

巻頭言

1 ハンモックの下

神津カンナ

時論

2 アクシデント化学

現在、最も重要な課題の一つは、サイト内の汚染水の除去である。
勝村庸介

特集

12 原子力安全部会「福島第一事故に関するセミナー」報告書から (第3報) 福島第一以外の発電所で起きた事象

東北地方太平洋沖地震は福島第一5、6号機や福島第二、女川、東海第二の発電所も襲ったが、これらの発電所ではシビアアクシデントを防止できた。福島第一1～3号機とそれらは何が明暗を分けたのか。シビアアクシデントの発生防止には何が重要なのか。

長澤和幸, 櫻庭達幸, 加藤浩介,
戸村典章, 阿部清治

23 (第4報) 事故で明らかになった課題

福島第一発電所事故は、安全設計、シビアアクシデントマネジメント、安全規制に課題があることや、PRA、運転経験、安全研究が安全確保活動に必ずしも十分には寄与していないことを明らかにした。

守屋公三明, 阿部清治

34 (第5報) 原子力防災等に関する課題

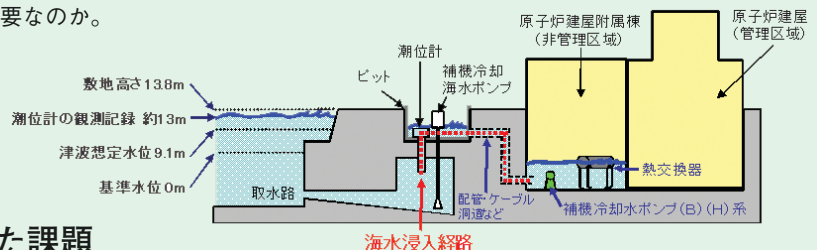
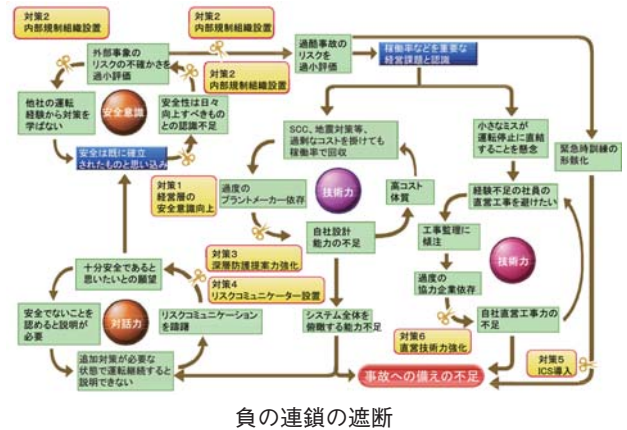
福島第一発電所事故におけるオフサイトの緊急時対応は適切に行われたか。事故初期の危機管理段階とその後の影響管理段階の対応で得られた教訓について、放射線防護の観点から解説する。

本間俊充, 関村直人, 阿部清治, 新田隆司

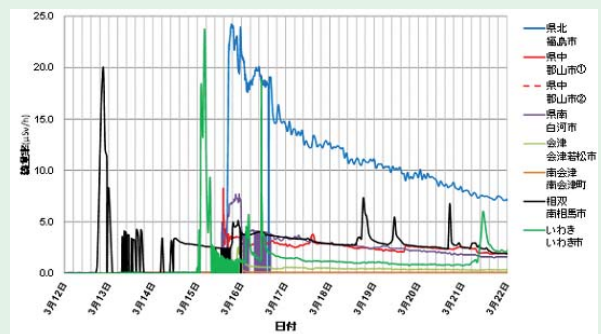
時論

4 福島原子力事故の総括および原子力安全改革プラン

福島原子力事故の背景となった東京電力の組織的な原因とは何か。
姉川尚史



原子炉建屋付属棟への海水流入のメカニズム



事故直後の空間線量率

表紙の絵(日本画)「静刻」 制作者 五十嵐晴徳

【制作者より】 ライフワークとしてここ数十年以上、鯉を描いてきました。静かな山間の池、現実のそれを超えて限りない憧憬の対象であり、かつ画家としての私に様々な外的なご縁を運んでくれた存在でもある。だが無論よい作品ばかりが出来るわけではない。それでも想い焦がれて描かずにはいられない、そんな思いで静池と鯉を描きました。

43 原子力規制委員会の活断層評価 — 張り子の虎ではないのか？

安全な原子力施設は再稼働してもよいが、原子力規制委員会による厳しい安全審査が必要である。下北半島の原子力施設の安全性審査などにおいて、規制委員会の真価が問われる。 渡辺満久

48 求められる「価値選択」の議論— 原子力安全、高レベル放射性廃棄物 処分、そして原子力学会の役割

福島原発事故を契機に原子力に関するあらゆる事柄が根本的に問い直され、「価値選択」の議論が求められている。原子力専門家はどうか関わらなければならないのか。 寿楽浩太

53 第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計 クライテリアの構築

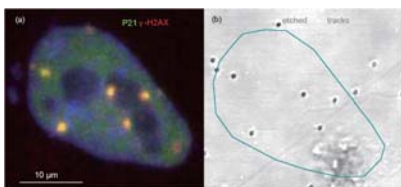
第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計要求の国際的な調和を図るため、原子力学会の専門委員会は安全設計クライテリア(SDC)の検討を重ねた。ここではSDC構築のアプローチ、SDCの概要および主要な論点についての考え方を解説する。
「第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計クライテリア」特別専門委員会

58 食品と放射線のリスクを考える — 発がん リスクの評価について

放射性物質と同様に、「閾値のない発がん物質」とみなされる遺伝毒性発がん物質が食品中には多数存在することがわかってきた。私たちはそれらのリスクを、どう評価してきたか。 畠山智香子

63 放射線生物学の最前線 — DNA 損傷修復の動的可視化

最近の放射線生物学や医理工連携、そのためのマイクロビーム源の開発の進歩は目覚ましい。ここではDNAの損傷、修復、タンパク質挙動の動的可視化、さらにはそれら分析を高機能化するための卓上マイクロビーム源の開発と利用を解説する。
上坂 充, 藤森 亮, 加藤宝光



HeLa 細胞にシングル Kr イオンを照射して修復蛋白質の動きを可視化したもの

6 NEWS

- 国際廃炉研究開発機構が発足
- クライン氏、東電に情報公開改善求め
- 産業界の安全向上で WG 初会合、経産省
- 東芝が重粒子がん治療装置
- 電子型ニュートリノ確認、世界初
- 九大、SPring-8 で 4D 観察法
- 海外ニュース

インタビュー

68 「被災地の復興をまず第一に」 — 半谷輝己氏に聞く

福島県を中心に全国各地で放射線をテーマに講演や対話活動が続けている半谷氏は、復興のために墓地と祭りを中核としたコミュニティの復活を呼びかける。 (聞き手)澤田哲生



topics

学会事故調、最終ドラフト案を公表

原子力学会の福島原発事故調査委員会は9月2日、都内で最終ドラフト案を公表した。

- 73 「春の年会」「秋の大会」発表にかかる専門分野表改定のお知らせ
- 74 「2014年春の年会」研究発表応募・参加事前登録のご案内
- 75 会報 原子力関係会議案内、人事公募、英文論文誌 (Vol.50, No.10) 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/>

ハンモックの下



作家 エッセイスト

神津 カンナ (こうづ・かな)

「親離れするとき読む本」, 「パープル・ドリーム」など多数の著書あり。さまざまな政府委員を歴任。

今年の初め頃だっただろうか。医師をしている友人との会話の中で彼が「オランダの原子炉が動かないので薬が来ない」というようなことを言った。気になってどういうことか詳しく尋ねてみると、日本の医療用アイソトープは、基本的に海外からの輸入依存だという実体が見えてきた。

ガン治療や検査のみならず、疼痛コントロールなどに放射線や放射性物質の薬品を使用することは知っていたが、それらの薬品がどこでどのように作られて日本で使用されているのかなどについては、それまでほとんど考えたこともなかった。しかし説明によると、最も使用量の多いテクネシウム製剤の原料であるモリブデンは、過去にカナダの原子炉が停止して供給不能に陥ったこともあるとか。今回のものはストロンチウム 89 を使った薬剤で、オランダの原子炉に依存していたものだったが、何かのトラブルで原子炉が停止し、再稼働の目処が立たないので供給がストップ。製薬会社は奔走してベルギーの原子炉で調達することになったが、このベルギーの原子炉も間もなく定期点検で止まるから、綱渡りのような状態がしばらく続くだろうということだった。

調べてみると、このような海外依存を解消すべきと、国も日本で国内生産を模索したことがあったようだ。既存の研究炉を使用するか医療用アイソトープの専用炉を作るなどの議論がなされたようだが、規制の厳しい国内では経済性が成り立たず、結局のところ国内生産は困難という結論に至ったようだ。

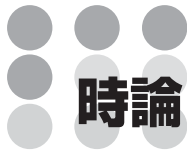
同時多発テロ以降、放射性物質の輸出入が非常に厳しくなったこともあるが、極東の島国という地政学上、日本は多くのリスクを抱えながら、原油や LNG だけでなく、医療用アイソトープも実は、海外からの輸入に頼っているという現実を思い知らされた。

少し話は違うが、同じ薬剤ということでは、漢方薬にも危機が訪れている。かつては漢方薬の原料となる薬草を日本も栽培していたが、今は原料のほとんどを中国からの輸入に頼っていて、日本の自給率は 12% 以下まで低下しているのが現状だ。この漢方薬、最近は欧米でも見直されるようになり、世界的にニーズが高まってきているようで、原料の高騰が懸念されている中、中国の漢方薬剤に EU の基準値を上回る各種農薬が残留していることが確認され、問題になっているのである。原料の薬草栽培は中国に一国集中だから、その屋台骨が崩れると市販薬にも使用されている漢方薬そのものが製造できなくなってしまう恐れがあるのだ。薬草栽培に関してのノウハウや種苗の確保、農地の確保など、日本が国内で一からやり直すのは容易なことではないだろう。

色々なことを思う。現代生活においては、必要なすべてのものを自国で賄うことは不可能だとしても、自給できない場合に、どのようなリスクが存在するのかを、人々、特に私たち日本人はほとんど考えていない。心地よいハンモックに揺られて微睡んでいるが、ふと下を見ると地面は遙か下で空洞が広がるばかり、という感じかもしれない。そして空洞を埋める、すなわち、手放したものを再構築するということがどれだけ困難なことかということも、漢方薬の問題から身に沁みだ。

原子力技術に関してでも同じである。私たちはとすると「商業発電炉」のことばかりを思うが、医療や工業製品などのために、世界中では多くの実験炉や研究炉が働いている実体も理解していなければならない。そのことを思えば、簡単に原子力技術を捨てる……などとは口が裂けても言えないはずである。

(2013年8月5日記)



アクシデント化学



勝村 庸介 (かつむら・ようすけ)

東京大学教授

本学会水化学部会長, 主な研究分野は原子力における放射線効果, 高温水・超臨界水の放射線分解とシミュレーション, 高 LET 放射線の反応, 超高速パルスラジオリシス, 放射線利用。

福島第一原子力発電所の事故から既に2年を経過した。地震が発生し、それに誘発された津波により、発電所全域の停電により緊急停止したはずの原子炉の冷却に失敗した。全域停電というシナリオを想定していなかった。シナリオの想定がなければ、十分な対応も困難である。津波発生からの5日間で水素爆発が1号機、3号機、さらに4号機と発生し、その後の事故の流れを決めた。

現在、最も重要な課題の一つは、サイト内の汚染水の除去である。冷温停止を維持するため絶え間なく注水を行う必要があるが、この注水によりタービン建屋内の汚染水レベルが上昇し、この汚染水の回収とその除染が進められている。現在、FPのうちで長寿命のCs-134, 137の除去とともに、緊急冷却のため海水を注入したことによる塩素イオンの除去が大きな課題となっている。これら水処理のルートの総延長はサイト内4kmにも及び、これまでの総水処理量は本年6月末で60万トンともいわれている。毎日400トンの増加が発生し、これらは地下水のサイト内への流入が原因とされている。処理水蓄積量の増加が進めば、早晚、サイト内での容量を越えてしまうことが危惧されている。

水処理施設が稼働を開始し、原子炉建屋内の汚染水内のCsイオンと塩素イオンの濃度は順調に低下してきた。しかし、1年を経過する頃から濃度低下のスピードが鈍り、定常濃度を形成するに至っている。このことは、除去と新たな発生、デブリからの溶出と思われるが、これらが平衡に到達したように思われる。複数の核種、イオンで同様の挙動が観測されることは、上の推測が確度の高いものと判断できよう。このことから炉心溶融で溶解した使用済燃料が注入された水とどのように反応し、その結果どのような形態でFPが水中で挙動するかについては全く我々の知識は乏しいと判断せざるを得ない。本年度に入り、その外の放射性核種の除去を行うALPSも導入予定で、Cs以外の放射性核種の除去がさらに進み、これらの濃度は放出基準を大きく下回ることになる。

汚染水の最終処分法で浮上してきた問題はトリチウムである。トリチウムは最大18keVのベータ線を放出し

半減期12.3年で減衰する。生物学的半減期は12日と推定され、比較的生物学効果は小さいと評価されている。現在の処理水には1,000Bq/cm³程度のトリチウムが含まれ、環境放出基準の0.01Bq/cm³にするためには大量の水での希釈が必要である。今後の我々の選択には3つのオプションがあるように思われる。一つはサイト内に継続貯蔵である。これは時間稼ぎのみで最終的な解決には至らない。二つ目はトリチウムの除去、濃縮である。原理的には除去、濃縮も可能であろうが、現実的には困難であることは明らかで、これも選択はできない。残るは希釈放出である。これは規制値に従って放出すると20年もの時間を要すると算出されている。最終的には希釈放出は現在の社会的状況を考慮するとなかなか了解は難しそうで、最終的には政治的な判断に委ねられることになりそうである¹⁾。

以上のような状況を踏まえて、我々に何が最も不足しているか考えてみると、事故時の使用中の核燃料と水との相互作用、FPの挙動の理解であり、これらに対する放射線の影響についてである。燃料中のFPの質量インベントリーはCsが主要生成物であり、Srもそこそこの量であるもののヨウ素の絶対生成量は小さい。同時に、考慮すべきは崩壊熱である。崩壊熱はFPからの放出放射線が熱になったものである。崩壊熱は核分裂生成物からの放射線量と同義である。崩壊熱は原子炉停止から1日経過して半減、1週間で3%程度、1年経過しても1%程度が残存し放射線源として無視できないため、放射線効果を必然的に考慮することが必要となってくる²⁾。

そもそも燃焼度の進んだ核燃料の内部構造は亀裂、ボイド、さらには様々な析出物、これらが径方向、高さ方向で不均一に、局所的に偏在する複雑な構造を形成することが知られているが、これらのシビアアクシデント時の挙動はよくわかっていない³⁾。炉心溶融を考えると1,855℃で被覆材のZrが溶融し、さらに高温になり2,800℃を越えるとUO₂そのものも溶融する。物理的には融点で溶解挙動は表現できるが、これに水が関わり、FPの放出やZrと水の相互作用による水素の発生が生

じるはずである。これらは水との接触がどの程度のスピードで進むかで様相は大きく変わるであろう。その様相によってエアロゾルの生成も大きく影響することが想像される。これらは容易に想像できるものの、実際にどのように進行するかを正確に予見することは現状では困難であり、そのためには実際の実験が必要である。熱流体的な解析はもちろんであるが、そこでの化学反応の解析も引き続くFP挙動を考える上では不可欠である。よく知られていることとして、ヨウ素は多くの化学形態、 I_2 , I , I_3^- , HOI , IO_3^- 以外にも有機ヨウ素があり、放射線がその変換を加速することから、放射線効果の検討も必要となる。これらが水相と気相間でダイナミックな移行をすると考えられ、事故時の挙動予測のコードが開発されている⁴⁾。ヨウ素以外のFP核種についても化学変化、水相、気相、さらには表面の効果等も考慮した挙動を予測する必要があるように思える。これらについては短時間で進行するもののみならず、長期間にわたるゆっくりした反応もあり、これらの動力的挙動を理解することも必要と思われる。さらに、 UO_2 がマトリックスとなるが、当初はこれにPuや他のFP核種が存在しているはずで、これが溶融した場合、あるいは溶融を経て凝固した後では、存在していたFP挙動は全く異なると想像される。Zrも水との反応で水素を発生した後は ZrO_2 を形成するであろう。このように、炉心溶融が発生した状況ではFPの挙動は温度、圧力以外の物理パラメータのみならず、水素濃度などの化学パラメータも関わる複雑なものとなると思われる、これらはダイナミックな現象として理解すべきものとなる。ところが、冷温停止に至ると今度は時間をかけた移行や反応が支配的になるはずである。 UO_2 は水に接触していれば徐々に溶解することが知られており、その過程で放射線が強く作用することも明らかになっている。これらは地層処分を検討されてきた課題で、 PuO_2 についても同様のことが起こるかも知れない。これらのデータを得るためにはいろいろのモデル実験を実施する必要がある。 UO_2 に非放射性のFP核種を含有した模擬使用中燃料を作成し、溶解させ、水と接触させたり、水に投入したりしてFPの挙動を追跡するのは一つの方法である。また、環境としても事故直後は水素環境であるのに対し、その後は酸素存在下での挙動を対象にするようになると想像される。さらに、それに加えて強い放射線環境下での反応なので、ヨウ素挙動で述べたように放射線が大きな支配因子となる。最終的には、適当な燃焼度の燃料を用いた実験が必要になると思われるが、FPやMAの飛散を防止するためには、必然的にグローブボックスの中での実験となり、実際の実験実施はなかなか困難と思われる。

今回の福島事故では海水がキーワードの一つに躍り出た。海水が原子力で現れることは余りないが、例外の一つは地層処分の分野がある。長期にわたり地下水が浸入

しなかったことから安定な処分地候補と見なすことのできる岩塩層に高レベル廃棄物を処分するとの考えが有り、この場合の事故のシナリオの一つとして地下水浸入で数モルもの高濃度塩水が発生し、その放射線の影響が議論されてきた⁵⁾。海水の主成分はNaCl 0.6モルで、Mgイオン、硫酸イオン、臭素イオン、炭酸イオンや有機物を含む混合系で放射線反応も単純ではなさそうである。

私ども水化学部会では、これまで原子炉の冷却水の管理を通じてSCCの抑制、被ばく低減を図り、原子炉の健全性を維持するとの目標を掲げて活動してきた。これまで述べてきたことは全て水に関わっており、我々は関連課題を主体的に取り組むことができると考えている。具体的には汚染水の処理、原子炉機器の健全性の確保、除染、水素の発生と挙動、核分裂生成物の放出と移行、これから取り組むことになる燃料デブリの取り出しなどが挙げられ、このうち幾つかは実際に実施されてきている。これらを整理しつつ、水化学の活動の中に取り込んで進めることも必要である。水化学ロードマップの改訂を進める段階にきており、これらを積極的に取り入れることが必要との認識もあり、是非その方向を検討したい。

以上のように、原子力事故に対して、化学の果たす役割は大きなものがあり、関連課題をまとめて“Accident Chemistry”なる分野を形成しうるのであると考えている。

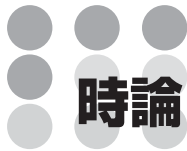
福島事故は世界的にも影響を与えた。福島事故を受けて中国では中国科学院が原子力の安全を専門とする研究所、核能安全技术研究所(Institute of Nuclear Energy Safety Technology)を2011年9月に安徽省合肥市に設立した。その中には核能化学安全(Chemistry for Nuclear Safety)なる部門もあり、化学関連分野の課題を重要視している。縁があつて、私もこれに関わることになり、水関連の研究を提案したいと思っている。

最後に一言、私の友人は福島原子力事故に対して多くの対応策が打ち出され復旧作業が進み、さらに将来を見据えた検討や研究も進んでいることから、これらの活動や成果を整理し、その記録を残しておくことは将来の事故対策、事故対応において、アーカイブシステムの作成が重要と発言している。全くその通りで、水学会の範ちゅうで可能なものは積極的に情報を整理し記録に残すようにしたいと考えている。

(2013年7月31日記)

—参考文献—

- 1) 内田俊介, 学会事故調査報告書 第9.2.1節, 丸善, 本年度末刊行予定.
- 2) Nuclear Safety in Light Water Reactors, ed. B. R. Sehgal, Academic Press, (2012).
- 3) P. C. Burns, R. C. Ewing, A. Navrotsky, *Science*, **335**, 1184-1187 (2012).
- 4) N. Girault, *et al.*, *Nucl. Eng. Des.*, **243**, 371-391 (2012).
- 5) M. Kelm, E. Bohnert, FZKA 6977 report, (2004).



福島原子力事故の総括および 原子力安全改革プラン



姉川 尚史(あねがわ・たかふみ)

東京電力(株) 常務取締役
東京大学大学院修了, 東京電力入社。
原子力設備管理部部長などを経て, 現職。
原子力改革特別タスクフォース事務局長,
原子力・立地本部副本部長を兼ねる。

東京電力では2012年9月から「原子力改革特別タスクフォース(以下、タスクフォース)」を設置し、「原子力改革監視委員会」の監督の下、福島原子力事故の技術面での原因分析に加えて事故の背景となった組織的な原因について分析を進めて参りました。そして本年3月末に「福島原子力事故の総括および原子力安全改革プラン」を公表致しました。以下、その内容を報告致します。

まず、当社は事故を防げなかったことと事故状況を迅速的確に公表することができなかったことの2点を反省しなければならぬと総括しています。

一点目の反省の意味は以下のようなことです。

当社は福島第一原子力発電所の設置許可申請書において、事故の際には多重の安全設備が確実に機能して、原子炉の停止、冷却、放射性物質の放出防止が図られると説明してきました。しかし、2011年3月11日の地震と津波により、安全設備のほとんど全てが機能を失ってしまいました。これは設計段階において地震と津波を起因とする共通原因故障への配慮が足りなかったことが原因です。その結果、全電源喪失という過酷な状態に至ってしまったのです。

更に、運転開始後には、米国のテロ対策等の安全性強化策や運転情報を収集分析し、対策を積極的に取り入れるという継続的な努力が足りませんでした。米国のテロ対策については米国から教えてもらえなかったとの弁明も聞かれますが、米国電力の中には規制当局の指示に先立って自ら対策を採った電力もありましたし、一部に関連情報も出回っていたので言い訳はできません。

以上の通り、当社は、設計段階の技術力不足、その後の継続的な安全性向上の努力不足により、広域に大量の放射性物質を放出するという深刻な事故を引き起こしたことを深く反省致します。

二点目の反省は、2011年3月11日の事故発生以降、広報活動全般が迅速さとの確さを欠いていたことです。特に炉心溶融が生じていることを公表したのは、5月24

日と大幅に遅れました。遅れの原因は、原子炉の状況を的確に把握できなかった技術力の不足、積極的な公表姿勢の不足、そして関係機関との調整へのこだわりでした。その結果、当社が立地地域のみならず、全国・全世界の方々の不安や不信を招いてしまったことを深く反省致します。

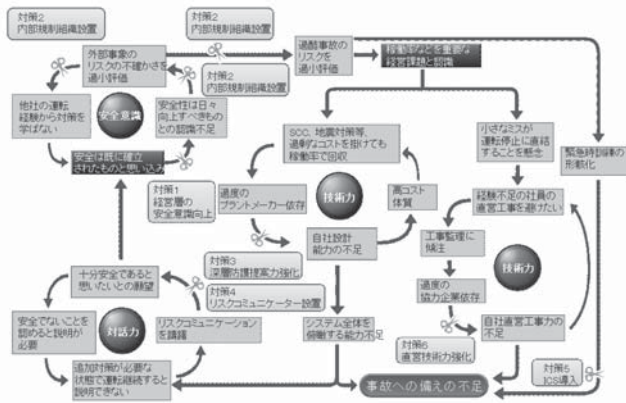
以上の反省を出発点として、当社組織内にあった問題を明らかにして、安全への取り組みを根底から改革することと致しました。

過酷事故が津波だけを起因事象として発生するものではない以上、津波対策を行えば過酷事故が防げるといことにはなりません。様々な起因事象によって生じるかもしれない過酷事故を防ぐためには、事前の備えが不足した組織に内在する問題を明らかにして、それらを解消する必要があります。

タスクフォースは事故の根本原因分析を行って、原子力組織の中に「安全意識」、「技術力」、「対話力」が不足しているとの結論に至りました。そして、これを助長する構造的な問題として原子力部門の内に図のような「負の連鎖」が存在していたために、3つの不足を解消することが困難でした。具体的には、原子力部門には安全は既に確立されていると思い込んでしまった安全意識の問題がありました。その結果、残る経営課題としては稼働率が優先され、システム全般を安全の観点で見直すような技術力、現場の事故対応を直営で実施する技術力が不足していました。同時に、立地地域や規制当局との間で残されたリスクについて率直に語る対話力が不足していました。

更に報告書では、福島原子力事故は、原子力部門のみによって引き起こされたわけではないと結論しています。原子力発電という特別なリスクを扱う企業としては、当時の経営層全体のリスク管理に甘さがあったと考えています。

以上のような組織に内在する本質的な問題を解消する



負の連鎖の遮断

ためには、負の連鎖を複数箇所ですべて同時に断ち切る対策を実施しなければならないと考えました。それが、以下の6つの対策になります。

(1) 経営層の安全意識向上

経営層は、原子力の特別なリスクを強く認識し、原子力事業者として安全に対する責任を負うことを自覚し、組織全体の安全意識を高めるためにリーダーシップを発揮し、人材の育成にも努めるよう、原子力安全意識の向上のための研修および定期的かつ客観的な評価を実施し、継続的な改善に活用します。また、安全文化の浸透は経営層のミッションと定め、トップのリーダーシップで取り組みを推進します。

具体的には、原子力発電所の安全設計、福島原子力事故の経過と教訓を題材とした経営者向けの研修を開催、また、原子力部門に対して、安全文化醸成活動の一環として福島原子力事故の総括をもとにした重層的な議論を実施させています。

(2) 内部規制組織の設置

取締役会直轄の内部規制組織として原子力安全監視室を設置し、執行側の原子力事業の運営を独立かつ直接的に評価することとしています。

具体的には、社外から室長を招き、5月15日に原子力安全監視室を設置しました。福島第一・福島第二・柏崎刈羽原子力発電所を訪問し、所長を中心とした幹部にインタビューを行い、安全意識の確認、必要なアドバイスを始めています。

(3) 深層防護提案力の強化

継続的に安全性向上対策の強化を積み重ねるため、深層防護に則った費用対効果の高い安全性向上対策を迅速に提案できる技術力を育成する仕組みを構築します。

また、全世界で発生した事故やトラブルは、自らの発電所でも発生するという意識を持ち、海外や他産業を含む運転経験情報を適切に活用する仕組みを構築します。

(4) リスクコミュニケーションの設置

原子力に絶対安全はないとの観点から、リスクコミュニケーション活動を行えるよう、リスクコミュニケー

ター(以下、RC)を設置するとともに、活動の中核になる組織としてソーシャルコミュニケーション室(以下、SC室)を新設します。

具体的には、4月10日にSC室を設置し、RCを順次任用・配置(約30名)しています。SC室は、原子力部門の情報を中心に収集し、経営層や原子力部門に対して具体的な情報発信の基本方針の提言を行っています。また、福島第一で発生したネズミによる停電事故への対応等、十分なコミュニケーションができていない事案を分析し、同様の問題が生じないように、コミュニケーションの徹底を図っています。

(5) 発電所および本店の緊急時組織の改編(ICS導入)

米国緊急時組織(以下、ICS)に倣い、指揮命令系統の明確化、情報共有の効率化等を改善するよう、発電所および本店の原子力防災緊急時組織を改編します。

具体的には、柏崎刈羽原子力発電所の緊急時組織にICSに基づく体制の整備を図り、3月にはおおむねその考えに従った運用ができるようになりました。6月末までに計9回の総合訓練、約400回の小規模訓練を行って、ICSの意義や効果を実感できるところまで向上してきています。

(6) 平常時の発電所組織の見直しと直営技術力強化

原子力安全に関する俯瞰機能の強化等を目的として、平常時の発電所組織を見直します。また、事故発生後の初期対応を当社社員が実施できるよう、直営技術力を育成するための組織を設け、想定外の状況に対応するための応用力を養成します。

○結 言

原子力発電という特別なリスクを有する設備運転の責任を有する事業者は、一般産業をはるかに上回る高い安全意識を基礎として、世界中の運転経験や技術の進歩に目を開き、確固たる技術力を身に付け、日々リスクの低減の努力を継続しなければならない立場にあります。

したがって、巨大な津波を予想することが困難であったという理由で、今回の事故の原因を天災として片づけてはならず、人智を尽くした事前の備えによって防ぐべき事故を防げなかったという結果を、真摯に受け入れることが必要です。

当社は防ぐべき事故を防げなかったことを深く反省し、改めて事故で大変なご迷惑をお掛けした立地地域のみならず、全国・全世界の方々に対し、心からお詫び申し上げます。今後は、原子力発電所の安全性向上対策の強化や当社組織の改革に、不退転の決意で取り組んで参ります。

(2013年 8月1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。

学会事故調が最終ドラフト案を公表

福島原発事故の原因究明や教訓抽出を検討している原子力学会の事故調査委員会は9月2日、最終報告書のドラフトを公表した。ドラフトでは津波対策や過酷事故対策が不十分だったことが事故を引き起こす直接的原因であり、事故後の緊急時対策や事故による影響の緩和・回復策にも問題があったと分析。その背景には、専門家が専門性に埋没して俯瞰的な視点に欠けたことなどをあげた。その上で今後は、深層防護をふまえた総合的な取

り組みによる原子力安全の向上を図るとともに、学会員自らが専門家として社会的に果たすべき責任感を広く共有するよう求めた。

また、多核種除去装置(ALPS)で処理された後も除去できないトリチウムを含む汚染水については、薄めて海に放出する方がリスクは低いとの見解を示した。

(原子力学会編集委員会)

国際廃炉研究開発機構が発足

茂木敏充経済産業相は8月1日、福島第一原子力発電所事故炉の廃止措置に向けた新研究開発組織「国際廃炉研究開発機構」の設立認可書を、同機構の理事長となる山名元氏(京都大学原子炉実験所教授)に手交した。新組織は8日に正式に発足した。

事故炉の廃止措置を進めるのに際し、今後は原子炉内の燃料デブリ取り出し作業の着手に向けて多くの研究開発を要し、技術的にも相当な困難が見込まれる。このため6月に改訂された中長期ロードマップでは、研究開発を個々に行うのではなく、一元的なマネジメントを担う研究開発運営組織のもとに現場ニーズを踏まえ、柔軟

かつ機動的に進めるべきとされている。

国際廃炉研究開発機構は、独立行政法人、メーカー、電力会社などの17法人で構成され、税制上の優遇があり、株式会社への移行がスムーズにできる技術研究組合の形をとっている。同機構は今後、助言を求める国際顧問の登用、海外専門家グループの設置など、国際的な叡智を結集する体制を整備し、廃炉対策推進会議、日本原子力研究開発機構とも連携をとりつつ、研究開発計画を推進していく。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

クライン監視委員長、東電に情報公開の姿勢改善求める

東京電力の原子力改革に関する諮問組織「原子力改革監視委員会」は7月26日、3月に同社が公表した「原子力安全改革プラン」の進捗状況に対する監視結果をまとめ、取締役会に答申した。同日の記者会見で監視委員会のデール・クライン委員長(元米国原子力規制委員長)は、最近の汚染水問題に鑑み、改革プランの加速、実効性の向上を促すとともに、「広報上の不手際が努力をないがしろに。情報を提供する意識がないのでは」などと情報公開の姿勢を厳しく批判した。

東京電力は、これに先立ち、「原子力安全改革プラン」

の13年度第1四半期の進捗報告を取りまとめている。その中で、福島第一発電所事故炉廃止措置に関し、期間中に発生した①ネズミによる停電、②地下貯水槽からの漏えい、③1、2号機タービン建屋東側地下水からの高濃度トリチウム検出——のトラブルを振り返り、それぞれについて、安全意識、技術力、対話力の課題を、過酷事故や津波に対する事前の備え不足から導かれた背後要因として抽出した。その上で、引き続き、経営層がリーダーシップを発揮し、改革プランを着実に実施していくこととしている。

産業界の安全向上でWG初会合、経産省が設置

「『安全神話』との決別」を第一に掲げ、産業界による自主的かつ継続的な原子力安全の取組を検討するワーキン

ググループ(WG)が7月17日、東京・霞が関の経済産業省庁舎で初会合を開いた。原子力の安全確保の一義的

責任を負う事業者が、常に規制以上の安全レベルの達成を目指すべきとの考えから、このWGは、規制サイトとは別に産業界の意識改革や自主的対策のあり方を検討するため、総合資源エネルギー調査会に設置された。メンバーは、座長を務める製品評価技術基盤機構理事長の安井至氏など10名の有識者のほかに、電力やメーカー、日本原子力産業協会、原子力安全推進協会もオブザーバーとして参画し、より現場に即した議論を展開する。

初会合では委員の尾本彰氏(東京工業大学特任教授)が、福島発電所事故を踏まえた社会的安全目標のあり方、施設の弱みを定量的に把握することなどを課題にあげた。また、規制委員会の新基準策定にも関わった山口

彰氏(大阪大学工学研究科教授)は、エネ庁が検討に先立ち掲げた論点項目に対し、「なぜできなかったのか」を根本的に掘り下げる必要を指摘したほか、今後の議論に向け、重要なキーワードへの共通認識を委員の間で明確にすることを求めた。

安全研究関連では、上塚寛氏(日本原子力研究開発機構理事)が、自身の経験も踏まえて研究者が「安全神話」に陥ることを危惧し、考え方を根底から改める必要を訴えたほか、電力会社の共通課題として井上正氏(電力中央研究所研究アドバイザー)が、技術者の養成・確保に言及し、メーカーも含めた総合的な協力体制を構築していく必要を求めた。

東芝が重粒子がん治療装置、マレーシアでFS調査

東芝は7月25日、マレーシア向けの重粒子線がん治療施設に関する事業性調査について、1マレーシア・デベロップメント社(1MDB社)と覚書締結を行った。重粒子線がん治療施設の事業計画の立案・評価やマレーシア国内で重粒子線がん治療装置の導入に適した施設の選択などを行う。2014年7月までに調査結果をまとめる予定。1MDB社は、2009年に設立されたマレーシア政府100%出資のファンドで、同国の長期持続可能な経済発展を目的とした、エネルギーや医療分野などへの投資を行っている。

重粒子線がん治療は現在、国内外で注目され、欧州、ロシア、中東、東南アジア各国などで導入の計画が進められている。同社はこれまで、重粒子線がん治療の世界最先端開発拠点である放射線医学総合研究所へ最新の重

粒子線照射システムを納入。また、昨年1月には神奈川県立がんセンターから重粒子線がん治療装置を一括受注している。海外では、今年5月にアルクドラホールディング社とアブダビ首長国向け重粒子線がん治療施設のFSに関する覚書を締結し、すでに調査を開始している。

国内では放射線医学総合研究所が15年を超える実績をベースに、各地への普及を進めている。がん病巣に対してパンチ力が高く、体内深部のがんを「切らずに治す」ことができ患者負担が少ない特長があるため、装置などをコンパクト化することで、まず群馬大学に重粒子線がん治療施設を整備し稼働した。最近では佐賀県鳥栖市の九州国際重粒子線がん治療センターが5月に開設している。

電子型ニュートリノ確認、世界初

今存在する宇宙の成り立ちを解明する——その手がかりとしてニュートリノと呼ばれる物質構成の基本的な粒子の解明に、着実な成果がみられている。7月19日、国際共同研究グループの発表によると、「電子型ニュートリノ出現現象」が存在することを示す決定的な測定結果が得られたという。

これまで、発射されるとき「ミュー型」だったニュートリノが「電子型」に変化することが予言されていたが、実際に測定されて現象が確かめられたのは世界初。実験は、茨城県東海村にある日本原子力開発研究機構にあるJ-PARCから発射されたニュートリノを約300km離れた岐阜県飛騨市にある東京大学の実験施設「スーパーカミオカンデ」で観測し、分析を重ねてきた(T2K実験)。

2011年6月にはその実験結果から兆候をつかんでいたが、その後の実験と分析の積み重ねにより決定的な測定結果を得たとしている。

宇宙の成り立ちは謎で、ビッグバンの直後には物質と反物質が生じたが、物質が残り現在の宇宙の構成になったと考えられている。ニュートリノがその謎に大きな役割を果たした可能性があり、ニュートリノの特徴の解明の一步として、電子型ニュートリノの出現を発見することが、この実験の第一の目的になっていた。今回、その目的が達せられたことになるが、今後も実験を重ねて、さらにニュートリノ解明を進めていくことで、宇宙の成り立ちの謎に迫ることができると期待されている。

九大、SPring-8 を活用し 4D 観察法を開発

九州大学大学院工学研究院の戸田裕之教授の研究グループは7月10日、大型放射光施設 SPring-8 を活用し、新たな金属組織の4D観察法を開発したことを発表した。これまでは主に2Dの手法が用いられてきたが、さまざまな現象が4Dであり、4D手法(3Dに時間軸を加えたもので、3Dの連続観察)が可能になれば、自動車、航空機などに用いられる材料の研究開発が飛躍的に高度化すると期待される。

これまで4Dの連続観察法を可能にする技術はなかったが、戸田教授の研究グループは金属の結晶粒界に多数存在する数～数十 μm 程度の粒子をSPring-8を利用したX線CTで鮮明に3D観察できることに着目した。こ

のような粒子は金属が変形し、破壊していく過程でも常に結晶粒界に位置するため、結晶粒界の粒子情報を使えば、個々の結晶の形を4Dで求めることが可能と発想、具体的な手法として効果の検証などを進めてきた。

従来、金属の強度などの評価は、多くの試験を別々に行い、それを総合して評価していた。今回開発した「結晶粒界追跡法」では、大型放射光施設を用い、1回の実験で、1本の試験片だけで組織の観察と強度等の評価を同時に実施できるので、双方の情報を高いレベルで能率よく取得し、かつ誤りなく結びつけることができる。

これにより、金属材料の真の変形の様子、破壊のメカニズムなどを知ることが可能になるという。

海外ニュース

【米国】

EIA、「2040年まで原子力の発電量は倍増」と予測

米エネルギー省(DOE)内にある独立の統計分析機関のエネルギー情報局(EIA)は7月25日、2040年までの長期的な世界のエネルギー市場動向を予測した「国際エネルギー見通し(IEO)2013」を発表した。今後30年間に世界のエネルギー需要は途上国に牽引され56%の増加が見込まれるほか、電源別発電量では再生可能エネルギーと原子力の消費量の伸びが化石燃料を上回る見通しだ。

IEO2013の標準予測ケースによると、世界のエネルギー消費量は2010年実績の524クアッド(=1,000兆)Btu(英国熱量単位)から40年に820クアッドBtuに増加する。主に中国とインドの消費量増が大きな要因で、これら2か国だけで40年までの増加分の半分を占める計算になる。

発電量も10年の20兆2,000億kWhが40年には93%増の39兆kWhに拡大。電力市場が十分確立され消費パターンが落ち着いたOECD諸国では、現時点で多くの人々が電力にアクセスできない状況にある非OECD諸国より電力需要の伸びが小さい。非OECD諸国のネット発電電力量が40年までに年平均3.1%で上昇するのに対し、OECD諸国のそれは1.1%に留まることになる。

また、エネルギー供給保証と温室効果ガスによる環境破壊への懸念から、多くの国で再生可能エネルギーの拡

大支援政策を政府が加速。結果として、同エネルギーの成長速度は標準予測ケースの中で最も高い年率2.8%に達すると見込まれる。この後に続くのが天然ガスと原子力で、伸び率はともに年率2.5%。石炭火力も年平均で1.8%増加する見通しであるため、2040年までを通じて最大の発電シェアを維持するが、温室効果ガスの排出抑制を狙った将来的な国家政策や国際合意により、そのシェアは実質的に低下していくと予想される。

〈福島事故は世界の原子力開発に長期的に影響〉

原子力による世界の総発電量は10年実績で2兆6,200億kWhだったが、40年には5兆4,920億kWhまで倍加するとIEO2013では予測した。再生可能エネルギーの拡大支援と同様の理由で原子力も設備の新設が促進されるものの、原子力の場合は、①福島事故の影響、②欧州のOECD諸国の既存政策における原子炉の閉鎖計画、③アジアの非OECD諸国で続く強力な原子力拡大傾向——というファクタが背景にある。

全般的に福島事故は今後の世界の原子力開発に長期的に影響していく可能性がある。大規模な拡大政策を公表していた中国でさえ、規制当局が国内の安全審査を終えるまですべての新規計画の承認手続きを停止。ドイツとスイスはそれぞれ、2022年と34年までに原子力から撤退する計画を発表した。同事故により原子力開発の不確実要素が増大したのは事実だが、それでもIEO2013は、40年までに原子力発電設備が中国で1億4,900万kW、インドで4,700万kW、ロシアで3,100万kW、韓国で2,700万kW増加することを見込み、原子力が拡大していくとの予測を示している。

DOE の SMR 支援計画, WH 社等 3 社が応募

東芝傘下のウェスチングハウス(WH)社は7月1日、開発中の小型モジュール炉(SMR)の試験用燃料集合体2体を完成したと発表した。同時に、今年3月に米エネルギー省(DOE)が公表したSMR開発・商業化促進プログラム第2回目の募集(FOA)にも応募しており、世界市場に初のSMRを提供する準備が整いつつあると強調している。

試験用燃料はサウスカロライナ州のコロンビア燃料加工施設で製造したもので、WH社では現在、燃料設計の流動試験に先立つ最終準備作業中。SMRの模擬運転を通じて燃料設計の性能を確認する計画で、同試験は8月一杯継続する。WH社のSMRは電気出力22.5万kWの一体型PWRで、すべての1次系機器を圧力容器の中に収納。技術が確証済みの機器や受動的安全系に加え、モジュール建設工法など、大型炉のAP1000で認可された技術を採用しており、最高レベルの安全性と機器数の削減が達成されたとWH社は説明している。

米オレゴン州のニュースケール社も今年3月の基本合意書に続き、1日に電気出力4.5万kWの小型一体型PWRの申請書をDOEに提出した。同社は大手エンジニアリング・資材調達・建設(EPC)契約企業のフルアー社を大株主としており、「米国人が米国の技術でクリーン・エネルギーを世界に輸出する」というDOEのSMR開発コンセプトに合致する、100%米国籍である点がセールス・ポイント。水の自然対流による冷却性能に加え、ポンプやその他の機械装置なしで原子炉を安全に停止可能な固有の安全性を備えたSMRを独自の特許技術により開発中で、最大12基のモジュールの統合により電気出力を54万kWまで拡大することができるという。

米サウスカロライナ州のホルテック・インターナショナル社も1日、電気出力16万kWの「SMR-160」設計でDOEのプログラムに応募したと発表した。

ポンプもモータも使用しないSMR-160は運転時と緊急時のすべてのコンディションを重力駆動とするなど、最も深刻な天災にも耐え得る設計になるとホルテック社は説明。ニュージャージー州でセイレムおよびホープクリークの両原子力発電所を操業するPSEGパワー社を戦略チームに加え、原子炉の運転や運転員教育、開発手続きやサイトの安全性、および規制・許認可に関する案件など、同社の主要な専門的知見を活用する。同社はさらに、昨年3月にSMRの開発・建設支援に関する協力合意文書をDOEのサバンナリバー国立研究所と締

結していることから、同研究所サイトに初号機が建設される可能性がある。

DOEのSMR開発・商業化促進プログラムは、民間企業との経費折半により、2022年までに有望な革新的SMR設計2件について商業化のための設計エンジニアリング、認証および許認可の取得を支援する内容。5年間に政府から約4億5,200万ドルが提供される計画で、すでに昨年11月、パブコック&ウィルコックス(B&W)社の「mPower」設計が1回目の募集で対象設計に選定されている。

【スペイン】

ガローニャ原発が正式に閉鎖

スペインのニュークレノール社は7月5日、昨年12月に運転を停止していたサンタマリア・デ・ガローニャ原子力発電所(BWR, 46.6万kW)を、産業エネルギー省の省令に従って正式に閉鎖した。閉鎖理由は純粋に経済性の問題であり、同原発の安全性や技術的な課題によるものではない点を強調している。

1971年に運開した同原発では、2009年の運転認可更新時に原子力安全委員会が「いくつかの安全上、放射線防護上の条件をクリアすれば2019年まで操業が可能」との判断を下していたが、政府は13年7月まで4年間のみ、運転の継続を許可した。

昨年9月には「持続可能エネルギーに対する租税措置法」により、経費の3割増しにつながる莫大な新税が13年から課されることが判明したため、ニュークレノール社は13年7月以降の運転認可を申請せず、昨年末で同原発を停止。発電所スタッフを保持するとともに追加のメンテナンス計画を策定するなどして、運転継続が可能な状況になるのを待っていた。

今年5月になり同社は認可の更新を実現するため、12年6月の省令を一部取り消すよう産業エネルギー省に要請したが、同省は6月19日に「省令の修正は認められない」との判断を下している。また、ニュークレノール社は09年から昨年までの間に同原発の改修・近代化で5,000万ユーロを投資。今後の改修で新たに必要となる経費や新税による負担を勘案して閉鎖を決めたとしている。

スペインの稼働中原発の中では最古だった同原発では、過去5年間の年平均設備利用率が常に80~90%台で推移しており、昨年は94.78%をマーク。良好な稼働実績を残していた。

【フランス】

フラマンビル3号機建屋にドーム屋根設置、フランス初のEPR

フランス初の欧州加圧水型炉(EPR)となるフラマンビル原子力発電所3号機(FL3)の建設サイトで、7月16日に原子炉建屋のドーム屋根設置が行われた。

2007年12月末に着工した同炉は現在、フランスで唯一建設中の商業炉。その2年前には世界初のEPR採用計画として、フィンランドでオルキオト原発3号機(OL3)の建設工事が始まったが、土木建築作業等に時間がかかり、送電開始予定年はFL3と並んで16年になる見通しとなった。

EPRはアレバ社が開発した次世代型PWRで、出力は世界最大級の165万kW。ドーム屋根の大きさも直径43m、重さ260トンに及んでおり、FL3の土木建築工事を担当したブイグ社は4か月間の準備作業を経て、大型クレーンを使った設置作業を成功裏に終えた。今後は屋根の外周を溶接するとともに、7,000トンのコンクリートで覆い、強度を増強することになる。

アーキテクト・エンジニアのフランス電力(EDF)によると、土木建築の95%、電気機器設備の据付も46%が完了することから、建設工事はいよいよ最終段階に移行。蒸気発生器や圧力容器、加圧器など原子炉系統設備の据付が今後数か月間で実施される計画だ。

【英国】

政府が新設サイトに40年間の財政優遇措置提案

英国エネルギー気候変動省(DECC)は7月17日、新規の原子炉建設サイトに特定されているイングランドとウェールズ両地域の8地点の地方自治体に対し、原子炉運開後に設備容量0.1万kWに付き年間1,000ポンドまで支払うなど、受け入れサイトに対する40年間の財政優遇一括措置を提案した。キャメロン政権は原子力の新設プロジェクトを前政権から引き継いだ際、公的補助金なしで実行することを条件としていたが、風力やシェールガス開発への補助と同様の方策で既存の原子力設備リプレースを一層加速していく考えだ。

DECCによると今回の提案は、国家的な発電事業の中でこれらの自治体が新規原子炉から影響を受ける期間や規模は、その役割から得られる利益の保障で評価されるべきとの認識に基づく。事業税の中から融通される資金の用途は特定の自治体毎に調整することとし、地元へ

の長期的な恩恵と原子炉建設による社会経済的資産が保障されるよう自治体が管理。イングランド南西部サマセット州のヒンクリーポイントで提案されている2基の場合、最高1億2,800万ポンドが地元を提供されることになる。

具体的な方法としては今年4月1日に導入された政府の事業税保持計画を活用。新設原子炉を受け入れた自治体は原子炉の運開後最初の10年間は自らが徴収する事業税の50%をそのまま保持できる。2030年以降の30年間は第2段階として、DECCが徴収する事業税の中から原発の規模と運転寿命に応じて年間1,000ポンド/0.1万kWを地元を提供。30年までに第2段階に移行できない場合は、DECCが地元自治体との広範な協議と並行して措置の実行に関する詳細をサイト毎に決定する。

ただし、事業税の保持措置はイングランド地方の受け入れサイトにのみ適用。ウェールズ地方はスコットランドや北アイルランドとともに連合王国内で大幅な自治権を有しているため、DECCは北ウェールズに立地するウィルファ原発サイトにもイングランドのサイトと同等の優遇一括措置が適用されるよう、ウェールズ地方政府と協議するとしている。

【ドイツ】

高レベル最終処分場手続き法案可決

ドイツの議会上院は7月5日、使用済み燃料と高レベル放射性廃棄物(HLW)の最終処分場サイト選定に関する手続き法案を賛成多数で可決した。6月28日付けで下院も承認済みであることから、同法案は予定通り、夏の休会を目前に成立。ゴアレーベン岩塩坑を候補地とするこれまでの作業をいったん白紙とした。また、連邦および州の両政府や各界の代表による委員会が2015年までに安全要件やサイト選定基準に関する提案を作成するほか、遅くとも31年末までに合意ベースで候補地を議会に勧告するなど、明確な目標の達成に向けて大きく動き出した。

この法案は今年4月に連邦環境相と州政府、各政党の代表らが合意した法案骨子に基づいて議会に提出された。地元での反対運動激化を含め、その適性を巡って長年議論が繰り広げられたゴアレーベンの反省から、選定作業のすべての段階で国民が参加するなど、透明性と対話に基づいて進めるのが同法案の原則となっている。ただし、特定の場所を除外することなく、技術的に立証可能な適性に基づいたサイト選定を行うとの方針に従い、ゴアレーベンも新たな選定プロセスにおける候補地の一

つとして残留した。

また、議会審議の中で何点が修正が行われ、選定基準を策定する委員会のメンバー数を当初予定の24名から33名に増員。同委が作成する報告書に対し、政治家委員が投票する権利はなく、意見書の添付のみ許されることになった。

ドイツ原子力産業会議(DAtF)は、廃棄物処分問題に関する30年もの政治的議論の後、超党派の合意により解決に向けた道筋が見えたこと、産業界が16億ユーロ以上を投資してきたゴアレベンが候補地に残ったことを歓迎するとコメント。しかし、代替サイトの選定や処分場建設に要する経費が事業者の負担とされた点については「法的根拠はない」として、これに反対する見解を示している。

【フィンランド】

ハンヒキビ計画、ロシアとの契約 に向け交渉

フィンランド中西部のピュハヨキでハンヒキビ1号機の建設を計画しているフェノボイマ社は7月3日、原子炉供給契約の締結を念頭においたプロジェクト開発協定をロシアと結んだと発表した。

同社は今年2月、大型炉を採用した場合の直接交渉権を「EU-ABWR」を提案する東芝に与えたが、出力を100万～130万kW程度に抑えた場合の直接交渉の相手としてロシアを4月に選択。昨年10月に独E・ON社が同プロジェクトから撤退し、同社が保有していたフェノボイマ社株34%の購入にロシアが関心を示したことが大きく影響したと見られている。フェノボイマ社では今後の交渉もロシアのみに集中すると明言しており、東芝の受注は事実上難しくなった。

【インド】

クダンクラム1が初臨界、インド 初の第3世代PWR

ロシアの技術協力を受けて、インドがタミルナド州で建設中だったクダンクラム原子力発電所1号機(ロシア型PWR、100万kW)が7月13日に初臨界を達成した。福島事故後に激化した地元の反対運動で約2年遅れの起動となったが、昨年3月の地元州政府による建設工事の再開承認、今年5月の最高裁による起動承認判決に基づき、インド初のPWRがようやく運転を開始する。

原子力供給国グループによるインドへの原子力機器禁輸は米国の努力で2008年に解除されたが、ロシアとインドは原子力平和利用分野の包括的政府間協定をそれ以前の1988年に締結。クダンクラムの最初の2基はこの枠組に基づいて02年に着工していた。両国は08年、3～6号機の増設についても新たな協定を結んでいる。

インドで21番目の商業炉となる1号機は同国初の第3世代プラス炉でもあり、出力はこれまで最大だったタラプール3、4号機の2倍にアップ。動的な安全系に加え、受動的残留熱除去システムや水素再結合装置、コア・キャッチャ、急速ホウ素注入システムなどの受動的な安全系を装備。インド原子力発電公社(NPCIL)では、このような多重の安全系により公衆や環境を適切に防護できるとしている。

起動プロセスはインド原子力規制委員会(AERB)による最終認可も含め、法令に基づくすべての規制要件をクリアした後、11日深夜に開始されていた。今後30～45日以内に出力が40万kWになったところでインド南部の送電網に接続。段階的に出力を定格まで上げていく計画だ。

【中国】

住民抗議で燃料工場計画中止

中国広東省江門市が所轄する鶴山市政府は7月15日、同市で計画されていた核燃料コンビナートの建設に反対する住民約800名が市庁舎前でデモなどの抗議行動を繰り広げたことから、住民の意見を全面的に考慮して同計画のキャンセルを決めたと発表した。経済発展を第一に国が行政活動を進めていた同国で、住民運動により開発計画が中止されたのは初めてのことで、政策上の価値観の変化が見て取れると中国情勢に詳しい専門家は指摘している。

江門市環境保護局によると、「中核集団鶴山龍湾工業パーク」と名付けられた同コンビナートは中国核工業集团公司(CNNC)と中国広核集団有限公司(CGN)が約4万9,000ヘクタールの敷地に共同で建設するもので、総投資額は370億元(約6,000億円)。ウランの転換と濃縮工場、および燃料加工工場を備えた世界規模の核燃料生産集約施設となる計画だった。

7月4日に市の開発局は10日間の日程で、同プロジェクトに伴う放射能汚染など6項目のリスク評価についてインターネット等で公示。文書や電話、電子メール等を介して一般大衆からの意見聴取を試みたところ、住民の激しい抗議行動につながったとしている。

特集

原子力安全部会「福島第一事故に関するセミナー」報告書から (第3報) 福島第一以外の発電所で起きた事象

東京電力(株) 長澤 和幸, 東北電力(株) 櫻庭 達幸, 加藤 浩介,
日本原子力発電(株) 戸村 典章, 原子力安全基盤機構 阿部 清治

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震を起因とする地震動と津波は、福島第一原子力発電所だけでなく、福島第二、女川、東海第二の発電所も襲った。発電所間で地震動強さと津波高さには差異があったが、福島第一の1～3号機で炉心が熔融するシビアアクシデントが起きた一方で、福島第一の5号機、6号機と他の発電所の原子炉ではシビアアクシデントを防止できた。福島第一の各号機の状況については特集の第2報で記述してあるので、本報では、福島第一以外の3つの発電所がどのような影響を受けたかを記述する。設備レベル、プラントレベルでの影響の違いを比較分析し、その上で、シビアアクシデントの発生防止にとって何が重要かを考察する。

I. はじめに

事故の分析では、とかく悪かったことばかり注目されるが、事故に至らなかった施設について、なぜ事故を免れたかを分析することも有用である。この観点から、原子力安全部会の「福島第一事故に関するセミナー」(以下、「セミナー」)では、第5回セミナーで福島第一の5号機及び6号機と福島第二の原子炉について、また、第6回セミナーで女川、東海第二の原子炉で起きた事象について、各発電所の従事者による紹介がなされ、それに基づいてシビアアクシデントを防げた理由を分析した。

福島第一の状況は既に多くの事故報告書で紹介されているし、本特集でも第2報で紹介済みである。本報では以下Ⅱ～Ⅳ章において、福島第一以外の3つの発電所が受けた影響を、設備レベル、プラントレベルで記述する。その上で、Ⅴ章で、各発電所の設備とプラントの状況を横並びで比較して、教訓・課題を抽出する。なお、本報での事象の説明や分析結果の説明は、ページ数の制限から概要のみに限られる。より詳細な記述はセミナー報告書¹⁾や安全部会ホームページ²⁾、発電所ごとの資料^{3～8)}にあるので、興味のある方は参照されたい。

A Digest of the Nuclear Safety Division Report on the Fukushima Dai-ichi Accident Seminar(3); Incidents at Fukushima Dai-ni, Onagawa and Tokai No.2 Nuclear Power Stations : Kazuyuki NAGASAWA, Tatsuyuki SAKURABA, Kosuke KATO, Noriaki TOMURA, Kiyoharu ABE.
(2013年 7月31日 受理)

Ⅱ. 福島第二原子力発電所の状況

福島第二原子力発電所には、出力110万kWの沸騰水型軽水炉(BWR)が4基設置されている。1号～4号機まで定格熱出力一定運転中であつたところ、東北地方太平洋沖地震に伴うスクラム信号により全号機が緊急停止した。各プラントの基礎版上で観測された地震動は基準地震動Ss以下であつた。

その後に襲った巨大津波は1号機南側や免震重要棟付近で遡上高さO.P.^a約+15mを記録し、特にO.P.+4mの敷地高さに配置される海水熱交換器建屋に大きな被害を与えた。これにより3号機を除く3プラントの原子炉冷却用の非常用海水ポンプが機能喪失し、その後さらに原子炉の熱の逃がし場となった圧力抑制室の温度が100℃を超え、原子力災害対策特別措置法における原子力緊急事態に該当する事象(原災法第15条該当事象(圧力抑制機能喪失))に至った。

免震重要棟に設置された発電所の原子力防災組織により、大津波警報が発報される中でのプラントウォークダウンによる設備被害の確認と復旧に向けてのロジスティクスの構築、本店原子力防災組織とタイアップした設備調達、そして、発電所員ならびに協力企業の懸命の努力による海水ポンプモータ取替や仮設電源ケーブルの敷設を経て、地震から4日後の3月15日7時15分、全てのプラントの冷温停止が達成された。

^a 福島第一、第二のO.P.とは、小名浜ペイルの略で、O.P.±0mは小名浜港での平均海面高さである。

1. 東北地方太平洋沖地震及び津波の概況

(1) 地震及び津波の規模

東北地方太平洋沖地震において、福島第二の原子炉建屋基礎版上で観測された最大加速度値はいずれも基準地震動 Ss より小さかった(第1表)。

第1表 地震観測記録と基準地震動 Ss に対する最大応答加速度値の比較

観測点 (原子炉建屋敷地内)	観測記録 最大加速度値	基準地震動Ssに対する 最大応答加速度値		
		南北方向	東西方向	上下方向
福島第一	1号機	460 ^{※1}	447 ^{※1}	258 ^{※1}
	2号機	348 ^{※1}	550 ^{※1}	302 ^{※1}
	3号機	322 ^{※1}	507 ^{※1}	231 ^{※1}
	4号機	281 ^{※1}	319 ^{※1}	200 ^{※1}
	5号機	311 ^{※1}	548 ^{※1}	256 ^{※1}
	6号機	298 ^{※1}	444 ^{※1}	244
福島第二	1号機	254	230 ^{※1}	305
	2号機	243	196 ^{※1}	232 ^{※1}
	3号機	277 ^{※1}	216 ^{※1}	208 ^{※1}
	4号機	210 ^{※1}	205 ^{※1}	288 ^{※1}

※1：記録開始から約130～150秒程度で記録が終了

発電所沖合で高さ約9mと推定された津波は、O.P.+4mの海側エリアでは浸水(浸水高O.P.約+7m)が全域に及んだ。また、主要建屋敷地エリア(O.P.+12m)では、南東側の一部から敷地に津波が遡上し、1号機から4号機側への浸水が認められた(第1図)。

なお、後の解析では、波の重なり度合いの違いにより、福島第一を襲った津波高さの方が福島第二に比べて高い結果が得られている。(福島第一：約13m、福島第二：約9m)

2. 地震及び津波の影響

(1) 地震による発電所への影響

地震による影響を調査した結果、耐震安全上重要な施設に外観上の異常は認められていない。

外部電源については、新福島変電所の設備の損傷等があったものの、4回線の外部電源のうち500kV 富岡線1

号の1回線から受電可能であった。原子力発電所の耐震設計においては、地震時には非常用ディーゼル発電機(D/G)からの受電を想定しているが、福島第二では福島第一と異なり外部電源の全喪失には至らなかったため、アクシデントマネジメント策の実施により事象の進展が緩やかであった。

(2) 津波による発電所への影響

発電所海側の海水熱交換器建屋では3号機南側建屋を除き、建屋内部へ海水が浸水し、非常用系のポンプや電源盤が浸水した。一部のポンプモータも被水して機能を喪失している。

また、主要建屋敷地エリア南東側から道路に沿って遡上した津波は廃棄物処理建屋、免震重要棟及び1号機原子炉建屋にまで到達した。1号機原子炉建屋では換気用の給気ルーバから建屋内に浸水し、D/Gまで到達した。

3. 津波到達以降の対応状況

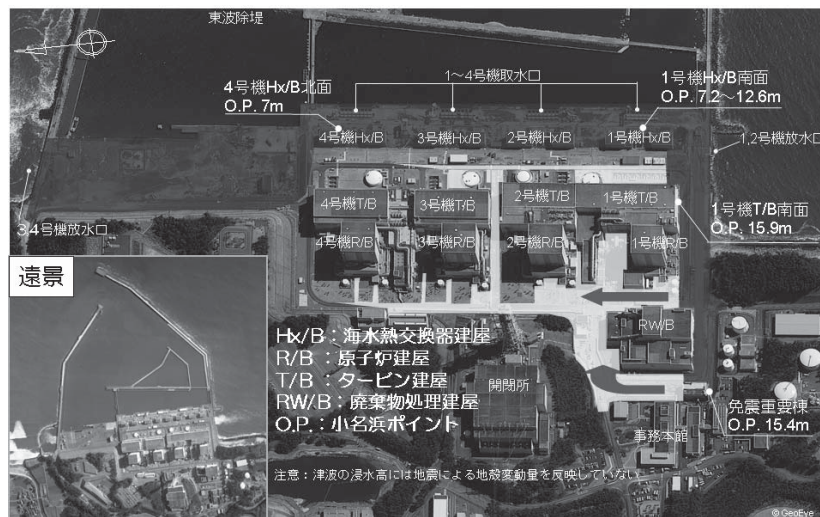
(1) 地震及び津波後の原子炉注水対応

非常用海水ポンプの機能喪失を免れた3号機は、3月12日12時15分に冷温停止を達成している。

津波で除熱機能を喪失した1, 2, 4号機では、事故時運転操作手順書に従い、原子炉隔離時冷却系(RCIC)による注水によって原子炉の冷却が維持された。その後、原子炉圧力が減少した以降は、アクシデントマネジメント策に基づき復水補給水系による代替注水が開始され、原子炉の水位が調整された。

(2) 除熱機能復旧までの格納容器冷却対応

原子炉の注水冷却に伴い上昇した圧力抑制室の冷却として、手順書に記載されている冷却法のほか、運転員の機転により、通常は用いない可燃性ガス濃度制御系の冷却水排水ラインを利用した圧力抑制室注水が実施された。これらの操作により、格納容器の温度及び圧力の上昇を一時的に抑制することができ、原子炉除熱機能復旧



第1図 発電所を襲った津波による浸水状況

への時間的余裕が得られた。

一方、原子炉除熱機能が長期間にわたって回復しないことも想定され、格納容器耐圧ベントのためのライン構成が実施された。復水補給水系による代替注水と格納容器耐圧ベントによる、いわゆるフィード・アンド・ブリードのラインがあらかじめ構成された。

(3) ウォークダウンに基づく復旧計画

地震発生後ただちに、所長を本部長とする発電所原子力防災組織が免震重要棟に立ち上げられ、情報提供や支援要請、事故収束対応を行う体制が整えられた。

まず、現場ウォークダウンにより設備の被害状況を把握する必要があったが、余震と大津波警報が継続するなか、照明がなく、大量の瓦れきや開口部が存在する現場は非常に危険な状態であり、復旧班(所員)を現場へ派遣することができなかった。伝令などが配置され、待避連絡手順が定められたうえで、海水熱交換器建屋等の被害現場の確認が開始されたのは、3月11日の22時頃だった。

現場ウォークダウンの結果を踏まえて復旧方針が定められ、被水したポンプの点検・補修、被水したモータの交換、また津波の影響を受けなかった電源盤からの仮設ケーブルの接続、高圧電源車とモータの接続等による当該ポンプの機能回復が計画された。

(4) 物資の緊急調達

復旧活動を実施する上で必要となるモータ、高圧電源車、移動用変圧器、ケーブルが、本店や柏崎刈羽原子力発電所に依頼されるなどして緊急調達された。要求仕様と合致した資機材については空輸や陸送などあらゆる手段を講じて福島第二へ輸送された。

これらの資機材は、3月13日6時頃までに福島第二に順次到着した。1号機のモータは、三重県の工場から福島空港まで自衛隊機により空輸、さらに福島第二まで自衛隊により陸送が行われた。4号機のモータは柏崎刈羽原子力発電所から協力企業のトラックにより輸送された。また、高圧電源車は、東京電力の各支店送配電部門所有のものが、各支店の社員によって発電所に持ち込まれた。さらに、自社倉庫や協力企業の倉庫などから4プラント合計で総延長約9kmもの仮設ケーブルが調達された。

陸送の過程では、地震後の発電所周辺道路の通行可否の把握、輸送者への伝達などの困難があった。

(5) 除熱機能復旧と冷温停止の達成

津波後、除熱機能復旧にあたり熱交換器建屋へのアクセスが困難な状況であった。偶然にも、工事のため発電所内にあった重機により、漂流物の撤去、アスファルト流出地点の砂利による応急復旧等が行われ、熱交換器建屋へのアクセスルートが確保された。

続いて、非常用機器冷却系ポンプのモータ取替とモータへの仮設ケーブル敷設が行われた。特に総延長約9kmの仮設ケーブルは、配電部門からの応援者を含む

社員と協力企業の作業員を合わせた200人の手で行われ、3月13日23時30分頃までに敷設を完了した。

また、ケーブル敷設と並行して、ポンプの機械部品の状態確認、モータの据付が行われ、1号機を始めとして準備が整ったものから13日20時17分より順次起動された。その結果、14日15時42分に原子炉除熱機能喪失の状態から全号機とも機能回復した。

さらに、圧力抑制室に加え原子炉水を早急に冷却するため、熱交換器を介して原子炉へ注水するラインを用いた冷却が応急的に実施されたことにより、最初の1号機では14日17時00分、最終的に4号機の圧力抑制室の水温が15日7時15分に100℃未満となり、圧力抑制機能喪失の状態から回復した。

(6) 冷温停止達成を支えたもの

様々な取組みと要因に支えられ、冷温停止を達成することができた。特に、中越沖地震を踏まえ設置された免震重要棟は、本復旧活動における中心拠点となり、通信・連絡機能、収納機能等が今回の冷温停止を達成するための収束対応をより円滑なものにしたと推測される。

また、約400名の所員が発電所原子力防災組織での復旧に従事した。限られた食料と厳しい環境のなか、さらに津波で家が流されたり、家族の安否が分からなかったりという状況のなかでの休息のない復旧作業は、自らを顧みず、原子力安全を最優先に復旧に徹するとの所員のプロ意識が成し得たものであると考えられる。この努力がなければ、冷温停止の達成は困難を極めたものになっていたであろう。

Ⅲ. 女川原子力発電所の状況

女川原子力発電所には、3基の沸騰水型軽水炉(BWR)が設置されている。(1号機はBWR-4, 出力52.4万kW, 2号機及び3号機はBWR-5, 出力82.5万kW)

1号機及び3号機が定格熱出力一定運転中、2号機が原子炉起動中のところ、東北地方太平洋沖地震の発生に伴い、全号機の原子炉が設計どおり自動停止した。

地震発生後、発電所外部から供給されている電源は、全5回線のうち1回線が確保され、D/Gも全て健全であった。その後発生した津波は、発電所構内の主要建屋には到達せず、原子炉及び使用済燃料プール(Spent Fuel Pool: SFP)を冷却する機能も健全であったため、原子炉は安定した状態で停止し、発電所の安全性は確保された。

1. 地震・津波の状況

(1) 地震観測記録の分析結果

各号機の原子炉建屋で観測された最大加速度値は、基準地震動 S_s に対する最大応答加速度値を一部上回っていたものの、ほぼ同等であった(第2表)。

地震観測記録に基づき地震応答解析を実施し、全号機

の原子炉建屋の耐震壁の変形及び各階の耐震壁に作用したせん断力を評価した結果、原子炉建屋の機能が維持されていることが確認されている。

第2表 地震観測記録と基準地震動 Ss に対する最大応答加速度値の比較

観測位置	観測記録			基準地震動 Ss に対する			
	最大加速度(ガル)			最大応答加速度値(ガル)			
	南北	東西	鉛直	南北	東西	鉛直	
1号機	屋上	2000 ^{a)}	1636	1389	2202	2200	1388
	燃料取替床(5階)	1303	998	1183	1281	1443	1061
	1階	573	574	510	660	717	527
	基礎版上	540	587	439	532	529	451
2号機	屋上	1755	1617	1093	3023	2634	1091
	燃料取替床(3階)	1270	830	743	1220	1110	968
	1階	605	569	330	724	658	768
	基礎版上	607	461	389	594	572	490
3号機	屋上	1868	1578	1004	2258	2342	1064
	燃料取替床(3階)	956	917	888	1201	1200	938
	1階	657	692	547	792	872	777
	基礎版上	573	458	321	512	497	476

※当該地震計の最大設定値(2000ガル)を上回っているため参考値。

(2)津波の調査結果

発電所の潮位計で観測された津波の高さは、O.P.+ 約 13m^{b)}であり、敷地海側の一部において海水の浸入痕が確認されたが、主要な施設が設置されている敷地高さ(O.P.+ 約 13.8m)を超えていないことが確認された。

2. 冷温停止までの対応操作

(1) 1号機

3月11日14時46分、地震の強い揺れを検知し、原子炉自動停止により全制御棒は正常に全挿入され、15時05分に未臨界が確認されている。地震直後は外部電源が確保されていたが、その後、常用系の高圧電源盤(Metal-Clad Switch Gear : M/C)内で短絡・地絡が発生し、外部電源を受電する起動用変圧器が停止した。これにより給復水系ポンプが使用できなくなったことから原子炉への給水はRCICによりなされ、原子炉の圧力制御は主蒸気管に取り付けられた逃し安全弁(SRV)によりなされた。その後、原子炉の冷却は残留熱除去系

^{b)} 女川でのO.P.とは、女川原子力発電所工事用基準面であり、O.P. ± 0mは東京湾平均海面-0.74mの高さである。ここでは、東北地方太平洋沖地震後に公表された国土地理院による女川発電所周辺における地殻変動(-約1m)を考慮した値を用いている。

(RHR)によりなされ、3月12日0時58分、冷温停止となった(第2図)。

(2) 2号機

原子炉起動を開始したところであり、地震発生直前の状態は原子炉未臨界かつ炉水温度100℃未満であったことから、原子炉自動停止後の3月11日14時49分に冷温停止が確認されている。

(3) 3号機

1号機と同様、原子炉自動停止により全制御棒は正常に全挿入され、3月11日14時57分に未臨界が確認されている。原子炉停止後の原子炉への給水は給復水系により行われていたが、津波により海水ポンプエリアに浸入した海水の影響でタービン補機冷却水系ポンプが停止したことにより、冷却水の供給がなくなった原子炉給水ポンプが手動停止され、RCICによる給水が実施された。原子炉の圧力制御はSRVによりなされた。その後、原子炉の冷却はRHRによりなされ、3月12日1時17分、冷温停止となった(第3図)。

3. プラントの被害状況

地震発生後に確認された主なプラント被害状況を以下に示す。

(1) 1号機重油貯蔵タンクの倒壊

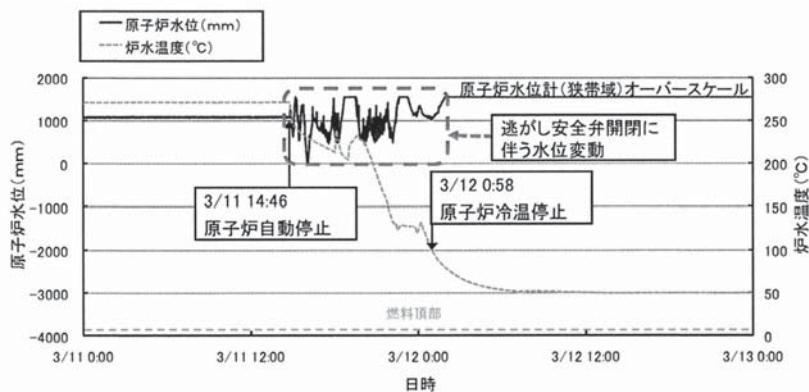
港湾部に設置していた補助ボイラの燃料用の重油貯蔵タンクが倒壊し、1号機取水口(海洋)側に重油が流出し、吸着マットによる重油の吸着回収及びオイルフェンスによる湾外への重油拡散防止措置が実施された。

当該タンクは発電所の主要設備が設置されている敷地高さ(O.P.+13.8m)より低い、O.P.+2.5mの場所に設置されていたことから、津波の影響により倒壊したものと判断された。

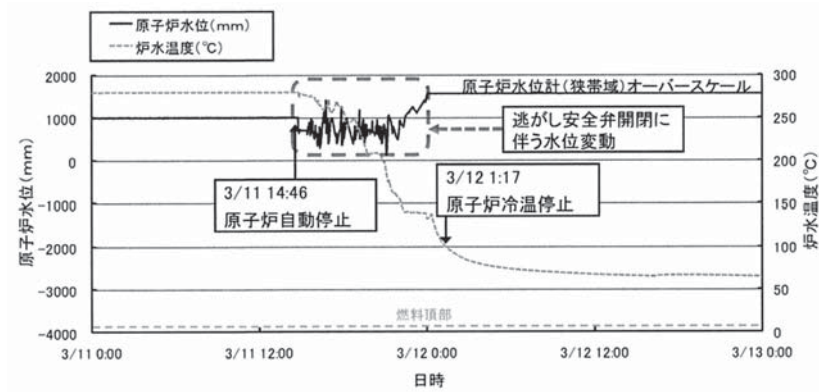
(2) 1号機高圧電源盤の火災

地震後に1号機タービン建屋地下1階の常用系のM/Cからの発煙が確認され、自衛消防隊により消火された。

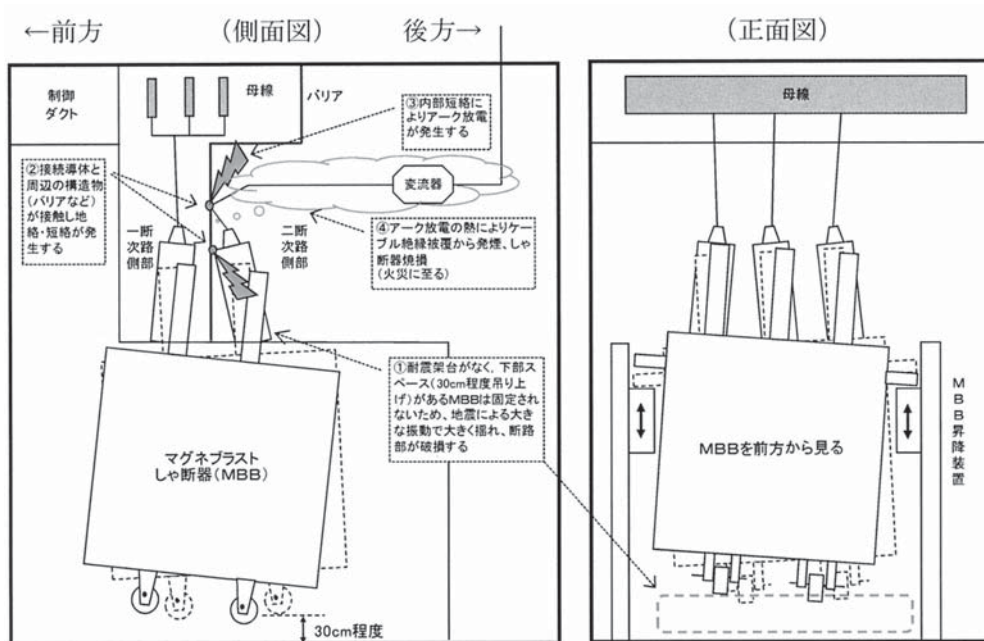
火災の原因は、M/C内で接続位置にて吊り上げられていたしゃ断器が地震により大きく揺れたため、しゃ断



第2図 地震発生後の原子炉水位及び炉水温度(1号機)



第3図 地震発生後の原子炉水位及び炉水温度(3号機)



第4図 高圧電源盤火災発生推定メカニズム

器の断路部が破損し、M/C内で周囲の構造物と接触して短絡等が生じた際に発生した火花により、M/C内ケーブルの絶縁被覆が溶け発煙したものと推定されている(第4図)。火災が発生したM/Cは、横置き型で固定する耐震性の高い構造のしゃ断器への取替えが行われた。

(3) 2号機補機冷却水系ポンプの浸水

2号機原子炉建屋地下3階の非管理区域において補機冷却系熱交換器室に海水が流入し、原子炉補機冷却水B系ポンプ及び高圧炉心スプレイ系(HPCS)補機冷却水系ポンプが浸水していることが確認された。

浸水の原因は、津波による潮位の上昇により、海水ポンプ室に設置している潮位計設置箱の上蓋が押し上げられ、そこから流入した海水がケーブルトレイ及び配管の貫通部を通じて配管等の地下通路に流入した後、さらに建屋側の配管の貫通部を通じて原子炉補機冷却系熱交換器室等に浸水したものと推定されている(第5図)。

流入元となった潮位計設置箱はその後取り外され、開

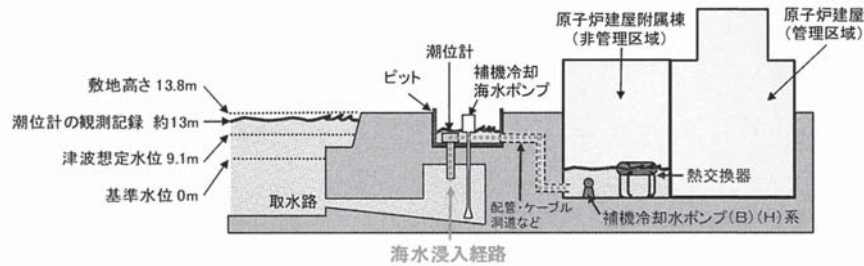
口部に閉止板の取り付けが行われた。

4. 安全機能確保の要因

女川原子力発電所が安全機能を確保できた要因と考えられる主なものを以下に記す。

(1) 敷地高さの設定

敷地の高さについては、1号機の建設計画当初から、津波対策が重要課題であるとの認識が持たれ、東北電力社内に土木工学、地球物理学の外部専門家を含む社内委員会が設置され、議論が重ねられた。当時の評価では、発電所敷地付近における津波高さは3m程度と想定されたが、社内委員会において、「①敷地の高さをもって津波対策とする。②敷地の高さはO.P.+15m程度とする。」と集約され、屋外重要土木構造物と主要建屋1階の高さはO.P.+15m、敷地の高さをO.P.+14.8mと決定された。以降、2,3号機設置許可申請時や土木学会による津波評価技術が開発された際には、その時々最新の知見を踏



第5図 原子炉建屋付属棟への海水流入のメカニズム

まえて津波評価が実施されており、いずれの場合においても想定される津波高さが敷地高さ以下であることが確認されている。地震に伴う地殻変動により、敷地は1m程度沈下し、O.P.+約13.8mとなったが、津波は主要構造物が設置されている敷地の高さを越えることはなかった。

(2)防潮堤の強化

女川2号機の設置許可申請時、津波については数値シミュレーション技術の適用により、想定津波の高さがそれまでの3m程度から9.1mに見直された。これを受け敷地地盤の法面に対し、津波引き波時の安定性等が考慮され、9.7mの高さまでコンクリートブロックによる防護工事が実施された。この工事が事前に実施されていたことにより、津波の第1波だけでなく、第2波以降についても耐え、健全性を維持することができたと考えられる。

(3)海水ポンプ室のピット化

女川では、海水を汲み上げるポンプを海面に近い港湾部に設置するのではなく、13.8mの高い敷地に深さ約13mのピットと呼ばれる穴を掘って設置しており、津波が敷地高さを乗り越えないと被水しない構造にしている。東日本大震災では高さ13mの津波が襲来したが、敷地高さを越えることはなかったため非常用の海水ポンプは冠水することはなかった(浸水による一部ポンプの機能喪失は前述のとおり)。

(4)耐震裕度向上工事の実施

女川では更なる耐震安全性の向上に資するため、自主的に設備の耐震裕度向上工事を行ってきている。工事は配管、電路類の支持構造物への補強等であり、工事箇所は3プラント合わせて約6,600箇所まで2010年6月までに実施されていた。今回、発電所設備の被害が比較的少なかったのは、事前にこれらの工事が実施されていたことも要因の一つであったと考えられる。

° H.P. は日立港工事用基準面で東京湾中等潮位下 0.89m。

IV. 東海第二発電所の状況

東海第二は、電気出力110万kWの沸騰水型軽水炉(BWR-5)である。

東海第二は定格熱出力一定運転中、東北地方太平洋沖地震(茨城県東海村での観測震度「6弱」)により、3月11日14時48分に「タービン軸受振動大(トリップ設定値0.25mm以上)」による主発電機自動停止(タービン主蒸気止め弁閉)の信号により原子炉が自動停止した。この地震の影響により、「外部電源喪失」となったもののD/G3台は使用可能であった。その後の津波の浸水によりD/G冷却用海水ポンプ3台のうち1台が使用不能となったが、その他の安全上重要な設備の機能は維持された。この結果、3月15日0時40分に冷温停止を達成している。

1. 地震・津波の状況

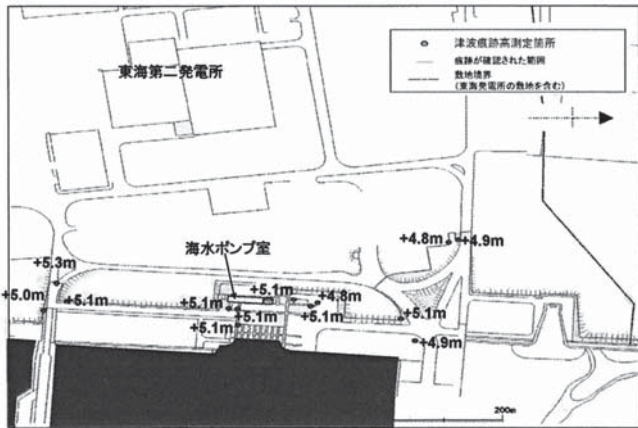
東北地方太平洋沖地震における発電所の原子炉建屋の基礎版上で観測された最大加速度値は当初、設計時及び基準地震動Ssによる最大応答加速度を下回っていた(第3表)。

また、この地震により発生した津波は、3月11日16時50分頃に最大水位約H.P.+5.5m^c(標高+4.6m)が確認された。発電所敷地内の遡上高はH.P.+6.2m(標高+5.3m)程度と評価している。)第6図に津波の浸水状況を示す。

第3表 地震観測記録と基準地震動Ssに対する最大応答加速度値の比較

単位:ガル

		地震観測記録			当初設計時		基準地震動S _s -D		
		NS	EW	UD	NS	EW	NS	EW	UD
R/B	6F	492	481	358	932	951	799	789	575
	4F	301	361	259	612	612	658	672	528
	2F	225	306	212	559	559	544	546	478
	B2F	214	225	189	520	520	393	400	456



第6図 津波の浸水状況

2. 地震・津波の影響

地震による発電所への影響については、耐震重要度が低い(耐震B, Cクラス)タービン設備等の一部の機器に損傷が認められているが、耐震設計上重要な設備(耐震指針Sクラスの設備)の損傷は認められていない。

原子炉建屋の地震観測記録における最大加速度は、当初設計時の設計用地震波(以下、「工認設計波」という)及び基準地震動Ssによる最大応答加速度を下回っていることが確認されている。また、原子炉建屋の地震観測記録による床応答スペクトルは、地下2階～地上6階において一部の周期帯(約0.65s～約0.9s)で工認設計波による床応答スペクトルを上回っているが、主要な設備の固有周期帯では、地震観測記録が工認設計波による床応答スペクトルを下回っており、耐震安全上重要な機器・配管系はおおむね弾性状態にあったと評価されている。

津波による発電所への影響については、地震発生から約5時間後の19時52分に津波の影響による北側非常用

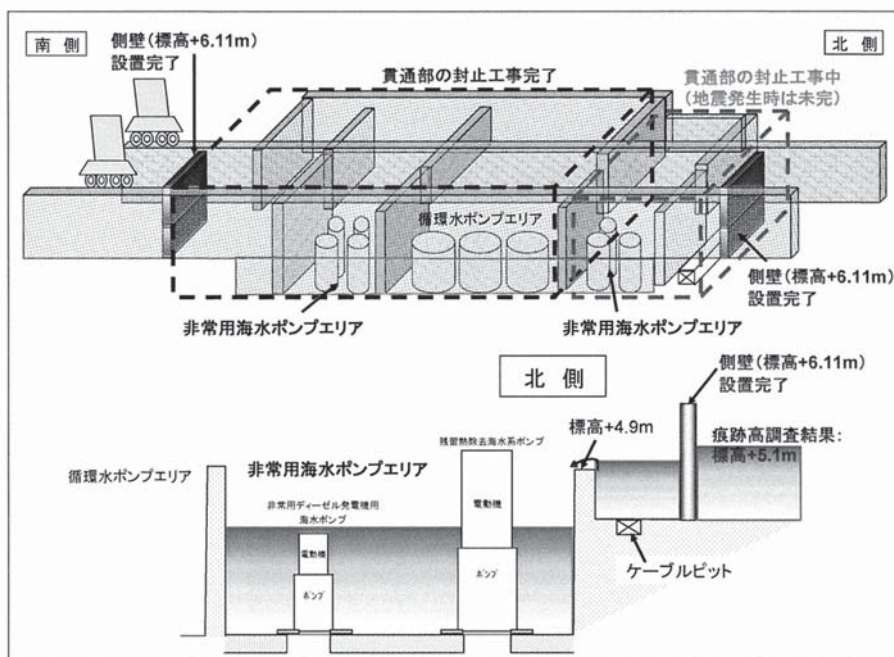
海水ポンプ室の浸水により、D/G冷却用海水ポンプ2Cが自動停止している。

D/G冷却用海水ポンプ及びRHR冷却海水ポンプは、多重性を有し、南北の非常用海水ポンプ室に分離して配置されていたこと、及びRHR冷却海水ポンプはモータ設置レベルがD/G冷却用海水ポンプに比べて高かったことから、北側の非常用海水ポンプ室に海水が浸入したものの、D/G冷却用海水ポンプ2C以外のポンプの水没を免れている。東海第二では、津波対策として側壁の嵩上げ工事(H.P.+5.80m(標高+4.91m)の既設側壁の外側にH.P.+7.00m(標高+6.11m)までの側壁を新たに設置)や、壁の貫通部の封止(浸水を防ぐ)工事が実施されていたが、北側の非常用海水ポンプ室の工事が一部施工中であったことにより、新たに設置した側壁と従来の仕切り壁の間に海水が浸入し従来から設置してある仕切り壁を乗り越え、北側非常用海水ポンプエリアへ浸水したものとしている(第7図)。

3. 地震発生後の発電所の運転状況

東海第二は、地震発生直後にタービン軸受振動大により主発電機が自動停止し、主蒸気止め弁の閉により原子炉が自動停止した。また、地震の影響により3系統の外部電源(275kV:2系統, 154kV:1系統(予備))も同時に喪失したが、3台のD/Gが自動起動し、発電所の安全停止に必要な設備への電源供給に成功している。

原子炉自動停止後の原子炉からの崩壊熱の除熱については、SRVから、圧力抑制プール(S/P)へ高圧の蒸気を導き、S/P水を2系統のRHRにより冷却することにより原子炉からの崩壊熱の除去が実施された。原子炉への注水については、HPCS及びRCICの2系統が確保され



第7図 津波による海水の浸水経路と浸水状況

ていた。

その後、津波の影響により D/G 冷却用海水ポンプ 2C が自動停止したことに伴い、S/P の冷却に用いていた RHR-A 系を停止すると共に、D/G-2C を停止している。D/G-2C が機能喪失したものの、健全な D/G からの電源供給により、原子炉からの崩壊熱除去に必要な機器への電源供給が維持され、原子炉の減圧操作は継続された。

原子炉冷温停止に向けては RHR を 2 系統確保して、より確実な冷却を達成するために、RHR-A 系を運転可能とする電源確保として HPCS D/G からの電源融通や、D/G-2C の復旧もしくは外部電源の復旧などを検討していた。

この際、HPCS については原子炉冷温停止に至るまでは RCIC と合わせ複数の原子炉水位維持手段として確保することが最善と判断、RHR-B 系については格納容器圧力を安定した状態で維持するために S/P 冷却を継続することとし、当面は、SRV による減圧と RCIC (原子炉圧力が低下して、RCIC が運転継続不可能となった後は HPCS) による原子炉水位制御、RHR-B 系による S/P 冷却を継続することとした。

その後、外部電源 (154kV) の復旧可能連絡を給電所より受けた (3月13日 10時40分) ことから、RHR-A 系を停止時冷却モードとして使用することとし、所内電源の 154kV からの受電準備を開始、線路充電 (3月13日 12時32分) を経て準備が整った後に、受電操作を実施した (3月13日 19時37分)。外部電源 (154kV) 復旧後、RHR-A 系の停止時冷却モードによる運転を開始 (3月14日 23時43分)、原子炉を冷温停止とした (3月15日

0時40分)。

なお、外部電源が復旧した 3月13日には、HPCS での原子炉水位維持と SRV による減圧、RHR-B 系による S/P 冷却の継続により原子炉圧力は低下し、安定 (圧力 1MPa 以下、水位は燃料有効長頂部上 4m 以上) な状態を保っていた (第 8 図)。

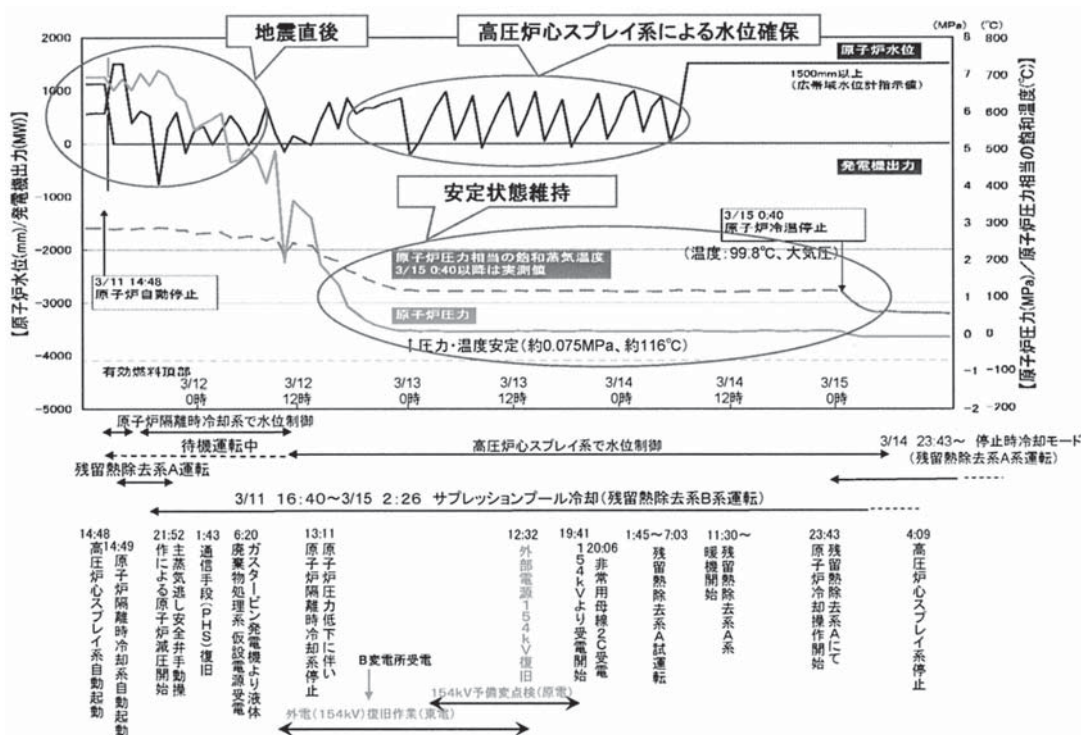
また、地震直後の原子炉への注水は HPCS ポンプ及び RCIC ポンプにより実施され、初期段階のポンプ水源を復水貯蔵タンク (Condensate Storage Tank : CST) としていたため、S/P の水位が上昇、外部電源喪失状態で廃棄物処理系での継続的な受け入れができないこと、復水貯蔵タンクの水位回復も望まれたことから、緊急安全対策建屋に設置されていたガスタービン発電機より、廃棄物処理系への電源融通も実施されている。

4. 津波想定に関する経緯とその対策

東海第二の津波評価とその対策については、原子炉設置許可申請以降、当時の知見、国内の津波評価に関する動向を踏まえ、その都度、自主的な評価を行うと共に、対策が講じられてきている。

東海第二の設置許可申請当時は津波に関する明確な基準がなく、既往の文献、近隣の最高潮位の記録等を基に 1958 年の狩野川台風による潮位 H.P.+2.35m を設計想定としていた。

その後北海道南西沖地震や土木学会の津波評価技術の発刊等、新たな知見の反映と対策を継続して実施してきている。東北地方太平洋沖地震発生時にも新たな知見



第 8 図 地震直後から冷温停止までの原子炉関連パラメータ

に対する対策工事が実施されているところであった。その前提条件は、2007年に茨城県が公表した「県沿岸における津波浸水想定区域図等」に用いられた津波規模を津波評価の新知見として反映し、津波評価を行い、H.P.+6.61mの評価結果を得ると共に、非常用海水ポンプ室の側壁をH.P.+7.00mまで嵩上げするといったものであった。一部の機器の浸水は免れなかったものの、この対策工事が奏功し、東北地方太平洋沖地震に伴う津波から安全上重要な機器を防ぐことができた要因となっている。

V. 各発電所で起きた事象の比較

本章では以下、各発電所の各号機が、地震・津波によってどれほどの影響であったか、それはどのような安全対策を採ってきた結果なのかを記述する¹⁾。

1. 地震動

各発電所で観測された地震動は、福島第一と女川で部分的に基準地震動 S_s に対する最大応答加速度を超えた値があったが、おおむね最大応答加速値以内であり、それを超えているものも極端な超過ではない。設計で想定していた最大値を超えたものがあるということ自体は、設計での想定が不十分であったことを意味するから、もちろん課題あるいは教訓となる事実である。しかし、これまでに得られた情報に基づく限り、施設及び設備への重大な影響はなく、耐震設計における裕度(実耐力)が安全確保に大きく寄与したと言える。

ただし、外部電源系に関しては、これは設計での想定通りであるが、ほとんどの発電所で地震動によって大きな被害が出ている。福島第一では7回線全て、福島第二では4回線(1回線は点検停止中)のうち2回線、女川では5回線のうち4回線、東海第二では3回線全てが喪失している。外部電源が生きていれば、シビアアクシデント防止対策の多くが実施可能であり、また、全てが喪失しなければ、復旧にも大きな役割を果たせる。外部電源系の信頼性向上も含め、全体として電源系の信頼性が高くなるのが望ましい。(こうした観点から、原子力規制委員会(以下、「規制委」)は既に、新基準による要求としても事業者の自主努力としても、合理的に達成可能な外部電源系の信頼性向上を求めている。)

2. 津波

津波については、従来は明瞭な規制基準がない状況下で、各発電所は新しい知見あるいは経験が得られるごとに想定津波高さを高め、必要と考えられる対策を講じてきた。即ち、まずは設置許可申請時に、次いで、2002年に土木学会による津波高さ評価手法が公表された際に、そして、福島第一、福島第二、東海第二については2007年に福島県及び茨城県が県としての防災対策のために津波を独自に想定した際に、必要に応じて見直しを行った。また、それに対応して津波対策も強化してき

た。

しかしながら、各発電所を襲った津波はそれまでの想定をはるかに上回るものであり、福島第一での安全上重要な設備の故障・損傷もほとんど津波によるものであった。(こうした観点から規制委は、新基準において厳格な津波対策を要求している。)

3. 被害状況

福島第一も含め、各発電所の各施設が地震と津波でどのような損傷を受けたかについては、第4表に示す。各発電所の被害状況をまとめると次のようになる。

福島第一

1～3号機は出力運転中、4～6号機は停止中であった。全号機で、地震動によって外部電源が全喪失した。6号機では空冷D/Gが生き残ったが、1～5号機では津波により全D/Gが喪失した。1号機及び2号機では、津波によって全直流電源も喪失した。海水冷却系は全号機で損傷した。結果として、1～3号機で炉心が溶融する事故になった。4号機は原子炉内に燃料はなかったが、3号機から流入した水素によって原子炉建屋内で水素爆発が起きた。5号機、6号機は停止中で時間余裕があった。6号機は生き残ったD/Gの活用によりシビアアクシデントを免れ、5号機は整備済みのAM(6号機からの電源融通)によりシビアアクシデントを免れた。

福島第二

全4機が出力運転中であった。外部電源は4回線のうち1回線が生き残った。1号機及び2号機のD/Gは津波により全て喪失したが、3号機では3基中2基が、4号機では3基中1基が生き残った。直流電源系は健全であった。

女川

1号機及び3号機は定格運転中、2号機は定期検査中で起動操作中であった。外部電源は5回線のうち1回線が生き残った。D/Gについては、1号機及び3号機は全て健全であった。2号機は津波の影響により補機冷却水系の一部が喪失したため、3基中2基が機能を喪失したが、1基が生き残った。直流電源系は健全であった。

東海第二

原子炉は定格運転中であった。地震によって外部電源が3回線全てで喪失し、津波によりD/Gは3基のうち1基が喪失したが、他の安全機能は維持された。非常用蓄電池(RCIC電源)の充電は別電源系から融通し、機能が維持された。直流電源系は健全であった。

VI. まとめ

既に本特集で何度も記述したことであるが、安全確保において施設外誘因事象を考えることが重要である。ここでは、様々な施設外誘因事象に対する防護設計を行うにあたって、設計基準としてどれほどのハザードを想定

第4表 福島、女川、東海各サイト・各プラントにおける地震・津波による設備被害状況¹⁾

(一部被害設備は「健全な数/全数」で表示)

サイト	号機	外部電源 ^{*1}	D/G (地震による 喪失はなし)	直流電源	電源車	海水 冷却系 ^{*6}	M/C(高圧電源盤) (()内は工事中系統)		P/C(低圧電源盤) (()内は工事中系統)		大規模な 燃料損傷
							非常用	常用	非常用	常用	
福島 第一	1号機	275kV:× 66kV:× (全7回線)	× ^{*2}	×	一部活用	×	×	×	×	×	損傷
	2号機		× ^{*2}	×		×	×	×	2/3	2/4	
	3号機		× ^{*2}	○→枯渇		×	×	×	×	×	
	4号機		× ^{*2}	×		×	×	×	1/2(1)	1/1(1)	健全
	5号機		× ^{*2}	○		×	×	×	×	2/7	
	6号機		1/3 ^{*2}	○		×	○	×	○	×	
福島 第二	1号機	500kV:1/2 66kV:× (全4回線)	× ^{*3}	3/4	一部活用 (外電、D/G確保)	×	1/3	○	1/4	○	健全
	2号機		× ^{*3}	○		×	○	○	2/4	○	
	3号機		2/3 ^{*3}	○		D/G(H)用:○ RHR用:1/2	○	○	3/4	○	
	4号機		1/3 ^{*3}	○		D/G(H)用:○ RHR用:×	○	○	2/4	○	
女川	1号機	275kV:1/4 66kV:× (全5回線)	○	○	(外電、D/G確保)	○	○	1/2	○	○	健全
	2号機		1/3 ^{*4}	○		D/G(H)用:× RHR用:1/2	○	○	○	○	
	3号機		○	○		○	○	○	○	○	
東海第二		275kV:× 154kV:× (全3回線)	2/3 ^{*5}	○	予備で確保 (D/G確保)	D/G用:2/3 RHR用:○	○	○	○	○	健全

※1: 福島第二、女川、東海第二では1日～数日で外部電源の一部が復旧。福島第二の66kVの1回線は点検停止中。

※2: 1、4号機の1/2、5号機はD/G本体の被水ではない(間接的要因(補機冷却系、M/C等関連機器水没)による喪失)、2、4、6号機B系は空冷

※3: 1号では原子炉建屋付属棟のDG送風機給気口等から浸水しD/Gの送風機を通じてD/Gに到達、2～4号では原子炉建屋付属棟への浸水はほとんどなし(間接的要因(補機冷却系、M/C等関連機器の水没)による喪失)

※4: A系は健全、海水ポンプ室内開口部(潮位計)からの浸水による原子炉補機冷却水B系ポンプ及びHPCS補機冷却水系ポンプ喪失

※5: 海水ポンプ室への浸水によりD/G冷却用海水ポンプ2Cが自動停止、D/G-2Cを手動停止

※6: 海水系統の機能喪失(補機冷却水系ポンプの機能喪失を含む)

海水ポンプ設置場所: 福島第二は湾岸部熱交換器建屋内(大物搬入口等から浸水(3号機南側建屋を除く))、

女川は敷地高さから掘ってピット化した海水ポンプ室(配管、ケーブル洞道経由で原子炉建屋付属棟(非管理区域)内に浸水)、

東海第二は湾岸部の側壁を津波対策で嵩上げた海水ポンプ室(一部工事未完の壁貫通部より浸水)に設置

するのか、どこまでの防護設計を施すのかという問題がある。

設計や規制に係る基本的問題については本特集第4報で採り上げるので、ここでは耐震・耐津波のための良好事例だけを採り上げることにする。

福島第一5号機は、交流電源が全て喪失したが、AMとして整備されていた6号機からの電源融通があって最悪の事態には至らずに済んでいる。

福島第二においてもAM策による事象進展の緩和により炉心溶融を回避できた。

女川では、中央制御室に手すり棒をとりつけ、地震時にも安定した状態で監視・制御ができるようにしていたこと、津波に対しては海水ポンプ室をピット化して大きな引き波があっても取水が可能にであったこと等が紹介された。第6回セミナーの参加者からは、「今日の話聞いた個人の感想だが、女川は必然的に被害を免れたと感じた。」との発言があった。

別の参加者の発言も引用しておく。「今日の発表を聞いて、東海第二が茨城県の津波評価を基に工事をやって

きたこと、女川が引き津波に取り組んできたこと、これらを継続的にやってきたのが良かったのではないかと。両プラントとも止水工事は大変ではあるがやってきた。一部、配慮不足や工事未了等の抜けがあっても、それが事態の収束につながったのではないかと。」

地震・津波がもし20年前に襲っていたら、東海第二も福島第一5号機も、より厳しい状況に面していた可能性がある。「継続的改善」が間に合った例である。

もう一つ述べておきたいのは「設置者に第一義的責任」という原則である。設置者が安全設計と日常的な安全管理に全責任を負っているのは当然として、重大な事象が発生したときの対応も大事である。例えば、東海第二では、D/G-2Cが停止した際に、後から考えれば当たり前であるが、他のポンプ等の状況を、津波等に注意しながら最初に確認し、また、被害の拡大防止、リスクを抑制しつつ事象を収束するための手順の検討を行っている。こうした対応は東海第二に限らず行われた。現場のことは現場の人が一番よく知っており、また、地震や津波に限らず異常な状態に対して現場確認が原則である。異常

状態が進展するほど、マネジメントの役割が大きくなる。設計を超える範囲においても、現場の状況を正確に把握し適切に対応することが、それ以上の異常状態の拡大を防止し、影響緩和に資し、事象の収束につながることを再認識する必要がある。

—参考資料—

- 1) 日本原子力学会原子力安全部会, 「福島第一原子力発電所事故に関するセミナー報告書—何が悪かったのか、今後何をすべきか」, 2013年3月.
- 2) 日本原子力学会原子力安全部会ホームページ,
<http://www.aesj.or.jp/~safety/>
- 3) 東京電力, 「福島原子力事故調査報告書」, 平成24年6月20日.
- 4) 長澤和幸, 「福島第二原子力発電所の状況について」, 第7回セミナー資料, 平成24年11月2日.
- 5) 東北電力, 「東北地方太平洋沖地震およびその後に発生した津波に関する女川原子力発電所の状況について」, 平成23年5月.
- 6) 東北電力, 「東北地方太平洋沖地震発生後の女川原子力発電所の状況および安全対策について」, 第6回セミナー資料, 平成24年10月22日.
- 7) 日本原子力発電, 「東海第二発電所における平成23年東北地方太平洋沖地震時に取得された地震観測記録の分析及び津波の調査結果に係わる報告書」, 平成23年5月.
- 8) 日本原子力発電, 「東北地方太平洋沖地震発生後の東海第二発電所の状況について」, 第6回セミナー資料, 平成24年10月22日.

著者紹介



長澤和幸(ながさわ・かずゆき)
東京電力(株)
(専門分野・関心分野) 設備設計, 原子炉
保全



櫻庭達幸(さくらば・たつゆき)
東北電力(株)
(専門分野) 運転・保守管理



加藤浩介(かとう・こうすけ)
東北電力(株)
(専門分野) 炉心・燃料管理



戸村典章(とむら・のりあき)
日本原子力発電(株)
(専門分野) 耐震設計

阿部清治(あべ・きよはる)

本誌, 55(9), p.498 (2013) 参照.

目安箱への投書のご案内

日本原子力学会 編集委員会

編集委員会は、読者・会員・投稿者・査読委員等からのご意見、ご提案をいただき、よりよい学会誌・論文誌編集活動を目指すべく、意見窓口「目安箱」を設けております。

- ・学会誌・論文誌の企画、編集、掲載記事や論文に関すること。
- ・論文査読方針・審査方針およびシステムに関すること*
- ・新刊図書の書評の推薦

などについてのご意見・ご要望がございましたら、学会ホームページ

<http://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>, または E-Mail aesj2005meyasu@aesj.or.jp にてお寄せください。編集委員会にて検討後、担当者より回答させていただきます。

学会誌、論文誌の編集活動への皆様の積極的なご参加をお願いいたします。

* 個々の査読コメント等に関するお問い合わせ、ご意見等については受け付けかねますので、ご了承ください。

特集

原子力安全部会「福島第一事故に関する
セミナー」報告書から
(第4報)事故で明らかになった課題

日立 GE ニュークリア・エナジー(株) 守屋 公三明, 原子力安全基盤機構 阿部 清治

福島第一原子力発電所(以下、「福島第一」)の事故は、安全設計、シビアアクシデントマネジメント、安全規制という、原子力安全に直接関係する活動において様々な課題があることを明らかにした。また、PRA、運転経験、安全研究が、こうした安全確保活動に必ずしも十分には寄与していない状況も明らかにした。本報は、事故時の事実関係に基づいて、技術的な課題を可能な限り明らかにし、「何が悪かったのか、今後何をすべきか」について論じる。

I. はじめに

原子力安全部会の「福島第一事故に関するセミナー」(以下、「セミナー」)については、その成果を取りまとめた報告書¹⁾の要点を全5報のシリーズ報告にまとめている。第1報でセミナー報告書の概要を紹介した後、第2報と第3報では、東北地方太平洋沖地震による地震動と津波によって影響を受けた4つの原子力発電所(福島第一、福島第二、女川、東海第二)で生じた事象を紹介し、その比較分析を行った。本報(第4報)は事故で明らかになった課題、言い換えれば、セミナー及びセミナー報告書の副題である「何が悪かったのか、今後何をすべきか」について論じる。

まずはⅡ章及びⅢ章で、安全設計の基本思想である深層防護についての説明と、深層防護に沿っての福島第一事故の重要課題を整理する。次いでⅣ～Ⅶ章で、安全設計に関する課題、安全規制に関する課題、PRA、運転経験、安全研究に関する課題について取りまとめる。

Ⅱ. 深層防護と安全確保策の関係

安全確保の最大の目的は、原子力施設の周辺における公衆を、放射線災害から守ることである。その基本となる考え方は深層防護(Defense in Depth)の思想である。深層防護とは、ひとつは多段の安全対策を用意しておくことであり、もうひとつは、各段の安全対策を考える時には他の段で安全対策が採られることを忘れ、当該の段

だけで安全を確保するとの意識である。すなわち、ある段の対策を考えるに当たっては、後段の対策があるとは思わずに(後段を否定して)高い信頼性のある対策を用意する。一方で、それにもかかわらず後段の対策を考える時は、前段の対策がどのように嚴重なものであってもそれが突破されると想定して(前段を否定して)対策を用意することである。

これをリスク論的な言葉で言い換えれば、多段の安全対策を用意する、各段の安全対策はそれぞれ高い信頼性をもって実施されることを確認する、その結果、全体として十分に高い信頼性をもった安全対策になるというものである。

原子力発電技術の開発当初から「深層防護」を安全の基本原則とし、この原則を工学的に達成することを安全研究と安全設計の目標としてきた。原子力発電所についての深層防護は、一般には次の5つのレベルからなるとされている。

- 第1のレベル：異常・故障の発生防止
- 第2のレベル：異常・故障の「事故」への拡大防止
- 第3のレベル：「事故」の影響緩和
- 第4のレベル：「設計基準を越す事故」への施設内対策
- 第5のレベル：「設計基準を越す事故」への施設外対策

ここでしばしばカギ括弧付けで表現する「事故」とは「設計基準事故(Design Basis Accident: DBA)」のことである。「設計基準を越す事故(Beyond DBA: B-DBA)」としては、DBAは超えたがまだ炉心溶融には至っていないものから、炉心溶融が起きてしまったもの(シビアアクシデント)まで含まれる。B-DBAも含めて、シビアアクシデントに至る前までを第3のレベル、シビアア

A Digest of the Nuclear Safety Division Report on the Fukushima Dai-ichi Accident Seminar (4); Issues Identified by the Accident: Kumiaki MORIYA, Kiyoharu ABE.

(2013年 7月31日 受理)

クシデントに至ってからを第4のレベルと分類する人もいる。いずれにしても、第4のレベルは設計基準を超えた状態であるから、ここでの対策はアクシデントマネジメント(AM)が中心である。なお、AMのための施設外対応(資機材の搬入とか、福島第一の事故後に新たに考えられている可搬式安全設備の用意など)は第4のレベルに分類すべきであろう。第5のレベルは防災対策である。

深層防護に基づく安全確保は、単なる設備設計の要求だけでなく、不断の設備管理から万一の事故における適切な管理・運用を含むものである。その結果として十分な安全性が確保されたかは、確率論的リスク評価(Probabilistic Risk Assessment:PRA)などを用いて確認されてきた。(時として、深層防護かリスク情報活用かという二者択一的な議論がなされることがあるが、PRAはむしろ、深層防護がどれほど適切に達成されているかを測る手法である。)更に、リスクが小さくてもリスクの低減に効果があると判断された場合は、設備の改善や運用手順の改善などの安全性向上の努力が払われてきた。

機器等の故障が、不特定の誘因によってランダムに起きる場合には、プラント設備の多重化及び多様化にAM設備を加えることで、5段階の深層防護の体系を実現することに成功したと考えられる。しかしながら、福島第一の事故では、設計の想定を超えるような地震や津波によって、安全機能を有する機器等に共通原因故障が生じ、その結果として炉心が溶融し、大量の放射性物質が環境中に放出された。このことは、個々の誘因事象、特に、施設外誘因事象に対して十分適切な深層防護対策がなされていたか否かという問題を提起した。

Ⅲ. 深層防護の各レベルで見られた問題点

福島第一事故であらわになった諸課題は、深層防護のほとんどのレベルに関係している。まずは、レベルごとに課題を整理する。

第1のレベルは、そもそもの発端となる異常や故障等のトラブルの発生を防止することである。そのためには、実証された技術に基づいて十分裕度のある設計を行うこと、必要に応じ地震や飛来物等の個々の誘因事象に対する防護設計を行うこと、高い品質管理システムに基づいて保守管理を行うこと等が図られる。しかしながら、福島第一事故では、施設外誘因事象のひとつである津波によって、多数の安全設備が同時に機能喪失してしまった。

第2のレベルは、トラブルが起きた場合にそれを直ちに検知して対応することにより、それが事故に発展するのを防ぐことである。具体的には、運転パラメータがある許容範囲を超えた時に制御棒を自動挿入して原子炉を停止すること等である。これについては、現時点までに

得られている情報からは何の問題も見当たらない。地震後津波が襲来するまでは、地震計の作動によって原子炉は自動停止し、外部電源喪失にはなった(運転時の異常な過渡変化の状態になった)がいずれの非常用ディーゼル発電機(D/G)も立ち上がって、施設は設計の想定どおりに制御された。

第3のレベルは、万一の事故に備えて、その影響の緩和を図ることである。例えば、原子炉冷却系の配管が破断し、冷却水が流出して炉心が空だきになるような事故(冷却材喪失事故。Loss-of-Coolant Accident:LOCA)に対して非常用炉心冷却系(Emergency Core Cooling System:ECCS)を用意しておくこと等である。しかしながら、福島第一では、想定していた高さを超える津波により、号機によって程度の違いはあるが、交流電源、海水冷却系、さらには直流電源までも喪失して、多くの安全設備が働かず、炉心が溶融する事故になった。

第4のレベルはAMであり、万一設計基準を超すような事故状態になった時に備えて、それがシビアアクシデントになるのを防止するための対策(フェイズ1のAM)、シビアアクシデントになってしまったあとにその影響を緩和するための対策(フェイズ2のAM)が用意されていた。こうしたAMの幾つかは、事故時に有効に働いた。しかし、幾つかのAMは、地震や津波が施設内外にもたらした影響や、シビアアクシデントがもたらした環境条件、特に、高い放射線場において、実施が困難になり、予定していた効果を挙げられなかった。

第5のレベルは防災対策である。我が国の防災は本質的に実効性がないものであった上、事故時の組織間連携にも問題があることが如実に明らかになった。また、JCO事故の反省項目、例えば災害弱者への配慮の問題等も放置されていたことが明らかになった。

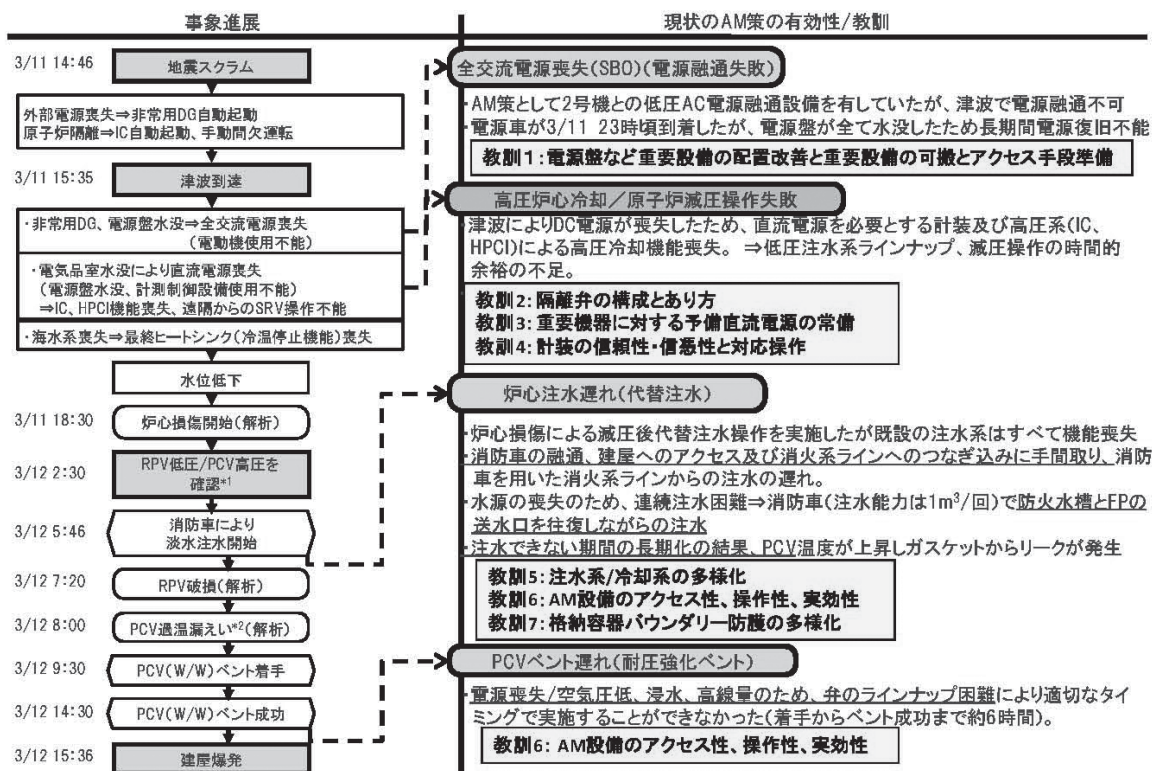
Ⅳ. 安全設計に関する課題

福島第一事故は、地震によって外部電源が喪失し、その約40分後の津波によってD/Gと最終ヒートシンクが喪失し、その結果、「原子炉の減圧」と「原子炉への注水」が遅れて炉心の溶融になったものである。その過程では特に、直流電源の喪失、電源盤の浸水が、あらゆるAMを阻害し、原子炉及び格納容器への注水が長期間喪失した。こうしたことから、最終的には格納容器の破損と放射性物質による土壤汚染につながった。

本章では、プラントの安全設計という観点(AMを含む)から福島第一事故の教訓を見出すことを試みる。

1. 福島第一事故の事象分析と安全設計上の教訓

福島第一事故の分析によって安全設計に係る教訓を見出すことは、外的誘因事象に対するプラントの安全性の向上にとって重要である。セミナーでは、第1図に示すような福島第一事故の事象分析から7つの設計上の教訓



第1図 福島第一発電所事故の事象進展と抽出された教訓(1号機の例)

を見出した。なお、各教訓中に記載された対策の事例は、現時点で有効と考えられる事例であり、実際のプラントへの適用では十分な検討と更に有効となる対策を考えるべきである。

教訓1：電源盤など重要設備の配置改善と重要設備の可搬とアクセス手段の準備

設計の想定を超えた津波は、護岸を乗り越えてプラント全体を約5m水没させた。その結果、吸排気口あるいは水撃で打ち破られた扉やシャッターより海水が建屋の1階に浸入し、階段などから地下階に落水した結果、非常用発電設備や直流電源並びに電源盤の機能を喪失させた。

このような設計の想定を超える津波の脅威に対しては、重要機器を可能な限り高位置に配置すること及び重要機器・施設を水密化すること(発生防止策)は有効である。しかしながら、給排気口を全くなくすることはできないし、想定を上回る水撃力を否定できないことから、これらの対策はある高さ以上の津波に対して有効性を失う。したがって、これらの対策とは別に、想定高さを超えた津波やその他の外部リスクに備えて、別の場所からの可搬もしくは仮設による復旧対策(事象緩和策)が重要である。電源車、電源盤、注水系などを、高台や防災棟(完全水密建屋など)に常備し、緊急時のアクセスのために、緊急取り付け口の確保とアクセスルート作成のための重機の常備が必要である。

教訓2：隔離弁の構成とあり方

BWRの現行の設計では、非常用復水器(IC)あるいは原子炉隔離時冷却系(RCIC)は原子炉隔離時の冷却設備として設置されており、これらが機能喪失をした場合でも高压注水系(HPCI)によるバックアップや原子炉減圧から低压注水系で炉心を冷却するという多段の防御が取られている。したがって、系統内で破断を検知した場合(検知不能の場合も含む)は、この系統は隔離を優先して炉心冷却は別の系統ですることになっているため、1号機では直流電源喪失(検知不能状態が発生)で隔離信号が発生し、その時点では維持されていた交流電源により隔離弁が動作して、ICが機能喪失した可能性が高い。隔離弁の動作に関しては、シビアアクシデントまで考えれば隔離よりも冷却機能優先の考え方もあるかもしれないが、設計基準事故時のバウンダリー機能確保やシビアアクシデント時にも隔離が必要な事態も想定すると、隔離優先を基本としつつ必要な場合は隔離弁を手動もしくは遠隔で開ができるように、例えば、隔離弁の格納容器外側設置、予備の直流電源の常備を追加することが必要である。

教訓3：重要機器に対する予備直流電源の常備

福島第一事故では直流電源の喪失あるいは枯渇によって計装が喪失し、プラント状態の把握ができなかった。この結果、初動の遅れ、適切な回復操作に失敗をした。

また、逃し安全弁 (SRV) の開放には直流電源でアクチュエータの弁を開かなければならないが、直流電源を津波で喪失あるいは長時間の高温待機運転中に直流電源が枯渇してしまったことから SRV による減圧が遅延してしまっただけでなく、さらに、RCIC、HPCI などの注水系の起動信号にも直流電源が必要である。したがって、本設の直流電源の他に可搬の直流電源もしくは直流電源への充電設備を備えておき、万一本設の直流電源が機能喪失した場合でも、SRV や事故時に必要な計装制御に速やかに電源を供給できるようにしておくことが重要である。なお、予備の直流電源の容量は、本設並みの容量は必ずしも必要ではなく、初動を迅速に行うことが重要であることから、非常時の運搬性に配慮したものであることが優先する。

教訓 4：計装の信頼性・信ぴょう性と対応操作

福島第一事故では事故が深刻になるにつれて原子炉水位、圧力、温度などの AM 実施上必要な計装の信頼性/継続性に問題が生じた。また、計測器の適用レンジも使用環境条件も大幅に超えてしまったことから、計測値の信ぴょう性が失われてしまった。シビアアクシデント時のプラント状態の把握のためには、一定の精度と十分な信頼性のある計装が必要である。なお、福島第一の事故ではデータが連続して採取できなかつたために、データの全体挙動を把握できず、その異常性に気がつきにくかつた。こうしたことも踏まえて、データを継続的に採取できるようにすることも重要である。

また、シビアアクシデント時の厳しい環境では計器のドリフトや誤作動は起こりうるため、重要な計器に関しては信ぴょう性を確認する別の手段を確保することは重要である。さらに、信ぴょう性が無いと判断した場合の AM 手順と訓練も重要である。

教訓 5：注水系/冷却系の多様化

水密強化やプラント内機器配置等の対策は当然重要であるが、設備設計の条件を超えた「想定外」での機能喪失も考慮して、プラント外からの救援/支援も含めた多様な手段を備えておく必要がある。そこでは、サイト内、サイト外からの水の融通を含め、水源の多様化が重要である。また、設計想定を超えたところでは常設の設備が機能喪失する可能性まで考慮して、可搬式や仮設の設備も含めて多様に備えることが重要である。かつ、多様なシナリオに対応できるように、柔軟性のある AM 設備と手順を整備し、日頃から教育訓練をしておくことが重要である。

教訓 6：AM 設備のアクセス性、操作性、実効性

福島第一事故では以下のようなアクセス性と操作性の問題事例が見られた。

- ・圧力抑制プール (ウェットウェル：W/W) ベント弁がサプレッションチェンバ近傍に設置されていたために、手動開を実施する上でアクセスと操作が困難
- ・外部からの注水実施時に繋ぎこみ先へのアクセスが困難
- ・外部からの注水にバイパスがあり、炉心への有効な注水に遅れが発生

また、実効性の問題事例としては以下が見られた。

- ・ラプチャディスクは誤操作によるバウンダリー機能喪失を防止するために設置されていたが、タイムリーな W/W ベント実施を阻害

以上のアクセス性を改善するために、以下の例に示すような措置を講じておくことが重要である。

- ① 遠隔手動ハンドルの追加による操作時の被ばくを低減
 - ② 代替注水の注水口の分散配置による接続が容易な構成
- また、操作性を改善するための措置の例として以下を行っておくことが重要である。

- ① 常用負荷への隔離弁追設によるバイパス対策が容易な構成
- ② 燃料プールへの代替注水専用ライン追設による注水が容易な構成

さらに、実行性を改善するために、以下の対策(例)を行うことが重要である。

- ① ラプチャディスクをバイパス可能な構成もしくはラプチャディスクの削除

教訓 7：格納容器バウンダリー防護の多様化

福島第一事故で土壌汚染を発生した原因は、代替注水遅れ及び格納容器ベント遅れにより、ベント前に格納容器過温リークが発生したことが土壌汚染の主要因と考えられる。一方、W/W ベントによるスクラビング効果は大きな汚染源にはなっていない。したがって、過温破損の対策を講じることが重要である。以下は、その具体例である。

- ① 注水機能の強化により過温シーケンスを回避し、過圧シーケンスは W/W ベントによりバウンダリー防護
- ② 非金属部の直接冷却 (原子炉ウエルへの水張、注水等) で過温シーケンスへの余裕向上

V. 安全設計に関する特に重要な課題と対策

1. 課題の整理

深層防護の観点から安全設計の問題を考えて見ると、以下の 3 つの課題を指摘することができる。

第 1 の課題は、施設外誘因事象、特に自然現象に対して、防護が不十分だったことである。自然現象は、ランダムに起きる機器等の故障とは違って、複数の機器等に共通原因故障を起こす可能性があり、第 1 の防護レベルが突破された時に、同時に、後段の防護レベルも突破されて、プラント設備の多くが機能不全に陥る可能性を

持っている。このような特質は今回の福島第一事故以前から安全研究の中で認識されていたが、最初の防護ラインを突破された後の対策として、プラント内の設備をどのように対策すれば有効かという点では必ずしも合理的で妥当な対策が案出されていなかった。したがって、最初の防護ラインである耐震設計のレベルや防潮堤の高さの裕度を多くすることに特化してきたが、後段の防護レベルに対しても有効な対策を確立すべきである。

第2の課題は、自然現象に対する防護レベルを設定することの難しさである。自然現象に対する防護レベルの設定は、地震にしても津波やその他の自然現象にしても、ハザードの評価は、歴史的な経験データに基づく方法が主体であった。最近では高度な自然現象のモデル化やシミュレーション技術が使われるようになってきているが、やはり最終的なレベルの設定には歴史データを使わざるを得なかった。一方で、歴史データは限られた期間のものでしかなく、記録には大きな不確かさもあるので、そこから得られた結果に基づいての予測だけでは、常に想定外が発生してしまう可能性を持っている。

この点に関して、原子力では、深層防護の原則に基づいて設計基準ハザードはかなり大きな余裕を見込んで設定をしてきており、福島第一事故でも地震については有効に働いたといえる。具体的には、原子炉施設を重要度に応じてクラス分類し、重要な設備ほど余裕を持たせて設計してきており、地震の知見が増えるに従って、バックチェックを行い、新しい知見に対しても適合できるよう努力してきたことが、そのスピード感には問題を残しつつも有効であった。

一方で津波については、「敷地高さおよび防潮堤で止める」を基本として設計し、新しい知見が出るたびに見直しをしているが、福島第一事故では想定高さをはるかに超えるものであった。津波高さの想定の問題に関しては、第2報のⅡ-1節で議論されたように地震ほどの余裕を付与できていなかった可能性の問題はあるものの、最新の知見を持って想定してもなお、これを超える津波が起こる可能性というものを真摯に考えた対応を持つべきであった。さらに、地震に伴う津波のような複合的な被害の想定は難しく、想定を超えてしまった場合のプラントへの被害の程度、範囲の想定は非常に難しいということも考慮して有効な対策を考えていく必要がある。

第3の課題は、Ⅲ章で述べたAMの実行上の困難さであり、サイト全体が被災するような事態でも迅速、的確なAMが行えるような対策を行う必要があるということである。

2. 対策の整理

福島第一事故の事象分析から見いだされた教訓を深層防護設計の観点で整理した課題に対する対策として整理すると、以下のようになる。

第1と第2の課題には、これまでのようにプラント内の設備対策にこだわった考えを脱却し、オンサイト、オフサイトを含めた大きな体系で合理的な対策を講じることであると考えられる。

施設外誘因事象、特に自然現象への対策をプラント内の設備によるものに限定すると、誘因事象のハザードが設計での想定をはるかに超えてしまった場合、原子炉建屋内に設置された設備は共通の原因で機能が喪失してしまう可能性を持つ。したがって、設計想定を超えた誘因事象の特性を踏まえてプラント外にAMの手段を備えておくことは、共通原因による機能喪失を避ける方策として合理的である。

福島第一事故時の対応においても、プラント設備の大半が機能しなくなった状態で、消防自動車による繋ぎ込みが注水手段として有効に働いた。この事実は、可搬設備がいかに有効であるかを証明したものである。更に、消防自動車は原子力仕様様の設備では当然ないことも考えると、いたずらに高信頼性や高性能を求めるよりも柔軟な運用を優先した設備とすべきである。このような考えは、福島第一事故以前の安全研究の中でも検討の俎上には上がったものの、原子力仕様への適合性という壁の前で見合わせられた経緯がある。規制における扱いも含めて、これまでのように設備の多重性や堅牢性だけを求めるのではなく、多様性、柔軟性に重きを置いた合理的な取り扱いが求められる。

第3の課題に対しては、様々な想定外の事態を想像して、AMを有効に行えるような配慮を考えるべきである。AMの実施のために必要な設備へのアクセス性の確保、アクセスルートを確保するために必要な重機の準備などのハード面ももちろん重要である。しかし、想定外の事態に対しては、的確な判断と実行をするための手順の準備や教育、訓練、運用体制などのソフト面の充実が最も重要な点だと考える。

福島第一の事故は、安全研究の中で指摘されてきた深いクリフエッジの脅威を体現したものであるが、このようなクリフエッジに対して発生頻度が工学的に無視できる程度低くても発生した際の被害の甚大さを考えると、合理的なセーフティネットを準備しておくべきだということになる。この場合のセーフティネットに相当する対策は、プラント内の設備に限定することが現実的でないことは、福島第一事故で経験した通りであり、プラント設備外で、サイト内、サイト外を含めた場所の多様化を考慮に入れて考えるべきである。また、対策設備の信頼性も発生頻度に応じた合理性を持つべきであるし、福島第一事故の経験からも無闇に多重化しても有効でないことは明らかであり、ハードとソフトの最適な組み合わせを考えた対策とすべきである。なお、必要と見なされた対策については、時間をかけずに速やかに実施されるような制度を合わせて持つことが福島第一事故の教訓の

一つである。

VI. 安全規制に関する課題

福島第一の事故は、国の規制にも多くの問題があったことを明らかにした。国の原子力規制体制は2012年9月19日の原子力規制委員会、原子力規制庁(以下、「規制委」、「規制庁」)の発足により、新たな体制がスタートしているから、今後は規制委が事故の反省に立って規制の改善を図っていくことが期待される。本章では、事故以前の規制において、何が不適切あるいは不十分だったのかを分析するとともに、今後の規制改善への期待を記述する。

1. 規制基準の継続的な改善

福島第一の事故は、地震動に引き続く津波によって起きた事故である。津波に対しては、第3報に述べたように、事業者は曲がりなりにも津波に関する新知見を反映して、「継続的な改善」を図ってきた。こうした改善の結果として、福島第一以外の発電所ではシビアアクシデントの発生を何とか防止できた。

規制側機関においても「継続的な改善」は必須の要件である。例えば、規制のための基準類は絶えず見直しが必要である。

2006年の日本へのIAEA総合規制レビューサービス(IRRS)では、「原子力安全・保安院(以下、「保安院」)は規制当局の責任として、安全審査の判断基準を自ら作るべきである」との勧告を受けている。福島第一の事故のあとで振り返ると、この勧告は重い意味を持っていた。

わが国では、基本設計は原則として旧原子力安全委員会(以下、「原安委」)の安全審査指針で審査されてきており、保安院は「航空機落下評価基準」などごく少数の例外を除き、自ら審査基準を策定することはしなかった。指針体系を常時見直す体制は必ずしも十分でなかった。

安全審査のための基準は常に見直すことが必要であり、そのための責任組織も必要である。規制庁には既に基準を一元的に見直す責任組織(技術基盤課)が発足している。今後は同課が、常に基準体系全体を見渡して、継続的に改善を図っていくことを期待する。そこではまず、福島第一の事故の反省に基づく改善が急務であり、「事故時に実際に何が起きたのか」を把握した上で、何が悪かったかを同定し、それに対応した改革を図っていくことが必要になる。

2. 運転経験や国際動向の反映

1979年の米国スリーマイル島(TMI)2号機での炉心溶融事故には、こうした事故の発生を予言する前兆事象があった。このため、TMI事故以降、原子力プラントで現実に行き始めている事象(運転経験)を系統的に収集・分析・評価して、そこから得られた教訓を規制や運転に

フィードバックすることが重要であるということは、国際的共同認識になっている。国際機関の活動としても、産業界ではINPO、WANOが運転経験分析を続けているし、IAEAでは事象報告システム(Incident Reporting System: IRS)の活動、OECD/NEAでは原子力規制活動委員会(CNRA)傘下の運転経験ワーキンググループ(WGOE)等の活動が継続されている。

しかし、事象の重要性は的確に把握されてきたか、また、事象分析の結果として適切な対応が採られてきたかについては疑問も残る。福島第一の事故を見たときに、このような活動が形骸化していなかったかという反省がある。この問題についてはⅦ-2節でまとめて論じる。

3. 自然現象等の誘因事象に対する設計基準

福島第一の事故は、自然現象の一つである津波について、結果から見れば、設計基準が過小であったことを示した。設計基準ハザードの設定の問題を含め、従来の設計及び規制は、地震動以外の自然現象等の誘因事象への具体的な対応にとって必ずしも十分ではなかった。

原安委の「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針(以下、「設計指針」)²⁾の「指針2. 自然現象に対する設計上の考慮」では、安全機能を有する構築物、系統及び機器(以下、「SSC」)はその安全機能の重要度等を考慮して、「適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられる設計であること」、また、「地震以外の想定される自然現象によって原子炉施設の安全性が損なわれない設計であること」、重要度の特に高い安全機能を有するSSCは「予想される自然現象のうち最も過酷と考えられる条件、または自然力に事故荷重を適切に組み合わせた場合を考慮した設計であること」を要求している。そして、その解説には次のようにある。「『自然現象のうち最も苛酷と考えられる条件』とは、対象となる自然現象に対応して、過去の記録の信頼性を考慮の上、少なくともこれを下回らない苛酷なものであって、かつ、統計的に妥当とみなされるものをいう」。

この「解説」の結果、過去に十分信頼性のある記録が少なく、統計的な妥当性が確認できない自然現象については、短期間の記録だけに基づいて設計基準ハザードが定められてしまう結果になったのではないと思われる。

津波については、事業者は、2002年2月に策定された土木学会の「原子力発電所における津波評価技術」³⁾の手法で想定津波高さを求め、自主的に津波対処設計を強化してきた。土木学会の評価式は、1611～1978年の歴史津波(記録として残っている津波高さ: 既往津波)に基づくものである。これは、上記の「解説」に沿った手法と言える。この方法で求められる津波高さは、ほぼ、1611～1978年の歴史津波の最高高さに匹敵するはずであり、そこで得られる結果は、過去400年間の津波の最高高さ程度の津波を想定することと思われる。ある程度の裕度

が含まれているとしても、千年に1度(10^{-3} /年)程度の津波を想定津波とし、それを超す津波については対策を考えていなかった。これでは、原安委の

- ・炉心損傷頻度(CDF)： 10^{-4} /年
- ・格納容器破損頻度(CFF)： 10^{-5} /年

なる性能目標⁴⁾を満足することはおぼつかなかった。

土木学会の評価式が原子力安全の観点ではどういう意味を持つのかは、議論されなかったのではないと思われる。分野間のコミュニケーション不足の問題でもあるが、本来はリスクを管理しなくてはならない原子力界の役割であり、それを果たせなかったことには反省が必要である。

4. 設計基準事故の想定

設計指針²⁾では、深層防護の第3のレベルである設計基準事故への防護についても問題があった。「指針27. 電源喪失に対する設計上の考慮」の解説において、「長期間にわたる電源喪失は、送電線の復旧や非常用交流電源設備の修復が期待できるので考慮する必要はない」としている。しかしこれも、厳しい地震や津波に襲われた時の状況を考慮しないものである。福島第一では極めて長時間の全交流電源喪失事故(SBO)が起きてしまった。設計基準を超す状況への対応策がないところで、過去の経験データだけに頼って、不十分な事故想定をしたことになる。

5. シビアアクシデント対処策の規制要件化

シビアアクシデント対策の規制要件化も、対応が遅れた例のひとつである。わが国では、1990年代に国内すべての軽水炉において包括的なAMを整備した。当時としては決して世界の趨勢に遅れるものではなかった。そして、次は規制要件化だというのがその時の規制側関係者の共通認識であった。しかし、そうした対応は事故前までなされず、AM設備が現実の事故状況下で本当に有効に機能するのかが規制の対象にならなかった。

シビアアクシデントへの対応は既に規制委の新規制基準で要求事項になった。(規制委では「重大事故」という言葉に統一されているが、本報ではセミナー開催時の用語として「シビアアクシデント」と記述している。)今後は、事業者による具体的な対策の妥当性が安全審査において確認される。

6. 想定外の事象への対処

福島第一事故では多くの「想定外」があった。想定できることはきちんと想定して、確固たる対策を用意すべきであるから、設計基準の想定が不十分だったから基準を変えることは当然必要であるし、また、設計基準を超えたら何が起きるかを想定することも必要である。しかし、V章で結論づけたように、「想定できないこともあ

り得るとして、柔軟な対策を考える」ことも必要である。

例えば、設計基準ハザードを見直したとしても、それを超すハザードが生じる可能性は残る。実際、3月11日の地震・津波以前には、東北地方太平洋沖であのような大きなマグニチュードの地震が発生することや、幾つもの地震源が連動してそこから生じる津波が重なり合って高くなることは、関係者の共通認識にはなっていなかったのである。「設計の想定を越すような事態に対してもあらかじめ準備する」ことも必要と考える。

炉心が溶融するようなシビアアクシデント時に起き得る諸現象については、過去に極めて大規模な研究がなされてきた。しかし、それでも、実際に事故が起きてみれば我々の想像力には限界があることが示された。原子炉建屋で水素爆発が起きたことや、3号機の原子炉で生じた水素が4号機の原子炉建屋に流入してそこで爆発が起きるなど、想定できなかった問題もあった。

米国では、同時多発航空機テロ以降、想定外事象への対処もなされた。わが国でも、例えば誘因事象がテロであれば何が起きるか分からないことを考えて、設置者は敷地外からのサポート等柔軟な対応手段を考えておくべきである。

規制委の新安全基準は既に、こうした「想定外の事象への対処」も求めている。

7. リスク情報に基づく科学的合理的規制

福島の事故後は規制強化一色であるが、本来、「科学的合理性をもった規制」は今でも必須のはずであり、そのためには確率論的リスク評価(PRA)の結果である「リスク情報」の規制への活用、すなわち、「リスクインフォームド規制」が欠かせない。設置者も規制者も、リスクの大きさに基づいて資源を割くという、いわゆる「グレーデッドアプローチ」は当然に採用されるべきである。

この分野での問題はⅦ-1節でまとめて論じる。

8. 基準の性能規定化

規制上の要求事項は規制当局が自ら定めるが、それを達成する詳細規定は学協会規格を適切にレビューした上で用いるという「基準の性能規定化」も変わるはずのない原則であると考えられる。

規制当局と事業者の役割分担でも同じことが言える。最近の事例を挙げれば、規制委は核燃料施設等についての新基準で、重要度分類については原則的な要求事項だけを示し、SSCの重要度分類そのものは設置者が安全審査において提案し、規制委がその妥当性を確認することとした。発電炉のように類似の施設が数多く作られるのと違って、核燃料施設等は個別に設計され、安全上の特性もリスクも異なることを考えれば、こうした扱いは極めて適切と言える。

9. 産学官の協力と規制の独立性

前述の日本 IRRS では、「保安院は実効的には独立しているが、形としても経産省から独立している必要がある」との勧告もあった。これは、2012年9月の規制委の発足により既に達成されている。

一方、福島第一事故後は、規制側が産業界と話し合うのはよくないことのように思い込む風潮がある。しかしながら、産学官が協力することと、規制が独立性を保つことは、両立させなければならないことである。

これについては、第8回セミナーでの参加者の発言に、問題点が正確に指摘されているので、それをそのまま記載しておく。

「阿部部会長(当時。現在は関村部会長)の話の中に、産学官の協力と規制の独立の話があったが、この辺の微妙さをきちんと書けるのは原子力学会だけではないか。今、規制側と、メーカーや事業者が、全部談合してやっているという具合に、何か非常に純粋さを求められて独立性が問われている所があるが、実際には、ポンプの設計、ポンプがいかにかに運転されるかも分からずに、ポンプの官庁検査などできない。さらに、実際に発電所がどのような体制で、運転員がどのようなモチベーションで動いているかということの理解なくして、本当の安全性が担保されるわけではないと思う。例えばノーリターンルールとか、非常に純粋さを保つような形で進められる方向性が今は出ていて、私はこれが本当の意味で安全性を担保することにはならないと思っている。」

なお、この意見に対しては規制委の更田委員から、次のような発言があったことも付記しておく。

「規制当局というのは独立でなくてはいけないが、孤立してはいけない。しかも安全性が確保されたり向上したりするのは現場であり、規制はそれを監視するだけであって、実際に安全を守るのは現場で、現場の知識抜きに安全を語るなどということはありません。したがって、当然、規制当局と産業界はきわめて密接に意見交換であるとか情報交換とかができなければいけない。」

「世論が非常に厳しい目で見ているなかで、まだ手探りで仕組みを作ろうとしている段階にあると思う。透明性は確保しなければならないが、今のような状況ですといいとは思っていない。申請者との間での良い意味での接点が少なすぎる。これは徐々に改善していかなければいけない。ただそのときの透明性の担保の仕方については慎重に考えているので、お時間を下さいという答えにはなってしまう。接点の重要性は産業界も感じているだろうし、我々もあるいはそれ以上に感じている部分がある。」

問題そのものは、多くの関係者に正確に認識されている。今後はこの問題についても、規制委が適切に対応していくことが期待される。

Ⅶ. PRA, 運転経験, 安全研究に関する課題

確率論的リスク評価(PRA)の結果や、運転経験の分析によって得られる教訓、安全研究の成果は、安全設計、安全管理、規制をよりよいものにしていくのに有用な知見を与えるものである。その関係を第2図に示す。運転経験データや安全研究の成果は、直接的に設計、管理、規制に有用なものもあるし、また、PRAの基盤情報となるものもある。代表的な例を挙げれば、機器等の故障率のデータはレベル1 PRAにとって、シビアアクシデント時に起き得る現象についての知見や地震の発生メカニズムや地震動距離減衰にかかる知見は、レベル2 PRAや地震 PRAにとって、それぞれ不可欠の情報である。

PRA, 運転経験, 安全研究から得られる知見は、福島第一の事故の前もより適切に活用されるべきであったし、事故のあとでは、事故の反省も踏まえて、より適切かつ広範に活用されるべきである。

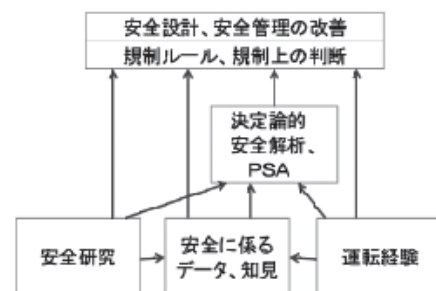
1. PRA

(1) PRAの手法

PRAの手法は、シビアアクシデントのシナリオを系統的に分析してシビアアクシデントの発生頻度やソースターム、健康影響等を定量化するとともに、その寄与因子を同定する手法であり、シビアアクシデント対策に有用である。

PRAでは、機器の故障が、機器に内在する原因(内的な誘因事象)によっても機器の外部から与えられる衝撃(外的な誘因事象)によっても起きること、また、機器の故障・損傷の中には、事故の発端となる事象(Initiating Event: IE)になるものもあるし、停止系や炉心冷却系等、炉心溶融を防止するための安全系の機能喪失につながるものも、格納容器冷却系統等、格納容器破損を防止するための安全系の機能喪失につながるものもあることを示している。そして、IEと安全系の機能喪失が炉心溶融や格納容器破損につながることを示している。

PRAはまた、格納容器が破損するような重大な事故によって公衆が健康影響を受けるまでのシナリオを示している。そこでは、放射性物質が環境中に放出されるこ



第2図 PRA, 運転経験, 安全研究の活用プロセス

と、放出された放射性物質は気象条件に左右されながら環境中を移行していくこと、公衆の被ばく線量は避難や退避といった緊急時対策の成否によって異なること、最終的には被ばく量から公衆の放射線影響を評価することになることが示されている。

この「PRA が想定する事故進展」と、福島第一で実際に起きたことを比べてみれば、PRA の全体としての考え方が、シビアアクシデント時にプラントの中で、あるいは敷地の外で起きるであろうことをいかに正確に予測していたかが理解されよう。原子力発電所についてのPRA の発想は、1975年に公表された米国の「原子炉安全研究(Reactor Safety Study : RSS)」によって確立したものであるが、先駆者の炯眼である。

なお、福島第一事故の後では「ストレステスト」の手法も国際的に多用されているが、これも問題によって有用な手法である。

(2) PRA の実施状況

わが国におけるPRAはその対象が限られていた。福島第一の事故の前まで、PRAは、いわゆる内的事象(正確には、ランダム事象)と地震のみしかなされなかった。

米国ではまず内的事象(ただし、外的事象のうち内的浸水を含む)だけを対象として個々のプラントについてのPRA (Individual Plant Examination : IPE)がなされ、引き続いて外的事象(内的火災、強風、外的浸水、地震等)を対象としてのPRA (Individual Plant Examination of External Events : IPEEE)もなされた。これに対して、わが国では、地震を除けば、IPEEEがなされなかった。PRAによるリスクの定量化は極めて部分的にしかなされていなかったのである。

福島第一の事故は地震と津波によるものであるが、主たる影響因子は津波である。原子力発電所のリスクを適切に管理するためには、津波、火災、テロ等、それぞれの誘因事象についてIPEEEを実施することと、そこで同定された弱点に対して措置することが欠かせない。

(3) PRA の性能に応じた利用

規制におけるPRAの利用も不十分であった。1990年代のAMの整備時には全発電炉でIPEが実施され、その後、定期安全レビュー(PSR)においてもPSAの結果は参照されるようになったが、リスクインフォームド規制の中核である、「PRAの結果であるリスク情報の規制ルールへの反映」は極めてまれであった。

航空機落下については衝突確率を計算して防護が必要かどうかを判断する、ハザード評価のための基準だけが整備された。他には「耐震指針の改訂」が重要なものであるが、それも、「地震リスクの結果が大きかったから、耐震要求を強化する」だけであって、リスク情報の十分な反映にはなっていなかった。

リスクインフォームド規制においては、「安全目標の規制への適用」も遅れていた。安全目標は本来、「合理的な規制」を作るためのものである。しかし、どうすれば、PRAの結果と安全目標を規制の改善、特に、規制ルールの改善につなげるかということ、前述の耐震指針の強化を除き、ほとんど何もなされなかったと言ってよい。あったのは、「安全目標とPRAの絶対値を比較してマルバツをつける」などという、およそPRAの考え方や実態とかけ離れた提案のみであった。

(1)項で述べたように、PRAの方法論そのものは、全体として、福島で起きた多くの出来事その通りに予測していたが、個々の現象・事象の予測性や定量性は必ずしも高くない。特に、

- ①外的事象のハザードの不確かさ
- ②シビアアクシデントの進展の不確かさ
- ③運転員のマインドセット

は、PRAにおいて最大の不確かさを有するものである。

PRAの結果を原子力施設の安全対策や規制に用いるには、このような大きな不確かさがあることを常に意識することが必要である。特に、歴史津波・歴史地震等の経験データを設計基準に反映することは当然必要だが、それを超すハザードがあり得ることを考慮して対策を考えておくことが必要である。

2. 運転経験分析

過去の規制において、「運転経験の反映」も不十分であった。福島第一事故の主たる原因となった津波についても、幾つかの前兆事象があった。1999年には、フランスのルブレイエ炉で、高潮と河川の増水の重畳に夜による浸水事象が起きている。また、2004年には、スマトラ沖での大地震時に、インドのマドラス炉で浸水事象が起きており、この事例については、わが国では産業界だけでなく規制側もその分析をしているが、「これはインドで起きた事故であってわが国では関係ない」で終わっていた。

そして、これは運転経験ではなく安全研究であるが、わが国はまた、IAEAに特別拠出金を提供して津波ハザードの知見をまとめる国際プロジェクトも実施している。しかしながら、そうした知見が実プラントに反映されることはなく、事故の防止につながらなかった。

わが国では、スリーマイル事故の後、「わが国ではこういう事故は起きない。なぜならば、わが国の安全管理ははるかに高いレベルであるから。」と言ってきた。チェルノブイリの事故の後には、「わが国ではこういう事故は起きない。なぜならば、わが国の原子力発電所は異なる設計であるから。」と言ってきた。他国の事例に謙虚に学ぶ姿勢に欠けていた。

今、福島第一事故に関する国際会議に出ると、ほとん

どの国が「わが国では福島第一のような事故は起きない。なぜならば、……」と言っている。本音とは違って、公式な言い回しに過ぎないのであろう。わが国としては、事故を起こした国の責任として、何が悪かったのか、今後どうすべきかを、繰り返し、正確に国際社会に伝えていくことが必要である。

3. 安全研究

原子力安全研究は、科学的・合理的な安全対策や規制のためのものであり、それによって原子力施設の安全が確保されることを目的としている。しかしながら、これまでの安全研究の中には「役立つ」とは能書きだけの「研究のための研究」であって、実際には必ずしも役に立たなかったものもあるのではないと思われる。ただ、この問題の背景を考えると、実物の安全と安全研究の間に大きな矛盾があることがわかる。

安全は弱い部分をなくすことが最重要である。“A chain is no stronger than its weakest link.”(鎖の強さはその一番弱い環の強さである。)という言葉がある。福島第一の事故は、津波に対する防護が弱かったことによる。一方「研究」と言えば、“Something new”(何か、これまでにはなかった新しいもの)がない限り、研究成果として認められない。研究の広さはなくとも、高さにおいては「世界で一番」でなければならないのである。勢い、研究者は自分の「一番強いところを更に強める」ような研究に走ることになる。あるいは、研究者によっては、厳しい言い方になるが、先人のやったことをほんの少し変えて得た結果を、“Something new”であるとして発表したりするだけである。

原子力安全規制にとっての課題は山ほどある。したがって、研究課題も山ほどある。ただ、その多くは、これまで研究者によって十分には手がけられていない分野であったり、単一の技術で解決できる課題ではなく、複数の技術を合わせて解決しなければならないものであったりする。

本報では、津波に対する防護について、津波の専門家が作った津波評価式について、原子力安全の専門家が関わっていないことを指摘した。産業界と規制当局の意見交換が必要であることも指摘した。研究者と実務者の交流も大事である。

狭い専門に閉じこもることなく、研究者が他の分野の専門家との交流を深めて、より大事な研究テーマに取り組んで欲しい。そして、そういうプロセスを通じて、安全研究者が、潜在的問題を見つけて警鐘を鳴らすことを期待したい。

セミナーにおいては、安全研究の弱体化と、それによる技術基盤の喪失の問題も論じられた。

「安全研究自衛隊論」というのがある。極端に言えば、安全研究は普段は役に立たなくてよい、事故時に役に立てばいい、というものである。すなわち、福島第一での事故のような重大な事故が起きたときに、あるいはそれよりマイナーであっても何か複雑な事象が起きたときに、安全研究に従事している一定規模の研究者がいて、研究の実施を通じて得られる専門知見で規制当局を支援することこそが一番必要なことというものである。

実際、福島第一事故の最中に、あるいは事後に、事故の分析をし、事故対応に必要な技術的助言をしたのは、JNESやJAEAの職員、中でも、スリーマイル島やチェルノブイリの事故のあとにシビアアクシデント研究やPRA研究に従事した人たちである。原子力利用を進める上で、様々な関連技術分野それぞれに、一定の人数の専門家がいることは不可欠である。

しかしながら、原子力の専門家の数は顕著に減少している。そして、それとともに、原子力の技術基盤全体が揺らいでいる。安全を担保するのは、最後は人である。安全研究が、適切なテーマについて適切な規模で継続的に実施され、結果として高い技術能力を有する人が常にいる。それが、今後、原子力利用を続ける上での条件である。

VIII. まとめ

本報では福島第一の事故で明らかになった様々な課題について取りまとめた。

安全設計に関する課題としては、福島第一発電所事故の事象進展の分析に基づいて、事故の発生と拡大の防止のためにはどのような対策を講じておくべきだったのかという教訓を抽出した。これらの教訓は、今回の津波だけではなく、その他の外部誘因事象に対して共通した教訓と考える。

安全規制に関する課題としては、最新の知見を速やかに反映するといった継続的な改善の努力の不十分さ、地震以外の外的誘因事象に対する取り組みの不十分さ、シビアアクシデントの規制要件化の遅れといった点がある。この中には、土木学会のような多分野との積極的なコミュニケーションの不足から重大なリスクの見落としといった点も含まれる。これらの課題の抽出とともに、今後の規制のあり方として科学的合理的な規制の推進や産学官の協力と規制の独立性といった問題についても述べた。

PRA、運転経験、安全研究に関する課題としては、特に外的誘因事象に対するリスク研究の不十分さがあり、これらの問題解決には複数の学問分野を合わせた取り組みが必要なため、狭い専門に閉じこもることのない研究が必要であると考えられる。

—参考資料—

- 1) 日本原子力学会原子力安全部会, 「福島第一原子力発電所事故に関するセミナー報告書—何が悪かったのか、今後何をすべきか」, 2013年3月.
- 2) 原子力安全委員会, 「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」, 平成2年8月30日.
- 3) 土木学会, 「原子力発電所における津波評価技術」, 2002年2月.
- 4) 原子力安全委員会安全目標専門部会, 「発電用軽水型原子炉施設の性能目標について—安全目標案に対応する性能目標について—」, 平成18年3月.

著者紹介

守屋公三明(もりや・くみあき)

本誌, 55[9], p.506 (2013)参照.

阿部清治(あべ・きよはる)

本誌, 55[9], p.498 (2013)参照.

学会誌への投稿記事の採否に関する判断基準

日本原子力学会 編集委員会

学会誌への投稿は、記事原稿の作成に先立ち、記事提案書(学会 HP に記載)の提出が必要となります。提出された記事提案書は編集委員会で審議し、通過したものについて記事原稿を提出していただくことにしています。

投稿記事の内容については著者に責任がありますが、記事提案書の審議において、投稿記事が下記のいずれかに該当すると判断した場合は、学会誌に掲載することをお断りすることになっています。なお、記事提案書に基づいて執筆された記事原稿につきましても、下記のいずれかに該当すると判断した場合や、記事提案書と異なる内容の原稿が提出された場合は、掲載することをお断りすることになっています。

- (1) 事実を無視し、あるいは歪曲した意見。
- (2) 真偽が不明な内容を含む場合。
- (3) 文章に論理性がない場合。文章が意味不明な場合。
- (4) 掲載することにより、学会の品位に傷がつく恐れがある場合。
- (5) 良識に欠けると思われる意見。例えば、個人あるいは組織の中傷・誹謗、一方的な極め付けなど。
- (6) 美醜、好悪に類する判断に依拠している場合。
- (7) すでに掲載された記事と同様の内容である場合。
- (8) 商業的な広告・宣伝などを目的とする場合。
- (9) 会員にとって掲載する価値がない場合。
- (10) 余り期間を空けない同一者からの投稿。

(注1) 記事提案書の審議結果については約1か月で事務局よりお知らせいたします。

(注2) 掲載否の場合、該当事由の番号をお知らせしますが、それ以上の説明は致しません。

(改定 2012年6月1日)

特集

原子力安全部会「福島第一事故に関する セミナー」報告書から (第5報/最終報)原子力防災等に関する課題

日本原子力研究開発機構 本間 俊充, 東京大学 関村 直人,
原子力安全基盤機構 阿部 清治, 日本原子力発電(株) 新田 隆司

第5報では、福島第一原子力発電所(以下、「福島第一」)事故におけるオフサイトの緊急時対応を中心に、事故初期の危機管理段階とその後の影響管理段階の対応で得られた教訓について放射線防護の観点から解説する。また、関連して INES 評価、事故時の協力・連絡、事故情報の更新の課題についても述べる。

I. はじめに

本特集は、原子力安全部会(以下、「安全部会」)が2012年に開催した「福島第一事故に関するセミナー」(以下、「セミナー」)の成果を取りまとめた報告書¹⁾の要点を紹介するものであるが、その最後となる本報(第5報)では、原子力防災に関する課題を中心に、INES 評価、事故時の協力・連絡、事故情報の更新に関する各課題を取り上げる。

日本の原子力防災システムは災害対策基本法と1999年の東海村 JCO 臨界事故後に制定された原子力災害特別措置法を頂点とし、防災基本計画で各関係機関の責務と役割が明確化され法的な整備がなされてきた。また、TMI 事故を契機として定められた原子力安全委員会(以下、「原安委」)の「原子力施設等の防災対策について」(以下、「防災指針」)は防災基本計画で専門的・技術的事項について十分尊重されるものとして規定され、国、地方公共団体、事業者が防災計画を策定する際、また防護対策を実施するための指針として位置付けられた。

しかしながら、緊急時において住民の健康を防護するための防災対策についての明確な運営の考え方(Concept of Operations)は、どこにも示されていなかった。防災指針には、「防災対策を重点的に充実すべき地域の範囲(EPZ)」、通報基準及び緊急事態判断基準、防護対策のための指標(いわゆる介入レベル)という技術

的な判断基準は示されているが、どのように防護対策を実行していくのかの基本的考え方、手順が示されていない。また、日本では TMI 事故は起こり得ても、チェルノブイリ事故は起きないというのが防災の基本とされ、実質的に格納容器破損に至るようなシビアアクシデントに相当する緊急事態への備えと対応は整備されてこなかったとあってよい。したがって、計画的避難のような長期的防護措置の検討もなされていなかった。

福島第一事故の緊急時対応では、初動対応の混乱、関係機関の連携不足、不明確な意思決定スキーム等、JCO 事故と同様の様々な問題が生じた。以下では、露呈した様々な課題の中から、セミナーで取り上げた放射線防護の観点から見た緊急防護措置実施の課題、事業者、地方自治体、国の責務・役割の明確化を含む緊急時管理と運営の課題を中心に解説する。

II. 事故初期における周辺の放射線状況

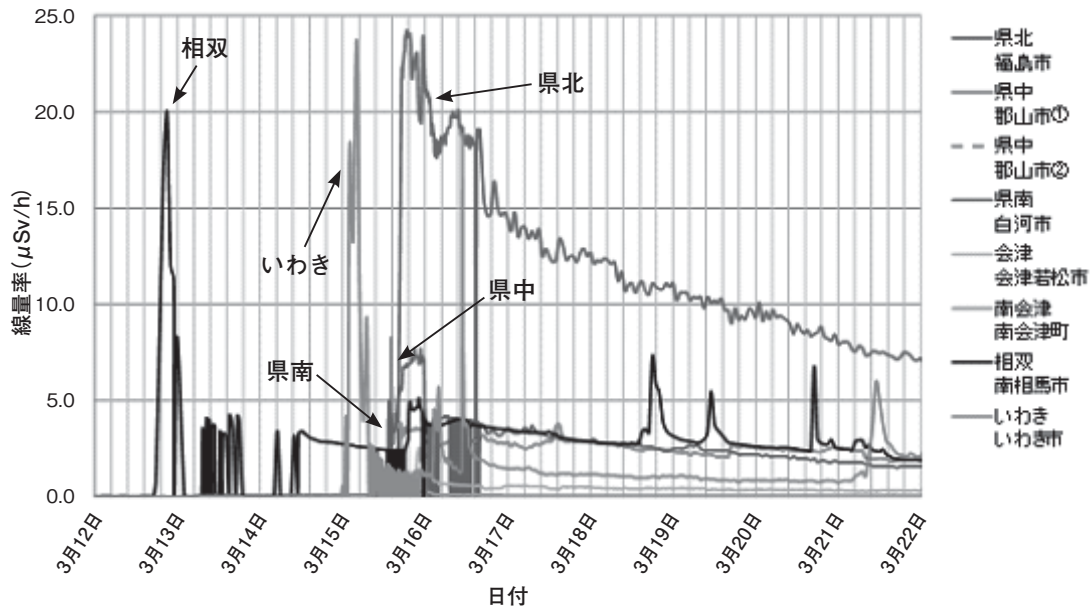
緊急時対応では、関係機関が緊急事態の時間的推移に対して一貫した共通の意思決定のスキームを策定することが重要である。緊急事態の管理は、準備段階、初期の危機管理、中期の影響管理および復旧の各段階に区分できる。福島第一事故での緊急時対応における特に危機管理と影響管理の課題を分析するため、まず、事故初期の周辺環境における放射線状況の概略を説明する。

福島第一原子力発電所は福島県浜通りに位置し海陸風循環が卓越する。夜間に海側に向かって風が早朝に南側に向き、その後、南西、西、午後から夕刻にかけて北西に向かう風向変化が顕著である特徴を持つ。第1図に事故初期の県7方部における空間線量率の時間変化を示す²⁾。

2011年3月12日の夕刻から夜にかけてサイトの北約

A Digest of the Nuclear Safety Division Report on the Fukushima Dai-ichi NPP Accident Seminar (5) : Lessons learned on Emergency Preparedness and Response and Related Issues : Toshimitsu HOMMA, Naoto SEKIMURA, Kiyoharu ABE, Takashi NITTA.

(2013年 7月31日 受理)



第1図 県7方部における空間線量率

24kmに位置する南相馬市で空間線量率の上昇がみられる。これは1号機のベント及びその後の建屋における水素爆発(12日15時36分)によって放出された放射性プルームが折からの南風によって運ばれ、南相馬付近を通過したものと考えられる。3月13日から14日にかけては風が陸から海に向かっており、3号機からのベントあるいは3号機の水素爆発(14日11時01分)による放出は陸側に向っていない。

3月14日の夕刻から15日朝にかけて2号機からの放出と考えられる放射性物質により敷地内の放射線量が上昇し始める。この放出の影響は折からの北風に乗って浜通りを南下、3月15日0時にはいわき市で空間線量が上昇し始め、4時には最大23.72 μ Sv/hを検出している。その後、放出プルームはさらに南下し、茨城県、関東各地でモニタリングポストの値が上昇し、静岡県まで到達したと考えられる。

サイトのモニタリングカーによる気象観測によると、14日夜半から15日午前にかけては北から北東の風が続き、正午を境に南から南東の風になり夜半までその状態が続いていた。第1図のように放出された放射性物質は、その後、白河市、郡山市、福島市に達し、福島市では18:40に最大24.24 μ Sv/hの空間線量率を検出している。アメダスデータを見ると15日17時に最初に福島市で0.5mmの降水を観測しており、福島市の空間線量率のピーク後のゆっくりとした低減は、降雨により地表面に沈着した核種からのガンマ線量率とと考えられる。その後、北部から雨や雪が観測され夜半には全域に及んだため、放出プルームの通過と降雨、降雪の影響による放射性物質の沈着により原子力発電所の北西方向の高い汚染分布を形成した。

Ⅲ. 原子力防災等に関する課題

1. 緊急防護措置の戦略と課題

JCO事故以降、頻繁に行われることになった防災訓練においては、ERRS(事故進展と放出量等のソースターム予測)とSPEEDI(環境中における被ばく線量予測)という緊急時計算予測システムによる線量予測結果を介入レベル(例えば、避難に対して実効線量50mSv、屋内退避に対して10mSv)と比較し、その実施範囲を決定するスキームが定着していた。しかしながら、福島第一事故では1号機の冷却機能の喪失、格納容器の圧力上昇、複数炉の同時災害のリスクというプラントの事象やリスクに基づき、事前のスキームとは違った形で避難の拡大(3km, 10km, 20km)および屋内退避が実施された。従来の8~10kmのEPZを超えた広範囲の避難の実行、地震、津波の影響の中で住民への情報伝達や輸送手段の確保に大きな混乱が生じた。緊急防護措置決定の遅れ、避難場所の度重なる変更があった。それでも、3km圏内の住民の避難は3月12日未明(0時30分)には完了している³⁾。また、3月15日における環境への放射性物質の大量放出の時点では多くの住民が20km圏外へ避難し、確定的健康影響を生じさせるような甚大な被ばくを与えることは回避できた。初期の外部被ばくについては福島県による県民健康管理調査⁴⁾の結果が示されている。3月11日から7月11日までの4か月間積算の外部被ばく実効線量は放射線作業従事者を除くと対象411,922名で最高25mSv、10mSv以上は120名で約99.8%が5mSv未満である(2013年3月31日現在)。また、2011年6月7日から2012年9月30日までに計画的避難区域および双葉郡の住民81,119名を対象にしたホールボディカウンタによる内部被ばくの預託実効線量

の推定では、最大 3mSv が 2 名で、81,093 名が 1mSv 以下の結果である。

東京電力や原子力安全基盤機構 (JNES) によって、事故後に行われたシビアアクシデント解析コードによる事故進展解析およびソースターム評価においてさえ、放出のタイミング、放出量、核種組成、放出位置等について十分信頼性のある結果が得られているとは言い難く、ソースターム評価には大きな不確かさが伴う⁵⁾。さらに、オフサイトでの防護措置が必要となるような放出は長期間にわたって続き、風や雨など気象条件の変動により複雑な沈着分布に至る。線量評価にも大きな不確かさが伴う。このような現実には、福島事故だけでなくチェルノブイリ事故でも経験した。被ばくを最も効果的に避けるには、放射性物質の環境放出前の迅速な避難が必要である。線量予測モデルをこのような緊急防護措置の実施に関する決定に用いることは、国際原子力機関 (IAEA) 等の国際標準からも外れる。ここからは、以下の教訓が導かれる。

教訓 1：緊急防護措置の実施

施設の状態に関しあらかじめ決められた判断基準に基づいて、あらかじめ決められた範囲の予防的防護措置が放射性物質の環境への放出以前に迅速に実施できるような準備を確立しなければならない。

この問題については事故後、原安委の防災指針検討ワーキンググループで検討された⁶⁾。国際標準に従い、緊急事態区分と区分決定のための施設における判断基準として緊急時活動レベル (EAL) の重要性が指摘され、それに基づいて、予防的防護措置を準備する区域 (PAZ) 内で予防的防護措置を放出前に実施する考え方が示された。その考え方は、原子力規制委員会 (以下、「規制委」) の原子力災害対策指針 (以下、「災害指針」)⁷⁾ に反映している。

福島第一事故では、この他、スクリーニングレベルや安定ヨウ素剤服用の混乱、屋内退避の長期化、病院や介護施設の要支援者の防護等の問題が生じた。屋内退避、避難、安定ヨウ素剤の予防服用といった緊急防護措置の実施については、準備段階において防護戦略全体の中でその実施手順の最適化を十分に検討しておく必要がある。避難は、自然災害等、多くの経験から最も効果的な措置と考えられる。リスクの高いサイト近傍の住民が先行して避難を行い、必要に応じ周辺住民が段階的に避難するスキームを確立しなくてはならない。屋内退避は迅速に実行可能で、新たな情報に容易にアクセスできるという利点があるが短期間の対策である。早期の一時的なブルームの回避等、その戦略を放出シナリオとの関係で検討する必要がある。安定ヨウ素剤の予防服用は、放射性ヨウ素の取り込みの前に行わなければ効果が十分期待

できない。事前配布と事後の避難所での配布に関する実施範囲と手順、服用指示の判断の手順等、避難や屋内退避の補完措置としての検討が必要である。

これら緊急防護措置実施の戦略については、国が基本的考え方を示し、地域防災計画の策定に当たってはプラントの特性に応じて地方自治体と事業者および対象となる住民の意見も踏まえ、準備段階での十分な検討が必要である。事前の計画が完璧ということはありません。地域防災計画はその時点で最善の策を検討し、訓練によってフィードバックを行い、絶えず見直す枠組みを確立する必要がある。

教訓 2：避難と屋内退避

病院等における要支援者の安全な避難のための事前準備が必要である。屋内退避は、避難や移転が安全に実施可能となるまでの短期間のみ実施すべきである。

2. 飲食物摂取に関する防護戦略と課題

汚染した飲食物の摂取による被ばくは、内部被ばくという住民の懸念とともに風評被害という社会的懸念をもたらす。飲食物に関連した防護戦略をいかに合理的に考えていくかは重要である。時間軸に沿って 2 つの課題がある。ひとつは、放射性ヨウ素、テルリウム等の短半減期核種の寄与が大きいと考えられるブルーム通過後の早い段階での迅速な出荷・摂取制限である。今回の事故では、3月16日採取の水道水や農畜産物に初めてヨウ素 131 が検出されてから実際に出荷・摂取制限が実施された3月21日までに5日を要している。短半減期核種の体内への取り込みの防止、無用な内部被ばくの回避は迅速性が重要である。飲食物中の放射性核種の濃度ではなく、空間線量率のように容易に計測可能な運用上の介入レベル (OIL) を準備し、一時的に汚染食物の摂取を制限し、その後により綿密に濃度指標に基づく OIL で出荷・摂取制限を講じる 2 段階のスキームを考慮すべきである。

もう一つの課題は、放射性セシウムを代表とする長期的な内部被ばくの影響を防護するための飲食物制限レベル設定の考え方である。厚生労働省は当初、原安委の防護指標を暫定規制値と定めた。原安委の指標は災害対策本部等が飲食物の摂取制限措置を講ずることが適切であるか否かの検討を開始するめやすである。その後、2012年4月1日から厚労省は食品安全の観点で、国際的にみても非常に厳しい規制基準を設けた。国際放射線防護委員会 (ICRP) 2007 年勧告にあるように、個々の防護措置は単独ではなく、様々な防護措置からなる防護戦略全体の最適化のプロセスの中で、本来検討すべき問題である。事故によって汚染された飲食物の摂取制限に関する判断基準を設定する場合、以下の観点からの検討が必要である：

- ・摂取制限による放射線影響の回避と栄養の観点も含む代替品の確保
- ・基準となる線量レベル設定において考慮すべき経口摂取線量の寄与
- ・食品摂取量および汚染割合の現実的評価
- ・消費者の食品安全と被災地域における生産者の状況
- ・輸出入に関しては国際基準との調和

飲食物摂取制限は、国内的には消費者の食品安全とともに生産者の経済活動の観点から国内事情を十分に反映した考察が必要である。一方、輸出入の観点からは国際的に共通基盤に立った考え方を確立する必要がある。このような観点から自国にとどまらず、国際的にも明確なガイダンスの必要性を提起していかねばならない。

教訓 3：迅速な飲食物に関する制限

初期対応の危機管理段階における飲食物に関する制限には、空間線量率等の迅速に得られるデータを参照する運用上の介入レベル(OIL)を準備すべきである。

教訓 4：長期的な飲食物に関する制限

長期的な飲食物に対する防護措置については、被災地の状況とともに国際的な調和も考慮に入れた、現実的な勧告が必要である。

この問題については、規制委の災害指針⁷⁾に空間放射線量率による OIL に基づく早期の地域生産物の摂取制限が明記された。

3. 緊急防護措置の解除と長期的防護措置の実施

危機管理段階で実施した 20km 内避難と 20～30km 範囲の屋内退避は、政府によって 4 月 22 日に 20km 圏内の警戒区域と圏外の計画的避難区域および緊急時避難準備区域として変更された。事故当時、防災指針には避難や屋内退避の解除、また一時的移転等の長期的防護措置に関する考え方や判断基準は示されていなかった。国際的にはすでに ICRP2007 年勧告が出され、それまでの行為と介入というプロセスに基づく放射線防護のアプローチから、計画被ばく・緊急時被ばく・現存被ばくという被ばく状況の特性に基づいたアプローチへと発展している状況にあった。計画的避難の実施は当初、従来の回避線量に基づく避難の介入レベル(50mSv)を参照して追加的防護措置の検討が行われたが、原安委は 4 月 10 日、ICRP2007 年勧告の緊急時被ばく状況の考え方に基づいて計画的避難の実施および緊急時準備区域への移行を助言した。

このように、事故以前に長期的な防護措置の検討を怠っていたこと、緊急時に適用する国際的な放射線防護の考え方が変わり関係者の十分なコンセンサスを得るの

に時間を要したこと等が原因で計画的避難の実施が遅れた。さらに、政府は関係自治体や住民との協議にも時間をかけなければならなかった。したがって、福島県の県民健康管理調査による外部被ばく積算実効線量の推定では、サイトから 20km 圏内に居住し最終的に遠方に避難した住民に比べ、後に計画的避難区域の設定により避難した住民に比較的高い線量もたらされている。この結果からも、3 月 15 日の放出に起因すると考えられる高い汚染レベル地域の住民に対する追加的防護措置実施の意思決定の遅れが指摘できる。IAEA は 3 月 30 日、それまで持っていた避難の OIL を福島事故に準じて独自に修正し、日本政府に対して慎重な評価の必要性を助言している。ここにおいても、放射性物質の放出後における防護措置実施の判断が、環境で測定可能な量で示される OIL とモニタリングによって迅速に行われるスキームの重要性が明らかとなった。

2011 年 9 月 30 日に原安委の助言を踏まえ、緊急避難準備区域内の解除が行われた。また、ステップ 2 完了を受けて原子力災害対策本部は 12 月 26 日、警戒区域および計画的避難区域の見直しに関する基本的考え方を示し、翌年の 3 月 30 日に原安委の助言を受け区域の見直しを決定した。避難区域については、この時点が ICRP の言う緊急時被ばく状況から現存被ばく状況への移行、すなわち復旧段階の始まりと考えられる。政府によるこの決定は、帰還する住民の放射線による健康影響に対する防護と同時に、持続可能な生活基盤を保証しなければならない。現存被ばく状況においては、除染による放射線状況の改善があっても基本的に線源の制御は難しく、被ばくレベルは個人の行動様式に大きく依存する。政府や地方自治体は放射線状況の改善とともに地域や個人が実行する防護措置を支援するための情報や有効性を評価する枠組みを提供する必要がある。長期的な復旧計画では人の健康、環境や社会・経済的な様々な面が関与するが、放射線防護の観点からは住民が自らの被ばく管理に関与できるように個人モニタリングのシステムを確立し、また放射線の健康影響に対する不安に対処するために、健康調査を充実していく必要がある。

教訓 5：時間推移に応じた防護措置

緊急防護措置と長期的防護措置の実施、および通常生活への復帰まで含めた対応の考え方や判断基準を、緊急事態への準備段階において確立していなければならない。想定される範囲の緊急事態の状況と対応する防護措置に対して、放射線防護の原則を適用するためのガイダンスをあらかじめ確立していなければならない。

教訓 6：運用上の介入レベル

緊急時における意思決定の指針として、運用上の介入レベル(OIL)は非常に重要である。OIL については、よ

り詳細な国際的なガイダンスが必要である。

この問題についても、規制委の災害指針⁷⁾に空間放射線量率による OIL に基づく早期の一時移転の実施が明記された。

4. 緊急事態管理と運営の課題

オフサイトの緊急時対応は深層防護の最後の砦として、IAEA の基本安全原則の原則 9 に「緊急事態への準備と対応」として明記されている。その主要な目標は、①現場、地域、国、国際間の各レベルで効果的な対応ができるように確実に取り決めがなされること、②合理的に予測可能な事象に対して確実にリスクを軽微なものとする、③人や環境への影響を緩和するために実施可能な手段を講じること、とされている。③の防護措置の課題については、すでに述べた。②の目標を達成するには、ハザード評価で考え得る範囲の事象を検討し、地震のような通常の緊急事態との組み合わせを含む緊急事態を考慮しなければならない。緊急時対応の失敗はあらかじめ準備していた想定範囲を超えたところで起こる。したがって、ハザード評価によって如何に合理的に予測可能な事象に対して確実に準備するかを問うことが重要であると同時に、それを超えるものに対応する柔軟性もまた重要な要素となる。準備段階では、仮に緊急事態が生じて想定範囲に収まるように平時からその対応可能な範囲を拡げる努力が必要である。危機管理段階の対応では、あらかじめ決められた手段でまず対処し、その枠を外れた場合に柔軟に対応できるように平時から能力を養っておかねばならない。

教訓 7: 複合的緊急事態への対応整備

緊急事態への対応は、非常に発生確率が小さいと考えられる事象も含め、すべての範囲の想定事象を考慮し、また、地震等の緊急事態との組み合わせを考慮した準備を整えておかねばならない。

そのためには、以下の点を考慮し現場、地域、国、国際間の各レベルでの関係機関の責務と役割およびその調整のあり方をもう一度見直す必要がある。そして、組織間で十分に明確にされた合意および統合化された対応を調整するための取り決めを行い、それが実効的に機能するように訓練によって絶えず見直しを行っていかねばならない。

- ・情報が少なく不確かさが大きい初期の危機管理の段階では、発災現場に近い事業者と地方自治体が連携し、あらかじめ決められた手順で現地の判断で迅速に緊急防護措置を実行していくスキームを確立していく必要がある。
- ・事業者はオンサイトの緊急時対応はもちろんのこ

と、EAL の設定、異常事態の通報だけでなく、住民に必要な緊急防護措置の判断や勧告といった地域防災計画との境界に踏み込んだ役割を今後検討していく必要があるだろう。

- ・防護措置実施の運営を担う地方自治体、住民防護の最前線に立つのはプロとしての警察や消防、そして自衛隊である。複合災害でなくとも、緊急防護措置実施の運営は他の一般災害における防災対策と共通の基盤でできるだけ統合すべきである。

IV. INES 評価に関する課題

原子力あるいは放射線の利用において事故や故障が起きた時に、国際的に統一された基準に基づき評価された事故・事象の安全上の重要性を、ただちに国内の公衆に知らせ、また主要なものについては IAEA にも通報する仕組みとして、国際原子力・放射線事象評価尺度 (INES) がある。このために「INES ユーザーズマニュアル (INES User's Manual)」が整備されており、現在はその 2008 年版⁸⁾が用いられている。

福島事故の最初の INES 評価は、3 月 12 日の 0 時 30 分頃になされた⁹⁾。福島第一の 1～3 号機における事象は、INES 評価の 3 つの基準のうち「深層防護」基準に基づいて、すべての熱除去能喪失があったとして、いずれもレベル 3 と評価された。なお、福島第二の 1, 2, 4 号機に対しても同様の評価がなされている。

2 度目の評価は 3 月 12 日の夕刻になされた¹⁰⁾。福島第一 1 号機における事象は、「施設における放射線バリアと管理」基準に基づき、レベル 4 と再評価された。16 時 17 分に福島第一サイトの敷地境界での放射線レベルが上昇し、1 号機からの放射能放出と判断されたことによる。

3 度目の評価は 3 月 18 日になされた¹¹⁾。福島第一サイトの 1～3 号機の事象は、「施設における放射線バリアと管理」基準に基づき、レベル 5 と再評価された。これは、原子炉水位が有効炉心頂部以下であった時期があり、水素爆発があったこと、敷地の内外で放射線レベルの上昇が観測されたことに基づき、高い可能性をもって原子炉炉心の溶融が起きたと判断されたことによる。

4 度目の評価は 4 月 12 日になされた¹²⁾。4 月に入り原子力安全・保安院は、JNES が行った福島第一 1～3 号機の原子炉の状態についての解析結果に基づく試算により、INES ユーザーズマニュアルに示された換算係数を用いて、大気中に放出された放射エネルギーをヨウ素 131 換算で 37 万テラベクレルと評価している。また、原安委は環境モニタリングからの逆算により、福島第一原子力発電所からの大気中への放出量の合計を、ヨウ素 131 と等価になるよう換算した値として、63 万テラベクレルと評価した。

これらの評価値は大きな不確かさを有するものである

が、いずれもレベル7の判断基準である「大気中への放射性物質の放出量がヨウ素131換算で数万テラベクレル以上」を上回るものである。このため保安院は、(3月18日までのINES評価はINESユーザーズマニュアルに基づき号機ごとになされたが、)施設全体としてレベル7の事象であったとの評価を行い、公表した。福島事故についてのINES評価は2013年3月末時点でも暫定評価のままであるが、保安院、原安委、東電、幾つかの研究機関等が推定した大気中への放射性物質放出量からは、施設全体としてレベル7に相当するという数字は変わらないと思われる。

福島事故は、INES発足後初のレベル7事象であるとともに、緊急事態下で、十分な情報が得られず、かつ、事態が進展しつつある状況下でINES評価がなされるという、これまでに前例のないものであった。

福島第一事故でのINES評価については、以下のようない課題が挙げられている。

- ・INESは「事故の重大さを迅速に公衆に知らせる」ためのものであるが、プラントパラメータや放射線モニタリングの喪失により、事故進展や放射性物質放出の状況の推定が困難であった。
- ・その結果、レベル5の評価は事故開始から1週間後、レベル7の評価は1ヶ月後になされた。「迅速な通知」にはほど遠かった。
- ・INES評価は、各時点で「高い信頼性をもって判明した事実」に基づいて実施された。しかし、事象進展に応じて評価結果が変わり、事故を軽く見せようとしたのではないかとの批判につながった。
- ・INES評価はこれまでユニット毎になされており、今回のような同時多発事故の場合であってそれぞれのユニットからの放射性物質放出量等の評価が困難である場合の評価の在り方も課題である。

福島事故後には、国際社会においても、「INESは緊急事態下での情報伝達手段として有用なのか」という疑問が示された。INES諮問委員会(INES-AC)では、IAEA事務局長の付託を受けて検討を行った。その結果、INESは、緊急事態下で影響を受け得る公衆にとって必要な情報を伝える手段とはなり得ず、むしろ、そういう影響と無縁の公衆に事故の重要性を伝えるものであると整理されている。また、INES-ACの「INESの利用(Use of INES)」ガイダンスに対し、シビアアクシデント進行中のINES評価および情報伝達のあり方を追加した「追加ガイダンス」が作成された。そこでは、炉心溶融の発生などの事態がかなりの信ぴょう性をもって明らかになったときはそれについてのINES評価をすべきである、ただし、事態が進展中の場合は、その発表の仕方には十分注意が必要である、また、ひとつの事象に過度に

何度もINES評価をすべきでないことが示されている。

V. 事故時の協力・連絡に関する課題

1. 課題の概要

原子力施設の安全設計や日常的な安全管理における問題、あるいは原子力施設で何らかのトラブルが起きたとしても、それが従来の設計基準の範囲内ににとどまる場合は、規制当局の主たる役割は設置者の監視(オーバーサイト)である。しかし、事故が進展してシビアアクシデント状態になれば、規制当局はもとより、国も地方自治体も、自ら振舞うことが要求される。このような状況下では、各関係機関が事故の状況を把握していることは当然必要であるし、各組織がどのように行動しているのかを互いに理解していることも不可欠である。

しかし、福島第一事故では、組織間の連携は必ずしも十分でなかった。また、事故がどのように進展したかを理解する上で必要不可欠な、プラントパラメータそのもの、あるいはその存在や信ぴょう性に関する情報も、必ずしも適時・適切には関係者に伝わらなかった。

こうした問題は、安全部会としては事故調査における最重要対象のひとつと考えている。しかし、組織間の連携不良・連絡不良について具体的にどこにどのような問題があったかを調べるには、調査権限も必要であるし、時間も要する。ここでは、分析が不十分とは思いつつ、幾つか問題点を挙げておくこととする。むしろ、今後規制委・規制庁によって、問題点が確認され、適切な対応がなされることを期待する。

2. 重大な事故が起きた時の各機関の役割分担について

原子炉の炉心が溶融するような重大な事故が起きたときには、事業者だけでなく、規制当局、国、地方自治体等が連携して対応することが必要である。第5回セミナーでは、JNESの齊藤実氏より、重大な事故が起きたときの各機関の役割に係る紹介がなされた¹³⁾。そこでは、東日本大震災とその後の津波に伴う原子力発電所事故への対応において、オフサイトセンターが果たした役割が整理されるとともに、今後解決すべき課題が抽出された。役割の整理と課題の抽出は、事故進展と対応の時間軸に着目して行われている。また、これらの課題に対して米国および国際社会においてこれまでに議論されてきた事項も紹介され、課題解決に向けてわが国で取り組むべき事項がまとめられた。

第5回セミナーにおいては、事故時の状況に基づいての齊藤氏からの説明を受けての議論で、「国、地方自治体も含めていろいろなステークホルダーがあるが、事故が起こった時の対応計画のあるべき姿について、あらかじめ議論していく必要がある」との意見があった。一方で、「サイト対応は事業者がやってほしい支援をするこ

とが重要で、事業者の要請に応えるのが基本になる。余計な介入をすると却って現場を混乱させるので、何をすべきかを考えておくことが大事」との意見もあった。これについては、「徴集されるメンバーが何人かいれば、必ずありがた迷惑をする人が出てくる。徴集する仕組みを作った上で、やるべき仕事を明確にして、メンバーを選ぶ必要がある」との意見もあった。

規制委の更田委員は、「戦場のような状態になっているところに問い合わせをするのがいかに負担になるかは想像がつく話で、事業者の邪魔をしないことが非常に重要であり、もちろん要請があった場合はそれにできるだけ応えるのが国の役割と考える」と取りまとめた。

3. 福島第一事故時の情報取得・情報伝達に関する事例

福島第一の1, 2号機では、津波によって直流電源まで失われ、現地においても一時期プラントパラメータを得ることができなかった。加えて、こうした状況は適時的確には規制当局や国、地方自治体には伝わらなかった。以下、どのような情報が伝わらなかったか列挙する。

- (1) 原子炉水位指示値の信ぴょう性：水位について、東京電力がはっきりと間違いであったと公表したのは、事故の2か月後の2011年5月12日である。事故の最中および直後には、水位の数字だけが「測定値」として示されていた。その数字によって多くの関係者が事故の状況を誤認した可能性がある。
- (2) 直流電源喪失とICのフェイルセーフ設計に関する情報：事故の進行中、現地から離れたところにいた多くの関係者は直流電源の喪失を知らないでいた。直流電源喪失を知った後では、直流電源のない中で炉心への注水はなされたか否かが関心事であったが、この問題を考えるには必須であるフェイルセーフ論理についての情報共有も遅れた。
- (3) 津波来襲前のプラントパラメータ：「津波の前は直流電源が生きていて、弁位置情報を示すことも弁の制御をすることも可能だったはず」であるから、「津波以前には通常の計測系による測定データがあるはず」であったが、事故後しばらくの間、東京電力以外の多くの関係者は、このデータの存在に気づかずにいた。
- (4) 2号機の原子炉水位指示値の信ぴょう性：2号機の原子炉隔離時冷却系(RCIC)は直流電源がなく制御不能のまま稼働し続けた。ずっと後になって東京電力から、原子炉水位がRCIC駆動側配管ノズル部にあって、水と蒸気の二相流がRCICタービンを「水車として」回して、炉心に注水していたと考えられること、また、水位測定値について圧力補正をするとぴったりこの高さになっていることが示された。事故後あちらこちらの研究者によって

なされた「再現解析」は、こうしたことを理解せずになされた可能性が高い。

- (5) 2号機圧力抑制室付近での衝撃音：この問題については、VI章で記述する。
- (6) SPDSの喪失：SPDS(Safety Parameter Display System)は、施設の安全に係る情報を整理してわかりやすく表示するシステムである。福島第一事故時、SPDSは直流電源喪失で不作動になり、また、後の調査によればデータ送信のための機器も地震動で故障している。
- (7) 環境モニタリングの喪失：福島第一周辺での環境モニタリングシステムは、多分電源喪失により、事故後かなりの期間失われた。(代わりに、モニタリングカーによる測定がなされている。)

これらの問題に取り組むには、まず、以下のような異なる問題があることを認識する必要がある。

- ・ 直流電源の喪失で計測不能。これは基本的に計測系の問題ではなく、電源系の問題である。ただし、電源が失われたときの計測については考えておく必要がある。
- ・ 水位の圧力補正。これは、運転員は理解していること。表示される指示値は実水位とは違うが、故障ではない。
- ・ シビアアクシデント時には水位測定値はあてにならないということ。これは水位計の適用範囲の問題であって、故障ではない。しかし、シビアアクシデント時のプラント状態の把握のためには放置できない問題である。
- ・ 2号機ドライウェル圧力と圧力抑制室圧力の測定値の乖離。これは、多分、計測系における故障である。計測系そのものについては、このように問題を分けて取り組むことが必要である。

ただ、同時に大事なことは、事故時の情報伝達のあり方である。上述のように、計測系に係る諸問題には本質的に異なるものがある。しかし、計測の専門家以外には問題の区別がつかない。結果として事故時対応や事故後分析における阻害要因となる。関係者に生データを含む情報を遅滞なく伝達することは当然大事であるが、それがどのような性質の情報なのかを適切に説明することも大事である。

VI. 事故情報の更新に関する課題

事故の教訓の反映には、まずは「実際に何が起きたか」を正確に把握することが大切である。事実を正しく認識しなければ対策も的を射ていないものになる。

国は、2011年6月にIAEAで開催された福島第一事故に関する閣僚級会合で事故について記述している。しかしながら、多くの重要な事項について、当時はまだわ

かっていなかったことが多かった。加えて、事故直後の混乱の中で書かれたものであったためと思われるが、記述には技術的な分析が不十分あるいは不正確なところもある。

このことは特に国際社会で深刻である。他国も、福島第一事故に鑑みて原子力安全の再考を図っているが、その中核になっている人でさえ、「福島第一事故で実際に何が起きたか」を正しく把握していないことがある。代表例としては次のような事項がある。

- (1) 原子炉に燃料がない4号機において、3月15日6時14分に爆発音がし、その後、4号機原子炉建屋5階屋根付近に損傷が確認された。これについては、使用済み燃料プール(SFP)内の燃料棒が露出して温度上昇し、ジルコニウム-水反応で水素が発生し、それが爆発したのではないかの推測もなされた。
- (2) 2号機において、3月15日6時00分～10分頃に圧力抑制室付近で衝撃音がし、それに合わせて2号機の圧力抑制室圧力も低下した。これは、「圧力抑制室に大きな破損口が生じたに違いない」という推定につながった。

これらの情報は現在では既に否定されている。(1)については、4号機の原子炉建屋で水素爆発は起きているが、これは3号機から流入した水素によるものと推定されている。また、事故期間を通じて、SFPの燃料棒が露出することはなかったと、高い確度で推定されている。(2)については、4号機の爆発音を誤認したものとされている。

事故時に何が起きたかを正確に把握することは、今後の安全対策を考える上で不可欠である。たとえば、上述(2)の例については、当初の誤った認識に基づいて、「圧力抑制室で水素爆発が起きたに違いない」、「いや、圧力抑制室気相部は窒素で不活性化されているから、これは過圧破損ではないか」という推論もあった。「圧力抑制室破損のあとに敷地境界の放射線レベルが著しく高くなっていることから、圧力抑制室プール水による放射能のスクラビング除去能が、想定されていたほど有効でなかったのではないか」との推論にもつながった。これらの推論はすべて誤りであった。

国内ではこうした誤認識による推論は少なくなったと思うが、国外に正しく伝えることも事故を起こした国の責務である。今後は、国、特に、規制委・規制庁によって、「福島第一事故で実際に何が起きたか」を国際的に知らしめる努力がなされることを期待する。

Ⅶ. おわりに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震と津波、そしてそれに伴う福島第一のシビアアクシデント以降、既に2年と9か月が経過した。これまでに国内外の各機関で、この事故の分析が進められ、多くの教訓や提言がま

とめられその中のいくつかのことは既に実行に移されつつある。独立した新しい組織である規制委とその事務局である原子力規制庁が2012年9月に発足し、防災指針の見直しやシビアアクシデントを規制の要件とするべく新しい規制基準が策定され、本年7月施行された。事業者においては、これまで緊急安全対策を進めストレステストでその安全対策の評価と効果確認を行うと共に、旧原子力安全・保安院報告書で提言された対策など、安全確保に向けた改善対策が進められてきた。また、一部の事業者においては、本年7月に既設発電所の新規規制基準への適合性の審査に向け、規制委へ安全審査の申請が行われた。

安全部会は福島第一事故を分析・評価するために、2012年に8回にわたるセミナーを開催したが、そこでは、メーカーの設計者、運転者、安全規制や安全研究に携わった者たちが、改めて事故を振り返り、自らの反省と今後の課題を提示した。その内容は、外的誘因事象の想定の不十分さ、深層防護設計の不十分さ、円滑なコミュニケーションの不足や原子力災害への対応の不備など多岐にわたるものであった。またこれらに対する参加者との意見交換では多くの質問・意見が出され、参加者の関心の高さが示された。議論の過程では、シビアアクシデント対策として何を考えてどう対策してきたか？何が不足していたか？現場の人たちが何を考えてどう対応したか？何が困難であったか？原子力以外の技術者たちは原子力をどう感じたか？規制側としての注意事項は何か？等、極めて重要なことが語られた。

このような貴重な内容をぜひ記録として残し、今後の原子力の現場に携わるものはもちろん、他の多くの人たちに読んで頂いて、福島の事故をより一層正確に理解して頂くと共に、今後、原子力安全部会「福島第一事故に関するセミナー」報告書の内容がそれぞれの関係機関における活動において活用され、関係者の協力と努力により、これまでの各種事故調査報告書と相まって、原子力発電の安全水準の向上に貢献されることを期待する。

最後に、5回にわたる本解説記事の執筆をして頂いた皆様そして最後まで読んで頂いた読者の皆様にも心からお礼申し上げる。

— 参考資料 —

- 1) 原子力安全部会、「福島第一原子力発電所事故に関するセミナー」報告書、平成25年3月。
- 2) 福島県、県内7方部環境放射能測定結果、<http://www.cms.pref.fukushima.jp/download/1/7houbu0311-0331.pdf>
- 3) 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、中間報告(本文編)、平成23年12月26日。
- 4) 福島県、県民健康管理調査「基本調査」の実施状況について、<http://www.pref.fukushima.jp/imu/kenkoukanri/250605siryou1-2.pdf>

- 5) 原子力災害対策本部, 原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について—, 平成 23 年 6 月.
- 6) 原子力安全委員会, 「原子力施設等の防災対策について」の見直しに関する考え方について 中間とりまとめ, 平成 24 年 3 月 22 日.
- 7) 原子力規制委員会, 原子力災害対策指針, 平成 25 年 6 月 5 日全部改正.
- 8) IAEA, “INES, The International Nuclear and Radiological Event Scale—User’s Manual, 2008 Edition”, (2009).
- 9) 原子力安全・保安院による記者会見(2011 年 3 月 12 日).
- 10) 原子力安全・保安院による記者会見(2011 年 3 月 12 日).
- 11) 原子力安全・保安院, 「東北太平洋沖地震による福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所の事故・トラブルに対する INES (国際原子力・放射線事象評価尺度) の適用について」, 平成 23 年 3 月 18 日.
- 12) 原子力安全・保安院, 「東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所の事故・トラブルに対する INES (国際原子力・放射線事象評価尺度) の適用について」, 平成 23 年 4 月 12 日.
- 13) 齊藤実, 「初動時の現地対策本部の活動のあり方について」, 第 5 回セミナー資料, 2012 年 8 月 20 日, <http://www.aesj.or.jp/~safety/H240820seminorsiryou4.pdf>.

著者紹介



本間俊充(ほんま・としみつ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 環境影響・リスク
評価

関村直人(せきむら・なおと)

本誌, 55 [9], p.498 (2013) 参照.

阿部清治(あべ・きよはる)

本誌, 55 [9], p.498 (2013) 参照.



新田隆司(にった・たかし)

日本原子力発電科(株)
(専門分野/関心分野) 原子力安全設計

日本原子力学会誌 ATOMOS 広告のご案内

一般社団法人 日本原子力学会

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

■賛助会員料金 (消費税別)

表 2	150,000 円	前 付	110,000 円
表 3	140,000 円	後 付	100,000 円
表 4	190,000 円	差し込み	230,000 円

※差し込みは本誌に同封となります。

■一般料金 (消費税別)

表 2	160,000 円	前 付	120,000 円
表 3	150,000 円	後 付	110,000 円
表 4	200,000 円	差し込み	240,000 円

■上記の金額は、1 ページあたりのモノクロの料金です。カラーの場合、1 ページあたり 120,000 円追加となります。また、版下・フィルム製作費は別途申し受けます。

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

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

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

解説

原子力規制委員会の活断層評価 張り子の虎ではないのか？

東洋大学 渡辺 満久

安全な原子力施設は再稼働してもよいが、原子力規制委員会による厳しい安全審査が必要である。現状では地盤のズレへの対応は困難であり、これに厳しく対処した敦賀原子力発電所における規制委員会の対応は全く適切であった。ただし、問題を敷地内活断層に矮小化するのではなく、周辺活断層の性状や敷地で起こりうる現象を正しく評価することが重要である。下北半島の原子力施設の安全審査などにおいて、規制委員会の真価が問われる。

I. はじめに

2012年10月より、原子力規制委員会(以下、規制委員会と呼称する)による原子力施設周辺の活断層評価が進められている。これを巡っては、様々な意見が交わされているが、一部には大きな誤解に基づくものもあるように思う。たとえば、「福島事故が活断層によるものではないのに、いきなり活断層問題が取り上げられて、しかも非常に厳しい基準を設定している」といった批判である。

現在の審査が始まったきっかけは、もちろん、2011年3月に発生した福島第一原子力発電所の深刻な事故にある。この事故によって、原子力の安全性に係わるかつての審査には大きな欠陥があったことを、国民は認識した。このため、旧原子力安全・保安院および旧原子力安全委員会(以下、旧審査委員会と呼称する)は、原子力の安全審査に関する様々な見直しを行うことを決定したのである。過去の審査への真摯な反省に基づいて見直しを行うとき、最も深刻な事態につながりかねない活断層問題を取り上げたことは当然のことなのである。また、そのような姿勢を明確にすることなしに、国民の信頼を回復することなどできるはずがない。

活断層の評価は、規制委員会の時代になって突然に始まったわけではない。旧審査委員会の時代に決められたことを引き継いでいるのである。

著者は、電力の安定供給や地球温暖化問題への対応が必要であるという立場から、原子力の利用は進めてもよいと考えている。ただし、それは安全性の確保が前提で

あることはいうまでもない。これまでに多くの原子力施設周辺で活断層の危険性を学会などで指摘してきたが、それだけ過去の審査がずさんであったかを示すものである。筆者が、規制委員会による厳しい活断層評価を望む理由がここにある。以下、規制委員会の活断層評価に係わる著者の見解をいくつか述べたい。

II. 活断層があると何が困るのか

活断層とは、最近、数10万年間に活動しており、近い将来にも活動することが予想される断層のことである。断層活動は地震発生を意味することが多いが、ズレ量が小さい(地震規模が小さい)と地表には痕跡は残らない。ズレ量が大きくて地震規模がM7クラス以上に達する場合、多くは地形に断層活動の痕跡が残るので、地形的にその位置を認定することが可能となる。小さい地震を起こす活断層の位置を事前に認定することは困難であり、M7に満たない大きさの地震はどこでも起こると考えておくべきである。ただし、まれにはM7クラスの地震も発生するので、地形的に活断層を認定できない場合であっても、最大でM7規模の地震が発生することを想定すべきである。

地震を発生させる活断層(起震断層)の近傍では、副次的な断層活動や重力によって発生する地すべりで地盤がズレることもある。これらの構造は、山崎(2013)¹⁾に適切に示されている。ただし、山崎氏は、地形で認定できるもののみを活断層と定義しており、この点が筆者の見解とは異なる。

副次的な断層は地震を引き起こすものではないが、将来も活動することが予想される断層なので活断層と呼ぶべきものである。副次的活断層に関しては、ズレの量が小さく活動間隔が長い場合には地形では認識できず、起震断層周辺を掘削しないと発見できないものも多い。

The Examination of Active Faults by Nuclear Regulation Authority: Is NRA Just a Paper Tiger Putting Up a Bluff?: Mitsuhsu WATANABE.

(2013年7月10日 受理)

2013年に規制委員会が制定した新安全基準(地震・津波)では、震源として考慮する活断層、地震に伴って永久変位が生ずる断層、支持基盤を切る地すべりを総称して、「将来に活動する可能性のある断層等」と呼んでいる。本論の「活断層」とは、この前2者に相当する。

原子力施設の建設にあたっては、地形学的に認定される活断層の近傍を避けることが必要である。その第1の理由は、地形学的に活断層が認定できない場合より大きな直下地震が発生する可能性が高く、「揺れによる被害」も大きくなると考えられるからである。第2には、断層運動によって支持地盤に永久変形が現れ、重要施設の損傷(ズレによる被害)が発生する可能性があるためである。

現在、原子力施設周辺に活断層が確認された例は非常に多い²⁾。それは、適切な安全審査なしに建設されたためであろう。それら活断層の多くは、長さが短く見積られて(値切られて)いる。長い活断層は大きな地震を起こすと考えられているためである。また、そもそも、活断層の存在自体が無視されている事例も少なくない。

工学系の研究者の方々のご意見を伺っていると、「揺れによる被害」は耐震性強化によって食い止めることが可能であると思われる。したがって、「揺れによる被害」に関しては、地震動の大きさを適切に評価し、それに合わせた工学的対処がなされれば被害発生を食い止められるであろう。活断層の長さを値切らずに、適切に評価して安全性を確認できれば、その施設の利用は認められるべきである。

一方、ズレによる被害はどうだろうか。原子炉建屋などの重要施設直下において支持基盤の永久変形が発生したとすれば、配管の切断などの深刻な状況が発生することが容易に想像できる。ズレによる被害は、活断層のほかに、地すべりでも発生しうる。これらの被害を食い止めることができるだろうか。

規制委員会の「新安全基準」検討委員会において、これまでの安全審査に係わってきた委員から「断層運動は数千年に1度程度の確率で発生するものであり、土地がズレても、ズレ量を予測して工学的に対応できる可能性がある。少なくともそういうチャレンジが必要である」という主旨の意見が出された。これに対して、「数千年に1度とはいってもそれは明日のことかもしれないし、ズレの量も明確に示すことはできない。土地がズレた場合に壊れないとは断言できない」という意見が強く、前者の意見は採用されなかった。筆者は、この結論を高く評価したい。

活断層の平均的なズレ量を推定することは可能であるが、「実際にどのくらいズレるか」と問われれば、メートルオーダーの最大値を提示するしかない。そのような大きな数値となる確率は低いし、そもそも発生確率も低いという反論が予想される。しかし、原子力のような重要施設の安全性を、発生確率で議論すべきではない。そ

れは、3・11で学んだはずである。2011年3月11日に発生したのは、30年発生確率99%と予想されていた宮城県沖地震ではなく、1,000年に1回の超巨大地震であったのである。

現在、メートルオーダーの土地のズレを完全に吸収し、絶対に被害が出ないような工法は開発されていない。研究の進展には非常に期待しているが、対応できるかどうか未確定の段階で、現状の施設を用いた「壮大な実験」を行うことは絶対に許されない。

「新幹線や高速道路はどうするのか」という意見もある。もちろん、それらについても「ズレ」による被害が出るであろうが、それらを原子力と同列視することは正しくはない。また、「活断層ばかりに注目しても、隕石が落ちることもある」という主張も耳にするが、「隕石が落ちることもあるから活断層を考慮しなくてもよい」という理屈は成り立たない。大きな被害をもたらす可能性のあるものが、目の前にあるのである。ズレない健全な土地を理学的に選定し、そこに工学的に安全な建物を造るべきである。

III. 浦底断層の審査

2013年5月、規制委員会は、敦賀原子力発電所2号機原子炉建屋直下に「耐震設計上考慮する断層」が存在する可能性があるとして断定した。著者の脳裏には、5年前、敦賀原子力発電所敷地内で浦底断層を観察したときの光景がよぎった。そのときの大きな驚きが蘇った。浦底断層は、兵庫県南部地震より大きな地震を起こしうる第1級の活断層である。その活断層が地層を激しく切断・変形している現場が、現役の原子炉のわずか250m隣にあったのである。

「どうしてこのような活動的な浦底断層を見逃してきたのか」という問いに対して、事業者も旧審査委員会も「調査も審査も適正だった」と繰り返した。見落としていたわけではなく、指針が改まり、活断層の基準が、5万年前以降から12～13万年前以降に変わったので、活断層であると認識されることになったという説明であった。しかし、約4,000年前以降にも活動している活断層を認めなかったという事実は、指針の変更とは全く無関係のことである。この件に関する真摯な反省は、一言も聞くことはできなかった。

2008年、浦底断層の活動性は正しく評価された。しかし、事業者は、原子炉建屋などの下に密集している小規模断層(破碎帯)が浦底断層と連動して動くことは頑なに否定してきた。たとえば、2号機原子炉建屋直下には古い時代に形成されたD-1破碎帯があるだけであると断定し、それらが浦底断層の活動と連動して動かないことはモデル計算によって確認したと主張してきた。しかし、第1級の活断層を「見逃した」事業者の説明には説得力はなかった。

今回の調査では、事業者がD-1 破碎帯の連続とするG 断層の近傍で、今まで知られていなかった「耐震設計上考慮する断層」(K 断層)が確認された。G 断層とK 断層の走向・傾斜は大きくは変わらない。G 断層(D-1 破碎帯)の近傍で、G 断層と似た構造をもつ断層が最近活動していることが、「新たに」確認された事実は極めて重大である。D-1 破碎帯は浦底断層の活動と連動した痕跡はないし、そのような構造が動くことは計算上も起こりえないとした楽観論は論拠を失った。敦賀原子力発電所2号機原子炉建屋直下に「耐震設計上考慮する断層」はない、という主張は破綻したのである。

「突然、活断層の危険性が取り上げられ、その存在可能性を中心に安全性を議論することは科学的ではない」という批判もあるという。しかし、すでに述べたように、活断層の問題は旧審査委員会時代からの宿題であり、過去のずさんな審査への反省に基づいて検討されているものである。規制委員会が唐突に取り上げたわけではない。また、単なる思いつきではなく、相当の根拠を基に可能性を指摘しているのである。既存の審査のルール(2006年・新指針、2010年・安全審査の手引き)には「グレーはクロである」という精神が貫かれている。ルールを正しく理解すれば、今回の規制委員会の判断が正しいことは明白である。

本原子力発電所敷地内の断層評価に関して、「破碎帯の調査を変動地形研究者が担当するのはミスマッチである」との主張がある³⁾。確かに、破碎帯の構造は断層岩・断層物質分析や構造地質学が専門とする分野であり、変動地形研究者にとっては専門外の分野である。破碎帯の分析を変動地形研究者が行うとすれば、それは問題がある。この点についてはご指摘の通りであり、今後よく考えておかなければならない問題である。

しかし、敦賀の審査で問題となったのは、K 断層の位置・形状と活動年代である。活動年代は、いわゆる上載層の年代観をもとに検討されており、それらは地形学(第四紀地質学)の専門分野である。筆者は、今回の審査において大きなミスマッチはないように思われる。

敦賀原子力発電所敷地内の活断層評価に関する報道などをみていて、気になったことがある。原子炉建屋などの重要施設直下の地盤がズレるかどうかは、重大な問題であることに疑いはない。しかし、問題の本質は、浦底断層のような第1級の活断層の近傍に原子力発電所を建設していることにある。そのような場所であるから、重要施設直下の地盤の安定性が問題となるのである。

現在、敷地内破碎帯(断層)問題への関心だけが異常に高まり、本質的な問題が軽視されている気がしている。まず、大きな活断層が周辺に存在しているかどうかを正確に把握する必要がある。それによって、想定すべき地震動が決まってくる。また、その活断層の活動によって敷地がどのような動きをするのか、傾くことはないの

か、敷地内断層はないのかなど、原子力の安全性を脅かすさまざまな問題を見逃さずに審査を行う必要がある。

IV. 下北半島と海底活断層

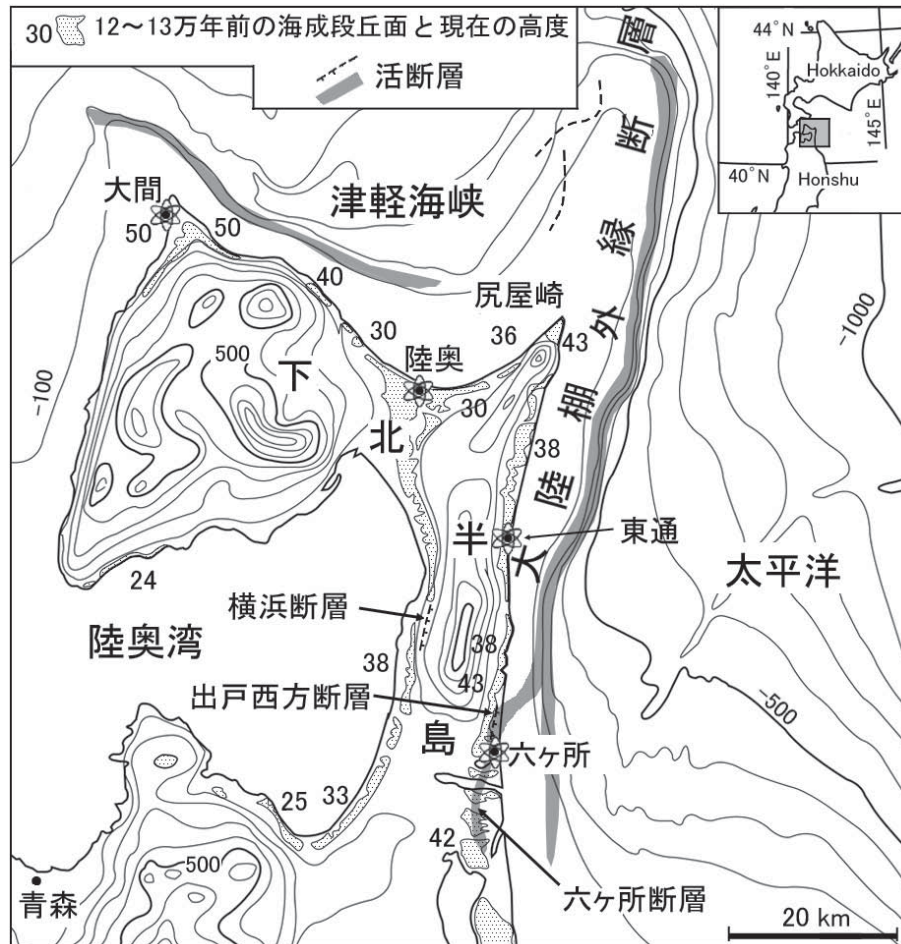
改めて申し上げるまでもなく、規制委員会は現有の施設を再稼働させるための組織である。決して、脱原子力のための組織ではない。したがって、安全であると確認されれば再稼働を容認するであろうし、場合によっては、危険性を見逃すことすらありうると考えている。そのような規制委員会の田中委員長は、下北半島の原子力施設の安全性についても再検討することを明言している。

下北半島には、わが国の原子力政策の根幹をなす、核燃料サイクルシステムに関わる重要な原子力施設が複数存在し、また建設されようとしている。繰り返しになるが、筆者はこれらの施設の建設・稼働に必ずしも反対ではない。安全であれば容認したいところである。しかし、この地域には非常に大きな活断層の見逃し問題があると考えており、このままの状態での稼働には反対している。規制委員会が下北半島の活断層を扱うならば、近々、規制委員会の存在意義が問われることになるかもしれない。

第1図には、下北半島の海成段丘面の分布、原子力関連施設の位置、および活断層(海底も含む)の位置・形状を示す。海成段丘面とは、過去の浅海底が陸化した平坦面であり、その陸側の分布限界が当時の海岸線である。下北半島には数10万年前以降の複数の海成段丘面が認められているが、第1図には12～13万年前の海成段丘面の分布を示している。12～13万年前当時、海面高度は現在よりやや高い程度であると復元されているので、この海成段丘面が海底であった当時の海岸線の、現在の高度がわかれば、隆起量や隆起速度がわかる。第1図に示したように、下北半島東部(六ヶ所村～尻屋崎周辺)では、当時の海岸線は、現在は標高30m以上の位置にあり、最近の12～13万年間に30m程度は隆起していることがわかる。

このような隆起運動を説明する上で、下北半島東部と並走する海底活断層(大陸棚外縁断層)が無関係であるとは考えにくい。池田(2012)⁴⁾は、下北半島の東方海域で実施された多数の音波探査結果をもとに、大陸棚外縁断層は確実に活断層であると認定している。また、渡辺ほか(2008, 2009)^{5, 6)}は、大陸棚外縁断層が南部で枝分かれして陸上に連続する活断層を六ヶ所断層と呼び、六ヶ所断層が上述の海成段丘面を変形させていると報告した。六ヶ所核燃料サイクル施設の一部は、六ヶ所断層による変形帯の中にある。

事業者と旧審査委員会は、上記の見解を完全に否定しているが、著者らには納得のゆく説明は全くなされていない。「危険性は認識できたが、それでは施設の稼働ができなくなるから、疑わしきは止めずで審査した」とい



第1図 下北半島の変動地形と原子力施設

うインタビュー記事⁷⁾をみて驚きを隠しえない。既存のルールでは「グレーはクロ」とされていたにもかかわらず、実際の審査の場では「グレーはシロ」とされていたのである。安全審査に大きな問題があったと考えざるをえない。

大陸棚外縁断層は長さ100kmを超える長大な活断層であり、想定される地震規模はM8を超える。六ヶ所核燃サイクル施設や東通原子力発電所で想定されている地震規模は6.8程度であるので、この活断層が見逃されたことによって、地震規模で100倍程度の値切り(無視)が行われていることだろう。上述したように、六ヶ所核燃サイクル施設では、ズレによる被害も予想できる。

六ヶ所核燃料サイクル施設には、大量の高レベル廃棄物が貯蔵されている。これら施設の安全性に関して、再度、慎重な審査が行われることを強く望んでいる。

下北半島北西端部・大間周辺においては、以下のような事実から具体的な地殻変動像が示されている(渡辺ほか、2012)⁸⁾。大間付近では、12～13万年前の海岸線の、現在の高度は60mである。その約10km南方では、同じ海岸線の高度は20m以下まで低下している。これらの事実は、本地域が確実に隆起していること、日本でも最大級の傾動運動が継続していることを示している。

最近約80年間の水準測量結果を分析したところ、このような地殻変動と関係するような定常的(慢性的)な変化は全く認められない。海岸部には地震のときに間欠的に隆起したことを示す地形(離水ベンチ)も確認されていることから、大間北方の海底活断層の活動によって、南に傾くように、間欠的に隆起してきたと考えられる。

2010年に制定された安全審査の手引きが適用される最初の事案であったため、大間原子力発電所の安全審査の件には非常に注目していた。ところが、審査の場では上記の事実関係は指摘もされておらず、われわれを大変驚かせた。われわれが事実関係を明らかにした後、事業者および旧審査委員会は、急ぎよ、追加調査を実施した。その結果、事実関係はほぼすべて追認せざるを得なかった。しかし、事業者も旧審査委員会も、全く説明もないままに、海底活断層の存在は否定したままである。

大間原子力発電所は、MOX燃料を使用する原子力発電所である。その重要性はよく理解できるが、上記の海底活断層は全く考慮されておらず、安全性に関しては大変大きな問題を抱えているといわざるをえない。安全が確保されているとはいえない状況であり、早急に耐震性の再検討が必要である。

V. 最後に

筆者は、これまでの原子力施設における活断層評価に関する問題点を指摘し、批判を加えてきた。規制委員会には、その意味で厳しい審査を行うように期待している。敷地内の活断層だけで原子力発電所を評価すべきではないという批判もあるが、この意見には大変大きな問題がある。重要施設直下に活断層や地すべりがあることは、安全性にとっては致命的な問題である。「この車はブレーキが壊れていますけれど、ハンドルは効きますので大丈夫」などと言って車を売る人間はいないはずである。

ただし、活断層に関するこれからの安全審査を、敷地内活断層だけに焦点をあててしまえば、問題の矮小化につながりかねない。最も本質的な問題は、どうしてそのような活断層が存在しているのかということである。今後のバックフィットにおいては、周辺の活断層の性状や敷地に起こりうる現象も、詳しく検討してほしい。

このような期待を抱く一方で、どこまで本気で審査を継続するのかについての疑問も抱いている。何といても、規制委員会は再稼働のための組織である。再稼働を目的としたずさんな審査も起こりうる。

規制委員会が立ち上がり、活断層調査・審査のための外部有識者を選定するとき、それまでに審査やバックチェックに関わった研究者はすべて排除された。このようなやり方は、少々やりすぎだとも感じた。しかし、利益相反を厳しく適用した結果であり、一線を引くためには、ある程度やむをえないことと理解も示してきた。

しかし、最大の利益相反は原子力規制庁に存在してい

ることを忘れてはいない。過去の審査に係わった事務局が横滑りといっている状態でも、どこまで本気で安全を追及できるのか、しばらくは見守るつもりである。「規制委員会は張り子の虎」と揶揄されないことを祈っている。

—参考文献—

- 1) 山崎晴雄, 地震と断層, そして活断層とは何か. 日本原子力学会誌, 55 (6), 12-15, 2013.
- 2) 渡辺満久, 原子力関連施設周辺における活断層評価への疑問, 科学, 79, 179-181, 2009.
- 3) 奥村晃史, 重要原子力施設直下・近傍の活断層. 日本原子力学会誌, 55 (6), 4-5, 2013.
- 4) 池田安隆, 下北半島沖の大陸棚外縁断層: 地下に横たわる巨大な断層を原発安全審査はどうあつかったのか. 科学, 82 (6), 644-650, 2012.
- 5) 渡辺満久, 中田 高, 鈴木康弘, 下北半島南部における海成段丘の撓曲変形と逆断層運動. 活断層研究, 29, 15-23, 2008.
- 6) 渡辺満久, 中田 高, 鈴木康弘, 原子燃料サイクル施設を載せる六ヶ所断層. 科学, 79, 182-185, 2009.
- 7) プロメテウスの罠-疑わしきは止めず-地底をねらえ22, 朝日新聞(2012年10月20日).
- 8) 渡辺満久, 中田 高, 鈴木康弘, 小岩直人, 下北半島北西端周辺の地震性隆起海岸地形と海底活断層. 活断層研究, 36, 1-10, 2012.

著者紹介



渡辺満久 (わたなべ・みつひさ)

東洋大学

(専門分野) 地形学, 自然地理学, 地殻変動がどのように地形を形成するのかに主な関心がある

求められる「価値選択」の議論

原子力安全, 高レベル放射性廃棄物処分, そして原子力学会の役割

東京電機大学 寿楽 浩太

福島原発事故は、それまで社会全体や原子力専門家が当然視してきたさまざまな前提を大きく揺さぶった。さまざまな事柄が、「なぜ、そうあるべきなのか(そうあってはいけないのか)」という根本的な問い直しの対象となっている。

原子力専門家は、従来の前提をいったんカッコに入れて、自らの価値に関する選択とそれを支える論理について改めて説明責任を果たしつつ、社会的な議論と意思決定に参加することが求められる。こうした「価値選択」の議論に積極的かつ誠実に関与し、真摯に応答することは、原子力専門家が社会の信頼を取り戻していくためにも不可欠なプロセスである。

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故(福島原発事故)後、原子力利用をめぐる社会的議論が積み重ねられてきている。原子力発電の今後、除染・廃炉の道筋、既存施設の安全性確保・向上と規制改革といった、事故が直接喚起した議論がその中心にあることは言うまでもない。

これに加えて、事故後の原子力利用に対する社会的関心の高まりなどから、高レベル放射性廃棄物処分についての議論が再び活発化しているほか、本学会においても、学会の社会的役割や責任についての議論が喚起され、先般、定款の改正も行われたところである。

このような、次元や性質の異なるさまざまな議論を列挙したのは単なる思いつきではない。これらの論点は、「価値選択」に関わる問題を含んでおり、いわゆる技術的・専門的議論のみによって決着し得ないという点において、一定の共通性を持っているからだ。

本稿では、これらの3つのテーマ、すなわち、「原子力安全」「高レベル放射性廃棄物処分」そして「原子力学会の役割」を題材に、科学技術に関する議論であっても、古典的な意味での「科学的」という表現には回収され得ない、「価値選択」を迫る議論が深く関わっていることを検討したい。

II. 「価値選択」と科学技術

科学技術に関する判断、意思決定については、科学知が一意に最適解をもたらすとの考え方が現在もなお、一般的である。原子力専門家、他分野の専門家、政治家や行政官、そして一般市民と、おそらく社会のあらゆる方面において、こうした考え方は根強いようである。

しかし、現代の科学技術と社会の関係を考える際には、この前提を当然視することはできない、というのが、筆者が専門とする科学技術社会論の分野の基本的な見解である。

筆者が原子力関係者にこの話をする際に毎度と言っていいほど紹介するのが、米オークリッジ国立研究所の所長を長く務めた A. Weinberg の論文、“Science and Trans-Science”である¹⁾。この論文は科学技術社会論の分野では記念碑的な扱いをされてしばしば引用される。曰く、現代の科学技術においては、「科学」と「価値」(「政治」)が不可分になっている、「科学的」判断のみでは事柄は決着しない、したがって、社会との対話、市民の参加といった要素を科学技術に関する社会的意思決定にもっと取り入れることが必要だ、というようなストーリーが、「トランス・サイエンス」が引き合いに出される際の定番であろう²⁾。

なお、「トランス・サイエンス」の考え方を紹介する際には毎度のことながら、大急ぎで付け加えたいことがある。この考え方は、科学知の重要度や信頼性が下がっているとの主張、あるいは、確たる科学的真理など存在しないといった類いの反科学的な含意を持つものでは決して

Towards “Value Judgment” Discussion; Cases of Nuclear Safety, High-level Radioactive Waste Management and the Role of AESJ: Kohta JURAKU.

(2013年7月30日 受理)

てないという点である。ワインバーグの指摘の核心は、「科学のみでは決めきれない」ことにあるのであって、「科学には決められない」「科学には分からない」といった安易な不可知論ではない。

このことを確認した上で、本稿で論じたいのは以下のような問題である。「科学のみでは決めきれない」問いとは具体的にはどのような場面において見られる問いであり、それと「価値選択」がなぜ不可分であるか。そして、技術専門家がなぜこのことを意識しなければならないか。これらこそが本稿の中心的課題である。

Ⅲ. なぜいま、「価値選択」なのか

とはいえ、本学会においても、こうした議論そのものはもはや、まったく目新しいものでもないだろう。ではなぜ、そうした定番の話を今さら引き合いに出したのか。

そこにはやはり、福島原発事故とその後の社会的論議の展開が深く関わってくる。

先述のように、人文社会科学の側からは、「科学」と「価値」(「政治」)が不可分である、したがってもっと後者の話をしなければならない、というメッセージが科学者・技術者に対してよく出される。しかし、この命題の含意はそれだけではない。両者が不可分であって、それが今に始まったことではないのであれば、過去において、「科学的」あるいは「専門的」に判断されたこともすべからず、「価値」(「政治」)についての判断を含み込んでいたと解することができるからだ。

具体的には、原子力分野での設計、運用、保守、規制などに関するさまざまな専門的判断(エキスパート・ジャッジメント)もすべからず、ある特定の価値判断をはらんだものだったとも言えることになる。

もちろん、「だからダメだ」というわけではない。エキスパート・ジャッジメントの結果が公益を最大化し、特段の不都合を生じない限りにおいては、この「価値判断を内包した専門的判断」は効率的である。社会全体が、同様の判断を熟議を経て行うには時間と手間がかかる。しかも、議論がまとまらなかったり、いわゆる衆愚的な過ちを犯したりする可能性も否定できない。専門家が専門知を基盤としつつ、普遍性を備えた価値判断を常に行ってくれるのであれば、社会はこれを信頼し、自ずと多くを委任するであろう。

福島原発事故が発生する瞬間までの、日本における原子力技術と専門家、そして社会の関係の基本的な見取り図は、このように理解しても差し支えなかったかもしれない。

しかし、である。福島原発事故は、このエキスパート・ジャッジメントへの委任の正当性を一挙に失わせた。事故の帰結そのものはもちろん、専門家がそのジャッジメントの経緯や根拠を満足に説明できなかった(これが「説明責任が果たされない状態」である)ことも大

きい。さらに、原子力専門家以外の人びとも、これまで当然視してきた、価値選択に先立つさまざまな前提を大きく揺さぶられ、あるいは完全に塗り替えられた(例：M9の地震が現実に発生することやそれによる津波が想像を絶する規模であったこと、等)。これまでに積み重ねられたエキスパート・ジャッジメントは、これまでは是認されていた、判断の根拠、前提を突如として失ったのである。

つまり、これまで大きな疑問を呈されたことがなく、議論の対象となつてこなかった事柄までもが、「なぜ、そうあるべきなのか(または、そうあってはいけないのか)」という根本的な問い直しの対象となってしまった。地震の想定、津波の想定、プラントの設計、これらに関わるさまざまな基準や計画……。「この状態でよいのだ」という妥当性の認定を支えてきた、およそあらゆる前提が問い直されることになったのである。

ここに、再度の「価値選択」の必要性・重要性の契機が生じる。すなわち、なぜこの想定はこれでいいのか、なぜこの部分の設計はA型式ではなくB型式なのか、なぜこの機器は3台ではなく2台で良いのか、等、どれも科学知が基盤となる専門的な判断ではあるけれども、そうした線引きや選択を実際に行う際には、コストベネフィット比較に代表される、「価値選択」を伴うからだ。あらゆる場面で、論理の再構築とその内容の説明、そしてそれに対する社会の信認を得ることが求められることになる。

1. 原子力安全

(1) 新たな原子力安全規制が直面するアポリア

このような問題として真っ先に挙げられるのが、原子力安全であろう。

例えば、既存の原子力発電所の安全規制にあたって、いわゆる「新基準」に基づく審査が着手されたが、結局、古典的な問題である「How safe is safe enough?」(どれだけ安全性を高めれば十分なのか)という問いへの回答は未だ明確ではない。

もちろん、読者の中には、「いや、規制委員会はついに安全目標を定めた。これがその問いに対する答えだ」と指摘される方もあろう。筆者も、安全目標を定めることの有用性や重要性は否定しない。

問題なのは、「それが誰の回答か」という点である。規制委員会による安全目標の策定は、なぜか唐突であった。こうした重要事項を決定する際に頻用される、有識者を集めた議論の場も設けられた形跡もない。それどころか、安全目標が正式に策定されたのかどうかすら実は明確ではなく、審議の過程では規制委員間の意見の隔たりが埋まらなかったとする新聞記事さえ目にした始末である³⁾。

これでは、社会全体が熟考の上で実質的な回答を出した、それが今回の安全目標だ、とは到底、言いがたい。

この状況では、いかに従前に「比べて」より厳格な基準を設定し、それを厳正に適用したとしても、「なぜそこまででいいのか、もっとやらなくてよいか」という声が止むことはないだろう。規制者や事業者は先の見えない安全性向上に取り組まざるを得ず、しかも社会からの信頼や納得がそれに伴わない。こうしたアポリア(解決のつかない難問)が生じているように思われる。

(2) 不可避となる価値選択の議論と「政治」の役割

このアポリアを解くためには、原子力安全についての価値選択の議論を行うしかない。つまり、「How safe is safe enough?」という問いにそもそもどのように答えるかを決め、その上で、具体的にどのような回答を出すかを社会全体で議論する。そして、結論が得られれば、それを今後の原子力安全を考える際のレファレンスとしていく。このようなプロセスを踏むしかないのである。

言うまでもなく、この作業は難儀だ。容易に着手できるはずもないし、容易にまとまるはずもない。

しかし、このような議論の場がどのような性質のもので、誰がそのイニシアティブを取るべきか、これについてはある程度ははっきりしている。価値に関する議論を行い、結論を出す営みは、そもそもの意味における「政治」であるということだ。

これまた大急ぎで付け加えなければならないが、ここでいう「政治」の含意は、現在の日本に存在する特定の政党や政治家、省庁等を実体的に指し示すものではなく、概念としての「政治」である。

今日の日本社会においては、残念ながら、現実の政治がこうした本来的な意味の「政治」とやや乖離している印象が強い。したがって、読者の中には、「それは無理だ」とか、「政治に任せるのは適当でない」といった悲観的・批判的な感想を持たれる向きも少なくなかろう。

しかし、そうした現状ベースでの悲観論に棹さしているのは、アポリアは解消しない。例えば、いわゆる「原発再稼働」問題は、安全基準の問題のいわば応用編であり、安全についての価値選択の具体的な事例であるわけだが、これについて政府首脳は、「規制委員会の判断を尊重」といった表現で、実質的な判断を規制委員会に丸投げしている。

紙幅の制約上、詳しい検討は別稿に譲りたいが、規制委員会による安全審査は「リスク評価」に該当し、これと「リスク管理」、すなわちリスクについての総合的な判断は異なる(必ずしも直結はしない)とするのが一般的な理解である。繰り返して述べているように、「How safe is safe enough?」への回答を用意しない限り、あるリスク評価結果が「安全」を意味するのか、「不安全」を意味するのかを判定できないからだ。

どのような手続きで、どのような方法を用い、どのような基準に照らして安全/不安全を判断するのかを決定するのは、すぐれて「政治」の役割である。

この「政治」のプロセスを経ない限りは、いかに科学的・専門的な安全論議を深めても、水掛け論にしかならない。ましてや、原子力安全に対する社会の厳しい見方に鑑みれば、その論議の中で「(安全規制は)十分である」「不安全ではない」と結論づける主張を行うことで、社会の信頼を獲得することは難しい(例:原子力発電所における原子炉直下あるいは敷地内における活断層の存否判定の問題)。

原子力専門家に期待されるのは、こうした問題について技術的な論議の迷路に深入りしていくことではない。「政治」が本来の役割を果たすことを促すためにも、社会が「価値選択」を行う材料となるような、安全性についての評価結果や安全性向上のための技術的対処の選択肢等を示す役割が期待されよう。

2. 高レベル放射性廃棄物処分

(1) 必要性和安全性のはざま

東日本大震災・福島原発事故を経て社会の関心が高まったのは発電所等の既存の原子力施設の安全の問題だけではない。高レベル放射性廃棄物処分(HLW 処分)もまた、日本学術会議から従来の取り組みの抜本的な見直しを求める「回答」が示されるなど、社会的論議が高まりを見せている事柄だ⁴⁾。

原子力発電環境整備機構(NUMO)の調査によれば、HLW 処分についての認知度は震災・原発事故前後で大きな変化は見られないが、HLW 処分についての関心と必要性の認識にははっきりした上昇傾向が伺える⁵⁾。

しかし、これは必ずしも好意的な見方の増加ではないと思われる。福島原発事故の発生により、報道等における「放射性廃棄物」についての情報量が増大したことを考えると(もちろん、この場合の「放射性廃棄物」は除染等、福島原発事故対応から発生するものが中心である)、否定的な意味(例:安全性への懸念)を多分に含むと考えるのが穏当な受け止め方であろう。

実際に、NUMOの同じ調査によれば、HLW 処分の安全性への人びとの見方は、事故後初めて行われた2012年2月の調査では前年に比べて大きく低下し、2013年2月の最新の調査でも2011年2月時点の水準には回復していない。また、HLW 処分事業を進めることに対する賛成の意見の割合もこれに近い傾向だ。必要性の認識が高まっているのに、安全性や事業推進への支持は高まっていないのである。

周知の通り、2000年の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(最終処分法)の成立とNUMOの設立、処分場候補地の公募の開始以降、HLW 処分事業は目立った前進を見ていない。

この状況を安全性に関する人びとの理解不足に起因するものと捉えてその解消に努めてきた取り組みは枚挙にいとまがなかろう。

(2)「社会的事業」としてのHLW処分と「価値選択」

もちろん、HLW処分に関する安全性への社会的関心は極めて高いことは間違いなからう。

ただし、HLW処分の「安全性」を口にする際に人びとが実際に気にしているのは、客観的な安全性の評価結果そのものばかりではないと思われるのだ。

HLWの処分は、従来、人類が取り組んできた多くの事業よりも有意に長い時間軸が想定されることから、将来の不確実性への対処が大きな問題となる。地層処分の概念はこれに対応するために考案され、発展してきたものでもあるが、その基本的なアイデアは、一般の人びとが慣れ親しんだ考え方とはかなり異なる。

すなわち、一般的には、不確実性が高ければ、人間側がさまざまな想定とそれに対する対処を事前に準備した上で、実際には常に状況をモニターしながら適切な対応を行うことでリスクを管理するというモデルが想定されがちであろう。ところが、地層処分は、地下深部の自然環境固有の閉じ込め特性を積極的に利用して、人間の能動的な管理によらずに必要とされるレベルのリスク管理を達成しようとする考え方であり、これは非専門家にとってはその妥当性を直感的には理解しがたいものだ。

もちろん、地層処分の専門家がこのような考え方を最善としてきたことには、理由がある。例えば、地層処分が想定する時間軸の長さに対して、過去の歴史を振り返った際の社会の変化はあまりにもその振れ幅が大きい。したがって、現代の我々が期待する水準の管理を将来の社会が継続できる、あるいは、継続してくれる保証はどこにもない、といったように。

しかし、考えてみれば、こうした判断もまた、「価値選択」である。またも急いで付け加えるが、「価値選択だ、だから間違っている」わけではもちろんない。そうではなく、地層処分が選択され、その概念が彫琢されてきた経緯においては、狭い意味での技術の発展のみならず、社会的な取り組みとしての妥当性について、政治・経済・法・倫理などさまざまな面からの検討と決定が重ねられてきているということ、そして、それを踏まえて、「どちらが望ましいか」という「価値選択」が繰り返されてきたことそのものに注意を喚起したい。

換言すれば、地層処分とは、狭い意味での「技術」の枠を遥かに超えた、「社会的事業」の構想であり、その具体的な計画の提案なのである。仮に他の技術を用いた、あるいは組み合わせたHLW処分の方策を検討し、採用したとしても、この点は何ら変わらないであろう。

そして地層処分の専門家は実際にこうした感覚を共有しており、「価値選択」の議論を誠実に、真摯に積み重ねてきたはずだ。米科学アカデミーやOECD/NEA等における、各国の専門家からのインプットを経た過去の報告書類に目を通すと、そのような議論の道筋と知の蓄積がよく伺える^{6,7)}。

(3)社会的経験としての「価値選択」の議論

ではなぜ、永年の「知恵」の集積である地層処分について、社会的な納得・支持が十分に得られないのか。直裁に言えば、「価値選択」の議論が社会的に共有されたかたちで経験されてこなかったことが大きな問題だ。

上記の真摯な議論の経緯において欠けている要素があるとすれば、それは「価値選択」が限られた範囲のアクター、つまり専門家ばかりによって議論され、決定されてきたことが真っ先に挙げられる。

もちろん、専門家が他のアクターを積極的に排除してきたわけではなからう。しかし、他のアクターの参加を得て、対話を重ねる努力が十分であったかという観点で見れば、見直すべき余地はあるのではないかと。

例えば、最終処分法成立に先立って、1990年代後半には原子力委員会に高レベル放射性廃棄物処分懇談会が設置され、立場や分野の異なる専門家による議論を経て報告書が取りまとめられたが、その後の「法案審議は……法案の提出から成立までほぼ2ヶ月半というきわめて短い期間であった。実質的な審議は、本会議では両院ともに質疑はわずか1日で、委員会審議でも議論が行われた日程は両院あわせて9日間にすぎず」、「衆参両院とも圧倒的な賛成多数で」可決・成立したことが知られている⁸⁾。

もちろん、内容が妥当であったから異論も疑義もなかったのだ、という説明も可能であろうが、HLW処分が社会にとって重大な「価値選択」であることに鑑みれば、国会での審議がこうした水準にとどまったことは好ましくはない。こうした拙速な意思決定の経緯では、HLW処分について熟考の末に納得のいく「価値選択」を行ったとの社会的経験が共有されづらく、せっかく法制度上は「決まった」処分事業であっても、政治的・社会的正当性の基盤を持ちづらいからである。

そして、2013年現在の現状では、必ずしもこうした「価値選択」の議論の重要性に立ち戻ることなく、地層処分について考える上で想定されるさまざまな個別具体のリスク(例：地震活動が地層処分場の安全性に与える影響)に対する評価や対応について、意見の異なる主体が見解を戦わせているようにも見受けられる。

しかし、前節で検討した原子力発電所の安全規制論議のように、リスク評価の結果を開陳し合っても、リスク管理の指標となるべき「価値選択」の議論が先行しなければ、結局は安全性論議のアポリアにはまり込んでしまう可能性が高い。

これを回避するためには、特に地層処分の専門家が、「なぜ、地層処分なのか」「なぜ、今取り組むべきなのか」「なぜ、そのようなやり方で安全性について論証できると考えるのか」等、専門家コミュニティがこれまで行ってきたさまざまな「価値選択」を伴う問いについて、改めて考えの筋道とその答えを示しながら、しかも複数の選

択肢を提示することで、社会全体が「価値選択」を改めて経験し、自らの回答を出すのを促すことが求められる。専門家が判断した結果を伝達するコミュニケーションではなく、共考と協働を促すイニシアティブを取ることが求められる。

なお、筆者も委員として参加している、本学会の「放射性廃棄物の地層処分の学際的評価」調査専門委員会では、まさにこうした共考と協働によって取り組むべき論点を整理しており、今秋にも最終報告書を取りまとめる見通しである。

3. 原子力学会の役割

最後に、日本原子力学会の役割についても、「価値選択」の議論が求められていることを手短かに指摘したい。

この問題については、福島原発事故後、学会内でさまざまな議論が行われ、先般、定款の改正も行われたところであるし、「東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会」からも、「日本原子力学会の今後の在り方の改善策について」が示され、本稿執筆時点ではこの文書への意見公募が行われているところだ。

ここで注意が必要なのは、「学会とは何か」、つまり「学会」の基本的価値はどこにあるのかという問いに対する答えが、会員の間で大きく異なっている可能性だ。

日本の場合、海外で技術者団体が成立し始めたちょうどその時期に、明治維新後の殖産興業・富国強兵の流れの中で工学を受容し、当初から技術者団体が「学会」とされてきたという経緯がある⁹⁾。

海外での技術者団体は、職能団体としての性質をその成り立ち(技術者の地位向上運動)からして色濃く備えており、社会貢献と職業倫理により技術者の尊厳を護り、技術者に対する社会的名声を高めることが謳われ、学会名称も、技術「者」の会であることを明示していることが多い(例: American Society of Mechanical Engineers (ASME))。本学会においてもこうした文脈から学会活動の方向性や会員の関与のあり方等を考える見方があるうかと思われる。

他方で、日本の技術系各学会は、設立当初から「学会」として学術団体としての性質を強く意識して発展してきたと言える。これを主に念頭に置く向きからすれば、学会活動は「学問の自由」や「研究者の自律」を旨とすべきであり、学会が会員を統率したり「学会として」社会的発言や活動を行ったりすることには違和感を覚える意見も出てきそうだ。

ここでも、「学会とは何か」という根本的な問いについての立場や見解の複数性を意識し、改めて「価値選択」の議論を行うことが求められる。そのことなくしては、例えば職能団体モデルに立つ会員からの提案が学術団体モデルを採る会員から論難される、あるいはその逆、と

いった不毛な応酬、はたまた、相互の提案の意図や意義が理解できないために発生するすれ違い等に終始し、「学会の今後の在り方」についての議論が深まらない危惧がある。「価値選択」の議論への積極的な参加は専門家と社会の関わり場面においてのみならず、専門家相互の議論においても不可欠な要素なのである。

IV. おわりに

以上見たように、福島原発事故は、それまで社会全体や原子力専門家が当然視してきたさまざまな前提を大きく揺さぶった。あらゆる事柄が、「なぜ、そうあるべきなのか」という根本的な問い直しの対象となっている。

原子力専門家は今こそ、従来の前提をいったんカッコに入れて、自らの価値に関する選択とそれを支える論理について改めて説明責任を果たしつつ、社会的な議論と意思決定に参加することが求められる。「価値選択」の議論に積極的かつ誠実に関与し、真摯に応答することは、原子力専門家が社会の信頼を取り戻していくためにも不可欠なプロセスなのである。

—参考資料—

- 1) A. Weinberg, "Science and Trans-Science", *Minerva*, 10(2), pp.209-222, 1972.
- 2) 小林傳司, 『トランス・サイエンスの時代—科学技術と社会をつなぐ』, NTT 出版, 2007.
- 3) 川合智之, 「分りにくい原発の安全目標 背景に「ゼロリスク文化」」, 『日本経済新聞』, 2013年5月5日付(電子版), 日本経済新聞社.
- 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年9月11日).
- 5) 原子力発電環境整備機構「地層処分事業に対する広報活動の効果測定について」, 総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会 第2回会合配付資料, (2013年6月20日).
- 6) National Research Council "Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges", National Academy Press, 2001.
- 7) Nuclear Energy Agency, "Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel" OECD/NEA, 2011.
- 8) 菅原慎悦, 寿楽浩太, 「高レベル放射性廃棄物最終処分場の立地プロセスをめぐる科学技術社会学的考察: 原発立地問題からの「教訓」と制度設計の「失敗」」, 『年報 科学・技術・社会』 Vol.19, pp.25-51, 科学・技術と社会の会, 2010.
- 9) 村上陽一郎, 『工学の歴史と技術の倫理』, 岩波書店, 2006.

著者紹介



寿楽浩太 (じゅらく・こうた)

東京電機大学

(専門/関心分野) 社会学, 科学技術社会論, 放射性廃棄物処分

第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計クライテリアの構築

「第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計クライテリア」特別専門委員会

第4世代ナトリウム冷却高速炉に対する安全設計要求の国際的な調和を図るため、第4世代原子炉に係る国際フォーラム(GIF)では、安全設計クライテリア(SDC)を構築することとした。そこで、日本原子力学会では特別専門委員会を組織し、SDC素案に対する検討を重ね、第4世代炉の安全確保に関する重要な論点を抽出するとともに、その考え方を分析・整理した。同委員会での検討結果は、GIFに設置されたSDCタスクフォースへの我が国からの提案に反映され、その後の多国間での議論を経てまとめられた。本稿では、SDC構築のアプローチ、SDCの概要および主要な論点についての考え方を解説する。

I. はじめに

第4世代原子炉に係る国際フォーラム(GIF)では、2030～2040年代の実用化を念頭に、安全性・信頼性・経済性等に優れた次世代原子炉システムとして有望な6つの概念の開発協力を進めている。特に、ナトリウム冷却高速炉(SFR)は、原子力開発・利用先進国で開発および運転経験が豊富であり、固有の安全性と高速炉としての特徴(資源有効利用と廃棄物低減)を両立している。また、各種の革新的概念に対する研究開発が着実に進展しており、各国において商業利用に向けた開発段階へ進展している状況にある。フランスでは、ASTRID(プロトタイプ炉)が設計段階にある。ロシアでは、BN600が運転中であり、BN800(実証炉)が建設中である。中国では、CEFR(実験炉)が2011年に初送電を達成し、実証炉の概念設計を進めている。インドでは、FBTR(実験炉)が運転中で、PFBR(原型炉)が2014年9月に臨界予定であり、今後10年程度で実用化を計画している。これらSFR開発国では、将来の国際展開を狙った開発が進められている。

一方、第4世代高速炉に対する安全設計要求は各国でばらつきがあるため、次世代炉として高い水準の安全性を担保できる安全設計要求を明確にし、高速炉開発に取

り組む各国へ採用を促すために、共通の安全設計要求の整備がGIFとしての重要な検討課題であった。そこで、2010年に、GIF議長により、国際的な協調によるSFRの安全設計クライテリア(SDC)を構築することが表明された。GIFでは、SFR開発国として日・米・仏・露・中・韓・EUが参加しており、各国からのメンバーに加えてIAEAの参加も得てSDCタスクフォースが組織された。同タスクフォースでは、2011年7月の活動開始から2013年5月のSDCレポートのGIFでの承認までの2年間でSDC策定の取り組みが行われてきた。これらの活動において、日本はGIFの議長国、SDCタスクフォースの議長国として国際的にも存在感とリーダーシップを発揮した¹⁾。

国内では、本学会において、「第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計クライテリア」特別専門委員会(2011～2012年度)を組織し、SDC素案に対する検討を行った。原子力の安全性に関連した幅広い専門家で構成される本委員会は、福島第一原子力発電所事故を受けて世界的に原子力発電所の安全性向上に関する議論が高まっていることを踏まえ、同事故の教訓を分析し第4世代炉にも適切に反映させるとともに、GIFの場で構築されるSFRのSDCは次世代炉としての高い安全水準を求めべきであるという認識をもって検討に取り組んだ。

本委員会では、国際的なSDCの構築に向けて、SFRの技術開発の動向、国際的な安全基準および国内外の規制の動向を最初に調査した。これらの調査結果と共に、GIFにおける安全上位基準、高速炉の特徴、各国の安全

Development of Safety Design Criteria in Generation-IV Sodium-cooled Fast Reactors : Special Committee on Safety Design Criteria for Generation-IV Sodium-cooled Fast Reactor. (2013年 7月10日 受理)

要件、ならびに福島第一原子力発電所事故の教訓の反映を踏まえて、SDC 素案に対する検討を重ね、第4世代炉の安全確保に関する重要な論点を抽出するとともに、その考え方を分析・整理した^{2,3)}。

II. 安全設計クライテリア構築のアプローチ

1. SDC の位置付け

GIF では、安全階層の最上位に位置するものとして、以下の安全目標⁴⁾が策定されている。

SR-1:「運転時の安全性と信頼性が優れること」

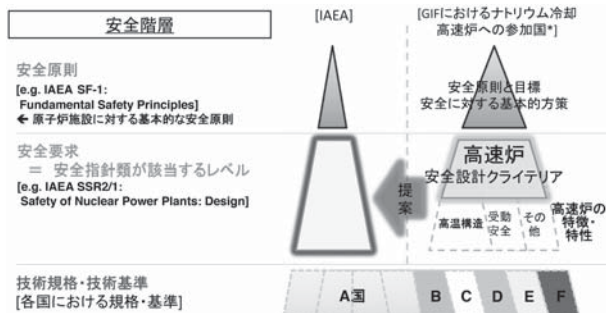
SR-2:「炉心損傷の頻度が極めて低く、その程度も小さいこと」

SR-3:「敷地外緊急時対応の必要性が生じない(ように安全性を高める)こと」

次に、各炉共通の安全に対する基本方策⁵⁾も定められた。この中では、設計基準を超えた過酷な状態への対応も考慮し、受動安全特性を活用することが謳われている。また、安全機能を“Add-on”ではなく“Built-in”で対応することがあげられている。“Add-on”とは、追加的な要求を新たに課した場合に、既存設備を改造したり電源設備を増設したりすることで対応することであり、“Built-in”とは、基本設計の段階から必要な安全機能を設計に取り入れて対応することである。

これらの最上位の安全性の考え方は、IAEA では安全原則(SF-1)⁶⁾として定められている。SDC は、その下位レベルに位置付けられる安全要求に相当するものであり、既存軽水炉に対しては、安全審査指針(現行の規制基準)レベルに相当する SSR 2/1⁷⁾が整備されている。なお、各国における規格・基準類は、さらにその下位に位置付けられるものである。

IAEA SSR 2/1 に相当するような国際標準化が図られた安全要求は第4世代炉では存在しなかった。そこで、第1図に示すように、第4世代 SFR の構築物、系統および機器に対する安全設計要求を包括的・系統的にまとめた SDC を構築することとした。この SDC は、将来的には IAEA での議論を通じて国際標準として位置付けられることを目指すべきものである。



第1図 GIFにおける安全設計クライテリアの位置付け

2. SDC 構築のアプローチ

SDC 構築のアプローチを第2図に示す。SDC 構築の着眼点は、第4世代炉としてあるべき高い安全目標である前述の SR-3 の実現である。そのため、基本的な深層防護の考え方を踏襲した上で、深層防護の第4レベル⁷⁾への対応強化を図る方針とし、重大な炉心損傷の防止と影響緩和対策を安全設計に取り入れることを要求とした。

SDC 構築にあたっては、SSR 2/1 の全体構成を参考にした。SSR 2/1 における炉型に依存しない安全設計要求は参考にできるが、炉型依存の要求は SFR の特徴を踏まえたものとする必要がある。代表的な SFR の特徴として以下があげられる。

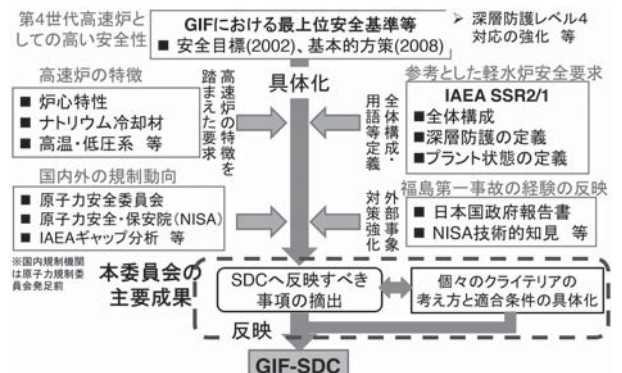
- ・炉心中心領域で正のボイド反応度となりうる炉心特性
- ・急速な冷却材喪失が生じにくい低圧システム
- ・ナトリウム冷却材の優れた伝熱特性
- ・ナトリウム冷却材の高い自然循環除熱能力
- ・ナトリウム冷却材の化学的活性
- ・クリーブに配慮が必要な高温構造システム、など

以上のような軽水炉と異なる特徴を有することから、各国の SFR の安全設計を調査し、その結果を参考にしてつ SFR の特徴を踏まえた設計要求とした。

また、SDC 構築にあたっては、福島第一原子力発電所事故の教訓を分析し、国内規制機関、IAEA 等の国内外の規制動向を踏まえて、高速炉に適用される安全設計の考え方を再吟味する必要がある。SDC に反映すべき事項として、例えば以下があげられる¹⁾。

- ・外部起因事象等による共通要因故障への耐性向上を目的とした非常用電源系および崩壊熱除去系の冗長性・多様性の強化
- ・長期の全交流電源喪失下での炉心冷却機能維持を目的とした崩壊熱除去系の強化
- ・水素爆発による格納容器の早期破損の防止を目的とした格納容器内の水素濃度制御機能の強化
- ・長期の全交流電源喪失下での燃料取扱および貯蔵系の除熱を目的とした状態把握・プラント管理機能の強化

本委員会では、以上の観点から検討を行い、SDC へ



第2図 安全設計クライテリア構築のアプローチ

反映すべき事項を抽出しつつ、個々のクライテリアの考え方と適合条件の具体化を進め、安全上の主要な論点について技術的議論を行った。

Ⅲ. 安全設計クライテリアの概要

1. SDC の構成と基本的考え方

第3図にSDCの目次構成を示す。SDCレポートは、第3図に示す内容で構成される。

第4世代炉の国際標準として高い安全性を確保するため、深層防護の各レベルの強化、特に第4のレベルに対して、炉心損傷の防止および影響緩和に関する Built-in での安全機能が要求される。すなわち、設計基準事故を超えるプラント状態である設計拡張状態 (DEC: Design Extension Condition) での著しい放射性物質放出を実質的に排除 (practically eliminated) することとし、既存炉より高い安全性を求めている。なお、SSR 2/1 によれば、物理的に発現が不可能、あるいは高い信頼水準で極めて発現しがたいと判断される場合、実質排除と判断される。例えば、軽水炉では高圧溶融物放出⁸⁾、SFR では炉心支持構造物破損⁹⁾などがあげられる。

深層防護の各レベル全体にわたって、バランスよく安全性を高めることが重要である。受動安全あるいは固有安全特性の活用は、DEC での多様性を確保するために有効であり、動的安全系が機能しない場合でもシビアアクシデントの終息や影響緩和に有用である。

2. SDC の特徴

SFR は、最大反応度体系になく、炉心中心部近傍で正のボイド反応度となりうる炉心特性を有することか

ら、再臨界による大規模な機械的エネルギーの発生防止が要求される。また、ナトリウムを冷却材として使用することに関連して、低圧条件下で運転されることから、冷却材漏えい時の静的な冷却材液位確保が行える一方、その化学的な反応が基本的な安全機能に影響を与えないことが要求される。さらに、多様性を高める方法として、受動的な原子炉停止機能、自然循環を活用した受動的な崩壊熱除去機能を設計に取り入れることが考えられる。福島第一原子力発電所事故の教訓を反映する観点からは、ナトリウムを用いる燃料貯蔵槽に対しても、長期間の電源喪失時にも除熱および状態監視を維持することなどがあげられる。

Ⅳ. 主要な論点についての考え方

1. 主要な論点の抽出

GIF の安全性・信頼性に関する高位の目標では、SR-3「敷地外緊急時対応の必要性が生じないこと」を設定している点が大きな特徴である。これは、深層防護の第5レベルとしての敷地外緊急時対応自体を不要として取り除くことを意図したものではなく、第4レベルにおける DEC に対する発生防止と影響緩和の強化を意図している。この主旨に沿った DEC の考え方と、SFR で考慮すべき DEC が本委員会の主要な論点の一つとなった。これに関連して、受動系の活用の考え方、深層防護の第4レベル以降のアクシデントマネジメントの考え方、従来の設計基準を超える外部起因事象に対する設計対策の考え方についても議論がなされた。

第1章 はじめに	第5章 全般的プラント設計
1.1 背景及び目的	5.1 設計基準
1.2 SDCの策定方針	内部ハザード
第2章 第4世代原子炉システムとしてのSFRに対する安全アプローチ	外部ハザード
2.1 GIFの安全目標と基本的安全アプローチ	事象と故障の組合せ
2.2 安全に関する基本的考え方	5.2 発電所の寿命を通しての安全運転のための設計
2.2.1 深層防護	5.3 人的要因
2.2.2 プラント状態、確率論的方法及び決定論的方法の関係	5.4 その他の設計上の考慮
2.2.3 受動的安全の仕組みの活用	5.5 安全解析
2.2.4 クリフエッジの発生防止	決定論的方法
2.2.5 格納機能	確率論的方法
2.2.6 ハザードへの対応準備	第6章 具体的なプラント系統の設計
2.2.7 非放射性物質及び化学物質に関するリスク	6.1 プラント設計全般に係わる事項
2.3 第4世代SFRシステムの安全アプローチ	6.2 原子炉の炉心及び関連する仕組み
2.3.1 対象とするSFRシステム	6.3 原子炉冷却材系
2.3.2 SFRの基本的な特徴に基づいたアプローチ	6.4 格納構造物と格納系
2.3.3 プラント状態に対するSFR特有の安全アプローチ	6.5 計装制御系
2.3.4 東京電力福島第一発電所事故からの教訓の反映	6.6 非常用電源供給
第3章 設計における安全の管理	6.7 支援系及び補助系
第4章 主要な技術クライテリア	6.8 その他の動力変換系
	6.9 放射性排出物及び放射性廃棄物の処理
	6.10 燃料の取扱及び貯蔵系
	6.11 放射線防護
	参考文献
	IAEA SSR-2/1とGIF SFR SDCの相違点
	用語の定義
	付属書

第3図 安全設計クライテリアの構成

2. 主要な論点についての考え方

(1) 第3世代プラス炉と第4世代炉のDECに対するアプローチの相違

既存軽水炉を拡張した第3世代プラス炉では、設計基準事故を超えるDECを想定するが、SSR 2/1によれば、炉心損傷の発生防止あるいは影響緩和の対策の要求はALARP (as low as reasonably practicable) との位置付けである。一方、第4世代炉では、GIFにおける安全性と信頼性の上位目標の一つであるSR-3を実現するため、炉心損傷の防止と影響緩和の対策を要求し、深層防護の第4レベルを強化することとしている。

これらの対策により、両炉共に大規模な放射性物質放出を実質的に排除する設計が可能である。ただし、第3世代プラス炉では、そのような対策ができない場合への例外条件(避難のための時間と離隔距離を設ける)があるが、第4世代炉ではそのような例外条件を設けず、あらかじめ設計対策を取り込んでおくことに特徴がある。なお、これは、その設計方策の効果によってサイト外緊急時対応が発動されることを回避できるようにすることを意図しているものであり、サイト外緊急時対応のための深層防護の第5レベルの位置づけを否定しているものではない。

(2) DECの区分と対策の考え方

深層防護の第4レベルを強化するため、DECの区分として、炉心損傷防止を達成すべき状態(カテゴリー1)と格納機能確保を達成すべき状態(カテゴリー2)を設定し、SFRの特徴を考慮して、確率論的評価の結果も参照しつつ決定論的にそれらの状態を選定・評価する。このカテゴリー1とカテゴリー2に有効な対策を想定する事象の特徴に応じて用意することとした。

放射性物質の大量放出を防止するためには、燃料被覆管、原子炉冷却材バウンダリー、原子炉格納容器バウンダリーのうち、最低ひとつの障壁の健全性を維持する必要がある。あるいは、損傷炉心の保持は原子炉容器内、ガス状および揮発性核分裂生成物の保持は格納容器というように、複数の障壁で相補的に格納障壁を形成することでもよい。いずれにしても多重障壁が一度に機能喪失し放射性物質の大規模放出に至る事態に至らないように設計する必要がある。

発生を想定すると格納機能を確保しえないような厳しい事象(例：再臨界による大規模な機械的エネルギーの発生)については、その発生を実質的に排除するため、個別の設計対策を講ずることが求められる。

(3) SFRで考慮すべき代表的なDECとその対策案

軽水炉は高圧系であり、代表的設計基準事故である冷却材喪失事故(LOCA)に対して、冷却材の相変化とそれに伴う圧力変化を考慮した冷却設備が求められ、かつ、それらの冷却設備は、原子炉冷却系に加えて格納容器に対して必要となる(炉心注水機能、減圧機能、格納容器

冷却機能(冷却材の凝縮機能)、冷却材循環機能に関わる系統が必要)。また、LOCA時の放射性物質の閉じ込め障壁は基本的には格納容器となる。

低圧系であるSFRでは、炉停止後の崩壊熱除去に際して冷却材の相変化とそれに伴う圧力変化を考慮する必要はなく、原子炉停止直後から低温停止に至るまで除熱モードが変わらないため、簡素な系統構成とすることが可能である。また、バウンダリー破損に対しても、バウンダリーを二重構造とすることによって、炉心冷却に必要な冷却材が確保でき、格納容器への影響を防止することができる。一方、SFRは再臨界ポテンシャルを有しており、これまで炉心損傷事故に至る可能性を考慮してきた。ただし、仮にこのような炉心損傷事故に至ったとしても、上述のような特徴から原子炉容器内で損傷炉心を保持できる可能性を有している。

SFRで重大な炉心損傷に至り得る代表的な事象は、炉停止失敗型と除熱失敗型に大別される。前者に対しては、受動的炉停止と損傷炉心の格納(設計対策による大規模な機械的エネルギー放出の実質排除、損傷炉心の原子炉容器内保持失敗の実質排除)、後者に対しては、ナトリウムの自然循環の活用、多様な冷却手段の確保および静的機器による液位確保等による炉心冷却と格納機能確保(炉心損傷の実質排除)を設計要求とすることが考えられる。

なお、SFRでは、軽水炉とは異なり、燃料破損を伴いながら冷却材に由来した水素が炉内で発生することはないが、漏えいナトリウムあるいは燃料デブリとコンクリート中の水分によって、冷却系統の外部において水素が発生する可能性もあるため、漏えいナトリウムの大規模燃焼と合わせて、これらの事象を防止あるいは緩和することが格納機能の健全性を維持する上で求められる。

(4) 受動系の活用の考え方

既存のSFRの動的安全系には、冗長性と実現可能な範囲での多様性が取り入れられており、さらなる安全性向上のためには、動的安全系に受動的方策を取り入れ、両者を適切に組み合わせることで多様性の強化を図ることが有効である。

一般に動的安全系は即応性が高く、異常な過渡変化や事故時の影響を緩和する能力が高い。一方、受動的方策はプラントの温度等の状態量がある程度逸脱した段階からその効果が現れ始めるため、応答がやや緩慢である。このため、設計基準事故に対しては主として動的安全系で対応し、そこに受動的方策を取り入れることによって、動的安全系が機能しない過酷なプラント状態においても、自然に原子炉停止し、崩壊熱が除去できるように設計することが適切と考えられる。また、炉心損傷に至ることを想定しても、炉心の有する固有の特性に基づいて溶融燃料を分散させ、再臨界を回避するとともに、分散した燃料の冷却性を確保するといったこともDECに

対する有効な設計方策となる。

(5) アクシデントマネジメントの考え方

設計基準事象とは異なり、DECでは、実際のプラント異常を終息させるための運転員による対応が必要となる場面が多くあり、それを実効的なものとするための設備を準備しておくことが必要である。すなわち、DECへの設計対策には、Built-inの設計対策に加えて、運転員による対応を前提としたものが含まれる。このような設計対策と運転員対応を総合して、アクシデントマネジメントと考える¹⁾。

アクシデントマネジメント方策は、予期せぬプラント状態に陥った場合の緩和手段を提供するものであり、従来のシナリオベースの設計対策に加えて、特定のシナリオに依存しないアプローチに基づくべきである。特にテロを含めた外部人為・内部脅威事象については、被害範囲の予測が困難であり、あらかじめ多様かつ柔軟な対策(電源車等)を用意しておいて、プラント状態の診断結果と使用可能な設備の状況に応じて柔軟に対応できるようにアクシデントマネジメントの対策と手順を用意することになる。

(6) 外部起因事象に対する設計対策の考え方

外部起因事象には、地震のようにプラント施設に一齐に荷重が加わることで多くの機器が共通要因破損に至りうるポテンシャルを有するもの、津波や火山灰降下のように、外部環境にさらされたプラント外面の機器や周辺施設の機能に影響を与えるものが考えられる。また、設計基準を超える条件では、長期の外部電源喪失を伴う可能性がある。

外部事象に対しては、設計基準を超える条件を考慮して設計を行うことを要求する。そのポイントは、主要安全設備(その機能喪失が炉心損傷に直結しうる設備と事故を終息させるために必要な設備)の裕度を確保する、あるいは、物理的分離を含めた防護手段を設けることである。

地震に対しては、全ての機器に影響が及ぶことから主要安全設備の耐震裕度を十分確保することが基本となる。これが、裕度確保の例である。SFRは系統圧力が低く高温であることから、冷却系機器は一般に薄肉構造となっている。耐震性を向上させるためには容器や配管の板厚を増加させるとともに、必要に応じて触れ止め構造やサポート構造を設置することとなるが、熱応力を緩和するためには薄肉としたほうが有利であり、耐震性と耐熱性の両立を図る必要がある。そこで、免震技術を導入して機器への入力地震動を低減することが有効である。個別機器の設計対応としては、たとえば、原子炉構

造については、原子炉容器の座屈等による破損防止、炉心の健全性確保の観点からの燃料集集体浮き上がり防止、炉心と制御棒の相対変位による反応度投入抑制等の観点からの評価を行い、裕度を確保する必要がある。

津波に対する防護手段を設ける例としては、敷地高さを確保して設計基準で考慮した津波の規模が安全設備の機能に影響しないように設計することが基本となるが、それより高い津波でも安全設備設置室の水密化等の設備による対策が考えられる。

V. おわりに

第4世代SFRの安全設計要求の国際協調を図るため、本特別専門委員会での検討を踏まえてGIFへ提案されたSDC素案は、多国間での議論を経てまとめられ、SDCレポートが刊行された。

SDCは基本性能要求であり、今後、SDCの技術的要求をより具体化・詳細化した安全設計ガイドラインを構築し、今後の高速炉の安全性向上をより実効性を持たせて国際社会に求めていくこともまた重要であろう。

福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえてSDCを整備することは、事故の当事国であり高速炉開発先行国である我が国の国際的責務であり、専門的な中立学術機関である日本原子力学会の使命と考えている。このような意識のもとで取り組んできた本委員会の成果は、世界の高速炉の安全性の考え方として役立つことを期待する。

執筆担当：山野秀将(日本原子力研究開発機構)

—参考資料—

- 1) 山口彰, 他, 原子力学会誌(ATOMOΣ), 55(3), 29~33 (2013).
- 2) 日本原子力学会「第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計クライテリアに関する調査研究」, (2012).
- 3) 日本原子力学会「第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計クライテリアに関する調査研究(平成24年度)」(2013).
- 4) U.S. DOE, *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, GIF-002-00 (2002).
- 5) GIF/RSWG, *Basis of the Safety Approach for Design and Assessment of Generation IV Nuclear Systems*, Rev.1, GIF/RSWG/2007/002 (2008).
- 6) IAEA, *Fundamental Safety Principles*, No.SF-1 (2006).
- 7) IAEA, *Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements*, No.SSR-2/1, (2012).
- 8) EC, EUR20163EN, (2001).
- 9) S.Kubo, *et al.*, FR13, (2013).

食品と放射線のリスクを考える

発がんリスクの評価について

国立医薬品食品衛生研究所 畝山 智香子

放射性物質と同様に、「しきい値のない発がん物質」とみなされる遺伝毒性発がん物質が食品中には多数存在することがわかってきた。それらのリスクをどう評価してきたかについて簡単な解説を試みる。

I. 食品中発がん物質

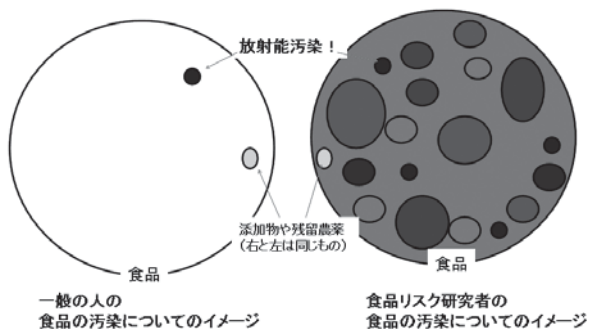
食品とは、人類がこれまで生きるために食べてきた、とりえず食べてもすぐに有害影響はないことだけわかっている「未知の化学物質のかたまり」である。「食の安全」という話題で取り上げられることが多い食品添加物や残留農薬については、安全性を確認した上で安全側にかかなりの余裕をもって使用基準や残留基準が定められているため、それらについてだけ考えていると、それが当然だと思いがちであるが、食品そのものは安全性が確認された上で食べているわけではない。イメージとしては、もともとグレーでよくわからないものの中にいくつか同定されたリスクがある、というものである。一般的には、食品は安全であるべきだという幻想があるため、ごく僅かのリスクについての受け止め方が専門家と違う可能性がある。(第1図)

食品にもともと含まれる有害物質の代表的なものとして、ジャガイモのソラニンやチャコニンなどの植物アルカロイドがある。ふぐやキノコの中毒は、食べられない部分や種類を食べたことにより中毒になるものである

が、ソラニンなどは「食用」として普段食べているものの中に、直ちに中毒症状がおきる量ではないが、一定量含まれている。大抵の有害物質は摂取量が少なければ有害影響が観察できないので、ことさら問題にしていなくてもよい。ただし天然物は安全という間違った認識により適切なリスク管理を怠ったための食中毒事件は決して少なくはない。

食品に含まれる有害物質の中で、「量が少ないから大丈夫」とは簡単に言い切れないものに、「遺伝毒性発がん物質」がある。遺伝毒性発がん物質とは、DNAや染色体などの遺伝形質を担う物質に影響を及ぼす作用(遺伝毒性)によりヒトにがんを生じさせる物質のことで、その代表的なものひとつが放射性物質であり、他にかび毒のアフラトキシンや植物アルカロイドの一種であるアリストロキア酸などが知られている。遺伝毒性発がん物質は、放射線同様、摂取量(暴露量)がゼロでなければリスクがゼロとは見なせない、つまりこれ以下なら安全であるというしきい値を決めることができないとみなして管理することになっている。従って食品添加物や残留農薬のように、意図的に使用される物質については、それが遺伝毒性発がん性の疑いがある場合には基本的に使用が認められることはない。そして天然の食品に含まれる場合には、合理的に達成できる限り低く(as low as reasonably achievable: ALARA)管理すべきであるとされてきた。

このALARA原則は、食品中に含まれる遺伝毒性発がん物質が比較的少数の場合にはそれなりに意味があるものだった。しかし科学者は食品中から次々と新しい遺伝毒性発がん物質を発見し続け、候補物質も含めて数十以上にもなってしまう、もはや単にALARA原則を唱えるだけでは現実的な対応の指針にはならなくなったのである。決定的だったのは2002年にフライドポテトなどのようなでんぷんとアミノ酸を含む食品を120℃以上の高温で加熱した場合、相当量のアクリルアミドが生じ



第1図 食品のイメージ

Considering Risks of Food and Radiation; Cancer Risk Assessment: Chikako UNEYAMA.

(2013年 7月19日 受理)

ることが明らかになったことである。アクリルアミド自体は工業用化学物質として比較的良好に知られた化合物ではあるが、日常的に相当量を食品から摂っているということが新たな発見だったのである。アクリルアミドは動物実験で発がん性があり、そのメカニズムとしては遺伝毒性が疑われている。アクリルアミドは意図的に食品に加えるものではなく、調理の際に自然にできてしまうものであり、しかもそれが含まれるのはジャガイモ製品だけではなく、パンやクッキー、コーヒー、ほうじ茶といった食生活にとってかなりの部分を占めているものだったのである。こういうものについて、「できる限り摂らないほうがいい」という対応をすることは不可能であるし、健全な食生活の維持が難しくなるという点からも不適切である。

II. 食品安全リスク分析

一方、食品の安全性確保のために、世界的に食品安全リスク分析というツールが用いられるようになってきた¹⁾。日本では2003年に食品安全委員会が設置され、食品の安全性についての科学的評価を、厚生労働省や農林水産省とは独立して行うことになった。第2図にリスク分析の三要素を示す。

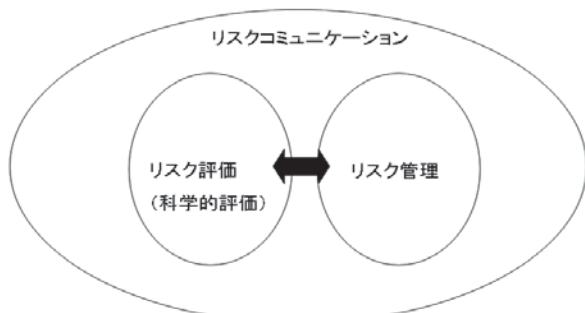
食品安全委員会は「リスク評価」を行い、厚生労働省や農林水産省はその評価結果を受けて食品中の各種基準値を設定したり市場に出回っている製品のモニタリングをしたりする「リスク管理」を行う。そして最も重要な鍵となるのが全体を貫く「リスクコミュニケーション」である。リスクコミュニケーションは、生産者から消費者に至るまであらゆる関係者の間で適切に行われるべきもので、例えば、新しい基準を作ったことを行政が消費者に一方的に説明する「説明会」のようなものを意味するわけではない。もちろん、コミュニケーションの前提としての、何が問題になっていてどういう解決方法があるのかといった基本的な事柄の「理解」は必須であるが、それだけでは不十分である。食品の安全性を確保するためには、「農場から食卓まで」の全ての関係者が責任をもって自分の役割を果たすことが必要である(shared responsibility)。例えば、食品のなかにはすぐ食べられ

る形で提供されているものもあるが、適切に調理して初めて安全に食べられるものもある。生の肉などのように、消費者がもし適切な保管・調理をしなかった場合には健康被害につながる食品もある。さらに特定の食品単品は安全であったとしても、そればかりを長期間大量に食べる、というようなことをすれば健康被害につながってしまうものもある。だからといって、実験動物の餌のように、いつ何をどれだけ食べるのかまで政府が事細かに決めるべきだという意見は多くはないであろう。ただ一部の国や地域では、砂糖や脂肪のようなものを多く含む食品に課税をするなどの方法で消費者の選択をある程度管理する試みがなされている。どのような管理方法が望ましいのかについて、関係者が意見を交わし最適解を見つけようとするのがリスクコミュニケーションである。管理の強化は選択肢の減少とそのための費用負担を意味するので、消費者が常に管理強化を望むわけではない。

III. 暴露マージン

食品安全リスク分析にとって、リスクコミュニケーションは非常に重要である。そのため、非専門家である一般の人たちにリスク評価の結果や管理方法の選択肢についての専門的内容を正確に伝える必要がある。天然に食品に含まれる遺伝毒性発がん物質については特にそれが困難な課題であった。一般的には「発がん物質」と言うだけで「とにかく避けるべきもの」とみなされる。遺伝毒性発がん物質については、放射性物質におけるリスク係数と同様に、線形しきい値無し(LNT)のモデルに基づき高用量域でのヒトや動物の発がんの結果から外挿したスロープファクター(SF)(注：用量-反応の直線の傾きという意味)を用いて、暴露量当たりのヒト生涯発がんリスクを計算することが行われてきた。そして化学物質の環境基準の設定などの分野では生涯発がんリスク 10^{-4} から 10^{-6} の間を実質安全量(Virtually Safe Dose: VSD)として管理目標に使っている。飲料水に含まれる殺菌副生成物などでは 10^{-5} をデフォルトの値として用いている(ただし天然汚染物質である無機ヒ素についてはこの値を達成できない場合があるので現実的に可能な基準値を設定している)。

このような方法は、専門家がリスク評価を行う際の指標としては特に問題なく採用されてきた。しかし一般の人相手に生涯発がんリスク 10^{-5} などと説明すると大抵の場合「10万人中1人はがんになってもいい」、あるいは「日本の人口が1億だとすると 10^{-5} というのはがんになって死ぬヒトが1,000人」というふうに解釈されてしまう。生涯発がんリスク 10^{-5} といった場合の10万人中1人というのは必ずしも実際にがんになるヒトの数を予想しているわけではないのだが、文字だけを見ればそう解釈されるのも仕方のないことではある。



第2図 リスク分析の概念図

そこでリスクコミュニケーションにとってもより良い方法として採用されるようになってきたのが暴露マージン(MOE: Margin of Exposure)である^{2~4)}。これは動物実験での無影響量(NOEL)やがんの発症率を一定程度増加させる量の信頼下限(ベンチマーク用量信頼下限: BMDL₁₀)などの毒性の指標となる用量を、実際に人々が暴露されている量で割ったもので、導き出された数値は安全係数に相当する。つまり有害影響が出ないであろうぎりぎりの用量に対して、実際の暴露量がどれだけ余裕があるかについての指標である。数値が大きければ大きいほど安全側に余裕があり、数値が小さいほど余裕が少なくMOEが1を下回る場合には有害影響が出る可能性を否定できないということになる。この数字は単独で提示されても何人中何人ががんになるといった計算はできない。他の物質の数値と比較して初めてどちらが大きい小さいか、あるいは同程度かを判断できる。

MOEはリスク管理の優先順位を示すための指標である。たくさんの化合物についてMOEが示されれば、どれが優先的に対処すべきかを判断するための一助となる。これまで世界各国の食品安全担当機関が評価してきたMOEの値を第1表に示す(なお全く同じではないが同様の表を参考資料5)に記載してある)。

また暴露量が個人ごとに違う場合には、個人の暴露量をもとにその人のリスク管理の優先順位付けを行うことも可能であり、消費者一人一人が自分にとって最も優先順位の高いリスクを考えるきっかけにすることもできるだろう。そして「遺伝毒性発がん物質」といってもそのリスクの大きさには大きな差があるということも理解できるだろう。たとえ遺伝毒性発がん物質であっても、MOEが100万を超えるようなものについては、ALARA原則があっても対策は後回しにしていだろうと判断することができる。

リスク分析の中には、適切な(衛生健康)保護水準(ALOP: Appropriate Level of Protection)という概念がある。この程度のリスクなら受け入れられるという目標値のことで、時代や地域によって異なるかもしれないが、その社会であらかじめ設定されているべきものである。理想的にはこのALOPを目指して各種のリスク管理対策がとられるのだが、現実にはALOPを具体的数値として明示することは難しい。例えば、食中毒による死者を年間ゼロにしようという目標をスローガンとして掲げるのは簡単であるが、それを実施するためにはあらゆる食品に宇宙食並みの衛生管理を要求することになり、実施不可能である。しかし計算上で年間1人が死亡というような数値目標を一般の人々が受け入れるのは容易ではないだろう。リスクの心理学についての研究からも、たとえ僅かであっても「リスクを受け入れる」というのは難しいことが示唆されている。それなら目標値を設定することは後回しにして、とにかく大きなリスク、あ

るいは簡単に削減できる費用対効果の高いリスクから順番に対策していこう、そして余裕があればその次のリスクにも対策していくという形で進めていけばいい、というのがリスクランキングの活用法になる。最終的に資源が尽きたところが結果的にその国・地域の保護水準となる。

IV. 今後の課題

発がん物質のリスク評価においては通常、がんになる、あるいはがんで死ぬということを指標に評価をしている。しかし人々の平均寿命が延びる中で、例えば、100歳でがんで死亡するということがそれほど重大な問題なのかについては検討の余地がある。ヒトのがん対策の目標としては、がんによる死亡をゼロにするというのはあまり意味がないため、75歳以下でがんになるヒトを減らすといった指標を使うことが多い。発がん物質の中でも強力な発がん物質は動物に早期にがんを作るが、弱いものは実験終了時に解剖してみたらそのまま放置すればがんになる可能性のある、前がん病変が認められたというようなものもある。このような時間の要因を適切に評価する方法があればそのほうが望ましい。がんを予防することだけに資源を投入した結果、お金がなくて高齢者の生活がおびやかされるというのでは何のためのがん対策なのかわからない。仮に平均寿命が40歳しかないのであればがん対策のほとんどは、禁煙ですら、必要ない。またがんだけが特別重大なリスクというわけでもない。第1表の最後の方に加えられている鉛については、発がん物質ではなく子どもの知能への影響が問題になっている。高齢になって発症するがんと、生涯にわたって影響する知能と、どちらがより優先的に対策すべきだろうか? リスクへの対処は、トレードオフも含めて、常に限られた資源をどう配分するのが最良なのか全体を考える必要がある。

最後に、個人的なことであるが、東日本大震災以降、原子力関係者に食品中の発がん物質についての話をする機会が何度かあり、食品中の発がん物質についてはあまり知らなかったという感想を頂いた。原子力は巨大な産業で、その内輪だけでも十分生きていけるのだろう。しかし、もし原子力の産み出す富で、ほとんど研究が進んでいない食品中の天然発がん物質対策などが行われていたら、震災後の対応も少しは違っていただかもしれないと思う。原子力の場合にはごく僅かの影響ですら膨大な資金で研究されているが、一方、無機ヒ素などは古くから発がん性があることは知られているにもかかわらず、動物では再現できず、なぜヒトでがんを誘発するのかなどについてはまだよくわかっていないのである。天然物については明確な責任者がいないことが多いので、責任を追求するという形での圧力は存在しない。しかし人々の健康と福祉の向上は社会の構成員全てにとっての願いな

第1表 遺伝毒性発がん物質のMOE

物質	MOE	条件	機関, 年度
ベンゾ(a)ピレン	130,000-7,000,000	食品由来	COC, 2007
6価クロム	9,100-90,000	食品由来	COC, 2007
クロム	770,000-5,500,000	飲料水	COC, 2007
1,2-ジクロロエタン	4,000,000-192,000,000	飲料水	COC, 2007
ベンゾ(a)ピレン	17,000,000-1,600,000,000	飲料水	COC, 2007
1,2-ジクロロエタン	355,000-48,000,000	室内空気	COC, 2007
ベンゾ(a)ピレン	10800-17900	食品由来	EFSA, 2008
PAH2	15,900	平均的摂取群	EFSA, 2008
PAH4	17,500	平均的摂取群	EFSA, 2008
PAH8	17,000	平均的摂取群	EFSA, 2008
カルバミン酸エチル	18,000	アルコール以外	EFSA, 2007
カルバミン酸エチル	>600	ブランデーとテキーラを飲む人	EFSA, 2007
アクリルアミド	78-310	ラット乳腺腫瘍を指標	JECFA, 2010
カルバミン酸エチル	20,000	平均的摂取群	JECFA, 2005
カルバミン酸エチル	3,800	高摂取群	JECFA, 2005
アクリルアミド	133-429	オランダの2-6才の子ども	RIVM, 2009
アフラトキシンB1	63-1,130	オランダの2-6才の子ども	RIVM, 2009
フラン	480-960	食品由来	JECFA, 2010
食品中ヒ素	余裕はない	ヨーロッパの平均的消費者(注1)(注2)	EFSA, 2009
食品中ヒ素	1.1-33	フランス成人平均	ANSES, 2011
食品中ヒ素	0.8-27	フランス子ども平均	ANSES, 2011
アクリルアミド	419-721	フランス成人平均	ANSES, 2011
アクリルアミド	261-449	フランス子ども平均	ANSES, 2011
PAH4	113409-230041	フランス成人	ANSES, 2011
PAH4	72433-150509	フランス子ども	ANSES, 2011
無機ヒ素	9-32	香港平均(注3)	CFS, 2012
無機ヒ素	5-18	香港高摂取群	CFS, 2012
PAH4	27600-15500	英国人全食品由来平均-97.5パーセントイル	EFSA 2008
PAH8	45,606	成人	スペイン, 2012
PAH8	40,078	子ども	スペイン, 2012
ヒ素	0.77-20.5(注4)	男性	スペイン, 2012
ヒ素	0.32-8.6	子ども	スペイン, 2012
アクリルアミド	853-305(注5)	1才未満	ヘルスカナダ, 2012
アクリルアミド	296-119	1-3才	ヘルスカナダ, 2012
アクリルアミド	1146-586	71才以上	ヘルスカナダ, 2012
無機ヒ素	3	ベルギー成人	AFSCA, 2013
無機ヒ素	68	ベルギー成人	AFSCA, 2013
鉛(注6)	0.9-1.9	母乳のみを飲んでいる乳児	COT2012(案)
鉛	1.6-10	ミルクのみを飲んでいる乳児	COT2012(案)
鉛	1.3-5	ミルクと離乳食	COT2012(案)
鉛	1.9-6.3	水	COT2012(案)
鉛	0.2-0.9	土壌	COT2012(案)
鉛	100-833	空気	COT2012(案)
鉛	3	香港平均, 食事のみ	CFS, 2013
鉛	6	香港高摂取群 食事のみ	CFS, 2013
鉛	1.8-4.8	ベルギー成人	AFSCA, 2013
鉛	0.5-1.2	ベルギー幼児 2.5-6.5才	AFSCA, 2013
鉛	1	ベルギー乳児 3か月	AFSCA, 2013

PAH2: ベンゾ(a)ピレン, クリセン

注5: 平均摂取量と90パーセントイルの値

PAH4: ベンゾ(a)ピレン, クリセン, ベンゾ(a)アントラセン, ベンゾ(b)フルオランテン

注6: 遺伝毒性ではないが毒性に、しきい値がないとみなされる

PAH8: ベンゾ(a)ピレン, ベンゾ(a)アントラセン, ベンゾ(b)フルオランテン, ベンゾ(k)フルオランテン, ベンゾ(ghi)ペリレン, クリセン, ジベنز(a,h)アントラセン及びインデノ([1,2,3-cd])ピレン

COC: 食品, 消費者製品, 環境中化学物質のがん原性に関する科学委員会(英国)

注1: BMDL₀₁が0.3~8μg/kg体重/日に対して推定摂取量0.13~0.56μg/kg体重/日

ANSES: フランス食品環境労働衛生安全庁

EFSA: 欧州食品安全機関

FSA: 英国食品基準庁

JECFA: FAO/WHO 合同食品添加物専門家会議

注2: BMDL₀₁が0.3~8μg/kg体重/日に対して推定摂取量0.37~1.22μg/kg体重/日。

RIVM: オランダ国立公衆健康環境研究所

CFS: 香港食品安全センター

スペイン: カタルーニャ州食品安全機関

なお海藻を食べる人達は4μg/kg体重/日程度になる可能性があり米を食べる3才未満の子どもは成人の2-3倍になる

注3: 香港が使用しているPODはJECFAが2010年に設定したものの、香港によれば香港の食事からの無機ヒ素摂取量は日本人の約半分

BMDL: ベンチマーク用量95%信頼下限値

BMDL₁₀は腫瘍発生が10%増加するBMDL

NOAEL: 無影響量, 有害影響が観察されない最高投与量

注4: 数字が小さい方はPODに0.3を使用, 大きい方は8を使用

ので、視野を広げ全体の中で最も優先すべき課題は何かをできるだけ多くの人に常に考えて欲しい。

—参考資料—

- 1) 林裕造監修, 食品安全リスク分析(食品安全担当者のためのガイド)(FAO 食品・栄養シリーズ), 日本食品衛生協会, (2008).
- 2) 畝山智香子, ほんとうの「食の安全」を考える—ゼロリスクという幻想(DOJIN 選書 28), 化学同人, (2009).
- 3) EFSA, Opinion of the Scientific Committee on a request from EFSA related to A Harmonised Approach for Risk Assessment of Substances Which are both Genotoxic and Carcinogenic, (2005).
<http://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/282.htm>

- 4) 畝山智香子, 「安全な食べもの」ってなんだろう? 放射線と食品のリスクを考える, 日本評論社, (2011).
- 5) 畝山智香子, 食品を介した有害物質摂取のリスク~放射性物質摂取のリスク~, 食品衛生学雑誌, Vol. 54, No. 2, p. 83 ~ 88 (2013) https://www.jstage.jst.go.jp/article/shokueishi/54/2/54_83/_article/-char/ja/

著者紹介

畝山智香子 (うねやま・ちかこ)
国立医薬品食品衛生研究所
(専門分野) 食品中化学物質の安全性評価



新刊紹介

原発の安全性と核廃棄物の処理 人類のエネルギー源としての原発

阿部康宏著, 149p. (2013.7), 東京図書出版,
(定価 1,200 円), ISBN 978-4862236678

22 世紀に利用できるエネルギー源は、太陽と核エネルギーで、太陽、原子力、核融合は十分なエネルギー源ではあるが、それぞれ使い難い特徴を持っている。環境への影響、安全性、および経済性から社会にあったものが選択されていくのだろうが、それぞれ直面する課題を科学技術で解決していくのが人間の従来から行ってきた手法である。22 世紀にも原発は有力なエネルギー源のひとつであり、原発推進に不安を持たれる方も多いが、そういった方への参考になればということで本書をまとめた著者はいう。著者の阿部氏は昭和 32 年から三菱で原子力に携わり、「常陽」、「もんじゅ」等の設計に従事された大先輩。その経験から、福島原発の事故は設計や製造、検査などの欠陥で起きたものでなく、会社の経営理念と管理の問題から生じたものと断じている。

「原発は地震では壊れない」、「原発は進歩している」、「エネルギー資源の特徴」、「22 世紀の電力資源と原発」、「放射性廃棄物処理は技術で解決」という内容は、一般の読者を想定した本としては目新しく、特に放射性廃棄物の処分を宇宙

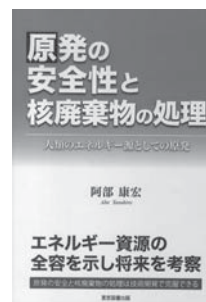
エレベータという装置を用いて宇宙空間に放出する技術は全くの夢物語ではない模様で面白いアイデアといえる。

福島の事故以降、原子力については見方が変わったと話される方も多い。今回の参議院選で当選した山本太郎氏のようにエネルギー不足を心配する必要はないと訴える人たちの

論争は、今後避けて通れないだろう。従来と同じ説明を繰り返すだけでは納得が得られない時代に突入した観がある。

高レベル廃棄物の処分方法についても、何が何でも地層処分という選択肢だけでなく、別の解決方法も検討してみてもどうかというのが著者の提案と思われる。3.11 以降、書店には脱原発的な意見を主張する本が増えているが、原子力推進の本は少ない。原子力の賛否を問うためには、健全な議論を行えるだけの情報提供がより一層必要と思われる。インターネットによる情報発信でも構わないが、原子力に取り組んでこられた先輩の方々の率直なご意見をもっとうかがえないものかと思った。

(編集委員会・齋藤 隆)



放射線生物学の最前線

DNA 損傷修復の動的可視化とシミュレーション

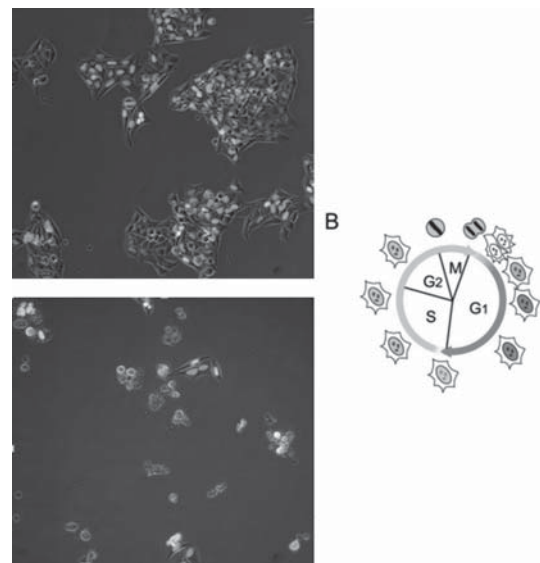
東京大学 上坂 充, 放射線医学総合研究所 藤森 亮,
コロラド州立大学 加藤 宝光

福島での低線量被ばくは地域の住民・労働に携わる方々の最大の関心事である。数十 mSv 以下の線量での疫学的影響は、様々な考え方や内挿式があり、統計的ばらつきも大きい。結果的には放射線防護の方策に大きな変化はないと考えられるが、その不確定性の原因の解明は、福島原発事故後の、原子力関連研究者の責務と考える。一方、最近の放射線生物学、医理工連携、そのためのマイクロビーム源の開発の進歩は目覚ましいものがある。今回は、マイクロ放射線生物学、つまり DNA の損傷、修復、タンパク質挙動の動的可視化、さらにはそれら分析を高機能化するための卓上マイクロビーム源の開発と利用を解説する。また、この分野の教育の重要性も言及する。

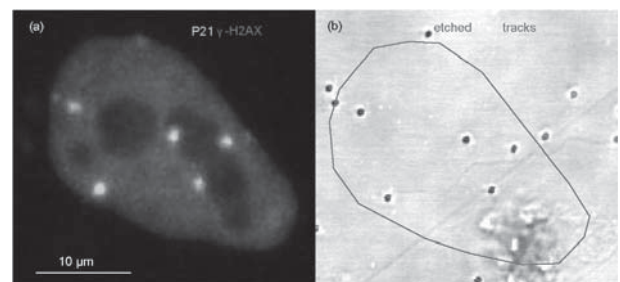
I. 序

筆者が学部学生時代、放射線生物実験を必修で履修した。学生1名にマウス1匹が割り当てられ、 ^{60}Co 線源で1日程度掛けて1krem (今では10Gy)照射し、その間のマウスの挙動観察(イライラ動き出す)、血中の赤・白血球の経時変化の測定、安楽死させて解剖し、肝臓・腸内出血を観察した。1kremの生物影響は鮮明な記憶となり、1mSv (0.1rem)のリスクも実感できた。その実習も15年程前から行われなくなった。一方、放射線生物学は目覚ましい進歩を遂げている。シングルイオンによるDNAの損傷・修復、修復タンパク質、細胞周期がミクロに時分割に可視化されている。この技術が確立され公開されれば、一般の人々も、皮膚の傷が治癒するように、DNA損傷が修復され、そこには個人差があることも理解しやすいと考える。今回はその最前線の技術と結果を紹介したい。まず序として、HeLa Fucciと呼ばれる細胞の周期(G (Gap) 1期, S (Synthesis) 期 (DNAから染色体生成), G2期, M (Mitosis) 期 (分裂)の色分け動画画像¹⁾の2ショット(0.8Gy照射)(第1図(a))とKrシングルイオン複数照射時のDNA修復タンパク質の挙動を分析した画像²⁾(第1図(b)左:光学顕微鏡,右:下においたイオン感受フィルム)を示す。第1図(a)では数日が1分程度に短縮され、照射による細胞分裂の不活性化が明確にわかる。第1図(b)ではまだ動画では

Visualization of DNA Damage and Repair by Radiations:
Mitsuru UESAKA, Akira FUJIMORI, Takamitsu KATO.
(2013年6月19日受理)



(a) HeLa Fucci細胞の周期と色分け可視化(G1期濃、S,G2,M期淡、上:0 Gy照射、下:8 Gy照射)



(b) HeLa細胞へシングルKrイオン照射による修復タンパク質の動きの可視化

第1図 HeLa細胞を使った細胞周期・分裂と修復タンパク質挙動の可視化

ないが、核でのDSB (Double Strand Break; 二重鎖切断) の場所と修復タンパク質の偏りが見える。両者の同時動画撮像することが可能となりつつある。

II. DNA 損傷に誘導される生体分子活動の可視化技術と放射線治療標的研究

本章では、主に独立行政法人放射線医学総合研究所 (放医研) と Colorado State University での研究成果を紹介する。

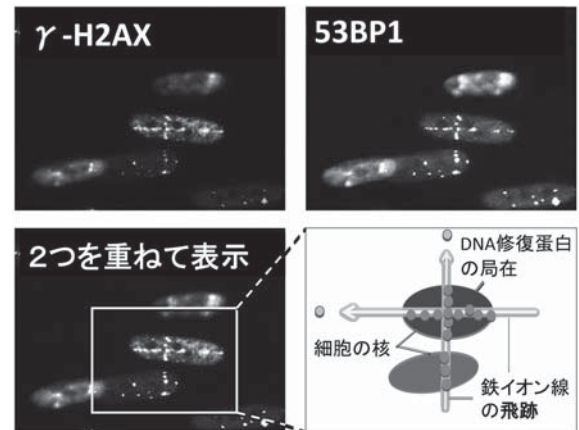
1. DNA 損傷に誘導される生体分子活動の可視化技術と放射線治療標的研究 (藤森 亮)

放医研は、世界的に著名な研究者との研究交流を通じて、粒子線治療を世界に普及・発展させることを目標に掲げ、国際オープンラボラトリー (International Open Laboratory: IOL) を設立した。私が担当する「粒子線治療分子標的ユニット」の研究課題は、重粒子線がん治療に関連する細胞分子メカニズムの解明、すなわち「粒子線治療の分子標的」の研究である³⁾。

放射線治療の標的とは、単純にはDNA鎖が切断をうけたときにこれを修復しようとする生体分子のすべてである。しかし、DNA損傷に対する細胞の応答は、DNA損傷修復にとどまらない。たとえば、アポトーシス、細胞周期、幹細胞性などはDNA損傷を生じた細胞の放射線感受性を左右する要因として知られている。動物の個体や組織のレベルでは、概日リズム、バイスタンダー効果、適応応答、再増殖 (repopulation) など、さらに多様な要因が放射線感受性に関与する。これらはまだ分子的な解明が進んでいないが、放射線がん治療の増強、治療抵抗性の解決に関わる重要な要因である⁴⁾。

分子標的研究は、分裂増殖するがん細胞 (またはがん組織) がDNA損傷に屈せず生存を続けようとする性質に関する生体メカニズムの解明ともいえる。こうした生体分子の観察には、細胞の生命活動が維持されたまま、分子の挙動を観察する手段が大きな威力を発揮する。蛍光標識された生体分子を時系列で観察する手法やこれを容易にするデジタル画像顕微鏡の技術の進歩には目を見張るものがある。ここでは、放射線標的分子の可視化の観点から、IOLのコロラド州立大学 Allen 博士との共同研究の例を紹介したい。

我々はX線と重粒子線によるがんの細胞死ないしは存命の仕組みについて調べている。細胞には、放射線などによるDNA損傷で遺伝情報の一部 (塩基配列の並び) が失われると、失われた遺伝情報と相同の配列を含んだ既存の遺伝子の一部を複製して、失われた部分を補って元通りに直そうとする '素敵な' 機能が備わっている。これを「相同組換え修復」と呼ぶ。粒子線を照射した細胞で、DNAの損傷部位に沿って相同組換え修復に関わる



第2図 DNA 損傷箇所および修復タンパク質の可視化
高LETの細いビーム (500MeV/n, 1Gy) の鉄粒子線が直交する2方向から照射された。

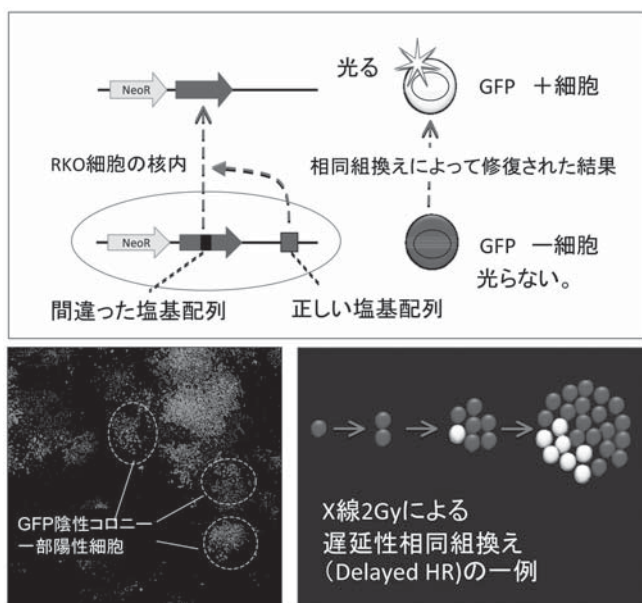
タンパク質が集まってくるのが見える (第2図)。

ただ、ゲノムDNAのどこに損傷が起きるかを予測できないため、特定の遺伝子に着目して修復過程を観察するのに工夫が必要である。これにはクラゲの蛍光タンパク質 (GFP) を生合成する遺伝子を人工的に細胞のDNAに組み込んで修復活動の標的遺伝子としたものが用いられる。RKOという大腸ガン細胞には1コピーの活性のない変異GFP遺伝子が導入されている。近傍にはこの変異 (塩基配列の欠け) を補うためのGFP遺伝子の正しい塩基配列 (相同遺伝子) が並べて導入されている。2つのDNA鎖の間で相同組換えが起きると、一つの正常なGFP遺伝子が完成されて活性化し、緑色蛍光を放つ細胞が出現し、このような細胞が再増殖 (repopulate) するのを観察できる (第3図)。

過去の研究から、この遺伝子変換は自然にも起こるし、紫外線や電離放射線はその頻度を上昇させる⁵⁾。さらに、初回のDNA損傷が標的遺伝子 (GFP遺伝子) そのものに生じなくても間接的に相同組換えが誘導され、その性質が被ばくから2回以上分裂した細胞にも維持されているといった事実から、RKO細胞のシステムは、外界のストレス下に分裂を続ける細胞がどのようにゲノム安定性を失っていくか (場合によっては、放射線抵抗性を獲得していくか) の原因を調べるための一つのモデルと考えられている。この「遅延性の」ゲノム不安定性に関わる分子機構はまだ明らかにされていないが、タイムラプス蛍光顕微鏡やセルソーティングシステムなどの装置に、照準性能の優れた小型の放射線照射装置を付加できれば、DNA損傷の間接的な影響や生体分子の動的観察を要する我々の研究がより加速すると考えられる。

2. 個人の放射線の感受性の違い (加藤宝光)

放射線生物学の発展と共に、特定の遺伝病で大きく放射線感受性となることが知られており、その原因遺伝子の決定、タンパク質の機能解明によって放射線生物学に



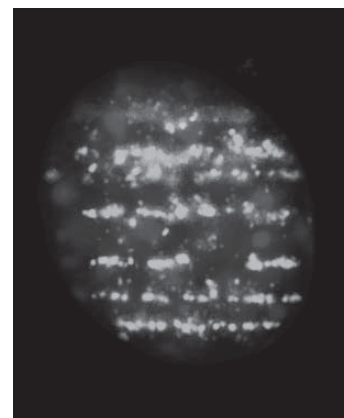
第3図 細胞内で生じた相同遺伝子組換えのイベントをGFP蛍光を指標として観察できるin vitro (ヒト大腸がん由来細胞)の系

おけるDNA修復に関する知見の理解が飛躍的に進んだ。だが、遺伝病のように重度の放射線感受性ではなく、一見正常に見える健常人だがやや放射線感受性である人の比率は、通常考えられているよりも大変高く、またそういった人は、特定のがんになる確率が高いことが知られている。このような人は恐らく人口の数%以上を占めることが予想され、ATMヘテロ接合体、BRCA1、BRCA2ヘテロ接合体変異などを持つ人がそれらの例に挙げられる。

故に、正常人由来の線維芽細胞の放射線感受性は、個人間でとても差が大きく、ATMヘテロ接合体由来の細胞とも感受性側で一部重なりあう。ATMホモ接合体はこれより重度に感受性を示す。

David ScottらはG2染色体法を用い、正常人、乳がんの患者、乳がん患者の一親等の家族のグループで、放射線誘発の染色体損傷形成において、乳がん患者では正常人と比較し有意に染色体損傷が多いことを確認した。しかしその一親等の家族の染色体損傷の分布は、正常人と乳がん患者の2層性となる形となり、特定の遺伝子の関与が疑われることが確認された。

DNA損傷の測定は近年、免疫染色により顕微鏡下の観察ができるまで、パルスフィールドゲル電気泳動法やコメント法のような高線量の放射線照射が必要であった。免疫染色法(第4図)は固定した細胞を用いて抗体、蛍光プローブを用いて任意のターゲットを染色する方法である。 γ H2AXフォーカス法により、細胞核内のひとつのDNA2本鎖切断を可視化することで、より高精度のDNA損傷、修復を調べることができるようになった。著者のグループでは、低線量率(10cGy/h)放射線照



第4図 免疫染色で可視化した γ H2AX

射とこの免疫染色法を組み合わせ、DNA損傷修復レベルでの放射線感受性の違いをATMヘテロ接合体やその他の中程度の放射線感受性となるグループの同定に成功した。

また最近ではGFPなどの蛍光色素と融合タンパクを細胞内に強制発現させ、生きた細胞でDNA損傷修復に関わるタンパク質の挙動についても研究が進んでいる。

第4図に γ H2AXを免疫染色で可視化した物を示す。3T3マウス細胞は2Gyの鉄イオン照射後に固定、染色された。横に線のように見える白いシグナルが重粒子線の飛跡と一致する。うすく灰色に背景に見える部分はDAPIによって染まった核内のヘテロクロマチン領域を示す。

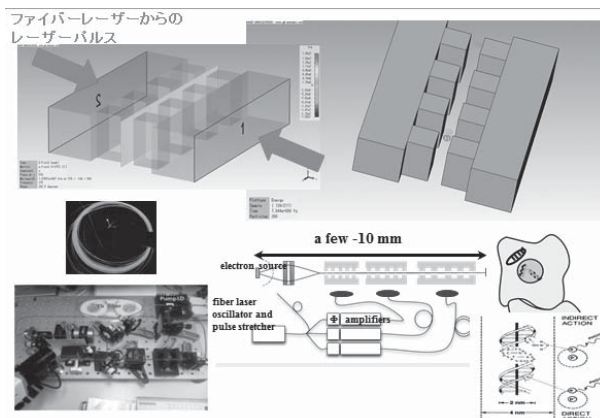
III. オンチップナノサイズビーム源開発

ここまでの実験結果はシンクロトロンやサイクロトロンを使ったマイクロイオンビームを使ったものである。もし卓上のマイクロUV光・電子・X線・イオンビーム源が実現され、光学顕微鏡で細胞・核・DNAを狙い撃ち分析が可能になれば、本稿で解説している多くのことがさらに解明されていくであろう。そのようなマイクロビームのパルス幅はアト秒領域である。ナノ・ピコ・フェムト秒の放射線化学分析は本学会メンバの得意とするところである⁷⁾。まずは高空間分解能のDNA損傷修復分析があり、そのあとアト秒粒子ビーム科学へと夢は膨らむ。本章では、それらに関する実績と開発の状況を紹介する。

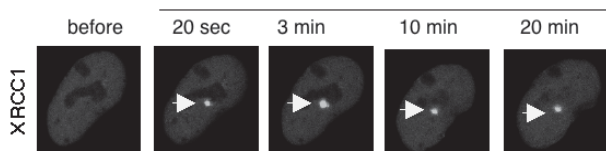
東北大学加齢医学研究所安井明教授研究室では、ゲノム損傷修復に関わる細胞内機構を解明する研究を行っている^{8,9)}。生きた細胞核にUVマイクロレーザー照射装置(第5図)を用いて照射し、損傷に応じてダイナミックに動くタンパク質をリアルタイムで可視化し、その挙動解析を行っている。例えば、第6,7図では、UVレーザーをスポット照射した箇所に集積するGFP付きWRNタンパク質の時間的変化の様子や、ライン照射して、できたDNA損傷箇所にhnRPUL1およびPARP1



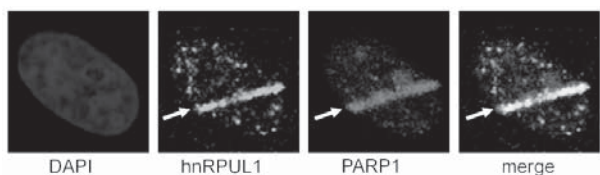
第5図 ピンポイント UV レーザー細胞照射分析システム (東北大学加齢医学研究所安井明教授研究室)
左: UV レーザー、真ん中: UV レーザー照射ヘッド
光学顕微鏡観察部、右: 制御・分析コンピュータ



第8図 ファイバーレーザー誘電体ナノサイズ電子加速・X線源



第6図 DNA 損傷箇所直ちに集積するタンパク質⁸⁾



第7図 2つのタンパク質の共局在の観察⁹⁾

タンパク質が共局在する様子を示す。また、プロテオミクスの方法を用いて新規タンパク質を同定したり、siRNAによりタンパク質の発現を抑制させたりすることにより、新規タンパク質の細胞内での振る舞いやがんや老化の原因となるゲノム不安定性との関係等を明らかにしている。

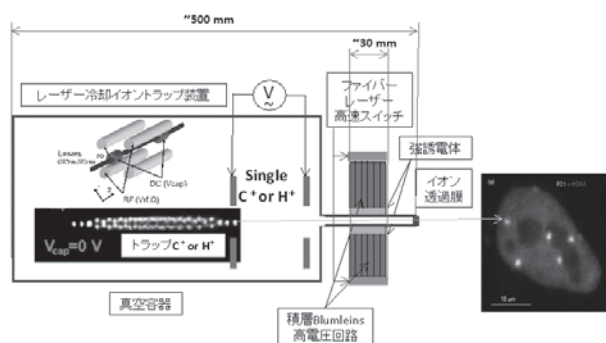
上記システムで光源を UV レーザーから電子・X線・イオンに置き換えようとする研究開発を実施中である。電子線形加速器(ライナック)は Sバンド(周波数 2.856GHz, 波長 105mm), Cバンド(5.712GHz, 53mm), Xバンド(9.3~11.424GHz, 27~33mm)の高周波電磁波の連結共振空洞である。それを Yb ファイバーレーザーからの 1.06 μ m の赤外光へ適用した共振空洞を考える。構造は第8図のように、1対の Silica ガラス(誘電体)製の櫛のようなものである。両側から侵入したレーザー光が Silica ガラスの凹凸により、中心真空ギャップ中で波長と位相が変調され、定在波が形成させる。一方から入射された電子が常に加速されるように設計できる。これがレーザー誘電体加速器(Laser Dielectric Accelerator)である。共振波長が 1.06 μ m ゆえ、連結空

洞長は最終電子エネルギー(1MeV)によって異なるが 1mm 以下、電子ビームが通過する真空ギャップは 1 μ m 以下である。したがって、電子ビームの横方向サイズは数百 nm, 縦方向 30nm (10attosecond)となる。強度は 10⁵ 電子/秒程度のオーダーである。一般に電子ライナックでのビームサイズは直径 2mm, 10¹⁰ 電子/秒程度である。しかし細胞核や DNA を狙い撃ちとなれば、その領域スケールは 1 μ m 以下であり、その面積での電子個数は 10⁴ 電子/秒程度となる。つまりその領域で見ればレーザー誘電体加速器のビーム強度は小さくない。また、その強度は 10⁵Bq に相当する。これが放射線管理区域外で使用可能な、密封 RI 線源同等となる。東大・高エネルギー加速器研究機構(KEK)・理化学研究所のグループは、電子銃, X線ターゲット, X線検出器も一緒に微細加工してオンチップ型化し、Yb ファイバーレーザーも自主開発し、加速器システムを開発中である。それを第5図の真ん中の UV レーザー照射ヘッドを、オンチップ型加速器システムに置き換えて、細胞核, DNA を狙い撃ちできるシステムを基本設計中である¹⁰⁾。

第9図には卓上シングルイオン加速システムのイメージを示す。レーザー冷却イオントラップをイオン源とする。すでに数個レベルの Ca イオンなどが捕獲・可視化されている。また、そこに電極を置いて1個ずつ取り出す技術も開始されている。一方、米国でファイバーレーザー高速スイッチ誘電体加速ライナックを使って 200MeV 陽子を 2m の長さで加速するがん治療器が開発中である¹¹⁾。その数 cm セクタを採用すれば卓上で細胞核, DNA 狙い撃ち分析システムが実現する。陽子, 炭素イオンを冷却 Ca イオンと一緒にトラップさせて冷却することも検討している。

IV. 結言

放射線生物学の最前線として、マイクロビーム, UV・ファイバーレーザー, レーザー誘電体加速, 分子



第9図 レーザー冷却トラップシングルイオン加速システム

動力学、アト秒科学など、様々な最新要素の導入と生物学的要素の解明が進み、放射線影響への新知見が得られている。冒頭に述べた「1kremの生物影響、1mSv (0.1rem)のリスクの実感」が、再現できる期待が大きい。本学会の有望分野のひとつに成長することを期待している。それにむけて、医学系研究、遺伝学、臨床学等と連携・協業を実現していきたい。

また教育について、筆頭著者の大学院工学系研究科原子力国際専攻では、平成24年度より英語講義 Radiation Biology を開講し、基礎と最新科学技術を解説している。平成25年度よりバイオエンジニアリング専攻と共通化した。来年度は医学系研究科と共通化し、遺伝学、臨床学等の教員にも参画いただく。また今回紹介したDNAの損傷と修復のミクロ観察の実験実習も加えたい。線量は10Gy、1mGyとしてその生物影響の差を実感させたい。翌年度は全学共通化し、社会工学的講義も加えて、低線量被ばく、放射線がん治療に興味のある文科系学生・留学生にも教育していきたい。他大学院・高専・研究機関とも連携し、教育の輪を広げたい。

また放射線・DNAの相互作用の理論(アト秒科学など)・数値シミュレーション(分子動力学・モンテカルロ法など)の発展も目覚ましく、DNAの損傷につき、実験結果と比較検討ができる段階になっている。次回はその解説記事を記載していきたい。

—参考文献—

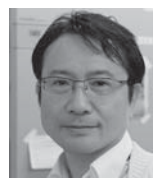
- 1) Asako Sakaue-Sawano, *et al.*, *Cell*, 132, 2008, 487-495.
- 2) F. Tobias, *et al.*, *Mutation Research* 2010, 54-60.
- 3) A. Fujimori, Particle therapy molecular target unit, International open laboratory National Institute of Radiological Science Annual Report 2011-2013. 126-127.
- 4) E. J. Hall, A. J. Giaccia, *Radiobiology for the Radiologist* (sixth edition), 2006.
- 5) L. Huang, P.M. Kim, J.A. Nickoloff, W.F. Morgan, Targeted and non-targeted effects of low-dose ionizing radiation on delayed genomic instability in human cells, *Cancer Res.*, 67 (3), 1099-104, 2007.
- 6) T. Kato, P. Wilson, H. Nagasawa, Y. Peng, JB. Little, J. Bedford, Variations in Radiosensitivity among Individuals: A Potential Impact on Risk Assessment, *Health Phys.*, 87 (5), 470-80, 2009.
- 7) 上坂充, 他, 日本原子力学会誌, 53 (5), 42-46, 2011.
- 8) Lan L, Nakajima S, Oohata Y, Takao M, Okano S, Masutani M, Wilson SH, and Yasui A, In situ analysis of repair processes for oxidative DNA damage in mammalian cells, *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, 101, 13738-13743, 2004.
- 9) Z. Hong, *et al.*, *PLoS ONE*, 8 (4): e60208, 2013.
- 10) A. Aimidula, *et al.*, TUPEA065, IPAC2013.
- 11) A. Zografos, *et al.*, THOAB201, IPAC2013.

著者紹介



上坂 充 (うえさか・みつる)

東京大学
(専門/関心分野) 先進小型加速器開発、可搬型ライナックの医療・原子力応用、人材育成



藤森 亮 (ふじもり・あきら)

放射線医学総合研究所
(専門/関心分野) 様々な光線に対する生体応答とその分子機構解明、得られた知見をがんの治療と予防に役立てる。



加藤宝光 (かとう・たかみつ)

コロラド州立大学
(専門/関心分野) 放射線生物学, 染色体損傷

INTERVIEW

「被災地の復興をまず第一に」



半谷 輝己氏に聞く

双葉郡内で塾を開講し、伊達市の健康相談窓口担当を務めながら、全国各地で放射線をテーマに講演や対話活動を続けている半谷輝己氏。同氏は、福島の野菜の危険性や脱原発を主張する識者やメディアの言説は、現地の感覚とはまるで異なると言う。非難や評論ではなく、復興のために何をなすべきかが大切だと語る同氏は、墓地と祭りを中核としたコミュニティの復活を呼びかける。

はんがいてるみ／福島県双葉郡双葉町生まれ、同県田村市在住。日本大学大学院博士前期課程修了。協同乳業名糖牛乳研究所、コニカケミカル医薬品研究開発部を経て、福島県双葉郡葛尾村にて学習塾 BENTON SCHOOL を立ち上げる。「たむらと子どもたちの未来を考える会」副代表、伊達市健康相談窓口担当を兼ねる。



聞き手 日本原子力学会 編集委員 澤田 哲生

東京工業大学

「東北の野菜を食べるな」と言われた

澤田 半谷さん、今日は日本原子力学会にようこそ。

半谷 ここがムラの総本山ですか(笑)。

澤田 半谷さんは、きわめて広範かつディープに地域住民と、放射線問題に関して、情報共有から対話をされていると聞きます。これまでに何人くらいを？

半谷 伊達市を中心に、ざっと数えて一万人くらいになります。また、京都や名古屋などの都市部からも依頼があり出かけました。どうやら、武田邦彦氏の次に私が呼ばれたようで、両者の話を比較するという趣旨らしい。武田氏の話は、私の目から見ても、専門知識を歪めています。彼の話がブログやメディアで、特に都市住民の間に広がった。これはとても由々しきことです。結果的に福島にとっては、風評被害をまき散らすことになっています。福島の住民の多くは武田さんを相手にしていないのですが、郡山は武田氏を講演に呼んでいるようです。彼の言説で酷いのは『東北の野菜は全部食うな』というものです。その一方で放射線のホルミシス効果(低レベルの放射線被ばくが身体に良いという説)には肯定的なこともいっている。支離滅裂というほかない。

澤田 武田氏はテレビにもよく出ている。ところで、半谷さんは頻繁に多数の方を相手に講演していますね。学者でない半谷さんが、どうしてそうなったのですか？

半谷 私のバックグラウンドは、伊達市の放射線健康相談窓口を去年担当させていただいたことにあります。今年も好評だということで引き続き任命を受けてやっています。また、国立保健医療科学院の取り組みおよび福島県保健福祉部子育て支援課の緊急支援事業のなかでも活動しています。福島県内には保育所が600ヶ所あります。先月までに、そのうちおよそ400ヶ所の保育所の保育士さんを集めた研修が終わりました。今後は、この400ヶ所から放射線の講話の依頼を受ける予定ですが、伊達市では、着任直後から放射線講話の依頼が幼稚園や保育園から殺到して、8か月で1年間の予定を超えてしまいました。1日に1回約2時間半の講話を3回行ったこともありましたね。また、同じような現象が起こるかも知れませんが、今から気合を入れています。

澤田 専門家ではない。だからこそ受け入れられた？

半谷 そういう面はあると思います。専門家の先生方は、専門用語を平気で使います。難しい話をそのまま専門家然として話せば、分からないので反感を買います。私は塾の先生なので、いかに分かりやすく話し理解してもらえるかが勝負です。それに私は双葉の生まれなので、地元の話織り交ぜて講演します。

澤田 それだけ？

半谷 会場に入れば全体を見渡し、ひと言二言話し

て、その日のターゲットを探すこともあります。

澤田 ターゲット(笑)?

半谷 要は、特定の主張をもっていると思える人です。会場にきたからには、聞きたいことや文句があるはず。それをズバリ聞き出して、そこから始める。すると会場の他の人も自然に私の話に引き込まれて来ます。

澤田 それはかなり高度な技ですね。

半谷 いえいえ、心を開いて向き合えば、やさしいことです。でも、他所から来られた学者さんには出来なかもかもしれませんね。

「避難した人と残った人で考え方が大きく違う」

澤田 さて、ごく最近の話題に少し触れたいのですが、遮水壁の問題がある。1,000トンの表層地下水のうち300トンが汚染されてそのまま海に流れ込んでいる可能性がある。これ、今に始まった訳ではなく、3・11以降続いている。私なども、2011年の初夏の頃、当時地下ダムでもつくらないともたないなどと発言していました。東電の工程表にも載ってましたよ。東電は、地下ダム建設費1,000億円も出せない。東電は自己資金が底をついているような状況ですから。民主党政権は、国で肩代わりするという決断がまったく出来なかったのです。一部メディアが、今頃になって、なぜこの問題を放置してきたんだと騒いでいる。さらに、税金を使うなど許せないと言う論調で騒ぐのが理解できない。あの頃にちゃんと政治主導でやってれば、今頃こんな事態になっていなかった。つまり、民主党政権は政治的判断が出来ず、結局まともな対策が出来なかった。逃げたんですよ。

半谷 見方が二極化していると思います。メディアは相変わらず東電は信用出来ない、で、私たちの地元の声は、そう高い濃度じゃないよね、という冷静な判断をしています。

澤田 そんな話は聞いたこともないですね(笑)。メディアは東電の失策がいいネタになる。真実を伝えるという立場もあるが、ビジネスなんですよ。売れるんですよ。テレビは視聴率が至上ですから。

半谷 今年も地元では海開きはやった。あとは漁業だけど、県民一般にはそう大きな関心ごとではないのです。ただし、ここにきて裏切られたという思いはあります。

澤田 どういうことでしょうか。

半谷 2年半も経ってるが、事態が根本的に良い方向に改善されているという実質感がないということです。水に関しては、20km圏内から今避難している人はそんなに大きな問題だと思っていない。ところが、これから20km圏内に戻ろうという人には、結構厄介で深刻な問題になるかもしれないと思います。

澤田 なるほど。さて、汚染水の一方で、テレビではTOKIOが盛んに『福島の桃』の美味しさを宣伝している。つまり安心して食べてくださいと訴えかけている。

また、ここに週刊SPAの記事がある。リンゴ農家が1Bq/kg以下でも売れないと嘆いている。こんなむごく無意味なことが解消できない。それが現状ですよ。

東京都民から66万票も集めた山本太郎氏が参議院に当選した。彼は原発に関しては、『放射線はどんなに微量でもコワイ』と煽っている。福島県民にとってはいい迷惑ですね。その山本氏をムードだけで66万人もの都民が支持している。不気味な現実です。どうなんですか県民感情としては?いま何が必要?

半谷 まず、前提条件をお話したい。3・11後、地元に残った人が聞きたい話と避難した人が聞きたい話が違う。抛り所にしてある情報が違う避難している方にとってはおそらく私の話しは相当受け入れられない。だけど残っている人たちには非常に好意的に受け取られる。伊達市等では、『ベクレルはこの程度だったらさすけねな(大丈夫だな)』と話して、みんな安心して笑顔で帰っていく。しかし、避難している人たちには、私の台詞も悪魔の戯言のように聞こえている。一方、避難せずに故郷に残った人には私の話は希望になっています。

澤田 それは、私も伊達市の小学校で半谷さんの講演を傍聴して実感しました。半谷さんが多く交流している避難せず残った人とはどういう方達?

半谷 家庭の中で話し合っ、福島でこのまま生き続けると決意した人たちです。実は、区長のリーダーシップが効いています。例えば郡山という都市は、元々行政区がなくてなんとなく出来上がってきた地域で、区長がいなかった。区長の顔が見えない地域は、しなくても良かった避難をしてしまった可能性がある。でも、そのことは責められない。

澤田 地域的に福島第一原発から20km圏内の人はほとんど帰還していないですよ。いま避難している人たちは具体的にどこに住んでいるんですか?

半谷 例えば、双葉は郡山市、白河市、いわき市、加須市(埼玉県)など。避難先では地域住民とのまざりも起こっているところが双葉に限らず、避難先の各地で起きていると聞いています。もともとからの地域住民からすれば、避難して新しく来て居付いた住民は補償金をもらっている。それにも関わらず、税金を払わない。非課税ですからね。なおかつ、被害者としての顔がある被害者面していると。避難から2年半が経って、バッシングが出始めているのです。同じ被災者同士、福島県民同士なのに軋轢が生まれ始めているという悪しき状況です。大きな問題になる前に何とかしなくてはなりません。

澤田 避難先は必ずしも県外ではないんですね。その避難されている人たちの見方というのは端的にどういったものなのですか?

半谷 基本は、ゴングマイウエイです。被災者なんだからという被害者意識が拭えない。

澤田 それは、地域住民と避難住民、どっちにとって

もよくないのでは。

半谷 本当は住民ではなく、ぐだぐだの行政が悪い。そもそもあれだけの事故が起こり、こんなにまでも被害者がいるとき、誰も刑事責任をとっていない。こんな馬鹿な話はないでしょう。まずは、時の政権のトップの菅直人元首相が責任をとるべきです。

菅さんはよくやったと言う人がいます。私からすればとんでもないことです。地域に振れをつくって、それを放置し続けてきた張本人です。その一方で、文句のつけやすい、文句を持っていきやすい方が責められる。東電です。東電を悪者にしたのも菅さんの大きな業績ですね。殿様を虐めるのは虐めがいがあがる。

澤田 東電は、昔は殿様だったけどいま没落した。だから、非難し放題だと。敗者は磔をうたれる。

半谷 私は、もともとは反原発だったんです。しかし、いまのような反原発はイデオロギーの遊び場として福島をもてあそんでいる。これは良くないですよ。地元民の思いとかけ離れている。

澤田 『イデオロギーの遊び場』ですか。

福島に住む人たちの本心が伝わっていない

半谷 もうひとつ付け加えたいことがあります。福島は東電の事故があったがためにスポットライトをあび続けているし、補償金ももらっている方達がいる。いまだに仮設住宅暮らしを強いられているのは辛いですよ。でも、それは岩手や宮城と同じじゃあないですか。ところが、岩手と宮城はスポットライトも補償金もない。逆説的ですが、福島は東電の原発事故があったからいまだに注目され続けて、補償も受けている。本来は、岩手、宮城、福島が公平に復興しなければならないのです。

澤田 そんなこと言って批判されませんか？（笑）

半谷 いやあー、私は元々は反原発だったんです。それに、生まれ故郷の双葉を愛しています。どうしても自分の記憶にある故郷を取り戻したい気持ちが抑えられません。だから、20km 圏内の人が他の地域の人々から非難されるのが悔しいのです。

澤田 まだ地元に戻れない。地震や津波で壊れた家や、そもそも先祖の墓石を起すことさえ出来ない。その喪失感は計り知れない。

半谷 そうですね。ただし、私はこの場でハッキリ言っておきたいことがあります。福島とひと言で言っても、浜通り、中通り一福島市や郡山市がある一、そして会津では物事の受け止め方が違う。私がこれまで接してきた人で、『福島は脱原発だ』とハッキリ言う人は、少数派のイデオロギー中心の人を除けばほとんどいない。

澤田 それはにわかには信じ難い。半谷さんに向かってハッキリ言いにくいのでは？

半谷 もう一度言います。私はもともと反原発だったんです。その人間が言うのですから……。

澤田 信じろと。しかし、自民党の福島県連だって『脱原発』を選挙公約にしていた。

半谷 浜通りの人間は、物事を謙虚かつ冷静にとらえています。これまで、原発や東電にはお世話になってきた。原発がなくなれば、産業がなくなるも同然の地域です。雇用がないと生活出来ない。それぐらいの認識がなくしてどうするんですか。

澤田 3・11以降、世の中の論調は、『福島は原発事故さえなければ……（もっと早く復旧に手が付けられたのに）』ですよ。

半谷 昨年の衆議院選挙で、未来の党が消えた、今回の参議院選で、みどりの党が消えた、共産党を除くと、脱原発や原発ゼロを掲げた党は軒並み衰亡か滅亡していった。そんななかで、山本太郎氏だけが脱原発派のアイドルとして残っていった。象徴的なんですよ。

澤田 共産党は組織票が強いから、投票率が下がれば当然の結果ですね。それに反原発の投票先が他になくて、共産に投じた無党派層もいるでしょう。社民じゃあ死票になるのが火を見るより明らかだった。

故郷帰還への情熱と条件 —— JC 系若者

澤田 故郷への帰還、復旧というなかで、半谷さんが提唱されているフロントランナー構想についてご説明ください。

半谷 まるで夢のような新都市構想をもって、福島に入って魅惑する研究者がいるんですね。

澤田 どなたですか、それは？

半谷 誰とは言わないですが、東京の非常に有名な私立大学の教授です。その人に限らず、夢のような新都市構想を持ち込んでくる人は少なからずいますよ。地元民はあんなものをみせられると、そういうものを作ってもらえるのかと思ってしまいます。私は、福島を研究の遊び場に作る気ですかと聞きたい。

澤田 本当に出来る目処、予算措置がない。

半谷 そうなんです。今は仮設住まいの皆さんに、申し訳が立たない。生きているうちに達成できるのかということですね——その絵に描いた餅の夢の都市構想。しかし、その夢を語るにしても、誰かが先に住み始めないといけない。なにも始まらない。それがフロントランナーです。

澤田 開拓者とか先住隊のイメージでしょうか。

半谷 まず、5人10人でも戻って1年間を目標に住み続けるのが最初ではないかなと考えています。医療や行政サービスはなかなか一気に復旧できないですよ。安全・安心を確保確立するには、凄いいお金がかかると思われれます。そのお金をどうするのか、国のお金、つまり税金で賄うとすれば、他県の人がどう見るか？現実的で、国民からの応援がもらえるやり方を考えたい。そこから始め、継続し、日本の成長に福島からも貢献してい

くようにする。フロントランナーは常に前向きです。

澤田 実際にフロントランナーになる人はいるのですか？

半谷 地元の双葉、浪江、大熊、田村には青年会議所(JC)の人々が40人ほどいます。彼らは非常に意識が高い。故郷復旧の願望が強い。

復興を妨げる 1mSv

澤田 ただ、フロントランナーが戻る上で、今現状での放射線量が壁になりませんか？

半谷 そうですね。ただし実際には放射線量は壁にはならないと見ています。フランスは自然放射線量が年間平均で約5mSvですね。内部被ばくは食生活に少し気を配ればそれ以下です。問題ないでしょう。第一、地元で採れる野菜等も、現行の厳しい食品衛生基準をクリアしている。しかし、現実的には、行政的には民主党が最終的に出した1mSvまで除染、が大きな壁になっている。あれは、非現実的です。除染には莫大な費用がかかる。

澤田 除染費用って、誰が出しているんですか。

半谷 東京電力ですね。もう潰れているようなものですが、今でも除染費用は東電の支出です。避難している人々への補償金も同様です。

澤田 そのことはあまり知られていないようですね。特に首都圏の人々には、東電ケシカランという話はよく聞きます。しかし、その東電が除染費用も避難されている方々への補償金も担っているという話はウケない。東電は、踏んだり蹴ったりですね。

半谷 福島に住む住民でも東電が金だしているという認識は薄い。マスコミがいけないと思いますよ。ミスリードしているんですよ。莫大な費用をかけても、それでも1mSvまでは除染できない。現実的でない。お金はもっと有効利用すべきではありませんか。

澤田 あれは、当時の政権のいわゆる原発担当大臣の細野氏が、どんどんと後退して行って5mSvといていた除染基準を、1mSvにまでしてしまった。人気取りのポピュリズム愚策の典型と言われています。放射線審議会は民主党政権下で早い時期に御用だ、とされて事実上潰されたままです。そこを所掌していた文部科学省の当時の副大臣である鈴木寛さんの相場観は20mSv/年で、そこにソフトランディングさせようとしていた。しかし、審議会もなく、ひとりぼっちで20mSvを背負い込みかけた当時の内閣府参与・小佐古敏荘東大教授は、記者会見をして舞台を勝手に降りてしまった。

半谷 そうでしたね。やはりあそこにまで戻るのですか。

澤田 そこから修復しないとイケない。一度法律が出来て、そのもとで行政組織が動き始めると、これがもうなかなか修復できない。大きな壁になる。さて、フロントランナーが戻れるmSv値はいくらでしょうか？そのための行政的措置はどうすればよいのでしょうか。少なくとも現行の除染に関わる特別措置法を見直さないと

にも前に進めないのではないのでしょうか？

半谷 そのとおり。それに除染で出たごみの置き場の問題もあるが、まったく宙ぶらりんのままです。そもそも地元には大型トラックが通れるような道路がたった4本しかない。仮にごみ置き場が決まっても、そこに至る道路は、大型トラックが数珠つなぎになって身動き取れなくなってしまうのは目に見えています。

澤田 いずれにしても、除染基準の1mSvは何の役にも立たない……。

半谷 そうです。このままだと、いつまでたっても戻れない——そこにぜひ目を向けてほしい。

澤田 誰にですか？

半谷 政治家、特にいま政権を担っている方々、それに行政の皆さんです。

澤田 どのようにしてほしいのですか？

半谷 戻った人間がそのなかで選べるような措置、つまり法律の整備とそのもとで行政が機能するようにしてほしい。がちり1mSvだと何もできない——これは細野氏が仕組んだ足かせだということです。20mSvとかに規制緩和してくれば色々始めることが出来る。ぜひそこに戻してほしい。ICRPやIAEAの勧告、推奨もそうになっているではないですか。なぜそれが出来ないの。

澤田 20mSvが現実的ですか。20mSvで戻っていいよといってもらえればいいのですか。

半谷 そうです。鈴木寛さんの意思をぜひ実現してほしい。私は個人的には初期には50mSv/年もアリだと思います。除染作業員の基準と一緒に(注：厚生労働省の設ける除染作業員の被ばく線量限度、つまり基準値は、1年間で50mSv、5年間で100mSv)作業員と私たちとは、なんか身体の仕組みでもちがうのでないのであれば、町の復旧を自ら選んで進んでやろうと言う人には、同様の基準が適用されてもいいのではないのでしょうか？除染作業員なら良くて、私・半谷はダメという理由をどなたか教えてください。

澤田 半谷さんは、3・11後早い時期の伊達市の除染活動以後、田中俊一・原子力規制委員会委員長と懇意にされているようですね。

半谷 ええ。田中先生が、伊達市等地元への放射線の説明は「専門家ではない半谷に任せる、とおっしゃったと伝え聞いています。たぶん、間違いないでしょう。(笑)

放射線安全フォーラムの加藤和明理事長からも、「スペシャリストではなく、エキスパートが現場では通用する」と直に言われました。

澤田 その田中さんは、3・11当時この放射線安全フォーラムの副理事長だった。規制フォーラムではなく安全フォーラムですよ。そして、100mSv/年以下なら安全という主張のはずです。田中さんが2011年に行った除染ボランティア活動の報告用のパワポ資料に明記してあります。

半谷 放射線審議会は2012年の9月以降、全委員が空席のままです。当時は文科省だったが今は規制委員会……全ての規制値はそこにまかされている。今こそ田中先生は声を上げてほしいですね。田中先生が言わないとダメ。半谷は福島で踏ん張っている——『田中先生、早く声を上げてください……お願いします』というのが私の切なる願いです。

澤田 まとめます。20mSvなら帰れるし、いろいろ始められる。それを規制委員会に何とかしてほしいと。

半谷 そうです。20mSvなら工夫出来る。生きていく自由度がもらえる。20mSvに意味が出てくる。

澤田 冒頭に述べた、汚染地下水の遮水壁に関しては、政治が動いた訳ですから期待出来るのではないのでしょうか。避難していて率先して帰ろうという人に福音を！

半谷 そう願いたいものです。でも、政治の前に規制委員会です。

澤田 最近の20km圏内の様子はどのようなのですか？

半谷 震災観光、ですよ。

澤田 なんですかそれは？

半谷 3・11直後に道路が復旧すると、三陸沿岸に瓦れき観光にやってくる人が激増しましたね。いまや原発から20km圏内も一時立ち入りできます。だから、観光にやってくる人が増えています。

澤田 地元の皆さんは複雑な気持ちなのではないでしょうか。でも、その原発事故ツーリズムは、地元にとってひとつの『未来』になるのではないですか。

半谷 そうですね。チェルノブイリに行って知ったのは、あそこには年間100万人も観光に来ている。博物館もある。福島の被災地もそのような観光地になれると思います。だって、今や『福島』は世界中の人が知っていますよね。

澤田 ほう。それはドンドン進めた方がいいのでは。

半谷 ただし、故郷があそこの自分としては、真っ先にやりたいのは先祖の墓をなんとかしたい。震災観光は二の次です。

澤田 倒壊した墓を修復するんですか？

半谷 いや、場所によっては修復に行けないほど線量が高い。年間数百mSvの墓場がある。これは、移転した方がいいと思います。墓はコミュニティーの中心になるんですよ。そして、盆踊りをやろうと言っています。盆踊りは、先祖と私たちが一緒になってする祭りですね。そうやって、地域の絆を作り直していく。以前よりも深い絆になると思いますよ。

澤田 お盆にも故郷に戻れない、祭りが出来ないという喪失感はとても大きいんですね。悲しい。

半谷 そうなんです。それを乗り越えるための墓と盆踊りですよ。

澤田 まるで日本人のコミュニティーとは何かを問い直すような話ですね。

原子力学会に期待すること

澤田 最後に日本原子力学会の特に若手に向けて、ぜひひと言をお願いします。

半谷 私の本業は中高生を育てることです。知識を伝えている。原子力の知識と技術は宝です。ちゃんと未来につなげて行ってほしい。教育に携わるものとして、一時の感情でこれまで培って来た知識や技術を放棄したり衰退させることは許し難いですね。あとは、福島の本当の現実をもっと見てほしい。マスコミの情報に惑わされないでほしい。惑わされれば、福島の高校生たちの未来を掴むことになりかねない。

澤田 そのほかには？

半谷 この被害を生み出したことに対して、キチンと反省してほしい。双葉活断層におかしなものを感じるので、おごりはキッチリ反省してほしい。

澤田 東電に対しては何かありますか。

半谷 東電はよくやっている……。

澤田 ここでリップサービスする必要はないですよ(笑)。例えば7月の汚染水漏れの発表が遅れたことに関して、社長の広瀬さんや本店の広報などへの風当たりは随分シビアですよ。

半谷 私は地元を始めいろんなところで、地道な活動を東電社員がしているのを見ている。私が地元での講演の際に、今日一緒に来ている方のなかに東電の人がいますという、聴衆から拍手が起こる。東電にはイヤなところなどもありますが、いま東電の人たちがどういふ思いで何をしているかもちゃんと見えていますよ。そこに私のような地域メディアのやりがいがあるのです。後は講演会に来ている人の顔ですね、目の輝きが物語るものがある。

澤田 地域の復興に視線があっているということでしょうか。東電も復興と一緒に汗を流している。支援してくれる人という見方でしょうか。

半谷 そうです。活動への支援。そして見てくれるという安心感があります。3・11から、時間がもう2年半たっているが、何も進んでいない。神戸は2年だった。どうするんだと。

澤田 ウクライナも2年で修復。

半谷 そう。なんでこんなに遅いのかと。

澤田 民主党は何も出来なかったしやれなかった。フロントランナーの話は政権や行政に伝わっていますか？政治と行政が動いて、立法がなされないと何も動かない。

半谷 確かにいま青写真描いてくれとも言われている。

澤田 それは良い話ですね。

半谷 そうですね——日本原子力学会の皆さんにもお知恵拝借とご協力をお願いしたいのです！