

巻頭言

- 1 原子力発電，政治家と専門家の責任
葛西敬之

時論

- 2 歴史的転換軸としての「電力自由化」
電力自由化は原発を退けるだろうか。
山岡淳一郎
- 4 福島第一発電所事故について考えること—低線量放射線被曝の安全と安心
白鳥正樹

会長所見

- 6 「原子力なしで，本当に大丈夫でしょうか」—「原子力ゼロ」の新エネルギー政策に関する所見
野村茂雄

特別報告

- 12 福島特別プロジェクトの立ち上げ
福島発電所事故により放出された放射性物質の除染や復興事業が速やかに進むように，学会では「福島特別プロジェクト」を創設した。
田中 知，藤田玲子
- 14 政府の福島原子力発電所事故の調査・検証結果の報告
7月に公表された政府事故調の報告書のうち，福島第一原子力発電所1～3号機における現場対処と事前の津波対策について解説する。
越塚誠一

解説

- 25 原子力災害の再発を防ぐ(その4) —機械構造分野の今後の課題について
機器配管系の耐震設計における余裕を分析し，どこまで分かっている，どこに課題があるのかについて整理した。
岡本孝司，高木敏行，植田 進

表紙の絵(日本画) 「^{こがね}黄金の時」 製作者 藤部厚子

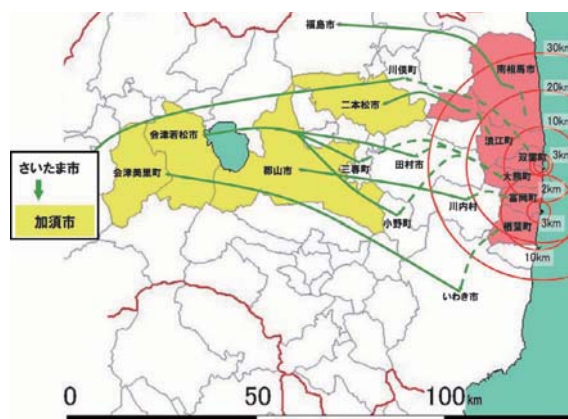
【製作者より】最近，日にする事が少なくなった梅の古木に出会い，一日の陽(ひ)が落ちる前の一瞬の光り輝く黄金(こがね)の時の様子と小さい雀の楽しそうな幸せな時間を表現しました。

第43回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

報告

- 19 福島第一原子力発電所事故による原子力災害—被災自治体等調査結果について

福島原子力事故では多くの市町村が被災し，今も過酷な状況に追い込まれている。全国原子力発電所所在市町村協議会はこの災害を検証し，今後の取り組みの方向性について報告書をまとめた。
中村 真，嶽 勤治

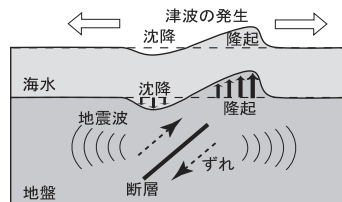


各市町の主な住民避難先

解説

- 31 原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価(第2回) —津波ハザード解析

標準委員会は津波PRA標準を策定して発行した。この標準について3回に分けて解説する。今回は津波PRA評価手法の津波ハザード解析について解説する。
松山昌史



地震津波は海底面の変形で起こる

- 36 高速炉の原子炉容器内観察・補修技術開発—高速実験炉「常陽」の復旧に向けた取り組み

「常陽」では，原子炉容器内実験装置の取扱トラブルを受け，プラント機能復旧上必要な技術開発を進めており，これらの内容を紹介します。
小林孝良

解説

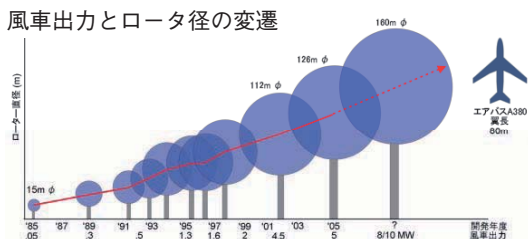
39 放射線治療・粒子線治療と日本における医学物理士教育 —第3回(最終回)

日本における医学物理士のあり方と求められる教育並びに教育プログラムの現状

現在の日本の放射線医療には医学物理の職制はない。職場がなければ有能な人材の参集を図ることはほとんど困難である。 丸橋 晃

46 風力発電の現状と今後の展望 —我が国における風力発電の動向

固定価格買取制度の施行により大量導入が期待される風力発電について、我が国における現状と今後の課題を解説する。 三保谷 明



連載講座 これからの原子カシステムを担う新原子カ材料(第2回)

52 低放射化フェライト鋼

低放射化フェライト鋼は核融合炉ブランケット構造材料として、開発が進められている。設計検討開始に値するデータは概ね整備されたが、照射後特性評価と、更なる照射データ蓄積が今後の課題だ。

谷川博康, 廣瀬貴規, 酒瀬川英雄, 谷川 尚

談話室

57 とことん語る福島事故と原子力の明日 —学生とシニアの交流成果、福島事故を市民に解説

学生とシニアの対話会

59 今わたしたちだからできること

私たち Women in Nuclear は福島原子力事故後も、さまざまな情報発信活動を行ってきた。

布目礼子

8 NEWS

- 原子力学会が事故調査委員会を発足
- 政府、規制委員会人事を閣議決定
- 国会事故調、国と事業者を厳しく批判
- 電力改革委が発送電分離で基本方針
- 意見聴取会、エネ環の選択肢を議論
- 政府事故調、炉心損傷時期などを精査
- 経団連、「原子力は不可欠」の意見提出
- 海外ニュース



原子カ外交シリーズ(6)

44 NSGの概要と最近の動向 核兵器関連資機材等の国際的な輸出管理レジームについて

各国政府の協調による原子力資機材や技術の輸出管理を通じ核兵器の不拡散に寄与する、原子力供給国グループ(NSG)について解説する。

牧野守邦

ジャーナリストの視点

61 原発の安全とは何か？ 仏グラブリーヌの取材から感じたこと

兼子将敏

24 From Editors

62 「2013年春の年会」研究発表応募・参加事前登録のご案内

63 会報 原子力関係会議案内、主催行事、新入会一覧、訃報、英文論文誌(Vol.49, No.10)目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

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

原子力発電，政治家と専門家の責任



東海旅客鉄道(株) 代表取締役会長

葛西 敬之(かさい・よしゆき)

1940年生まれ。1963年東京大学法学部卒業後、日本国有鉄道(国鉄)入社。1969年米国ウィスコンシン大学経済学修士号取得。1987年JR東海発足とともに取締役に就任、1995年社長。2004年より現職。

良質の電力を安価で安定的に供給することは日本の産業を守り日本人の雇用や生活水準を維持する必要条件である。そして原子力発電はそのための必須の電源だと言うのが現実である。

今、危機的なのは国政の責任者である政治家、政治主導を唱える御本人たちがこの現実を目を閉ざし、思考を停止していることだ。

また原子力の専門家たちは、今回の事故の教訓を徹底的に生かし、今後同様の災害に襲われても心配がないことを専門家の権威と信用にかけて明言すべきである。彼らもまた空気に気圧されたかのごとく沈黙しがちだ。

化石燃料はほとんどが中東からの輸入で、供給量も価格も不安定である。再生可能エネルギーは効率が低く、質・量・価格いずれの面で見ても原子力の代替にはならない。原子力抜きで日本はいかにして低コストで良質の電力を安定的に確保するのか。安価な電力の安定供給なしにいかにして日本の製造業は世界の市場で競争力を維持できるのか。強い製造業なしに日本人はどこに雇用を求め、生活の質を維持しようとするのか。

ポピュリズムに堕した政治家は国を滅ぼす。今日、「原子力発電を廃止し、再生可能エネルギーで代替せよ」と叫んでいる運動家とそれに迎合している政治家は、「必勝の信念と竹やりがあればアメリカの物量に勝てる」と叫んで日本人を戦場に駆り立て、国を滅ぼしたかつての精神主義者に似ている。

「民意に従う」と政治家は言う。一方、民意を啓発し、先導すべき時に政治家が大衆迎合し、専門家が沈黙したために亡びた事例に人類の歴史は満ちている。大衆は得てして自分が何を欲しいのか、そのための代償は何かを自覚していない。現実を見て初めて「そうだったのか」と気付くのである。商品の生産計画をアンケート結果に依存する経営者は会社を倒産させる。今般のエネルギーミックス議論の遣り方は会社を倒産させる経営者と酷似する。賛否を問われる国民は、原子力エネルギーを捨てた場合どんな代償を払わねばならないかを知らされていない。今までと同じ生活水準を維持しつつ、原子力だけを捨てることが出来ると思込まされているのだ。

先導すべき民意に追従し、原発ゼロを口にする政治家、沈黙する経済人やテクノクラートたち。今日覚めなければ日本は亡国の世界史に新たな一ページを加えるだろう。

放射線は人々の日常生活の随所に存在する。放射能がゼロでなければ不安全かのごとく言い続けた政府要人は、それにより故郷を追われた人々、職を失い、いまだに不安を募らせる人々に対する責任を免れない。

電力は生活や産業の血液である。原子力のリスクを管理・克服しながら安価な電力を安定的に確保しなければ、酸欠で人が死に至るように、産業は亡び、人は生活の場を失い、貧困化する。それは大衆迎合政治家による人災であり、加害者たる政治家たちはどう償うつもりなのか。

人々の生活は放射線以外にも多様なリスクと共存している。例えば自動車や航空機、そして高速鉄道のような輸送システムでも同様である。要はどこまでリスクを制御・克服し、覚悟を決めて活用するかである。自動車輸送は日本国内だけでも毎年五千人の事故死を出している。しかしそれでも自動車の利便性を人は捨てない。航空機が墜落すれば乗客は死亡する。しかるがゆえに航空機は crash avoidance(墜落回避)の設計思想で設計されている。それを超える不測のリスクは利便性の代償として覚悟するのだ。日本の高速鉄道は航空機と同様に crash avoidance(衝突回避)をシステムの的に担保している。平面交差のない専用軌道の上を近代的制御システムで守られた列車が走行する。軽量であるがゆえに省エネで、加減速性能が良く、線路破壊が少ない電車が航空機以上に安全に走行する。五十年の歴史で列車事故による死傷者は皆無である。超電導磁気浮上鉄道はそれをさらに徹底した設計である。

在来線との直通運転を前提とする欧州では crash survival が設計思想となる。安全性は日本より低いが、衝突した場合でも生き残るチャンスを残す頑丈さが求められる。欧州ではそれを覚悟の上で高速鉄道が使われる。

原子力発電の場合も本質は同じだ。福島第一原発の事故は、完璧な安全確保、最悪事態の下に置ける危機管理への得難い教材である。事態を直視し、世界で比類のない完璧な対策を講じて原子力を活用してこそ日本の明るい未来が開ける。

賠償の負担責任を明確に区分することも大切だ。全ての責任は一次的には東電にあるという規定は、損害が利用者負担の限界を超えているという現実と直面した時、全関係者の無責任化をもたらす。最も無責任になっているのが政府自身である。全て東電の責任ならば大衆迎合は「遣り得だ」とばかりに賠償範囲や除染レベルが無規律化している。

所詮は利用者か納税者が負担するしかないのだという事実を政府は国民に周知すべきだ。そして自らの大衆迎合に歯止めを掛けなければならない。
(2012年8月25日記)



歴史的転換軸としての「電力自由化」



山岡淳一郎(やまおか・じゅんいちろう)

ノンフィクション作家

「人と時代」「21世紀の公と私」を共通テーマに政治、近現代史、建築、医療など幅広く執筆。主な著書に「原発と権力」(ちくま新書)、「田中角栄 封じられた資源戦略」(後藤新平 日本を羅針盤となった男)(草思社)、「放射能を背負って」(朝日新聞出版)など

■地域独占体制に自由化のメス

現在、電力産業界は3度目の歴史的転換に直面している。転換の軸は「電力自由化・発送電分離」だ。経済産業省は「低廉で安定的な電力供給」を掲げて、電力自由化へ舵を切った。

9電力会社(沖縄電力を含めて10電力)の地域独占体制の一角が崩れるという意味で、やや大げさに聞こえるかもしれないが、歴史的転換期を迎えたと私は思う。

日本に電力事業者が生まれて120~130年。草創期から民間電力会社の自由競争が長く続いたが、1930年代に軍部と連携した革新官僚の策動で、電力事業は「国家管理」に移された。1939年に特殊法人の日本発送電株式会社が設立され、発電、送電を独占。戦争遂行に向けて産業を統制し、あらゆる物資、人を動員する国家総動員体制が敷かれた。これが最初の転換だった。

しかし、戦争に敗れて国家は破たんする。政府は「すべての官庁および軍は降伏を実施するため、連合軍最高司令官の出す布告、命令、支持を守る」という降伏文書に署名し、戦後がすべり出した。GHQ(連合国軍最高司令官総司令部)は、過度経済力集中排除の名目で日本発送電の分割再編を政府に命じる。

巨大な独占企業体となっていた日発は、政治家や官僚に深く食い込み、分割に激しく抵抗した。これに対し、「電力の鬼」と呼ばれた民間の雄、松永安左エ門がGHQと気脈を通じて「9電力分割・民営化案」をこしらえ、法案が国会に提出される。けれども日発寄りの国会議員は動かず、民営化案は審議未了で、あわや廃案に……。

そこでGHQは、1950年11月、超法規的な「ポツダム政令」を出し、日発を解体。翌年、9電力会社が発足し、地域独占体制が確立された。これが2度目の大転換であった。電力産業は民から官へ、官から民へと振り子のように揺れ動いた。

そして戦後の電力再編から60年余、いままた電力会社の地域独占体制に「電力自由化」というメスが入ろうとしている。

■発送電分離の核心はシステムの開放と中立化

この夏、2030年時点での原発依存度(0%, 15%, 20~25%)をめぐる「国民的議論」に人びとの関心が集まった。政府がエネルギー政策の重要な選択肢を国民に示し、議論を呼びかけたことは、インターネット時代のオープンガバメント(開かれた政府)を象徴している。

国は政策の合意形成プロセスで新たな一歩をしるしたわけだが、このエネルギーミックスの国民的議論と同じくらい重要なのが「電力システム改革」の自由化論議だ。こちらは「総合資源エネルギー調査会 総合部会 電力システム改革専門委員会」で行われている。

同委員会は、国民の目が原発依存度の選択肢に向いていた7月下旬「電力システム改革の基本方針」を出した。そこには「小売全面自由化(地域独占の撤廃)」、「総括原価方式の撤廃」、「発電の全面自由化(卸規制の撤廃)」、「送電部門の中立性・広域性の確保(広域系統運用機関の創設)」、「地域間連系線等の強化」などの改革メニューが並んでいる。

これらが実行されれば、電力会社の発電部門と送電部門は切り離され、市場化が一気に進む。経済産業省は来年の通常国会に電気事業法の改正案を出し、2014年以降、発送電分離を実現する考えだ。電気料金も市場競争に委ね、従来のコスト計算を前提にした総括原価方式はやめるといふ。

一般紙や電波媒体は、電力自由化を競争促進、規制撤廃の方向で報道しがちだ。そのため多くの人が発送電分離と聞いて、発電も送配電も小売もバラバラにして市場原理に委ねるかのようにイメージしている。

が、これは大きな勘違いである。発送電分離の核心は、電力各社が財産として抱え込んでいる送配電の系統を、広く、中立的に開放することにある。

電力自由化といっても自由競争が起きるのは、発電と小売りの分野であり、送配電分野は今後も「独占」が続く。多くの事業者に独占インフラである送配電網を開放して使えるようにし、競争を起こす。それが発送電分離の狙いだ。

送配電の系統を、道路にたとえれば分かりやすい。これまでの系統は電力会社の「私道」だった。太陽光や風力の発電事業者が使いたいと申し出ても、私道だから拒むこともできた。私道間の関係は悪く、昨年、東京電力が計画停電を行った際は西日本からの電力融通は限定的で、焼け石に水だった。

このような私道をどんな事業者でも使える「公道」に変えれば、再生可能エネルギーの発電事業者も参入でき、需給が逼迫した際の融通もつけやすい。結果として日本全体の電力供給が安定化する、と経産省は見込む。

問題は、誰が公道を管理するかだ。現実に電力各社が所有する送配電部門をどう切り離し、運用していくのか。戦後の電力再編で、独占体の日本発送電が分割民営化に徹底抗戦したように、送配電網を資産とする電力会社の抵抗は激しい。

「発送電一貫体制ならばこそ、電力の安定供給ができた」「発送電分離をすれば運用に齟齬をきたし、停電が発生する」と声上がる。

しかし、電力会社の強い影響力を残したまま送配電部門を形だけ切り離しても、発電や小売の競争は進まない。かといって電力会社の送配電網の所有権を丸ごと別会社に移す「所有権分離」も簡単ではない。

そこで二つの案が浮かび上がる。電力会社とは別の「ISO(独立系統運用機関)」を設けて送電網の運用を担わせる「機能分離」と、電力会社の送配電部門を法的に切り離して子会社にする「法的分離」だ。機能分離は中立性が高く、新規参入を招きやすい反面、設備投資の面などに不安が残る。一方、法的分離は系統の運用面では安定感があるが、電力会社の影響力は残る。それぞれ一長一短だ。

枝野経産大臣は閣議後の記者会見で「国民の視点からみれば、法的分離がわかりやすい」と発言しているが、専門委員の間では法的分離と機能分離の同時進行も議論されている。

まず、すべての電力会社にホールディングカンパニーをつくって、送配電部門を子会社化する。これが法的分離に当たる。それぞれの子会社は送配電網の所有権を保持する。その上で、全国規模のISOを立ち上げ、運用権を委ねる。所有と運用を分けるのだ。アメリカのテキサス州では、この方法で発送電分離が行われている。

■電力自由化は原発を退けるだろうか

では、実際のところ電力自由化はうまくいくだろうか。発送電分離と広域連係で北海道の風力発電の電気が東京へ送られる、といったサクセスストーリーは誕生するのだろうか。最も重要な鍵は、新規参入の規模だろう。

発送電分離をしたのはいいけれど、もし発電、小売の両部門に大規模な参入がなければ、実態的な地域独占が

続くことになる。そうすれば自由化された電気料金は上げ放題、となりかねない。経産省は電力自由化の目的を「低廉で安定的な電力供給」とするが、ただでさえ上昇の一途の電気料金がさらにはね上がる恐れがある。

確かに、新規参入を呼び込む制度として、再生可能エネルギーを助成する「固定価格買い取り制度」はスタートした。卸供給制度の撤廃や卸電力取引所の活性化などの競争促進策もメニューに書かれてはいる。

だが、制度設計だけで「欲望」の渦巻く産業界を誘導するのは難しい。

率直に言えば、新規参入は政治の主導力にかかっている。ある程度強引な呼び込みも求められる。

たとえば1980年代半ばの電電公社民営化では、中曽根政権が経団連と連携して京セラと新興企業に「第二電電」を設立するよう仕向けた。民営化されたNTTの初代社長には中曽根首相に近い真藤恒氏が就任し、大切なマイクロ回線を1ルート第二電電に貸して、競合会社を育てた。

背景には労働組合との確執など、さまざまな要因があった。競争の促進は政治の主導力抜きには語れない。はたして、現政権にその力があるのか……。

電力自由化を左右する、もう一つのファクターは、原発だ。原理的には電力自由化で競争が進めば、原発が入る余地は少なくなる。原発は莫大な投資を長期で回収しなくてはならず、自由市場の民間企業には背負えない。大きな事故を起こせば、経営が傾く。

現に資源エネルギー庁は、6月13日、民主党の「脱原発ロードマップを考える会」に「廃炉決定の際の除去損、解体引当金引当不足額」という文書を提出している。

そのペーパーによれば、「原発が再稼働せず、廃炉が決まった場合、北海道から九州までの9電力会社と日本原子力発電の10社に発生する特別損失は総額4兆4,000億円」。特別損失を計上すると、東京電力、北海道電力、東北電力、日本原電の4社は即座に債務超過に陥る旨が記されている。だから電力各社は、再稼働に躍起なのだ。

原理的には電力自由化は民間企業の原発を退ける。

しかし、電力自由化を軌道にのせたい経産省の側から見れば、とりあえず、安定的な電力が大量にあるほうが電力システムの転換リスクは少ない。原発のシェアをある程度固定化させ、競争分野を支えたい。

そこで浮上するのが、原発の国有化もしくは国家管理化である。原発が重荷の民間会社にとっても「損切り」で原発を手放すのは悪い選択ではない。ただし、これまた政治の動向に委ねられている。

電力自由化の成否は、政治がもたらす「原理論と実践論の相克」で決まるだろう。

(2012年8月23日 記)



福島第一発電所事故について考えること (低線量放射線被曝の安全と安心)



白鳥 正樹(しらとり・まさき)

横浜国立大学名誉教授, 同安心・安全の科学研究教育センター特任教授
日本機械学会「東日本大震災調査・提言分科会」主査, 日本学術会議連携会員。専門分野: 材料力学, 計算力学。

1. はじめに

昨年(2011年)の3.11以降, 日本機械学会に「東日本大震災調査・提言分科会」が組織され, 筆者が主査を拝命した。機械全般の被害調査を主として技術的観点から調査を行い, 今後起こるであろう東南海地震等の大地震に備えるための提言を行うことを主たる目的としている。被害は広範にわたるために以下の7つのWGを組織し, 基本的にWGを中心として活動を進めることになった。

- WG1: 機械設備等の被害状況と耐震対策技術の有効性
- WG2: 力学体系に基づく津波被害のメカニズムの理解
- WG3: 被災地で活動できるロボット課題の整理
- WG4: 被災地周辺の交通・物流分析
- WG5: エネルギーインフラの諸問題
- WG6: 原子力規格基準等の課題と今後の方向性
- WG7: 地震, 原発事故等に対する危機管理

これらの活動の概要は日本機械学会誌2012年6月号に中間報告の形で報告されているので, 関心のある読者はそちらを参照されたい。

上記のミッションを与えられた筆者はこの1年数ヶ月の間, 特に原発事故の問題を重く受け止め, 日本学術会議に設けられた原子力事故対応分科会等関連する委員会に参加するとともに, 学術会議をはじめとする様々な組織が主催するシンポジウムにも積極的に参加して, この事故の本質は何であろうかと考えてきた。

すでに東電自身による事故調査委員会報告のほか, 民間事故調査委員会, 国会から委託された事故調査委員会の報告書も提出, 公示され, また政府の事故調査委員会の中間報告も出されており, 7月末には最終報告が出る予定と聞いている。これらを比較して, 特に見解に差のある部分についてはさらに突っ込んだ精査が求められよう。

検討すべき課題としては, 規制の在り方, 危機管理, シビアアクシデント対応, 多重防護などの技術的課題, 廃炉に向けたシナリオ, 廃棄物処理, 原発再稼動の問題, エネルギー政策等々, 課題が山積しているが, 中でも筆者が割り切れない思いでどのように考えたらよいか思い

悩んでいる事柄は, 放射線による健康被害の問題である。この問題は筆者の専門とする分野の問題ではないが, 一市民としてあるいは機械工学の一研究者として思うところを述べてみたい。

2. 放射線被害に対する安全と安心, Probability と Possibility について

“放射性物質の環境への放出を伴うような事故は決して起こしてはならない”ということは国民の誰もが認める共通のコンセンサスである。しかし今回の事故のように結果として放出されてしまった場合にどのように対処するのか。

日本原子力研究開発機構 J-PARK センター柴田徳思(敬称略, 以下同様), 年あたり1 mSvの規制値に対する一般人の癌になるリスクは 5.5×10^{-5} と推定され, 死亡率から見た癌のリスク 2.7×10^{-3} に比べて十分に安全とされる範囲に入っていると述べている。また摂取制限量の飲食物を1年間とりつづけたときの癌になるリスクは1 mSv(筆者注: 2012年4月以降の新基準)に対して 5×10^{-5} , 5 mSv(2012年4月以前の基準)に対して 2.8×10^{-4} と推定され, 後者は不慮の事故による死亡のリスク 3.2×10^{-4} と同程度であるとしている。このような分析を基にして, 同氏は「放射線の影響について, 一般の多くの方々が知識を持たないために, 放射線とどのように付き合ったら良いかわからず, 対処に困っている現状がある」また, 「放射線の影響については国際放射線防護委員会(ICRP)のレポートが信頼できる資料であるが, ICRPは放射線の影響を過小評価しているという説明がインターネットでたくさん出ている。知識を得ようとしてこのような説明を見れば, 政府の説明は不安を与えるものとなる」と述べている。(2011年10月19日, 日本学術会議原子力総合シンポジウム2011におけるプレゼンテーション資料より抜粋)。上記規制値の根拠を与えているデータはICRPによる「100 mSv以下の低線量被曝に対しては被曝量と癌発生率との統計的な因果関係はない」とする説明からProbabilityの論理と呼ばれることも

あるが、このような科学的根拠に則った安全に対する説明は、そのまま国民に受け入れられることは難しく、たとえ規制値以下の値であっても癌になる可能性を完全に否定するものではないから(これを Possibility の論理と呼んでいるようである)安心して社会生活を送るには放射線量は限りなくゼロにするのが望ましいとする論理が、インターネットあるいはマスコミ等を通して世間の常識としてまかり通っている。特に、規制値をちょっとでも超えるとマスコミが敏感にかつ大々的に公表するため、それによる風評被害は計り知れない。

このような問題に対して、山地は以下のようにコメントしている。「インターネットが実現したサイバー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、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。ただし科学的知識の中にも不確実な領域がある。地球温暖化懐疑論や、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。福島原子力事故では、このような科学の不確実領域で社会がどう行動すべきかが問われている。福島原子力事故は、避難や汚染された食品の出荷停止などによって、甚大な被害をもたらしているが、その根本にあるのは放射線被曝に対する不安である。今までの研究では、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100mSv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被害は観察されていない。しかし、この領域の科学的知識は、いまだに不確実で、不要な放射線被曝はできるだけ避けるという慎重な行動をせざるを得ない。今回の事故では、この保守的な行動の結果として、現実に莫大な損害と社会不安をたき起こしている。」(山地憲治,「科学が生む不安」,電気新聞「時評ウェブ」2011.10.3)。

一方、低線量放射線被曝のような科学的に因果関係が明確でない不確実な領域の問題に対して、小林は1970年代の米国の核物理学者アルヴィン・ワインバーグの言葉を引用して「トランスサイエンス領域の問題」と呼び、この領域の問題に対する意思決定の方法として以下のように提案している。

「ワインバーグはこの種のトランスサイエンス的問いに関しては、専門家のみで意思決定すべきではなく、民主主義社会においては専門家を含む社会全体で討議をしつつ決定するしかない」と主張していた。それが彼の言う「拡大されたピア(仲間)」,つまり専門家以外の人々を巻き込んだ意思決定なのである。科学技術に大幅に依存し

た現代社会において、トランスサイエンスの領域が拡大しており、社会は、それに対する社会的意思決定の仕組みを構築できていないことを問題提起したのである。

原子力発電技術のような巨大技術を社会に実装して利用していくためには、この技術がもたらす社会的影響、メリットとデメリットなどを多角的に検討することが必要であり、それらの作業は本来、文系、理工系を問わず各種の専門家がまずもって取り組むべきものなのである。その上で最終的に一般市民の社会的討議に付す、というのが物事の順序であろう。」(小林傳司,「トランスサイエンスの時代の学問の社会的責任」,学術の動向, Vol.17, No.5, May, 2012)

3. 合意形成に向けて

低線量放射線被曝の問題に関しては、社会の評価が大きく割れている。この評価いかんによって、原発再稼働の是非、あるいは将来のエネルギー政策等に対する判断が大きく違ってくる。一刻も早く国民の合意が得られることが望ましいが、いまだに10万人に近い避難者がいる状況においては、冷静な議論を市民との直接的な対話を通じて展開していくことには無理があろう。

小林の言う「拡大されたピア」とは、今回の問題に対しては、例えば学術会議のような場がそれに相当するのではなかろうか。必ずしも原発あるいは放射線の専門家ではないが、学術会議にはこの問題が提起する様々な問題を、文系、理系を問わず、様々な視点から議論できる専門家が集まっている。もう一つ重要なことは、議論を行い合意形成にまで持っていくルールが明確になっており、それが尊重されると言うことであろうか。学術会議はまさにそのような条件を備えており、これまでも様々な問題が取り上げられて提言として社会に発信されてきた。日本学術会議には今一度この「低線量放射線被曝」の問題を取り上げて、「拡大されたピア」として議論し、その議論の結果を「合意された科学者のユニークボイス」として発信していただきたい。このユニークボイスを核として、国会審議等における政策形成に資すると共に、さらに市民との対話を通じて社会の中に冷静な判断が生まれてくるのを待つしかないのではなかろうか。

急がば回れと言うことばもあることだし、その間、我々原発の研究・開発に従事する専門家には、科学技術の問題として確実に答えを出すことのできる安全の問題に万全を期する覚悟が要請されよう。

(2012年7月18日 記)

会長所見

「原子力なしで、本当に大丈夫でしょうか」

—「原子力ゼロ」の新エネルギー政策に関する所見—

日本原子力学会会長 野村茂雄

政府が近くまとめる「革新的エネルギー・環境戦略」に盛り込むエネルギー政策では、2030年代の原発稼働ゼロを目指す方針であると報道されています。

しかしそれは本当に賢明な選択だといえるでしょうか。

再生可能エネルギーが大規模電源に育つには、時間がかかります。それまでは、原子力を利用すべきです。

再生可能エネルギーは今後、最大限開発して導入すべきです。しかし原子力に代わる確実な大規模電源として再生可能エネルギーが育つまでには、相当な時間がかかります。一気にそれを拡大できると考えるのは楽観的であり、国策としては危険です。一方で原子力は大きなリスクがあるとして、あらゆる面で悪とするのは、極端過ぎます。

将来のエネルギーを選択するにあたっては、その時点で本当に導入できる可能性がある量とコストを見据えることが必要です。私たちは、大規模電源として再生可能エネルギーが育つまでの間は、原子力の安全強化をさらに図った上で、基幹電源としてバランスよく利用すべきだと考えます。

原子力15%シナリオでも、すべての住宅に太陽光パネルを設置することが前提です

原子力ゼロではなく、2030年時点で原子力を15%とするシナリオでも、すべての住宅の屋根に太陽光パネルを設置することが前提になっています。原子力ゼロシナリオではさらに、設置不可能な住宅まで耐震補強して設置することが必要になります。

それらを前提にして、風力発電を含めた再生可能エネルギー全体をこれから18年後には3.5倍に増やし、発電量の4割を再生可能エネルギーで賄うという政策目標は、本当に現実的でしょうか。

風力の稼働率は20%、太陽光の稼働率は12%です。

また再生可能エネルギーの導入には、送電線網の問題が関わります。再生可能エネルギーの発電量は大きく変動するため、電力を安定的に供給するには、それをバックアップする安定的な電源が必要になります。そのバックアップのための発電所では、化石燃料を燃やすしかありません。高性能蓄電システムを導入するためには、相当な費用と時間がかかります。政策目標では大規模洋上風力発電の設置も示されていますが、本当の実力は不明です。節電も一定の限界があります。また太陽光の稼働率は約12%、風力の可動率は約20%しかないことも、十分ふまえておくべきです。

エネルギー政策は「質実剛健」と「柔軟性」「リスク分散」が基本

国家のエネルギー政策の基本は「質実剛健」であり、不確定な状況に直面しても「変化に適用できる柔軟性」や「電源構成の多様化によるリスク分散」、さらには「国際資源・競争力確保」の観点での戦略が必要です。私たちは、1970年代の石油ショックのことを忘れてはなりません。また50基余りある原発という資産を放棄することは、莫大な損失です。今の日本の国際競争力は、すでに中位にまで落ちており、原発の放棄はさらにこれに拍車をかけます。

原子力ゼロで、本当に立ちゆくのでしょうか

福島原子力発電所事故が起こる前の原子力の割合は、26%ありました。その原子力の割合を、ここ10年程度でゼロにするということは、相当な痛みが伴うと覚悟すべきです。政策の中には、ストーブの販売禁止や重油ボイラーの原則禁止などの規制も含まれることになるでしょう。国民の皆様は、本当にこれを受け入れることができるのでしょうか。そのための激変緩和措置や是正メカニズムを入れないと、国は崩壊します。しかし、本当に有効な激変緩和措置や是正メカニズムは、そもそもあるのでしょうか。

再生可能エネルギーが大規模電源に育つまでには、相当な期間が必要です。それを急ぎ過ぎることは、国民生活に急

激でかつ大きな負担と不便を強いることとなります。

再生可能エネルギー導入を急いだドイツの買い取り制度は、破綻しました。

今の政策目標では、太陽光を最大42円/KWhで購入することが示されています。通常の電気料金よりはるかに高いこのコストを、家庭で負担することはできるかもしれません。しかしながら日本を支える町工場を含めた電力多消費型産業は、この料金では立ちゆかなくなります。すでにぎりぎりの状態にあるこれらの企業はコストアップで国際競争に勝てなくなり、海外に移転するか崩壊するかのどちらかになります。ドイツでは再生可能エネルギーを増やすために固定電力買い取り制度(Feed-in Tariff, FiT)を導入しました。その結果、買い取り価格のコスト高にともなう負担増に企業や家庭が耐えられなくなり、この制度を修正することを打ち出しています。

世界のエネルギー需要は伸びています。

経済界や多くの企業団体は、原子力を大幅に減らす、あるいはゼロにする政策目標について反対しています。政策は、それらの要望や見解とは、大きくかけ離れたものとなります。

一方で世界人口は確実に増加しています。拡大するそのエネルギー需要を満たすために、アジア地域をはじめとして海外の多くの国々では、安定的なエネルギー確保をめざして原子力利用を続けています。あるいはこれから始めようとしています。そのような国々と日本の国の政策は、逆方向へと向かうこととなります。

「すべての原発に大きなリスクがあり、事故の起きる危険性がある」というのは、あまりにも短絡した捉え方です。女川原子力発電所や再稼働した大飯原子力発電所等は、福島第一原子力発電所とは安全レベルが異なります。また福島原子力事故を受けて、既存の原発の安全性はさらに強化されました。最新のAPWRやABWRは東電福島第一原子力発電所のMK-1タイプと比較すると、安全対策で相当進化した設計・運転となっています。

総合科学技術の「火」が消えようとしています。

原子力は、総合科学技術としての体系によって構成されています。これはこの30年、さまざまな分野で我が国の科学・工学の進歩に寄与してきました。我が国が、核分裂反応という新しい量子物理メカニズムを平和的に利用しはじめて約50年が経ちました。製造業やプラントメーカーを含め、相当な世界的実力をもつ日本のこの技術の「火」が今、消えようとしています。その「火」はいったん消えたら、元に戻すのは不可能に近いでしょう。

使用済燃料をリサイクルするか。負の遺産とするか。

使用済燃料のリサイクル利用を止めるならば、使用済燃料は従来の「もう一度使える価値ある資源」から「負の遺産・廃棄物」になります。国内では、日本原燃のガラス固化事前確認試験が完了し、いよいよ燃料サイクルを開始しようとしている段階にあります。これまでに全国の原発から運び込まれた使用済燃料や、約40tあるPu原料に対しては、現実的に対応することが必要です。軽水炉燃料のリサイクル利用を継続して大間原子力発電所を完成させ、回収プルトニウムは集中的に大間原発フルMOXで燃焼処理を行うのが、最も現実的だと考えます。

青森県に搬入した使用済燃料やガラス固化体の取扱いを、もし変更する場合には、米国ブルーリボン委員会のような詳細検討を提示しなければなりません。しかしながら、代替案は容易には見つからないでしょう。

高速増殖炉サイクルについてはロシア、インド、中国が熱心に研究開発を進めています。今後、この世界で最前線に出てくるこれらの国々を含めた世界的枠組みに参加することが大切です。また、放射性廃棄物のうち半減期が長いものを半減期が短いものへと変換できる核変換試験も展開すべきです。

国内の原子力に関する技術水準は高いレベルにあります。

原子力学会ではこれまで、米国や欧州各国との協力を進めてきました。また昨年の福島原子力事故後、カザフスタンやベトナムなどとも新規に交流協定を結びました。さらに今年度は、インド、ロシアとの協定も結ぶ予定です。国内の原子力に関する技術水準は高いレベルにあり、我が国の原子力界に対して海外からは、多くのことが期待されています。

一方で福島原子力発電所事故後、人材育成は確実に難しくなることが予想されます。今の若者の多くにとって、展望のない原子力産業に魅力は感じないかもしれません。しかしながら過去の石炭産業やアルミ産業が衰退していった歴史とは異なり、海外では原子力を有力な基盤電源として積極的に利用しようとしています。それを裏付けるように我が国からの講師派遣や我が国へ来訪する海外研修生の数は、福島事故以降もほとんど減っていません。海外へ打って出ようという気概のある若者にとって原子力は、絶好のチャンス到来ではないでしょうか。

(2012年9月12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。

原子力学会が事故調査委員会を発足

日本原子力学会は東京電力福島第一原子力発電所事故の原因究明と事故の再発防止を検討する事故調査委員会を発足させ、8月21日に都内でその第1回会合を開いた。委員は学会所属の専門家39人からなり、委員長には田中知氏が就任した。月1回程度のペースで会合を開き、来年末を目途に調査結果をまとめる。

原子力学会では福島原子力事故後、「原子力安全」調査専門委員会などを立ち上げ、この事故の経緯や原因究明などを行ってきた。また国会事故調や政府事故調の報告が出揃ったことを受け、学会では総括的にこの問題の調査検討を深めるために、この調査委員会を設立したものの。専門家で構成される学術的な組織として、この事故とそれに伴う原子力災害の実態を科学的・専門的視点から分析して課題の抽出を行う。さらに学会あるいは原子力界全体にわたる組織的・社会的な問題点とも向き合い、その検討結果を学会の活動に反映させていくとともに、政府・関係機関に対し改善策の提示や提言を行う。

調査ではまず、この事故はどのようなものだったのかという事実の確認と経緯を詳細に検証。地震や津波などの影響や事故事象の進展、放射能放出と地域への影響などを詳細に分析し、国会や政府事故調、東電報告の分析や評価もあわせて行う。また事故後の環境修復や除染活動、事故炉の中長期対策についても検証する。

事故原因の分析では安全設計やアクシデント対策、防災対策などを対象に、原子力の安全原則や深層防護など多様な視点から検討するとともに、関係する主体の歴史的経緯や組織的な要因にも言及。法体系の問題や、原子力を推進する専門家集団のあり方についても検討する。

具体的な調査は各部会や各委員会で検討した結果を、親委員会となる事故調査委員会で審議検討する形で進行。その成果は年会やシンポジウム、学会HP、学会誌で紹介していく。

(原子力学会誌編集委員会)

政府、規制委員会人事を閣議決定

政府は7月26日、「原子力規制委員会」の委員長に、日本原子力研究所(現原子力機構)副理事長、原子力委員会委員長代理を歴任した田中俊一氏(高度情報科学技術研究機構顧問)を、その他4名の委員に、更田豊志氏(原子力機構)、中村佳代子氏(日本アイソトープ協会)、大島賢三氏(広島大学)、島崎邦彦氏(地震予知連絡会会長)を当てる人事案を国会に提示した。また8月24日には閣議で、この人事案を決定した。

7月26日の記者会見で細野豪志原発担当相は、委員長への就任を見込む田中氏は、原子力安全規制に携わる上

で不可欠な専門的知識・経験を豊富に有しているだけでなく、福島原子力事故発生以降、いち早く現地での除染活動に「自ら泥まみれになって活動してきた」ことなども考え合わせ、「先頭に立つことを恐れぬリーダー」として、本ポストの最適任者にあがったとした。委員長・委員の任期は5年だが、一斉に任期満了とならないよう、更田氏と中村氏は3年、大島氏と島崎氏は2年と初任のみ例外規定。

(日本原子力産業協会提供、以下の資料も同じ)

国会事故調、国と事業者を厳しく批判

国会の東京電力福島原子力発電所事故調査委員会は7月5日に報告書を取りまとめ、衆参両院議長に提出した。福島事故の根本原因とその背景、改革への提言などを盛り込み、今後、国会での議論を求めた。

報告書は事故の根源的原因として、歴代の規制当局と電気事業者との間に「規制する立場とされる立場の『逆転関係』」が起き、規制当局は電気事業者の『虜(とりこ)』となっていた」と指摘。一方で、事業者は「既設炉の稼働の

維持」や「訴訟対応で求められる無謬性」(過去の正当性)を守るために、「何度も事前に対策を立てるチャンスがあったにもかかわらず、回避や先送りを行ってきた」と厳しく批判している。

世界では過去に、米国スリーマイル島原発や旧ソ連チェルノブイリ原発での大事故が起こったにもかかわらず、日本では大事故など起こらないとの「安全神話」という「思い込み」が生まれ、ほぼ50年にわたる一党支配も

あって、高度経済成長を遂げる中で、「自信は次第におごり、慢心になり始めた」と指摘した。

事業会社や規制官庁の「単線路線のエリート」たちにとって、「前例を踏襲すること、組織の利益を守ることは、重要な使命」となり、安全対策は先送りされることになったと説明。昨年3月11日に発生した巨大地震と津波によって引き起こされた「原子力災害への対応は、極めて困難なものだったことは疑いもない」と認めながらも、「この50年で初めてとなる歴史的な政権交代からわずか18か月の新政権下でこの事故を迎えた」ことから、政府、規制当局、事業者は「危機管理能力を問われ、日本のみならず、世界に大きな影響を与えるような被害の拡大を招いた」と断じている。

事故の直接的原因については、地震および地震に誘発された津波という自然現象であるとしながらも、「重要

な点において解明されていないことが多い」と指摘し、事故の主因を津波による全電源喪失とした東京電力や政府がIAEAに提出した事故報告書に疑問を呈している。

その理由として、①スクラム(原子炉緊急停止)後に最大の揺れが到達した、②小規模LOCA(小さな配管破断などの小破口冷却材喪失事故)の可能性を原子力安全基盤機構の解析結果で指摘、③1号機の主蒸気逃がし安全弁(SR弁)が作動しなかった可能性を否定できない——などを挙げた。

さらに提言では、①規制当局に対する国会の監視、②政府の危機管理体制の見直し、③被災住民に対する政府の対応、④電気事業者の監視、⑤新しい規制組織の要件、⑥原子力法規制の見直し、⑦独立調査委員会の活用——の7項目を挙げた。

電力改革委が発送電分離で基本方針

経済産業省の総合資源エネルギー調査会電力システム改革専門委員会(委員長=伊藤元重・東京大学経済学研究科教授)は7月13日、需要サイド、供給サイド、送配電分野における改革の方向性、および詳細設計へ向けた検討課題を盛り込んだ基本方針を取りまとめた。

震災に伴い、原子力を中心とする大規模電源の遠隔地集中の限界とリスクが顕在化したことなどに鑑み、同調査会基本問題委員会で、需要家への多様な選択肢の提供、送配電部門の強化・広域化など、現行の電力システムに関する課題が提起されたのを受け、1月より専門委員会で審議を行ってきた。

このほど取りまとめられた改革の基本方針は、「国民

に開かれた電力システムを目指して」と題してまず需要サイドの改革を述べ、「すべての国民に『電力選択』の自由を保証する」として、小売前面自由化(地域独占の撤廃)を掲げている。供給サイドの改革では国際競争力の強化に向け、発電の全面自由化、卸電力市場の活性化などを、送配電分野の改革では全国大の広域的なネットワークを整備し、公平で自由な電力プラットフォームを提供する考えから、需給バランスの維持と運用に責任を負う「広域系統運用機関」の創設などを述べている。

専門委員会では今後、年内を目途に、改革に向けた具体的制度設計の検討を進める。

意見聴取会、エネ環の選択肢を議論

2030年のエネルギー選択に向け全国11都市で開催される意見聴取会が7月14日、さいたま市を皮切りにスタートした。発電量に占める原発依存度を基準とし、政府のエネルギー・環境会議がこのほど取りまとめた3つの選択肢①ゼロシナリオ、②15シナリオ、③20~25シナリオ——を軸に、エネルギー・環境戦略の方向性を定める礎とすべく、国民的議論を展開するもの。

さいたま市会場の新都心合同庁舎には、抽選で選ばれた約170人が参加。政府関係者より3つの選択肢に関する説明が行われた後、事前に選ばれた各選択肢に賛同する意見表明者3名ずつ計9名が二巡で発言する形で進められた。

政府側は今回のエネルギー選択に関する議論に関して、震災を機に、「原子力を基幹電源とするエネルギー選択」から、「原発依存度を可能な限り減らす」という方

向性が共有されつつあり、「どの程度の時間をかけて減らしていくのか」、「どこまで減らすべきか」、「どのエネルギーで補っていくべきか」などを意見の分かれる論点として示し、3つのシナリオの要点を説明した。

意見表明では、福島事故の経験から「人類は核を制御できない」ことが示されたとする意見や、使用済み燃料処理の停滞などからゼロシナリオを訴える青森県出身者の意見があった。一方で、これまでに培われた日本の技術力に期待し、「原発50%のシナリオがあってもよい」、「再生可能エネルギーに依存するのならば、停電頻発の覚悟も必要」「原子力がこれまで、高品質な電力の安定供給に貢献してきた」とする声もあった。

意見聴取会に出席した枝野幸男経産相は、各意見表明者の発言終了後、参加者一同に対し、エネルギー・環境に関する選択についてそれぞれ考えて欲しいなどと述べ

た。また、今回は、事前に選ばれた陳述人以外には発言の機会が与えられておらず、場内から運営方法に関する不満の声が上がったのに対し、枝野大臣は、「真摯に受

け止める」などと応えた。

意見聴取会は、15日に仙台市、16日に名古屋市でも開かれ、8月上旬まで主要都市で順次、開催された。

政府事故調、炉心損傷時期などを精査

政府の福島原子力発電所事故調査・検証委員会(委員長＝畑村洋太郎・東京大学名誉教授)は7月23日、東京・大手町庁舎で会合を開き、最終報告書を取りまとめた。報告書は会議終了後、その場で委員長より野田佳彦首相に提出され、野田首相は「まずは精読したい。2度とこのような事故が起こらないよう、事故の再発防止に向け万全を期して取り組んでいきたい」と述べた。

同委員会は、11年5月の閣議決定により設置され、同6月の初会合から数えて計13回の本会合を開催。発電所視察、関係者からのヒアリング、被災地域首長らとの意見交換、国際シンポジウム開催などを通じ、規制行政庁、事業者等とは独立した立場で、技術的、制度的な問題も含め、包括的に検討を行ってきた。ヒアリングの総人数は計772名、総聴取時間は計1,479時間にも上った。

本文編と資料編とを合わせて計800ページ超に及ぶ今回報告書は、同委が去る12月に取りまとめた中間報告と一体となるもので、中間報告段階で調査未了だった事項や、さらに調査・検証を要することとした事項について明らかとなった事実を、既報の事柄は改めて再掲せず記述している。

また、最終章では、主要な問題点に分析・考察を加えた上で、「抜本的かつ実効性ある事故防止策の構築」、「複

合災害という視点の欠如」、「『被害者の視点からの欠陥分析』の重要性」など、重要な論点9項目の総括を行い、中間報告で示されたものも合わせて、原子力災害の再発防止および被害低減のための提言を述べた。提言は、原子力の安全対策・防災対策、被害の防止・軽減策、規制機関のあり方などに関し、同委の使命が事故の再発防止に向けた政策提言にあることから、「今後も原子力発電所を存続・活用すべきとの考えを前提としたものではない」とした上で、今後の原子力利用の是非にかかわらず「迅速かつ確実に実現を図ることが重要」とする事項を挙げ、関係省庁において具体化やフォローアップを求めている。

事故対処に関する問題点分析では、福島第一発電所における現場対処を福島第二発電所と比較。例えば、第一発電所3号機では、高圧注水系手動停止の際に代替手段をあらかじめ準備しなかったことにより、6時間以上にわたり原子炉注水が中断した一方で、第二発電所では作業環境が良好であったこともあるが、次の代替手段が実際に機能するかを確認した上で、注水手段を切り替えるといった対応がとられ、第一発電所の対処は第二発電所に比べ適切さを欠いていたなどと指摘している。

経団連、「原子力は不可欠」の意見提出

日本経団連は7月27日、政府が検討している2030年時点の「エネルギー・環境に関する選択肢」に関して、意見書を提出した。意見書では、我が国の経済成長、産業の国際競争力、雇用確保、温室効果ガスの排出削減などの面から、エネルギーの安定供給が不可欠であり、とりわけ原子力エネルギーの確保が重要だとしている。省エネ・再生エネの大幅な導入計画は、「経済性を含め、現実的な想定とすべき」と厳しく批判している。

エネルギー政策に求められる基本的視点として、①エネルギーの安全保障(安定供給)、経済性、環境適合性の適切なバランス、②政策の費用対効果や、国民生活および企業活動への影響を十分考慮しながら、成長や国民生活に必要なエネルギーの確保、③化石燃料の有限性を踏まえ、省エネルギーや再生可能エネルギー技術の開発・普及に最大限努力する必要がある。他方、エネルギーの需給ギャップが生じないように、現実的な導入可能量は十分精査されるべき、④化石燃料に乏しく、容易に電力の

輸入ができないわが国は、リスク分散と資源国に対する交渉力確保の観点から、エネルギー源の多様な選択肢を維持する必要がある、⑤地球温暖化問題には、経済との両立を図りながら着実に取り組むべき——の5点を挙げている。

その上で、「エネルギー・環境に関する選択肢」の各シナリオ共通の問題点として、①エネルギー需要の予測の前提となる経済成長率の想定が、実質で2010年代は1.1%、20年代は0.8%とされるなど、政府の成長戦略との整合性がない。最終エネルギー消費で約7.5%、電力需要で約8.1%もの違いがある、②わが国では過去、電力需要の対実質GDP弾性値がプラスで推移してきた。今回の各シナリオは、今後約20年にわたり、GDPが伸びても電力需要は減少するという逆の想定。将来、電力不足が生じることのないよう、省エネ・再生エネ等の導入量は、楽観的でなく、経済性を含め現実的な想定とすべき。省エネ、再生エネ、系統対策費用として100兆円を超

える投資が見込まれ、こうした負担で将来の成長に必要な投資資金が不足することとなれば、産業の国際競争力に深刻な影響を与えかねない、③政府のエネルギー政策は、国民生活や産業、雇用を守るものでなければならない。モデルによって幅はあるものの、電力料金で約26～

130%の上昇、実質 GDP で0.4～7.6%の減少となっている。産業の国際競争力や雇用への影響などについての詳細な分析がなされていない、④温室効果ガスの排出削減について、国際的公平性の検証がなされていない——などの問題点を指摘している。

海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[米国]

マクファーレン氏が NRC 委員長に就任

米原子力規制委員会(NRC)は7月9日、5月21日に辞意を表明していたG・ヤツコ委員長の後任として、ジョージ・メーソン大・環境科学政策学部のA・マクファーレン准教授(48)が第15代NRC委員長として宣誓就任したと発表した。B・オバマ大統領の指名後、6月29日付けで議会上院が同氏を承認したのを受けたもの。ヤツコ委員長の残りの任期を引き継ぎ、さし当たり2013年6月末まで委員長職を務める。歴代の女性委員長としては3人目。地質学者としてユッカマウンテンでの高レベル廃棄物処分計画には批判的な見解を持つ。

ヤツコ前委員長は昨年10月、残りの委員4名から「上級スタッフを脅し、NRCの職場環境を寒々しいものにしていく」との批判を受けた。事の真偽について内部調査していたNRCの独立した総監察官局(OIG)は、6月末に議会に報告書を送付。その中で、他の委員やNRC幹部が脅しやいじめと感じる事例を少なくとも15回特定したと伝えられている。なお議会上院は、マクファーレン委員長のほかに、6月30日付けで任期が満了したK・スピニッキ委員の2期目の就任を承認した。オバマ大統領の再指名により、5年の任期を務める。

[カナダ]

ブルース A 1 号機、改修後15年ぶり再稼働へ

カナダ原子力安全委員会(CNSC)は7月20日、改修工事等で約15年間停止状態にあったブルース A 原子力発電所1号機(CANDU炉, 80.5万kW)の再稼働を許可した。CNSCの現場スタッフと技術専門家のチームが数々の検査や診査を実施した結果、同炉の状態が再稼働の必須条件をすべて満たすとともに安全性試験を成功裏に完了したことを確認したものの。

この承認により、同炉は1997年12月以来の「原子炉停止保証状態」から復帰が認められ、原子炉の臨界防止のために取られていた複数の措置、すなわち圧力容器であ

るカランドリア管内の重水にガドリニウムを注入する、重水浄化系の弁をロックするなど——が解除される。また、さしあたり定格の50%まで出力を上げ、CNSCの監視の下でいくつかの安全性テストを実施した後、さらなる出力上昇の承認をCNSCから得ることになる。

同炉の運転会社であるブルース・パワー社は「これで原子炉を運転し、残りの起動試験を終えることができる」とコメント。オンタリオ州の送電網に接続する最終安全チェックの準備が整ったとしている。また、今回の改修により、同炉は運転寿命が25年伸びたと伝えられている。

ブルース A 発電所の CANDU 炉 4 基は1970年代に営業運転を開始したが、運転実績の低迷に伴う経済性の悪化から、90年代後半に運転を休止。2001年以降、圧力管や燃料チャンネル、蒸気発生器の取り替えを含め、2043年までの運転寿命延長を目指した大がかりな改修工事を開始した。3、4号機はそれぞれ04年と03年に運転を再開したが、機器の取り換えおよび改修工事は1、2号機の再起動後に実施する予定。2号機は今年3月に約20年ぶりの再起動を果たしている。


 報告

福島特別プロジェクトの立ち上げ

「福島特別プロジェクト」

代表 田中 知, 幹事 藤田 玲子

東京電力福島第一発電所事故により放出された放射性のセシウムの除染や復興事業が速やかに進むように、日本原子力学会では、理事会直結の組織として「福島特別プロジェクト」を創設した。このプロジェクトの概要について述べる。

I. はじめに

日本原子力学会は東京電力福島第一発電所事故に関して、原子力関係者として事故を未然に防ぐことができなかったことを反省し、深くお詫びを申し上げます。

福島特別プロジェクトは原子力学会理事会に直結する組織とし、代表、副代表、幹事および顧問を置く(代表: 田中 知, 副代表: 池本一郎, 幹事: 藤田玲子, 顧問: 角山茂章)。

これまで現地において積極的な活動を行ってきた放射線影響分科会やクリーンアップ分科会を中心として、関連する部会、専門委員会支部等と連携した体制とし、地元ニーズや具体的な活動の進展を踏まえ、柔軟に体制を組み替えながらプロジェクトの円滑な推進を図るものとする。

このプロジェクトは、東京電力福島第一原子力発電所の未曾有の事故による原子力災害の修復に、福島のため現地の視点に立って学会の総力を結集して臨むものとする。

すなわち本プロジェクトは、地元にとって切実かつ喫緊の課題である周辺環境の除染作業のサポートや放射線影響に関する分析・助言など現地における活動を中心としつつ、事故炉に関する中長期対策などについて、関連する部会、専門委員会等の学術的な知見も最大限に活用し地元に取り有益な情報を分かりやすく発信するなど、地元役に立つ活動を幅広く実施することを目指したものである。

II. これまでの経緯

日本原子力学会では昨年4月に「原子力安全調査専門委員会」を立ち上げ、「技術分析」、「放射線影響」、「クリーンアップ」の3分科会において、事故後1年の間に調査や情報発信などを実施してきた。

Fukushima Special Project: Satoru TANAKA, Reiko FUJITA.

(2012年 8月2日 受理)

特に放射線影響分科会とクリーンアップ分科会は、福島県と共同で福島の住民の方々が少しでも早く現状復帰できるように、講演とパネル討論を組み合わせた「安全・安心フォーラム」を飯坂温泉、郡山市、南相馬市、いわき市で実施した。

また、住民の方々への専門家集団として正確で分かりやすい情報を提供するためにチェルノブイリ事故の後に欧州でまとめられたEURANOSデータ集を翻訳した「資料集」の発刊や環境省の廃棄物関係ガイドラインの内容をかみ砕いた「仮置き場Q&A」などを発行してきた。

今年度は既に「除染推進に向けた地域対話フォーラム」(5月13日, コラッセふくしま), 「日本原子力学会主催シンポジウム—東京電力福島第一原子力発電所の今は? 今後は?」(5月26日, コラッセふくしま), 「日本原子力学会シンポジウム—東京電力福島第一原子力発電所事故後の取り組み」(6月16日, コラッセふくしま)の3シンポジウムを実施している。

そこで、これまでの活動をさらに強力に進めるため、住民の方々と国や環境省との間でインターフェースの役割を担い、独立な立場で発言と活動を継続する。中間貯蔵施設が設置され、運用されるまでの約3年間を当初の実施期間とする。

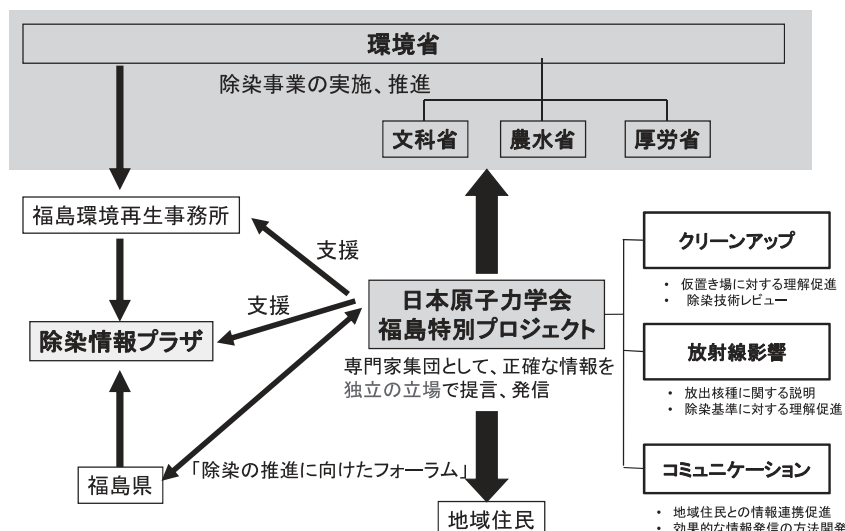
III. 主な活動

福島県の住民のため、現地において除染等の技術支援を中心とした活動を行う。併せて、地元において関心があると考えられるプラントの状況に関する情報等を分かりやすく説明するため、以下の活動を行う。

なお、今後、福島県や住民の方々のニーズと具体的な活動の進展を踏まえ、柔軟に活動内容等を見直しつつ活動の範囲を広げていくこととする。

(1) 住民の方々への情報提供

放射線のモニタリング結果の公表や除染技術に関する評価を行うとともに、放射線の健康影響も含め、住民の方々に分かりやすい解説・報告を行う。住民の皆様の一



第1図 福島特別プロジェクトの位置づけ

ズに応え、説明用資料などを取りまとめる。「除染推進に向けたフォーラム」などの対話集会を共同開催する。

(2) シンポジウム開催

本プロジェクトの活動報告また情報発信の場として、環境省・福島県・関係市町村・関係機関と協力してシンポジウムを開催し、正確な事実・知識の普及および理解の促進を図る。

(3) 除染促進活動

環境省と福島県が共同で運営している「除染情報プラザ」を積極的に活用した除染促進活動を支援する。除染情報プラザへの専門家の派遣を行う。実際の除染情報プラザの支援としては以下を行う。

- ・ 除染情報プラザの機能向上を図るため、除染プラザ運営機関に対して除染技術、放射線影響などに関する原子力学会の知見を提供する。
- ・ 地元の方の積極的な利用促進を図るため、広報活動を支援する。
- ・ 各種除染情報の収集とマッチング作業を行う。
- ・ 放射線の健康影響、除染の方法、仮置や中間貯蔵等について、住民からの質問などに対応する専門家を派遣する。
- ・ 除染情報プラザにおいて行われるミニ講習会について、テーマ設定の提案や講師派遣などの支援を行う。
- ・ 学会の専門家が講師となり、現地を巡回するミニ講習会を開催する。

また、市町村が推進する除染作業が円滑に進むように、市町村の要望に従い、専任の担当アドバイザーを置く。

(4) 除染講習会アドバイザー業務

除染講習会で用いるテキストの作成や、除染ボランティアおよび指導員の教育を行う。

(5) 環境修復/中長期対策への提言

東京電力福島第一原子力発電所の事故による発電所内

や周辺の修復に関する技術課題の分析・評価を行い、必要に応じて環境省や福島県が行う環境修復及び政府・東京電力が進める中長期対策に対して提言を行う。また、引き続き、関係機関の現地活動を支援する。

福島特別プロジェクトの位置づけを第1図に示す。図に示すように、福島特別プロジェクトでは具体的な施策は、クリーンアップ、放射線影響、コミュニケーションの3分野に分けて実行する。クリーンアップでは、仮置き場に対する理解促進や除染技術のレビューを行う。放射線影響では、放出核種に関する説明や除染基準に対する理解の促進に努める。コミュニケーションでは地域住民との情報連携の促進や効果的な情報発信の方法を開発する。

IV. おわりに

本プロジェクトは、原子力学会員のボランティアな精神と企業や自治体などからの学会への賛助金により実施していくものである。学会員の皆様の物心両面からの温かいご支援をぜひ、お願いしたい。

著者紹介



田中 知(たなか・さとる)
 東京大学
 福島県除染アドバイザー
 (専門分野/関心分野)放射性廃棄物処分、
 オフサイト除染



藤田玲子(ふじた・れいこ)
 (株)東芝 電力システム社
 福島県除染アドバイザー
 (専門分野/関心分野)放射性廃棄物処理、
 再処理、オフサイト除染

政府の福島原子力発電所事故の調査・検証結果の報告

東京大学 越塚 誠一

東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会(政府事故調)は2012年7月23日に調査・検証結果をまとめた最終報告を公表した。調査結果の全体は、最終報告および2011年12月26日に発表された中間報告を合わせたものとなっている。本稿では、福島第一原子力発電所の1～3号機における現場対処および事前の津波対策を中心に技術的な調査・検証結果について報告する。

I. 政府事故調について

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震および津波により、東京電力福島第一原子力発電所では1～3号機が過酷事故に至り、1, 3, 4号機が大規模な水素爆発を起こしてしまった。これらによって大量の放射性物質が環境に放出され、10万人を越える住民が避難を余儀なくされた。長半減期核種による土壌汚染も深刻であり、事故から1年以上を経過した現在においても警戒区域は解除されず、住民の避難が続いている。

このような大きな被害をもたらした原子力発電所の事故を調査するため、2011年5月24日に「東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会」(政府事故調)を内閣官房に設置することが閣議決定された。

政府事故調は委員会と事務局から構成されている。委員会は畑村洋太郎東京大学名誉教授を委員長とする10名の委員および委員長が指名した2人の技術顧問から成り立っている。委員長代理には作家の柳田邦男委員が就任した。委員会の指導の下に事務局が調査の実務を行った。

事務局には各省庁から約30名の官僚が派遣され、これに事務局専門家8名が加わった。事務局長は小川新二氏である。事務局は調査・検証を直接担当する3つの班(社会システム等検証チーム、事故原因等調査チーム、被害拡大防止対策検証チーム)および全体を取りまとめる総括班に分かれている。筆者(専門はコンピュータシミュレーションと原子炉過酷事故解析)は事務局専門家の1人として事故原因等調査チーム長を務めた。同じチームの事務局専門家には日本原子力研究開発機構の大井川宏之氏(専門は原子炉物理学)と東京理科大学の中曽根祐司氏(専門は材料強度学とシミュレーション工学)が就任した。事故原因等調査チームは、現場や東電本店での事故

対処およびプラントの挙動などの事故経過について調査し、事故原因の追究および問題点の抽出を行った。

政府事故調は発足してから、事故現場の視察や関係者のヒアリングを積み重ね、その結果をもとに2011年12月26日に中間報告¹⁾を行った。2012年2月24～25日には東京に海外専門家5名を招いて、中間報告に関する国際会議を開催した。中間報告の英訳も作成された。海外専門家によって述べられた意見は、最終報告に向けた調査に反映させた。

最終報告は2012年7月23日に行われた²⁾。最終報告も全体が英訳される予定である。

なお、福島原子力発電所の事故に関して主な調査委員会は4つある。本稿における政府事故調のほかに、国会事故調³⁾、東電事故調^{4,5)}、民間事故調⁶⁾があり、既にそれぞれ報告書が公開されている。

本稿では、筆者が所属した事故原因等調査チームが主に担当した現場対処、事前対策、プラント挙動の調査・検証結果を述べる。

II. 報告書の概要

1. 中間報告

中間報告の目次を以下に示す。

第I章 はじめに

第II章 福島第一原子力発電所における事故の概要

第III章 災害発生後の組織的対応状況

第IV章 福島第一原子力発電所における事故対処

第V章 福島第一原子力発電所における事故に対し主として発電所外でなされた事故対処

第VI章 事故の未然防止、被害の拡大防止に関連して検討する必要がある事項

第VII章 これまでの調査・検証から判明した問題点の考察と検討

このうち、被害状況については第II章、現場対処については第IV章、事前対策については第VI章にまとめられている。現場対処については、福島第一原子力発電所の

Report from Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company : Seiichi KOSHIZUKA.

(2012年7月25日 受理)

1～4号機に関する内容のみが記載されている。調査・検証により明らかになった問題点として、1号機の非常用復水器(IC)の作動状況に対する誤認および3号機の高圧注水系(HPCI)の手動停止および代替注水に関する不手際を指摘した。また、事前の津波・過酷事故対策が不適切であったとした。

なお、中間報告の内容については吉岡斉委員が既に原子力学会誌に紹介している⁷⁾。

2. 最終報告

最終報告の目次を以下に示す。

第Ⅰ章 はじめに

第Ⅱ章 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所における被害状況と事故対処

第Ⅲ章 災害発生後の組織的対応状況

第Ⅳ章 福島第一原子力発電所における事故に対し主として発電所外でなされた事故対処

第Ⅴ章 事故の未然防止、被害の拡大防止に関連して検討する必要がある事項

第Ⅵ章 総括と提言

最終報告には、調査結果の全体の中で、中間報告に書かれなかったことが記載されている。したがって、中間報告と最終報告を合わせた内容が調査結果の全体になっている。

最終報告の第Ⅱ章では被害状況と事故対処を合わせて記述しており、中間報告の第Ⅱ章と第Ⅳ章を合体させた章だてになっている。

現場対処に関しては、福島第一原子力発電所の5,6号機、電源復旧、福島第二原子力発電所の1～4号機についても調査結果を記載した。福島第一原子力発電所の1～3号機については、計測機器に関する調査、東京電力や原子力安全基盤機構(JNES)による過酷事故解析コードを用いた解析結果、東京電力や原子力安全・保安院(NISA)によるこれまでに行われた調査の結果などを参考に、プラント挙動にまで踏み込んで調査した。記載量が膨大になったため、詳細については資料編の「資料Ⅱ-1-1 主要施設、設備の被害状況に関する検証結果報告」として本文とは別にした。

Ⅲ. 調査結果の技術的な内容について

本章では調査結果の技術的な内容として、福島第一原子力発電所の1～3号機の現場対処、事前の津波対策、地震動による損傷、過酷事故解析、リスク評価を取り上げる。なお、筆者の個人的な意見についてもそれと示して加えることとしたい。

1. 1号機

1号機は最も早く炉心損傷に至り、3月12日には建屋の水素爆発が生じている。これは津波による全電源喪失

によって非常用復水器(IC)の配管破断検出回路のフェールセーフ機能が働き、ICのすべての弁が閉じてしまったためであると結論している。技術的な詳細は中間報告に記載されている。さらには、ICが機能していないことを当直が認識することが遅れた。免震重要棟に設置された発電所対策本部や東京の本店対策本部においても、ICの作動に疑問を持ったり作動の確認を指示することはなかった。これは極めて不適切であった。(中間報告 p.473)

ただし、こうした指摘は事故調の役割として事故の教訓を得るために行っているものであり、中間報告には以下の記載もなされている。「重要情報の取捨選択や評価に適切でない点があったとしても、現実に対応した関係者の熱意・努力に欠けるところがあったという趣旨ではない。ただ、各人が全力で事故対応に当たりながらも、事後的にみるとこのような問題点が発見されるのであり、その点については問題点として指摘する必要があると考える」(中間報告 p.121)

電源がなくとも作動する、いわゆるパッシブな冷却系であるICを備えた1号機が、最も早く炉心損傷に至ったことは、パッシブな冷却系を備えた新しい原子炉システムの設計に対してその有効性を疑わせる可能性があった。筆者の考えでは、ICに関する詳細な検証から、全電源喪失に対してパッシブな冷却系は有効であるが、次のような教訓が得られた。(1)ICのようなパッシブな冷却系であっても、その作動は緊急時には疑わなければならない。(2)パッシブな冷却系であっても、緊急時に計測系が失われることは十分考えられ、作動状況は人間の五感によって容易に確認できなければならない。(3)パッシブな冷却系が作動していない場合にも、復旧が容易に行えなければならない。特に(3)については、従来のパッシブ系の考え方(人間が関与しなくてもある一定の時間作動する)と相反する面があり、1号機からの教訓は重要である。

また、1号機の原子炉圧力は3月11日20:07頃に6.9 MPa gageが計測され、その後3月12日2:45頃には逃がし安全弁(SR弁)を作動させていないにもかかわらず0.8 MPa gageまで低下した。したがって、その間に圧力容器が破損して耐圧性が失われたと考えられる。

2. 2号機

2号機では、津波襲来後に原子炉隔離時冷却系(RCIC)が継続して作動していたが、これが当初は確認できなかった。RCICは3月14日の9:00頃以降に徐々に機能が低下し、12:30頃までに完全に喪失したと考えられる。その後、原子炉圧力の減圧に時間を要し、バッテリーをつないでSR弁の開操作を試み、18:00頃に5つめのSR弁でようやく原子炉圧力が低下し始めた。その後、23:35頃には格納容器ドライウェル(D/W)圧力が0.74 MPa

absまで上昇した。この時点でD/Wの格納容器雰囲気モニタ(CAMS)の値がサプレッションチェンバ(S/C)の値を既に大きく上回っており、溶融炉心が压力容器の損傷を引き起こした可能性が高い。

また、S/C圧力の計測に関し、3月14日4:30頃から12:30頃までは通常用S/C圧力計が復旧し、その値はD/W圧力とほぼ同じであった。一方、22:10頃にS/C圧力の計測が再開されるが、これはアクシデントマネジメント用S/C圧力計によるものであり、D/W圧力とは大きくかい離した。アクシデントマネジメント用S/C圧力計は、その時点での計測以前は測定範囲外の値を示していたものであった。したがって、22:10頃以降のS/Cの圧力は誤計測であったと考えられる。

3月15日6:12頃に聞かれた爆発音は、当初は2号機のS/C付近から生じたとされていたが、のちに4号機の建屋の水素爆発であることが判明した。実際、S/C圧力の値はそれ以前から誤計測であったと考えられるが、6:00にはついにダウンスケールに至った。これが発電所対策本部に0.0 MPa absと伝わり、2号機S/C付近の爆発を疑うこととなった。時間的な前後関係としても、S/C圧力のダウンスケールが先であり、爆発音が後であった。

最終報告では、S/Cを水源としてRCICを長時間動作させていたのであるから、S/Cの温度と圧力は重要な監視対象であったにもかかわらず長時間にわたって計測がなされず、適切さが欠けていたと指摘している。(最終報告 p. 363-364)

3. 3号機

3号機では、1,2号機と異なり津波後も直流電源が供給された。そのため、津波襲来によって交流電源が喪失した時点でRCICが停止していたが、その後これを起動することができた。また、RCICの停止後に高圧注水系(HPCI)が起動された。

中間報告に記述されているように、当直は3月13日2:42頃にHPCIを手動で停止させた。これは、原子炉圧力の低下によりHPCIの作動条件を逸脱し、HPCIポンプの破損を懸念したためである。この判断は合理的であるが、HPCIの停止の前にディーゼル駆動消火ポンプ(D/DFP)の原子炉への注水の切り替えの確認およびSR弁の開操作の実施の前にHPCIを手動停止させており、不手際であった。(中間報告 p. 475)

最終報告では、福島第二原子力発電所の現場対処の調査結果も示されている。それによれば、1号機ではRCICが作動中にSR弁で減圧し、3月12日3:48頃に代替注水手段である低圧の復水補給水系(MUWC)による注水を開始してから、RCICを4:58頃に手動停止している。2号機では、3月12日4:50頃にMUWCの注水を開始した後にRCICが4:53頃に自動停止している。3号機

では、3月11日22:53頃にMUWCの注水確認をした後に23:11頃にRCICを手動停止し、23:15頃にMUWCによる注水を開始している。4号機では、3月11日23:33頃にMUWCの注水確認をした後に3月12日0:16頃にRCICが自動停止するとほぼ同時にMUWCによる注水を開始している。このように、どの号機においても低圧の代替注水を実施してからRCICを停止させている。もちろん、福島第二原子力発電所では、外部電源が使用可能であったことなど福島第一原子力発電所よりも状況は恵まれていた。最終報告では、福島第二原子力発電所の現場対処を引用しつつ、再度、福島第一原子力発電所のHPCIの手動停止は不適切であったと指摘している。(最終報告 p. 363)

さらに最終報告において、3号機のSR弁の開操作による原子炉の減圧については成功しなかったと判断し、中間報告での記述を訂正した。3号機の原子炉圧力の記録によれば、3月13日2:42頃のHPCIの手動停止後に圧力は再び上昇することになる。しかしながら、6:30以降、SR弁が全く作動していないにもかかわらず、原子炉圧力が下降傾向を示しており、この時点で損傷が疑われる。さらに、9:10頃に急激な圧力の上昇が見られ、その後急速に低下している(最終報告の資料Ⅱ-1-1-48)。これは、燃料の一部が压力容器下部プレナムに落下して、压力容器底部にあった冷却水に接触し、多量の蒸気が発生して圧力が一気に上昇し、その後、压力容器又はその周辺部が破損して急激な圧力低下に至ったことによる挙動と考えても矛盾はない。9:10頃はSR弁の手動開操作に向けてバッテリーの接続等の作業を行っていたものの、SR弁の手動開操作に至ったのは9:50頃であり、9:10頃の圧力の低下はSR弁の手動開操作とは関係がない。

4. 事前の津波対策

事前の津波対策の調査結果は中間報告に記載されている。869年に、いわゆる貞観津波が仙台平野を襲ったことが古文書に載っており、津波対策にこれをどのように考慮するかが問題であった。

1966~1972年に福島第一原子力発電所の1~6号機の設置許可申請がなされた時の想定津波波高は小名浜港工事基準面(O.P.)+3.122 mであった。その後、2002年に発行された土木学会原子力土木委員会津波評価部会による「原子力発電所の津波評価技術」に基づいて想定津波波高は再評価され、O.P.+5.4~5.7 mと引き上げられ、その対策も施された。なお、この再評価では貞観津波は考慮されていない。同年、地震調査研究推進本部(推本)は「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について」の中で、津波地震は海溝寄りの領域内のどこでも発生しうる可能性があるとして指摘した。これは福島沖でも津波地震が発生する可能性があることを意味する。

2006年9月に原子力安全委員会による耐震設計審査指針の改訂を受けて、いわゆる耐震バックチェックが開始された。新指針では津波を地震随件事象と位置付け、施設の安全機能が重大な影響を受けるおそれがないこととされた。推本の見解に基づいて、東京電力は2008年までに三陸沖の波源モデルを福島沖に流用して津波解析を行い、福島第一原子力発電所においてO.P.+9.3~15.7mの波高の計算結果を得た。さらに、同年に佐竹らが貞観津波の波源モデルに関する論文を発表し、東京電力はこれを用いた津波解析により福島第一原子力発電所においてO.P.+8.6~9.2mの波高の計算結果を得た。そして、福島県沿岸において貞観津波の津波堆積物の調査を開始した。有識者にも意見を求めた。しかしながら、具体的な津波対策には着手しなかった。なお、佐竹らの波源モデルに基づく波高の計算結果はNISAに対して2009年9月7日頃に報告された。2011年3月7日にNISAは東京電力のヒアリングを実施し、三陸沖の津波波源を流用した計算結果および佐竹らによる貞観津波の波源モデルを用いた計算結果を聴取した。しかし、対策工事を実施するよりの明確な指示はしなかった。また、この時点で耐震バックチェックの最終報告はいまだになされておらず、地震随件事象として書き込まれた津波の評価と対策は未実施であった。そして2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生する。

筆者は原子力に係わるものとしてこの津波対策に関する経緯が残念でならない。貞観津波は約1000年前の天災であり、確率的に考えれば 10^{-3} のオーダーである。性能目標である炉心損傷頻度の 10^{-4} と比較すれば、設計基準として考慮されるべきである。また、福島原発事故後に他の原子力発電所が実施した電源車や消防車の配備などの緊急安全対策は、それほど膨大なコストが必要ではなく、これが事前に実施されていれば福島第一原子力発電所の1~3号機で発生した過酷事故は避けられたかもしれない。中間報告では、津波および過酷事故の事前対策に対して「国や専門家を含め原子力事業に係る者は、今回の事前検討の経緯を自らのこととして把握し、今後の教訓としなければならない」と記述された。(中間報告 p. 491) さらに筆者の個人的意見を加えれば、この経緯の背景には組織の縦割りの問題があり、学会においても自らこうした弊害をなくすような努力が必要ではないだろうか。

最終報告においては、考える様々な外的事象を考慮した総合的なリスク評価を行う必要があると指摘し、総合的なリスク評価によって原子力発電所の脆弱性を見出し、これに有効な過酷事故対策を準備しなければならないとの教訓を示した。(最終報告 p. 397-398)

5. 地震動による損傷

地震動による損傷については、中間報告および最終報

告に調査結果が記述されている。地震直後から津波到達までのプラントパラメータおよび関係者のヒアリングに基づいて、重要な機器の損傷はなかったと判断された。仮に圧力容器から格納容器への漏えいがあるとする、圧力容器内の水位の低下や格納容器ドライウエル(D/W)圧力の上昇を引き起こすが、そうした計測データは1~3号機において見られない。保安規定では運転上許容される不明確な箇所からの漏えい率が定められているが、最終報告に記載されているように、JNESによるMELCOR解析からは、この許容される漏えい率を超えるような漏えいが発生した可能性は低い。したがって、微小なリークの可能性までは否定できないが、少なくとも事故原因に結びつくような有意な漏えいは生じていない。ただし、1~3号機は地震後の外部電源喪失によって格納容器が隔離されており、作動しなかった機器の隔離弁より外側の地震動による影響は確認できておらず、損傷の有無は不明である。

6. 過酷事故解析

最終報告では過酷事故解析が取り上げられている。過酷事故解析における検証ではプラント挙動の正確な再現には成功していないとの結論が示されている。具体的には、東京電力が2011年5月および2012年3月に公表したMAAPコードによる解析、JNESが2011年9月に公表したMELCORコードによる解析である。各号機において、炉心損傷の時刻、圧力容器の破損時刻、格納容器の破損時刻、および関連する圧力などのパラメータは、実測値とのかい離およびコード間の結果の差が大きい。

一般論として言えば、過酷事故解析では過酷事故に伴う諸現象を定量的に説明することができ、測定データによって検証できる。さらに、計算モデルにはこれまでの学術的な知見が盛り込まれており、検証を通じて計算モデルの妥当性を評価することは、過酷事故に関する学術的な知見までも評価することにつながる。過酷事故解析コードは、過酷事故が仮に発生したらどのような事態になるかを事前に予測をして、その対策を考え、多重防護の観点から原子力発電所の安全性を高めるために用いられるものである。したがって、福島第一原子力発電所において過酷事故に至った1~3号機に関する解析及び検証によって、これまでの過酷事故に関する知見を評価するとともに、事故の進展を十分再現できないなど解析に問題がある場合には、これを解決するよう研究を進め、より信頼性の高い解析コードとすることが強く望まれる。(最終報告 p. 24-25)

7. リスク評価

過酷事故対策はリスク評価に基づいて行われるべきものであった。日本においては、内的事象に対するリスク評価および過酷事故対策は実施されていたものの、外的

事象に対するリスク評価は過酷事故対策には反映されていなかった。中間報告では、絶対安全が存在しないことを認め、リスク情報を提示し、合理的な選択を行うことができるような社会に近づく努力が必要ではないかと記述している。(中間報告 p. 498-499)

最終報告ではリスク評価の限界が議論されている。これに関して筆者は最終報告から読み取れる内容として以下の2点を具体的な問題として指摘したい。

第1は、外的事象には様々な事象が考えられ、最終報告では地震・津波以外についても網羅的に検討することが必要であるとされているが(最終報告 p. 397)、不確かさが大きくてリスク評価が実質的に不可能な場合もあり得る。こうした事象の典型はテロであろう。米国では2001年の同時多発テロ以降にEDMG(Extensive Damage Mitigation Guideline)が整備された。外的事象において不確かさが大きい場合には、同様にリスク評価による過酷事故対策よりも、EDMGとして対処されるべき事象があると考えられる。

第2に、従来のリスク評価では放射線による人的被害のみが考慮されており、福島原発事故において生じた長期の避難に伴う様々な困難、災害関連死、除染などは直接は考慮されていない。このことは、今回の被害実態からも極めて不合理である。最終報告では、被害実態の全容の継続的な調査を強く要求しており(最終報告 p. 429-431)、リスク評価も被害実態の全容を反映できるようなものとすべきである。

IV. おわりに

政府事故調の中間報告および最終報告の記載された現場対処および事前対策を中心に技術的な内容の解説を行った。中間報告では1号機のICの作動状況に対する誤認および3号機のHPCIの手動停止に係わる代替注水に関する不手際を指摘し、事前の津波・過酷事故対策が不適切であったとも指摘した。最終報告では、2号機のS/Cの監視が不適切であったこと、および再度の3号機

のHPCIの不手際を指摘した。

現場はいまだに立ち入ることができない場所が多く、炉心の損傷状況、および压力容器や格納容器の破損状況の詳細は明らかではない。しかしながら、政府事故調は2012年7月23日の最終報告をもってその活動を終える。そのため、事故調査および被害調査の継続と、これに基づいた教訓の継続的な見直しが最終報告において強く要望された。(最終報告 p. 429-431) 特に、事故に関する技術的な事実関係については、事業者、規制当局および専門家による徹底的な究明がなされ、今後の原子力発電の安全対策に反映されなければならない。

—参考資料—

- 1) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会, 中間報告, 2011.12.26.
- 2) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会, 最終報告, 2012.7.23.
- 3) 国会東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, 報告書, 2012.7.5.
- 4) 東京電力(株), 福島原子力事故調査報告書(中間報告書), 2011.12.2.
- 5) 東京電力(株), 福島原子力事故調査報告書, 2012.6.20.
- 6) 福島原発事故独立検証委員会, 調査・検証報告書, 2012.2.28.
- 7) 吉岡 齊, “政府の福島原子力発電所事故調査・検証委員会の中間報告について”, 日本原子力学会誌, 54[5], 318-322(2012).

著者紹介



越塚誠一(こしづか・せいいち)
東京大学
(専門分野/関心分野) コンピュータシミュレーション, 粒子法, 流体力学, V&V, 物理ベースCG, 過酷事故

報告

福島第一原子力発電所事故による原子力災害被災自治体等調査結果について

全国原子力発電所所在市町村協議会 中村 真，嶽 勤治

全国原子力発電所所在市町村協議会(以下「全原協」という)は、原子力発電所の立地および立地予定の24市町村と、隣接6市町村の計30市町村で構成され、立地に伴う諸問題の解決のために一丸となって取り組んでいる。福島第一原子力発電所で発生した原子力災害では会員市町村が被災し、想定外の「行政機能移転」や自治体の区域を超える「広域避難」というこれまでにない過酷な状況に追い込まれた。全原協では、市町村自らがこの災害を検証し、安全・防災対策をはじめとした原子力行政に反映させることを目的に、ワーキンググループを設置して調査を行い、平成24年3月に報告書として取りまとめた。本稿では、調査の概要と調査から見てきた課題に対する取り組みの方向性について報告する。

I. はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波により、福島第一原子力発電所では、これまで日本が経験したことのない規模の放射性物質の放出という深刻な原子力災害が発生した。被災された会員市町村は、長期化する住民避難や行政機能の移転などにより、現在も非常に過酷な行政運営を強いられている。

今回の災害では、国の初動対応の混乱や復旧復興に係る対応の遅れなど、極めて多くの課題が浮き彫りとなっている。事故の原因調査のみにとどまらず、国の初動対応を含めた原子力防災体制における問題についても、十分に調査・検証を行い、危機管理体制、防災体制の抜本的な見直しを早急に行わなければならない。

われわれ立地市町村としても、住民の安心安全を守るための対策を検討すべきと考え、市町村職員自らで被災地などを調査することとした。

II. 調査体制および調査事項

協議会構成市町村の中から5市5町3村の職員で構成する「原子力災害検討ワーキンググループ」を設置し、会員の中で被災した福島県内の6市町(双葉町、大熊町、楢葉町、富岡町、南相馬市、浪江町)および同じ地震と津波を受けながら原子力災害に至らなかった事業所(女川原子力発電所、東海第二原子力発電所)の調査を実施した。現地調査では次の事項について調査し、結果を基に課題の抽出および対応の方向性について検討を行った。

- 通報連絡・情報伝達に関すること
- 住民避難に関すること
- 防災体制に関すること
- 避難所運営に関すること
- その他(震災対応上の問題、課題など)

III. 調査結果

事業者からの通報連絡の状況について、第1表に示す。福島第一原子力発電所からの第1報はいずれの市町でも確認できず、原子力災害対策特別措置法第10条および第15条も一部の町しか届いていなかった。

立地4町においては、もともと発電所とのホットラインが整備されており、特に福島第二原子力発電所用は停電時にも使用できるものであったため、地震直後もつながっていた。また、早い段階で東京電力(株)から社員派遣があり、避難時も同行していたため、随時、情報提供できる体制は取られていたが、福島第一原子力発電所の情報は非常に断片的で、内容も不十分であった。

一方、隣接の浪江町、隣々接の南相馬市においては、電話連絡などはなく、震災直後の社員派遣もなかったため、テレビで情報収集するしかない状況であった。

次に、国、県からの避難指示などの通報連絡状況について第2表に示す。国や県からの連絡はほとんどの市町で確認がとれず、避難指示すら届いていない市町村がほとんどであった。当然、避難先や避難方法などについての確かな指示はなかった。

オフサイトセンターの設置についても、市町への連絡はなく、オフサイトセンターからの情報発信もほとんどが届いていなかった。職員を派遣できたのは大熊町のみであったが、オフサイトセンターそのものが機能不全に陥っており、十分な状況把握はできなかった。

The Effects of the Nuclear Disaster at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on Local Governments: Makoto NAKAMURA, Kinji DAKE.

(2012年 7月10日 受理)

第1表 東京電力(株)からの通報連絡状況

※ 時間は24時間表示		双葉町 [H23. 8/22~8/25調査]	大熊町 [H23. 10/12~10/14調査]	福島町 [H23. 10/12~10/13調査]	富岡町 [H23. 10/18調査]	南相馬市 [H23. 10/19調査]	浪江町 [H23. 10/26~10/27調査]	
震災直後の庁舎の 電源・通信等の状況	停電したが、非常用発電機で電源を確保した。FAXI台のみ使用可能であった。福島第一、第二のホットラインがあったが、手回式の第二しかつながらなかった。	停電したが、非常用発電機で電源を確保した。FAXI台のみ使用可能であった。(FAXは3/11 19:00頃から使用可能)福島第一、第二のホットラインがあったが、手回式の第二しかつながらなかった。	停電したが、非常用発電機も使用できなかった。降接する「宇田の森」は非常用発電機で電源が確保できたため、災害対策本部を移動した。第二のホットラインはつながっていた。(第一とはつながりにくく3/12未明から不通)	停電したが、非常用発電機も使用できなかった。降接する「宇田の森」は非常用発電機で電源が確保できたため、災害対策本部を移動した。第二のホットラインはつながっていた。(第一とはつながりにくく3/12未明から不通)	停電したが、非常用発電機も使用できなかった。降接する「宇田の森」は非常用発電機で電源が確保できたため、災害対策本部を移動した。第二のホットラインはつながっていた。(第一とはつながりにくく3/12未明から不通)	停電したが、非常用発電機も使用できなかった。降接する「宇田の森」は非常用発電機で電源が確保できたため、災害対策本部を移動した。第二のホットラインはつながっていた。(第一とはつながりにくく3/12未明から不通)	停電したが、非常用発電機も使用できなかった。降接する「宇田の森」は非常用発電機で電源が確保できたため、災害対策本部を移動した。第二のホットラインはつながっていた。(第一とはつながりにくく3/12未明から不通)	停電したが、非常用発電機も使用できなかった。降接する「宇田の森」は非常用発電機で電源が確保できたため、災害対策本部を移動した。第二のホットラインはつながっていた。(第一とはつながりにくく3/12未明から不通)
	第1報 (地震発生)	記録なし	記録なし	記録なし (東電にも送信記録なし)	記録なし	記録なし	記録なし	
	10条通報	記録なし	2012/3/11 16:07 (固定電話)	2012/3/11 16:35 (固定電話・FAX)	記録なし	記録なし	記録なし	記録なし
15条通報	確認とれず (固定電話)	2012/3/11 16:50 (固定電話)	記録なし (東電には送信記録があるが町では受信していない)	記録なし (東電には送信記録があるが町では受信していない)	記録なし	記録なし	記録なし	
東京電力からの状況連絡	状況連絡の有無	随時連絡あり	随時連絡あり	随時連絡あり	随時連絡あり	随時連絡あり	随時連絡あり	
	社員派遣	3/11 17:00頃 2名 (以降常駐)	3/11 20:00頃 2名 (以降常駐)	3/12 22:30頃 2名 (以降常駐)	3/11夜~ 2名 (第二から) (以降常駐)	3/25~1名 (その後増員され現在7名)	発災数日は連絡なし 発災数日はなし (発災数日後から1名常駐)	
	主な連絡手段	東京電力常駐社員 ・FAX ・固定電話	東京電力常駐社員 ・ホットライン (第二) ・FAX ・固定電話	東京電力常駐社員 ・ホットライン (第二) ・FAX	東京電力常駐社員 ・ホットライン (第一、第二)	東京電力常駐社員 ・ホットライン (第一、第二)	東京電力常駐社員 ・ホットライン (第一、第二)	発災数日は連絡なし
内容の適正さ	炉心溶融の可能性など、避難判断に必要な情報がなかった。	炉心溶融の可能性など、避難判断に必要な情報がなかった。安全性が強調されて、事故の深刻さが伝えられなかった。	炉心溶融の可能性など、避難判断に必要な情報がなかった。安全性が強調されて、事故の深刻さが伝えられなかった。	炉心溶融の可能性など、避難判断に必要な情報がなかった。	炉心溶融の可能性など、避難判断に必要な情報がなかった。	炉心溶融の可能性など、避難判断に必要な情報がなかった。	発災数日は連絡なし	
連絡の継続性	3/12、4:00頃に東京電力広報部からイベントの通報連絡があった。	3/12、16:30頃に0FCに町職員を派遣し、情報収集を行った。	3/11、16:30頃に0FCに町職員を派遣し、情報収集を行った。	区域外避難後も継続	区域外避難後も継続	区域外避難後も継続	発災数日は連絡なし	
備考							発災数日は連絡なし 福島第一の隣接町であり東京電力と通報連絡協定を締結していたが、連絡はなかった。 東京電力はFAXしたとして、事業者からの情報がなかったため、テレビで情報収集した。	

第2表 国、県からの通報連絡状況

※ 時間は24時間表示	双葉町 [H23.8/22~8/25調査]	大熊町 [H23.10/12~10/14調査]	楢葉町 [H23.10/12~10/13調査]	富岡町 [H23.10/18調査]	南相馬市 [H23.10/19調査]	浪江町 [H23.10/26~10/27調査]
発電所状況連絡	なし	ほとんどなし(2、3回のみ)	なし	なし	なし	なし
発電所の状況連絡	なし	ほとんどなし(2、3回のみ)	なし	なし	なし	なし
主な連絡手段	—	固定電話、携帯電話	—	—	—	—
内容の適切性	—	・避難判断に必要な情報なし ・事故の深刻さが伝えられず ・連絡が遅く、情報活かせず ・区域外避難後も継続	—	—	—	—
連絡の継続性	—	なし	—	—	—	—
緊急事態宣言	確認とれず	なし	確認とれず	なし	確認とれず	なし
県	確認とれず	なし	確認とれず	確認とれず	確認とれず	なし
3km避難	確認とれず	3/11 21:50頃 (東電駐在員・TV確認)	確認とれず	確認とれず	確認とれず	なし
3~10km屋内退避	2012/3/12 6:29 (FAX)	3/12 6:00頃 (細野補佐官よりTEL)	確認とれず	確認とれず	確認とれず	なし
10km避難	確認とれず	確認とれず	確認とれず	確認とれず	確認とれず	なし
20km避難	確認とれず	確認とれず	確認とれず	確認とれず	確認とれず	なし
20~30km屋内退避	確認とれず	確認とれず	確認とれず	確認とれず	2012/3/15 11:56 (FAX)	なし
20km警戒区域	確認とれず	確認とれず	確認とれず	確認とれず	2012/4/21 12:12 (メール)	2012/4/21 (FAX)
20~30km屋内退避	確認とれず	確認とれず	確認とれず	確認とれず	2012/4/11 18:13	4月21日
計画的避難区域	確認とれず	確認とれず	確認とれず	確認とれず	なし	なし
緊急時避難準備区域	なし	不十分 (県からは田村市へ、警察からは川内村への避難指示あり)	なし	なし	なし	なし
避難先、避難経路の指示	(川俣町への避難指示があったとの情報は詳細不明)	・3/11深夜に国土交通省からバスを出すとの連絡があった。(3km避難用と認識した) ・3/12、3:00頃に茨城交通のバス50台が大熊町で待機していた。 ・県とのホットライン(専用電話、FAX)はつながらなかった。 ・3/11、23:00頃副知事が来庁し、その後、東電副社長が来庁した。	・県の(原子力防災用)緊急時通信網は鳥取西庁舎が被災し使用不可能であった。 ・県総合情報センターのうち地上系回線は使用不可能、衛星系回線は使用可能であったが、連絡が集中しなかった。	なし (川内村への避難指示があったとの情報は詳細不明)	・3/12、18:25の20km避難指示の場合、南相馬市にも対象地区があるが、指示文書に南相馬市の記載がなかった。(指示文書自体は後日、経済産業省のホームページで内容を確認した)	なし
避難に係る指示内容	なし	なし	なし	なし	なし	なし
避難方法の指示	なし	なし	なし	なし	なし	なし
備考						

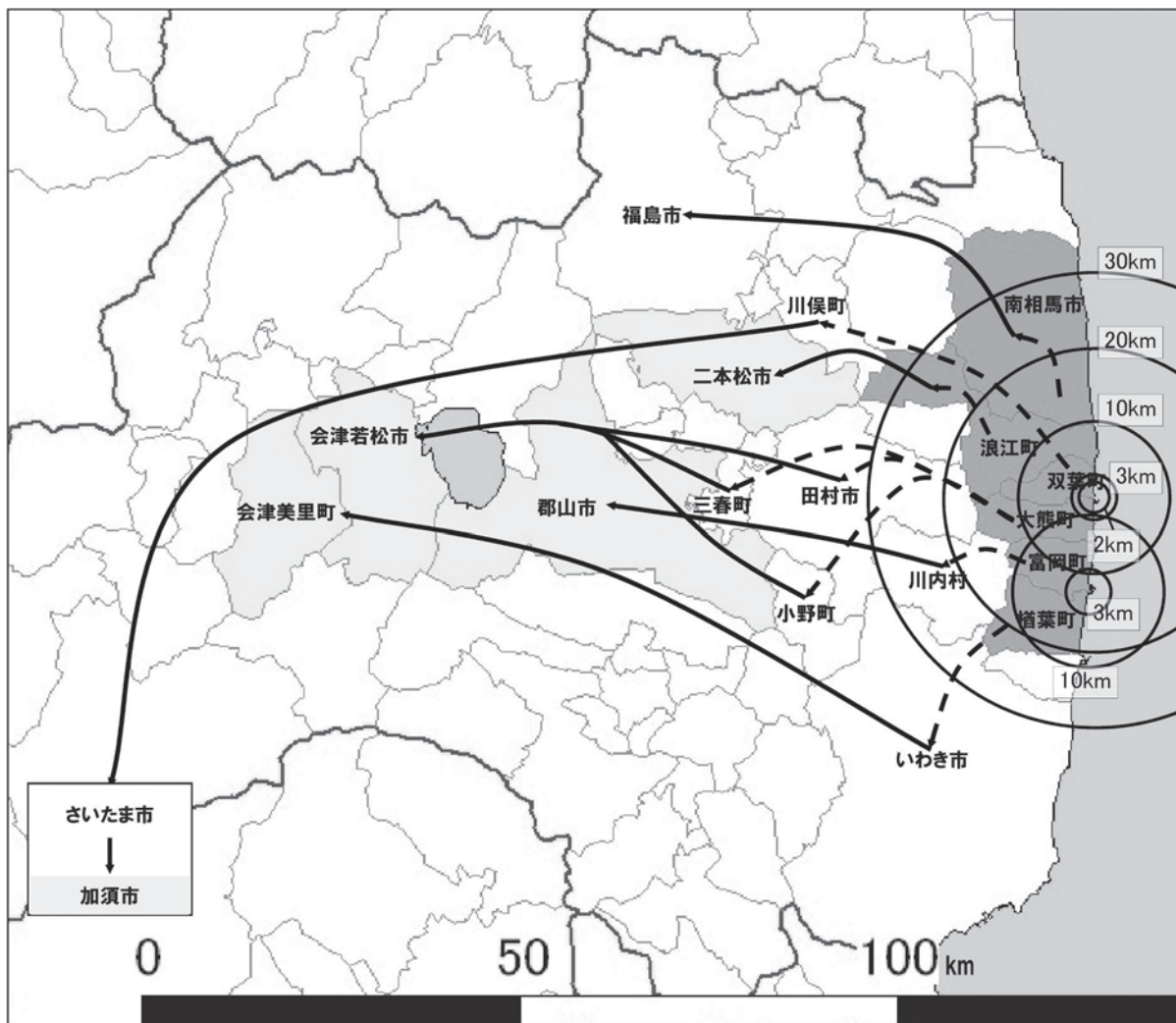
住民避難について、国、県からの避難指示が届かなかったことから、テレビなどの情報で独自に判断せざるを得ず、避難先や避難手段も自らで確保しなければならない状況であった。一部の市町では国が派遣したバスを活用したが、ほとんどの市町は独自に確保しなかった。しかし、市町での確保は困難を極め、多くの住民が自家用車避難を行わざるを得ない状況であった。住民への避難指示の広報は市町で配備した防災行政無線や広報車、消防団や職員の巡回などで行った。

原子力災害の拡大に伴い、一度避難したところからさらに避難しなければならない状況も発生した。また、緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム(SPEEDI)などの情報が提供されなかったことから、高線量地域に避難所を開設してしまった市町もあった。(第1図参照)

災害時要援護者や病院患者については、地区の方々の協力を得ながら対応した。病院患者の搬送などでは施設での対応のほか、自衛隊車両や救急車、警察車両も活用された。

安定ヨウ素剤について、国は3月12日に20 km 圏内に避難指示を行った後、3月16日に20 km 圏内残留者の避難にあたっての服用指示を出したが、ほとんどの市町に的確に伝わっていなかった。立地地域の住民は安定ヨウ素剤に関する知識を持っており、福島第一原子力発電所1号機や3号機の水素爆発を受け配布の要望も強くなったことから、独自に配布を判断した市町もあった。

今回、想定を超える複合災害となり、オフサイトセンターも機能しなかったことから、全ての市町において、これまでの原子力防災訓練は全く役に立たなかった。また、行政機能を移転しなければならない状況を想定しておらず、住民対応は困難を極めた。避難が長期化、広域化したことにより、避難所の数も極めて多くなり、避難所に職員を配置できないなどの問題が発生した。さらに広範囲で物流が滞ったため、物資の供給にも著しい支障が生じており、被災市町の職員が物資を取りに行かなければならない状況まで発生した。



第1図 各市町の主な住民避難先

Ⅳ. 課題・問題点と対応の方向性

調査結果を踏まえ、市町村の視点から課題、問題点を抽出し、今後の対応の方向性について検討を行った。主な事項について記載する。

1. 情報連絡・住民広報

- 国、県から情報はほとんどなく、テレビなどの情報に頼らざるを得ない状況であった。また、各機関によって指示や行動が異なる事例もあり、混乱が生じた。
- 今回の初期対応の徹底的な検証を行い、迅速に情報連絡ができる体制や各防災関係機関が確実に情報共有できる体制を早急に構築すべき。
- 大規模災害による停電や通信不良に伴い、国、県、市町および事業者の通信網が機能不全に陥った。
- 大規模災害時や停電時にも確実に情報連絡ができるよう、衛星電話の配備や保安電話の活用など、通信網の強化や多重化を早急に図るべき。
- 国および事業者の情報発信は適切性を欠いており、多くの国民に疑念や不信感を抱かせた。市町においては情報が不足し、住民への情報提供が不十分となった。
- 国が直接、報道発表や住民広報を行う広報担当者を市町村に派遣する体制を構築すべき。

2. 防災体制

- 国からの情報、指示がなく、市町が独自に判断を迫られる事態となったが、規模の小さい市町では原子力を専門に理解する職員がいなかった。
- 国および事業者は、原子力災害時に必要な情報提供、助言を行うため、市町村の災害対策本部への要員派遣を法律に位置付けるべき。
- これまで複合災害を想定しておらず、原子力防災対策が有効に機能しなかった。
- 国は今回の災害を踏まえ、原子力防災計画への見直しのための具体的なガイドラインを早急に示すべき。また、市町村としても複合災害時に有効に機能できる体制を検討する必要がある。
- 国は、統合対策本部の設置や計画的避難準備区域、緊急時避難準備区域を設定するなど、法律の規定にはない災害対応を行い、混乱を招いた。
- 国は早急に今回の初動対応についての検証を行い、防災指針や危機管理体制などを抜本的に見直すべき。
- 長期間・広範囲にわたる対応を余儀なくされ、市町の職員に大きな負担がかかっていた。
- 国は職員や専門家などを市町村へ速やかに派遣するなどのバックアップ体制を構築すべき。

3. オフサイトセンター

- 地震によりオフサイトセンターの機能が喪失し、要員

の参集も適切に実施されなかった。その後も撤退を余儀なくされるなど、拠点施設として機能しなかった。

→オフサイトセンターが全く機能しなかった原因を検証し、参集体制なども含め、オフサイトセンターのあり方を再構築すべき。電源喪失や線量上昇への対応、通信設備の多重化など、抜本的な設備強化および代替施設の確保を早急に検討すべき。

4. SPEEDI

- SPEEDIの拡散予測情報が市町に提供されなかった。
- SPEEDIがなぜ活用されなかったのか、調査・検証を実施し、その結果を公表すべき。

5. 行政機能移転

- 行政機能移転という想定外の事態は市町の対応能力の限界を超えており、自治体機能が著しく低下した。
- 国または道県が主導して、行政機能移転先の確保など、市町村をバックアップできる体制を構築すべき。

6. 避難道路整備

- 国および県からの避難先・避難方法・避難経路などの指示は不十分であった。避難のためのバスも確保できず多くが自家用車避難となったため、道路には避難車両が殺到し、移動に長時間を要する事態となった。
- 複数車線化や急勾配・急カーブなどの区間の解消を行うなど、国の責任において災害に強い道路を整備すべき。また、交通規制や交通誘導のあり方を検証し、複合災害時にも迅速に避難できる体制を構築すべき。

7. 住民避難

- 市町の枠を越える広域避難が必要となったが、国や県のイニシアチブが不足し、避難指示、避難先および避難手段の連絡など、適切な対応がなされなかった。
- あらかじめ国・道県において、広域避難を想定した枠組みを構築すべき。また、避難後の地域のコミュニティを堅持するため、地域とのつながりを維持する仕組みを考える必要がある。
- 放射能拡散の状況についての情報提供がなされなかったため、高線量地域に避難先を置いてしまった。
- 国や道県は、モニタリング結果やSPEEDIの拡散予測を用いて、的確な避難先や避難経路を指示できる体制を早急に構築すべき。また、避難先で放射線量を迅速に把握できるように、測定機器の設置や人員配置など、緊急時モニタリング体制を強化すべき。
- 自家用車避難に伴い、渋滞、燃料枯渇による車両の放置、避難先での駐車場の不足などが生じた。
- 自家用車避難を想定した交通シミュレーションを実施し、迅速に自家用車避難ができる計画を検討すべき。

8. 支援物資の搬送・避難所運営など

- 広範囲で物流が滞り、行政運営および住民の生活に支障が生じた。また、被災市町の職員が支援物資を受け取りに行かなければならない状況も発生した。
- 支援物資の搬送で市町村に負担が生じないように、あらかじめ国・道県が責任を持って体制を検討すべき。
- 避難先が広域化したため、必要な職員が配置できず、住民対応が困難であった。また、複数の市町村の住民が避難所に混在したため、避難者情報の把握が難しく、安否確認の問い合わせ対応に苦慮した。
- 広範囲に影響が生じる原子力災害を想定し、自治体職員や国の職員の応援派遣体制を構築すべき。市町村としても、避難所間の連絡手段、住民への連絡手段などの確保および職員配置体制の検討が必要である。

9. 住民被ばく

- 国や県、東京電力(株)の緊急時モニタリングの対応は不十分であり、内部被ばくについても速やかな調査が行われなかった。
- ホールボディカウンタを立地地域に配備すべき。特に、放射線の影響を受けやすいとされている子供については、国の責任で継続した健康調査を実施すべき。

10. 安定ヨウ素剤配布・服用

- 国から適切な配布・服用指示がなされなかった。
- 今回の指示決定の経緯・伝達のあり方を徹底的に検証し、早急に対応策を講じるべき。また保管や配布の方法を検討し、迅速に配布を行える体制を構築すべき。

V. おわりに

今回、調査から抽出された課題の解決のため、国が実施すべき事項については、関係省庁に要請を行った。国

は、これらの課題に誠意をもって対応しなければ、立地市町村は将来に希望をもって自治行政に取り組んでいけないということを認識すべきである。

今回、市町村職員のみで調査に取り組み、自治体としても厳しい現実を突きつけられたが、調査により新たな原子力防災の方向性を検討することができた。市町村自らが主体的に取り組まなければならない事項も多く、全原協では今年度もワーキンググループを継続し、各市町村の原子力防災計画に反映するための検討を進めているところである。立地市町村として、取り得る対策に限界があることは否めないが、地域住民のため、真に必要な不可欠な防災対策を早急に講じていくことが求められる。全原協は、これまで以上に会員市町村が一丸となって、住民の安心・安全の確保に全力で取り組んでいく。

—参考資料—

原子力災害検討ワーキンググループ報告書
(<http://www.zengenkyo.org/houkokusyo/bousaihoukokusyo.pdf>)

著者紹介



中村 真(なかむら・まこと)
全原協原子力災害検討ワーキンググループ
主査(薩摩川内市課長)
(専門分野/関心分野)薩摩川内市で約18年
3カ月にわたり原子力担当業務に従事。
2012年3月まで原子力対策課長。



嶽 勤治(だけ・きんじ)
全原協事務局長(敦賀市理事)
(専門分野/関心分野)2009年4月より敦賀
市企画政策部長、2011年4月より企画政策
担当理事。



From Editors 編集委員会からのお知らせ

—最近の編集委員会の話題より—
(9月5日第3回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・英文誌の出版状況、電子投稿審査システムの開発状況が報告された。新しい著作権および印刷発行権移譲書類を承認した。
- ・英文誌の50周年記念 Review 論文の追加候補を承認した。学会誌に案内を出すこととした。
- ・平成24年度学会賞(論文賞)への編集委員会推薦論文を選考した。また、英文誌独自の表彰内容についてほぼ決定した。
- ・賛助会員電子アクセス移行に伴う手続きを進めるとともに、それに伴う支払い条件変更を確認することとした。
- ・掲載否論文著者からのクレームへの対応が報告された。

【学会誌関係】

- ・新企画「直言；原子力とどう向き合ってきたか、今後どう向き合うか」を当事者の視点から、外部の視点からの執筆者を選出し、12月号から4、5回の予定で掲載することになった。
- ・巻頭言、時論記事の今後の予定について確認、検討された。1月号は巻頭インタビューを掲載の予定。
- ・特集「原子力の人材教育・育成」を企画中で、第1弾は原子力人材教育問題についての解説記事を11月号に掲載予定。次に「学生との座談会」、それを踏まえて原子力人材教育を推進している大学、研究機関の代表者との「設問方式の誌上インタビュー」方式の記事を掲載の予定。

編集委員会連絡先<<hensyu@aesj.or.jp>>

原子力災害の再発を防ぐ(その4/最終回)

機械構造分野の今後の課題

東京大学 岡本孝司, 東北大学 高木敏行, 日本原子力発電(株) 植田 進

日本原子力学会の「原子力発電所地震安全特別専門委員会」傘下に設置した構造分科会は、日本機械学会の活動と連携して、機器・配管系の耐震設計における技術的課題や地震時の影響評価といった学会としても取り組んでいくべき事項について議論した。これらを「地震安全の論理」に沿って整理し、課題の過不足を検討して課題整理表に取りまとめ、ロードマップを作成した。本稿では、抽出された検討課題について述べるとともに、平成23年3月11日に発生した東日本大震災以降の原子力発電所の対応・評価状況を踏まえ、原子力発電所の耐震設計に関する余裕がどこまで分かっている、どこに課題があるのかについて解説する。

I. はじめに

日本原子力学会の「原子力発電所地震安全特別専門委員会」傘下に設置した構造分科会は、機器・配管系の耐震設計における技術的課題や、地震時の影響評価といった機械構造分野について学会としても取り組んでいくべき事項について議論した。これらの議論を「地震安全の論理」に沿って整理し、取り組むべき課題の過不足を検討して取りまとめ、ロードマップを作成した¹⁾。

原子力発電所の耐震設計には、ベースマットを含めた建屋構造の耐震、機器・配管の耐震などの設計がある。この中で耐震解析による評価と同時に、設計を行うもの(建屋構造や機器の固定部、配管の支持構造、格納容器など)以外の多くの構造物は、構造設計を行った後に耐震解析を行っている。このときの耐震設計とは基本的に耐震解析による構造設計の確認となっている。

それぞれの解析の過程では保守性を保つように設計されている。それぞれの持つ保守性は集積され総合的に大きな余裕を有することになる。構造分科会では、このような余裕を有することに着目しつつ、耐震設計において機器・配管の応答解析から強度評価までの手順の範囲を対象として、今後の耐震設計のあり方(高度化)や地震後の健全性確認のための点検・評価の標準化及び高度化に関連する技術的課題を中心に検討した。

その検討より、耐震設計のあり方、地震後の健全性確認のための点検・評価の標準化及び高度化に関連する技術的課題、地震時の設備に対する影響を表す指標の検討

といった機械構造分野の議論を「地震安全の論理」に沿って整理し、取り組むべき課題を得た。

(1) 「地震安全の論理」では、耐震設計における安全確保の概念として、①必然的にもたらされる余裕と、②自主的に確保する余裕があることを説明している。機械構造分野では、①に相当するものとして、耐震設計手法の内在する裕度の定量的把握といった課題が考えられる。②に関しては、設計者が意図して確保するものであり、裕度の定量的把握のために

- ・設計時の地震応答評価による裕度：M1
- ・設計手法による応答計算値と許容限度との間の裕度：M2
- ・設計許容限界の持つ裕度：M3

の3つに分けて考えたときには、M2に含まれてくるものとなる²⁾。

(2) 「地震安全の論理」では、耐震設計における基準地震動の位置づけを耐震重要度分類と相まって「発生する事象の原子炉への影響が異常過渡相当となり、リスクを十分に低く抑えられる地震動レベル」としている。耐震設計の高度化の課題とは、この考え方を踏まえて設計手法や許容値を検討していくこととして関連づけられる。

(3) 「地震安全の論理」では、基準地震動を科学的かつ合理的に設定できるように確率論的概念の導入を提言している。機械構造分野では、地震動(入力)が確率論的となった場合に構造基準がこれに対応していくことが課題となる。また、動的機能維持に関しても地震動(入力)が確率論的となった場合の対応がその評価方法も含めて検討すべき課題と考えられる。

(4) 安全評価体系における耐震設計の課題としては、減衰定数の見直し、動的応答評価手法の検討といった課題や免震技術のような新技術の採用が考えられる。

Prevent Recurrence of Nuclear Disaster⁴⁾; Future Tasks in the Field of Structure and Components: Koji OKAMOTO, Toshiyuki TAKAGI, Susumu UEDA.

(2012年 8月8日 受理)

本稿では上記の議論を踏まえ、抽出された技術的検討課題について説明する。また、東日本大震災での原子力発電所の状況や対応を踏まえ、機械構造分野での耐震設計に関して、機器の安全余裕やさらなる課題について述べる。

II. 抽出された検討課題

1. 建屋・機器の耐震余裕の評価

基準地震動を超えるような地震動に対する現行の耐震設計に基づく建屋・機器の余裕を定量的に把握することが必要である。安全上重要な機器の耐力に関する余裕を定量的に把握し、実際にどの程度の大きさの地震動まで耐えられるのかを示しておかなければならない。現行知見に基づく耐震設計における余裕の明確化、試験や解析による要求機能に応じた許容限界等を検討し、余裕を定量的に明示することが課題となる。

施設がもつ実際の余裕は、これまでの実験結果等からすれば、大きいものと推定されるが、その余裕がどれだけあるか、耐震設計に内在する裕度や荷重等の因子のばらつきを考慮し把握しなくてはならない。

地震後の設備健全性評価に関する国等の審議会では、「設備が持つ耐震余裕」について一層の技術的解明による説明性向上が要請されている³⁾。このため、耐震バックチェックの評価実績や、耐震安全余裕に関する国の審議動向を踏まえつつ、機器・配管系の耐震余裕の定量評価に資する研究を実施していくことが必要であろう。成果は関係学協会で検討中の信頼性評価法を活用した構造基準高度化検討へ反映して行かなければならない。

2. 地震動指標の検討

原子力施設への地震入力への厳しさを表現方法として、現行の加速度(いわゆる震度)に代わる設備に対する実効的な厳しさを示す指標を構築することが重要である。

現行の加速度振幅(入力もしくは応答)をベースとした耐震安全性の評価は過度に保守的であり、合理的な地震時の対応や健全性評価に資するため、機器損傷事例と入力地震動との関係を整理し、エネルギー評価手法等の有効性の検討が必要である。

その一つとして、米国で用いられているCAV(Cumulative Absolute Velocity)の適用可能性がある。CAV値による健全性判断は、設備の応答解析等を実施せずに入力としての指標として判断できるメリットがある⁴⁾。また、短周期地震動(いわゆる短周期側のヒゲ)の影響を合理的に評価する方法としても有効である。ただし、実際の運用に当たって、判断しきい値を適切に設定するための十分なデータがそろっておらず、実地震や振動試験による被害や影響に関するデータの蓄積が課題となる。

健全性判断指標の構築に関しては、地震動に対するエ

ネルギーの評価指標の調査、調査した指標を用いた実地震記録についての試算、地震波を用いた破壊試験等による検討、また健全性判断基準としての適用性を検討していかなければならない。

3. 耐震設計の合理化・高度化

(1) 技術の進捗やデータの蓄積に基づき、機器・配管系の設計手法(地震応答解析法、許容限界)の有する保守性を定量化し、耐震設計の合理化・高度化を進めなければならない。

現行の機器・配管系の設計用減衰定数は、振動試験結果に基づくデータの下限值に保守性を持って設定されている。米国では、カテゴリーIの構造物及び機器の減衰定数については、SSE(Safe Shutdown Earthquake)に対して、わが国に比べ大きな減衰が用いられている⁵⁾。

合理的な耐震設計、耐震余裕の適切な評価のため、より現実的な設計用減衰定数(機器種別に応じた減衰定数、地震入力への大きさに応じた減衰定数)を設定し、これらについての規格基準化の検討が必要である。

(2) 動的ひずみ(ひずみ速度)は、鋼構造材料の機械的強度に影響を及ぼすことが知られている⁶⁾。原子力機器・構造物については延性材料が使用されており、地震による動的ひずみが構造強度に与える影響は小さいと想定される。

この影響を定量的に評価するために、配管などの機器・構造物に生じる地震時のひずみ速度を調査、検討し、想定されるひずみ速度の範囲で機械的強度との相関データを文献調査によって収集する。拡充すべき機械強度データがあれば、実験的に採取し、機器・構造物の健全性に及ぼす地震時動的ひずみの影響を検討する。この成果の規格・基準への反映も必要である。

(3) 弾塑性応答評価法の適用検討を進めることが課題となる。耐震設計で使用されている地震応答解析モデルは、設計対象に応じて各種仮定を設け、基本的には保守的な設計が達成できるよう配慮して運用されている。建屋耐震壁の復元力特性を考慮した解析のように、対象施設の実況に即した非線形性を考慮するなどして、より適正な地震応答を評価することも解析モデルへの要求事項として重要である。

機器・配管系への弾塑性応答評価法の適用拡大、弾塑性強度評価手法の適用拡大の検討も必要である。新耐震設計基準に基づく耐震バックチェックの結果から、地震荷重による発生応力が大きく、弾塑性解析による現実的な評価が有効と考えられる代表機器・構造を抽出する。抽出された代表機器について、現行のJSME設計・建設規格と強度評価、及び実現象を再現する3次元シミュレーション解析(静的、動的)を実施する。これらと比較することにより、機器の強度評価に対する弾塑性解析手法による設計余裕を検証する。また、簡易な試験体を用

いた試験と弾塑性解析による強度比較による設計余裕の検証も実施することや、弾塑性解析における地震荷重の取扱いを明確にすることで、地震荷重評価における過度な保守性を排除できる合理化評価手法の確立も必要であろう。

4. 新技術の採用

高地震地帯への立地成立性並びに標準化設計による設計効率化を目的として、実規模大の確証試験による免震設計の確証と評価法の確立により、免震構造の実プラントへの適用性検討の必要がある。非原子力分野では免震技術の適用例は拡大してきている。電気協会は平成12年に、FBR 分野での免震設計法に関する研究成果に対する調査報告書⁷⁾等、当時の知見に基づいて、発電用原子炉施設全般に対する技術指針 JEAG 4614を制定している。免震構造原子力施設の建設、特に軽水炉原子炉建屋への適用に際しては、安全性確保の面から更なる各種検証が重要である。

5. 地震後(時)の評価

(1) 地震時の機器・構造物の挙動の把握、その後の健全性評価の迅速かつ確実な実施に資するため、機器系地震観測装置の標準的な設置が必要である。

地震時に受けた機器応答のデータ取得ができれば、設計時点での評価と大小を比較すること、また許容応力等と比較することで、詳細な解析をせずに地震後速やかに構造・機器の損傷の有無やさらには健全性の確認が可能となる。また、比較的大規模な地震発生による機器応答のデータが取得できれば、解析手法の高度化にも役立てることが可能となる。これを実現するために、データ取得の必要な代表機器、部位の選定、データ取得の方法を、線量等の測定環境も考慮して総合的に評価・検討することが課題となる。

(2) 地震後の設備の健全性を確認し、プラントを再起動するために点検・評価の基準を策定することが必要である。地震の影響を受けた機器の健全性について、解析結果と点検を相互に関連づけて解析の結果に応じて重点的な点検を実施する等、設備点検の基本的な考え方を策定し、点検項目に応じた効果的な点検方法を定めなければならない。

地震後の設備点検には、大まかには地震後速やかに設備の状況を確認するための点検と地震応答解析の結果と併せ設備の健全性を総合的に評価する点検がある。また、国、学協会、民間での地震安全に関わる機器構造分野では、解析結果に応じて重点的な点検を実施する等、設備点検と相互に関連づけた検討が行われている⁸⁾。これらの検討成果を基として、今後の点検基準として損傷モードに応じた点検項目を策定し、適切な点検方法で実施できるように地震時の点検ガイドラインを策定するこ

とが重要となる。

さらに、点検が精度良く広範囲に適用可能となれば、解析結果の検証にも役立てることが可能となる。このため、地震後の設備点検の基本的な点検項目を整理し、点検項目に応じた点検方法を開発していくことも必要である。

6. 地震 PRA 手法の充実

地震による原子力発電施設の有するリスクを、例えば炉心損傷頻度という確率的な指標として示すことが可能である地震 PRA をより充実させることが重要である。

機器構造分野では、すでに述べたように、耐震余裕をより定量化することや機器耐力データベースを整備することで損傷確率評価の精度向上に寄与していくことができる。荷重の種類に応じて設計係数を許容される破損確率を満足するように定める荷重・耐力係数設計手法的な概念の適用検討、動的機能維持評価における耐震余裕を検討して機器の損傷確率分布を表すフラジリティ特性を改善していくこと、さらに長期的にはリスク情報を活用し設計段階のみならず、運転や保守における管理と連動して安全確保の方策を配分するといったシステム化規格の概念への拡張を検討していくことが望まれる。

Ⅲ. 機器の応答と安全余裕(東日本大震災後の対応を踏まえて)

1. 機器の安全余裕の考え方

原子力発電所の安全設計においては、数多くの重要な機器のうち、一つが故障(損傷)した場合に発生しうる様々な事象(内的事象)を考察し、原子炉が健全であることを確認する作業を実施する。しかし地震や洪水などの外的事象においては、複数の機器が同時に損傷する可能性がでてくる。このため、外的事象の検討においては、設計基準事象に対して、重要な機器の損傷そのものを防止することをもって、安全を担保する思想がとられている。この方法の弱点は、考慮した設計基準事象が最大の荷重であることが証明できないことにある。

一般の機器設計においても、最大荷重の不確実性が大きいシステムを設計しなくてはならないことがある。最大荷重の不確実性が小さい、つまり、最大荷重を超える可能性が非常に低い場合には、機器が損傷するまでの余裕を小さくすることができる。例えば、機器の使用圧力は、安全弁の設定圧力を超えることはほとんどない。このため、安全弁の設定圧力で十分持つ設計をすればよいことになる。一方、最大荷重の不確実性が大きな地震のような場合、大きな余裕を持って設計を進めることが一般的となっている。

50年前に原子力発電所を設計する場合にも、不確実性の大きな地震をどのように考えるかが課題であった。不確実性が大きいため、当時の設計では極端に大きな荷重を設定して設計を行っていることも多い。スペクトルで

図示すると、数倍の荷重を考慮している場合もあり、古いプラントの方が、大きな安全余裕がある場合も多い。近年の地震学の発展により、不確定性が当時よりは減ってきているが、それでもやはり大きな不確定性がある。このため、現在の耐震設計においても、比較的大きな安全余裕をとっている。

I章で議論したように、耐震設計で考慮している余裕は、M1(解析に含まれる余裕)、M2(評価値と制限値の差)、M3(制限値に含まれる余裕)の3種類に分解することができる。

M1には、解析手法の保守性による余裕が主に含まれる。これには、減衰係数の保守的な設定(実際の減衰は設定よりも大きいため、実際に掛かる荷重は少なくなる)、床応答スペクトルの保守的な設定(振動数に対して最大応答加速度が機器に掛かると設定することにより、実際よりも大きな荷重がかかる)、スペクトルの拡幅(地震動設定の不確かさなどを考慮し、10%スペクトルを拡幅するため、大きな荷重を加える)などのものが含まれる。

M2についての具体的な設定例については、ストレステストで評価されているので、次節で検討する。

M3には、規格で見込まれている余裕のほかにも、規格よりも実際の構造材物性値の方が大きいことによる余裕も含まれる。

これらの余裕のほかにも、システムとしての余裕があるが、これについては4節の確率論の項で検討する。

2. 機器の安全余裕とストレステストによる評価

安全余裕を決定論的に評価しようとしたのが、ストレステストである。設計基準を超えて荷重を大きくしていくと、どこで安全余裕が食いつぶされるかを保守的に評

価したものである。

重要な機器それぞれについて、どの程度の安全余裕があるかを設計基準地震をベースとして評価している。これは、第I章及び前節で考察したM2に相当する。不確定性の大きな荷重に対しては、M2を比較的多くとることが行われている。なお、ストレステストでは、M1及びM3についての余裕については原則として考慮していない。一部、蒸気発生器伝熱管など、現実的な許容値を用いているものもあるが、その場合は、その旨を議論して評価がなされている。またM1に対しても、一部、スペクトルの拡幅などを行っていない場合もあるが、これについても議論はなされた上で用いている。M1及びM3には大きな余裕が含まれているが、原則としてこれらの余裕については考慮しないことで、保守的な余裕を算出している⁹⁾。

分厚いストレステストの報告書には、この安全余裕が定量的に示されている。機器の安全余裕には、機能が担保されるまでの余裕と定義できる。この機能の中には、大きく分けて動的機器と静的機器他の機能維持に分けられる。第1表に大飯3号機の報告書¹⁰⁾から、代表的な静的機器及び動的機器他の評価結果を抜粋して示す。

静的機器は、配管や容器などの構造物であり、圧力バウンダリーを構成している。これらのバウンダリーの損傷を防ぐために、地震によってかかる応力をシミュレーションによって解析し、損傷を起こす応力よりも十分に小さな値であることを確認する。この安全余裕は最低でも2倍程度ある。第1表に示されているように、静的機器では、大きな余裕を取っている。特に配管が損傷することによって、LOCA(冷却材喪失事故)につながることから、十分に大きな余裕をもって設計がなされている。

第1表 大飯3号機のストレステスト評価結果例(報告書¹⁰⁾より抜粋)

	設備	設置場所	耐震	損傷モード	単位	評価値 (a)	許容値 (b)	余裕 (b/a)
静的 機器	余熱除去系配管	C/V	S	構造損傷	MPa	181	361	1.99
	1次冷却材配管	C/V	S	構造損傷	MPa	130	348	2.67
	主蒸気系配管	C/V, E/B	S	構造損傷	MPa	117	257	2.19
	原子炉容器	C/V	S	構造損傷	MPa	131	375	2.86
	蓄圧タンク	C/V	S	構造損傷	MPa	99	254	2.56
	ほう酸タンク	E/B	S	構造損傷(座屈)	-	0.45	1	2.22
動的 機器 他	タービン動補助給水ポンプ	E/B	S	構造損傷	G	0.77	1.4	1.81
	内燃機関(ディーゼル機関)	E/B	S	構造損傷	G	0.51	1.0	1.96
	主蒸気隔離弁(電磁弁を含む)	E/B	S	構造損傷	G	1.8	6.1	3.38
	1次冷却材圧力計	C/V	S	構造損傷	G	1.96	6.43	3.28
	メタクラ	C/B	S	構造損傷	G	0.61	1.10	1.80
	ドロップバ盤	C/B	S	構造損傷	G	0.74	2.00	2.70

ストレステストで、保守的に考えた結果としては、2倍を切っている機器もあるが、M1やM3に分類される評価の保守性を考慮すれば、工学的には最低2倍程度の安全余裕があると考えられる。

一方、ポンプやバルブなどの動的機器や、電気盤等の機能維持を確認するのは、一般的には、実際に振動台で揺らして確認することになる。しかしながら、振動台の性能に限界があり、また、動的機器はなかなか壊れないため、実際に壊れる加速度が求められている機器はあまりない。評価上は、振動台で揺らすことのできた最大加速度で壊れなければ、その加速度を限界加速度と保守的に評価している。例えば、実際に10Gで壊れる機器があったとしても、5Gまでしか実験ができなかった場合、10Gではなく5Gを限界加速度と保守的に評価している。第1表に具体的な値を示す。例えば、大飯3号機でクリフエッジ(断崖の先端の意味で、状況が大きく変わる限界を表す)となったメタクラ(メタルクラッド形配電盤)の許容値は1.1Gとなっているが、これは、上下方向に対して、健全性を確認した加速度が1.1Gということである。水平方向については、4Gまで実験で確認されているが、残念ながらこの加速度以上の実験がなされていない。ストレステストにおいては、クリフエッジになるのは、この動的機器等の試験最大加速度がほとんどである。これも、工学的に判断すれば約2倍程度の余裕は含まれていると考えられる。

なお、ストレステストでは、荷重が大きくなって余裕がなくなると、機能を失うと想定している。実際には、この判定基準にもM1やM3といった、さらなる余裕が含まれている。また、バックアップを含めて複数の同じ機能を持つシステムが用意されていることが多い。このため、余裕がなくなれば、すぐに炉心損傷に至ると考えるのは間違いであることに注意したい。

3. 数値振動台と動的機器

実際に動的機器を振動台で揺らして、機能喪失を起こす加速度を実験的に評価することは困難である。これは、大型機器を壊すまで揺らすことのできる振動台が現実的にない場合が多いためである。

そこで、FEM(有限要素法)などの数値シミュレーションを用いて機能喪失実験を行うことが現実的であろう。数値振動台として、動的機器の機能喪失試験を行って、現実的な安全余裕を評価することが重要であると考えられる。実験で数値振動台の検証と妥当性確認(V&V)を確実に実施し、不確かさを定量化した上で、数値実験によって機能喪失を起こすまでの安全余裕を定量化することが重要である。また、このデータは、後述のPRAの基礎データとして用いることも可能であり、ぜひ数値振動台の評価を進めることが重要であろう。

4. 確率論的リスク評価

非常に巨大な地震などによって、機器が機能維持できなくなる、つまり、安全余裕を超える荷重が来た場合、一気に全てが駄目になるかということと実際はそうではない。前章の6節で地震PRAの重要性について述べたが、機器の損傷は確率的であり、大きな荷重ほど損傷する機器の数が増えてくることになる。そこで、確率論的な安全評価を併用し、安全性を確認することが必要になる。

これが残余のリスクと呼ばれて2006年の耐震指針¹⁾に導入された。確率論的に評価して、設計基準地震を超えた場合に、どれだけのリスクがあるかを評価し、それが十分許容できるレベルであるかを考察する。安全余裕だけに頼るのではなく、確率的にリスクを捉えて、それが十分許容できるレベルであることを確認することも重要である。一つの手法では限界があり、複数の指標及び手法で確認を行うことで、より充実した評価が可能になる。

残念ながら、この地震のリスクの研究自体が、残余のリスクが十分小さいことを確認するという目的のために導入されたために、大きな課題が残った。確率論であるため、本来は最適もしくは最確のデータを用いて評価を進める必要がある。これによって、確率分布を求めることで、最確の確率とその周りの不確かさを考察することが重要となる。しかしながら、残余のリスクでは、確率分布ではなく、保守的に最も大きな確率を求めることに注力がなされた。考えられる最大の確率を求め、それを残余のリスクとして、十分小さいことを証明しようとした。実際の確率はもっと低いことになる。しかし、実際の確率や不確かさの評価に対しては、あまり研究が進まなかった。

保守的なリスクではなく、本質的なリスクを評価することが必須であり、今からでも遅くはないので、より現実的なリスクを算出することと、より不確かさが小さくなるような研究を推進すべきであろう。

5. 東日本大震災による重要な機器構造の損傷の有無

東日本大震災により、福島第一原子力発電所はシビアアクシデントを起こし、現在も収束作業が続けられている。福島第一原子力発電所の事故は、津波により電源が喪失し、原子炉が冷却できなくなったことがその直接要因である。なお、津波襲来前には、M9という地震が発電所を襲っている。地震の規模は、ある意味、地震学の常識をくつがえす大きな地震であったが、その地震によって原子力発電所に加わった荷重は、ほぼ設計で考慮していた荷重の範囲内に収まった。一部の振動周波数帯で、想定を超えているスペクトルが観察されているが、上記のように、現状の耐震設計は、少なくとも2倍以上の余裕を持った設計を実施していることから、重要な機器・配管・構造物については、損傷は考えにくい。原子

力安全・保安院の評価でも、ほぼ弾性範囲内に収まっていることが確認されている¹²⁾。また、津波が来襲するまでの圧力・水位などのデータを見ると、原子炉1次冷却材圧力バウンダリーの損傷は考えにくい。以上のように、今回の東日本大震災に対しても、揺れに対する耐震設計は十分に機能したと推定されている。

IV. まとめ

耐震設計における機械構造分野の技術的課題や地震時の影響評価といった学会としても取り組んでいくべき事項について記述した。さらに、平成23年3月11日に発生した東日本大震災以降の原子力発電所の対応・評価状況を踏まえ、あらためて原子力発電所の耐震設計に関して機器構造の余裕がどこまで分かっていて、どこに課題があるのかについて解説した。

地震は、世界中で発生する。今回の地震のように、地震学が必ずしも十分でないことも明らかになっている。つまり、少なくとも2倍以上の余裕があるということでも十分である、と思考を停止してはいけない。今回の地震の新知見を、耐震設計に反映するとともに、安全余裕の考え方を含め、より良い設計に改善していくことが必須である。より大きな地震が発生することを想定し、確率的な評価を実施することによって、そのリスクを明らかにすることも進めなくてはならない。数値シミュレーションを駆使し、その信頼性を評価しつつ、より良い耐震設計を目指すことが必須である。また、地震、津波以外にも、考慮すべき外的事象は数多くある。これらの事象を分類し、余裕を定量化し、リスクを評価し、より高い原子力安全を目指し続けていくことが今後の課題である。

—参考資料—

- 1) 「原子力発電所の“地震安全”に関する検討報告書—地震安全ロードマップ—」, 日本原子力学会原子力発電所地震安全特別専門委員会編, 2012年3月20日発行.
- 2) 岡本孝司, “機器の応答と安全余裕”, エネルギーレビュー, (2011年10月号), pp.49-53.
- 3) 原子力発電所の耐震安全性に係る信頼性の一層の向上を図るための今後の取組みについて(平成21年1月 原子力安全・保安院).
- 4) Regulatory Guide 1.166, “Pre-Earthquake Planning and Immediate Nuclear Power Plant Operator Postearthquake Actions,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.

- 5) Regulatory Guide 1.61, “Damping Value for Seismic Design of Nuclear Power Plants,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- 6) 「動的繰返し大変形を受ける溶接構造物の脆性破壊性能評価方法」(日本溶接協会 WES 2808:2003).
- 7) 「発電用新型炉技術確認試験事業報告書」(日本原子力発電 平成17年3月発行).
- 8) 「地震後の機器健全性評価ガイドライン[地震前計画と地震後の点検・評価]」(日本原子力技術協会中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会 平成24年3月発行).
- 9) ストレストテスト(一次評価)に関する審査の視点(案), (平成23年11月14日 原子力安全・保安院, 原子力安全基盤機構).
- 10) 「東京電力株式会社福島第一原子力発電所における事故を踏まえた大飯発電所3号機の安全性に関する総合評価(一次評価)の結果について(報告)」添付5 (平成23年10月 関西電力).
- 11) 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針, (平成18年9月19日 原子力安全委員会決定).
- 12) 「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による原子力発電所への影響検討について(建築物・構造, 機器・配管系の地震応答解析結果)」[東京電力(株)福島第一, 第二原子力発電所] (平成23年12月9日 原子力安全・保安院).

著者紹介



岡本孝司(おかもと・こうじ)
東京大学
(専門分野/関心分野)原子力安全工学, 原子炉熱工学, 可視化学など



高木敏行(たかぎ・としゆき)
東北大学
(専門分野/関心分野)非破壊検査, 劣化の非破壊評価, 機能性材料



植田 進(うへだ・すすむ)
日本原子力発電(株)
(専門分野/関心分野)系統計画, 構造・強度

解説シリーズ

原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的
リスク評価

第2回 津波ハザード解析

電力中央研究所 松山 昌史

標準委員会では津波 PRA 標準を2012年2月8日に発行した¹⁾。この標準について3回に分けて解説する。第2回では津波ハザード解析の概要についての解説を行う。まず、地震による津波という自然現象のメカニズム、それに対応してハザード解析が「津波発生域モデル」と「津波発生・伝播数値モデルの設定」から構成されていることを述べる。そしてハザード曲線の作成方法について触れる。

I. はじめに

土木学会原子力土木委員会津波評価部会では、2003年から確率論に立脚した津波評価法を検討しており、その手法を「確率論的津波ハザード解析の方法(2011年9月)」²⁾として公開した。断層評価技術は日進月歩であるが、その最新の結果を参考に実施可能な津波評価手法の主な構造はここで整備されており、本標準の津波ハザード解析に多くの内容が反映されている。前稿では、全体の概要を述べた。本稿では津波 PRA 標準の評価手順の中から津波ハザード解析について述べる。

II. 津波ハザード評価

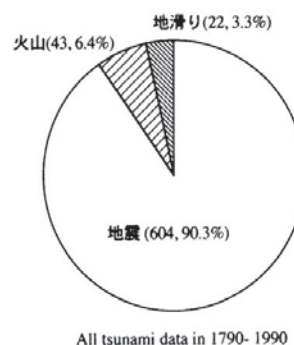
1. 地震による津波の概要

(1) 津波の発生原因

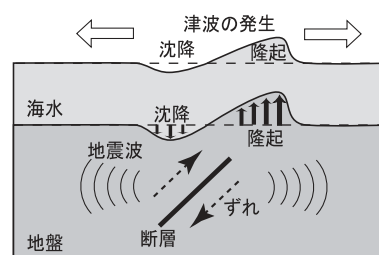
“津”とは港の意味で、津波とは荒天時でも日頃は波浪の小さい港湾で大きくなる波という意味がある。この津波の発生原因としては、断層運動(地震)のほかに、火山噴火、山体崩壊による陸域からの土砂・土石流の海中への突入、海底地すべり等が挙げられるが、断層運動以外の原因による津波は全体の10%以下とされており³⁾(第1図)、断層運動に伴う津波と比べるとその発生割合は小さい。そのため、日本における津波防災は主に地震津波が想定されてきた。

(2) 地震津波のメカニズム

地震津波の発生原因は、地震時の海底面の変形である



第1図 過去200年間の発生原因別の津波



第2図 PRA 評価(ETとFT)

(第2図)。地震の発生原因は断層運動であるが、同時に地殻変動が発生し、海底面が変形したときに、海水に擾乱が発生し、津波となる、発生した津波は、四方に広がり、その一部が沿岸に到達すると浸水等の災害となる。

以上のことから、津波現象は津波の発生、及び発生後の海域伝播、これらのメカニズムが重要であり、ハザード評価においても、この2つから構成される。

2. 津波ハザード評価手順の概要

津波ハザード評価とは、評価対象サイト周辺における活断層データや過去の地震データなどにに基づき、不確実さを考慮して対象サイトにおける津波高さ(ある津波が発生した時の最大水位上昇量や最大水位下降量)等に関

The Tsunami Probabilistic Risk Assessment of Nuclear Power Plants(2); Outline of Tsunami Hazard Analysis : Masafumi MATSUYAMA.

(2012年 7月17日 受理)

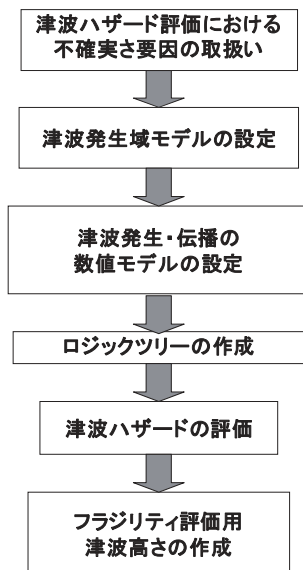
■前回のタイトル

第1回 津波 PRA 評価手法の概要及びシステム解析

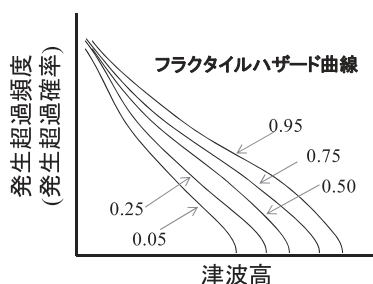
する年超過確率又は年超過発生頻度(回/年)を評価することで、第3図に示す手順で実施する。

基本的な考え方は地震ハザード評価手法⁴⁾に準じており、不確実さを偶然的な不確実さと認識論的不確実さに分け、認識論的不確実さについてはロジックツリーを作成して、専門家アンケート結果を基に分岐における重みを設定する。津波ハザードの評価は、次の活用目的に応じて実施する。

- (1) 炉心損傷頻度(CDF)評価のための津波の高さとその年超過発生頻度の関係を示す津波ハザード
 - (2) 構造物・機器のフラジリティ評価のための津波の高さとその年超過発生確率の関係を示す津波ハザード
- 津波ハザード評価では、第4図のようなフラクタルハザード曲線群を求める。この津波ハザード曲線群内の1つの曲線は、対象サイトでの津波高さと、ある期間(n年)にそれを超える津波が発生する確率、すなわち、年超過確率又は年超過発生頻度(回/年)の関係を評価するものである。フラクタルハザード曲線は認識論的不確実さを定量的に表し、津波高さがその値を越えないとみなす専門家のコンセンサスがどれくらいの割合で得られるか(認識度)を示す。例えば、0.95フラクタルハザード曲線は、専門家の認識度95%でこの値を超えないとする津波高さに対する確率を表す。また、津波高さ(最大



第3図 津波ハザード評価の手順



第4図 フラクタルハザード曲線

水位上昇量)について、同じ年超過確率の0.95と0.50のフラクタルハザード曲線を比較すると、津波高さがその高さより低いという認識度が大きいほど高くなるので、0.95フラクタル曲線の津波高さが0.50のものより大きくなる。

3. 津波発生域モデルの設定

津波シナリオを構築するために、以下の手順に沿って作成する。

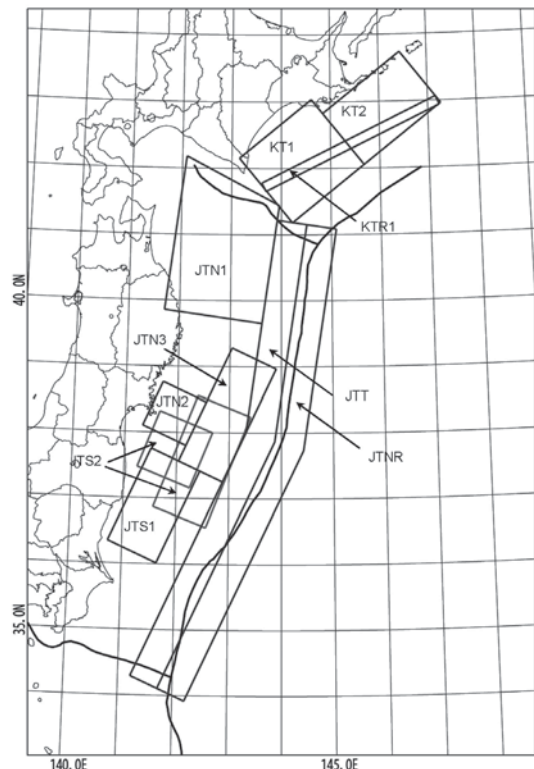
(1) 津波発生領域の設定

津波発生領域は対象サイトへの影響を考慮して、適切に設定する。具体的には地震の発生様式に共通の特性を持った領域の地質構造を表す地震地体構造^{2,3)}に基づき、過去の地震の発生状況や津波発生様式に応じて設定される。日本海溝沿い及び千島海溝(南部)沿い海域の設定例を第5図に示す。設定にあたっては以下の点に留意する。

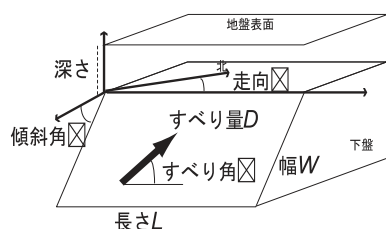
- (1) 津波と地震動を統一的に評価することが望ましいので、地震動ハザード評価⁴⁾用モデルを参考とする。
- (2) 中小地震では大きな津波が生じないことから、大地震のみを検討の対象とすることが可能である。
- (3) 「遠地」の地震による津波の影響も無視できない場合には、「遠地」の地震を追加する。

(2) 断層モデルの設定

前(1)項で設定した各地震発生領域において、津波をもたらす地震の特性を踏まえて断層運動を適切にモデル化する。文献調査などに基づき、評価地点に影響を及ぼすと考えられる断層モデルを設定する。地震時の断層運



第5図 日本海溝沿い及び千島海溝(南部)沿い海域における地震発生領域の設定



第6図 断層運動を記述する断層パラメータ

動は、海底地殻内に矩形の破壊領域のすべりとしてモデル化され、第6図に示す断層パラメータで表現される。これを、後述する海底地殻変動モデルに入力として、海底面の隆起・沈降が推計され、津波の入力条件となる。

近年、歴史地震・津波データ以外に、液状化の痕跡や津波堆積物調査等から得られる成果もあるので留意する。津波堆積物調査は、最大1万年程度前の津波の発掘が可能といわれており、津波の再現期間の設定に重要な資料となることが期待されている。

(3) マグニチュード範囲の設定

各津波発生域の地震のマグニチュードについては、1つの値に限定されないと考えられること、また津波に対してマグニチュードの影響が大きいことから、既往最大規模を決定しそれに対してマグニチュードの分布幅を考える。マグニチュードの分布幅を適切に設定し、確率分布は一様分布とする。

(4) 地震の発生確率の設定

長期的なハザードを評価する場合と現時点でのハザードを評価する場合(更新過程)について、それぞれ地震の発生確率に関するモデルを設定する²⁾。

長期的平均的なハザードを評価する場合には、大地震の発生が定常ポアソン過程に従うとし、大地震の単位時間あたりの平均発生回数をパラメータとして、ある期間内に大地震が発生する確率を評価する。

更新過程を考慮して現時点のハザードを評価する場合には、BPT分布を用いた評価が代表的である。BPT分布は、最後に地震が発生してから次に地震が発生するまでの経過時間の分布関数を与え、パラメータとしては地震の平均発生間隔 μ と α を設定する。 α はばらつきを与えるパラメータで、BPT分布の分散は $(\mu\alpha)^2$ となる。

(5) 連動に関するモデルの設定

プレート境界型の地震においては、複数の地震が連動する場合がある。連動については、対象とする地震の過去のデータを用いて、連動する確率を設定する。連動する確率の推定方法は十分に確立しているわけではないが、複数の方法が提案されている⁴⁾。2011年東北地方太平洋沖地震においては、第5図における複数の発生域の地震が連動し、巨大地震になった。このように隣接する断層が連動することにより、地震そのものが成長する場合がある。一方、南海トラフにおける南海地震、東南海地震、東海地震は、連動した場合においても個々の地震

エネルギーには大きな影響を与えない可能性があると考えられている。これらの特徴に応じて、連動の確率と連動時のマグニチュードを設定する必要がある²⁾。

4. 津波発生・伝播数値モデルの設定

津波シナリオにおいて対象サイトにおける津波水位を推計するための数値モデルを設定する。

(1) 海底地殻変動モデルの選択

地震津波の発生原因は、先に示したように、地震時の海底面の隆起や沈降といった変形である。この地殻変動による海底面の隆起・沈降の分布形状が、津波発生の入力条件となる。この海底面の変形を推計するために、各シナリオの断層モデルを基に海底地殻変動モデルを選択する。なお、海底地殻の剛性率については、津波発生域の特性に応じて適切に設定するものとする。

一般的には、海底地殻変動モデルとして、地盤が均質な弾性体と仮定した理論解による Mansinha and Smylie の方法³⁾がよく用いられる。なお、近年では、差分法や有限要素法による海底地殻変動解析も行われるようになっており、地殻の速度構造分布の反映や地殻変動過程の詳細な模擬が行われている。

(2) 津波発生・海域伝播の数値モデルの選択

(1) 基礎方程式

津波発生・海域伝播の数値モデルについて、評価地点における津波による水位変動を精度よく計算できる適切な基礎方程式を選択する。津波は、水深に比べて波長が長いことから、長波の理論に基づき、3次元の基礎方程式を鉛直方向に積分した平面2次元場の方程式として記述される³⁾。

長波の理論にはその精度に応じて線形長波理論、非線形長波理論(浅水理論)、分散波理論等の理論があり、3次元の基礎方程式を鉛直方向に積分した平面2次元場を基本として再現すべき現象に応じて適切に使い分けることが重要である³⁾。

(2) 数値計算法

数値モデルでは、再現すべき現象に関する計算精度と計算に要する時間等を考慮して、適切な数値計算法を用いることとする。スタッガード格子を用いた陽的差分法が採用されることが一般的である³⁾。

(3) 地形データと入力条件等

数値モデルに用いる地形データは、最新の海底地形図、陸上地形図等をもとに作成することが望ましい。津波入力条件は、断層モデルを基に、先に設定した手法によって得られる隆起・沈降の分布形状を用いる。計算領域および空間格子間隔については、津波波源の大きさ、津波の空間波形、海底・海岸地形の特徴、評価地点周辺の構造物等を考慮して、適切に設定する。

なお、本章で示した海底地殻変動モデルおよび津波発生伝播モデルについては、文献3)に詳細が記述されている。

5. ロジックツリーの分岐として考慮する項目

認識論的不確実性については、ロジックツリーの分岐として考慮する。以下に、各ステップにおける項目を述べる。

(1) 津波発生モデルの設定

(1) マグニチュードの範囲

各津波発生域における固有地震のマグニチュードの範囲については、ロジックツリーの分岐とする。第7図に示すような事例を基に作成することができる。

(2) 平均発生間隔, BPT 分布の α

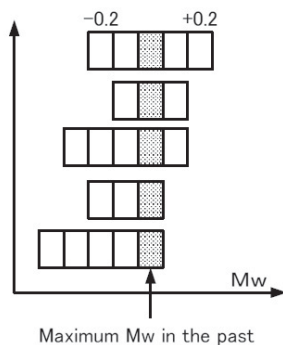
現時点のハザードを評価する場合には、BPT 分布を用いるが、そのばらつき α をロジックツリーの分岐として考慮する。 α の分岐として、0.2, 0.3, 0.4が標準的である。

(3) 断層モデル(一枚モデルか複数モデルか)

歴史津波の再現等において、矩形の一樣すべりの均質断層モデル以外に、小断層の集合で構成される不均質断層モデルが提案されている場合がある。このような場合、この2つの断層モデルのどちらが適切かを、ロジックツリーの分岐とする。

(4) スケーリング則

地震断層の長さ、幅、すべり量の間関係(スケーリ



第7図 マグニチュードの範囲の設定事例

縦軸は分岐、横軸はマグニチュードで四角一つが0.1の範囲を示す。灰色は過去最大マグニチュードを示し、それに対して範囲をどう設定するかを分岐とする。

ング則)については、海溝型地震・連動型地震・活断層地震などによって幾つかの考え方があり、ロジックツリーの分岐とすることができる。

(5) 連動モデル

連動の確率についても幾つかの考え方があるので、ロジックツリーの分岐で考慮することが望ましい。

(2) 津波発生・伝播数値モデルの設定

(1) 津波水位の評価結果の真値に対するばらつき

数値モデルによる津波水位に関する評価結果と痕跡高は完全に一致することは少なく、ばらつきが存在する。よって、前章で選択された数値モデルによる評価結果についても得られた津波水位を中央値としてばらつきを考慮することが望ましい。そのばらつきをどの程度考慮するかについては議論があり不確実性が小さくないので、ロジックツリーの分岐で考慮することが有効である。

土木学会の「確率論的津波ハザード解析の方法」²⁾では、特定地点の津波水位が時間的に推定値に対してどの程度ばらついているかを表現するにあたって、空間的なばらつきと時間的なばらつきが同じというエルゴード仮定が成立するものとして、空間的なばらつきを示すパラメータ κ の値に対応した対数標準偏差 $\beta (= \ln \kappa)$ を与える。 κ の値は、1.25~1.55の4つの分岐を設定する。また、対数正規分布の打ち切り誤差の範囲としては、 $\pm 2.3 \beta$ と 10β の2つの分岐を設定した。

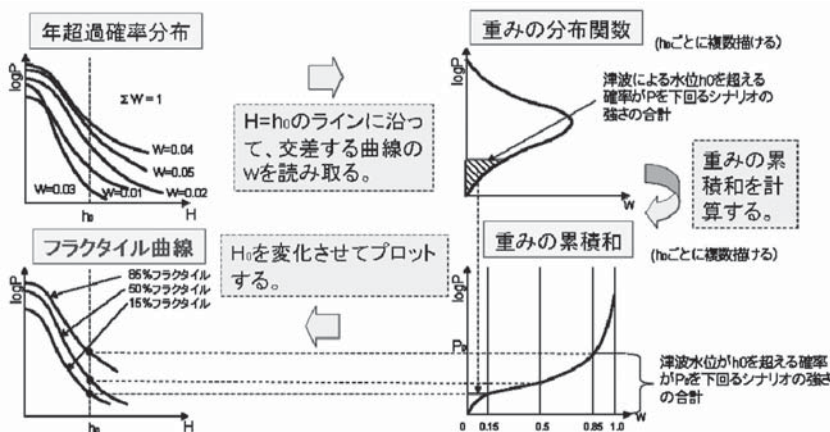
6. フラクタイルハザード曲線の作成

フラクタイルハザード曲線を作成する概要を第8図に示す。各シナリオの計算結果には、発生確率とロジックツリーによって規定された重みが紐づけられている。重み別に年超過確率分布曲線を作成し、各津波水位に対して、重みの年超過確率分布を算出し、積分することにより、ある津波水位における年超過確率の重みの累積和を算出する。津波水位毎のシナリオの重み累積和(XX%フラクタイルのXXに当たる)に対する発生確率を抽出して、その重みの累積和毎にフラクタイルハザード曲線を作成する。

7. フラジリティ評価用の津波水位変化の作成

ここで作成された津波水位の確率分布は、対象サイトの前面海域のある場所におけるものである。敷地内の機器などに対するフラジリティ評価を行うためには、これらから敷地内の津波水位等を設定する必要がある。全シナリオにおいて発電所敷地内への浸水計算を行う方法が計算効率の観点から現実的でない場合には、敷地内の水位設定方法が必要であり、課題の一つである。

なお、東日本大震災における福島第一原子力発電所事故の主要因の一つが原子炉建屋内への浸水による電源喪失であ



第8図 フラクタイルハザード曲線作成方法概要²⁾

る。電源盤等、重要機器の浸水の評価するために、敷地内での津波水位のみならず、水位の時間変化を考慮して建屋内への浸水量を見積もる方法が必要である。

また、対象サイトに港湾が存在する場合には、港湾内の海底地形変動を評価する場合がある⁵⁾。この場合、評価用のシナリオを(必要であれば)複数選択する。例えば、全面海域の津波高さ最大のシナリオに対して、海底地形変動を数値計算モデルにより評価する方法がある。

Ⅲ. おわりに

巨大津波は再現期間が100年程度から数千年以上に至る。日本の災害歴史記録は世界的には長く1500年程度であるが、巨大津波の再現期間に対して十分とはいえず、経験値が高いとはいえない。足りない部分を埋めるために、多分野の知見の融合が必要となる。津波ハザードについては、地質、地震、土木、建築の各分野、津波のフラジリティ評価については、原子力、機械、建築、土木、これらを結集する必要がある。本稿を含む津波PRA標準は、この協働による成果を取り込むことが可能であり、深層防護の進化に寄与する。最後に今後の課題を示す。

- (1) 2011年東北地方太平洋沖地震の知見の反映が必要である。同地震と同じ形式の地震については、地震調査研究推進本部で評価されており¹⁾、平均発生間隔は600年程度、マグニチュード(Mw)は8.4~9.0程度と記述されている⁶⁾。この知見等を基に、地震発生領域とその発生確率を設定する必要がある。そのためには、新たなロジックツリー作成とマグニチュードの範囲等について専門家アンケート等が必要である。
- (2) 有史以前の古津波に関する研究の発展が必要である。その代表的なものとして津波堆積物が注目されているが、津波堆積物の調査方法や認定方法については、標準的なものが整備されているとは言える状況ではない。さらなる研究と認定手法の整備が必要である。
- (3) 地震以外の原因による津波について、原子力安全委員会の耐震設計審査指針(改訂案)⁷⁾において、考慮することが提案され、今後は評価が必要になると考えられる。

—用語解説—

①偶然的不確実さ

現実に存在しているが、現状では予測不可能と考えられる自然界のランダム性などに起因する不確実さで、地震の規模や断層破壊過程のばらつき等が挙げられる。

②認識論的不確実さ

研究が進展すれば確定できるが現状では予測不可能な不確実さで、活断層であるかないかという問題や発生するマグニチュード範囲等、見解が専門家ですら統一されていないものが挙げられる。

③年超過発生頻度

地震や水害などの災害の発生頻度を表す単位の一つで、1年あたりにある値を超える事象が何回発生するかの期待値として定義される。逆数は年超過発生確率である。

④定常ポアソン過程

ランダムに生起する事象を表す確率過程の一つである。微小区間において、ある事象が発生する確率が時刻に無関係(前回の発生に無関係)で、その平均生起確率が一定の場合に、定常ポアソン過程となり、その確率密度は指数関数で表される。活動履歴が不明な断層に適用される。

⑤BPT分布

ある事象の生起間隔のモデル化に用いられるものの一つで、地震調査研究推進本部が、固有地震の発生間隔をモデル化する手法の一つとして採用した。プレート運動の定常的な応力蓄積過程とその開放といった物理的過程を踏まえており、更新過程(最新の地震発生年)を考慮した発生確率(発生頻度)に適用される。

—参考資料—

- 1) 日本原子力学会 標準委員会, 原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準: 2011(AESJ-SC-RK 004:2011), (2011).
- 2) 土木学会 原子力土木委員会 津波評価部会, 確率論的津波ハザードの解析方法, (2011).
- 3) 土木学会 原子力土木委員会 津波評価部会, 原子力発電所の津波評価技術, p.321(2002).
- 4) 日本原子力学会 標準委員会, 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準: 2007(AESJ-SC-P006:2007), (2007).
- 5) 藤田尚毅, 稲垣和男, 藤井直樹, 高尾誠, 金戸俊道, 津波による海底地形変化評価モデルの現地適用性に関する研究, 第35回海洋開発論文集, pp.213-218(2010).
- 6) 地震調査研究推進本部, 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価(第二版)について, (2012).
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/11_nov_sanriku/index.htm.
- 7) 原子力安全委員会 地震・津波関連指針等検討小委員会, 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針(改訂案), (2012).
http://www.nsc.go.jp/senmon/shidai/jishin/jishin_14/ksiry0_2.pdf.

著者紹介



松山昌史(まつやま・まさふみ)
電力中央研究所 地球工学研究所
(専門分野/関心分野)海岸工学, 津波リスク評価, 津波数値計算・水理実験, 海洋レーダによる表層流況リアルタイム観測,
python プログラミング

高速炉の原子炉容器内観察・補修技術開発 高速実験炉「常陽」の復旧に向けた取り組み

日本原子力研究開発機構 小林 孝良

高速実験炉「常陽」では、原子炉容器内の実験装置の取扱において起ったトラブルを受け、カメラやファイバースコープにより、高温・高放射線量の原子炉容器内部の状況を把握する等、プラント機能復旧のために必要となる技術開発を進めてきた。本稿では、これまで進めてきた観察・補修技術開発の意義と得られた成果、そして今後の復旧への取り組みを紹介する。

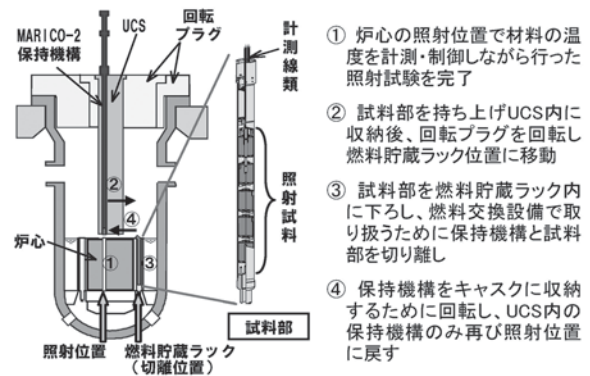
I. はじめに

高速実験炉「常陽」(ナトリウム冷却型高速炉(以下、SFR;熱出力140 MWt)では、照射試験を終えた計測線付実験装置 MARICO-2の試料部(以下、試料部)を取り出すため、2007年5月に第1図のとおり試料部を上部の保持機構から切り離す作業を行った。しかし試料部と保持機構が完全に分離できていない状態で回転プラグを操作したことにより、試料部が原子炉容器内の燃料貯蔵ラック上で曲がり、炉心上部機構(以下、UCS)の下端も部分的に損傷したことが分かっている(第2図)。ラック上の試料部はUCS等の下部と接触する高さにあるため、現在、燃料交換に必要な回転プラグの運転範囲が一部制限されており、炉心の約1/4の集合体にアクセスできない状況である。「常陽」では燃料交換機能を復旧するため、試料部を回収し、UCSを交換する計画のもと技術開発を進めている。

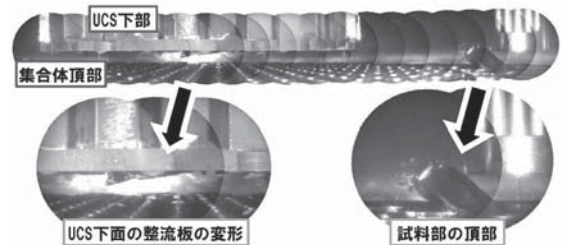
原子炉容器内の構造材は中性子照射により放射化されている。また、SFRの冷却材であるナトリウムは、融点およそ100℃の金属であり、冷却系は停止中もナトリウムが凝固しないよう約200℃の高温に保たれる。さらに、ナトリウムは化学的に活性で空気や水と反応するため、原子炉容器内部はカバーガスとしてアルゴンガス雰囲気にしており、このバウンダリーを維持するため、アクセスルートは小口径の貫通孔に限られる。ナトリウムが不透明であることもあり、視覚による状態確認や作業監視は制約されている。このように高放射線・高温環境のSFRの原子炉容器内部の状況を把握し、保守・補修を行うには、軽水炉にはない技術開発が必要であり、その技術レベルを高め、供用期間中の運転・保守に反映することでSFRの信頼性の向上に寄与することができる。

Development of Inspection and Repair Techniques in Reactor Vessel of Fast Reactor—Endeavour to retrieve damaged components in the experimental fast reactor JOYO : Takayoshi KOBAYASHI.

(2012年 6月19日 受理)



第1図 試料部の切り離し作業

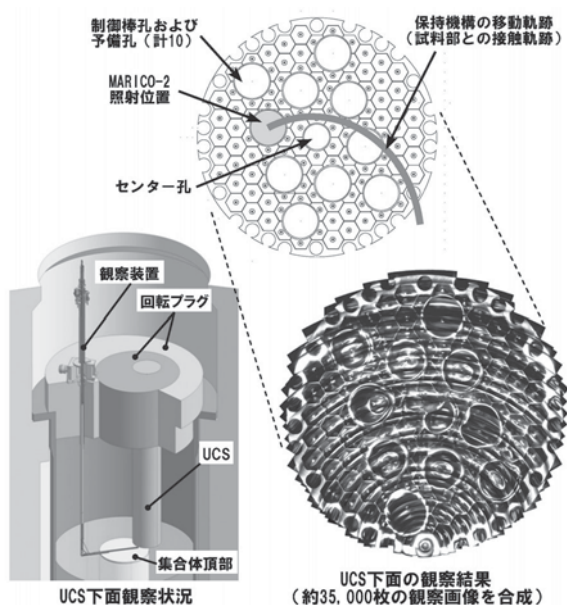


第2図 原子炉容器内の状況

II. これまでの技術開発と成果

1. 原子炉容器内観察技術

SFRの原子炉容器内の観察では、高温・高放射線環境下に加えて、回転プラグ上から内部構造への遠隔操作によるアクセス、明瞭な画像を得るための適切な照明の確保が重要となる。「常陽」ではこれまで、回転プラグの貫通孔上にアクリル板を設置し、アクリル板を通してカメラにより撮影を行う集合体の頂部観察や、貫通孔からファイバースコープを装備した遠隔装置を挿入して画像を得る原子炉容器内観察の経験がある。今回もこれらの技術を適用し、炉心上部の状況や試料部の状態把握を行った。しかし UCS 下面の状態は回転プラグ上部から約 6



第3図 UCS下面観察

m下方にあるUCSと集合体頂部の隙間(約70mm)にファイバースコープを挿入し観察する必要があり、回転プラグの貫通孔(直径約110mm)から原子炉容器内に挿入した後、遠隔操作で先端をL字に屈曲させてUCS下面に挿入する装置を新たに開発した。第3図は回転プラグの操作によりUCSを動かして取得したファイバースコープの動画から、画像取得の時間と、その時の回転角速度・回転角・回転半径等から求めた位置情報から画像を配置しつなぎ合わせる画像拡張技術を用いて、UCS下面全体を合成した観察画像である。

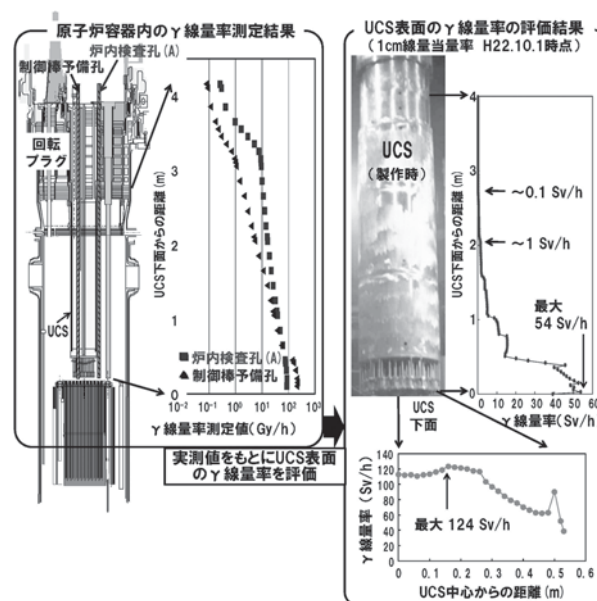
今回用いた耐放射線ファイバースコープは、約16時間の観察(約5,000 Gy)で透過光量が低下し、画像が暗くなり始めている。今後実施するUCS交換、試料部回収においてもファイバースコープによる原子炉容器内の作業監視が必要であるが、作業時間は約1,000時間(1月強)、空間線量率は~300 Gy/hであるため、およそ30万 Gyの照射線量が想定される。ファイバースコープの交換に伴う作業の中断をなくし長時間の連続監視を可能とするためには、その耐放射線を向上させる必要がある。透過光量の低下は、放射線によって生じる欠陥に起因するため、この欠陥を埋めるように働く不純物の水酸基の含有量を高めたファイバースコープ(以下、高耐放射線ファイバースコープ)を試作し、Co-60線源を用いたγ線照射試験により特性の評価を行った。この結果、高耐放射線ファイバースコープは50万 Gyまで初期の1/2以上の透過光量を維持することができ、作業監視装置へ適用できる見通しが得られた。

2. UCS交換に向けた技術開発

UCSの交換作業は、過去にフランスの高速実験炉ラプソディで実施された実績はあるものの、世界でも数少ないSFRの大規模な炉内構造物の交換作業である。「常陽」のUCSは、30年以上の供用で放射化しており、表面

のγ線量率が高くなっている。炉心から離れたUCSの中性子照射量の計算精度を考慮し、計算値に約1桁の設計裕度を見込むと、既存のUCSを収納するキャスクの総重量は、取り扱う格納容器クレーンの最大容量100トンを超えてしまう。そのため、「常陽」では、原子炉容器内のγ線量率を実測し、その結果から既存のUCS表面のγ線量率を評価した。評価結果を第4図に示す。

γ線量率の測定には、耐熱性にも優れる軽水炉の炉内中性子計装用核分裂計数管を改良し、封入キセノン圧力を上げてγ線感度を高めた電離箱型のγ線検出器を用いた。また、原子炉容器内には、各種構造物や集合体に放射線源が存在し、測定されたγ線量率は、それが混成されたものとなるため、UCSと検出器の相対位置を変えた条件でγ線量率測定を実施することでUCSの寄与分を評価した。当該UCS表面のγ線量率分布に応じて4段のキャスク厚さを用いた構造とする等の設計によって、放射線遮へいの観点で十分な余裕を確保しつつ、UCS(約16.5トン)収納後のキャスク総重量は、目標の100トンを下回る約93.4トンとすることができた。今回の、実測と解析を併用したUCSの放射化量評価は、世界的にも希少なSFRの原子炉容器内の環境評価の実績である。

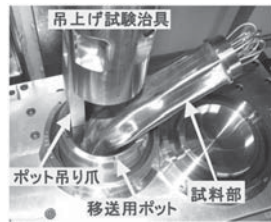


第4図 炉内γ線量率測定と評価結果

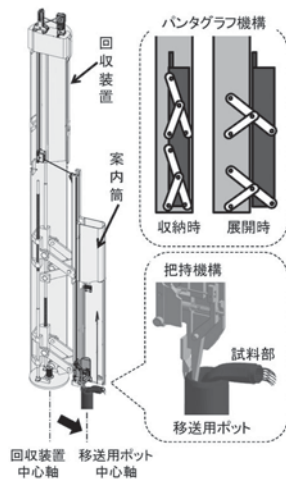
3. 試料部回収に向けた技術開発

試料部回収では、原子炉容器内で変形した機器を遠隔操作によって確実に把持し、原子炉容器外に取り出す技術が必要となる。試料部については頂部が曲がり、把持機能部品も外れているため、原子炉容器内で落下させることなく安全・確実に回収するための専用の回収装置が必要になる。また頂部が曲がった試料部はUCS引抜き後の開口部(直径約1m)から回収する必要があるが、試料部と回収孔は同一軸上にないという課題がある。さらに、

回収装置は、前述の観察画像での情報に加えて、実際の試料部の機械的狀態を把握し、確実に回収できる方法を採用する必要がある。まず、試料部を直接把持して単体で回収する方法を検討し、把持用の簡易治具を用いて原子炉容器内の試料部を数 cm 引き上げる試験を実施した。この結果、試料部は装荷されている移送用ポットと分離せず一緒に持ち上がることが分かった。このため試料部は移送用ポットと一体で回収する方法を採用することとした。本方法について、第5図のように移送用ポットの隙間にポット吊り爪を差し込み吊り上げる試験治具を設計・製作し、原子炉容器内で試験を行った結果、異常なく爪を挿入でき、爪を掛けて移送用ポットごと円滑に吊り上げられることを確認した。



第5図 移送用ポット上げ試験状況(炉外)



第6図 回収装置概要

以上の調査・検討結果に基づき決定した装置の概念を第6図に示す。本装置は既存のUCS引抜き後の開口部に設置し、原子炉容器内挿入後に試料部直上にパンタグラフ機構を展開し、移送用ポットと一体で回収する。回収時には移送用ポットを鉛直に吊上げると上部にある熱遮へい板と干渉するため、途中まで上昇させた後、先に上部のパンタグラフを閉じつつ斜め上に引き上げるように収納する機構にしている。装置設計には「常陽」の燃料取扱設備等において長年蓄積し、実証してきた原子炉容器内での遠隔取扱技術を十分反映するとともに、主要な機械要素についてはモックアップ試験を実施することにより、設計の妥当性を確認することができた。

Ⅲ. 今後の技術開発

上述の技術開発に基づき、新UCSやUCS収納キャスクを含むUCS引抜き装置、試料部回収装置等の製作は既に開始している。引き続き以下の技術開発を進め、実機UCS交換、試料部回収を完遂することで、SFRの供用期間中の補修技術として実証していく。

1. 原子炉容器内観察技術

今後、高耐放射線ファイバースコープは試料部回収作業の監視装置に装備して、長時間の連続監視に使用するとともに、照射下でのデータ蓄積を行う。またこの高耐放射線ファイバースコープは、東京電力・福島第一原子力発電所の圧力容器や格納容器の内部の調査への適用も期待

されており、日本原子力研究開発機構では、特別チームを組織して「常陽」の技術を応用した技術開発に着手している。

2. UCS交換に向けた技術開発

「常陽」のUCSは、予め交換することを想定したのではなく、既存のUCSと回転プラグ側に設置された案内スリーブとのギャップが小さい。このため、ギャップで蒸着ナトリウムが形成したブリッジ(ナトリウムブリッジ)のせん断抵抗や、UCS引抜き時の案内スリーブとの干渉によって生じる抵抗により、既存のUCSや案内スリーブが変形・破損(以下、変形等)する可能性がある。そこで、抵抗に対する変形等を有限要素法によって解析し、引抜き荷重の許容値を定めた。この結果、引抜き速度や引抜き荷重を管理・監視することで変形等を防止できる見通しを得た。なお、ナトリウムブリッジのせん断抵抗は、ブリッジの高さ、ナトリウム温度、せん断速度等に依存するため、これらのパラメータは、せん断抵抗の評価値が大きくなるように設定した。既存のUCSの引抜き作業は、案内スリーブと干渉しないよう、水準器やレーザー測長器による水平度・水平方向位置の監視、カメラ等によるギャップの状況の監視によって、適宜、水平度や位置を調整しながら進める計画である。現在、実機寸法の模擬体を使用したモックアップ試験を進めており、監視・制御等に用いる治具類の機能等を確認していく。

3. 試料部回収に向けた技術開発

試料部回収装置は製作に着手しており、装置製作後には実機寸法のモックアップ試験による総合的な機能確認を行うとともに、作業手順の詳細検討や監視装置の準備を進める。また、回収後の試料部は、移送用ポット内のナトリウムを抜き取った上でホットラボに搬入し、セル内遠隔操作で移送用ポットと分離・解体して詳細検査と照射試料の取り出しを行う計画である。このため、ナトリウム抜き装置、解体装置の準備も併行して進める。

Ⅳ. おわりに

UCS交換と試料部回収作業は平成26年度に行う計画である。これら復旧作業は、SFR実機プラントにおける貴重な補修経験となる。復旧後は、世界有数の中性子照射能力を活かして、SFRの研究開発、学术界・産業界への研究機会の提供、第4世代原子力システムやITER計画等の国際プロジェクトへの貢献等、世界の実験炉として活躍していきたい。

著者紹介



小林孝良(こばやし・たかよし)
日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)高速炉開発、プラント運転・保守

解説シリーズ

放射線治療・粒子線治療と日本における医学物理士教育

第3回(最終回) 日本における医学物理士のあり方と求められる教育並びに教育プログラムの現状

京都大学 原子炉実験所 丸橋 晃

日本の放射線医療の現状を打破するため、医療の現場で医療スタッフとして働く医学物理の専門家集団の形成が不可欠である。現在の日本の放射線医療には医学物理の職制はなく、職場がなければ有能な人材の参集を図る条件はない。医学物理士認定機構にかかわるすべての方々、団体はこの現状を打破するため医学物理専門家たるにふさわしい人材の育成を通じ、その社会的認知のための取り組みを強力に進めつつある。人材育成は一朝一夕で成るものではなく、それにふさわしい教育プログラムと教育組織の確立が不可欠である。医学物理に係る専門家の育成のために原子核(力)関連の研究教育組織は先導的役割を担うべきと主張する。新たな人材の注入により、なによりも日本の放射線医療の現状の認識を一変させ、日本のみならず世界の患者に最高の医療を提供していくことができる条件を確立するために。

I. はじめに

放射線医療の高度化を図り得る医学物理に精通した専門家集団の形成が不可欠である理由を、またそのような集団が現在どのようになっているかを概説する。望まれる専門家の姿とその人材育成に関する教育と、現時点で企画されている教育プログラムに言及する。

およそ10年前、長期間にわたり線量過剰あるいは線量不足の照射が見過ごされてきたという事態が複数の放射線治療施設から連続して報告された。さらに、核医学検査における過剰な放射能投与の報告は記憶に新しい。これらの事故は日本の放射線医療の問題点の存在を端的に現している。

1970年代から指摘されてはいたが、これらの事故を機に、メディア関係者や患者を含め多くの人々が真に我が身の問題として取り上げた課題は、放射線医療を担うスタッフの人的構成に関わるものであった。がん治療の主要術式は外科療法、化学療法、放射線療法であるが、全体の治療における放射線治療の割合はおおよそ3割であ

On the Frontiers of Radiation & BNCT Cancer Therapy and Medical Physicists Training(3); *The Role of Medical Physicists and the Educational Program of Medical Physics in Japan*: Akira MARUHASHI.

(2012年 6月24日 受理)

■前回のタイトル

第2回 ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)

り、欧米の約半分にすぎない。これは、がん治療における放射線の能力が正当に評価されていないことを表している。欧米の放射線医療と日本のそれとの間にある基本的相違は、医療現場における医学物理士の存在の有無のみといっても過言ではない。日本ではこの医学物理の専門家が医療現場にいない。欧米における医学物理士は放射線医療を魅力的なものにし、放射線の医療的能力を医療関係者が正当に評価するために大きな役割を果たしている。日本でもそうすればよいのではないかと、半世紀を経て実働してきた日本の放射線医療のスタッフ構成と日常的業務担当のあり方を再構成することは一朝一夕にできるものではない。日本の放射線医療では、欧米での医学物理士の業務は診療放射線技師が担ってきているとしてこの再構成に反対する意見がある。一方で、日本には高額で高能力の装置は山ほどあるのに稼働率はたいへん低いため、なんとか使いこなせる専門家が求められている。

今後さまざまな意見を集約、総合、分析し、患者を中心に据えた放射線医療の最適化を図れるスタッフ構成と業務分担が図られるべきである。いずれにしてもスタッフすべての協力と和が実現されなければならない。その業務をスムーズに実践できるための専門家育成の教育プログラムと教育体制が構築されるべきである。

II. 日本の放射線医療体制の 問題点を明らかにした放射線 治療事故の要因

「放射線は両刃の剣」であることは関係者には十分認識されている(と思われる)にもかかわらず、このような事故が発生するところに放射線を利用する医療の特性がある。放射線を取り扱うには多くの課程があり、理解力、注意力と習熟が必要である。がん組織は母地としての正常組織に囲まれていることが一般的である。細胞の相違で放射線に対する死への感受性の差異はあるが、両者の間にそれほど相違がある訳ではない。むしろ、がん制御よりも小さな線量で臓器組織の機能障害が発生する場合もある。国際放射線単位測定委員会(ICRU)の処方線量についての勧告に基づいて、我が国でも関係学会を中心にさまざまな指針^{1,2)}が作られている。それらに基づく指導にもかかわらず、さまざまな事故の事態が発生している。

その第1の因子は、「処方線量の5%以内の精度」が要求される放射線の性質である。線量が少なればがんは治癒しないし、多ければ障害が許容できないものとなる。しかも精度を要求される照射標的は生きている体内にある(動くし、基本的に見えない)。コミッションングにおける線量処方とモニタ測定値との理解力とカンが重要な要素。

第2の因子は、照射される放射線量を正確に決めることの難しさである。照射される放射線量は諸種のモニタで常時監視されている。この量の精度は $\pm 2\%$ 以内が指針とされている²⁾。これらのモニタの出力についてのトレーサビリティは確立している。しかし、モニタの出力と放射線量とのインターフェイスは単純ではない。事故と判断されかねない事態を引き起こす原因は、極端に言えば時々刻々変わる可能性がある。最近、沖縄を襲った気圧が940 hPaの台風のような猛烈な低気圧下では、モニタの種類にもよるが出力が7%も変化することになる。正確な放射線量を処方するには多くの要素の専門的な管理が要求される。

第3の因子は、放射線照射機器の絶えざる更新である。これが上記の事故誘因の基本的原因である。がん組織により大線量を照射しても周囲の正常組織の線量は変わらないか低く抑える(放射線照射の原体性を高める)ことを実現するため、治療機器および照射技術は日進月歩である。一人ひとり異なる条件を持つ患者に、たとえ使い慣れた1台の治療装置といえども正確な照射量を長期にわたって処方するスタッフの努力はたいへんなものである。専門家によるある意味では第三者的評価が求められる。

以上3つの要因に整理し、それぞれの側面から放射線医療に医学物理業務を専らとする専門家の必要性は明らかである。日常の診療を継続しながら放射線診療技師は

新しい治療機器や照射技術の導入に対処せざるを得ない日本の現状がある。(高線量の照射域とがん組織体積との一致性を意味する)原体性が高まれば高まるほど照射精度が厳しく求められ、照射線量の算定過程も複雑性と難度が増大し精神的負担が過大にならざるを得ない。これらの状況を打開する基本的条件は、経営者(病院管理者)と治療スタッフに対して第三者的立場の業務を業務の1部とする放射線に精通したスタッフの存在である。

III. 医学物理士に関する歴史と現状

欧米における医学物理士は放射線医療の職制に組み入れられている。すなわち、医学物理に関する研究・教育機関のみならず、病院等の医療機関にもスタッフとして雇用される状況にある。日本では放射線医療に関わる実務は、国家認定された医師と放射線診療技師により医師法、薬事法等で承認され規制される装置をもって実施されると規定されている。また、保険医療における医業は、基本的に研究業とは相容れない業務であるとされている。このような原則ではあるが最近、学会等で認定された専門家(医学物理士など)が品質保証(QA)に係る内容に限定して参加することが許容されると厚労省通達等により示された。しかし、このような業務を遂行する者を職制に組み入れるか否かの判断は各医療機関の専決事項であり、この点から欧米のような医学物理士は日本に存在しないというのが現実である。日本に関する記述は関連学会による医学物理士という資格認定に関する歴史と現状とならざるを得ない。

1. 欧米について

(1) 経過

1895年のレントゲン線の発見や1898年の放射性元素の発見後、すぐさま電離放射線は医療に应用されはじめ、1920年代には原子物理や原子核物理の知識をもった物理学者がそこでの課題解決を目的に医療業務に携わり始めた³⁾。この歴史過程で放射線診療における職制が明確化され、現在では、放射線治療チームは放射線治療医(Radiation Oncologist)、医学物理士(Radiation Oncology Physicist)、放射線治療技師(Radiation Therapist)と線量測定士(Medical Radiation Dosimetrist)とで構成され、それぞれ明確な業務(役割)分担の上に連携している⁴⁾。

(2) 医学物理士の役割(任務規定)

医学物理士(Radiation Oncology Physicist)が責任を負う基本的業務は「放射線の最適な利用を確保し、明確に公認され得る診断上もしくは治療上の成果を実現することであり、「放射線治療の評価、実施及びその最適化において中心的かつ専門的な活動を行う。その役割は臨床、研究及び教育にわたり、その主要な責任は高水準の臨床物理学的なサービスと監督技能を提供する」こととしている⁵⁾。

(3) 認定条件と資格

医学物理士の資格認定とその維持のための条件として、医学物理学を修得し、物理を医学に応用するための概念と技術についての教育と放射線診療における実際的な訓練を受けていること。医学物理士の資格として少なくとも学士レベルの物理学の知識及び大学院修士過程で医学物理学を修得すること⁴⁾。AAPM-TG 40によれば、医学物理士は米国放射線科認定委員会、米国医学物理士認定委員会などから認定され、登用される場合には適切な州免許の保持が勧告され、これらの資格に基づき、医学物理士の存在が医療の質の確保の対価として保険請求点数に加算されている。

2. 日本について

(1) 経過

日本の放射線医療は、医療業務を主催する医師とその指示のもとに機械を操作する技術者(放射線診療技師)により構成されている。放射線医師による日本医学放射線学会(JRS)は1923年に、放射線診療技師による日本放射線技術学会(JSRT)は1942年に結成された。以後約70年間、この2団体は放射線医療の品質を支える車の両輪の役割を担ってきた。しかしながら、特にCTの発明に代表される1970年代以降この体制は深刻な問題を抱えてきた。この問題に対して、工学部あるいは理学部の大学院を出身母体とする放射線物理学者の学術団体(現在の日本医学物理学会:JSMP)が形成され、特に、放射線量の測定に関する指針作りや精度管理に指導的役割を果たしてきた⁵⁾。この過程で、1987年医学物理士認定制度がJRSに設けられた医学物理士の認定がスタートした(認定は2009年にスタートした一般財団法人日本医学物理士認定機構に移行)。上記した事故を契機として、放射線医療関連4学術団体(日本医学放射線学会、日本医学物理学会、日本放射線腫瘍学会、日本放射線技術学会)と日本放射線技師会が2006年日本放射線治療品質管理士認定機構を立ち上げ、放射線治療の品質保証を能動的に実践するため治療品質管理士が発足した。また、品質保証における医学物理的課題に関する厚労省との話し合いにより定位放射線治療など特殊な療法に関し、その品質保証の業務に物理工学的専門家(医学物理士を念頭)の関与が通達として文書化された。

(2) 日本における医学物理士の現状

現在の医学物理士認定機構が認定した医学物理士は706人(現役は623人)である。このうち医学物理士という身分規定での職能者(ただし医療スタッフとして公的に認定されてはいない)として医療現場(重粒子線施設が中心)に日常的に深く関係しているのは約50人程度と思われる。医学物理士を職能とする多くは研究、教育機関に在職し、日常的に現場に関与することはほとんどない。放射線医療に医学物理の職域がないというこの現実、

放射線医療領域の課題に興味をいなく有能な若き理工学志願者には道がないということでもある。

IV. 現状の放射線医療が抱える課題

職制としての品質保証専門家が不在である日本の放射線医療はさまざまな後進的要素を抱えている。その1つである上記した事故的状態の長期間放置があるが、それ以外に下記する多くの問題がある。

(1) 線量・線量分布の品質管理や評価基準の策定などの外部組織に依存

線量・線量分布の品質管理の前提として線量計の品質管理があるが、その管理を行う専門家は個別医療機関にはほとんど存在しない。トレーサビリティの最末端である放射線治療部において最も重要な役割(性能の評価、確度や精度に関する評価基準の策定や実施のためのマニュアル制作など)を担い得る専門家が不在である。

(2) 導入先端技術の未消化

個別医療施設にとって日常不断の技術革新は施設の生存の条件であり、先端装置・先端技術を導入によっても高度でより安全な医療を提供するための競争は強制的に作用するはずであるが、日本ではそうになっていない。これは日本の医療体制の在り方にも起因し、先端的装置の購入は競争的であるがその有効利用を先導する専門家が不在で対応不可能(施設はあまり気にしていないのかもしれない)。

(3) 品質の高度化の遅れ

品質保証の意味は、現状の承認された医療装置・器具、医薬品を用いるという条件(より高度な医療手段の開発については現場では対象外)で提供できる最高の医療を実現するというを意味する。このために、常に現状を改良する眼をもった専門家が必要である。現状のマニュアルに沿って誤りなく照射が実践されるということは品質保証の必要条件であるが必要十分条件ではない。

(4) Cost-Benefit

人為的ミスを低減するための装置(ハード、ソフト)の措置とダブルチェックを基本とする人的措置に関する財政とリスクを管理するための経営戦略的要因は、ともすれば前者が優先されかねない。これをより高い次元で解決する提案が必要である。

(5) 先端放射線医療技術開発に関する不振

国やメーカーにとって日常不断の技術革新は生存の条件である。放射線医療機器の開発には放射線医療のセンスを持った専門的技術者が不可欠である。1960年代前半までは理工学に興味をもつ医師が中心となってメーカーを指導し、回転横断撮影装置など世界をリードする状況にあった。しかしながら、CTが発明される1970年代以降その状況は一変し、リニアック治療装置の製造からすら撤退する状況となった。これも関連メーカーと放射線治療施設に放射線治療の高品質化を課題とする専門

家の不在が大きな要因である。ただし、この放射線治療装置に関しては、京都大学放射線科の平岡教授の熱い思いが医学物理士を巻き込みつつ動態追尾4次元照射装置として蘇らせ、世界をリードしようとしている。さらに、京大原子炉実験所においては、所の全面的バックアップのもと共同利用グループ医師団と医学物理士とが協力し原子炉中性子源 BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) を世界に先駆けて展開し、これを成果に世界初の BNCT 用加速器照射システムの開発に成功した。

以上の共通的問題点のすべてにおいて、医療現場において医学物理を専らとする専門家の必要性は明らかであり、その参画によって日本の放射線医学は大きな変貌をとげることが予想される。30有余年の経験から、これとは別の注意すべき点として患者への説明責任と医療現場の雰囲気作りがある。形成される体内線量分布の意味、線量の大きさから見込まれる局所制御率(TCP)と余病発生率(NTCP)さらには使用している放射線がどのようなものかなどなど、患者の質問に対応し安心して治療を受けていただけるようにするとともに、医療スタッフの和も含めて明るい雰囲気の現場を形成することが大切であり、この点での役割が医学物理専門家に求められる。放射線をよく知る者がこの役として適任である。これに対応できるための教育が必要となる。

V. 医学物理に精通した専門家集団の役割

上記から放射線医療の品質保証を課題とする医学物理に精通した専門家集団の必要性は明らかである。放射線医療における医師以外の業務を遂行するスタッフの職制に関し、日本では1つであるが欧米では3つに区分されている。

ここにいう品質保証専門家の業務は、欧米における医学物理士の業務「放射線の最適な利用を確保し、明確に公認され得る診断上もしくは治療上の成果を実現することであり、放射線治療においてはその評価、実施及びその最適化において中心のかつ専門的な活動を行う。その役割は臨床、研究及び教育にわたり、その主要な責任は高水準の臨床物理学的なサービスと監督技能を提供する」ことはもとより、より高い品質保証のために、IV章に記した先端医療技術の創出なども対象となる。品質保証とは現在の技術水準に対応するのみならず、将来的な改良開発を考慮した放射線の最適利用をも視野に含む放射線医療の提供を意味するものである。

治療分野における上記した品質保証専門家のおおよその業務を列挙する。

- (1) 治療計画における照射線量分布の最適化^a および評価
- (2) 治療装置・関連機器の受入試験(アクセプタンステスト)・コミッショニングの計画、実施、評価

- (3) 治療装置・関連機器の QA/QC の計画、実施、評価
- (4) 治療精度の検証、評価
- (5) 放射線治療の品質を保証する研究開発：品質を高めるための線量投与計画(treatment planning)や各種確認課題等に関する基礎的研究メーカーに対する改良、開発課題の提案と機器の仕様作成・発注
- (6) 医学物理学に関する教育(新人、放射線医療スタッフ)と社会啓発
- (7) 患者への放射線治療に関する医学物理的質問に対する説明

以上の課題をすべて個人の専門家が日常課題とするのはきわめて困難であり、決して効率的とは言えない。医療機関に席を置き現場の業務を軸に品質保証業務を行う専門家集団と、研究教育機関に席を置き個々の医療機関からの発想ではなく放射線医療全体底上げの観点から品質保証業務を遂行する専門家集団とで業務分担し連携するとともに相互入れ替える措置が適当である。この観点から本稿では、前者を医学物理師、後者を医学物理士と仮称する。両者の関係を概略する。

(1) 医学物理士(国家資格が必要)

放射線医療を革新できる研究者であり教育者でなければならない。放射線を医療に応用するための物理工学的研究を遂行することにより、放射線医療の質を究極的なものにまで高め提供することを基本的任務(義務と権利)とする。そこに至る過程のさまざまな技術的到達レベルに対応する改良過程を通じ、その時点での最も質の高い医療現場を形成し、これに必要な個人と組織の放射線応用の知的レベルの高度化を図ることを任務とする。同時に医療人としての知識とセンスを有する医学物理士の育成に責任を持つ。

(2) 医学物理師

医学物理師の資格は医学物理士のうち医療機関において医学物理レジデント教育を修了したものに与えられる。

放射線医療の現場で働き、その労働に見合っただけ賃金を得る医療実務遂行者である。この実務は基本的に最先端の物理工学技術をその医療現場に展開しルーチン化を実現するとともに現在の医療の質を改革することを基本とする。医学物理士の現場業務に対する教育を担当する。医師、診療技師や看護師など関係スタッフと共に物理工学教育環境を先導的に整備し、組織としての知的レベルの向上に責任を負う。医療機関のあり方など施設者への提言(それができる環境作りを含む)が重要任務である。地域医療の高度化に貢献する役を負う。

^a 医師が指示する処方線量を実現するために、マージン設定、照射方向およびそれぞれの方向から照射量の重み付けなどを要素とする最適化。

Ⅵ. 医学物理士に求められる教育とあるべき教育組織

上述したように、医学物理士(医学物理師)に期待される課題は大変多様で、しかもその業務は人を対象とするものである。これに答える能力と医療的センス(最も重要な視点は患者への思いやり；患者が高い生活の質を獲得するための即時的、短長期的課題解決とそれを実現するための意識の鋭敏性と努力)に溢れた人材の集団形成には十分な教育期間とそれを可能にする組織が必要である。

1. 医学物理士に求められる座学並びに実習を含む基礎的教育項目

- (1) 放射線安全に係る放射線管理,放射線施設設計(遮蔽計算, 機器配置, 環境)に対応する放射線物理・工学(放射線の反応：量と質), 放射線生物学(人への効果), 管理測定(ラジオメトリー, ドジメトリー), 放射線防護(法規・勧告)
- (2) 放射線治療に係る物理工学的情報処理(統計, 検定, 画像情報), 照射技術(体位, 同期照射, 追尾照射, 照合, 融合画像), 機器工学(装置開発), 投与線量分布最適化計画(アルゴリズム), 線量・線量分布測定(原理, 手段, 校正), QA/QC(物理的, 線量的, 臨床的), 照射法(原体照射, 外部線源, 小線源), 放射線生物学(TCPN, TCP)に対応する治療学・腫瘍病理学, 解剖学・画像診断(読影：単純, 断層, 機能), 治療装置設計(思想, 目的, 課題), 情報工学, 線量測定, 配分線量, 放射線生物学, 生理学
- (3) 放射線診断に係る線量責任(利益>損失), QA/QC(物理的, 線量的, 臨床的), 装置開発, 画像処理(融合)に対応する画像機器工学, 画像情報診断学(解剖, 病理との関係), 解剖学, 画像情報処理, 診断装置設計(思想, 目的, 課題)
- (4) 核医学診断に係る線源挿入・情報処理(診断装置の原理, 特性), 装置開発に対応する機能画像機器工学, 機能画像情報診断学(解剖, 病理との関係), 機能解剖学, 分子イメージング, 生理学, 画像情報処理, 核医学診断装置設計(思想, 目的, 課題)

などである。以上の教育に加えて医療倫理や看護(座学, 実習)が必要である。

2. あるべき教育組織

上記の教育を行う組織として大学での教育を前提とする。この教育には学部での2年間と大学院での3年間程度は必要である。日本には現存しないこのような教育システムを実現する上で1960年代にきわめて活発であった原子核(力)工学の役割は不可欠と思われる。全国が合同した医工連携の大学院大学構想はその方向であろう。

Ⅶ. 教育の現状

現在、医学物理に関連した教育は、6年前に5年間のプロジェクトとして始められ、今年2期目が始まったがんプロ養成プランによる教育プロジェクトである⁶⁾。医学部に属する医科学研究科や保健学科が連携して教育プログラムを立ち上げ、講習会やE-learningシステムによる教育を実施している。

現在、医学物理士認定機構(Japanese Board of Medical Physicist, 以下JBMP:2009年2月25日制定)では医学物理士認定(資格試験及び資格認定)に際しての条件として学歴区分を設けている。これに関連して2011年10月に「本認定基準を満たす教育コースに対して医学物理士認定機構が教育コースの認定を与え、本認定教育コースを修了した者がそれにより新規認定条件を満たすこととする」とする放射線治療分野の医学物理教育コースの認定を開始した。この説明にある「がん対策基本法の制定, がんプロフェッショナル養成プラン等により、日本の医学物理教育は改善の兆しがあるものの、依然として過渡期的状況にあり、本教育コースを完全に満たす教育コースはまだ極めて少ないと予想される。また、医学物理業務を遂行するにあたり、医療現場での医学物理部門の設置が強く望まれるところであるが、同部門設置に関しても過渡期的状況にあると認識している。」が日本の医学物理士に関連する現状である。

教育コースについては「修士課程, 博士課程(3~5年, 修士・博士一貫コースを含む)の教育コース」があり、「講義を主体とした講義基準と、臨床を主体とした臨床基準」と「臨床研修生課程(レジデントカリキュラム):大学院にて当該修士または博士号を取得した者に対して開かれる臨床教育課程」を決めている(教育コース基準を単独の施設実施できない場合は、単位互換等により他の大学との連携も可能)。

— 参考文献 —

- 1) 「標準測定法01」, 日本医学物理学会(問い合わせ: JSMP事務局)
- 2) 「外部放射線治療装置の保守管理プログラム」, 日放腫学会研究調査委員会編.
- 3) “The Roles, Responsibilities and Status of the Clinical Medical Physicist”, EFOMP policy statement Nr. 1, 1984.
- 4) “THE MEDICAL PHYSICIST”, AAPM pamphlet.
- 5) “Comprehensive QA for radiation oncology”, Report of AAPM Radiation Therapy Committee TA-40, *Medical Physics*, **21**, 581-618 (1994).
- 6) 医学物理士認定機構 HP

著者紹介

丸橋 晃(まるはし・あきら)

京都大学 原子炉実験所

(専門分野/関心分野)医学物理士としての中性子治療研究(中性子の医療的能力の全開を目指す課題), 放射線・放射能の安全利用と人類(肉体, 精神)

NSG の概要と最近の動向

核兵器関連資機材等の国際的な輸出管理レジームについて

経済産業省 牧野 守邦

(元在ウィーン国際機関日本政府代表部参事官)

原子力は、平和利用による恩恵と大量破壊兵器の脅威という相反するものを与え得るものである。このため、原子力平和利用の恩恵を享受するには、核兵器の不拡散の観点からの確な対応が求められる。NSG(Nuclear Suppliers Group: 原子力供給国グループ)とは、原子力資機材や技術の輸出管理を通じて核兵器の不拡散に寄与していこうとする各国政府の集まりを指すものである。本稿では、このNSG発足の経緯や制度の概要、最近の動向等について概説することとしたい。(本稿における見解は、筆者個人のものであり、日本国政府や筆者が所属する組織のものではない。)

I. 制度発足の経緯

1974年、核兵器不拡散条約(NPT)非締約国であるインドは、核爆発実験を行うに至った。このため、1975年、NPTの規定を補完する核拡散防止措置を探求すべく、日本を含め、米国、英国、旧ソ連等、主な原子力供給国7カ国の政府がロンドンに集まり、検討を重ねた。1977年9月、新たに原子力資機材等の輸出に際して採られるべき措置などに合意し、これらをガイドラインとして取りまとめた。これが現在のNSGガイドラインの最初のものである。

II. 制度の概要

1. ガイドライン

(1) 実施と意義

NSGガイドラインは、原子力資機材等の輸出管理を国際的な政策協調の下に実施するための指針である。NSGガイドラインに盛り込まれた内容の具体的な実施は、参加国における国内法令等によって行われることとなる。

NSGガイドラインによって、原子力資機材等の輸出管理の分野においては、国際的な政策協調により規制の強化が図られてきた。また、NSGガイドラインにより、核不拡散の目的を確保しつつ、原子力の平和的利用に関する協力を維持し、発展させることに貢献してきた。

(2) 主な内容

NSGガイドラインには、核物質や原子炉およびその関連設備、再処理・濃縮施設等、原子力専用品の輸出管理に関するパート1と、産業用として非原子力分野に利用されているものの使い方によっては核燃料サイクル活動にも資することとなる、原子力汎用品の輸出管理に関

するパート2の2種類がある。いずれも輸出する場合の条件(供給条件)等を定めたものである。

NSGガイドライン・パート1の主な規定内容としては、供給条件として、受領国におけるすべての核物質に対して保障措置を適用する包括的保障措置が適用されること、受領国政府から核爆発に使用しない旨の公式の保証を取り付けること、受領国が第三国へ再移転を行う場合には、受領国が要請されたものと同じ保証を第三国に求めること等を規定している。また、2011年に改正がなされ、濃縮および再処理の移転に関し、これを制限する方針を維持しつつ、さらに、追加議定書の発効等の供給条件化、濃縮施設等の設計・製造技術の提供の回避(ブラックボックス化)等、規制が強化された。さらに、2004年に採択された国際連合安全保障理事会の大量破壊兵器等の不拡散等に関する決議(国連安保理決議1540)を踏まえ、輸出管理の確立を図るべきこと等も規定されている。

NSGガイドライン・パート2の主な規定内容としては、パート1と比べると比較的緩やかではあるが、供給条件として、用途および最終使用場所を示す最終需要者からの申告書、およびいかなる核爆発活動または保障措置が適用されない核燃料サイクル活動にも使用されない旨の保証を取得すべきこと、このガイドラインに参加していない国に対しては第三国への再移転に関し供給国の事前同意が確保されることの保証を取得すべきこと等を規定している。また、移転を許可する場合の基本的な基準を示すのではなく、核爆発活動等に使用される場合または転用される危険がある場合等には移転を許可すべきではない旨を規定している。そして、輸出許可申請の審査をするにあたって考慮すべき点として、受領国がNPT締約国であるか否か、移転される資機材等が最終用途に

とって妥当であるか否かおよび最終用途が最終需要者(最終使用者)にとって妥当であるか否か等を挙げている。さらに、供給国に対して、付属書に掲載されていない品目の移転であっても核爆発活動に関連して使用される場合等は許可に係らしめるキャッチオール規制について、国内法によりその実施を保証すべきとしている。

2. 主な活動

NSG では、総会、情報交換会合、協議グループ会合及び技術専門家会合が、常設の会合として行われている。

総会は、唯一の意思決定機関であり、NSG ガイドラインの改正に関する決定の他、NSG 参加国以外の国へ輸出管理を通じた核不拡散への理解と協力を働きかけるアウトリーチなど、核不拡散分野における多様な議論が行われる。協議グループ会合は、NSG ガイドラインの改正や主な課題の検討を行い、その成果を勧告として総会に報告する。情報交換会合は、北朝鮮やイランの核開発計画等核拡散の懸念に関する情報交換等を定期的に行っている。また、審査・執行専門家会合も開催され、効果的な審査や執行に関する事例紹介等が行われている。なお、NSG の事務局機能は、在ウィーン国際機関日本政府代表部が担っている。

Ⅲ. 最近の動向

1. インドとの民生用原子力協力

米国が2001年にインドの核実験実施に対する制裁を解除した後、両国間における協力関係の強化が急速に進められ、2005年には米印首脳会談において、民生用原子力分野での協力が合意された。しかし、NSG ガイドライン・パート1では、包括的保障措置の適用を供給条件としているため、インドに対する例外適用を認めるか否かがNSG において検討されることとなった。その後、インドとIAEA との保障措置協定の締結や、インド外相による、核実験モラトリアム、民生用原子力施設へのIAEA 保障措置の適用、NSG ガイドラインの遵守を含む厳格な輸出管理の実施等インドが遵守すべき公約や行動に関する声明の表明がなされた。これらを受け、2008年に、NSG ガイドラインの改正の形は採らずに、IAEA の保障措置が適用されるインドの民生用原子力計画に対する民生用原子力協力を例外的に認める旨の方針がNSG の声明として採択され、実施されることとなった。インドへの例外措置の実施は、これまで国際的な核不拡散体制の外側にいたインドに核不拡散への取組を促す契機となるとの見方がある一方、NPT に加盟していない

インドに対して原子力協力を行うことは国際的な核不拡散体制に悪影響を与えとの見方もある。核不拡散に係るインドとの対話と協力の促進のための努力、インドの公約と行動の誠実な実施、さらには、インドから機微技術に係る核の闇市場が発生しないことなどを見極めつつ、この例外措置の評価がなされることとなろう。

2. 機微な輸出に対する NSG の規制強化

2004年2月にブッシュ米大統領は、大量破壊兵器の拡散防止に関する7項目の提案を行った。その中の1項目に、NSG 参加国は、既に実用規模で稼働中の濃縮または再処理工場を有していない国に対しては、これらの設備や技術の提供を拒否すべきである、という提案が含まれていた。

本提案は、機微な原子力技術を有する国による技術移転の制限と技術格差の固定化を強化する内容となっている。このため、NSG のようにコンセンサス・ベースの多国間協議の場でこのような提案に関する合意を形成していくことは容易ではなく、2004年以降2011年のNSG 総会で合意に至るまでの7年間、検討・協議が継続された。合意された規制強化の内容は前述のとおりである。本提案は、2004年のシーアイランド・サミット以降もG8サミットで取り上げられた。機微な輸出に対する規制強化の内容がNSG において合意されるまでの間は、G8による政策協調の下に各国において機動的、先行的な対応が行われてきたといえる。

おわりに

原子力関連資機材等の移転は、輸出する側から見ると核不拡散の側面が強く関係し、輸入する側から見ると原子力平和利用の側面が強く関係することとなる。また、核兵器や原子力技術等を「持てる国」と「持たざる国」など、多様な関係者が関わっている。今後の重要課題の1つが、濃縮施設等の機微な輸出の厳格な管理であることを踏まえれば、日本は、機微な技術を有する「持てる国」であり、NSG 等の多国間協議の場においてより主体的な政策判断が求められていくこととなろう。

(2012年7月10日 記)

— 参考資料 —

- 1) 原子力以外のものも含め、大量破壊兵器等の輸出管理レジームについては、次の文献に詳しい。浅田正彦編著「兵器の拡散防止と輸出管理—制度と実践」、有信堂高文社、(2004.7)。

風力発電の現状と今後の展望

我が国における風力発電の動向

電源開発(株) 三保谷 明

2012年7月1日に、固定価格買取制度が施行され、今後導入拡大が期待される再生可能エネルギーであるが、なかでも風力発電は、再生可能エネルギー電源のなかではコスト面でメリットが大きく、海外では主要電源の地位を占めるまで成長している。我が国にも大容量風車を製造するメーカーが3社(三菱重工、日本製鋼所、日立製作所)あり、大量導入への対応を進めている。国も洋上への展開を視野に入れ、各種研究開発を実施している国もある。そうした風力発電の動向に加え、風力発電の技術的な特徴・運転保守方法や、最近の技術動向などについて解説する。

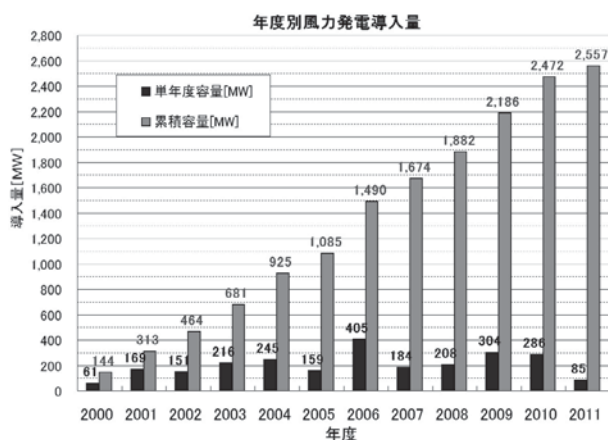
I. 我が国における風力発電導入

1. これまでの導入経緯

我が国では1990年頃から系統に連系して発電する風力発電機の導入が始まった。当初は実証あるいはデモ用が多く、設置台数も1~2基、単機容量も数十~百kW程度であった。しかし1997年以降、国による事業者支援制度や電力会社による買取りメニューが整備されると、多数の風車を設置する大規模ウインドファームが、全国に次々と建設されていった。

風力発電機の発電電力量は、風車の回転面積に比例し、上空に行くほど好風況が得られることもあり、風車のロータ径は次第に大型化し、現在では直径90m超の風車や、定格出力3MWクラスの風車も導入されている。

第1図に、我が国における風力発電の導入量を示す。ユニット容量の増大と導入基数の拡大で、我が国の風力



第1図 我が国における風力発電導入量¹⁾

Current State and View in the Future of Wind Power Industry in Japan : Akira MIHOYA.

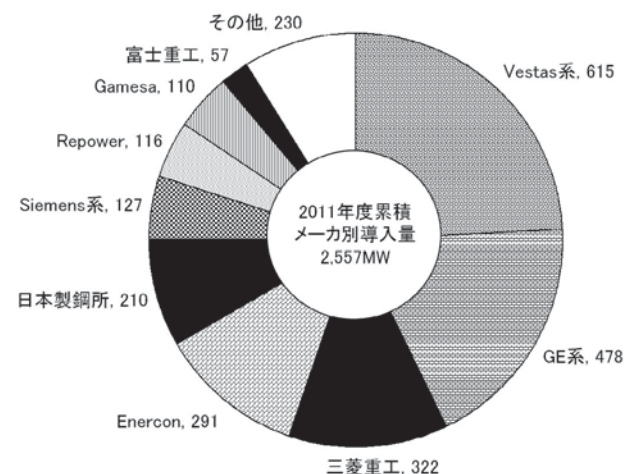
(2012年 8月1日 受理)

発電導入量は次第に拡大していった。しかしながら出力変動の問題や、買取り価格の低減に対する建設費用の増大、補助制度の廃止などもあったことから、成長は小幅に止まり、近年では年20~30%ずつ拡大していた世界市場と比較すると、見劣りがするものであった。

第2図は、我が国におけるメーカー別の導入量である。世界市場では、当初は風車専門メーカーがシェアを奪ったことや、風車の大型化に伴い製品開発に技術力と資本力が必要になってきたことから、SiemensやGEといった重電メーカーが参入し、シェアの上位を占めるようになってきた。我が国でも長年の歴史を有する富士重工の風力部門が、2012年7月に日立製作所に譲渡され、海外と同様の傾向を見せている。

2. 今後の導入見込み

今後、風力発電がどの程度導入されるかどうかは、風力発電原価や、開発のインセンティブ(事業収益性)のほか、出力変動を緩和するための系統運用方法、風力発電



第2図 我が国における風車のメーカー別導入量¹⁾

に関する国民の受容性など様々な要因に影響される。特に風力資源の豊かな北海道、東北、九州地域では、電力系統規模に対して風力の出力変動が大きいため、電力会社管内の周波数や電圧は、当該電力会社が各社ごとに一定範囲内に調整するという現状の系統運用を前提にすると、それほど大規模な導入が見込めない。しかしながら系統対策を実施すれば、偏在する風資源を活かした導入が期待される。

2010年に経済産業省と環境省がそれぞれ風力発電導入可能量を試算している。これは系統制約を除いて、風況(陸上5.5 m/s以上、洋上6.5 m/s以上)と社会的な条件(自然公園や保安林・市街化区域等以外、居住地から500 m以上、道路に近く送電線から40 km未滿など)や、買取り価格(20円/kWh・15年)などの条件に基づき、風力発電の導入可能量を計算したものである。経済産業省の試算²⁾によれば、陸上3,900万 kW、洋上1,300万 kWとなっている。

II. 風力発電機の技術的特徴

1. 風車

発電用の風車には、数 kW から数 MW まで様々なものがあり、風車の型式も垂直軸、水平軸があるが、系統連系用として用いられる大型風車は、ほぼ全て水平軸のプロペラ風車である。これは、高々度の強風をできるだ

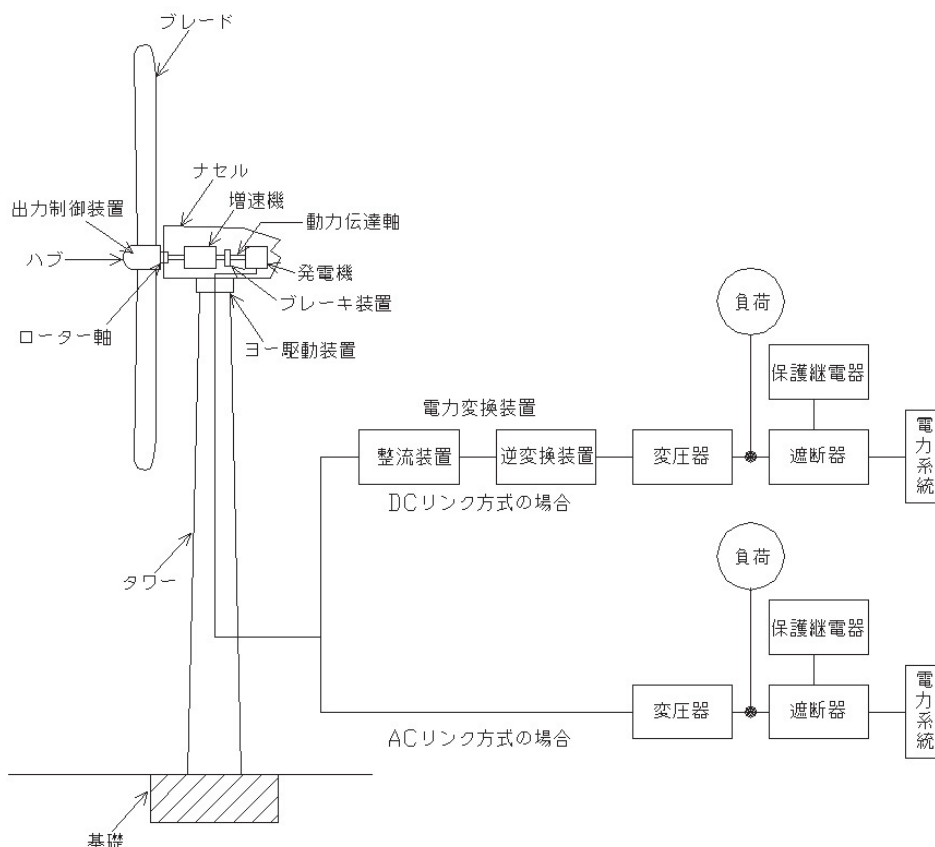
け広い面積で捉え、効率良く発電するには、水平軸のプロペラ風車が有利であったためである。第3図に代表的な水平軸プロペラ風車の構造を示す。

2. 発電機および系統連系方式

2 MW 級風車の発電時回転速度は毎分10数~20回転程度である。これは水車発電機の毎分100~1,200回転や、蒸気タービン(火力用毎分3,000~3,600回転、原子力用1,500~1,800回転)と比べると極めて低速である。そのため、発電機の周波数では系統にそのまま連系できないことから、機械的な増速装置を用いたり、周波数変換装置を用いて、低周波から系統周波数に電氣的に増速する必要がある。増速の方式により発電機は2つの種類に大別することができる(第4図)。

(1) 増速機十巻線形誘導発電機

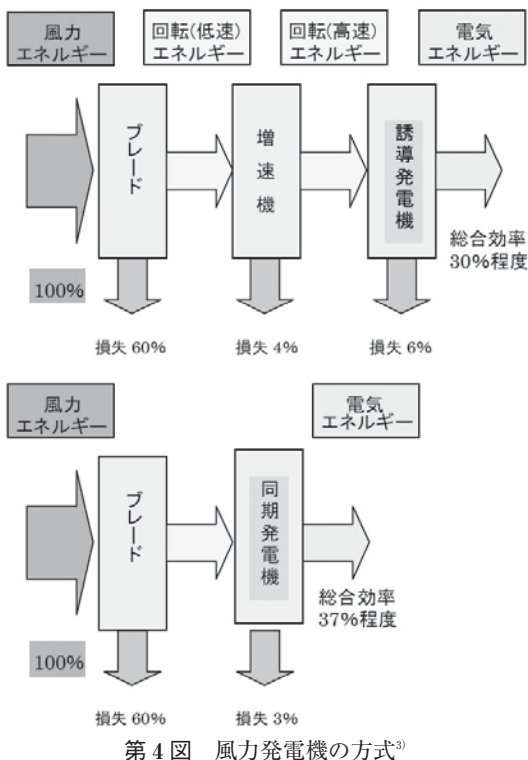
増速機で回転数を100倍程度に増速し、巻線形誘導発電機を回転させる方式である。発電機の交流励磁電流の周波数を制御することによって、風車の可変速制御を実現している。この方式は、発電機が高速で回転することから、小型軽量に製作することができる。また周波数変換装置が安価となるため、風車価格が安価となり、広く普及している。可変速制御が必要でなければ、かご形の誘導発電機が用いられる場合もある。一方で増速比率の大きな増速機を、剛性が低く振動が大きいナセル内で使用するため、増速機が損傷するケースが多く、事業者の



第3図 水平軸プロペラ風車

第1表 風力発電機各部の機能

ロータ	ブレード……………回転羽根, 翼 ロータ軸……………ブレードの回転軸 ハブ……………ブレードの付け根をロータ軸に連結する部分
伝達系	動力伝達軸……………ロータの回転を発電機に伝達する部分 増速機……………ロータの回転数を発電機に必要な回転数に増速する歯車(ギア)装置
電気系	発電機……………回転エネルギーを電気エネルギーに変換する装置 電力変換装置……………直流, 交流を変換する装置(インバータ, コンバータ) 変圧器……………系統からの電気, 系統への電気の電圧を変換する装置 系統連系保護装置……………発電設備の異常, 系統事故時などに発電設備を系統と切り離し, 系統側の損傷を防ぐ保護装置
運転・制御系	出力制御装置……………風車出力を制御するピッチ制御あるいはストール制御 ヨー駆動装置……………ロータの向きを風向きに追従させる装置 ブレーキ装置……………台風時, 点検時などにロータを停止させる装置
支持・構造系	ナセル……………伝達軸, 増速機, 発電機などを収納する部分 タワー……………ロータ, ナセルを支える部分 基礎……………タワーを支える基礎部分



大きな負担となっている。

(2) 同期発電機十周波数変換装置

多極(70~160極など)の同期発電機で低周波数の交流電力を発生し, 周波数変換装置で系統周波数まで周波数を増加させる方式。発電機が多極となり大型化してしまうこと, 全電力を変換するコンバータが必要となるた

め, 変換装置が高額となる。一方, 増速機が不要で故障が少なく, 変換装置を用いて電圧を自在に制御できることから, 系統への親和性が高い特徴がある。増速機を用いないという意味でギアレス風車と呼ばれることも多い。洋上用超大型機の多くがこの方式で検討されている。

3. 風力発電機の運転と保守

(1) 風向制御・起動停止制御・風速制御

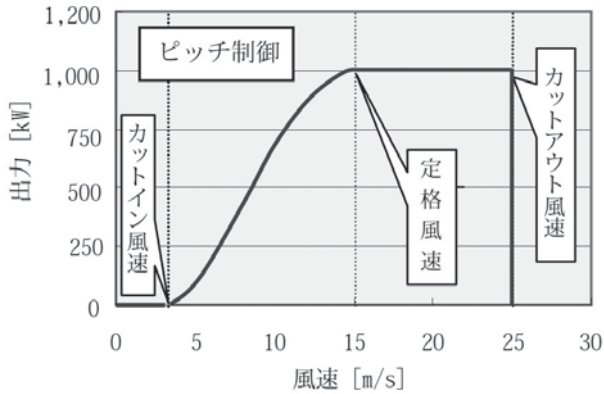
風車は常に正面から風を受けさせるため, 自ら風向を検出し, 正対するように風車の方向を自動で制御している(ヨー制御)。

一定風速以上になると, 自動で発電を開始し, 系統に電力を送り出す。この風速はカットイン風速と呼ばれ, 3~4 m/s に設定される場合が多い。また定格出力になるとブレードの仰角を変え, 風を逃がすことで定格出力以上にならないよう制御する(ピッチ制御)。定格風速は風車の種類にもよるが, 12~16 m/s であることが多い。また強風時には, 風車の運転が危険になるため風車を停止する。これをカットアウト風速と呼び, 通常25 m/s 程度に設定されている。カットアウト後も, 風車は風に対する投影面積が最小となるよう, 風向に応じて, 風車の向きを自動的にヨー制御している(第5図)。

最近の風車のなかには, 風切り音を低減させるため, ピッチ制御で風車の回転数を低下させる機能を持つものもあるが, その場合には発電量の減少を伴う。

(2) 風力発電機の監視制御方式

風力発電機は遠隔地に設置されることが多く, 既往の発電所のように, 保守員をサイトに常駐させることも困



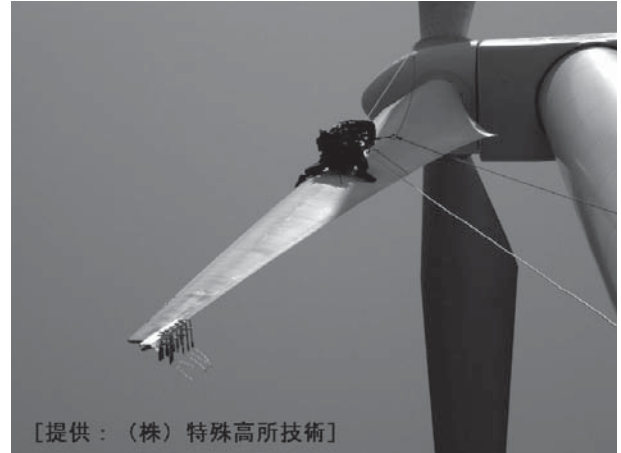
第5図 風力発電機の運転範囲³⁾

難であるため、風車の運転は起動・停止を含めて自動で行われることが多い。異常が発生した場合には、一過性の軽故障時には、一定時間経過後に自動再起動するが、そうでない場合には自動的に停止するとともに、監視センターや、保守員のパソコン、携帯電話等に警報を発報し、保守員が点検することになる。

(3) 風力発電所の保守方法

風力発電所の多くは自家用電気設備であり、事業者自らが策定した保安規程に基づいた、電気主任技術者を中心とする自主保安体制で運転保守が行われている。風車10基程度を有するウインドファームでは2～3名の保守員を常駐させ、日常の巡視や給電対応、故障対応にあたっている。風車の定期点検は通常半年に1度行われるが、事業者自ら行うほか、メーカーや独立系のメンテナンス事業者が保守を行う場合も多い。

風車の保守のうち、特徴的なものはブレードのメンテナンスである。風車はブレードが露出しており、砂塵や雷撃の影響を受けやすい。またプラスチック表面をコーティングした構造であるが、紫外線その他の自然環境下での経年劣化は避けられない。また風車は強風地に立地しているため、メンテナンスにクレーンなどの重機を用いると、強風による待機時間が発生して、保守費用が高額となることがある。風車を順次回転させて作業を行うため、足場を組んだ作業も困難である。最近では、ロープを使ってブレードに沿って作業員が降下し、ブレード



第6図 ロープアクセスによるブレードメンテナンス⁴⁾

の点検や補修を行う方法が導入され、保守の合理化に成果をあげている(第6図)。

(4) 風力発電機の出力変動

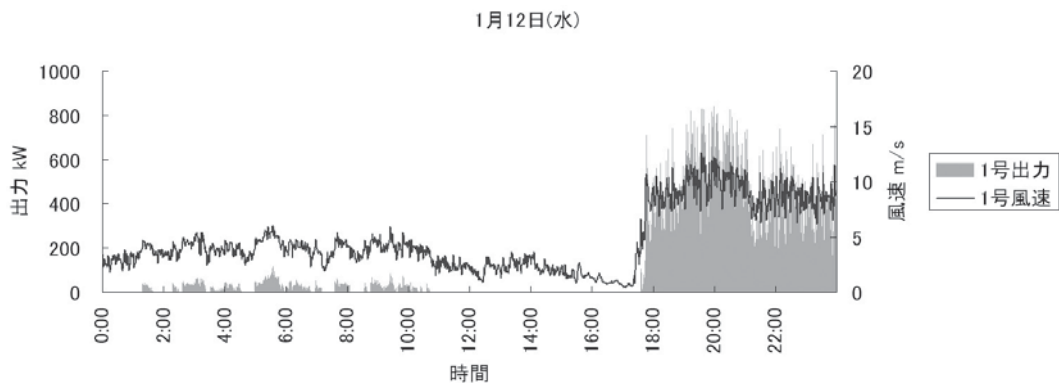
風車の出力は理論的には風速の3乗に比例するため、わずかな風速変動でも、出力が大きく変動する。第7図に、東京臨海風力1号機(850 kW)の2011年1月12日の出力と風速の変動例を示す。

当日は18時頃より、風速が9 m/s程度に強まり、風車は18時以降50～100%の間で変動を続けている。このケースでは、急に出力が増大(長周期変動)し、かつその後も短い周期変動が継続している(短周期変動)。第7図では風力発電の2つの出力変動の問題が顕著に表れている。風力発電のこうした特性が、大量導入に当たっての問題となっている。

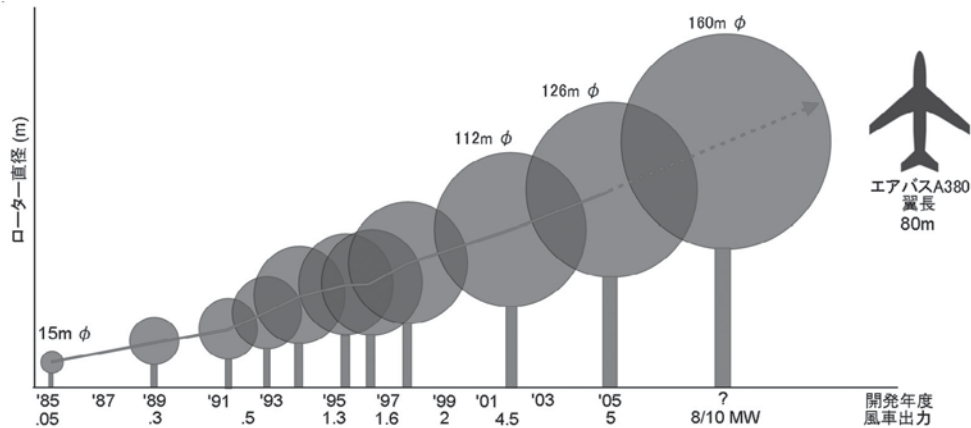
Ⅲ. 最近の技術動向

1. 大容量化

前述のように風力発電機は、大出力化を図るため、次第にブレード長を伸ばしてきた。第8図は、風車出力とブレードの長さの変遷を表したものである。現在主流の2 MWクラスで、ロータ径は90 mに達しており、超大型ジェット旅客機と同等となっている。最近では低風速域でもより多くの発電量を得るため、100 m程度にロー



第7図 風車の風速と出力の変動例



第8図 風車出力とロータ径の変遷⁵⁾

タ径を増大した風車も見られるが、陸上では輸送制約があるため、これ以上の大ロータ径化は困難と見られる。

2. 洋上風力

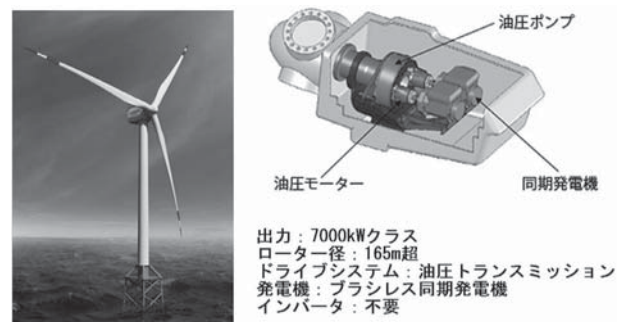
国内の風力発電は、陸域において立地適地が減少することから、今後の更なる導入促進のためには洋上への展開が不可欠となっている。そのため、国では我が国の気象・海象条件に適した洋上風力発電技術の確立を目的として、洋上風況観測システムおよび洋上風力発電システムの実証研究を進めている。

第9図は、電源開発株式が北九州若松沖で実施している洋上風況観測システムおよび洋上風力発電システムの実証研究の概要図である。

また、洋上では陸上のような輸送の問題がない一方、海中の基礎構造物が高額になるため、より出力の大きな風車が必要になる。そのため、国では5 MW 超クラスの洋上風車を目指した超大型風力発電システム技術研究開発も実施している。第10図は、その概要図である。

3. 蓄電池併設風力

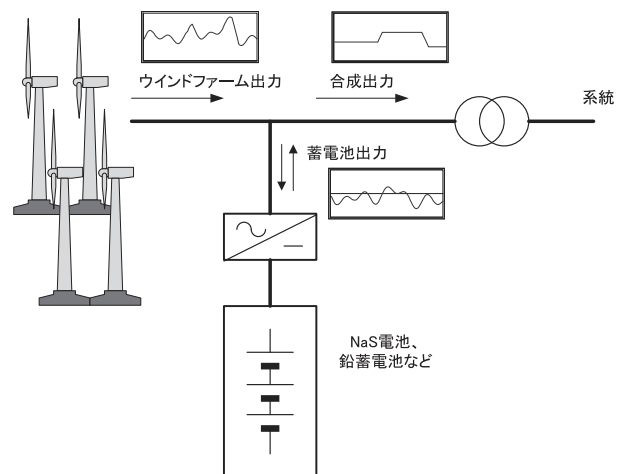
II-3(4)項で述べたように、風力発電は出力変動が大きいことから、系統の調整能力が不足する場合に、導入が制限されることが多い。そのため、風力発電機に蓄電池を併設して、蓄電池による出力変動緩和を行う風力発電所も実用化されている。第11図はその概要図である。変動緩和の対象が長周期であれば、時間容量に優れる



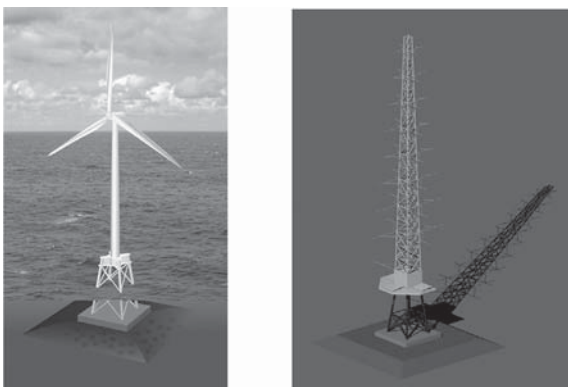
超大型風力発電システムイメージ

【提供：三菱重工業（株）】

第10図 超大型風力発電システム技術研究開発⁶⁾



第11図 蓄電池併設風力の概要図



第9図 北九州沖の洋上風力発電実証システム

NaS電池が使用され、短周期であれば鉛蓄電池による安定化システムが実用化されているが、ニッケル水素電池やキャパシタなどの電池を一部組み合わせたハイブリッド電池についても研究開発が行われている。

4. FRT(事故時運転継続機能)条件

風力発電が大量に導入された欧州では、落雷事故時などの瞬時電圧低下で、風力発電所が一斉に停止し、広範囲な停電となることが懸念されている。2006年に発生した欧州大停電も、系統事故時に風力発電所が大量に脱落したことが原因の一つと言われている。そのため、欧州

では系統事故等で電圧が一時的に低下した場合でも、風力発電機が運転を継続できるよう、風車は事故時運転継続機能を付加することが、各国の送電系統運用規則(グリッドコード)に定められている。我が国では風力に先立ち、低圧系統に連系する太陽光発電向けのFRT要件が、系統連系規程 JEAC 9701-2010の追補版に定められた。風力についても、現在検討が進められており、将来は風力発電機もFRT機能が必須になるものと思われる(第12図)。

IV. 今後の課題

2012年6月に提示されたエネルギーミックスの選択肢の原案によれば、原子力依存度を現状維持(25%)とするシナリオにおいても、2030年までに17.6GW、すなわち現在の7倍程度の飛躍的な風力発電導入量が必要となる。既に固定価格買取制度が施行されたとはいえ、本稿でも触れたとおり、我が国への風力発電の大量導入には、未だ多くの課題が山積しているのが実情であり、とりわけ以下の課題には、官民挙げての取り組みが必須である。

(1) 系統連系制約

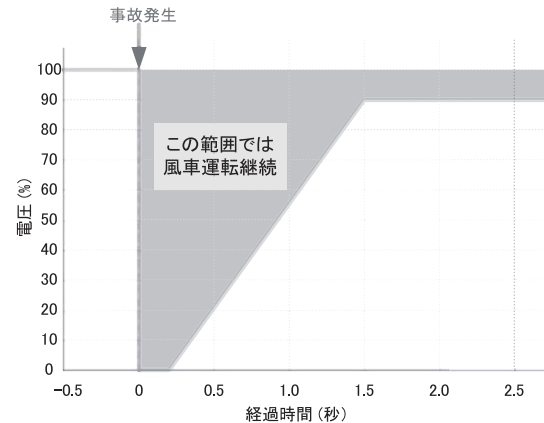
風力発電の出力変動性と不随意性に起因する需給インバランスにより生じる系統電力の周波数変動問題(エリア全体)と、風力発電所近傍に十分な容量を有する送電系統がないことによる送電容量不足や電圧変動等の問題(ローカル)があり、短期的には送電系統の運用方法の見直し(広域的運用)や接続ルールの見直し、中長期的にはエネルギー需給見通しに基づく地域間連系を含む送電系統設備の整備、増強が必要となる。

(2) 規制緩和

風力発電所の設置には、風車1基あたりの地上占有面積は非常に小さい(数十m²)ものの、大規模ウインドファームの立地には、広い用地を確保する必要があり、農地や森林がその適地となる場合が多いが、適地となる広い農地の大半を占める第一種農地は、農地法等の改正により風力事業を目的として転用することが不可能となっている。また森林のうち保安林についても、その指定解除や作業許可の要件について、現在、林野庁当局が緩和策を講じつつあるが、まだ制約は多い。その他、風力発電所立地に関する規制法制は、自然公園法、海岸法、港湾法等多岐にわたり、これらの規制法制の適正かつ早急な緩和が望まれるところである。

(3) 改正環境アセスメント法

2011年4月に公布された改正環境アセスメント法により、風力発電もその法対象となったことから、風力発電の導入促進が求められる一方で、風力発電所開発のリードタイムの長期化が懸念されている。アセスメント実施中の開発案件に対する経過措置等も講じられているが、風力発電の特性、実態に即したアセスメント項目の適正化や手続きの迅速化が望まれる。



第12図 FRTの概要図

(4) 社会受容性の向上

風力発電所の開発、立地における最大の要件は、地元行政や地域住民の合意形成であり、その導入促進を図るためには、地元企業や住民の事業参画等を含む地元メリットの拡大による社会受容性の向上が望まれる。

V. おわりに

本誌は日本原子力学会の会誌であり、読者に風力発電の分野にどれほど関心を持って頂けるのか、多少の不安がある。しかしながら、筆者自身も過去、原子力発電所の施工監理に従事した経験を持ち、利用可能な資源を電気という形に変えて、人々の生活に貢献したいという思いは、本誌の読者と目的を共有化できるのではないかと考えている。原子力発電関連設備の近くで風車を見かけることも多いと思われるが、そうした際に、本稿を思い出して頂ければ幸いである。

—参考資料—

- 1) 日本風力発電協会資料
- 2) 平成22年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業(風力エネルギーの導入可能性に関する調査)調査報告書, 経済産業省.
- 3) 風力発電導入ガイドブック第9版, NEDO.
- 4) 株式会社高所技術 Web サイト
<http://www.tokusyukousyo.co.jp/>
- 5) EWEA/2001 van Kuik 資料を基に作成.
- 6) 海洋における再生可能エネルギー利用技術研究開発の現状, 経済産業省.

著者紹介



三保谷 明(みほや・あきら)
電源開発(株) 環境エネルギー事業部シニア
エキスパート
(専門分野/関心分野)高風力発電事業/エネ
ルギー安全保障, 地域振興

連載
講座これからの原子力システムを担う
新原子力材料

次世代原子力システムのための材料開発の現状と課題

第2回 低放射化フェライト鋼

日本原子力研究開発機構 谷川博康, 廣瀬貴規, 酒瀬川英雄, 谷川 尚

低放射化フェライト鋼は核融合炉ブランケットの構造材料として、フェライト/マルテンサイト系耐熱鋼の添加元素を低放射化制約に見合うものに置換することで設計され、耐熱鋼製造技術を背景とした開発が進められている。本稿では低放射化フェライト鋼について、要求性能と開発状況、および研究開発課題について紹介する。

I. 材料設計思想

低放射化フェライト鋼は、25年近く、欧州、米国、および日本で開発が進められてきた材料であり、熱交換器等に利用されていたフェライト/マルテンサイト系耐熱鋼(改良9Cr-1Mo鋼: T 91/P 91)の組成を元に、添加元素のMoやNbをWやTa等で置き換えることで誘導放射能の低減を狙い、さらなる特性の改善が行われてきた材料である¹⁾。フェライト系耐熱鋼は、細かく粒界を導入し、さらにその上に微細で安定な析出物を析出させることにより高い高温強度を実現しており、このような微細な組織は耐照射性の観点からも有効であると考えられている。このような組織によって実現される強度特性は、Ta等の微量添加元素の添加量調整のほか、製造工程、熱処理条件の選択により調整可能であり、照射効果を考慮した最適化が試みられている。

この系の鋼は低温で延性から脆性に遷移する傾向を示し、かつ、その遷移が発生する温度(延性脆性遷移温度, Ductile Brittle Transition Temperature: DBTT)が照射により上昇することから、このDBTT上昇を最小限にすることが開発初期課題として検討された。その結果、Cr添加量が8~9 wt%近傍で照射によるDBTTの最小の上昇量を示したことから、主流の低放射化フェライト鋼のCr量は上記の添加量となっている。

Materials for New Generation Nuclear Energy Systems—Current State and Future Agenda for Material Developments(2); Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steel: Hiroyasu TANIGAWA, Takanori HIROSE, Hideo SAKASEGAWA, Hisashi TANIGAWA.

(2012年 7月27日 受理)

■前回のタイトル

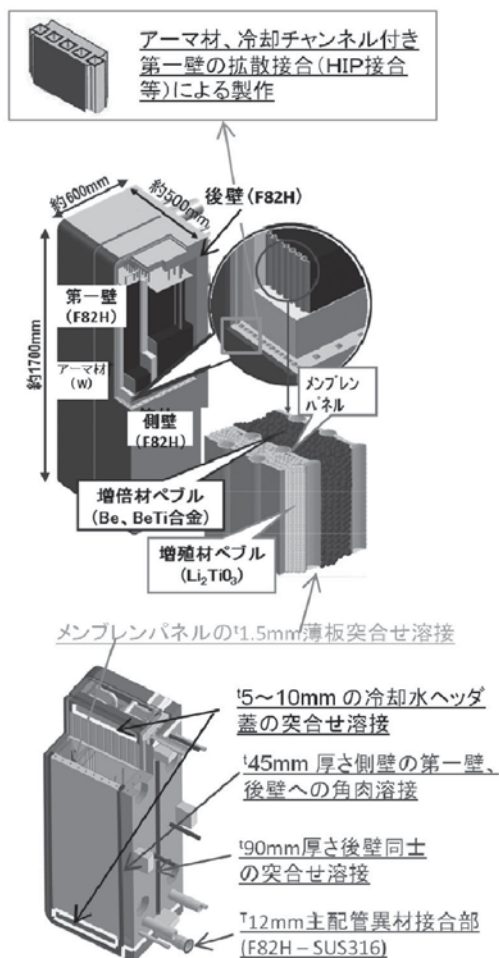
第1回 黒鉛・炭素材料

II. 要求性能

低放射化フェライト鋼は、ブランケットの筐体および内部構造を構成する構造材料の候補として検討されている。国際熱核融合実験炉(ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor)でのテストブランケット・モジュール(TBM)試験に向けて開発が進んでいる固体増殖・水冷却方式のブランケットを例に²⁾、構造材料に関わる設計と負荷条件の解析例を紹介する。

1. ブランケット設計

現在開発が進められている核融合発電システムは、重水素-三重水素(D-T)核融合反応を利用するシステムであり、核融合エネルギーの大部分は発生する高エネルギー中性子(14 MeV)の運動量として与えられる。核融合炉ブランケットは、核融合プラズマの周囲に配置され、発生した高エネルギー中性子を遮蔽し、熱エネルギーに変換するとともに、燃料である三重水素(トリチウム)の生産も行うことが要求されるシステムである。このため、現在提案されているブランケット設計は複雑な構造を示す(第1図)。すなわち冷却水流路を内蔵する筐体(第一壁・側壁・後壁)、トリチウム増殖材(Li₂TiO₃)で生成されたトリチウムが中性子増倍材(Be)に吸蔵されるのを防ぐ冷却管付仕切り板(メンブレンパネル)、冷却配管、トリチウム回収系配管、および壁面に取り付けるためのキーで構成される。この構造を構築するためには、様々な厚さや形状の部材の製作が必要となる³⁾。さらにその製作においては、たとえばTBM一機につき溶接線全長が約115 mになるように³⁾、複雑な溶接組み立て工程となることから、様々な溶接・接合技術が必要となるだけでなく、材料自体が良好な溶接性を示すことが要求される。



第1図 固体増殖・水冷却方式ブランケット (ITER-TBM) の構造例、および主たる接合部分

2. 負荷条件

ブランケットでは、熱、中性子照射、電磁力、冷却材圧力が構造材料に対する負荷となる。

熱負荷としては、プラズマからの表面熱負荷 0.5 MW/m^2 に加え、構造材料そのものの核発熱、内部の増殖材の核発熱がある。結果として、核融合中性子の負荷が最も大きいプラズマ対向面(第一壁)が最も高温となるが、フェライト鋼の利用上限温度である 550°C を超えない設計となっている。一方、中性子壁負荷はITERでは最大でも 0.78 MW/m^2 程度でほとんど問題とならないが、原型炉(SlimCS設計⁹⁾)では 3 MW/m^2 となり、最も厳しい箇所まで交換までに 100dpa 程度の照射量が予想されている。

低放射化フェライト鋼を磁気閉じ込め式核融合炉で利用する場合に特有の負荷として、電磁力負荷がある。この負荷は、プラズマが瞬間的に消滅するプラズマディスラプションが発生した場合、プラズマ電流の消滅に伴ってブランケット内に誘起された電流とコイルが作る磁場とが作用して、非常に短い時間($\sim 30 \text{ ms}$)にブランケットに電磁力が生じることで発生する。この評価については、ITERの遮蔽ブランケットについては解析例が報告

されているが、TBMや原型炉ブランケットを対象とした解析は少なく、今後の課題とされている。

このほか、冷却媒体である加圧水型軽水炉(PWR)相当($285\sim 325^\circ\text{C}/15.5 \text{ MPa}$)水による腐食、トリチウム増殖材や中性子増殖材との反応等の環境負荷も考慮する必要がある⁵⁾。

III. 開発状況と課題

日本において開発された低放射化フェライト鋼としては、旧原研(現、原子力機構)と旧NKK(現、JFEスチール)が共同で開発したF82H鋼⁶⁾($\text{Fe-8Cr-2W-0.2V-0.04Ta-0.1C}$)、および大学連合と新日鐵とが開発したJLF-1鋼⁷⁾($\text{Fe-9Cr-2W-0.2V-0.08Ta-0.1C-0.05N}$)が代表的なものであり、これらの鋼の開発は世界をリードしている。以下、F82Hについてその状況と今後の課題について述べる。

1. 製造技術

ITER-TBM製作において必要とされる低放射化フェライト鋼製造技術については、現時点ではほぼ実証済みである。すなわち、この規模での溶解は小型($\sim 5 \text{ t}$)の真空誘導溶解炉(VIM炉)で対応可能であり、かつ部材製作性も小規模設備にて実証済みである。一方、原型炉では約 $3,500$ トンの低放射化鉄鋼材料が必要になると考えられている⁸⁾。大量製造技術自体は、非核融合分野において膨大な研究開発が進んでおり、特に近年、利用が進んでいるW添加耐熱鋼の製造技術および知見が利用できるが、低放射化フェライト鋼に特有の製作技術課題として、Ta量制御および微量不純物元素制御がある。前者のTaは、一般耐熱鋼で利用されているNbの代替として析出強化による耐熱性向上や靱性向上を期待して添加されるが、非核融合分野で使用された実績はほとんどないことから、その制御技術に関する情報が限られている。一方、後者は、強度特性に影響のある元素(Nb, Mo, Ni, Cu, Al, Ti, Co, N)と特に影響がない元素(Ag, Bi, As, Sb等)に分けられ、これらの目標濃度はリサイクルの観点や浅地埋設基準等から議論されている⁹⁾。これらの中でAlやNは精錬プロセスの最適化によって制御可能だが、他の元素については現在の精錬技術での除去は困難であり、高純度原料を選択し、専用炉を用いる必要があると考えられている。これらの低放射化フェライト鋼特有の課題は、実際の実規模製造を通して技術と経験を蓄積していく必要があると考えている。

ブランケットを製作する上で不可欠な接合技術についても、非核融合分野の鉄鋼材料接合技術をそのまま利用できる。これまでTungsten Inert Gas(TIG)及び電子ビーム(EB: Electron Beam)溶接について検討が進められ、溶金部での硬化、熱影響部(HAZ: Heat Affected

Zone)の軟化といった高Crフェライト系耐熱鋼と同様の傾向が確認されているが、基本強度特性の大きな劣化はなく、溶接割れ感受性も低いことが明らかになっている³⁾。その一方、HAZ部において疲労特性劣化や異なる照射応答を示すことから、その体積を最小にできるファイバーレーザー溶接等の高品質・高出力先進溶接技術の適用が検討されている。また、母材製作時の焼ならし焼き戻し熱処理(NT: Normalizing & Tempering)に加え、溶接後熱処理(PWHT: Post Weld Heat Treatment)が必要となることの影響、プラズマ対向材料(W)や主配管系ステンレス鋼との異材接合技術、熱間静水圧加圧による接合部の検査技術等の開発も今後の課題である。

2. データベース

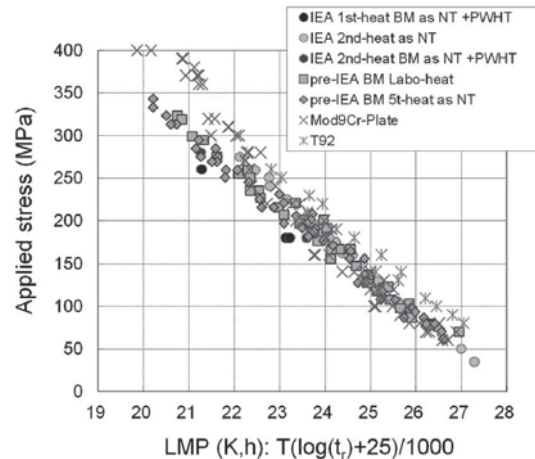
低放射化フェライト鋼の特性および照射データに関しては、IEAで実施された低放射化フェライト鋼の共通試験の供試材(F82H鋼IEAヒート材)として各国でデータが取得され、データベース化されている。これにより、機器設計に必要な物理特性、強度特性などのデータはおおむね整備されている。また、照射特性についても、広い照射温度、照射量にわたる照射データが蓄積されている。特にF82H鋼は各国の照射プログラム中でも比較材料として照射されており、すでに多くの照射データが得られている。

(1) 非照射データ

F82H鋼は、耐熱鋼として基本的な特性であるクリープ特性は、材料設計ベースとした改良9Cr-1Mo鋼と同等の特性となっている(第2図)。その一方、核融合炉においてはプラズマディスラプションやパルス運転モードによる短時間負荷および繰り返し負荷が予想されることから、高温特性のみならず、靱性および疲労特性についてもバランスが取られていることが求められる。F82Hは室温における0.2%耐力および引張強度がそれぞれ550MPaおよび650MPa程度になるように熱処理される。この条件で、これまでF82H-IEAヒート材を中心に、第2~4図に示すような多くのクリープ破断特性、引張データ、衝撃特性データ、および靱性データ、疲労寿命等、および物理特性が取得されている¹⁾。特にIEAヒート材については10万時間時効データが取得済みであるのみならず、10万時間超のクリープ試験が継続進行中である。また、高Crフェライト系耐熱鋼では、溶接部でのクリープ寿命・破断特性が著しく低下するType IV損傷が運用上の大きな問題となるが、溶接材を用いた1万時間以上のクリープ試験を実施中であり、F82HのType IV損傷の発現条件なども明らかになりつつあることから、ブランケットモジュールの構造設計に必要な基礎データはほぼ揃いつつあるといえる。

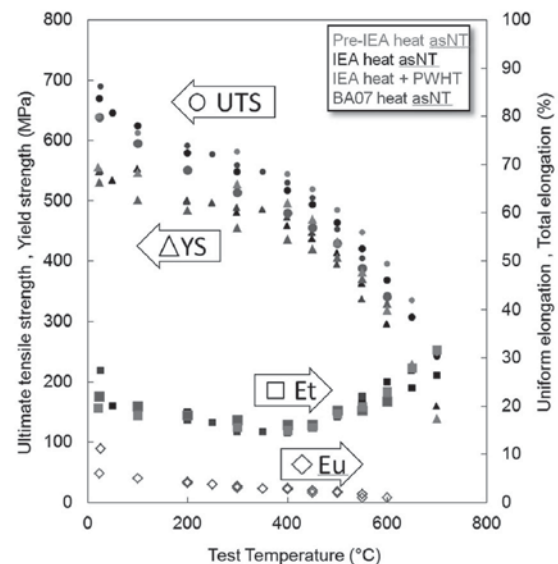
(2) 照射データ

核融合炉ブランケットは、14 MeV近傍にピークを有

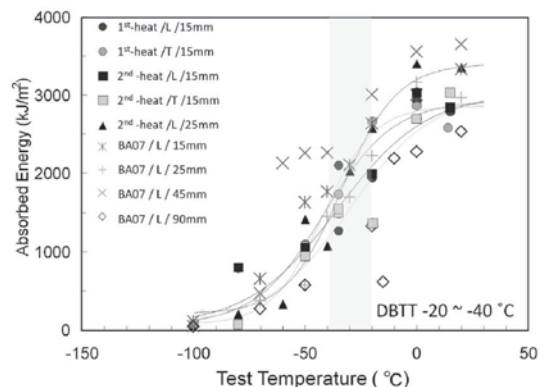


第2図 F82Hの異なる3ヒートのクリープ特性のラーソンミラー定数(LMP)依存性

比較のため、改良9Cr鋼(P91)板材データおよびT92データをプロットした。



第3図 F82Hの異なる3ヒートの引張特性の温度依存性

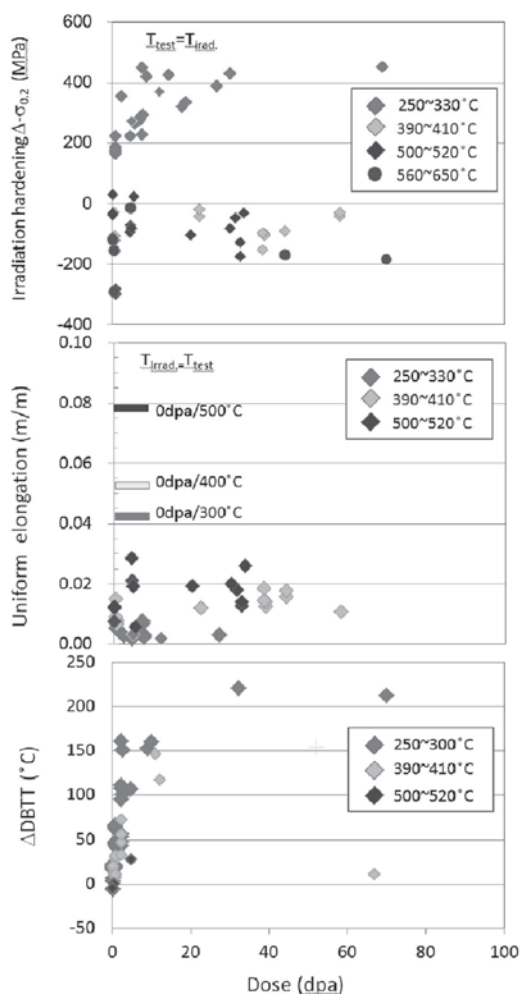


第4図 F82H IEAヒート(1st heat, 2nd heat)およびBA07ヒートの異なる厚さの板の、異なる方位(L: 圧延方向, T: 圧延垂直方向)で採取した試験片から得られたシャルピー衝撃特性

するエネルギースペクトルをもった、従来の核分裂炉(原子炉)に比べて非常に高いエネルギーの中性子束にさら

される。よって核融合炉構造材料に求められる照射データは14 MeV 核融合中性子照射データであるが、強力核融合中性子源がないことから、これまで取得されてきた照射データは日米協力を中心とした核分裂実験炉、高速増殖炉照射実験により得られたデータが中核を成す。照射効果に関する主要な関心は、照射硬化・脆化、照射クリープおよびスエリングにある。引張強度特性は80 dpa 近くまでのデータが取得されており、300°C 近傍の照射で顕著となる照射硬化も30 dpa 程度で飽和する傾向が明らかになりつつある(第5図)。一方、伸びについては照射による低下が顕著であり、特に300°C 照射では1 dpa 以下で均一伸びはほぼ喪失する傾向を示す。また、照射硬化が発現しない400°C 以上での照射でも伸びが低下傾向にある点には留意を要する。

ディスラプション時に問題となる照射後衝撃特性については、欧州の照射プログラムで約70 dpa までの重照射データが獲得されており、30 dpa 程度でDBTT 上昇はほぼ飽和する傾向を示している。一方、靱性については、マスターカーブ法による照射後遷移温度評価は約20 dpa まで進んでいるものの、靱性値そのものの取得は遅れており、今後の課題となっている。照射クリープ評価



第5図 F82H IEA ヒートの引張・衝撃特性の照射量依存性 (上:0.2%耐力変化、中:均一伸び、下:DBTT 変化)

については、照射加速クリープが予想される400°C 以上では比較的照射領域までのデータがクリープチューブ試験片により得られているが、照射誘起クリープが予想される300°C のデータは5 dpa 程度までに限られているため、今後重点的に取得すべきデータとして認識されている。

これらのデータ取得と並行して、より設計マージンを与えるという観点で耐照射性向上の検討が進められてきている。これまで、F82H についてはTa 添加量を増量した鋼(MOD 3)および熱処理条件の最適化を図った鋼(MOD 1)において、照射後遷移温度の上昇が抑えられる傾向が示されており、今後さらなるデータ蓄積による材料仕様への反映が進められる予定である¹⁾。

14 MeV 核融合中性子照射効果としては、はじき出し損傷とともに、核変換生成物であるHe やH といったガス原子が材料中に多量に導入されることによるスエリングや強度特性劣化が懸念されている。特に、希ガスであるHe は固体材料に対して溶解度がないうために、構造材料中で生成した核変換He の多くは、材料中の空洞、結晶粒界などに偏在する。このように偏在したHe は、空洞の内圧を上昇させることによるスエリングの促進や、粒界強度を低下させることによる粒界ヘリウム脆化などを通して、構造材料の健全性に著しい影響を及ぼす場合がある。スエリングについては、イオン照射実験によりHe およびH が大きな影響を与えることが明らかになっている。また、サイクロトロン照射や核破砕中性子源照射により、一定量以上のヘリウムが硬化や脆化を引き起こす兆候も確認されつつある。最終的な評価は国際核融合炉照射施設 IFMIF での照射を待つところではあるが、損傷導入速度の違いによる影響補正(照射場相関評価)とともに、イオン照射等の模擬照射実験でのデータ蓄積による精度の向上を要する。

このほか、核変換反応の影響としてガス原子生成のほか、主要添加元素濃度変化がある。例えば、90 dpa 程度の照射により2.0 wt% あったW(タングステン)のうち1.0 wt% がOs(オスミウム)やRe(レニウム)に変換されるという計算結果もある¹¹⁾。ブランケット構造材としての低放射化フェライト鋼についても、散乱中性子成分は核融合炉機器の物質や物量に大きく起因するが、固体増殖ブランケット周辺はトリチウム生成のために、低エネルギー中性子が大量に発生することが予想される。よって、低放射化フェライト鋼の強度(特に高温強度)に重要な役割を果たしているW の核変換効果が顕著に表れることが予測されることから、今後ブランケットでの生成量評価と低放射化フェライト鋼中のRe あるいはOs が材料にどのように影響するのかを調査する必要があると考えられる。

(3) その他

冷却水による腐食、増殖増倍材との反応等の共存性

データ取得も進んでいるが⁵⁾、今後より幅広いパラメータのデータベースの構築に加え、共存性への照射効果評価を進めていくことが必要である。また、照射データは基本的に微小試験片より取得されていることから、今後設計データとしての信頼性を確立していくことが必須の課題となる。

Ⅳ. まとめ

核融合炉ブランケットシステムの構造材料として約4半世紀にわたって開発が進められてきた低放射化フェライト鋼は、ブランケット設計検討に用いられるに値するだけの技術基盤とデータベースを有することが示された。しかし、その性能が十分であるか否かは、ブランケットの破損モード、負荷条件が明示され、それに対応した評価を経て初めて明らかになる。特に照射後特性が要求を満たしているか、あるいは照射後特性を考慮した設計が成立するか否かについて、出来るだけ早期に明らかにする必要がある。これらの課題については、欧州と進める「幅広いアプローチ」活動(Broader Approach: BA活動)において、原型炉R&D活動の一環として進められており、2030年頃の原型炉建設開始を目指した開発活動が実施されている。今後は、材料規格策定に向けたデータベース拡充が活動の中心となるが、同時に原型炉構造材料として利用するには、材料が実働機器で実際に使われる実績を上げていくことも重要であり、ITER-TBMやIFMIFといった比較的近い将来に製作・建設が期待される装置に着実に構造材料として利用されることが重要と考えている。

—参考資料—

- 1) 小特集 原型炉実現に向けた低放射化フェライト鋼研究開発の進展, プラズマ核融合学会誌, 87[3], 161-199 (2011).
- 2) 谷川尚, 特集 テキスト核融合炉, 第5章炉工学技術に関する基盤と課題, 5.1節ブランケットと熱変換システム, プラズマ核融合学会誌, 87 Supplement, 128 (2011).

- 3) H. Tanigawa, *et al.*, *Fusion Eng. Des.*, **83**, 1471 (2008).
- 4) K. Tobita, *et al.*, *Nucl. Fusion*, **49**, 075029 (10 pp), (2009).
- 5) 小特集 核融合炉ブランケット燃料増殖材・冷却材中の材料の共存性, プラズマ核融合学会誌, **86**[7], 389-423 (2010).
- 6) M. Tamura, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **141-143**, 1067 (1986).
- 7) A. Kohyama, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **212-215**, 684 (1994).
- 8) K. Tobia, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **386-388**, 888 (2009).
- 9) 野田哲二, プラズマ核融合学会誌, **79**, 452 (2003).
- 10) H. Tanigawa, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **417**, 9-15 (2011).
- 11) T. Noda, *J. Nucl. Mater.*, **233-237**, 1491 (1996).

著者紹介



谷川博康(たにがわ・ひろやす)
日本原子力研究開発機構
(専門分野)核融合炉構造材料開発・評価



廣瀬貴規(ひろせ・たかのり)
日本原子力研究開発機構
(専門分野)核融合炉構造材料開発・評価,
ブランケット工学



酒瀬川英雄(さかせがわ・ひでお)
日本原子力研究開発機構
(専門分野)核融合炉構造用鋼, 酸化物分散
強化型鋼, ナノ析出粒子のキャラクタリ
ゼーション



谷川 尚(たにがわ・ひさし)
日本原子力研究開発機構
(専門分野)核融合炉ブランケット開発


 談話室

 とことん語る福島事故と原子力の明日
 学生とシニアの交流成果、福島事故を市民に解説

学生とシニアの対話会

まえがき

シニアネットワーク連絡会(SNW)は、「次世代を担う若者を鼓舞し、原子力の人材育成に貢献する」こと、及び「市民への分かり易い情報発信と解説」に活動の基本を据えて努力してきた。学生と原子力シニアの対話会、メール交換による往復書簡はその代表的な活動である。

このたび、その成果を新書版に凝縮して一般市民に向けて『とことん語る福島事故と原子力の明日(電気新聞刊)』を出版した。これを契機に、対話会・往復書簡の成果につき報告し、併せて出版に至る経緯と狙いを紹介する。

学生とシニアの対話会

50歳近くの年齢差がある学生と原子力OBとの対話会は、2005年7月に初めて武蔵工大(現東京都大)で開催され、今年3月までに70回もの回数を重ねることになった。延べ参加者は学生が約2,200名、シニアが約900名、教員が約250名という多数にのぼる。

エネルギー・原子力・地球環境という、日本と世界の将来を左右するテーマは、広範囲で多様性に富む多くの課題を抱えているので、年齢差を超えて双方の世代の問題意識をぶつけ合い、膝を突き合わせて真剣に議論を重ね、ここまで来ることができた。もちろん、積極的に協力していただいた日本原子力学会、各大学の教員、電気事業連合会、日本電機工業会の皆様の支えがなければ続かなかったであろう。

対話会のきっかけは、当時の学会・企画委員の発言であった。「世界が原子力ルネサンスを迎える中で、今後のわが国の原子力界を担う学生に元気がない。原子力開発の隆盛期を経験してきたシニアと対話をする機会を与えて、元気付けたい」との提言であった。当初の受け皿は、資金援助のない「エネルギー問題に発言する会」だったので、活動範囲も開催回数も限定されていた。2006年のSNWの発足とともに活動主体をそちらに移し、全国の原子力系大学を対象とするようになった。一方、原子力への期待も次第に高まり、SNWの対話会の目的に「若年層の原子力への受容性の向上」を追加して、対象を教育系学生や一般理工系学生へ広げるようになった。

対話会の内容は対象学生によって多少の違いはあるが、半日程度の時間内で基調講演、対話、発表、講評となっている。対話の時間は2時間程度で、学生6,7人

にシニア2人で対話グループを作り、あらかじめ決められているテーマについて、ファシリテーション方式を使って進行する。テーマは原子力系の場合には学生が選んだ専門性の高いもの、教育系や理工系では放射線の基礎、原子力発電の安全性、他のエネルギーと原子力エネルギーといった一般的なものが多い。対話会の後に10数項目のアンケートを実施する。重視しているのは「対話への満足度」「対話会の必要性」であるが、毎回90%を超える学生が「とても満足、満足」、「非常に必要、必要」と答えており、自由記述では「経験と知識の豊富なシニアから得ることが多大であった」「もっと時間が欲しい」という意見が多い。また、教育系、理工系では原子力へのイメージアップにつながったことが見て取れる。

昨年度は東電福島原発事故の影響が心配されたが、開催回数、参加学生数ともに前年度とほとんど変わらなかった。また事故前に比べて学生のエネルギー・原子力に対する関心は一段と高まっており、対話の必要性を「非常にある」と回答した割合が前年度に比べて10%もアップしている。世間では様々な情報が飛び交い混乱しているが、「シニアとの対話を通じて正確な情報を得ることができた」という信頼感が、以前にも増して大きくなった結果だと認識している。(SNW・松永一郎)

学生とシニアの往復書簡

学生とシニアの往復書簡は日本原子力学会学生連絡会とシニアネットワーク連絡会の共同企画であり、全国各地の大学生・大学院生と原子力関係機関のOBであるシニアが電子メールを利用して原子力に係る様々な問題について議論する企画である。本企画は毎年夏から秋の約3ヵ月間をかけて書簡の往復が行われ、締めくくりに書簡テーマについて、対話会で更に深掘りを行う。4年目を迎える今年度も、学生とシニア合せて約30名が参加し活発な議論が行われている。往復書簡の議論内容は毎年限定出版本として参加者に配布され、いつでも議論を読み返せるようになっている。

本企画の目的は、次世代を担う学生と、これまで電力会社、メーカー、研究機関、官庁等の原子力関係機関の第一線で活躍してきたシニアがメールで議論することで、シニア世代から学生世代へと世代を越えた知識や技術の継承を実現すること、これらを通して大学の講義だ

けでは得られない知見を得ること、そして、参加者が自分自身の中の知識を整理することにある。さらに、東電福島事故が起こってしまった今は、原子力利用に係る問題について学生が自ら主体的に議論に参加し、今後の原子力安全確保の在り方やエネルギー政策に対し意見を表明する機会を得ることが、本企画の最大の意義である。これらの目的にとってEメールを通しての議論という本企画の形態は、学生が考える時間を確保でき、経験・知識豊富なシニアとも対等な議論が行えるという点で、最適な形態となっている。

往復書簡で取り扱うテーマは参加した学生が自由に設定することができる。過去3年間の議論では、原子力の安全性、エネルギー政策、核燃料サイクル、対外戦略・核不拡散、東電福島事故の原因・遠因等がテーマとして取り上げられ、原子力の技術的側面だけでなく、原子力特有の分野融合的なテーマについて幅広く議論がなされてきた。

今年度は東電福島事故から1年を経て事故の状況が明らかになってきており、事故の技術的原因や遠因についてより詳細な議論が行われている。加えて、原子力利用に係る倫理的問題やリスクコミュニケーションについて、学生から盛んに問題提起が行われ、原子力利用の社会性について深く議論しようという参加学生の意志が感じられる。原子力に関わる議論が国民的議論となっている今、原子力の一時代を築いてきたシニアと次世代を担う学生が真剣に議論する往復書簡の意義はますます大きくなっている。

本企画は今後もぜひ継続したいと考えている。原子力専攻の学生に限らず、次世代を担う気概を持った全国の学生の参加を期待する。(大阪大学・成川隆文)

一般市民向け新書版の出版

半世紀前後の年齢差を超越して学生は原子力シニアに向けて、単刀直入に質問を投げかけ、若者の意見をメールに書き込んだ。対応した複数の原子力シニアは、それぞれの経験と知見を踏まえて異なった反応が寄せられ、メール交換は極めて多様性のある議論が展開された。

往復書簡を通じて原子力に関わる各種問題点を掘り下げ、エネルギー政策の展開に関する議論など、類いまれな「問答集」はぜひとも意識レベルの高い市民の皆様にもご披露すべきだ。エネルギー問題や原子力への理解を深めて貰う縁とすべきだ、との強い要請に応じて出版企画が持ち上がり、2010年暮からシニアの有志で編さんが

進められた。印刷直前までこぎ着けた昨年3月の時点で、東電福島事故が発生した。原子力シニアの面々も、福島事故対応への支援や各種メディアへの取材協力などに忙殺され、出版企画は一時棚上げせざるを得なかった。

学生とシニアは、福島事故を重く受け止め、意見交換を原点に戻してやり直すことにした。2011年度の往復書簡は学生の希望も入れて、福島事故に関わる各種問題と課題に焦点を絞った。学生の質問と添えられた意見は、それぞれ独自に調査した結果を踏まえて、問題の本質を正確に捉えていた。議論に際して、学生には自ら解決の糸口を見出だそうとする姿勢が見られ、シニアをしびれさせ、シニアは反省と共に、解決すべき多面的課題を真摯に検討した。2011年末まで交わされた往復書簡を踏まえ、出版企画の編さん作業を再開した。

一般市民の読者に向けて、まず事故の概要を総合的に整理して冒頭に提示した。以降、第一章 とことん語る福島事故、第二章 事故から学ぶ、第三章 放射線は怖い？ 第四章 核燃料サイクルは本当に必要か？ 第五章 廃炉と放射性廃棄物を考える、第六章 日本のエネルギーはどこへ向かう？ という6章の構成とした。

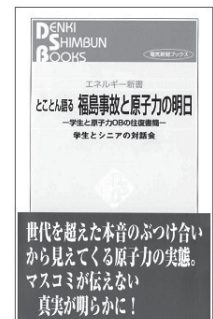
また読者も往復書簡を疑似体験できるよう、紙面構成にも配慮した。往復書簡はかなり専門的な領域にも及んだが、専門用語を極力排除し、大幅に紙数を圧縮してシニアが書き直し、学生のレビューを経て編さんした。したがって、本書の文責は各章ごとに表示したシニア執筆者に帰せられることを断っておく。また、シニアは飽くまで個人の立場で参加したので、編著は「学生とシニアの対話会」として、電気新聞から新書版で出版した。

往復書簡に託した狙いは、原子力人材の育成への貢献であるが、シニアの面々は今回の事故原因がどこにあったか等、厳しい反省と併せて建設的な視点で率直に応え、学生は往復書簡の交流を通して「主体的に意思決定する姿勢を学び、次世代を担う自覚が芽生えた」との感想は、最大の成果であった。

新書版出版の提案と、編さんに際しては並々ならぬご支援を頂いた電気新聞社に、参加者一同の謝意を捧げたい。

多くの市民の皆様が手に取ってお読み頂けたらと念じている。

(SNW・小川博巳、
2012年7月31日 記)



談話室

今わたしたちだからできること

WiN-Japan 会長 布目 礼子

WiN (Women in Nuclear) は、原子力・放射線利用の仕事に携わる女性の国際的ネットワークである。原子力平和利用推進の立場から、女性と次世代層を対象に原子力や放射線・放射能の理解活動などを行うことを目的としている。世界組織としての WiN-Global は1993年にヨーロッパで誕生し、現在、91ヶ国の3,726名が会員登録している。毎年、年次大会を開催し、各国の WiN が行っている理解活動の状況や会員の研究成果の発表などを通じて情報交換や人脈交流を行っている。

WiN-Japan は、WiN-Global の日本組織として2000年に設立され、会員は約200名(準会員、賛助会員を含む)を数える。WiN-Global 年次大会へも毎年参加し、日本の原子力を取り巻く状況や WiN-Japan の活動について報告を行っている。WiN-Japan の活動としては、WiN-Global の精神を受け入れ、日本の国情にあった原子力理解促進活動や会員の資質の向上に努めている。

WiN-Global 年次大会

昨年と今年の WiN-Global 年次大会では、WiN-Japan から東京電力福島第一原子力発電所事故に関する報告を行った。

昨年は6月にブルガリアで開催され、WiN-Japan からは7名の会員が参加した。大会の冒頭で特別セッションが設けられ、事故の概要、技術的対策、当時の放射線による環境影響と避難状況などを報告した。参加した各国の会員からは、現地で復旧作業に当たっている方々への寄付と心温まるメッセージをいただいた。また、WiN-Global としての事故に対する態度表明として「福島宣言」を採択した。宣言は、福島での出来事は全世界の原子力産業全般にとって厳しい試練であり教訓であり、非常事態において団結し、理性的に行動した日本の態度に世界は学ばなければならない、各国が個別に対応するのではなく、世界が心を合わせ、力を合わせて行動すべきであり、原子力産業に従事する女性たちは、国際標準の安全基準や規制を作り上げるためにあらゆる努力をし、子供たちの将来のために強力な支援と貢献をするというものである。

今年はスウェーデンで開催され、6名の会員が参加した。今年も「福島セッション」が設けられ、福島第一原子力発電所の現状と今後の計画、食品中の放射性セシウム

の新しい規制値と風評被害対策、電力会社等による支援活動について報告した。報告後の質疑応答では、「国や東京電力から国民への情報提供はどのように行われたのか」、「事故による放射線利用分野に対する影響はないのか」、「食品の規制値の新基準が、他の国に与える影響をどう考えるか」など具体的な質問があり、現在も事故に対する関心が高いことを強く感じた。私たちは、今後もこのような機会を捉え、日本からの発信を続けていくことが重要ではないかと考える。

学生交流会「サイエンス・カフェ」

WiN-Japan は、広く一般の方々に向けて原子力や放射線・放射能についての広報活動を行ってきた。特に一般の女性や次世代層との直接対話による草の根活動に積極的に取り組んできた。その活動のひとつが、立地地域などの女性や女子学生との交流会である。参加者は、講演やレクチャーでエネルギーや原子力についての学び、WiN-Japan 会員とともにテーブルトークで意見交換を行うというもの。私たちが参加者一人ひとりときちんと向き合い話し合いをするなかで、原子力や放射線・放射能について理解していただき、自らの問題として捉えていただきたいと考えている。

昨年は、東京の2つの大学と福島の大学において女子学生との交流会「サイエンス・カフェ」を開催した。実施内容は、第一部が WiN-Japan からの話題提供として会員による放射線・放射能の一般知識と今後のエネルギーについての講義。第二部では WiN-Japan 会員と学生さんとのテーブルトーク。テーブルトークの合間で、放射



「福島セッション」での報告

線測定器ベータちゃんを使っての測定体験も行った。この交流会を実施するにあたり、私たちは、東京の学生と福島の子の原子力やエネルギーに対する意見や考え方には違いがあるのではないかと考えていたが、実際には大きな違いはなく、また、エネルギーや原子力について、とても良く考えていることを知ることができた。これから社会に出ていく若い世代へ情報を発信していくことは、私たちの責務ではないかと思う。また、シンポジウムやセミナーといった一方的ではないフェース to フェースの会だからこそ聞くことができる意見もあるのではないかと思う。交流会のテーブルトークにおける参加者からの声をご紹介します。

【放射線・放射能について】

- ・様々な放射線利用があることを知った。
- ・国が設定した暫定基準値は、どの程度のもので、どのようなリスクがあるのかわからなかった。
- ・食品にも放射性物質が含まれていることを多くの人は知らなかった。事故後に「実は含まれている」と言われると、ネガティブにとらえてしまう。
- ・自然放射線は大丈夫だが、人工のものは良くないと思われる。

【今後のエネルギーについて】

- ・エネルギーについて考える際に、豊かさ、幸せなどに価値観を持つと論理的な考えがぶれてしまう。
- ・電気がないのは困る。新エネルギーでは需要を賄うことはできないと思う。しかし、原子力が良いとも思わない。
- ・エネルギーについて研究をしている上で、自然エネルギーが原子力に替わるものであるとは思っていない。
- ・自然エネルギーに期待はあるが、これだけエネルギーを使っている生活を捨てることができるのかと思う。節電はこれ以上無理。
- ・以前からエネルギーについては考えていた。福島第一原子力発電所のような古い発電所は再稼働させたくないが、そうでないものは再稼働させたら良いのではないか。日本は経済成長しなくてはならないと思うから。



交流会での WiN-Japan からの情報提供



熱心に議論する学生さん達

【福島第一原子力発電所事故について】

- ・原子力は国家的プロジェクトで、原子力行政をはじめ様々な専門家が関わっているため、プラントの技術者がいくら頑張っても、それだけではすまない複雑さがあると思う。
- ・原子力の安心と安全やリスクをどう受け入れるかについて今後考えていきたい。
- ・福島に原子力発電所があることを知らなかった。
- ・原子力発電所の事故は、何が、なぜ大変なのかがわからなかった。
- ・自分で判断したいので、正しい情報を知りたいが、メディアも行政も信じて良いのか。
- ・原子力発電は、中学の社会科の日本の産業という項目で習った。教科書には「国が管理しています。原子力は安全です」と記述されていたので、爆発が起きた時、日本は終わりではないかと思った。

今私たちだからできること

WiN-Japan の会員は、いろいろな形で原子力や放射線の仕事や研究に携わっており、ひとりでも多くの女性や次世代を担う人たちに、原子力エネルギーや放射線利用について知っていただきたいという思いを持ち、さまざまな活動を行ってきた。

事故直後に、会員のひとりが仲間に対して発信していた放射線の影響などについてのわかりやすい解説を私たち会員へも送ってくれ、私たちはそれを自分たちの周囲の人々への説明に利用することができた。まさに WiN-Japan のネットワークの力である。

原子力や放射線・放射能について、女性の視点と言葉で伝えること、特にフェース to フェースで丁寧に伝えることが大切であると考えており、これからもさまざまな機会を捉えて対話活動を行っていききたいと思う。今このような状況であるからこそ、私たち WiN-Japan が行っていかなければならないことではないかと思っている。

(2012年7月30日 記)

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

原発の安全とは何か？ ～フランス・グラブリーヌの取材から感じたこと～

NHK 兼子 将敏

今年3月、私はフランス北部の街、グラブリーヌを訪れた。海沿いの灯台に登ると、深い青の北海が広がり、振り返ればオレンジ色の屋根が続く。その街並みのすぐ先にはこの風景に不似合いな巨大なコンクリートの箱が6つ鎮座している。街の中心からわずか5キロほどの場所にヨーロッパ最大の原発が立地しているのだ。この訪問の目的は“地域情報委員会”の取材だ。地域情報委員会は、原子力透明化法という法律で、原発立地地域への設置が定められており、原発の監視や情報の透明化のため、事業者と市民が建設的に話し合うことを目的とした組織だ。

到着の翌日、グラブリーヌ市庁舎では、地域情報委員会の会合が開かれた。会場には50人以上も座れる巨大な円卓が設置され、住民の代表や議員、原発で働く労働者、グリーンピースの代表など、原発推進派から反原発派まで、様々な立場の市民がこの円卓を囲んだ。最後に円卓に加わったのは、この日、委員会から呼び出しを受けた面々、グラブリーヌ原発の所長、電力会社EDFの幹部、そして政府の規制機関ASNの支部代表だ。地域情報委員会の呼び出しは法的拘束力を持ち、これを拒否することはできないのだ。

開会の言葉が終わると、早速、住民達から電力会社の担当者に次々と質問が飛んだ。『津波や洪水の対策は十分なのか？』、『非常用のディーゼルエンジンの数と設置場所に問題はないのか？』、『緊急時の冷却水の多様化はどこまで対応できているのか？』専門家のレクチャーを受けている市民達の質問は的確で鋭い。電力会社の担当者は、現在のグラブリーヌ原発が抱えている問題やリスクも包み隠さず報告していく。フランスでは、電力会社が地域情報委員会で虚偽の回答をしたり、最大1週間の回答期限を守らなければ、罰金や裁判にかけられることもあるのだ。住民へのリスク情報の開示は大前提、住民達はリスクを把握し、新たな対策を要求、もしリスクを許容できなければ原発停止を求めることもできる。

会合の後、住民に話を聞いた。『(主婦グループ代表)フランスにおいて発電手段として原発が重要であることは理解しているが、原発はやはり怖い。だからこそリスクがどの程度あるのか？きちんと知った上で、原発をどうするかを私たちが判断したい。』(原発労働者の代表)原発は私たちの生活を支える大切な職場だ。その職場に安全を求めることは当たり前だ。事故のリス

クを減らすよう声を上げ、対策を実行させることは私たちの当然の権利だし、地域情報委員会はそのための場所だ。『事故が起これば大きな被害を受けるのは住民だ。だからこそ、住民は原発のリスクをきちんと知り、そのリスクとメリットを見比べて、原発の稼働するか、止めるかを判断すべきなのだ。それをフランス政府も住民も認識しているのだと感じた。電力会社の幹部は私たちにこう断言した。『私たちは地域情報委員会のOKなしに、原発を稼働することはありえません。』

取材中、ある人が言っていた言葉を思い出した。『原発も車も飛行機も100%の安全はない。安全とは実は“許容できるリスク”のことだ。だからこそ、私たちはリスクをきちんと把握し、許容できるかできないかを判断する必要がある。』しかし日本ではこの“安全の真の意味”がどこまで理解されているのか？今なお東電は事故情報を出し渋り、また原発の稼働についての議論も【そこに残されたリスク】をきちんと捉えたものとはなっていない。

今回の取材から帰国して間もなく、欧州でも特に原発の高い安全性を誇り、電力の4割を原発に頼ってきたスイスが、脱原発へと歩みだしているとのニュースを見た。福島事故後、スイスはいち早く安全対策の強化に取り組んできた。その一方で原発のリスクについて再考し、国土面積の狭いスイスでは、一旦、事故が起これば、観光業など国の主産業は大打撃を受けるため、いかに小さなリスクも受け入れられないと、脱原発を決めたのだ。

“過去を見つめ、未来について考える”ことは、生物の中でも私たち人間だけに許された術だ。ならば私たちがすべきは、原発のリスク情報を透明化し、そのリスクを見つめ、議論と検討を重ね、未来を選択することだ。思考を重ねたその先に、私たちが進むべき行く末がきっと見えてくるはずだ。(2012年8月9日 記)



兼子将敏(かねこ・まさとし)
NHK 科学環境番組部ディレクター
1993年NHKに入局。科学・環境番組部に在籍し、NHKスペシャル『地球大進化』、追跡AtoZ『肥満』など、科学技術や医学をテーマにした番組を主に制作してきた。3.11以降は、福島第一原発事故や原発の安全規制をテーマに番組を制作している。