

巻頭言

- 1 次世代の社会インフラ構築に向けて
柵山正樹

時論

- 2 議論の深化が望まれるエネルギー政策
縮原発に向かうことは不可避だとしても、一定の割合で原発を維持すべきではなかろうか。
 柏木孝夫
- 4 政治に翻弄される浜岡原発、現地報告
浜岡原子力発電所は菅首相(当時)の要請を受けて稼働を停止した。ここは今、大規模な補強工事を行っている。
 石井孝明

解説

- 27 原子力安全論理の再構築とレジリエンスベースの安全学
今後の安全論理においては、「変化」への対処が重要である。これを具体化する指針の一つが、レジリエンスエンジニアリングだ。
 北村正晴

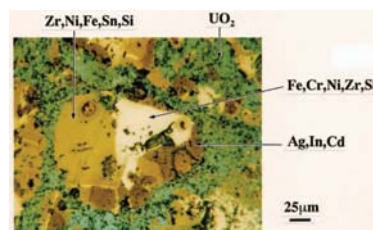
特集 原子力人材育成の現状と課題 1

- 13 大学における原子力教育の現状
福島原子力発電所事故後、電気事業者やメーカー、研究機関では原子力関係の新規採用者数が減少し、技術継承への懸念が大きくなっている。この分野に専門の人材を供給してきた大学への学生の入学・就職状況にも深刻な影響が出ている。
 工藤和彦
- 21 原子力人材育成環境の現状と文部科学省の取組み
福島原発事故が起こった今、どうしたら学生が夢を持って原子力を志望できるような環境を作ることができるだろうか。
 正岡秀章

解説

- 33 シビアアクシデント時に溶融した燃料の形態と特性—TMI-2炉心から採取したデブリに対する試験の結果から

福島原発事故の進展の解析や溶融燃料(デブリ)の取出しを検討するためには、デブリの特性に関する知見が必要である。
 永瀬文久



TMI-2炉心から採取したデブリの断面マイクロ組織

報告

- 49 環境影響、線量評価及び放射能計測の現状と見通し—初期活動状況の総括

福島原発事故により環境中に放出された放射性物質による汚染状況のモニタリングと個人被ばく線量評価、一般市民による環境中の放射線測定に関する初期の活動状況で見出された課題と今後の見通しについて概説する。

中村尚司, 百瀬琢磨, 井口哲夫



- 17 原子力産業界における人材育成の課題—福島第一原子力発電所事故を教訓として

福島原子力発電所事故に伴う学生の原子力離れが懸念される中で、原子力産業界では新たな政策の方向性を踏まえた人材の確保・育成を進めていく必要が生じている。
 徳田 充

表紙の絵(日本画) 「山葡萄」 製作者 岸野圭作

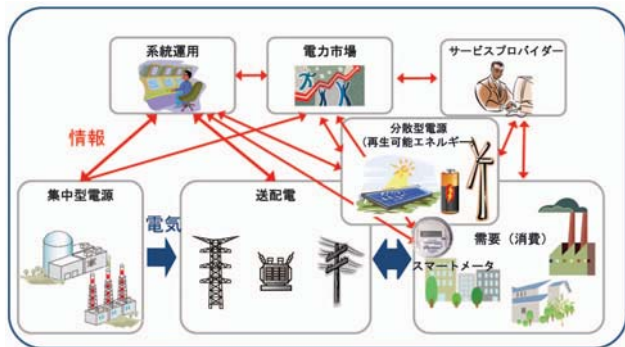
【製作者より】 過ぎ行く日々は早く、目の前を移ろいゆく季節の中で、秋の日、艶めかしく一瞬の輝きを見せ、冬へと急ぐ姿に、ある寂しさを感じました。

第43回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

解説

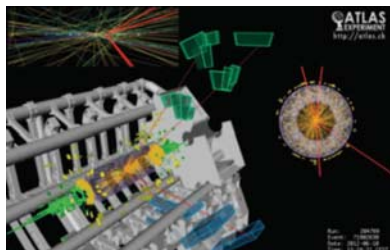
38 スマートグリッドの現状と今後の展望

現世界中で急速に関心が高まっているスマートグリッド。それはどのようなものか。なぜ台頭してきたのか。実現に向けた取り組みはどうか。進んでいるのか。 栗原郁夫



44 ヒッグス粒子、未知への探求へ 第一歩—LHC実験の最新成果について

高エネルギー素粒子物理分野が長年追求めてきたヒッグス粒子らしき新粒子の存在が明らかとなった。ヒッグス粒子をめぐるこれまでの動向と、最新の結果を紹介する。 陣内 修



ヒッグス粒子→ZZ*→4つのミュオン粒子の事象候補

From Abroad

53 The 3rd International Conference on Nuclear Power Plant Management

IAEA は今年5月に米国で、原子力発電所のライフサイクル管理(PLIM)をテーマとした国際会議を開いた。

Ki Sig Kang, Frank Nuzzo

26 From Editors

64 会告 「平成25・26年度代議員候補者推薦のお願い」

65 会報 原子力関係会議案内、奨学金寄付者一覧、新入会一覧、英文論文誌(Vol.49, No. 11)目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

6 NEWS

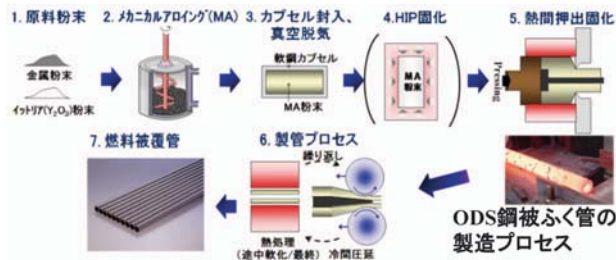
- 政府がエネルギー政策を閣議決定
- 原子力規制委員会が発足
- 学会事故調、報告書の構成などを議論
- 大飯3, 4号機が運転を再開
- IAEA, 「女川原発の構造物は健全」
- 中間貯蔵施設、政府が12候補を提示
- 保安院, SA 対策を規制委へ引継ぎ
- 文科省概算要求, 安全対策などに重点
- 原子力委, 事故調報告受け決意と反省
- 3 事故調委員長が学術会議シンポで報告
- 海外ニュース

連載講座 これからの原子力システムを担う新原子力材料(第3回)

56 酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼

高温強度と耐照射性に優れる ODS フェライト鋼を Na 冷却高速増殖炉の燃料被ふく管に適用する実用化技術や、強い耐食性をもつ Al 添加高 CrODS 鋼の開発が進められている。

鵜飼重治, 大塚智史, 皆藤成二



私の主張

61 事故時の原子炉主任技術者の在り方の再検討 木村逸郎

会議報告

62 原子力プラントの安全確保に関する国際動向 倉本孝弘

ジャーナリストの視点

63 原発事故1年半、改革は進んだのか 服部 尚

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

次世代の社会インフラ構築に向けて



電気学会 会長

柵山 正樹 (さくやま・まさき)

東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。
三菱電機(株)電力・産業システム事業本部長などを経て2012年から執行役副社長(半導体・デバイス事業本部長)。

私は1977年に入社し、火力・原子力発電用の大型発電機の開発と設計を行う職場に配属された。以来、社内で他部門へ異動するまで30年以上にわたって大型発電機の設計と製造に携わった。私が入社する前の1960年頃から70年代にかけて、我が国の発電設備の単機容量は、我が国経済の高度成長を支えるために急激に増大した。しかし、この単機容量の増大は、残念ながら我が国の自主技術ではなく、米国メーカーとの技術提携によって供与された技術がベースになっていた。私が入社した時期は単機容量の増大が一段落し、社内の経営課題は大容量化から技術的独立に移っていた。自前の技術開発に取り組んだ結果、80年代の末になって、ようやく技術提携契約を解消することができた。その後も、種々の技術課題に直面したがそれらを解決し、さらにグローバル競争の中で勝ち抜くための性能改善や合理化の努力を続けるなかで、真の技術的独立を果たしていったように思う。ここまでは、私の個人的な経験に基づいて発電機の技術に関して述べてきたが、その他の大型技術についても、時期的な差異はあるにしろ、同様な経緯をたどってきたものと考えている。

しかし、昨年の大震災で、成熟していると考えられていたシステムが国民の目前で崩壊し、多数の方が被災されると同時に技術に対する社会の信頼を損ねる事態となった。技術者として技術の向上に取り組んできたつもりであっただけに、今回の事態を大変残念に思うと共に、今後の社会インフラの構築に向けて重い責任を感じている。以下に次世代の社会インフラ構築に当たって重要と考えるポイントを3点述べる。

1点目は、既存技術の再検証と改良である。技術に対する社会の信頼を回復し、さらに安全で安心な社会インフラの構築に貢献するために、まず既存技術について、想定している環境条件、使用方法、そしてシビアアクシデントマネジメントの観点から再検証する必要がある。電気技術者としては、電源の信頼性を検証するために、システム構成図上だけでなく機器配置も含めた総合的な検証の必要性を痛感した。検証に続いて、新しい技術を取り込みながら、継続的に既存技術の改良に取り組んでいく必要がある。

2点目は、「安全」と「安心」をベースに、持続可能性と生活快適性を両立するエネルギーインフラの構築である。震災前は、持続可能な社会を実現するために、原子力発電に期待するところ大であったが、震災に伴う原子力発電所事故を受けて、2030年を目途とした我が国のエネルギー政策が議論されている。議論に際しては、感情に流されることなく、物理的および政治的な安全性、持続可能性、経済性も含めた生活快適性などの観点から、今後の改善目標と工程も含めて十分に議論する必要がある。また、発電側だけでなく、送配電から需要家も含めてのエネルギーのサプライチェーン全体の効率改善について、目標を設定し実現に向けて取り組む必要がある。

3点目は、後継人材の育成である。昨今、学生の理工系離れが指摘されるなかで、技術の魅力をアピールすると共に、技術者が大切にされる風土を作る必要がある。そのためには、技術者が成果をあげ、あげた成果を社会に発信することが重要である。さらに、今後グローバル化がますます加速すると予想される中で、国際的視野を持った人材を育成するために、国際交流の機会を創出していく必要がある。

震災の復興に向けての取組が進んでいるが、復興工事は元に戻すのではなく、同時に次世代の社会インフラを実現させていくべきであり、時間的には待った無しの状況である。私も、微力ながら技術者として、よりよい未来の実現に向けて電気学会のメンバーと共に取り組んでいく決意である。

(2012年8月29日 記)



議論の深化が望まれるエネルギー政策



柏木 孝夫(かしわぎ・たかお)

東京工業大学 特命教授
東京工業大学大学院理工学研究科修士課程
修了, 工学博士。東京農工大学教授, 東京工
業大学教授, 東京工業大学先進エネルギー
国際研究センター長などを経て2012年4月
より現職。専門分野はエネルギー・環境シ
ステム, エネルギーシステム解析など。

■はじめに

縮原発に向かうことは不可避だとしても, 1次エネルギーの選択肢を減らさず安定供給を維持するために, 一定の割合で原発を維持すべきというのが, 専門家としてのわたしの意見である。安全はもちろん大事だが, 同様に安定供給も極めて重要であるということ認識しなくてはならない。安定供給とは, 必要な時に必要な量を適切な価格で供給することである。生活や産業に不可欠なエネルギーを安定供給できなくなれば, 産業は勿論のこと日本国憲法第25条で保証されている生存権が脅かされることにもなる。

一方において, 米国を中心に巻き起こっている「シェールガス革命」の影響もあり, 世界的に天然ガスシフトが急激に進んでいることは, 周知のとおりである。天然ガスの価格は急落し, その需要が増大するのとは対照的に, 石油が供給過多になり, こちらも価格が急落している。供給調整等によりいずれ, 天然ガスの価格は上がり, 需要も抑えられるだろう。こうした価格変動は, これからも続き, やむことがない。資源を持たない我が国は, 電源や1次エネルギーを自由に選べるような状況にはない。だからこそ, 安定供給のためには1次エネルギーの選択肢を減らすべきではないと, わたしは主張し続けている。

我が国は, 東日本大震災に伴う東京電力福島第一原発の事故という大きな危機に直面した。被災した方々をはじめ多くの方が, もう二度と原発は持つべきでないと思うのも, 心情論的にはよく理解できる。しかし, だからこそ日本は, この原発事故を乗り越えるための技術開発を進め, その上でじっくり方向性を見定めるべきではないだろうか。危機を表す英語「crisis」は「分岐点」という意味も持つ。このまま何もせずに原発から撤退するか, 事故を乗り越える技術開発によって世界に貢献するか, その分岐点に立たされているのである。安定供給の面からも, 世界への貢献という面からも, やはり一定の割合で原発を維持すべきと考える。

原発比率がどう決まるにせよ変わらない方針もある。

それは, 電源構成におけるコージェネレーション(熱電併給)システムの比率15%という目標である。発電能力にすると2,500~3,000万キロワットに達することになる。3シナリオの原案を議論した経済産業省の総合資源エネルギー調査会の基本問題委員会でも, 原発比率に関しては議論が紛糾したのとは対照的に, このコージェネの比率に関しては全くと言っていいほど異論が出なかった。原発だけでなく, 発電効率の悪い老朽火力発電所の代替としても期待でき, 熱需要も含めた総合エネルギー効率に優れ, 需要地に設置するので上位系の電力システムへの負荷が小さくて済むといったメリットを, 各委員が高く評価した。

■資源エネルギー庁に「コージェネ推進室」

このコージェネシステムの導入促進のための体制強化として, 新たに8月1日付で資源エネルギー庁, 電力・ガス事業部政策課に「熱電併給推進室(通称:コージェネ推進室)」が設置された。

コージェネ導入促進の具体策は, 大きく分けて4つ。

(1)サポート体制の強化, (2)市場創成, (3)設備の導入支援, (4)燃料価格の低減——である。これら4つの大きな柱を促進策として具体的に打ち出せたことは, 極めて大きな意義があると考えられる。

(1)のサポート体制の強化は, 8月1日付のコージェネ推進室の設置などによる。このコージェネ推進室は, 具体的な施策を企画・立案するとともに, コージェネ導入に関する総合的な相談窓口として, 各地域の経済産業局や関係部局, 他省庁, 電力会社, ガス会社などと連携し, ワンストップサービスを提供する。各経済産業局にも担当窓口を設置し, 地方における案件なども発掘していく。

(2)では, ネガワット取引や, 余剰電力の売電などの市場創成に取り組む。ネガワット取引は, 需要家による節電量を供給量として見立てた「ネガワット」を取引するものである。需給逼迫が想定される場合に, 需要側の負荷抑制による節電分を入札などによって確保する。すでに, 関西電力などが自主的に開始している。大阪ガスと

新電力(PPS)のエネット(東京・港)による取り組みでは、コージェネシステムを対象とするネガワット取引が試行されている。

余剰電力の売電に関しては、経産省のアクションは早かった。電力システム改革の方向性が明確になると卸電力取引所に「分散型・グリーン売電市場」を創設し、コージェネや太陽光発電などの分散型電源を対象に、1,000キロワット未満の小口の余剰電力などを取引できるようにした。さらに、電力システム改革が進めば、個々のコージェネの発電電力を束ねて商品価値を高めるアグリゲーションビジネスも可能になるだろう。

最新のコージェネ機器は発電効率が高まり、使用できる電力と熱の比率は、ほぼ1対1にまでなっている。旧型の機器では、その比率は1対2と、電力が小さかった。発電効率の向上により、熱需要がそれほど多くない小規模の施設などでもコージェネで十分に電力を賄え、少ないながらも余剰電力が得られる。これを束ねて売電できれば、エネルギーを余すことなく使い尽くせるようになる。

(3)の設備の導入支援は、補助金やグリーン投資減税などが主な施策となる。補助金の適用に関しては否定的な意見もあったが、基本的に“地産地消”で、上位系の電力システムへの負荷を低減でき、新たな送配電網の整備コストを抑えられるというメリットを評価し、拡充される方向にある。

(4)の燃料価格の低減に関しては、一企業、一業界にとどまることなく、共同購入など広くエネルギー業界が協力して取り組む必要がある。さらには、外交として、政府レベルでの交渉も重要になってくる。例えば、米国とFTA(自由貿易協定)を結んでいない我が国は、安価なシェールガスを米国から輸入したくても、オバマ大統領の承認なしには実現しない。首相や経産相をはじめ、政府の働きかけが極めて重要になってくる。

■再エネ導入に不可欠なコージェネ

原発代替として期待の大きい再生可能エネルギーに関しては、その最大の導入促進策である「再生可能エネルギーの全量固定価格買取制度」、いわゆるFIT(フィード・イン・タリフ)が7月1日に始まった。これに前後して、これまで発電事業にかかわっていなかった企業までもが続々と再エネ発電事業への参入を表明した。特に多いのが、最も手っ取り早いと考えられているメガソーラー(大規模太陽光発電所)への新規参入である。

このメガソーラーの大量導入においても、実は同じ分散型電源であるコージェネが重要な役割を担うことになる。太陽光発電は天候に大きく左右される。日照の度合いによって発電量が変動してしまう。その変動を補い、発電量を安定させるためには、蓄電池など他の手段も考えられるが、現状で最も経済性に優れた現実的で有効な手段は、コージェネと組み合わせることであろう。

例えば、定格出力1万キロワットのメガソーラーであれば、単体では出力の変動が1万キロワットある。ただし、ある程度の数量のメガソーラーが広く点存して普及し、各地に分散して設置されていれば、均し効果により平均して5,000キロワットの変動を補完できれば、電力システム全体への影響を抑えることができる。

この5,000キロワットの変動を、コージェネで補完するとしたら、出力1万キロワットの機器が必要になる。なぜなら、停止状態から最大出力まで一気に立ち上げることは現実的には不可能で、エネルギー効率も極端に低くなってしまう。そのため、常に5割程度の出力で稼働させておく必要があり、5,000キロワットの変動には、1万キロワットのコージェネでなくては対応できないのである。

■メガソーラーを狙う外資の思惑とは

これはあくまでも、ある程度の数量のメガソーラーが各地に分散して設置されている場合である。そうでなければ、1万キロワットの変動に対応するために、2万キロワットのコージェネが必要になってしまう。同様の問題は、数十万キロワット規模の大型メガソーラーの場合にも生じてしまう。導入量の増加と共に出力の変動を補完する手立てを実施していないと、上位系の電力システムに大きな負荷を与えてしまうことになる。

ところが、日本のFITと再エネ事業に関心を寄せる外資系の金融機関やファンドなどは、この数十万キロワット規模の大型メガソーラーのみにターゲットを絞り、すでに具体的な案件に乗り出してきているようである。彼らは、最低でも年間100億円のキャッシュフローを確保したいと考えている。例えば、25万キロワットのメガソーラーであれば、年間稼働時間が1,000時間として、買い取り単価が1キロワット時当たり42円なので、キャッシュフローは年間105億円になる。

さらに彼らは、このようなことを考えている。運用資金に社債などで集めた1,000億円を初期投資し、消費税を抜くと年間100億円のキャッシュフローを得る。FITの期間は20年なので、その間に単純計算すると2,000億円の収入が見込める。しかし3年後には、例えば1,300億円で売り抜けてしまう。あるいは、上場して持株を売却することも可能である。買った側は、設備と残りの期間のキャッシュフローを手にするようになるが、発電量が落ちればキャッシュフローが目減りしてしまうリスクも伴う。設備のメンテナンスの手間やコストも、年数がたてばたつほど膨らんでくる。

こうしたビジネスモデルによって、日本国民の富が、海外へと流出してしまう危険性は大きい。国力の増大をもたらす我が国独自の運用ルール設計に期待したい。

(2012年8月27日 記)



政治に翻弄される浜岡原発，現地報告



石井 孝明(いしい・たかあき)

経済・環境ジャーナリスト
慶応大学経済学部卒業，時事通信社記者，
経済誌副編集長を経て，フリーランスの記
者。現在はシンクタンクのアゴラ研究所の
フェロー，エネルギー情報専門ウェブサイ
ト GEPR の運営も行う。(http://www.
gepr.org/ja/)



中部電力浜岡原発の全景

中部電力の浜岡原子力発電所(静岡県御前崎市)は，昨年5月に菅直人首相(当時)の要請を受けて稼働を停止した。ここは今，約1,400億円の費用をかけた津波対策などの大規模な補強工事を行っている。ここを8月初頭に取材した。

12メートルの高さの防波壁など工事は圧倒される規模だ。「心と力をひとつに」を合い言葉に，約4,000人の人々が働き，原発の安全性を高める努力を重ねている。

しかし政府からの再稼働の確約はない。現状を放置してよいのだろうか。浜岡原発の現状を紹介しながら，エネルギーの未来を考える。

1. 「目指せ世界一」安全性を高める現場の努力

「私たちは安全と地元との共存共栄のために努力を積み重ねてまいりました。昨年の停止要請は，それが突然全否定を受けたように思い，大変な衝撃で無念でした」。中部電力の水谷良亮取締役専務執行役員は語った。水谷氏は浜岡原子力総合事務所長も務める運営の責任者だ。

昨年5月6日に菅直人首相は，突如開いた記者会見で，東海地震の危険を理由に，浜岡原発の停止を中部電力に求めた。首相が原発を止める法的権限はなく，菅氏は「要請」という言葉を使った。しかし，それに一企業が逆らうことはできないだろう。中部電力は受け入れた。

しかし水谷氏も同社の社員らも，ショックの後で次の考えに達したという。「これを機会に自分たちの安全を見直して，世界一の安全性を目指そう。そして社会や周辺住民の皆さんに，少しでも安心をいただけるように頑張ろうではないかと，考え直したわけです」。

中部電力の幹部から社員まで，横暴とも言える政治家の動きを批判せず，自らを変えるきっかけにした。そして同社は浜岡原発の安全性を高める大工事に着手した。

「心と力をひとつに」。現場を行き来する作業員のヘルメットには，このステッカーが張られている。「負けてたまるか，目指せ世界一」。事務所の会議室には水野明久中電社長の色紙が置かれている。社員の士気は高く，中部電力の意地と決意がうかがえる。現場のこの心意気に，筆者は感銘を受けた。

2. 徹底した津波対策—圧倒される巨大防波壁

中部電力は1,400億円の工事費をかけ，津波対策，耐震対策などの安全強化策を行った。13年12月までに完了する予定だ。その規模には圧倒される。

浜岡原発は太平洋の遠州灘に面している。自然の地形を活かした砂丘の堤防がある。ここは幅60～80メートル，高さは海拔10～15メートルある。今回の工事ではそれに加えた安全対策を行った。

追加の津波対策は3段階にわたる。まず敷地への浸水防止だ。浜岡原発では砂丘堤防の後ろに地上高10～12メートル，厚さ約2メートルの巨大な防波壁を，総延長1.6キロにわたって建設している。中国の「万里の長城」を連想させる。壁は地下約15～40メートルまでの基礎部分に支えられ，想定される津波の力にも耐えられる見込みだ。海拔は壁の上部までで約18メートルになる。

それだけではない。建屋内への浸水防止を行っている。主要な出入口の扉を二重の防水扉にした。「重要区画は潜水艦のように密閉できます」(中部電力担当者)。

さらに原子炉の冷却をどんな場合でも維持できるように工夫を重ねた。災害用の電源となる発電機を建屋の中段に置き，また海拔40メートルの高台にガスタービン発

電機，緊急時の資材や機材を備えた倉庫などを建設中だ。さらに災害時の電源喪失に備えるために可搬式動力ポンプを常備して，これも高台に置いた。

さらに浜岡原発は海から海水を採取して冷却に使っている。屋外の海水取水ポンプが浸水した場合に備えて，同様の機能を持つポンプを，地下水槽を持つ防水構造の建屋の中に設置する。以前からあった近くの川からの緊急時の取水設備も拡充する予定だ。

内閣府中央防災会議は今年8月29日に「南海トラフの巨大地震モデル検討会」を開き，推計結果の取りまとめ（第二次報告）を公表した。この場合に御前崎市で震度7，その沿岸部の最大津波高が19メートルになる可能性を予想した。

中部電力の担当者は20メートル級の津波が来ても，砂丘堤防を含めて4段階の防御を乗り越えて，原子炉が破壊されたり，冷却できないほど施設が壊れたりする可能性はないと見ている。さらに仮に福島原発事故のように全電源喪失という事態になっても，1週間は自家発電で原子炉を冷却できる見通しだ。

3. 電力会社の努力と負担を直視した原発の議論を

中部電力は浜岡原発で，地震への取り組みも行ってきた。福島第1原発では約670ガル（ガル：地震の揺れの強さ）の振動に見舞われた。国は800ガルの揺れを想定して安全基準を浜岡原発に求めたが，同社は上乗せで1,000ガルの耐震目標を掲げて2008年に工事を完了させた。

中部電力は今後も福島事故，中央防災会議など，国の地震研究の検討を進め，対策を講じて行く予定という。「ハードの整備と同時にとっさの事態に備える十分な訓練などソフト面の対策も重ねます。対策に盲点があるか，確認を続けます」と担当者は語った。

浜岡原発は，静岡県の中東部に位置する。日本の原発は立地場所と，利用する都市が離れている例が多いが，浜岡原発で発電された電気は主に静岡県内で使う。同原発の運営では電気の「地産地消」を強調し，「共存共栄」を訴えてきた。しかし福島原発事故を受けて，地元からは

一部で不安が出ているという。

「地元の皆さまには現状を丁寧に説明していきます。『工事が終わればすぐ再稼働』と考えているわけではなく，あらゆる関係者の方の理解を得ようと努力を重ねます。安全を高め，それを皆さまの安心につなげたいと考えています」と，中部電力の水谷専務は語った。

浜岡原発の再稼働は，中部電力にとって経営に直結する。同社の2011年度決算では連結で10年に経常損益は1,482億円の黒字だったのに678億円の赤字に転落。純損益も921億円になった。浜岡原発の停止で火力発電の増加に伴って燃料費が3,711億円増加した。経営努力でそれを補ったが黒字確保はできなかった。

しかし中部電力の一連の安全性を高める努力が報われるかどうか，現時点では不透明だ。新規の安全対策は自主的なものにすぎず，再稼働を認可する国が決めたものではない。

浜岡原発は政治に翻弄されている。昨年の停止要請によって，「時の総理大臣が危険と言った原発」として，シンボリックな意味を持ってしまった。菅前首相は政権運営を批判されて昨年9月に退陣した。その後には彼は反原発運動にのめり込んでいるが，浜岡停止について反省はなく「正しい判断」と事あるごとに繰り返す。

政治家からは選挙対策と思える「原発ゼロ」を述べるパフォーマンスが目立つ。政治の迷走を受けて，行政機関の動きは鈍い。再稼働の基準が示されていない。

大事故を起こさずに原発を運営してきた中部電力が，これほどの負担を受けるのは不当である。そして大きな視点で見れば，問題は中部一社にとどまらない。これは国による企業の財産権の侵害であり，法の支配という国家運営原則の放棄である。

全国の電力会社の原発の再稼働が遅れている。経産省資料によれば，2011年度は各地の原発の停止が続いたため，燃料の代替によって全電力会社で10年度に比べて2兆3,000億円の燃料費が増加した。

12年度の子予想では，原発がすべて止まり続けた場合に，3兆1,000億円から3兆8,000億円へと燃料費の増加分は増える見込みだ。負担は，電力料金の上昇，経済への悪影響の形で，いずれ日本国民にのしかかる。

原発をめぐるさまざまな意見がある。しかし，どの立場の人も電力の安定供給を支える人々，また原子力の安全のために働く人々の努力を直視し，認めるべきところは評価してほしいと願う。そして電力会社と私たちに加わる負担を直視した上で，再稼働や，さらには原発の未来の議論を行うべきではないだろうか。

浜岡原発の巨大工事は，原子力をめぐる政治の誤り，そして情勢の混迷を示す象徴に，筆者には思える。

（2012年9月12日 記）



浜岡原発の防波壁



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。

政府がエネルギー政策を閣議決定

日本の将来のエネルギー政策の方向性を検討していた政府のエネルギー・環境会議は9月14日、2030年代において原発稼働ゼロを可能とするよう、あらゆる政策資源を投入すると明記した「革新的エネルギー・環境戦略」を決めた。新しい戦略では、安全性が確認された原発は重要電源として活用するとして、再稼働を認めている。またグリーンエネルギーの成長とエネルギーの安定供給を実現するために、電力システムの改革に着手。市場競争を促すことや発送電分離による分散ネットワークの確立と、省エネルギーの拡大を強力に推進するとした。

エネ環が決定した戦略ではまず、原発に依存しない社会の実現のために、3つの原則を提示。①40年運転制限の厳格な適用、②原子力規制委員会の安全確認を得たもののみ、再稼働を認める、③原発の新設・増設は行わないとしている。

これらを実現していくために核燃料サイクル政策につ

いては当面、①直接処分の研究に着手、②「もんじゅ」については国際的な協力の下で高速増殖炉開発の成果を取りまとめ、廃棄物の減容及び有害度の低減等を目指した研究を、年限を区切った計画の下で実行し、成果を確認後に終了、③廃棄物の減容及び有害度の低減を目的とした使用済核燃料の処理技術、専焼炉の研究開発の推進、④バックエンド事業は国も責任を持つ、⑤国が関連自治体や電力消費地域と協議する場を設置し、核燃料サイクルに関する検討作業を行う方針だ。

なおこれらの政策については、今後の情勢の変化に柔軟に対応しながら、ふだんに見直していくとしている。

一方、政府は9月19日、エネルギー戦略については「柔軟性をもって不断の検証と見直しを行いながら遂行する」との方針を決め、エネ環がまとめた2030年代において原発稼働ゼロを可能とすることをめざした目標を閣議決定に盛り込むことを見送った。

原子力規制委員会が発足

政府は9月19日に、原子力規制委員会委員長に田中俊一氏、4人の委員に更田豊志氏らを当てる人事を、特別措置として首相自らの権限で任命した。規制委設置法の付則には、同意が得られないまま国会が開じた場合は首相が委員長らを任命できると定められているものを適用

したものの。

また原子力規制委員会は同日、第1回会合を開き、透明性の高い意志決定プロセスの実現によって、原子力規制に対する国民の信頼回復を図っていくとするメッセージをまとめた。

学会事故調、報告書の構成などを議論

原子力学会の福島第一原子力発電所事故に関する事故調査委員会は9月4日に都内で第2回会合を開き、政府事故調の事務局長を務めた小川新二氏が事故の進展状況を中心に政府事故調の調査・検証結果を説明した。会合で同氏は、この事故がどのようなものだったかという事実とその後の経過、あるいは事故原因について、まだ十分に解明されていない部分が残っていると指摘。学会事故調に対してそれらの解明への期待を述べるとともに、いくつかの事故調で食い違っている点についての分析、政府事故調などでは言及されていない具体的な安全対策

の改善策についても学会の報告に盛り込まれることを要望した。

また学会事故調は9月20日に広島大学で第3回会合を開き、学会の原子力安全部会がこれまで行ってきた検討結果の内容の紹介や、来年末までに取りまとめる報告書の構成についての議論を行った。

(詳細は、<http://www.aesj.or.jp/jikocho/index.html>に掲載)

(以上は原子力学会誌編集委員会)

大飯3,4号機が運転を再開

関西電力の大飯発電所3号機(PWR, 118万kW)が8

月3日、国の最終検査を終了し本格運転を再開した。ま

た8月16日には同4号機(PWR, 118万kW)が8月16日、国の最終検査を終了し、本格運転を再開した。福島原子力事故後、定期検査中のプラントが本格稼働するの

は3号機が初めてで、4号機が2基目となる。
(日本原子力産業協会提供、以下の資料も同じ)

IAEA 調査団、「女川原発の構造物や機器類は健全」

国際原子力機関(IAEA)の耐震安全に関する専門家ミッションがこのほど、東日本大震災による東北電力女川原子力発電所への影響に関する2週間の調査日程を終え、「地震動の大きさ、地震の持続時間や規模からみても、原子力発電所の構成要素は目立った損傷を受けなかった」などとする調査報告をまとめ、8月10日、原子力安全・保安院に提出した。

東北地方太平洋沖地震は、国内で発生した最大規模の

大地震で、女川発電所1～3号機の原子炉建屋の各階では、基準地震動Ssに対する最大応答加速度を一部上回る揺れを記録したが、各号機とも自動停止後、冷温停止状態で安定が図られている。今回のIAEA調査団は7月29日～8月11日に来日し、大きな地震力にもかかわらず、被害の少なかった同所における地震等の影響に関するデータを収集して、加盟各国と共有することにより、国際的な原子力安全対策への活用に資するのが目的だった。

中間貯蔵施設、政府が12候補地点提示

双葉地方及び福島県と国との協議会が8月19日に福島市で行われ、細野原事故担当相は中間貯蔵施設の調査地候補として、双葉町2か所、大熊町9か所、楢葉町1か所の計12か所を示し、現地調査の実施を求めた。

選定にあたっては、(1)除染に伴う土壌や廃棄物の搬入、分別、減容化、貯蔵等に必要な敷地面積を確保する、(2)各地から除染土壌や指定廃棄物等を効率的に搬入する

ため、これらが大量に発生する地域になるべく近い、(3)主要幹線道路(国道6号線、常磐道)へのアクセスが容易である、(4)地震や津波、地滑りなどの自然災害に備えるため、断層や浸水域、地滑り地、軟弱地盤を避ける、(5)河川の流れの変更等を最小限とする——ことのほか、設置自治体の負担を軽減することや搬入車両による交通渋滞を防止すること——などを条件とした。

保安院、SA対策をまとめ規制委へ引継ぎ

原子力安全・保安院は8月27日、原子力安全委員会に福島事故を受けてのシビアアクシデント対策の基本的考え方について、現状の検討状況を取りまとめて報告した。今後の検討は新たにできる原子力規制委員会に引継がれる。

「発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策規制の基本的考え方について(現時点での検討状

況)」と題する報告書では、シビアアクシデント対策を含めた深層防護の考え方、考慮する自然災害や航空機衝突などの外的事象と外的事象への対策の考え方、総合的なリスク評価と継続的改善などがまとめられている。

今後も検討すべき事項としては①自主的取組みの規制上の取扱い、②複数基立地の取扱い、③安全目標および性能目標事故調見直し——などを挙げている。

文科省概算要求、廃棄物・安全対策などに重点

文部科学省は8月28日の原子力委員会で、2013年度予算の概算要求構想を発表し、①福島対応、②放射性廃棄物対策、③原子力安全確保に係わる基礎基盤研究・人材育成——を重点的に措置するとした。

このうち放射性廃棄物対策については、使用済み燃料の直接処分に関する研究開発についても、経済産業省と連携しながら検討するとした。「もんじゅ」等の高速増殖炉サイクル技術開発については、エネルギー・原子力政

策見直しの状況を踏まえた予算を要求した。ITER等の核融合研究開発やJ-PARC等の量子ビーム関連研究開発については引き続き着実に実施するとし、これらの取組みは「幅広い科学技術への展開をめざす研究開発」として、エネルギー政策見直しの中の原子力中核部分とは異なる位置付けとして扱ってほしいと原子力委員会に要請した。

原子力委、事故調報告受け決意と反省表明

原子力委員会は8月30日、東京電力・福島原子力発電所事故の国会および政府の事故調査・検証委員会による最終報告書が出されたことを受けて、同委員会としての決意や反省を盛り込んだ文書を委員会決定した。

同文書では、これまで原子力委は原子力大綱をはじめ、さまざまな提言や意見を表明してきたが、「最も反省すべき」点として、「専門家や国民の意見を広く聴いた上でこうした提言を行ったにも関わらず、関係者に対して提言を尊重しての取組みを行うよう強く求めるイニシ

アティブをとれなかった」とした上で、「法律に認められている原子力利用に関する重要事項に関する勧告権を行使することもなく、しつこさを欠いた」と反省している。

その原因として、「原子力安全委員会の存在に配慮するなど、原子力利用に係る推進行政と安全規制行政の分離の原則やその制度的枠組みに過度に意識が捕らわれてしまったため」と自己批判している。

今後は、「国民の声に注意深く耳を傾け、それを踏まえた提言や意見の表明を行っていく」としている。

3 事故調委員長が学術会議シンポで報告

日本学術会議は8月31日、福島原子力発電所事故に関する政府、国会、民間の各調査委員会の委員長らを招き、調査結果について説明を受けるとともに、事故を通じて明らかになった学術としての課題を洗い出し、今後の科学者コミュニティのあり方を考察するシンポジウムを開催した。7月末の政府の事故調査・検証委員会による最終報告公表を受け、各事故調の報告書が出そろったところ。

政府事故調の畑村洋太郎委員長は「100年後の評価にも耐える」ことを目標に、「何が起きたのか」ではなく、「何を学ぶのか」という視点で調査・検証に当たってきたとした説明。その上で原子力発電所の設計に際して、地震への相当な対策と比べ、津波への想定・備えが不十分だったことを指摘し、「違う向きからも考える」必要を強調した。

民間事故調の北澤宏一委員長は事故の遠因として、「原子力ムラ」のなれ合い的な体質を批判し、安全規制に携わる側も推進側と同等の力量が持てるよう、教育の重要

性にも言及した。

国会事故調の黒川清委員長は報告書に掲げた提言事項の実現に関し、「立法府のガバナンスが効いていなかった」などと、これまでの国策の進め方を振り返った上で、国会議員らが調査結果を読んで民意に訴えかけることを期待した。

3つの事故調報告を受けた総括討論では冒頭、元学術会議会長の吉川弘之氏が登壇、プレゼンを行い科学者・専門家の社会的役割の重要性を呼びかけた。また、発災後、放射性物質の及ぼす健康影響評価などで活動してきた柴田徳思氏(千代田テクノル研究主幹)は、高レベル放射性廃棄物処分問題にも言及し、学術の役割として、まず「信頼される科学者集団」であることを強調した。会場参加者からは原子力事故に関し、海外の科学アカデミーとも対等にやり取りのできる特別委員会を早急に立ち上げるべきなどと、学術会議に対し苛立ちを含んで要望する声もあった。

海外情報

(情報提供：日本原子力産業協会)

[米国]

アーミテージ報告、日本の原子力国際展開に期待

米国の戦略国際問題研究所(CSIS)は8月15日、R・アーミテージ元国務副長官とジョセフ・ナイ・ハーバード大学教授による日本委員会報告書「日米同盟——アジアにおける安定」を発表した。同報告書は「エネルギー安全保障」の章の中で、「原子力エネルギー」についても論じ、日本の包括的な安全保障を考える上で、「原子力研究開発における日米協力は不可欠だ」と強調している。

報告書では日本の原子力発電について、「現在そして将来もCO₂排出のない唯一の重要なベースロード電源で

あり続けるであろう」との見通しを示し、「国家のエネルギー政策に関する決定の遅れは、重要なエネルギー依存型産業の日本からの撤退を促すおそれがあり、国家の生産性を脅かすかも知れない」と警告を発している。

また、発展途上国は、今後も原子炉建設を進めることから、「恒久的な運転停止は、責任ある国際的な原子力開発の妨げになりかねない」と危惧した上で、国際展開を進めるロシア、韓国、フランス、それに今後は中国も加わってくることから、「世界が効率的で、信頼でき、安全な原子炉および原子力サービスから今後も恩恵を受けようとするならば、日本が遅れをとっている余裕はない」として、日本の輸出推進政策を実行する背中を後押ししている。

その上で、「日本と米国は、安全で信頼できる民生用

原子力を国内外で促進する上で、政治的・商業的利益を共有している」とも指摘している。

このような観点から、日米両国政府は、「福島から幅広い教訓を学び取りながら、この分野での協力を活発化し、安全な原子炉設計と有効な規制の実施を世界規模で展開する上で再びリーダーシップを発揮しなければならない」と鼓舞し、「3月11日の悲劇を、経済的・環境的な一層の低迷の理由にすべきではない」と強調している。

ロムニー共和党候補、原子力への投資拡大表明

今年11月の米大統領選挙を控え、8月28日に正式に共和党候補者に指名されたM・ロムニー前マサチューセッツ州知事は8月23日に、10年以内に完全なエネルギー自給を目指すという多様性のある独自のエネルギー政策を公表した。オバマ現政権が再生可能エネルギーによる雇用促進に固執しているとして、その政策を批判する一方、自身は石油や天然ガス、および原子力の規制改革を推し進めることにより、国内の埋蔵資源開発を強化。原子力については2年以内に認可が発給されるよう原子力規制委員会(NRC)の手続きを簡素化するなど、さらなる投資を促していく考えを明らかにしている。

同候補によると、オバマ政権は石油や石炭に代わる再生可能エネルギーに数十億の予算をつぎ込むなど、いわゆる「グリーン雇用」の創出に強くこだわっているが、その代表格である風力も太陽光もいまだに市場競争力を得られないままだと指摘。あまつさえ、大きな資本を必要とするグリーン雇用の推進により既存の雇用が損なわれているのが実態だとし、具体例としてスペインと英国では風力産業などに対する1人分の補助金が高額なため、グリーン雇用に1人分創出する際、それ以外の雇用が2.2人分以上失われたとしている。

これに対してロムニー陣営では、「エネルギー部門は国全体の経済の蘇生を牽引できる」という信念のもと、石油や天然ガス、石炭、そして原子力で時機を逸せずエネルギーを生み出すため、政府は強力で確実かつ有効な規則を有するべきだと断言。代替エネルギーの基礎研究に予算を付ける一方、市場において競争力を持つまでに進展しないエネルギーへの助成は段階的に縮小していくべきだと強調した。

そのための第1段階としてロムニー氏は、石油と天然ガスの国内資源開発を促進するとともに、原子力への投資拡大を促す合理的で最新方式の規制を採用する考えを提示。固定の日程に合わせた優先的な手続きによって開発や探査の承認・許認可が発給されるよう統合し、規制手続きにおいてエネルギー企業を取り巻く不確実性の雲を取り払う考えだとしている。

また原子力規制に関しては特に一項を設け、「原子力産業の規制構造改革にはとりわけ注意を払うべきだ」と主張。現行の構造は異常に煩雑で範囲も限定的であるとし、一例としてNRCの体制ではたった1種類の原子炉設計しか審査できないと述べた。同氏によると、こうした制限が競争を阻害するとともに技術革新を抑制、価格も上昇する。一つの設計審査が延々と引き延ばされるせいで、現在NRCの手元では17件・26基分の審査が滞っていると指摘した。

このような背景から、同氏は大統領となった暁には、既存の原子力発電所サイトや隣接地区で承認された設計であれば、いかなる原子炉についても2年以内に認可が発給されるようNRCの手続きを効率化する方針だと明言した。

NRC、認可発給を一時停止

米原子力規制委員会(NRC)は8月7日、原子炉新設計画における建設・運転一括認可(COL)手続き、ならびに既存原子炉の運転認可更新手続きで最終的な認可の発給を一時的に停止する方針を明らかにした。

NRCが2010年に改定した廃棄物信頼性決議(WCD)等に対し、コロンビア特別区巡回控訴裁判所が6月に「現行法に違反する」と裁定したのを受け、この問題の解決まで新たな認可発給の凍結を決めたもの。これにより、EPC契約締結済みのレヴィ・カウンティ1,2号機建設計画のCOLを含め、現在進展中のCOL審査19件、認可更新審査12件、ワッツパー2号機の運転認可審査が影響を受けるが、一部の報道では、審査手続き自体は継続するようNRC委員がスタッフに命じたと伝えられている。

WCDはNRCがCOLおよび認可更新の申請に対して判断を下す際、根拠とするリスクや確証に関する規定で、①地層処分場の技術的適性、②処分場の運開予想時期、③地層処分に至るまでの使用済み燃料の安全管理、④安全な一時貯蔵期間、⑤安全な貯蔵施設の確保性——の5つの科学的な事実認定事項で構成される。

オリジナルのWCDが1984年に発効された後、廃棄物処分に関する新たな了解事項等を反映させるため、NRCは1990年にこれを改定。2010年の改定時には、②において「2007年から09年までの間」と明示されていた処分場の利用可能時期を「必要となる時期」に改定したほか、④で「発電所の運転認可満了後、少なくとも30年間は可能」としていたサイト内一時貯蔵の安全性保証期間を「少なくとも60年」に改定した。

このような結論に対して3つの環境保護団体は、「処分場の設置を阻む社会的、政治的な障害を十分考慮しておらず、必要な時期に処分場を利用できるという文言は

設置が間に合わなかった場合の影響に注意を向けていない」と提訴。裁判所も、この改訂、および付随する使用済み燃料の一時貯蔵規則の改定は国家環境政策法 (NEPA) に違反すると判断した。

また今年1月には、使用済み燃料と高レベル廃棄物の管理処分対策を審議していたオバマ政権の有識者によるブルーリボン委員会がユッカマウンテンに代わる処分場建設サイトを地元の同意に基づいて一から選定し直すよう勧告。こうしたことから、裁判所はNRCが廃棄物管理に伴う将来の危険性やそれに伴う影響を適切に調査していないと判断し、WCDで改定された②と④を無効とする裁定を下すに至った。

エクセロン社が新設計画断念

米テキサス州でピクトリア・カウンティ原子力発電所の建設構想を進めていたエクセロン社は8月28日、同構想で政府から承認を得るのは断念すると発表した。近年の天然ガス価格低下や市場状況などから、予測しうる将来に原子炉を新設することは経済的でないとの結論に達した。ピクトリア郡南東部のサイトについて申請してあった早期立地認可 (ESP) については、すでに米原子力規制委員会 (NRC) に取り下げを連絡済みだとしている。

エクセロン社は2008年、GE日立製ESBWR (高経済性・単純化沸騰水型炉) 2基の建設を想定した建設・運転一括認可 (COL) をNRCに申請したが、同設計が認証取得前であったため09年3月に採用設計をABWRに変更。同年7月にはCOLの申請を取り下げ、最終的な建設決定まで20年間有効なESPを先に取得する方針を明らかにしていた。また、昨年5月にコンステレーション社を合併吸収した後は、400万kW以上のガス火力および風力発電設備をテキサス州で操業している。

2007年以降、経済発展に伴う電力需要の拡大、原油や天然ガス価格の変動、温室効果ガスの排出抑制効果などを背景に原子力が世界的に再評価されようになり、米国でもこれまでに17件・26基分のCOLがNRCに申請された。このうち4件・8基分についてはすでにメーカーとのEPC契約が結ばれており、NRCは今年2月、34年ぶりとなる新たな建設認可をボーグル増設計画に発給している。

しかし、リーマン・ショックを引き金とする世界同時不況、近年の天然ガス価格の下落およびシェールガスの開発規模拡大などにより、世界のエネルギー事情は徐々に変化。GE社のJ・イメルト最高経営責任者は7月末、英フィナンシャル・タイムズ誌のインタビューの中で、「原子力はその他のエネルギーと比べてコストがかかりすぎ、経済的に正当化するのには非常に難しい状況だ」と断言。多くの国が安価な天然ガスと再生可能エネルギー

の組み合わせにシフトしていくとの考えを述べた。

[カナダ]

ダーリントン増設へ、四半世紀ぶりにサイト準備許可

カナダ原子力安全委員会 (CNSC) の共同審査小委員会 (JRP) は8月17日、オンタリオ・パワー・ジェネレーション (OPG) 社が申請していたダーリントン原子力発電所の増設計画に「サイトとプロジェクト概要の準備に関する許可 (SPL)」を発給する判断を下した。同国では2009年に3件の新設計画で申請が取り下げられるなどしており、建設許可と運転許可の前提となる許認可が与えられるのは四半世紀ぶり。SPLは2022年8月までの10年間有効であることから、OPGでは18年以降に2基・約200万kWを運開させるため、サイトでの準備活動や建設許可の申請に向けた作業を開始する。

OPG社がダーリントン・サイトで最大4基・480万kW分の原子力発電設備建設でCSNCにSPLを申請したのは2006年のこと。09年にCSNCと環境相が独立の立場の専門家3名を同計画に関するJRP委員として指名後、OPG社が作成した環境影響声明書とSPL申請書に関する審査や公聴会等が実施されていた。

JRP委員は昨年8月に増設計画がサイト近隣の環境に悪影響を及ぼすことはない結論付ける報告書を連邦政府に提出。この勧告を受けて、政府は今年5月に同計画を実行に移すことに同意した。SPLを基本とするカナダの新しい許認可システムでは、環境影響評価やSPL発給のほか、建設許可と運転許可の発給についても一般市民が意見表明する機会を設定。今回の判断についてJRPの委員長は、「数百人も一般市民との議論を通じ、彼らの意見を反映させるなど、透明性のある方法で最良の決断に到達できた」としている。

採用炉型については09年2月にOPG社が仏アレバ社、カナダ原子力公社 (AECL)、米ウェスチングハウス (WH) 社から提案書を受領。今年6月には、AECLの商業炉部門を買収したSNCラバリン社とWH社の2社がOPG社と結んだ合意に基づき、それぞれ改良型CANDU 6 (EC6) とAP1000を2基建設するための詳細な建設プランや日程、経費見積等を1年以内に準備することになった。オンタリオ州政府から選定された供給業者は、敷地の伐採や整地、掘削等を請け負う予定だ。

[英国]

ウィルファ1号機が2014年まで稼働へ

英国原子力規制局 (ONR) はこのほど、4月に営業運転を終了したウィルファ原子力発電所2号機

(GCR, 56.5万kW)の燃料を同型・同出力の1号機に転用することを許可した。これにより、1号機は運転認可の切れる2014年9月までの操業が可能になった。

ウィルファ原発の2基は世界の原子力発電開発の中でもパイオニア的存在であるコールダーホール発電所をベースとする旧型のガス冷却(マグノックス)炉。同国のオールドベリー原子力発電所1号機(23万kW)が今年2月に閉鎖された後は、世界で唯一の同型発電所となった。

ウィルファ発電所を操業するマグノックス社は今年4月25日、運開後41年が経過した2号機を停止し、再起動せぬまま閉鎖とした。その理由はマグノックス合金で被覆した燃料がすでに製造されておらず、限られた燃料ストックを同1号機に流用し、その運転認可期限一杯まで操業可能とするため。同発電所には昨年12月に最後の燃料が納入されていた。

ONRは今回、2号機で部分的に使用した燃料が1号機に転用可能となるよう同発電所の操業規則の一部修正を承認した。「原子炉間の照射化燃料交換(IRX)」と呼ばれるこの手続きはオールドベリー原発ですでに実績があるが、ウィルファ原発では初めて。マグノックス社は同プロセスが安全裏に行えることを保証するため、操業規則の複数の変更点を特定しており、ONRの専門家チームは同社がそれらを安全に実施可能であると認めたことになる。

[ベルギー]

ドール3号機の圧力容器に亀裂

ベルギー連邦原子力規制局(FANC)は8月16日、定期検査で圧力容器最底部に数多くの毛髪状亀裂の存在が検知されたドール原子力発電所3号機(PWR, 105.6万kW)について関係各国の専門家による技術会合をブリュッセルで開催した。10月の国際専門家会合までに実施される追加の検査結果に基づき、同炉の今後の処遇に関して完全に公平な立場から措置を取るとしたほか、同炉と同じく1970年代にオランダのRDM社が鍛造した圧力容器を有するチアンジュ2号機(PWR, 105.5万kW)についても同様の検査を行うとしている。

ベルギーで稼働する原子炉7基すべての運転を担当しているエレクトラベル社は、10年に1度義務付けられている大規模な点検のため6月2日にドール3号機を停止した。その際、同国で始めて採用した新しい超音波センサー検査で圧力容器に亀裂が入っていることを示す結果が出た。

事態を重く見たFANCは16日の技術会合に米国、フランス、英国、スイス、オランダ、ドイツ、スペイン、スウェーデンの専門家を召集。同炉の状態に関する情報や圧力容器の検査と健全性に関する専門的知見を共有し

た。エレクトラベル社は今後、同炉を停止状態にした上で9月末までに追加の調査を実施。FANCは10月の国際専門家会合、第2回目の技術会合等でその結果を分析し、同炉に対する最終決定を下す。

[UAE]

豪州から原発用ウラン輸入へ

アラブ首長国連邦(UAE)は8月1日、豪州と原子力平和利用協力協定に調印した。2017年以降、同連邦で初めて運開する商業炉4基用のウランを調達する枠組協定となるもので、豪州から核物質および原子力機器などが提供される条件として、核兵器や爆発物への転用を明確に禁止する条項を明記。同協定は今後、豪州の議会が審議することになっている。

同協定への調印は、アブダビ首長国を訪れていた豪州のB・カー外相とUAEのS・アブドラ外相が行った。世界のウラン資源の40%を保有する豪州は潜在的なウラン輸出を管理するため、すでに日本を含めた40か国・地域と22の保障措置協定を締結。UAEは同国がウラン輸出のための門戸を開いた最初の中東国家となった。

UAEはもともと、2008年に策定した原子力発電導入計画の中で領土内でのウラン濃縮と再処理実施を明確に否定。国際社会からの全面的な支援と信頼を得つつ原子力開発を進める新しい非核兵器国のモデルとして米国からも称賛されている。

今回、豪州と結んだ協定でもウランの悪用を確実に防ぐため、以下の条項が盛り込まれた。すなわち、「第6条＝協定下にある核物質と機器について適切な核物質防護措置が取られるようすべての必要な手段を講じることを両国に要求」、「第7条＝協定下にある核物質をUAEが豪州政府の文書による事前合意なしに第三国に移転することを明確に禁止する」、「第8条＝協定下にある核物質がUAE領土内で濃縮、再処理されないことを規定する」、「第9条＝協定下にある如何なる物質も明確に平和利用目的に限定するほか、核兵器およびその他の核爆発物への製造に使用することを明確に禁止する」。

ウランの価格と取引量については今後の交渉次第だとしている。

原子力人材育成の 現状と課題

福島原発事故が起こり、人材問題が深刻さを増している。原子力をめざす学生が減り、産業界では原子力分野の人材採用を手控える動きが始まった。また、技術継承の最大の機会である原子力発電所の新規着工の見通しが、全く不透明になった。

優秀な学生が原子力をめざし、産業界ではそれらの人材を積極的に受け入れ、彼らが原子力発電所の新規着工で技術を継承し、さらに技術を進化させていく—その正のスパイラルのすべてが、日本では崩れ落ちそうになっている。

この袋小路をどう打開するか。私たちは何をすればよいのか。

原子力学会誌では今号から数回にわたり、この人材問題について考えていく。

原子力人材育成の 現状と課題

大学における原子力教育の現状

九州大学 工藤 和彦

福島第一原子力発電所事故(平成23年(2011)3月11日,以下「1F事故」と略)が発生して約1年8カ月が過ぎた。原子力に関係する電気事業者やメーカーおよび研究機関等では,1F事故以後は原子力関係の新規採用者数が相当減少して,技術継承への懸念が大きくなっている。また,原子力工学に関する教育を行ってこの分野に専門の人材を供給してきた大学(大学院)への学生の入学・就職状況にも深刻な影響が出ていると聞く。本特集は,1F事故を背景にした原子力人材育成についていろいろな角度から解説することを企画したものであり,今回は大学,産業界,文科省(産・官・学)における原子力人材育成への取組と現状を紹介する。本稿では,主として大学の学部・大学院における原子力教育に関する状況と課題などを紹介する。

解説Ⅰ. 大学における原子力教育

1. 原子力関係の学科・専攻の変遷

昭和30年(1955年)12月に原子力基本法が制定されて,わが国の大学・大学院で原子力に関する研究・教育が行われるようになって60年近くになる。原子力に関わる学部学科・大学院専攻(以下「学科」,「専攻」と略)の設置状況およびこれらの修了者数の推移から,この約60年を以下の4期に分けることができる。

- (1) 昭和30年代から昭和47年(1972)頃まで原子力関係の学科・専攻の設置が続き,学部卒業生数は増え続け,それ以後平成4年(1992)頃まで,学部卒業生数はほぼ一定となっていた。
- (2) 平成5年(1993)から平成19年(2007)にかけて原子力関係の学科・専攻の改組・名称変更が始まり,原子力(原子核)等の名称が外されるとともに,カリキュラム内容も大きく変わったところが出てきた。
- (3) 平成17年(2005)あたりから世界の原子力発電の建設,建設計画が増加し,この状況を踏まえて原子力を専門とする人材育成の重要性が再認識され,原子力の名称を持つ専攻がいくつか新設された。平成24年現在,18の大学の学部・大学院で原子力のカリキュラムが実施されている。
- (4) しかし,1F事故の発生によって,原子力利用に関する認識が一変した市民,若者たちが出てきた。

2. 原子力関係の学科・専攻の新設と卒業生の増加(昭和30年代～昭和47年)

この期間に13の大学(北大,東北大,筑波大,東大,東京商船大,武蔵工大,東海大,名大,京大,阪大,近畿大,神戸商船大,九大)の学科・専攻のほか,東工大および立教大に原子力研究所が新設された。13大学の学科・専攻名のほとんどに原子力,原子核または原子炉が入れられ,講義のために原子力に関する教科書の執筆,専門分野の名著の翻訳などが活発に行われた。

第1図に原子力に関わる学部・大学院の卒業生・修了者数の推移を示す。昭和47年頃の学部卒業生は年間約500人に増加し,それ以降はほぼ一定となっている。一方,修士課程(博士前期課程)修了生は昭和47年頃までに年間約180名弱になり,その後も平成12年(2000)頃まで増加が続き年間約300名になっている。博士課程(博士後期課程)の修了生は平成12年頃までほぼ単調に増加して,年間約50名になっている。

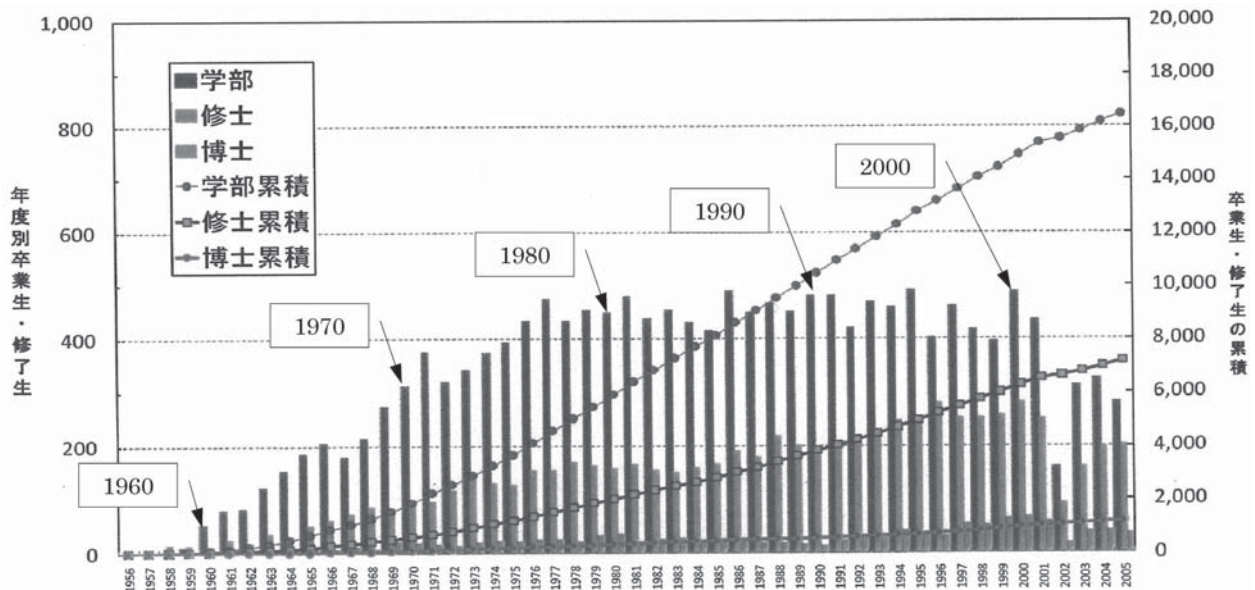
3. 原子力関係の学科・専攻の名称変更 (平成5年～平成19年)

平成3年(1991)6月に大学設置基準が改訂され,いわゆる大綱化が行われた。これにより大学の一般教育と専門教育の区分がなくなり,学部教育に大きい変化が生まれた。すなわち,学部における細分化された専門分野の教育が,工学基礎教育が重視されたカリキュラムに変わり,これに伴って多くの学科が大学科にくくり直された。大綱化に伴って,航空,造船,精密機械といった特定の専門分野,産業に密接に関係した学科が大学科に改組,統合されたところも多く,この時期の名称変更は原子力関係に限られてはいない。

一方,大学院では研究中心から講義が重視される時間

Present Status of Japanese Nuclear Human Resource Development and Nuclear Engineer Education in Universities and Industries; Present Status of Nuclear Engineer Education in Universities: Kazuhiko KUDO.

(2012年9月3日 受理)



第1図 原子力に関わる学部・大学院の卒業生・修了者数の推移¹⁾(財)全日本地域研究交流協会, 平成19年2月)

配分になり、学部で行われていた原子力の専門的な科目の一部は大学院で講義されることになった。このことは、第1図でも明らかなように大学院、特に修士課程への進学者割合が平成12年には国立大で約80%、私立大で約10~20%と、学部卒業生の半数以上を越えていることとも関係している。

名称変更の結果、平成16年(2004)には原子力を名乗る学科は1大学(北大)、大学院は4専攻(東工大、名大、京大、阪大)のみになってしまった。

第1図は平成17年までの統計であるが、それまでに学部卒業生は累計約16,000人を超え、また、修士課程修了者数は約7,000人に及び、博士課程修了者も1,000人強となっている。これらの卒業生・修了生の多くが原子力産業・研究開発機関等で活躍していることは、本特集の徳田氏(四国電力)の稿に述べられている。

4. 原子力関係の専攻の名称復活 (平成17年~平成22年)

平成17年前後から24年にかけて、世界の原子力発電所の建設中が36基→75基に、建設計画が39基→94基に急激に増加してきた。これらのうち、建設中の50基、建設計画中の49基が中国をはじめ韓国、インド、ベトナム、インドネシアなどアジアの諸国で建設・計画されている²⁾。この状況を踏まえて、平成16年頃まで減少傾向が続いた原子力がついた学科・専攻名を復活させる大学と、学科・専攻を新たに設置する大学が現れた。前者は東京都市大学(旧武蔵工業大学)の「原子力安全工学科」および東海大学の「原子力工学科」であり、新設したのは福井工業大学の「原子力技術応用工学科」である。現在のところ、学科名に原子力があるのはこの3学科にとどまっているが、14の大学に原子力教育を行っている学科があり、その定員の合計は1学年あたり約850名になっている。

現在19の大学が大学院で何らかの形で原子力教育を

行っている。これらの大学は「原子力教員協議会」という任意団体を作って、原子力学会が開催される春、秋の大会時に原子力教育に関する連絡・協議を行っている。第1表に同協議会から提供された現在の各メンバー校についての資料を示す。原子力(核)の専攻名称を持つのは7大学8専攻である。八戸工大、茨城大、長岡技科大、福井大、福井工大は原子力発電所の立地県で、新たに専攻を設けたものであり、修了生の原子力界への送り込みに積極的な意欲を示したものである。博士前期課程(修士課程)の合計定員は1学年約800名弱、博士後期課程は同約250名である。

東京都市大学と早稲田大学は「共同原子力専攻」を設置した。これは両大学の教員が共同の教育カリキュラムを担当し幅広い原子力教育を行って、それぞれの専攻で修了生を出すという運営であり、教員の補充が十分に行えない大学にとって連携の一形態を示す方式として注目される。

II. 原子力人材育成関係者協議会の活動³⁾(平成19年度~平成21年度)

前節で述べたように、アジア諸国等での原子力利用計画の進捗や放射線利用の拡大に伴い、技術者、研究者に関する人材需要が拡大することが予想された。また、国際機関や海外での原子力発電所建設に際して、原子力先進国として国際的に活躍できるわが国の人材育成が急務であることが認識され、平成19年度から21年度にかけて「原子力人材育成関係者協議会」(委員数32名:大学等6名、電気事業者3名、原子力関連メーカー5名、文科省・経産省・内閣府14名、研究機関その他4名)が設けられた。

この中で原子力分野の人材育成の取組方針が、①社会的基盤、②初等中等教育、③高等教育、④実務の段階、⑤国際人材育成に分けて検討された。

第1表 原子力関係学部学科，大学院専攻の状況(原子力教員協議会メンバー校)

大学	学部 学科名	定員	大学院 専攻名	博士前期	博士後期
北海道大学	機械知能工学科	120	量子理工学専攻	21	6
			エネルギー環境システム工学専攻	23	8
八戸工業大学	原子力工学コース	約45	原子力工学専修コース(専攻横断型履修)	約12	—
東北大学	機械知能・航空工学科量子サイエンスコース	35	量子エネルギー工学専攻	38	11
筑波大学	エネルギー工学主専攻	約35	構造エネルギー工学専攻	68	16
茨城大学	—	—	応用粒子線科学専攻	25	9
			原子力工学教育プログラム	—	—
東京大学	システム創成学科環境・エネルギーシステムコース	43	原子力国際専攻	22	11
			原子力専攻(専門職大学院)	15	—
東京工業大学	—	—	原子核工学専攻	30	9
東京都市大学	原子力安全工学科	15	共同原子力専攻	15	4
早稲田大学	—	15	共同原子力専攻	15	4
東海大学	原子力工学科	40	応用理学専攻	20	—
			総合理工学専攻	—	35
			マテリアル理工学専攻・量子エネルギー工学分野	24	7
名古屋大学	物理工学科・量子エネルギー工学コース	43	エネルギー理工学専攻	36	9
			量子工学専攻	35	7
長岡技術科学大学	—	—	原子力システム安全工学専攻	20	—
福井大学	—	—	原子力・エネルギー安全工学専攻	27	12
			機械工学専攻(原子力工学を含む)	5	—
福井工業大学	原子力技術応用工学科	20	電気工学専攻(原子力発電工学を含む)	5	3
			応用理化学専攻(放射線応用工学を含む)	5	3
京都大学	物理工学科	20	原子核工学専攻	23	9
			エネルギー社会・環境科学専攻，エネルギー基礎科学専攻，エネルギー変換科学専攻，エネルギー応用科学専攻	130	35
大阪大学	環境・エネルギー工学科	75	環境・エネルギー工学専攻	76	15
近畿大学	電気電子工学科	180	エレクトロニクス系工学専攻(原子エネルギー分野)	50	6
神戸大学	マリンエンジニアリング学科	60	海事科学専攻	20	11
九州大学	エネルギー科学科	100	エネルギー量子工学専攻	25	12
			先端エネルギー理工学専攻	34	12
定員合計		846		787	254

10回の全体会のほか多くの作業部会，調査では産官学の委員が協力してわが国の原子力人材育成のビジョンやロードマップが検討され，第2表に示す人材育成基盤の確保のための10項目の提言が平成22年4月に公表された。

このうち，第4項目の「原子力専門教育の体系再構築と充実強化」は大学等における原子力教育を解析し，課題をまとめた提言である。この提言には更に具体的な指摘がなされている。その一部を次に示す。

- ・原子力教授人材の確保，育成，人材のネットワーク化
- ・産業界から共同研究，講師派遣，施設見学会開催等の教育支援の強化，充実
- ・教育・研究用原子力施設の共同利用による実験内容の充実とネットワーク化

・教科書，教授人材，教育研究用施設等教育資源の国際連携

- ・特色ある大学の教育取組に対する支援(選択と集中)
- ・原子力施設が立地する地域の大学，研究施設，産業の連携を生かした教育

本提言は1F事故の約1年前にまとめられたものであるが，事故後の現在であっても変わらずに取り組むべき重要なポイントが指摘されている。

提言8を踏まえて，平成22年(2011)11月に「原子力人材育成ネットワーク」が発足した。その詳細は，本特集の正岡氏(文部科学省)の論文に示されている。

第2表 原子力分野の技術者、研究者の育成、人材基盤の確保のための提言(平成22年4月)

1	理系、特に工学系への進学者を増やすための初等中等教育への取組の強化
2	原子力の必要性、安全性等の正確な知識の教育、伝達
3	原子力の技術、研究、産業等の魅力、将来性を社会、特に若い世代に伝達し、学生の進路選択に際し、原子力への志向性を向上
4	原子力専門教育の体系再構築と充実強化
5	国際人材の養成
6	原子力新規導入国への国際展開に対応する人材育成体制の整備
7	原子力分野の技術継承の仕組みの確立
8	人材育成活動の機能に応じたネットワーク化やその中心となってコーディネート、コントロールするハブ設立の推進
9	わが国原子力人材育成の体系化と可視化
10	原子力人材育成を戦略的に進めるための中核的恒常機関(原子力人材育成全体のハブ)の設立

Ⅲ. 1F事故後の大学における原子力教育

東日本大震災による1F事故発生の前、世界の原子力ルネッサンスの潮流の影響を受け、大学および高専の原子力教育は拡大・充実し、就職に関しても学生の関心は高まる傾向にあった⁴⁾。

しかし、1F事故の発生により、「原子力」教育を明示した学科・専攻への平成24年度の進学希望者の減少、合格後の辞退者の増加は顕著であったと聞いている。また、平成24年度の就職に向けた新卒者の原子力産業への反応は、極めて厳しいものであったと大学および企業の関係者が述べている。

1F事故の発生を踏まえて、わが国のエネルギー政策、原子力利用に関する方針が再検討されており、現時点(平成24年9月上旬)においてもまだ確定していない。この方針決定は今後の原子力教育に関係するところが大きく、速やかな決定、公表を望むものである。

政府、国会、民間の1F事故調査委員会から報告書が公表され、事故の経過、発生原因、今後の対応などについてそれぞれの立場から多くの有益な指摘、提言がなされている。

いずれの報告書でも、事故に関係したファクタとして人的要因を挙げている。今回の事故の対応に直接かわった者は政府、規制機関、原子炉メーカー、電気事業者などであるが、大学・大学院で原子力を専門的に学んだ学生はそのいずれでも働いていたし、今後も卒業後の職場としてそれらを考えている学生も多いだろう。

事故調査報告書で取り上げられている人的要因の問題には、原子炉設計や製造、建設、運転、保守のように、就職後に職場でOJTとして教育されるべき事項が多い。例えば電気事業者においては、運用手順書の整備や事故

模擬とその対応、日常の訓練の問題などが指摘されている。

このことに関し、大学で原子力教育を担当している教員は、事故調査報告書などから大学における教育で今後考慮すべき課題を読み取る必要がある。

筆者は下記のような課題を考えている。

(1) 工学基礎教育の徹底

機械、電気、化学、材料などの基礎とともに、軽水炉を念頭に置いた水に関する知識を充実させる。

(2) 原子力関連専門科目の充実

原子炉物理学(臨界の概念、熱の発生)、使用済み燃料、放射性廃棄物の処理・処分、除染

(3) 安全工学の内容の見直し

多段階防護の見直し、過酷事故の概要と対策、ヒューマンエラー、確率論的安全評価・決定論的安全評価と両者の問題点

(4) 原子力関連実験の取組

全員に原子炉または臨界実験装置を使う臨界を経験させる。その他の施設の見学などにより、情報機器のみでは得られないモノ、機械の働きを実感させる。

(5) 放射能、放射線、放射線被ばくに関する教育

全員が十分に学習して、周囲の市民などからの質問にも説明できるレベルとなる。学生といえどもコミュニケーションとしての能力、意欲は非常に重要である。

(6) エンジニアリング問題(解答が一つでない問題)への取組

複数の解答を考えさせ、それらを多角的な評価基準で選択でき、説明、議論できる能力の養成

(7) 工学倫理の思考・考察訓練

1F事故時には現場の関係者は命がけで対応したことが理解されているが、国、電気事業者などでの事故に至る前の段階における問題が多く指摘されている。将来にこれらをケーススタディできるように教材の整備が望まれる。

—参考資料—

- 1) 原子力関連講座を有する国内大学の教育カリキュラム及び教育実習に係る調査報告書、(平成19年2月、(財)全日本地域交流協会)。
- 2) 世界の原子力発電開発の動向 2012年版(平成24年5月、日本原子力産業協会)。
- 3) 原子力人材育成関係者協議会報告書—ネットワーク化、ハブ化、国際化—、(平成22年4月、日本原子力産業協会ホームページ)。
- 4) 原子力産業セミナー2013(原子力産業協会主催)。

著者紹介



工藤和彦(くどう・かずひこ)
九州大学 東アジア環境研究機構
(専門分野/関心分野)原子炉工学、初等・中等教育における原子力・放射線教育

原子力人材育成の
現状と課題原子力産業界における人材育成の課題
福島第一原子力発電所事故を教訓として

四国電力(株) 徳田 充

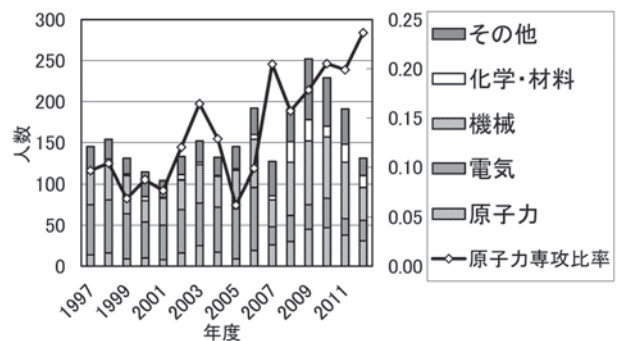
2011年3月11日に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故(以下「1F事故」という)を踏まえ、現在、国のエネルギー・環境会議等において今後の原子力政策等が検討されている。原子力産業界(電気事業者、プラントメーカー)としては、これまで各社が自前の研修プログラムで必要な技術や知識を習得させる人材育成を行ってきたが、1F事故に伴う学生の原子力離れが懸念されるなど、新たな政策の方向性を踏まえた人材の確保・育成を進めていく必要が生じている。このため、原子力産業界が自ら考えてこれまで行ってきた人材育成に関する取組みと課題について、1F事故前後で整理し紹介する。

I. はじめに

2012年度の原子力産業界の原子力関係新規採用者数は、東京電力が採用を見送ったこともあり、全体として前年度から3割程度減少した(第1, 2図)。また、一般社団法人日本原子力産業協会が主催する原子力産業説明会への参加者も大幅に減少しており、1F事故の影響で原子力を志向する学生が減少していることは否定できない。

さらに、原子力関係新規採用者のうち、原子力専攻以外の学生が減少しており、原子力発電の将来に対する不安から「電力会社は希望するが、原子力部門は希望しない」学生が増えているものと考えられる。

これまで原子力発電はクリーンエネルギー源の大部分を占めるものとして定着し、世界で多くの建設が計画されるなど「原子カルネッサンス」の流れにあったが、1F



調査対象：IHI、東芝、日立GEニュークリア・エナジー、富士電機、三菱重工業、三菱電機の6社

(注) 2012年度は、4月時点の原子力部門配属数/配属予定数をカウントした。(日本原子力産業協会調べ)

第2図 プラントメーカーの原子力部門採用状況

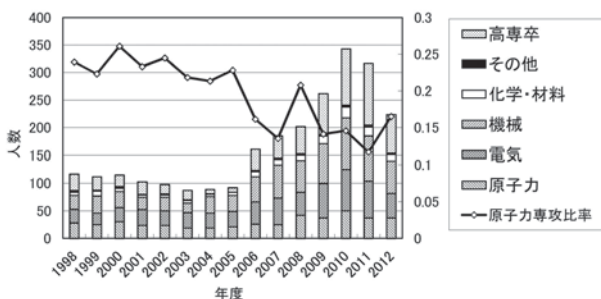
事故を契機に流れは一変した。

本稿では、スリーマイル島事故(以下「TMI事故」という)を経験した米国の最近の動向を踏まえ、1F事故前後の原子力産業界の人材育成への取組みと課題を紹介する。

II. 1F事故前の取組みと課題

原子力関連施設の建設/運転・保守には、原子力工学のみならず、機械・電気・材料・化学等の幅広い分野の人材が不可欠であることから、電気事業者の原子力関係社員のうち原子力工学出身者は5~10%程度で、原子力専攻以外の出身者が圧倒的に多い。このため、新入社員に対し原子力に関する一般知識等に関する研修を行い、その後、各部門における現場作業を中心としたOJT(オン・ザ・ジョブ・トレーニング)により原子力の専門知識を養成する仕組みとしている。

以下に、1F事故前の原子力産業界の取組みと課題について述べる。



調査対象：北海道電力、東北電力、東京電力、中部電力、北陸電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力、日本原子力発電、電源開発の11社
(注) 2012年度は、4月時点の原子力部門配属数/配属予定数をカウントした。(日本原子力産業協会調べ)

第1図 電気事業者の原子力部門採用状況

Present Status of Japanese Nuclear Human Resource Development and Nuclear Engineer in Universities and Industries; Learning from the Fukushima Nuclear Accident: Mitsuru TOKUDA.
(2012年6月19日受理)

1. 現場力の低下

電気事業者は、各社の教育訓練センターにおいて運転訓練シミュレーターによる運転操作訓練ならびに実際に機器の分解点検等を行う保修訓練を計画的に実施している。また、運転操作や保修作業に関する社内技能認定制度や作業責任者クラスを対象とした日本原子力技術協会が認定する全国標準の保全技量認定制度を取り入れている。これらのほかにも、

- ・若手を指導する資格に関する社内高度技術者認定制度
- ・OJTをより充実させるためのOJT支援者専任制度
- ・過去に経験したトラブル事例や失敗経験等から得られた教訓やノウハウからなる技術継承データベースの構築

などの対応を行っている電気事業者もある。

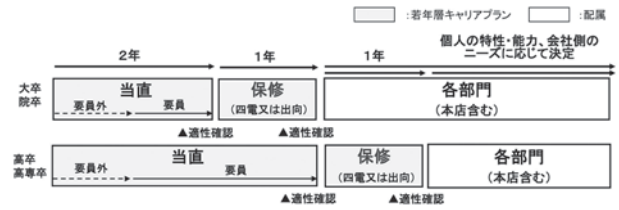
以上のとおり、現場作業でのOJTを中心に人材育成を行っているが、現在運用している品質マネジメントシステムが品質文書への過度なチェック傾向があることから、必要とされる書類が増大し書類作成に多くの時間をとられていること、また現場から離れた管理的な仕事が増えたことなどから、所員が現場に出て設備等に習熟する時間が以前に比べて明らかに減少しており、「現場力」の低下が懸念される。

2. 必要とする人材の明確化

運転操作の研修を当直体制に入っていく運転当直研修を電気事業者各社は実施しており、本稿では四国電力のケースを紹介する。

四国電力は、入社間もない時期に、まずは現場に即した知識や経験を早い段階で幅広く身につけさせ(ジェネラリストの育成)、その後、各々の専門知識を活かし、原子力発電等における個別の課題解決に対応できる能力や多面的に物事を判断できる能力を育成(スペシャリストの育成)することとしている。

このため、四国電力は、新入社員の教育プログラムとして、2004年から学歴や専攻分野にかかわらず、全員に運転当直を2～3年間経験させ、その後、全員を関係会社等に2～3年間出向させて保修業務を経験させる「若年層キャリアプラン」を実施している(第3図)。「当直研修2～3年間は長過ぎる。早く専門分野に配属させるべき」との意見もあったが、入社してからの数年間、原子力発電所の主要業務である運転当直、保修業務を経験させることは、現場に即した知識や技能を幅広くじっくり習得でき、研修ではなく業務を遂行しながら技術力を磨くというプロ意識の醸成にも効果的と考えている。昨年、本キャリアプラン経験者およびその上長にその効果についてアンケート調査を行った結果、「プラント全体について知識が深まって、その後の業務に大いに役立っている」との意見が大半を占めた。



第3図 四国電力の新入社員キャリアプラン

一方、課題としてあげられるのは、原子力産業界が必要とする人材を大学等の高等教育機関に明確に提示していないことから、育成する人材に相互でミスマッチが生じてしまっていることである。このため、我が国における原子力の人材育成を産官学連携のもと、より効果的かつ効率的に遂行することを目的に2010年に設立された「人材育成ネットワーク」の実務段階人材育成分科会は、2012年4月、高等教育分科会に対し原子力産業界が必要とする人材(能力)に関する要望として次のとおり取りまとめた。

(1)基礎学力：機械工学分野を例にとれば、材料・水・熱・機械の4力学の知識、(2)専攻分野の基礎知識：原子力発電に関する一般的な物理現象(臨界、熱交換等)を理解できる知識、(3)システム思考力：専攻分野にとどまらず、設備全体を系統的に理解する能力、(4)現場力：三現主義(現場、現物、現実)を基本に、設備を見て、触れて、感じることを大切にする能力、(5)コミュニケーション力：課題を解決するために意思疎通が図れ、社会に説明できる能力、(6)語学力：グローバル化が着実に進んでおり、自らの考えを主張し議論できる能力

3. ノウハウの技術継承(形式知化)

プラントメーカーは、ベテランの技術・技能を継承していくため、以前から大型機器取替工事やプラントの海外輸出等の機会を最大限に活用し、OJTを中心とした技術力の維持・継承に取り組んでいる。また、設計根拠、トラブル経験等の技術資料の文書化やIT化等による形式知化に取り組むとともに、マニュアルに書かれていない知識、つまり頭の中にあるカンや経験などの暗黙知(ノウハウまたは職人芸)のデータベース化(文書化、映像化)を進めている。

しかしながら、これまでは継続的な原子力発電所の国内建設の受注があったため、各建設工程における専門業務が継続的に発生し若い世代への技術継承がなされてきたが、1990年代以降の国内建設の停滞により建設経験を有する人材が減少したこと、および1960年代から原子力発電所の建設に携わり優れた技術や技能を有した団塊世代が大量に退職していることなどから、若手の確保と技術継承が急務となっている。

このことは、本年6月に東京で開催された日本原子力学会原子力青年ネットワーク(YGN)主催の若手討論会

でも、「聞きたいことを教えてくれる中間層は少なく、技術力があるベテランは退職間際で技術継承が難しい」ことが直面している課題の一つとして提起され議論されている。

一方、米国でも高齢化が大きな問題となっており、EPRI(米国電力中央研究所)は、ベテラン社員が有する貴重なノウハウを特定、抽出、保存する手法のガイドラインを2002年発行した。現在、米国の多くの電力会社で使用されており、我が国のノウハウの技術継承への適用性を検討する必要がある。

また、原子力産業の国際展開にあたって、海外プロジェクトで活躍できる人材育成が必要であり、コミュニケーション力も要求される。さらに、原子力発電所の受注にあたっては、人材育成等の基盤整備との組合せで行われる場合があることから、プラントメーカーとして「ものづくり」を継続していくためには技術基盤の維持が今後とも必要である。

Ⅲ. 米国の TMI 事故後の人材育成

世界最大の原子力発電設備をもつ米国は、1979年のTMI事故以降、新增設が停滞したことにより多くの企業は原子力事業からの撤退、他企業との合併などの合理化を実施した。一方、日本は原子力政策を堅持し、その結果、現在の国際競争力を持つこととなった。

その後の1990年代には新規建設がなく原子力教育インフラが大幅に減少したが、米国は廃炉や廃棄物管理事業への移行により一定規模の人材を確保し続けたことから、2007年頃からの原子力カルネッサンスの動きやエネルギー需要の増加等により原子力を学ぶ学生数は増加傾向に転じている。

最近の動向としては、数十年ぶりとなる新設計画が進められており、オバマ大統領は1F事故後も「原子力は重要なエネルギー源の一つ」と改めて確認している。このように、大きな事故を経験した米国が原子力の技術基盤の重要性を認識し、一定規模の人材を確保し維持してきたことは、我が国の将来の舵取りに大いに参考となる。

なお、1F事故の後においても、ドイツ、イタリア、スイス、ベルギーなど一部の国を除き、世界の多くの国はエネルギーの安定供給、地球温暖化対策および化石燃料価格の高騰等に対応するため、安全性を確認したうえで、引き続き原子力の開発を継続していく方針を表明している。

Ⅳ. 1F 事故後の取組みと課題

1F事故以降、原子力に対する社会の眼は一段と厳しくなっており、原子力産業に従事する者にとって社会への貢献を感じにくく、魅力のない職場となりつつあるのではないか。また、全基停止状態が長期間続いている電

気事業者では、2011年度以降に入社した者は運転プラントの経験がほとんどないため、運転訓練シミュレーターによる運転操作訓練の頻度を増やしたり、火力発電所で運転プラントの体験をさせるなど、いろいろな工夫を行い技術力の維持に努めている。

米国のこれまでの動向からもわかるように、今後、原子力発電所の停止が続いたとしても、原子力産業界にとって世界最高水準の安全確保に向けた人材育成は引き続き最重要課題である。1F事故を教訓とする原子力産業界の取組みと課題について以下に述べる。

1. シビアアクシデントに備えた要員

本年7月23日に公表された政府事故調の最終報告では人材育成について以下のような指摘がなされている。

- ・自ら考えて事態に臨むという姿勢が十分でなく、危機対処に必要な柔軟かつ積極的な思考力が欠如していた。
- ・事故対処に強く求められる資質や能力の向上を目指した実践的で、シビアアクシデントを想定した教育・訓練が実施されていなかった。

これらの指摘に対応するため、電気事業者は、「原子力安全」、「防災」、「危機管理」に軸足を置いた人材育成に移行してきており、

- ・緊急時対応要員に対して、想定を超える不測の事態(シビアアクシデント)に備えた対応能力(プラントの設計思想や事故時の炉心状態などに関する知識)の養成
- ・緊急安全対策が確実に実行できるよう、従来の防災教育、訓練に加え、シビアアクシデント事象を取り入れた実践的な訓練の実施

などの対応を行っている。

2. 放射線教育の拡大

原子力専攻以外の学生にとって、放射線について体系的な学習を行う機会はほとんどなく、理工系の学生ですら放射線についてよく理解しておらず、人体が環境からの放射線にさらされていることを知らない者が多い。また、1F事故を実際に経験した人たちの体験談を垣間見るに、通常のレベルを超えた放射線被ばくの影響について、放射線従事者といえども少なからず不安を感じている人が多い印象をもった。これらのことから、放射線の人体への影響リスクの概念を正確に理解できる取組みが重要である。

しかしながら、これまでの高等学校のカリキュラムでは原子核物理は選択科目で、多くの大学が入試範囲から外していることもあり、大多数の高校生はこの部分について学習していないのが現実である。さらに、大学でも学習を行う機会がないことから、放射線についての科学的な知識がないまま大学を卒業し社会に巣立っていく。

現在、電気事業者は、原子力安全や放射線工学に関する特別講義等を大学や高等専門学校などで行っているが、文系学生も含めた社会全般への放射線や原子力に関する国レベルの科学的な教育プログラムが必要である。

なお、義務教育の中学校では、2012年度から新学習指導要領に基づくカリキュラムが実施されており、「理科(エネルギー資源)」では放射線の性質と利用に触れることとしている。また、2013年度入学生から新学習指導要領が実施される高等学校(数学、理科は2012年度入学生から実施)では、「物理基礎」および「物理」で放射線および原子力の利用とその安全性の問題や核反応等について学習することとなっており、今後の成果に期待したい。

3. 国際貢献への責務

中国、インド、ベトナムなど国際的に原子力発電が拡大している中で、高い水準の人材や技術基盤を有する日本に対する支援の期待は大きい。安全確保、核セキュリティ、核不拡散の観点から、1F事故により得られた経験や教訓を共有し、国際的な原子力安全確保、向上に貢献することが我が国の責務である。

そのためには人材の絶え間ない確保が必要であるが、プラント建設を受注するプラントメーカーは、国内建設が難しい現在、一定量の仕事を継続的に確保するため、1F事故の緊急工事(電源復旧、原子炉等の冷却、滞留水の処置)や安全対策工事などの実務を通じての育成や海外へのプラント輸出で対応せざるをえない状況であるが、受注契約の成立までには時間を要し、各分野の継続的な仕事を確保することが難しいのが現状である。

V. おわりに

「論争を避けることにより安心感を醸成する」との偏った風潮により、放射線被ばくリスクへの理解活動や新知見への積極的な取り組みが不十分となり、自らが何もしなくても「日本では原子力災害は起こらない」との油断と過信があったのではないかと。全ての関係者は真摯に反省すべきである。

エネルギーの安定供給(必要なエネルギーを、安い価格で、長期的かつ安定的に確保する)、環境性(地球温暖化対策)、経済性(発電コスト)の観点から、原子力は重要な電源であり、現在検討されているエネルギー選択シ

ナリオのうち「2030年に原子力ゼロ」の場合でもこれから約20年間は現在の軽水炉を安全に運転する必要がある。今後、我が国が最先端の技術開発を行い、安全技術の開発導入や新型安全炉とでも呼ぶべきものの開発など、核エネルギーの安全な利用拡大を世界の中心となって推進していく必要があるのではないかと。

また、放射性廃棄物の処理・処分、放射線の疫学的影響評価等の1F事故の処理や数十年間にわたる原子炉の廃止措置を実施するためにも一定の人材や技術基盤の維持が必要である。

将来性のない技術に対して、原子力安全を支える高い技術力を有した優秀な技術者は集まらない。1F事故により失った国内外の信頼を早急に取り戻し、信頼される原子力技術を確立し維持していくことこそ原子力産業に携わる者全ての責務である。

このため、原子力産業界は原子力安全に強い真剣さをもって取り組むとともに、その取組みの見える化等による情報公開をリスクを恐れず積極的に行い、国民の安心感を醸成する必要がある。当然のことながら、原子力産業界ばかりではなく規制側とのそれぞれの役割分担で安全性の向上を目指してこそ目標は達成できる。また、今後も、人材育成ネットワークを活用した産官学が一体となった人材育成等の取組みを地道に推進していくこともあわせて重要である。

— 参考資料 —

- 1) 世界の原子力発電開発の動向2012, 日本原子力産業協会.
- 2) 原子力政策大綱(平成17年10月11日), 原子力委員会.
- 3) 原子力政策大綱に示している人材の育成・確保に関する取組の基本的考え方の評価について(平成22年8月17日), 原子力委員会.
- 4) エネルギーレビュー2012-4, p.8.

著者紹介



徳田 充(とくだ・みつる)
四国電力(株) 原子力保安研修所
(専門分野/関心分野)原子力部門の人材育成

原子力人材育成の
現状と課題

原子力人材育成環境の現状と文部科学省の取組み

文部科学省 正岡 秀章

将来の原子力の基盤と安全を支える観点において、大学や高等専門学校(以下、「大学等」)における原子力の教育研究活動の役割は非常に大きく、これら活動は密接に原子力産業の発展・成長に関係してきた。本解説においては、東京電力(株)福島第一・第二原子力発電所の事故(以下、「福島原発事故」)による原子力人材育成環境の変化や現状、及び近年の文部科学省の原子力人材育成に係る取組みについて紹介する。

I. 原子力人材育成環境の今

大学等における原子力教育は、様々な大学・学科で実施されており、また、どこまでを「原子力教育」とするか等の定義も難しいが、原子力人材育成環境を定量的に評価するため、例えば、「原子」という単語を有する学科・専攻(以下、「原子力関係学科」)について集計すると、昭和59年度当時は旧帝大を中心に10学科・11専攻だったものが、平成16年度には1学科・4専攻になり、平成24年度は3学科・8専攻となっている(第1図)。

このような推移を見る限り、ここ近年は後述する「II. 原子力教育の歴史・変遷」のような流れもあり、徐々に原子力教育が復活しつつあった。

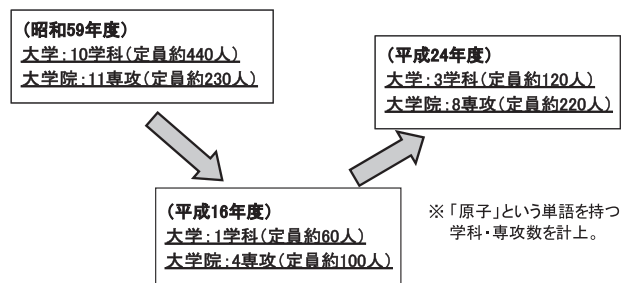
しかしながら、福島原発事故により状況は一変した。当然ながら、原子力・放射線に対する国民の不安は増加し、また事故発生後の政府の対応等に対する不満も生

じ、原子力そのものに対する抵抗感・不信感が増加した。政府も、原子力発電依存度を低減するという基本方針を打ち出し、原子力を含むエネルギー政策について国民的議論を進めているところである。このような社会・国民からの原子力に対する厳しい指摘や政府の方針は、学生の進路や就職に大きな影響を与える。

平成24年度の原子力関係学科の志願者数及び入学者数は昨年度の約1割減となった。特に、学部への入学者数が約2割減となるなど、全体として大学院進学時より大学進学時の進路選択に影響が出ている。ただ、全体としてはこのような傾向にあるが、個々の大学で見ると昨年度と大きな差がない大学もあり、また、一部の大学では志願者数や入学者数が増加しているところもあった(第2図)。

また、今年1月～2月に一般社団法人日本原子力産業協会が実施した原子力関係企業の合同就職説明会「原子力産業セミナー」¹⁾では、来場学生数が22年度の約1/4になった。専門分野別にみると他の産業への就職も可能な電気・電子系や機械系の学生の減少が著しいなど、福島原発事故は就職先の選択にも大きな影響を与えている。なお、原子力事業は、総合的な工学技術の集まりであり、原子力関係企業の採用者のうち8割程度は原子力以外の電気・機械・化学等の学生となっており²⁾、これら分野の学生の原子力人材としての育成が極めて重要であることは言うまでもない(第3図)。

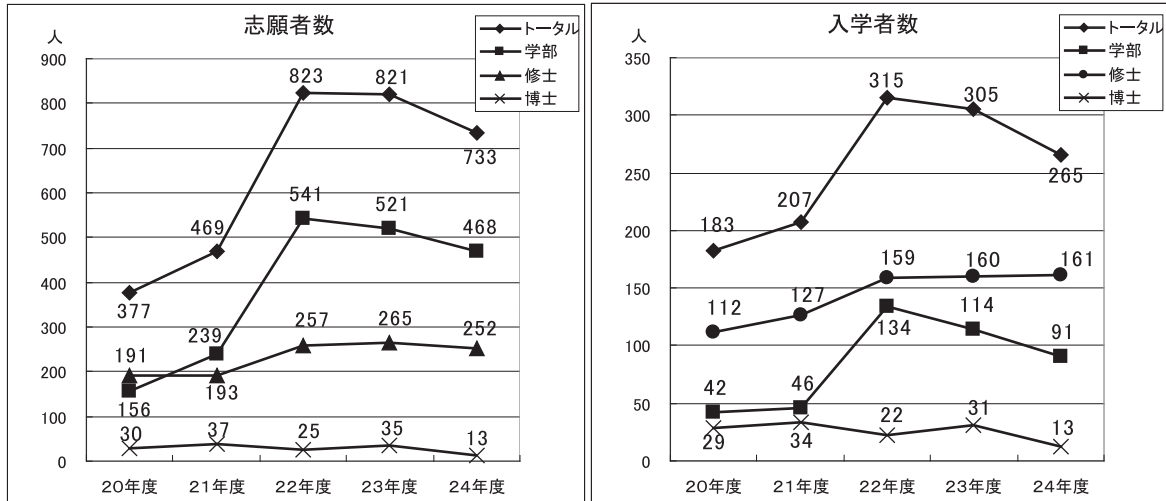
このような学生の動向調査は、あくまで指標の1つであり、他の機関が実施するアンケート調査や動向調査を総合的に見ていく必要はあるが、どちらにせよ、現段階では、福島原発事故の影響を正確に評価するのは難しく、また今後決定されるエネルギー政策・原子力政策にも大きく影響されるため、継続的にこれらの調査を実施していく必要がある。



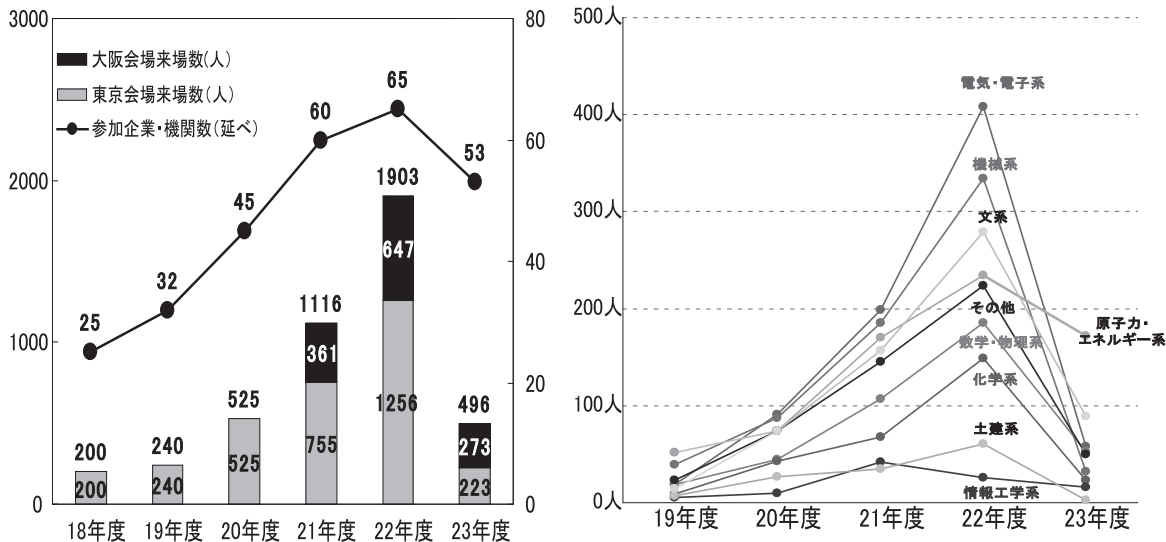
第1図 原子力関係学科の推移

Present Status of Japanese Nuclear Human Resource Development and Nuclear Engineer Education in Universities and Industries ; The Current Environmental Conditions of Nuclear Human Resource Development and Action of MEXT : Hideaki MASAOKA.

(2012年 8月31日 受理)



第2図 原子力関係学科の志願者数・入学者数



出典: 日本原子力産業協会調べ

第3図 原子力産業セミナーの来場学生数

II. 原子力教育の歴史・変遷

1. 原子力教育の変遷

原子力教育や原子力人材育成については、原子力研究の黎明期から重要性が指摘されてきたが、その観点は、原子力研究の進展や原子力産業の発展・成長に伴って変わってきた。

原子力委員会の「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」(以下、「長計」)³⁾によると、初めて作成された昭和31年版長計では、原子力研究が全く新しい分野であるということから、海外留学を通じた人材育成を重視していたが、その後、原子力研究・産業が成長期・発展期を迎えると、原子力学科の増設等による量的な人材確保を重視したものになっていった。それと同時に様々な技術的な課題を解決するための研究者の育成や原子力

以外の学科における原子力知識の普及を重視した。その後、昭和50年代半ばになると、質を重視した教育やエネルギー以外の原子力利用の幅広い分野の専門家の育成も積極的に進めた。このような中、大学では旧帝大を中心に原子力研究が成長し、多くの学科・専攻が立ち上がり、原子力を体系的に学べる環境が作られていった。これらは、単にエネルギー分野だけでなく、従来以上に医療・工業・農業などにおける放射線利用等の研究も成長させていくことになった。

平成に入ると、質とともに、安全文化の醸成や技術継承が言われ、また若い世代における原子力知識の普及活動や人材の国際化などが重視された。この時期、大学では、原子力発電所が設計・建設の時代から運転・保守の時代に入っていったことや国内外の事故等の影響、さらには大学における学科の大括り化や専門教育の大学院へ

の移行(学部はより基礎教育を重視)等により、「原子」という冠を持つ学科・専攻は減っていった。もちろんコースや研究室レベルでは従来と変わらず原子力研究が着実に行われているところもあり、単に学科等の名称のみで判断することは難しいが、少なくとも学部レベルにおいて原子力を体系的に勉強できる環境は少なくなったと言える。なお、このような大学側の変化自体は、学問の高度化、学際化、複雑化等に対応したものと考えられ、学生に学習の幅を与え、大学入学後にじっくり進路(専門分野の選択)を考えらえるというメリットがあった。

2. 近年の動き

平成10年代半ば以降は、大量の技術者の退職や国内原子力発電所のリプレース等による新規建設・増設への備え、更に学生の就職先の選択に大きな影響を与えたと考えられる、いわゆる原子力カルネサンスと呼ばれる海外での原子力ニーズの増加等により、今後の国内需要だけでなく、原子力発電の国際展開等原子力の将来性が明るくなってくると、立地地域の大学や元々原子力関係学科を有していた大学はそれをいち早く感じ取り、原子力関係学科が復活するなど、原子力産業の動向に素早く対応した。例えば、東京大学では、通常の学部卒業生が対象の大学院だけでなく、電力会社やメーカ、国等の入社数年目の社会人に対して、高度な原子力教育を実施する専門職大学院を設立するなど、産業界と密に連携した原子力教育を実施している。

福島原発事故後も、長岡技術科学大学で新たな専攻が立ち上がるなど、学科・専攻数という意味では増加傾向にあるが、これについても、今後のエネルギー政策の長期ビジョンや新規原子力発電導入国の動向等に大きく左右されるため、引き続き、状況を見ていく必要がある(第1表)。

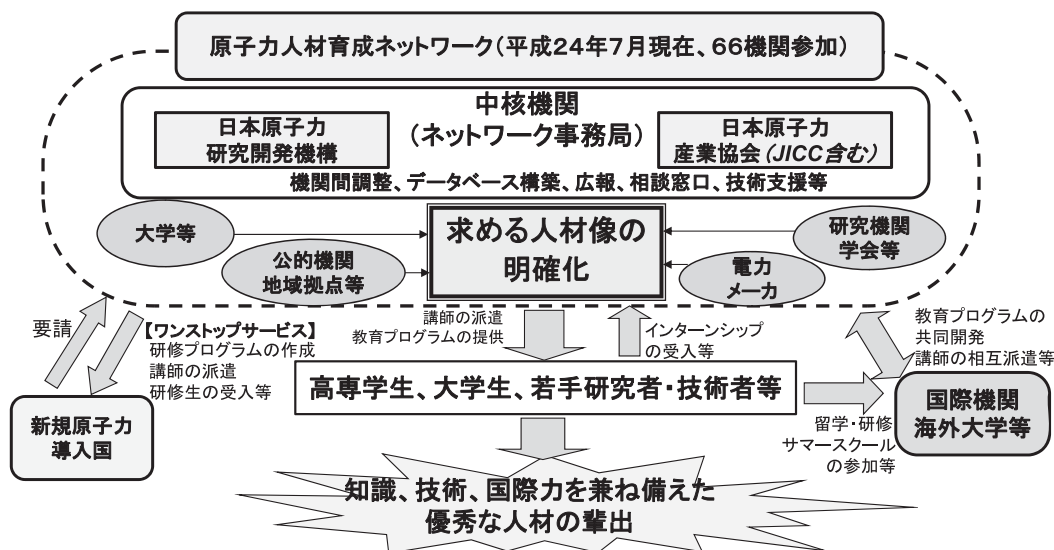
第1表 近年の原子力関係学科設立状況

設立年月	大学	学科・専攻
平成16.4	福井大学	原子力・エネルギー安全工学専攻
平成17.4	東京大学	原子力国際専攻 原子力専攻(専門職大学院)
	福井工業大学	原子力技術応用工学科
平成20.4	東京都市大学	原子力安全工学科
	東海大学	原子力工学科
平成22.4	東京都市大学 早稲田大学	共同原子力専攻
	長岡技術科学大学	原子力システム安全工学専攻

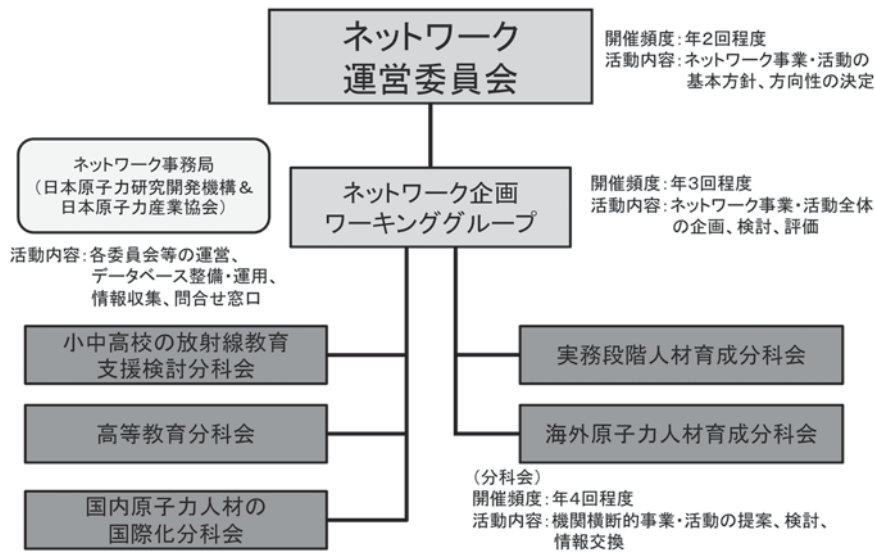
Ⅲ. 国全体における取組み

前述した近年の原子力の重要性の再認識に鑑み、平成22年11月には、産学官の原子力人材育成機関の相互協力の強化及び我が国一体となった原子力人材育成体制の構築を目指し、「原子力人材育成ネットワーク」(以下、「ネットワーク」)⁴⁾が設立された。これは、企業や国際社会が求める人材像をよりの確に把握し、効果的・効率的・戦略的に人材育成活動を推進し、知識、技術、国際力を兼ね備えた優秀な人材を継続的に輩出しようとする取組みであり、7月末現在66機関が参画している。設立当時は、「原子力人材育成関係者協議会報告書～ネットワーク化、ハブ化、国際化～」(平成22年4月、日本原子力産業協会)で示された10項目の提言²⁾の実現、特に原子力発電の国際展開に対応するための人材育成体制の構築や我が国の原子力人材育成活動の体系化と可視化等が早期に求められていた(第4図)。

ネットワークは会議体であり、第5図に示すような体制で構成されている。例えば、高等教育分科会では、各



第4図 原子力人材育成ネットワークの概要(イメージ)



第5図 原子力人材育成ネットワークの体制図

大学や高等専門学校で実施している原子力教育の調査やマップ化を行うとともに、原子力人材の育成戦略・計画を検討する上で基礎となる原子力関係学科への応募状況調査や卒業学生の就職状況調査などの学生動向調査を実施している。また、福島原発事故後の機械・電気・化学等の原子力以外の学生の「原子力離れ」に対する取組みとして、原子力に関わる現場を直接見て、知って、感じて、考えてもらうことを目的に、原子力発電に係る機器設計・製作～運転・保守～廃止措置、更には中性子の医学・工業利用といった放射線利用まで幅広い原子力分野のダイナミックな現場を体験できる見学会を企画している。国際化分科会では、今年6月に「IAEA 原子力エネルギーマネジメントスクール」⁹を企画・実施し、新規原子力発電導入国の人材育成に貢献するとともに、我が国の若手人材の国際化や国内外の人的ネットワークの構築に貢献した。

上記のような取組みは、産学官が参画する all Japan の本組織が出来なければ困難だった取組みであり、ネットワーク活動が一定の成果をあげている例と言える。

また、昨年8月には、福島原発事故を踏まえ、その時点までに得られている人材育成に係る課題を抽出し、当面、重点的に取り組むべき事項を整理した「東京電力福島原子力発電所事故を踏まえた原子力人材育成の方向性について」⁹を取りまとめた。ここでは、従来の取組みに加え、シビアアクシデント等の原子力安全や防災・危機

⁹ IAEA 原子力エネルギーマネジメントスクールは、IAEA が主催する原子力のマネジメントに関するグローバルな視点を若い人に伝承するための3週間の研修コースで、将来その国のリーダーとなることが期待される人材に原子力に関連する幅広い課題について学ぶ機会を与えることを目的としている。主にアジアの原子力発電新規導入国における若手リーダーの育成を目的としたスクールを今年6月にアジアで初めて茨城県東海村で開催。海外13カ国計21名及び国内9機関計18名の合計39名の研修生が参加した。

管理の専門家の育成、原子力関係学科以外の学生が原子力に触れる「きっかけづくり」、原子力・放射線に係るリスクコミュニケーターの育成など、5項目の人材育成活動の必要性が述べられている。

IV. 文部科学省における取組み

文部科学省は、「原子力政策大綱」(平成17年10月、原子力委員会)³⁾や「原子力に関する研究開発の推進方策について」(平成18年7月、研究計画・評価分科会)⁶⁾等を踏まえ、将来にわたって原子力に関する広範囲の活動を維持し、さらにそこで新しい可能性を切り開いていくためには、継続的に優秀な人材を育成していくことが重要との認識の下、平成19年度に経済産業省と連携し「原子力人材育成プログラム」⁷⁾を立ち上げた。このプログラムは、各大学・高等専門学校における特色や強みのある原子力教育研究活動を支援するものであり、今年度までに21大学・16高専の計80課題を支援してきた。この取組みは、各大学等のカリキュラムやテキストの開発・作成、実験装置等の教育研究基盤の拡充に貢献した。分かりやすい代表的な成果例としては、①原子力関係学科の増加：プログラム開始後4大学で2学科・3専攻が設立、②高等専門学校学生の原子力関連就職率の増加：18年度7%が22年度12%に増加等⁸⁾があげられる。

また、現在、原子炉を有する大学が京都大学と近畿大学のみになるなど、原子力教育を行える施設や講師は限定的になってきており、一大学・一機関で出来る範囲が狭まっている。文部科学省としても、このような状況や前述のネットワークの設立等を踏まえ、平成22年度には「国際原子力人材育成イニシアティブ」を創設し、産学官の関係機関が連携することにより、人材育成資源を有効に活用した機関横断的な人材育成活動の支援を開始した。特に、福島原発事故後は、IAEA 閣僚会議に対する

報告書⁹⁾等を踏まえ、当該事業の中に、新たに「復興対策特別人材育成事業」を立ち上げ、原子力安全や危機管理に係る人材育成とともに、環境放射能測定や除染、溶融燃料の処理・処分を含めた廃止措置など、新たな中長期的な課題に対応するための人材育成活動を強化している。例えば、①北海道大学では、環境科学、保健物理学、獣医学、農学などの他分野の視点から環境放射能の諸課題を学び、さらに環境放射能測定技術の習得した、多様な環境放射能問題に対応可能な国際的人材の育成、②東京工業大学では、国内16大学と連携し、原子力安全性・核セキュリティ・危機管理に関する大学間連携授業の授業骨子・シラバス・教材の作成、③東京大学では、原子力安全の基礎である物理現象とこれら現象によるシステムとしての挙動等を理解するためシミュレータと実験の融合による原子力安全専門家の育成、等を実施している。これ以外にも、放射線生物・医学分野の専門家教育や教職員等への放射線教育、リスクコミュニケータの育成等、今年度までに18機関計32課題の幅広い原子力人材育成活動を支援している。

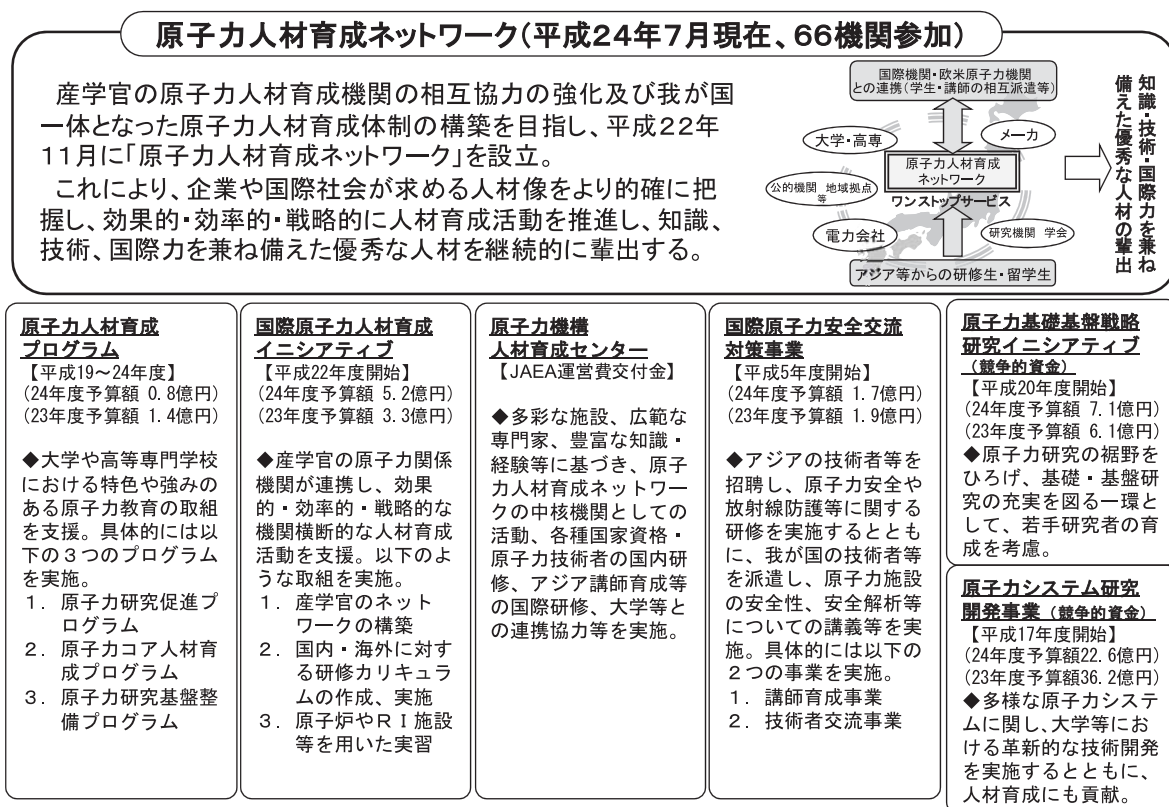
なお、第6図にあるように、文部科学省としては上記2事業以外にも研究開発や国際協力の一環として様々な人材育成活動を支援するとともに、学習指導要領の改訂により中学校理科において放射線等に関する教育が導入されたこと等を踏まえ、初等中等教育段階におけるエネルギー・放射線教育の各種支援も実施しているが、これらについてはまた別の機会に紹介させていただく。

V. まとめ

文部科学省は、従来から、原子力の平和利用を、安全を確保しつつ推進していくために、幅広い人材の育成が必要との認識の下、大学等における原子力教育研究活動の高度化や国際化等の取組みを支援してきた。

福島原発事故以降も、原子力人材の育成は、現存する原子力施設の安全確保や廃止措置等の観点から、原子力政策見直しの方向性如何に関わらず必要かつ重要との認識の下、「復興対策特別人材育成事業」を立ち上げるなど、原子力安全・危機管理等にかかる人材育成活動を強化している。特に、福島第一原子力発電所の廃止措置や周辺地域の除染活動を着実に進めることが重要であり、これらは長期にわたる極めて困難な事業で、相当程度の技術開発・研究開発が必要である。これらを着実に進めていくためには、これを支える人材なくして実現は到底できない。今年7月31日に閣議決定された「日本再生戦略」¹⁰⁾でも「中長期的視点で廃止措置に必要な人材の育成・確保を図り」とされており、文部科学省としても、しっかりとこれら人材育成活動を強化していく必要があると考えている。

一方で、福島原発事故後の学生動向調査を見ると、当然厳しい状況になっている。これについては、ただ単に廃炉作業で数十年仕事があるというだけでなく、学生が夢を持って原子力を志望できるような環境作りが重要である。しかしながら、エネルギー政策の方向性が見えな



第6図 文部科学省における原子力人材育成の取組み

い中、現時点で根本的な解決策を見つけ出すことは難しく、関係者一同、頭を悩ませているのが現状である。この状況を少しでも打開するために、今後、大学等研究機関は事故を踏まえた新たな研究開発テーマを提示することや、産業界が入社後のキャリアパスを示すこと、政府も原子力人材の重要性や放射線利用を含む幅広い原子力関連産業の可能性を示すことなど、様々な工夫した取り組みが必要である。

これらを進める上で何より重要なのは、今回の事故からこれまでの人材育成がどうであったかを検証し、真摯に考え、反省することである。その上で、若い学生が自信を持って原子力に進み、今後の日本の原子力安全をしっかりと支えていくとの覚悟を持ち成長していけるような原子力人材育成環境を構築することが望まれる。各種の事故調査委員会報告書や先日貴学会に発足した事故調査委員会の調査結果等を踏まえ、今後の原子力人材育成環境の在り方について、ネットワークを中心に、産学官が連携して具体的な提案を示す必要があると考える。

VI. おわりに

今回、文部科学省の取り組みを紹介させていただき、貴学会等関係者の皆様に感謝申し上げます。筆者自身、まだ9年程度ですが、入省以来、原子力行政/規制行政に携わってきた者として、福島原発事故を防げなかったことは極めて残念であり、今回の事故を踏まえ、自身も原子力人材育成環境を含む今後の原子力の基盤と安全を支えるべく、しっかり考え・行動していく必要があると思っております。

注)本内容は、筆者個人の見解を含んでいます。

—参考資料—

- 1) 日本原子力産業協会ホームページ。
- 2) 原子力人材育成関係者協議会報告書—ネットワーク化、ハブ化、国際化、(平成22年4月、日本原子力産業協会)。
- 3) 内閣府原子力委員会ホームページ。
- 4) 原子力人材育成ネットワークホームページ。
- 5) 東京電力福島原子力発電所事故を踏まえた原子力人材育成の方向性について、(平成23年8月8日、原子力人材育成ネットワーク)。
- 6) 原子力に関する研究開発の推進方策について、(平成18年7月、文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会)。
- 7) エネルギー総合工学研究所原子力人材育成プログラムホームページ。
- 8) 文部科学省原子力科学技術委員会第5回(平成24年4月17日)の資料2「原子力基礎基盤研究・人材育成の現状と課題」。
- 9) 原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書、(平成23年6月、原子力災害対策本部)。
- 10) 日本再生戦略(平成24年7月31日、閣議決定)。

著者紹介



正岡秀章(まさおか・ひであき)
文部科学省 研究開発局 原子力課
(専門分野/関心分野)原子力行政、規制行政



From Editors 編集委員会からのお知らせ

—最近の編集委員会の話題より—
(10月1日第4回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・英文誌の出版状況、電子投稿審査システムの開発状況が報告された。掲載料請求に課題がある。著者にアンケートをすることとした。
- ・英文誌の50周年記念 Review 論文の進捗状況が報告された。
- ・平成24年度学会賞(論文賞)への編集委員会推薦論文の追加1件を選考した。また、英文誌独自の表彰内容について決定した。
- ・掲載否論文著者からのクレームへの対応を検討した。

【学会誌関係】

- ・秋の大会での企画セッションからの記事候補の再確認を行った。大会に参加した編集委員から追加提案はなかった。
- ・巻頭言と時論の掲載予定の確認を行った。12、1月号の時論の提案があった。出席した委員からの異論なく、著者へ打診していくことにした。
- ・特集「原子力の人材教育・育成」の第2弾の学生との座談会について、大会を利用して学生連絡会、YGNの代表者と事前打ち合わせをした旨の報告があった。座談会は10月中旬に開催し、1月号の掲載予定で作業を進めて行く。

編集委員会連絡先<<hensyu@aesj.or.jp>>

解説

原子力安全論理の再構築とレジリエンスベースの安全学

東北大学 北村 正晴

原子力の今後に関する国民的討議を進めるに際しては、福島事故以後の原子力安全をどのように構築し説明するかが重要な課題である。技術的な安全向上方策の導入を説明するだけではこの課題解決はできない。なぜ事故のつど「想定外」という言い訳が繰り返されたのか、福島事故に関しては津波や電源喪失に関する警告への対応が先送りにされたのか、などの疑問が解消されない限り国民の原子力への強い拒絶感は解消されない。この問題に対して本稿では、元々原子力分野で採用されていた深層防護に基づく安全論理は妥当なものであったこと、対象の継続的な変化や新知見の導入に関係する「変化」への対応が影響して安全論理の内容が劣化していたこと、したがって今後の安全論理においては「変化」への対応が本質的に重点であることを述べている。そしてこの「変化」への対応の指針としてレジリエンスエンジニアリングという方法論の意義について解説した。

I. はじめに

「福島事故の惨禍を招いた原子力発電をこれからも継続することなどありえない」、「事故がゼロであることが保障されない以上、原子力発電の再開は認められない」などの脱原発論が連日のように聞かれる。これに対する原子力維持または推進論の立場からは、「日本のエネルギー事情、各地域の電力事情を考えると、ある程度の原発稼働は必要である」、「様々な安全対策によって原子力発電所の安全性は向上したので再稼働は問題ない」などの主張がなされている。メディアを通じて表現される国民の意見にも、有識者や政治家の主張にも、このような意見対立は広く見受けられる。

上記の意見対立の最大の要因は、安全に対する深刻な懸念への対応不全にあると考えてよい。原子力発電の採用に伴う問題点としては他に、高レベル放射性廃棄物の最終処分場問題、燃料サイクル路線の停滞、事故の影響まで考えた場合の高コスト性なども挙げられている。しかし国民の多くにとって福島事故により改めて印象付けられた原子力の危険性こそが最大の懸念である。「福島第一原発事故後の日本では、必要性があるというだけでは、原発を動かすことはできないことである。必要性だけでなく、危険性も直視し、危険性を最小化するきちんとした手立てを打たない限り、原発を動かすことは不可

能なのである」という橘川の指摘¹⁾は的確である。

この見方に立てば原子力専門家は安全を主張する論理とその実効性についてもっと徹底して検討し説明すべきである。本学会誌には2011年6月以降、福島事故の原因解明や今後の対策に関する論考は多数示されている。しかし安全の体系的論理という観点に立った考察は、諸葛による時論²⁾がこの方向での検討の必要性に言及しているほかには筆者の知る限り見られない。(なお、本稿提出後、アトモス2012年8月号に、宮野廣、他による「原子力災害の再発を防ぐ(その2)原子力安全論理の再構築に向けて」が掲載された。具体的提案内容は異なるものの、大きな目的は共通点もあることを付記する。)

この安全実現と説明のための論理(以下、安全論理と略)に関して改めて問い直ししないと、前述のような互いに食い違う主張の当否を含めその先の議論は的外れになる。以前の原子力安全論理が誤っていたなら、どこを修正すればよいのか。誤っていなかったなら、なぜ福島事故を防げなかったのか、どう修正すれば安全を格段に高めることができるのか、などの問いについて改めて考えることが必要である。この答えを得た上で、その内容を国民にわかりやすく説明するための方策についても併せて検討することも必要である。今後の原子力政策に関しては従来なされてきたような(原子力ムラと揶揄される)広義の原子力専門家だけで議論し決定することはもはやありえない。事故の前からすでに、技術と社会の間に生じる問題の解決は専門家集団単独ではなく市民の参加を踏まえてなされるべき時代、すなわちトランスサイエンスの時代が到来していることは広い範囲で指摘され

Reframing of Nuclear Safety Logic on the Basis of Resilience Engineering: Masaharu KITAMURA.

(2012年 8月22日 受理)

ていた^{3,4)}。事故以後は、この市民参加型政策策定の重みは一層増大している。この状況を考えれば、安全に関する説明の重要性、必要性に関して多言は不要であろう。

福島事故の深刻さと立地地域の方々に及ぼしたご迷惑、ご苦痛の大きさを考えた時、これまで原子力に関わってきた一人として、謝罪と反省の言葉を述べる以外できることはないように筆者は感じてきた。しかし日本がどのようなシナリオを選ぶにせよ、安全の論理を再吟味しその内容を国民に的確に説明することは、避けて通れない課題である。福島事故からしっかりと学ぶことこそが原子力人としての責務の一つでもあると考える。この認識に立って以下の考察を進める。

Ⅱ. 原子力安全論理

前章で挙げた問いにつき、どのように回答するのが議論の出発点である。福島事故を防げなかった原子力関係者はどのような安全論理に則って原子力安全を守る努力をしてきたのか？

この問いかけに関しては、「現行の原子炉等規制法は、事故の発生防止という観点では、異常発生防止と異常拡大防止、異常影響緩和という3つの考え方で止まっている。IAEA 提唱の5層の深層防護ではさらに苛酷事故対策と防災が入っている」という指摘⁵⁾が原子力専門家の代表的な見解であろう。異常発生防止と異常拡大防止、異常影響緩和という3つの考え方にとらわれていたことの問題点指摘が広い範囲で見受けられる。

しかし原子力安全論理は本当にそのような枠組みで当初から構築されていたのかといえばそうではない。原子力安全論理が、より多層の深層防護構造を持つという考え方は、少なくとも原子力安全専門家の間では知られていた⁶⁾。この引用文献の著者は原子力安全委員や安全委員長の経験者である。ここでの深層防護は、①立地地点の選択、②異常事象発生の抑止、③発生事象の早期検出・対応、④影響緩和、⑤アクシデントマネージメント、⑥離隔、すなわち施設と社会の相関低減、⑦防災——という7層から構成されている。詳細な説明は省略するが、IAEA 提唱の国際的指針と同等以上の安全実現指針が記載されていることは明らかである。要するに、異常発生防止と異常拡大防止、異常影響緩和よりさらに視野を広げた安全論理は日本でも知られていた。

問題は、「なぜ日本では欠陥のある安全論理を踏まえた原子力規制や事業運用がなされていたのか？」という形ではなく「元々は知られていた7層の安全論理が、現実には3層だけの論理に縮退し劣化していたのはなぜか？」という形で問われなければならない。原理的に欠陥がある安全論理しか知られていないがゆえに安全が損なわれたのであれば、それを改めることが安全につながる。しかし元々は知られていた安全論理が縮退し劣化した形で実装されていたのである以上、縮退や劣化が起

こった理由を考え、それを除去することが必要な措置になる。そして縮退や劣化が検出されず改善もされないような事態を回避するための対策を導入することが重要課題となる。

安全の劣化については「原子力ムラの人間が利益に力点を置きすぎて安全を軽視したからである」という類の、当事者性悪説を良く見聞きする。この種の批判はある程度成立するとしても、その批判の段階で考察を停止させることは避けるべきである。人間には課題をなるべく簡潔に整理して問題を取り扱う際の認知的な負担を押さえたいとする共通の傾向が存在する。一度判断がなされてしまうとそれへの固執傾向も生じやすい。人間や組織の安全に関する世界的権威である J. Reason はこの傾向性を「最小努力の原理」、「監理的利便性の原理」と名付けて注意を喚起している⁷⁾。誰かの誤りや怠慢によって事故が起きたという考え方に固執することの問題点は、安全人間工学の分野でも強く指摘されている。より深いレベルまで考察を進めることが必要なのである。

Ⅲ. 安全論理劣化の背後要因

前章で示したように、簡略化した認識に基づく事故原因の追及はしばしば実態の部分的把握に留まることが警告されている。地震や津波の想定における原子力専門家の思考停止が事故を招いたという批判は広い範囲で聞かれている。筆者自身もそのような見解を表明⁸⁾しているが、これはあくまで技術者が想定外などという言い訳をする事態はあってはならないという限定的な文脈に立った見解である。本稿の観点からはより大局的な安全論理の縮退や劣化に関する考察が本質的な課題である。

安全の劣化は原子力ムラの住人が安全神話を自ら信じ込み自縄自縛になったことから生じたという定型化した原子力専門家集団批判は多い。マスメディア記事の多くはこのような書き方になっている。民間事故調査委員会(独立検証委員会)の報告書では、「安全神話」の社会的背景というタイトルで第9章に見解を表明している。一般的な意味で「安全神話」とは、原子力の安全を疑うことなく、したがって的確な安全策を講じることもない自己過信(complacency)に満ちた人間・組織のイメージが浮かんでくる。しかしそのような問題認識は一面的に過ぎる。そのような見方に対する批判は本学会誌の解説論文⁹⁾に次のように的確に指摘されている。

「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たし、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。」

筆者の実感としても、原子力事故は起こらないなどという単純化した見方をしてはいなかったし、「安全神話は死んだ」に類する決まり文句が原子力トラブルのたびに繰り返されることには強い違和感があった。安全神話によりかかっていたから事故が防げなかったという見方は妥当ではない。原因としてはもっと異なるメカニズムを考えるべきである。

ここではむしろ、独立検証委員会報告書に記されている「この調査中、政府の原子力安全関係の元高官や東京電力元経営陣は異口同音に『安全対策が不十分であることの問題意識は存在した。しかし、自分一人が流れに棹をさしてもことは変わらなかったであろう』と述べていました(p.7)」という記述に注目したい。複数の関係者が異口同音に問題意識を持ちつつも沈黙していたというこの記述の意味はよく考えてみる必要がある。

筆者は今回の大津波による危険を事前に予見してはなかった。その意味で筆者は自分の能力の不足を恥じるものである。それゆえ自戒を込めて想定外事象という失態をしないための事象予見方策について考察を示していた⁸⁾。しかし上掲の発言が事実であるならば、今後は「知りつつ沈黙している」事態を回避するための別な対策が必要である。先に引用した木下論文⁹⁾では「想定外」事象を5種類に分類している。筆者の考察も基本的には同様の分類を採用している。この分類をまとめて要約した結果を第1表に示す。この分類から明らかなように、過去

の原子力に関わる事故やトラブル事象はいずれも、厳密な意味で「想定外」事象ではなかった。「評価者側の過誤要因」に注意を払っていれば認識し対策を講じることは可能であったといえる。

筆者はあらゆる事象が想定可能であると主張しているのではない。なんらかの「想定外」事象が起こる可能性は原理的に否定できない。しかしこれまでに経験されてきた「想定外」事象は実際には「想定除外」扱いを受けた事象である。「想定除外」を軽率に(または意図的に)行うことなく、「その事象が起こった場合に打つ手はあるか?」と自問し、必要ならばなんらかの対策を施すことで結果的に「想定外」事象の数を格段に低下させて安全性を向上させることは可能になると考える。

このような「想定除外」事象の蓄積は、明らかに安全の劣化につながる。本来は5層または7層であったはずの深層防護が、実質的に3層だけになっていたという安全論理構造の縮退にもつながっている。そして「想定除外」事象の多くは、第1表に記載した過誤要因に加えて、科学の進歩に伴い新しく得られる知見との関係において生じやすいことは容易に理解されよう。福島第一原子力発電所に限らず原子力発電所の多くについて設置段階での安全審査がなされて以降、地震についても津波についても、新知見は獲得され続けている。津波や全電源喪失事故のリスクについても事前の指摘がなされていたことは広く知られている(たとえば独立検証委員会報告書、国会事故調査委員会報告書参照)。これらの新知見、事前指摘は、貴重な警告として機能しえたはずである。

第1表 「想定外」事象候補の分類と評価者の判断過誤要因

事象がコア	事象側の特性	評価者側の過誤誘因	典型的事例
(1) 極低確率事象	生起確率が客観的に見て極めて低い	実質的に生起確率ゼロと考えてよい。しかし影響評価を実施せぬままでは不可	隕石の直撃
(2) 多数の故障が同時生起する事象	組み合わせ事象なので、独立事象と見做してよい条件下では生起確率は低い	多くの機器損傷、機能喪失につながる共通要因を考慮に入れた検討なしでは不可	福島事故につながる多重の電源と複数の冷却系の同時機能喪失
(3) 専門家集団(学会)内部での見解不一致	生起確率の評価が、多数派は低い少数意見では高い	少数意見側の根拠を確認せず多数決的に判断	活断層の有無や連動の可能性に関する判断過誤
(4) 地震・津波などの自然災害	生起確率は無視できないが、発生時期の不確実さが大きい	発生時期の不確実さが大きいことを、すぐに生起することはないと誤解釈	XX年程度の間隔で発生する大津波(前回発生からXX年経過)への配慮欠落
(5) 専門外知識の活用が必要な事象	生起確率は無視できないが、当該分野では生起事例未経験	専門知識や関連情報の認識不足で、発生シナリオを無視	「もんじゅ」における温度計さや管の破損
(6) 人間・機械相互作用	人間と機械の相互作用に起因する事象シナリオの複雑化	動作するはずの機器の不動作、計測器指示値の解釈困難	スリーマイル島事故
(7) 組織要因	組織全体の安全風土劣化に起因する多重要因	通常の組織ではありえない不適切シナリオの生起を見過ごし	チェルノブイリ事故、JCO事故

逆に言えば、事業者や規制担当者、およびそれらの所属組織の警報に対する感度の不足が、事故の本質的な背後要因であったといえる。感度の不足が起こる原因として、何かを変えることによるコスト増大への懸念を指摘する声も少なくない。独立検証委員会の報告書における前出の引用文と、同じ報告書にある「前出の東電元常務は、荒木・元社長が掲げた“普通の会社”というスローガンについて、“コストダウンが役員の評価基準になり、安全面で危うさがあった”と打ち明ける(p.319)。」という引用文をつなぎ合わせれば、コスト増大への懸念が最大の要因であったというシナリオは納得されやすいものと感じられる。しかしこの発言は事実なされたとしても、事故の調査に際しては、納得されやすいシナリオの段階で留まることなくさらにその背後の Second Story まで検討する必要がある¹⁰⁾ことは広く知られている。コストへの懸念があったとしても、もし津波の警告が高い現実性を持って指摘された場合に、それでもコストを気にして発言を自制するであろうか。

実際には、津波の可能性が警告された場合に、第1表の事象カテゴリー「(4)地震・津波などの自然災害」が対象であり、「(3)専門家集団(学会)内部での見解不一致」も推測されたことで、「想定除外」とする判断が働いた可能性があるだろう。その上、「(2)多数の故障が同時生起する事象」では安全性は損なわれるという可能性を見落としていたという見方が、より実態を反映しているのではあるまいか。さらにその背後には、変えることへの一般的抵抗感も存在した可能性もある。この一般的抵抗感の駆動源は、II章で引用した「最小努力の原理」に求めることができる。堅牢に構築された巨大な原子力発電所に向い合ったとき「エビデンス不十分な警告に対していちいち対応する必要はない」、「改良や変更をしなくても原子力発電所は堅牢に構築されており安全は維持される」という感覚が生じることは容易に推測できる。安全をある程度高いレベルで実現すれば、あとは適切なメンテナンスをすることとヒューマンエラーを避けることだけで安全は維持されるという、対象モデルを定常的なものとする見方が根本的問題点であると言いつつ直すこともできる。

だからこそ、警告への感度向上、「想定除外」の回避、変化・変更への抵抗感克服などが、福島事故の再発防止と原子力施設安全性の向上のための基本指針となる必要がある。ただこれらの指針が理念として受け取られただけでは実効性は期待できない。基本指針が実際に組織内で機能するための、より現実的な方針への翻訳と関連した体制作りのための方法論が必要である。次章に紹介するレジリエンスエンジニアリングはそのための方法論として大きな役割が期待される。

IV. 原子力安全論理のあるべき姿と レジリエンスエンジニアリング

変化・変更へのニーズを軽視または「想定除外」してきた原子力関係者の思考パターンが福島事故を起こした根本的な要因と見做すことは以上の考察から合理性を持つ。この考え方と対極にあるのが、レジリエンスエンジニアリング^{11,12)}の問題認識である。この方法論では、システムも環境も変化するし脅威はいつでも襲ってくる可能性があるという基本認識に立って安全を考えることが提唱されている。イメージ的には、島や暗礁の点在する多島海を航行する帆船の船長が心得るべき指針であるという説明もなされている。レジリエンスエンジニアリングの解説については別報¹³⁾に多少詳しく記しているのでここでは骨子のみを記す。

レジリエンスエンジニアリングという方法論は、欧米の安全研究者、とくにヒューマンファクタ研究者や実務家の間で徐々に形成されたものである。それまでの安全研究・ヒューマンファクタ研究は対象システムが時間的に定常不変であるという見方と、人間(オペレーターやパイロット)は現場で侵すエラー要因であり、これを除去しようとする方向で進められてきた。しかしその見方の限界が次第に明らかになってきたことと人間が成功をもたらす要因でもあるという認識とを踏まえて、2004年ころから急速に進展してきたのがレジリエンスエンジニアリングである^{11,12)}。

レジリエンスエンジニアリングの基本的立場は下記のように要約できる。

- A) システム(本稿では原子力発電所とその運用組織)も環境(自然環境, 社会環境)も動的に変化していることが常態である。不変なものと考えてはならない。
- B) それゆえ、システム運用の担当者は常に警戒心(Constant sense of unease)を持って業務を進め、必要に応じて変化への適応(adaptation)を図るべきである。
- C) 変動や外乱がシステムに影響する場合、できるだけ早期に的確な対応をすることが望ましい。
- D) 大きな変動や外乱が生じて期待するシステム動作が維持できない場合においても、決定的な破局は回避しつつシステムを運用すべきである。その際には当初の目標にこだわらない柔軟な運用をすべきである。
- E) システムの運用に関わる人間はエラーを起こす要因であるだけではない。時には素晴らしい成功ももたらす要因と見るべきである。

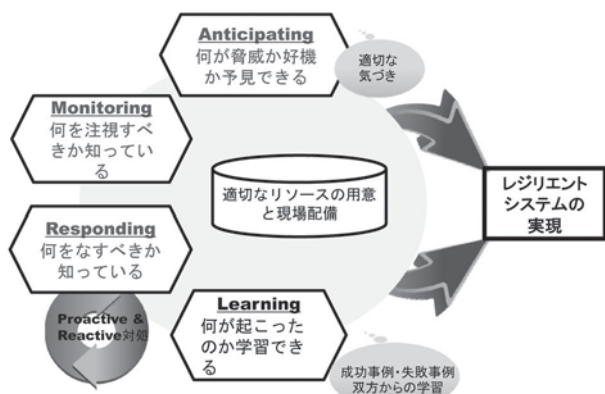
この枠組みは、望ましい状態を固定的または定常的に考える従来の安全論とは決定的に異なっており、より現実的であることは福島事故の事象推移と対応における難点を思い返せば明らかであろう。以上の要求に応えるためにはシステム側には次のような方策が具備されていることが必要とされている。

- (a) 「対処, モニタ, 予見, 学習」の4機能が必要である。「対処」は現在の状況に対し何をすべきか知っていること, 「モニタ」はどんな事柄に注意を向けて監視すべきか知っていること, 「予見」はどんな脅威が生じるかを推測できること, 「学習」は経験された事象から教訓を抽出できることを意味する。
- (b) これらの機能が成立するためには必要なリソース(人間, 機器や装置, 図面や手順書などの資料, 資金など)が配備されていることが必要である。
- (c) システム内へのリソース配分は状況に適応して動的に最適化されねばならない。
- (d) これらの機能, とりわけ「モニタ」と「予見」は受動的(reactive)ではなく能動的(proactive)に活性化されることが望ましい。
- (e) 「学習」に際しては, 失敗事例からだけでなく成功事例, 良好事例から学ぶことが重要である。

これらの具体的方策が, 従来の安全論が教示する内容とは大幅に異なること, 福島事故を参照すればより合理性が高いことが理解されよう。(a)に示す主要4機能に対して(b)~(d)は補完的の要件を表している。これらの機能や要件の発動は決まった順序でなされるわけではなく状況に依存する。以上述べたレジリエンスエンジニアリングの概念を図式的に整理して第1図に示す。

実際に大地震が起きてしまった段階では, たとえば次のような行動戦略が考えられる。

- ① ただちに必要なニーズに対して「対処」する。その際には必要なリソースを活用する。
- ② 「対処」しつつ, 状況の変化を注意深く「モニタ」し必要に応じ「対処」担当者に注意を喚起する。
- ③ 必要が生じるリソースについては前倒しで手配する。
- ④ 脅威が発生した段階では事前に準備した「対処」方策を実行するが必要に応じ戦略を変える。
- ⑤ さらに起こりうる脅威事象を「予見」し, 必要な措置をマネジメント担当者に通知する。



第1図 レジリエンスエンジニアリングの主要4機能と補完的の要件

- ⑥ 事態が収束した後で, 得られた知見を整理して「学習」機能の入力情報として提供する。

一方, なにも外乱が起きていない日常的活動においては, 次のような行動戦略が採用される。

- ① 常に「予見」機能を活性化して, システムや環境の変化可能性や外部からの警告情報を分析する。
- ② その際には過去に経験された事象からの「学習」データを適切に参照する。
- ③ 脅威となる事象が「予見」された場合には, 「モニタ」機能を活性化するとともに「対処」に必要なリソースを確認し, 必要に応じてリソース配備状態を修正する。
- ④ 脅威となる事態が起これなければ, 「予見」モードに復帰するとともに「予見」結果を「学習」する。

このようにレジリエンスエンジニアリングに基づくシステム運用を行えば, 主要機能のいずれか, もしくはすべてが常に活性化されている。これにより「想定除外」や警告への感度低下は適切に回避できることになる。結果として, システム(ここでは原子力発電所)の安全性は格段に向上することが体系的に主張できる。システムも環境も変化するという認識を基本とするレジリエンスエンジニアリングは安全という目的に対して明らかな合理性を有しているのである。

V. 必須要件としての市民対話

前章で述べた方向で安全性を高めることができたと仮定しよう。しかしその事実を国民に説明して納得してもらうことができなければ, 原子力発電技術は社会で存続することはできない。これまでの安全説明は, 3層に縮退していた安全論理を受けて, 批判的な問いかけに対して「そのような極端な事象(たとえば巨大地震または格納容器破損)を想定することは非現実的です。起こりませんから大丈夫です」という趣旨を基本としてなされてきた。このタイプの説明は福島事故を経験した今日, 効力を失っていることはいうまでもない。

本来は福島事故以前から, IAEAの5層記述または前記の7層記述を参照して, 「そのような事象は起こらないと考えています。でももし起こったとしても事故には発展させません。対処できる備えがあります」と説明すべきであった。さらに「でもなんらかの理由で事故に発展してしまったらどうする」という質問も受けつけて「それでも炉心水位は確保します」, 「水位が確保できなくても水素爆発は回避できます」などの多段階的な説明をする必要がある。事実そのような備えこそが深層防護ならびにレジリエンスエンジニアリングの本質なのであるから, 従来型の説明を踏襲することは合理性を持たない。その上で, 「平常時から常に異常の発生に即応できる備えと訓練を行っています」, 「警告情報にも的確に対応します」という説明も併せて述べ, 理解を求めると

いう本来の方向性を追求すべきである。

なお関連する問題として、再稼働についての論議に際ししばしば聞かれる「防潮堤も免震事務棟もできないうちに再稼働するのは許せない」という批判への対応について考察したい。この種の主張を容認すれば、今後、安全を一層高めることを目指した新しい改善策を導入しようとする都度、「その新しい改善が今までされていなかったということは、現システムは危険だということ許せない」という反論に直面することになる。当然ながら安全論争は「0か1か」、「白か黒か」という形でなされてはならない。深層防護の安全論を説明することは、「そんな極端な事象は起こりません」と切り捨てる従来の安全説明よりはるかに大きな努力を要求する。しかしその努力を続けて、深層防護と変化への対応を統合し「想定外」事象の可能性を著しく低減できる安全論理についての説明を貫くことが専門家に課された責務である。レジリエンスエンジニアリングに基礎を置く安全説明は、その責務を果たすための手段としても大きく前進した内容になっている。

VI. おわりに

原子力安全の再構築のための論点整理とレジリエンスエンジニアリングの視点を導入することの意義について解説した。脱原子力に関する議論の決着がどうなるにしても、上記のような論点の整理と論理的考察を踏まえた討論が欠かせないはずである。本解説では従来の原子力論理の根幹は誤っていなかったが、現実の原子力発電所へ実装する段階で視野狭窄や「想定除外」を起こし、結果として事故を防げなかったという検討結果を述べた。そしてこの問題点の克服手段としてレジリエンスエンジニアリングの方法論を枠組みとする安全性向上の方策について説明した。レジリエンスエンジニアリングを基盤とする安全学の意義と具体化方策についての認識が原子力専門家に共有され、社会にも発信されることを期待する次第である。

—参考資料—

- 1) 橘川武郎, リアルな原発のたたみ方, 日本原子力学会誌アトモス, 54〔1〕, 22-26 (2012).
- 2) 諸葛宗男, 今こそ深層防護の安全哲学の深耕を, 日本原子力学会誌アトモス, 53〔12〕, 794-795 (2011).
- 3) 小林傳司(編), 公共のための科学技術, 玉川大学出版部, (2002).
- 4) 八木絵香, 対話の場をデザインする, 大阪大学出版会, (2009).
- 5) 田中 知, リスクガバナンスに向けて, エネルギー総合工学, 35〔1〕, 4 (2012).
- 6) 佐藤一男, 原子力安全の論理, 日刊工業新聞社, (2006).
- 7) J. Reason, *The Human Contribution*, Ashgate Publ., (2008) : 佐相邦英監訳, 組織事故とレジリエンス, 日科技連, (2010).
- 8) 北村正晴, 福島第一事故からの「学び」, 原子力学会誌アトモス, 53〔6〕, 406-408 (2011).
- 9) 木下富雄, リスク学から見た福島原発事故, 日本原子力学会誌アトモス, 53〔7〕, 465-472 (2011).
- 10) D.D. Woods, R.I. Clark, Nine Steps to Move Forward from Error, *Cognition, Technology & Work*, 4 : 137-144 (2002).
- 11) E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson, (Eds.), *Resilience Engineering : Concepts and Precepts*, Ashgate, (2006).
- 12) E. Hollnagel, J. Paries, D.D. Woods, J. Wreathall, *Resilience Engineering, in Practice*, Ashgate Publ., (2011).
- 13) 北村正晴, レジリエンス・エンジニアリングの産業安全向上への応用, ヒューマンインタフェース学会誌, 14〔2〕, 5-10 (2012).

著者紹介



北村正晴(きたむら・まさはる)
 (株)テムス研究所所長, 東北大学名誉教授
 (専門分野/関心分野)ヒューマンファクター, 市民対話, レジリエンスエンジニアリングとシステム安全

解説

シビアアクシデント時に溶融した燃料の形態と特性 TMI-2 炉心から採取したデブリに対する試験の結果から

日本原子力研究開発機構 永瀬 文久

福島第一原子力発電所では、原子炉炉心の冷却ができなくなり炉心温度が上昇し、燃料が溶融するシビアアクシデントに至った。事故の進展を解析して溶融した燃料の状態や分布を推定するため、また取出し作業に役立てるためには、溶融し他の炉心材料と混合した燃料の特性に関する知見が必要である。1979年に起こったスリーマイル島2号炉(TMI-2)事故後に炉心から取り出された溶融燃料(デブリ)に対し様々な調査・分析が行われた。日本原子力研究開発機構も1988～1993年に行われた OECD/NEA の TMI 压力容器調査計画(VIP)に参加し、入手した約60個の TMI-2デブリに対して様々な試験を行った。本稿においては、その結果を中心にデブリの形態と特性について解説する。

I. はじめに

2011年3月11日に起こった東京電力(株)福島第一原子力発電所での事故においては、冷却材が原子炉炉心から失われ注水が再開されるまで約6時間から14時間を要したとされる。また、暫定的ではあるが計算コードを用いた解析によれば、炉心の最高温度は二酸化ウラン(UO₂)の融点以上の温度に達したと考えられ、1号機から3号機において多くの燃料が溶融した可能性が高い。政府と東京電力による中長期対策会議は発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップを策定し、溶融した燃料の取出しを20～25年後に完了するとしている。溶融燃料取出しを効率的かつ確実にを行うためには、デブリの分布を含む炉内状況の推定が必要であり、シビアアクシデント解析コードの高度化をはじめとする技術開発が、中長期対策会議の下に設置された研究開発推進本部を中心に行われている。事故の進展を解析し炉内状況を推定するためには、デブリの特性に関する知見が必要である。デブリの特性について最も広範に試験が行われたのは、1979年の米国・スリーマイル島2号炉(TMI-2)事故後に炉心から取り出されたデブリに対するものである。本稿においては、TMI-2デブリに対する試験の結果を中心にデブリの形態と特性について解説する。

II. スリーマイル島2号炉事故の概要

1. 事故の進展

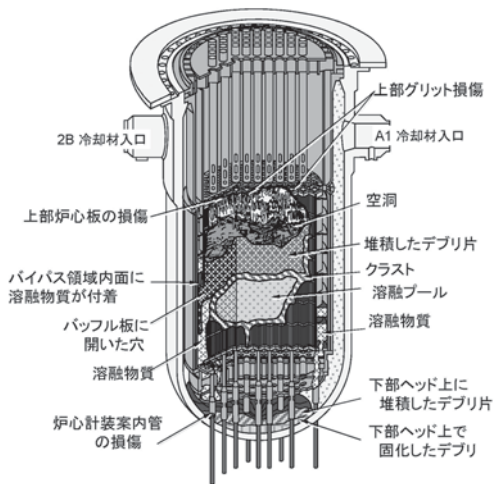
TMI-2は、電気出力95.9万kWの加圧水型軽水炉(PWR)であり、事故の1年前の1978年3月28日に臨界を達成し、1978年12月30日に商用運転を開始した。1979年3月28日、約97%定格出力運転中、制御用空気系の故障のため給水ポンプが停止し、さらにタービントリップしたことから、原子炉1次系の温度、圧力が上昇したが、設計どおり加圧器逃し弁が開き、原子炉は緊急自動停止した。しかし、その後、加圧器逃し弁の故障や運転員の誤操作が重なり、炉心から冷却材が喪失し燃料が水蒸気中に露出した。事故発生後2時間20分で冷却材の流出は止まり、3時間半後に ECCS の短時間起動により炉心はようやく再冠水したが、約2時間半の間、炉心の露出は続いた。

事故後に行われた様々な調査により明らかになった TMI-2炉心の損傷状態¹⁾を第1図に示す。炉心中央やや上部寄り燃料集合体の溶融が始まり、事故の間も冠水していた燃料集合体下部を除き炉心の約45%(62 t)が溶融したと言われる。溶融した燃料は炉心下部で一旦固化し溶融プールを形成したが、再び溶融し約19 tが压力容器下部ヘッド上に流れ落ちた。

2. デブリの分析計画

事故収束後、復旧作業が発電所の所有者であった GPU-Nuclear 社によって行われた。この作業では、施設の除染、液体及び燃料を含む固体廃棄物の撤去、施設の監視保管状態への移行が行われた。米国エネルギー省と我が国の WR 委員会(10電力、原子力関連5社、原工試、

Morphology and Properties of Fuel Materials Molten in Severe Accidents—Results of Examinations of Debris Samples from TMI-2 Reactor Core: Fumihisa NAGASE.
(2012年 8月31日 受理)

第1図 TMI-2炉心の損傷状況³⁾

日本原子力研究所(現日本原子力研究開発機構。以下、原子力機構)で構成)の間に共同研究が締結され、1984年から1989年まで、事故状況の把握、デブリ試料の分析、原子炉及び機器の状況分析、放射性廃棄物の処理、処分技術の開発が行われた。

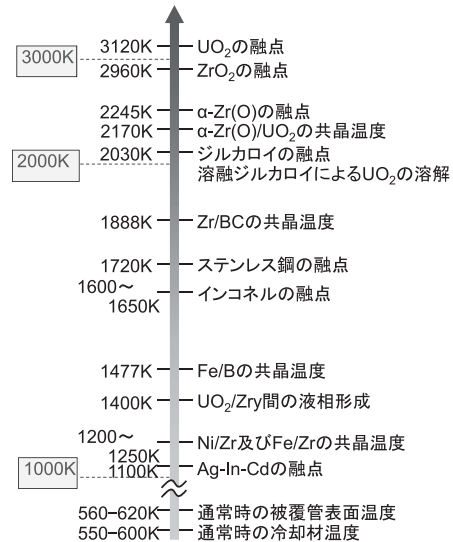
炉心から採取されたデブリ試料の分析はアイダホ国立研究所(INEL)を中心とし、まず米国で行われたが、その後、欧米8カ国と1国際研究機関において、炉心及び下部プレナムから採取したデブリ試料に対する金相試験、放射化学分析、元素分析等がOECD/NEA/CSNIタスクとして1992年まで行われた。

1988年からは、高温の溶融物落下が压力容器下部ヘッドの健全性に及ぼす影響を調査することを目的としたTMI压力容器調査計画(TMI-VIP)がOECD/NEA国際共同研究として実施された^{2,3)}。この計画では、压力容器下部ヘッドの損傷程度と破損までの裕度の推定が主な目的であったが、我が国(原子力機構)と米国(INEL)が下部ヘッドに堆積したデブリの分析を担当した。原子力機構には、下部ヘッドだけでなく、他の炉心位置からも採取したデブリ約60個が輸送され、燃料試験施設等においてデブリ試料の物理特性、化学組成、熱特性、放射性物質の放出等に関するデータを取得した⁴⁻⁶⁾。

Ⅲ. シビアアクシデント時の燃料挙動

デブリの性状と特性を理解するためには、その生成過程を知る必要がある。炉心溶融の過程については、TMI-2事故以降、我が国や欧米で行われた様々な規模の試験により知見が得られている。

炉心を構成する材料の溶融及び共晶(液相)形成等を温度指標上にまとめ第2図⁷⁾に示す。シビアアクシデント時には、崩壊熱の蓄積とジルカロイ/水蒸気反応が主要な熱源となり、炉心温度は3,000 Kを超えることも想定される。燃料棒を構成するジルカロイ被覆管とUO₂の融点は比較的高い温度範囲にあるが、Ag-In-Cd合金の溶

第2図 炉心構成材料の溶融及び共晶(液相)形成に関する温度指標⁷⁾

融(約1,100 K)や多くの炉心構成材料の溶融や主構成元素間の共晶形成が1,500 K以下で起こることがわかる。溶融や共晶形成は炉内の雰囲気にも依存するが、炉心構成材料が炉心において非常に小さな重量割合しか占めないにもかかわらず、UO₂やジルカロイの融点よりもずっと低い温度で溶融が開始し、燃料棒や集合体の早期溶融や溶融範囲の拡大に寄与する可能性を示唆している⁸⁾。

炉心構成材料間反応に関する反応速度も実験的に求められている。ジルカロイ/インコネル、Ag-In-Cd合金/ジルカロイ反応やジルカロイ/ステンレス鋼反応といったPWR制御棒を構成する材料間の反応が、いずれもUO₂/ジルカロイ反応よりかなり大きな反応速度を持つ。また、BWR制御棒材料間の反応であるB₄C/ステンレス鋼反応も、液相が形成される約1,480 K以上では大きな反応速度を持ち、シビアアクシデント時には早期に制御棒が溶融しBWR集合体溶融過程で大きな影響を与えると予想される。原子炉運転条件では、化学的な相互作用をほとんど起こさないUO₂とジルカロイ被覆管も1,700 Kを超える高温では反応し、界面には徐々に液相が形成される。

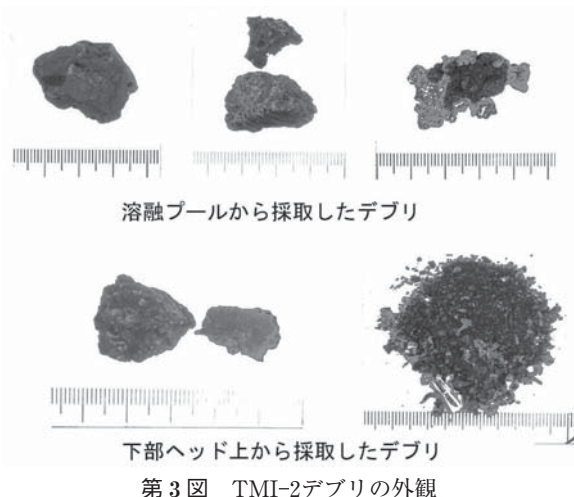
1980年代を中心に燃料集合体の損傷及び溶融過程を調べる大規模な実験が、研究用原子炉を用いて精力的に実施された。これらの実験により、燃料体の温度変化、燃料の損傷と溶融の進展、スパーサーグリッド上のブロック形成(冷却材流路の閉塞)、上部炉心支持構造物の損傷、再冠水時の大量のエネルギーと水素の発生、溶融した燃料の崩落が示され、さらに低融点の制御棒材やスパーサーグリッドの溶融が集合体溶融に極めて大きな影響を与えることが確認された。

IV. 溶融燃料の形態と特性

1. 外観

事故後の TMI-2 では、炉心位置によりデブリの存在状態が異なる。例えば、上部炉心では岩石状のデブリが堆積しており、スコップ状のジグを用いてデブリが取り出された。一方、溶融プールあるいはそれを囲むクラスト領域では、溶融した炉心物質が層状あるいは大きな塊状に固化しており、ドリリングによる破碎の後にデブリが取り出された。このため、取り出されたデブリの形状は必ずしも炉心にあった状態のものではない。

原子力機構が入手したデブリの典型的な外観を第 3 図に示す。多くは溶岩のように黒あるいは灰色でごつごつした表面を持った岩石状であるが、金属光沢を示すものもあった。大きさは砂のように細かなものから 100 mm 程度の岩石状のものまで様々であった。



第 3 図 TMI-2 デブリの外観

2. 密度

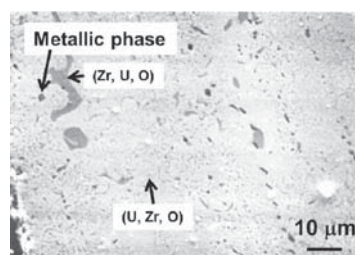
原子力機構において 32 個のデブリを対象とした密度測定を行った。最小値は $6.32 \times 10^6 \text{g/m}^3$ 、最大値は $10.49 \times 10^6 \text{g/m}^3$ であった。比較的密度の小さなものは金属を多く含むデブリや金属の酸化物(例えば、被覆管に用いられているジルコニウム (Zr) の酸化物 ZrO_2 の密度は $5.56 \times 10^6 \text{g/m}^3$) であり、比較的密度の大きなものは金属と反応していない二酸化ウラン (UO_2 : 密度 $10.49 \times 10^6 \text{g/m}^3$) や制御棒材料である銀の破片、またはそれらを多く含むデブリであると考えられる。デブリ間の重量の差 (0.4 ~ 1,603 g) を考慮した加重平均は、 $7.38 \sim 8.79 \times 10^6 \text{g/m}^3$ であった。後述するように、デブリの多くは UO_2 と ZrO_2 の混合物であり、密度の加重平均値はこれを反映しているものと考えられる。採取位置による差は小さいが、金属質のデブリが多いと言われるクラスト領域と下部ヘッド上の固化領域でデブリの密度は比較的小さい。なお、断面に占める空孔の割合 (空孔率) は 4.6 ~ 38.0% であったが、空孔率と密度との間に相関は見られなかった。

3. ミクロ組織

典型的なセラミックスデブリの切断面を第 4 図に示す。これは下部ヘッド上に固化した領域から採取されたものである。デブリの多くは図に示すように ($\text{U, Zr})\text{O}_2$ を主成分とするセラミックス質であり少量の金属を含んでいる。セラミックスデブリは多数の空孔を含有するが、前述のように、空孔率はサンプルごとに異なり、またサンプル内の位置によっても異なった。

炉心中央に形成された溶融プールを囲むクラストの下部から採取されたデブリの断面⁹⁾を第 5 図に示す。積み重なった燃料ペレットが一旦溶融し固化した金属によって取り囲まれている。炉心上部から落下してきた溶融金属がこの位置で固化しつつ、燃料被覆管を溶解しさらに燃料ペレット内部のクラックに流入し、 UO_2 を徐々に溶かしつつ固化していった様子がこの写真から推測できる。

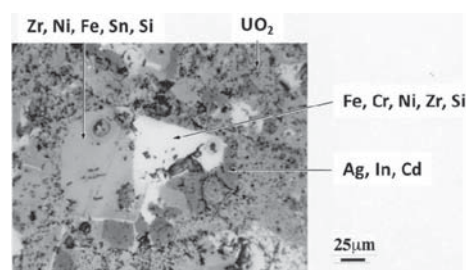
金属を多く含むデブリの断面の例を第 6 図に示す。大きく分けて 4 つの領域からなっている。写真中、最も明るく見える領域は Fe, Cr を主成分とし Zr を含む。表面が滑らかでグレーに見える領域は Zr を主成分とし Ni 等を含有する。恐らく、前者は制御棒を構成するステンレス鋼とジルカロイが反応して、後者はジルカロイとインコネル (グリッドスペーサ) が反応してできた生成物であると考えられる。このほか、制御材料である低融点の銀も観察され、炉心溶融初期に制御棒等で生じた溶融物が燃料棒を溶融し、燃料集合体内に溶融が進展していった様子がこの断面からも推測できる。



第 4 図 下部ヘッドから採取したセラミックスデブリの断面ミクロ組織



第 5 図 クラストから採取したデブリの断面⁹⁾



第 6 図 下部ヘッドから採取した金属を多く含有するデブリの断面ミクロ組織

4. 化学組成

第4図及び第6図にそれぞれ典型的なセラミックス及び金属リッチなデブリのマイクロ組織を示したが、多くのデブリは(U, Zr)O₂を母相とするセラミックスデブリである。電子顕微鏡を用いた元素分析やガンマ線分析⁶⁾から、下部ヘッド上で固化したセラミックスデブリ中のU濃度は、64~88 wt%であることが示されている。このU濃度は、TMI-2炉心の初期装荷量(UO₂:約75%, ジルカロイ:約18%, その他の炉心構成材料:約7%)がほぼ均一に混合した濃度に近い。下部ヘッド上で固化したデブリは、炉心中央で炉心材料が溶けて混合して形成された溶融プールから流れ落ちたものと考えられ、上のU濃度はこの溶融進展を裏付けるものである。セラミックスデブリ中には微量の金属が析出することがあった。また、炉心溶融初期に溶けて落下したと考えられるAg-In-Cd合金やFe-Crを主成分とする合金の破片が砂粒や岩石状のセラミックスの間に見つかることがあった。第1表¹⁰⁾は、欧米で行われた分析結果も含め、燃料や構造材等の炉心物質が事故によってどのように化学変化したかをまとめたものである。

TMI-2事故においては、加圧器圧力逃し弁からの1次系冷却材放出が続き、炉心は次第に露出したが、炉心上部や中央部は再冠水するまでの間、水蒸気中で高温になった。このため、炉心にあった金属の多くの割合が酸化された。例えば、燃料被覆管中のZr約24tは、その約43%が酸化されたと見積られている。この酸化に伴って、発生した水素の量は450 kg程度である。したがって、炉心の雰囲気は水蒸気と水素の混合雰囲気になった。事故時における炉内雰囲気の設定は炉心で生じる化学反応やFPの放出移行挙動を評価する上で重要である。

炉心構成材料中に含まれる元素の酸化状態から事故時における炉内の酸素ポテンシャルが推定されている⁹⁾。OECD/CSNIのTMI-2共同研究で得られた元素の酸化状態に関する情報は以下ようになる。Ag, In, NiおよびSnは金属状態で存在した。Feは金属と酸化物の

第1表 TMI-2事故における炉心構成材料の化学形変化¹⁰⁾

炉心構造物	事故前の化学形	事故後の化学形
燃料	UO ₂	1. UO ₂ 2. ZrO ₂
被覆管	ジルカロイ(Zr)	3. UO ₂ -ZrO ₂ 共晶
制御棒被覆管	ステンレス鋼 (Fe-Cr-Ni)	Feを主成分とする相 1. Fe, Ni, Cr等の酸化物 2. Fe-Sn, Fe-Ni系共晶
制御材料	Ag-In-Cd	1. UO ₂ -ZrO ₂ 中のAg粒子 2. Fe系溶融物中にCrを核としてAgが析出
可燃毒物	Al ₂ O ₃ -B ₂ O ₃	1. Ag主成分相へのAl移行 2. Bは未検出
グリッド スペーサー	インコネル (Ni-Cr-Fe)	Fe-Cr-Ni混合酸化物として ZrO ₂ -UO ₂ 溶融物中に分散

両方の状態で検出された。Crは一般に酸化物となっていた。これらの結果と酸化物生成の標準自由エネルギーを合わせ考えると、1,500~2,300 Kの温度範囲で、TMI-2炉心の酸素ポテンシャルは約-150 kJ/molと約-500 kJ/molの範囲にあったと推定された。

5. 残留FP

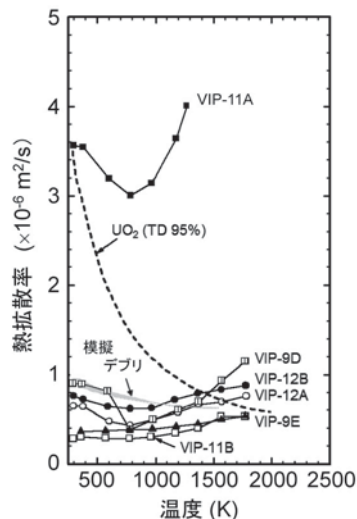
照射済燃料には核分裂生成物(FP)が相当量含まれており、事故時に燃料から放出される条件と量を知ることが重要である。このため、事故条件における燃料からのFP放出を調べる実験が行われている¹¹⁾。一方で、TMI-2で事故を経験した燃料に残存したFP量に関するデータも蓄積されている。原子力機構及び米国アイダホ国立研究所(INEL)において行われたデブリに対するガンマ線分析の結果^{6,12)}から、デブリ中のFP残留について以下の知見が得られている。

セシウム(Cs)は揮発性が高く、また半減期が比較的短く収率(核分裂1回あたりに生成する割合)が高く環境への影響が大きいと、そのシビアアクシデント時の挙動が注目される。上部炉心から採取されたTMI-2デブリ中のCs残留割合は、比較的大きく数%から50%、平均で17%であった。炉心上部では事故時の温度が比較的低温で、溶融せずに破碎、落下した燃料ペレット破片が含まれていることを反映していると考えられる。これに対し、一旦溶融し溶融プールや下部ヘッド上で固化したデブリ中のCs残存割合は平均で5%程度であり、1%以下のデブリも少なくない。この測定結果は、燃料ペレットが溶融した場合にはほとんどのCsが放出されることを示しており、実験的に調べられた燃料からのCs放出挙動に関する知見¹¹⁾と一致する。

原子力機構におけるガンマ線分析は事故から15年後に行われたために、Cs-134, Cs-137, Eu-154, Co-60以外の核種の放射能は低く検出限界以下であった。一方、INEL等で行われた測定では他の核種についてもデータが取得されている。それによれば、一旦溶融し下部ヘッド上で固化したデブリにおけるSr-90, Ru-106, Sb-125, I-129, Ce-144, Eu-154の残存率はそれぞれ、約90~100%, 3~10%, 3~10%, 0~11%, 90~100%, 65~80%であった。

6. 熱特性

原子力機構では、TMI-2デブリと「模擬デブリ」を用いてデブリの熱特性を測定、評価した⁵⁾。模擬デブリは、炉心構成材料の初期炉心装荷量を参考に、UO₂, ZrO₂, Fe₃O₄, Cr₂O₃, NiO, Agの粉末を混合し焼結させたものである⁴⁾。熱特性測定装置が必ずしも照射済燃料に対応していなかったことから、模擬デブリを製作し、その熱特性を測定することでデブリの熱特性を推定した。測定あるいは測定値を用いて評価した項目は、熱膨張率、



第7図 TMI-2デブリと模擬デブリについて測定された熱拡散率の温度依存性

比熱，熱拡散率，熱伝導率，溶融温度である。

第7図に，TMI-2デブリと模擬デブリについて測定された熱拡散率の温度依存性を示す。金属を多く含むデブリ（試料番号VIP-11A）を除き，1,500 K以下の低い温度では，セラミックス質のTMI-2デブリ（試料番号VIP-9D, VIP-11B, VIP-12A等）の熱拡散率は UO_2 （密度95%）の熱拡散率¹³⁾に比べて明らかに小さく，熱を伝えることが分かった。TMI-2デブリに多く含まれるZrの酸化物の熱拡散率が小さいこと，TMI-2デブリには熱拡散率を低下させる空隙が含まれていることが UO_2 とTMI-2デブリとの間の熱拡散率の大きな差の原因と考えられる。

また，模擬デブリの溶融温度は約2,840 K（約2,570°C）であり，同じ ZrO_2/UO_2 比を持つ $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ の液相温度とほぼ一致した。模擬デブリは UO_2 や ZrO_2 以外の炉心構成材料を重量比10%以下含むが，溶融温度においてはそれらの影響は小さいと考えられる。

V. おわりに

シビアアクシデント時の炉心溶融進展を評価するため，また福島第一原子力発電所における炉内状況を把握するためには，溶融し固化した燃料（デブリ）の特性を把握する必要がある。原子力機構は，TMI-2から採取したデブリを入手し分析を行い，外観，密度，マイクロ組織，化学組成，残留核分裂生成物，熱特性といったデータを取得した。本稿においては，その結果を中心にデブリの性状や特性について解説した。

福島第一原子力発電所(BWR)とTMI-2(PWR)は炉型が異なり，炉心の形状や炉心構成材料の種類や重量比が異なる。TMI-2デブリの分析から得た知見を参考にしつつ，BWR特有の事故進展やデブリ特性の違いを調べることで，福島第一原子力発電所の事故進展や炉内状況

の解明が進み，計画通りに損傷燃料取出し等の廃止措置が完了することを強く望む。

—参考資料—

- 1) C.S. Olsen, *et al.*, "Materials interactions and temperatures in the three mile island unit 2 core," *Nucl. Technol.*, **87**, 57-94 (1989).
- 2) J.R. Wolf, *et al.*, *TMI-2 vessel investigation project integration report*, NUREG/CR-6197, March 1994.
- 3) K.B. Stadie, "VIP—An international assessment of the challenges to the TMI reactor pressure vessel," *TMI-VIP project, Achievements and significant results*, OECD documents, p.21-31 (1994).
- 4) H. Uetsuka, F. Nagase, "Companion sample examination and related study at JAERI", *ibid.*, p.269-280.
- 5) F. Nagase, *et al.*, "Thermal properties of Three Mile Island Unit 2 core debris and simulated debris," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **49** [1], 96-102 (2012).
- 6) 上塚, 永瀬, 鈴木, TMI-2デブリに対するガンマ線分析, JAERI-Research 95-084, (1995).
- 7) P. Hofmann *et al.*, "Reactor core materials interactions at very high temperatures", *Nucl. Technol.*, **87**, 146-186 (1989).
- 8) G. Schanz, *et al.*, "Information on the evolution of severe LWR fuel element damage obtained in the CORA program", *J. Nucl. Mater.*, **188**, 131-145 (1992).
- 9) D.W. Akers, *et al.*, *TMI-2 examination results from the OECD/CSNI program*, EGG-OECD-9168, April 1992.
- 10) P.D. Bottomley, M. Coquerelle, "Metallurgical examination of bore samples from the three mile island unit 2 reactor core", *Nucl. Technol.*, **87**, 120-136 (1989).
- 11) A. Hidaka, "Outcome of VEGA program on radionuclide release from irradiated fuel under severe accident conditions," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48** [1], 85-102 (2011).
- 12) D.W. Akers, *et al.*, *TMI-2 core bore examinations*, GEND-INF-092, January 1992.
- 13) M. Hirai, "Thermal diffusivity of $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ pellets," *J. Nucl. Mater.*, **173**, 247-254 (1990).

著者紹介



永瀬文久(ながせ・ふみひさ)
日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)事故時燃料挙動評価

スマートグリッドの現状と今後の展望

電力中央研究所 栗原 郁夫

ここ数年の間にスマートグリッドへの関心が世界中で急速に高まった。様々に語られるスマートグリッドには共通的な要素があるものの、国や地域によってイメージが多少異なっていたりする。本稿では、スマートグリッドとはどのようなものかを、共通する概念をベースに整理するとともに、これが台頭してきた背景について概観する。ついで、スマートグリッドを構成する主要なハード・ソフトの要素とともに、海外でのスマートグリッドへの取り組み状況について述べる。わが国では東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、電力システムのあり方などに不透明感が高まってはいるものの、スマートグリッドそのものについては、より関心が高まるとともに、その実現に向けた取り組みも加速しているといえる。

I. スマートグリッドの概念と台頭してきた背景

1. スマートグリッドとは

スマートグリッドについての共通した定義は現時点ではない。第1表は代表的な定義の例で、いずれも幅広い概念であり、力点の置き方や表現法が様々である¹⁾。

ただし、スマートグリッドには共通した概念があり、それらはおおよそ以下の通りとなる。

- ・電気と情報通信技術 (ICT) とを融合
- ・供給サイドと需要家サイドの相互連携
- ・再生可能エネルギーの大量導入
- ・電気の効率的利用 (省エネ, CO₂削減, ピーク削減等)

スマートグリッドのイメージを描くと第1図のようになる。最も基本となる概念は、電気とICTとの融合である。分散型電源やサービスプロバイダーなど、今後の大量導入や新規参加が予想される要素も含めて、電気の供給と利用を取り巻くすべての環境がICTでつながれることになる。

第1表 スマートグリッドの定義例

国・機関	内容
米国 (DOE)	デジタル技術を用いて大規模発電、流通設備、消費者、分散型電源・蓄電装置からなる電力システムの信頼性、セキュリティ、効率 (経済およびエネルギー) を向上させるもの。
欧州 (European Technology Platform)	持続可能、経済的かつセキュアな電力供給を行うため、接続されるユーザ (発電者、消費者および両方を兼ねる者) の活動をインテリジェントに統合できる電気ネットワーク。
IEC (国際電気標準会議)	双方向通信と制御技術、分散計算機、関連センサ (ユーザの構内に設置された装置を含む) を活用した電力ネットワーク。

Current Status of Smart Grid and Future Prospects : Ikuro KURIHARA.

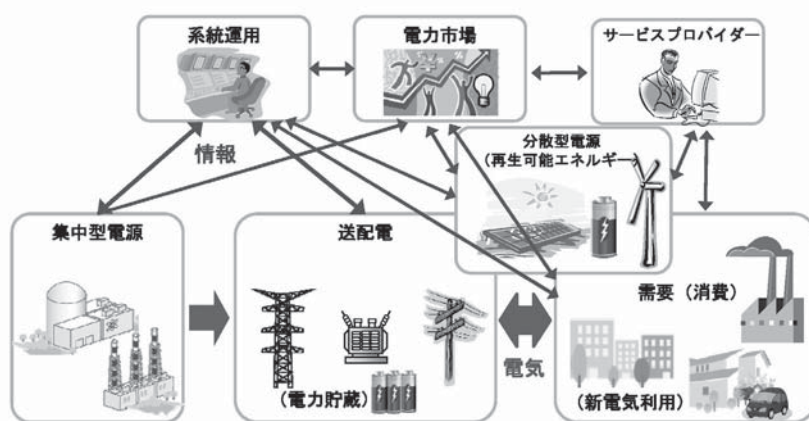
(2012年 8月3日 受理)

2. スマートグリッドが台頭してきた背景

スマートグリッドという言葉が用いられ始めたのは、米国において2003年8月の北米大停電の頃である。米国のDOEは同じ年の7月に“GRID 2030”という電気の次の100年に向けた国家ビジョンを提示している。その1か月後に大停電となってしまったのは皮肉であるが、そのビジョンの中にスマートという用語が出ている。しかし、ここでのスマートは個別的な用い方であり、しかも表の中の項目として記述されるといったレベルで、一つのまとまった概念にはなっていなかった。その後、大停電を背景に明らかになった米国の電力システムの課題を踏まえて、様々な研究機関や政府、民間組織などが新しい次世代の電力システム概念を次々に提案、発展させていった。代表的なものに、EPRI (Electric Power Research Institute) のIntelligridやDOEのModern Gridなどがある。一方で、これらを普及させるために、Grid Wiseアライアンスなどの組織が結成された。こうして、2007年にはEnergy Independence and Security Actにおいて、スマートグリッドが政策の一つとして掲げられることとなった。この法律の中では、研究開発や標準化、セキュリティなどに対応していくことが記述されている。

欧州においてもスマートグリッドが叫ばれるようになったのは2005年頃からである。欧州においては、当初は再生可能エネルギーの大量導入への対応といった面が強かったが、その後は多面的な目的になってきている。海外のスマートグリッドの動向については後章で詳述する。

スマートグリッドの狙いや、それによって可能となる新たな需給環境について、主に欧米の様々な文献等で共通的に挙げられている項目は、概略、第2表の6項目に整理される²⁾。このうちどれに重点が置かれるかで、スマートグリッドもいくつかの種類に分類される。従来にな



第1図 スマートグリッドのイメージ

第2表 スマートグリッドの狙い・達成される需給環境

狙い・達成される需給環境	内容
① 消費者の能動的参加	・消費者のエネルギー利用選択肢の拡大 ・消費面も含めたエネルギー供給・利用の最適化
② 再生可能エネルギー電源を含む、すべての電源の協調	・風力、太陽光、(分散型)電力貯蔵などの導入、既存電源との協調運用、有効活用
③ 信頼度・電力品質の向上 (ITセキュリティ、災害対応含む)	・デジタル社会に対応した電力品質 ・系統擾乱や自然災害、意図的攻撃などにも強い系統
④ 設備の最適化、運用・管理の効率化	・アセット利用(含保全)の最適化、自動化による系統の効率的運用 ・投資の効率化 ・損失低減
⑤ 新サービス、市場の活性化	・よりロバスタな電力市場 ・消費者参加のオプション提供 ・新たなビジネスケースの創出
⑥ 環境問題への対応	・クリーンなエネルギー利用、環境系技術の享受 ・省エネ

第3表 スマートグリッドのベネフィット

消費者にとってのベネフィット	電力会社にとってのベネフィット
<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー利用選択肢の増加 ・エネルギー利用情報の入手(見える化) ・電気料金の削減(上記の結果としての) ・電力会社との連携 ・停電の減少 ・環境価値の把握と反映 ・新サービスの享受 	<ul style="list-style-type: none"> ・設備投資削減、投資効率化 ・運用・保守コストの低減 ・信頼度、電力品質の向上 ・CO2排出の削減 ・再生可能エネルギーの活用 ・消費者との連携 ・新サービスの提供・活用
環境にとってのベネフィット	社会・経済にとってのベネフィット
<ul style="list-style-type: none"> ・再生可能エネルギーの(大量)導入 ・CO2排出の削減 ・損失低減 ・設備投資削減(省資源) ・省エネインセンティブの提供 ・環境優位技術の積極導入(電化の推進) 	<ul style="list-style-type: none"> ・グリーンジョブの創出 ・ベンチャー分野への投資 ・新産業、新サービスの創出 ・標準化推進 ・グローバルなビジネス展開 ・CO2排出の削減、エネルギー利用効率化 ・高度かつセキュアな低炭素社会電力インフラの構築

かった新しい観点として特に注目されるのは、消費者の参加、再生可能エネルギー電源の大量導入、新サービスといった点である。地球環境(温暖化)問題への対応、景気・雇用対策や新たな成長戦略としての期待といった側面もある。

スマートグリッドは、電力の供給者、消費者といった従来の単純な構造から、様々なステークホルダを電気のバリューチェーンの中にもたらす。スマートグリッドのベネフィットはステークホルダによって異なる。第3表は「消費者」、「電力会社」、「環境」、「社会・経済」の観点から主なベネフィットを整理したものである。プラットフォームの構築であることから社会的な面でのベネフィットや、若干抽象的なベネフィットが多いのも事実であり、これがスマートグリッドへの設備投資を消極的・困難化させている面もある。

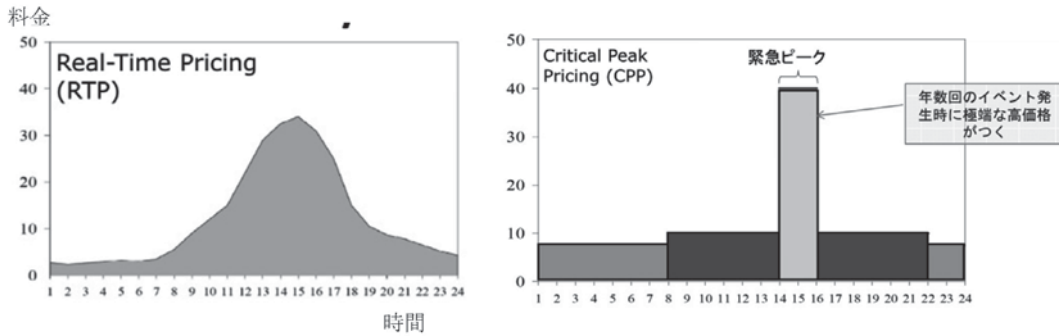
II. スマートグリッドを構成する主要な要素

スマートグリッドはハードとソフト技術からなる総体である。スマートグリッドにとって不可欠と考えられている主要な要素の幾つかについて述べる。

1. スマートメータ

スマートメータはスマートグリッドにとって最も重要な要素の一つといってもよい。スマートメータは双方向の通信機能のついた電力量計であり、1時間~15分ごとの電力使用量の計測を行う。その他に遠隔操作による電気の入り切りや、メータ単独ないしは後述する HEMS (Home Energy Management System) と連携して様々なサービスオプションを提供することなどが考えられている。

スマートメータによって実現できる重要なサービスに電気使用量の「見える化」と「デマンドレスポンス(DR)」がある。見える化は前日の使用量の提供からリアルタイムの使用量まで幾つかのタイムスパンが考えられるが、いずれにせよ、気づきによる節電や省エネなど、需要家内の電気の有効利用に役立つ。デマンドレスポンスは電気料金を時間に応じて変化させることで需要に働きかけ、需要家と電力会社の双方にとって望ましい需給状況を作るものである。基本的には、ピーク電力を削減することが電力会社にとっては、高コストの電源運用や新たな電源の増設の抑制にとって有効であるため、ピークを削減することが大きな狙いとなる。具体的な料金メニューとしては、第2図に示すように、電気の使用状況に応じた時間帯別の電気料金、ピーク時に極端に電気料金を上げるクリティカルピーク料金、時々刻々料金を変



第2図 デマンドレスポンス(DR)の料金体系の例

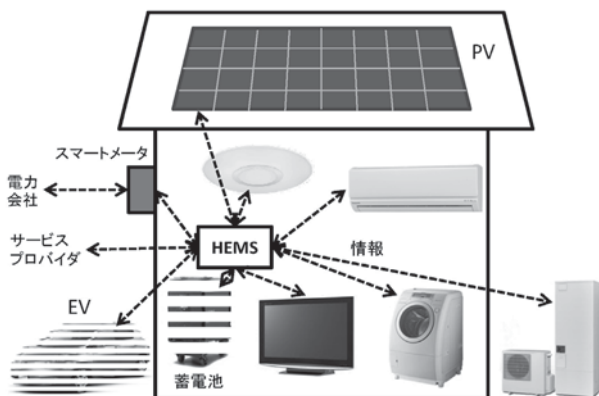
化させるリアルタイム料金などがある。このように時間に応じた料金を設定し、それによる需要変化を含めて精算するにはスマートメータが不可欠となる。

2. HEMS, BEMS

HEMS, BEMS (Building Energy Management System) は、それぞれ住宅、ビルのエネルギー管理を行うシステムのことである。個別の電力機器(負荷機器だけでなく太陽光発電や蓄電池など)との情報連携を行い、単独でも電力の見える化などで機能するが、第3図のように、スマートメータと連携してデマンドレスポンスに対応して、電気料金に応じた個別機器(スマート家電など)の運転や制御などを行うことも考えられる。なお、HEMS, BEMSによるエネルギーが管理された住宅やビルをスマートハウス、スマートビルディングなどと呼ぶこともある。

3. 分散型電源(再生可能エネルギー発電)

需要家側に設置される太陽光発電(PV)、燃料電池、蓄電池(電気自動車(EV)を含む)や、系統側の適当な地点に設置される太陽光発電(メガソーラー)、風力発電(WP)などの分散型電源もスマートグリッドの重要な要素である。特にこれらが大量に導入されたもとで、安定的かつ効率的の供給を実現することがスマートグリッドの主要な役目の一つでもある。

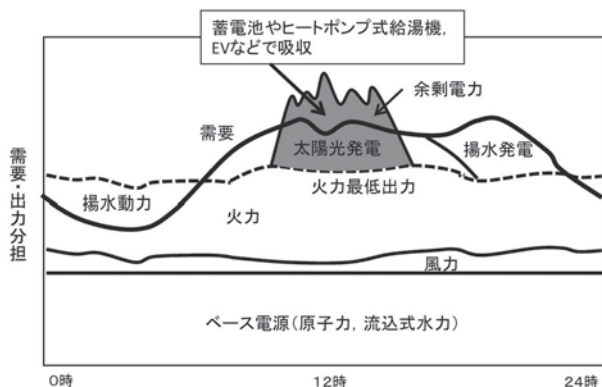


第3図 HEMSとスマートハウス

PVが住宅に大量に設置されると配電線の電圧上昇を引き起こし、電圧管理が難しくなる。また、作業などで配電線を停止した場合にも、配電線の単位で負荷とPV発電力がバラバラになると電圧が残ってしまい(単独運転)、保安上問題が生じる。このため、現状ではPVの電力変換装置(PCS)には単独運転防止装置が設置されたり、配電線電圧管理のための設備が設置されたりしている。単独運転防止は停電時にもPVを停止させることになるが、将来のよりスマートな形としては、停電時にもPVや貯蔵設備で供給可能な範囲については供給を継続することにもなる。この際にはEVが電力貯蔵設備として機能することもある。これは、家庭内のみの場合(V2H: Vehicle to Home)や、ある地域を対象とする場合(V2G: Vehicle to Grid)もあろう。V2Gの場合は多数のEVで再生可能エネルギー発電の変動を吸収するなど、系統の安定化としての役割をも期待した概念である。ただし、こうした状況は、スマートグリッドといってもかなりレベルの進んだ状況(高度な配電自動化を伴う)ということになる。

再生可能エネルギー発電が大量に導入されると、自然任せの出力変動や基本的には出力制御が困難であることなどから需給運用上の課題が生じる。例えば、出力変動に対して、これを補償するために火力発電の調整力が現状以上に要求されるようなことがありうる。また、バックアップ電源が必要となる。これに対して、単に火力発電を増強するのではなく、より広域的な運用で変動を吸収したり、上述したようにEVを含めた貯蔵設備の活用、デマンドレスポンスなどによって対応するのがスマートグリッドのアプローチである。なお、これには高度な出力予測技術等が必要となることにも留意しなければならない。

また、PVの大量導入は需要の少ない年末年始や大型連休、春・秋季の土日などに余剰電力を発生させる可能性がある。従来電源の最低出力にPVの発生電力を加えると需要を上回ってしまう可能性がある。これに対しては、PVの出力抑制がもっとも簡単な方策として挙げられるが、よりスマートな方策となると第4図のように、蓄電池での貯蔵、EVやヒートポンプ式給湯機などを運



第4図 PV 余剰電力の発生とスマートな対応

転することで余剰を吸収するなどが考えられる。また、この時間帯に電気料金を下げることで新たな需要を創出することなどもありうる。こうしたことを容易に可能とするプラットフォームがスマートグリッドである。

4. センサと ICT

スマートグリッドにおいては ICT インフラが必須である。すなわち、センサ、通信ネットワーク、情報処理装置、制御装置などが主要な構成要素となる。わが国においては、電力系統側の ICT インフラは既に高度に整備されているが、分散型電源の大量導入や高経年設備の増加などに伴い、今後、ICT インフラの更新や増強を考慮することも重要である。一方、需要側の ICT インフラについては、これまでほとんど整備されていなかったため、分散型電源や需要家エネルギーの計測・管理、デマンドレスポンスなどに対応した整備が必要である。

ICT インフラの構成要素のうち、センサに関しては、広域系統連系の強化が求められていることから、広域系統監視用センサの充実が重要になると考えられる。現在、電流や電圧、周波数、位相角などの系統状態量に、GPS の高精度時刻情報に基づくタイムスタンプを付して、計測データを出力するフェーザ計測装置 (PMU: Phasor Measurement Unit) が標準化・商用化されている。広域系統連系がなされている欧米などでは、各所に配置した PMU を通信ネットワークで連携した広域計測システムの導入が進んでいる。

配電系統ではセンサ・通信機能付き開閉器の導入が進められているが、さらに柱上変圧器などからも状態情報を収集し、需要側のセンサであるスマートメータからの情報とも組み合わせることで、潮流や電圧を最適に分散制御できる能動的な配電系統を実現できる可能性がある。

通信ネットワーク技術に関しては、汎用で低コストのルータやスイッチを用いたインターネットプロトコル (IP) 化が進んでいる。スマートメータ用通信ネットワークでは、都市部を中心に多数のメータを収容するため、マルチホップ無線方式を適用し、配電柱上の装置でデー

タを集約した上で営業所などまで幹線系光ファイバにより伝送する形態が導入され始めている。また、集合住宅などでは電力線通信も適用されている。

電力系統側の通信ネットワーク技術としては、いかに高速かつ高信頼な広域 IP 系ネットワークを構築するかが課題である。リアルタイム性と信頼性の要件が極めて高い系統保護制御用に、GPS に代わって高精度な時刻同期を通信ネットワーク上で確立する方式 (IEEE 1588) の導入が検討されている。また、制御・通信機器の相互接続性が重要になっており、設備監視制御用のデータ定義を含む通信プロトコルの標準化 (IEC 61850 など) も進められている。

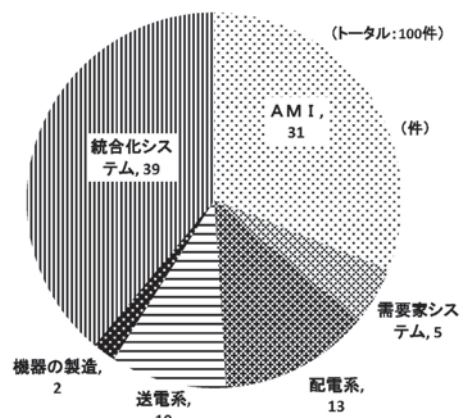
Ⅲ. 海外におけるスマートグリッドの動向

1. 米国

米国においてスマートグリッドへの取り組みが本格的になったのは、オバマ政権のもと、地球環境問題やリーマンショックに対する景気刺激策、新たな成長戦略の重要な要素などとしてエネルギー政策に、より強く組み込まれたことによる。特に2009年の景気刺激策 (ARRA: American Recovery and Reinvestment Act) の中で、45億ドルがスマートグリッドに投入されたことで、関連企業の期待は一気に高まった。

ARRA におけるスマートグリッドの補助金は、大別するとプロジェクトの推進とデモンストレーションになるが、プロジェクトのカテゴリー別の内訳は第5図のようになる。単独プロジェクトとしてはスマートメータの設置 (AMI: Advanced Metering Infrastructure) が最も多い。

米国では特に消費者の能動的参加がスマートグリッドの重要な項目となっており、そのためにスマートメータの導入が進んでいる。また、DR の実証試験なども盛んに行われている。ただ、エネルギーマネジメント市場は、現状ではスマートメータがすべての消費者に対して完備されたわけでもなく、さまざまなベンチャー企業が独自



第5図 ARRA 補助金プロジェクトの内訳

の方法で取り組むなど、やや混戦状態であり、先に、電力の見える化を Power Meter として提供した Google も 2011年9月でサービスを停止している。また、マイクロソフトの家庭用エネルギー管理システム(Hohm)も2012年5月で終わっている。ただ、Google は家庭内のエネルギー管理から完全に手を引いたわけではなく、Android 端末を用いて家庭内のエンターテインメントを含むあらゆる機器を操作するような Android@Home なる概念も提案している。

米国で精力的に進められている作業に、スマートグリッドに係わる標準化活動がある。スマートメータや双方向通信などには様々な企業が参入している。このため、標準化がなされていないと相互運用性において大きな問題となる。標準化は国立標準技術研究所(NIST: National Institute of Standards and Technology)が中心となって進めている。これまでに、標準化に向けたロードマップの作成、スマートグリッド標準の検討と調査などを進め、75の既存標準の抽出、スマートグリッド相互運用性パネル(SGIP: Smart Grid Interoperability Panel)における優先行動プランとして、21項目の検討などを行っている。標準化に関わるもう一つの重要項目として IT セキュリティがある。IT セキュリティについては上記とは別の枠組みで検討が進められており、具備すべきセキュリティガイドラインがまとめられている。

スマートグリッドというところの場合、需要家サイドに目が行くが、一方で従来の電力システムの高度化も進んでいる。特に再生可能エネルギー発電として WP は地域によっては今後大量に導入されることが見込まれ、従来型の送電線増強なども進んでいる。例えば、テキサス州では CREZ(Competitive Renewable Energy Zones)と呼ばれるプロジェクトが進行している。これはテキサス州の風況の良い地点からの風力発電出力を需要地に運ぶための送電線の増強プロジェクトであり、2013年に完成を目指している。

2. 欧州

欧州におけるスマートグリッドは欧州技術プラットフォーム(European Technology Platform)の中の研究開発として、第7次フレームワークプログラム(7th Framework Program: 2007-2013)においてスマートグリッドが取り上げられたことによる。その後は、欧州の目指す、いわゆる20/20/20計画、すなわち2020年までに

- ・温暖化ガスを1990年レベルの20%削減
- ・再生可能エネルギーを20%導入
- ・エネルギー利用効率を20%向上

を達成するための不可欠な手段の一つとしてスマートグリッドが位置づけられている。これらを達成する計画は戦略的エネルギー技術計画(SET-plan: Strategic Energy Technologies Plan)と呼ばれている。

欧州におけるスマートグリッド関連プロジェクトは米国と同様に、様々な視点から進んでおり、費用的にも米国の ARRA による支援策とほぼ一致する(1€=1.3\$)。スマートメータについてのプロジェクトが比較的多く、イタリアについてはすでにスマートグリッドが現在のブームになる前に全ての需要家への導入が完了している。ただし、スマートグリッドの主眼とする DR など、需要家の能動的参加を意図したものでは必ずしもない。

欧州では再生可能エネルギーの大量導入に対して送電線や配電線の増強の重要性が高まっている。幾つかの送電線プロジェクトが提案され建設が進んでいるが、反対運動などで進んでいないものも多い。また、バックアップ電源の必要性も高まり、電力市場のもとでどのようなインセンティブを与えるかが課題となっている。

3. 中国、韓国

中国の電源は西部、北部に多く、需要地は東の沿岸部に多い。このため、急速に増大する沿岸部の需要に対して大電力を輸送する必要がある。中国ではこれを超々高圧送電(UHV: Ultra High Voltage)によって実現することとしている。一方、供給サイドの拡充とともに、需要家サイドの取り組みにも積極的である。このため、中国では“Strong and Smart Grid”と呼んでおり、以下の3つのステップで進めている。

- ・2009-2010 計画、パイロットプログラム
- ・2011-2015 試験的運用、双方向サービス、技術的ブレークスルー
- ・2016-2020 Strong & Smart なシステムの構築、スマートメータの大規模普及

一方、韓国では、国内的にもシステムのスマート化を着実に進めていくものの、スマートグリッドを産業活性化の一つとして捉えているところがある。韓国では3つのフェーズを考えている。すなわち、

- ・フェーズ1(2010-2012): 開発と運用のデモンストレーション
- ・フェーズ2(2013-2020): 広域への拡大(消費者のインテリジェンス)、スマートメータの100%導入
- ・フェーズ3(2021-2030): 国としてのスマートグリッド化(全システムのインテリジェンス)

現在はデモンストレーションの段階にあり、その一つとして済州島においてスマートグリッドのテストベッドを構築している。

IV. わが国のスマートグリッド

わが国のスマートグリッドへの取り組みは、欧米で概念が掲げられた時期には、そうした名称のもとではほとんど行われていなかった。その後、米国を中心にスマートグリッド・ブームになった頃からは、ほぼ1年程度の遅れをもって、国等での取り組みが始まった。

現在、わが国ではスマートグリッドをめぐる以下に示すような幾つかの並行した流れがある。既に言われているように、わが国の電力系統自体はICT導入がかなり進んでおり、実際、配電自動化のレベルも欧米に比べて高い。そのため、わが国におけるスマートグリッドの取り組みは再生可能エネルギーの大量導入や需要家との連携といった視点が強い。

- ・PV大量導入に向けた系統大での課題検討や対策実証
- ・スマートメータの実証試験と導入計画
- ・スマートメータ、HEMS周りの標準化と関連得意技術を中心とした国際標準化
- ・再生可能エネルギー発電導入のための政策的取り組み
- ・次世代社会システムとしてのスマートコミュニティに対する国、民間の実証と取り組み
- ・東日本大震災以降のエネルギー政策の見直し(再生可能エネルギー、分散型エネルギーシステムの活用、節電・省エネなど)

東日本大震災以前は、わが国のスマートグリッドは特に住宅設置のPV大量導入との関係で語られることが多かった。しかし、東日本大震災以降、PVのみでなく、WPやその他の再生可能エネルギーへの期待とともに、需要家サイドの節電や省エネに対する意識も高まっている。こうした意味において、わが国にとって、スマートグリッドへのニーズはむしろ加速されていると考えてよい。

スマート化を電力に関わる分野だけでなく、より広げた概念としてスマートコミュニティやスマートシティな

どが提唱されている。電気、ガス、熱といったエネルギーばかりでなく、交通や上下水道などのインフラも含めて全体をある地域単位でスマート化するものである。ここでは再生可能エネルギーなどの地産地消の考え方もある。また、これはエネルギーシステムの分散化という側面ももっている。わが国では、国のプロジェクトとして横浜市、豊田市、けいはんな学研都市、北九州市の4つの地域でスマートコミュニティの実証試験が始まっている。地域の最適化と全体最適化の関係など、十分に明らかになっていない点もあるのは事実であるが、今後、実証を通して現実的な姿が明らかになっていくものと期待したい。

—参考資料—

- 1) <http://energy.gov/oe/technology-development/smart-grid>, <http://www.smartgrids.eu>, <http://www.iec.ch/smartgrid>
- 2) 栗原郁夫, 総論: スマートグリッド技術の動向と展望, 電気評論, 95[10], 15~21(2010).

著者紹介



栗原郁夫(くりはら・いくお)
電力中央研究所 システム技術研究所
(専門分野/関心分野)電力システム工学(系統計画・運用)/スマートグリッド, スマートコミュニティ

日本原子力学会誌 ATOMOS 広告のご案内

一般社団法人 日本原子力学会

「日本原子力学会誌」は、特集・解説・講演等、広く原子力に関わる記事を掲載し、我が国の原子力研究、産業の発展に資するべく、努力しております。学会誌は毎月約8,000部が発行されており、電力、メーカー、大学、研究機関を中心とする会員および賛助会員の原子力関係者はもとより、広く原子力関係機関、市町村、マスコミ等にわたっております。本誌への広告掲載は、発展の一助になるものと信じておりますので、ぜひ、広告の掲載をお願い申し上げます。

■賛助会員料金(消費税別)

表2	150,000円	前付	110,000円
表3	140,000円	後付	100,000円
表4	190,000円	差し込み	230,000円

■一般料金(消費税別)

表2	160,000円	前付	120,000円
表3	150,000円	後付	110,000円
表4	200,000円	差し込み	240,000円

※差し込みは本誌に同封となります。

■上記の金額は、1ページあたりのモノクロの料金です。カラーの場合、1ページあたり120,000円追加となります。

また、版下・フィルム製作費は別途申し受けます。

■過去1年以上毎月出稿された機関につきましては10,000円引きとなります。

■連絡先 105-0004東京都港区新橋2-3-7新橋第二中ビル3F, 一般社団法人日本原子力学会 学会誌編集担当 富田, 野口
TEL 03-3508-1262, FAX 03-3581-6128, E-Mail: hensyu@aesj.or.jp

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

ヒッグス粒子，未知への探求へ第一歩

LHC 実験の最新成果について

東京工業大学 陣内 修

7月4日に発表された新粒子発見のニュースは瞬く間に世界を駆け巡った¹⁾。スイス・ジュネーブで行われているLHC(Large Hadron Collider)実験で得られたデータの最新解析結果から、高エネルギー素粒子物理分野が長年追求めてきたヒッグス粒子らしき新粒子の存在が明らかにされたからだ。本稿では、ヒッグス粒子探索の意義から、探索手法とこれまでの努力、そして最新の結果までを駆け足で巡ってみる。

I. ヒッグス粒子とは何か

素粒子の標準模型では6種類のクォークと6種類のレプトン(どちらもスピンの1/2のフェルミ粒子)が物質を構成する基本粒子であるとし、これらの中に働く相互作用を電弱統一理論(電磁力と弱い力)と量子色力学(強い力)で記述する。力の媒介はゲージ粒子(スピンの1のボソン)が担っていると考える。これらのゲージ粒子の存在・その様々な特性はこれまで四半世紀に渡り実験的に精密検証されており、標準模型は素粒子の振る舞いを記述する基礎理論として確立されてきた。弱い相互作用を担う重いW、Zボソン、およびクォーク・レプトンの質量をこの枠組みの中で与えるために、標準模型にはヒッグス場というものが必要不可欠となる。ヒッグス粒子はこのヒッグス場の存在を裏付ける上で、発見が長年期待されてきた標準模型が予言する最後の粒子である。

1. ヒッグス場と質量

ヒッグス粒子だけ何故それほど特別扱いされるのだろうか?そこにはヒッグス場の特殊性が関係してくる。我々が素粒子と呼ぶ「無限に小さい粒」は、実はそれぞれ対応する「場」というものの上に生じる一種、波のようなものであると考えられている。例えば、電子は「電子場」の上である特定の波長(質量・静止エネルギーに対応する)をもって生成・消滅する波であると考えるのである。同じように、あらゆる粒子には呼応する「場」が存在しているが、これまで知られている粒子(物質粒子、ゲージ粒子)の場は振幅の平均値がゼロで、基本的に場がエネルギーを持たなければ、粒子(波)が存在しないというだけのものである。ところが粒子に質量を与えるとされ

るヒッグス場(スピンはゼロのスカラー場)だけ特別で、振幅に真空期待値と呼ばれるゲタをはいており、平均値がゼロでない。このためこのヒッグス場と粒子との間の相互作用により粒子は質量(=エネルギー)を獲得することになる。つまり我々が真空と呼ぶ、何もないはずの空間は、実はヒッグス場と言うエネルギーのゲタをはいたもので満ち満ちていると考えるのである。このように、これまで知られている種類の粒子(場)とは全く性質の異なる基本場が実在するか、という根源的な問、これを解明するのがLHC実験の課題である。

2. ヒッグス粒子とLHC

想定している最も簡単な標準模型のシナリオでは、各粒子とヒッグス粒子との相互作用の強さが、粒子の質量に比例する。したがって、LHCなどの加速器実験におけるヒッグス粒子生成率、またヒッグス粒子から各粒子への崩壊率は予測することができ、実験でヒッグス粒子らしき粒子が観測されたときは、その粒子の崩壊モード別の強度を測定することで標準模型由来のヒッグス粒子であるかどうかを検証することができる。仮に上記の条件を満たす粒子が発見された場合、「ヒッグス機構」と呼ばれる粒子に質量を与える仕組みと「ヒッグス場」が実在していることを意味し、宇宙誕生直後の真空の相転移に関する重要な情報をえることができる可能性が出てくる。

標準模型由来であった場合、ヒッグス粒子の質量は理論的枠組みから軽いことが要請される。更に既に2011年11月の段階で、LHCで得られたデータから存在の許容される質量領域は114.4-141 GeVと限定されていた。今年順調にLHCの運転が進めば、統計が十分にたまりこの領域にヒッグス粒子が存在するかどうかを判明することができる。2012年はいずれにせよ、LHCにおけるヒッグス粒子研究にとって分岐点となるエキサイティングな年である。

Seeking for Discovery of Higgs Boson, a Big Step Forward towards Unveiled Field; The Latest Results from the LHC Experiments: Osamu JINNOUCHI.

(2012年 8月15日 受理)

II. ヒッグス粒子探索

1. LHC 加速器

ヒッグス粒子探索にとって加速器に要求される2つの最重要要素は、エネルギーと衝突輝度である。LHCでは陽子を7 TeVまで(今年4 TeV)加速して正面衝突をさせる。光の速さの99.9999991%まで加速するため、陽子の軌道を曲げるのは困難である。1,232本もの超伝導二重極磁石による強力な磁場(8.3テスラ)と、大きな円周(27 km)が必要となる。また、LHCではビーム横方向に16 μm の大きさに搾り込んだ約 2×10^{11} 個の陽子の固まり(バンチと呼ばれる)を40 MHzの頻度で衝突させ、ビームの衝突輝度をあげている。上記の数字は設計値であるが、エネルギー、輝度ともに現在設計値の半分程度を実現している。輝度が上がると、1回のバンチ衝突中で幾つもの陽子・陽子衝突事象が起こる。これは観測したい高エネルギー散乱事象に重なって背景事象が多数(現在20-30事象程度)発生することを意味し、測定精度を鈍化させる影響をもつ。このような効果が本格的に気になるほどに、2011年度後半の運転から輝度が大幅に増加したのだが、数々の解析上の工夫により、精度を下げない方策が取られている。第1図は過去3年間の衝突輝度の推移を表している。年を追うごとに、輝度が大幅に増強されていく様子が分かる。これら輝度の90%以上を良好なデータとして各実験で解析に用いている。

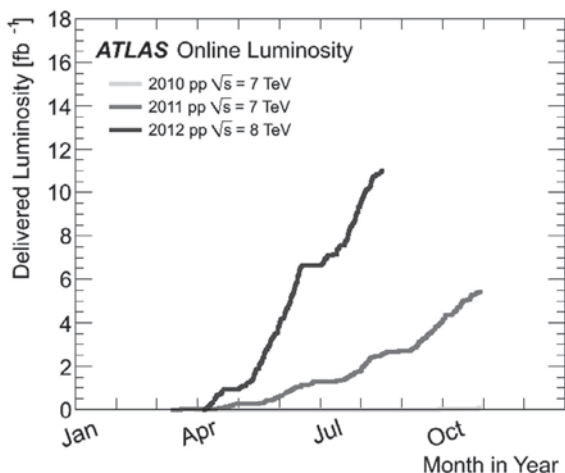
加速器の建設に日本からは資金面だけでなく、ビームの絞り込みに使われる四重極磁石の設計・制作、さらにLHC加速器全体の鍵となる、超伝導線材や冷却システムの研究で大きな貢献をしている。

2. 検出器の役割(アトラス実験を例に)

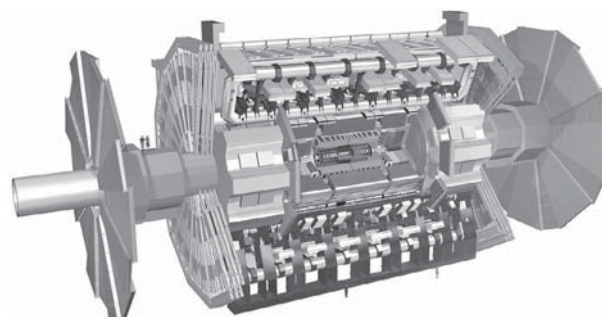
LHCではヒッグス粒子の生成に関して主に2つのモードが考えられる。生成率の9割近くを占めているのが、それぞれの陽子中のグルーオンが融合するモード(グ

ルーオン融合)、そしてもう一つは数は少ないがビーム軸近辺前後方に高運動量のジェットを2本放出するという特徴的な信号を伴う、ベクトルボソン融合がある。一度、ヒッグス粒子が陽子・陽子衝突で生成されるとすぐさま崩壊してしまう。崩壊する先のモードはヒッグス粒子の質量に大きく依存するが、上記のように我々が現在着目している領域(114.4-141 GeV)に関して言うと、背景事象と判別できるきれいな信号をもつ(ヒッグス \rightarrow 2光子、ヒッグス \rightarrow ZZ* \rightarrow 4レプトン)、もしくは断面積の大きいことにより初期の発見が期待できる(ヒッグス \rightarrow WW* \rightarrow 2レプトン+2ニュートリノ)という、3つの主要な発見モードがある。その他、この質量領域では他のモードへの崩壊チャンネルもあり、前述した通り、新粒子存在の発見を確立したあとで、標準模型ヒッグス粒子であるかどうかを検証する上で重要な測定項目となる。次節でそれぞれのモードについて述べるが、これらの測定のためには、電子、光子、ミュー粒子、ハドロン・ジェット、消失エネルギー、さらにボトムクォーク、タウ粒子由来のジェットの同定も重要になってくる。このような多数の物理対象オブジェクトの測定をバランスよく、一方で特別に光子に関してはエネルギー・位置測定性能を最大限引き出し、さらにレプトン(電子、ミュー粒子)の運動量測定精度・同定能力も強力に行う検出器が必要となる。第2図のアトラス検出器はこれらの要請に応えるべく、研究開発の期間も含めて20年近い歳月を費やして作られた。この巨大な検出器の建設・運転は国際共同実験グループで推進しており、38ヶ国、約3千人の物理学者が組織を構成して行った。日本からは高エネ研と15の大学機関がアトラス日本グループとして一体になり取り組んでいる。

アトラス検出器は2つの磁石が強力なレプトン測定系をなす特徴をもつ。一つは中央部に位置する2テスラの超伝導ソレノイドで、この磁石は設計から制作にいたるまで日本製(高エネ研+東芝)である。ソレノイド内は3段階の飛跡検出器であり、荷電粒子の運動量測定、衝突点決定を主な役割とする。2段階目のシリコン半導体ストリップ型検出器は日本グループ製である。ソレノイドの外側には電磁・ハドロンカロリメータと続く。特に電磁カロリメータは光子の入射方向を決定できるように



第1図 各年(2010, 2011, 2012年)の積算ルミノシティを月の関数として表したもの



第2図 アトラス検出器全体図(高さ25 m, 長さ44 m)

ビーム軸方向に細かくセグメントされており、アトラス検出器の優れた特徴の一つとなる。その外には、トロイド型超伝導磁石およびミュオン検出器があり、ミュオン粒子の測定を行う。ここでも日本の技術が生きている。前後方部のトリガー用ミュオン検出器とその読み出しエレクトロニクスは日本グループ製である。

またLHCのように複合粒子である陽子同士を衝突させる実験では、衝突事象のほとんどは興味のない低エネルギーのものとなる。そこで重要な事象だけを取り出し記録するトリガー機構が必須となるが、中でもミュオン粒子を含むクリーンな事象を取り出すことはヒッグス粒子探索に限らず、様々な物理探索で重要となる。日本グループはミュオン粒子を利用した高速トリガーシステムも担当している。

総じて検出器建設に関して日本グループは全体の10%程度を担っている。また建設終了後も、宇宙線・衝突データを用いた検出器の較正、調整や、運転に関連するソフトウェアの開発・維持など一連の作業を現地で続けている。アトラス日本グループ²⁾はスタッフ、大学院生を併せると110名程度いるが、常時数十名が現地CERNに張り付いて、検出器運転のエキスパートとして活躍しながら、最新データの解析も行っている。このように、日本グループのこれまでの長期に渡る継続的な活動と、これからの永続的に続く貢献の上にアトラス実験は成り立っていると言っても過言ではない。

本稿では触れないが、LHCにはアトラス検出器の設置されている衝突点とは別の衝突点に、もう一つ大きな国際共同実験CMSがある。検出器の特徴はアトラスと若干異なるが、基本的な性能、グループとしての規模は互角である。この2つの実験の競争が原動力となり、数多くの質の高い実験結果を、早急に公表することが可能となる。

Ⅲ. 最新の結果

(詳細はアトラス³⁾、CMS⁴⁾を参照の程)

1. 幾つか重要な基本事項

若干専門的な話に入る前に基本事項を確認しておく。

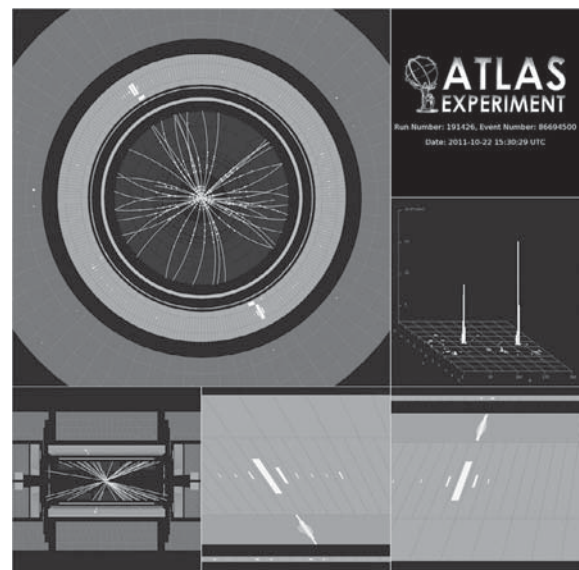
仮にLHCが設計通りの運転輝度に達したとしたとき、どのような頻度で事象が発生するかを考える。瞬間輝度 $=10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を仮定すると、ただのQCD衝突事象というものが1GHzで起こる。ボトムクォーク・ペア・ジェットを含むようなものが10MHz、さらにWを含む事象では1kHzの頻度で起こる。125 GeVのヒッグス粒子は0.5 Hzで生成され、これが4つのレプトンに壊れるモードは分岐比をかけて約0.00001 Hzとなる。この低頻度の信号を追いかけるため、背景事象を効率よく落としながら、信号をなるべく減らさない事象選別をする必要がある。事象選別においては初めの6桁程度をトリガーで、その後5桁近い削減をオフラインのデータ解

析で行っている。

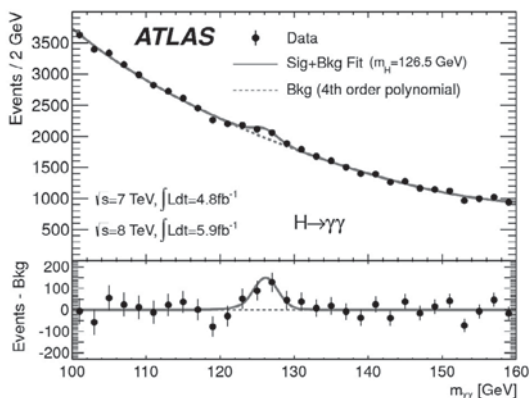
以下、各モードではヒッグス粒子が崩壊したと仮定し、崩壊生成物の運動量測定を行っているが、崩壊後の粒子を捕まえて全ての4元運動量を測り、足し上げれば、崩壊前の粒子の静止質量が得られる。ニュートリノ等が含まれて一部の情報(ビーム軸方向の消失エネルギー)が失われるときは、横方向質量など質量情報に準ずるものを用いることもある。いずれにせよ、新粒子存在の検証は質量分布が鍵となる。

2. ヒッグス→2つの光子に崩壊するモード

このモードでは生成されたヒッグス粒子が2つの光子に崩壊する。光子が物質と反応せず、直接電磁カロリメータまで到達したときには、第3図のように、細かいセグメントに分割されている電磁カロリメータ内に電磁シャワーを起こし、エネルギーを落とす。第3図で見られるように、光子が作るシャワーの形状を綿密に捉えていることが分かる。光子は質量を持たず、本来ヒッグス粒子とは直接結合しない。そのためトップクォークやWなどの量子ループを介して結合する。結果、分岐比は小さく、信号事象の数は少ない。しかし予想される標準模型からの背景事象がなだらかな傾斜分布である一方、期待されるヒッグス粒子からの信号は鋭いピークを作るため、低質量領域におけるゴールドンチャンネルとして期待されている。事象選別では単純に2つの孤立した光子(それぞれ横運動量が40 GeV, 30 GeVよりも高いもの)をもつことを要求する。背景事象の内訳では、標準模型起源のものが75-80%を占める。これは本物の光子を実際に2本含んでいるため、これ以上落とすことができない。また、残りの20-25%は、偽事象である。ハドロンジェットを光子と誤認識する確率は非常に小さく(1万回に一度程度)抑えてあるが、ある割合で混入する。2011



第3図 ヒッグス粒子→2つの光子の事象候補



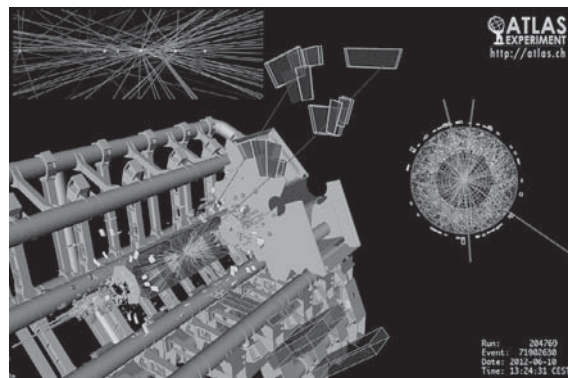
第4図 2光子から再構築した質量分布

年と2012年の積算輝度は約11 fb⁻¹であるが、予想される信号数は事象選別後、約170事象、信号領域に残る背景事象の数は約6,000事象である。第4図はこの2年間のデータで得られた2光子の運動量をもとに再構築した質量分布である。なだらかな連続分布の中ほど126.5 GeV付近にはっきりとしたピークが見えていることが分かる。統計的な有意性は4.5σである。このきれいなピークの観測は決定的で、ライバルのCMSグループでも近い質量値に同程度の大きさで信号が確認されている(125.0 GeV, 4.1σ)。

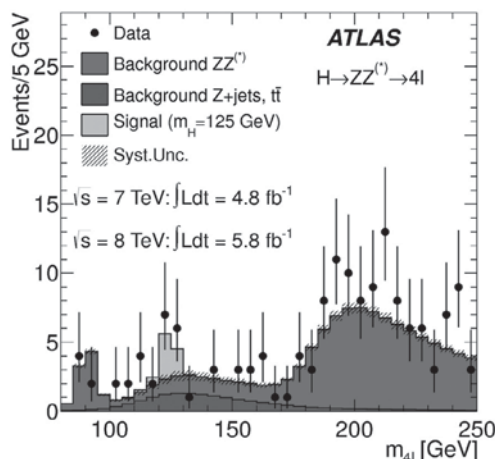
3. ヒッグス→ZZ*→4レプトンに崩壊するモード

このモードも2光子崩壊モードに引き続き、分岐比は小さく断面積は小さいが、4つのレプトンの運動量を正確に測定することができるため、質量を完全に再構成することができ、ピークを観測することができる。またレプトンの運動量測定分解能が元来、非常に優れているため、質量ピークの分解能は1.5-2.0 GeVにまで狭まる。事象選別では4つのレプトン(電子, ミュー粒子)を要求し、2つのペアは同じフレーバであることが必要とする。すなわち、4つの電子, または4つのミュー粒子, もしくは2つの電子+2つのミュー粒子である。

このモードにも標準模型起源のZZ*事象が減らすことができない背景事象として存在し、事象ごとには基本的に見分けがつかない。シミュレーションを用いて正確にこの背景事象の量・分布の形を見積もり、比較する必要がある。第5図は事象候補の典型例である。上記条件を満たす4つのミュー粒子への崩壊を観測した例である、4つのミュー粒子を組んで再構成した粒子質量は125.1 GeVである。その他の背景事象はジェットをレプトンに誤認してしまった場合、b-ジェット起源のレプトンを勘定してしまった場合等、選別条件次第で混入する度合いが変わる類いのものである。第6図は2011年と2012年のデータを併せて、4本のレプトンの運動量から質量を再構成したものである。中濃色、深濃色のヒストグラムはそれぞれ、標準模型起源のZZ*, およびジェットがレプトンに誤認識される類い背景事象を表す。うす



第5図 ヒッグス粒子→ZZ*→4つのミュー粒子の事象候補



第6図 4本のレプトンの質量再構成をした分布

色のヒストグラムはヒッグス粒子質量を125 GeVと仮定したときに予想される信号の量である。データは誤差棒のついた点で表している、125 GeV付近に背景事象予測とは異なるピークが観測されており、統計的有意性は高い。アトラス実験, CMS実験ともに125 GeV付近にピークを観測しており、それぞれ3.4σ, 3.2σの有意性を確認した。

4. ヒッグス→WW*→2レプトン+2ニュートリノに崩壊するモード

このモードではニュートリノが検出器をすり抜けてしまい運動量を測定できない。更にすり抜けるニュートリノは2つなので、力学的保存則などを用いても元の事象の力学的情報を完全に再現することができない。そこでこのモードは前者2モードと異なり、共鳴ピークを作らず、非常に難しい解析となる。しかし生成断面積×分岐比が大きいため、重要なチャンネルである。ピーク探索をできない代わりに、事象数の数え上げを行い、シミュレーションと実データを用いて予想した背景事象数との比較からヒッグス粒子の寄与を検証する。

背景事象への主な寄与は標準模型由来のWW*, もしくはトップクォークペア生成である。その他はジェットをレプトンとして誤認識してしまったものである。中でもWW*は、探している信号と似た崩壊事象なので見分けがつかない。唯一違いがあるとすると、起源がヒッグ

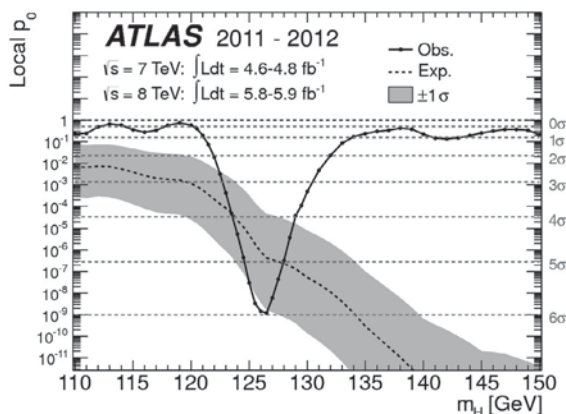
ス粒子(スピン0のスカラー粒子)であると仮定すると、信号側ではスピン方向の保存則から、放出される2レプトンの方向が同じ方向になりやすいという傾向がある、これを事象選別の一つの条件として用いることができる。事象選別では2つの異符号のレプトンとニュートリノが作る横方向消失エネルギーを要求する。2012年のデータでは同時多発事象の影響が大きくなったため、背景事象を効率よく落とすために、レプトンペアの組み合わせとして電子+ミュー粒子だけを用いている。

5. 各解析チャンネルの統合

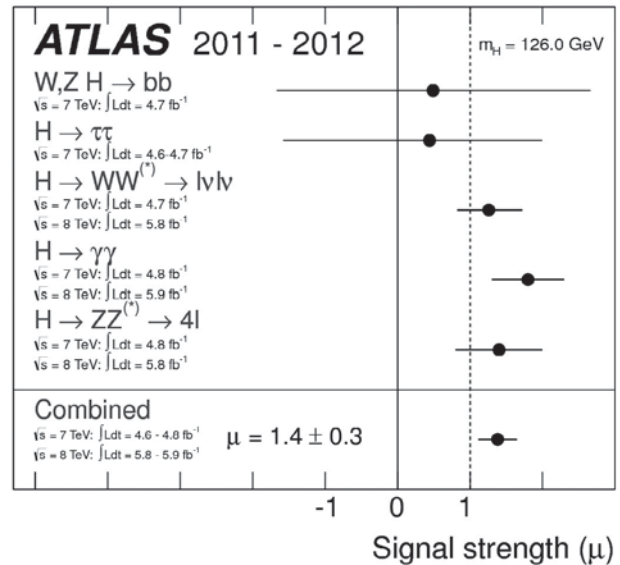
高エネルギー素粒子実験の解析結果は最終的には統計的な試験を通じて、客観的な手法のもとに有意度を示す。今回の報告では信号らしきものが分布中に見えていること、及び紙面の関係から95%信頼度を用いたヒッグス粒子存在領域の排除に関する結果は割愛する。そこで以下2種類の統計プロットを紹介する。

一つ目を第7図に示す。Local p_0 と呼ばれる分布で、横軸は想定するヒッグス粒子の質量、縦軸はヒッグス信号がなく背景事象しか観測にかかっていないと仮定した関数で質量分布をフィットし、その仮定事項がどのくらい偶然にでも起こりにくいかを確率で表している。つまり p_0 が小さければ小さいほど、本物の信号である確率が高く、右側の縦軸で表しているように、統計的有意性(σ で表現)が高くなる。アトラス実験では126.0 GeVでピークとなり、この新粒子の有意性は 5.9σ である。CMSも同様に、125.3 GeVに 5.0σ の有意性を確認している。また第7図中に示されている帯は、もし仮に標準模型ヒッグス粒子がデータに実際に含まれていた場合、現在のデータ量でどのくらいの有意度として観測されることになるかを $\pm 1\sigma$ の幅とともに示したものである。第7図から、観測された信号の方が若干大きいものの、標準模型の予想する信号強度と無矛盾であることが分かる。また、2つの実験が、ほぼ同じ質量値に 5σ 以上の有意性で粒子を観測していることから、新粒子が発見されたということは事実として確定してよいであろう。

2つ目は第8図である。背景事象に信号(強度をパラ



第7図 全モードを足し上げた後の Local p_0 分布



第8図 各崩壊モードにおける信号強度

メータ μ) を足した関数で質量分布をフィットしたときに、データが示す信号強度の最適値を、各モードごとに表したものである。 μ が1と無矛盾であれば、標準模型を支持し、0であればそのモードにおいてヒッグス粒子との結合がないこと、また有意な大きさを持ちながら1からずれている場合は、標準模型を超えた新しい物理を示唆している可能性がある。

第8図にあるように、標準模型と無矛盾ではあるが感度の高い3つのチャンネルが若干高めに点、 $\tau\tau$, bb へのモードの誤差が大きく、現時点では統計的に有意な議論をできない点から、今回発見された新粒子が標準模型由来のヒッグス粒子であるかどうかは、まだ最終決着がついていない。

2012年のLHC実験計画は12月末まで約2ヶ月の陽子・陽子運転を延長することが決定し、 $\tau\tau$, bb についても精度が上がる予定である。今後は新粒子の性質を徹底的に調査し、標準模型由来のものであるのか、それとも新しい物理を示唆する「ヒッグス粒子の仲間の一つ」なのか見極めなくてはならない。しばらくLHC実験からは目が離せないであろう。

—参考資料—

- 1) 7月4日の記者会見に関する情報 [http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases 2012/PR 17.12 E.html](http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases%2012/PR%2017.12.E.html)
- 2) アトラス日本グループ <http://atlas.kek.jp/index.html>
- 3) ATLASの最新結果(7/31) : arXiv:1207.7214 v1
- 4) CMSの最新結果(7/31) : arXiv:1207.7235 v1

著者紹介



陣内 修(じんのうち・おさむ)

東京工業大学大学院

(専門分野/関心分野)1995年に修士論文のテーマとしてアトラス実験を始めて以来、高エネルギー素粒子実験を専門とする。中・小規模の実験に携わる経験を有するが現在LHCアトラス実験に専念している。

報告

環境影響、線量評価及び放射能計測の現状と見通し
初期活動状況の総括

東北大学 中村 尚司, 日本原子力研究開発機構 百瀬 琢磨,
名古屋大学 井口 哲夫

福島第一原発の事故により、環境中に放出された放射性物質による汚染状況のモニタリング、個人被ばく線量評価、および一般市民による環境中の放射線測定に関する初期の活動状況で見出された課題と今後の見通しについて概説する。

I. 放射能分布

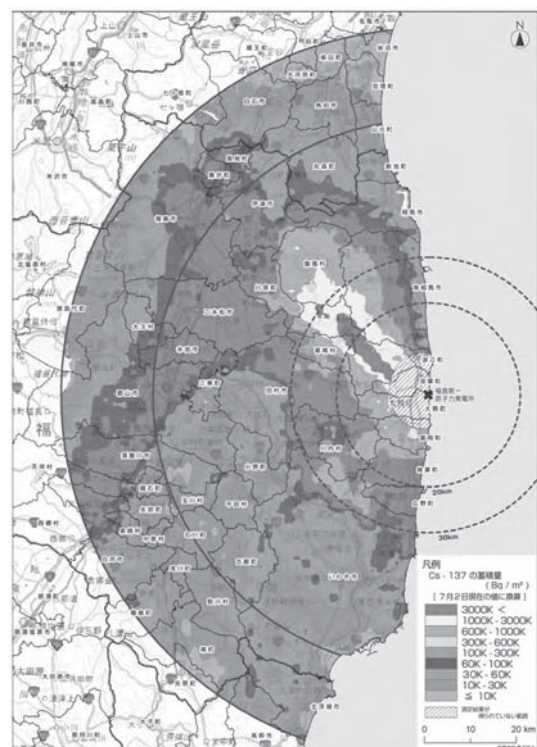
福島第一原発の事故後、土壌の汚染状況を把握するため、航空機サーベイや放射線量測定及び土壌サンプリング・分析が実施され、これまでに測定され、分析評価がなされた項目が、文部科学省から順次公表されている。この活動において、2011年5月下旬に設置された文科省の放射線量等分布マップの作成等に係る検討会では、同9月30日までに10回の会合が開催された。ここでは、大学や研究所の90を超える機関から400人を超える協力を得て、6月6日から13日に掛けてと、6月27日から7月8日に掛けての2回、以下に述べる測定が行われた。

- (1) 京都大学で開発されたKURAMAという自動車による空間線量率の走行サーベイ
- (2) 福島第一原子力発電所から80 km 圏内では2 km 間隔、80から100 km と福島県の残りの全域では10 km 間隔ごとに1か所を選んで、その中で3 m × 3 m の広さで5地点の土壌を深さ5 cm 採取して、その核種別放射能濃度をGe検出器により測定する。
- (3) 土を採取したのと同じ地点で、シンチレーションサーベイメータで空間線量率を測定する。
- (4) 関連する調査研究として、土壌中の深さ方向の放射性物質分布の測定、土壌表面に蓄積した放射性物質の移行調査、河川や地下水の放射性物質の調査等を行う。

8月2日と12日には、まず空間線量率の分布マップとして、航空機サーベイ、走行サーベイ、定点測定の結果が公開された。8月29日には、Cs-134とCs-137の土壌濃度マップとGe検出器による*in situ* 測定の結果が公開され、9月13日には、森林内のセシウムの移行調査結果が公開された。その後、I-131の土壌濃度マップが9月21日に、続いてSr-89, Sr-90, Pu-238, Pu 239+240の土壌濃度マップが9月30日に公開され、その他の希少

放射性核種の分布マップや、河川水等への移行なども今後順次公開予定である。

紙面の制約上、これらの公開データのうちから、Cs-137の土壌濃度マップの例を第1図(2011年8月30日公開)に示す。これらの結果から、各地点の空間線量率の測定値とCs-137の土壌濃度マップは、ともに原発から北西方向に最も高い値を示し、それから福島県中通り地方に高い値を示して、その分布は航空機サーベイの結果と全般的な分布傾向がよく一致している。さらに、各地点の空間線量率分布とCs-137の土壌濃度分布の間には良い相関があることも分かった。この分布マップはSPEEDI計算による結果とも比較的良く一致し、当時の気象条件に支配された様子がよく表れている。したがって、現在の土壌汚染状況の把握と今後の環境回復の対策



第1図 Cs-137の土壌濃度マップ(http://radioactivity.mext.go.jp/old/ja/1910/2011/09/1910_0912.pdf(別紙4))

Present Situation of Radioactivity Distribution: Takashi NAKAMURA, Takuma MOMOSE, Tetsuo IGUCHI.
(2012年 8月17日 受理)

を考える上で大変貴重なものであり、さらに広域かつ継続的なモニタリングを実施していくことが望まれる。

Ⅱ. 作業員及び住民の個人モニタリング

1. 作業員の個人モニタリング

福島第一原子力発電所構内の作業員は、事故発生当初、放射線状況の厳しい作業環境で緊急作業に従事した。観測された空間線量率は最大で12 mSv/h(2011年3月15日)に達し、また、屋外のみならず、建屋内においても内部被ばく防護のためのマスク装着が必要となり、免震重要棟等に滞在した女性作業員が放射性ヨウ素等による内部被ばくを受け、女性の線量限度を超えた。津波浸水により多くの個人線量計(APD)とその読み取りシステムが使用できなくなり、個人線量計が不足した。発電所に設置されていたホールボディカウンタはBGの上昇や故障に伴い使用できなくなった。このような状況下で、当初は作業グループ単位で1つの線量計を用いるなどの方法で外部被ばく線量が測定されていたが、4月以降は必要な個人線量計が確保された。内部被ばく線量測定については、小名浜に派遣された日本原子力研究開発機構(JAEA)の車載型のホールボディカウンタを用いて測定が行われた。この検査において内部被ばく線量が20 mSvを超えた可能性があるとして判定された作業員は、JAEA 核燃料サイクル工学研究所の放射線保健室に設置されている厚さ20 cmの鉄遮蔽体内のGe半導体検出器精密型体外計測装置で測定が行われた。

緊急作業に従事した作業員の外部被ばくと内部被ばくを合計した実効線量の分布は東京電力から公表されている。これによると、3月末までに緊急作業の線量限度250 mSvを超える作業員は6名、最大の実効線量は678 mSv(外部被ばく88 mSv, 内部被ばく590 mSv)であり、線量限度を超えた被ばくの要因は主として放射性ヨウ素による内部被ばくであった。4月以降は、作業員の被ばく管理が強化され、5月以降50 mSvを超える事例は発生していない。

2. 住民の個人モニタリング

福島県の健康管理調査の一環として、福島県民全員に対して震災以降の行動調査が現在進められている。この調査結果に基づき、 γ 線による空間線量率の時間変化、位置の違い、建物の遮蔽効果等を考慮の上、住民一人ひとりの外部被ばく線量評価が行われる見込みである。また、一部の地域では、児童生徒に個人線量計を配布し、生活環境における個人の外部被ばく線量を測定しているケースもある。

警戒区域や計画的避難区域の住民は、ブルーム中の放射性物質の吸入摂取等により、主として事故発生初期の段階で有意に内部被ばくを受けた可能性がある。大気中の放射性物質濃度の継続的なモニタリング結果があれば、測定を行った地域の内部被ばくの状況を計算によ

って評価することができる。しかしながら、震災に伴う停電等の影響で原子力発電所周辺における大気中の放射性物質濃度の観測データは少ない。事故発生当初、国からオフサイトセンターに派遣された環境モニタリングチームによって3月12日から3月15日に発電所周辺で測定されたヨウ素、ダストサンプリングの測定結果等があるものの、これらのデータは、連続モニタリングではなく測定地点や期間が限られているなど、そのままでは、住民等の内部被ばく線量評価への適用は困難である。

連続モニタリングの例として、茨城県東海村の核燃料サイクル工学研究所では、3月13日から継続的なダストサンプリングを開始し、第1表に示すように、核種別の空気中放射性物質濃度の実測データを得た。この結果から、一般公衆の呼吸率に基づき3月13日から5月23日の測定地点(屋外)における吸入摂取による内部被ばく線量を評価すると、成人の実効線量が0.57 mSv、小児(1歳)甲状腺等価線量が15 mSvとなった。

Cs-134, Cs-137を対象としたホールボディカウンタ(WBC)を用いた内部被ばく線量の調査は、7月から8月末にかけてJAEA, 放医研によって浪江町, 飯館村, 川俣町山木屋地区の住民約3,300名に対して行われた。9月以降もJAEA等によって双葉郡の7町村の住民を対象とした測定が継続されており、いずれの結果においても健康に影響のある数値は検出されていない。福島県他の地域においても、順次、WBCを整備し測定を開始する計画が進められている。WBCによる検査の結果は、福島県の健康管理調査のデータベースに登録される予定である。

3. 今後の見通し

住民等の線量再構築においては、事故発生当初の放射性ヨウ素等による内部被ばくの評価が課題である。本年3月下旬に、いわき市等において1,080人の子どもを対象として小児甲状腺の検査が行われ、全員甲状腺等価線量で100 mSvに相当するスクリーニングレベル未満であったことから、地表に沈着したCs-137等からの γ 線による外部被ばく線量に比べ、避難時の吸入摂取を含め

第1表 茨城県東海村における大気中放射性物質濃度

核種	平均濃度(Bq/m ³) ^{a)}
Te-129 m	1.5
Te-132 ^{b)}	3.7
I-131	12
I-133	0.56
Cs-134	1.3
Cs-136	0.21
Cs-137	1.5

^{a)}モニタリング期間は3/13~5/16

^{b)}I-132はTe-132と放射平衡と考えられる

た内部被ばく線量の寄与は相対的には小さくなると予想されるものの、根拠となるデータが十分ではない。30 km 圏周辺の降下塵中の I-131/Cs-137 比に着目すると、放射性物質の降下量が多かった飯館村付近を含め、発電所の北～南西方面ではこの比が 0.31～5.83 であったのに対し、降下した放射性物質の量が比較的少ない南～南西方面では 13～26.5 と I-131 の比率は相対的に大きくなっている。このように、I-131/Cs-137 比が方位や時期によって異なることも考慮する必要がある。今後、膨大な環境モニタリングのデータと SPEEDI などの放射性物質の大気拡散シミュレーションによる計算結果を照合するなどにより、大気中の放射性物質の濃度分布の詳細が明らかになれば、WBC による Cs-137 等の実測値が、放射性ヨウ素などの核種の吸入による内部被ばく線量を評価するための個人の指標として活用されることが期待される。

Ⅲ. 放射線計測の留意点

1. はじめに

福島第一原発の事故により大量の放射性物質が環境中に放出され、広域に拡散したことが明らかになるにつれ、我々の住環境、食品・飲料、物品等、身の回りの放射線に対する関心や不安が高まっている。現在、文部科学省や環境省等が中心になり、国を挙げて実測に基づく放射能汚染の詳細な状況把握に努めている一方、放射線の測定を専門としない方々による計測値のホームページやブログ等での紹介、また線量率の高い場所を特定し、その情報をお互いに交換して、自分たちでできる範囲の対策を積極的に講じる動きも活発化している。このような身の回りの放射線(事故以前から存在する自然放射線も含む)の状況を正しく知ることは、さまざまな放射線によるリスクに対する理解を深め、それらを低減する工夫にもつながるため、本原子力学会としてもこの流れを大いに推進・サポートすべきと考えている。

しかしながら、放射線の測定、特に人体への被ばく線量や物品の放射能濃度の定量評価は、いろいろな物理量(例えば、時間、長さ、重さ等)の測定の中でも最も難しい技術の一つである。最近、種々雑多な放射線測定器が巷に出回っているが、上記のような一般市民の方々による身の回りの放射線量の測定活動をより有効にさせていただくには、測定器固有の特性や表示される測定値の意味、また実際に測る環境や対象物における放射線の特徴などをよく理解していただくことが強く望まれる。

ここでは、巷での関心が高い「空間線量率」、「人体・物品等の表面汚染」、「食品・飲料の放射能濃度」の測定を念頭に、①測定器で何を測っているか、②測定データをどのように線量率や放射能濃度に換算するか、③測定結果がどのくらい変動する可能性があるかの3つの観点から、放射線計測上の留意点を一般の方向けに整理して概説する。

2. 測定器で何を測っているか？

福島第一原発事故に起因する環境中の放射性物質は、現在ほとんど放射性 Cs (^{134}Cs と ^{137}Cs) と考えてよい。この放射性 Cs からは γ 線(光子)と β 線(電子)が放出され、物質に当たると電荷や光を生じる。放射線の測定器では、有感物質に空気・希ガス等の気体や透明な無機蛍光体・半導体等の固体が用いられており、福島県外の周辺地域の比較的低い空間線量率測定等で一般によく使われている小型の放射線サーベイメータの方式としては、前者のガイガーミュラー(GM)計数管と後者のシンチレーション検出器が挙げられる。

GM 管方式では、計数管内に入射した放射線 1 個当たりに封入ガス中にできた電荷を放電現象を利用して増幅し、ほぼ一定の大きさのパルス電流(または電圧)を発生させる。したがって、この電流パルスの個数を数えることで、放射線の強さを測ることができる。一方、シンチレーション方式は通常、NaI(Tl)やCsI(Tl)結晶などの放射線が当たると蛍光を生じる物質(シンチレータ)に光を電流に変換する光電子増倍管やフォトダイオードを組み合わせたもので、その蛍光量あるいは電流パルスの大きさがシンチレータに吸収された放射線エネルギーにほぼ比例するので、放射線の強さと共にエネルギーの情報も測定することができる。これらの放射線測定器で得られた電気信号に対し、校正実験や理論計算をもとに換算係数を掛けることで、ベクレル(Bq)という単位で表される放射能(1秒間当たりに放出される放射線の数)やシーベルト(Sv)という単位で表される(等価または実効)線量(γ 線や β 線では人体組織1kg当たりに吸収されるエネルギー量にほぼ相当)の値付けが行われている。

3. 放射線サーベイメータによる正しい測定方法

まず、市販小型放射線サーベイメータは、一般に堅牢で取り扱いが容易な構造になっているものの、周囲の影響を受けやすい電気製品であり、測定時の温度・湿度、気圧、振動・衝撃、電磁氣的誘導などについて、取扱説明書に記載されている使用上の注意を守ることが大前提である。また、放射線の測定器としての基本的な性能を踏まえた上での使用が測定結果の正しい解釈をする上で非常に重要である。ここでは、市販の小型放射線サーベイメータの検出感度、エネルギー依存性、方向依存性等の観点から計測上の主な留意点を述べる。

(1) 検出感度

市販小型放射線サーベイメータによる毎時の空間線量率の測定下限は通常、GM管方式で $\sim 0.1 \mu\text{Sv/h}$ 、シンチレーション方式で $\sim 0.01 \mu\text{Sv/h}$ であり、一般環境の低い線量率を正確に測定したい場合は、シンチレーション式サーベイメータを選択することが望ましい。ただし、Ⅲ-2節で述べたように、放射線検出器から出力される電気信号のパルス計数率(カウント/秒)を線量率($\mu\text{Sv/h}$)へ換算するためには、高精度な標準線源と厳格な測

定条件のもとでの校正が必要であり、厳密には校正時と同一条件での測定のみ、正しい線量率を与えらる。また、測定下限に相当するパルス計数率は ~ 0.1 cpsのオーダーであり、後述するように、十分な測定時間を設定しないと本質的に測定結果がばらつき性質を持っている。この測定下限から考えると、食品に含まれる放射性Csの規制レベル(~ 100 Bq/kg)相当の微弱放射能を、一般の放射線サーベイメータで測定するのは至難の業である。

(2) エネルギー依存性

線量率を正確に測定するためには、検出効率のエネルギー依存性(検出器応答)が、1 cm線量当量(皮膚1 cm下の被ばく線量)のエネルギー依存性と等価であることが望ましいが、一般にはズレが生じる。放射線のエネルギー測定が可能なシンチレーション式サーベイメータでは、エネルギー弁別測定により重みづけをしてそのズレを補償する機種(エネルギー補償型)もあるが、比較的安価で小型のGM管式およびシンチレーション式サーベイメータでは、物理的にフィルタ(カバー)等を付加して調整するような工夫があるものの、エネルギー補償がなされていない。その結果、 $^{137}\text{Cs}\gamma$ 線のエネルギー ~ 0.66 MeV以下の γ 線に対して検出効率が高くなる傾向がある。このことは、 $^{137}\text{Cs}\gamma$ 線源で校正されていても、測定環境中にその散乱成分である低エネルギー γ 線が多く存在する場合、高めの測定値が出やすくなることを意味している。

(3) 方向依存性

放射線サーベイメータの検出効率の方向依存性は、その有感領域の形状に依存している。GM管式は棒状なので、その検出効率は前方・後方が低く、側面が高くなる。一方、シンチレーション式の方向特性は比較的等方であるが、光電変換素子の付いている方向の検出効率が $\sim 20\%$ 程度凹む傾向がある。したがって、正確に線量測定を行うためには、校正を行ったときと同一方向、測定対象に対して常に同じ向きでの測定が必要と言える。

(4) 放射線計数値の統計性

放射線の計数値は本質的に揺らぐ(計数のばらつきはポアソン分布または正規分布に従う)性質を持っており、計数値が N カウントのとき、そのばらつきの指標：標準偏差 σ は \sqrt{N} となることが知られている。したがって、測定器の感度が低いか、測る線量が低いほど、測定値がブレることになる。例えば、市販の小型GM管式サーベイメータでは、 ~ 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ の空間線量率に対し、1分間の測定で10カウント程度の検出感度であるので、相対的な標準偏差 $\sim \pm 30\%$ ($10 \pm \sqrt{10}$ カウント)の変動が見込まれる。ちなみに、環境省の「放射能濃度等測定方法ガイドライン」では、複数回の線量測定の平均値に対し、その標準偏差の3倍をばらつきの指標にとることが推奨されている。

(5) その他の留意事項

市販の小型放射線サーベイメータで環境や物品の放射線量を測定する場合、測定器自体の特性に由来する指示値の揺らぎのほかに、自然に存在する放射線自体に場所や気象等による時間変動があることも知っておくべきである。小型放射線サーベイメータでは、自然起源の放射線のうち、宇宙から飛来する放射線は高エネルギーで検出しづらいので影響が小さいが、例えば、人体に必須な元素であるカリウムの同位元素のK-40(半減期12.5億年)は、天然カリウム1 g当たり約30 Bq含まれており、土壌や食品の中に広く分布しているほか、花崗岩等の存在の有無により、その中に豊富に含まれるトリウムやウラン、もしくはその系列の放射性核種(例えば、大気中に放出される放射性気体Rn-222とその娘核種)による線量の寄与が無視できない。実際、わが国において、 ~ 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の空間線量率に対し、このような自然放射線の地域や気象による変動幅は、最大 $\sim 30\%$ 程度が見込まれる。

また、放射線サーベイメータには、「時定数」と呼ばれる測定器の応答時間の目安となるパラメータがあり、通常、この時定数の数倍の経過時間後に線量率の指示値を読まないで過小評価となったり、ホットスポットの探知位置にややズレが生じる可能性がある。

さらに、地表や物品表面の放射性Csを、 γ 線と β 線の両方に感度を有するGM管サーベイメータ等で測る場合、 γ 線より β 線に対する感度が2桁近く高いので、 β 線の遮蔽を施した測定を行わないと、極端に高い誤った線量率指示値になってしまうことにも注意を要する。

—参考資料—

- 1) 首相官邸 放射線モニタリングデータについて
<http://www.kantei.go.jp/saigai/monitoring/index.html>
- 2) JAEA-Review 2011-035, 福島第一原子力発電所事故に係る特別環境放射線モニタリング結果。
- 3) 環境省 廃棄物関係ガイドライン第5部「放射能濃度等測定法ガイドライン」平成23年12月,
http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/haikibutsu-gl05_ver1.pdf

著者紹介

中村尚司(なかむら・たかし)
東北大学名誉教授
(専門分野/関心分野)放射線物理・計測・防護

百瀬琢磨(ももせ・たくま)
日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)放射線防護

井口哲夫(いぐち・てつお)
名古屋大学
(専門分野/関心分野)放射線工学

From Abroad

The 3rd International Conference on Nuclear Power Plant Management, Salt Lake City, Utah, USA

Ki Sig Kang and Frank Nuzzo

(*International Atomic Energy Organization*)

The IAEA organized the first and second International Conference on Nuclear Power Plant Life Management in 2002 in Budapest, Hungary, and in 2007 in Shanghai, China. Participants at the first and second conferences recommended that another conference be organized within four to five years. The third International Conference on Nuclear Power Plant Life Management (PLiM) was held in Salt Lake City, Utah, USA from 14 to 18 May 2012. Over 350 participants representing 38 Member States and 3 international organizations attended this Conference. The conference focused on topical issues and advances made in PLiM applications, particularly in the use of (PLiM) techniques in support of longer term operation of nuclear power plants. The closing session included a panel discussion on current national approaches to PLiM and the impact that the Fukushima accident had on PLiM.

1. Introduction

Main objective of the third international conference on Plant Life Management (PLiM) of nuclear power plants was to provide a platform for information exchange about national and international policies, regulatory practices on safety and on technological advances in support of ageing management and PLiM programmes to achieve safer and more reliable operation. Key elements related to the safety aspects of ageing and long term operation were presented together with the economic impacts and advanced methodologies in ageing evaluations. The participants focused on the benefits of high efficiency practices in ageing management, on trends in PLiM, particularly as pertains to operation beyond the nominal plant design life (also referred to as Long Term Operation, LTO) and on the need to further develop ageing programmes.

2. PLiM “Comes to Age”

PLiM in nuclear power generation has gained increased attention over the past decade. Effective ageing management of systems, structures and components (SSCs) has become a key element in the safe and reliable long term operation of nuclear power plants. A PLiM programme brings with it an effective set of tools that greatly helps operators safely and cost effectively manage ageing effects in SSCs and prepare the plant for long term operation (LTO). PLiM facilitate decisions concerning when and how to repair, replace or modify SSCs in an economically optimized way, while maintaining a high level of safety. The feasibility of extending nuclear power plant (NPP) operation has

been recognized by operators and regulators alike, as evidenced by the number of license renewal programmes and LTO plans in several Member States.

3. Major Topics Discussed in the International Conference

The international conference was organized into 6 major working sessions. In session 1 the participants discussed the various approaches to plant life management and shared information and best practices in PLiM applications for LTO from the safety and economic point of view. In session 2 the main topic was PLiM economics, implementation experiences and successes. Session 3 focused on ageing management related to other operational programmes. Participants shared technical updates on ageing management issues, including maintenance and inspection planning, control of material degradation. Session 4 explored design modifications to SSCs including large modernizations, refurbishments and replacement projects, dictated by ageing evaluation, obsolescence and new safety requirements. Session 5 engaged in managerial issues and how PLiM greatly enhances system management and facilitates the successful resolution of complex issues in the management of NPPs. Session 6 reviewed regulatory issues concerned with plant life management in which the specialists exchanged information on regulatory requirements, roles and responsibilities of those involved in regulatory and policy matters. Most presenters believe that aging management does not begin at the end of life to help apply for LTO but is rather a living process that continuously incorporates

operating experience. Research was recognized as crucial in establishing the technical basis for long-term operation of nuclear power plants beyond their design life. The industry must take a leading role in driving the process and resolving issues. The closing session included a panel discussion on current national approaches to PLiM and the impact that the severe accident at the Fukushima NPP had on plant life management.

4. The Role of the IAEA in PLiM for LTO

The three main areas of the IAEA mandate are safety, verification and technology. Therefore the IAEA is involved in the development of safety standards, guidelines and specialized technical publications. In addition, it offers expert review and peer review missions. It leads in technical cooperation activities including workshops and training courses.

In parallel the IAEA established and runs the Nuclear Industry cooperation forum in support of its member states. A Cooperation Forum typically increases interactions with utilities and nuclear industry, between operating organizations in experienced countries and newcomers. It fosters more effective communication between member states and complements its capabilities to collect and disseminate best operational practices.

Another IAEA initiative related to PLiM is the International Generic Aging Lessons Learned (IGALL) programme. Its kick-off and scoping meeting was held in 2010 and the program was launched soon thereafter. A progress report was produced in 2011 and the final IGALL report is expected to be issued in 2013. The results will be available to operators, regulators and vendors alike. The IAEA provides in addition a comprehensive program of support services for new comer countries and for countries contemplating nuclear power program. Notably, Safe Long Term Operation (SALTO) is an in-depth peer review of the scoping and screening process, of the assessment and management of SSCs for Ageing Degradation, of the revalidation of the safety analysis, of configuration management, design basis reconstitution, FSAR update and a review of PSR related activities.

In the area of ageing management, existing programmes are being updated to include the new accident mitigating features and additional defenses resulting from the stress tests and safety re-evaluations. Preserving the capabilities and availability of these features, even under accident conditions, must be included in ageing programmes to ensure availability of this new equipment in order to allow emergency response with higher flexibility such as the use of safety components at multiple functional levels and at more than one defense-in-depth layer. PLiM specialists should

cover not only physical ageing, but also non-physical ageing issues such as obsolescence of technological solutions, of regulations, of design and operating standards, of staff training and knowledge level. In the USA, NRC staff are reviewing rulemaking for LTO in order to establish whether the commission should require licensees to periodically re-evaluate seismic and flooding hazards and update if necessary their design basis. Rulemaking for station blackout are also changing. Some of the considerations involve determining quality standards for added flexible severe accident equipment and its inclusion in age-management programmes.

5. Drivers of a PLiM Programme for LTO

The top contributors in an LTO decision are safety, security and cost-effectiveness. They must be upheld under LTO, when NPPs operate beyond their original design life. Particularly important are the performance records and the accumulation of a knowledge-base on ageing management and specific LTO related R&D. In many member states, following the Fukushima accident, PLiM Technical Evaluations have been conducted. Operators have updated their technical Information Base on Ageing Management. Critical aspects of ageing are now continually researched including the identification and characterization of expected and potential degradation. This implies a continuing study of mechanisms and their consequences, the development of fitness for service criteria for critical SSCs, the definition of targeted preventive maintenance activities, the use of condition based maintenance and expert tools for active components, of on-line monitoring of critical equipment, updates to new emergency conditions in environmental qualifications, the planning and execution of important interventions age management on heavy equipment and passive components.

In addition, technology watch and obsolescence programmes are being strengthened to prepare for the future, conducting feasibility studies and applying strategic management not just of components but also of manufacturing capabilities and tools, of critical skills through orders and contracts as well as through the implementation of strategic stocks.

6. Key Ageing Management Issues in LTO Programmes

Research and development following the Fukushima accident have taken a more focused and prioritized approach. Selective R&D designed to help 'know' some of the current 'unknowns' is essential in support of LTO. Where knowledge gaps are identified, R&D is requested to characterize the degradation mechanisms but also their root causes such as environmental conditions or intrinsic ageing stressors. One of the potentially plant life-limiting mechanisms is neutron irradiation embrittlement of RPV steels. Among the

recent successes in the application of PLiM techniques is in the conduct of time limited ageing analysis (TLAA) and life cycle optimization. These techniques are capable of identifying the end of life cycle failure probabilities for large capital assets and associated costs related to their refurbishment or replacement. Well documented programmes for replacements, modifications and inspections of passive, long-lived SSCs provide assurance that all upgrades follow safety and performance requirements, reducing risk and increasing reliability.

Rigorous fatigue analyses are required for LTO. Additional instrumentation may be required to more accurately account for actual loading history during plant operation under particular conditions. Unknown historical loads are usually the main concern in fatigue calculations. Regulators require traceability of all operational transients and actual cyclic loading to demonstrate the plant will remain within its safe licensing envelope and at the same time meet modern evaluation criteria. Unknown entities make it difficult to obtain credible usage factors in the justification for LTO.

Key issues in RPV and passive SSC evaluations to further successes in LTO programmes are the need for improvements in the integrity assessment methods and in the use of probabilistic analysis for safety margin evaluations, the need further the validation of the embrittlement prediction formula to higher fluence and more reliable fluence calculations, more detailed analysis and verification and validation (V&V) and an improved management of the RPV fluence through fracture toughness recovery. Advanced in non-destructive examination (NDE) methods to detect and characterize ageing are also necessary to successfully support LTO such as the customization of existing NDE methods and the development of new ones, improvements in tool resolutions, and in extending applications of on-line monitoring and prognosis tools.

The use of statistical models for the evaluation of irradiation-assisted SCC (IASCC) failures and for the development of the capability to predict them is an encouraging trend in the industry. It is essential to continue supporting the development of "probability of detection" (POD) curves and numerical simulations. The optimum sample size is key to success in this field.

In cable ageing management, of particular importance is the development of in-situ real-time cable condition monitoring methods to detect degradation. Broadband impedance spectroscopy (BIS) was found to be superior to time domain reflectometry (TDR) in locating degraded cable portions. In polymer insulation jackets, replenishing the jacket with plasticizer has proven to be a successful technique to regain jacket flexibility and elasticity. As no one tool that can exactly predict the remaining life of cables, it is necessary to perform

gradual, repetitive measurements and tests, preferably through diverse methods and compare the data collected over time.

7. Conclusions

During the 3rd International NPP PLiM conference, successful achievements of PLiM applications were reported in support of LTO in both the technical and economic fields. Advanced ageing management processes were reported, including material degradation and integrity assessments (embrittlement, cracking, and fatigue), maintenance and inspection techniques were presented in support of LTO programmes. Continuous information exchange programmes related to operating experiences, regulatory practices, and the latest acquired knowledge in AM for LTO management (PLiM conference, IGALL, and future R&D) were received with great interest.

Acknowledgement

The Conference was organized by the IAEA, and hosted by the U.S. Government through its Nuclear Regulatory Commission and Department of Energy in cooperation with the European Commission, and the OECD Nuclear Energy Agency. A tour of the Idaho National Laboratory in Idaho Falls was also part of the Conference agenda.

Nomenclature

IGALL = International Generic Aging Lessons Learned
 NDE = Non-Destructive Examination
 POD = Probability of Detection
 PSR = Periodic Safety Review
 RPV = Reactor Pressure Vessel
 SCC = Stress Corrosion Cracking
 SALTO = Safe Long Term Operation

References

- 1) The IAEA 12 point Nuclear Power Safety Action Plan at the following IAEA Web site address under :
www.iaea.org/newscenter/news/2011/actionplan.html
- 2) Technical proceedings, The 3rd International Conference on Nuclear Power Plant Management, Salt Lake City, Utah, US-Conference Summary (Vienna 2012).

Profile

Ki Sig Kang

IAEA, Division of Nuclear Power,
 Plant life management, Ageing management, Material degradation, Equipment Qualification, Reactor Pressure Vessel Embrittlement, Life Management Approaches.

Frank Nuzzo

IAEA, Division of Nuclear Power,
 Refurbishment and replacement of heavy components, Integrated Safety Review, Design Review Process, Feasibility Studies; Reactor Coolant and associated system design.

連載
講座これからの原子力システムを担う
新原子力材料

次世代原子力システムのための材料開発の現状と課題

第3回 酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼

北海道大学 鵜飼 重治,

日本原子力研究開発機構 大塚 智史, 皆藤 威二

高温強度と耐照射性に優れた ODS フェライト鋼を Na 冷却高速増殖炉の燃料被覆管に適用すべく、日本原子力研究開発機構が中心になって一貫した実用化技術開発が進められている。また、鉛ビスマスや超臨界圧水冷却材に対する優れた耐食性を有する Al 添加高 CrODS 鋼も京都大学を中心に開発が進められている。これらは我が国の独自技術として国際的にも注目され、その期待度は大きい。

I. 緒言

耐照射性が格段に優れたフェライト鋼をベースに、その高温強度を大幅に向上させるため、酸化物粒子を微細に分散した酸化物分散強化型(Oxide Dispersion Strengthened)フェライト鋼(ODS 鋼と略記)の開発が進められている。酸化物粒子として用いられるイットリア(Y_2O_3)はメカニカルアロイングによる粉末の合金化過程でいったん分解した後、添加したチタンと高温焼結時に反応してナノスケールの複合酸化物($Y_2Ti_2O_7$)粒子として微細析出し高温強化に寄与する。しかしミリスケールのバルク強度は結晶粒界等の弱化因子の影響を受けやすく、単純な分散強化では予測できない。ODS 鋼は他の金属材料に比べこのような弱化因子に敏感な特徴があるため、加工熱処理によるメゾスケール(結晶粒径相当のミクロンサイズ)の組織制御が被覆管製造では特に重要である。

ODS 鋼は国際的な第4世代(Generation IV)原子炉の燃料被覆管候補材であり、また次世代核融合炉のブランケット構造材料としても期待されている。我が国ではそれほど認識されていないが、ODS 鋼の開発研究は国際的には極めて活発であり、昨年開催された核融合炉材料国際会議での発表件数は、フェライト鋼が47件であったのに対し、ODS 鋼は43件とほぼ同数であり、酸化物粒

子のナノ制御モデリングからバルク強度の評価、照射効果に至る基礎的研究成果が多数報告された。ODS 鋼の実用化に関しては、日本原子力研究開発機構(原子力機構と略記)を中心に高速増殖炉用燃料被覆管の製造・製管技術、検査技術、端栓との接合技術、照射影響評価、材料強度基準の整備など、一貫した実用化技術開発がなされており、国際的にも大変注目されている。

本稿では、原子力機構が進めている Na 冷却高速増殖炉用 9~12 CrODS 鋼被覆管の開発を中心に概説するとともに、鉛ビスマスや超臨界圧水冷却材に対する耐食性に優れた Al 添加高 CrODS 鋼の開発研究や核融合炉ブランケット構造材料としての適用研究についても紹介する。

II. 9~12 CrODS 鋼被覆管の開発

1. ODS 鋼被覆管の開発経緯と要求性能

(1) 開発経緯

安全性・経済性に優れた高速増殖炉サイクルを実現するためには、高燃焼度化によるサイクルコスト低減、高出口温度化による発電効率向上が不可欠である。発電効率の向上は、コスト削減のみならず、単位発電量あたりの放射性廃棄物量を低減するため、環境負荷低減の観点でも重要である。原子力機構では、これらを達成し得る燃料被覆管材料として ODS 鋼に注目し、1980年代から開発に着手した。1999年7月から2006年3月まで実施した実用化戦略調査研究(FS: Feasibility Study), 引き続き2011年3月まで実施した高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT: Fast Reactor Cycle System Technology Development Project)フェーズ I の一連のプロジェクトにおいて、一貫して ODS 鋼を将来のナト

Materials for New Generation Nuclear Energy Systems—Current State and Future Agenda for Material Developments(3); ODS Ferritic Steels: Shigeharu UKAI, Satoshi OHTSUKA, Takeji KAITO.

(2012年 5月29日 受理)

■前回のタイトル

第2回 低放射化フェライト鋼

リウム冷却高速増殖炉燃料被覆管の第1候補材料と位置づけて開発を進めてきた¹⁾。

一般にフェライト系材料の場合、過度にCr濃度を増量すると、500℃未満の低温側での熱時効や中性子照射効果により2相分離(Crリッチなαプライム相の析出)が生じ、延性が低下することが懸念される。そこでODS鋼被覆管のCr濃度は9~12wt%に設定したうえで、耐照射性と加工性を重視したマルテンサイト系9CrODS鋼を第1候補とし、耐食性に優れたフェライト系12CrODS鋼をバックアップと位置づけて、それらの開発を行ってきた。第1表に9CrODS鋼被覆管と12CrODS鋼被覆管の基本組成を示す。

(2) 燃料被覆管の要求性能

第1図にFaCTで開発を進めているJSFR(Japan sodium cooled fast reactor)の燃料集合体および燃料要素を模式的に示す。外径10mm程度、肉厚0.5~1.0mm程度の被覆管にMOX燃料ペレットを充填した燃料要素255本が一つの集合体に収納され、この燃料集合体562体が炉心に装荷される。JSFRの場合、冷却材出口温度は550℃、取出平均燃焼度は約150GWd/tであり、これに対応する被覆管の最高温度は700℃、はじき出し損傷量は約250dpa(displacement per atom)に達する。開発するODS鋼被覆管にはこのような高温・高燃焼度に耐える高温強度と耐照射性のみならず、核分裂生成物(FP)による内面腐食、冷却材ナトリウムによる外面腐食といった複合環境に対する耐性も要求される。

2. 組織制御および高温クリープ強度特性

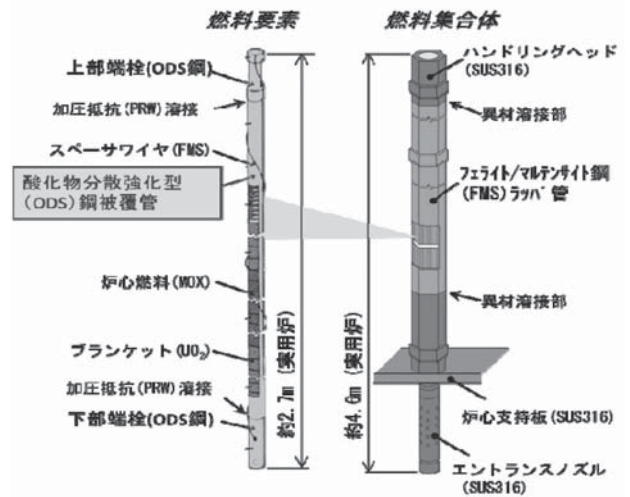
(1) 9CrODS鋼被覆管

ODS鋼被覆管の製造プロセスは、粉末冶金法による素管製造と冷間圧延による製管プロセスからなる(第2図)。上行程の素管製造は、金属・合金粉末とイットリア粉末をボールミルでメカニカルアロイング処理し、熱間押出で固化成形するプロセスで、従来の溶解法とは大きく異なる。ODS鋼被覆管を製造する上での最大の難点は、難加工材であるODS鋼を冷間圧延で薄肉長尺の被覆管にまで加工する製管プロセスにある。そこで、

第1表 9Crおよび12CrODS鋼被覆管の基本組成

	化学組成(wt%)						計算値(wt%)	
	C	Ni	Cr	W	Ti	Y	Y ₂ O ₃ ^{a)}	Ex.O ^{b)}
9Cr-ODS	0.13	<0.20	9	2.0	0.20	0.28	0.35	0.07
12Cr-ODS	0.03	<0.20	12	2.0	0.26	0.18	0.23	0.07

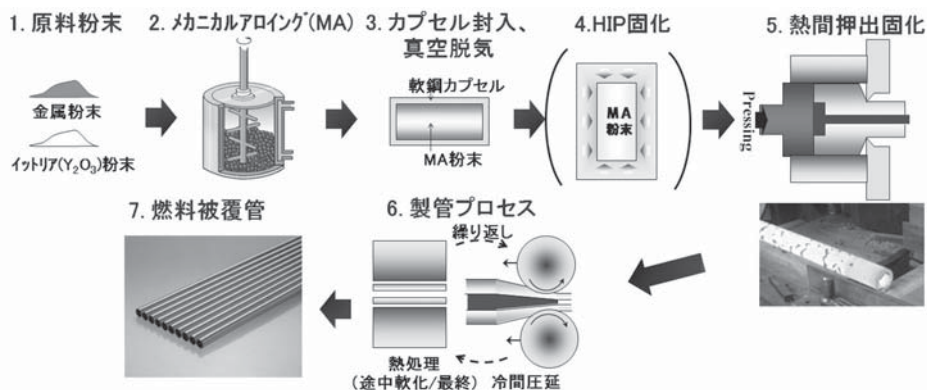
a) Yが全てY₂O₃の形態で存在すると仮定した場合の計算値
b) 全酸素量分析値から、Y₂O₃中の酸素量を差し引いた過剰酸素量



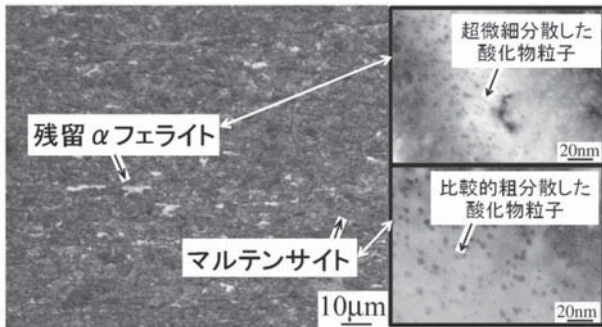
第1図 JSFR燃料集合体および燃料要素の模式図

マルテンサイト系9CrODS鋼では、α/γ変態を積極的に利用し軟化したフェライト相状態で最終被覆管形状までの冷間圧延を行った後、圧延方向に伸長した結晶粒を最終焼ならし・焼戻し熱処理で等軸化するという新しい技術を開発し²⁾、この課題を克服した。製造した9CrODS鋼被覆管の欠陥検査においても、従来の超音波探傷検査技術を改良することで対応可能である。

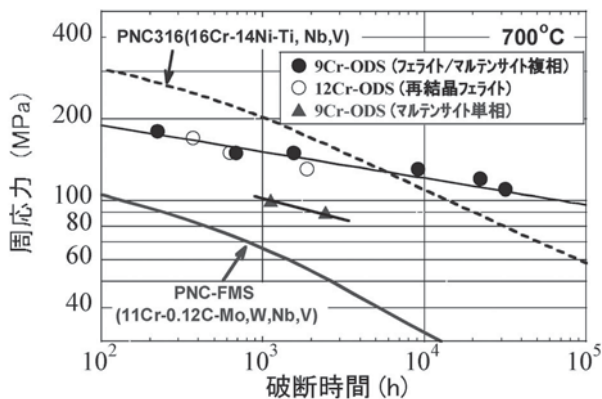
9CrODS鋼被覆管の組織を第3図に示す。計算状態図に基づくマルテンサイト単相になるが、実際には残留αフェライトと名付けたフェライト相との複相組織である。残留αフェライトとは、高温熱処理時に、ナノスケールの酸化物粒子によるピンニング効果により、α/γ逆変態が進行せず、αフェライトのまま残った相



第2図 ODS鋼被覆管の製造プロセス



第3図 9Cr ODS 鋼被覆管の金相組織(縦断面)と酸化物ナノ粒子の透過型電子顕微鏡像

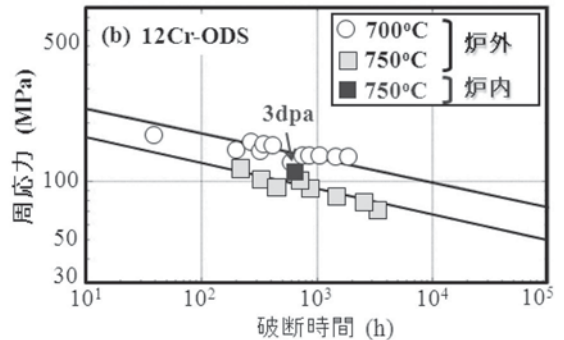
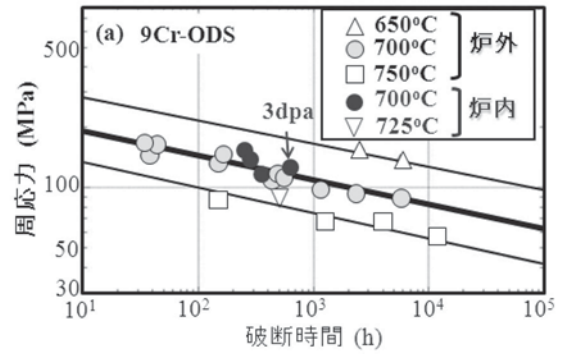


第4図 ODS 鋼被覆管の炉外高温内圧クリープ破断強度

である³⁾。残留 α フェライト相中では、転位密度が高く、酸化物粒子も微細かつ高密度に分散しており、有効な強化相として機能する。第4図に示す内圧クリープ破断強度から、焼戻しマルテンサイト単相に比べ、残留 α フェライトを含む複相組織とすることにより、破断時間が1~2桁伸びることが分かる。これはマルテンサイト相中のブロック境界などで生じる局所的な変形促進に対し、硬質の残留 α フェライト相が複合材料的に変形抵抗として働くことに因る⁴⁾。通常フェライト系耐熱鋼の場合はフェライト相は軟質相で高温強度の低下要因となることを考えると、これは ODS 鋼に特有の挙動で材料学的にも興味深い。

(2) 12Cr ODS 鋼被覆管

α/γ 相変態のないフェライト系12Cr ODS 鋼では、回復軟化を利用して製管した後、加工方向に伸びた結晶粒を再結晶組織として等軸・粗大化させる。しかし、 α/γ 変態の駆動力が数百 MJ/m³であるのに対し、再結晶の駆動力は数 MJ/m³と2桁低く再結晶の再現性が十分でないため、量産規模で均質な再結晶組織を保証するためには、いまだ製造上の課題が残されている。均質な再結晶組織を有する12Cr ODS 鋼被覆管のクリープ破断強度は、9Cr ODS 鋼被覆管と同等レベルである(第4図)。



第5図 ODS フェライト 鋼被覆管の炉内高温内圧クリープ破断強度

3. 照射試験

9Cr ODS 鋼被覆管と12Cr ODS 鋼被覆管から作製した内圧クリープ試験片を用いて、「常陽」で炉内高温クリープ破断試験を行った結果を第5図に示す⁵⁾。照射量は3dpaと必ずしも高くないが、両被覆管ともに高温照射下でクリープ強度の低下が全くないことは注目すべき成果である。また、「常陽」での約30dpaまでの材料照射試験において、835°Cの高温照射後においても両被覆管ともに優れた高温強度を維持することを確認している。

9Cr および12Cr ODS 鋼被覆管製燃料ピンからなる試験集合体をロシアの高速実験炉 BOR-60で照射し、ODS 鋼被覆管製燃料ピンとしては世界的に経験のないピーク燃焼度112 GWd/t までの範囲で破損等の不具合なく照射試験を完了している。一方で、ピーク燃焼度が98 GWd/tの試験集合体で9Cr ODS 鋼被覆管1本に破損が生じた。この原因は照射温度異常と被覆管組織の不均質によることが判明しており、これに対応すべく均質性改善のための製造技術改良の見通しを現在までに得ている。

4. 今後の課題

ODS 鋼被覆管の実用化に向けた今後の課題としては、量産技術を開発し、粉末冶金特有の不均質性を排除して安定的に均質な被覆管を製造する技術を確認することである。またこれと共に、被覆管としての品質保証体系を整備する必要がある。加えて、燃料ピン照射試験による照射性能実証、再処理時の被覆管硝酸溶解特性評価も今後に残された重要な課題である。

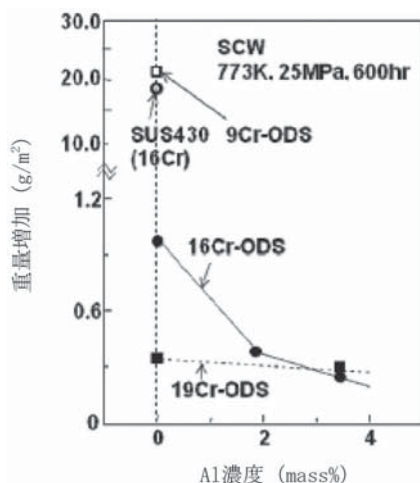
Ⅲ. Al 添加高 CrODS フェライト鋼の開発

1. 超臨界圧水や鉛ビスマス冷却材に対する耐食性

冷却材に超臨界圧水や鉛ビスマスを用いた次世代高速炉を想定して、これらの冷却材に対して優れた耐食性を優する Al 添加高 CrODS フェライト鋼の開発が京都大学を中心に進められた。

Cr 量の増量は耐食性の向上に有効であるが、一方、Cr リッチ α' 相の出現に伴う熱時効脆化を促進させることが知られている。第 6 図は 9CrODS, 16CrODS, 19CrODS について(それぞれ wt%), 510°C で 25 MPa, 600 時間の超臨界圧水による腐食試験を行った結果である⁶⁾。溶存酸素量は 8 ppm であり、比較のために SUS 430 の結果も示されている。腐食は酸化反応であり、これによる重量増加を軽減するためには Cr 濃度を 19Cr 程度まで上げる必要があるが、16Cr にして Al を 3.5 wt% 添加すると 19Cr と同等にまで耐食性を改善できる。これは試料表面に薄いアルミナ (Al_2O_3) 酸化被膜が形成されることによる。アルミナ酸化被膜が形成されると、Cr 濃度が 14Cr~19Cr の範囲で耐食性に差異がないことが分かっている。この Cr 濃度範囲で熱時効脆化をどの程度抑制できるかの見極めが今後の重要な課題である。

融点が 125°C と低い共晶組成の鉛ビスマス合金は、次世代高速炉の冷却材としてだけでなく、加速器駆動核変換システム (ADS) の液体重金属ターゲットとしての採用も検討されているが、鉛ビスマス合金中にはニッケル、鉄、クロムが溶けやすいという課題がある。しかし、4 Al 添加の 14CrODS 鋼は 650°C で酸素濃度が 10^{-6} mass% O_2 の鉛ビスマス合金中に 1 万時間浸漬してもほとんど腐食しないことが確認されている。これは表面に形成されるアルミナ酸化被膜によるものである。従来から表面を酸化被膜でコーティングする技術開発が行われてきた



第 6 図 超臨界圧条件 (510°C, 25 MPa, 600 h) における高 CrODS 鋼の酸化による単位表面積当たりの重量増加と Al 濃度の関係

が、Al を合金化することでアルミナ酸化被膜の自己生成・修復機能を発現できるというメリットが示された。

なお、フランス原子力庁 (CEA) では、再処理時の硝酸溶解特性や耐食性を重視して、Cr 濃度を 14~18 wt % まで増加したフェライト系 ODS 鋼被覆管の開発を行っている。しかし、現状の開発レベルは素材開発段階にあり、今後の進展が期待される。

2. 高温強度特性の改善

耐食性の向上に有効な Al の添加は、逆に高温強度を低下させることが知られている。II 章で述べた 9CrODS 鋼や 12CrODS 鋼では、微細な $\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 複合酸化物粒子を高密度に分散させているが、Al 添加鋼では粗大な YAlO_3 複合酸化物となり数密度が低下するため、分散間隔の広がりによる分散強化の低下が顕著となる。そこで、4 Al 添加 15CrODS 鋼に微量の Zr、あるいは Hf を添加することにより Al 無添加と同等のクリープ強度を達成することに成功している⁷⁾。これは粗大な YAlO_3 複合酸化物にかわって微細な Y-Zr 複合酸化物、あるいは Y-Hf 複合酸化物が生成したことによることが高分解能電顕による解析から明らかになっている。

Ⅳ. 核融合炉ブランケット構造材料としての適用

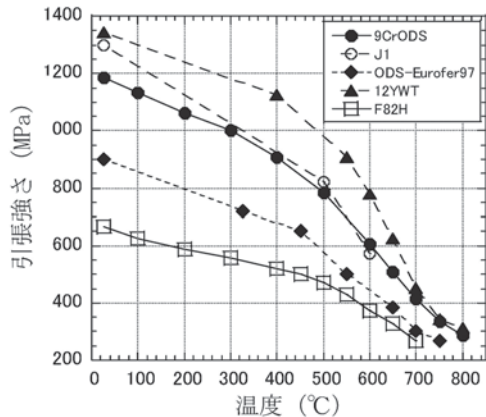
1. 開発状況

核融合炉ブランケット構造材料には、放射能レベルを低減するため、モリブデン (Mo) やニオブ (Nb) をそれぞれ低放射化元素であるタンゲステン (W) やタンタル (Ta) で置き換えた低放射化フェライト鋼が開発されている。しかしその使用温度は 550°C 以下に制限されており、適用温度域を高温側へ拡大して熱効率の向上を図るため、各国において低放射化 ODS フェライト鋼の開発も積極的に進められている。

代表的な低放射化 ODS フェライト鋼とその主要成分を第 2 表に示す。前述の高速増殖炉の燃料被覆管として開発されている 9CrODS 鋼は、低放射化フェライト鋼でもある。J1 鋼と欧州の ODS-Eurofer 97 は、それぞれ低放射化フェライト鋼である F82H と Eurofer 97 をベ-

第 2 表 各国で開発されている代表的な核融合炉用低放射化 ODS 鋼 (wt %)

9CrODS 鋼	Fe-9Cr-0.13C-2W-0.2Ti-0.35Y ₂ O ₃	日本
J1 鋼	Fe-8Cr-0.16C-2W-0.2Ti-0.18V-0.10Ta-0.37Y ₂ O ₃	日本
ODS-Eurofer 97	Fe-9Cr-0.08C-1W-0.3Mn-0.2V-0.1Ta-0.5Y ₂ O ₃	欧州
12 YWT	Fe-12Cr-0.05C-2.5W-0.6Mn-0.4Ti-0.25Y ₂ O ₃	米国



第7図 代表的な低放射化 ODS 鋼の引張強さ

スにイットリア(Y_2O_3)を添加して酸化物分散強化を図ったものである。8~9 mass% Cr を含有する9CrODS 鋼, J1 鋼, ODS-Eurofer 97は焼戻しマルテンサイト組織であり, α/γ 逆変態を利用して等軸組織にすることができる。一方, 12 mass%Cr を含む12 YWT は, フェライト単相組織であるため再結晶処理による組織制御が図られるが, 十分ではなく加工方向に伸長した結晶粒形態を有している。これら低放射化 ODS 鋼はブランケットを構成するパネルや冷却用パイプに加工する必要がある。

2. 基本特性

第2表に示した各鋼種の引張強さを第7図に示す。比較として, F82Hの引張強さも示されている。Ti を含まない ODS-Eurofer 97では低放射化フェライト鋼(F82H)からの強度増加が小さい。9CrODS 鋼と J1 鋼は同等の強度レベルにあり, これら焼戻しマルテンサイト組織では強度異方性は小さく, 十分な延性も確保されている。一方, フェライト単相である12 YWT の引張強さは優れているが, これは引張軸が加工方向に平行な場合であり, それと直角方向では強度・延性が低下するという課題がある。ODS フェライト鋼を大型のブランケット構造材料として用いる場合には, 薄肉被覆管では要求されない衝撃特性や破壊靱性といった特性も重要となる。

V. まとめ

福島第一原子力発電所の甚大な事故の影響で, 我が国の今後の高速増殖炉の開発計画は不透明な状況にあるが, 国際的には ODS 鋼への期待度はますます高まって

いる。2012年秋には欧州で ODS 鋼の核分裂炉/核融合炉への適用に絞ったワークショップも予定されている。原子力機構の ODS 鋼被覆管開発は量産技術開発へステップアップする段階にあり, Al 添加高 CrODS 鋼を含めて我が国の独自技術として, 今後の進展が大いに期待される。

—参考資料—

- 1) 日本原子力研究開発機構, 日本原子力発電, JAEA-Evaluation-2011-003, (2011年6月).
- 2) 奥田隆成, 安部勝洋, 鵜飼重治, 水田俊二, 萩茂樹, 廣畑憲明, 日本国第3171185号, 「酸化物分散強化型鋼の製造方法」.
- 3) M. Yamamoto, S. Ukai, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **417**, 237-240(2011).
- 4) S. Ukai, S. Ohtsuka, *et al.*, *Mater. Sci. Eng. A*, **510-511**, 115-120(2009).
- 5) T. Kaito, S. Ohtsuka, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **386-388**, 294-298(2009).
- 6) A. Kimura, H.S. Cho, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**, 323-328(2007).
- 7) T. Furukawa, S. Ohtsuka, *et al.*, *Proc. ICAPP*, Tokyo, Japan, May 10-14, 2009, Paper 9221.

著者紹介



鵜飼重治(うかい・しげはる)
北海道大学
(専門分野/関心分野)原子力材料,
高温材料, 材料強度学



大塚智史(おおつか・さとし)
日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)原子力材料,
高速炉炉心材料開発



皆藤威二(かいとう・たけじ)
日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)原子力材料,
高速炉炉心材料開発

私の 主張

事故時の原子炉主任技術者の在り方の再検討

大阪科学技術センター 木村 逸郎

昨年12月法律に基づいて国会に東京電力福島原子力発電所事故調査委員会(国会事故調)が設置され、筆者は本年2月その参与に任ぜられた。数少ない原子力関係者として、反省の気持ちを抱きつつできるだけ委員会に出席し、現場の調査や避難者との会合などにも参加し、その上で報告書作成にも加わった。本年6月に両院議長に提出された報告書にあるように、この事故が巨大な天災によって起されたものの、人災であるという結論を支持している。

事故の対応で、菅首相の行動や東京電力との関係がクローズアップされたが、筆者は早い時期から現場での活動、特にシビアアクシデントに至った状況下での指揮命令系統に注目した。発電所長が原子力災害対策特別措置法(原災法)に定められた原子力防災管理者として命がけで指揮し、運転直および多くの所員と協力会社員が苦勞して対処したことは高く評価したが、原子炉主任技術者(炉主任)の活動が見えなかったのが、国会事故調の中でも指摘し、状況を調べた。その結果、福島第一原発では事故を起こした1～4号機の炉主任として1人がすべてを兼務していたことが分かり驚いた。原子炉等規制法第40条で、原子炉設置者は原子炉の運転に関して保安の監督を行わせるため、炉主任を選任して国に届けることになっている。ここだけ見ると、すべての原子炉にそれぞれ炉主任がいるように見えるが、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第19条に炉主任兼務の規定があり、これが抜け穴の指示でもあった。東京電力は1～4号機は同型炉(?)として炉主任を兼務させた。この届け出を受けて、何も感じずに受け付けた原子力安全・保安院にも呆れた。

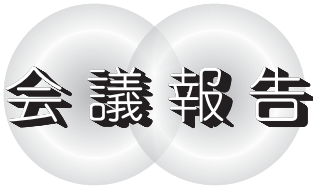
筆者は福島第一原発の炉主任2名(1～4号機と5,6号機各1名)の事故時の状況についても調査した。両者とも免震重要棟にある対策本部のテーブルに席が設けられ、事故の対応について必要な助言をしていたとのことであったが、現場には1週間ほども行かなかったという。それでどうして運転の保安の監督ができようか。1991年2月に発生した関西電力美浜発電所2号機の蒸気発生器細管破断事故では、その炉主任が適切な判断をして事故の拡大を防いだ。筆者自身も若い頃、京大研究炉

(KUR)の炉主任をしたが、常に現場を重視するように努めた。発電炉から見るとはるかに小さいKURでも、運転開始から間がなかったこともあり、炉心変更や大きな保守・修理にはすべて立会い、時にはひやりとしたことさえあったが、すべて現場で対応した。原子炉がシビアアクシデント状態になり、原災法が適用されて原子力防災管理者が指揮する状況下で、炉主任の立場はどうなるかなどの課題もあるが、もし福島第一原発で各号機に炉主任がいて、先頭に立って現場を点検し、原子炉制御室に留まって、事故状態での運転の保安の監督をしていたら、対応が少しでも改善したのではないかと考える。これに対し、たとえある号機の炉主任が現場で何か指示をしようとしても、そのほとんどは発電所全体としての判断が必要で、内容によっては本店の指示を仰ぐ必要もあり、さらに政府の原子力災害対策本部の本部長(首相)の判断まで求めるべきことさえあるので、実際は無理であり、かえって指揮命令系統が複雑化して混乱するのではないかという反論がある。筆者も非常時の指揮命令系統はあまり複雑化すべきではないと思うが、現場近くに炉主任がいて、アクシデントマネジメント(AM)の進め方を監視して助言すれば、先ずは誤操作や見落としの防止に役立つのではなからうか。もちろんこのためには、炉主任は常日頃からその原子炉について現場の主(ぬし)のようになり、AMの内容についてもただ知っているのではなく、例えばそのための弁があれば、その操作法はもちろんそれがどの非常電源に接続されているか、放射性物質が漏洩した際に近接できるかなど一切を頭に叩き込んでおくべきである。

原子力規制委員会と規制庁で、今後シビアアクシデントとAMについて根本的に検討される中で、炉主任の在り方(試験制度や免状保有者の再教育も含む)についても議論し、必要によって法規の改正まで検討してほしい。

IAEAでも不測事態のマネジメントの問題を取り上げている。本学会においても、こうした問題を積極的に取り上げていただきたい。

(2012年8月25日 記)



原子力プラントの安全確保に関する国際動向

11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM 11)

2012年6月25～29日(ヘルシンキ, フィンランド)

原子力プラントの安全確保にはリスク評価が重要な役割を担っているが、定量的なリスク評価手法として、確率論的安全評価(Probabilistic Safety Assessment: PSA)が広く使用されている。

PSAの手法及び適用の進展に焦点を当てた国際会議であるPSAMは、1991年に第1回が開催されて以来、今回の開催で11回目を数える。本会議は、世界中の技術者の参加、交流を促進することから、基本的には2年ごとに、米国、欧州、アジアの地域順で開かれてきたものであるが、今回は、フィンランド ヘルシンキの港沿いにある会議場 Scandic Marina Congress Center にて開催された。

PSAM 11会議の概要

PSAM 11は、安全・信頼性工学の国際会議である The Annual European Safety and Reliability Conference (ESREL 2012)との共催となったこともあり、参加者は40カ国、850名(日本からは40名程度の出席であり、参加国別では、米国、フランスに次ぐ人数であった)、発表件数も基調・招待講演、一般発表を合わせ700以上となる大会議となった。本会議は、多数の発表を通じた技術情報の共有の場であると同時に、関連分野での技術者が一堂に会して旧交を温めコミュニケーションを取る場としても重要な役割を持っている。昼食会、晚餐(会議主催とヘルシンキ市主催の2回の晚餐が開催された)、また、コーヒー・フルーツブレイクと、様々な場が有効に活用されたが、それはそれは騒々しいコミュニケーションの場となった。また、会議終了日翌日の6月30日には、オルキオト発電所訪問のテクニカルツアーも企画され、プラントシミュレータやサイト内に設置されているオンカロ処分場の見学が実施された。雨の中であったが、こちらも、120人ほどの参加者があり盛況であった。

本会議での、オープニング・セッションでは、米国NRCコミッショナー Apostolakis 名誉議長より講演が行われた。また、各日の冒頭のプレナリー・セッションでは、各界の専門家より、福島第一原子力発電所事故に関する講演をはじめ、リスク評価における不確かさの取扱い、原子力の安全性向上への国際協調や安全目標の役割といった、リスク評価・PRAの本質を再確認させるような講演もなされ、全体をまとめる重要な基調講演が行われた。

本会議での一般発表は、29のテクニカルトラックに分類され、11部屋に分かれて同時並行で進められた。講演、発表においては、当然のことながら“Fukushima”と題したものが多く、また日米欧の専門家を集めたパネル

ディスカッションもあり、多数の聴講者が集まった。これらの発表、議論を通して、現状の欧米では、事故そのものの分析・評価のフェイズを超え、事故からの“Lessons Learned”での対応、評価・手法の改善といった将来に向けた研究・検討のフェイズに移り、その成果を出しつつある状況にあると感じた。また特に欧州諸国において、PSAを活用する安全評価の規制の状況や変化に関する発表も幾つかなされ、我が国に参考となる情報も多かった。

PSAM 11での日本からの発表

日本からの発表も、各分野にわたり29件を数えた。特に、福島第一原子力発電所事故に関連したリスク評価等の日本からの情報発信に対しては、聴講者も多かった。

また、標準委員会で新たに策定・発行した津波PRA標準(AESJ-SC-RK004:2011)につき、大阪大学山口教授他から詳細な内容発表を実施する等、標準委員会リスク専門部会での取組みについての発表も行われた。津波PRAに関しては、世界的にも例のない体系的な評価手法を、津波の被害を受けた当事国がまとめていることから、多数の聴講者を集め質疑も多く、注目の高さを感じた。

会議を終えて～Tokyo PSAMに向けて

福島第一原子力発電所事故後、国際的にもPSA、リスク評価の重要性がますます高まっている中において開催されたPSAMであったが、講演、発表を通して、リスク評価・PRAの原則、原点を考えさせることが多く、出席者の多くが、その意義を認識し直すことができたと同時に、今後の手法及び適用の進展の必要性、意欲を掻き立てられる場になったものと思う。PSAMという会議体も、回を追うごとにその規模を膨らませ、原子力プラントの安全確保に対する寄与において、その重要性をますます増している。

PSAMは2年ごとの定期開催を行っているものであるが、それに加えて、来年2013年春には東京にて福島第一原子力発電所事故に焦点を当てたトピカル会議を開催することを決定している(2013年4月13～15日、於：ハイアットリージェンシー東京、<http://www.psam2013.org/>)。今回のPSAM 11での成果以降の進展も踏まえ、リスク評価・PRAを中心とした技術の進展に関して、有意義な会議になるものと期待される場所である。学会員のみなさんにおかれても、ぜひとも、発表・参加を検討するようお願いしたい。

(株)原子力エンジニアリング・倉本孝弘、

2012年7月27日 記)

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

原発事故1年半、改革は進んだのか

朝日新聞 服部 尚

4月にデスクからライターに復帰した。なかなか行けなかった被災地に行くと、頭で理解していた事故の深刻さを改めて体感することは少なくない。

この夏に震災1年半の企画取材で、計画的避難区域に指定されている福島県川俣町山木屋地区に入った。緑豊かな農村だったが、地区のすべての住民は避難していて、人影がまったくなかった。代わりに不審者が立ち入っていないか警戒するパトカーが頻繁に行きかっていた。

ほかの被災地のように津波や地震で建物が壊れたりしている訳ではない。それなのに、住民はずっと戻れないでいる。荒れ放題の牧草地に入った際、地区内で汚染調査をしている研究者に「このあたりで毎時5マイクロシーベルトですね」と教えられた。単純計算すると年間20ミリシーベルトを超える。改めて、目に見えない汚染をもたらす原発事故の怖さを感じた。

この地区では、複数の大学の研究チームが汚染の実態を調査している。途中で、避難している地区の住民が研究者らに何度もお辞儀してお礼を言っている姿に出会った。「ふるさとがどんな風に汚染されたのか知りたい」という思いがじんわりと伝わってきた。

汚染の実態を知って、見えない放射線と初めて向き合える。そんな気持ちに政府は応えることができていない。

原発事故が起こったのは昨年3月だが、文部科学省が汚染調査に着手できたのは6月と約3カ月かかった。この時点で、半減期が短い放射性セシウムなどのデータをとるのは難しい時期に入っていた。複数の放射線の専門家が事故直後から自発的に計測したデータがそろって残っているぐらいだ。

それなのに、事故以来ずっと汚染の調査は省庁ごとにばらばらに取り組みまれてきた。汚染がどこまで広がり、自然環境によってどのように変化しているのか、生態系にどんな影響を及ぼし、暮らしと関係しているのか、住民に全容を示すことができていない。

全村避難した福島県飯舘村での取材では、6月にまとめた村民アンケートで33%の人が帰らないという選択肢を挙げたことを教えられた。45%の人が避難解除されてもすぐには帰らないという。ショックな数字だった。避難生活が長引くにつれて、気持ちの中でふるさとに戻ることをあきらめる人が増えるのではないのか。その一方で、早期の帰還に向けた除染作業は進ん

でいない。

事故を経験した私たちの社会が、これからどのように進むべきなのか、みえないままで。

野田政権は9月に、2030年代に原発をゼロにすることを目指した「革新的エネルギー・環境戦略」をまとめた。原発はゼロにするという一方で、ゼロにするとなれば本来は必要となる施策の変更までは踏み切れなかった。最も象徴的なのは使用済み燃料から取り出したプルトニウムを利用する核燃料サイクルは維持するという姿勢だ。

今後、新增設は認めないとしながらも、すでに許認可手続きを終えた大間原発や島根原発は対象にはしないという。プルトニウムを増やす高速増殖炉の計画も従来のままだという。

原発に代わる再生可能エネルギーや、需要を抑える省エネを強力に進めるとしたが、どのような政策を進めていくのかについての工程表も出せなかった。

事故から1年半を経て、事故を踏まえた改革は進んだのだろうか。私にはせいぜい原子力規制委員会が発足したことぐらいしか思い当たらない。原子力規制委はあくまで原子力安全を監視する機関に過ぎない。政治や経済事情に左右されない独立した機関として、原子力の安全を追求するという当たり前の原点に戻っただけだ。

私たちは原発事故の教訓と本当に真摯に向き合えていない。まだ出発点に立ち尽くしたままのような気がする。事故をきちんと収束させ、次に日本がどんな進路を取るべきなのか、きちんとした道筋を国内外に示すことが、事故を起こした国としての責任なのではないか。その追求の責務はマスコミの仕事に携わる私自身も負っている。そんな思いを強くしている。

(2012年9月19日 記)



服部 尚(はっとり・ひさし)

朝日新聞 編集委員

1991年、朝日新聞入社。福井支局や大阪や東京の科学部、名古屋社会部で原子力・放射能や医療・医学分野の取材に当たった。震災時は科学医療部デスク。今春から現職。