

巻頭言

1 科学の不確実領域と社会

山地憲治

時論

2 ヤッカマウンテン処分場計画の終焉と今後

この計画の失敗の背景には、サイトをヤッカマウンテンに絞り込んだ時のやり方に倫理的・道義的問題がなかったらうか。 安 俊弘

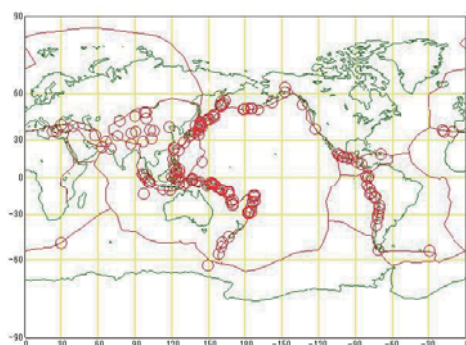
4 台湾の原子力動向と日本

原子力をめぐる台湾と我が国の政治的混迷は、政治的ポピュリズムに起因する。この共通点を踏まえた両国の交流が望まれる。 林 勉

東日本の巨大地震に学ぶ(2)

13 世界の変動帯と安定大陸

20世紀以降、世界ではM8.8以上の巨大地震が8回あった。 尾池和夫



この100年間でM7.8以上を記録した震源地の浅い大地震とプレート境界

解説

16 原子力損害賠償紛争審査会について—中間指針策定の作業と今後の課題

福島原発事故は、農林水産業等に多大な被害と、周辺住民に避難等に伴う損害を与えた。この事態に対して原子力損害賠償紛争審査会が設置され、同審査会は賠償金の基準となる包括的な指針を策定した。 高橋 滋

ヤマザト コミチ
表紙の絵 「山里の小径」 製作者 足立 和子

【製作者より】 いつも眺めている雑木林の四季、朝日に輝く時、夕日に映える林の中を歩く時、美しいと感じる。林の中の植物の羊歯や蔦、秋の虫に喰われた「山帰来(さんきらい/さるとりいばら)」等をテーマにしている。私の住む町に神籠石(こうごいし)伝説が残る山があり、山陰に苔むした石垣が並ぶ静かな小径が続くその山の中の風景を表現したいと作成しました。

第42回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

解説

22 シビアアクシデント対策整備の経緯と「残余のリスク」

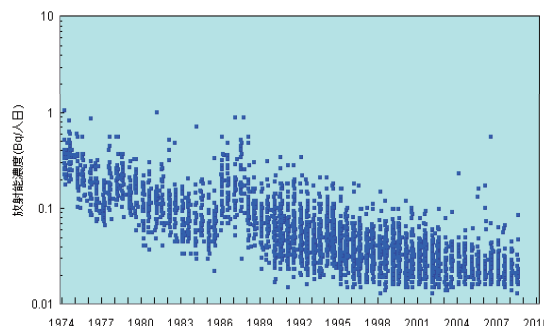
福島事故を踏まえ、安全設計指針等の改訂やシビアアクシデント(SA)対策の規制要件化が検討されている。行政指導により、民間の自主保安として実施されてきたSA対策のこれまでの経緯と変遷を振り返る。 平野光将

29 海洋における人工放射性核種の動態—福島原発由来核種は海洋でどう動くか?

福島事故によって多量の人工放射性核種が海洋にもたらされた。今後、これらの核種はどのように生態系に取り込まれ、海洋生態系にどう影響していくのだろうか。 日下部正志

34 日本人の食物摂取による実効線量の評価—過去の調査結果から分かること

福島事故で放出された放射性物質は、人への内部被ばくをもたらす可能性がある。ここでは平常時において、国内に住む人々が食物摂取によって生涯の間、どの程度被ばくしているかについて述べる。 真田哲也



日常食中のセシウム137の経年変化

報告

39 我が国の原子力の法規制と組織に関する考察—福島第一事故の教訓を踏まえて

わが国の原子力規制は、法制面とそれを支える組織のそれぞれに課題がある。規制は原子力に特化した炉規法に一本化すべきであり、新設される安全庁は十分な独立性を確保する必要がある。 西脇由弘

報告

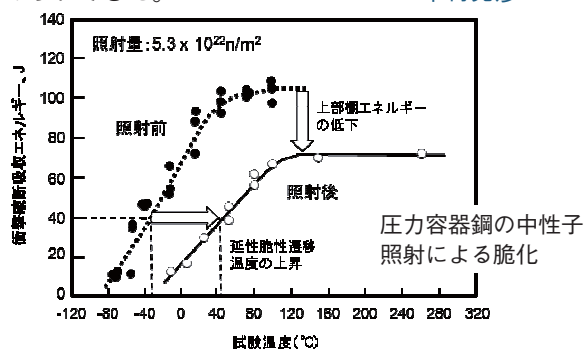
44 安全の構築に向けて—東日本大震災より明らかになった課題と安全再構築の視点—安全工学シンポジウム2011より

日本学会会議は今年7月に安全工学シンポジウムを開催した。そこで行われた東日本大震災に関する緊急パネル討論の内容を紹介する。話題は「安全の基本的側面」「原子力事故関連」「地震・津波による被害」等であった。 松岡 猛

連載講座 第4回 材料が支える原子力システム

56 低合金鋼

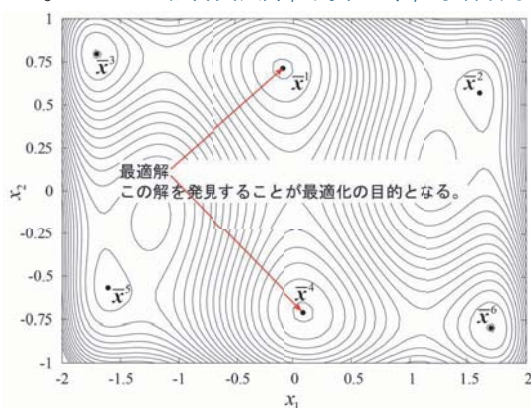
軽水炉圧力容器は、低合金鋼で製造され、我が国の優れた製鋼技術をもとに、溶接性、加工性、靱性、耐照射性などの一層の高性能化が進められてきた。 木村晃彦



解説シリーズ 第1回 ヒューリスティックな最適化手法とモデリング

50 最適化問題とは

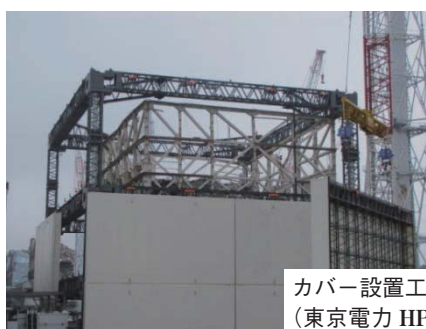
複雑な問題に対してもっとも適した解を与えることを「最適化」という。総合技術といわれている原子力分野でも、さまざまな最適化問題が存在する。連載第1回である本解説では、最適化を実現するための基礎的知識について紹介する。 相吉英太郎, 岡本 卓, 小林容子



最適化問題の目的関数の等高線

6 NEWS

- エネ研、原発なしでGDP 5.6%減と予測
- 「再生戦略」で原子力依存低減を明記
- 原子力損害賠償の中間指針まとまる
- 「ステップ1」終了で避難準備区域解除へ
- 「原子力安全庁」を閣議決定
- 福島第一対策で進捗状況を発表
- 泊3号機が再開、福島事故後初めて
- 除染対策で政府が方針
- 安全委が放出総量を再試算
- 東大原子力GCOEが国際サマースクール
- 海外ニュース



カバー設置工事中の1号機
(東京電力 HP, 9月15日)

ATOMOS Special 世界の原子力事情(18) 東欧編

61 ハンガリー

—パクシュ原子力発電所増設の動き

杉本 純

28 From Editors

64 会報 原子力関係会議案内、主催・共催行事、人事公募、英文論文誌(Vol.48, No. 11)目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

WEB WEBアンケート

9月号のアンケート結果をお知らせします。(p. 63)
学会誌記事の評価をお願いします。

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

学会誌ホームページはこちら

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

科学の不確実領域と社会



地球環境産業技術研究機構 (RITE)
理事・研究所長

山地 憲治 (やまじ・けんじ)

東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。
電力中央研究所エネルギー研究室長，東京大
学教授を経て，2010年より現職。専門はエネ
ルギーシステム工学。

インターネットが実現した情報空間には画像を含めて膨大な情報が飛び交っている。しかし、その情報の信頼性は疑わしい。このような状況の中で、学会のような専門家集団によって精査された科学的知識の役割はますます重要になっている。ただし、科学的知識にも不確実な領域がある。地球温暖化懐疑論や地震・津波の予知、低線量放射線被曝の健康リスクなどは典型的な例である。このような科学の不確実領域における科学と社会の関係が、今まさに問われている。

今回の福島原子力事故では、原子力推進の前提である「安全の確保」に失敗し「国民の信頼」が大きく損なわれた。信頼の回復がなければ、新しい原子炉の建設はもとより、既存原子炉の運転継続も難しい。信頼回復にまず必要なことは、原子力が持つリスクを直視することだろう。核燃料内に膨大な量の放射性物質を持つ原子力発電所の潜在的危険性は巨大であり、工学的な安全対策をいくら施してもリスクはゼロにはならない。

しかし一方、安全(逆に見れば危険=リスク)は相対的な概念であり、日常生活の中にも一定のリスクが存在する。放射線被曝についていえば、自然放射線による被曝があり、我々の体の中にも7,000ベクレルくらいの自然放射能がある。安全神話の元凶は、対象を安全と危険の2つに分類できるとする絶対的安全概念である。我々が実現できるのは、より安全なシステムであり、ゼロリスクはあり得ないことを理解しなければ実りある議論は成立しない。

問われているのは、どの程度のリスクなら受け入れられるのかであり、これは究極的には社会の判断である。この判断はリスクの科学的理解だけでは決着できない。極端な例を持ち出せば、ウランを核分裂させることは長半減期の放射性核種を短半減期の放射性核種に変換することであり、百万年以上の時間範囲では放射能を低減させる過程、つまり潜在的リスクを長期的に減らすものという科学的解釈も成立する。

私はエネルギーに関する学術が、エネルギー政策などエネルギーに関する社会的決定に役立つことを念頭に、理系と文系の学術を統合した「エネルギー学」の形成を目指してきた。原子力に対する国民の信頼という問題も、「エネルギー学」の重要な対象である。しかし、今回の事故に直面して、この課題の難しさを改めて噛みしめている。

そもそも、エネルギー政策決定における学術の役割も明確ではない。ドイツの哲学者ヘーゲルの言葉に、「ミネルヴァの梟は黄昏になって飛翔する」という警句がある。梟は知恵の女神ミネルヴァの使者であり、ここでは学術あるいはそれを担う学者を象徴している。私は、梟が黄昏に飛翔するというのは、事態が収束し始めてから学術は活動を開始すると解釈している。もちろん、学術にも様々な分野があり、この警句がすべての学問分野に当てはまるとは思っていない。しかし、自然科学(とその直接的応用としての工学)の場合と異なり、エネルギー政策や震災復興のような人間社会の問題については、学術は後から事実を分析して解釈を行い人間の知恵として蓄積して将来に備えるという役割が重要だと考えている。

原子力の安全に対する信頼は、より安全なシステムに向けた不断の努力の中から生まれてくると考えているが、それと同様な関係が学術の役割の中にも見出せる。普遍的な真理に基づいて現実の問題の解決を図り、その中から新たな真理を見出して展開していく動的な学術の姿である。

学術的知識は現実の問題を解決するための行動に科学的根拠を与えるが、社会的にその知識が共有されていなければ行動は正当化されない。例えば、低線量被曝のリスクについて、短期間の急性被曝の場合でも100 mSv以下では、発ガンリスクの増大を含めて統計的に有意な健康影響は観察されていない。しかし、この領域の科学的知識は未だに不確実で、不要な放射線被曝はできる限り避けるという保守的な行動をせざるを得ない。科学的知識を社会で共有される知恵にする努力が求められている。

(2011年 9月18日 記)



ヤッカマウンテン処分場計画の終焉と今後



安 俊弘 (Ahn, Joonhong)

カリフォルニア大学バークレー校教授
東京大学工学部原子力工学科卒業。カリ
フォルニア大学バークレー校 PhD。東京
大学工学博士。東京大学工学部専任講師、
東海大学助教授を経て、現職。米国アカデ
ミー全米研究評議会 Nuclear and
Radiation Studies Board メンバー。米国原
子力学会出版委員長。

米国の放射性廃棄物処分：許認可申請まで

米国は、1940年代初頭から始まったマンハッタン計画以来の核兵器開発、製造、運用、解体などに伴う廃棄物、エネルギー省(DOE)が運用する各種の実験・研究炉からの使用済み燃料、海軍の原子力空母・潜水艦などの船用炉からの使用済み燃料、民間の発電炉からの使用済み燃料といった多様な高レベル廃棄物を抱えている。

それらの最終処分実現に向けて、1982年核廃棄物政策法の1987年修正により、ネバダ州ヤッカマウンテンに研究開発の対象が絞られた。ブッシュ前大統領の8年間に政治的に重要な関門を突破し、ついに2008年6月3日、エネルギー省は原子力規制委員会(NRC)に対して処分場の建設と運転の許認可申請を提出した。同年9月8日NRCはそれを正式に受理(docket)し審査を開始した。申請書は最上位の文書だけでも8,600ページの膨大な量で、審査には3~4年が見込まれ、順当にいけば今年にも審査結果が出る見込みであった。

会計検査院によれば、許認可申請までにかかった経費は150億ドル(税金と1キロワット時あたり1/10セント課金される廃棄物基金)とされている¹⁾。また、核廃棄物政策法では、民間の使用済み燃料をDOEが1998年1月までに引き取ることが決められているもののそれが果たせず違法状態が続いていた。電力会社はDOEを相手取って一連の訴訟を起こし、当然軒並み連邦政府敗訴となり、司法省は税金で賠償金の支払いを余儀なくされていた。その総計は100億ドルに達し、処分場ができるまでさらに増え続ける、という状態であった。このような状況の根本的な解決にめどがつかない、ということで関係者一同の喜びには大いなるものがあった。

ヤッカマウンテン計画の終焉？

しかし、2009年にオバマ大統領が政権に就くや、民主党(多数与党)上院院内総務リード議員(ネバダ州選出)の意向を強く受けて、ヤッカマウンテン計画不支持の姿勢を次第に鮮明にしていった。2010会計年度(2009年10月から2010年9月まで)DOE予算では、ヤッカマウンテン関係予算は関連部局の閉鎖・撤回の予算を除いてすべて

削除され、代わって、代替策を検討するブルーリボン委員会(後述)設置のための予算が盛り込まれた。2010年9月末日にはDOE内でヤッカマウンテン計画を所管していた民間廃棄物管理局(Office of Civilian Radioactive Waste Management, OCRWM)が廃止され人員の再配置、ネバダ州の地元事務所の閉鎖などが完了しているという素早さであった。

2010年3月3日、DOEはNRC傘下の原子力安全・認可委員会(Atomic Safety and Licensing Board, ASLB)に許認可申請の撤回を申し入れた²⁾。その時DOEが理由としてあげたのは、「ヤッカマウンテンが安全でないとか、申請書に不備があるということではなく、このオプションではうまくいかず(not workable)代替案の方が国民の利益になる」という政策的なものであった。ここで注目される点は、DOEが許認可申請の「実体的効果を伴う棄却」(dismissal with prejudice)を求めている点である。これは法律用語で、ひとたび決定が下れば同じ案件について再提訴できないことを意味し、ヤッカマウンテンが将来においても処分サイトとして再考されないことを確実にする非常に強い表現と言える。

これに対してASLBは、2010年6月29日、DOEの「申請撤回」動議を却下する決定を下した³⁾。二重否定でややこしいが、要するにASLBは審査を続けるという意味表示である。「申請撤回は政策的理由によるものであるが、1982年核廃棄物政策法は連邦議会が定めた政策を変える権限をエネルギー長官に与えていない」というのがその理由である。このASLBの決定は、チュー・エネルギー長官やネバダ州選出議員からの反発を招いたが、一方で、これを歓迎しチュー長官に再考を求める書簡⁴⁾が91名の上下両院の議員から連名で送られたり、と様々な反応を巻き起こした。

ASLBが下した決定に対して、最上位のコミッショナー5名がどのような判断を下すのかに注目が集まった。詳細は、米国原子力学会 Nuclear News 7月号に記事⁵⁾があるのでそちらを参照していただきたいが、ヤッコNRC委員長は委員長のもつ行政権限をたてに審査業務の終結を決定した。これに対しては、NRCの内外か

ら多くの厳しい批判の声が上がった。特に、これまでの審査作業で判明したことを何も公表しないでそのまま闇に葬るのは納税者にも説明がつかない、との批判が強かった。これに応えるかのように、今年7月末に、これまでの審査内容の一部を公開する報告書が公開されている⁶⁾。

ブルーリボン委員会

オバマ大統領は2010年1月29日大統領令を発して、「アメリカの原子力の未来に関するブルーリボン委員会」の設置を命じた⁷⁾。同年3月、15名のメンバーが発表され、「炉と燃料サイクル技術」、「輸送と貯蔵」、「処分」の3小委員会を構成して議論が行われた。そして、今年7月29日、ドラフト・レポートがチュー長官に提出された。正式報告書の完成は、次の大統領年頭教書と予算教書の前、つまり今年末から来年早々と見られている。

その最上位の提言は(1)段階的で透明性の高い合意形成プロセスをサイト選定に適用する、(2)輸送、貯蔵、処分事業をDOEから専門の別組織に移管する、(3)その事業体が(連邦予算承認プロセスを経ず)直接、核廃棄物基金にアクセスできるようにする、(4)高レベル廃棄物と使用済み燃料の最終処分場を一つ以上できるだけ早い時期に実現する、(5)それらの中間貯蔵施設を一つ以上できるだけ早い時期に実現する、(6)廃棄物管理を格段に改善する可能性のある炉・サイクル技術の研究・開発・実証に長期に安定した支援をする、(7)安全性の向上と核拡散リスク減少のために国際協力を推進する、となっている。

特に(7)では、福島事故にも言及し、いくつかの米国科学アカデミーの報告書(特に2005年、2006年の使用済み燃料貯蔵の安全性に関するもの^{8,9)})を引用して、アカデミーに調査研究を求めているのが注目される。また、すでに、高濃縮ウランを使う諸外国の研究炉の燃料を核不拡散の観点から米国に回収している例を挙げ、小国の発電炉使用済み燃料の米国への引き取りも提言していることが注目される。これらは米国内の貯蔵・処分施設整備が条件となっているが、米国のリーダーシップ確保の観点から提言されている。

今後の行方

法律に明記された手順に従って多大の費用と四半世紀の時間をかけて進めてきた計画を一政権の政治的な判断で終わらせた代償は大きい。その手続きの法的正当性については今も係争中であり、ヤッカマウンテン計画はまだ首の皮一枚のこっているという見方をする関係者もいるが、OCRWMを解体したことなど、既に後戻りできないほど事態は進んでしまっている。ブルーリボン委員会、処分サイト選定を成功裏に進めてきたスウェーデンやフィンランドなど北欧諸国をつぶさに研究したことはその提言の(1)を見ても明白だが、莫大な費用と時間を

かけたプロジェクトを不可逆的に大急ぎで終わらせたことと抱き合わせで委員会が設置されたのは皮肉な巡り合わせと言えるかもしれない。

法的に瑕疵がなかったことは間違いないが、筆者の見るところ、1987年核廃棄物政策法を修正してヤッカマウンテン一つに絞り込んだときのやり方に倫理的・道義的問題があり、そのつけを今払わされているようである。つまり、当時政治的発言力の小さかったネバダ州に突如としてサイトを押し付けた形になったことが尾を引いていたと考える。

カナダは20世紀の最後になって社会的な賛成が得られないという理由でそれまで進めていた計画を破棄し、より広い社会的議論を進めている¹⁰⁾。スウェーデンもサイト候補地を絞っていく初期の段階では同じように住民の反発にあってアプローチを大きく修正し今日の成功につながっている。それらの経験から言えることは、一言で言うと、「急がば回れ」であろう。「事業者側が答えを用意する(おしつける)のではなく、社会が自ら答えを見つけるまで、そのプロセスの手助けをすることに徹する」ということである。ブルーリボン委員会の提言を見ると、米国がその方向に舵を切ったように見える。

これだけの犠牲を払ってまでも米国がヤッカマウンテン計画をやめなければならなかった理由には、今日の日本における原発を巡る議論に対して我々原子力コミュニティがどう理解し対応するかを考えると参考にできる部分があるかもしれない。

(2011年8月10日 記)

(追記)2011年9月9日、5名のコミッショナーは評決を行い、ASLBの決定支持2名、反対2名、棄権1名と割れた。評決の対象となった文言があいまいで複雑であり、実際に審査が継続できるかどうかは依然として不透明である。

—参考資料—

- 1) <http://www.gao.gov/new.items/d11229.pdf>
- 2) http://energy.gov/sites/prod/files/edg/media/DOE_Motion_to_Withdraw.pdf
- 3) <http://www.state.nv.us/nucwaste/licensing/order100629deny.pdf>
- 4) http://murray.senate.gov/public/index.cfm?p=NewsReleases&ContentRecord_id=aaab33e6-1d5c-4761-89d8-44ac382dcfd0
- 5) http://www.new.ans.org/pubs/magazines/nn/y_2011/m_7
- 6) <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1119/ML111990436.pdf>
- 7) <http://www.brc.gov/index.php?q=page/executive-order>
- 8) http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=11263
- 9) http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=11538
- 10) <http://www.nwmo.ca/>



台湾の原子力動向と日本



林 勉(はやし・つとむ)

東京大学数物系大学院修士課程修了。日立製作所原子力事業部長、同理事などを歴任。現在は「エネルギー問題に発言する会」代表幹事、原子力学会シニアネットワーク運営委員。

9月6,7日に台北で開催された台日科学技術フォーラム(主催:亞東関係協会科学技術交流委員会)に招待され、講演とパネルディスカッションに参加する機会を得た。これは毎年、テーマを決めて行っているもので、今年「東日本大震災の現実と将来」であった。このことがきっかけで台湾の原子力と我が国とのかわりについて考えてみたことについて、述べてみたい。

台湾原子力発電の導入経緯

台湾は我が国と同じくエネルギー資源に乏しく、そのほとんどを輸入に依存している。その中で原子力の重要性は高く、国民党政権下で早くから米国の協力を得て、アジアでは我が国について2番目に早く原子力の導入を行った。第一原発の金山1,2号機(BWR,各63万6,000kW)が1978,1979年、第二原発の国聖1,2号機(BWR,各98万5,000kW)が1981,1983年、第三原発の馬鞍山1,2号機(PWR,各95万1,000kW)が1984,1985年にそれぞれ営業運転を開始し、電力供給能力に大きく寄与した。これにより、1984年には原子力が火力を抑えて第1位の座を占め、1985年には総発電電力量の52.4%を賄うに至った。しかし、1985年以降は新規の原子力設備がないため、電源構成(発電電力量)に占める原子力発電の割合は、現状では19.3%にまで低下している。

台湾電力会社は1987年、電力需給バランスの面から第四原子力発電所(龍門)1,2号機(ABWR,各135万kW)の建設を計画し、1999年3月に1号機が、同年8月に2号機が正式に着工した。ところが2000年3月に行われた台湾総統選挙で、第四原子力発電所の建設中止を強く主張している民進党候補の陳水扁氏が当選し、行政院は工事の中断を宣言した。野党議員が大半を占める立法院(国会)は、行政院の決定を不服として、その後約4ヵ月間、両者による協議が行われ、2001年2月14日に行政院が建設再開を決定し、第四原子力発電所の建設は続行されることになった。しかし、撤去した設備と人員確保の問題や、発注できなかったための詳細設計の遅れなどが原因

で、本格的な工事の再開は2001年11月となった。その後も政治的混乱や品質問題、および工事管理能力の不足により建設工事が遅れ、完成までにはなお約3年を要する状況である。

第一,第二,第四原発は台湾の最北端近くに、第三原発は最南端近くに立地している。

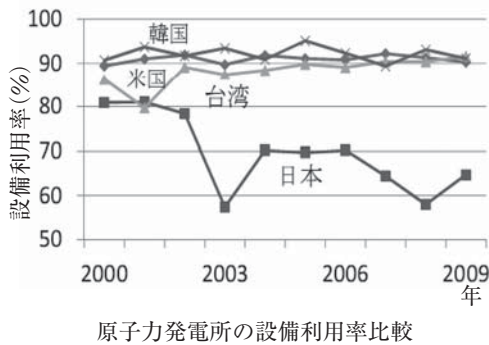
台湾原子力発電と日本との関係

台湾の第一,二原発は米国のGE社、第三原発は米国WH社が主契約者で、我が国メーカーは機器の一部を供給するというで協力した。第四原子力発電所については、我が国で完成した最新式のABWRに決定し、GE社の主契約のもとで、日立、東芝、三菱重工が分担してほとんどの機器を納入している。この中でわが国と台湾との原子力技術の本格的交流が行われ、台湾原子力技術の向上に大きく貢献してきた。しかしながら一方で、我が国の反原発グループが大挙して台湾に押しかけ、これに台湾メディアも加わり反原発の国民運動となり、第四原子力発電所の運転開始が大幅に遅れる一因となっているのは誠に残念なことである。

台湾原子力発電から学ぶこと

台湾原子力の設備利用率の高さは素晴らしい。第1図に示すように、韓国、米国に次ぐ世界一流の成績である。これに比較して我が国の低迷ぶりが際立っている。これは国富の莫大な損失になっている。その原因の一つとして我が国の原子力規制の硬直化が指摘されている。今回、原子力安全庁が設置され、推進と規制の分離が行われるが、この中で諸外国に負けない合理的かつ安全をきちんと担保できる規制のあり方も合わせて織り込むべきである。台湾の設備利用率が高い原因をきちんと評価して、我が国も学ばなければならない。

今回の福島事故のTBS取材班は台湾電力を訪れ、発電所の中まで詳細な調査を実施した。その成果は9月11日に放映された。この番組を作成するに当たって指導し



た元東芝技術者の角南義男氏はこのTBS取材に同行したが、その報告で次のような重要な指摘をしている。

(1) 非常用電源と淡水源確保の考え方

台湾での非常用電源と淡水源に関する安全方針は4箇所の原子力発電で首尾一貫している。非常用DGは各号機に2台、さらに原子炉2ユニットに共通の共用DGおよび巨大なガスタービン発電機2台が用意されている。非常用電源は高所に置かれ、重力で供給できる。この一例として第一原発の金山発電所の例を示すと、津波想定高さ10.7mに対して発電所設置高さ11m、スイッチヤード設置高さ16m、非常用ガスタービン設置高さ22m、10万トン以上の人工貯水池の設置高さ62mとなっている。他の発電所も同様な考えで設置高さが設定されている。このような津波対策が設計段階から行われていることについて、我が国では反映されていなかったことは残念である。台湾から学ぶ姿勢に欠けていたのではないかと思われる。

(2) 台湾電力の徹底した公開性

福島事故のTBS取材班は日本の原子力発電所の取材を申し入れたが、拒否され窮余の一策として台湾電力会社に申し入れ、快く許可してもらえたとのことである。取材した発電所ではすべての要望に応じてくれ、現物を見ることができなかった物や場所については後日、写真を送ってくれたそうである。このような公開性は官から民間まで一貫した方針であり、それに沿って実施されているとのことである。もちろんテロ対策上の配慮はなされた上での判断であると思われるが、このような姿勢がメディアの正しい理解、ひいては国民の理解増進に役立つものであり我が国も大いに学ばなければならない。

(3) 徹底した質実剛健主義

我が国と比較して快適性を追求した贅沢施設(事務所、所長室、厚生施設等)は皆無であったとのこと。実質を重んじる風潮を原点に帰って学ばなければならない。

台湾原子力の悩み、日本原子力の悩み

これまで述べてきたように、台湾では優れた面も多く

あるが、大きな悩みも抱えている。それは第四原発が遅々として完成できないことである。来年1月には総統選挙があり、民進党主席の蔡英文候補者が当選するようになると、第四原発は永久に葬り去られる可能性もある。この時のエネルギー政策はどうなるのか、我が国と共通の悩みである。また台湾電力では福島事故に対する国民の不安を考慮し、運転許可年限の40年を超えるプラントについては廃炉にする方針を決めたとのことであり、このことは今後の我が国の原子力政策にも大きな影響を与える可能性がある。我が国では民主党政権下で「減原発」方針が明確に打ち出されており、その動きは台湾にも大きな影響を与えるであろう。エネルギー政策をめぐる両国でのこのような政治的混迷は政治ポピュリズムに起因している。行天豊雄氏は雑誌「選択」9月号の巻頭インタビューで、「ポピュリズムが世界経済を狂わす」と述べ、ポピュリズムの本質は「大衆の欲するところには従うが、大衆が真に必要なことには従わないということだ」と喝破している。両国の現状はまさにこの鋭い指摘の通りの状態になっている。この共通の問題を考慮した上での両国の交流が望まれる。

今後の日台技術交流のあり方

台湾との技術交流においては、これまで日本側から教えてあげるといふ姿勢が強く、台湾から学ぶという姿勢が少なかったのではないと思われる。前述したように台湾から学ぶことも多々ある。

冒頭に触れた「台日科学技術フォーラム」では、今後の両国の技術交流のあり方についても議論された。その時にこれからは世界の中で、アジアが重要性を増していくことは明確である。台湾は地政学的にはその中心に位置しており、重要な役割を果たせるとの認識の上で技術に優れた我が国との協調がWIN WINの関係を構築できるとの提案があった。これは重要な指摘であり、原子力においてもこのようなWIN WIN関係を築くべきである。

エネルギー問題は政治的ポピュリズムの犠牲にしてはならない。次世代を担う若者たちの問題である。9月10日にNHKが放映したマイケル・サンデイ教授の熱烈授業(究極の選択)に参加した米国、中国、日本の選抜された学生たちは、福島事故について真剣に討論した上で、原子力の賛否の問いに対して、圧倒的多数で賛成の意思表示をした。このことを重く受けとらなければならない。原子力学会のシニアネットワーク(SNW)では台湾の謝牧謙教授の支援を受け、清華大学の学生との対話活動を行っており、大きな成果を出しているが、今後は両国の学生たちがエネルギー問題は自分たちの問題としてとらえた真剣な交流も望まれる。

(2011年 9月23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。

エネ研、原発再稼働なければ来夏の GDP 5.6%減と予測

日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット需給分析・予測グループは7月28日、2011年度および2012年度の「短期エネルギー需給見通し」を発表した。原子力発電については、(1)定期点検などにより現在停止中の原子力発電所が2011年9月以降に順次再稼働する「9月再稼働ケース」、(2)定期点検などにより現在停止中の原子力発電所および今後定期点検入りする原子力発電所が再稼働しない「再稼働なしケース」——の2つのケースを想定している。

2011年度の1次エネルギー国内供給は震災や節電の影響を受けて、生産活動や経済が落ち込むことから前年度比3.8%減となるが、2012年度には、震災からの復興により生産活動や経済の回復が見込まれるとし、同2.6%前後の伸びに回復すると見通している。

エネルギー起源のCO₂排出量については、9月再稼働ケースの場合、2011年度は原子力発電の稼働率低下に伴

い火力発電の割合が高まるものの、エネルギー消費の減少に伴い前年度比1.2%減となると予測。2012年度には再稼働による設備利用率の向上や新規プラントの運転開始を見込むものの、生産活動や経済の回復に伴うエネルギー消費量増加で同1.8%増となる。

一方、再稼働なしケースでは、2011年度には原子力発電所が順次停止していくことに伴う化石燃料消費量の増加で同3.2%増となり、2012年度には原子力発電所が全基停止するために発電用の化石燃料消費量が大幅に増加することから、同9.3%増を見込んでいる。

再稼働なしケースでは、2012年度夏期に既存の火力発電をフル稼働させても最大電力需要に対して7.8%の供給不足が生じる。このことにより、2012年度夏期の実質GDPへの影響は、供給不足がない場合に比べて5.6%(7.7兆円)の減少になるとしている。

「再生戦略」を閣議決定、原子力依存低減を明記

政府は8月5日、福島原子力発電所の事故の反省を踏まえた新成長戦略の見直し方針である「日本再生のための戦略に向けて」を閣議決定した。同方針の「革新的エネルギー・環境戦略策定に向けた中間的な整理」で、戦略を策定する際の基本理念として、下記の3つを掲げている。

- (1) 「新たなベストミックス実現に向けた三原則」①原発への依存度低減のシナリオを描く、②エネルギーの不足や価格高騰等を回避するため、明確かつ戦略的な工程を策定する、③原子力政策に関する徹底検証を行い、新たな姿を追求する
- (2) 「新たなエネルギーシステム実現に向けた三原則」①分散型のエネルギーシステムの実現を目指す、②

課題解決先進国としての国際的な貢献を目指す、③分散型エネルギーシステム実現に向け複眼的アプローチで臨む

- (3) 「国民合意の形成に向けた三原則」①「反原発」と「原発推進」の二項対立を乗り越え国民的議論を展開、②客観的なデータの検証に基づき戦略を検討する、③国民各層との対話を続けながら革新的エネルギー・環境戦略を構築

また「当面のエネルギー需給安定策～エネルギー構造改革の先行実施」の中で6つの重要課題の一つである原子力については、①聖域なき検証・検討、②原子力安全の徹底、③原発への依存度の提言に関する国民的議論を踏まえた対応——をミッションとしている。

原子力損害賠償の中間指針まとまる、風評被害の範囲を整理

文部科学省の原子力損害賠償紛争審査会(会長=能見善久・学習院大学法務研究科教授)は8月5日、中間指針を取りまとめた。審査会が既に公表していた第1、2次指針を踏まえ、事故がまだ収束しない状況下で賠償すべき損害として、一定の類型化が可能な損害項目・範囲を示したものの。産業界における風評被害についても、

賠償範囲となる産品、産地などを整理した。

住民避難に係る賠償については、政府指示による避難区域、屋内退避区域、計画的避難区域のほか、局所的に年間積算線量が高く推定されるとして新たに設定した特定避難勧奨地点や、自治体による一時避難要請区域(南相馬市)も対象区域とした。自主避難に関しては、今後

の検討事項となった。

風評被害の範囲に関しては、食用の農林水産物(畜産物を除く)は福島、茨城、栃木、群馬、千葉、埼玉の各県産のもの、水産物は福島、茨城、栃木、群馬、千葉の各県産などとなっており、事故発生以降、実際に生じた消費者の買い控えや価格低下による営業損害、検査費用等が賠償対象となる。牛肉では7月8日以降に生じた被

害について、東北・関東中心に全17道県で産出されたものが対象。また、福島県内に主な事業所のある食品産業でも、事故発生以降の製品買い控えなどが対象となっている。

観光業の風評被害では、放射能汚染に対する消費者の心理を踏まえ、福島のほか茨城、栃木、群馬の各県に営業拠点を置く企業も含まれることとなった。

福島事故収束「ステップ1」終了で緊急時避難準備区域解除へ

政府・原子力災害対策本部は8月9日、福島第一原子力発電所事故収束の道筋「ステップ1」終了を受け、緊急時避難準備区域の一括解除を含む今後の避難区域見直しの考え方をまとめた。

緊急時避難準備区域の解除に向けては、①水素爆発の発生可能性、②原子炉の冷却失敗の可能性および万一の場合の影響、③使用済み燃料プールの冷却失敗の発生可能性、④地震・津波による使用済み燃料プールの損壊などの発生可能性、⑤原子炉から放出が続いている放射性物質による影響——について、評価を行った結果、妥当性が確認できたとしている。緊急時避難準備区域の設定は広野町、楢葉町、川内村、田村市、南相馬市の5市町村にわたっており、政府は今後、1か月を目処に各市町

村より復旧計画提出を受け、地域の実情を踏まえ、一括解除とする考え。また、放射線被害に対する住民不安に応えるべく、8月中を目処に除染に関する基本方針を取りまとめることとしている。

警戒区域の縮小および計画的避難区域の見直しに関しては、事故収束工程の「ステップ2」完了後、原子炉の冷温状態確保などにより、放射性物質の放出が厳格に管理された時点で、検討を行う。

また対策本部は避難区域の見直しと合わせ、発電所から20km圏内の警戒区域で、これまで対象外としていた3km圏内についても、一時立入りを8月中にも開始することを決定した。

「原子力安全庁」を閣議決定、環境省・外局に安全規制組織を統合

政府は8月15日、原子力安全規制に関する組織改革の基本方針を閣議決定した。「規制と利用の分離」の観点から、原子力安全・保安院の扱う安全規制業務のうち、原子力部門を経済産業省から切り離し、内閣府の原子力安全委員会の機能を統合した「原子力安全庁」(仮称)を環境省の外局として新設する。12年4月設置を目指し、法案整備などの所要の作業を進めるべく、内閣官房に近く準備室が立ち上がる運びだ。

来年度からの施行を目指す当面の安全規制組織の見直しの方針としては、新設の「原子力安全庁」に原子力安全規制関連の業務を一元化。規制機関としての一層の機能向上を図るほか、経産省所管の原子力発電や燃料サイクル関連の規制業務に加え、他省所管の試験研究炉、核燃料物質等使用に関する安全業務や、核セキュリティについても一体的に対応する。事故発生時の初動対応などの

危機管理についても、新組織の重要な役割と位置付け、「緊急事態専門官」を新設し、体制整備を図っていく。また今般の事故を踏まえて環境モニタリングの司令塔機能を担い、中長期的な現状回復のための放射性廃棄物や汚染土壌の処理、除染についても関与させる。

現在の安全委員会については、規制と利用の分離によりダブルチェック機能の意義が薄れることから、位置付けや役割を見直し、新組織下に「原子力安全審議会」(仮称)として、再編・設置し、専門的知見による助言機能を持たせる方向だ。また、環境省下に移っても、専門能力を持った優秀な人材の確保・養成を保つため、「国際原子力安全研修院」(仮称)を設立するほか、組織文化の大転換を図る必要性から、ノーリターン・ルール導入など、人事管理の有効方策も検討することとしている。

政府・東電統合対策室、福島第一対策で進捗状況を発表

政府・東京電力統合対策室は8月17日、福島第一原子力発電所事故の収束に向けた「道筋」の進捗状況を発表した。4月の「道筋」取りまとめ以降、1か月ごとに公表されている。今回の「道筋」では、ステップ2の目標達成時

期は前回と同じく3～6か月後のままで、変更はない。

最近1か月間では、1、4号機の循環冷却システムが開始され、全4基の「より安定的な冷却」を達成したほか、高レベル汚染滞留水の処理も、6月の運転開始以降、平

均稼働率88%、累計処理量が約4万9,200トンに達するなど、プラントの安定化が着実に進んできた。滞留水処理では第2セシウム吸着処理装置「サリー」に加え、蒸発濃縮装置の2系列増設など塩分処理施設増強を図り、汚染水の減少を目指すほか、今後は、処理に伴い発生する廃スラッジ等の保管管理も進めていく。

海洋への汚染拡大防止については、1～4号機の既設護岸の前面に遮水性をもつ鋼管矢板設置の設計を進める。大気・土壌への放射性物質の飛散抑制も、小名浜で仮組された1号機原子炉建屋カバーの設置工事が10日に始まった。

北海道電力・泊3号機が再開、福島事故後初めて

北海道電力の泊3号機が8月17日に定期検査を終了し、営業運転を再開した。原子力発電プラントの再開については、事業者による津波応急対策やシビアアクシデント対策が講じられた後、地元の下承がカギとなっていたが、同機はこのほど、北海道知事の了解を受けて、事故後初の戦列復帰となった。

泊3号機は今年1月に運転開始後初めての定期検査に入り、所要の機器類取替工事などを実施。3月からは調整運転が行われていたが、8月9、10日の原子力安全・保安院による総合負荷性能検査、11日の原子力安全委員

7月下旬から8月上旬にかけての1～3号機からの放射性物質放出量は、事故直後の約1,000万分の1となる毎時約2億ベクレルと推定しており、今後もモニタリングを継続し、放出量の低減傾向を評価していく。

また、今回の進捗状況では、新たに要員育成・配置を課題として提示。今後、不足が見込まれる放射線関係の要員の育成を図ることとしている。東京電力による「放射線測定要員養成教育研修」では既に、約1,900人が修了しているほか、資源エネルギー庁でも日本原子力研究開発機構の協力を得て、年内250人を目標に研修事業を進めている。

会報告を経て、17日には北海道知事から、国による最終検査手続きに「異議はない」との意向を得て、定期検査終了に至った。安全性に関する総合評価(ストレステスト)は、全プラントを対象とした2次評価を年内に実施することとしている。泊2号機は、8月26日より定期検査に入る。

このほか東京電力の柏崎刈羽1号機が8月6日、同7号機が23日より、定期検査に伴い停止しており、8月24日現在で稼働している原子力プラントは、計14基となっている。

除染対策で政府・方針、推定被ばく量を半減へ

政府・原子力災害対策本部は8月26日、被災地域の除染に関する緊急実施基本方針を決定した。国、自治体、地域住民が連携し、今後2年間で汚染地域における一般公衆の推定被ばく線量を半減させ、長期的には年間1mSv以下となることを目標に、対応方針を取りまとめたもの。当面必要な経費として約2,200億円が見込まれており、速やかに精査の上、予算立てすることとしている。

除染実施に対する基本的姿勢としては、8月9日に発表された避難区域見直しに関する基本的考え方を受け、国が県・市町村や地域住民との連携のもとに除染推進に責任を持って取り組むとしている。

推定年間被ばく線量が20mSvを下回っている地域でも、放射線の影響を受けやすい子供の生活圏では優先的に除染を実施。推定年間被ばく線量で1mSv以下を目指すなど、緊急時被ばく状況にある地域を段階的かつ迅速に縮小することを暫定目標とした。

具体的には2年以内に、汚染地域における一般公衆の推定年間被ばく線量を約50%減少することが目標。風雨などの自然要因による減衰(ウェザリング効果)で、推定

年間被ばく線量が約40%減少することから、除染を施すことによって少なくともさらに約10%削減して、目標を達成させる。また園児・学童が活動する学校・公園については、特に念入りに作業を行い、子供の推定年間被ばく線量を2年以内に約60%減少させることを目指す。

除染は線量水準に応じ、年間の積算線量が20mSvを超える可能性のある計画的避難区域では、高いレベルの技術を要することから、国が主体的に実施。発電所から20km圏内の警戒区域についても、自治体機能の移転や立入制約の状況から、国が除染を実施することとしている。

自然被ばくなどを除いた追加被ばく線量が年間1～20mSvの地域では、個別事情や住民のニーズを把握しているコミュニティ単位での計画的な除染が効果的と考えられることから、「除染実施ガイドライン」を示した上、市町村で策定する計画のもと、国も支援して実施する。

除染に伴って生じる土壌等の処理については、当面の間、市町村ごとに仮置場で管理するが、長期的な処分場確保に向けては、国が責任を持って対応すべく、早急にロードマップを立案することとしている。

安全委が放出総量を再試算

原子力安全委員会は8月24日、福島第一原子力発電所事故に伴う大気中への放射性核種放出総量の再試算を発表した。当初不足していた事故発生初期の環境モニタリングデータについては、日本原子力研究開発機構が放出率を再推定したものをベースにした。3月11日～4月5日の推定値はヨウ素131が 1.3×10^{17} ベクレル、セシウム137が 1.1×10^{16} ベクレル。

安全委では4月12日、原子力機構の解析により、福島第一での想定放出総量をヨウ素131が 1.5×10^{17} ベクレル、セシウム137が 1.2×10^{16} ベクレルと公表しているが、

環境モニタリングのデータ不足で3月12～14日の放出量推定が行われなかった。その後、炉内状況が明らかになりつつあり、短半減期核種を考慮したサイト北西部の線量上昇地域の再解析を実施した上、12～15日の放出率を再推定した。

なお、原子力安全・保安院のINES「レベル7」の適用では、ヨウ素131が 1.3×10^{17} ベクレル、セシウム137が 6.1×10^{15} ベクレルが用いられている。

(以上の資料提供は日本原子力産業協会)

東京大学原子力グローバル COE, 4分野で国際サマースクールを開催

東京大学グローバル COE「世界を先導する原子力教育研究」プログラムでは、平成21年度の国際サマースクールを4分野で開催した。UCパークレー校及び開催地の大学等との共催で、シリーズとして4回目となり、米国、欧州、アジアの各地で、活発な取り組みを行った。

放射線計測分野は7月26日から8月1日までドイツミュンヘン工科大学で、また原子力安全、セキュリティ、保障措置分野は、韓国済州国立大学で7月27日から31日にかけて開催した。原子力社会論は7月31日から8月5日まで米国 UC パークレー校で開催。福島原子力発電所事故を受けて、その教訓を学び取り、こうした事態を繰り返さないためにはどのような視角、どのような方法からの検証・再考が必要かを学際的に議論した。8月22日

から8月24日にかけては英国インペリアルカレッジロンドン校で、放射性廃棄物処分に関する“Science, Safety Assessment and Public Perception”をテーマに、専門家や学生が意見を交換した。

このほか東京大学と上海交通大学、西安交通大学は共催で9月8日から10日にかけて、国際シンポジウムを中国西安で開催した。「FUKUSHIMA セッション」では、本拠点の教員が福島原子力発電所事故の推移や教訓、対策について講演した。

なお東京大学では国際サマースクールを、平成24年度以降も開催すべく検討している。

(資料提供：東京大学)

海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[米国]

テネシー峡谷開発公社、ベルフォンテ 1 の建設再開へ

米国のテネシー峡谷開発公社(TVA)は8月18日、1980年代に建設作業を中止していたベルフォンテ原子力発電所1号機を完成させる判断を下した。福島事故発生を受け、今春の最終決定は先送りしたものの、同社の理事会は一層クリーンなエネルギー社会を実現するための「統合資源計画(IRA)」を行動に移すには「クリーンで信頼性が高く、低コストである原子力が最良のオプション」と断言。2008年に建設再開したワッツバー2号機に続き、126万kWのPWRを2020年に完成させるため、49億ドルを投入する考えだ。

TVAは70年代にアラバマ州北部の同発電所サイトで120万kW級PWRとなる1,2号機の建設を開始した

が、電力需要の低迷などから88年に両炉の作業を停止。当時の1号機の進捗率は90%だったが、後に機器の一部を売却したため、現在の評価は55%。その後、両炉の敷地活用のため3つのオプションについて検討を開始し、「2基のうち1基を完成させる提案」について昨年5月に最終環境影響声明書(FSEIS)補足案を公開諮問に付した。

8月には1号機を利用可能と判断した場合に備え、製造に時間のかかる機器の調達や許認可手続き、追加設計エンジニアリング経費として2億4,800万ドルを理事会が承認。10月にはバブコック&ウィルコックス(B&W)カナダ社に対して、1号機用蒸気発生器2台の設計製造、仏アレバ社に原子炉系統設備と計装制御系の設計エンジニアリングを発注していた。

3月の福島事故発生に鑑み、TVAではベルフォンテ1号機完成計画への教訓として、同事故の事実関係を広範囲に把握・理解するとともに、地震と津波など複数の

災害が重なった事態の評価に意識を集中。そうした状況下においてもサイト内の機器を安全に保管し、的確に対処可能となるよう統合的な安全性の改善を図るとしている。

ノースアナ原発、地震で非常用電源が起動

米国のドミニオン社は8月23日、同国東部バージニア州中央部で午後1時45分に発生した地震により、同社のノースアナ原子力発電所の2基(各90万kW級PWR)が運転を停止したと発表した。

同日の午後2時直前に外部電源を喪失したものの所内の非常用ディーゼル発電機が起動しており、安全系は通常どおり稼働。機器の大規模な損傷、および放射性物質の外部への放出はなかった。これに伴い、同社では米原子力規制委員会(NRC)による4ランクの緊急事態尺度で下から2番目にあたる「警戒態勢」を宣言している。

同社によると、この地震は同社がバージニア州南東部に保有するサリー原子力発電所でも感知されたが、さほど激しい揺れではなかったため80万kW級のPWR2基はそのまま運転を継続。この地震はマグニチュード(M)5.8程度で、首都ワシントンD・Cを含む同国東海岸の広い範囲で揺れが感知されたと伝えられている。

メリーランド州のNRC本部では現在、ノースアナ発電所と直接連絡を取りながらその他の連邦機関と対応を調整中。同発電所の状況監視を続けるとともに、東部に立地するその他の原子力発電所における「異常事態」(緊急時尺度の最低ランク)についてもモニタリングしている。また、NRCの手続きに従い、アトランタなど2か所の地域事務所が緊急対応センターを始動。ノースアナも含め影響を受けた原発すべての駐在検査官が状況を注視しているところだ。

「異常事態」宣言したピーチボトム、TMI、サスケハナ、リメリック、セイレム、ホープクリーク、オイスタークリーク、カルバートクリフス、シェアロンハリス、クック、パリセードなどの各発電所では、所内点検をしつつ運転を継続している。

ユタ州に2基・300万kWの原子力発電所建設構想

米国で新たな原子力発電所の建設計画が、明確な輪郭を持ち始めている。中西部・ユタ州を本拠地とするエネルギー基盤開発会社のブルー・キャッスル・ホールディング(BCH)社は8月19日、ブルーキャッスル原子力発電所プロジェクトの事前サイト許可(ESP)申請に向けて、過去6か月にわたる現地およびその他におけるサイ

ト特性調査活動が大きく進展したと発表。同州経済の活性化等を狙い、鋭意、計画を進めていく方針だ。

同社が具体的に実施したのは、①現地での気象データ収集、②地下水特性のモニタ等による水文学調査、③地質工学的なコア試錐活動を含むサイト応答分析——など。これらを補足する現地外活動としては、地球生態系および水生生態系のデータ収集、地元の人口や経済的なパラメータを特徴づける人口学的・社会経済学的データの収集に焦点を合わせたとしている。

2基合計で300万kWの原子力設備の建設で最適なサイトを選定するため、BCH社では数年前から広範囲な活動を実施していたが、「当初から見当を付けていたユタ州中東部のグリーンリバー近郊の適性を支持する重要な計測結果が得られた」と明言。米原子力規制委員会(NRC)の認可申請や州政府および地元自治体の許可申請に向けて満足のいく結果が得られつつある点を強調した。

BCH社では今年2月からESPの申請準備として、これらの調査活動を開始。3月にはNRC宛ての書簡の中で、グリーンリバー近郊を建設候補地とする同プロジェクトのESPを2012年秋までに申請するほか、その12~18か月後にはNRCの設計認証(DC)取得済みの原子炉設計を想定した建設・運転一括認可(COL)を申請する予定だと伝えていた。また、同プロジェクトの用地購入契約を済ませるとともに、今後選定する原子炉設計の候補メーカーにも打診を始めたことを明らかにしている。

[カナダ]

サスカチュワン州と日立、原子力技術で共同研究

カナダのサスカチュワン州政府は8月25日、放射線利用による検査・医療技術、材料科学の共同研究開発・検証で日立製作所と覚書(MOU)を締結した。また、原子力発電の安全性向上、および小型原子炉技術に関する共同研究開発で、日立GEニュークリア・エナジー(日立GE)社、GE日立ニュークリア・エナジー・アメリカ(GEH)社、およびグローバル・ニュークリア・フュエル・アメリカ(GNF-A)社と、もう1件の覚書を締結したと発表した。

同州が今後、これらの分野でリーダー的立場を確保していくため、日立製作所らが海外市場拡大の一環として協力していくことになったもの。これら2件の覚書を実行・支援する経費として、両者は今後5年間に1,000万カナダドル(約7億8,000万円)を折半で投入するとしている。

実際の研究開発活動の場となるのは同州内にある2つの大学のほか、サスカチュワン研究委員会およびカナダ

の国立シンクロトロン研究施設などで、資金は分野ごとの研究機関設立や研究支援、がんや心臓疾患の診断・治療のための陽子線がん治療システムとPET 設備の開発に投資。陽子線治療の技術開発と商業化における日立製作所のこれまでの実績、核医学および画像診断技術の開発のために同州に設置されたカナダで唯一のシンクロトロンなどが活用される。

原子力分野では、実際に使用されなかった燃料棒からウランを取り出して再利用する研究で日立 GE 社、GEH 社および GNF-A 社が同州政府と協力。また、現時点で同州が原子力発電を推進するか否かの判断は下されていないものの、小型炉 (SMR) の設計および実行可能性研究についても、これら 3 社が協力していく。

[英国]

セラフィールド MOX 加工工場が閉鎖へ、福島事故が影響

英国・原子力デコミッション機構 (NDA) は 8 月 3 日、稼働率が低迷していたセラフィールド MOX 燃料加工工場 (SMP) を閉鎖するとの方針を発表した。

福島原発事故の影響により、日本の 10 電力会社所有のプルトニウムを MOX 燃料に製造し、プルサーマル計画に使用する見通しが不透明になったことから、NDA では SMP の今後について再検討。燃料製造契約への影響や変化した商業リスクを分析。その結果、SMP 維持のために英国国民にさらなる財政負担を強いるよりは、実質的に最も早い時期に閉鎖するのが唯一合理的な行動と判断したと説明している。

NDA は今後も、日本のプルトニウムを国際的な安全基準に則って安全に保管するとともに、その再利用に関する日本の電力会社の方針を、責任を持って支援していくため、さらなる協議を行う方針だ。

2002 年に操業を開始した SMP は、エンジニアリングおよび技術上の問題等により、設計上の生産能力である年間 120 トン (重金属換算) よりはるかに少なく、9 年間の稼働期間に生産した MOX 燃料は 15 トン程度と言われている。

08 年には顧客からの MOX 製造注文を仏アレバ社に下請けに出さざるを得なくなるという状況に陥ったが、NDA は 09 年 10 月、操業実績の向上を図りつつ、既存の製造契約を遂行する方針を公表。NDA の商業輸送部門である国際原子力サービス (INS) が、SMP の操業継続を保障するために新たな契約の確保を命じられた。また昨年 5 月には、日本原子力発電を含む日本の電力 10 社の英国でのプルトニウム全量を SMP で MOX 燃料に加工し、日本に輸送することで全体的な枠組み合意に達していた。

なお、今回の決定は SMP のみに係わる商業的な問題によるもの。英国には現在、原子力の民生利用で抽出したプルトニウムが 120 トン存在し、このうち 28 トンが海外顧客の所有。これらの長期的な管理方法を探るため、政府は今年 2 月から 5 月まで (1) 長期貯蔵の継続、(2) 固化後に地層処分、(3) MOX 燃料に加工し、新規および既存の炉で再利用——などの選択肢を公開協議に付した。

これらのうち、英国政府は (3) 案を「最も有望と思われる予備的な政策見解」として提案。難点として、SMP の稼働率が低く、多額の経費を投じて新たな加工工場を建設する必要がある点を指摘していた。核拡散の不安が少ないなど同案の有用性や合理性が、安全面や金銭的な価値といった要求事項に見合っていると検証されれば、実行に移される可能性も少なからずあると見られている。

[ヨルダン]

原子炉建設入札、3 社から財務提案書を受領

ヨルダン国営通信の「ペトラ」は 8 月 14 日、ヨルダン原子力委員会 (JAEC) が同国初の原子力発電所建設計画で、候補の国際的な原子炉メーカー 3 社から財務提案書を受領したことを伝えた。

JAEC はすでに 6 月末に、(1) ロシアの原子力建設輸出企業であるアトムストロイエクスポート (ASE) 社、(2) カナダの SNC ラバリン社、(3) 仏アレバ社と三菱重工の合併企業——からそれぞれ、100 万 kW 程度の VVER (ロシア型 PWR)、改良型 CANDU 6 (カナダ型加圧重水炉)、および ATMEA 1 (第 3 世代プラスの PWR) の技術提案書を受領。今後は内閣が設置した特別委員会がこれら 2 種類の提案書を審査し、12 月までに原子炉の採用設計を決定することになる。

ASE 社によると、今回の財務提案書には建設価格の計算を含めているほか、入札要項に従って EPC (設計・調達・建設) 契約の形式でも提案書を作成。同社のほかにクルチャトフ研究所や総合エンジニアリング担当のアトムエネルトプロジェクト社、設計会社のギドロプレス社、核燃料成型加工コンソーシアムのトベル社といった企業名をロシア入札チームとして明記している。

中東に位置しながら天然資源に乏しいヨルダンでは、エネルギー需要量の 97% を輸入するため国家予算の約 2 割を充当。2019 年以降に初の原子炉の運用を計画するなど、代替エネルギー源の確保を急いでいる。

なお、三菱重工が日本企業として ATMEA 1 を同国に輸出する際、必要とされている日本と同国政府間の原子力平和利用協力協定については、昨年 9 月に両国政府が調印したものの、福島事故の発生等を受けて国会承認

が延期されている。参院はすでに通過済みだが、衆院外務委員会での審議日程が不透明なため、今期国会で採決されるか否かは未定。

[中国]

嶺澳Ⅱ-2が営業運転開始

中国広東核電集团有限公司(CGNPC)は8月8日、同国で14基目の原子炉となる嶺澳原子力発電所2期工事2号機(PWR, 108万kW)が営業運転を開始したと発表した。

同炉は今年5月3日に国内送電網に接続され、7月23日に定格出力に到達。初併入時には6月15日の営業運転開始を予定していたが、福島事故の影響等により延期されたと見られている。日中科学技術交流協会によると、中国では同事故後、運転中の14基で安全点検を実施し、すでに作業を完了。7月からは建設中の原子力プロジェクトについても実施しており、今月末に結論を出す予定である。また、認可申請中のプロジェクトは承認審査が中断されている。

嶺澳Ⅱ-2号機はフランスの原子炉設計をベースに中国が改良したCPR1000で、同設計の初号機となった同1号機と同じく、中広核工程設計有限公司や中国核工業第二研究設計院、中国核動力研究設計院(NPIC)の共同設計。建設工事は核工業華興公司や核工業23公司、中建二局などが担当したほか、東方電気や上海電気、中国一重、中国二重といった国内企業約200社が機器を製造するなど、国産化率は64%に達している。

同炉の運開により、広東大亜湾および嶺澳原子力発電所の合計出力は6基610.8万kWとなり、年間の総発電電力量は450億kWhに達するとCGNPCでは予想している。

[ベトナム]

国家電力開発計画を公表、原子力は2020年に1.3%

ベトナム商工省は8月3日、2011年から20年までの国家電力開発計画を公表し、20年時点で原子力の発電設備を全体の1.3%とし、総発電電力量の2.3%を賄う方針を明らかにした。20年までに農村や山間部および離島に居住するほぼすべての国民の生活を電化するプロジェクトを含めており、原子力も電源ミックスの重要な構成要素の一つとして、他国および国際機関と緊密に連携しつつ開発と技術の習得を加速していく方針。

この計画は7月に同国のグエン・タン・ズン首相が承認していたもので、2030年までの開発ビジョンも加えた「電力計画VII」と呼称される。記者会見の席で商工省のホアン・コク・ブオン副大臣は同計画での具体的な開発目標として、輸入も含めた発電量を2015年に1,940億~2,100億kWh、20年には3,300億~3,620億kWhに拡大すると明言した。再生可能エネルギーの開発を優先的に進める予定で、総発電電力量に占める割合は現在の3.5%から20年には4.5%に増加させるとしている。

原子力については、主要な国産エネルギー源として将来の安定供給確保のために開発を進めるとしており、20年に初号機の運開を果たす計画。この年の国内総発電設備容量は7,500万kWを計画しており、この中での原子力の割合は1.3%。主力はやはり石炭火力の48%で、以下水力の23.1%、ガス火力の16.5%、再生可能エネルギーの5.6%、輸入の3.1%などと続く。

総発電電力量は3,300億kWhと見積もっており、原子力で2.1%を賄うほか、石炭で46.8%、ガスで24%、水力で19.6%、再生可能エネルギーで4.5%、輸入で3.0%となっている。

連載 東日本の巨大地震に学ぶ(2)

世界の変動帯と安定大陸

(財)国際高等研究所 尾池 和夫

I. 地震のマグニチュードと震度

プレート内の水平運動によって、岩盤の中に非静水圧場が形成され、そのストレスで岩盤にひずみが生じる。その岩盤中に、すべり破壊が発生して、蓄積されたストレスを解放する現象が地震である。地震の分布図を描くと、プレート内のストレスの状況を見ることができる。地震を起こしたすべり破壊の大きさで地震の規模、マグニチュードが決まる。

マグニチュード(Mで表す)は記録された地震波の震幅の対数から決める値なので、小さい地震には、マイナスのMもあり、大きい方は、現在までの最大値がM9.5である。たいへん広いダイナミックレンジを持つので、観測データから計算するためには、小さい地震波を検出する高感度の地震計や、逆に強大な揺れでも壊れない強震計が必要で、地震観測の精度を保つためには、高度の技術の発展と予算が必要であった。

日本では、1995年の阪神・淡路大震災の後、地震観測のためのネットワークの整備が急速に実現し、気象庁の検知能力が著しく向上した。小さい地震に関して、気象庁が今まで記録した最小は、M マイナス1.6である。日本の観測結果については次回に詳しく述べる。

Mの値は世界共通であるが、地震波が地表に到達して足下が揺れたとき、その揺れの強さを表す震度という尺度は国によって異なる。日本では、気象庁が定めた、震度0から震度7までの10段階である。

気象庁震度階級で、震度0は、地震波が観測されているが人は感じないという揺れである。その上は、1から7までの整数であるが、1995年の改訂以後、震度5と6には強弱ができたので全部で10段階となった。震度6弱を超えると、人は立っていることができなくなると言われている。

諸外国で使われている震度階級には、震度1から12というのが多い。外国人との情報交換にはこの点に注意することが必要である。

このように地震という現象を表すためには、Mという地震の規模と、震度という各地の揺れの強さとの両方が必要である。自治体の震災対策などの行動基準は、普通の場合、震度を基準に決められている。

II. 世界の地震の分布

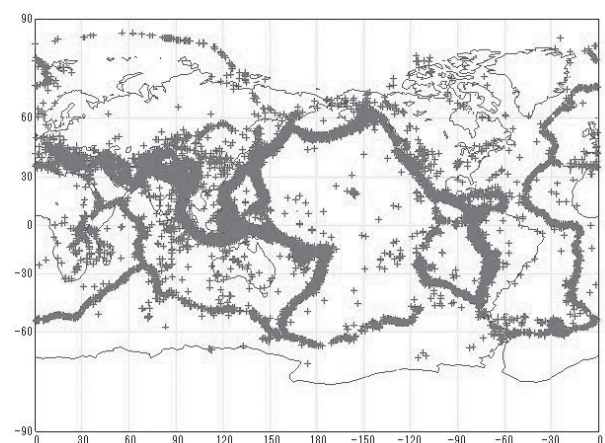
地球表面はリソスフェアと呼ばれる板状の岩盤に覆われており、その動きを見るために、まず地球儀を用意してほしい。メルカトル図法で世界地図を描くと北極や南極の周辺の実際の様子がわからない。

地球の表面を覆うリソスフェアは、10数枚のプレートに分かれていて、各プレートはさまざまな向きに移動している。地球の球面に沿って移動するから、各プレートの動きは、ある地点を中心として、地球表面に沿う回転運動になっている。

プレートとプレートの出会う境界には、離れていく境界、すれ違う境界、衝突している境界、重い海のプレートが軽い陸のプレートの下に潜り込んでいる境界などがある。

第1図は世界地図に浅い地震の分布図を描いた図である。この図では、太平洋や大西洋やインド洋の中に細長い帯状の分布があり、大陸の周辺には一面に広がる広い分布があることに気づく。

第1図で地震のデータが1964年以後であるのは、その頃、地下核実験を探知するための地震観測網が世界に展開されたために、M5程度の比較的小さい地震を含めて、世界の自然地震の均質な観測ができるようになったからである。以後、地震検知能力だけでなく、地震波の持つ情報を最大限に利用できるようになり、今では地震計の精度が向上し、カバーできるダイナミックレンジや周波数帯域ともに精度のよい観測記録が得られている。地震



第1図 世界の浅い地震の分布(1964-2009年, M5以上で深さ0-100 km, ミラー図法による)

計によるこのような記録は、地震の仕組みだけでなく、地球内部の物性や運動に関する豊富な情報を含んでいる。

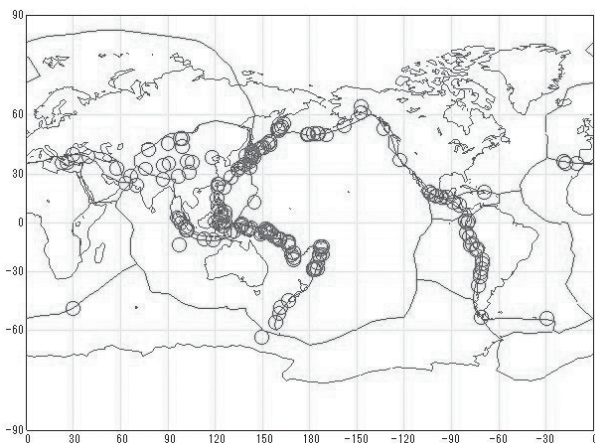
さて、第1図に見られる細長い地震の帯は、プレートとプレートが離れていくように相対運動をしている境界で、引っ張る力でM6程度までの大きさの地震を起こしている場所である。そこには大地震はほとんど起こっていない。

また、浅い地震が広く密集して起こっている地域がある。そこはプレートの収束地域で、プレートとプレートが押し合いをして岩盤に圧縮力が働いている。その圧縮力は陸のプレートの岩盤を広く伝わり、ストレスを蓄積して浅い地震を起こす。そこには大規模な地震があり、とくにプレート境界には巨大な地震が起こる。

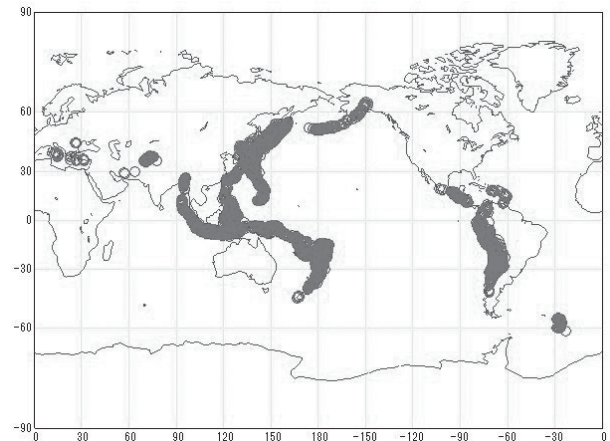
第2図に、浅い大きな地震の分布を示す。M7以上の大きな地震は、プレートの集まってくる場所に起こる。プレートが集まる地域では、重い海のプレートが軽い陸のプレートの下へ潜り込むから、潜り込むときに陸の先端を引きずり込んでいる。その曲がりが大きくなると、プレート境界にすべり破壊が発生して巨大地震を起こす。

潜り込んだ海のプレートの内部にも破壊が起こって、深い地震が起こる。したがって、世界地図に深い地震だけの分布を描くと、そこに海のプレートが潜り込んでいることがわかる。潜り込んだ海のプレートの先は、深さ660 kmあたりに達すると、そこで水平に流れていったり、マントルの中へちぎれて落ち込んでいったりすると考えられている(第3図)。

世界の地震分布とさまざまなデータを比較することがよく行われる。例えば、原子力発電所の分布図と比べることがある。その時、地震分布図の解釈には十分な注意が必要である。ほとんどの場合、第2図のような大規模な地震と比較することが多いが、すでに述べたように、地震は岩盤の破壊で起こるから、大地震の発生した場所にはしばらく次の大地震が起こらない。近未来の大規模地震は、むしろ最近、大地震が起こっていない場所に起



第2図 世界の浅い大地震(1901-2009年, M7.8以上)とプレート境界



第3図 世界の深い地震分布(1964-2009年, 深さ101-660 km, M5以上)

こると考える方がいい。本来、大地震の起こる場所で、長い間起こっていない場所が次の大地震の候補地である。

Ⅲ. 変動帯と安定大陸

世界の浅い地震の分布をよく見ると、さまざまなことに気がつく。その中の一つに南極大陸プレートの周囲を離れていくプレート境界が1周していることがある。このことは、他のプレートが南極大陸から離れて行く運動をしていることを意味する。南極大陸は地球の回転軸の近くにあるので、あまり動いていない。そこから他の陸を乗せたプレートが離れて行く運動をした結果、今の地球の大きな特徴を生み出した。

ある計算結果では、9400万年前は南半球にも北半球にも大陸が同じようにあった。多くの大陸で北半球に集まる状態になって、地球の水氷時代ができた。例えば、2万年周期で氷河期と間氷期が発生する周期は、近日点が地球の軌道を1周する周期である。地球が公転軌道に対して23.4度傾いて廻っているので、近日点が北半球の夏に重なると、氷が解けて黒い大地が見え、熱を吸収してますます温度が上がる。近日点が北半球の冬になると光を反射して凍り始め、氷河期となる。大陸がすっかり氷河に覆われた氷河期にも、日本列島には比較的温暖な地域があり、象や人びとが大陸から渡って来た。

第2図から、大地震の起こらない陸地に多くの国々があることがわかる。そこに住む人びとは震災を知らない。そのような国の地形の例として、第4図にヘルシンキの飛行場から見た景色を示す。大地が動かないので平坦な地形である。また、例えば、パリのように盆地と言われている地形であっても市街地のすぐ下は1億年前の岩盤であり、そこには地震が起こらない。

ヨーロッパ北部の安定大陸と異なり、例えば、中国大陸では大地震が多く起こる。ユーラシアプレートの東の端にあるこの地域には、太平洋プレート、ユーラシアプレート、インド・オーストラリアプレートなどが集まっ



第4図 ヘルシンキの空港から見た地平線

てきてプレート収束域を形成し、広大な地震活動地域を生み出している。その運動がヒマラヤ山脈や日本列島などの地球上の皺を作っているのである。

大規模なプレート収束域には、大震災が起こる。死者の数で震災の規模を表すと、世界の歴史の中で最大の震災は、1556年に西安の郊外で起こった地震で、83万人の死者を記録した。また、20世紀の最大の震災は1976年の中国唐山地震で、24万人以上の死者を出し、2番目の1920年の海原地震の20万人の死者という震災も、やはり中国であった。

地震分布図から世界のプレート境界の位置がわかる。それらの境界は、現地の調査でも、他の地球科学的な情報からも確認される。境界は場所によって、相対運動が大きくなると不明瞭になっており、そのような部分のプレート境界の線の引き方には、引く人の知識の偏りが現れることになる。

世界の活火山の分布からも地球内部の活動の様子を見ることができる。潜り込んだプレートの運動でできる火山のことや、ホットスポットと呼ばれるマンツルの深部から出てくるマグマが作る火山のことは前章で述べた。

プレートとプレートの離れて行く境界では、大洋の海底に中央海嶺ができていて、マンツルからの物質が新しい海底を生産し、海洋底がそこから拡大している。海底火山の活動が盛んである。アイスランドは大西洋中央海嶺の大規模な火山活動でできた島で、そこではマンツルから次つぎと新しいマグマが出てきて、プレートが生まれている様子を陸で見ることができる。火山活動の恩恵で、アイスランドには豊富な地熱と氷河からの大量の水による発電で、豊富な電力がすべてまかなわれる国になっている。

Ⅳ. 世界の巨大地震

理科年表から世界のM8.8以上の地震を抽出すると次のように11回ある。その中では、南アメリカに5回、北アメリカからアリューシャンに3回、北西太平洋で2回、インド洋に面して1回である。

1700年1月26日, M9, USA

1716年2月6日, M8.8, Peru

1868年8月13日, M8.8, Chile/Peru

1906年1月31日, M8.8, Ecuador/Colombia

1952年11月4日, M9.0, Russia/Kamchatka

1957年3月9日, M9.1, USA/Aleutian Is.

1960年5月22日, M9.5, Chile

1964年3月27日, M9.2, US/Alaska

2004年12月26日, M9.0, Indonesia/Sumatra

2010年2月27日, M8.8, Chile

2011年3月11日, M9.0, 日本, 東北日本太平洋沖地震

19世紀以前のことはあまりよくわからないが、それでも1700年の巨大地震のことはよくわかってきた。アメリカ合衆国の北西部の太平洋岸の沖に、カスケーディア沈み込み帯がある。ここでは、海岸が沈降して津波が押し寄せた証拠の地層が見つかっている。その巨大地震による津波が日本まで到達して日本の歴史資料に記録されていた。その分析から、1700年1月26日21時ごろ(現在の現地時刻)に発生したという結論が得られている。100 kmにわたって震源断層面のすべり破壊、平均14 mのすべり量で、M9.0あったと推定されている。

シアトルとカナダのバンクーバーを結ぶ沿岸では、地層のボーリング調査によって津波堆積物を含む砂層が確認された。それから平均して500年に1度の割合で、大津波が起こっていることがわかった。これから起こる巨大地震の候補の一つが、このカスケーディアの地域に起こるであろうと考えられている。

地震計による観測が行われるようになって最大の地震は、1960年のチリ地震で、M9.5であった。この地震による津波で、チリの海岸で1,000名以上の死者があり、15時間後にハワイで死者60名、地震から約23時間後には日本の太平洋岸に津波が到達し、死者および行方不明者142名という被害を出した。女川駅には、そのときの水位を示す青い線が駅のプラットホームからの階段にあったが、今回の巨大地震でその駅も基礎を残すだけとなった。

産業技術総合研究所では、2005年にチリ中南部沿岸の湿地でトレンチ調査を行い、過去約2000年間の堆積物から、チリ沖の巨大地震がほぼ300年間隔で起こったという証拠を見つけた。

ハワイ諸島には、環太平洋の各地の地震による津波が来襲してたびたび被害が出た。アメリカ合衆国は1949年に地震警戒センターをハワイに設置した。その名称を、Pacific Tsunami Warning Centerとして、Tsunamiという言葉が英語になり、やがて学術用語として国際化した。

2004年12月26日、インドネシアの現地時刻7時58分50秒、スマトラ島北西沖160 kmから震源断層面の破壊が北方へ走り、M9.3の巨大地震が発生した。スマトラ島北部では最大34 mの津波高が観測された。

(2011年8月15日 記)

著者紹介

尾池和夫(おいけ・かずお)

本誌, 53[10], p.13(2011)参照.

原子力損害賠償紛争審査会について 中間指針策定の作業と今後の課題

一橋大学 高橋 滋

福島原発事故は、農林水産業等に多大な被害を与え、避難等に伴う損害を周辺住民に与えた。この事態に対し、原子力損害賠償紛争審査会が設置され、8月5日に、東京電力が被害者に賠償金を払う際の基準となる包括的な指針を策定した。本稿は、原子力損害賠償の特有の仕組みを解説し、指針の内容を概説する。ただし、重要なことは、一企業に負担できない賠償金支払いのスキームを確立し、被害の拡大防止・復興に向け、国が迅速に施策を実施することである。

I. はじめに

本稿においては、福島第一原発・第二原発事故に対応するため設置された原子力損害賠償紛争審査会における指針策定の作業につき、解説を加えるものである。そこで、まず、今回の指針策定の根拠法である「原子力損害の賠償に関する法律」(昭和36年法147号。以下、「原賠法」という)の概要を紹介する。その上で、本年4月の設置からの指針策定作業と指針の内容とについて、紹介を行う。もっとも、これまで公表された指針は、福島第一原発事故が収束してない中で策定された暫定的なものであり、今後の事故の収束の方向性によっては、新たな指針が策定される可能性があるものであることを、あらかじめお断りしておく。

II. 原子力損害賠償制度の概要

1. 原賠法の制定とその概要

原賠法は、「原子力損害賠償補償契約に関する法律」(昭和36年法第148号。以下、「原賠補償契約法」という)とともに、昭和36(1961)年に制定された。最初の商業用発電所である日本原子力発電(株)東海発電所が着工したのは、昭和34(1959)年のことであり、原賠法の基本的なスキームに関する原子力委員会原子力災害補償専門部会の答申が公表されたのも昭和34年のことである。

当時の文献を一読すれば、原子力施設の運転に内在するリスクの大きさを十分に立法関係者は理解していたことがわかる^{1,2)}。そして、当時は、わが国において、商業用原子力発電が現実のものとして視野に入ってきた時期

であり、その中で、事故の際の原子力事業者の責任のあり方、損害への対処について明確にしておくことが不可欠であるとの見地から、原賠法が制定された。

このような原賠法の特徴は、以下の諸点にある。

第1は、事業者の無過失責任である。民法709条に代表されるように、わが国の不法行為法は過失責任主義を採用した。これに対し、原賠法は、「危険性を内在する施設を操業、運転し、事業を展開する者は、その危険性に基づく利益を享受する反面、危険性・リスクが顕在化したことよって生じた損害については、加重された責任としての無過失責任を負うべきである」とする危険責任の法理を採用した(後の立法例として、大気汚染防止法(昭和43年法第97号)25条、水質汚濁防止法(昭和45年法第138号)19条等がある)。

ちなみに、わが国において、無過失責任規定が設けられたのは、昭和14(1939)年の旧鉱業法の改正が始めてのことであったが、その後、立法例はしばらく途絶え³⁾、原賠法の規定(3条1項)は、実質的に鉱業法に続くものであった⁴⁾。ただし、不法行為法の立法管轄権が州にあるために連邦法に明文化できなかった米国を除き、英国、西ドイツ等の立法は、原子力事業のリスクの大きさに鑑み、無過失責任主義を採用していたから、国際的には特異なものではなかった⁵⁾。

もっとも、原賠法は、あらゆる場合に原子力事業者が無過失で賠償責任をもつ、とは規定していない。今回の事故においても、議論となったように、原賠法は、「損害が異常に巨大な天災地変又は社会的動乱によって生じたものであるとき」には原子力事業者の責任を免除している(原賠法3条1項但書)。

原賠法の第2の特徴は、原子力損害の発生に備えて、損害賠償が確実に行われることを保障する手段＝「損害賠償措置」の仕組みを設けていることである。すなわち、原賠法によれば、原子力事業者は、原子力損害を賠償す

On the Committee for Disputes Solution on the Atomic Damages in Japan—The Legal Scheme and the Guideline-making about the Damages from the Accident of Fukushima 1. Atomic Power Stations: Shigeru Takahashi.

(2011年 8月1日 受理)

るための措置＝損害賠償措置を講じていなければ、原子炉の運転等をしてはならない(6条)。原賠法の求める損害賠償措置の内容は、①一工場若しくは一事業所当たり1,200億円(当初は、50億円)を対象とする原子力損害賠償責任保険契約(保険会社を相手とする契約)、及び原子力損害賠償補償契約(政府を相手とする契約)を原子力事業者が締結するか、②同額を供託するかのいずれかである。

ただし、原子力事業者の経営的観点からは、①を選択することが合理的であろう。そこで、わが国においては、まず、原子力事業者と保険会社との間の責任保険契約を引き受けるため、昭和35(1960)年に、民間保険会社の共同によって日本原子力保険プールが設立された。

もっとも、民間の保険契約の性質上、①地震、津波等の天災に起因する損害は填補の対象とならず、②正常運転により発生する損害も除外される。さらに、③事故後10年間に発生する損害を対象が限定され、それを超えて不法行為法の除斥期間である事故後20年にいたるまでの損害は対象とならない。このように、民間保険の填補の範囲が限定されている点に鑑み、原賠法は、責任保険契約その他の措置によっては填補されない損害の支払いにより原子力事業者に生ずる損失を政府が填補することを約し、原子力事業者が所定の補償料を納付することを内容とする、原子力損害賠償補償契約を、原子力事業者が政府と締結することを求めた。

ちなみに、この原子力損害賠償補償契約の仕組みについての詳細は、原賠法と同時に成立した「原賠補償契約法」(前出)に規律されている。

このように、原賠法は、無過失責任に基づく損害の賠償を確実なものとするための措置をとることを原子力事業者に求めているが、その措置によってカバーされる範囲を超えて損害が拡大した場合についても、事業者の責任は免除されないとの立場をとっている(無限責任主義)。この点が、原賠法の第3の特色であり、かつ、国際的に見た場合にわが国に独自のものである。

すなわち、他の国では、国家補償の額を含めて責任を制限し、あるいはわが国という損害賠償措置の範囲を事業者の責任範囲とし、それを超える損害については国が補償することを明示するのが通例であった⁶⁾。

これに対し、わが国の原賠法は、原子力事業者に無限責任を負わせながらも、まず、損害賠償措置の範囲、さらには、原子力事業者の責任財産を超える損害が発生した場合について、原子力事業者に対して「原子力事業者が損害を賠償するために必要な援助を行う」ものとし(原賠法16条)、また、巨大な天災地変又は社会的動乱によって原子力損害が発生したため原子力事業者が免責される場合(前記の原賠法3条1項但書のケース)について、「被害者の救助及び被害の拡大の防止のため必要な措置を講ずるようにする」(原賠法17条)と規定するにとどまる。

ちなみに、原賠法の制定時には、同法の基本的枠組みのあり方について調査・審議するため、原子力委員会(当時)に原子力災害補償専門部会が設置されたが、その答申においては、無限責任主義を採用するに際しても、被害者との関係においては国が補償を行い、原子力事業者と国の関係においては、賠償の範囲・事故の性格等に応じて国の求償権を規定する、との構想が提案されていた。

そこで、原賠法が、原子力事業者の責任を限定せず、原子力事業者の支払能力を超えた損害が発生した場合について、国が必要な援助を行うとするにとどめた点は、立法当時、多くの関係者から疑問が寄せられた⁷⁾。

原賠法の第4の特色は、責任集中原則である。原賠法は、原子力事業者以外の者は、損害賠償の責任を負わないとしている(原賠法4条1項)。この原則が採用された背景には、①賠償責任を負う者を原子力事業者に限定することで、被害者が賠償を求める際の便宜を図る狙いがあったと同時に、②賠償責任保険を填補する原子力保険者への配慮もあった、と説明されている⁸⁾。

最後に、原賠法は、以上の特色をもった仕組みを設けた上で、原子力損害が現実に生じた際に生ずる紛争について、和解の仲介を行う組織として、原子力損害賠償紛争審査会(以下、「紛争審査会」という)を設置した(18条)。これが、本稿の対象の紛争審査会である。

2. 原賠法の改正—JCO 臨界事故等

原賠法は、現在まで数次の改正を受けている。ここでは、現在の制度の骨格を理解する上で必要と思われる改正についてのみ、触れることにしたい。

原賠法及び原賠補償契約法の中で、損害賠償補償契約の締結及び国の援助に関する部分は、10年の時限的措置であった。そこで、昭和46(1971)年(同年法第53号)、昭和54年(同年法第44号)、平成元(1989)年(同年法第21号)、平成11(1999)年(同年法第37号)に、時限措置を延長し、損害賠償措置額を60億円、100億円、300億円、600億円に引き上げる等の措置が取られている。

原子力事故による損害賠償が法的に問題となった例としては、まず、昭和56(1981)年に敦賀原子力発電所で起きた放射性物質漏出事故がある。もっとも、この事故については、風評被害の範囲をめぐって裁判となった事例⁹⁾はあったものの、和解・調停によって解決がされ、原子力損害賠償紛争審査会の設置にはいたらなかった。

これに対し、平成11(1999)年9月30日に起きた東海村JCO 臨界事故は、従業員2名が死亡し、中性子線による被ばくのおそれから周辺住民に避難・退避の要請が行政によって行われる等、国際原子力事象評価尺度(INES)でレベル4に位置づけられるものであった。

そのため、科学技術庁は、原賠法に基づく紛争審査会(以下、福島原発事故に伴って設置された審査会と区別

する場合には、「第一次審査会」というを同年10月に設置して紛争処理に当たさせた。それとともに、同審査会が紛争を処理するに際しても、損害の認定と損害賠償についての基本的な考え方が明らかにされている必要があるとして、「原子力損害調査研究会」(会長・下山俊次科学技術庁参与)が設置され、同研究会は、平成12(2000)年3月に、「(株)ジェー・シー・オー東海事業所核燃料加工施設臨界事故に係る原子力損害調査研究報告書」を公表している¹⁰⁾。この報告書は、検査費用、避難費用、財物汚染、休業損害・営業損害、精神的損害等を含め、多角的な議論を行ったものであり¹¹⁾、これらは、今回の指針の策定活動の際にも参考とされている。

ちなみに、JCO 臨界事故は、原子力損害賠償の法制度についても見直しがされる契機となった。同事故を踏まえた改正は、時限措置の延長期間が到来した平成21(2009)年に行われた(同年法第19号)。改正の内容は、①時限措置をさらに10年延長すること、②賠償措置額を1,200億円に引き上げるとともに、③紛争の自主的な解決の促進のための賠償の参考となる指針を策定する事項を新たに紛争審査会の責務としたこと(原賠法18条1項・2項の改正)、④補償契約に係る業務の一部を損害保険会社に委託できる旨の規定を置いたことである(原賠補償契約法18条)等である¹²⁾。

このような改正がなされる中、不幸にして、東日本大震災に連動して福島原発事故が生じ、JCO 事故の紛争処理の集結後に設置が解かれていた紛争審査会が再設置されることとなった(以下、第一次審査会と区別して用いる場合には、「第二次審査会」という)。

Ⅲ. 福島原発事故と審査会の活動

1. 審査会の設置

平成23年3月11日の福島第一原発事故の発生とその後の事故の拡大の結果、同日、原子力災害対策特別措置法に基づき、内閣総理大臣が施設の半径3 km 圏内からの避難の指示を発出し、翌日には半径10 km 圏内、さらには半径20 km 圏内へと避難指示の対象が拡大された。さらに、3月15日には、半径20 km 以上30 km 圏内の住民に対して屋内退避の指示が追加された。また、福島第二原発についても、3月12日以降、10 km 圏内の地域に避難指示が出された(この避難指示は、4月21日以降は半径8 km 圏内に対象は縮小されているものの、平成23(2011)年7月末時点においては解除されていない)。

このように、事故の発生・拡大に伴い、施設周辺に居住し生活する住民に、避難、避難生活に伴う出費、生産・営業の中断や就労機会の喪失等の損害が発生し、かつ、その額が巨大なものとなることは、事故の直後に誰の目にも明らかとなった。かつ、十分な準備の余裕もなく避難等を余儀なくされた住民、生産・営業の中断等に伴う損害を受けた事業者等に対し、迅速に救済措置を実施す

ることは急務であった。

そこで、原賠法を所管する文部科学省は、事故発生後の早い時点で紛争審査会を設置する方針を固め、4月15日、第二次審査会の第1回会合が開催された。委員は、第一次審査会の会長を務めた能見義久学習院大学教授(会長)、大塚直早稲田大学教授、鎌田薫早稲田大学総長、野村豊弘学習大学教授等の民事法の専門家のほか、田中俊一高度情報科学技術研究機構会長、草間朋子大分県立看護科学大学長等の放射線医学等の専門家が加わり、行政法の分野からは筆者が参加した¹³⁾。

2. 紛争審査会の指針策定権限

上述のように、事故の直後から、放射線被ばくを回避し、不測の事故の拡大に伴って被害が発生する事態を回避する目的をもって、法令に基づく内閣総理大臣の避難等の指示がされた。これにより、多くの住民が住み慣れた住居・職場を離れ、避難所等における不便な生活を強いられる状態が生じた。これに加え、避難対象地域における生産活動、農業・食品加工業、運輸・観光業等、地域の経済活動にも甚大な被害が発生した。

そこで、委員会は、平成21(2009)年の法改正により、委員会の任務とされた指針策定の権限を行使し、多数の被害者に対して東京電力からの賠償の支払いが、迅速、かつ公平・適切に行われることを確保する作業を重点的に進めることとなった。

すなわち、平成21年(2009)年改正後の、原賠法18条2項2号は、「原子力損害の賠償に関する紛争について原子力損害の範囲の判定の指針その他の当該紛争の当事者による自主的な解決に資する一般的な指針を定めること」を紛争審査会の任務として規定している。

もともと、上記条項に基づき紛争審査会が策定する指針は、行政法上は、紛争審査会が「原子力損害の賠償に関する紛争について和解の仲介」(原賠法18条2項1号)を行う際の内部基準である。また、当事者の交渉において、事案に応じた柔軟な解説がされることも予定されている。したがって、指針には法的な拘束力が与えられておらず¹³⁾、民事法上も、損害賠償請求権の存否及びその範囲に関する裁判所の判断を直接拘束するものではない。

しかしながら、原賠法は、仲介の基準を示すことによって、今回の事故のように、民事の不法行為では例を見ないほどに多数の当事者にわたる多様な損害が、迅速かつ適切な形で解決されることを期待している。加えて、原子力損害に関連する多分野の専門家によって構成された合議体である紛争審査会が必要な調査権限を行使した結果として指針を策定するのであるから、それは、民事裁判においてもある程度の意味をもつものとなる。すなわ

¹³⁾他の委員は、中島肇桐蔭横浜大学教授、山下俊一長崎大学教授、米倉義晴放射線医学総合研究所理事長である(当初)

ち、賠償されるべき範囲にあるものとしてある損害が指針において認定されるならば、紛争が裁判に持ち込まれた際にも、当該損害が賠償の範囲になるとの被害者側(原告)の主張・立証の負担は大幅な軽減されることにつながる(通常不法行為訴訟では、原則、被害者側に不法行為要件該当性に関する主張・立証責任がある)。

他方、紛争審査会の指針は、その性格上、個別の事案の特殊性までは視野においていないのであるから、指針に盛り込まれなかった種類の損害であっても、被害者側が損害賠償請求訴訟を裁判所に提起することは妨げられない。その場合、裁判所は、当該損害が賠償の対象となるか否かを、通常不法行為訴訟のルールに従って、個々に判断することになる。

3. 第一次指針から中間指針まで

このような性格をもつ紛争審査会の指針であるが、指針の策定・公表は数次にわたることとなった。すなわち、事故が発生してから期間が経過したにもかかわらず、収束のめどは立たないため、避難生活を余儀なくされ、営業・生活の基盤を破壊された住民の被害に鑑みるならば、明確に損害に該当すると判断される種類のものは、可及的速やかに指針に盛り込み、迅速な支払いを東京電力に促すことが求められた^{b)}。

そこで、紛争審査会は、設置されてから約半月後の4月28日には、①「政府による避難等の指示に係る損害」、②「政府による航行危険区域設定に係る損害」、③「政府等による出荷制限指示等に係る損害」の3類型について、賠償の基本的なルールを示す第一次指針を策定し公表した。

まず、①については、4月28日までに、原子力災害対策特別措置法に基づいて、「避難区域」についての指示のほか、「屋内待避区域」^{c)}、「計画的避難区域」^{d)}、「緊急時避難準備区域」^{e)}の指定が出されていた。これらの区域については、その区域指定の趣旨に従って、避難等の行動が住民に求められることから、(a)検査(人)の費用、(b)避難費用、(c)生命・身体等の損害(受傷、健康状態の悪化、悪化を防ぐための追加的支出等)、(d)精神的損害、(e)営業損害、(f)就労不能に伴う損害、(g)検査(物)の費用、(h)財物価値の喪失又は減少等が、救済されるべき損害として認定された。

また、②は、海上保安庁により福島第一原子力発電所を中心とする半径30 kmに設定された円内海域であり、漁業者の被害のほか、内航海運業者・旅客船事業者が迂回して航行したことによる被害、事業者の経営悪化に伴う就労不能による損害等が認定された。

さらに、福島第一原子力発電所で周辺に放射性物質が広く拡散したこと、農産物の被害が発生し、これをどの範囲まで救済すべきかが重要な検討課題となった。特に、消費者心理に伴う買控え等、「風評被害」に関する

救済のあり方も議論となったが、この点は議論を先送りし、第一次指針の段階においては、「政府等による出荷制限指示等に係る損害」について、当面、迅速に救済が図られるべき損害として認定がされた。

このように、第一次指針においては、確実に損害と認定できるものについて、迅速な賠償がされることを確保する見地から、類型化がされた。そのため、精神的損害についての具体的な賠償のあり方、農産物を中心とした風評被害に対する賠償のあり方については、以降の指針策定作業の課題とされた。

そこで、紛争審査委員会は、第一次指針策定から1月後の5月31日に第二次指針を公表した。第二次指針においては、第一次指針の策定時に議論が集中した、精神的損害についての具体的な賠償のあり方、農産物を中心とした風評被害の賠償のあり方が取り上げられた。

まず、農産物を中心とした風評被害の賠償については、「消費者又は取引先が、商品又はサービスについて、本件事故による放射性廃棄物による汚染の危険性を懸念し、敬遠したくなる心理が、平均的・一般的な人を基準として合理性を有していると認められる場合」には、本件事故と相当因果関係がある損害として賠償の対象となること^{f)}が確認された。その上で、具体的基準として、農林水産物、畜産物、水産物のそれぞれについて、政府の出荷制限指示等が出されたことがある区域(県又は市町村単位)において算出された産物については、買控え等を懸念して出荷、作付け等を断念したことによる被害を含めて、賠償の対象となるとの基準が示された(葉物野菜について県単位で出荷制限措置がとられた場合には、当該県全体で算出された農産物の被害が賠償の対象となる)。農林水産物の場合、消費者が摂取に伴う内部被ばくをおそれることはやむを得ないこと、かつ、日常生活に不可欠なものであって震災による消費マインドの影響等を受けにくいものであるから、その売上減は、

^{b)}東京電力も避難住民に対し仮払いを実施したが、指針とは異なる基準が用いられた。もっとも、指針策定後は、当該損害の一部仮払いの性格を有することになる。

^{c)}ちなみに、屋内待避区域については、3月25日、枝野官房長官により、住民の生活維持困難を理由として自主待避の促進等が公表され、また、4月22日の計画的避難区域、緊急時避難準備区域の指定がされたことにより、同区域の指定は解除された。

^{d)}計画的避難区域とは、福島第一原発発電所から半径20 km以遠の周辺地域のうち、事故発生から1年の間に積算線量が20ミリシーベルトに達するおそれがある区域であり、1か月を目途に計画的に避難すべきものとされた。

^{e)}緊急時避難準備区域とは、福島第一原子力発電所の半径20 km以上30 km圏内の計画的避難区域に該当しない区域のうち、常時、緊急時に屋内待避や避難が可能となるよう、準備をすることが求められる区域であって、当該区域には子供、妊婦等が立ち入らないことが求められる。

^{f)}この判断は、敦賀原発廃液漏出事故をめぐる名古屋高裁金沢支部平成元年5月17日判決判時1322号99頁の判示等を参考として、紛争審査会が具体化した基準である。

合理的な消費者の行動の結果と判定できること、が重視された結果である。

また、避難生活を余儀なくされたことに伴う精神的な損害については、救済の対象とし、評価困難な雑多の不利益と合算する形で、一律の基準をもって措置すべきであるとの方向で、議論は集約された。ただし、額までは合意にいたらなかったものの、1)避難所・体育館等、2)アパート、借家等、3)ホテル・旅館等との間では、生活の不便さに差があり、さらに、屋内退避に伴う生活上の制約は避難生活のそれとは区別されるべきである、との議論の方向性が示された。

もっとも、この点については、避難者への迅速な救済を重視して、この問題に関し特に策定された第二次指針追補(6月20日公表)において、一定の修正がされた。すなわち、1)食料品の支給の可能性を踏まえるならば、避難所・体育館等が格段に生活上の不便があるとは認定できないこと、2)精神的苦痛について金額で差をつけることは適当ではない、との意見があったこと等を踏まえ、避難所については、一定の額の上乗せは行うものの、避難に伴う慰謝料について、基本的に定額を支払う、との方針に変更された。具体的には、事故発生時から6か月については、避難性格を余儀なくされている方には、一人10万円(避難所のみ12万円)、その後の6か月については、同様に5万円を払うものとされた(警戒区域等の解除があった場合には見直しがされる)⁹⁾。さらに、「その後の支払いの在り方については、事故の収束状況等諸般の事情を踏まえ、改めて算定方法を検討する」との方針が示されている。

なお、第二次指針においては、そのほかにも、警戒区域に立入りが認められるようになったことから生ずる一時立入りの費用、屋内退避措置の解除に伴う帰宅の費用等について、新たな損害類型として認定している。

4. 中間指針の策定・公表

ちなみに、紛争審査会の発足の当初から、政府指示等に伴う避難の状況は別として、農林水産業の売れ行き減少等の被害、観光業・輸出産業等の被害、営業損害等の詳細については実情が不明なことも多く、これらの損害に関する指針の策定に際しては、実情の把握が不十分できることが意識されていた。そこで、第二次指針の策定に先立って、5月16日の第4回委員会以降、各分野の被害等の実態調査に携わる専門委員が多数任免され、その最終的な調査結果は、7月14日の第10回紛争審査会に提出された。

これらの成果を踏まえ、紛争審査会は、第二次指針追補の公表後から、東京電力から被害者に対して当面支払われる損害賠償金についての全体的な指針の策定に向けての作業に着手した。もっとも、この間、1)茶葉から有意な放射性セシウムの量が発見され、6月初旬から茶

の出荷制限が広い範囲でなされる、2)新たに「特定避難勧奨地点」¹⁰⁾に関する指示が出される(6月16日)、牛肉の放射性セシウム汚染の問題が生ずる(7月以降)等、賠償対象となる損害の認定上、検討を必要とする事態が次々と生じ、中間指針においては、新たな類型の損害が認定されることとなった。

そして、最後に問題となったのは、特定された販売先が被害にあった結果として営業損害が発生した等の「間接損害」への賠償のあり方のほか、1)外国政府等による食料品の輸入拒否、2)外国人観光客の減少等、3)地方公共団体の被害等であった。最終的には、まず、1)については、外国輸出の特性に鑑み、既に輸出先に輸出され、生産・製造されていたものが拒否された場合に、廃棄・転売等に関する費用を賠償することとされた。また、2)は、5月末までの一定率以上の解約について損害として認める、3)は、財産的な損害、民間と同様の事業を展開しているものについて損害が生じた場合は損害を認めるものの、税収の見込み減少等、公権力の行使として特有な収入については、特段の事情がない限り、損害と認めない、という方向で合意がされた。その結果、中間指針は、8月5日の第13回紛争審査会で確定・公表されている(なお、政府等の指示に基づかず自主的に避難した住民についての賠償のあり方については、議論が整理され次第、指針に追加し公表されることとなっている)。

IV. おわりに

1. 天災・津波条項の不適用

既に見たように、原賠法3条1項但書は、天災があった場合については、原子力事業者の責任を免責する。

東京電力はこの条項の適用については見解を保留しているようであるが、審査会に対し、東京電力は少なくとも正式には免責の主張を行わなかった。また、上記条項の解釈としても、国会審議においては、「人類の予想していないような大きなもの」「超不可抗力」に類する事態が想定されていた¹⁴⁾ため、今回のような事態は該当しない、というのが委員の共通の認識であった。

かつ、これは私見であるが、869年の貞観地震につい

⁹⁾ 避難所の方への損害賠償は、1)負傷はないが、行動の制約を含め、生活上の不便を受けていること、2)地域共同体を含め生活基盤が崩壊し、自宅から離れた生活を強いられ、かつ、いつ帰宅できるかできない状況におかれている点に鑑み、自動車損害賠償責任保険の慰謝料(月額12万6000円)を参考にして決定された。屋内退避の慰謝料は一人5万円とされているが、これは、制限があっても、自宅に居住し一定の行動の自由もあったからである。

¹⁰⁾ 特定避難勧奨地点とは、計画的避難区域及び警戒区域以外の場所であって、事故発生から1年間の積算線量が20ミリシーベルトを超えると推定される空間線量率が続いていることから、住居単位で、住民に注意喚起、自主避難の支援・促進を行うこととした区域である。

での知見が文献のみならず、各種の地質データに基づいて収集され、それが約1000年周期と認識されていたことからすれば、今回の地震が、「人類の予想していない」「超不可抗力に類する」ものではないことは、自明であろう。立法当時、免責の基準を示した「関東大震災の3倍程度を超えるもの」という閣僚等の国会発言も引用される¹⁵⁾が、それは、その後の地震のメカニズムの解明、耐震技術の発展からは今回には妥当しない。

2. 今後の課題

既に述べたように、暫定的なものであるが、福島第一原発・福島第二原発の事故に起因する損害について、類型化が可能なものについては、指針の性格上可能な限り幅広く盛り込んだ中間指針が策定された。

そこで、今後は、損害賠償者である東京電力が指針に従って賠償を進めることになるが、当然のことではあるが、指針は抽象的なものであり、その適用をめぐる多数の紛争が生ずることが予想される。

そこで、7月22日、「原子力損害賠償紛争審査会の組織等に関する政令」(昭和54年令281号)が改正され、紛争の和解の仲介の手續に参与する「特別委員」が置かれることとなった(同令4条1号)。今後は、委員・特別委員による紛争の仲介が始まることになろう。

ただし、紛争審査会が認定した損害は広く、その額は巨大である。それは、日本を代表するものの、民間企業である東京電力の資力を超える。その意味において、立法時に批判のあった「(政府が)原子力事業者が損害を賠償するために必要な援助を行う」(原賠法16条)としたことの内実が、今、問われている。

この点、7月28日、政府提出の「原子力損害賠償支機構法」が修正・可決され、参議院の議員立法である「平成23年原子力事故による被害に係る緊急措置に関する法律」(原発損害仮払い法)が成立した。これまで、支払いのスキームが不確定のため、東京電力の支払いが遅れたとの批判があったが、これで、賠償金の支払いが迅速に行われる基盤が確保されたことになる。

ただ、最終的な財源負担のあり方は不明であるし、一部の論者は、「東京電力が第一義的な責任を負う」との建前の下で、損害拡大の的確な防止、積極的な救済策の実施が遅れた、と批判している¹⁶⁾。この批判が正鵠を射たものであるかについて後世の評価に委ねざるを得ないが、今後、一民間企業に任せることなく、積極的な被害者救済、地域の迅速な復興に政府が努力されることを切に願うものである。

— 参考資料 —

- 1) 我妻栄, “原子力2法の構想と問題点”, ジュリスト, **236**, 6~10(1961). 他に, 下山俊次「原子力」, 山本草二ほか, 『未来社会と法』, 筑摩書房, 415-560(1976)がある。

- 2) 我妻栄, 鈴木竹雄, 加藤一郎, 他, “座談会 原子力災害補償をめぐる”, ジュリスト, **236**, 11~28(1961).
 - 3) 吉田文和, 利根川治夫, “鈹害賠償規定の成立過程: 鈹業法改正調査委員会議事録及び第74回帝国議会議事録の検討を中心に”, 北海道大学経済学研究, **28**[3], 73-162(1978). この規定は, 現行鈹業法(昭和25年法第289号)109条へと引き継がれている。
 - 4) 昭和33(1958)年, 水洗炭業に関する法律(同年法第134号)16条1項において無過失責任規定が導入されている。この規定については, “法令の話題: 鈹業法109条”, 時の法令, **758**, 13-16(1971).
 - 5) 竹内昭夫, “原子力損害2法の概要”, ジュリスト, **236**, 31(1961).
 - 6) 星野英一, “原子力損害賠償に関する二つの条約案”, 法学協会雑誌, **79**[1], 81-94(1962); 竹内昭夫, 前掲文献5), 34.
 - 7) 我妻栄, 鈴木竹雄, 加藤一郎, 他, 前掲文献2), 16-20.
 - 8) 下山俊次, 前掲文献1), 539. 責任集中原則の意義は被害者救済にあるが, 原子力施設の設備や機器の製造者・供給者, 核燃料等の製造者・供給者, 運転従事者等に責任が分散し, 保険が複雑化することを防ぐ意味もある。
 - 9) 名古屋高金沢支判平成元年5月17日判時1322号99頁。
 - 10) 大塚直, “東海村臨界事故と損害賠償”, ジュリスト, **1186**, 36-43(2000).
 - 11) 森島昭夫, 石橋忠雄, 大塚直, 下山俊次, 高橋滋, “座談会・原子力行政の現状と課題—東海村臨界事故1年を契機として”, ジュリスト, **1186**, 14-20(2000).
 - 12) “法律解説: 原子力損害の賠償に関する法律及び原子力損害賠償補償契約に関する法律の一部を改正する法律”, 法令解説資料総覧, **333**, 35-38(2009).
 - 13) “法令解説”, 前掲文献12), 37.
 - 14) “田中武夫委員の質問に対する我妻栄参考人の陳述”, 第38回国会衆議院科学技術振興対策特別委員会議録, **14**, 5(1961).
 - 15) 森島昭夫, “政府には原子力被害救済の責任がある”, 中央公論, **126**[7], 140-141(2011).
 - 16) 森島, 前掲文献15), 134-138.
- 【追記】 脱稿後, 次の文献に接した。
- 野村豊弘, “原子力事故による損害賠償の仕組みと福島第一原発事故”, ジュリスト, **1427**, 118-124;
- 大塚直, “原発の損害賠償”, 法学教室, **372**, 27-28.

著者紹介



高橋 滋(たかはし・しげる)

昭和61(1986)年一橋大学大学院法学研究科博士後期課程満期退学。徳島大学総合科学部専任講師・同助教授, 一橋大学法学部助教授を経て, 平成7(1995)年一橋大学法学部教授。現在, 一橋大学大学院法学研究科教授/同・国際・公共政策大学院長。公害等調整委員会委員, 原子力損害賠償紛争審査会委員, 原子力安全委員会専門委員(特定放射性廃棄物処分安全調査会長)。

シビアアクシデント対策整備の経緯と「残余のリスク」

東京都市大学 平野 光將

福島第一原子力発電所の重大事故に至った直接的経緯、原因、さらにその根本原因などは、今後の畑村委員会の検証に委ねられているが、津波に対する対策が不十分であったことは明白である。今回の未曾有の重大事故を踏まえ、安全設計指針等の改訂やシビアアクシデント(SA)対策の規制要件化が検討されているが、今まで行政指導により民間自主保安として実施されてきたSA対策の経緯、変遷を、SA対策の拡大、充実を目的とした耐震設計審査指針の「残余のリスク」の導入を含めて振り返り、そこから教訓を学び取り、今後の原子力施設の安全性向上の一助としたい。

はじめに

今回、福島第一原子力発電所の重大事故発生で甚大な被害をもたらされ、今なお事故の処理作業は収束していない。旧ソ連チェルノブイリ事故とは事故要因、影響が違ふとの声もあるが、住宅地、農地、牧場などを追われ避難を余儀なくされた方々が多数おられ、また遠く離れた地域でも農作物、畜産物等に被害が生じており、原子力関係者の一人として衷心より反省している。未曾有の重大事故に至った直接的経緯、その理由、さらにその根本原因などは、今後の畑村委員会の検証に委ねられているが、津波に対する対策が不十分であったことは明白であり、「残余のリスク」を含めシビアアクシデント(SA)対策の整備に係わってきた立場から教訓を探る意味で稿を起す。

I. SA対策整備までの経緯

世界各国はTMI-2事故(1979年3月)やチェルノブイリ事故(1986年4月)などの教訓を踏まえて、原子炉施設の支配的なリスク要因である炉心が重大な損傷に至る事故(シビアアクシデント:SA)への対策を実施し、その発生防止と影響緩和により、リスクの抑制を検討してきた。

(1) 原子力安全委員会は、TMI-2事故の原因を調査検討し、①運転員の教育・訓練の強化、②事故時手順の見直し、③発電所緊急時対策所の設置、④計測機器の充実・強化などの教訓(52項目)を抽出し、我が国の原子力安全確保対策に反映させた。

(2) 国境を越えて放射能の影響を及ぼしたチェルノブイリ事故は、正のボイド反応度係数やポジティブスクラム効果といったRBMK型原子炉の設計上の欠陥、規則違反や運転計画からの逸脱などによるものであり、設備面で西欧型軽水炉に直ちに反映すべき教訓はないと判断されたが、安全文化という言葉が新たに生まれ、正しい操作の励行だけでなく、安全を優先する組織やプラント管理のあり方などの重要性が国際的に強調された。

(3) 原子力安全委員会は、SAへの拡大防止対策およびSAに至った場合の影響緩和対策が原子炉施設の安全性の一層の向上を図る上で重要であるとの認識にたち、共通問題懇談会を設置して、我が国が採るべきSA対策、SA研究、確率論的安全評価(PSA)実施などについて検討した。共通問題懇談会報告書は、「設計基準事象に対応した安全確保活動を通じて原子炉施設の安全は十分確保され、原子炉施設による周辺公衆に対する放射線被ばくのリスクは十分低くなっているとした上で、万一、原子炉施設にSAに至るおそれのある事象、あるいはSAが発生した場合でも、PSAに基づいて抽出された適切なSA対策(アクシデントマネジメント:AM)が行われるものとすれば、SAに至る可能性はさらに減少し、あるいはSAによる公衆への影響を緩和できるため、リスクは一層小さいものとなる」としている¹⁾。

(4) この報告書を受けて、1992年5月に原子力安全委員会は、以下の趣旨の決定文を発出した²⁾。

1) 原子炉設置者は、原子炉施設の安全性の一層の向上を図るため、効果的なAMを自主的に整備し、万一の場合にこれを的確に実施できるようにすること。

The Circumstances of Severe Accident Measure Implementation and "the Residual Risk": Mitsumasa HIRANO.

(2011年 8月22日 受理)

- 2) 行政庁は、AMの促進、整備等に関する行政庁の役割を明確にするとともに、その具体的な検討を継続して進めること。
- 3) 当面の処置として、行政庁から以下の報告を受け検討する。
- ① 新設原子炉施設については、当該原子炉施設の燃料装荷前までに整備するAMの実施方針(設備上の具体策、手順書の整備、要員の教育訓練等)
 - ② 運転中または建設中の原子炉施設の今後のAMの実施方針
 - ③ 上記①および②で実施するPSA
- 4) 関係機関および原子炉設置者はSAに関する研究を継続することが必要。当委員会は、これらの成果の把握に努め所要の検討を行う。
- (5) 原子力安全委員会の決定を受けて、通商産業省は以下のように、電気事業者にSA対策を要請(1992年7月)するとともに、SA対策検討会を設置して専門家の意見を聴きつつ事業者のAMの妥当性を評価することとした³⁾。

1) PSAの実施とこれに基づくAMの整備

- ① レベル1 PSAおよびレベル2 PSAを実施し、各原子力発電所の特性の把握とAM候補の検討を1993年度末までに行う。また、格納容器ベンディングシステム、水素制御対策等の格納容器対策、運転手順書の整備、運転員の訓練等を含め、AMの技術的要件を検討する。
- ② 検討結果を踏まえ、計画的かつ速やかに必要なAMを整備する。
- ③ 定期安全レビュー(PSR)等において、上記AMについて定期的に評価する。

2) その他

- ① 電気事業者は、代表的な原子力発電所を対象に1年以内に停止時PSA(レベル1 PSA)を実施し、その結果を踏まえ、適切に対応する。
- ② 電気事業者は、引き続きPSA手法の精度を高めかつ、その範囲を拡大する研究を行うとともに、機器故障率等のデータベースを整備する。

自主保安であることから、国が電気事業者と調整した重要なポイントを幾つか述べる。

- a) 個別プラントに求めたレベル1 PSAおよびレベル2 PSAとは、内的事象の出力運転時のレベル1 PSAおよびレベル1.5 PSA(格納容器破損まで)であることが合意されているが、これは当時の我が国におけるPSA技術の整備状況も踏まえたものである。
- b) 当初は格納容器ベンディングシステム、水素制御対策等の格納容器対策は、PSAの結果にかかわらず設置を要請する案であったが、PSAによる有効性評価により決定することとなった。

- c) 停止時PSAも代表炉について実施し、必要なら適切に対応することを求め、さらに我が国の地震リスクが無視できないのとの認識に立ち、その範囲を拡大する研究という表現で、地震等外的事象PSAの研究・開発を求めた。

なお、上記(5)の1)③は事業者に求めたものであるが、国もフォローすることになる。(Ⅲ章PSR参照)

(6) その後の経緯

電気事業者は、1994年3月に、PSAの結果とそれから摘出されたAMの候補を通商産業省に報告した。通商産業省および原子力安全委員会がその妥当性を確認し、これ以後、電気事業者はおおむね2000年を目途に既設炉のAM整備に着手した。

電気事業者は、2002年5月にすべての既設炉に対するAM整備が終了したことを報告するとともに、2004年3月までに個別プラントPSAに基づくAM策の定量的有効性評価の結果を提出した。原子力安全・保安院(原子力安全基盤機構(JNES)が技術支援)および原子力安全委員会は、AM整備上の基本要件(2002年4月)に基づきレビューし妥当とした。

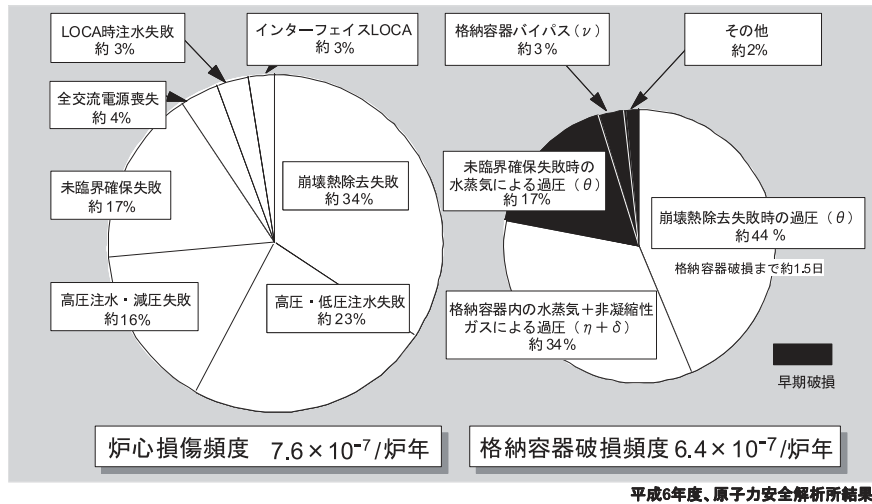
Ⅱ. 整備されたSA対策

AM策摘出の手順の例を第1, 2図に示す。

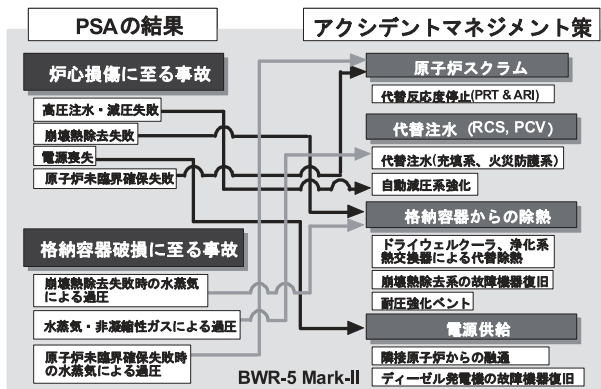
炉心損傷あるいは格納容器破損に至る事故シナリオを同定し、その原因となる主要な安全機能喪失を代替する設備および事故対応手順を整備しており、当時多くの国が実施していたSA対策と比較しても、最も系統的な手順といえる。

ここではAM策の具体的内容には言及しないが、第2図から見ると、内的事象を起因とする全交流電源喪失を対象に整備されたAM策は隣接原子炉からの融通、非常用ディーゼル発電機の故障機器復旧であり、1Fで大きな議論となっている代替注水や格納容器ベントによる徐熱が十分に実施できなかったことは、経緯からは納得できる。ただし、もともとAMは電気事業者の技術的知見に依拠する「知識ベース」の処置であり、状況に応じてその知見を駆使して臨機にかつ柔軟に行われることが望まれるものである。前述のその範囲を拡大する研究とともに対応が望まれるところであった。

新設炉におけるAMの整備と国によるその妥当性のレビューはその後も継続しており、最近では、2010年に島根3号のレビューが実施された。それらの新設炉におけるSA対策は、基本的には1994年に提案されたものと同じであり、PSAで使用している機器故障率が原子力学会標準で整備された国内データに基づいていることを除いては、上記(4)の4)や(5)の2)で述べられた本来の主旨にあったSA研究の最新知見の反映や検討範囲の拡大はなされていない。



第1図 BWR5プラントのPSA結果例(内的事象, 出力時)



第2図 アクシデントマネジメント策の抽出

Ⅲ. 定期安全レビュー (PSR)

SA 対策の要請とはほぼ同時期の通商産業省の要請⁴⁾により、事業者の品質保証活動として、約10年間隔で最新の技術的知見に基づき、既設原子力発電所の安全性等を①運転経験の包括的な評価、②最新の技術的知見の反映状況の把握および必要な対策の立案、③PSAの実施とSA対策の有効性把握および必要な対策の立案の観点から、総合的に評価するPSRが開始された。

その結果は行政庁がPSR検討会を設置して専門家の意見を聴きつつ評価することとなっており、上記③の一部としてSA対策整備状況の評価も行っていた。実際、この評価では、例えば、現地調査ではSA対策設備の状態、運転員の教育訓練などの確認を行うことに加え、出力時PSAに基づき整備したSA対策を考慮した停止時PSA(2001年3月以降)を実施して待機除外設備構成管理手順の改善、そのための設備の追加などが行われた。さらに、次年度は火災PSAと仮合意、そしてその次は地震PSA?との議論がなされ、前記のその範囲を拡大する研究で表現したSA対策の拡大、強化も少しずつではあるが進んでいた。

東電不適切記載事件(いわゆるシラウド問題、2002年8月)をきっかけに、実用炉規制が改訂(2003年10月)され、PSRは保安規定の要求事項として法令上義務化されたが、上記③(PSA関連)は、法的要求事項とするには十分な技術的知見が得られていないとして、従前通り任意要求事項にとどめるとともに、行政庁の評価がなくなった。そのため、SA対策整備状況の定期的評価、SA対策の範囲の拡大の動きが実質的に停止した。

そこで、我が国の地震リスクに危惧をもつ専門家は、耐震設計審査指針改定において「残余のリスク」の概念を提案し、SA対策の充実、拡大を目指すこととした。

Ⅳ. 耐震設計指針改定の背景と経緯

旧耐震設計指針が策定された1981年以降、特に1995年の兵庫県南部地震に関する調査研究の成果等を通じて、断層の活動様式、地震動特性、構造物の耐震性等に関する貴重な知見が蓄積されていたが、一方、必ずしも事前に震源が特定されていない大地震が発生し、幾つかのサイトで旧耐震設計指針の想定を越す揺れを観測したことから、一般国民からは原子力発電所の耐震安全性について、より透明性の高い説明を求める声が高まっていた。

原子力安全委員会に設置された耐震設計指針検討分科会は、耐震安全性に関する国内外の動向を踏まえ、検討、審議すべき事項を23に分類して、基本WG(耐震安全性確保の基本的考え方)、施設WG(施設設計の方法)および地震・地震動WG(基準地震動の評価法)を設置して、それらの項目に関する最新知見を調査、整理した。各WGからの報告を受け、改定耐震設計指針(新耐震指針)は、5年数ヶ月の検討、審議を経て2004年9月19日に策定された。

Ⅴ. 新耐震指針の特徴と意義

旧指針と比較した新耐震指針の大きな特徴は、

- (1) 信頼性の高い地質・地盤調査を前提とし、基準地震動 S_s の策定においては、その策定過程に伴う不確かさを適切に考慮するとともに、超過確率を参照すること
- (2) S_s を超える地震動が生起する可能性は否定できないとし、 S_s を超える地震動による「残余のリスク」を認識し、それを合理的に実行可能な限り小さくすること

を求めたことといえる。

(1)の基準地震動 S_s 策定において、旧指針には明示されていない策定過程に伴う不確かさ(ばらつき)を適切に考慮することに加え、超過確率を参照することを求めたのは、「残余のリスク」の把握と低減に活用することを視野に入れて、策定された S_s の応答スペクトルがどの程度の超過確率に相当するかを把握することが望ましいとの観点からである。

また、(2)の「残余のリスク」の導入は、旧指針上の定義、表現はともかく、従来は限界地震に基づく基準地震動 S_2 を超える地震動はないがごとく説明、運用されてきたことを鑑みれば、SA 対策を求めた画期的な改訂といえる。

これは基本 WG の提起したリスク評価を取り入れた改訂耐震指針の枠組みが、多くの議論を経てほぼ認められたからであるが、以下にその考え方の概要を述べる。

1. 地震を起因とする事象の特徴

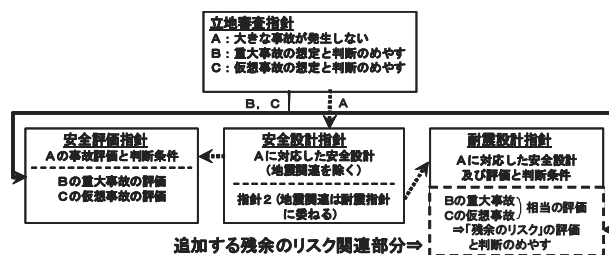
一般に原子炉施設の安全性は深層防護の原則に基づく確定論的な対策・評価によって達成されているが、地震を起因とする事象は、以下のような要因から機器故障や人的過誤等に起因する内的事象と異なる特徴を持つ。

- (1) 地震・地震動は自然現象で人間が制御できないこと
- (2) 兵庫県南部地震以降、著しい進歩を遂げた最新技術でも地震・地震動の規模、頻度、特性を精度よく(不確かさを小さく)推定することは難しいこと
- (3) 大きな地震動に対し重要な系統・機器・構造物が同時多発的に損傷し、多重防護が有効に機能しない可能性があること

2. 基本的枠組み

原子炉等規制法に「災害を防止し」とあり、これを実現するために既に各種の指針があるが、耐震指針の位置付けを第3図に示す。

- (1) 原子炉立地審査指針は、
A：原子炉は事故を起こさないように、設計、建設、運転および保守が行い得ること。
B：敷地周辺の事象、原子炉の特性、安全防護施設等を考慮し、技術的見地からみて、最悪の場合には起るかもしれないと考えられる重大な事故(以下「重大事故」という)の発生を仮定しても、周辺の公衆に放



第3図 耐震設計指針の位置づけ

射線障害を与えないこと。

C：さらに、重大事故を超えるような技術的見地からは起るとは考えられない事故(以下「仮想事故」という)(例えば、重大事故を想定する際には効果を期待した安全防護施設のうちのいくつかが動作しないと仮想し、それに相当する放射性物質の放散を仮想するもの)の発生を仮想しても、周辺の公衆に著しい放射線災害を与えないこと。

として、対象施設に対して、発生可能性(確率)の異なる3つの状態に対して、それぞれの状態がもたらす影響がある限度に限定することを求めている。

このBおよびCは、設計基準事象を超えSAを意識した規定であることは共通認識である。

(2) これに対して、安全設計指針は、このうちAの条件を担保するための安全設計を求めているが、指針2の第1項の解説において、具体的な耐震安全性確保については耐震設計指針に委ねている。すなわち、耐震設計指針に上記Aに対する設計対応を求めている。

(3) 一方、安全評価指針は、こうした設計(A)の妥当性を評価するための設計基準事象の安全評価の方法に加えて、B(重大事故)とC(仮想事故)に係る安全評価の方法を示しているが、その想定は明らかに内的事象に対するものであり、地震事象は想定されていない。

(4) したがって、耐震設計指針が妥当とする耐震安全性は、上に述べた原子炉立地審査指針などの指針が受け入れ可能としている「発生可能性(確率)と被害の関係」と整合的であるべきであり、そのことがわかる規定がなされているのが適切である。

この基本的枠組みについては多くの議論があったが、これが最終的には「残余のリスク」の導入となった。

3. 新耐震指針の安全機能維持の考え方

新耐震指針は、(1)不確かさを考慮した基準地震動 S_s を策定し、重要な系統・機器・構造物が安全機能を維持するよう設計することで、原子炉等規制法にある災害を起こさないことを求めている。また、その結果として、(2)必要な対策を実施することを含め「残余のリスク」を小さくすること求めている。「残余のリスク」は解説での規

定ではあるが、最高裁判例などでは安全確保に関してはしばしば解説も本文と同様な拘束力があるとされる。

「残余のリスク」が小さいことを確実にするため、確率的耐震安全評価(地震 PSA)などにより「残余のリスク」を把握することが必要である。

Ⅵ. 「残余のリスク」の取り扱い

1. 「残余のリスク」の定義と要件

「残余のリスク」は、基準地震動 S_s を上回る地震動の影響が施設に及ぶことにより、①施設の重大損傷事象が発生すること、②大量の放射性物質が放散する事象が発生すること、③それらの結果として周辺公衆に対して放射線被ばくによる災害を及ぼすことであると定義され、この「残余のリスク」の存在を十分認識しつつ、それを合理的に実行可能な限り小さくするための努力が払われるべきであるとしている。

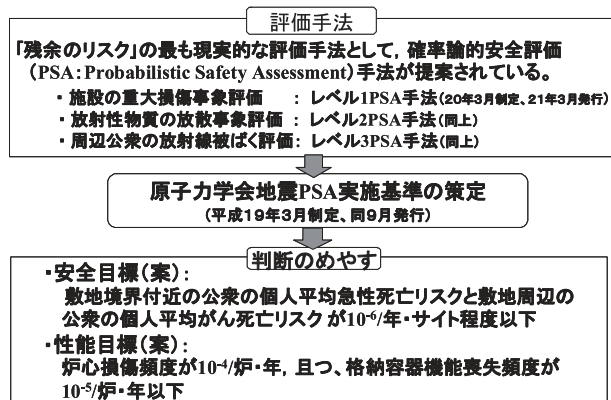
2. 「残余のリスク」の評価手法・判断指標

既に我が国の研究機関、規制支援機関および産業界で開発、整備され、実機プラントの解析にも用いられていた PSA 手法が、第 4 図に示すように、日本原子力学会において実施基準としてまとめられている。特に地震 PSA 実施基準は分科会でもその概要が何度か説明されているが、我が国が地震国であることを踏まえて、IAEA, NRC などからも世界でもっとも詳細な進んだ方法と評価されている。

また、判断の目安としては、原子力安全委員会が策定した安全目標(案)および性能目標(案)とすることが妥当である。ただし、近年の一層の原発リスクの低減の意識は世界的動向であり、性能目標の見直しは必要と考えられる。

3. 地震 PSA からの情報と「残余のリスク」低減

- (1) 評価条件、評価モデル、使用データ、評価結果を陽に明示するので透明性、説明性が高い。
- (2) 耐震安全上重要な次のような情報が得られ活用で



第 4 図 「残余のリスク」の評価手法・判断指標

きる。

- ・炉心損傷頻度(CDF)へ寄与する構造物・機器による耐震重要度分類の適正化
- ・地震動下で複数の機器が同時に損傷する共通原因損傷の把握
- ・CDFへ寄与するシステム、事故シーケンスの把握によるシステム冗長性、多重防護の有効性の把握
- ・炉心損傷や格納容器損傷などのクリフエッジに至る地震動の大きさの把握
- ・「残余のリスク」の安全目標/性能目標あるいは国際標準との比較

すなわち、CDFに寄与の大きい構築物、機器およびシステムに着目し、耐震安全性の一層の向上を図り「残余のリスク」を低減のためのプラント改造、SA対策を行うことができる。例えば、構造強化の観点では、タンクや配管のような静的機器の場合は支持構造物(基礎アンカーボルトや配管サポート等)の強化、またポンプや電気盤のような動的な機器の場合は制震、免震構造化による応答の低減を行う。

Ⅶ. 耐震バックチェック

- (1) 原子力安全委員会(平成18年9月19日)は、原子力施設の耐震安全性は、基本設計に加えて、詳細設計、それらに基づく建設段階を通じて、さらに地震時における適切な運転管理等が相まって確保されるとして、安全審査とは別に、「残余のリスク」を含む耐震安全性に関する評価について、行政庁から報告を受けるとの見解を示した。
- (2) 原子力安全・保安院は、耐震バックチェックを事業者へ指示(平成18年9月20日)した。
 - 第1段階(速やかに実施)
 - ・不確実さを考慮した S_s の策定と建屋・機器の安全性評価
 - ・不確実さを考慮した設計津波の策定と建屋・機器の安全性評価、斜面崩壊の評価等
 - 第2段階(準備の出来たところから)
 - ・地震 PSA 等を用いた「残余のリスク」の定量的評価

耐震バックチェックの第1段階の進捗状況を第1表に示す。

国からの要請に対し、電気事業者は当初3年を目処に実施するとの意向であったが、2005年7月に発生した中越沖地震により柏崎刈羽発電所建家で旧耐震指針の設計応答の2倍を超える加速度応答が観測されたこと等から、その原因分析から得られた新知見(地震動増幅や建屋床柔性等)の各サイト、プラントへの水平展開等に時間を要し大幅に遅れている。また、地震動に対する評価が優先され、福島第一サイトでも地震動に関連して貞観津波の議論などがなされたが、ほとんどの中間報告には

第1表 耐震バックチェックの審議状況

平成22年12月6日現在					
設置者名	施設名	審議状況	設置者名	施設名	審議状況
北海道電力	泊	△	関西電力	大飯(3, 4号機)	◎
東北電力	女川(1号機)	◎		高浜(3, 4号機)	◎
	東通	△	中国電力	島根(1, 2号機)	◎
東京電力	柏崎刈羽 (1,5,6,7号機)	◎ (最終報告)	四国電力	伊方(3号機)	◎
	福島第一(3号機)	◇	九州電力	玄海(3号機)	◎
	福島第一(5号機)	◎	九州電力	川内(1号機)	◎
	福島第二(4号機)	◎	日本原子力 発電	東海第二	○
中部電力	浜岡	△ (最終報告)		敦賀	△
北陸電力	志賀(2号機)	◎	原子力機構	もんじゅ	◎ (最終報告)
関西電力	美浜(1号機)	◎		再処理	△
			日本原燃	六ヶ所	◎ (最終報告)

◎: 原安委でも妥当と評価 ○: 保安院での審議を終え、現在原安委で審議中
 △: 現在、保安院で審議中 ◇: 保安院で特別な扱いとして審議を実施し妥当と評価
 ※最終報告以外は中間報告を審議、中間報告には津波に関する評価は含まれない。

津波に関する評価は含まれていない。また、第2段階の「残余のリスク」の評価に関する事業者の報告はなされていない。

その結果は予測し難いが、今回の福島第一発電所の深刻な事態を省みるに、耐震バックチェックの遅れは大変残念なことである。

おわりに

6月の日本国政府の報告書には、それまでに得られた事故の教訓28項目が記載されている⁵⁾。直接的にSA対策に関する教訓は第1の教訓のグループ：シビアアクシデント防止策の強化(8項目)および第2の教訓のグループ：シビアアクシデントへの対応策の強化(7項目)であるが、当然ほとんどがSA関連であり、今後、我が国で真摯に対応していかなければならない。

本稿では、事故の直接原因である、地震・津波対策と事故対応の基本である安全文化について触れる。

○教訓1：地震・津波への対策の強化

「地震は複数震源の連動による極めて大規模なものであったが、耐震設計では、考慮すべき活断層の活動時期の範囲を12～13万年以内とし、大きな地震の再来周期を適切に考慮していたので、安全上重要な設備、機器の地震による大きな損壊は確認されていない(更なる調査は必要。なお福島第一サイトの耐震バックチェックは終了していない)。津波設計では、過去の津波の伝承や確かな痕跡に基づいて想定した津波高さ(5.7m)を大幅に超える14～15mの規模であり、津波対策が不十分であった。

今後は、十分な再来周期を考慮した津波の発生頻度と高さを想定して設計用津波を策定し、敷地への浸水影響を防止する構築物等の安全設計を行う。さらに、設計用津波を上回る津波が施設に及ぶことによるリスク(残余のリスク)の存在を十分認識して、重要な安全機能を維持できる対策を講じる。」

との主旨が述べられている。

幾つかのサイトで旧耐震指針の設計用限界地震によりもたらされる基準地震動S2想定を越す揺れを観測したこと、また志賀2号機の運転差止め金沢地裁判決において、活断層の危険性の考慮が不十分で揺れの算定方法が妥当性を欠く、と指摘されたことなどから、耐震指針改訂が急がれた事情があったにせよ、津波に対する議論が不十分であったとの指摘は甘受されるべきである。

しかし、新耐震指針では地震随件事象である津波に対して、地震動に対する要件と同一の文言で、「施設の供用期間中に極めてまれであるが発生する可能性あると想定することが適切な津波によっても、施設の安全機能が重大な影響を受ける恐れがないこと」を求めていることを設計、審査に携わる関係者は見逃してはならない。

○教訓28：安全文化の徹底

「原子力安全文化」とは、「原子力の安全問題に、その重要性にふさわしい注意が必ず最優先で払われるようにするために、組織と個人が備えるべき統合された認識や気質であり、態度である。」これをしっかりと我が身のものにするには、原子力に携わる者の出発点であり、義務であり、責任である。原子力事業者および原子力規制に携わる者は組織も個人もともに、安全確保の上でわずかな疑念もないがしろにせず、新しい知見に対して敏感にかつ俊敏に対応することに真摯に取り組んできたかを省みるべきである。

今後は、原子力安全の確保には深層防護の追求が不可欠であるとの原点に常に立ち戻り、原子力安全に携わる者が絶えず安全に係る専門的知識の学習を怠らず、原子力安全確保上の弱点はないか、安全性向上の余地はないかの吟味を重ねる姿勢をもつことにより、安全文化の徹底に取り組む。」

との主旨が述べられている。

事故の根本的な要因は、設計基準事象の設定やそれを超える事象に対する対策に関する指針、基準が不十分なことではなく、設計、建設、運転する者およびそれを審査、規制する者の安全文化の欠如が大きい。例えば、耐震設計指針では設計用基準地震動Ssを上回る地震動による「残余のリスク」を低減する努力を求めたが、原子力安全に携わる者は、この認識を地震随件事象である津波に対しても持つべきことは当然である。今後は地震動と津波の重畳効果も考慮した「残余のリスク」の把握、低減が求められる。

振り返ってみると、先輩達の作成した我が国の1990年代初めの個別プラントPSA実施とその知見に基づくSA対策整備の枠組みは、当時のSA研究、リスク評価技術などの成熟度に基づき世界の動向と較べて遜色のないものであった。また、「残余のリスク」の導入を含め我が国の新耐震指針は、世界各国の中でも最も進んだ指針としてIAEA安全要件、指針などでも参考とされている。

もっとも反省すべきはそれを引き継いだ世代が、定期安全レビュー(PSR)の国レビューの機会を失ったこともあるが、SA研究やPSA技術の最新知見の反映に基づくSA対策範囲の拡大を実施してこなかったことであり、耐震バックチェックを予定通り実施してこなかったことである。

今後、指針、基準等の改訂やシビアアクシデント(SA)対策の規制要件化がなされると考えられるが、立派な枠組みの構築に加え、より重要なことは、それを確実に達成しさらに向上させる、事業者側および規制側双方の高い安全文化に裏打ちされた安全規制システムである。

—参考資料—

- 1) 共通問題懇談会、シビアアクシデント対策としてのアクシデントマネージメントに関する検討報告書—格納容器対策を中心として(1992年3月)。

- 2) 原子力安全委員会、発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネージメントについて(1992年5月, 1997年10月一部改正)。
- 3) 通商産業省、アクシデントマネージメント対策の今後の進め方について(1992年7月)。
- 4) 通商産業省、定期安全レビューの実施について(1992年6月)。
- 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(2011年6月)。

著者紹介



平野光将(ひらの・みつまさ)
東京都市大学
(専門分野)原子力安全工学, リスク評価,
原子力危機管理

From Editors 編集委員会からのお知らせ

- 学会誌記事執筆者のための
テンプレートを用意しました
執筆要領と合わせてご利用下さい



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

- 「投稿の手引」「和文論文テンプレート」を
改定しました。

<http://www.aesj.or.jp/publication/ronbunshi.htm>

—最近の編集委員会の話題より— (10月7日第4回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・東日本震災関連論文の早期掲載に関して、総投稿数20論文、掲載済み10論文、掲載決定4論文審査中1論文であることが報告された。また、和文論文誌ではJ-Stageでの早期公開が進んでいることが報告された。
- ・英文論文誌のTaylor&Francis社からの出版に関する正式契約が締結され、2012年1月号からの移行に向けた準備状況が報告された。
- ・原子力学会賞論文賞へ編集委員会から5論文を推薦することを承認した。

- ・審査区分の見直しに関して検討し、方針を決めた。
- ・欠員となっていた第7分野の編集委員1名の補充を承認した。
- ・査読委員希望者に関して、承認した。
- ・8月分のJ-Stageアクセス数が報告された。

【学会誌関係】

- ・9月に開催された「2011年秋の大会」からの記事執筆候補と打診状況について報告があった。
- ・編集理事より学会の今年度予算の状況について報告があった。編集委員会は総務・財務委員会の要請に応じた支出削減を行うため、支出管理の徹底と収入増を図っていくことになった。
- ・本年10月号より半年間、ジュンク堂書店池袋本店で学会誌を店頭で陳列販売することになった。
- ・今年度の広告出稿状況と受注活動の報告があった。今後も広告出稿増を目指していく。
- ・前回幹事会より、旅費交通費削減のため一部の遠地委員にはTV会議システムを利用して会議に出席を依頼している。今後も支出削減のため継続していくことを確認した。

編集委員会連絡先<<hensyu@aesj.or.jp>>

環境における放射性核種の分布と動態

3. 海洋における人工放射性核種の動態

—福島原発由来核種は海洋でどう動くか？

(財)海洋生物環境研究所 日下部 正志

福島原発事故によって多量の人工放射性核種が海洋にもたらされた。今後、これらの核種がどのように生態系に取り込まれ、最終的に海洋生態系にどう影響するかを予測することは我々の安心安全を担保するうえで、極めて重要である。事故以前にも、既に海洋には原水爆実験や原子力施設よりもたらされた多くの人工放射性核種が存在し、その分布挙動について、多くの研究がなされている。本稿ではそれらの過去の研究の成果を総括することにより、海洋環境への影響予測の一助としたい。

I. はじめに

今回の福島第一原子力発電所事故に伴い、3月11日から4月5日までに大気に放出された放射性核種は ^{131}I については $150 \times 10^{15} \text{Bq}$ 、 ^{137}Cs については $12 \times 10^{15} \text{Bq}$ に上った¹³⁾。他の核種も当然放出されているだろうが、その全貌は明らかではない。 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs については、第一原発近傍の海域ですべて最大 10^6Bq/l レベルが観測された¹⁸⁾。これらは現在 $10^1 \sim 10^2 \text{Bq/l}$ のレベルに収まっている。第一原発より30 km圏外においても、4月中旬に上記3核種が最大 200Bq/l 近くまで上昇したが、現在はすべて検出限界以下(9Bq/l)になっている。

このように、福島原発近隣の海水中の人工放射性核種濃度は減少の傾向にあるが¹⁸⁾、例えば、従来の東部北太平洋の濃度は ^{137}Cs については約 2mBq/l であったことからすると⁶⁾、現在も決して従来のレベルに戻ったとは考えにくく、今後の海洋におけるこれらの核種の消長はしっかりと見届けなければならない。本稿では、原発より放出される主な放射性核種(^{90}Sr 、 ^{89}Sr 、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Pu)について、その海洋における挙動をまとめた。

II. 海洋における元素の分布

1. 分布パターン

現在の分析化学の技術を持ってすれば、周期表の水素からウランまでのすべての元素を海水中で検出することができる。それらの濃度範囲は 10^0 のオーダーにわたる

Behaviors of Radionuclides in the Ocean: Masashi KUSAKABE.

(2011年 7月12日 受理)

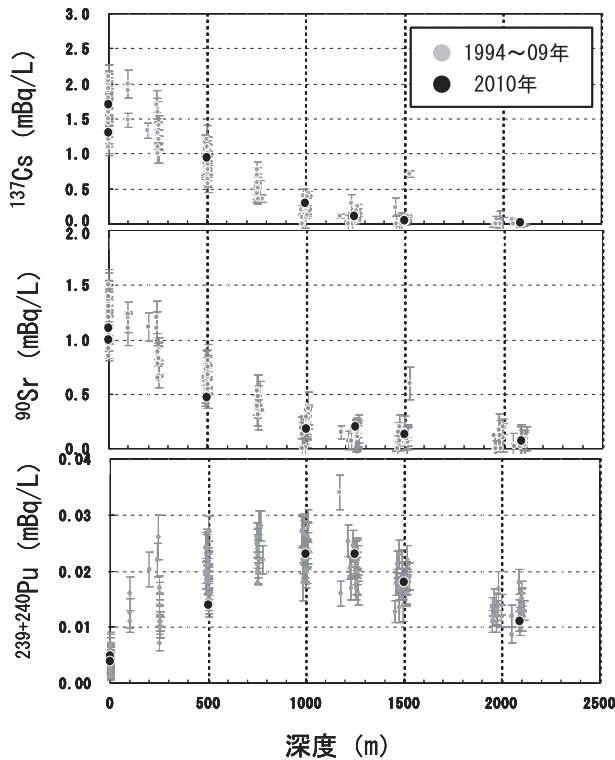
が、その外洋での一般的な鉛直分布はそれほど複雑ではなく、海水中の粒子との親和性およびプランクトンへの取込み/排せつにより、その分布がほぼ決まる。同時に水平的な分布パターンは海水の流動が大きくかかわっている。

人工放射性核種といえども、海洋における挙動はその安定同位体と同じ挙動が期待されるが、その分布においては大きく異なる場合がある。すなわち、人工放射性核種に関しては、海洋への導入が始まったのは1950年代であり(そのソースは、原水爆実験と原子力施設からの意図的または事故による放出である)、その分布に関しては定常状態になっていない。言い換えると、海水中の核種の分布は時間的に変化している。海洋へのもたらされる経路も、グローバルフォールアウトのように大気を通して比較的均一に海洋にもたらされるパターンに加え、今回の事故のようにその供給源が極めて限定されたものあり、多様である。よって、海水中の人工放射性核種の分布は、海洋への供給量の変遷、供給のパターン、放射壊変、化学/生物/物理的プロセス等を反映し、時空間的変動が顕著である。

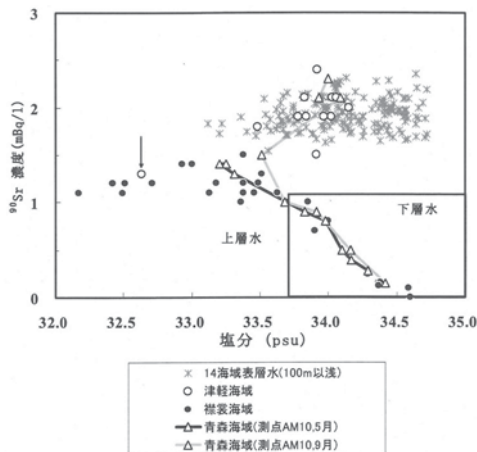
2. ストロンチウムの分布

ストロンチウムは周期表では、カルシウムと同属のアルカリ土類金属に属し、海水中では大部分が溶存している。鉛直的には大きな変化はないが、カルシウム同様、わずかに表層では濃度の減少がみられ、生物により体内に取り込まれていることが示唆される。原発内の核反応では2種類のSr(^{89}Sr 、 ^{90}Sr)がほぼ同じ生成率でできる。半減期はおのおの50.5日、28.8年である。中長期的には、 ^{90}Sr の影響が重要になる。

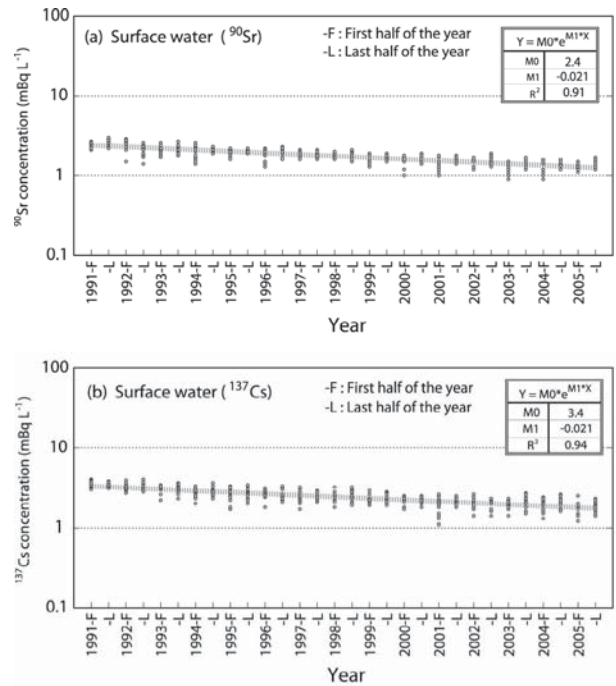
外洋の鉛直分布パターンは、海水の鉛直拡散混合とフォールアウトの時間的変遷(すなわち、1950年代に最大のフラックスを持ち、以後指数関数的に減少)を反映しており、第1図に示すように表面付近に最大値を持ち、下に向かって減少している。水平的な分布では、海域ごとにその濃度に差がみられる。稲富ら(2009)¹¹⁾は日本周辺海域において、⁹⁰Sr分布を調べ、水塊によりその濃度に差があることを示した(第2図)。すなわち、100 m以浅では大体2 mBq/l ぐらいになるが、それより下の層(100~500 m)では、低塩分の親潮系の水塊が卓越する襟裳海域では半分ぐらいまで濃度は低下する。下層



第1図 襟裳岬沖における⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ²³⁹⁺²⁴⁰Puの鉛直分布(1994~2010年)(文献16のデータを著作権者の承諾のもとに稲富が作成)



第2図 塩分と⁹⁰Sr濃度の関係(文献11より著作権者の許諾のもと転載)



第3図 青森県沖海域における表面水中の⁹⁰Srと¹³⁷Csの時間変化(文献6より著作権者の許諾のもと転載)

水(500 m以深)ではそのような傾向は見られない。Oikawaら(2011)⁶⁾は、青森県沖海域表面海水において1991年から2005年まで¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²³⁹⁺²⁴⁰Puの濃度を連続して測定し、その見かけの半減期を以下のように求めた: Pu(17.8年), Sr(16.7年), Cs(16.1年)(第3図)。セシウムとストロンチウムはほとんど同じ半減期を持ち、その時間的変化は物理的混合により決まるとしている。同様な見積りもPovinecら(2005)⁸⁾によって太平洋全域で行われた。青森沖と同じオーダーの値が得られており、海域ごとの差異は現場の物理混合を反映している。

福島近傍の土壤中からは、現在のところ、短寿命の⁹⁰Srを伴う⁹⁰Srが土壌から検出されているものの、現在のところ海底土からは検出されていない¹⁸⁾。海水中の濃度に関してはまだ報告例はない。ベータ線測定にかかわる分析的煩雑さゆえ、測定に時間がかかるが、その結果が待たれる。

3. ヨウ素の分布

ヨウ素は海水ではヨウ素酸イオン(IO_3^-)が安定であるが、極表層では還元されたヨウ素イオン(I^-)も同時に存在する。生物活動に伴う還元反応によるものである。全体的には表面で減少し、深さとともに増加している。

放射性ヨウ素(¹³¹I)も海洋では、生物への取り込み、酸化還元反応のプロセスを経て下層に運ばれると考えられるが、その半減期の短さゆえ(約8日)鉛直分布が測定されることはあまりない。上述のように福島原発からは大量の¹³¹Iが海洋にもたらされたが、壊変と希釈により現在は30 km 圏外ではほとんど検出されていない¹⁸⁾。

4. セシウムの分布

セシウムはナトリウムやカリウムと同様に、アルカリ金属に属する。ナトリウムやカリウムは海水中では最も安定な、すなわち溶けやすい元素である。ストロンチウムと同様、その表層における分布は海水の物理的混合によりコントロールされている⁸⁾。日本近海の放射性セシウムの分布も上記ストロンチウム同様、水塊の影響を受けている^{5,6)}。

セシウムの分布は、このように海洋では粒子として除去されにくく長く留まる特徴を備えているものの、海洋における平均滞留時間(海水中の総量を年間流入量または除去量で割ったもの)は、ナトリウムとカリウムは、おおよそ5,500万年、1,200万年と非常に長い、セシウムは33万年と明らかに短く¹⁾、他のアルカリ金属には見られない除去機構が働いている可能性がある。

セシウムの粘土鉱物への親和性の強さはよく知られている¹⁰⁾。Børrentzen and Salbu(2002)²⁾は室内実験で、セシウムが時間とともに不可逆的に粘土鉱物に取り込まれる様子を定量的に示した。実際の沿岸域でも、長屋(2001)¹⁴⁾は堆積物の堆積速度とセシウムの堆積速度の良い相関を示している。このように、外洋の比較的きれいな、すなわち懸濁物質の少ない海域では、セシウムは保存性成分として挙動するが、沿岸域のような懸濁物が多量にある海域では、堆積物への除去過程も重要な移動プロセスとして考えられる。稲富ら(2009)¹¹⁾は日本近海の海水中の¹³⁷Cs/⁹⁰Sr比はほぼ一定の1.4であり、海水中では同様な挙動をとることを示唆している。しかし、深層水の比を精査すると、それは有意に低く(0.2)、さらに堆積物においてはその比は約5になり、¹³⁷Csの堆積物への選択的な除去を示唆している。

福島原発近傍の海底土の¹³⁴Csと¹³⁷Csの測定結果が出始めている¹⁸⁾。増加傾向にあるところ、減少傾向を示すところ様々である。測定結果が充分ではなく、堆積物への移動量は未定であるが、海底およびその直上の生態系への影響が懸念される。今後更なる継続調査が重要になってくる。

5. プルトニウムの分布

海水中には主に4種類のPu同位体(²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu)が存在し、すべてが人工放射性核種である。安定元素が存在しないため、その挙動を類推することは難しいが、今まで多くの分析が、特に²³⁹Puと²⁴⁰Puについてなされており、その分布パターンが明らかになってきている。Puの分布に最も大きな影響を与えるものは懸濁物である。第1図に示すように、溶存態としての特徴を備えるSrやCsは表層でピークを持ち、中深層ではほとんど存在しないが、Puは中深層においても存在している。表層でのPuの懸濁物への吸着、懸濁物の下層への沈降、中深層での懸濁物の分解という一連の粒子によ

る下方輸送サイクルにより鉛直分布は説明できる。稲富ら(2009)¹¹⁾は青森県沖海域において懸濁態Pu(>0.45 μm)を分析し、ばらつきはあるものの、懸濁態Puと懸濁物量は正の相関関係があることを見出した。一方、Okuboら(2008)⁷⁾は、現場型超大容量海水ろ過濃縮装置を用い、海水中の粒状Puの分析を行い、大粒子(>70 μm)態Puは生物生産が高い沿岸域ではその粒状物あたりの比放射能は外洋に比べて低く、プランクトンにより希釈されていることがわかった。粒子のサイズの違いによって粒子態Puの挙動が異なることが考えられる。懸濁態Puの移動過程は更なる研究が必要である。

海水中の²³⁹Puと²⁴⁰Puの比はその発生元に依存している。すなわち、原子炉のタイプ、使用する核燃料の種類、核兵器のタイプ等により発生するPuの同位体比は異なる。山田(2009)¹⁹⁾は日本沿岸の堆積物中の²⁴⁰Pu/²³⁹Puを調べ、海域によりその比がソースの変動を反映していることを明らかにした。すなわち、東シナ海や相模湾では、ビキニ核実験由来のPuが約50%、日本海で約20%、オホーツク海で10%、釧路沖では、ほとんどがグローバルフォールアウト起源であった。ビキニに放出されたPuが黒潮で日本沿岸に運ばれ、日本沿岸で粒子とともに堆積していることがわかる。

今回の事故に際して、海洋へどれだけPuが付加されたかは不明である。海水のみならず、堆積物中のPuは重点的に調査されるべきであろう。

Ⅲ. 放射性核種と生物

海洋にもたらされた人工放射性核種の挙動に関して、注目しなければならない点は水産生物への濃縮である。その目安として、濃縮係数(CF: Concentration Factor)が使われてきた。計算式を以下に示す。

$$CF = \text{生体中の濃度} / \text{海水中の濃度}$$

IAEAがその推奨値を出している(第1表)が、その使用に関しては注意が必要である。すなわち、生物による核種の取込みは、排泄等も含むダイナミックな過程であり、ここで示されているCFは取込みと排泄がつりあった平衡状態における値である。現在のように海水中の核種濃度が日々変化しているような状況下では平衡状態は期待できないので、基本的には個々に示すCF値は使えない。しかし、そのような場合でも、注目している核種の動向を定性的に見積もる場合は良い指標となる。

また、CF値は多種類の試料を含む非常に大きな幅を持ったデータの平均値であるということもその使用に際しては忘れてはならない。実際は、生物の成長段階、種類、体内の部位により大きく異なる¹²⁾。さらに、食物連鎖のクラスによっても異なっている。第4図に示すように栄養段階が高次になるに従って、¹³⁷Csの濃縮が進んでいくことがわかる¹⁵⁾。ただし、食物連鎖のみが濃縮過程にかかわるプロセスではなく、海水からの直接の取込

第1表 海産生物への濃縮係数(文献9を元に作成)

	濃縮係数(CF)					
	魚類	甲殻類	軟体動物	昆布	動物プランクトン	植物プランクトン
ストロンチウム	3×10^0	5×10^0	1×10^1	1×10^1	2×10^0	1×10^0
ヨウ素	9×10^0	3×10^0	1×10^1	1×10^4	3×10^3	8×10^2
セシウム	1×10^2	5×10^1	6×10^1	5×10^1	4×10^1	2×10^1
プルトニウム	1×10^1	2×10^2	3×10^3	4×10^3	4×10^3	2×10^5

みもある。

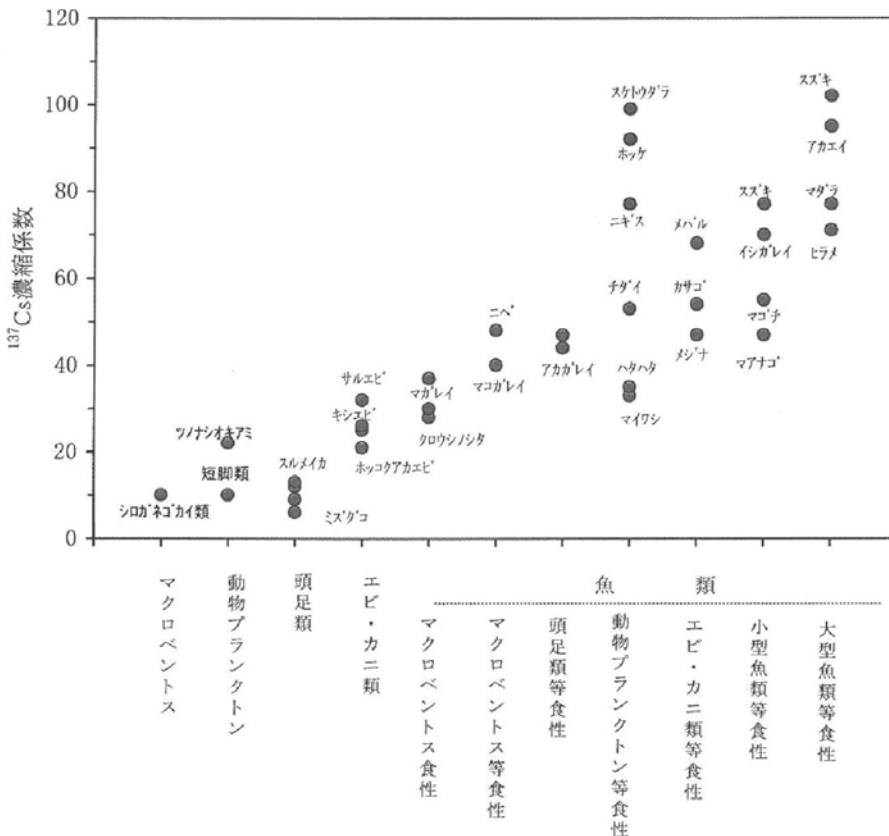
これらの濃縮過程およびそれに続く排出過程にかかる時間は数ヶ月から数年に及ぶ。御園生(2006)¹⁷⁾はチェルノブイリ事故の影響により上昇した海水中の¹³⁷Csの影響が半年(スズキ)から1年後(マダラ)に生体中のピークとなって出現し、その影響は2年以上に及ぶことを示した(第5図)。海水中の濃度は半年後には、事故前に戻ったことを考えると、このような非定常状態では、海水濃度の多寡にかかわらず継続した調査研究が極めて重要になる。

Kaeriyamaら(2008)⁴⁾は¹³⁷Csの動物プランクトンへの取込みについて調べた。動物プランクトンに取り込まれた(または体表に付着した)¹³⁷Csは全体から見ると多くはなく、濃度分布は種ごとに大きく異なる。しかし、動物プランクトンの上下移動により無視できない量のCsが下方に運ばれていることがわかった。動物プランクトンの移動に伴う放射性核種の移動については、さらなる定量的なデータの蓄積が必要である。

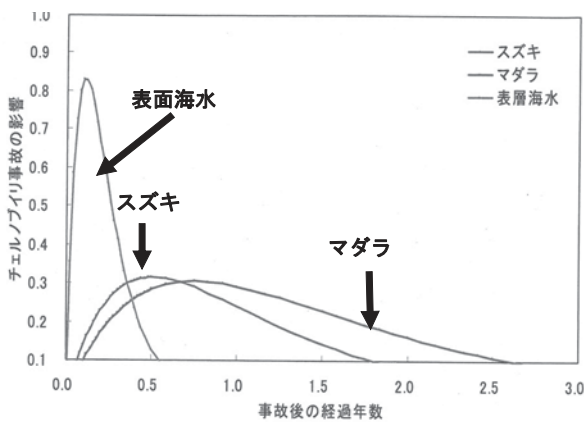
ヨウ素は海藻に取り込まれることは良く知られている(第1表)。しかし、化学形の違いによる取込み挙動の違いは海藻のみならず魚類でも顕著であり、酸化環境で化学的に安定なIO₃⁻はほとんど取り込まれることはなく、I⁻が優先的に取り込まれることは興味深い³⁾。酸化還元状況が激しく変化することがある沿岸域では、ヨウ素は外洋とは違った挙動が予想される。

IV. おわりに

沿岸域は生物生産が活発で、陸域からの土壌等無機粒子や有機的粒子の流入も多い。さらに海流の動きも決して単純ではない。放射性核種の化学的性質は上述のように元素により異なる。今回の事故に伴い海洋へ放出された放射性物質の量も正しく見積もられているとはいえ、放出も今後も続く可能性もある。現実決して楽観視できない。我々の健全な生活を脅かす現在ある、あるいは将来予想されるリスクを最小限にするためには、正確な現状把握を行い、従来の研究より得られた知見と



第4図 海産生物の栄養段階と¹³⁷Csの濃縮係数(文献15より著作権者の許諾のもと転載)



第5図 チェルノブイリ事故の影響の近似
縦軸の単位は、海水：10 mBq/l, 魚類：Bq/kg.wet
(文献17より著作権者の許諾のもと転載)

もに、将来の分布挙動を予測し、それを元に適切な対応をする必要がある。まずは、できる限り時空間的に密な観測を行うことが肝要である。さらに、観測そのものも海水中に溶けている核種のみならず、生態系を形成している他の要素(例えば、粒子、動植物プランクトン、魚類、海藻等)に含まれる核種濃度とその時間変化を調査すべきである。

—参考資料—

- 1) W. S. Broecker, T.-H. Peng, *Tracers in the Sea*, Eldigo Press, (1982).
- 2) P. Børrentzen, B. Salbu, "Fixation of Cs to marine sediments estimated by a stochastic modeling approach", *J. Environ. Radioact.*, **61**, 1-20(2002).
- 3) S. Hirano, *et al.*, "Chemical forms of radioactive iodine in seawater and its effects upon marine organisms", *Radioisotopes*, **32**, 319-322(1983).
- 4) H. Kaeriyama, *et al.*, "¹³⁷Cs concentration in zooplankton and its relation to taxonomic composition in the western North Pacific Ocean", *J. Environ. Radioact.*, **99**(12), 1838-1845(2008).
- 5) T. Nakanishi, *et al.*, "Temporal and spatial variations of ¹³⁷Cs in the waters off a nuclear fuel reprocessing facility in Rokkasho, Aomori, Japan", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **283**[3], 831-838(2010).
- 6) S. Oikawa, *et al.*, "Plutonium isotopes concentration in seawater and bottom sediment off the Pacific coast of Aomori sea area during 1991-2005", *J. Environ. Radioact.*, **102**, 302-310(2011).
- 7) A. Okubo, *et al.*, "Determination of Pu isotopes in marine particles collected by large volume in situ filtration and concentration system", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **275** [2], 291-297(2008).
- 8) P.P. Povinec, *et al.*, "⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, and ^{239,240}Pu concentration surface water time series in the Pacific and Indian Oceans—WOMARS results". *J. Environ. Radioact.*, **81**, 63-87(2005).
- 9) *Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment*, Technical Report series No. 422, IAEA, (2004).
- 10) H. Tsukada, *et al.*, "Concentration and specific activity of fallout ¹³⁷Cs in extracted and particle-size fractions of cultivated soils", *J. Environ. Radioact.*, **99**, 875-881(2008).
- 11) 稲富直彦, 鈴木千吉, 御園生 淳, 原 猛也, 城戸勝利, "日本周辺海域における人工放射性核種の濃度分布と経年変化について", *放射線科学*, **52**[3], 34-38(2009).
- 12) 笠松不二男, "海産生物と放射能—特に海産魚中の¹³⁷Cs濃度に影響を与える要因について", *Radioisotopes*, **48**, 266-282(1999).
- 13) 原子力安全委員会プレスリリース(平成23年4月12日).
- 14) 長屋 裕, 原子力発電所等周辺海洋放射能調査から, 海生研ニュース2001年1月, 5-7.
- 15) 日本沿岸海洋環境放射能調査, 海洋環境放射能総合評価事業の成果, 1984-1999, 2000年12月, 海洋生物環境研究所.
- 16) 平成21年度海洋環境放射能総合評価事業 海洋放射能調査結果, 原子力発電等周辺海域, 核燃料サイクル施設沖合海域. 平成22年8月, 文部科学省科学技術学術政策局 原子力安全課 防災環境対策室.
- 17) 御園生 淳, "海域に負荷された¹³⁷Csの影響予測—チェルノブイリ事故前後の資料と経年変動予測式をもとに", 創立30周年記念シンポジウム—かけがえない海を未来へ—予稿集, 31-35(2006), 海洋生物環境研究所.
- 18) 文部科学省プレスリリース(平成23年5月1日, 6月24日, 7月4日).
- 19) 山田正俊, "海水, 懸濁粒子, 沈降粒子, 及び堆積物中のプルトニウム同位体の分布と挙動", *放射線科学*, **52** [3], 27-33(2009).

著者紹介



日下部正志(くさかべ・まさし)
(財)海洋生物環境研究所
(専門分野/関心分野)環境放射能

日本人の食物摂取による実効線量の評価 過去の調査結果からわかること

(財)日本分析センター むつ分析科学研究所 真田 哲也

2011年3月11日に発生した東日本大震災は地震による直接的な被害はもとより、それによって引き起こされた大津波により、さらに多くの壊滅的な被害をもたらした。今回の事故では、ベントや水素爆発による原子炉建屋の損傷により放射性物質の環境への放出があり、広範囲にわたり空間線量率の上昇や農畜産物の汚染、汚染水の漏えいによる、海水や海産物への影響が報告されている。

放射性物質の環境への放出はやがて飲食物の汚染へと広がり、最終的には人への内部被ばくの直接の要因となるため、それらの放射能濃度を把握することは極めて重要である。本稿では平常時の日本人の食物摂取による預託実効線量を評価した結果を概説し、現在では天然の放射性物質(ポロニウム210およびカリウム40)からの寄与が大きいことについて述べる。

I. はじめに

今回の福島原子力発電所の事故では、原子炉や使用済み燃料プールからヨウ素131やセシウム137に代表される放射性物質が環境中に飛散した。その範囲は、原子力発電所近傍のみならず、関東地方にもその影響が報告されている。

今回の事故ではヨウ素131およびセシウム137が広範囲に飛散していることが明らかとなっており、ストロンチウム90も原子力発電所の近傍の土壌から検出されている。

事故直後は飲料水からヨウ素131やセシウム137が検出され、食品中の放射性物質に関する暫定規制値を超えるものも存在した。またその後は、農作物・海産物にも影響が及び、ホウレン草や魚(コウナゴ)からヨウ素131やセシウム137が検出され、その汚染の範囲は甚大である。最近では、牛肉からセシウム137が検出されており、被害の根は深い。さらに、海水への汚染も懸念されることから、今後は海産物への影響も危惧される。

現時点では事故建屋からの放射性物質の飛散は少なくなっているものの、冷温停止には至っておらず、完全な封じ込めは完了していない。また、環境に放出された放射性物質は、除染等を行わない限り、陸圏では地表に留まり、再浮遊により吸入したり、地下水に移行したり、さらに農作物等に移行しそれを摂取したりすることによ

り内部被ばくの要因となる。海洋では拡散により希釈はされるものの、生物濃縮により放射能濃度が高くなった魚を摂取することも考えられる。

本稿では、食物摂取による成人の内部被ばく、特に平常時の食品の放射能濃度レベルとそれによる被ばく線量について解説し、今回のような事故時における被ばく線量を評価する上で参考となるデータを示した。

なお、今回は概説にとどめたので、詳しく知りたい場合は参考資料と後述するホームページを参照していただきたい。

II. 被ばく線量の算出方法

1. 内部被ばくの特徴

被ばくには放射性物質が体の外にあり、そこから発生する放射線で被ばくする外部被ばくと放射性物質が飲食物や大気に含まれて、それを摂取することにより被ばくする内部被ばくに分けられる。文字通り、「外」と「内」の違いである。この違いは放射性物質の振る舞いに反映されるため、線量評価の方法が異なる。また、放射線防護の考え方も異なり、例えば、外部被ばくの場合は線源から、距離をとったり、時間を短くしたり、遮へいを施すことによって、被ばく線量を低減することができる。一方、内部被ばくは、いったん体内に取り込んだ放射性物質に起因しているため、体外に排泄しない限り被ばくは継続する。また、特定の臓器に集まる性質の放射性物質であれば、局所的な被ばくをもたらす。さらに、近くの物質にエネルギーを与える性質の放射線であれば(例えば、ガンマ線に比べてアルファ線)同じ放射能濃度の場合、アルファ線の方が組織(細胞)に与える影響は大き

Evaluation for Committed Effective Dose due to Dietary Foods by the Intake for Japanese Adults: Tetsuya SANADA.

(2011年 8月23日 受理)

い。

内部被ばくは、上述のように体内に放射性物質が存在し長期にわたり被ばくが継続するため、生涯における健康リスクを評価する必要があるため、物理学的半減期と生物学的半減期(代謝による機能)を考慮して成人の場合は50年間、子供の場合は70歳になるまでの総被ばく量を累計した、預託実効線量で評価する。

2. 食品中の放射性物質の濃度

我が国における食品に関する放射能の全国調査は、文部科学省が行っている環境放射能水準調査の一環で、対象となった家庭で一人前多く調理してもらい、それを1日分の食事として分析する陰膳方式で実施された日常食を対象とした調査がある。また、旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所の事故を契機に、流通食品を対象として1989年度から実施された調査と、輸入食品に限定して2003年度から実施された調査があり、現在はいずれも終了しており、「日本の環境放射能と放射線」のホームページ¹⁾でデータを公表している。

このホームページでは環境放射能調査に関する過去のデータの閲覧はもとより、検索したデータを用いたグラフの作成、原子力艦放射能調査に係る3港(横須賀港、佐世保港、金武中城港)のオンラインでの放射線測定データの表示、図表を中心とした放射能・放射線に関する解説等が公開されている。

このホームページで作成した我が国の日常食中のセシウム137放射能濃度の過去30年余の経年変化を第1図に示す。1970年代はそれまで行われた大気圏内核実験の影響を受けて、現在より1桁程度高い値を示している。1986年付近にチェルノブイリ原子力発電所事故に起因するピークが認められるが、全体としては現在まで漸減している。

1989年度から2005年度に実施した11都道府県の流通食品の放射能調査結果を第1表に示す。この調査²⁾では240種類の食品、試料数にして2,000試料以上の食品中のストロンチウム90、セシウム137等の人工の放射性物質(核種)をはじめ、ラジウム226、鉛210、ポロニウム210

第1表 食品に含まれる放射性物質の濃度範囲²⁾

放射性物質	放射能濃度 (Bq/kg)
⁹⁰ Sr	N.D.~ 9.9
¹³⁷ Cs	N.D.~ 19
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	N.D.~ 0.010
²³⁸ U	N.D.~ 5.2
²³² Th	N.D.~ 0.18
²²⁶ Ra	N.D.~ 3.9
²¹⁰ Pb	N.D.~ 45
²¹⁰ Po	N.D.~120

N.D.: 検出下限値以下

等の天然の放射性核種の濃度を測定した。その結果、食品の種類により濃度の範囲は大きく異なり、天然の放射性核種であるポロニウム210が、特に魚介類に多く含まれていることがわかった。

3. 線量評価に用いるパラメータ

(1) 預託実効線量の算出

食品の摂取による預託実効線量の計算は、ICRP Publication 72³⁾に示されている以下の式を用いた。

$$D = \sum \sum C_{ij} M_f h_j \quad (1)$$

ここで、 D : 預託実効線量(mSv)

C_{ij} : 食品 f 中の放射性物質 j の放射能濃度(Bq/kg)

M_f : 食品 f の1日あたりの摂取量(kg)

h_j : 預託実効線量係数(mSv/Bq)

(2) 食品の分類および年間摂取量

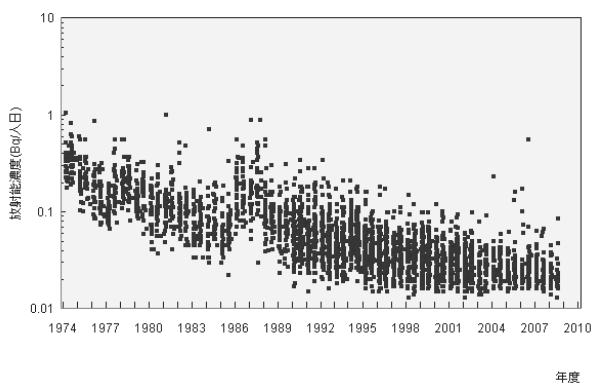
飲食物の分類および摂取量は、全国規模の調査である国民健康・栄養調査⁴⁾の食品ごとのデータを基本としている。すなわち、1群から6群(1群: 穀類等, 2群: 野菜類等, 3群: 藻類, 4群: 魚介類, 5群: 肉類, 6群: 卵, 牛乳・乳製品等)に分類し、摂取量を評価した。摂取量は年齢により異なるので、成人のほか、幼児、乳児についても評価されている。なお、今回は成人についてのみ評価した。

(3) 線量係数

放射性物質の放射能濃度がどれくらいの被ばく線量に相当するかを表す係数は、線量係数として表される。経口および吸入摂取による単位摂取量当たりの線量係数(Sv/Bq)は、ICRP Publication 72³⁾に示されており、年齢別で核種ごとに示されている。

ヨウ素131およびセシウム137の経口摂取による線量係数を第2表に示す。

この表のように、例えばヨウ素131は年齢による違いが大きく、成人よりも子供の方が放射線に対する感受性が高いことがわかる。しかし、子供は成人と比較して摂取量が少ないことから、この値の差がそのまま線量の差



第1図 日常食中のセシウム137の経年変化¹⁾

第2表 ヨウ素131およびセシウム137の経口摂取による線量係数³⁾

核種	年 齢				
	1 歳	5 歳	10歳	15歳	成人
	(Sv/Bq)				
¹³¹ I	1.8×10^{-7}	1.0×10^{-7}	5.2×10^{-8}	3.4×10^{-8}	2.2×10^{-8}
¹³⁷ Cs	1.2×10^{-8}	9.6×10^{-9}	1.0×10^{-8}	1.3×10^{-8}	1.3×10^{-8}

として示されるわけではない。緑黄色野菜を例にとると、年摂取量の平均値⁴⁾は1歳から6歳は18.7 kg、20歳以上は35.9 kgで約2倍の差がある。

Ⅲ. 線量評価の結果

1. 食品群別の線量

流通食品を対象とした放射能調査²⁾の結果を基に、上述の(1)式を用いて食品群ごとの預託実効線量を計算した。

食品群別の年摂取量と預託実効線量を第3表に示す。この表から、全食品群からの預託実効線量の合計は0.80 mSvであった。ここで、Ⅳ類の魚介類の実効線量が0.64 mSvと全体の80%を占めており、寄与割合が大きい。後述するが、これは魚介類のポロニウム210の放射能濃度が他の食品と比較して高いことや、日本人の魚介類の摂取量が多いという食習慣に起因している。

2. 放射性物質別の線量

次に、放射性物質別の預託実効線量を第4表に示す。ストロンチウム90、セシウム137、プルトニウム239+240

の人工放射性物質からの線量寄与は少なく、ポロニウム210やカリウム40等の天然の放射性物質からの寄与が大きい。特に、ポロニウム210とカリウム40で全体の92%を占めており、現在では人工の放射性物質からではなく、天然の放射性物質からの寄与が大きいことがわかる。日本人は世界的に見ても魚介類の摂取量が多いことから、それらに含まれる天然の放射性物質からの寄与が大きい。これは、国連科学委員会の2000年報告書⁵⁾に示されている世界の平均値と比較しても明らかである。ポロニウム210とカリウム40の世界の平均値は、それぞれ0.070 mSv および0.17 mSvで、我が国の平均値は、0.73 mSv および0.18 mSvである。カリウム40の値はほぼ同じであるが、ポロニウム210は1桁高い値であり、これは魚介類の摂取量が多いことによるところが大きい。

次に、放射性物質ごとの預託実効線量の食品群別寄与割合を第2図に示す。前述のように、ポロニウム210はⅣ類(魚介類)の寄与が86%と大きく、次いでⅥ類の卵類、牛乳・乳製品類等である。一方、人工の放射性物質であるストロンチウム90はⅥ類の卵類、牛乳・乳製品類等の寄与が41%と最も高く、Ⅰ類、Ⅱ類、Ⅲ類が20%前後でほぼ同程度である。セシウム137はⅠ類、Ⅱ類、Ⅲ類がほぼ同程度で、この3つで約90%を占めている。プルトニウム239+240はⅠ類とⅢ類で96%を占めており、特にⅢ類の藻類からの寄与が大きいことがわかる。

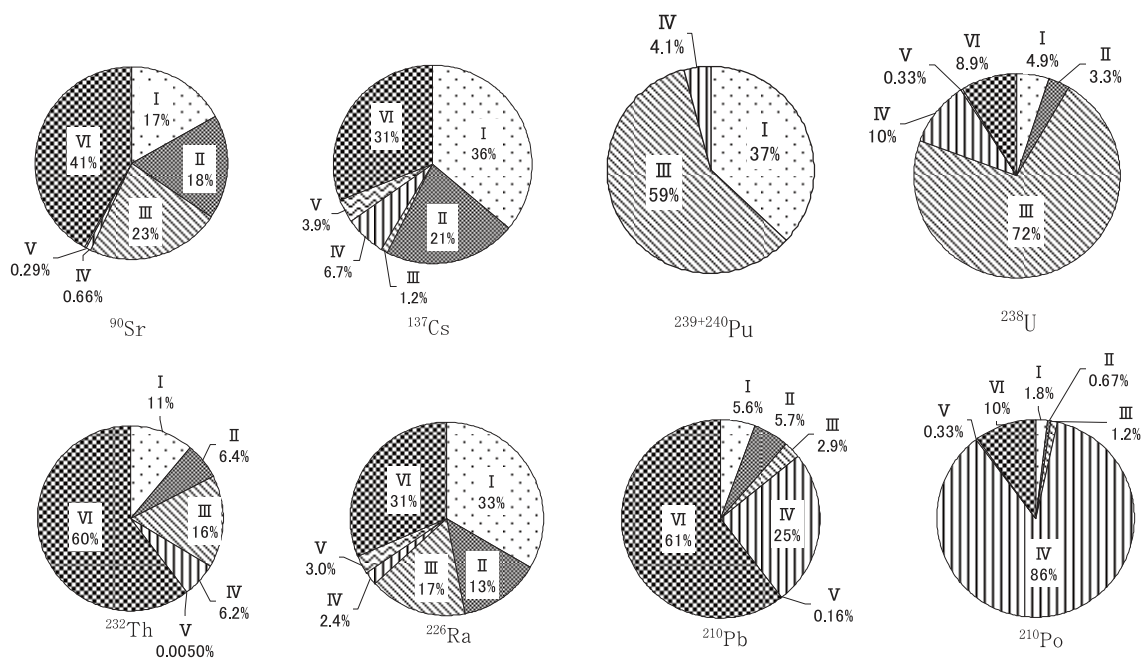
セシウムの経年変化図(第1図)で示したように、現在では過去の核実験の寄与は極めて低く、食品においてはポロニウム210やカリウム40といった天然の放射性物質

第3表 食品群別の年摂取量と預託実効線量²⁾

食品群	分類	年摂取量 (Kg/年)	年間の放射能 (Bq/年)	預託実効線量 (mSv)
Ⅰ	穀類	168	36	0.017
	いも類	22.8	7.9	0.0017
	砂糖・甘味料類	2.63	1.0	0.00069
	豆類	21.5	7.6	0.0016
	種実類	0.843	10	0.00063
Ⅱ	野菜類	98.5	26	0.0060
	果実類	45.4	4.9	0.0020
	きのこ類	5.44	7.4	0.0023
Ⅲ	藻類	5.33	42	0.014
Ⅳ	魚介類	32.2	550	0.64
Ⅴ	肉類	28.2	6.0	0.0029
Ⅵ	卵類	13.3	5.5	0.0030
	牛乳・乳製品類	61.5	16	0.0044
	油脂類	0.803	0.17	0.00012
	菓子類	9.67	3.8	0.0014
	嗜好飲料類	60.8	110	0.087
	調味料・香辛料類	31.9	33	0.016
合 計		609	870	0.80

第4表 放射性物質別の預託実効線量²⁾

放射性物質	年間の放射能量 (Bq/年)	線量換算係数 (mSv/Bq)	預託実効線量 (mSv)	合計の線量に 対する割合(%)
⁹⁰ Sr	59	0.000028	0.0017	0.17
¹³⁷ Cs	60	0.000013	0.00078	0.079
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	0.039	0.00025	0.0000097	0.00098
²³⁸ U	15	0.000045	0.00067	0.068
²³² Th	1.7	0.00023	0.00039	0.039
²²⁶ Ra	43	0.00028	0.012	1.2
²¹⁰ Pb	85	0.00069	0.058	5.8
²¹⁰ Po	610	0.0012	0.73	74
⁴⁰ K	—	—	0.18 ⁶⁾	18
合計	870	—	0.98	—



I：穀類，いも類，砂糖・甘味料類，豆類，種実類，II：野菜類，果実類，きのこ類，III：藻類，IV：魚介類，V：肉類，VI：卵類，牛乳・乳製品類，油脂類，菓子類，嗜好飲料類，調味料・香辛料類

第2図 放射性物質ごとの預託実効線量の食品群別寄与割合²⁾

からの影響が大きい。なお，吸入による内部被ばく線量の寄与が大きい放射性物質として，ウラン系列の天然放射性物質であるラドン222があり，それによる被ばく線量は0.45 mSv⁷⁾で，吸入による被ばく線量の大部分を占めている。

IV. おわりに

本稿では食物摂取による内部被ばくの平常時の濃度レベルについて解説し，今回のような緊急時における被ばく線量を評価する上で基礎となるデータを示した。

今回の事故においては，国の定める暫定規制値を超えるヨウ素131やセシウム137を含む飲食物が報告されており，これらが将来，環境中でどのような振る舞いをし，食品に影響していくかについては，今回紹介した過去の

データが役立つのではないかと期待する。すなわち，ここで紹介した食品中に含まれる人工の放射性物質は，1960年代を中心に行われた大気圏内核実験やチェルノブイリ原子力発電所の事故により環境に放出されたものの痕跡であり，今回の事故のこれからを予測する基礎データとなると考える。

福島原発では現在も全力で復旧作業が続けられている。廃炉まで含めると長期的なスケジュールになると思われるが，1日も早い収束を願うと同時に，周辺環境が3月11日以前のレベルに戻るよう取り組む必要がある。

また，周辺環境の汚染状況の把握と住民の被ばく線量評価には，文部科学省が作成した放射性セシウムの土壤濃度マップを活用し，線量評価にはホールボディカウンタ等を用いた長期にわたる内部被ばく線量の測定が重要

である。また、外部被ばくに関しては、必要に応じて個人被ばく線量計(フィルムバッジ)の携帯等を一元的な管理の下で実施する必要があると考える。さらに、環境放射能調査には、分析値の信頼性確保のため、試料採取法、分析測定法の標準化、共通化が必須である。また、相互比較分析等を行い、得られたデータの信頼性を担保することも重要であろう。

事故の対応には様々な分野の専門家や技術者が数多く携わっているので、産学官の連携はもとより、学会も含め連携した調査体制を構築し、情報を共有して英知を結集することがこの難局に立ち向かっていく最も重要なことであると考え。もちろんそれは、周辺住民の方々や被災された方々の心のケアを含めた協力と理解の上に成り立つことは言うまでもない。

— 参 考 資 料 —

- 1) 文部科学省, 日本の環境放射能と放射線, <http://www.kankyo-hoshano.go.jp/>.
- 2) T. Ota, T. Sanada, Y. Kashiwara, T. Morimoto, K. Sato, "Evaluation for committed effective dose due to dietary foods by the intake for Japanese adults", *Jpn. J. Health Phys.*, **44**[1], 80-88(2009).
- 3) ICRP Publication 72, Age-dependent dose to members of

the public from intake of radionuclides: Part 5
Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients, (1996).

- 4) 厚生労働省健康局総務課生活習慣病対策室, 平成20年国民健康・栄養調査報告, 平成23年1月.
- 5) 国連科学委員会, 放射線の線源と影響, 原子放射線の影響に関する国連科学委員会の, 総会に対する2000年報告書 附属書付, 実業公報社, (2002).
- 6) H. Sugiyama, H. Terada, K. Isomura, I. Iijima, J. Kobayashi, K. Kitamura, "Internal exposure to ^{210}Po and ^{40}K from ingestion of cooked daily foodstuffs for adults in Japanese cities", *J. Toxicol. Sci.*, **34**[4], 417-425(2009).
- 7) T. Sanada, K. Fujimoto, K. Miyano, M. Doi, S. Tokonami, M. Uesugi, Y. Takata, "Measurement of nationwide indoor Rn concentration in Japan", *J. Environ. Radioact.*, **45**, 129-137(1999).

著 者 紹 介

真田哲也(さなだ・てつや)

(財)日本分析センター

(専門分野/関心分野)環境放射能分析, 放射化学分析, ラドン濃度測定, 地球化学(陸水, 特に温泉水中の希土類元素の動態)



報告

我が国の原子力の法規制と組織に関する考察
福島第一事故の教訓を踏まえて

東京大学 西脇 由弘

福島第一原子力発電所の事故について、現在、政府の事故調査・検証委員会が事故原因などの調査中であり、教訓はこの結果を踏まえて検討すべきではあるが、本稿では、政府がIAEA閣僚理事会へ提出した報告書や過去の原子力法制に関する研究を踏まえつつ、我が国の原子力の法規制と組織に関する分析・考察を行う。

I. はじめに

福島第一の事故以前に行われた比較的新しい我が国の原子力の法制度の体系的分析や改善提案として、IAEAが安全指針などへの適合性の観点から提言を行ったIRRS報告と、法制度の問題点の分析からその解決方法を探った東京大学原子力法制研究会の報告¹⁾の2つがあげられる。この両者は互いに独立して分析したものであるが、その結論は互いに似通ったものとなっている。

筆者は、上記研究会の幹事であり、我が国の原子力法制度の研究に当たってきたが、今回の福島第一事故は、同研究会が指摘した我が国の規制の弱みを一層強く印象づけるものとなったと感じている。

筆者の見るところ、規制制度それ自身は福島事故の直接の原因であるとはいえないが、事故の遠因や、さらに事故原因の本質的な側面を含んでいると思われる。この点については、筆者の拙稿「我が国のシビアアクシデント対策の変遷(原子力規制はどこで間違ったか)」²⁾に詳述しているが、本稿では、この分析や原子力法制研究会の過去の検討結果、さらにIAEAのIRRS報告を踏まえ、主として原子炉施設を対象として分析・考察を行う。

II. 我が国の規制の問題の2つの側面

我が国の原子力規制は、法制面とそれを支える組織の両面に課題を有している。

原子力の法規制は、昭和32年に原子炉等規制法(以下「炉規法」と略す)が制定されて以来、事故トラブルや新規事業に対応するために規制が付加され、複雑な構造をとることとなった。

またこのほど、環境省のもとに原子力安全庁(仮称:以下「安全庁」と略す)を新設し、原子力安全・保安院(以下「保安院」と略す)の原子力規制部門と文部科学省(以下「文科省」と略す)のモニタリング部門を統合し、原子力

安全委員会を同庁の八条委員会として原子力安全審議会とする組織改正案が政府から示された。この政府案は、規制機関の専門性を高めるなど、高く評価できる点も多い。

本稿では、この政府の組織改正案を前提としつつ、法制面と組織面について、章を分けて記述する。なお、法制面については、紙面の都合があり、具体的な法改正案を紹介できないので、法改正の要点のみを記載する。

III. 法的側面に関する考察

1. 炉規法に一本化された規制

我が国の原子炉施設は、電気事業法と炉規法の両法にまたがって規制されている。この法構造が検査の乱立などに見られるように規制を複雑化させ、また、電気事業法による構造強度に重点が置かれた規制を招いており、規制は原子力に特化した炉規法に一本化すべきである。

電気事業法から原子炉規制を除外してもよいが、現在の炉規法のように、電気事業法で必要と思われる規制が残れば炉規法に委任する方法もあり、二重規制を排すべきである。なお、環境影響評価も、気象や水理との共通性を考えれば、炉規法で実施すべきである。

2. 放射線障害から国民を守る規制

炉規法の法目的は、「災害を防止し」「公共安全」を図ることとされている。「災害」については定義もなく内容が不明確であり、また、個々人の安全確保は公共安全を図ることによる反射的利益に過ぎないとされている。

このため、炉規法が個々人の放射線障害を防止することを明確にするため、同法の目的を「放射線障害を防止し、…公衆の安全を図るために、…」と改正する。

また、福島第一事故というシビアアクシデントが発生したことから、事業者の自主的措置としてきたシビアアクシデント対策を炉規法に取り込み、規制対象とする。法目的の改正により、シビアアクシデント発生時であっても個々人を放射線障害から守ることを明確にする。

3. 包括的安全解析書の導入

炉規法は段階的規制体系をとっていることから、冒頭の設置許可、および、後続規制である保安規定や核物質防護規定の認可、国際規制物資の使用の届出、計量管理

A Study about Improvement of the Nuclear Reactor Regulation Law and the Regulatory System of Japan: Yoshihiro NISHIWAKI.

(2011年 8月17日 受理)

規定の認可などの規制行為の総体を取りまとめた図書が存在しない。このため、許認可の結果に対する規制側と被規制者の共通の理解が存在しない状態となっており、この点はIAEAのIRRA報告でも問題とされている。

段階的規制体系をとりつつ全体を総括した図書、すなわち包括的安全解析書を導入するためには、冒頭の規制と後段規制に齟齬が生じてはならず、冒頭の規制である設置許可に全体を包摂させざるを得ない。すなわち、設置許可申請書を、後段規制すべてを包摂する包括的安全解析書とすることとし、後段規制段階で詳細が確定すれば、変更許可や届出などにより最新の状況を包括的安全解析書にフィードバックする方法をとることとする。

現行設置許可申請書の添付六、八、十は、原子炉安全にとって重要な要素(許可の要素)であることから、添付書類はすべて本文とし、包括的安全解析書に盛り込む。

後段規制を包摂するため、包括的安全解析書へ追加する記載事項は下記のとおりである。

- ・現在の設置許可では、線量目標値指針の適合性しか審査していないが、法目的を放射線障害の防止としたことから、周辺監視区域外での被ばく線量の評価を包括的安全解析書の記載事項とし、設置許可段階で公衆の被ばく評価を行う。
- ・構造強度から機能性能に規制の重点をシフトさせるため、設工認の方針(耐震設計に関しては、床応答曲線までを記載事項とする)を記載事項とし、設置許可段階で設工認の審査を行い、設工認は廃止する。

なお、設計や検証に民間第三者認証が導入されれば、事業者はその状態を申請することになる。

- ・保安規定の記載事項のうち、安全解析と不可分である「運転上の制限」や品質保証など、冒頭の規制で審査すべき事項を包括的安全解析書に記載する。
- ・確率論的安全評価とシビアアクシデント対策(既存炉の場合はアクシデントマネジメント)を記載事項とし、設置許可で審査する。

公衆の被ばく防止をシビアアクシデント対策の観点から審査し、敷地境界や公衆との離隔の妥当性を判断する。なお、現在実施されているストレステストは、シビアアクシデント対策の一部となる。

- ・核物質防護や保障措置などは、従来第一号要件の「原子炉が平和の目的以外に利用されるおそれがないこと」からくる具体的要請であるとされていたが、Safety, Security, Safeguardの3Sは一体不可分であり、第四号要件の「放射線による障害の防止に関する基準」の観点からも判断されるべき事項とする。

国際規制物資の使用に当たっては、炉規法第六十一条の三の許可が必要であるが、原子炉設置者や再処理事業者などの各種事業者は、炉規法第二十三条の設置許可などを受けていることからこの許可は免除されている。設置許可や各種事業許可においては、平和利用の

観点から審査が行われているが、計量管理の設計上の可能性、核燃料の入手国ごとの種類や数量および使用予定期間は申請事項ではなく、国際規制物資の使用の許可の観点から審査が実施されているか疑問がある。また、日・IAEA保障措置協定の第42条から第50条に基づき設計情報がIAEAに提供されていることなど、設計と保障措置は不可分であることから、設置許可で審査することが妥当である。包括的安全解析書を導入すれば、保障措置等のみでなく、核物質防護の観点からアクシデントマネジメントを見直すなど、3Sを一体として審査することが可能となる。

4. 許可基準を含む技術基準の政省令化

炉規法二十四条の許可基準は、政省令への具体的な基準の委任規定がなく、特に第四号の「災害の防止」は、如何なる災害をどのようにして防止するのか判然としない。このため、法目的にあわせ第四号を「放射線障害の防止」とし、これを具体化した技術基準省令を新設する。さらにこの省令のもとに、電気事業法の省令62号に相当する性能規定化された技術基準告示を新設し、具体的な仕様規定は民間規定をエンドースして使用する。

前節3.で述べたように、設置許可申請書を包括的安全解析書とすることから、技術基準は、基本設計から運転管理まで含めたものとする必要がある。原子炉安全を分かりやすい形であらわすためには、この技術基準は、多重防護に立脚することが望ましい。また、福島第一事故の反省に立ち、炉規法の適用範囲を拡大しシビアアクシデントまで包摂させるため、技術基準は、多重防護の第四層までを含むものとする必要がある。

包括的安全解析書は、核物質防護や国際規制物資の使用や保障措置も包摂することから、これらの基準も技術基準に含まれることが必要である。

以上を総合すると、技術基準は次の構成となる。

- (1) 原子炉施設の設置場所における自然的立地条件が当該施設における大きな事故の誘因とならず、かつ、原子炉施設の構築物、系統および機器は異常状態の発生を防止し得る信頼性が確保されること。
- (2) 原子炉施設の運転の際に異常状態が発生することを防止すること。
- (3) 原子炉施設の寿命期間中に予想される運転時の異常な過渡変換事象が生じた場合でも、炉心は損傷することなく、かつ、原子炉施設は通常運転に復帰できる状態で事象が収束する設計であること。
- (4) 前号の事象を超える異常な状態であって放射性物質を異常に放出するおそれがある事故事象を生じた場合でも、炉心の著しい損傷のおそれなどなく、かつ、放射性物質の放散に対する障壁の設計が妥当であること。
- (5) 前号の事故事象を超えるシビアアクシデントが発生した場合でも炉心の溶融を防止し、炉心溶融が生

じた場合でも敷地外への放射線の影響を極小化すること。

- (6) 原子炉施設の燃料の貯蔵設備および取扱設備は、臨界を防止し、崩壊熱を除去できること。
- (7) 放射線業務従事者の線量が、告示で定める線量限度を超えず、かつ、周辺監視区域の外側のいかなる場所においても、その場所における線量が告示で定める平常時、事故時およびシビアアクシデント時の線量限度を超えないようにすること。
- (8) 妨害破壊行為等の脅威への対応を含む核物質防護措置を講じること。
- (9) 国際規制物資の使用に当っては、国際規制物資の使用に係る二国間協定その他の国際約束が履行でき、またその適正な計量管理を確保すること。

5. 製造事業者を申請者とする設計認証制度の新設

現行法では、原子炉施設を設置しようとする者が、その申請をなすうの段階になって、初めて設置許可の申請ができることとなっている。

しかし、設計段階においては製造事業者が一義的な責任を負っていることから、製造事業者が被規制者となることが望ましい。このため、設置者が設置許可の申請を行う前に、製造事業者が標準的な原子炉の設計に係る認証、すなわち「原子炉設計認証」を得ることができる制度を新たに設ける。設置者は、その「原子炉設計認証」を設置許可の申請書の一部に引用して申請できる。

具体的には、法二十三条に枝番を付し、「設置許可申請書の記載事項のうち、設置者が有すべき原子炉施設の設置場所固有の情報を除いた事項」を申請内容として申請させ、技術基準に適合していれば認可することとする。なお、「原子炉設計認証」を用いない設置者による申請も従来どおり行いえるよう、現行の制度も並存させる。

6. 原子炉安全の観点からの変更許可の要件

現在、設置許可の変更要件は、申請書本文事項の変更と形式的に決められているが、これを原子炉安全の観点から定めるため、技術基準に抵触する場合には設置許可の変更を要することと改める。具体的には、技術基準に抵触しない軽微な事項を届出とし、その他の変更は変更許可を要することとする。

この届出は、変更があった日から30日以内とするが、さらに些細な編集上の変更や図面の変更などは、27ヶ月以内の届出(アズビルト)で足ることとする。なお、届出の判断過程は、記録の保存を義務づけ、国の検査対象とする。

7. 乱立して複雑化した検査の統合

原子炉施設の工場等での製造には、製造事業者が一義的な責任を有していることから、製造事業者の製造工程を検査の対象とするベンダー検査を導入する。ただし、原子炉施設全体の技術基準適合性に責任を有するのは設置者であることから、ベンダー検査は製造事業者の品質

保証に係る検査に限定し、技術基準適合性は留保する。

また、新たに原子炉施設を新設しようとする場合、あるいは、変更許可が必要な場合には、合格をしない限り原子炉施設の使用が出来ないとする停止条件付きの使用前検査を実施する。なお、溶接検査は、ベンダー検査と停止条件付使用前検査に包摂される。

さらに、包括的安全解析書の遵守状況の検査である事業者監視検査を新たに導入する。事業者監視検査には、技術基準の適合性、保安規定、核物質防護や保障措置なども含まれることから、定期検査、保安検査および保障措置検査は廃止する。事業者監視検査は、事業者の申請に基づく検査ではなく、規制が国民に対する説明責任を果たすための規制の能動的な検査とする。

IAEAの安全指針GS-G-1.3によれば、検査は、体系的で事前に決められた計画検査と、不測かつ計画外の状況や異常事象に対応して行われる対応型検査に大別される。前述の3つの検査は計画検査に分類され、我が国では対応型検査は立入検査の機能の一部として実施されている。不測の事態に備えて立入検査は存続させることとし、対応型検査である事故対応等検査を新設する。

この検査の新設・統合により、現行の各種の検査は、ベンダー検査、停止条件付使用前検査、事業者監視検査、事故対応等検査および立入検査に再編される。

8. 環境放射線モニタリングの法制化

福島第一事故では、環境放射線モニタリングが有効に機能しなかった。都道府県が実施している環境放射線モニタリングの法的位置づけが明確でないこともこの一因と考えられ、これを炉規法に取り込むこととする。具体的には、環境放射線モニタリングを炉規法上の国の責務とした上で、都道府県が法定受託事務として実施する。各種公害対策と同様に、都道府県がモニタリングを行うこととするが、原子力では施設の規制は国が行うことから、都道府県に対する国の説明責任を法定化する。これにより、都道府県が住民の安全確保をすることを規制法上も明確化でき、国民の安全を守る国と住民の安全を守る都道府県が、同じ立場に立ち安全確保を目指すことにより、規制がより信頼ある強固なものとなる。

周辺監視区域外の放射線の直接の確認手段である環境放射線モニタリングを炉規法に位置づけることは、炉規法の法目的を「放射線障害の防止」としたことから正当化される。なお、シビアアクシデントを炉規法に取り込んだため、従来の原子力災害対策特別措置法第10条通報は炉規法の守備範囲となり、同法の改正も必要である。

IV. 組織に関する考察

本章では、安全庁の政府案を基礎として、その所掌範囲や運営などについて、考慮すべき点や提言を行う。

1. 独立性の問題

IAEAの安全指針GSR Part 1の要件4において、原

子力の規制機関は、独立性を担保できる権限、人事、財源を持たねばならず、政治や政府の他の組織からの圧力から独立しなければならぬとされている。不当に規制を緩める圧力は当然排除すべきであるが、逆に技術的に根拠のない規制の強化は被規制者の順法精神を損ないかねず、安全庁は独立して安全の観点から必要十分な規制を実施することが求められる。

安全庁を環境省に設置した場合、許認可権者は安全庁長官ではなく環境大臣となり、また、人事、機構定員や予算も環境省の大臣官房の所掌となり庁独自に要求・管理できるわけではない。保安院は、IAEA が求める「実質的な独立性」を満たすため、許認可上の判断は資源エネルギー庁などの意見に左右されず独自に行っており、人事や予算なども、経済産業省からの独立性を満たすよう運用上の工夫がされていた。同様に、環境省も、許認可の判断や人事、機構定員や予算については、安全庁の独立性に配慮しその意向を尊重しなければならない。なお、保安院は、財源を電源開発促進対策特別会計に依存していた。安全庁も財源を同特会に求めるならば、特会の枠を持っている文科省のように安全庁の別枠を用意し移管するか、繰り入れられた一般会計から直接予算を配分して、財源の独立性を担保する必要がある。可能ならば、IAEA の安全指針 GS-G-1.1 に示されているように、事業者からの許認可や検査などの手数料で原子力規制の特別会計を設け、独自の財源を確保すべきである。

また、GSR Part 1 の要件 4 において、規制機関は、政府各部門や政府機関に対し独立した助言ができなければならないとされており、従来は、原子力安全委員会が内閣総理大臣を通じて関係行政機関の長への勧告権を持っていた。環境大臣は、環境の保全に関する基本的な政策に関する重要事項について勧告することができるが、原子力規制は「環境の保全」であるか明確でなく、また環境大臣は「基本的な政策に関する重要事項」だけしか勧告権はなく、さらにテロ対策などの環境と係わりがない事項についての勧告はできないことから、原子力安全に関する幅広い勧告権を付与することが必要である。

2. 緊急事態対応についての問題

福島第一事故において防災対策が機能しなかった理由は、敷地外への放射性物質の放散に対する防災計画や防災訓練が実効的でなかったことにある。このため、関係機関の役割分担を踏まえた防災計画の立案、部分的な非通知訓練を含む実効的な防災訓練の実施、そしてその結果の分析による防災計画の見直し・充実が不可欠である。政府案は、保安院の原子力防災課の機能を拡張し緊急事態専門官を置くこととしており、同専門官のもとで訓練を積み重ねることによって、シビアアクシデント時の防災対応を現実的なものとしていく必要がある。

また、防災体制全体についても、政府の事故調査・検証委員会において検証・提言が行われるものと考えられ

るが、米国では、原子炉安全は NRC、退避等の外部活動は FEMA (連邦緊急時管理局) と役割分担されており、これを参考に以下の観点から原子力防災体制について見直されるべきであろう。

- (1) 安全庁は、原子力施設の安全確保に責任を持つ
- (2) 退避等については、災害対策本部を中心として自衛隊・警察などを統合して指揮するか、日本版 FEMA を新設する

安全庁は、(1)の原子炉の事故の収束の役割を担うとともに、(2)の他機関との連携業務、すなわち、放射性物質の放散や拡散の情報伝達と、事故収束に必要な資機材の入手や輸送の依頼を実施しなければならない。このため、安全庁と原子力災害対策本部の有機的連携は不可欠である。大臣が防災対策本部の副本部長であれば、発言力が増すというメリットはある。しかし、原子力や防災に通じた大臣が常に選任されるわけではないこと、大臣の任期はおおむね短いこと、原子炉事故の収束には原子力に通じた専門性の高い者が当たることが適当であり、必ずしも大臣が必要ではないことから、大臣と安全庁の専門家の役割分担が必要となろう。また、国家安全保障、すなわちテロ対策や保障措置などの観点から、安全庁は内閣総理大臣と直結する機能を持つことも重要である。

3. 保障措置等の所管の問題

政府案では、放射線規制や保障措置などは文科省に残し、安全庁に移管されないこととなっている。

しかし、研究炉や使用の規制が安全庁に移管された場合、文科省は原子力施設に関する直接の知識(原子力研究を行う傘下機関からの間接情報のみとなる)を得る部門がなくなり、設計情報に基づいた適確な査察や、IAEA が行う核開発国の査察への参加協力などを行う専門的な知識を有する職員の保持・育成が可能か疑問である。

また、保障措置は、原子力の平和利用を担保する最も重要な規制措置である。しかし、査察対象施設の 4 割弱が大学や日本原子力研究開発機構などの文科省傘下の機関であり、同省が査察という規制業務を実施することは利益相反となる。さらに、文科省の査察は研究開発局という推進部局の核不拡散・保障措置室で実施されており、規制部門と推進部門の分離がなされていない。IAEA の安全基準 GSR part 1 の要件 4 に反する可能性がある。

原子力規制が安全庁に統合される中、保障措置だけが文科省に残ることは、我が国の平和利用の担保に対する姿勢に疑念を招きかねず、同省に残すならば、残さねばならない積極的な理由と説明が必要である。

前章Ⅲ. で述べたように、IAEA の IRRS の指摘事項である包括的安全解析書を導入すれば、保障措置は包括的安全解析報告書の記載事項となる。安全庁と文科省が設置許可を分割して審査することは現実的でなく、保障措置関連の規制全体を安全庁に移管すべきである。

また、放射性同位元素等の規制、放射線審議会および原子力損害の賠償も、文科省に残されることとなっているが、これらも原子力規制を実施する安全庁に一貫化すべきである。文科省は原子力規制の横割り機能がない一省庁であり、教育と科学技術の振興を主たる業務としていることから、原子力規制関連の業務を残さなければならない理由が不明である。特に、原子力損害賠償については、同省傘下の機関が原子力事故を発生し賠償に伴う紛争を処理しなければならない事態も想定され、保障措置と同様、文科省の所掌とするのは適当ではない。

4. 専門性向上のための方策

政府案においては、職員の専門性向上のために、人材の確保・養成、ノーリターンルールの採用などに加え、研修機関の設置などを織り込んでおり、新たな組織を担う人材の専門性の確保に配慮が払われている点は高く評価される。詳細については、今後、制度設計がなされるであろうが、その際、配慮すべき点について述べたい。

まず、ポストごとに、その職務を遂行するために必要な専門性を明確にすべきである。個々人の専門分野や知識・経験をもとに、必要とされる専門性に適した人事配置をすることが求められる。ポストごとに資格審査することが望ましいが、研修の合格とリンクさせることもありえる。なお、研修は、将来の能力確保の約束ではあるが現在の能力の確認ではないことに注意が必要である。配属された者の専門性などを、事後的にチェックする人事考課を的確に実施しなければならない。

管理者は部下を指導し職務を遂行せねばならず、また緊急時には先頭立って判断・行動せねばならないことから、諸外国の規制機関と同様、上級管理者ほど高い専門性が要求されなければならない。専門性が高く、国際的な知見を持つ安全庁の各部門の責任ある職員が、国際機関や海外規制機関のカウンターパートと伍して安全性向上の議論を戦わすことができなければならない。

安全庁には、審査、検査、緊急時管理など、様々な業務があり、職種ごとの給与体系と人事考課があることが望ましく、いわゆる専門職人事制度を採用すべきである。許認可や検査などの手数料をもととした独立した収入源を持つ特別会計を新設すれば、給与体系も公務員のそれとは異なるものにすることが可能であろう。

また、国際機関や主要先進国、原子炉施設の輸出先国などの在外公館に、原子力アタッシェを配することも重要である。10人規模のアタッシェが配置されれば、常時の海外規制機関とのルートを確保でき、安全庁の国際化に貢献するのみならず、魅力あるキャリアパスの1つを構成する要素になりうる。

5. 地方自治体との関係の問題

安全庁は、環境放射線モニタリングの計画立案・調整を実施することとなっている。また、地方との連絡調整の重要性が増すことから、安全庁の地方組織の整備・強化を行うこととなっている。

前章Ⅲ.で述べたように、現在の環境放射線モニタリングは、その位置づけが明確ではないことから、炉規法に取り込み安全庁の責務とし、法定受託事務として都道府県が実施することが適切である。これにより、公害の防止と同様に、安全確保に関する都道府県の役割が規制法上明確にされる。

6. 支援機関の問題

安全庁に関する政府案では、現在保安院の規制支援機関であり高度の専門性を有するJNESを、安全庁の傘下の独法とすることとされている。

政府案では、安全庁とJNESの役割分担が不明であるが、現在でも、両者のインターフェースがうまく取れていないのに、さらに専門性を高めた安全庁と、機能や規模が同じようなJNESが重層構造になると、両者の機能が有効に連携できない恐れが高い。したがって、安全庁とJNESは重層構造ではなく、一体として統合することが理想である。公務員の定員問題などで統合が困難であるならば、他国の例にならい、安全庁は許認可などを行う小さな組織とし、その傘下に、規制権限を実質的に移管された大きな独法を作るという構造とすべきであろう。

また、JAEA安全研究センターや放射線医学研究所などの規制支援研究機関を、安全庁の傘下の研究所とし、国力を総合して安全確保を図らなければならない。特にJAEA安全研究センターは研究費を保安院に依存しており、予算面からも傘下機関とすることが妥当である。

— 参考文献 —

- 1) 平成19, 20年度の「原子力法制研究会 技術と法の構造分科会 研究報告」, および2009年6月の「原子力法制研究会 社会と法制度設計分科会 中間報告」.
- 2) “わが国のシビアアクシデント対策の変遷(原子力規制はどこで間違ったか)”, 原子力 eye, 57〔9〕, 37-40(2011); 57〔10〕, 40-45(2011).

著者紹介



西脇由弘(にしわき・よしひろ)
東京大学
(専門分野)原子力の法工学, 原子力規制の在り方



安全の構築に向けて—東日本大震災より明らかになった課題と安全再構築の視点

「安全工学シンポジウム2011」パネル討論より

宇都宮大学 松岡 猛

本年7月に開催された日本学術会議主催「安全工学シンポジウム2011」において緊急に企画されたパネル討論の討議内容についての報告である。パネル討論は「安全の基本的側面」、「原子力事故関連」、「地震・津波による被害」の3つのグループに分け、最後に、リスクマネジメントの観点からの討議とそれに引き続いての全体討論が持たれた。各話題提供者からはそれぞれの専門に基づく貴重な事実関係の報告および今後の安全再構築に関する提言が出された。

はじめに

日本原子力学会をはじめとして、安全工学に関係する40余りの学協会の共催、日本学術会議総合工学委員会主催の「安全工学シンポジウム」が毎年7月上旬に開催されている。今年は日本機械学会が幹事学会となり開催の準備が進められ、3月11日東日本大震災が発生した時点ではプログラムはほぼ確定していた。

大会の中心となる特別講演2件、パネル討論2件は既に決定されていたが、日本学術会議および実行委員会(実行委員長 東京理科大学中曾根祐司教授)による検討により、大震災を考慮した緊急特別企画を実施することとなった。日本学術会議 広渡清吾副会長(現会長)による「東日本大震災と日本学術会議」の特別講演を1件追加し、シンポジウム初日一番に行われた。

さらに、表題のパネル討論を企画し関連各分野の専門家にパネリストとしての参加を呼びかけた。大震災直後で非常に多忙な時期であったにもかかわらず多数の方々の参加を得ることができ、大変内容の濃いパネル討論を実施することができた。

本報告では、そのパネル討論で各パネリストが指摘した課題とそれらをもとに討議された論点、今後の日本の安全対策、安全の再構築のあり方について、できる限りパネル討論の様子を再現しつつ述べる。

パネル討論の構成

コーディネータおよび司会は総合工学委員会・機械工学委員会合同「工学システムに関する安全・安心・リス

ク検討分科会」委員長である著者が務めた。

第1のグループは、3件の話題提供で構成され午前中に行われた。話題提供者・テーマは、総合工学委員会委員長 東洋大学・矢川元基教授の「総合工学委員会からの提言」、明治大学・向殿政男教授の「安全の理念と安全目標」、上智大学グリーンケア研究所・高木慶子教授の「天災・人災の渦のなかで生きる希望を探す」である。

第2のグループは、原子力事故関連の4件で午後2時から開始された。話題提供者・テーマは、防災科学研究所・藤原広行領域長の「地震ハザード評価の課題」、日本原子力学会副会長 東京大学・澤田隆特任研究員の「福島第一原子力発電所事故」、芝浦工業大学・後藤正志講師の「原子力プラントの安全性」、日本アイソトープ協会・佐々木康人理事長の「放射線の健康影響と防護体系」である。

第3のグループは、地震・津波およびそれにより引き起こされる火災、化学プラント事故関連の3件の話題提供である。話題提供者・テーマは、東京海洋大学・岡安章夫教授の「東日本大震災における津波被害」、京都大学・田中哮義教授の「東日本大震災により明らかになった地震火災の特徴と火災対策上の課題」、東京農工大学・中村昌允教授の「東日本大震災と化学プラント」である。

質疑応答の後、最後に、三菱総合研究所・野口和彦理事によるパネル討論のまとめとしての「安全におけるリスク論の適用と課題」の話題提供が行われ、その後、フロアを交えた活発な総合討論がもたれた。

安全の基本的側面に関する討議

最初の問題提起者の矢川教授は、構造物の強度上問題となる部分は異種材料の節合部であるという基本的な事実をJAL 123号機事故等の事例から示し、原子力のような巨大技術には“人的な継ぎ目”が多数存在していると指摘した。つまり、今回の福島原子力発電所の事故では、地震と津波を扱う土木技術者と原子力プラント本体に係

Toward the Establishment of Safety—Issues come out in the Great East Japan Earthquake and View Points for Restructuring of Safety; From a Panel Discussion in the Safety Engineering Symposium 2011: Takeshi MATSUOKA.

(2011年 8月22日 受理)

る機械、電気、原子力工学などの技術者との人的継ぎ目に問題点はなかったかの検証が必要と述べた。土木と建築でも一見外部からはほぼ同一と見られている分野も内部では全く風土が異なっている。ましてや、原子力、機械、電気との風土の違いは相当なものである。

この継ぎ目の存在の原因は、科学が分科によって進歩してきたことによる。加速度的に新領域が生まれるのは科学の発展の宿命とさえ言える。細分化しすぎた科学の弊害が顕著となり、多くの人工物でグローバルな見地からは最適でない、あるいは最悪となっている例も見られる。

細分化された知を再び統合する「知の統合」が科学の新たな発展、社会の要請に応えるために必要であり、理念だけでなく具体的な方法論と方策の提言が求められている点を強調した。「知の統合」の成功例として人文科学と情報科学の「デジタル・ヒューマニティーズ」、医学と工学における「ナノ・マイクロ・エンジニアリング」、人文・社会科学と生物学、哲学と脳科学・心理学の事例が述べられた。

明治大学の向殿教授は、安全の理念と安全目標の観点から議論を展開した。絶対安全はあり得ない、想定外は常にあり得る、人間はいつかは間違えるという基本的な立場を述べ、「安全」とは危害または損傷の危険性が許容可能な水準にあること、あるいは受け入れ不可能なリスクが存在しないことと定義されていると説明。持論である安全学の必要性を強調した。

今回の福島原子力発電所の事故についてもいわれている「想定外」であるが、多くの場合は想定した上で対応する必要がないと判断している。それはコスト/機能/リスクの大きさ等々を考慮して、ある基準(価値判断)に基づき、その対策を施す(配慮する、予想する)必要がないと判断(無視をした)しているのだと指摘した。

この判断は、価値観に基づくものである。したがって、判断の根拠、残留リスクを公開する(最悪の場合、どんなことになるかを明らかにする)必要がある。新しい条件や事実が見出された時には、早急に判断基準を見直して、新しい基準で判断すべきであると述べた。

「受動安全」は何もできなくなったら安全となり、「能動安全」は安全を保つために何かし続けることと言える。

リスクの極めて高いシステムに関する安全設計思想を明確にする必要があり、原子力発電に対する日本の選択はフェールセーフ、受動的安全の実現であり、それができないならば、原発ゼロ(全くない)という選択肢もあり得るとの意見を向殿教授は示した。

日本は安全性、信頼性を国とする選択をとり、「情報の開示・隠さない」を安全・安心の基本とすべし。

パニックに陥らない冷静な判断、国民の安全文化(安全意識、リスク感覚等)の醸成が必要である。

企業(国、事業者)は安全の達成を迫っているが、顧客(国民)は安心を求めている。安全は客観的、数量的なアプローチを目指して発展してきた、一方、安心は主観的要素が強い。そのため国と国民でかみ合わない面が存在する。今後、「最悪の場合にはこのような危害が発生するという情報が公開されていること」と「残留リスクについての理解・合意・納得等が得られていること」が必要であると指摘。

上智大学グリーンケア研究所長の高木慶子特任教授は「天災・人災の渦の中で、生きる希望を探す」の題目のもと、今回の大震災に遭われた人々の支援について述べた。会場の大多数の工学関係者とは全く異なる視点からの強烈な意見で、非常に深く考えさせられ、また反省させられた。

災害による悲嘆は種々の喪失体験から生じる。今回のような巨大災害時には重複する種々の喪失が存在する。その中で最大のものは家族との死別である。それに続いて、身体的喪失、所有物の喪失、環境の喪失、役割の喪失、自尊心の喪失、安心と安全の喪失が続く。

災害の種類によって悲嘆の状態が異なってくる。自然災害の場合は自責の念が非常に長く残り、人為的災害の場合は、加害者が存在するため複雑な悲嘆状態が長引き、身体的障害の発生、病気となる場合もある。

悲嘆者への支援の根本は、悲嘆者に寄り添うことにある。寄り添うとは悲嘆者のすべてを受け入れることであり、悲嘆者を評価しないことである。寄り添うことにより悲嘆者の話をすべて聴くこととなる。人は話すことにより気持ちが落ち着き、考えがまとまり、生きる力と意味が湧いてくる。

次善の支援方法は、サポートグループ、自助グループへの参加である。同じ体験をした者同士で体験を分かち合うことで心が癒される。

災害で受けた心の傷の癒し・希望の発見は、大自然、文化芸術、宗教的儀式、人類の歴史的遺産等により達成されると述べ、次の2つの歌詞を会場に流し、寄り添う心の本質を示した。

「故郷—ふるさと—」、「You Raise Me Up」

福島第一原子力発電所事故に関する討議

福島第一原子力発電所事故の原因となった地震のハザード評価の課題について、防災科学技術研究所の藤原広行領域長より話題提供があった。

防災科学研究所の地震観測網の紹介とそれによる東日本大震災地震の地震動分布の広がりの様子が動画で示された。さらに、地震による地盤のすべり量分布図、地震の概要が示され、本地震の最大すべり量は25 mであった。

阪神・淡路大震災を契機として、地震調査研究推進本部が政府の機関として設置され、平成21年7月には250

mメッシュの「全国地震動予測地図」が、Web上で地震ハザードステーション(J-SHIS)として公表されている。

評価対象の地震の一つは海溝型地震、もう一つは活断層による地震である。海溝型の地震に関しては、地震の発生域と規模、そこで発生する地震の繰り返し間隔に関しては、ある程度解明できたとの思い込みがあり、今回の東日本大地震を予測していなかった。今回の地震動の発生を考慮した予測地図が、現在更新されている。

数百年あるいは千年以上の間隔を持って発生する地震は、仮にその規模が大きくても、対策を講ずるべき地震としての優先順位は、相対的に低く見積られる傾向があった。数千年に1度くらいの頻度の事象までを考慮に入れた海溝型地震の評価がなされていれば、今回のM9.0の地震そのものの予測は無理としても、ある程度の規模の地震を想定することができ、それらに基づいた対策を立案することの可能性はあった。

ハザード評価の本質的に難しい部分は、不確実な部分をいかに評価するかということで、いわゆる専門家と呼ばれる人々が集まると、わかっている部分をいかに詳細化し精密化するかという議論に置き換わる場合が多く、ここに落とし穴があった。

今後の海溝型地震の長期評価の高精度化として以下の点が示された。(1)過去の地震の規模や活動についての高精度評価のため、津波堆積物調査、海域における活断層調査等の成果をより積極的に活用、(2)プレート運動におけるひずみや応力等の現状をより高精度で把握し、評価するため、海底の地殻変動等の調査観測の結果の積極的活用、(3)プレート領域間で連動する地震について、領域間の相互作用も考慮した評価、(4)防災に活用されるよう、評価の内容や示し方の検討、(5)津波について、事例整理だけでなく、津波高さや浸水域等を評価する方法や、その示し方の検討。

次に、本学会副会長の澤田隆氏より福島第一原子力発電所事故の概要が説明され、会場の参加者全員が現状の原子炉状態について共通の認識を持つことができた。

まず、福島第一発電所の位置、概略仕様、構造の説明があり、事故の原因となった地震動の観測値が示された。2, 3, 5号機で基準地震動を上回っていた。

津波高さは、福島第一では設計津波水位を大きく上回る15mであった。津波来襲後のサイトの写真が示され、海水ポンプ、重油タンクが流失していることが見て取れた。

地震直後、全炉でスクラム成功。一方、外部電源は喪失、全号機で非常用DGの自動起動が行われた。1号機は非常用復水器が自動起動、2, 3号機は隔離時冷却系を手動で起動した。

津波後、1～4号機の非常用DGが機能喪失し、全交流電源喪失の状態となる。原子力プラントの過酷事故を

評価するMAAPコードによると、炉心損傷時刻は、1～3号機でそれぞれ、事故発生後4時間、77時間、42時間と推測されていることが紹介された。現状(7月7日現在)ではいずれも燃料の大部分は原子炉圧力容器内にとどまり、冠水して固体状態で冷却されている。今後、大規模な放射性物質放出につながるような事象の進展はないと考えられると報告された。

原子力事故収束のロードマップとして、当面の取組みとその意味、その後の長い道のりの説明がなされ、すべての事後処理には10～30年を要するとのことであった。

さらに福島第一原子力発電所事故に関連して、元東芝の技術者であった芝浦工業大学の後藤政志非常勤講師から「原子力プラントの安全性」の題目で議論がなされた。

福島原子力発電所事故では、止める、冷やす、閉じ込めるという3原則がくずれ、原子力安全システムが崩壊し過酷事故(シビアアクシデント)となってしまった。起こりえないはずのシビアアクシデントが起きてしまった以上、小手先の対策では無理。抜本的な安全対策、プラントの安全設計の見直しの必要がある。

今回の事故では格納容器は一時的に危ない状態となったと認識しているとのことであった。また、格納容器ベントは究極の選択で、意図的に放射能をまき散らすことになるとの指摘がなされた。

福島事故は直接的には地震と津波だが、それに機器のトラブルと人為的なミスが重なったことが原因で発生した。シビアアクシデントの発生確率が小さいとして無視したことが最大の問題であった。

以上の議論に基づいて、原子力プラントについて、「最大規模の地震に対する全プラントの評価を実施すべき」との提言をはじめとして、主として技術的側面についての多数の緊急提言が後藤氏より出された。

福島原子力発電所事故による放射線影響が多くの国民の大関心事となっているが、この面について日本アイソトープ協会の佐々木康人理事長より「放射線健康影響と防護体系」という説明がなされた。

放射線の健康影響には2タイプがある。一つは、症状、徴候が現れる身体的障害(確定的影響)で、1シーベルト以上で現れ、症状ごとに「しきい線量」が存在する。

もう一方は将来、がんが発生する可能性(リスク)が高まるかもしれない影響(確率的影響、晩発影響)で「しきい線量」がないと仮定して扱う。現在、問題となっているのはこの低線量の確率的な生物影響である。現状では十分な知見がないので、生物影響機構についての細胞・遺伝子レベルの研究を進める必要がある。

わが国の放射線防護管理規制は、ICRPの勧告、IAEAの提案する基準に基づいて作られている。

放射線被ばくは、①職業被ばく、②公衆の被ばく、③患者の医療被ばくに分類されており、各分類の線量は加算しないこととなっている。被ばく状況も①計画被ば

く状況、②緊急時被ばく状況、③現存被ばく状況に分類されている。

新しい線源の導入や古くからの被ばくを低減するに当たっては利益>損失を達成させる必要がある。また、各状況における被ばく線量の管理は、線量拘束および参考レベルを用いてALARA(as low as reasonably achievable)原則を用いる。今回問題となっている非常時(緊急時被ばく状況)の対応では、①重篤な身体的影響の回避(2,000ミリシーベルト以上)、②予測線量、回避線量、残存線量の推定・初期対応を実施する。

対応作業者の参考レベルは

<100→<500→<1,000ミリシーベルト

公衆の参考レベルは 20~100ミリシーベルトの範囲内で決める、となっている。

内部被ばくの対応は以下の原則に基づいて行う。(a)放射能汚染物に触れない。摂取しない(吸入、経口摂取、傷)、(b)摂取量と放射性同位元素(RI)の種類同定、(c)生理的モデルを用いて算出した換算係数を用いて全身の被ばく線量(実効線量)と臓器線量(等価線量)の推定(預託線量)を実施、(d)低減化の実施(ヨウ素剤、プルシアンブルー、下剤、利尿剤、キレート剤等)。

復旧期においては、現存被ばく状況を1~20ミリシーベルトの範囲内でそれぞれ実現すべき。

以上、最新の国際知見に基づいた放射線被ばくの管理基準の説明が行われ、現在、国民が関心を寄せている原発事故による放射線レベルの意味の理解にとって有意義な情報となった。

地震および津波の被害に関する討議

東京海洋大学の岡安章夫教授からは、津波被害の実態報告と津波対策の観点からの安全再構築の提案があった。

東北太平洋沖の過去の大きな地震には1611年慶長三陸、1896年明治三陸(M 8.5)、1933年昭和三陸(M 8.1)があり、津波被害では869年の貞観津波、1960年のチリ津波があった。古文書、堆積物の調査から1000年に1回程度の津波があると推測される。

今回の津波波源域は震央を中心として南北550 km、東西200 kmであることが示された。津波は上側に載ったプレートの東方向へのすべりとともに海水が上方へ持ち上げられることにより発生した。沖合に設置されたGPS 波浪計ではいずれもピーク時に7 mほどの潮位上昇がみられている。

波浪警報は、14時49分の第1報では岩手県3 m、宮城県6 m、福島県3 m、茨城県2 mであったが、15時14分の第2報ではそれぞれ6 m、10 m以上、6 m、4 mに修正され、15時30分の第3報ですべて10 m以上となった。その時点で津波はほぼ到達していた。

津波痕跡高は岩手、宮城県海岸でほとんどのところが

20 mを超え、ところにより40 mに達する遡上高が見られた。岩手県、宮城県、福島県の海岸堤防・護岸約300 kmのうち約190 kmが全壊、半壊してしまった。

人口に対する死者・行方不明者の率は大槌町10.5%、陸前高田市9.1%、南三陸町6.9%、女川町9.1%であった。

航空写真、地図、現地被害写真を用いて陸前高田市、大槌町、山田町の被害状況が説明され、そのなまなまし、被害の大きさが改めて実感させられた。

土木学会津波特定テーマ委員会の報告に基づく以下の提案が紹介された。(1)津波のレベルを2種類設定する。一つは海岸保全施設で対応する津波(津波防護レベル)、もう一つは街づくりと避難計画をあわせて対応する津波(津波減災レベル)である、(2)海岸保全施設を一定程度超えて越流した場合も破壊・倒壊しにくい施設設計をする。復興において配慮すべきこととしては、(3)津波の高さを精度よく確定することは限界がある。随時見直しが必要、(4)盛り土構造の活用、地域計画、土地利用規制による多重的な防護機能が必要、(5)避難計画は津波減災レベルを基本として再構築する、等が挙げられた。

京都大学防災研究所の田中哮義教授からは地震時の火災についての貴重な報告があった。

大地震時には同時的に火災が多発することは過去に頻繁に経験され、記録も多く残っている。しかし、海洋プレート型地震に伴う火災の記録は少なかった。今回の地震は、海洋プレート型巨大地震における火災の様相に接した初めての震災といえる。津波被害に比較して注目度は低いものの、発生した実に様々なタイプの火災は多くの課題を提起している。

津波と関係しない従来型地震火災として関東内陸部の出火データをみると、地震動による家屋被害の程度に対しての出火数は阪神大震災における神戸市での出火に比較して10~1,000倍も大きい。今後の分析が必要である。

津波が大きく関与し、広域に延焼拡大した火災は岩手県から宮城県にかけての三陸沿岸域に集中している。

気仙沼市の大規模火災では、湾上を火のついたオイルが漂流し、湾の奥に流れ着き、津波で浸水した市街地に入り込むことで、大規模な市街地火災をもたらした。

大槌町、山田町、田老地区の火災は、津波で流されてきた家屋や種々の瓦礫、車両などが、津波の引いた後に可燃物の堆積として市街地上を一面に覆い尽くし、その中に何らかの理由で火のついた瓦礫が元となり火災が始まった。最初は火災ではなく、通常なら簡単に消火できるが、消防車も消火栓も使えず、津波の危険の中では成す術もないうちに拡大して、津波に耐えた家屋も巻き込みながら拡大してしまった。

石巻の門脇地区では、住民が避難のために乗ってきた乗用車が多数駐車されていた。そこに津波が押し寄せてきたため、車が激しくぶつかり合い、出火したといわれ

る。その火は避難場所である小学校に延焼し、拡大して市街地火災となっている。

多くの産業火災も発生している。千葉県市原市の石油コンビナート以外に製線工場で危険物施設火災が起こっている。宮城県では仙台市の印刷工場および石油コンビナート、石巻市の女川発電所タービン建屋、多賀城市石油コンビナートの製油所、福島県では南相馬市の原町火力発電所のオイル棟の火災などが起こっている。

津波と火災と、一見相反するような災害事象が同時に、また特に稀でもなく起こり得ること、津波により市街地は道路も空き地も建物の敷地も区別なく可燃物に覆い尽くされること、そこに火災が発生したら消火の術がないこと、避難場所あるいは津波避難ビルといわれるものは火災の危険を無視して計画してはならないこと、等々の重要な教訓が示された。

東京農工大学の中村昌允教授からは、今回の地震による化学プラント事故についての報告と提言があった。

鹿島コンビナートで、コンビナートの原料供給源のプラントが停止したために、約2ヶ月間の操業停止となったが、下流側の被害は比較的軽微であった。被害が目立ったのは液化化地域にあったプラントである。

千葉コンビナートでは、コスモ石油を除いて大きな被害はなかった。コスモ石油千葉製油所での火災は、今回の地震による化学プラント火災では最大規模でLPG球形タンク15基が損傷し鎮火まで10日間を要した。出火原因は、定期点検中で比重の大きな水をタンクに満たしていたため、地震時大きな荷重が加わり、タンク支柱が座屈し配管を損傷。漏れ出たガスが爆発炎上したためである。

この事故については、緊急遮断弁が常時「開」の状態になっていたことが判明し、経済産業省より、高圧ガス保安法により緊急遮断弁の設置を義務付けられている事業者に対し、緊急遮断弁は、必要な時に安全に、かつ、速やかに閉止できる状態を維持しなければならないという注意喚起が行われた。

市原のコンビナートでも液化化が発生し、護岸、配管に大きな被害が出ている。

今回の地震による化学プラント事故の特徴は、製造設備本体は比較的軽微な被害であった。これは耐震強度を余裕をもって設計していたことが大きい。配管はゆがんだり湾曲をした部分もあるが、漏えい等にはつながっていない。これは配管が熱膨張等を考慮した緩みをもって作られていたためである。

中村教授からは以下に記す提言が出された。

すべてのリスクに対応する設備投資は難しいので、残存リスクの情報共有と重大事故にならない対策が必要である。自家発電の非常用電源の整備が重合反応装置の暴走を防ぐうえで重要であり、今回は、過去の重大事故の教訓を活かして対策が取られており大事に至らなかつ

た。

リスクベース管理を実施しているが、その基準の見直しが必要である。深刻な被害とは何かの合意を形成し、これについてはいかに発生頻度が低くても許容不可としなくてはならない。

緊急時には専門的事項の決断は現場に委ねることをルール化しておくべきである。

安全におけるリスク論の適用と課題

最後に、三菱総合研究所の野口和彦理事によりリスクマネジメントの観点からの総括的な議論がなされた。

「津波への対応」、「原子力の安全対策」など、直接経験した事象に対する断片的な反省に終始すると、別のタイプの災害事象での大きな被害を防げない。日本における安全、リスク対応の構造的課題が、今回の大災害の発生という厳しい現実として突きつけられたという視点で議論する必要がある。

今回リスクマネジメントは機能していたかとの問題提起がなされ、「経験してきたことや対策可能な事象のみをリスクとして取り上げてきた。」「リスク分析において、多様な専門知識とその知識を総合的に活用する技術とシステムが十分でなかった。」点が指摘された。

また、安全を前提としたリスク評価が往々にして実施されている。その結果、低減できないリスクの存在が許容できなくなり、危機管理の対象とすべきリスクとして取り上げない、危機的リスクを「想定外」と捉えるという現象が起こってしまう。

野口氏も向殿教授と同様に、想定外について2種類の想定外があることを指摘している。つまり、「想定できなかった」と「想定しなかった」である。

低減対策がなくとも、保有しているリスクを認識していないと、危機管理はできない。少しでも被害を小さくするという意識が重要である。リスクマネジメントは、社会生活を営むためにどのようなリスクなら許容可能であるかを決定するために実施するものである。

リスクマネジメントのあり方として野口氏は以下を指摘している。

多様な視点でリスクを認識することができるリスク分析の専門家を育てる必要がある。ここでいう専門家はPSAの専門家ではない。

リスクを発見し対応するということは、限られた知識の中でもこのようなリスクを発見できたという謙虚さが前提であり、見つけた以外のリスクがないことを保障するものではない。

リスクマネジメントや安全分野では、社会の変化に遅れをとらないように、常に技術向上の継続が重要である。

まとめ

本年7月に開催された「安全工学シンポジウム2011」において緊急に企画されたパネル討論内容をまとめた。

パネル討論は5時間にわたる長時間であり、話題は大きく3つのグループに分けられた。「安全の基本的側面」、「原子力事故関連」、「地震・津波による被害」である。最後に、リスクマネジメントの観点からの示唆に富んだ議論と全体を通じての総合討論が持たれた。

各話題提供者からそれぞれの専門に基づく貴重な事実関係の報告および今後の対策に関する提言が出された。これに対し会場の参加者からも熱心な意見が多数出た。紙面の関係、および大変多岐にわたる議論が持た

ため討論の詳細は記載できなかったが、本文記載内容から当日の会場の雰囲気をご推察頂ければ幸いである。

今回のパネル討論では各種の重要な問題提起がなされているので、この企画を今回限りにせず、安全、リスクマネジメント推進の輪を広げていきたいと考えている。日本原子力学会をはじめ関係各学協会のご協力を頂きたいとお願いする。

著者紹介



松岡 猛(まつおか・たけし)
宇都宮大学
(専門分野/関心分野)システム工学, 信頼性工学/各種大規模システムの安全性確保

学会誌への投稿原稿の扱いについて —採否に関する判断条件—

編集委員会

学会誌への投稿は、それ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(投稿)原稿を提出していただくことにしています。

編集委員会では、会員の皆様から寄せられる投稿原稿、投書には、謙虚に耳を傾け誠実に対応するようにしています。

記事の内容については、著者に責任がありますが、学会誌へ投稿された原稿を記事として掲載するかどうかについては、編集委員会が判断いたします。編集委員会が下記のいずれかに該当すると判断した記事提案書(場合によっては、記事提案書に基づき執筆された投稿原稿)については、記事として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) 文章に論理性がなく、意味不明な場合。
- (3) 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。
- (4) 良識に欠けると思われる意見。例えば、個人あるいは組織への中傷・誹謗、一方的な極め付けなど。
- (5) 美醜、好悪に類する判断が求められている場合。
- (6) すでに掲載された記事と同様の内容を繰り返し主張している場合。
- (7) 商業的な広告・宣伝などを目的とする場合。
- (8) 会員にとって掲載する意味がない。
- (9) 内容がタイムリーでない。
- (10) 内容が正しいかどうか判断できない。
- (11) 関係する機関の了解が得られていない。
- (12) 余り期間を空けない同一者からの投稿。

(註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。

(註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。また、編集委員会に対する常識を欠いた要求*が求められた場合にも返答いたしません。

*例えば、極めて短い期限での返答の要求、守秘義務に反する情報開示を求めたりする場合など。

(2009年7月3日改定)

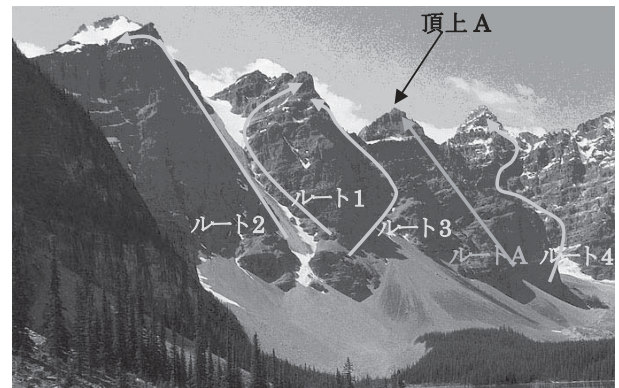
解説シリーズ

「ヒューリスティックな最適化手法とモデリング」の開始にあたって

我々の日常生活において、「最適化」という概念はいたるところで使われている。例えば、個人の仕事の最適なスケジュールリングや、目的地までの交通機関の最短経路での乗り継ぎの選択などである。このために様々な電子的なツールもあるが、何もこれらに頼らずとも人間の経験則による処理能力で十分な対応が可能な場合も多い。一方、総合技術といわれている原子力分野でも、当然のことながら、機器設計の最適化、原子燃料の炉心内配置の最適化、放射線防護の最適化、核燃料サイクル全体の最適化など、さまざまな最適化問題が存在する。事実、当学会の会誌および和文論文誌の2000年以降の記事を検索しても、そのタイトルに「最適化」という用語を用いている論文や解説記事だけでも十数件にのぼる。これらが扱っている最適化問題は、いずれも大規模・非線形・多目的・階層構造・不確実などの特徴を持ち、それらの問題に対して効率よく解を見つけ出すためには、コンピュータを用いた高度な情報処理手法を必要とする場合が多い。

ところで、こうした最適化のための計算手法は、旧来のもは数理的な根拠に基づいて理論的な洞察を経て開発されてきたのに対して、近年では、科学技術上の複雑な最適化問題の解法にも、必ずしも数学的な理論に頼らずに、人間や生物の挙動を単に模倣した手法により解を探索する「発見的な手法」が登場し、実際問題に適用されてきている。これらの手法は、ギリシャ語の「発見する」という意味の“heuristiskein”を語源とし、「ヒューリスティック手法」とよばれ、解の探索性能を比較的簡便に向上させるアルゴリズムの総称として、多くの人にすでに認知されている。そこで、本解説シリーズでは、このような実際の原子力分野における複雑な最適化問題にも有用なヒューリスティックな最適化手法とモデリングについての紹介を行う。

このような「ヒューリスティック最適化手法」は、等高線が地図にない未開地における、複雑な地形をした未踏の最高峰を極める登山に喩えることができる。例えば、図に示すような登山をイメージしてほしい。従来手法では、ある地点から一人の登山者が正確な地図情報をもとに標高の高い方へと少しずつ上っていき(例えば図のルートA)、一つの頂上(頂上A)にたどり着いたら、最高峰へは到達しないままそこで登山を終了してしまうことに相当するのに対し、ヒューリスティック手法では、複数の登山者がそれぞれ異なるルート(例えば図のルート1~4)で登りながらも、それら全員が登山隊の構成員として情報交換しあいながら同時に挑んで、未知の最高峰へ到達しようとすることに喩えることができる。このとき、どのような組織体制でどのような情報交換を行



未踏の最高峰を目指す登山

うと最高峰に効率的に到達できるかは、それを保証する理論はまったくなく、まさに経験的知識によらざるをえない。そのため、シミュレーションを通して効率的に評価するためのさまざまな手法が提案され、準最適解を効率よく見つけることが可能である。また、こうした手法の理解には、大学の一般教養レベルの数理的知識で十分であり、また計算実行のためのプログラミング能力も初等レベルの技能で十分であるという利点もある。

今回、第2回および第3回の解説において、ヒューリスティックな最適化手法としてその計算性能がある程度評価されているPSO(Particle Swarm Optimization)やDE(Differential Evolution)について紹介し、また後半において、これらを用いたモデリング手法について解説する。モデリング手法では、理数系ならばどなたも熟知している「最小自乗法」とこれらのヒューリスティック手法を組み合わせることの新たな可能について紹介する。

ユーザにとって理解が平易でしかも性能がある程度優秀なヒューリスティックな手法を、原子力分野の最適化問題に適用してカスタマイズしていくことは、原子力分野の発展に有意義であると思われる。とくにいかなる自然災害があろうとも、2度と重大な事態に至らない原発システムの構築のために、本手法がロバストな構造物のレイアウト最適化に応用されることを願っている。なお、今回の第1回目は、最適化問題と手法を理解するために必要な基本的な知識の確認であり、本解説の本題には至らないものであるが、その内容は大学2・3年生を対象とした「最適化」に関する教科書の冒頭の部分をさらに丁寧に解説してあり、大学入学時点の数学の知識ないしは大学1年で習得する数学の知識で十分理解していただけのものと信じている。

(慶応義塾大学・相吉英太郎, 千葉大学・岡本 卓, テブコシステムズ・小林容子)

解説シリーズ

ヒューリスティックな最適化手法とモデリング

第1回 最適化問題とは

慶應義塾大学 相吉 英太郎,

千葉大学 岡本 卓, (株)テプコシステムズ 小林 容子

「最適化問題」は、システムの設計・計画・運用などの場面において定式化され、それを解く計算手法である「最適化手法」が数多く開発されて実際に用いられている。4回にわたる本解説では、最適化問題に関する基本的な解説から始め、近年話題となっているヒューリスティックな手法を古典的手法と対比する形で解説するとともに、最適化手法の基礎的な応用分野の一つである、関数や写像を近似するモデリング手法まで言及する。第2回以降の内容は次のとおりである。「第2回 古典的手法と Particle Swarm Optimization」, 「第3回 遺伝的アルゴリズムと差分進化法」, 「第4回 ヒューリスティック手法を用いたモデリング」。

I. はじめに

最適化問題は、原子力分野(たとえば文献1))を含む様々な工学の分野で定式化される問題であり、これを解く最適化手法は、最適化問題の中でも解法が確立されている線形最適化問題や凸型最適化問題(これらの定義などは後述)を対象として、数理的な解析を踏まえて計算性能の優れた手法が開発され、身近なソフトウェアのソルバ(Solver)機能として実装されるに至っている。たとえば、

- (1) Microsoft Excel 2010のソルバ機能
- (2) GNU Octave の Optimization 機能
- (3) サイバネットシステム社の Optimus

などをあげることができる。これらは、より複雑な関数を有する問題、より変数の数が大きい大規模な問題が、より早い計算時間で、より精度よく解けるように、つねに改善されている。しかし、すべての問題に対して、万能な手法やソルバというものではなく、解きたい問題に適切な手法を選ぶ必要がある。

ここで、機械部品の設計問題のベンチマークである「コイルバネの最適設計問題」を取り上げてみよう²⁾。この問題は、本解説の[付録1]で記したような問題で、バネのワイヤの直径、コイルの直径、アクティブなコイルの数を設計変数として、コイルバネのたわみやせん断応力に関する機械的制約を考慮しながら、バネ全体の重量を最小化する問題である。この問題を、上記のソルバ機能の

第1表 コイルバネ最適設計問題をソルバで解いた結果

試行	ワイヤ直径	コイル直径	コイルの数	重量
No.1	0.05713	0.50232	6.04111	0.01318
No.2	0.05098	0.34001	12.35579	0.01269
No.3	0.06669	0.83628	2.43038	0.01648
No.4	0.05170	0.35689	11.29302	0.01268

1つを利用して、4通りの初期試行点を与えて解いた結果を第1表に示す。この表のように、この問題では、与える初期試行点が異なると、試行ごとに、異なる解候補が得られてしまい、ここに最適化の難しさの一つがある。これは、凸性の仮定のもとで、局所的最適解が唯一であることを前提としているため(凸性や局所的最適解の解説については後述)、複数の局所的最適解の中で一番良い大域的最適解を抽出する機能が、古典的な最適化手法には本質的にはないためといえる。これに対して、大域的最適解を得る保証が数理的にはなされていないにも関わらず、大域的最適解かそれに準じる良好な解を実用的な計算時間で発見的(Heuristic)に探索することができる手法が、「ヒューリスティック最適化手法」と称して、近年提案されてきている。

本解説では、原子力分野のシステムの設計・計画の場において、最適化手法を少しでも役立てていただくことを目的として、第1表のように異なる解候補が得られてしまう理由や、このような状況でも、優れた解を得ることが期待されるヒューリスティックな最適化手法を可能なかぎりわかりやすく解説する。

Heuristic Optimization and Modeling(1): Optimization Problem: Eitaro AIYOSHI, Takashi OKAMOTO, Yoko KOBAYASHI

(2011年 5月13日 受理)

II. 最適化問題と最適解

1. 最適化問題の記述

一般に最適化問題は、

「 M 個の不等式

$$g_m(x_1, \dots, x_N) \leq 0, \quad m = 1, M$$

および、 L 個の等式

$$h_l(x_1, \dots, x_N) = 0, \quad l = 1, \dots, L$$

を満たす N 種類の変数の組 (x_1, \dots, x_N) の中で、関数

$$f(x_1, \dots, x_N)$$

を最小にするような最適解 (x_1^*, \dots, x_N^*) を見つけよ」

と説明され、簡潔に

$$\min_{x_1, \dots, x_N} f(x_1, \dots, x_N) \quad (1a)$$

$$\text{subj. to } g_m(x_1, \dots, x_N) \leq 0, \quad m = 1, \dots, M \quad (1b)$$

$$h_l(x_1, \dots, x_N) = 0, \quad l = 1, \dots, L \quad (1c)$$

と表現される。ここで、 x_1, \dots, x_N は決定変数、 f は目的関数とよばれる。また、(1b)式は不等式制約条件、(1c)式は等式制約条件とよばれ、両者をまとめて単に制約条件とよび、 $g_1, \dots, g_M, h_1, \dots, h_L$ を制約関数とよぶ。記述を簡略化するために、ベクトル表示、 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)^T$ 、 $\mathbf{g} = (g_1, \dots, g_M)^T$ 、 $\mathbf{h} = (h_1, \dots, h_L)^T$ を用いると、問題(1)は

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad (2)$$

$$\text{subj. to } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}, \quad \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$$

と記述される。なお、本解説では、最小化問題をつねに想定するが、目的関数 $f(\mathbf{x})$ を最大化する場合は、 $-f(\mathbf{x})$ を最小化する問題を考えればよい。

ところで、関数そのものは実数値をとる変数空間全域で定義されても、変数空間のある領域以外では最適化問題として意味をもたない場合がある。このような最適化問題として意味を持つ変数の領域を X で表すことにする。たとえば、すべての変数が負の値をとらない場合は、

$$X = \{\mathbf{x} | x_n \geq 0, n = 1, \dots, N\} \quad (3)$$

すべての変数が閉区間 $[0, 1]$ に限定される場合は、

$$X = \{\mathbf{x} | 0 \leq x_n \leq 1, n = 1, \dots, N\} \quad (4)$$

である。さらに、すべての変数が 0 または 1 の 2 値しかとらない場合は、

$$X = \{\mathbf{x} | x_n = 0 \text{ or } 1, n = 1, \dots, N\} \quad (5)$$

であり、すべての変数が整数値しかとらない場合は、

$$X = \{\mathbf{x} | x_n \in \{0, 1, \dots\}, n = 1, \dots, N\} \quad (6)$$

と表すことができる。このように、変数のとりえる値が、問題(2)の不等式や等式以外にも限定される場合、

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad (7)$$

$$\text{subj. to } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}, \quad \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{x} \in X$$

と記述する。なお、問題(7)における集合

$$S = \{\mathbf{x} \in X | \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}, \quad \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}\}$$

は、許容領域(許容集合)または制約領域(制約集合)といい、その要素を許容解という。

ところで、最適化問題は、

(1) 変数が連続値をとる連続変数最適化問題

(2) 変数が離散値をとる離散変数最適化問題(たとえば X が(5),(6)式の場合)

に大別されるが、本解説では、連続変数最適化問題とこれらに関連する話題のみを扱うことにする。なお、離散変数最適化問題については、たとえば文献3)を参照してほしい。また、離散値と連続値の両方をとる2種類の変数からなる混合変数最適化問題もあるが、本解説では扱わないことにする。

関数 $f, \mathbf{g}, \mathbf{h}$ が、たとえば、

$$f(\mathbf{x}) = (9 \quad -4) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1 & 6 \\ 5 & 7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -1 \\ 4 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 3 & -1 \\ 9 & 8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 8 \\ -6 \end{bmatrix}$$

のように線形関数で与えられるとき、問題(7)は線形最適化問題とよばれ(一般には「線形計画問題」ともよばれるが、本解説では「最適化問題」という用語を用いることで統一する)、これをベクトル・行列表現を用いて一般化すると、

$$\min_{\mathbf{x}} \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (8)$$

$$\text{subj. to } A\mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \quad C\mathbf{x} = \mathbf{d}, \quad \mathbf{x} \in X$$

と定式化される。ただし、標準的な線形最適化問題の場合、領域 X は、(3)式で与えられる。線形最適化問題は、企業活動や軍事活動の場において、資源(設備、労力、時間、資金、資材など)を最大限、かつ効率的に配分する問題として、いわゆるオペレーションズ・リサーチ分野で頻繁に登場する問題である。そして、この問題を解くための手法として、古典的な単体法(シンプレックス法)のほか、近年では、問題を高速に(決定変数の数 N の多項式オーダーの計算効率で)解く手法として内点法が研究され、それらは、ソルバとして実装されるに至っている(内点法については、文献4)を参照)。

また、関数 f が

$$f(\mathbf{x}) = 2x_1^2 - 10x_1x_2 + 5x_2^2 + 6x_1 - x_2$$

のように、2次関数

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^N c_i x_i = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T W \mathbf{x} + \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (9)$$

で与えられ、 \mathbf{g}, \mathbf{h} が線形関数のとき、問題(7)は2次型最適化問題(一般には「2次計画問題」とよばれるが、やはり「最適化問題」という用語を用いる)

$$\min_{\mathbf{x}} \frac{1}{2} \mathbf{x}^T W \mathbf{x} + \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (10)$$

$$\text{subj. to } A\mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \quad C\mathbf{x} = \mathbf{d}, \quad \mathbf{x} \in X$$

となる。やはり、標準的な2次型最適化問題では、領域 X は、(3)式で与えられる。さらに、線形最適化問題や2次型最適化問題を含んで、一般に、 f が凸関数で、かつ許容集合 S が凸集合(たとえば、集合 X が凸集合、 \mathbf{g} が凸関数、 \mathbf{h} が線形関数)のとき、問題(7)は凸型最適

化問題という(凸関数や凸集合の定義は[付録2]を参照)。また、問題(7)において、目的関数 f か制約関数 g, h のいずれかが線形関数でない場合、非線形最適化問題と称する。非線形最適化問題の中でも、凸型最適化問題は比較的扱いやすく、目的関数や制約関数はすべて連続微分可能であるという前提で、関数の勾配を用いた一般縮約勾配法や逐次2次計画法をはじめとした古典的手法が開発されており(なお、これらの手法の詳細の解説は、本解説の範囲を超えているので割愛する)、これらをソルバとし利用することも可能である(たとえば、Microsoft Excel 2010のソルバ機能のGRG非線形エンジンなど)。

2. 最適解の定義と性質

次回からヒューリスティックな手法について解説するが、それらの手法の開発動機や意義を説明するために不可欠な「大域的最適解」と「局所的最適解」について、それらの区別を定義の形で明確しておく。

まず、問題(7)の許容領域 S と、ある許容解 $x^o \in S$ に対し、

$$f(x^o) \leq f(x) \quad \forall x \in S \tag{11}$$

が成り立つとき、 x^o を問題(7)の大域的最適解、または単に最適解といい、 $f(x^o)$ を最適値という。また、 x^o のある近傍 $B(x^o; r)$ が存在して

$$f(x^o) \leq f(x) \quad \forall x \in S \cap B(x^o; r) \tag{12}$$

が成り立つならば、 x^o を問題(7)の局所的最適解という。なお、複数の局所的最適解が存在するとき、それらの中で目的関数をもっとも小さな局所的最適解が大域的最適解となり、もし、局所的最適解が唯一ならば、それが大域的最適解になることは自明である。

ここで、近傍 $B(x^o; r)$ とは、 x^o からの距離が $r(>0)$ 未満の x の集合

$$B(x^o; r) = \{x \mid \|x - x^o\| < r\} \tag{13}$$

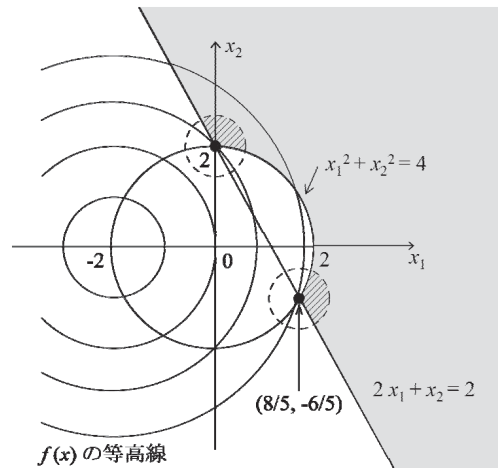
のことで、 x と x^o の距離 $\|x - x^o\|$ は、 x が連続値をとる連続変数最適化問題の場合は、 N 次元実ベクトル空間のユークリッド距離、 x が0か1しかとらない離散変数最適化問題の場合は、ハミング距離(各成分値を比較したときの値が異なる成分の数)とする。

以上のような大域的最適解と局所的最適解の区別を

〈例題1〉最適化問題

$$\begin{aligned} \min_{x_1, x_2} & (x_1 + 2)^2 + x_2^2 \\ \text{subj. to} & 2x_1 + x_2 \geq 2, x_1^2 + x_2^2 \geq 4 \end{aligned} \tag{14}$$

で明確に理解しておこう。目的関数の等高線と制約集合を (x_1, x_2) 平面に図示すると、第1図のようになる。目的関数の最小値を与える x は、 $x = (-2, 0)^T$ で、等高線は、この点を中心とする同心円で、この中心点から遠いほど関数値が大きい。また、許容領域 S は、灰色の領域となる。したがって、 $(x_1^o, x_2^o)^T = (0, 2)^T$ と $(x_1^o, x_2^o)^T = (8/5, -6/5)^T$ の2点が局所的最適解で、対応する目



第1図 〈例題1〉の目的関数の等高線と許容領域

的関数値は、それぞれ8と72/5であり、このうち目的関数の小さな前者が大域的最適解となる。局所的最適解の定義式(12)は、局所的最適解を中心とした適当な円の内部(たとえば、図中の破線の内部)を近傍 $B(x^o; r)$ とすると、その領域と許容領域 S との共通部分(図中の斜線部分)の目的関数値 $f(x)$ が、局所的最適解の目的関数値 $f(x^o)$ と比較して大きいか等しいことを意味している。このことは、第1図のように、上記の2点をそれぞれ通る目的関数の等高線の外側(2点より目的関数値を大きくする側)に、斜線部分の領域が含まれている様子からも読み取れる。この例題のように、目的関数が凸関数であっても、許容領域が非凸集合の場合には、局所的最適解が複数個存在する可能性があり、この種の問題に古典的な非線形最適化手法を適用すると、求まる局所的最適解が初期試行点によって異なることがある。

次に、許容領域が凸集合であっても目的関数が凹関数のために、複数の局所的最適解が存在する例題として

〈例題2〉最適化問題

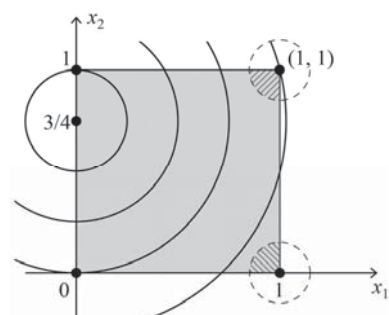
$$\begin{aligned} \min_{x_1, x_2} & -x_1^2 - (x_2 - 3/4)^2 \\ \text{subj. to} & (x_1, x_2)^T \in X \end{aligned} \tag{15}$$

をあげておく。集合 X が、

$$(a) X = \{(x_1, x_2)^T \mid 0 \leq x_n \leq 1, n = 1, 2\}$$

$$(b) X = \{(x_1, x_2)^T \mid x_n = 0 \text{ or } 1, n = 1, 2\}$$

の場合について考える。目的関数の等高線と許容領域を (x_1, x_2) 平面に図示すると、第2図のようになる。目的



第2図 〈例題2〉の目的関数の等高線

関数の最大値を与える \mathbf{x} は, $\mathbf{x} = (0, 3/4)^T$ で, 等高線は, この点を中心とする同心円で, この中心点から遠いほど関数値は小さい。したがって, 制約条件がなければ, 有限の最小値は存在しない。第2図から, (a)の場合は, 正方形領域の頂点 $(1, 0)$, $(1, 1)$ が局所的最適解であり, このうち $(1, 0)$ が大域的最適解である。これら2点が局所的最適解であることは, これらの点を中心とした小さな円を近傍として考え, その内部と正方形の許容領域との共通部分の目的関数値を考えれば明らかであり, 勾配を用いた古典的な最適化手法では, 初期探索点の与え方次第で, 2つの局所的最適解の一方が求まることになる。なお, $(0, 0)$ と $(0, 1)$ が局所的最適解でないのは, それぞれ, $x_2 = 0$, $x_2 = 1$ にそった直線上の点, それぞれの点にどんなに近い点であっても, 目的関数値をより小さくするからである。(b)の場合は, $(1, 0)$ が局所的最適解かつ大域的最適解である。 $(1, 1)$ が局所的最適解でないのは, この点からハミング距離1の距離にある $(1, 0)$ の方が, 目的関数値をより小さくするからである。

III. 関数の勾配と古典的最適化手法

本連載では, 以降, 原則として $M = 0$ かつ $L = 0$ の場合, すなわち制約条件が存在しない無制約最適化問題の場合を扱い, 最適化問題を単に

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad (16)$$

と記述する。そして, 変数 \mathbf{x} は連続値をとる連続変数最適化問題を考える。

関数 $f(\mathbf{x})$ が \mathbf{x} において微分可能な関数であれば, 勾配

$$\nabla f(\mathbf{x}) = \left[\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_N} \right] \quad (17)$$

が存在し,

$$\nabla f(\mathbf{x}^\circ) = \mathbf{0} \quad (18)$$

すなわち,

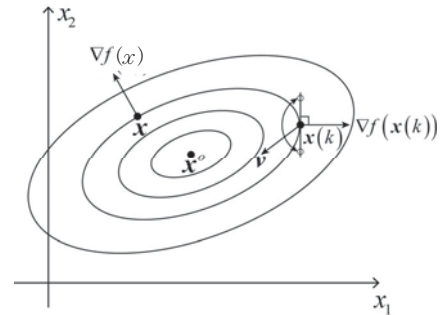
$$\frac{\partial f(\mathbf{x}^\circ)}{\partial x_n} = 0, \quad n = 1, \dots, N \quad (19)$$

が, \mathbf{x}° が問題(16)の局所的最適解であるための必要条件となる。また, 関数 f が凸関数のときには, (18)式(または(19)式)は, \mathbf{x}° が問題(16)の大域的最適解であるための十分条件にもなる。

一方, 勾配 $\nabla f(\mathbf{x})$ は, 点 \mathbf{x} を通る関数 f の等高線に垂直な変位ベクトルで表される(第3図)。このような勾配の性質を利用して, 第 k イテレーションでの試行点 $\mathbf{x}(k)$ を, その点での勾配 $\nabla f(\mathbf{x}(k))$ との内積が負, すなわち

$$\nabla f(\mathbf{x}(k)) \cdot \mathbf{v} < 0 \quad (20)$$

を満たす方向 \mathbf{v} (降下方向という)に, つぎの試行点 $\mathbf{x}(k+1)$ をとる反復解法が多く考案され, 勾配法と称されている(第3図参照)。勾配法には, 最急降下法・共役勾配法・準ニュートン法と称される手法があり, これらは,



第3図 勾配ベクトルと降下方向

関数 f が凸関数のときにかぎり, 有効な手法である。

本解説では, 勾配を用いた古典的な最適化手法が扱いにくい, 目的関数 f が凸関数でない場合を想定する。そこで, 最適化手法の性能評価に用いられるベンチマークとよばれるテスト最適化問題のうち, 非凸な無制約最適化問題の例題を2つあげておく。

〈例題3〉 Rosenbrock 関数最小化問題

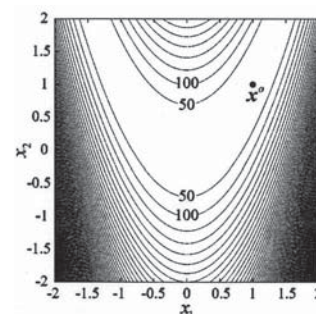
$$\min_{x_1, x_2} 100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (21)$$

〈例題4〉 Six-hump Camelback 関数最小化問題

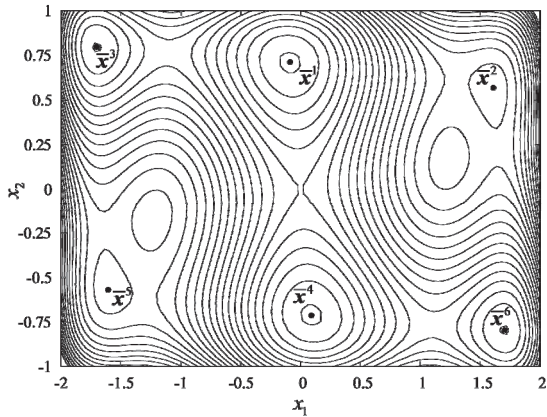
$$\min_{x_1, x_2} \left[4 - 2.1x_1^2 + \frac{1}{3}x_1^4 \right] x_1^2 + x_1x_2 + (-4 + 4x_2^2)x_2^2 \quad (22)$$

〈例題3〉の目的関数は, 曲線 $x_1^2 = x_2$ にそって湾曲した谷をもつ非凸関数で, $\mathbf{x}^\circ = (1, 1)^T$ が大域的最適解となる。等高線を示した第4図からわかるように, 第1項の大きな係数100によって, 等高線に垂直な方向は, きわめて急峻な斜面となり, 勾配を用いた古典的な最適化手法では解きにくいベンチマークとなっている。この例のような谷をもつ非線形性の強い関数を有する最適化問題を, 関数の勾配を用いないヒューリスティックな手法で効率よく, かつ精度よく解くことが近年の課題となっている。

また, 〈例題4〉の目的関数は, その等高線を示した第5図からわかるように, 凸凹状の非線形性の強い関数であり, x_1, x_2 軸に対称な6つの局所的最適解をもち, $\mathbf{x}^\circ = (\pm 0.0898, \mp 0.7127)^T$ (第5図の $\bar{\mathbf{x}}^1$ と $\bar{\mathbf{x}}^4$) が大域的最適解となる。このような複数の局所的最適解をもつ問題に対して, 古典的最適化手法を利用したソルバを用いると, 初期試行点に応じた局所的最適解の1つしか求める



第4図 〈例題3〉の目的関数の等高線 (\mathbf{x}° が大域的最適解)



第5図 〈例題4〉の目的関数の等高線(\bar{x} が局所的最適解)

ことができない。複数の局所的最適解の1つである大域的最適解を、比較的効率よく、かつ高い確度と精度で求める手法を大域的最適化手法と称するが、そのための有望な手法として、近年話題となったヒューリスティックな手法について、次回以降解説していくことにする。

— 参考資料 —

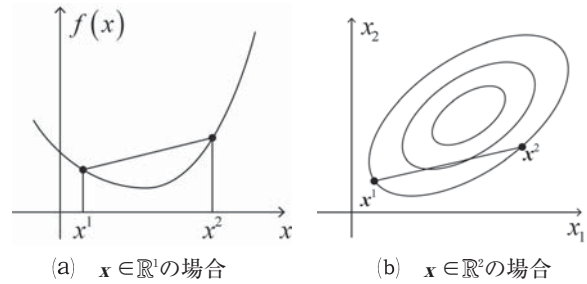
- 1) 矢島直, 齊藤一弥, 海老塚佳衛, “GRG 非線形計画法による燃焼特性の最適化—Pu-239の産出量を最大にする高速増殖炉の制御棒計画”, 日本原子力学会誌, 17, 493 (1975).
- 2) J. S. Arora, *Introduction to Optimum Design Second Edition*, Elsevier Academic Press, (2004).
- 3) 久保幹雄, J. P. ペドロソ著, メタヒューリスティクスの数理, 共立出版, (2009).
- 4) 小島政和, 水野真治, 土屋隆, 矢部博, 内点法(経営科学のニューフロンティア9), 朝倉書店, (2001).

〔付録1〕

〈例題5〉 コイルバネの最適設計問題

$$\begin{aligned} & \min_{x_1, x_2, x_3} (x_3 + 2.0)x_2x_1^2 \\ & \text{subj. to } 1.0 - \frac{x_2^3x_3}{71875x_1^4} \leq 0 \\ & \frac{x_2(4x_2 - x_1)}{12566x_1^3(x_2 - x_1)} + \frac{2.46}{12566x_1^2} - 1 \leq 0 \quad (23) \\ & 1.0 - \frac{140.54x_1}{x_2^2x_3} \leq 0 \\ & \frac{x_2 + x_1}{1.5} - 1.0 \leq 0 \end{aligned}$$

x_1 がバネのワイヤの直径, x_2 がコイルの直径, x_3 がアクティブなコイルの数を示す。目的関数は、コイルバネの重量であり、1番目の制約は、バネのたわみに起因する制約、2番目は、バネのせん断応力に起因する制約である。



第6図 凸関数

〔付録2〕

集合 X に対して,

$$\lambda x^1 + (1 - \lambda)x^2 \in X, \forall x^1, x^2 \in X, \forall \lambda \in [0, 1] \quad (24)$$

が成り立つとき、集合 X は、凸集合であるという。これが、集合 X の境界に凹みがない状況であることは、容易に理解されよう。

凸集合 X 上で定義された関数 $f(x)$ について

$$f(\lambda x^1 + (1 - \lambda)x^2) \leq \lambda f(x^1) + (1 - \lambda)f(x^2), \quad (25)$$

$$\forall x^1, x^2 \in X, \forall \lambda \in [0, 1]$$

が成り立つとき、関数 X 上で凸関数であるという。これを感覚的に表現すれば、関数 $f(x)$ のグラフの2点を結ぶ線分が上側にその曲面上側になる、いいかえれば、関数が下に凹んでいる状況である。 $x \in \mathbb{R}^1$ の場合を第6図(a)に示す。また、 $x \in \mathbb{R}^2$ での (x_1, x_2) 平面上の等高線では、第6図(b)のように、同じ等高線上の2点を結んだ線分が、その等高線の内側(関数の値を小さくする側)に位置する状況となる。

著者紹介



相吉英太郎(あいよし・えいたろう)

慶應義塾大学

(専門分野/関心分野) システム工学とくに最適化の理論と手法、その他ニューラルネットワークなど



岡本 卓(おかもと・たかし)

千葉大学

(専門分野/関心分野) システム工学, 最適化理論, 非線形力学, ソフトコンピューティング, 複雑ネットワーク



小林容子(こばやし・ようこ)

(株)テプコシステムズ

(専門分野/関心分野) 最適化応用, 知識工学, 原子炉システム制御

連載
講座材料が支える原子力システム
より高い信頼性のために

第4回 低合金鋼

京都大学 エネルギー理工学研究所 木村 晃彦

軽水炉压力容器用の低合金鋼は、大型の構造物の製造性(溶接性や加工性)および靱性確保を主眼に開発された。実用化後はさらに耐照射性能を向上させるため、不純物制御技術を取り入れた我が国の製鋼技術をもとに、一層の高性能化が進められてきた。压力容器は、軽水炉発電プラントの高経年化を支える重要な機器であり、中性子照射による靱性劣化の程度を高精度に把握し、その結果を科学的に解明し、随時、脆化予測式に反映させていくことが肝要である。

I. 開発の足どり

1. 軽水炉压力容器用低合金鋼の開発

我が国の軽水炉压力容器は、合金元素としてマンガン(Mn)、モリブデン(Mo)、ニッケル(Ni)をそれぞれ1%前後含む、いわゆる低合金鋼に分類される鉄鋼材料で製造されている。1970年代始めの初期プラント以来、大型化に伴う厚肉化への対応のため、鋼種や製造法は多少変遷してきているが、靱性や溶接性を重視し、一貫して(1.15/1.50)Mn-(0.40/0.70)Ni-(0.45/0.60)Mo系の低合金鋼が用いられている。ASTM規格では、A 533 B Cl. 1あるいは、A 508 Cl. 3に相当する鋼材である。また、特に炉心領域材に対しては、中性子照射脆化を防止するため、高純度化等による改良が図られた¹⁾。

原子炉压力容器鋼の仕様や規格・要件は、ASME Codeや通商産業省告示などの規制や規格の改訂によって変遷してきた。日本初の軽水炉であるJapan Power Demonstration Reactor(JPDR)の原子炉鋼材は我が国で昭和36年に製造され、その鋼材の仕様は米国のASTM A 302 Bの規格をベースとし、低温脆性の向上を目的として0.40~0.70% Niが添加された改良Mn-Mo鋼(通称A 302 B mod.)である。我が国の商業用原子力発電炉1号機である東海発電所1号機用压力容器用鋼材も同年製造されている。この鋼種はJIS SB 46相当の英国規格COLTUF 28相当材である。日本原子力発電機敦賀1号機はJPDRと同じ沸騰水型軽水炉(BWR)であり、鋼種はJPDRと同様に、鋼板はA 302 B mod.、鍛造品はA 336 mod.であるが、靱性確保のための熱処理として、それ

ぞれASME Code Case 1332, 1339で規定された水焼入焼戻処理が適用された。東京電力(株)福島1号機の原子炉では、鋼板はA 533 B Cl. 1、鍛造品はA 508 Cl. 2の敦賀1号機の要求性能と同等の新しい規格が適用され、その後製造された美浜2号、浜岡1号ほかに使用された鋼材も同一の仕様である。1974年にASME A 533 B鋼の銅(Cu)およびリン(P)濃度の規制が強化(それぞれ、0.12 wt%Cuおよび0.017 wt%P)され、さらに1983年にはASTM:Mn-Mo-Ni鋼(A 533 B Cl. 1, A 508 Cl. 3)のCu(0.12 wt%), P(0.015 wt%), S(0.018 wt%)の規制が強化された。

2. 低合金鋼の組織

压力容器鋼は、いわゆる低合金鋼の調質処理材であり、連続冷却変態線図から、鋼組織としては上部ベイナイトが主で、部分的にマルテンサイトも存在する²⁾。ベイナイトは旧オーステナイト粒界に炭化物の析出がなく、マルテンサイトほどではないが転位密度が高い。焼き戻し処理として、通常、640°C以上で数時間の熱処理を行うため、鉄の炭化物であるセメントイトが溶出し、替わってモリブデンの炭化物(Mo₃C)が転位線上などに整合析出する。この時、不純物として混入している銅やリンの挙動に着目すれば、いずれも焼き戻し温度での平衡を保った後、空冷によって凍結されるが、厚板鋼材内部では冷却速度が比較的遅いため、部分的には粒内析出や粒界偏析が生じていると推測される。

3. クラッド材

压力容器鋼の高温水中における腐食を抑制するため、その内表面はオーステナイト鋼(SUS 309 L)で覆われている。したがって、压力容器の経年変化を考える場合、压力容器鋼の照射脆化のほかに内表面クラッド材の水環境効果と照射効果の重畳効果を考慮する必要がある。オーステナイト鋼の照射誘起応力腐食割れ(IASCC)はよく知られた現象であり、類似の現象がクラッド材にも発生する可能性はある。また、クラッド材中のフェライ

Materials for Nuclear Energy Systems—Towards High Reliability(4); Low Alloy Steel : Akihiko KIMURA.

(2011年 4月1日 受理)

第1回 軽水炉用ステンレス鋼

第2回 高速炉炉心用改良ステンレス鋼

第3回 Ni基合金

ト相はクロム濃度が高く、照射脆化を起こしやすいため、割れの起点となる可能性もある。いずれにせよ、仮にクラッド材に割れが生じて、そのまま連続的に压力容器鋼の割れを引き起こすかは、压力容器鋼の照射脆化の程度に依存すると考えられるが、これまで国内においては压力容器のノズル近傍のクラッド材やパイプ溶接部にひび割れが生じているが、压力容器鋼そのものの割れは観察されてはいない。このように、压力容器における材料課題は、結局、压力容器鋼の照射脆化に帰結すると考えられるため、その照射脆化予測が重要になってくる。

II. 中性子照射による脆化

1. 照射脆化の評価手法

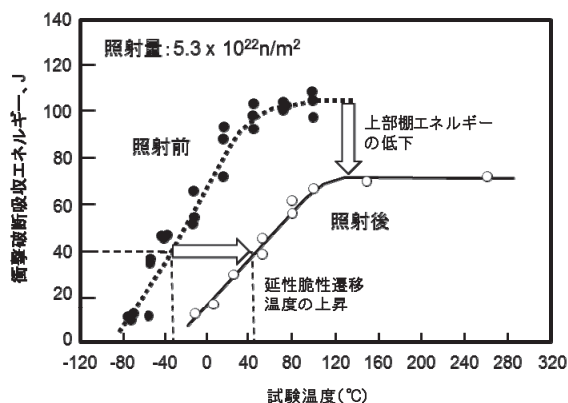
一般に、低合金鋼は、低温になると脆性的に破壊する性質(低温脆性)を持っており、その脆性は延性脆性遷移温度(Ductile-Brittle Transition Temperature: DBTT)と上部棚エネルギー(Upper Shelf Energy: USE)という指標で評価される。压力容器鋼の照射脆化は、第1図に示すようにDBTTの上昇とUSEの減少により評価される。DBTTの上昇、すなわち照射脆化は、照射による硬化あるいは粒界偏析などに起因することが知られている。前者は硬化型脆化、後者は必ずしも硬化を伴う必要がないため、非硬化型脆化と呼ばれている。硬化型照射脆化の場合は、照射硬化が照射脆化の指標となるため、照射硬化機構の解明のための研究が実施されてきた。一方、非硬化型照射脆化の場合は、不純物リン(P)などの粒界偏析による粒界脆化を伴うことから、Pの粒界偏析量への中性子照射の影響が調べられてきた。

2. 硬くなれば脆くなる(照射硬化と照射脆化)

照射硬化を引き起こす因子としては、不純物銅の析出(Cu クラスタ)とそれ以外の損傷組織(マトリックス損傷)との2つに大きく分類されている。

(1) Cu クラスタ

不純物銅を比較的多く(0.2~0.3 wt%)含んでいる場



第1図 压力容器鋼の中性子照射による脆化(延性脆性遷移挙動の変化: DBTTの上昇とUSEの低下)

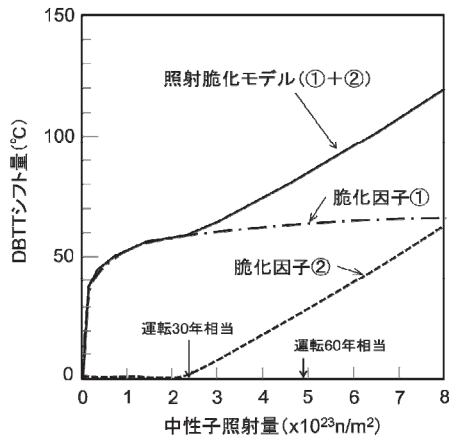
合、鉄中の銅の溶解度は290℃においては0.01 wt%以下であるため、熱力学的に予測される銅の析出による脆化が問題となる。析出したCu クラスタは転位運動の障害物として作用し、硬化の原因となる。1 nm以下の直径の場合は粗大化とともに当初のbcc構造から9R構造へと変化し、さらに粗大化に伴い、fcc構造へと結晶構造が変化するとされている³⁾。Cu クラスタによる強度の増加分、 $\Delta\sigma_Y$ を予測するモデルはRussel-Brownモデルとして広く知られており、Cu クラスタによる照射硬化はクラスタの密度とサイズおよびクラスタのせん断弾性係数に依存するとされているが、せん断弾性係数がクラスタの構造に依存することに留意する必要がある。Cu クラスタの析出は、照射量が $10^{23}n/m^2$ 以下(運転開始後数年)で完了するため、寿命延長時においては、不純物銅による脆化がさらに進むことはないと推測される。

一方、低合金鋼の合金元素であるNiとMnの場合、鉄中溶解度は添加量よりも大きいため、一般には析出は生じない。しかし、詳細な分析を行った結果、Cu クラスタの周辺にNiやMnが集積していることが明らかとなっている⁴⁾。このNiやMnの集積の駆動力については検討の余地が残されているが、高照射領域においてCu クラスタが成長した後に、Cu クラスタへの偏析の自由エネルギーが増大したためと考えられる。また、MnやNiなどのCu以外の元素からなるクラスタは、マトリックス損傷に分類されており、遅発型(late blooming)クラスタと呼ばれることがある。

(2) マトリックス欠陥

不純物銅の少ない我が国の压力容器鋼においては、銅析出物以外のマトリックス欠陥による脆化がより重要である。鋼中不純物銅原子の数には限りがあるため、銅の照射下析出は照射量が $10^{23}n/m^2$ 以下で完了することがこれまでの研究において示唆されている。一方、転位ループやマイクロポイドなどに代表されるマトリックス欠陥などの弾き出し損傷は、照射量が $10^{23}n/m^2$ 以上でも発達する可能性があるため、寿命延長時にはこれら欠陥集合体の蓄積効果を考慮する必要がある。压力容器鋼における代表的な欠陥集合体としては、マイクロポイドや格子間型転位ループ(I-loop)があげられる。前者は陽電子消滅測定(PAS)からその存在が示唆されており、後者はTEMにより直接観察されている。PASを用いたFeモデル合金の照射後焼鈍実験により、マイクロポイドは350℃(30 min)の焼鈍で分解するが、照射硬化の回復は400℃の焼鈍で初めて生じることから、照射硬化の主な支配因子をI-loopと考えることは妥当である⁵⁾。このI-loopの蓄積は中性子照射量 $10^{24}n/m^2$ まで継続すると推測されるため、寿命延長時における脆化の主要因となる可能性がある⁶⁾。

このことは不純物銅が比較的多く存在する場合にもあてはまる。第2図は、照射脆化の照射量依存性を模式的



第2図 中性子照射による脆化(DBTTのシフト量)の照射量依存性を示すモデルの例

に示している。例えば、不純物銅による脆化のように照射の初期に脆化が飽和するような場合は曲線①で示される。一方、マトリクス損傷による脆化は照射の後期になって顕著になる傾向にあり、曲線②で示される。①と②を合成したものが全体の脆化量となる。この図はわかりやすく説明するために一例として示したものであるが、軽水炉運転後30年程度までは曲線①の支配因子に着目するだけで全体の脆化量をほぼ予測することが可能であるが、それ以降では曲線②の支配因子が脆化の進展を決定することになる。すなわち、照射脆化支配因子が照射量に依存する場合は、照射脆化予測も照射量に依存したものになる。運転60年後の(①+②)と①とのずれの大きさは、さほど顕著ではないが、高経年化に向け、モデルの高度化が望まれる。

3. 不純物Pによる脆化(照射促進粒界偏析と照射脆化)

不純物であるリン(P)の濃度は、ASMEでは0.015 wt%以下と規制されており、粒界脆化の観点からは緩い規制になっている。つまり、このような少量であっても290℃で平衡状態が達せられれば、粒界面のほとんどがPで覆われ、顕著な粒界脆化の生じることが計算上示されるためである。しかし、非照射の290℃ではPの拡散が遅いため、60年程度では、平衡状態に到達せず、Pの粒界偏析も実際にはほとんど無視できる程度である。

一方、照射下においては、照射誘起拡散によるPの粒界偏析の促進が推測されるが、材料試験炉を用いた加速試験結果からは、この程度のP濃度の圧力容器鋼においては、照射量が $10^{24}n/m^2$ 程度までは粒界脆化はそれほど顕著ではない。P濃度が0.011 wt%の圧力容器鋼に中性子照射や熱時効を施した場合の衝撃試験における粒界破面率(破面全体の面積に対する粒界破面の面積の割合)とその時のDBTTの上昇分の相関を求めた研究によると⁷⁾、450℃で1万5千時間の時効でも粒界破面率は約6%と小さく、DBTTの上昇は約40℃であることや、290

℃で $1.1 \times 10^{24}n/m^2$ の中性子照射を行った材料ではDBTT上昇量が130℃に達しているが、粒界破面率は3%未満と小さく、脆化のほとんどが硬化型照射脆化に起因しているとされている。この結果からは、P濃度が0.011 wt%程度の圧力容器鋼の場合、60年程度の照射期間中に生じたPの粒界偏析によるDBTTの上昇は10℃以下ということになる。今後は、Pの照射誘起粒界偏析への照射速度の影響の調査が必要である。

Ⅲ. 圧力容器の監視試験

1. 監視試験法

(1) 破壊強度の監視

原子炉圧力容器の非延性破壊防止のための解析は、ASMEコードSec. IIIをベースとして作られたJEAC 4206「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」の付録1「非延性破壊防止のための解析法」に基づいている。これは原子力機器のフェライト系耐圧部材に対する許容荷重を求めるための解析法を線形破壊力学に基づいて示したものである。すなわち、対象とする部材について、まず使用温度における破壊靱性を求め、つぎに部材の厚さに対応する最大仮想欠陥を定め、これから限界の使用条件(許容荷重、応力、温度等)を定める方法を採用している。換言すれば、対象とする欠陥に作用する応力から求めた応力拡大係数(K_I)等が材料の破壊靱性 K_{Ic} より小さくなるような条件を選ぶことにより、非延性破壊が防止されるとしている。

(2) 予測式

圧力容器鋼の照射脆化は、落重試験で得られる関連温度、RTNDT(Reference Temperature Nil Ductility Transition)やシャルピー衝撃試験(衝撃負荷時の破断吸収エネルギーを測定)によるDBTTの照射によるシフト量(ΔT)で評価されており、照射脆化の予測は、このシフト量の経時変化、すなわち照射量依存性を予測することである。関連温度移行量と延性脆性遷移温度のシフト量(ΔT)の間には直線関係が認められている。さらに、これまでの研究から、 ΔT と照射硬化量(ΔHV)との間にも直線関係が認められている。

我が国において用いられている脆化予測式は、日本電気協会の電気技術規程原子力編「原子炉構造材の監視試験方式」⁸⁾に示されている。 ΔRT (NDT)予測値は、 ΔRT (NDTc)計算値とマージン(10℃)の和として表され、 ΔRT (NDTc)計算値は、炉型(PWR, BWR)、公称照射温度、中性子束、NiおよびCuの含有量、定格負荷相当年数(EFPY)に依存し、附属書表B-2100に与えられている。予測式の適用範囲として、検討対象となる元素(Cu, Ni, P)の含有量、中性子照射量($1.0 \times 10^{21} \sim 1.0 \times 10^{24}n/m^2$, $E > 1$ MeV)および公称照射温度(270~290℃)が明記されている。 ΔUSE 予測値(%)に関しては、中

中性子照射量, Ni および Cu の含有量から求める計算式が示されている。 ΔRT (NDT) 予測値と同様に, ΔUSE 予測式の適用範囲として, 検討対象となる元素 (Cu, Ni, P) の含有量, 中性子照射量および公称照射温度が明記されている。

米国においては, 1974年に ASME A 533 B 鋼の Cu および P 濃度の規制が強化(それぞれ, 0.12および0.017 wt%)され, 翌年, 米国 NRC が Regulatory Guide 1.99 で, Cu と P 含有量をパラメータとした脆化予測式を制定した。1983年には, ASTM: Mn-Mo-Ni 鋼 (A 533 B Cl. 1, A 508 Cl. 3) の Cu (0.12), P (0.015), S (0.018) の規制がさらに強化された。現在では, 照射脆化機構を反映させた ASTM E 900-02⁹⁾ の中性子照射脆化予測式が用いられている。

2. 照射環境と脆化予測課題

加圧水型軽水炉 (PWR) において压力容器が被るとされる中性子照射量は, 寿命延長時において, $1 \times 10^{24} n/m^2$ に近づくと想定される。材料試験炉と商用炉を比較すると, 損傷速度に大きな開きがあり, 材料試験炉を用いた照射実験が, 加速試験と呼ばれる所以となっている。一方, DBTT に対しては, フラックスの影響が見られなかったとの報告¹⁰⁾もある。ただ, 照射量は高々 $1 \times 10^{23} n/m^2$ ($E > 1$ MeV) であり, フラックスも現実の压力容器, 特に BWR のフラックス領域とはかけ離れている。より低フラックス域で照射量が $1 \times 10^{24} n/m^2$ に近づいた時のフラックス依存性に関しては, データの少ないのが現状である。しかし, BWR 並みのフラックス域において比較的高照射量 ($1 \times 10^{24} n/m^2$) での照射実験を行うことは極めて長期間を要し, 現実的ではない。そこで, 今後は監視試験の果たす役割が重要となっている。監視試験片の装荷位置は, 実際の压力容器の照射条件に相当する位置および加速照射位置と指定されており, それらの結果を比較することは極めて重要である。また, 材料試験炉の照射キャプセルは炉心に近く, 压力容器は炉心から遠いため, 中性子のエネルギースペクトルも異なっている。冷却水による減衰を考慮した場合, 中性子の減衰は γ 線に比べ大きい。このように, 炉心での加速照射場と压力容器の照射場とでは, 中性子のエネルギースペクトルおよび照射される粒子の寄与割合が異なっていることも考慮する必要がある。

3. 監視試験における留意点

(1) 監視試験片の不足

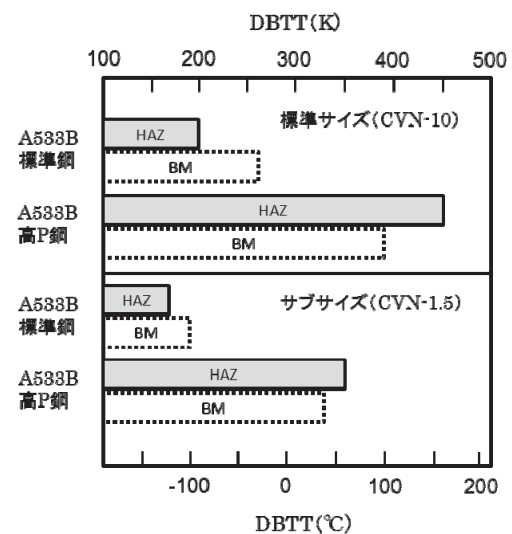
監視試験は, その時点における照射脆化を評価し, その後, 運転を継続した場合の压力容器の健全性が維持されるかの判断基準を与えるものである。長寿命化に伴う問題の一つに監視試験片の不足があげられる。その解決方法としては, 監視試験済み試験片を再利用する方法であり, 溶接を用いて同形状の試験片を再生する方法や

試験片を微小化する方法が考えられている。前者においては溶接に伴う照射欠陥の回復, 後者においては衝撃特性の試験片サイズ効果が課題となる。再生試験法において再度利用可能な試験片は, 脆性破壊した試験片のみに限られ, 遷移領域や延性領域で破断した試験片は塑性変形のため使用できない。したがって, 12本の試験片で DBTT や USE を求める場合, 再生可能な試験片は, 多く見積もっても 4本に限られ, 溶接による再生法では, 再生される試験片数は 8本 (標準試験片 1本あたり 2本) であり, 1組12本の試験片数に及ばない。一方, 試験片の微小化の場合, これまでの実績から, 1/3サイズ ($3.3 \times 3.3 \times 20$ mm³) が望ましく, 再生される試験片数は 32本 (標準試験片 1本あたり 8本) となり, 1組10本から11本とすれば, 3回分の監視試験がその後, 可能となる。

微小試験片を適用する場合の課題は, DBTT と USE の試験片サイズ効果であり, これを表記する経験式が標準サイズを含めた照射材に対して適用できるかを確認する必要がある。具体的には, 標準サイズの試験片を照射して DBTT や USE を求め, 脆性破壊した試験片から新たに 1/3サイズの試験片を再生し, DBTT と USE を求めて比較し, 類似の相関性を確認しておく必要がある。

(2) 溶接部の監視

電気技術規程 (JEAC) では, 監視試験片として, 母材 (Base Metal (BM)), 溶接金属および溶接熱影響部 (溶接境界から母材側 1 mm: HAZ 試験片と呼ぶ) が指定されている。溶接部における照射脆化の研究¹¹⁾によると, 最近の A 533 B 鋼 (Cu: 0.05 wt%) においては, 照射前後のいずれにおいても HAZ 部の DBTT が母材に比べて低いことが示されている。第 3 図は, A 533 B 鋼の母材部 (BM) と熱影響部 (HAZ) の DBTT を比較したもので, 標準サイズ (10 mm 角) およびサブサイズ (1.5 mm 角) の試験片を用いて測定した結果である。標準鋼の場合



第 3 図 2 種類の压力容器鋼の母材部 (BM) および熱影響部 (HAZ) における DBTT の比較

合は、どちらのサイズでも HAZ 部の方が母材部に比べ DBTT が低い。一方、不純物 P を 0.3 wt% 添加し、脆性域での破壊様式が粒界破壊を示す鋼材においては、母材が HAZ 部に比べて DBTT が低くなっている。

開発初期の低合金鋼は、不純物 P や S を含み、熱影響部で溶接割れを起こしたと考えられる。したがって、原子炉用の圧力容器鋼溶接部への照射影響が懸念されたことから、HAZ 部の監視試験が重要視されていたと推測できる。しかし、その後の鋼材の高純化と監視試験の結果から、HAZ 部の損傷は顕著ではないことが明らかになりつつある。これまでに装填されている熱影響部試験片の照射脆化が母材や溶接金属に比べ小さいものであるならば、HAZ 部の監視を母材で代替することも可能であろう。また、試験片サイズの小型化は最弱部位の決定に影響を及ぼさないこと、および標準サイズとの間に一定の相関を見出すことが可能であることから、監視試験に微小試験片を用いる方法も効果的である。

(3) 非破壊試験法

試験片不足の解消のもう一つの手段は、非破壊検査法の開発である。非破壊で DBTT と USE を求めるためのさまざまな技術開発研究が行われており、興味深い現象が見出されているが、いまだ発展途上の研究であり、学問的な基盤が構築されているわけではない。今後の重要な研究課題であり、データの蓄積や理論付けが必要である。非破壊検査法では、測定する物性値と脆化の度合い (Δ DBTT) との間に直接的な相関が必要となる。測定する物性値は脆化支配因子のプロープであり、仮に照射が進むにつれて支配因子が変われば、脆化との間の直接的な相関を逸してしまう可能性があるため、非破壊検査の方法も照射量に依存することになる。

(4) 統合研究

経年に伴う軽水炉発電プラント機器構造材料の特性変化を監視および予測する技術の開発研究は重要である。実機材料の経年変化を効率的・効果的に監視する技術は、現場における運転管理において、極めて重要であり、破壊検査および非破壊検査法の技術開発は重要なミッションの一つである。また、検査法のみならず、検査すべき箇所や検査すべき時期を効率的・効果的に選定する能力が不可欠であり、ここでは材料学にとどまらず、機械システム、溶接熱輸送などの総合力が問われており、材料とシステムの統合的理解が重要となる。

V. 最後に

低合金鋼は初期プラント以来、軽水炉圧力容器用として使用され、その間、材料の仕様や製造法に改良が加えられると共に、長期間の実炉使用や基礎的な研究の結

果、その性能予測が可能な状況になりつつある。しかしながら、科学的根拠に基づいた材料挙動の機構論的理解のための学術的課題もいくつか残っている。照射脆化予測に関しては、(1)高照射量領域での脆化の照射量依存性と脆化支配因子の解明、(2)溶接熱影響部の照射脆化評価、(3)商用炉・研究炉データ相関等である。特に、脆化支配因子が運転年数30年程度の低照射量領域とそれ以降の高照射量領域とで変化する可能性もあり、その実証試験とそれに応じた予測式の高精度化が望まれる。これまでの研究から、不純物銅濃度の少ない我が国の圧力容器の照射脆化は、60年間の使用に十分に耐えると予測されるが、安全性を確認するための監視試験は、今後も継続されなければならない。効率的・効果的監視試験の実施には材料挙動の機構論的理解が不可欠である。

大型の鍛造品を不純物制御しながら製造する最先端技術は、我が国が得意とする製鋼技術の一つである。大型鋳塊の鍛造技術の導入による厚板溶接線の長さの減少や鋼材の高純度化による靱性の向上は、軽水炉圧力容器の高性能化および長寿命化を可能にしており、軽水炉発電プラントの高経年化を今後も支えていくであろう。

—参考資料—

- 1) 小平恒夫, 原子力工業, 30[4], 81(1984).
- 2) W.C. Leslie, *The Physical Metallurgy of Steels*, McGraw-Hill, 287(1981).
- 3) P.J. Othen, et al., *Philos. Mag. Lett.*, 64, 383(1991).
- 4) C. A. English, et al., ASTM STP 1405, p.151(2001).
- 5) T. Kudo, et al., *Mater. Trans.*, 45[2], 338(2004).
- 6) K. Yabuuchi, M. Saito, R. Kasada, A. Kimura, *J. Nucl. Mater. Lett.*, 414, 498-502(2011).
- 7) A. Kimura, et al., *21st Effects of Radiation on Materials*, ASTM STP 1447, 565(2004).
- 8) 電気技術規程 原子力編「原子炉構造材の監視試験方法」, JEAC 4201-2007, 原子力規格委員会, 日本電気協会.
- 9) ASTM E 900-02, (2002).
- 10) 土井謙次, 曾根田直樹, 恩地健雄, G.R. Odette, G.E. Lucas, 原子力学会「2001年秋の大会」予稿集, 第三分冊, 671(2001).
- 11) B. Kim, H. Mitsui, R. Kasada, A. Kimura, Submitted to *J. Nucl. Sci. Technol.*

著者紹介



木村晃彦(きむらあきひこ)
京都大学 エネルギー理工学研究所
(専門分野)原子力/核融合炉材料。鉄鋼材料の照射影響や環境強度の研究、酸化物分散強化鋼の開発研究、W の照射影響や接合技術開発、超臨界圧水腐食、照射脆化や水素脆化の研究等。

ATOMOS Special

東欧編

世界の原子力事情 第18回

ハンガリー—パクシュ原子力発電所増設の動き

京都大学 杉本 純

オーストリア南東の隣国ハンガリーは、中欧を代表する内陸国で、面積は日本の約4分の1、人口は約一千万人、中央をドナウ川とティサ川が縦断し、その流域には肥沃な平地が広がっている。気候は、湿気の多い大陸性気候である。ハンガリーは、石油、天然ガス、石炭などの国内エネルギー資源が乏しく、輸入エネルギーへの依存度が大きい。1970年代にエネルギー自給率が約65%から約50%に低下して以降、現在まで同程度で推移している。輸入エネルギーの多くを占めるロシアからの供給が90年代後半から減少してきており、国内資源の開発促進、エネルギー利用効率の改善、環境対策(特に石炭)の推進などが課題となっている。

ハンガリー唯一の原子力発電所は、首都ブダペストの南約100 km パクシュにある(第1, 2図参照)。原子炉は旧ソ連製の44万 kW 級の加圧水型炉である。1966年に締結されたハンガリーとソ連間の条約に基づき、1974年に1号機および2号機、また1979年には3号機および4号機の建設がそれぞれ開始され、1983年から1987年にかけて4基の原子炉が順次、営業運転を開始している。2007年の国内総発電量を見ると、原子力は、58%の火力について第2位の37%を占めている。バイオマスが4%弱、水力が0.5%と続いている。2010年のデータでは、総発電量に占める原子力の割合は42%と上昇しており、世界で5位、我が国の29%同13位より上にある。稼働率も2008年から2010年の平均値は88%と我が国の63%より高く、欧州8位である。この良好な運転実績の要因として、燃料交換に伴う運転停止期間が短いこと、従業員の訓練が充実していることなどが挙げられている。

安全性については、欧州の原子力規制当局からなる西欧原子力規制者会議は「パクシュ発電所の安全レベルは、西側と同等」との結論を2000年に提出している。ウィーンに本部のある国際原子力機関(IAEA)には、ハンガリーは我が国と同様、1957年の創設時から加盟している。そのため、2007年5月に50年間の原子力協力を記念した特別イベントがブダペストで開催され、IAEA 事務次長からパクシュ発電所でのIAEA レビューミッションの受入れ等によるプラント改善や規制の検討への貢献が賞賛されている。2009年に実施された世論調査に

Hungary—Seeks to expand nuclear power at Paks: Jun SUGIMOTO.

(2011年 9月23日 受理)



第1図 パクシュ原子力発電所 ©MVM



第2図 パクシュ原子力発電所の展示館 ©MVM

よれば、ハンガリー国民の77%は原子力を支持し、55%は新規の商業用発電炉をパクシュ発電所に設置することに賛成し、さらに60%は、将来予想される電力需要増に対し原子力で供給すべきと回答している。

2009年3月、ハンガリー政府の経済委員会は全会一致で、また、環境委員会は賛成15、反対1、棄権1で新規原子炉の設置を検討することを議会に提言した。これを受けて議会は、賛成330、反対6、棄権10で、新規原子炉をパクシュ発電所に設置する準備作業を進めることの基本承認を可決した。これに基づき、国として最終的な意志決定を行うため、資金調達、技術仕様、環境影響、炉型、建設主体の選定等について、専門家による検討が進められてきた。

福島事故後の2011年6月になって、フェツレギ国家開発大臣は、「ハンガリーは国のエネルギー需要を満たすため原子力が必要である」と記者会見で発言している。「個人的見解」と断りつつも「ハンガリーは電力源として

原子力から撤退する状況にはない」と述べている。大臣によれば、2011年後半に政府は、現在進められているストレステストの結果も考慮してパクシュ発電所の新規増設による規模拡大を含めたエネルギー戦略を議論することになっている。パクシュ発電所を所有するハンガリー国営電力によれば、バルカン半島西部とルーマニア地域におけるエネルギー供給者としての役割を果たしたいと記者会見で述べている。また、政府はパクシュ発電所の4基の原子炉の各20年の寿命延長を期待していると付言した。

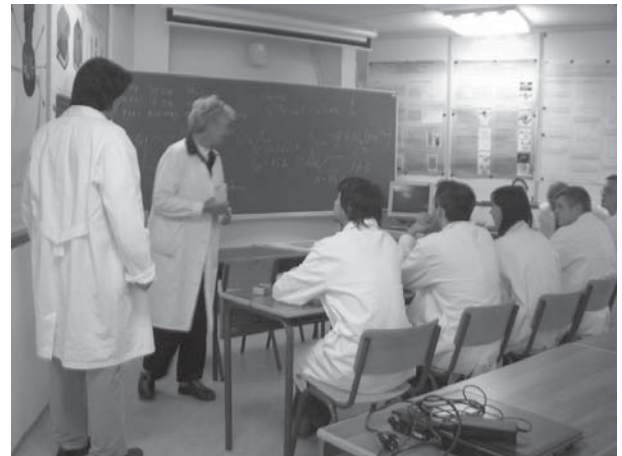
余談であるが、1997年9月、筆者が副議長を務めるOECD/NEAのシビアアクシデントに関する国際研究協力計画技術会合への出席のためブダペストを初訪問した。ウィーンに似た美しい街並みであるが、特にドナウ川に架かる有名な鎖橋の夜景がきれいだったのが印象的だった(第3図参照)。宿泊したホテルはドナウ川に浮かぶ船だったが、そのホテルの経営が北朝鮮系だったことに少々驚いた。同じ社会主義国だった頃の関係が続いていたのだと思う。2008年5月には、原子力人材育成に関する国際会議がブダペストで開催され、再訪することができた。会議では、パクシュ発電所の技術者から発表があり、筆者がたまたま質問したことをきっかけとして知り合いになった。今回のパクシュ発電所の写真やハンガリーの世論調査等のデータは彼を通じて入手することが



第3図 ブダペストの鎖橋の夜景



第4図 ブダペストでの国際会議



第5図 研究炉を用いた学生の教育

できた。会議終了後の技術ツアーでは、物理学中央研究所のブダペスト研究炉を見学した。多くの学生が研究炉を利用した研修を実施しているのをまのあたりに見て、人材育成に力を入れていることが良く理解できた。これらの写真もご参考までに掲載させて頂く(第4, 5図参照)。

参考：World Nuclear Association Web.

著者紹介

杉本 純(すぎもと・じゅん)

本誌, 53[8], 588(2011)参照.

原発事故の事実を知りたいという大きなニーズが

信頼回復に向けた活動を望む声も多く (9月号の Web アンケート結果)

「原子力学会誌」9月号に対して寄せられた Web アンケートの結果をご紹介します。今回は85名の方から、回答がありました。

1. 高く評価された記事

Web アンケートでは、各記事の内容および書き方について、それぞれ5段階で評価していただいています。9月号で高く評価された記事について、「内容」、「書き方」に分けてそれぞれ上位4件をご紹介します。

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	解説	福島第一原子力発電所事故の分析と今後に向けて	4.48
2	巻頭言	東日本大震災と原子力発電に思うこと	4.30
3	解説	土壌における放射性核種の挙動特性	4.12
3	談話室	飯館村訪問記—みんなで作っぺ!	4.12

第2表 「書き方」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (書き方)
1	巻頭言	東日本大震災と原子力発電に思うこと	4.10
2	談話室	飯館村訪問記—みんなで作っぺ!	4.06
3	解説	福島第一原子力発電所事故の分析と今後に向けて	3.95
4	ATOMOS Special	世界の原子力事情(16)東欧編 ブルガリア	3.75

今月号も福島原発事故に関連する記事が上位を占めています。

2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 今月号は、福島原発事故で知りたかったことがかなり載っていた。
- (2) 解説「福島第一原子力発電所事故の分析と今後に向けて」に関して、津波による被害から、原子炉内の事象の進行及び対策について説明がなされ、非常に興味を持って読んだ。今後は、詳細な解析結果を継続して記事にしてほしい。
- (3) 福島に関連する記事に関しては、一般的なことや概念的なことだけではなく、具体的な方法やデータも提示してほしい。

3. 編集委員会からの回答

福島原発事故の関連記事については、事故事象の分析だけではなく、事故に伴う社会的側面に関する記事も増やしていく予定です。

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