

巻頭言

- 1 今、改めて核セキュリティー文化の確立を
伊藤隆彦

時論

- 2 原子力安全の確保に必要な人材の育成を

原子力安全の確保に最も重要なのは、安全の原理・原則をわきまえ、必要な人材を育成し、供給し続けることである。
代谷誠治

- 4 安全規制の最適化とは

今後、原子力を安全に管理していくために必要なことは、「想定外」の想定、マネジメントの充実、リスクを考慮した規制の実現だ。
岡本孝司

- 6 インテグラルファーストリアクター(統合型高速炉, IFR)の物語

IFRとはウランウム、プルトニウム、ジルコニウムの混合金属燃料を使った高速炉と乾式再処理を組み合わせたサイクル統合施設だ。
田中伸男

解説

- 14 理念を実践につなぐ
—求められるのは具現化への道筋

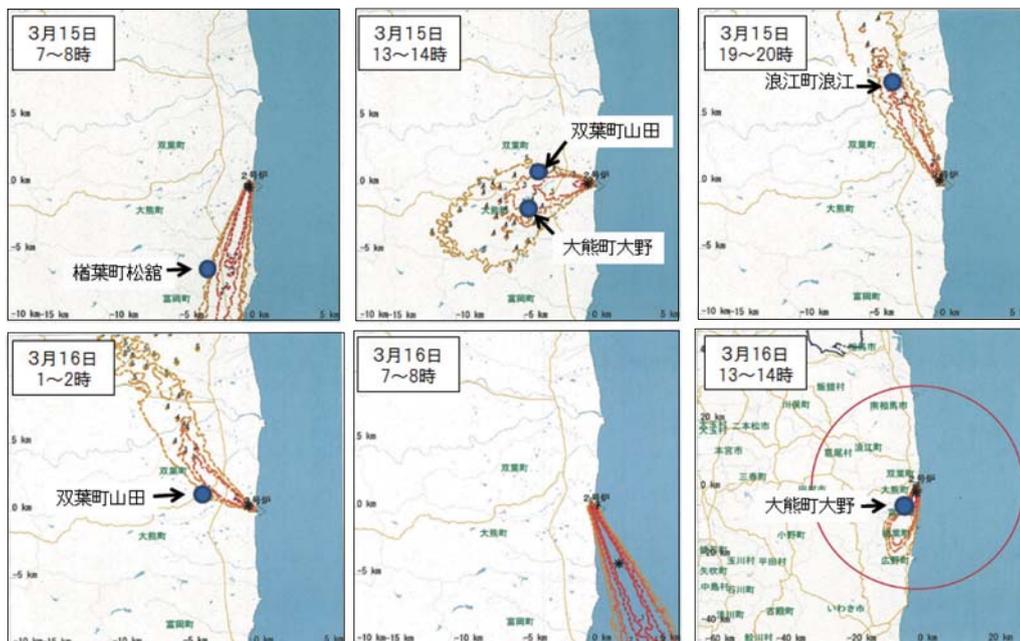
福島事故についての批判と改革への提言は数多く公表されている。しかし、理念的な提言は実装・実践への実現可能な道筋の提示があつてはじめて機能する。そのための方策を考察した。
北村正晴

- 19 原子力安全について思うこと
—東京電力福島第一原子力発電所の事故に関連して

この事故についての反省点を列挙する。なお、米国のNRCは、「働き甲斐のある職場」として最高の評価を得ている。規制機関の技術力向上はきわめて重要だ。
小山田 修

- 22 検証！SPEEDIが福島原発事故で提供した予測情報—その精度と適時性、今後の活用

今回の事故でSPEEDIはどのような予測情報をどのようなタイミングで関係機関に提供したのか、それらの精度はのちに測定されたモニタリングデータと比較してどうであったか。それらを検証し、今後の活用を探る。
茅野政道



SPEEDIによる2011年3月15～16日の空気吸収線量率分布予測

表紙の絵(日本画)「春香山桜(しゅんかやまざくら)」 制作者 山崎 隆夫

【制作者より】春になると、山も街も至るところが桜色に染まる。都会では優しく吹く春風が桜花を美しく散らす頃、山に入ると小振りの花輪で可憐に咲く山桜に出会った。一本の桜木から洩れる柔らかな陽射しが、光とともに春の香を運ぶ様は、まさに春を象徴しているように思えた。(日展アートガイドより)

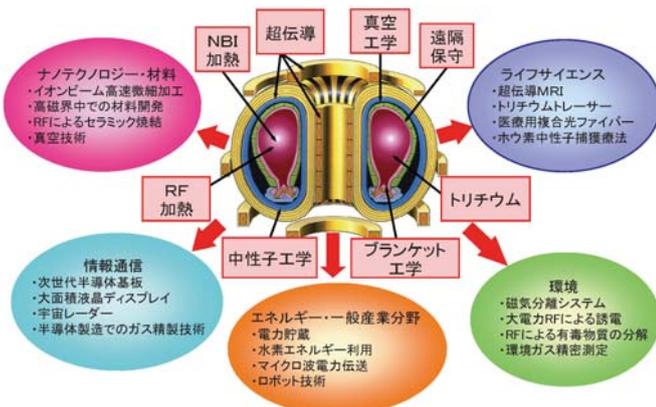
第44回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

解説

27 核融合研究で開発された最先端技術の波及効果

核融合研究で開発された最先端技術は、どのような機器に技術波及したのか。あるいはどんな可能性があるのか。その現状を俯瞰し、核融合研究開発の新たな魅力を紹介する。

栗原研一、小川雄一



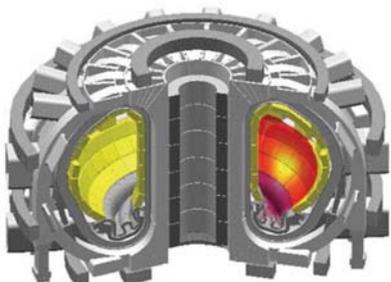
核融合工学技術の波及効果

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7回)完

37 材料評価技術

次世代原子力システムの開発に向けて、材料評価技術が注目されている。そのステップの踏み方や経緯及び今後の課題を整理した。いずれのシステムでも、材料の照射影響の評価が共通の課題である。

若井栄一



プラズマを取り囲んで厚さ約50 cmのブランケット壁(黄色の部分)には、SUS 316 LN-IG(低Co)材が用いられている。

談話室

47 本当に人々は「ゼロリスク」を求めているのか—シビアアクシデント対策とゼロリスク志向

人々がゼロリスクを求めているというのは、フィクションでしかなかった。

堀越秀彦

8 NEWS

- 東通の破碎帯で規制委と東北電が見解
- 国会、原子力規制委の人事を承認
- 技術同友会が過酷事故防止で提言
- 衆院、原子力問題調査特別委を新設
- 規制委が新安全設計基準で骨子案
- 海外ニュース

報告

33 放射性セシウムはどう動くのか—原子力機構が福島県で放射性物質の環境動態研究に着手

福島発電所事故で飛散した放射性セシウムは、雨や風の影響を受けて、これからどう動くのか。あるいは動かないのか。原子力機構は、そのプロセスを調査して今後の動きを予測する調査研究を始めた。

日本原子力研究開発機構



地中の土壌をサンプリングし、セシウムの濃度を調べる

ジャーナリストの視点

49 40年後も変わらぬこと

石毛紀行

46 From Editors

- 50 会報 原子力関係会議案内、人事公募、新規フェロー一覧、フェロー賞受賞者一覧、シルバー・永年会員一覧、英文論文誌(Vol.50, No.4)目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会ホームページの「目安箱」(<http://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>)にお寄せください。

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

今、改めて核セキュリティ文化の確立を



核物質管理学会日本支部会長

伊藤 隆彦 (いとう・たかひこ)

東京大学工学部卒業，中部電力(株)入社，同社副社長，原子力委員会委員を経て現職。日本原子力文化振興財団理事長を兼ねる。

東京電力福島第一原子力発電所事故は多くの課題と教訓を残しつつあるが、とりわけ安全と核セキュリティの再構築への取り組みは喫緊の課題であろう。

今回の過酷事故は、津波に襲われたことにより、原子炉の冷却に必要な直流電源を含む全ての電源機能の喪失などにより、原子炉の冷却機能を失ったこと、更に代替注水などの非常時への備えもうまく使いこなせなかったことなどに起因するが、同様の機能喪失はテロ行為でも引き起こすことが可能であり、安全と共に核セキュリティにも脆弱性があったのではとの懸念を生んだ。

今回の事故原因の深層には、日本の規制と、事業者における「安全文化」の劣化があったと指摘されている。国際原子力機関(IAEA)の国際原子力安全諮問グループは、「安全文化」を「原子力施設の安全性の問題が、全てに優先するものとして、その重要性にふさわしい注意が払われること」が実現されている組織・個人における姿勢・特性(ありよう)を集約したもの、と定義している。つまり、「安全文化」とは、組織と個人が安全を最優先する風土や気風を指すということだ。

一方この「安全文化」に匹敵する言葉に、IAEAの「核セキュリティ文化」がある。IAEAの核セキュリティシリーズ文書は、「核セキュリティ文化」の根幹は、確実に脅威が存在することを認識すると共に、核セキュリティの維持が重要であり、またそこに係る各層の一人一人の役割が重要であることの認識にあるとしている。「核セキュリティ文化」の未熟や劣化は、原子力利用の前提をなす「安全の確保」を損なうリスクに繋がるということだ。

「核セキュリティ文化」を健全に育成・維持してゆく観点から、この福島事故の教訓を眺めてみればいくつかの課題が出てくるのではないかと。まず、原子力施設を預かる関係者への「核セキュリティ文化」の浸透は十分か、特に経営トップも含めたマネジメント層への浸透はどうか、ということだ。従来、過酷事故対策あるいは核テロ対策などセキュリティの分野は、特別な専門分野あるいは厳しい情報管理下の事項として、特殊な分野との位置づけで、経営トップを始め全体を総括するマネジメント層が常に留意すべき対象とはされていなかったのではないかと。また、原子力施設における核セキュリティに係る訓練は、潜在する核セキュリティ上の不備を洗い出すことのできる実効的なものになっているか、など多くの検証を要する課題があるのではないかと。更に、核物質の盗取と転用の可能性の観点から、核セキュリティと保障措置のシナジーも認識せねばならないだろう。これら3つのS(原子力安全、核セキュリティ、保障措置(核不拡散))のシナジーを考えれば、安全、核セキュリティ、保障措置の専門家には、原子力施設を預かる組織内はもちろん、産業界、学界など組織の枠を超えて場を共有することも求められるのではないかと。そして、この3つのSへの適切な対応を誤った時のリスクの大きさを考えれば、原子力施設を預かる組織の経営トップには、「安全文化」と共に「核セキュリティ文化」の育成・維持の先頭に立つことが今改めて求められよう。

原子力委員会核物質防護専門部会が福島事故後に出した報告書「我が国の核セキュリティ対策の強化について」は、「(福島事故で)テロ行為の対象として原子力施設に対するテロリストの関心が高まった」との懸念を表明している。

この懸念を絶対に顕在化させてはならない。

(2013年1月15日 記)



原子力安全の確保に必要な人材の育成を



代谷 誠治(しろや・せいじ)

京都大学 名誉教授
京都大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学、京都大学原子炉実験所所長、原子力安全委員会委員などを歴任。専攻は原子炉物理学。

1. はじめに

東日本大震災に端を発した東京電力(株)福島第一原子力発電所における未曾有の原子力事故が発生してから約2年が過ぎた。過酷事故(シビアアクシデント)が我が国で現実のものとなったことについて、発生時に原子力安全委員会委員の職にあった者として慙愧に堪えない。

大きな潜在的危険性を孕む原子力エネルギーの利用に際しては、今一度、原子力安全の基本に立ち返って安全確保のあり方を見直す必要があると考える。危険性が存在する限り、設備や機器等ハードと組織や体制等ソフトの両面において、安全性を高める不断の努力を怠ってはならない。原子力施設の設備や機器類を増強して安全性向上を図り、施設の安全管理や原子力の規制体制を整備して強化する必要があることは論を俟たない。加えて、これらのハードやソフトは人によって運用されるものであることを忘れてはならない。何よりも原子力安全の確保に必要な人材を育成するとともに、原子力の事業者と規制者は共に絶えず技術の研鑽と能力の向上に励み、不断に原子力安全の向上に努めることが不可欠である。

2. 原子力安全の原理・原則に立ち返って安全確保を

原子力エネルギーの利用には大きな潜在的危険性、リスクが存在していることは否定できない。このリスクの顕在化を防止し、安全の確保を図るために、今一度、原子力安全の原理・原則に立ち返って考える必要がある。

リスクが存在する限り、安全性向上に向けた努力を続ける、すなわち継続的改善の取り組みを不断に行うことが肝要である。リスクが消滅しない限り、安全確保に向けた闘いに終わりはない。確かに安全は安心の素であるが、安心しては安全を確保することができないものである。とりわけ安全確保の取り組みに従事する者は、絶えず心配して原子力施設の現状の詳細な把握に努め、安全性を評価し、安全性向上に努めなければならない。

原子力施設の安全を確保するには、施設の現状と安全余裕を適切に把握しておくことが肝要である。現場を重視し、その詳細な状況を絶えず把握して、常日頃から施

設の現状を反映した図面及び文書を整備しておき、それらに関係者が共有しておくことが望ましい。安全余裕に関しては、ストレステストの方式などを大いに活用して適宜評価し、その結果を継続的改善に利用するとともに、常に適切な余裕を確保しておくことに努める必要がある。なお、安全余裕の評価に関しては、安全研究等を通じて評価に必要なデータを取得するとともに、評価手法の高度化を図ることが求められる。

想定外事象は、その発生の予見や防止が、(1)不可能、(2)可能ではあっても、その方法等が不充分であるために起きるものの2種類に分類できる。少なくとも想定外事象(2)については、たとえ発生しても人と環境に重大な影響を与えないよう、あらかじめその時点で最善と考えられる多重の防護策¹⁾を講じておき、多重防護の有効性についてはストレステストを実施するなどして評価を加え、施設の現状を考慮して、かつ積極的に新知見等を取り入れて、適時・適切に防護策を見直す必要がある。これは想定外事象(1)への対策強化にも役立つと期待できる。

原子力事業は許可事業であり、誰しもが行えるという代物ではない。許可を受けた事業者は、自らの事業を遂行するに当たって一義的責任を負わなければならない。当然のことながら、原子力安全についても一義的責任を負うこととなる。もちろん、事業を許可した規制者についてもその責任を免れることはできず、規制者は事業者の原子力安全の向上に向けた努力を助長する責務がある。定式的な点検や検査を行うだけでは形式安全の追求に止まってしまい、ややもすると「木を見て森を見ず」という状態に陥ってしまう。追求すべきは安全性の向上に資する実質安全であり、それに向けた有効な方策を事業者と規制者が共に模索し、実効的な点検や検査の方法を確立すべく改善の努力を続けることが重要である。

3. 原子力利用は科学技術の成果に立脚して成立

原子力の利用は科学技術の発展の成果に立脚して成立したものである。当然のことながら、原子力利用の前提となる安全確保についても科学技術の成果が活用され

る。より安全な原子力利用の実現には、科学技術の健全な発展が必要不可欠であることは自明であり、原子力研究の発展に努め、その成果を進んで取り入れて安全性の向上に資する必要がある。また、将来、たとえ原子力の利用を取り止める方向に進む場合においても、原子力利用を安全な形で終焉に導くために原子力研究の実施が不可避となることは明らかである。

さて、原子力の利用に際し、これまで我が国では規制や安全対策に対する誤った「無謬性」への固執があり、極度に保守的となって新知見や国際標準の取り入れなどが遅れ、ともすれば安全神話の蔓延に通ずる状況が生まれていたように思える。真理の探求に基礎を置く科学技術の発展は、発明・発見に基づき、過去の誤謬を正すことによって成し遂げられるものである。原子力利用に際し、科学技術の発展と相容れないような「無謬性」への固執があってはならない。大いに進取の精神を発揮し、積極的に新知見や国際標準の取り入れなどを行うことにより、さらなる安全性の向上を図ることが肝要である。

原子力は紛れもなく総合科学技術である。総合科学技術の成果に立脚した原子力施設を運用するためには、単に関連する個別専門分野の技術者を糾合するだけでは不十分である。原子力に関する総合的な知識を持ち、かつ個別の専門分野にも習熟した技術者の集団を構成して施設の運用に当たり、あるいは適切な規制を行うことが不可欠である。その際、技術者集団にあっては、従来の縦割り組織の壁を破り、例えば各原子力施設の現状についての認識を共有する仕組みを作り、技術者間で真摯かつ率直な意見交換ができ、必要に応じて緊密な連携が図れるような統合的組織を構築することが重要である。その上で、事業者と規制者との間で、それぞれの立場をわきまえた上で意見交換を積極的に行い、原子力施設の現状に関する認識の差を埋めることが必要である。

4. 原子力安全の確保に必要な人材の育成を

既に述べたとおり、原子力の安全確保には、ハードとソフトの両面における継続的改善が必要となるが、これを実行して運用するのは人である。原子力に関する総合的な知識を持ち、現場を熟知した技術者集団の育成が原子力の安全確保に不可欠であることも既に述べた。これらの帰結として、原子力安全の確保を図るために最も重要なことは、安全確保に必要な人材を育成し、供給し続けることであると筆者は考えている。

原子力安全の確保に必要な人材を育成する上で、大学等における原子力の教育研究を充実させ、日本原子力研究開発機構等における原子力研究、とりわけ安全研究を充実・強化することが重要と考える。原子力の事業者や規制者においても、安全性の向上を目指して新知見や国際標準の取り入れ、あるいは独自の方法の開発に真摯に取り組むことに努め、それに必要な人材を積極的に採用

することになれば、人材育成に弾みがつく。

原子力の教育研究に関しては、特に実験教育、実験研究を充実させることが重要と筆者は考えている。実験に失敗は付き物である。実験では、当初の計画あるいは思惑どおりに順調に事が運ぶこともあるが、往々にして想定外の事象や現象に遭遇するものである。計算機シミュレーションやシミュレータでは、失敗しても簡単にリセットしてやり直すことができるが、実験ではそう簡単には事が運ばない。実験の結末は現実の事象として現れ、必然的に実験者はそれへの対応を行う必要が生じる。

原子力の実験では実際に核燃料物質や放射性同位元素を取り扱うこととなり、各種の安全規制の制約を受ける。設備・機器類が故障すれば修理・修復しなければならず、少しでも放射性物質による汚染が発生すれば汚染の拡大を防止し、除染しなければならないが、これらは安全規制の下で行う必要がある。もちろん、準備や後始末等についても安全規制の下で行う必要があることから、誤った成果主義が横行している現状では敬遠されがちであるが、実験を通じて原子力安全の一端を体験し、実際の現象への対処を経験する貴重な機会ともなる。

5. おわりに

原子炉施設には、原子炉の運転に関して保安の監督を行わせるために原子炉主任技術者免状を持つ者の中から選任された原子炉主任技術者やその代行者が存在するはずである。運転に関して保安の監督を行う者は、当然、施設の現状を熟知しているはずであり、運転時に事故を含めて異常が発生した場合に備えて、常日頃からの確かな指示が出せるように準備をしているはずである。原子炉事故を未然に防ぐためにも、事故影響を最小化するためにも、原子炉主任技術者及び代行者がその能力を存分に発揮できる環境を整備しておくことが重要と考える²⁾。

最後に、大きな潜在的危険性がある限り、「これで十分に安全」という状態はあり得ない。原子力に携わる者は、自らの社会的責任を果たす責務があり、リスクの顕在化を防ぐために不断の努力を惜しんではならない。我が国において世界最高水準の安全性を達成することを目指し、ぜひとも人材の育成に力を注いでいただきたい。

(2013年2月15日 記)

— 参考資料 —

- 1) 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—多重防護の考え方について。
<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/enzen/shidai/genan2012/genan036/siryu4-1.pdf>
- 2) 木村逸郎, 事故時の原子炉主任技術者の在り方の再検討, 日本原子力学会誌アトモス, 54[11], 755(2012).



安全規制の最適化とは



岡本 孝司(おかもと・こうじ)

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻専攻長・教授

2004年より2012年まで旧原子力安全委員会原子炉安全専門審査会委員，旧保安院ストレステスト意見聴取会委員などを歴任。専門は原子炉熱流動・原子力安全工学・可視化情報学。英国物理学会フェローなど。

1. 想定外をマネジメントで対応する

今年2月にロシアに隕石が落ちて、数多くの建屋が損傷した。隕石が落ちることがありえることは、皆知っていたが、それが膨大なエネルギーを放出し、衝撃波として荷重を加えることはある意味、自然は人の知識を超えていることを示したと思っている。

福島第一発電所事故には、いくつもの教訓があるが、今後、原子力を安全に管理していくために、最も重要な教訓は下記3点にまとめられる。

- (1) 「想定外」を想定すること
- (2) マネジメントを充実させること
- (3) リスクを考慮した規制を行うこと

(1) 「想定外」を想定すること

最も重要な教訓は、想定外を想定することである。事故の後、想定外というキーワードが踊った。原子力安全の考え方に想定外はあってはならないし、元々想定外を想定する考え方があった。しかし、対応が不十分であったことから対応を取ることができなかった。このような「想定外」を想定するためには、いくらハードウェアを揃えても仕方がない。ハードウェアで対応する設計を拡張しても、設計の領域であって、想定外には対応できないのである。

IAEAの深層防護思想に取り入れられている Design Extended Condition (DEC) は設計拡張事象と呼ばれていて、過去、設計を超える状況を考えるとされていた、Beyond Design Basis Accident (BDBA) 設計基準超過事象の考え方は明らかに異なる。Beyond DEC (BDEC) を考える必要がある。これが、いわゆる深層防護の第4層に相当する。深層防護では、各層の独立的効果 (independent effectiveness) が必要条件となっている。

いくらハードウェアを準備しても駄目である。そのハードウェアを含めて、人が対応できることが第4層の最も重要な考え方である。これをアクシデントマネジメントと呼ぶ。

今、パブコメになっている規制庁の新基準は、この意味から不合格である。DECにはなっているのかもしれ

ないが、BDECにはなっていない。特にシビアアクシデントを緩和する第4層については、従来の第3層と同じ考え方になってしまっている。シナリオを想定してハードの対策をとるだけでは、アクシデントマネジメントとしては不十分である。第4層を充実させないと、隕石落下を超えるような、想定外の事象が起きたときに、対応ができないことは明らかである。

(2) マネジメントの失敗

事故の、もう一つ重要な教訓は、マネジメントが失敗したことである。緊急時対応として、それなりの教育訓練はなされていた。炉心溶融後の対応マニュアルも用意されていた。しかし、ハードウェア(電源や通信機など)が使えず、また、ソフトウェア(対応力など)も不十分であり、放射性物質の放出を防ぐことができなかった。第4層の準備が不十分で、簡単に破られてしまったと考えることができる。事故の教訓としても、第4層マネジメント能力を拡充することが必須なのである。

新基準では、マネジメント能力については、保安規定で規定し、保安検査で検査するとなっている。つまり、再稼働の条件でもないし、安全審査の対象にもなっていない。なぜであろうか? 規制委員会に、マネジメント能力を評価する実力がないからではないのかと危惧する。難しいことは先送りして、簡単なことだけを見る基準になっているように思える。

(3) リスクを考慮すること

さて、事故のもう一つの大きな教訓は、規制側のマネジメント能力の欠如である。事故の前の規制は、難しいことを先送りして、簡単なことを見ていた。リスクをともに考慮するのは難しいので先送りをし、リスクにはほとんど関係のない、ハンコの有無や誤字脱字チェックをしていた。この先送りにより、リスクを考えない規制を続けていたため、大きなリスクを見落としていたのである。残念ながら、今の規制委員会は、先祖返りをしており、事故前よりももっと悪くなっている。リスクのほとんど減らない、簡単な員数確認や、書類記載ミスを一生涯実施している。ところが、リスクを大きく減らす、

マネジメント能力の評価については、ほとんど無視している。これは、リスクを考えていない規制であるためである。

逆に、自分たちの組織リスクには非常に敏感で、組織を守ることに一生懸命に見える。規制委員会にマネジメント能力がないことは、放射性物質拡散計算のドタバタを見ても明らかである。下請けである JNES に責任を押し付けたようであるが、マネジメント能力の欠如は隠せない。ここを充実させるためには、謙虚に学び、経験を積むことが必要なのだが、自らコミュニケーションをとらずに、孤立している現状では無理かもしれない。

2. 規制とリスク

国会事故調は、その英訳報告書で、事故の原因を“Japanese Culture”に起因するとし、“Made in Japan”であるとしている。これは、大きなミスリーディングである。某国の方と話したときに、国会が福島第一事故は日本特有の原因であると言っているのだから、うちとは関係ないと言われていた。国会事故調が間違っているのだと言って、改善を進めていただくようお願いしたが、ちゃんと進めていただけるかどうか。

さて、規制としては、規制をやっていることをアピールしなくてはならない。最もやりやすいのは、とにかく何でも厳しくして、厳しいことをやっていると見せることになる。しかし、それは、リスクとは関係ない。このやり方では、規制が事故を誘発するリスクが高くなる。JCO 事故の後、変な規制を行ったことによって、福島が起きたと言っても過言ではない。また、変な規制をすると事故が起きる。

今の規制委員会の考え方は、とにかくハードウェア偏重である。リスクの高いものは、対策をしてリスクを下げねばならない。これは必須である。リスクの低いものに対策することも一瞬よいように思える。しかし、対策というのは、状態を変更させるので、必ず別の場所にリスクを導入する。対策によって、ある部分のリスクは下がったかもしれないが、別の部分のリスクが増え、結果的にリスクを増やすことも良くある。有名な話として、2001年同時多発テロの後、移動手段として車の利用が増え、結果的に交通事故で亡くなる人の数が増えた。飛行機を止めて車にする対策をとったことで、テロにあう確率は減ったが、事故に合う確率が増えてしまったわけである。とにかく何でも対策をとればよいというのは間違いなのだ。総合的なリスクを低減することが必須であり、単純ではないのである。そこを考えられるには現場を良く知ることが必要であり、東京の机の前に座っているのは、全く駄目である。

リスクに正面から取り組まないと、また事故が起きる。想定外を想定すること、マネジメント能力を評価することを、リスクをベースに考えることが必須で、その

規制を行わねばならない。

3. 科学的にリスクを考えること

今、外部事象としては、活断層の危険がクローズアップされている。しかし、ここでの議論は、活断層かどうかという無意味な議論に終始している。一言で活断層といっても、その中身は数多くあり、地震を起こす、もしくは地震活動に伴って変位を起こすものが重要だ。また、その変位にもピンからキリまであり、本当に重要なことは、原子力安全が脅かされるかどうかである。リスクを科学的に正面からとらえなくてはならない。

風が吹けば桶屋が儲かるという言い回しがある。論理的に繋がっているように見えて、実は、ありえないという例え話である。前提と結論の間に、非論理的な飛躍があるのだが、そこを論理的に見せかけているのである。今の活断層の議論は、まさに風が吹いて桶屋が儲かるのがけしからんから、子供は常に家の中に居させようと言っている状態である。神戸での地震の後、地震や耐震に関する科学は大きく進歩した。今、活断層だ何だと呼ばれているものについても、様々な知見が得られて来ている。ところが、今の規制委員会は、過去の研究をすっ飛ばして、感覚で議論をしているようにしか思えない。風と桶屋の間を結ぶ、数多くの関係について、十分な研究があるのに、それらの研究を無視して、風が吹いたら桶屋が儲かるかもしれないと言っているにすぎない。おそらく、それらの一流の先生方の意見を聞かないのは、間違いを指摘されるのが怖いからなのであろう。

一つの重要な問題は、規制委員会にコミュニケーション能力がないことにある。米国では、規制と事業者が、独立な立場で、同じ目標に向かって議論を続け、その議論の中から、より安全を確保するための成果が生まれてきている。一方、日本の規制委員会は、事業者と議論することさえ悪であるかのような風潮を規制委員会自体が作りだしている。規制委員会と事業者は原子力安全に対して対等なのだ。決して規制委員会は偉くない。原子力安全について、事業者に教えてもらわねばならないことも多々あるであろうし、逆に事業者に教えることも多々あるのである。お互いが努力を続けて、議論をすることによって初めて原子力安全は達成される。形だけ、2時間程度意見を聞き置くという形式をとっても、議論ではない。

議論がないと、一方的に、風が吹けば桶屋が儲かる視点からの規制が行われる。事業者は、リスクが高くなることが分かっているのに、言われたとおりに対策をする。結果として、日本の原子力発電所のリスクは高まり、また事故が起きる。これは、火を見るよりも明らかなので、万一、事業者が言われたとおりの対策をするのであれば、日本では原子力を止めるべきである。Japanese Culture なのだとあきらめるしかない。

(2013年2月18日 記)



インテグラルファーストリアクター (統合型高速炉, IFR)の物語



田中 伸男(たなか・のぶお)

日本エネルギー経済研究所 特別顧問
前国際エネルギー機関(IEA)事務局長。東京大学経済学部卒業後、1973年通商産業省入省。国際原子力企画官、産業資金課長、通商機構部長などを歴任。在米日本国大使館書記官、同公使、OECD 科学技術産業局長など、多年に渡る海外勤務経験。(62歳)

去年の10月、米国は加州バークレイで開かれた統合型高速炉 Integral Fast Reactor に関する国際会議に出席した。本誌の読者であればご存知だろうが IFR とは1988年に米国アルゴンヌ国立研究所が提案したウラン、プルトニウム、ジルコニウムの混合金属燃料を使った高速炉と電解精製による乾式再処理(パイロプロセッシング)を組み合わせたサイクル統合施設である。1960年代以来、アイダホで EBR 2 実験炉として運転されてきた実績がある。日本やフランスが進めてきた酸化燃料と湿式化学法再処理とは違う路線だが、既に米国では GE が PRISM 炉として実用化に途をつけ、中国、インドにおいても研究されている。英国が近い将来、プルトニウムバーナーとして採用する可能性が高い。実は日本の電力中央研究所もアルゴンヌ国立研究所と共同研究を行っていたが、クリントン政権の高速炉研究凍結で中断した。最近では特に韓国が国をあげて進めている。私は経済産業省に勤務し原子力関係のポストにもついでながらこの IFR についてほんの半年前まで知らなかった。不明を恥じるばかりだが、驚くべきことに私が話したほとんどの方もそうであった。もっと早く知っていたら日本は核燃料サイクルについて違う選択をしたかもしれないという人もいた。

アルゴンヌ国立研究所で開発に当たったチャン教授が解説してくれた。IFR はプルトニウムの効率的な利用という高速炉ならではの経済性(軽水炉では燃料の1%しか燃やせないが、IFR は99%燃やし尽くせるためほぼ無尽蔵のエネルギー源を手に入れることができる)に加え、金属燃料と減速材ナトリウムの熱伝導率特性から全電源喪失の場合でも炉が自然に停止する固有安全性が実証されており、かつプルトニウムが施設外部に出ないという閉鎖型サイクル技術であって核不拡散保障措置にも優れている。さらにプルトニウム以外の放射性物質マイナーアクチニド(MA)が炉内で一緒に燃えるため最後に残る高レベル廃棄物の放射能が天然ウラン並みに落ちるのに必要な年数が軽水炉の10万年に対しわずか300年という夢の原子炉だ。実はクリントン政権による撤退決定

後もアルゴンヌで廃棄物処理技術として細々ながら研究が続けられてきたが、それはパイロプロセッシングが TMI 事故で溶けた燃料の再処理にも使われるなど、有効な使用済み核燃料処理技術であるからだ。福島第一原発事故でいろいろなものが混ざりこんでメルトダウンした燃料の処理にも使えるはずである。また常圧のタンク式炉は小型でも効率が高くモジュラー炉として途上国での展開も期待できる。東芝が開発している小型炉も基本的には同じものと言える。なぜこれほど結構なものが世界で採用されなかったのでしょうかとチャン博士に聞くと、「馬に乗って川を渡っているときに川の真ん中で馬を乗り換えることは難しいといつも言われてきました」と寂しそうに笑われた。一度確立した技術パラダイムを変更するのは大変だ。

なぜ韓国が推進しているかといえば国内で使用済み核燃料の再処理をする必要があるからだ。韓国は日本と違い商業再処理が認められていない。しかし早い原発では2016年に原子力発電所の燃料プールでの使用済核燃料中間貯蔵が限界にくる。原子炉の新設があればその冷却プールをやりくりして2020年過ぎまで持ちこたえられる。根本的解決策として2014年の米韓原子力協定(123協定)改定をにらみ米国に韓国での再処理導入を認めさせるのが最大の関心事。六ヶ所村再処理工場で採用されている Purex 法はもともと兵器用の純粋プルトニウムを作るための技術であるのに対して、パイロプロセッシングからは純粋プルトニウムはできない上にそれが施設外に出ることもないという核の拡散性が低い技術。韓国は日本に認められているのになぜダメなのかと米国をつついている。もともと米国のアルゴンヌ国立研究所で開発に参加した韓国人チャン教授らの協力も得て韓国政府がデザイン認証の準備予算を去年3月につけ、韓流の核燃料サイクル構想が始まっている。ただし朝鮮半島でプルトニウム生産が行われれば核拡散のリスクが大幅に高まると考える米国政府がそう簡単にOKを出すとは思えない。(商業再処理は認めずとも研究用の再処理は認められる可能性はある。)しかし他方で日本が原子力を辞める

という決断をすると話は変わってくる。去年の八月に知日派の論客ジョセフ・ナイとリチャード・アーミテージはCSISの日米関係に関する論文の中で、民主党のエネルギー安全保障、なかんずく原子力技術の放棄に疑問を呈し、日本は一流国であることを辞めるのかと問いかけた。その場合、米国は核不拡散のパートナーとして止むを得ず日本に代わって韓国を選択せざるを得ないことになる。

米韓原子力協定改定に当たって米国は韓国に商業再処理を認めるよりも米国に使用済核燃料を引き取る方がましと考えている可能性もある。去年8月に米国ニューメキシコ州で開かれた日米韓の原子力対話に参加したが、話題は使用済核燃料をどう処理するかだった。近くのカルスバッドにある連邦エネルギー省の廃棄物処理施設(WIPP)も見学した。地下700mの岩塩層に掘ったトンネルに核兵器生産に伴う低中レベル廃棄物が整然と並び岩塩層に溶け込む日を待っていた。米国ではネバダ州のユッカマウンテンに代わる処理方法がエネルギー長官に提言されたところである。現在、使用済燃料は乾式容器で発電所内に保管されているが、将来これを集中的に暫定貯蔵する施設を作るのか、カルスバッド施設を拡張して直接処分するのか等議論が始まったところだ。ユッカマウンテンでの処分の特徴は使用済核燃料を新型高速炉の燃料として将来再利用する可能性を残す点(リトリーブリティ)である。ウラン資源に限界がある以上、プルトニウムを含む使用済核燃料は単なるゴミではなく有用な資源だ。シェールガスやシェールオイルが大量に見つかっている米国はすぐにプルトニウムを燃やす必要はない。いずれ技術が確立し再使用できる日までとっておけばよい。

しかし資源が十分にはない国にとっては重要である。中国が高速炉に熱心なのもそのためだ。インドは国内で豊富なトリウムを燃やす新型炉の研究に熱心である。日本でも高速増殖炉「もんじゅ」は自前のエネルギー源を確保するために開発されてきた。しかし福島第一原発事故以来、核燃料サイクルが見直されている。高速増殖炉技術の遅れと高レベル放射性廃棄物の地層処分地の確保の困難性がその背景にある。全量再処理路線に代わり、一部を乾式容器で暫定貯蔵したり、直接処分することが検討されている。とりあえず貯蔵するにせよ、将来どのような使い方ができるのかをはっきりさせない限り国民は納得しないだろう。IFR実現に今欠けているのは軽水炉の使用済み核燃料を処理するパイロプロセッシングプラント

を建設して金属燃料を作り、規模の大きいIFR実証炉を建設しその運転実験することだ。これを目標にすれば「もんじゅ」も金属燃料を燃やしIFR実証実験に貢献できる。日本では六ヶ所村の再処理施設を増設することが難しいのだとすれば、むしろ軽水炉の使用済み核燃料をパイロプロセッシングによってIFRの燃料として使う新核燃料サイクルも補完的に採用すべきではないか。IFRは濃縮ウランを軽水炉で燃やし、使用済み核燃料をPurex法で再処理して高速増殖炉で使うという軍事技術を応用した技術体系とは違う本来的に原子力平和利用の技術体系である。ウラン濃縮は広島型原爆につながるし、プルトニウムは長崎型原爆に使われた。軽水炉は原潜の推進機構であり、地上に置けば冷却水が無くなるリスクがついて回る。しかしナトリウムを減速材とする高速炉は本来的に原潜にはなじまない。この研究は平和利用に徹してきた日本が世界をリードすべきである。また日米韓など同じ核不拡散体制を信奉する国が共同で進めるべきだろう。米国や韓国の友人達との対話は希望を持たせるものであった。日韓がケンカをしている暇はない。

福島事故以来、原子力技術は大きなリスクがあるという認識が確立したが、人類に必要な技術でもある。パークレーでの会議に参加した藤家洋一元原子力委員会委員長の発言に会場が静まり返った。彼は長崎に原爆が投下された直後から医療隊隊長として救護に当たった永井隆博士の次の言葉を引いた。

「スベテハ終ツタ。祖国ハ敗レタ。吾ガ大学ハ潰滅シ吾ガ教室ハ烏有二婦シタ。余等亦人々傷ツキ倒レタ。住ムベキ家ハ焼ケ、着ル物モ失ハレ、家族ハ死傷シタ。今更何ヲ云ハンヤデアル。唯願フ処ハカカル悲劇ヲ再ビ人類ガ演ジタクナイ。原子爆弾ノ原理ヲ利用シ、コレヲ動力源トシテ文化ニ貢献出来ル如ク更ニ一層ノ研究ヲ進メタイ。転禍為福。世界ノ文明形態ハ原子エネルギーノ利用ニヨリ一変スルニキマツテキル。サウシテ新シイ幸福ナ世界ガ作ラレルナラバ、多数犠牲者ノ霊モ亦慰メラレルデアラウ。」

人間は悲劇からどう立ち直れば良いかを知っている。福島県についても同じことが言えないだろうか。廃炉や放射能除染には時間とお金がかかる。廃炉、除染など福島事故の後始末に関する国際研究に加え、前向きに世界のための原子力技術開発を進める拠点としても福島は来る。IFRに関する世界の英智を福島に集める。それこそ災い転じて福と為す方法ではないか。

(2013年2月7日 記)



このコーナーは各機関および会員からの情報をもとに編集しています。お近くの編集委員(目次欄掲載)または編集委員会 hensyu@aesj.or.jp まで情報をお寄せ下さい。資料提供元の記載のない記事は、編集委員会がまとめたものです。

東通発電所の破砕帯で規制委と東北電が見解

東通原子力発電所の敷地内にある破砕帯を調べていた原子力規制委員会の東通原子力発電所敷地内破砕帯に関する有識者会合は2月18日、破砕帯が活断層である可能性が高いとする報告をまとめた。同会合では、敷地内を走るF-3断層には逆断層センスのずれが認められ、その上を覆う新しい地層が断層に平行に並ぶように配列しているため、F-3断層は、その上に新しい地層が堆積した後に活動したものであり、「後期更新世以降(約12~13万

年前以降)に活動した耐震設計上考慮する活断層である可能性が高い」とした。

これに対し東北電力は2月18日、「当社はこれまで敷地内断層には活動性がないと判断」してきており、「今後は多面的なデータに基づく総合的な評価のために、新たに地質調査を実施し、改めて活動性がないことを確認する」とのコメントを発表した。

(原子力学会編集委員会)

国会、原子力規制委の人事を承認

衆議院は2月14日の本会議で、田中俊一氏を原子力規制委員会委員長に、島崎邦彦氏ら4人を同委員会委員とする人事を承認した。参議院も15日に承認した。野田前

政権は民主党内から異論があったため同意人事を先送りし、例外規定に基づいて首相権限で任命していた。

(同)

技術同友会が過酷事故防止で提言

技術同友会は1月23日、福島第一原子力発電所事故を受け、「過酷事故を2度と起こさないための対策の提言」を発表した。10項目からなり、元原子力委員長代理の齋藤伸三氏(放射線利用振興協会顧問)をヘッドとする「原子力発電所過酷事故防止検討会」で昨秋より検討されてきたもの。

提言は設計基準を超えた事象に対し、安全設備が機能を発揮できなかった福島発電所事故対応に鑑み、過酷事故の防止・影響緩和策を目指すIAEA深層防護レベル4の対策を充実させるよう、基本理念とともに具体的安全策を述べた。そこではいかなる自然災害、人為事象も「想定外」では済まされないとし、「『想定外』をなくす努力こそが大切」と訴えている。また、原子力安全確保の体系確立と運用のための指針・基準類の見直しにより、世界的に評価されるレベルに高めるべきとし、規制機関に対しては深層防護レベル4の事故影響緩和の根本原則を策

定するよう求めた。さらに国と事業者は協働し、科学技術者が関わる学会等を軸として、広く国民とのリスクコミュニケーションを行い、原子力発電の便益とリスクに関するコンセンサスを得る活動に努めるべきとしている。

深層防護レベル4に対する具体策としては、多種多様な設備等の活用を含めた組み合わせを想定し、実効性ある方策を構築するアクシデントマネジメントについて言及。その安全確保機能は、共通要因故障を排除した信頼性確保、位置分散による独立性などを考慮し、可搬式設備や移動式設備、接続口に多重性を持たせるといった柔軟な対応を求めている。さらに、専門職の設置、手順書作成、教育・訓練の徹底、規制機関による検査・監視にも触れ、継続的改善に努めるべきとしている。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

衆院に原子力問題調査特別委員会を新設

衆議院は1月28日の本会議で、議員40名からなる原子力問題調査特別委員会を新設することを決定した。

本会議後の委員会では、自民党の森英介氏が委員長に互選された。委員会は、国会に設置された「東京電力福島原子力発電所事故調査委員会(国会事故調)」が昨年7

月にまとめた「7つの提言」の第1番目に掲げられていた「国民の健康と安全を守るために、規制当局を監視する目的で、国会に原子力に係る問題に関する常設の委員会等を設置する」との提言を受けたもの。提言から半年以上たってようやく設置が実現した。

規制委，地震・津波で新安全設計基準骨子案

原子力規制委員会の専門家チームは1月29日、原子力発電所の地震・津波に関わる新安全設計基準の骨子案を取りまとめた。今後、パブリックコメントに付せられる。

規制委員会は、旧原子力安全委員会が昨年3月に整理した耐震指針の改訂案を引き継ぎ、法令に基づく安全設計基準として定めるべく検討を行ってきた。

このほど取りまとめられた新安全設計基準の骨子案では、地震および津波に対する設計の基本方針として、シビアアクシデントに至らないことを立地条件で担保する考えから、想定される地震動に対し十分な支持性能を持つ地盤に設置し、重要な安全機能を持つ施設は、将来も活動する可能性のある断層等の露頭がないことを確認した地盤に置くよう求めている。

施設の設計に用いる基準地震動については、内陸地殻内地震に関して耐震設計上考慮する活断層を、後期更新世以降(約12~13万年前以降)の活動が否定できないもの

と定義。地震調査研究推進本部の見解も踏まえ、活動性が明確に判断できない場合は中期更新世以降(約40万年前以降)まで遡って、地形、地質・地質構造、応力場等を総合的に検討した上で、評価するよう求めている。

新たに設けられた基準津波については、地震のほか、地すべり、斜面崩壊、火山現象などの要因やそれらの組み合わせも考慮し、施設に最も大きな影響を与えるものとして、数値計算を実施し策定することとし、個別の安全審査で妥当性が十分確認されなければならないとしている。さらに、津波に対する設計方針は、IAEAの安全文書も参照し、遡上波の流入、漏水による浸水範囲、水位下降による取水性低下、津波防護施設・設備、2次の影響など、6項目の設置許可基準を掲げている。

規制委員会では、今後、新基準施行までに、実際の運用に向けたマニュアルを整備していく考えだ。

海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[米国]

DOE, 「2048年までに最終処分場を操業開始」

米エネルギー省(DOE)は1月11日、民生用原子炉から出る使用済み燃料および高レベル放射性廃棄物(HLW)の管理処分戦略を公表し、2025年までに集中中間貯蔵施設を、48年までに最終深地層処分場を操業開始とするなどの計画を明らかにした。昨年1月に政府の有識者特別(ブルーリボン)委員会(BRC)が提示した勧告に応じて、各発電所敷地内に貯蔵されている使用済み燃料を早急に政府が引き取るための、新たな管理処分計画を議会にかける考えた。ただし、サイト選定はBRC勧告通り、地元の同意に基づいた方式を取るため、約20年の歳月と数百億ドルを費やしたユッカマウンテン計画に替えて、作業を一からやり直すことになる。

今回の戦略計画は、使用済み燃料等の輸送・貯蔵・直接処分で統合システムを開発するための持続可能プログラム実施に向けた枠組となるもので、BRC勧告に対するオバマ政権の政策声明という位置付け。同システムの全体設計を説明するとともに、そうしたシステムの実行に必要な改革の概要を示している。

まずBRC勧告の重要原則に則り、閉鎖済み原子炉の使用済み燃料を最優先に、サイト自治体の同意に基づく立地方式で段階的に1か所以上の中間貯蔵施設、および/または処分場を建設していく。議会の承認を得つつ、

差し当たり10年間は、それぞれの施設の一つに焦点を合わせて以下のプログラムを実施。すなわち、(1)2021年までに中間貯蔵・パイロット施設の立地・設計・許認可手続き、建設、および操業開始を実現、(2)25年までに一層規模の大きい中間貯蔵施設の利用が可能となるよう立地と許認可を進める、(3)48年までに深地層処分場が利用可能となるよう、サイトの選定および特性評価に関する実証作業を進展させる。

このプログラムを実行に移すには、処分システムの要素開発をタイムリーに行うための法整備が不可欠で、同意ベースで立地を進める際の要件や十分な資金を必要に応じて調達できる基金方式への改革、および同プログラムの実施を担当する、自立性の高い新組織創設も必要だ。このため、政府は議会がこうした包括的な法整備に向けて動き出すことを期待。その間、政府はDOEを通じて、使用済み燃料等を最終的に輸送・貯蔵・処分するための様々な地層の適性研究や処分システム概念の検証といった活動を既存の議会承認の枠内で行っていくとしている。

フェルミ3建設計画、ESBWRで環境問題クリア

米原子力規制委員会(NRC)のスタッフは1月18日、DTE エナジー社がGE日立ニュークリア・エナジー(GEH)社製・ESBWR(高経済性・単純化BWR)の建設を想定して提出していたフェルミ3号機の建設・運転一

括認可(COL)申請について、地元民の利益や水資源への影響など環境影響上の問題は見当たらないとの分析結果をまとめた最終環境影響声明書(FEIS)を発行した。NRC 委員に COL の発給を暫定的に勧告するもの。COL 審査を構成する安全審査と環境影響評価のうち、片方をクリアしたことから、同計画は実現に向けて大きな節目を迎えている。

ESBWR は出力150万 kW 級で、受動的安全性を備えるとともに設計と操業を簡素化した次世代設計。米国の標準設計としての認証(DC)審査を NRC から受けているところで、GEH 社は2011年3月に安全性と技術面での承認である最終安全性評価報告書(FSER)と最終設計承認(FDA)を取得。これに続いて関連規則が制定されれば今年中にも DC が発給されると見られており、採用計画への COL 発給に向けた条件の一つが整う段取りだ。

一方、DTE 社が申請したフェルミ3号機計画の COL 審査では、安全上の問題がないことを保証するFSERをNRCが発行する必要がある。また、FEIS発行に伴い、政府の協力機関としてNRC審査チームとEIS作成で協働した米陸軍工兵司令部(USACE)からは、水質浄化法とUSACEの規制要件に基づく許可が発給される見通しである。

[カナダ]

ハイドロ・ケベック社、ジェンティリー2号機を閉鎖

カナダのハイドロ・ケベック社は昨年12月28日、ケベック州で29年間操業したジェンティリー原子力発電所2号機(CANDU炉, 79.5万kW)を閉鎖した。2008年には運転寿命の延長を目的とする大がかりな改修プロジェクトを計画したが、その見積経費は2倍以上に増加。同炉による発電電力の価値が低下したこともあり、「このプロジェクトを経済的に正当化することはできない」と結論づける閉鎖勧告報告を10月、州政府に提出していた。

同炉では今後、2014年半ばまでの18か月間に燃料と重水の取り出しや設備機能の解除を実施。すでに同1号機も1972年に閉鎖済みであることから、同発電所は40年間の休眠状態に入る。この間、使用済み燃料は7年間の冷却期間を経て乾式貯蔵キャスクに移されるが、休眠期間終了後はサイトからも撤去。続いて設備の解体を開始するなど、2062年までにはサイト全体が原状に返される計画だ。

これらの措置はカナダ原子力安全委員会が監督予定で、実施に際してハイドロ社は説明会を開催する。2号機の廃止措置には、50年以上の期間で18億カナダドルを要すると見積もっている。

ウラニウム・ワン社、ロシアの100%子会社に

カナダの大手ウラン生産業者であるウラニウム・ワン(U1)社は1月14日、ロシアの国営アトムレドメゾロト(ARMS)社が同社の普通株を100%取得するという取引計画を取締役会が満場一致で受け入れたと発表した。

ARMS 社は現在、U1 社株の51.4%を保有しており、全株式の取得契約が成立すればU1社は同社の完全子会社となる。ARMS 社はU1社を足がかりに、世界規模の事業成長を遂げる戦略を展開中。現在の市場環境は変化しつつあり、この目的の達成には民間企業体であることが一層効果的との判断に基づいていると説明した。

ARMS 社の取引計画によると、同社は未保有の株数48.6%を1株当たり2.86加ドルで買い取る予定。1月11日付けの株価に32%のプレミアムが付くことになり、同社が支払う合計額は13億加ドルに達する見通しだ。手続きは3月のU1社株主総会および規制当局の承認を得た後、今年の第2四半期までに完了するとしている。

U1社に対してはかつて、日本の東京電力と東芝および国際協力銀行がウランの安定供給を目的に資本参加。しかし、2010年8月にARMS社がU1社株の過半数を取得したのを機に、長期的に一定のウラン精鉱を確保できることを条件に資本関係を解消している。

[EU]

欧州議会、欧州炉の安全性向上で決議案

欧州議会(EP)の産業・研究・エネルギー委員会(ITRE)は1月24日、「欧州の事業者は原発が自然災害に耐え得るよう安全性を改善するための経費250億ユーロすべてを負担すべきだ」などとする24項目の決議案を承認した。福島事故後に欧州連合(EU)域内で実施されたストレステストによる勧告を受けたもので、2月6日の本会議でEP議員が原子力安全に関する議論を重ねた上で、7日に同決議案の票決を行うことになっている。

ITREのA・サルトリ委員長によると、同決議はEUが策定準備を進めている「原子力安全指令」の叩き台となるもの。「原子力は現在のEUの電源構成において重要な存在であり、ストレステストで行われたことに対する我々の確固たる支援は、EPが原子力の安全性とエネルギー供給保証の結合をどれほど重要と考えているかの表れだ」と指摘した。また、加盟各国が同テストによる発見事項を推進するための具体策を取るとともに、最も適用レベルの高い基準を早急に採用するであろうことを確信していると述べた。

EU加盟15か国の145基で実施された包括的なリスク・安全評価の結果などを考慮して欧州議会が決議案に含めた項目は以下のとおり。

- (1) EU域外の原子力発電国にもストレステストの実施、および結果の共有を働きかけるようECとEU加盟国に要請する。特に重要なのは、国際的な安全基準の強化や、その適切な実施である。
- (2) 福島で再び浮き彫りになった放射性廃棄物による災害は、域内の施設はもちろん、トルコのアククのように地震と津波のリスクが高い近隣諸国でも発生し得ることから、EUは高リスク地域での発生防止対策を取るべきだ。
- (3) 最良と特定された慣行を自国の規制に組み込むようEU加盟国とその規制当局に呼びかける。
- (4) 域内の132基で必要とされた安全性改善対策の総経費・100億～250億ユーロについて、各国の規制当局と事業者が協力して一層詳細なコスト分析を実施するよう要請。そうした改善費が納税者ではなく原子力事業者によって賄われねばならないことを認める。

同委はこのほか、原子力保険と賠償責任に関する新たな提案が年末までに提出されるべきだと明言。ECもこの関連で、ストレステストによる勧告事項の実施に関する報告書を2014年6月までに公表する計画だ。

[英国]

サイズウェルBの使用済み燃料乾式貯蔵施設を建設

英国の稼働中原子力発電所のほとんどを所有するEDF エナジー社は1月14日、同国唯一の軽水炉であるサイズウェルB原子力発電所(PWR, 125万kW)用に、使用済み燃料の乾式貯蔵施設(DFS)の建設を開始すると発表した。

既存の貯蔵プールが2015年に許容量に達することから、これに間に合うよう2年間で完成させる計画。英国内で深地層処分場が利用可能になるまで、サイズウェルBが運転期間中に発生させる使用済み燃料はすべて、DFSで安全に保管することになる。

DFS建設計画に対する許可はすでに2011年7月に発給されており、昨年9月に地元の審議会が最終許可を与えた。同発電所では建設作業が地元の道路交通網に及ぼす影響を改善するため、約20万ポンドを先行投資。今年7月の完了を目指して、サフォーク郡審議会の高速道路部門が作業中であることを明らかにしている。

[フィンランド]

ポシバ社、政府に処分場計画建設を申請

フィンランドの使用済み燃料最終処分実施主体であるポシバ社(POSIVA)は12月28日、ユーラヨキ地方のオルキルトに使用済み燃料最終処分場を建設するため、政府に宛てた許可申請書を雇用経済省に提出した。

同国で稼働する既存炉4基に加え、建設中のオルキルト3号機(OL3)および計画中の同4号機(OL4)から出る使用済み燃料9,000トン地下400～450mの深地層に埋設する。今後、原子力法に則り、関係省庁や自治体、一般からのコメント収集手続きが開始されるが、申請書が政府の審査に回されるのは14年末頃になる予定。完成後も政府の操業許可が必要となるため、実際の操業開始は2020年頃になる。

フィンランドでは原子力発電所から出る使用済み燃料は再処理せず、高レベル放射性廃棄物(HLW)として深地層に直接処分する方針。同国で原子力発電所を操業するテオリスーデン・ボイマ社(TVO)とフォーラム社の出資で設立されたポシバ社が、最終処分の研究開発や処分場の建設・操業を実施することになっている。同処分場は「地上で廃棄物を専用容器に封入する設備」のほか、同設備と相互接続された「地下処分場設備」で構成。地下設備はさらに、段階ごとに建設されるトンネル網と関連の技術施設が含まれる予定だ。

[ブルガリア]

ベレネ計画の是非めぐり国民投票、投票率は2割

ブルガリアでベレネ原子力発電所完成計画の是非を問う国民投票が1月27日に行われた。投票率は20.22%と法的な拘束力が得られる6割には遠く及ばなかったものの、投票した国民の60.6%が同計画に「賛成」と回答していることから、現政権が昨年、打ち切りを表明した同計画を再び議会審議の俎上に載せることは可能だ。ただし、エネルギー相は「80万人の国民、全人口の12%足らずが政府の打ち切り決定に反対しているに過ぎない」と強調しており、前政権がロシアとの協力で進めていた同計画の実現は難しくなった模様。その一方、現政権は既存のコズロドイ原発に、米国籍企業との協力で7号機を増設するという自らの案には意欲的で、今年の後半にも環境影響声明書など、政府決定に必要な書類を準備すると明言している。

ブルガリアは欧州連合への加盟と引き替えに閉鎖した古い原子炉の容量を代替するため、北部のベレネで100

万 kW 級の原子炉 2 基を 2014 年までに完成させることとし、2008 年に前政権がロシアと建設契約を締結した。しかし、資金調達がネックとなって、49% の出資を約束していた独 RWE 社が撤退。09 年に発足した中道右派政権の B・ポリソフ首相は昨年 3 月、「コストがかかり過ぎるため実現は不可能だ」として計画の打ち切りを決定していた。

これに異を唱え、国民投票実施のための請願活動に乗り出したのが最大野党で前政権のブルガリア社会党。必要数を上回る署名の収集に成功したが、ブルガリアでは伝統的に、雇用機会の創出効果などの点から原子力に対する世論が好意的。このため、今回の国民投票では改めて意志表明する関心が薄かった、もしくはベレネ原発の経済性に関する与野党の政治的議論の中で、自らの判断を下す意欲が失われたことなどが投票率の低さに表れたと見る向きもある。

国営通信(BTA)によると、組織委が 29 日に公表した最終投票率は 20.22%。関連法によると、前回総選挙での投票数から導き出した有効投票率である約 6 割に達していないため、法的には無効となるが、投票率が 20% 以上で、なおかつ賛成票が過半数を超えていることから、この議題は議会で再審議することができる。

しかし、経済・エネルギー・観光省の D・ドブレフ大臣は同省のウェブサイト上で「議会在審議したとしても政府の判断を再確認することになるだけだ」と指摘。前政権の計画にはあくまで反対する立場を表明した。

現政権としてはベレネ計画用の機器を流用し、新たな原子炉をインフラの整ったコスロドイ発電所に 1 基増設する案を提示しており、昨年 8 月にはコスロドイ 7 号機のハイブリッド化構想に関する実行可能性調査をウェスチングハウス(WH)社に発注。ベレネ用に購入済みのロシア型 PWR 機器を、WH 社製の計装制御(I&C)系や燃料、および親会社である東芝製のタービン発電機と組み合わせる可能性を探っている。

ドブレフ・エネルギー相も記者会見で、地質調査報告など環境影響評価の事前調査や社会経済分析について議論中だと回答。7 号機のサイトや建設に関する認可判断のための準備が進められていることを明らかにした。

[チェコ]

テメリン 3, 4 号機計画の入札でアレバの申し立て却下

チェコの経済競争局(UOHS)は 1 月 24 日、同国のテメリン原子力発電所 3, 4 号機完成計画で、チェコ電力(CEZ)による入札手続きの停止を求める仏アレバ社の申し立てを棄却する裁定を明らかにした。

CEZ 社は出力 170 万 kW の第 3 世代 PWR を 2 基完成

させるという同計画の入札手続きで、11 年 11 月に(1)ウェスチングハウス(WH)社の企業連合(AP1000)、(2)仏アレバ社(EPR)、(3)ロシアとチェコの企業連合(MIR1200)——に詳細な入札招請書を手渡した。しかし、昨年 10 月に「アレバ社の提案書は法的な要件を満たしていない」として、同社を候補から除外。アレバ社が同入札への復帰を求めて UOHS に入札手続きの停止を訴えたのに対し、UOHS は翌 11 月、CEZ 社が選定企業と契約締結するのを暫定的に差し止める指示を出していた。

今回の裁定においても UOHS は「契約書の調印禁止はいまだに有効」と明言。CEZ 社は残り 2 社からの提案書について審査を継続することは可能だが、UOHS が最終的な判断を下すまで契約の締結はできない。同社は今年 10 月までに落札企業を決定し、年末までに調印にこぎ着けたいと述べたと伝えられている。

なお、チェコ環境省は 18 日、同計画の環境影響評価書(EIS)について、大気や水質の基準など 90 項目の条件付きで承認すると発表した。

数千頁に及んだ専門家の研究報告書や分析レポート等を審査するとともに、非政府団体や一般から聴取した 6 万件以上の意見を斟酌した結果、3, 4 号機の増設が環境や一般大衆の健康に甚大な悪影響を及ぼすことはない保証する内容だ。

[ロシア]

バングラデシュの原子力導入計画に財政支援

ロシアの V・プーチン大統領は 1 月 15 日、バングラデシュが進めている原子力導入計画の準備作業に 5 億ドルを融資することで同国と政府間協定を結んだと発表した。

2011 年 11 月に 100 万 kW 級のロシア型 PWR(VVER) 2 基の建設で協力協定を結んで以降、両国はバングラデシュ側の原子力法制基盤や規制、人材育成などに関する協力で協議を実施。今回、サイト調査や実行可能性調査および環境影響調査などの作業で融資が決まったことから、2017~18 年の完成を目指して建設計画が加速すると期待されている。

今回の協定は、バングラデシュの S・ハシナ首相がロシアを公式訪問したのを機に、教育や文化、農業など広範囲な分野における両国間の協力強化の一環として締結された。

原子力分野では原子炉建設計画に対する技術的、財政的支援のほか、バングラデシュの首都ダッカに原子力情報センターを設置することも決定している。同センターでは 3 次元映像や CG、アニメーションなどがステレオ音響で鑑賞可能で双方向コンソールやディスプレイも装

備。原子力エネルギーの性質に関する基礎的な児童教育プログラム等を提供する近代的な上映施設となる予定だ。

バングラデシュでは東西パキスタン時代の1960年代から原子力発電所の建設構想が立ち上がっていたが、独立戦争や資金調達の問題により何度か頓挫。現在の計画は2009年にロシアが協力提案したもので、ダッカの北西200 km、ガンジス川沿岸のルプールに合計200万 kW の原子力設備を建設する。

2011年2月の事前合意に基づき、両国は同年11月、主契約者をロシアのアトムストロイエクスポート(ASE)社とするほか、燃料供給や使用済み燃料の引き取り等でも協力する協定を締結。ロシアのロスアトム社は二重の格納容器や静的な熱除去システム、水素の再結合装置、コア・キャッチャーの装備など福島事故後の安全要件のみならず、国際的な安全要件のすべてを満たす原子炉設計を提供するとの見解を表明している。

[トルコ]

エネルギー大臣、仏と原子力発電所建設で協議

1月16日付けのトルコ・エネルギー省のウェブサイトによると、同省のT・ユルドゥズ大臣がイスタンブールでフランスのN・ブリック貿易相と会見し、トルコのエネルギー分野における重要案件である2番目以降の民生用原子力発電所建設計画について協議したことが明らかになった。

トルコは現在、ロシアとの協力により地中海沿岸のアックユで120万 kW 級のロシア型 PWR 4 基の建設を進めているが、2023年までには国内の3か所で原発を完成させるのが目標。第二発電所となる黒海沿岸のシノップ計画については中国、韓国、カナダのメーカー、日本の東芝が同計画への入札を準備しているほか、三菱重工も仏アレバ社との合弁事業体「ATMEA」として入札参加の意思を表明したことが伝えられている。

昨年フランスで発足したオランド政権は、国内総発電電力量における原子力シェアを50%まで削減する政策を進める一方、原子力機器および関連サービスの輸出に関してはフランスが世界のリーダー的地位を維持するため、政府全体で支援する方針を示している。ブリック貿易相も「原子力分野で卓越した経験を有する我が国が、この分野における協力でトルコと協議するのは自然なことだ」と強調。トルコが最良かつ確実な技術を導入できるよう協力したいとの抱負を述べた。

ユルドゥズ大臣も、フランスの進んだ原子力技術については認識していると指摘。このような貿易協力により、政治的に冷え込み気味の両国関係が改善される可能

性を示唆した。

[UAE]

アルゼンチンと原子力協力で覚書

アラブ首長国連邦(UAE)の国営通信 WAM によると、UAE は1月14日、「世界未来エネルギーサミット」に参加するためアルゼンチンのC・フェルナンデス大統領が同連邦を訪問したのに合わせて、同国と平和利用分野における原子力協力覚書(MOU)を締結した。

UAE は現在、アブダビ首長国のブラカで UAE 初の原子炉となる出力140万 kW の韓国製 APR1400を建設中。アルゼンチンは30年以上にわたって重水炉2基を運転していることから、同国からも将来的に専門技術や知見、核物質などの移転を求めていく考えだ。UAE にとって同国は米国、英国、韓国、日本、フランス、カナダ、ロシア、オーストラリアに次いで9か国目の原子力協力国となるが、南米では初めて。

[中国]

福建省の寧徳1号機が初併入

中国広東核電集团有限公司(CGNPC)は12月28日、福建省の寧徳原子力発電所建設サイトで、1号機が初めて国内送電網に接続されたと発表した。

同炉はフランスのPWR技術に基づき国産化率の改善が続けられている「CPR」で、出力は108万 kW。今後は政府から正式な営業運転許可を取得するため、フル出力による168時間連続試運転などの負荷試験を含む各種試験を行っていく。

紅沿河1号機が初臨界

中国広東核電集团有限公司(CGNPC)は1月18日、遼寧省で建設作業中の紅沿河原子力発電所サイトで、1号機が16日午後9時42分に初臨界に達したと発表した。

2007年8月に着工した同炉はフランスの原子力技術を国産化した100万 kW 級の CPR で、2010年9月に運開した嶺澳原子力発電所Ⅱ-1号機と同型の設計。同じサイトに最終的に6基が建設される予定で、このうちⅠ期工事にあたる4号機までがすでに着工済みだ。Ⅱ期工事の2基についても2010年7月に起工式が行われたが、福島事故を受けてその後の作業は中断している模様。

事業主体は遼寧核電有限公司で、中国電力投資集团公司とCGNPCが45%ずつ、遼寧省能源投資公司および大連市建設投資公司も5%ずつ出資している。

理念を実践につなぐ 求められるのは具現化への道筋

(株)テムス研究所 北村 正晴

福島事故に関する調査報告をはじめとする原子力のあり方批判や改革への提言は多数公表されている。しかしそれらの批判に対応し提言を実行しようとする、大きな困難に直面する。その困難の本質は、理念を実践に結び付けるための具体的方策が見いだせないことである。優れた提言もその実行可能性や実践への道筋が見いだせない現実には機能しない。この困難を解消することを目的として、ヒューマンファクター、組織マネジメント論、レジリエンスエンジニアリング、科学技術社会論等からの知見を参照しつつ考察した。

I. はじめに

「何か大事なことが抜け落ちているのではないか」という違和感を福島事故以降の原子力問題に関する見解や、政府、民間、国会の事故調査委員会報告書¹⁻³⁾等に接するたびに筆者は感じてきた。原子力関係者への厳しい批判や、今後の原子力技術のあり方についての抜本的改革を含む提言がなされることは当然であり、原子力関係者は、批判される現状の解消に努めるとともに提言の具体化方策を探求することが責務である。しかしその認識とは別に、上述した違和感は払拭できなかった。

その違和感を形成する要因について、ヒューマンファクター、組織マネジメント研究、レジリエンスエンジニアリング、科学技術社会論等からの知見を参照しつつ考察した。その結果、違和感を構成するいくつかの要因を洗い出すとともに、その要因に対処する方策についても試論を得ることができた。原子力安全への取り組みや対応する規制の枠組みが整備されつつある今日の段階だからこそ、これまであまり明示的に検討されていない視点からの考察を記しておきたい。

II. 違和感の概観

違和感の総体を一言で言えば、調査報告や指摘、提言等を実現するための道筋が見通せないということである。理念と実践のつなぎ方が分かりにくいとも言える。理念や指針を提示して、実践は現場一任ともいえる報告のあり方は今回の事故調査報告書に限らず我が国には広く見受けられる。理念は示すから、実務は現場が主体的

に考えよという姿勢は、なにかからなまでに指図せず現場の努力に任せようという趣旨のもと考えれば合理的な面もある。しかし理念や指針がそれ自身として実行可能性を持つものであることと、その実践の方策とを、根拠をもって示されないと、実務担当側は困惑する。また、提言への対応を手探りで進めた後で、実行可能性がないと判明するようなことがあれば、原子力関係者としても社会としても大きな回り道をすることになる。この理念と実践のつなぎ方に関する分かりにくさを構成する要因について検討した。以下では具体例を参照しつつ違和感の構成要因について考察する。

1. 安全文化の再構築

政府の事故調査・検証委員会では「事業者や規制当局、関係団体、審議会関係者などおよそあらゆる原発関係者には、安全文化の再構築を図ることを強く求めたい」と述べている(政府, p. 429)^a。この安全文化についてはIAEAが「原子力発電所の安全の問題には、その重要性にふさわしい注意が最優先で払われなければならない。安全文化とは、そうした組織や個人の特性と姿勢の総体である。」と定義し、それを受けて原子力関係組織の多くでは、基本方針、行動憲章などを定めている。原子力事業の現場では、「安全最優先」、「常に問いかける姿勢」、「報告する文化」などの標語や指針が様々な形で強調されている。しかしこれらの理念を現実の行動に結び付けるには工夫が必要である。理念を実務に翻訳して実装するに際しては多くのトレードオフ問題を解決しなければならず、その実践は容易ではない。

From Ideas and Concepts to Practice—Improving Effectiveness in Implementing Recommendations : Masaharu KITAMURA.

(2013年 1月31日 受理)

^a 本稿では政府、民間、国会の事故調査報告書を繰り返し引用する。参考文献記載の字数を節約する都合上、これら3種の報告書については出典の記載を(政府, p. xxx), (国会, p. yyy)のように簡略化する。

具体的に安全文化のレベルを判断する(したがって再構築を支援する)提言がなされていないわけではない。政府の事故調査報告書は安全文化のレベルを判断する具体的なチェック項目を、組織安全の権威である J. Reason の意見などを参考に提示(政府, p. 427)している。しかしそこで提示されている項目のなかには

- 経営陣は安全に関わる意思決定をゆるぎなく下せるか。
- 財務状況や営業成績に関係なく、安全を独立して守るポリシーが確立されているか。
- 不完全要因やリスクが存在している時に、それらへの対処の判断が甘くなったり、外見をとりつくりただけだったりしていないか。

など、依然として実践へのつなげ方が抽象的なものも含まれている。安全に関わる意思決定を「ゆるぎなく」下す、とか、経営的状況等に関係なく、「安全を独立して守る」とは何を意味するのであろうか。不完全要因やリスクへの対処の判断が「甘く」なるとはどういう状況を示すのであろうか。むろん我々は、東京電力が津波の襲来可能性に対する判断を誤ったことを知っている。だから後から考えるならば意思決定は「ゆるぎなく」下されなかったのだし、判断は「甘かった」のである。しかし課題の本質は、未来の事象に関わっている。原子力安全に関わる様々な警告や意見はこれからもさまざまな個人や組織から発出されよう。その際に、いかに対応すれば上記の提言項目を満足したことになるのか、具体的意思決定の方策が必要である。

2. 安全最優先と訴訟リスク

訴訟リスク問題は安全文化との関連でも、「規制が事業者の『虜』となっている」という批判の文脈でも言及(国会, p. 520, p. 525)されている。具体的には「(東電は)シビアアクシデントによって(中略)対策を講じたり、既設炉を停止したり、訴訟上不利になったりすることをリスクと捉えていた」(国会, p. 525)、「規制当局は(中略)訴訟上のリスクを軽減する方向で東電と共闘する姿勢は、規制当局としての体をなしておらず…」(国会, p. 489)などの批判がなされている。だが訴訟に関しては、伊方原発の安全性を巡る訴訟に言及して、「この裁判を通じて原発の安全性を証明するための様々な「証拠」を持たなければならないという環境が作られた。その結果、(中略)原発全体の安全性を担保する仕組みを欠いた安全規制へと展開していく」(民間, p. 300)という指摘もある。この指摘の内容はそのまま、事業者側から見た訴訟リスクは現実問題として極めて大きくなったことを意味している。ここで筆者は訴訟を起こした側を批判しているのではない。ただ「訴訟リスクのことを懸念して視野狭窄を起こすことなく安全文化をしっかりと構築せよ」という趣旨の提言を受けても、現実にとるべき方策が見出しかね

ているのが原子力事業者であり、規制当局の現状である。この問題も提言の実現可能性に直結している。

3. 高レベル放射性廃棄物処分問題

この問題は事故調査報告書の中では明示的には扱われていない。しかし原子力問題を考える際には本質的な重要性を持つ課題であることは良く知られている。筆者らが実施してきた原子力に関する対話実践においても、「この問題が未解決だから原子力発電を支持することはできない(またはこの問題がよくわからないから原子力発電に関する判断ができない)」という見解にはしばしば接している。つまり「処分問題の解決」は「原子力政策に関する方針決定」の前提である。一方で、この問題に関する原子力委員会からの審議依頼に対する学術会議の回答⁴⁾では、「広範な国民が納得するような原子力政策についての大局的方针を示すことが不可欠」としており、「原子力政策に関する方針決定」が「処分問題の解決」の前提とされている。2つの課題が互いに一方が解決しないと他方が決まらないという、循環的關係を構成していることになる。その解決は極めて困難と言わざるを得ない。また上記の回答書には、「自律性のある科学者集団(認識共同体)による専門的な審議の場を確立する必要がある」、「公正な立場にある第三者が討論の過程をコーディネートすること、(中略)が必要である」などの提言がなされている。これらの提言も理念としては理解できるが実践に結びつける道筋は不明である。

4. TMI 事故の振り返り

福島事故と TMI 事故を関係付けた考察は、複数の調査報告書に示されている。とりわけ国会事故調の報告書では、TMI 事故後の米国規制機関の改革について紙数を割いて説明し、「結果としてわが国の規制体制は米国、フランスなど他国と比べ大きく遅れを取るようになった。(中略)本事故の発生と拡大を防ぎ得なかった」と指摘(国会, p. 573)している。この指摘は正当であろう。しかしわが国でも TMI の後には相当の技術的対策は実施されたことを無視してはなるまい。詳しくは省略するが、安全パラメータ表示システム(Safety Parameter Display System: SPDS)や警報重要度分類・フィルタリング装置(Alarm Filter)などは比較的速やかに導入されている。見方を変えると、このようなハード的な装置についての提言は実践への道筋が明快であるがゆえにわが国にとっても受け入れやすいが、規制や安全管理などソフト面に係わる提言は実践への道筋を定めにくいがゆえに導入が遅れる傾向があるのではないだろうか。理念的な提言はこの事情から先送りにされていた可能性がある。

なお、TMI 事故に関する米国大統領諮問委員会報告書⁵⁾に改めて目を通すと、世界的にはチェルノブイリ事

故の後で注目されるようになった安全文化の構築に実質的に等価なことを意味する記述は、この報告書の中にもすでに相当程度書き込まれている。とりわけ

- 事前の警告が何度もなされており、それらに真摯に対応すれば TMI 事故は防止できた可能性が大きい (p. 29),
- 規制当局は安全に関わるあらゆる範囲の事柄を徹底して考慮に入れる広い視野を持つべきである (p. 63),
- 事業者は、政府の規制に適合するだけで安全が確保されると考えてならない (p. 68),

などの記述は安全文化と関連性が高い。国内外の原子力産業界は、チェルノブイリ事故の衝撃まで待つまでもなく、安全文化の必要性に相当する示唆を受け取っていたことになる。理念を実践にしっかり結びつけることの重要性は、このことから明らかであろう。

III. 事例から要因へ

前章に示した事例は、批判や提言を実行可能性や実効性に結び付けようとする際の困難さを示している。同様の困難は他の批判や提言の多くにも共通している。それらに含まれる様々な要因は、課題ごとに固有の要素も含んではいるが、内容を整理してみると比較的少数の共通要因にまとめることが可能である。

1. 共通要因

共通要因のひとつは、安全の実現方策に関する困難さである。安全文化はもとより訴訟リスクも TMI 事故からの教訓も、この課題と直接に結びついている。いうまでもなくこの安全実現は、通常時における事故の防止、抑制と、事故発生後の緊急事態対応の両面から検討されねばならない。種類の異なるテーマである高レベル放射性廃棄物処分問題も、地下に埋設された放射性廃棄物の超長期間にわたる安全を実現することの困難さが中心的課題のひとつである。この意味で提示された批判や提言の多くは、安全の実現という技術的課題に関係している。

しかし現代社会において、技術者の視点からは安全と判断できる状態が実現できたとしても、それが社会に持ち込まれてよいか否かを原子力専門家だけで判断することはもはや不可能である。実現された安全状態を規制機関や立地地域自治体とその住民、さらに広く国民一般に説明し納得をとりつけるには、従来型の「専門家集団で決めてから国民に説明する」という方法は機能しない。技術と社会の間に生じる問題の解決に際しては、「専門家以外の多様な人々を含んだ『トランス・サイエンスの共和国』を構想せざるを得ない時代⁶⁾」が到来していることは明確に指摘されていた。福島事故の調査報告書等では、これらの知見がある程度反映されている。しかし「専門家以外の多様な人々を含んだ問題解決の実践方策」ま

でを提言している記述は筆者には見いだせていない。

さらに、訴訟リスク問題や、高レベル放射性廃棄物処分問題に関しては、安全の問題だけでなく、環境倫理や世代間倫理、そして行政手続法的な視点から見た正当性など多くの論点が密接に関係することになる。そのような課題に対しても、原子力専門家だけではなく、多様な専門家やステークホルダーと連携した問題解決を進めることは必然である。以上から、共通要因としては、少なくとも「安全の実現」と「非原子力分野専門家との協働」という2つが重要であることを指摘できる。これらの共通要因について考察を進める。

2. 「安全」に係わる要因

ここで「安全」の意味が明示されないまま多様な考察や提案がなされていることを見直してみたい。本来「安全」は操作的に定義できない、あるいはエビデンスベースで定義できないあいまいな概念であるという指摘⁷⁾は極めて重要な意味を持つことが理解されねばならない。「安全とは容認できないリスクが存在しないこと」などの定義は、実証することが本質的に困難な言い換えに過ぎない。それゆえ、「安全」に関する考察は、便宜的にでも、操作性を持つ形で(あるいは実現の方策が明示される形で)定義を示したうえでなされることが必要である。にもかかわらず、安全文化や訴訟に際しての安全性説明などの討論場において「安全」という概念は定義されることなく論議されている。このことが「安全」に関する意見対立の錯綜をもたらしている。今後は「安全」の意味するところを、少なくとも現状よりは明確に定義すべきである。

「安全」という一見すると自明のような基本概念も、安全学の最前線では進化している。そしてその進化を受けて安全実現の方策も大きく変容しつつある。これらに関する詳細な説明をすることは本稿の趣旨を外れるので別紙^{8,9)}を参照願いたい。ただ本稿との関連で必要な説明は後述する。安全に関する新しい知見を参照することで、硬直化した意見対立を、ある程度共通の視点に立って解きほぐすことは可能と考える。

3. 「非原子力分野専門家との協働」に係わる要因

「福島事故の原因究明と再発の防止」に論点を絞ってさえ、組織マネジメント、規制のあり方、立地地域行政や市民との関わり方など、大きな広がりを持つ課題群が処理されねばならない。組織マネジメントや社会関係マネジメント、原子力リスク認知とコミュニケーション、規制の科学などに関しては様々な学術分野で膨大な学術知、実践知が蓄積されている。しかし原子力事業者や規制機関がこれらの分野に関する実践を行うに際して、当該分野専門家の指導を受け、蓄積された学術知や実践知の体系を効果的に学習した上で実務にあたることは(本来そうあるべきなのだが)現実問題として難しい。結果

としては、たまたま入手できた入門書を斜め読みするか、初心者向けの研修会に参加するくらいの準備で実務に直面することになる。

より広い視点からは、「原子力と社会」問題解決の方策として「原子力ムラ構造の解体」、「社会への透明性の高い説明」、「市民参加方式の強化」などが強く要求されている。しかし何をどこまで行えばこれらの提言に応えたことになるのか、そのような取り組みに際して直面する様々な困難をどのように解決すべきなのか、原子力専門家らが単独で規定し実践することは困難である。この「原子力と社会」に係わる難問題を解決するためにも、人文社会系の学術専門家の能動的な関与を期待する⁹⁾のが自然である。

ただしいずれの課題解決に際しても、異分野協働の場を構築し効果的に機能させることは異文化間コミュニケーション¹⁰⁾の実践が必要で、それ自体が難問題である。要するに原子力に係わる諸問題は、原子力分野の専門知識だけでは解決できない難問題であり、その解決のために人文・社会科学専門家との連携を必要とするが、その連携活動自体が別の難問題を構成するという2重の難問解決を要請されているのが実態である。原子力関係者は、この2重の難問に向い合う覚悟を今求められていると言えよう。

IV. 要因から対応策へ

1. 「安全」の意味の再定義

「安全」を説明するという課題には前述したように本質的な困難が付きまとう。この困難を解決、あるいは低減する方策として、近年の安全学の進歩を基に検討した。

(1) 安全性Ⅰから安全性Ⅱへ

安全性Ⅰは従来型の安全観に対応している。「安全とは危険がなく安らかな状態であること」(広辞苑)とか、「許容できないリスクがないこと」(IAEA 他)のような定義は広く知られているが、いずれも「望ましくない状態が起こらない」という静的(static)状態が想定されている。これが安全性Ⅰである。これに対して近年、レジリエンス的な安全を提唱する研究者の間でその重要性が指摘されている安全性Ⅱは、「システムが破局的な状態に陥ることなく動作(operation)を継続できること」⁸⁾と定義されている。したがって安全性Ⅱは、外乱、故障等への対応を含んだ動的(dynamic)かつ能動的(proactive)な概念になっている。安全性Ⅱの定義の下でも事故の防止や被害の最小化は動作継続の最重要必要条件である。しかし「(静的な)安全こそが究極の目的である」という理想論的な捉え方はされていない。安全性Ⅱの方が平常時から事故時までの望ましい状態を統一的に視野に入れており、深層防護の考え方も整合性がよい概念である。この安全性Ⅱを基本とした安全の追求が、安全に関する意見の錯綜解消に効果が大きいと考える。

(2) 深層防護論理の説明と安全性Ⅱ

深層防護論理の背後には前段否定の論理があることは周知のとおりである。①異常発生防止と②異常拡大防止、③異常影響緩和という3つの防護層に加えて④過酷事故対策と⑤防災を含めたものがIAEAのいう5層の深層防護である。この場合、各層の能力が理想的に高ければ次の層は不要であろうという主張がしばしばなされる。本来の深層防護の論理では、各層の能力は単独でも目的とする安全の達成に十分なほど高いことが望ましいことは当然であるが、機械システムにもそれを扱う人間にも完璧はあり得ない以上、さらなる防護層を設定しておくことが合理的となる。

ここで④および⑤層まで考慮するということは、どんなに確率は低くても、①～③の防護層が破られることは起こり得ると想定することに対応している。福島事故以前に広く行われていた、「極端な仮定を重ねて初めて起こり得る事象は考える必要はない(起こらない)」という安全性説明はその根拠を失った。代わりに「大多数の故障や外乱については①～③層までで抑え込める。ごく稀に③層までの防護層を突破する事象が起こったとしても、④層の対応で住民の皆様への影響は防げる。さらに稀な事象のために④層の防護層も機能不全になった場合でも、防災計画が整備されており、福島事故の時のように混乱した状態は起こさない。余裕を持って避難していただける時間は必ず確保できる」という趣旨を説明することになる。これが安全性Ⅱを前提としてのリアリティのある説明である。

この深層防護の考え方は、安全性Ⅱが重要な視点として認識される以前から原子力安全専門家には知られていたが、安全に関する認識の不統一があるため説明は容易でなかった。結果的に、許容できるリスクレベルやシビアアクシデントに関する説明が困難を極めたことは事故報告書にも詳細に示されている(政府, p.311, p.321)。深層防護の考え方を原子力専門家と国民との間で食い違いない形で共有するためには、安全性Ⅱの概念を媒介にした方がわかりやすいと考える。ただしこの考え方について国民との共有を目指す活動に際しても、現在のところ国民からの信頼を大きく損なっている原子力専門家だけで進めることは実効性が乏しいであろう。原子力以外の分野で信頼を得ている安全学専門家との協働を媒介として進めることが望ましいと思われる。

なお、「広域にわたり甚大な被害をもたらす事故・災害の場合には、発生確率にかかわらず、しかるべき安全対策・防災対策を立てておくべき」という主張(政府, p.413)は一つの重要な示唆と解釈したい。「発生確率にかかわらず対策を」という要請は、人工物の構築上はほとんど不可能な要請にも見える。だがここで「しかるべき」という修飾語の意味を考えてみる必要がある。この要請も安全性Ⅱを基本指針として初めて実現可能な

のであることを付記する。

2. 異分野協働問題への示唆

原子力技術に関する政治的意思決定に、市民参加を含める方法が各方面で検討されている。すでに「国民的討議」の試みも人文・社会科学系専門家の努力によって実施された。しかし市民参加による意思決定方式について、多くの未解決課題があることも現実である。その方向性は基本的に望ましいが、海外で開発された手法の直接的導入ではなくわが国に適した方策の探求もなされるべきであろう。米国により開発された原子力発電施設をそのまま導入した結果が福島事故の背景にあることを我々は知っている。今後の市民参加方式の強化を考える際に、海外で実績のある市民参加の技法をそのまま導入しようとするならば、同じ過ちが形を変えて再現することにならないだろうか。

福島事故問題を日本固有の文化に起因するものとした国会事故調査委員会報告書英語版での黒川委員長コメントは大きな反響を呼んだ。科学技術的な課題を固有文化論に埋没させることには慎重でありたい。しかし文章化された理念や指針を実践につなげることや、また国民との間で共通理解を形成することのためには文化的特性に配慮しつつ歩を進めることが必要と考える。

V. おわりに

以上述べてきた諸課題は、大きく要約すると「理念と現実との接続問題」という性格を持つ。「形を作っただけでは機能しない。仕組みは作れるが、目的は共有されない」という畑村委員長指摘(政府, p. 446)は至言である。この指摘を指針にして効果的な実践への道筋を見出し、原子力の現場や関係組織に提言することは原子力研究者の責務である。しかしその責務を十分に果たすことは、工学者や技術者だけでは困難である。人文・社会科学を含む広い学術領域からの専門知の結集を心から期待した

い。ただしその方向への第一歩は原子力関係者が責任を自覚して踏み出すべきなのである。

—参考文献—

- 1) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会 最終報告書, (2012). <http://icanps.go.jp/post-2.html> (2013. 1. 30現在)
- 2) 一般社団法人日本再建イニシアティブ, 福島原発事故独立検証委員会調査・検証報告書, ディスカヴァー, (2012).
- 3) 国会 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会報告書, (2012). <http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naic.go.jp/index.html> (2013. 1. 30現在)
- 4) 日本学術会議, 回答: 高レベル放射性廃棄物の処分について, (2012).
- 5) J. G. Kemeny, Report of The President's Commission on The Accident at Three Mile Island, (1979).
- 6) 小林傳司, トランス・サイエンスの時代, NTT 出版, (2007).
- 7) 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).
- 8) 北村正晴(監訳), レジリエンスエンジニアリング概念と指針, 日科技連, (2012).
- 9) 北村正晴, 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, 日本原子力学会誌アトモス, 54[11], 721-726 (2011).
- 10) E.T. Hall, *Beyond Culture*, Anchor Books, (1977).

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

原子力安全について思うこと

東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故に関連して

元・原子力安全委員会委員 小山田 修

本稿では、2011年3月11日に発生した原子力発電所の事故に関して、原子力発電所敷地内の事象について、反省すべき点を中心に記す。

I. 専門家への信頼の失墜と回復

本来は、①専門家間の、少なくともある程度正しい共通認識が基本として存在し、②それを専門外の方たちへ伝達する工夫がなされ、③それによって専門外の方たちの理解が進む、というのが望ましい構図と思われる。今回の原子力発電所の事故では、基本になる①の段階に不十分なことが多かったのではないかと、という反省がある。以下に、いくつかの例を示す。

- (1) 自然力(津波高さ)の想定に問題があり、さらに想定を超えた場合の対応の準備の不十分さのために、原子炉事故を発生させてしまったこと。あるいは、決められた手順等についての日ごろの順守状況から、「日本において、原子炉事故が発生する可能性は相当に低い」と思い込み、結果として事故防止の備えが不十分であったこと。
- (2) 日本近傍におけるマグニチュード9クラスの規模の地震発生(地震動は原子炉事故の発生要因とは考えられないが)、あるいは今回の規模の津波の襲来を、専門家集団の代表的意見として予測し、国の防災対策に反映することができなかったこと。
- (3) 炉心溶融後の水素爆発を予測できなかったこと。(1979年の米国 TMI 事故において、格納容器内で水素燃焼が発生したことは認識されていたが、シビアアクシデント時における BWR 原子炉格納容器の外側における水素燃焼の可能性の言及は、事故前にフィンランドと米国の2件の研究があったものの、これらの研究が大きく取り上げられた形跡はなく、今回の事故において生じた激烈な爆発現象は、原子力に携わっていた技術者の共通認識にはなかったように思われる。これは、原子炉安全の研究がシビアアクシデントを防ぐための範囲に注力し、シビアアクシデントが実際に発生した場合の事象の進展まで

研究を掘げられなかったことが要因と考えられるが、事故事象の進展の予測という、専門家が最も高い知見を持ち、頼られるべき時点で適切な予測ができなかったということは、深く反省すべきことと考える。)

- (4) 低放射線被ばくによる健康への影響について、多くの異なる意見が表明されていること。

(本件については、長く研究に従事されてきた専門家の間での見解はおおむね一致したものとなっている点、上記(1)(2)(3)とは異なると思われるが、その見解から大きく離れた意見についての情報が多数出されており、避難を余儀なくされた方たち、心配している人たちにとって、今なお深刻な問題を生じていると思われる。)

専門家への信頼の回復は容易なことではないが、専門家が信頼されない社会は混迷を続ける。専門家としては、今回の事故事象の検討の継続、安全対策の策定、現状の知見の確立、意見の発信を、粘り強く続けることが重要であると思われる。

例えば、原子炉圧力容器および原子炉格納容器の損傷状況、現状の核燃料物質の所在場所、等に関して未解明のことが多く残されている。また、2号機の原子炉建屋が水素爆発を免れたのは、1号機の爆発による影響でブローアウトパネルが開いたためではないか、という説明を見かけるが、ブローアウトパネルは原子炉建屋の天井からかなり低い位置に設置されており、その上方には相当多くの空間があるためブローアウトパネルの開放だけで爆発を防げたのか、天井部分に別の開口の存在がなかったか、あるいは蓄積された気体の成分の評価等を行うことも必要であると思われる。また、事故前まで、原子炉格納容器の構造面の挙動研究に関しては、設計条件以下で機能を全うできることの確立に注力され、設計条件を超えたあとに機能喪失(原子炉格納容器の場合は放射性物質の漏えい)がどの段階で生じるのかについて行われた検討は十分とはいえず、温度、圧力をともに考慮

Several Concerns on Nuclear Safety ; From experiences of TEPCO Fukushima Daiichi Accident : Osamu OYAMADA.
(2013年 3月3日 受理)

した挙動の検討を急ぐことが必要であると思われる。

II. 計画外停止率の低さと原子炉安全に対する頑健性

日本では従来、計画外停止率が世界各国と比べて相当に低い水準を維持してきたことをもって、技術力の高さを示すものと見なしてきた。しかしながら、計画外停止率が低いことと原子力発電所の安全性の高さが同一ではないことは、明瞭に認識されなければならないと考える。自然による外力が穏やかな状態における計画外停止率が低いとしても、そのことは、自然による外力がまれな頻度で極めて大きくなった際に、原子力発電所を安全な状態に停止できることを意味するものではない。

計画外停止率の低下の努力は、発電機能の維持を目的としたほかに、原子力発電所の計画外停止が、たとえ安全性に直接関係のない事象によるものであっても周辺住民に対して不安を与えること等の理由により強化されてきたものと思われるが、考えようによっては、計画外停止率の低さが緊急時の非常用機器作動のための経験を少なくしていた可能性も含めて、評価していく必要があると思われる。

原子力発電所の安全性については、異常事態が発生したときに、それが外部への放射性物質の放出につながる事故に拡大することを防ぐことが重要であり、事業者の努力も、規制側の業務も、その点に最大限の注力が必要である。

III. 高経年化対策

日本においては、高経年化対策として、構造物・電線などの材料の経年変化の研究に多くの努力が払われてきた。応力腐食割れ対策、配管内の流れによる減肉の対策、温度変動による疲労損傷の防止など、多くの分野で日本は世界をリードする成果をあげてきた。また、研究の結果の実際のプラントへの適用としても、予防保全工事を多く行ってきた実績がある。

しかしながら、高経年化問題は、材料の経年変化の対応だけではなく、自然外力条件の絶えざる見直しや、初期プラントにのみ用いられている安全系システムの実践的な使用感覚の涵養等を含めた、より広範な観点から強化していくべきと思われる。

ここで、原子力発電所の供用期間についての米国の考え方を記しておく。

米国では当初、供用期間を40年と定めていたが、この期間は、1954年当時、化石燃料を使用する発電所の償却(amortization)期間が40年であったので、それを適用したものであり、構造物の経年変化等の技術的観点あるいは安全性から定められたものではないことが、米国NRC(Nuclear Regulatory Commission)の資料 Short History of Nuclear Regulation, 1946~2009に記されている。1980

年代にNRCは供用期間の延長について慎重に検討した結果、安全確保に関する最新の確認を行うことで最長20年の供用期間延長を認可できると結論付けた。2013年2月のNRC報告では、米国の104基の原子力発電所のうち73基について60年の運転認可が与えられ、うち17基はすでに40年を超えた運転に入っており、そのほか15基についてNRCが審議中、13基について申請予定、と記されている。

IV. 継続的改善の重要性

今回の事故は、米国TMI事故やソ連のチェルノブイリ事故のように、“機器の故障の放置”、“計器の値の解釈の誤り”、“安全に十分配慮しなかったプラント性能の調査”等が原因となって発生したものではない。社内あるいは規制当局に認可された業務規則を守ること、昨日まで行ってきた仕事を今日もそのまま行うことでは、事故を防げなかったことは、明瞭に認識されるべきことと思われる。思い込み等を払拭し、安全性向上についての不断の見直し、絶えざる改善が重要である。

今回の事故に際して、発電所の人員は懸命の努力をしたと思われる。例えば、電源喪失後、早い段階で原子炉への注入ラインを新たに組みあげる手立てを講じたことが、事故のさらなる悪化を食い止めたと考えられる。そのほか、構内のモニタリングポストが停電のために計測できなくなったことに対応して、3月11日午後5時から、機能を失ったモニタリングポストの場所を巡回するモニタリングカーを走らせたことにより逐次記録された放射線量のデータは、後に事象推移の検討等に際して貴重なデータとなった。

これらの努力にも関わらず、事故の発生が防げなかったことは根本的な反省点であり、特異事象の発生の前に、装置の準備、対応の訓練が重要であることを示すものである。

V. 規制当局者の技術力向上

規制機関にとって重要なことのひとつは、規制にあたる個々の人員の技術力の向上である。原子炉安全とは何か、原子炉安全の向上につなげる行為とは何か、をよりよく理解できるように、常に能力の向上を図ることが必要である。

参考として留意すべき国外の機関として、米国の原子力規制当局(NRC)がある。NRCは、米国の政府機関に関する Best Places to Work(「働き甲斐のある職場」)という評価システムにおいて、2009年、2010年の2年間続けて最高評価を得ている。評価の内容は、職員の能力育成、管理者の組織運営能力、チームワークほか、多様な項目から成り立っている。NRCの職員の相当多くが、NRCに長く勤続する。長く規制業務に従事しながら、現場経験等を含む研さんによって高い技術力を身に付け

た専門家が多数いて、そのような専門家たちが、規制のための研究、規制規格の作成を自ら行い、また、各原子力発電所個別の安全対策向上の監視などを行っている。(規制規格には、NRC 外の学識経験者の意見も、必要に応じて反映する仕組みを設けている。)

このような NRC の今日の姿は、発足時からそうだったのではない。特に、1979年の TMI 原子力発電所事故後、原子力発電に対する米国民の批判は強く、NRC も事業者も、原子力施設の安全確保の対応で多くの試行錯誤が続いた。原子力発電の最初の時代を担った世代が退職時期を迎えたこと、TMI 事故直後に原子力分野の学生数が急減したことなどによる知識・技術の伝承不足の懸念は、深刻な課題となった。

対応として、米国では大学教育等への息の長い施策を行うことによって、新しい世代の原子力分野への参加が進められ、現在は原子力分野の学生数は TMI 事故前よりはるかに多くなっている。特に働く職場としての評価の高い NRC へは、年々新しい優秀な人材が入ってきているとされている。(ときおり、「米国の場合は、海軍の原子力潜水艦や原子力空母の出身者が多数、民生用の原子力分野に移ってきていて、それは NRC 内でもかなりの数に上り、これによって原子力の人材が確保されている。一方、日本には同様な軍関係からの人材供給がないという根本的な差異がある。」との推論を耳にするが、これについては、NRC のコミッショナーから、「NRC の活動における海軍出身者の寄与は確かにあるが、それは限定的なもので、原子力発電所の安全確保のための人材としては大学で原子力を学んで直接 NRC に入ってきた人たちの寄与が大きい。」という説明を受けている。)

VI. 関係者間の議論の継続

原子力安全のための努力は、さまざまな領域で行われる必要がある。規制側における規制要件の見直しだけでなく、学会等における検討、事業者・産業界における検討などが繰り返行われ、それらが互いに補完しあいながら、進められるべきものである。

国外において産業界が中心となって作成されてきた規格の代表例が、米国の ASME (American Society of Mechanical Engineers) の Boiler and Pressure Vessel Code Section III で、これは 1963 年に原子力発電所に用いる機械設備の構造規格として発行されて以来、規制機関にも認められて使用されてきている。また、米国内のみならず、日本を含む世界の多くの国に、さまざまな形態で取り入れられている。

ASME では、福島原子力発電所の事故を受けて、元 NRC 委員長の Diaz 博士を長とするタスクフォース

を設けて検討を進め、原子力安全の新たな取り組みの提案として、2012年6月に Forging a New Nuclear Safety Construct を発表した。これをもとに、2012年12月にワシントンでワークショップを開催し、世界各国の産業界、規制組織等の参加を得て、今後の進め方について討論が行われた。その場には、昨年7月に就任した NRC のマクファーレン現委員長も出席し、産業界における安全向上努力の重要性などを含めたスピーチをした。

毎年4回開かれる ASME の Boiler and Pressure Vessel Code の改訂検討会議には、NRC から多くの参加者があり規制当局としての意見を述べ、また十数ページにわたる NRC の活動状況説明書が配布される。

規制側と事業者の関係のあり方、原子炉安全に関する社会からの受容については、元 NRC 委員長 Diaz 博士が ANS 2012 Winter Meeting における講演で説明された以下の内容が、示唆に富んでいると思われる。

- ・ On “acceptability” of safety, U.S. Appeals Court ruled in 1987, “The level of adequate protection need not, and almost certainly will not, be the level of zero risk.”
- ・ The reality is that there is no such thing as zero risk, and for all technologies, including nuclear, a certain level of risk is/should be acceptable to society.
- ・ There has to be a defined, fair, visible CONTRACT between regulators and operators, with accountability by and for all, that considers internal and external events and extends the protection to severe rare events.

VII. むすび

東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故が、今なお多くの人に避難を余儀なくさせていること等は、まことに心苦しい思いがあるが、原子力は、エネルギーの利用だけでなく、医療の診断技術やがん治療、工業用検査など、日本にとって欠かせない。したがって、原子力分野の研究を続けること、人材の育成を続けることは大切である。

著者紹介



小山田 修(おやまだ・おさむ)
元・原子力安全委員会委員
(専門分野/関心分野)原子力発電所用機器
の構造設計、強度設計用規格

検証！ SPEEDI が福島原発事故で提供した予測情報 その精度と適時性、今後の活用

日本原子力研究開発機構 茅野 政道

東京電力福島第一原子力発電所の事故では、SPEEDI は事故当初からマニュアルに沿った情報提供を関係機関に行っていたが、避難等の判断に利用されなかったことが大きな議論になった。本稿では、今回の事故で SPEEDI がどのような予測情報をどのようなタイミングで関係機関に提供し、それらの精度はのちに測定されたモニタリングデータと比較してどうであったかを検証し、それをもとに今後の活用を探る。

I. はじめに

SPEEDI は、原子力発電所等から放射性物質が大量に放出される事態に備え、周辺環境の放射性物質の大気中濃度や被ばく線量などを迅速に予測するシステムである。

東京電力福島第一原子力発電所の事故における SPEEDI の活用については、東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会(政府事故調)、福島原発事故独立検証委員会、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が、避難対策等にも積極的に SPEEDI を使うべきだったと結論づける一方、東京電力福島原子力発電所事故調査委員会(国会事故調)は計算予測の避難判断への利用には限界があり、緊急時モニタリング充実が必要としている。

このような議論を深めるためには、まず今回の事故で SPEEDI がどのような予測情報をどのようなタイミングで関係機関に提供し、それらの精度はのちに測定されたモニタリングデータと比較してどうであったかという基本的検証が不可欠である。2012年9月21日に、福島県はホームページ上で屋内退避や避難の行われた30 km 圏内の環境モニタリングポストのデータを公開した¹⁾。これにより、同圏内での空間線量率の時間的・空間的変動がある程度は把握できるようになった。

そこで、本稿では、文部科学省や旧原子力安全・保安院(NISA)のホームページ上に公開された SPEEDI 予測情報の両機関への提供時刻と予測結果をもとに、当時、SPEEDI が関係機関に提供した情報の時間的適切さや精度を解説する。また、その結果を踏まえ、SPEEDI の今

後の活用方策を探る。

II. どんな情報を提供したのか、その精度と適時性は？

SPEEDI が提供した予測情報は、大別して「定期実行」と「依頼計算」の結果に分けられる。

定期実行は、毎正時に単位量の放出(1 Bq/h)が始まったと仮定して、1時間ごとの放射性プルーム(放射性物質を含む煙)の動きを空間線量率分布等の形で提供したものである。今回の事故では、2011年3月11日16時から定期実行が開始され、毎正時に関係機関に情報を提供し続けた。当初は、25 km 四方の範囲を対象に2時間後までの分布予測を提供していたが、3月16日8時からは汚染範囲の拡大に伴い、対象範囲を100 km 四方に拡張し、3時間後までの分布予測の提供に切り替えている。

依頼計算は、NISA の緊急時対応センター(ERC)やオフサイトセンター(OFC)及び旧原子力安全委員会等が、事象進展に伴う環境影響確認や緊急時環境モニタリング計画の立案、放出量の逆推定やそれに基づく線量評価のために予測条件を指定して行ったものである。

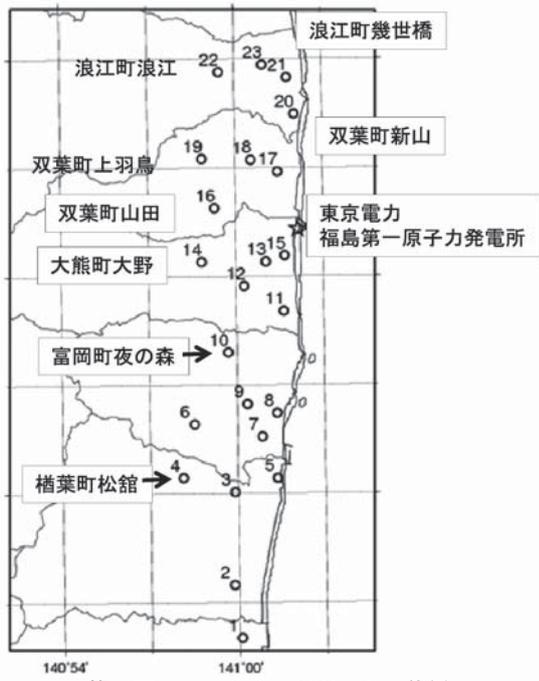
ここでは、はじめに定期実行の計算結果から、SPEEDI が放射性プルームの動きをどの程度事前に予測できたのか、どのような気象条件で予測精度が低下したのかを検証する。次に、ERC からの依頼により行われたベントや水素爆発に対する影響予測、及び OFC からの依頼による緊急時モニタリング計画策定のための拡散予測の精度と適時性を検証する。検証期間は、主に ERC や OFC 等に頻繁に情報が提供された3月11日から16日である。

1. 観測データで見る検証期間の特徴

はじめに、福島県のモニタリングポストデータから推定される3月11日から16日の放射性プルームの動きを概観する。モニタリングポストの地点地図を第1図に示

Verification! Predicted Information provided from SPEEDI during the Fukushima Daiichi Nuclear Accident ; Accuracy, Timeliness and Future Utilization : Masamichi CHINO.

(2013年 2月8日 受理)



第1図 モニタリングポストの位置

す。ポスト位置を丸印で示すが、以下で引用されるポストは地名を付した。

3月12日： 午前中から格納容器からの漏えいによると思われる $30 \mu\text{Sv/h}$ 以下の空間線量率の上昇が数か所で見られる。午後の1号機でのベント操作により14時半から15時にかけてドライウエル圧力が急速に低下し、この期間に大気放出があったと考えられる。15時に双葉町上羽鳥(NW 5.6 km)で $1,590 \mu\text{Sv/h}$ まで空間線量率が上昇したが、その後、地表面からの線量率は15日までに $30 \mu\text{Sv/h}$ 程度まで低下したことから、希ガスが大量に含まれヨウ素やセシウムが比較的少ないウェットベントによるプルームの影響と考えられる。15時36分には1号機で水素爆発があり、17時に双葉町新山(NNW 3.9 km)で $904 \mu\text{Sv/h}$ まで空間線量率が上昇したが、双葉町上羽鳥とは対照的に、プルーム通過後の地表面からの線量率は15日までに $200 \mu\text{Sv/h}$ 程度までしか低下せず、観測風向

から考えても水素爆発による線量上昇と考えてよい。

3月13～14日： 13日は3号機でドライウエルの圧力上昇と数回のベント操作があったが、数 $10 \mu\text{Sv/h}$ 以下の空間線量率の上昇が沿岸数か所で一時的に見られるものの、基本的にプルームが海側に流れる気象状況であったため、12日午後に見られたような大きな線量率上昇はない。14日にも3号機のベント操作や水素爆発があったが、海側にプルームが流れる状態は夜まで続いた。夜中にサイトの南側で線量上昇が始まっている。

3月15～16日： 15日7時から8時頃、福島第一原発の南方に位置する富岡町夜の森(SSW 7.3 km)、楢葉町松館(SSW 14.2 km)でそれぞれ $41, 19 \mu\text{Sv/h}$ の線量上昇が始まり、時間とともに線量上昇地点は時計回りに変化した。11時ごろには、大熊町大野(WSW 4.9 km)で $390 \mu\text{Sv/h}$ を記録し、13時に双葉町山田(WNW 4.1 km)での $232 \mu\text{Sv/h}$ の線量上昇を経て、21時には浪江町浪江(NNW 8.6 km)で $32.1 \mu\text{Sv/h}$ の線量上昇があった。この頃まで、時計回りに変化してきたプルームの流れは反転し、その後、反時計回りに、16日0時に再び双葉町山田で $1,020 \mu\text{Sv/h}$ 、1時に大熊町大野で $173 \mu\text{Sv/h}$ を記録し、3時には楢葉町松館で $44.5 \mu\text{Sv/h}$ のピークが現れている。その後、一旦プルームはSSEの海上方向に流れたと思われるが、16日11～12時に楢葉町松館と大熊町大野で 33 及び $324 \mu\text{Sv/h}$ の線量上昇があった後、20日朝まで主なプルームの流れは海上方向であったと推測される。

本稿では、紙面の関係ですべての期間の検証を記載できないため、主に陸側に大きな線量上昇をもたらした3月12日午後と3月15日から16日の予測を詳細に検証する。

2. 定期実行²⁾の精度

3月12日午後のベント(14:30～15:00頃)と水素爆発(15:36)の時刻を挟む14, 15, 16時の放出を仮定した定期実行の結果を第2図に示す。ここでは、放出開始から2時間後の空気吸収線量率を時系列的に表示した。12日



第2図 3月12日14, 15, 16時放出を仮定した定期実行の2時間後の空気吸収線量率分布予測 (出典) http://www.bousai.ne.jp/speedi/20110312_rok/20110312.html

は、昼ごろから風向が時計回りに変化したが、ベントによる15時の双葉町上羽鳥の線量上昇を15時放出の予測プルーム(中央図)が1~2時間遅れで再現している。また水素爆発のプルームの動きについては、15、16時放出の予測プルーム(中央、右図)が双葉町新山及び浪江町浪江の線量上昇時刻(17:00)に到達しており、ほぼ正確に予測している。

3月15~16日に配信された SPEEDI の定期実行の結果を第3図に示す。ここでは、毎正時の放出の2時間後の分布を、線量上昇の始まった15日8時から16日14時まで6時間ごとに示す。観測と同様に15日8時にSSW方面に流れていた予測プルームは時計回りに向きを変え、14時には大熊町大野と双葉町山田の間に位置するが、これは現実よりも2時間程度の遅れがある。20時には予測プルームは浪江付近を流れており、この時点では観測とほぼ一致する。16日2時には反転して双葉町山田付近に流れているが、現実よりも2~3時間程度の遅れがある。図には示していないが、この遅れは楢葉町松館に到達するころには短縮され、8時には海上に出ている。14時の予測プルームは2時間程度の遅れで南西方向の一時的な線量上昇を再現し、その後、海上に出ている。なお、3月16日13~14時の図は、計算範囲の拡大に伴い他の図よりも表示範囲は広く、図中の黒円丸は、サイト中心から30 km 円を示している。

3月12日と15~16日は、いずれも風向が急激かつ複雑に変動していたが、上記のように時々刻々の放射性プ

ルームの動きを数時間の誤差を見込んだ上で時・空間的に俯瞰できている。政府事故調の報告書は、サイト北西地域について、15日は屋内退避し16日に避難する等、避難時期の判断に SPEEDI の結果は活用できたとしているが、そのような利用が可能な精度はあったと考えられる。

3月13日と14日については、プルームが海上に流れて検証できないため例示しなかったが、沿岸部での一時的な上昇や内陸で大きな線量上昇がない状況を予測できている点では、有用な情報を提供しているといえる。

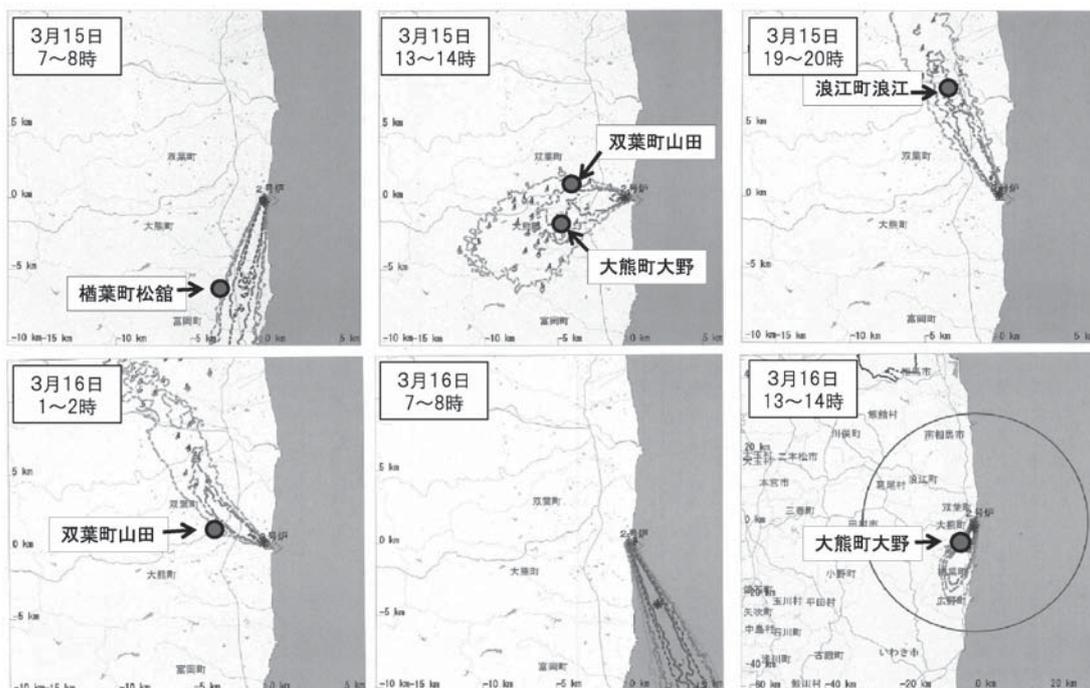
一方で、精度が下がるケースも見られた。3月12、13日の明け方から午前中は、静穏に近い状況が出現する気象状況の中で地上付近からの漏えいがあったと考えられ、風向が定まらず敷地に近い様々な方向で比較的低い線量上昇が現れたが、このような状況の予測は困難であった。

以上から、プルームの飛来時期の予測に SPEEDI を活用する上では、時・空間的にピンポイントで情報が得られると考えるのではなく、ある時空間の幅をもって判断に用いる必要があることがわかる。その幅は、気象条件等により異なるため、事前に SPEEDI の精度と気象状況の関係等を理解するとともに、予報結果を時々刻々入手される実測データで常に補正する必要があるだろう。

3. 依頼計算の精度と適時性

(1) ERC の依頼計算³⁾

当時、放出情報が得られなかったために SPEEDI の



第3図 3月15日から16日の定期実行による空気吸収線量率分布予測

(出典) 3月15日分 <http://www.bousai.ne.jp/speedi/20110315 rok/20110315.html>

3月16日分 <http://www.bousai.ne.jp/speedi/20110316 rok/20110316.html>

予測情報の絶対値に意味はなく、ここでは相対的な影響分布予測について評価を行う。

3月12日1号機ベント： 14時からの1号機でのベント操作に先立ち、ERCはベントによる影響確認のための計算依頼を行い、13時42分にはその結果を受信している。SPEEDIから送信された放出から3時間の外部被ばく実効線量の分布図を第4図(a)に示す。ベント開始を14時と入力しているが、放出開始とみられる実際の圧力低下が14時30分頃からのため、分布は若干南にずれている可能性があるが、15時に線量上昇のあった双葉町上羽鳥方向での線量上昇を事前に予測できている。このことは、ベント操作のような計画放出に先立ち影響範囲を知るためにSPEEDIの予測が有効であることを示している。

3月12日1号機水素爆発： 15時36分の水素爆発後にERCは水素爆発の影響確認計算を依頼し、16時49分にはその結果を受信している。理由は不明だが、この計算では放出開始が17時に設定されている。SPEEDIから送信された放出から3時間の外部被ばく実効線量の分布図を第4図(b)に示す。17時ごろの浪江町方面、19～20時頃の南相馬方面での線量上昇以前にその予測が十分な精度で提供されている。当時入手できた環境モニタリングデータはないが、水素爆発による大量放出の懸念があれば、念のための屋内退避等の判断につなげられた可能性

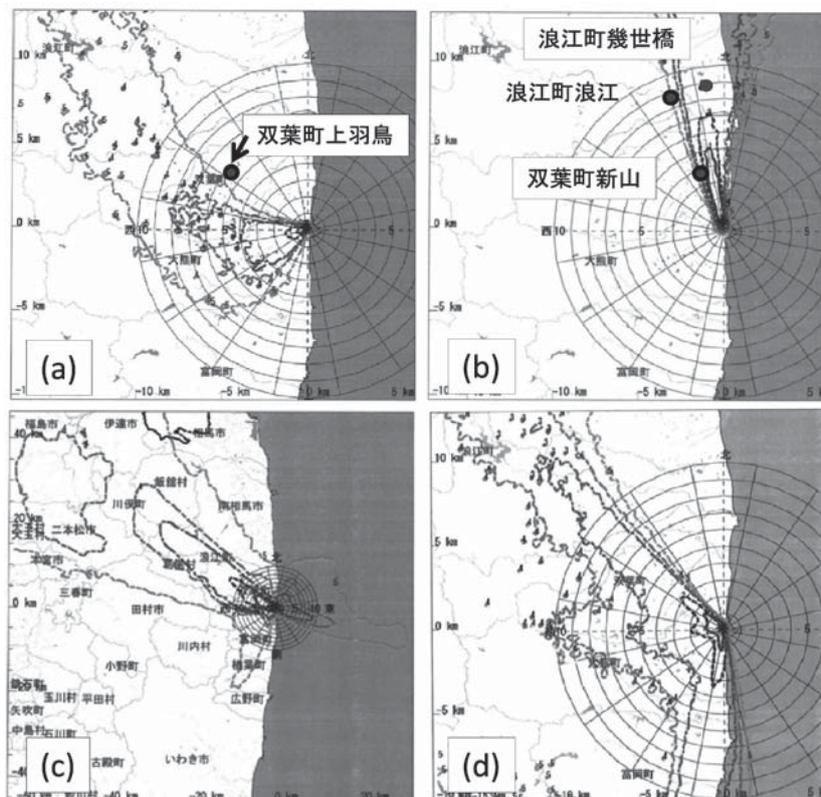
はある。

3月15日の大量放出： 15日6時頃の爆発音後に、ERCは当時想定された2号機サプレッションチェンバ破損による影響確認のための計算を依頼し、6時51分に結果を受信した。SPEEDIから送信された15日9時から24時間のヨウ素地表蓄積量の分布図を第4図(c)に示す。この図は、当日朝の時点ですでに夕方の北西部での地表汚染をSPEEDIが予報できていたことを示している。15日早朝から敷地境界で高線量が記録されており、夕方までその状況が続くことへの懸念があれば、念のための何らかの判断に必要な時間的余裕はあったと思われる。

なお、依頼計算では、線量影響範囲を見るために積算の沈着量や線量分布が求められており、実測に対する分布の一致度は定期実行より良い。これは定期実行では時々刻々の変化が求められ、時空間的な誤差が顕在化するが、依頼計算では、積算によりこれらが相殺されるためと考えられる。

(2) OFCの依頼計算⁴⁾

OFCは、緊急時モニタリング計画作成の参考とするため、3月14日から毎日定期的に単位放出を仮定したSPEEDIの24時間予測を受信している。組織的な緊急時モニタリングの始まった3月15日には、第4図(d)に示すように、未明の2時32分に当日の外部被ばく実効線量の



第4図 依頼計算の例。(a)3月12日14～15時のベントの影響予測、(b)3月12日15時36分の水素爆発の影響予測、(c)3月15日6時頃の爆発音後の影響予測、(d)3月15日のモニタリング計画立案のための影響予測。

(出典) (a),(b),(c) http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/speedi/erc/speedi_erc_index.html

(d) http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/speedi/ofc/speedi_ofc_index.html

分布図を受信している。この図では、明け方から午前中のサイト南方向での線量上昇及び夕方の北西部での線量上昇を予測しており、実測とほぼ一致する分布予報ができています。文部科学省の検証報告書(第2章)⁵⁾でも、SPEEDIの予報に基づき、高線量地域となった北西部にはじめからモニタリングチームを派遣できたことが記されており、有効に利用されたと考えられる。しかしながら、プルームの大気中濃度を捉えるダストサンプリングのためには、プルームの時々刻々の変化の情報も重要であり、今後、提供すべき情報として考慮すべきであろう。

(3) 旧原子力安全委員会の依頼計算⁶⁾

原子力安全委員会は、緊急時対策支援システム ERSS からの放出源情報が得られないため、3月17日からモニタリング結果と SPEEDI の予測情報から放出変動の逆推定を行い、それをもとに SPEEDI による周辺住民の被ばく線量を評価している。3月23日には、放射性ヨウ素による甲状腺被ばく線量を評価し、この結果は小児の甲状腺被ばく検査地域の選定に役立てられた。

放出量の逆推定は、ERSSからの情報がないため行われたが、ERSSが動作したとしても SPEEDI と組み合わせることで定量的に妥当な結果を出せるか検証された事例はない。現実性が曖昧な ERSS と SPEEDI による予報的な定量評価よりも、たとえ現況評価や事後評価になったとしても、モニタリングと計算予測の単純なフィッティングによる線量評価や、放出量逆推定に基づく線量評価のほうが利用価値は高いと考えられる。

Ⅲ. 今後の活用は？

はじめに当時の状況をもう一度整理する。地震から18時間後には1号機でベント操作が始まり、約24時間後に1号機が水素爆発を起こすなど、周辺住民の避難中に意図的または想定外の大気放出が発生している。一方、緊急時モニタリングが体系化されたのは地震から4日後の15日ごろからであり、事故当初は、11日から起動した SPEEDI が適時性をもって防災対策やモニタリング計画立案の判断材料を提供できた唯一の情報源であった。しかしながら、上述のように相対的な分布予測については、一定の信頼性のある結果を提供していたものの絶対値は不明であり、十分な情報とはなり得ていなかった。

このような状況を踏まえると、今後、緊急時モニタリングや放出量推定の迅速性が改善されたとしても、モニタリングまたは計算予測のどちらかだけで、事故当初から対策に必要な十分な情報が得られるとは考えにくく、相互に補完的特徴を持つモニタリングと計算予測による総合的な状況把握を強化すべきであろう。

これまでの検証結果を踏まえると、計算予測の持つ「予報」と「即時の全体把握」という特徴を生かした今後の利用には、以下が考えられる。

(1) 緊急時モニタリング体制が十分整う以前の初期段

階においては、

- ・大気拡散や地表沈着の将来予測に基づく緊急時モニタリング計画の策定とモニタリング結果の評価。
 - ・離散的モニタリング値と単位放出を仮定した予測分布のフィッティングによる現状把握を基にした早期の対策判断。
 - ・プルーム飛来の将来予測に基づく、避難・退避・ヨウ素剤服用等のタイミング判断。
 - ・影響予測に基づくベント等計画放出のタイミング判断。
- (2) 緊急時モニタリング体制が整って以降は、
- ・放出量逆推定による事故尺度評価と詳細な被ばく線量評価。
 - ・広域拡散予測に基づく食品検査や近隣自治体でのホットスポット形成過程の理解。

また、モニタリング結果と計算予測を統合して有用な情報を引き出す役割は、両者に精通した専門家にあり、そうした人材育成も望まれるところである。

以上、SPEEDI が提供した予測情報の精度と適時性を検証するとともに、その活用法を提案した。今後、国や地方自治体等が原子力防災のマニュアル等を作成する際の参考となれば幸いである。

— 参考資料 —

- 1) 福島県 HP:
<http://www.pref.fukushima.jp/j/post-oshirase.pdf>
- 2) 原子力規制委員会 HP:
http://www.bousai.ne.jp/speedi/SPEEDI_index.html
- 3) 原子力規制委員会 HP:
http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/speedi/erc/speedi_erc_index.html
- 4) 原子力規制委員会 HP:
http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/speedi/ofc/speedi_ofc_index.html
- 5) 文部科学省 HP:
http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/_icsFiles/afildfile/2012/07/26/1323887_01.pdf
- 6) 原子力規制委員会 HP:
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/mext_speedi/0312-0324_in.pdf

著者紹介



茅野政道(ちの・まさみち)
日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)環境動態, 被ばく線量評価, 計算シミュレーション, 緊急時対応システム

核融合研究で開発された最先端技術の波及効果

日本原子力研究開発機構 栗原 研一, 東京大学 小川 雄一

核融合実現に向けた課題克服を目的に研究開発された多数の最先端技術は、これまで他の産業分野へも活発に応用されてきた。現在、国際熱核融合実験炉 ITER 建設や原型炉を目指した幅広いアプローチ活動が技術課題と格闘しながら展開される中、本稿では、核融合研究で開発された最先端技術が、どのような機器に技術波及したか、あるいは可能性があるかについて現状を俯瞰し、科学技術創造立国の一翼を担っているとも言える核融合研究開発の新たな魅力を紹介する。

I. はじめに一核融合技術の波及効果の調査史

我が国の第2段階核融合研究開発基本計画(1975年原子力委員会策定)における中核装置「臨界プラズマ試験装置 JT-60」は、装置ミッションである臨界プラズマ条件を1996年に達成し、トカマク型核融合装置が、持続的原子核反応を高効率に起こす手法として成立することを実証した。これは、第3段階核融合研究開発基本計画(1992年同委員会策定、現行計画)の中核装置である実験炉 ITER の建設開始へとつながり、早期の実験開始に参加極の全精力が投入されている。また並行して核融合発電炉実現への最終ステップである原型炉に向け、プラズマ制御面及び装置工学面の最終課題解決の方策を検討してゆく活動が進められているところである。

JT-60の建設からそのミッション達成までの20年以上にわたる装置開発活動に加え、ITERの工学設計活動、また慣性核融合実験装置激光IX号レーザーの開発における高パワーレーザー技術や大型ヘリカル装置 LHD の開発における超伝導コイル技術などでは、我が国の産業界の電気、電子、機械、真空技術などと広範囲且つ密接な相互発展を樹立し、その結果多くの技術創出の実績も評価されている。

それら新しい技術は、当初は核融合における課題解決を目的に開発された訳であるが、それが核融合という超や極という語から始まる最先端の科学分野であることにより、応用についても全く新しい領域が切り拓かれることが多い。そこで他の分野の未解決課題の克服に貢献する場合や全く新規の応用が見出される場合もあり、総じて波及効果と呼ばれている。本来の目標達成までの道程

が長く、長期間の研究開発投資を要する最先端科学技術分野の推進には、社会への早期還元は不可欠と言える。

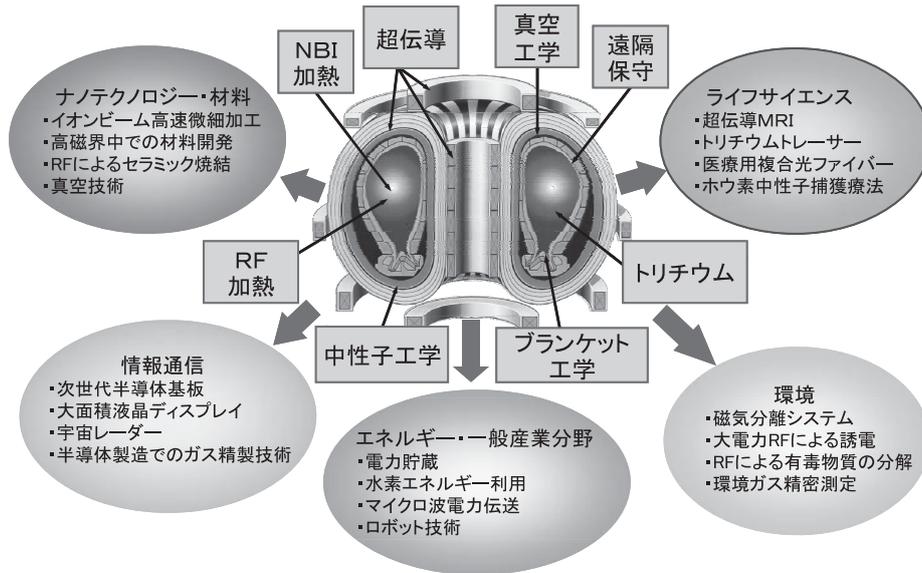
核融合研究開発をこの波及効果という観点で捉える試みは1986年に、当時の日本原子力研究所から原子力産業会議(現原子力産業協会の前身)に調査が委託され、具体的事例を系統的に報告書にまとめられた¹⁾。また、1998年には、核融合エネルギーの社会的受容性を論ずる中で、1970年代からのJT-60建設以降の波及効果について、総合的網羅的にまとめて報告された²⁾。欧米でも核融合開発の波及効果調査報告が1980年代に行われ、産業界の国際競争力強化に対する意義などに言及していることなど、文献2の冒頭で詳しくレビューされている。

その後、実験炉 ITER の建設サイトが決定された2006年に、それまでのJT-60実験やITER工学設計活動結果を踏まえて、核融合工学技術に絞っての波及効果について日本原子力研究開発機構で定点観測的なレビューが内部の検討として行われた。第1図にその際の分類の概念を示す。工学技術領域は、我が国の原型炉概念として想定されているトカマク型核融合装置にとって主要な要素技術、超伝導、NBI加熱、RF加熱、中性子工学、ブランケット工学、トリチウム、遠隔保守、真空工学等を取り上げた。波及分野については、(a)ナノテクノロジー・材料、(b)ライフサイエンス、(c)情報通信、(d)環境、(e)エネルギー・一般産業分野、の5分野とした。

2006年以降、ITERの建設活動への移行や幅広いアプローチ(BA)計画が始動するなど、新規に実機的设计製作が開始され、それに先立って試作開発が並行して実施されてきたが、その中でも波及の可能性のある技術が開発されている。そこで今回、最新の技術情報を収集し、それを基に解説を行う。なお、本稿では磁場閉じ込め装置開発での波及効果技術を中心に取り上げる。

A Survey of Spin-offs from State-of-the-art Technology Created in Fusion Research and Development: Kenichi KURIHARA, Yuichi OGAWA.

(2013年 2月4日 受理)



第 1 図 核融合工学技術の波及効果(代表的波及分野)

第 1 表 核融合工学技術からの波及効果の具体例一覧表

波及分野	項 目
ナノテクノロジー・材料	① 超伝導高磁場発生による高品位シリコン単結晶の引き上げ ② イオンビームを用いたナノ加工技術 (ハードディスク製造への応用) ③ RFプラズマ・プロセッシング技術による新材料の創成 ④ RF技術によるセラミックス焼結 ⑤ 真空技術 (真空熱天秤、高分解能質量分析器等) の波及効果
ライフサイエンス	① 超伝導技術による医療用MRI、高分解能NMRスペクトロメーター、粒子線治療用加速器 ② 水素同位体分離技術を用いた医療用レーザー精製技術 ③ 遠隔保守用複合 (レーザー照射と観察) ファイバーの医療応用 ④ 大電流連続加速技術のホウ素中性子捕獲療法 (癌治療) への応用
情報通信	① イオンビームによる次世代半導体基板の製作 ② イオンビームを用いた大型液晶画面の製作 ③ 指向性の良いミリ波帯高周波を用いた宇宙レーダー等への応用 ④ 核融合燃料精製技術を用いた半導体製造におけるガス精製技術
環境	① 超伝導技術による磁気分離システム (下水浄化装置等への応用) ② 大電流電子ビームによる有害物質の分解 ③ 大電力RFによる誘雷、デブリレーダー ④ RF技術による有害物質の分解 ⑤ 核融合燃料精製技術を用いた可搬型リアルタイム環境モニタリング装置 ⑥ ベレットによる宇宙空間デブリ・隕石の衝突シミュレーター ⑦ 高温等圧加圧接合技術も大型精密構造物製作への適用
エネルギー・一般産業分野	① 超伝導技術による電力貯蔵 (SMES) ② 超伝導コイル用低温構造材料の水素エネルギー・システムへの応用 ③ RF技術のエネルギー伝送、加速器等への応用 ④ 核融合燃料分析技術を用いた化学工業プロセス・モニタリング装置 ⑤ 免震技術及び免震要素のリアルタイム・モニタリング技術 ⑥ 極限環境下での高精度光学式ペリスコープ ⑦ 配管内走行自動溶接・切断・検査ロボット ⑧ 高放射線環境下での高精度距離測定センサー ⑨ T字継ぎ手低歪溶接法の応用 ⑩ CVD単結晶ダイヤモンド検出器の応用 ⑪ 高エネルギー中性子による大型機器の非破壊検査 ⑫ 構造設計法の高度化による薄くて強い構造物の実現 ⑬ 高性能炭素複合材料の応用 ⑭ 高性能冷却管の応用 ⑮ 水素回収技術の水素製造プラント保全技術への応用 ⑯ 海水中からのリチウム資源回収技術 ⑰ プロトン導電体を用いた水素製造、燃料電池への応用 ⑱ 高出力ファイバーレーザーを用いた高品質加工技術 ⑲ 高耐熱性フレキシブル放射線 (中性子・ガンマ線) 遮蔽樹脂 ⑳ JT-60技術の波及 (エネルギー貯蔵、直流送電、大電力四極管等)

II. 波及効果を生む技術

波及分野として選定した5分野に貢献する可能性のある技術を、核融合工学の各技術要素から核融合研究者側から見て抽出した具体例40項目を、第1表に示す。この抽出では、波及効果を利用する側である産業界から見ても、実応用に貢献し得るものがある一方、まだ種の段階に留まるものもあり、その意味では応用レベルが様々であることを付記しておく。

1. 超伝導技術

大型の超伝導技術は、核融合研究開発の要求に応える形で発展して来たと言っても過言ではない。磁場核融合装置は、ジュール発熱する銅導体コイルの利用ではエネルギー発生装置に成り得ないからである。1990年代のITER工学試作開発において、高磁界(13T以上)を発生できるニオブ・スズ(Nb₃Sn)超伝導線材の開発と量産化に成功し実機製作への見通しが得られ、現在、他の技術課題もクリアしITER用超伝導コイル実機製作が開始されている。この一連の超伝導コイル試作開発で培われた技術は、製造メーカーの超伝導関連機器製造技術に波及し、それらは医療用MRIや粒子線治療用加速器応用へとつながった。

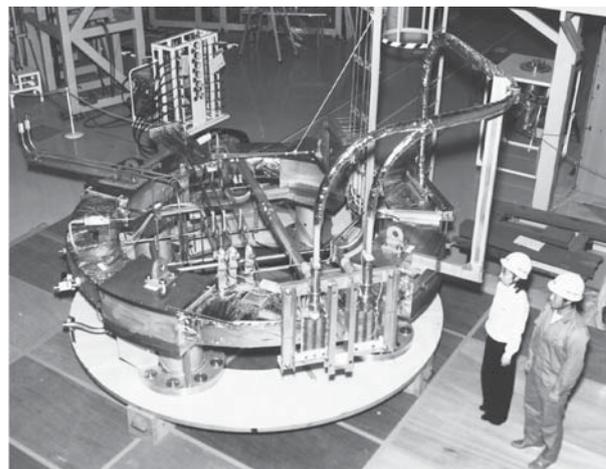
超強磁場の創出が可能であるニオブ・スズ超伝導線を用いた超大型の超伝導コイルは、第2図に示すように、超伝導電力貯蔵システム(SMES)への試作開発が進められ、エネルギー貯蔵容量の大幅な拡大が研究機関や産業界により検討されている。

超伝導技術の波及を考えるとときのキーワードは、強磁場、極低温、低温高強度、冷凍機、高蓄積エネルギー、高温超伝導等であるので、その点で波及分野での課題解決につながるかどうかを考える。第3図に現在までの超伝導技術の到達レベルを示す。この図は同時に波及効果を検討するヒントを提供する。

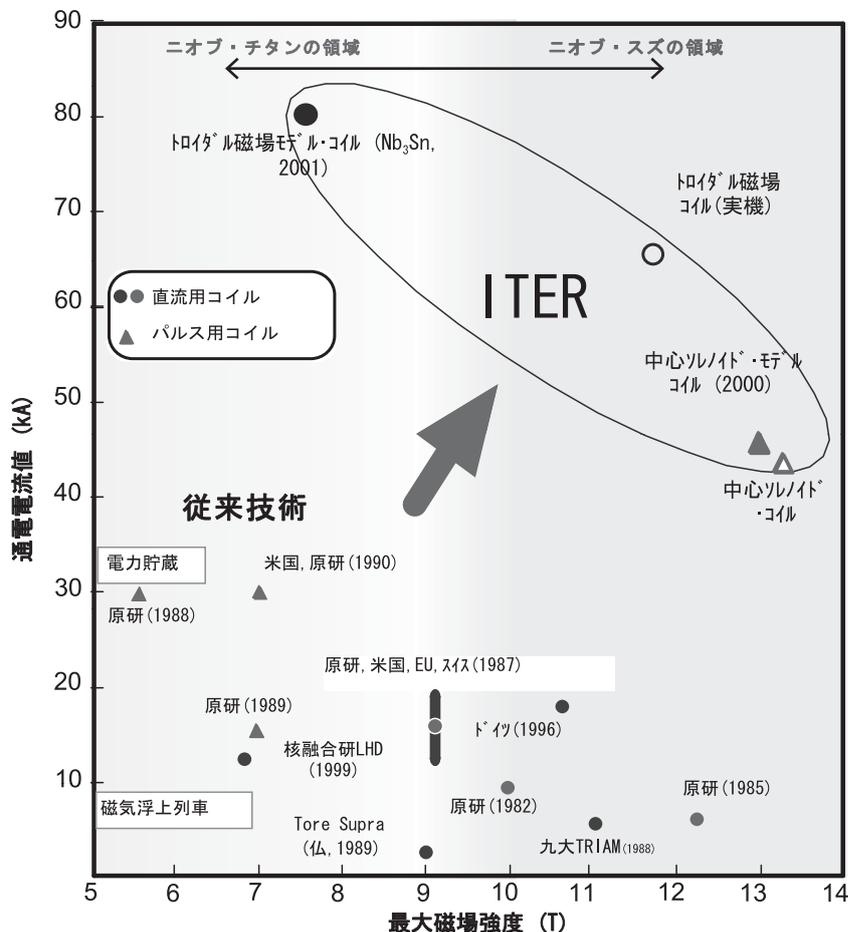
2. 中性粒子入射(NBI)加熱技術

臨界プラズマに必要な1億度以上の温度にするためには、追加加熱が不可欠である。最も確実な加熱が中性粒子ビーム入射である。粒子ビーム入射装置は一種の加速器であり、ビームエネルギーは高々数百keVから1MeV程度であるが、そのビーム電流は数10A以上の大電流であり、入射パワー

でMWのビームという特徴を持つ。その達成には、世界初の挑戦のため幾多の技術的困難を克服しながら実現された。その後、プラズマに注入運動量を向上させる加速電圧の増加が要請され、中性化効率が正イオンでは限界があるため、負イオン加速中性粒子ビーム入射装置の開発に移行した。2008年に停止したJT-60の運転最終期では400keVの高エネルギー粒子の入射を実現し、ITER用には1MeVで40Aのビームを開発している。



第2図 SMES用超伝導要素コイル
(5kW×1h相当のエネルギー蓄積)

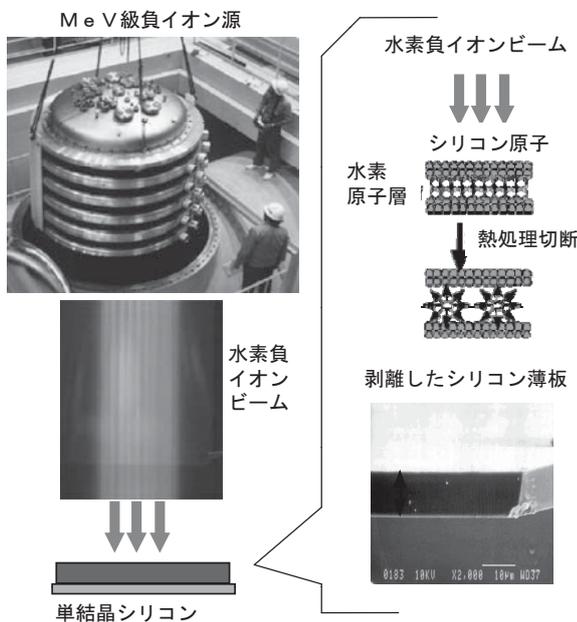


第3図 超伝導技術の達成レベル

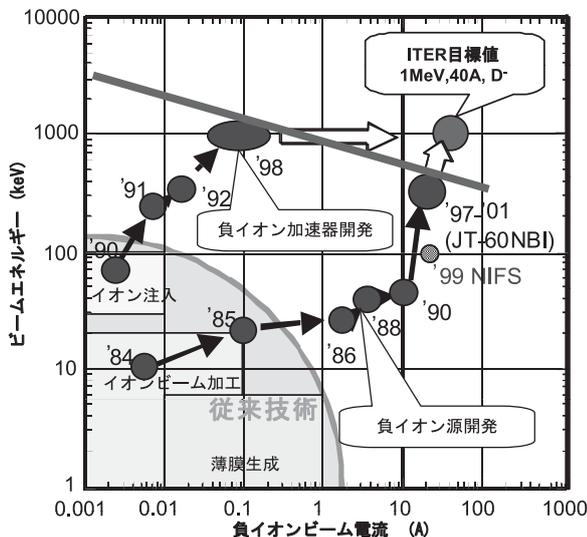
核融合開発によって大きく進展したイオン源に関する技術を用いて製品化されたイオンビーム加工機は、ハードディスクの微細加工などに利用されている。また、最新の負イオン NBI ビームを用いて次世代半導体基板の製作という波及効果の実用化が有望視されている。第4図に示すように、単結晶シリコンウェハーに水素負イオンビームを照射注入し、水素原子層を作り、剥離させてシリコンの薄板を製造するというものである。第5図には、負イオンビーム技術の達成レベルを示す。

3. 高周波(RF)加熱

これまで3つの異なる周波数帯の高周波加熱装置が開発された。すなわち、イオンサイクロトロン周波数(100 MHz)帯、低域混成波(2 GHz)帯、電子サイクロトロン



第4図 負イオン粒子ビームを用いた次世代半導体基板の製作



第5図 負イオンビームの達成レベル

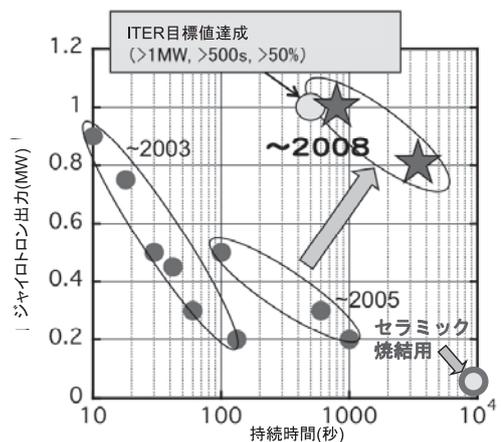
(EC)周波数(100 GHz)帯。特に、EC加熱入射を用いた局所的な電流駆動により、プラズマの性能を劣化させプラズマ崩壊を引き起こす不安定性の抑制に成功し、運転シナリオに組み入れられている。このため ITER, 原型炉以降でも使われることが想定される100 GHz以上のEC周波数用ミリ波発振器ジャイロトロン開発が精力的に実施され、第6図に示すように、ITERの目標である周波数、パワー、持続時間、効率を既に同時に達成している。

波及効果として、セラミックス焼結用のジャイロトロン(周波数28 GHz)が挙げられる。飛躍的に高いマイクロ波吸収率を実現し、セラミック焼結の消費電力を大幅に減らした。高速加熱、局所加熱、セラミック接合が可能であり、精密小型部品から厚肉・複雑形状部品まで対応できるという特徴を持つ。各種機能材料, 圧電セラミック, 積層デバイス材料, 自動車用構造材料(エンジン, スプリング)等の製造研究が進展している。

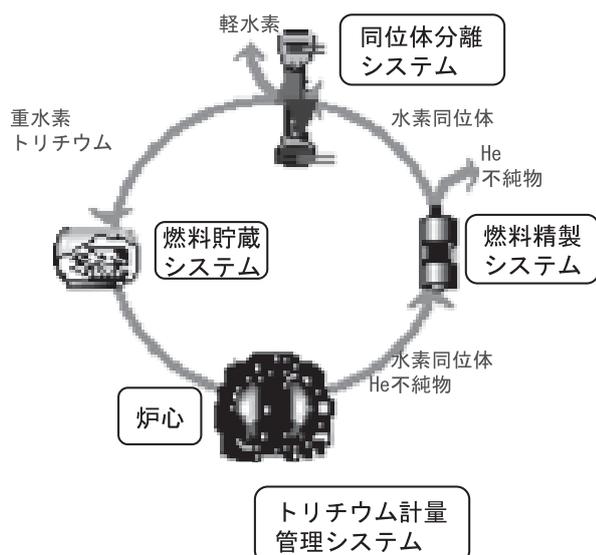
4. トリチウム取扱い技術

燃料となる大量トリチウムを取り扱う技術は、第7図に示すように、燃料サイクルを構成する要素技術からなり、これまでの研究開発で核融合炉の要求技術はほぼクリアしている。トリチウムガスが建家内に漏れた場合でも、雰囲気ガスを浄化してトリチウムだけを回収するシステムやブランケットで生成されたトリチウムをヘリウムなどのスイープガスで取り出し、その後、トリチウムだけを選択回収するシステムなどの試作実証が進んでいる。

トリチウム取扱い技術の一つの波及効果として、ガス分析技術を用いた可搬型リアルタイム環境モニタリング装置がある。マイクロガスクロマトグラフのカラム及び検出器部分をマイクロチップ化し、有機成分(メタン等), 空気成分, 水素同位体の高速分析(2分以内=従来の1/20以下に時間短縮, ガス漏洩なし)し, 装置の小型軽量化(重量・容積を1/5以下)を達成した。自動車排気



第6図 ジャイロトロン達成レベル



第7図 核融合炉トリチウム取扱い技術

ガス、ダイオキシン等の分析やモニタへの応用も見込まれる。

5. 真空工学技術

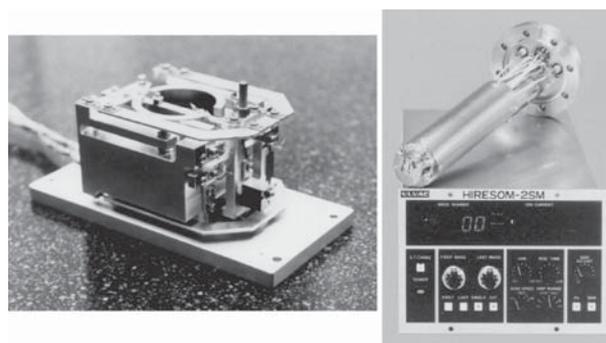
核融合の真空は、超清浄・超高真空という特徴から、そこで開発された技術の波及効果として、既に製品化され利用されているものが多い。例えば、微量発生ガスの迅速且つ高感度の計測が可能なガス質量分析装置の利用では、自動車用アルミ合金といった鑄造製品からの放出ガス分析による品質管理や、野菜からの放出ガス分析による鮮度の指標策定等に用いられている。

応用製品としては、以下の(a), (b), (c)が既存。(d)は開発中。(a)真空熱天秤：2千万分の1の精度で重量測定を実現(従来10万分の1)(第8図左参照)。(b)ヘリカル溝型真空ポンプ：出口軽水素圧力1,000 Pa域で連続運転を実現(従来圧力10 Pa域)、完全オイルフリー。(c)高分解能質量分析計：重水素(D₂)とヘリウム(He)を10 ppmの精度で分別測定を実現(従来精度1,000 ppm)(第8図右参照)。(d)高純度分離装置：従来技術では不可能であった室温、大気圧条件下での連続分離を実現(200 Pa・m³/s)

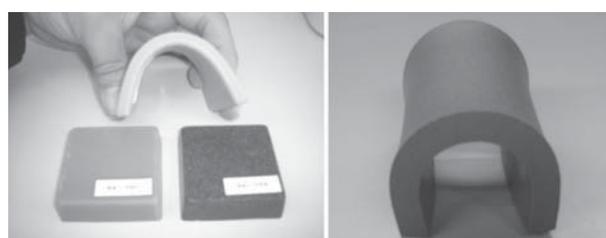
6. 中性子工学技術

核融合炉では、超伝導コイルにおける核発熱防止や計測器保護のために、中性子・ガンマ線遮蔽が必要となるが、一方、狭隘部に遮蔽用金属を挿入することは極めて困難な場合が多い。そこで、フレキシブルで耐熱性(250℃)を有する遮蔽樹脂材として、ゲル状樹脂材料から自由に成型できる遮蔽材の製作方法が開発されている。

代表的な中性子遮蔽樹脂材であるポリエチレンと同程度のCf中性子遮蔽性能を持ち、中性子吸収物質より密度の高い重金属粉末を均一分散で混練する製作方法によりガンマ線遮蔽材にも使用可能というものである。第9図に製品を示す。



第8図 真空技術の波及効果としての製品化例
(左：真空熱天秤(新光電子株)、右：高分解能質量分析計(株アルバック))



第9図 高耐熱性フレキシブル中性子遮蔽樹脂材(左)とガンマ線遮蔽樹脂材(右)

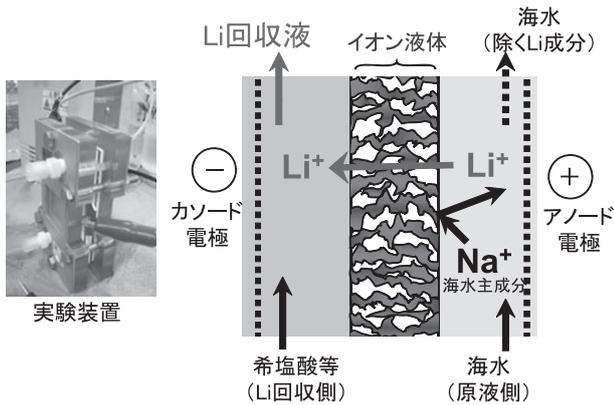
この技術は本来の機能を、中性子やガンマ線を取り扱う核分裂炉など核融合炉とは別の放射線発生装置での応用を想定した波及効果である。

7. ブランケット工学技術

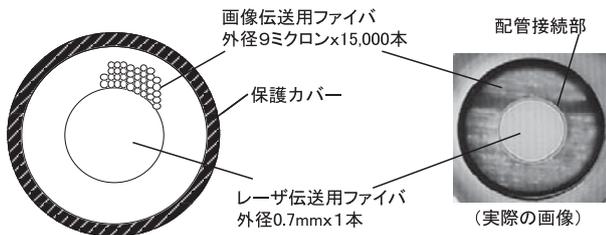
核融合炉において、ブランケットは工学的に最も複雑で課題も多く残る構成要素と言える。その課題の多くは未踏技術であることから、課題解決の結果として、同時に波及効果をもたらすことも期待できる。その一つとして、他の産業へのインパクトが大きいと考えられる波及効果を紹介する。

核融合炉の燃料増殖ブランケットにおいて、トリチウム生産の原料はリチウムの同位体⁶Liであるが、陸上の資源としては、大容量電池等への需要が多く、大量に輸入で賄うことは極めて難しい。一方、天然のリチウム元素は海水中に大量に含まれており、⁶Liは約7.6%存在していることから海水からのリチウム資源の回収技術が求められる。リチウムは、パソコンのバッテリーやハイブリッド車の車載電池等多方面への利用もあるレアメタルであり、海水からの大量回収は、我が国の資源の安全保障に貢献することにもなる。

第10図に示すように、イオン液体を海水側と回収側の液層の間に介在させることによりLiイオンが回収側に移行するという原理を用いた技術開発が最近急速に進んでいる。既に海水中Liの最大22%の回収に成功している。



第10図 海水中リチウムを回収するイオン液体応用技術の原理



第11図 複合型光ファイバの概念

8. 遠隔保守技術

放射化した核融合炉近傍には、人が近づくことは不可能であることから、高機能の遠隔保守機器は必須である。代表的なものは、大型重量物であるブランケット着脱ロボット、配管の遠隔溶断・溶接ロボット等である。

その波及効果は、本来機能の単純な他分野への適用だけでも有効なものも多いが、ここでは、ライフサイエンスへの波及の可能性がある複合ファイバを紹介する。これは冷却配管の溶断・溶接用 YAG レーザーを伝送させる機能とその状況を観察するイメージガイド機能との2つの機能を合わせ持つファイバである。

第11図にそのファイバの断面図を示す。高出力 YAG レーザーと高解像度との両立性が特徴となり、波及としては医療用レーザーメスなどが想定される。

9. その他の技術の波及効果

第1表に示しただけでも期待される核融合技術の波及効果が多数存在するが、現在 BA 活動として実施している国際核融合材料照射施設 (IFMIF) の工学実証活動からのガン治療への波及効果に触れる。最先端のガン治療法として注目されているホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、中性子を照射することでガン細胞だけを選択的に破壊する。これまで原子炉の中性子を使って行われてきた

が、加速器による制御性改善などを目指しているながら、大電流加速器技術とターゲット技術に課題を抱えていた。一方、IFMIF はこれまで世界に例のない大電流のイオンビームを発生できる加速器とそれを受ける液体金属リチウム流の開発を行っており、125 mA という大電流加速器と 20 m/s の高速の液体リチウム流のループにより、これまで不可能だった大量の中性子の発生、大規模な最先端ガン治療施設という大きな波及効果が期待される。

Ⅲ. 結びとして

人類未踏の技術に挑戦している核融合研究開発を進めることによるメリットの一つとして波及効果を概観した。波及効果は、核融合先端技術の強力推進により、国際社会におけるわが国の技術基盤を強くし、同時に多額の投資に対する社会への早期還元を行うことにもなり、まさに科学技術創造立国の牽引車としての役割を果たしている。また産業界においては、その国際競争力を高め、国力の源である貿易収支をプラス側に誘導することが期待される。さらに波及効果を通じて、大学、産業界、研究機関は、技術面での相互発展が過去に展開された良好な実績も有している。今後、核融合発電炉までの開発ステップにおける社会からの理解と支援を得るためにも、所期の目的である人類恒久のエネルギー源探求のみならず、技術的副産物である様々な波及効果を通して広く社会貢献している事実を発信することが肝要であろう。

—参考資料—

- 1) 核融合波及効果調査委員会，“核融合研究開発の波及効果に関する調査報告”，日本原子力産業会議，(1987)。
- 2) 森野信幸，小川雄一，“核融合エネルギーの社会的受容性と科学的見通しⅡ：10. 波及効果”，プラズマ核融合学

著者紹介



栗原研一(くりはら・けんいち)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)核融合プラズマの挙動解明に関わる実践的研究開発，課題解決に有効な新しい方法論/見方/考え方



小川雄一(おがわ・ゆういち)

東京大学
(専門分野/関心分野)核融合プラズマ研究・核融合炉設計，および核融合エネルギー開発戦略

報告

放射性セシウムはどう動くのか

原子力機構が福島県で放射性物質の環境動態研究に着手

日本原子力研究開発機構

東京電力福島第一原子力発電所事故で飛散した放射性セシウムは、雨や風の影響を受けて、これからどう動くのか、あるいは動かないのか。日本原子力研究開発機構は、そのプロセスを調査して今後の動きを予測する調査研究を始めた。福島長期環境動態研究と名付けられた本プロジェクトでは、今後の長期にわたる放射性物質の分布を予測し、放射性セシウムが生活環境に移行するのを抑制する方策を検討するとともに、被ばく線量を評価することをめざす。本稿では昨年12月から本格的に始まった本プロジェクトの概要を紹介する。

山林の中での動きを探る

「東京電力福島第一原子力発電所事故で飛散した放射性セシウムは、今は土壌中の粘土粒子にしっかりと吸着しており、容易には移動しません。けれども台風や大雨、融雪に伴って、土壌中の粒子とともに動く可能性があります。現に住民の方々からは、除染した場所に、周囲から放射性セシウムが移動してきて、再汚染されることを心配する声も聞かれます。森林の中にある放射性セシウムはどう動くのか、あるいは動かないのか。そのプロセスを調査して今後の動きを予測し、放射性セシウムが生活環境に移行するのを抑制する方策を検討すると共に、今後の長期にわたる放射性物質の分布を予測し、被ばく線量を評価するのが、本プロジェクトの目的です。ここでの成果が、住民の皆さまの安心につながればと期待します」。

昨年12月3日、場所は福島県川俣町にある山あいの斜面の切り開き。時々吹き付ける風がほおを刺す中で、長靴をはいた11人の作業員を前に、福島長期環境動態研究プロジェクトリーダーの中山真一(=写真左)はこう述べた。



今回のプロジェクトが計画されたのは、一昨年11月から昨年5月まで行った除染モデル実証事業を担当した研究者

から、除染した場所の放射線量が今後、どのように変化していくのかを見ておくべきとの一言からであった。原子力機構ではこれまで、地層中に処分された放射性廃棄物に含まれる放射性物質が、地層中や生態圏をどのように移行し人間に影響を与えるかを調べる研究に取り組んできた。

今回のプロジェクトが計画されたのは、一昨年11月から昨年5月まで行った除染モデル実証事業を担当した研究者から、除染した場所の放射線量が今後、どのように変化していくのかを見ておくべきとの一言からであった。原子力機構ではこれまで、地層中に処分された放射性廃棄物に含まれる放射性物質が、地層中や生態圏をどのように移行し人間に影響を与えるかを調べる研究に取り組んできた。

JAEA Launched a Project on the Assessment of Transport of Radioactive Contaminant in the Environment of Fukushima : Japan Atomic Energy Agency.

(2013年 2月12日 受理)



しかし、環境中に広く拡散した放射性セシウムが、どこにどのようにとどまり、どんな時にどのように動くのかという研究は、チェルノブイリ事故後の例など世界でも数は限られており、福島には福島特有の環境がある。このため、「福島長期環境動態研究」と名付けられた本プロジェクトは、何をどう調べるかという、ほとんど手探りの状態から始まった。この日、川俣町の山林およそ8,000 m²で始められた調査は、本プロジェクトの最初の本格的な実地調査となった。

気象と空間線量率を同時に観測する

山へと続く緩やかな傾斜をもつ小道の脇に、ソーラーパネルやカメラを搭載した装置がある。その装置を前に、寺内誠(=写真上)はこう説明する。

「この装置では、上部についたカメラが正面の様子を画像でとらえ、雨量計や風速計などが、気象データを観測します。さらに放射線センサが、空間線量率を測ります。これによって、気象条件の変化と空間線量率の変化を、同時に観測することができます」。

装置の高さは2 mほど。下部は三脚で固定され、そ

の上に放射線センサとカメラ、雨量計、風速・風向計、伝送ユニット、そして電源であるソーラーパネルがある。カメラは、山へと続く緩やかな傾斜をもつ小道(林道)とそのまわりを射程に入れており、大雨が降れば、その小道の中に既に出来ている水みち(水路のような窪み)中を土砂を含んだ水が流れてくる模様を観察することができる。

装置では10分ごとに気象データと空間線量率のデータや画像を、パソコンに自動転送する。そのデータを集積すれば、気象条件と空間線量率との関係を把握することができる。この気象観測一体型放射線モニタは、福井市にある山田技研(株)と原子力機構が共同研究で開発したものだ。

さらに一帯の面的な空間線量率の分布については、 γ プロッタ(=写真右上)を導入し測定した。 γ プロッタは放射線を計測する2個のプラスチックシンチレータとGPSを内蔵したステッキ状の装置で、これを持って歩くことで、放射線量をリアルタイムで電子地図上にマッピングすることができる。この装置によって、定期的な測定のほか、台風の過ぎ去った後や融雪時にも測定を行い、気象条件による放射性セシウムの移動を確認することができる。

植生や地形を調べる

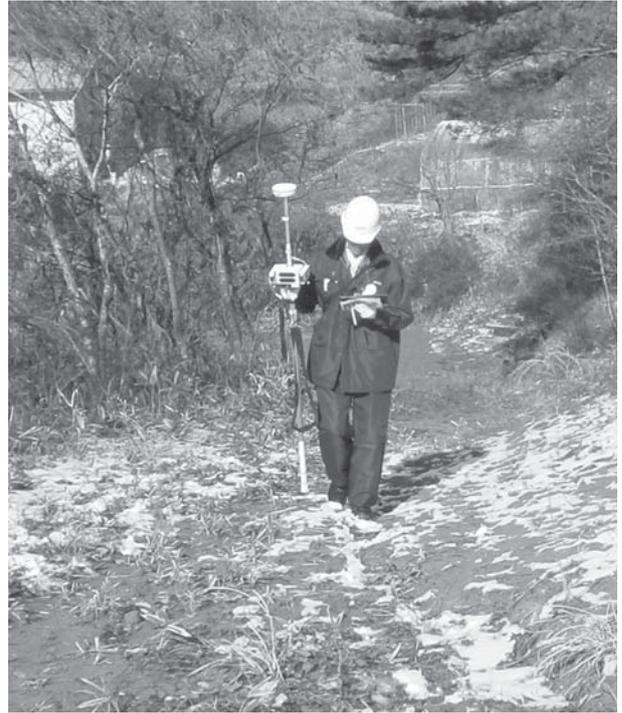
森林内で土壤中の粒子とともに放射性セシウムが、流れる水によってどう動くかを予測するためには、対象となるエリアの土壌層とそれに対応したセシウムの濃度分布のほか、鉱物組成やセシウムの動きに影響する森林の植生や地形などをつぶさに調べる必要がある。このため原子力機構では、この一帯の地形や植生、下草などの種類と分布のほか、後述する土壌サンプラーを用いて表層土壌中のセシウム濃度分布と土壌層、さらには鉱物組成を徹底的に調べている。森林内の樹木については、その配置や高さ、幹の直径、樹種を調査。下草はその分布や、リターと呼ばれる腐葉土の厚さと分布を調べている(=写真右中)。

地形の調査に使っているのは3Dレーザースキャナー(=写真右下)で、これによって3次元的な地表面の凹凸まで正確に計測することができる。「この装置は、坑道等の状況を計測するために利用していたものです。これにより、水の流れやすいところ、たまりやすいところに分かる。」と新里忠史は自信を持って説明する。

これらの調査結果は、森林の中の表層を流れる水の動きを把握するためのもので、更に詳しく調査するため、濁度計や水位計などの自動観測機器の設置場所の選定にも使われる。

地衣類を調べる

地衣類とは、菌類と藻類の共生生物だ。多くは木や石



の表面に生育している。外見はコケに似ているため、それと混同されがちだが、地衣類は菌類。コケのような植物とは異なり、地衣類には根がない。

「地衣類は、セシウムを吸収しやすく、吸収したセシウムはほとんど動かないことが、チェルノブイリ事故で分かっています。そのため、このプロジェクトでは樹木

や石の表面の地衣類を採取し、それがどの程度の放射性セシウムを含んでいるか、生育場所でどう変わるのかを調べ、周辺の放射性物質の量と比較することで、周辺の放射性物質の量が事故当時からどれくらい減少したのか分かるのではないかと考えています」。

こう説明するのは、土肥輝美。説明しながら、土肥はヘラで地衣類を剥ぎ取る作業を続ける(=写真右中)。

土壌を調べる

土の中に放射性セシウムは、どの程度しみこんでいるのか。また時間とともにどう変わっていくのか。その深さ方向の分布状況を調べるのが、土壌サンプラーだ。

土壌サンプラーとは、土中に円筒を押し込んだ後、それを引き上げることで、円筒内に押し込まれた土を層構造を乱さず円柱形のままで掘り出すことができる装置(=写真右下)だ。この掘り出した円柱形の土の中に放射性セシウムがどのように分布しているかを調べることで、放射性セシウムが浸透する速さを調べることができる。また、濃度分布と土壌構成、さらにはそれら構成土壌の鉱物組成などを調べることで、セシウムの移動プロセスを把握することができる。

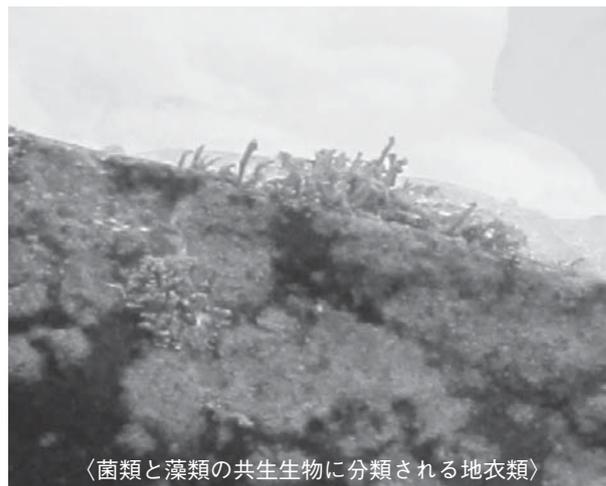
実際の土壌のサンプリングに立ち会った。けたたましい音を立てて円筒状のサンプラーが徐々に地下に押し込まれていく。原子力機構の職員数人が、それを手で支えて制御している。押し込んだ円筒状のサンプラーから土を取り出すためには時間がかかるため、前日、同じ場所で試験的に掘り出された土を見ると、深さ方向にいくつかの異なる土壌が見える。職員は、押し込む際に表土が混ざった部分の土を取り除くために、円筒状に掘り出された土の表面部分をていねいに、ヘラでこそぎ落としていた(=写真次ページ上)。とても地味な作業だ。

なぜ、この場所で土壌採取をしているのかを尋ねると新里忠史は、「下流側を背にして、正面及び左右の地形を見ると、この位置を雨水等が流れると判断できます。地面すれすれに顔をもってくれば、その勾配が分かります」と答えてくれた。実際にやってみると、平坦だと思っていた場所にも傾斜があることが分かった。

なお、予備的な調査によれば、放射性セシウムは地表面から深さ10 cm以内に分布することが多い。ここではそれを、詳細に調べていく予定だという。

川俣町

福島県伊達郡にある町。人口はおよそ1万4千人。平安時代から始まった養蚕業や絹織物業により、「絹の里」として知られる。近年は絹織物業に替わって自動車部品・電子部品製造などの工場が立地し、産業構造の変化が進んでいる。



〈菌類と藻類の共生生物に分類される地衣類〉



川を調べる

一方、原子力機構では山林のほかに、川における放射性セシウムの移動も調べている。同じ日の午後、調査地区の一つである南相馬市小高川でも川に関する調査が開始された。海からおよそ1 km 上流に遡った地点だ。

調査では、川幅や川の水深、流れる水の流速、濁度を測定(=写真右中)。さらに河川水や川底の堆積物、川岸の堆積物や土壌を定期的に調べることで、セシウムを吸着した土壌粒子の動きや堆積の状況、さらには流れの速さや、河口域付近では海水による塩分濃度の増加によってそれらがどう変わるのか、大雨や雪溶け後の増水時期にはどうなるのかなどを調べる。スクレーパープレート(=写真右下)を用いた土壌採取では、cm単位で土壌を採取し、放射性セシウムの濃度と土壌の特性を知ることができる。この作業を担当していた鶴田忠彦は、「これにより、河川の増水によってセシウムが運ばれてくるのか、逆に土壌が削り取られることによってセシウムが少なくなっているのかが分かります。今日の河川敷の線量率測定では、川から離れると、線量率が高く、川に近づくとも線量率が低くなっていることが分かりました。川の増水による土砂の動きによってセシウムの量が変化すると予想されます。」と作業の手を休めることなく、答えてくれた。

調査対象の河川は、小高川のほかに請戸川、熊川、富岡川である。

南相馬市

福島県浜通り北部の太平洋に面する市。人口はおよそ6万5千人。国の重要無形民俗文化財に指定されている「相馬野馬追(そうまのまおい)」が行われることで知られる。その起源は1千年以上前に遡り、約500騎の甲冑(かっちゅう)姿の騎馬武者が集まり、古式甲冑競馬と神旗争奪戦が繰り広げられる。東日本大震災と東京電力福島第一原発事故が起こった平成23年、祭りは大幅に縮小されたが、去年は7月28~30日に本格的に開催され、多くの観光客が訪れた。



この原稿は、日本原子力研究開発機構がHPに掲載している「トピックス福島」No.14を加筆修正したものです。

連載
講座これからの原子カシステムを担う
新原子力材料

次世代原子カシステムのための材料開発の現状と課題

第7回(最終回) 材料評価技術

日本原子力研究開発機構 若井 栄一

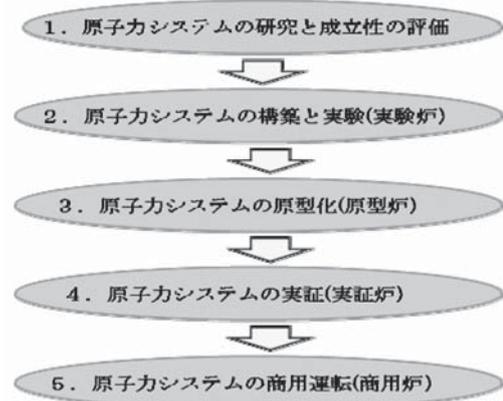
次世代原子カシステムのための材料開発として材料評価技術がある。次世代原子カシステムとして第4世代原子炉や核融合炉等の開発がある。いずれの研究開発も近い将来、商用化を目指してそれぞれの開発ステップを踏んでいるところである。本稿では、各種システムに共通した材料の評価技術のステップの踏み方や経緯及び今後の課題を簡潔に整理した。いずれのシステムでも、材料の照射影響の評価が共通の課題であり、システムがおかれる環境ごとに適正な評価を必要とする開発段階の材料評価技術であり、今後の材料開発や評価の方向性等を紹介する。

I. 緒言

原子力材料の評価技術は、原子炉システム開発における根幹となる最重要な技術の一つとなっている。本稿では、次世代原子カシステムを考える前に、原子力開発の初期に行われた実際の原子カシステムの経緯やステップの踏み方をまず振り返りたいと思う。

原子力の平和利用や研究開発の背景に、1953年12月に米国アイゼンハワー大統領がニューヨークの国連総会で行った「原子力平和利用」の話があり、これは2トン相当の濃縮ウラン235を各国に配分し、世界的な原子力平和利用を促進するという提案内容であった。これを受け、翌年12月の国連総会で「原子力平和利用促進に関する国際協力」が決議されると共に、IAEA(国際原子力エネルギー機関)の設立と原子力平和利用国際会議(1955年第1回ジュネーブ会議)が開催され、原子カシステムの開発が急速に進展していく要因であったと考えられる。

第1図に原子カシステムの商用化に向けた開発プロセスの例を示す。次世代原子炉システムの国内技術として、本講座の第1回の黒鉛・炭素材料について柴田らによって紹介されたように、超高温ガス炉のためのシステム開発は第1図のステップ4を踏んでいる。ナトリウム冷却型高速炉については、現在、ステップ3を踏みつつ、



第1図 原子炉システムの商用炉までの開発プロセス

ステップ4のための準備を進めている段階である。その他の第4世代原子炉として、鉛合金冷却高速炉やガス冷却高速炉及び、超臨界圧水冷却炉があり、国内外の協力下でそれぞれの開発が進められている。核融合炉については、本格的な核融合システムとしてITER(国際熱核融合実験炉)が現在、建設を開始したばかりであり、ステップ2の途中段階にあると考えることができる。その他にも、熔融塩炉などの他の原子カシステムも初期の段階から開発研究が継続中のものもある。他方、最近の話では、やや注目に値する米国のビルゲイツ氏らによる小型高速炉の商用化開発を実現化に向けた動きもあり、日本国内でもこれに連携する形で企業の動きもある。

II. 原子カシステム開発と材料開発の例

天然の原子炉が地球上に存在していたとされる中部アフリカのガボンのオクロには、3つの鉱床において自律

Materials for New Generation Nuclear Energy Systems? Current State and Future Agenda for Material Developments(7); Technology of Materials Evaluation: Eiichi WAKAI.

(2013年 1月7日 受理)

■前回のタイトル

第6回 機能的な材料(増殖・増倍材料を含む)

的な核分裂反応があったとされる場所が16箇所ほど見つかっている。約20億年前、数十万年にわたって平均で約100 kW 相当の出力で核反応が起きていたことが調査と解析から判断されている。これはフランスの物理学者 Francis Perrin が1972年に発見した場所での有名な話である。人工の原子炉システム開発については、核兵器を開発するために進められたシカゴ・パイル1号 (Chicago Pile 1 : CP-1) があり、1942年12月に臨界に達した最初の原子炉である。原子力システム開発の初期の進展の様子を第2図に示す。

原子力による発電開発を目的として始められた世界初の原子力システムは軽水炉ではなく、高速増殖炉であり、1946年に米国の高速増殖炉の実験炉「クレメンタイン」が臨界を達成した。その熱出力は25 kWt であった。また、史上初の原子力発電は米国アイダホ州アトミック市近郊に建設された高速増殖実験炉 EBR-1 (Experimental Breeder Reactor No. 1) であり、1951年12月に発電実証試験が行われ、初期の発電容量は1 kW 程度であった。増殖の研究と液体金属技術の研究を目的に建設されたものであった。この炉の電気出力は150 kW_e であり、冷却材として常温で液体の NaK が使用され、燃料には高濃縮ウランが使用された。この後、世界初の商用原子力発電は英国のホルダーホール型ガス冷却炉 (50 MW) で行われ、1956年に運転が開始された。米国商用炉は英国にやや遅れを取り、 SHIPPINGPORT 原子力発電所が出力100 MWe とし加圧水型 (PWR) の原子炉として1954年9月に建設され、1957年に操業を開始した。

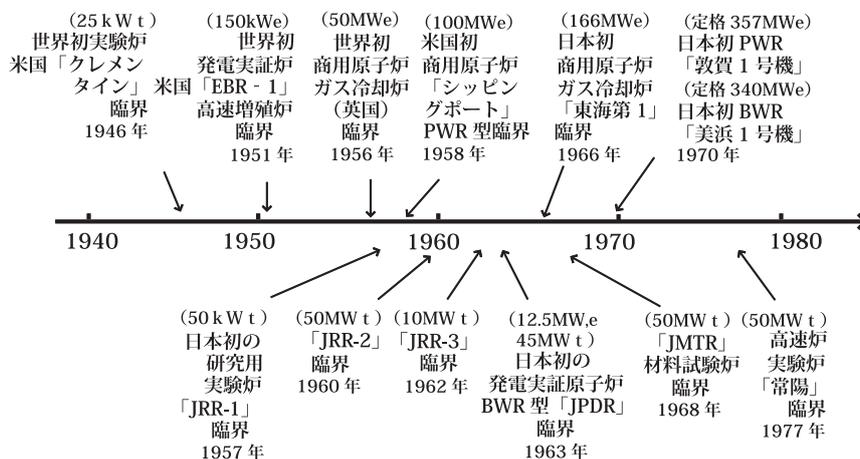
米国では、このように初期段階に原子力システムとして高速増殖炉の実験と発電実証化を押し進めたが、経済性のめどが立たず、途中で軽水炉に切り替えられた。初期の発電用原子力システム開発の開始から商用化 (ステップ2から5) までに要した歳月は約12年を必要とされたことになる。

一方、わが国では、原子力研究機関として、1956年6

月に特殊法人として日本原子力研究所 (原研) が発足され、1957年8月にわが国初の原子炉である研究1号炉 (Japan Research Reactor-1 : JRR-1) が初臨界を達成した。この原子炉の熱出力は50 kW であり、軽水減速冷却ウオーターボイラ型原子炉であった。当時、日本にはまだ、原子炉を確立するだけの技術力がなく、米国のアトミックックスインターナショナル社によって建設されたものであった。建設と試験の主な目的は、技術者の訓練、制御測定に関する基本実験とラジオアイソトープの実験の生産であった。

原研の研究用2号炉である JRR-2は、ウラン-アルミニウム合金板状燃料を持つ重水減速冷却の研究用原子炉で、最高熱出力が10 MW であり、米国 AMF 社とわが国の民間会社によって設計と建設がなされ、1960年10月に初臨界となった。定格出力は2年後の10月によりやく到達した。研究目的は各種の材料試験と RI (放射性同位元素) の生産であった。

次に建設された国産1号炉ともいえる JRR-3は、1956年から設計を開始し、1958年12月に最終設計仕様書を完成させ、1962年9月に初臨界を達成している。熱出力が10 MW で天然ウラン金属燃料重水減速冷却型研究炉である。徐々に出力上昇を行い、1965年5月から最大出力の連続的な運転を開始することになった。この目的は、原子炉の試験的建設と原子炉構造に関する各種試験であった。日本初の軽水炉として BWR (沸騰水) 型の動力試験炉 (Japan Power Demonstration Reactor : JPDR) が日本初の原子力発電実証が1963年8月に原研で行われた¹⁾。JPDR の熱出力は45 MW であり、電気出力は12.5 MW であった。このようにして軽水炉の開発では、約7年間の短い期間にステップ4までの開発が進んだ後に、東海第一発電所の商用運転が1966年に開始された。外国から軽水炉に関する技術の輸入要素が多くあったこともあり、ステップ2から5までの開発がわずか約10年間という速さで到達したことになる。このような軽水炉の原子力システム開発を支えた主要な材料は、圧力容器



第2図 原子力システム開発初期の進展の様子

材料、炉内構造材料及び燃料被覆管材料である。

国内の原子力用材料の開発として、開発が不可欠となった压力容器材料に発生した損傷や改良などについて、ここでは主に触れておきたい。1966年のJPDRの定期検査の際、压力容器上蓋のステンレス鋼肉盛り部分にヘアークラックが確認され補修されたことである。翌年の定期点検でも同様なクラックの発生が確認されたという問題があり、国内初の材料評価技術の課題として、構造・材料の安全性研究の対象となった機器である^{2,3)}。JPDRの主要技術は、米国GE(General Electric)社から導入したものであるが、この原子炉压力容器の鋼材はわが国で1961年に製造されたものであり、米国のASTM A 302 Bの規格をベースとして、0.40~0.71% Niが添加した改良Mn-Mo鋼(通称A 302 B mod.)である。

また、わが国の商業用原子力発電炉1号機(黒鉛減速炭酸ガス冷却型原子炉(コルダーホール型))である東海発電所1号機(166 MW)は1966年7月から営業運転が開始された。その炉の压力容器用鋼材は1961年に製造されたが、ボイラ用の鋼材であるJIS SB 450相当の英国規格COLTUF 28相当材であった。1970年3月に国内初のBWRは、日本原子力発電(株)の敦賀1号機であり、鋼種はJPDRと同様に、鋼板はA302B mod.であり、鍛造品はA336 mod.であるが、韌性確保のための熱処理として、それぞれASME Code Case 1332および1339で規定された水焼入れ焼戻処理が適用された。同年11月に国内初のPWRが、関西電力(株)美浜発電所1号機で営業運転が開始した。その後東京電力(株)福島1号機では、鋼材はA533 B C 1.1、鍛造品はA508 C 1.2の新しい規格の適用や、1974年以降に、さらにASME A533 B鋼のCuとP濃度の規制強化等が実施された。このように軽水炉压力容器鋼に関しては、使用環境の条件に適するように多くの改良や開発をしていく必要があった例であるが、いくつかの機器について材料の種類と使用条件の概略を第1表にまとめた。

このようにして規制強化を構築できた背景には、1968年に臨界に到達した原研のJMTR(材料試験炉)及びJRR-2を利用した、压力容器鋼等の材料照射研究が本格的に進められた成果によるものであったとも言える。1971年から1973年にIAEA共通試料を用いて厚板鋼材の照射脆化研究により、中性子照射量と脆化の関係等を明らかにさせた経緯があり、硫黄などの元素に関係して材料特性が照射によって劣化の度合いが異なってくるという結果であり、日本で開発された原子炉压力容器材料は他の国の材料に比べて耐照射特性が良いことが分かった。その原因の一つは添加元素である硫黄などの濃度だけでなく、鋼材に施されている熱処理などによる硫黄などの元素の分布状態の差異による影響もあることが分かっている。また、本学会誌の日本の軽水炉压力容器鋼中の不純物(リンおよび硫黄)の製造年推移によると、2元素の値を1985年以降、それぞれ0.004 wt%未満に抑制している⁴⁾。このようにさまざまな改良がなされ、原子力システムとしての材料の機能性向上が進められてきた。このような材料の改良や開発は原子力システムに限らず、様々な分野で広く行われていることである。

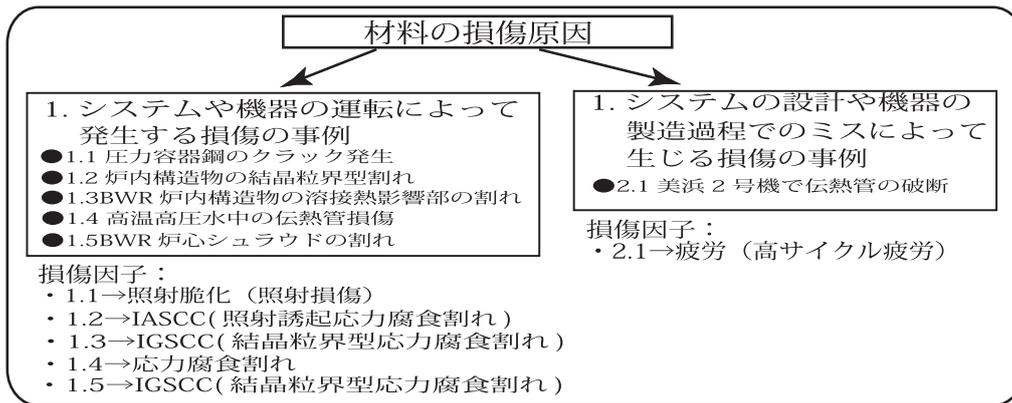
Ⅲ. 原子力システムの材料劣化や損傷

これまでの原子炉の運転経緯から軽水炉機器の材料劣化や損傷は中性子照射や高温水などの使用環境と密接に関係があることが分かっている。第3図に示すように、材料の損傷原因は、原子炉機器の施工前の設計・製作ミスとそうでないもの、耐久性の向上のための機器材料の変更と交換が必要になったもの等があるが、その主要因は、照射損傷、腐食及び疲労に大別される。

照射損傷としては、压力容器の照射脆化や炉内構造物の結晶粒界型割れを起こす照射誘起応力腐食割れ(IASCC: Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking)がよく知られている。後者は照射と応力と腐

第1表 軽水炉原子力システムを支えている主な材料と使用環境

機器	材料	使用条件
原子炉压力容器	厚い低合金鋼(A302B mod, JIS SB 450相当, A336. mod, A533B, A508B)	・高圧力(150気圧以上) ・中性子照射 ・温度サイクル ・高温水 ・温度勾配
原子炉压力容器の貫通部(制御棒の出し入れ用、各種計装信号用)	インコネル合金(600)、ステンレス鋼(SUS304, SUS316)	・高温水 ・中性子照射
炉内構造物	BWR(沸騰水型原子炉)とPWR(加圧水型原子炉)はともにステンレス鋼	・高温水 ・中性子照射
PWRの蒸気発生器伝熱管	インコネル合金(600, 690, X-750)	・高温水、伝熱効率
燃料被覆管	ジルコニウム合金(BWR:ジルカロイ2、PWR:ジルカロイ4)	・高圧力および高温 ・冷却材との化学反応を起こさない ・中性子照射



第3図 軽水炉における材料損傷の原因とその評価

食の複合効果として出現する。

腐食に関しては、BWRでの炉内構造物の溶接熱影響部が結晶粒界型応力腐食割れ(IGSCC: Intergranular Stress Corrosion Cracking)で損傷することが知られており、その原因も解明され対策も確立している。また、PWRでは1次冷却水により、インコネル600合金の1次冷却水中の結晶粒界型応力腐食割れ(PWSCC: Primary Water Stress Corrosion Cracking)が発生した事例がある。蒸気発生器は1970年代初頭のPWR運転開始直後から伝熱管に損傷が発生し補修などが行われてきた⁵⁾。インコネル600合金製の伝熱管は2次冷却水でも粒界割れ(IGSCC/IGA)を生じたため、現在ではインコネル690合金を採用し、損傷割合は減少している⁵⁾。さらに耐応力腐食割れ特性に優れたインコネルX-750の採用と負荷荷重を小さくする設計変更により1983年以降、炉内構造物の応力腐食割れが防止されている。この他にBWR炉心シュラウドの割れが1990年代に発生しており、原因はステンレス鋼の溶接熱影響部で割れが生じるIGSCCであった。

疲労破断⁵⁾については、美浜2号機で1991年2月に蒸気発生器の伝熱管3,260本あるうちの1本が破損し、原子炉が緊急自動停止した事例がある。IAEAの事故評価尺度でレベル2に相当するものであった。この事故は疲労破断(高サイクル疲労)によるものであり、破断は伝熱細管(外径22.2mmで肉厚が1.27mm)の周方向に生じていて破面には高サイクル疲労に特有なストエーションが観察された。この破断の原因は振動防止金具(棒)が設計通りに挿入されておらず、破断した伝熱管の領域まで届いていなかったために、流体力学的な弾性振動が発生し、管は長年の振動による金属疲労(高サイクル疲労)が進んで破断したためであった。この事故では、1次冷却水の約5トン分が2次側に漏れた。これにより微量の放射性物質が外部に漏れ、海水でトリチウムが470 Bq/L程度計測された。この事故における材料損傷は基本的に、蒸気発生器製造の際に振動防止用振れ止め金具が所定の位置まで挿入されていなかった施工ミスが原因であ

り、また、検査等のミスも重なったものであると考えられるので、再発防止は可能な損傷である。さらに美浜2号機では高圧給水加熱器の伝熱管に2か所の穴が開いた。

高温高压水中での応力腐食割れは、PWRよりBWRの方が多く発生し、初期のBWRの压力容器及び配管で1970年代前半に頻発したが、原因究明と適切な対策(構造材の改良と環境条件の改善)によって、その後の軽水炉冷却系の主要部ではほとんど起きていないようである。しかし、最近になって压力容器内のシュラウド溶接部、細管、ボルト等に発生した事例があり、今後も注意していく必要がある。また、照射の影響が加わることによって生じると考えられる照射誘起応力腐食割れの発生の可能性が指摘され、研究対象となっている。他方で、軽水炉の原子炉冷却水を模擬した環境中で、構造材料の疲労寿命が減少することが知られていて、日本機械学会編発電用原子力設備規格の環境疲労評価手法に取り入れられている。軽水炉と運転条件や方法が異なる、高温ガス炉、高速増殖炉及び核融合炉では、別な事象を考慮して材料損傷等の対策を取っていく必要がある。

また、原子力発電と火力発電での事故などのトラブル発生頻度は、システムや運転方法、使用年数などがいろいろと異なるため、一概には簡単に述べることは難しいが、1990年から1999年までの10年間で生じた電気事業者電気事項件数を経済産業省原子力安全・保安院電力完全課が1999年度の電気保安統計としてまとめており、火力発電所の349件に対して、原子力発電所では223件であった。なお、火力発電ではボイラ関係の損傷事例が多く、部位別で熱交換器管が全体の約80%を占めていてその最大の要因は事業用ボイラで低サイクル疲労であり、家用ボイラでは建設時の溶接不良が主な要因となっている。

このような一般的な課題と対策も含め、新しい原子力システムを開発や評価する材料の研究者や技術者側からも、材料が置かれている環境や使用環境及び、材料と環境との相互作用を十分に把握しておくことは研究開発を行う上で大切である。次世代原子力システムの構築に際

して、こうした材料の損傷事例を十分に把握し、共通する部分とそうでない部分もあり、より一般化した考察や評価を行い、材料選択や改良と開発など、また、使用方法や設計方法のさらなる検討を進めていくことが不可欠である。

Ⅳ. 高速増殖炉開発における実験炉から原型炉、および核融合炉開発の実験炉および原型炉に向けたブローダーアプローチ活動

高速増殖炉の研究開発は、原研が軽水炉の研究開発を進めつつ、高速実験炉の第2次概念設計を完成した後、1967年10月に動力炉・核燃料開発事業団(動燃)が発足して本格化した。その10年後の1977年4月にウラン-プルトニウム混合酸化物燃料(MOX燃料)を用いた液体金属ナトリウム冷却、ループ型の高速増殖炉実験炉である「常陽」が茨城県大洗町にある日本原子力研究開発機構(JAEA)の大洗研究開発センター(旧動燃)で50 MWで臨界に達した。常陽は「増殖炉心」(MK-I炉心)で熱出力50 MW及び75 MWの運転を行い、高速増殖炉に関する技術的知識、経験の蓄積が図られた。その後、炉心を「照射用炉心」(MK-II炉心；熱出力100 MW)に改造し、1982年11月にMK-II炉心としての初臨界を達成した後、高速炉用の燃料・材料開発等のための各種の照射試験を行った。その後、MK-II炉心に比べて、高速中性子束を約1.3倍、照射スペースを2倍に増加させた「高性能照射用炉心」(MK-III炉心；熱出力140 MW)に改造し、2003年7月に初臨界を達成し、2004年5月からMK-III炉心での本格運転を開始した。MK-III炉心では、FBRシステムの確立を目指した照射試験のみならず、国内外の幅広い研究分野に対しても、高性能化された高速中性子照射施設の利用の機会を提供した。

原子炉の安全性を確保するため、炉内構造物、安全容器、1次冷却系と2次冷却系の機器、配管材料の中性子照射及びナトリウム浸漬に対する健全性を確認するサーベランス試験を計画的に実施している。実際の位置より加速照射環境で照射されたサーベランス試験片の測定結果から、寿命末期に相当する中性子を照射した材料の強度が、設計の許容値を十分満足していることを確認している。主要構造材料には高温におけるクリープ破断及びクリープ疲労特性を向上させた高速炉構造用316ステンレス鋼(316FR)を先駆的に採用している(第2表参照)。「常陽」の設計、建設、運転で得られた多くの技術的知見や経験、設計データの蓄積、設計手法や安全評価

法の進展とともに、「もんじゅ」の設計は詳細化された。「もんじゅ」の開発を進めるにあたって、安全設計方針、高温構造設計方針、耐震設計方針などの安全技術指針類が整備された。この中で、高温構造設計方針は軽水炉の設計方針にはないものであり、高速炉の分野で構築した重要なものであり、Ⅵ章においてその内容を説明する。

常陽の初臨界から17年後の1994年4月には、福井県敦賀市にあるJAEAの研究開発センター(旧動燃)にある高速増殖原型炉「もんじゅ」が臨界に達し、翌年8月に初送電が行われた。このようにステップ3を踏み、その原型炉で試験を進めるステップ4を踏んでいる最中に同年12月に2次系ナトリウム漏れ事故が発生した。ナトリウム漏えいの原因は、設計ミスによりナトリウムの流れによる温度計さや管の大きな振動が起こり、金属疲労でさや管が折損したためであると報告されている。この後に、高速増殖炉のための実証炉や実用炉開発のための研究開発が進められている。

軽水炉以外の原子力システムとして商用化が進んでいないこともあり、高速炉開発や核融合炉開発は国際協力による開発要素はあるものの、多くが自力的に技術開発などを進めないといけない。後で詳細を記載するが、日本における高速炉開発では実験炉から原型炉までの開発に約17年の歳月を要し、現在までに「もんじゅ」のナトリウム漏れ事故の影響もあって約36年が経過した。

核融合炉の実験炉開発においては、国際熱核融合炉(ITER: International Thermal Fusion Nuclear Reactor)計画が1985年のジュネーブでの米ソ首脳会議をきっかけに始まり、日本、欧州連合(EU)、米国、ロシア、韓国、中国、インドの7極の共同で2005年6月にITERの建設地がフランスのカダラッシュに決定し、2007年10月にITER協定ができ、ITER国際核融合エネルギー機構が発足した。現在、基礎工事などが開始されており、マグネットや構造材料等を順番に組み立てていき、2020年頃にファーストプラズマ試験が達成できる見込みである。

ITER計画の目的は「平和目的のための核融合エネルギーの科学的小および技術的可能性を実証すること」となっており、500 MWの核融合出力を持続することになっている。ITERでの試験は、まずHやDの単独プラズマ運転から始まり、低密度のD-T運転、高密度のD-T運転へと移り、500 MWの核融合出力で実験を行う計画である。この出力はプラズマを所定の温度に維持するために必要な熱入力10倍もあり、高出力タイプの初めての核融合実験炉となる。また、炉の一部ではテストブランケットモジュール(TBM)と呼ばれる部分で、将来の原型炉用の照射モジュールの試験も併用して実施

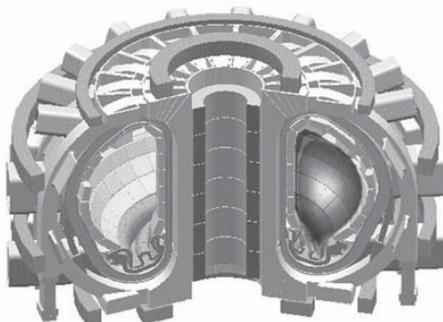
第2表 316FR鋼の化学組成(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	N
<0.02	<1.00	<2.00	0.020-0.045	<0.030	10.00-14.00	16.00-18.00	2.00-3.00	<0.05	0.06-0.12

する計画になっている。本体のITERでは水冷却型ブランケットシステムであるが、原型炉では、さまざまな冷却システムのブランケットシステムが考えられている。またITERでは、将来の核融合発電プラントで必要となる加熱技術や制御技術、計測技術、遠隔保守技術など、いくつかの重要な技術の試験が行われる予定である。

核融合反応により発生するエネルギーは、容器の内面に設置されたブランケットにおいて、冷却水をあたため、炉の外に取り出される。ITERのブランケットでは、中性子の遮断と熱の取り出しの2つの機能を持つ。プラズマを取り囲んだブランケットは、厚さ約50 cmの壁になっていて、ブロックを組み合わせた構造になっている。ブロックの重量は1個あたり約4トンあり、約400個のブロックでブランケットを構成している(第4図)。この材料にはSUS 316 LN-IG(低Co)材が用いられ、TF(トロイダル磁場)コイルのケーシングの材料として、JJ 1鍛鋼品(12Cr-12Ni-10Mn-5Mo-0.24N鋼, クラス1: 4K耐力 $\geq 1,000$ MPa), 強化型316 LN鍛鋼品(0.17 \leq N \leq 0.22, クラス2: 4K耐力 ≥ 900 MPa), SUS 316 LN熱間圧延板(クラス3: 4K耐力 ≥ 750 MPa)が使用されることになっているが、これはTF(トロイダル磁場)コイルの応力分布に対応して材料の種類を変えている^{6,7)}。このブランケットで核融合出力を熱に変えて外に取り出すと共に、燃料の一部であるトリチウムの生産も行う。

将来の核融合炉のブランケットでは、核融合反応により発生した中性子を吸収し、内部のリチウムを反応させて新しい三重水素(トリチウム)を生成させる。このトリチウムと海水から取り出した重水素が核融合炉の燃料になる。ITERでは、原型炉用の核融合炉のブランケットを想定したテストブランケットモジュールを真空容器の窓部に挿入してトリチウムの生産と冷却水などによる熱の取出しの試験を行い、適切な溶接技術やトリチウム拡散を制御する被膜等の材料研究も重要な課題と考えられている。



第4図 プラズマを取り囲んで厚さ約50 cmのブランケット壁(黄色の部分)
ITERでは1個あたり約4トンのブロックを約400個で構成。
(<http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/iter/index7.html>)

ダイバータは、プラズマから余分なエネルギーの除去、核融合反応の燃えかすであるヘリウムガス及びプラズマ中の不純物を減少させる役割を担っている。ただし、ダイバータは高熱粒子束の負荷を受けるため、いかにしてその耐久性を保つか、現時点での最大の材料課題である。また、超伝導コイルは、真空容器の外側にある。超伝導に必要とされる超極低温を維持するためにクライオスタットの中に置かれ、クライオスタットの中は真空に保たれている。その外側には、プラズマを加熱するための加熱装置、プラズマの温度や密度を測定するための測定器などが配置される。D形のコイルの中には超伝導線が何回も巻いてあって、それに電流を流すと磁場ができる。このトロイダル磁場コイルは、高さが5階建てビルほどあり、1個あたり約300トンになる。そういうコイルを18個円く並べて、ドーナツ形の空間に強い磁場を作ってプラズマを閉じ込め、トロイダル磁場コイルの中心部には超伝導の中心ソレノイドコイルがあり、これに電流を流すと変圧器の原理でプラズマに大きな電流が流れるシステムになっている。

また、プラズマが1回巻きの2次コイルになっている。外側には合計6本の円形コイルが水平に配置され、プラズマの形や位置を制御する。大きなコイルは直径が約26 mである。なお、ITERでの建築費で大半を占めるのがこの超伝導コイルの製作費なため、このコストをいかに低減できるかが、将来の核融合炉の進展を左右させる要因になる可能性がある。

ところで、ITERは消費するエネルギーよりも多くのエネルギーを発生し、これを表すのにQ値が用いられる。Q値とは核融合反応で発生する熱出力を外部からの加熱入力で割ったものである。Q値が1より小さいということは、核融合で発生するエネルギーよりも多くのエネルギーがプラズマを加熱するために必要ということを意味する。現在、世界最大のトカマクであるJETでは、ブレークイーブン(Q=1)に近いQ=0.65を達成した。

ITERでは、Q=10または定常状態を目指した長時間運転ではQ=5以上の達成を目指している。また、ITERでは超伝導磁石や高熱負荷機器、遠隔操作といった将来の核融合発電プラントで必要となる重要な技術やプロセスの試験が実施される。さらに、ITERでは熱効率のよい高温ブランケットをプラズマのまわりに配置し、ブランケット内のリチウムを含む物質から燃料であるトリチウムを生産する方法の開発と試験を行う予定である。

幅広いアプローチ(BA)活動の骨子を以下に示す。

- ・国際核融合エネルギー研究センター： 遠隔実験センター、計算機センター及び原型炉設計・研究開発調整センターのそれぞれが、核融合エネルギーの早期実現や我が国の実力や存在感の向上といった視点から意義があり、これらの施設を一つのセンターと

することにより大きな相乗効果が見込まれる。

- ・サテライトトカマク装置： ITERにおける試験研究を効果的・効率的に行うとともに、原型炉に向けた補完的研究を国際的に行うことにより、核融合エネルギーの早期実現を図るという視点から意義がある。
- ・国際核融合材料照射施設： 実際の核融合炉条件下での材料の照射データが不可欠であることから、この施設の意義・重要性は小さくない。

2007年2月5日に麻生太郎外務大臣(当時)とヒュー・リチャードソン駐日欧州委員会代表大使が、核融合エネルギーの研究分野におけるBA活動の共同実施のため、日本国政府と欧州原子力共同体との間の協力に署名により共同発表された。日本と欧州原子力共同体は、21世紀に向けてクリーンで持続可能なエネルギー源としての核融合エネルギーの実現を促進するために、この協定の下で3つのプロジェクトに共同で取り組み、10年間に及ぶ実施期間を有することになった。また、BAは将来の動力用原型炉(DEMO)のための研究開発を実施し及び先進的な技術を開発することにより平和的目的としての核融合エネルギーの早期の実現を目指したものであり、この国際協力は、ITERプロジェクトに密接に関連し、ITERの建設期に合わせて実施されることになった事業である。

なお、各原子力システムでそれぞれの開発課題があり、ロードマップが作成されているが、核融合炉原型炉開発に対して、高速炉の研究開発と同規模かつ国内で進められる場合、実験炉ITERのファーストプラズマの時期を出発点とすると、大まかな換算評価であるが、2037年頃ようやく、核融合原型炉のファーストプラズマ等を達成できるのかもしれない。いずれにしても開発のステップ2から3までの開発要素をより明確化し、実施すべき技術開発や開発スケジュール等を詳細化していく必要がある。

V. 材料評価技術

本講座で対象としてきた「これからの原子力システムを担う新原子力材料」では、超高温ガス炉、核融合炉、高速増殖炉、次世代軽水炉等の原子力システムで開発中のもの、または開発が必要とされる新材料に関する内容である。これらのシステムで要求される材料の性能値は、現存する材料だけでは要求仕様を満足することができないため、それぞれの用途や目的に沿った材料の改良や開発等を重ね、その原子力システムに適合するように材料の研究開発を進めている状況である。この研究開発のプロセスにおいて、キーとなる評価項目や考慮すべき項目を下記に挙げる。現象のマイナス点を十分に注意する必要があるが、プラスに働く可能性も十分に考慮し

て開発を進めることが重要である。

- (1) 照射関係： 照射粒子の種類とそれらのエネルギースペクトル、材料の耐照射性能、材料の諸特性変化に関する照射量依存性(予測法含む)、照射による材料中の欠陥回復挙動や回復方法、材料の寿命評価、材料の放射化レベル評価、材料特性に対する照射の有効利用等
- (2) 微小試験片： 各照射環境で材料の強度特性などを評価する際にスペース制限により微小な試験片の利用、試験片サイズ効果(試験片サイズに依存する特性変化の評価)、微小試験片の作製方法、微小試験片の試験技術、微小試験片用の試験装置
- (3) 使用する物理的環境因子： 温度、圧力、応力、熱負荷など
- (4) 冷却： 方法と冷却材、冷却材(ガス、液体金属、水など)と材料間の反応
- (5) 減肉的な効果： 環境(液相や気相)の流動による「物理的な効果」、環境の「化学的(腐食の)効果」、及びこれらが複合して装置材料の減肉を加速する現象(エロージョン-コロージョン)、これらの有効利用等
- (6) 製造、製作の技術、及び関連する検査技術並びに、非破壊検査技術
- (7) 材料強度基準等の規格化の整備
- (8) 炉システムにおける各機器類の検査方法： 監視試験片の利用、非破壊検査など
- (9) 安全性、経済性、高効率な発電
- (10) 放射性廃棄物量や環境負荷低減
- (11) 発電によって発生する熱源の有効利用

上記項目のいくつかについては、共通した材料評価技術が必要になってくる。原子力システムでは、放射線等の環境下で材料を使用していくために照射損傷評価はその評価プロセスの中で不可欠な課題項目となっている。また、この評価を進める場合、照射施設が必要になり、照射環境をできるだけ類似させた状態にして材料の評価を行うことが重要である。どのような環境で使用する機器であるか。それに適する材料はどのようなものであればよいか。その機器のその材料に要求される性能値はどのような値であるか。コストはいくらぐらいかかるのか。どのくらいの年月でそれを達成させることができるのか。いろいろな検討を積み重ね、夢と現実をどのように埋めていく最適なアプローチを見出し、課題を解決して前進していくことが、現在、これらの研究開発を進めている我々の重要な責務ではないかと考えられることである。

材料は、一般的に必ずしも均質でなく、ある程度の偏りを持っている。材料の破壊は材料中の最弱部で生じるという最弱リンクモデルがあるが、照射によってこの弱

い部分に変化することが考えられる。また、照射前にはなかった別な相の形成(照射誘起析出)や原子の偏析(照射誘起偏析)等により、照射前に比べてさらに最弱部が形成される場合がある。このようなことがあるため、材料の特性評価には、化学分析や組織解析、強度特性などを詳しく調べる必要がある。

VI. 高速増殖炉と核融合炉などでの構造材料の材料評価技術

高速炉原型炉「もんじゅ」の設計・建設のための設備規格⁸⁾では、軽水炉の設備規格をベースにその規格を構築しているが、使用温度が軽水炉に比べて高温であることと冷却材として液体金属ナトリウムを使用するため、高温における材料強度基準等を規格に整備する必要があった。適応した材料は、構造部材として SUS 304 と SUS 316 を、伝熱管として SUS 321 を選定し、設計上限温度 650℃までを、また、NT 板材と NT 伝熱管として、2 ¼Cr-1Mo 鋼を設計上限温度 550℃をカバーするように規格が整備された。この際、ナトリウム環境効果と中性子照射効果の 2 つの効果が考慮された。前者では、液体ナトリウム接液面のくされ代及び強度補正係数を取り扱っている。後者では、累積の速中性子のフルエンス (1×10^{25} n/m² ($E > 1.602 \times 10^{-14}$ (J))) と熱中性子のフルエンスの限界量を規定しており、引張試験における 10% 破断伸びを確保できるようにしている。また、クリープ強度に関して熱中性子照射効果の評価を取り入れている。今後、炉のコンパクト化に伴って、限界中性子量などを正確に評価していくことが重要になると考えられる。

ところで、わが国では高速増殖炉や核融合炉用の構造材料では、火力発電の分野で開発されてきたフェライト系耐熱鋼を基にして開発が進められている。近年、火力発電の発電効率を向上させるため、超超臨界圧(上記条件が 600℃で 30.1 MPa (300 気圧) 以上)のボイラの開発が世界的に目標になっている。火力発電では発電出力を日内変動や週内変動等の出力調整運転が必要で、熱疲労損傷を受けるため、熱膨張率の小さいフェライト系鋼が望ましく、このような実現のためにはオーステナイト系鋼に匹敵する高温強度を有するフェライト系鋼開発が必要となっている。1950 年代に 9~12 Cr 鋼系の新材料が開発され、600℃で 10 万時間クリープ強度が 30~40 MPa になった。1960 年代には 60~80 MPa になったが、9 Cr 系に 2% の Mo を添加して高温強度を確保した EM 12 (9 Cr-2Mo-VNb 系フェライト鋼)が開発された。1980 年代に開発された 9 Cr 系フェライト鋼の T 91/P 91 鋼は、Mo, V, Nb の添加量を最適化してよりすぐれた高温強度(蒸気条件: 844 K で 32.8 MPa (325 気圧), 866 K で 24.8 MPa (246 気圧))を確保した材料である。

また、NSCR 9 と呼ばれる 9 Cr-2MoVNb 系合金は、

EM 12 組成を改良した、0.03 wt% の窒素と 0.03 wt% のホウ素及び 0.1 wt% の Ni を添加した材料で、600℃で SUS 304 鋼とほとんど同じ強度を持っており、9 Cr-1Mo 鋼に比べて溶接性と加工性を向上させるために低炭素濃度 (0.08 wt%) としている。また、微細な炭化物や炭窒化物によって、より高いクリープ破断強度をもっている。12 Cr 系鋼では、炭素量を 0.1% に低減し、溶接性の難点を改善した HCM 12 鋼があり、焼戻しマルテンサイトと多くの δ フェライト鋼を含む 2 相鋼である。

高速炉構造材料開発における新材料については 316 FR 鋼と改良 9 Cr-1Mo 鋼 (ASME Grade 91) が実証炉用に評価が進んでいる。前者は旧動燃、新日鉄、三菱重工により開発された材料であり、SUS 316 鋼の仕様範囲内で高温強度を向上させた材料である。原子炉容器鋼として適用評価を進めている。規格・基準化については、材料強度基準案および高温構造材料設計指針案が作成済みで、日本機械学会発電用設備規格 材料規格、設計・建設規格に反映 (60 年設計、炉容器、炉内構造物管対象) し、現在、炉容器リング鍛鋼品の製作技術の開発を行っている。

機器のコンパクト化と配管短縮のため、「もんじゅ」では SUS 304 を使用し、1 次系ループは 9 エルボあり、1 ループあたりの長さが約 100 m であり、出口温度が 529℃であった。これに対して実用施設の 1 次系では、米国オークリッジ国立研究所により開発された改良 9 Cr-1 Mo 鋼を使用し、1 次系ループを 1 エルボとして、1 ループあたり 25 m に配管を短縮し、出口温度を 550℃としている。現在の高速炉構造材料開発の課題を以下に簡潔に示す。

●製品の製作性について

- ・大型鍛鋼品として、炉容器(リング形状)として 316 FR や SG 材を使用して、製作性を実証する。管材(極厚)については改良 9 Cr-1Mo 鋼を用いた製作性実証
- ・薄肉小口径伝熱管として改良 9 Cr-1Mo 鋼の製作性実証

●60年設計に向けた技術整備について

- ・合理的な設計のための評価として、次の課題を明らかにして設計を構築していく必要がある。
 - ① 出来る限り長時間のデータの取得
 - ② 金属組織学的な根拠に基づく外挿評価、変形・破壊メカニズム、析出挙動
 - ③ 運転開始後の裕度確認(超長時間データによる評価やサーベランス試験片の利用、非破壊検査、これらの有効な複数の方法による確認)

核融合分野においては、火力のボイラ管開発分野で、1980 年代に開発されたフェライト鋼をベースに、核融合炉に適した低放射化性を取り入れた改良的な開発が、日欧米で独自の特徴を出して低放射化フェライト鋼の開発

が進められてきた。核融合分野では12Cr系より9Cr系の照射による延性脆性遷移温度の変化が小さいことから9Cr系が選択された経緯がある。ただし、照射特性は延性脆性以外にも、注意すべき重要な特性があるため、慎重に照射効果を取り入れた設計評価を進めていく段階にあると考えられる。低放射化性の点では、Mo, Nb, Ag, Alなどの含有量が厳しく制限され(ppmレベル)、Ni, Cuは主要元素には使えない。低放射化フェライト鋼は、Fe-Cr-Mo鋼のMoをWに置換、NbをTaなどに置換した材料であり、詳細は本講座第2回の谷川らによって記載されている。核融合炉では、14 MeVの核融合中性子により、構造材料の部位で100~150 dpaの照射量を受け、核変換により10 appm/dpaの割合でHeが生成され、40 appm/dpaの割合で水素が材料中に生成される。このため、弾き出し損傷だけでなく、HeやHの生成の影響を中性子のスペクトルを考慮して、材料評価を進めていかないといけない。また、パルスビームと連続ビームでは、欠陥の形成と拡散プロセスの関係から同一のdpaでも照射による欠陥組織発達過程が異なってくる事が予想されており、このため、これらを実験できる照射環境を提供する照射施設が必要とされている。JAEAのTIARA、京大DueTや東大HIT等でのHe/dpa等のパラメータを制御できる有用なイオン照射施設等の照射試験も重要である。また、原子炉による材料照射試験は様々な強度評価ができることから重要な役割を果たすと考えられる。さらに照射環境が最適な照射施設としては、国際核融合炉材料照射施設(IFMIF)が原型炉開発に必要な不可欠な施設であると考えられている。現在、BA活動で日欧協力下、IFMIF工学実証・工学設計活動が2007年より進められている⁹⁾。IFMIFの概要図を第5図に示す。

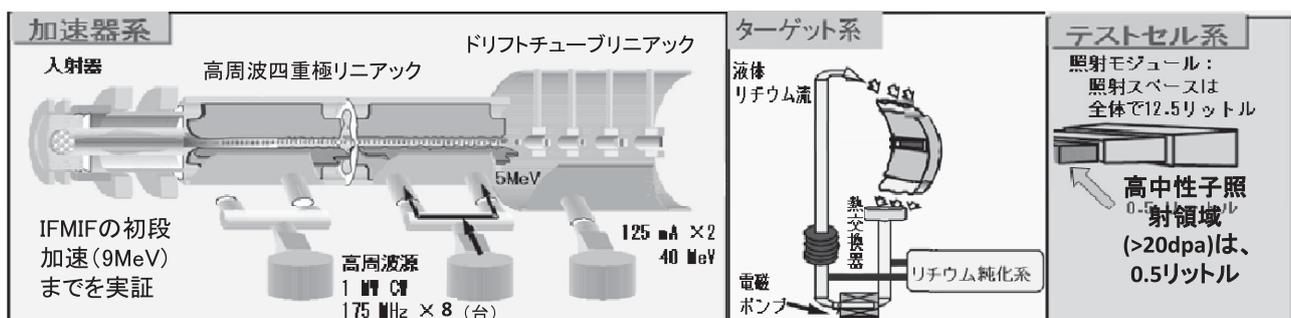
軽水炉の压力容器鋼の補修や改良、開発において実際に行われた経験から推測できることは、核融合炉のような次世代原子力システムにおいても、材料の改良や改善を実際の経験に基づいて進めていかなければならないと思われる。原型炉を何基も作って経験を積んでいくこと

はコスト的にも必ずしも良い方法とは言えないことから、核融合炉環境または、類似した環境を構築して材料開発を進めていくことが大変重要な役割を果たすと考えるべきである。これを効率よく進められる最良の照射施設は、前述のIFMIFである。また、IFMIFやその他の原子力関係の材料評価では、微小試験片を使用した評価が重要であると考えられる。しかしながら、標準試験片よりも非常に小さな微小試験片を用いる場合の試験法の規格化等の整備が十分でなく、より信頼性の高いデータを取得するためにも、早急な微小試験片試験技術の確立が必要である。

Ⅶ. 微小試験片試験技術の現状と今後

以前行われた微小試験片材料評価技術の進歩については、日本原子力学会から刊行された1992年3月に「微小試験片材料評価技術」研究専門委員会にてまとめられている。この中では、その当時、照射材料で行われていた各種材料特性評価のための試験技術評価がまとめられているが、標準化や規格化までの作業等はそこでは行われていない。ASTM インターナショナル、ISO、ASME、JIS及び日本機械学会(JSME)で定められている、引張試験、破壊靱性試験、シャルピー衝撃試験、疲労試験、クリープ試験及び、き裂成長速度試験に対するいくつかの試験方法のガイドラインがあり、現状の試験法や問題点、また微小試験片に関する現状などについては最近、議論がなされている。最近の研究では低放射化フェライト鋼に対するマスターカーブ法の適用は、補正や修正等が必要であることが示されている¹⁰⁾。今後に向けて新たな試験方法の基準や評価方法の確立が必要である。

日本機械学会基準のJSME S 002(統計的疲労試験方法)がある。S-N曲線が水平になる限界の応力を疲労限度というが、このばらつきを規定しており、その中央値を取るとしている。サイズ効果、切欠効果や表面状況などについては、日本機械学会の金属材料疲労強度の設計資料Iに詳細が記載されている。



第5図 国際核融合材料照射施設(IFMIF)

IFMIFは重水素ビーム2本を液体リチウムターゲットに注入させて、核融合中性子と同等な高強度の中性子を発生させて材料や原型炉システムの一部を照射させるための装置として開発中。

微小試験片試験技術の標準化については、試験片作製方法、変位や適応する応力やその他を含めた制御技術を考慮した試験機の仕様、試験方法をそれぞれ十分な確認試験や整備を進め、それぞれの材料を用いた試験法の標準化と規格化などを構築していく必要があると考えられる。また、併せて微小試験片用の試験装置に関する制御や計測法等についても、未確立な技術が多く、今後の課題として進めていかなければならない。

VIII. その他

最後になるが、大変興味深い研究を紹介したい。この一つが、HeによりF82H鋼のクリープの破断寿命が長くなるという山本らの結果¹¹⁾である。もう一つは、照射により疲労寿命が長くなるというMaterna-Morrisらによる結果¹²⁾がある。これらは材料に照射をすると硬化して脆くなりやすいという従来の考え方が照射材料評価の分野に広がっているように思うが、照射による硬化挙動は材料の降伏応力等の強度を照射前に比べて上げることや、非照射環境では存在しない相状態を形成することのように、大きなメリットとして考えていくべく照射効果と捉えることもできる。我々は照射による材料劣化挙動だけでなく、照射によって使用前より優れた特性を出現させる照射効果を最大限に生かして材料の適応範囲を拡張できるように、今後、材料開発を進めていくことが大変重要になっていくと考えられる。

—参考資料—

- 1) 日本原子力研究所史, 日本原子力研究所編, (2005).
- 2) T. Kondo, H. Nakajima, R. Nagasaki, *Nucl. Eng. Des.*, 16 (1071)205.

- 3) 原子力エネルギーの高効率安全利用と材料・システムインテグレーション, 日本金属学会分科会シンポジウム予稿, 日本金属学会, (2001-6).
- 4) 佐藤育男, 「原子力機器材料への技術的挑戦と国際展開」, 日本原子力学会誌, Vol. 52, 806-810(2010).
- 5) 恩地健雄, 軽水炉機器の経年劣化事象と損傷事例, 材料における「安全学」の構築, 日本金属学会分科会シンポジウム予稿, 日本金属学会, 17-20(1992-2).
- 6) 島本進, 高橋良和, 奥野清, *TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.)*, Vol. 41 No.12, 542-552(2006).
- 7) V. Barabash, The ITER International Team, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, Vol. 367-370, 21-32(2007).
- 8) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2005年版)〈第二編 高速炉規格〉JSME S NC2-2005, 日本機械学会, (2005.9).
- 9) 若井栄一, 他, プラズマ核融合学会誌, Vol. 88, No.12, 691-705(2012).
- 10) B. Kim, *et al.*, presented in ICFRM 15(2011); *J. Nucl. Mater.*, in press.
- 11) N. Yamamoto, Y. Murase, “Long-term creep properties of F82H steel including 1000 appmHe”, presented in ICFRM 15(2011); *J. Nucl. Mater.*, in press.
- 12) E. Materna-Morris, *et al.*, presented in ICFRM 15(2011) in USA; *J. Nucl. Mater.*, in press.

著者紹介

若井栄一(わかい・えいいち)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)材料強度学, 材料照射損傷工学, 微小試験片試験技術, 材料照射施設技術開発



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—
(3月4日第9回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・英文誌の出版状況が報告された。Web投稿・審査システムにより2月期に20論文が投稿された。内7論文が海外から。
- ・英文誌の50周年記念 Review 論文の進捗状況が報告された。50周年 Virtual Issue は設定公開済み。
- ・二重投稿に関する匿名告発について、経過が報告された。
- ・和文論文誌の審査フォーマット改訂案を承認した。
- ・編集委員の国際化の手始めとして、試験的に韓国から委員を招聘することを了承した。
- ・和文論文誌がElsevier社のSciVerse Scopusデータベースに取り入れられることが報告された。

【学会誌関係】

- ・4月号以降の記事案について、出席委員から企画中または打診中の記事の進捗状況について報告があった。6月号以降は記事

数が少ないので、今後も引き続き記事企画に努力していくことになった。

- ・新規提案や寄稿済みの記事の、対応の進捗状況の報告があった。記事種別の変更や、著者にコメントを求める必要がある記事、詳細な提案書を再提出し再検討する必要のある提案など、いくつか報告された。
- ・3月下旬に開催される春の年会で記事候補に選出しているセッションについて、次回幹事会で策定結果を提出するよう改めて依頼があった。
- ・編集委員会の体制強化案の一つとして、「各部会・各連絡会・各委員会から、編集幹事会に代表者1名の出席をお願いする」提案が前回の編集連絡会であり、第1回目として3部会宛てに発信した旨の報告があった。4月の幹事会からスタートする。

編集委員会連絡先<<hensyu@aesj.or.jp>>

談話室

本当に人々は「ゼロリスク」を求めているのか シビアアクシデント対策とゼロリスク志向

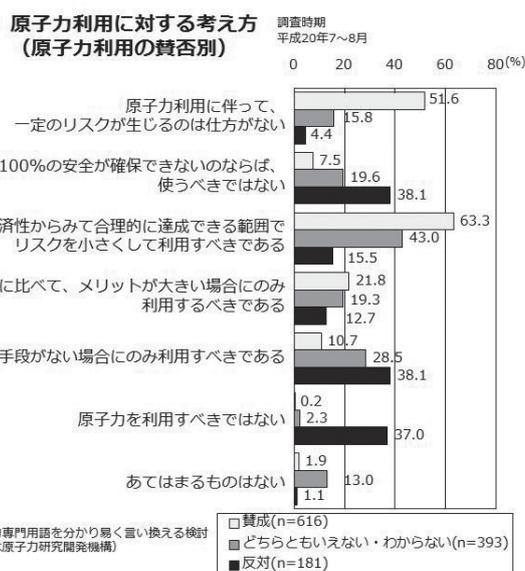
（株）ノルド社会環境研究所 堀越 秀彦

■ゼロリスク志向というフィクション

平成24年9月18日、原子力安全委員会の最後の会合において班日委員長(当時)より、東京電力福島第一原子力発電所の事故の対応を振り返り、リスクの存在を前提とする備えが不足していたとの文脈において「人々がゼロリスクを求めているとして、リスクがあることを知らせることを避ける風潮があったことこそが、問題視されなければなりません。」^aとの発言があった。

しかし、本当に人々はゼロリスクを求めているのだろうか。事故前(平成20年)に、首都圏在住の方を対象として実施された意識調査がある。原子力に対する考え方についてたずねた結果は第1図のようになっていた。

ここで「ゼロリスクを求める」にあたるのは「100%の安全が確保できないのならば、使うべきではない」という選択肢であろう。これに「あてはまる」と回答したのは16.1%である。無視できる数ではないが他の選択肢に比べて多くはない。むしろ人々の多くはリスクとメリットや経済性を考慮すべきと考えており、リスクの存在を前提とした議論をする素地は十分にあったように思える。つまり「人々がゼロリスクを求めている」という根拠は薄く「リスクがあることを知らせることを避ける」とい



第2図 原子力に対する考え方(賛否別)^c

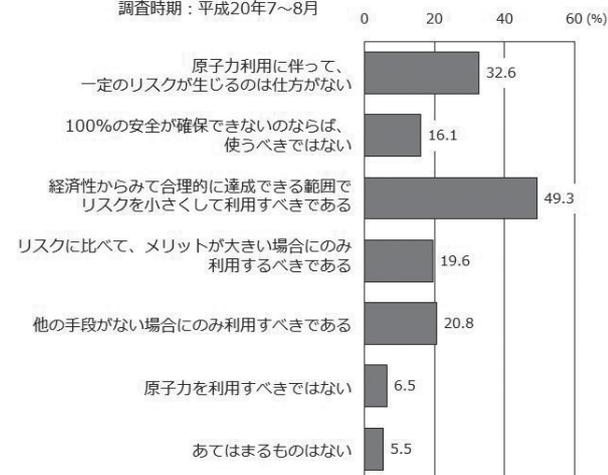
うのは、当局の思い込みに基づく自主規制にすぎなかったと言えそうだ。

ちなみに、この設問を原子力利用の賛否の別にクロス集計した結果も示されている。原子力利用に「反対」という意見を持つ方には「100%の安全が確保できないならば使うべきではない」と考える人が多かった(第2図)。

当局に直接声を届けるような方々には、原子力利用に反対という意見を持つ方が多く、そのために、ゼロリスクを求める人が多いと感じられたということだろうか。それが故に「人々がゼロリスクを求めている」という言説が検証されずにまかり通っていたのであれば、専門家集団としての気質に不安が残る。仮に、ゼロリスクを求める人の割合は専門家集団よりも一般の人の集団において高いとか、当局に直接届く声にはゼロリスクを求めるも

原子力利用に対する考え方 (単純集計)

調査時期：平成20年7～8月



出典：原子力専門用語を分かり易く言い換える検討 (日本原子力研究開発機構) ■全体(N=1190)

第1図 原子力に対する考え方^b

^a 平成24年9月18日第37回原子力安全委員会速記録

^b 調査時期：平成20年7月28日～8月8日、有効回答数：1,190名、調査方法：Web アンケート、調査対象：東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県及び茨城県の一部に居住する原子力関係者でない16歳以上の男女

出典：日本原子力研究開発機構 原子力専門用語を分かり易く言い換える検討 JAEA-Review 2009-043

^c 脚注 b に同じ

の多いとしても、それは必ずしも一般の人にゼロリスクを求める人が多いことを意味しない。直接届く声だけに反応して大局を見誤ってはいけない。

そもそも、人々の意識がどうであろうとリスクの存在は大前提である。とりわけ規制機関はリスクがあるからこそ存在する。人々が本当にゼロリスクを求めていると認識していたならば、むしろリスクが存在することを伝える必要性が高いと判断されるべきだろう。

■リスクを知らせることへの躊躇と SA 対策の不足

少し見方を変えて、「人々がゼロリスクを求めている」という認識とは別に、関係者にはリスクがあることを知らせることを躊躇する意識が元からあったことも指摘しておきたい。

東京電力福島第一原子力発電所の事故においてはシビアアクシデント(SA)対策の不足が指摘されている⁴が、原子力関係者でリスクの存在を認識していなかった者はいないだろう。しかしその対策ができなかった。福島第一原子力発電所事故政府事故調のヒアリングにおいて原子力安全・保安院長(当時)は、「いくばくかのリスクが存在するという説明は、特に地元との関係では非常に苦しい。原子力に理解のある方からも、一所懸命、原子力の安全はしっかり進めていくという説明だったのに、なぜそのような問題点が残っているかのようなことを言うのか、という批判を受ける。まして、批判的な人は当然、話が違ふ、安全と言っていたのに安全ではない要素があるなら、その対策はどうするのかという議論になってしまう⁵」と述べている。問題意識はあったが、言い難かったということだろう。

また、事業者には SA 対策の必要性を公言することにより、訴訟、施設の稼働停止、反対運動などの問題が生じるおそれがあるとの認識があった⁶ようだ。

このような理由から規制当局や事業者はリスクがあることを知らせることを躊躇した。「人々がゼロリスクを求めている」との言説は、その躊躇を正当化する方向に作用したことだろう。そして、SA 対策については規制

要件化の議論はありつつも、事故の時点まで「既に低いリスクを一層低減するための」「事業者の自主的な取り組み⁷」と位置づけられたままだった。

SA 対策が不足していた原因は今後も検討されていくことと思われるが、リスクを認識していたにもかかわらず、それを伝えること(そして対策につなげること)を躊躇させた社会的要因(例えば、立地地域での説明や約束ごと、訴訟や反対運動に代表される国民との硬直した関係等)は注目されるべきと考える。

■今後の対策とリスクコミュニケーションへの期待

今回の事故の教訓として、SA 対策を法規制上の要求にするための検討が行われている。平成24年8月には原子力安全・保安院によって「シビアアクシデント対策規制の基本的考え方⁸」がまとめられ、平成25年7月に新しい規制が公布・施行される。

この新たな対策はリスクの低減につながるものと期待されるが「ゼロリスク」を基準に考えると「なし崩し的にリスクを受け入れさせるものである」という批判的な文脈を形成することもできる。リスクの存在を前提とした規制を改めて批判する声があるかもしれないが、原子力の安全確保に携わる方には、リスクに対峙する自らの仕事を、今度こそ臆せず社会に伝えてほしいと思う。特に、これまで事業者ばかりにリスクコミュニケーションが求められてきた感があるが、どこまでのリスクを社会的に許容するかという線引きはもっぱら規制の問題である。規制機関による主体的なリスクコミュニケーションを期待したい。

また、「人々がゼロリスクを求めている」から「リスクがあることを知らせることを避ける」という考え方の背後には、人々はリスクを理解できないだろうという傲りと、人々への不信感の存在も感じられる。今回の事故の前にも不祥事やトラブルが続き、信頼回復は我が国の原子力のひとつの大きな課題とされてきた。しかし、人々を信頼せず、リスクを知らせず、それで信頼を回復したいというのは、いささか虫のよい話だったということだろう。まずは人々を信じることから始めて欲しい。

(2013年1月31日 記)

⁴ 例えば、東京電力福島原子力発電所事故調査委員会(国会事故調)報告書 p 120-121「日本では設計基準内の内部事象のみの狭い領域に対し、事象ごとのパッチワーク的な AM 対策(筆者注:アクシデントマネジメント)を行ってきた」など

⁵ 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会(政府事故調)最終報告

⁶ 東京電力原子力改革特別タスクフォース「原子力改革の進め方(2012年10月12日)」

⁷ シビアアクシデント対応検討会(NISA, JNES)事務局「我が国のシビアアクシデント対応の規制上の取扱いについて—シビアアクシデント対応検討会(NISA, JNES)の中間とりまとめ—」

⁸ 原子力安全・保安院「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)」(平成24年8月27日)

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

40年後も変わらぬこと

産経デジタル 石毛 紀行

原子力発電の関係者は「ジャーナリズムは敵」と考えてはいまいか。反原子力の立場の人は「ジャーナリズムは権力に迎合している」と思ってはいまいか。何が起き、何が問題だったのか、これから何が必要なのか、記者は可能な限り多様な視点を踏まえて、読者に伝えようとしているつもりだ。敵でも味方でもない。

新聞社の場合、記者が最初に担当するのはいまでも事件・事故取材、警察担当からが基本だ。そこで取材とは何かを身をもって学ぶ。被害者、加害者、その家族、知人友人、関係者、捜査機関、話してくれる人も、そうでない人もいる。話を聞くことができて、そこには思い違いやウソが混じっていることも隠し事もある。よくよく聞いていくと第一印象とまったく異なっているということも多い。

教育や医療、労働問題などをテーマにした取材もしてきたが基本は同じだ。様々な現場で様々な立場で汗を流している人たちの思いを、きちんと聞くことがいかに大切で難しいことか。記者の仕事は、書くことよりも、とにかく「聞く」仕事なのだ。

2年前、東日本大震災による津波によって発生した東京電力福島第一原発事故。事故の直後から、各メディアは聞く作業を続けてきた。

津波に襲われた発電所が全電源喪失に陥ったとき、操作に問題はなかったのか。原子炉の圧力を逃すためのベントがなぜ間に合わなかったのか。海水はなぜすぐに注入できなかったのか。現場には何が足らなかったのか。誰かが邪魔をしたのではないか。

そもそも全電源喪失時の検討が先送りされていたのはなぜか。2つの非常用ディーゼル発電機が、ほぼ同じ場所に設置された理由は。想定した津波高はなぜ小さかったのか。原子力安全・保安院、原子力安全委員会などはなぜリスクに気づかなかったのか。

地震の翌日、原子炉溶融の可能性に気づいた国は旧ソ連のチェルノブイリ原発事故のような重大な結果を想像しなかったのか。溶融の可能性を記者会見で率直に語った原子力安全・保安院の審議官はなぜ急に交代したのか。その後、溶融の言葉が使われなくなり、福島第一原発の危機的状況が正しく国民に伝わらなくなったのではないか。なぜただちに20キロ圏内に避難指示を出さなかったのか。

事故時に役立てるため運用していた文部科学省の緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム

(SPEEDI)のデータが、すぐに公表されなかったのはなぜか。20キロ圏外にある浪江町、飯館村の危機に気づき、モニタリング調査でも予測に違わぬ高線量の放射線が観測されたにもかかわらず、なぜ数値は公表されなかったのか。

避難指示の出た地域の住民、その周辺の住民に健康被害の恐れは本当はないのか。避難区域は、何年たったら通常の生活に問題のない放射能レベルにまで下がるのか。そしていつ戻れるのか。

聞きたいことは山ほどある。これらのうちすでに記事になったものもあるし、曖昧にされていることもある。答えの出されていないものもある。それらの出来事を書き尽くすまで、記者は聞き続けるだろう。

福島第一の事故処理には、今後30年から40年かかるという。溶融し堆積した燃料を取り出し、原発の廃止措置を完了し、放射性廃棄物の処理・処分が終わるまでの期間だ。

30年から40年という期間は途方もなく長い。大学新卒で東京電力に入社した社員が定年まで勤め上げる時間だ。一生を福島第一原発の廃止措置に捧げるということに他ならない。一生を福島のために詫び続ける仕事と言い換えることもできるかもしれない。事故後に入ってきた者にとっては相当に覚悟のいる仕事である。

東電社員に限った話ではない。原子力のエネルギーを利用しようとするすべての業界とそこにいる人々に共通の仕事だ。研究者だから、規制官庁だから、ジャーナリストだから、許されるというものではない。

40年後の記者たちは事故当時とその後を知る私たちに、敵としてでも味方としてでもなく、事実だけを厳しく聞いてくるだろう。「なぜ、あの時、そうしたのか」と。そのときまで、自分の良心に恥ずることのない仕事を続けていきたい。(2013年2月7日 記)



石毛紀行(いしげ・のりゆき)

産経デジタル

平成3年、産経新聞社入社。平成8年から福井支局で原子力発電をめぐる諸問題取材。大阪社会部、広島支局を経て、16年に東京社会部。原発問題、医療・社会保障、労働問題などを担当。東北総局長を経て、20年から産経デジタルでウェブニュース全般を担当。