

巻頭言

- 1 大自然と宇宙を司る理と専門家の知恵 櫻井よしこ

時論

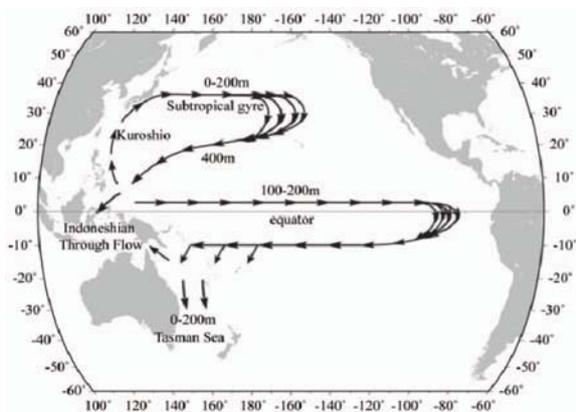
- 2 多様なリスクに注目しながら
 リスク社会に生きる私たち。その不確実性を見据えた上で、どう対処すべきか。 藤江幸一
- 4 メディア・バイアスはいかにして生じるか
 メディアは新奇で注目されることをニュースにする。それはメディアの宿命でもある。 小島正美

解説

- 12 原子力規制委員会設置法の概要—新しい原子力安全規制法制度とは
 原子力規制委員会設置法が国会で成立した。この法律には原子力に関するほとんど全ての法律の改正が盛り込まれている。 諸葛宗男, 西脇由弘

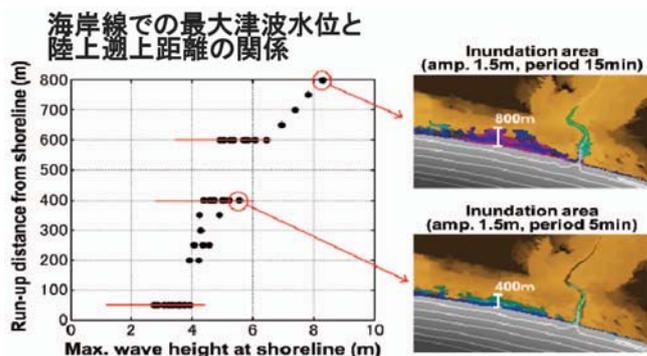
報告

- 18 福島第一原子力発電所から放出された放射性セシウム同位体の北太平洋における総量と分布
 福島原発事故に由来する放射性物質は北太平洋全域にどのように拡散しているのか。これからどうなるのか。過去の研究成果と最新の観測結果を報告する。 青山道夫



解説

- 22 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3回/最終回)—建屋・機器フラジリティ評価
 標準委員会は津波 PRA 標準を発行した。3回目の今回はその内容のうち、建屋・機器フラジリティ評価手順と要求事項について解説を行う。 美原義徳



- 27 東日本大震災におけるエネルギーインフラの被害調査と問題分析—日本機械学会東日本大震災調査・提言分科会 WG5の活動
 東日本大震災におけるエネルギーインフラについて原子力、火力、エネルギーシステム、エネルギー政策の視点から調査分析を行った。 小泉安郎, 浅野 等, 大川富雄



津波で流されたタンクと破壊された揚炭機(原町火力発電所)

- 32 「福島の事故は、なぜ防止できるのか」について
 J. M. Acton らによる“Why Fukushima was Preventable?”の内容を紹介する。 斯波正誼

表紙の絵(木版画) 「横浜夕景15・観覧車」 製作者 小林理恵

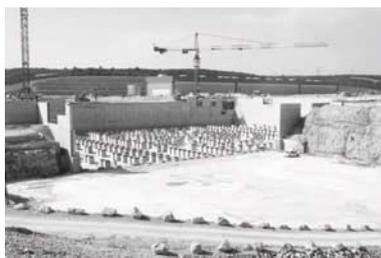
【製作者より】 横浜みなとみらい地区の観覧車は手前の海に姿を映し輝きを倍加させます。水面の光は風に吹かれて舞い踊り楽しい気持ちと呼び起こしてくれます。観覧車の回転のようにゆっくりと、平穏で幸福な時間が進むことを祈ります。

第43回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

解説

37 核融合発電技術開発の現状と今後の展望—目前に迫る核融合連続燃焼の実現

核融合はいまでも「夢物語」ではない。まだ発電は実現していないとはいえ、この約30年間で核融合研究は画期的に進展し、点火燃焼に向けた実験炉の建設が進んでいる。 岡野邦彦



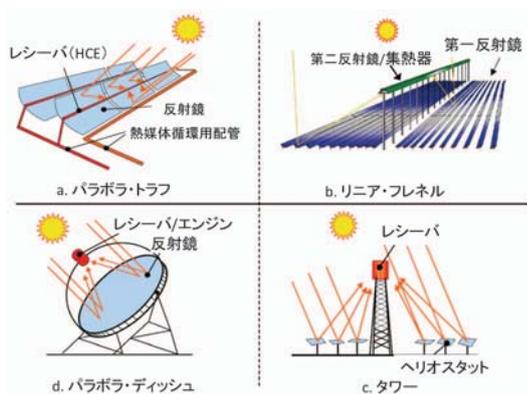
建設中の ITER
本体基礎部分

42 ヤッカマウンテン計画の失敗とブルーリボン委員会報告書

ヤッカマウンテン処分場計画が廃止に追い込まれた。行き場を失う米国の使用済燃料の新たな管理方策を検討するブルーリボン委員会が最終報告書を公表した 河田東海夫

48 集光型太陽熱発電(CSP)の技術と市場

CSPは、反射鏡で集光した太陽光をレーザーで熱へと変換し発電する技術である。蓄熱システムやボイラを組み合わせれば、電力需要に合わせた電力供給が可能だ。北アフリカでは発電した電力をEUに送る計画が進行している。 吉田一雄



代表的な集光・集熱技術

報告

53 危機管理とヒューマン・マシン・インタフェースにおける課題と議論—震災を踏まえて：HMS 研究会夏期セミナー会議報告

長谷川尚子, 松村哲夫, 五福明夫

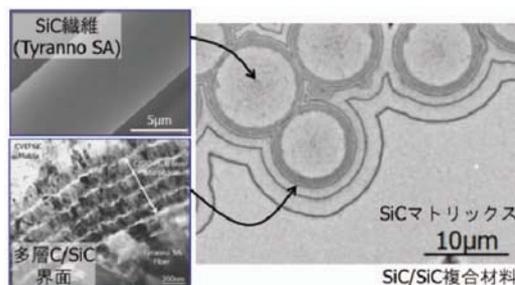
6 NEWS

- 規制委、事故時の放射能拡散を試算
- エネ環、エネルギー戦略の工程表を提示
- 原子力規制委が発足
- 防災対策指針策定に着手
- 安全委員会が今後を展望し幕引き
- 学術会議、高レベル処分で提言
- 東電が1号機格納容器内の写真を発表
- 敦賀市に原電敦賀総合研修センター
- 海外ニュース

連載講座 これからの原子力システムを担う新原子力材料(第4回)

57 SiC 複合材料

低放射化特性、耐照射特性、高温強度特性、耐食性等から、SiC 複合材料研究は核融合への応用から始まり、技術進展に伴いガス冷却高速炉炉心材料、高温ガス炉制御棒、熱交換器、軽水炉被覆管などへの応用が検討されるようになった。 檜木達也



CVI法で作製されたSiC複合材料の微細組織

日米欧学生交流

63 カールスルーエ工科大学滞在記

向井啓祐

36 From Editors

61 新刊紹介「連続体力学の話法 流体力学、材料力学の前に」 刑部真弘

62 会報 原子力関係会議案内、主催・共催案内、人事公募、寄贈図書一覧、H25年度フェロー候補推薦募集、新入会一覧、英文論文誌(Vol.49, No.12)目次、和文論文誌(Vol.11, No.3)目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧
後付 総目次・著者名索引(Vol.54, NOS.1~12)

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

大自然と宇宙を司る理と専門家の知恵



国家基本問題研究所理事長・ジャーナリスト

櫻井よしこ (さくらい・よしこ)

ハワイ州立大学歴史学部卒業後、「クリスチャン・サイエンス・モニター」紙東京支局、日本テレビニュースキャスター等を経て、2007年より現職。

東日本大震災から約20ヶ月が過ぎました。1000年に一度の大災害から、私たちは多くのことを学びました。1万9,000人に上る死者・行方不明者の犠牲を無にすることなく、日本の復興につなげなければなりません。

事故は2つのことを教えてくれました。事故が規制も含めて過酷な事故に備える原発管理の甘さ・杜撰さによる広い意味での人災だったこと、震源地に最も近い東北電力女川原発が生き残ったように、日本の原発技術は優秀だったこと、この2点です。だからこそ、人災を引き起こした「管理」の問題と、震災、津波に耐えた「技術」の成果を明確に分離して考えることが重要です。エネルギーの安定供給は社会と経済の基盤です。今、日本がなすべきは、事故を招いた構造的な原因を徹底的に究明し、より安全性を向上させた上で原発を維持する事です。選ぶべきは脱原発ではありません。原発の技術的安全性は飛躍的に高まっておりますので、再生可能エネルギーの開発とともに、国際社会に於いて原子力関連の技術革新・高度な安全管理システムを牽引していくことこそ、日本の国益になるのではないのでしょうか。

私は貴重な資料を拝見しました。1968年から69年にかけて女川原子力発電所の敷地の高さを決定するために開かれた東北電力の会議録です。3.11の大震災で、女川原発は、東京電力の福島第一原発よりも震源地にずっと近く、より激しい揺れと巨大津波に襲われながらも、生き残りました。決め手が原発を高い敷地の上に建てていたことだったのは皆様も周知のとおりです。原発は大量の冷却水を必要とします。海に近ければ、取水も排水も容易で、使用済核燃料の運搬費用も抑制できます。高い敷地に建設することは、コストを含むおよそ全ての面で負担増になります。それでも東北電力は三陸地方ではM7.5以上の地震で、100%津波が起きるとの知見に基づいて、敷地の高さを14.8m、土木構造物や建家1階の高さを15mと決定したのです。その決定がなされたのは、専門家らが自然への畏敬と畏怖の念を忘れなかったからであることが、会議録から浮き彫りになりました。

1979年の着工より11年前に、東北電力は専門家9名からなる「原子力地点海岸施設研究委員会」を原子力開発推進本部内に設置しました。9名は東洋大学の本間仁教授(当時、以下同じ)を委員長として、地震、土木工学(水理学、海岸工学、津波)、地球物理学等の専門家らで構成されているものです。

専門家を集めての会議の課題は、専ら津波対策を念頭にした原発の立地条件の検討でした。女川は33年の三陸地震で2.7~3.3mの津波に、60年のチリ地震で3.1mの津波に襲われています。これら過去の事例と2通りの計算式に基づいて、東北電力は最適の敷地高さを15mと考え、専門家らの意見を聴いたのです。

会議では過去の地震・津波の事例が度々詳しく紹介されています。例えば、「宮城県沿岸で最も注意すべき津波は、明治29年の三陸地震で昭和8年の三陸地震よりも、震源がもっと南にある地震」「貞観地震、慶長地震の時には仙台湾沿岸に大津波の記録がある」「昔話では貞観のとき岩沼(という地域)の松の木の上に船が残されていた」、「従って南寄りの地点で発生した地震に気を付ける必要がある」等、貞観、慶長の史実や過去の経験話が登場しています。

貞観地震は平安時代の869年に発生、M8.3~M8.6でした。慶長三陸地震は江戸時代の1611年、M8.1でした。議事録からは、東北電力がこうした事例をとりわけ重視したことが伝わってきます。委員会はこの種の議論を経て15mの高さの敷地は妥当とし、鈴木憲郎副社長が決定、社長の承認を得たと書かれています。その結果、3.11における女川原発の被害は小規模にとどまりました。無事に残った女川原発が震災後、地域の被災者らの避難生活の場として使われていたことは、一般にはあまり知られていないと思います。

東北電力関係者は、適切な対策を講じた先輩世代の知恵に感謝しているとおっしゃってられますが、その知恵は突き詰めれば自然への畏敬の念に行き着くのではないのでしょうか。自然を畏怖し、真摯に対処することは、言い伝えに込められた経験知に正面から向き合い、聞きたくないことにも耳を傾け、大自然と宇宙を司る理(ことわり)を弁(わか)きま)えることだと考えます。物の理を理解し、対処を考えることは専門家の領域に属するものです。地震も津波も発生を止めることは出来ませんが、被害を最小に食い止めることは、事象の理を理解して手を打てば、必ず可能だと考えます。そこに必要なのが専門家の知恵ではないのでしょうか。是非、苦境を乗り切り、皆様が世界人類の未来に燦然と輝く明るい光を灯していただきたいと思ひます。

(2012年10月29日 記)



多様なリスクに注目しながら



藤江 幸一(ふじえ・こういち)

横浜国立大学大学院環境情報研究院教授，同安心・安全の科学研究教育センター長

(社)日本水環境学会 前会長，環境省中央環境審議会専門委員。専門分野：水環境工学，資源循環工学など。

裏付けとなる十分なデータや情報が得られず，不確かさを残したまま規制や基準の設定，あるいは政策等の決定を迫られる場面は少なくないと思われる。入手可能な限られたデータや情報，すなわち科学的なエビデンス，それを活用した解析結果に基づくリスク評価に加えて，human dimension(人間事象)を組み入れることによって，社会的側面，すなわち人々の選好性などを適切にくみ取りつつ，朝令暮改に陥らない長期的な視点での規制や基準の設定，あるいは政策決定が求められている。

さて，日本語には安全，安心という言葉がある。辞書では安全の英訳として safety が出てくるが，その用例には food safety や safety performance などがあり，safety の意味は「安全」よりも「安全性」に近いのではないだろうか。安心については peace of mind や relief が掲載されているが，前者は「安心感」，後者は「苦痛の緩和やその除去」と言う意味になる。

日本では，「ゼロリスク」を安全と考え，自分の予想に反することは起きない，もし何かあったとしても受容できる範囲内であると信じている状態を「安心」と表現しているように思える。英語に「安全」や「安心」にズバリ対応する単語を見つけにくいのは，何事にもゼロリスクは有り得ないことを認識している，すなわち取り巻く生活環境やそれによって醸成された文化が我が国とは違っているからであろうか。「安全＝ゼロリスク」とするならば，原子力発電に関する安全神話は，生まれるべくして生まれたようにも思えてくる。

日常生活を見回すとゼロリスクなど有りえないことはすぐに理解できる。警察庁統計によれば，平成22年度に発生した交通事故の件数は約73万件，負傷者数は約90万人，うち24時間死者数4,863人，そして発生1年以内の死者数は7,066人に達している。これらの数値から単純計算すると，毎年，人口1,000人当たり7人が交通事故で負傷し，10万人に6人が死亡している。さらに生涯では2人に1人は交通事故で負傷し，人口1,000人当たり5人は交通事故でお亡くなりになるという恐ろしい現実が見えてくる。

日常生活の中で交通事故と同様に，リスクが高いと見

なされているのが喫煙である。損失余命として定量化されたリスクの大きさは喫煙が約1,000日，受動喫煙(虚血性心疾患)が120日であり，ダイオキシン類は1.3日と見積もられている¹⁾。周囲の人々に対して副流煙がもたらすリスクの大きさは驚きである。

ダイオキシン問題が大きく取り上げられ，ダイオキシン類対策特別措置法が制定されたのは平成11年である。廃棄物焼却施設からのダイオキシン排出規制が厳格化され，廃棄物焼却施設は一気に最新鋭設備に更新されたが，施設の建設や維持管理に伴って莫大なコストが発生しており，政府による補助も行われたものの，結局は住民負担であることに違いはない。ところが，塩素系農薬を製造する過程で副生成物としてダイオキシンが発生し，それを含む農薬の使用によって1980年以前に環境中に排出されたダイオキシン量は，ゴミ焼却施設からの総排出量を遥かに上回るとされている²⁾。

ここで原子力発電の今後のリスク要因について考えてみたい。すでに廃炉が決定している福島第一原子力発電所の1～4号機を含めて，国内の原子力発電所は50基を超えている。国内の原子力発電をすべて停止しても原子炉が消えて無くなるわけではないので，放射性廃棄物の回収・処理を行いながら廃炉のための解体工事を進めることになる。放射性廃棄物の環境中への拡散を抑えながら原子炉を解体するには，高度な技術，相当の経費，解体された廃材の処理，そして大量かつ多様なレベルの放射性廃棄物の処理・処分が必要となる。

世界中には400基を超える発電用原子炉があり，今後も大幅な増加が見込まれている。国内のみに目を向けるのではなく，原子炉の建設，運転管理から広く放射性廃棄物の取り扱いに至る一連の工程における安全性の向上，すなわち多様なリスクを低減するための技術を世界的規模で普及させる必要がある。減速材に黒鉛を用いたチェルノブイリの原子炉とは違って，水を減速材として用いる原子炉においてレベル7に達する事故を経験した我が国は，福島原発の自らの事故処理に加えて，50基を超える原子力発電所の安全性を一層向上する必要性からも，上記した一連の技術開発が喫緊の課題である。チェ

ルノブイリでの事故時にも観測されたが、排出された放射性物質は地球規模で速やかに拡散する。このようなシビアアクシデントの経験を通して得られた多様なデータや情報の解析結果は、安全性を向上するための技術開発や維持管理に大きく貢献できる。

もとより福島第一原発の事故は、津波による電源喪失に起因しているが、事故が進行していく過程で、原発のシステムや構造のあり方、そして事故による被害を最小化するための対処法はどうあるべきであったかなど、安全性の向上や適切な危機管理を行う上で、多くの知見やデータを収集することが可能であったと判断される。国内外において、同様の事故を起こさないために、そして原発によるリスクを低減するために、それらの知見やデータは十分に活用されなければならない。

そのために不可欠なのが有能な人材の確保であり人材の育成である。しかし、集中砲火を浴びていると言っても過言ではない現状では、原子力関連分野に有能な人材を確保することは絶望的であり、将来への不安から有能な技術者ほど原子力以外の業種に転職しているのではなかろうか。かつてそうであったように、原子力産業においても我が国の競争相手国への頭脳流出が加速するのではないかと懸念される。このような動向は、結局は国内における発電用原子炉や関連施設の安全性低下を招くことになり、廃炉や廃棄物の適正な処理・処分を実現する上でも大きな障害になるものと考えられる。

さて、原発事故を受けてエネルギー政策をどう設定するのか、政局や総選挙の争点とも関係して大きな話題になっている。そこでは、エネルギー源の選択権はあたかも自分たちの掌中にあるかのような議論がなされている。1973年の第1次と78年の第2次の2度にわたる石油危機を経験し、エネルギー安全保障の観点も含めて、原子力発電の比率を増やす政策が行われてきたと記憶している。エネルギー自給率が極小である我が国のエネルギー供給を如何にするかについて、十分信頼できる根拠に基づいた議論が期待される。

2010年の世界のエネルギー消費量は、石油危機当時のちょうど2倍に達しており、エネルギー消費量の増加速度は21世紀に入って一層加速している。化石燃料の安定確保に不安が残る現在では、再生可能エネルギーの割合を云々することよりも、化石燃料を如何に確保するかの議論や戦略の構築が優先されるべきであろう。現状では火力発電の燃料はLNGが40%、石炭が40%、石油が15%程度とされている。LNGの中東への依存度は20%程度、石炭についてはオーストラリアとインドネシアからの輸入量が石炭全体の80%を超えており、中東への依存度が極端に高い石油の割合は幸いなことに低い。しかし、ひとたび中東危機が発生すれば、化学原料としても、燃料としても石油と競合するLNGの争奪と価格の高騰は想像に難くない。国際公約を反故にすることになるが、温

室効果ガスの排出には目を瞑って石炭への比重を増大させることも選択肢とせざるを得ないのではないか。

再生可能エネルギーが我が国の基幹エネルギー源になるとは考えにくい。石油危機後のように、右肩上がりの経済発展が期待できた当時とは違って、経営上の大きなメリットが期待できない設備投資は困難であろう。補助金や電力の高値買い上げ制度もあるが、すべて国民の負担であることを忘れてはならない。2度の石油危機を経て、バイオマスを含めた代替エネルギーの開発が推進されてきた。その高コストに対して、石油価格が100ドルを超えれば十分に競争力があるとの説明がなされてきた。しかし、石油価格は100ドルを挟んで変動している現在でも、再生可能と言われるエネルギーは割高であり、供給に不安が残る化石燃料に頼らざるを得ないのが現状である。資源・エネルギーをほとんど持たずに、狭隘な国土での産業活動、経済活動によって工業製品を生産・輸出し、資源・エネルギー、そして食料を世界中から確保している我が国にとって、すでにその兆候が見え始めているようにも思えるが、国際競争力を失えば、その行く末は自明である。

もう一つ忘れてはならないのが、リスクコミュニケーションの重要性である。個人や組織間でのリスクに係る情報・意見の交換過程を経て、相互の理解を推進するための手段である。更なる合意形成の努力が必要であり、合意形成を推進するには、リスク評価が可能であれば専門家がその結果を関係者に説明する。リスク評価が困難な場合にこそ、早い段階で透明性を確保したステークホルダーによるコミュニケーションが必要であろう。「ダメなものダメ」的な議論に陥らないように、お互いに聞く耳を持つ、合意に至らないまでも情報を共有することが第一歩である。リスクの存在を相互に理解し、関連するデータや情報に基づきながら、総合的なリスクを如何に低減するかについてのコミュニケーションが不可欠である。

科学的なデータや根拠に基づく予測とリスク評価、加えて社会的側面、すなわち揺れやすい人々の選好性を的確に把握しつつ、どのような社会を目指すのか明確なビジョンを掲げながら、不確実性が残る中での意思決定・政策決定が求められる。想定を超えた事態の発生にどう対処するのか、危機管理方策に関するコンセンサスを得ておくことも避けて通れない。リスクというものを理解し、我が国の将来を考えた信頼に足る政策決定がなされることと、それを冷静に見守ることができる社会の醸成を期待したい。

(2012年9月15日 記)

—参考文献—

- 1) 鈴木基之, 環境工学, p.67, 放送大学教育振興会, (2003).
- 2) S. Masunaga (益永茂樹), Historical Trends of Dioxin Sources and Contamination in Japan. Chapter9, p.206, in Global Contamination Trends of Persistent Organic Chemicals edited by B. G. Loganathan, P. Kwan-Sing Lam, CRC Press, (Aug. 9, 2011) ISBN: 978-1439838303.



メディア・バイアスはいかにして生じるか



小島 正美(こじま・まさみ)

毎日新聞社 生活報道部編集委員

1974年、毎日新聞社入社。長野支局、東京本社生活報道部、千葉支局などを経て、1997年から編集委員。東京理科大非常勤講師。著書に「誤解だらけの放射能ニュース」(エネルギーフォーラム)など。

メディア情報(マスコミ情報)がバイアス(偏りや一面性)に満ちていると考える専門家は多いはずだ。なぜ、メディア情報はバイアスに満ちるのか。長い記者経験から、「メディア・バイアスの法則」を考えてみた。

メディアとはいったい何者なのか。そして、メディア情報を発信する記者とはいったいどういう人種なのか。このことをまず押さえる必要がある。どんな生き物、組織も、みなそれぞれ特有の“生存戦略”をもっている。企業なら、利益をあげて組織を大きくすることが基本戦略だ。学者なら、研究費を勝ち取って業績を積み重ねることだ。市民活動家なら、自分のイデオロギー(思想)を広め、自らの組織(信者の数)を拡大させることだろう。

■記者の戦略

では、記者の戦略は何だろうか。記者の戦略は他社(他の記者)より一早く、目立ったニュース(特ダネ)を読者(視聴者)に届けることだ。ニュース(情報)はいうまでもなく「売るための商品」である。言論といえども、商品である以上、お客様が手に取って喜んでくれるもの、「へえ、毎日新聞のニュースはすごいなあ」と感心してくれるものでないといけない。

バイアスは、このニュースの特性から始まる。記者たちがまず着目するのは「おもしろさ」「珍しさ」「世間から注目されること」である。記者たちは、普通の人々が普通に生きて、普通の満足を得ているような日常的な出来事には関心がない。世の中をひっくり返すような出来事や目立った行動をとる人に注目する。

福島第一原子力発電所の事故以降、反原発の嵐が吹き荒れている。ニュースに出てくる人たちは過激な市民活動家だったり、反原発を鮮明にする一部の学者だったりすることが多いのは、このせいだ。

福島の一部地域を除き、原発事故に伴う放射線が地域住民に健康被害をもたらしているという事実はないにもかかわらず、メディアがやたらと「不安情報」を流すのは、そういう偏ったサンプルの学者、市民ばかりを登場させるからだ。

私は各種学会に出て、これまでに少なくとも50人を超

える放射線生物学の学者に聞いているが、9割以上の学者は「現状程度の放射線リスクなら、心配する必要はない」と答えている。学者の世界を紹介する場合には、異端的な意見よりも、圧倒的な多数意見を流すのがメディアの役割だと私は思うが、そうならないのがメディアの世界だ。そこにバイアスが入り込む。

統計学的に言えば、世の中の声を正しく伝えるには、代表的なサンプルをとりあげるのが正しいはずだが、記者たちは偏ったサンプルを好む。そのほうがニュースとしてインパクトがあり、おもしろいからだ。

このため、原発事故にからむニュースで登場する知識人は、音楽家の坂本龍一さん、作家の大江健三郎さんや落合恵子さん、歌人の俵万智さん、精神科医の斎藤環さん、江戸文化研究家の田中優子さん、評論家の内橋克人さんなどなど、私から見れば、放射線の専門分野とはかけ離れた人たちばかりだ。

■代表的サンプルはニュースにならず

記者たちがなぜ、そういう人たちをニュースのサンプルとして選ぶのか。これは記者特有の反文明的な気質のせいだろうと思う。上記にあげた知識人は「悪いのはアイツだ!」といったふうに社会を図式化して見せるのがうまい。記者のニュース感覚に似ており、記者と相性が合うのだろう。

昨年、仙台市に住んでいた歌人の俵万智さんが沖縄の島に逃げた。NHKはニュースで取りあげた。記者たちは逃げた人を盛んにニュースにする。9割以上の母親たちは福島にとどまっているのに、目立つ現象だけを追いかける。まるで逃げた俵万智さんが正しいかのようなニュースは不安を煽るはずだと思うが、記者にそういう感覚はない。

また、原発事故が起きたあとだけに、代表的なサンプルの専門家(いわゆる権威ある学者)を取りあげるには相当の勇気がある。世間からの批判を承知で書かねばならないからだ。

結局、メディアは、情報という商品売っているのだから、その情報を買ってくれる世間のみなさまには勝てないの

である。主役は、ニュースを買って消費する市民なのだ。その市民(消費者団体も含む)の言動がいくら非科学的でも、市民を批判することはまず無理だ。

その結果、市民が科学的な根拠なく、反対や不安、懸念を表明しても、市民側に挙証責任を求める声は出てこない。つまり、市民は間違っただけを言っても、許されるのがいまの民主主義だ。そうした市民の反対、不安を取りあげて、世間が注目するニュースに仕上げるのがメディアである。

■NHKは例外か？

やや例外なのは、国営放送のNHKだ。

2011年12月28日に「追跡！真相ファイル 低線量被ばく・揺らぐ国際基準」というドキュメンタリー番組を放映した。丹羽太貫・京都大学名誉教授らICRP委員らが「この番組内容は、歴史的事実に反し、事実の隠匿、音声記録の改ざんなどがあり、視聴者が正しい情報を知る権利を奪っている」などと提訴しても、NHKはびくともしない。訂正すら出さない。この番組をつくったのが民放ならば、おそらく謝罪していたと私は思う。お客様のことを聞かないとつぶれてしまうからだ。

NHKは民放ほど視聴率を気にしなくても済むから、視聴率の低い教育番組をつくることのできるという利点もあるが、強気の姿勢がとれる点で特異的だろう。

結論として言えるのは、ニュースは世間の感情に左右されること。そして、記者たちはその世間の期待を担ってニュースを送っていることだ。

■ニュースの方程式

こうしたことから、次のことが言える。「ニュースのインパクト」(大きさ、広がり)＝「特異的なこと」×「物語」×「アクション」、という3つの要素で決まる方程式だ。物語は、たとえば、「チェルノブイリで甲状腺がんになった子供たちを治療した」といったストーリーを熱く語る学者がニュースになりやすい。国立がん研究センターのがん専門家は「甲状腺がんのほとんどは良性で心配するようなことはない」と科学的な解説を記者たちにするが、そういう物語性に欠ける話はニュースになりにくい。科学的なエビデンスの度合いや情報の正確度はあまり重視されないことを覚えておこう。

■記者に「合意への意欲」なし

もうひとつの特徴は、何か問題が生じたとき、記者たちはなんとかして解決に結びつけようという「合意への意欲」をもたないことだ。

がれきの処分地が、だれも住まない奥山の中に決まっても、反対する首長や市民の声を取りあげるだけで、政府への批判に終始する。批判が記者の生きがいのなだけだ。苦慮の末に生まれたはずの政府側の案をどうしたら合意にもっていけるかという建設的な案を各種専門家に聞いて記事にすることはまずない。

つまり、ニュースになる要素をもった人がニュースに乗って、世間から注目を浴びるのがいまのニュースだ。過去を振り返ってみると、世論の流れを一挙に変えた小佐古敏荘・東京大学教授、児玉龍彦・東京大学教授のケースが最たるものだ。このほか、先ほど紹介した数々の知識人、タレントが世論作りに貢献している。

■80対20の法則

イタリアの経済学者のパレート(1848～1923年)が唱えた法則に「80対20の法則」がある。

これは世の中の現象をうまい表現で言い当てたものだ。たとえば、「上位20%のお金持ちが全所得の80%を占める」「会社の収益の80%は、20%の優秀な従業員が占めている」とかいわれる法則だ。

ニュースの3要素方程式から言えることは、世の中の現象の8割を動かしているのは2割の活動家たち(消費者団体、学者、文化人など)だということだ。1キログラムあたり数ベクレル程度の放射性セシウムに不安を感じる消費者が2割以下でも、それがメディアに乗って、世論を動かすのだ。

ではどうするか。「20」が「80」を制すなら、これまで「80」にいた穏健な人たちが「20」に回って、メディアを動かせばよい。とにかくニュースになるようなアクションを起こし、メディアの間違いにも即座にアクションを起こす勇気と組織力がいま最も必要だろう。

(2012年10月14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。

原子力規制委、事故時の放射性物質拡散を試算

原子力規制委員会は10月24日、全国16ヶ所にある原子力発電所で、もし福島第一原子力発電所で起きた事故と同じ程度の事故が起きた場合、それぞれの地域で放射性物質がどのように拡散するかをシミュレーションした結果を公表した。試算結果によれば、柏崎刈羽と浜岡、大飯、福島第二の4つの原発では、7日間での被ばく線量が100mSvを超える地域が30キロ以上遠に達することがわかった。

この試算は各サイトで実測した1年間の気象データをもとに、事故を起こした福島第一原子力発電所1～3号機から放出された放射性物質の総量が、各原発から10時間にわたって放出されたと仮定した。評価には、放射性物質の拡散傾向を計算する手法であるMACCS2を採用している。地形は考慮していない。

(原子力学会編集委員会)

エネ環、エネルギー戦略の工程表を提示

政府は10月19日に「エネルギー・環境会議」を開き、先に決めた「革新的エネルギー・環境戦略」を実現するための工程表をまとめた。原子力委員会についてはその歴史的経緯や現在の役割、原子力行政体制の国際比較などを検討した上で、12月中下旬に見直し案を決める。核燃料サイクル政策の研究開発方針については、12月下旬に中

間報告を行う。また人材や技術面については12月下旬までに強化策を打ち出し、立地地域対策については構造転換を含む支援策をまとめる方針だ。

これらの検討結果を踏まえて、年末にエネルギー・環境会議を開き、来年以降の工程管理を決めるとともに、最終的な方針決定へ向けて検討を進めていく。(同)

原子力規制委が発足、独立性と透明性めざす

原子力安全規制を一元的に管理する「原子力規制委員会」が9月19日に発足した。

同日開催された初会合では、委員会の意思決定、緊急対応、報道等に関するルールが確認された。田中俊一委員長は冒頭、「決して平穏な中での発足ではない」と述べ、「福島のような事故を起こしてはならないことを肝に銘じる」との決意を表明した。続いて行われた発足式では、委員会を支える原子力規制庁らの職員が参集し、田中委員長ほか各委員からの訓示を受けた。

終了後の共同記者会見で田中委員長はまず、福島発電所の処理をあげ、特に事故炉を巡る防災対策にも着実に対応すると強調。再稼働の安全基準についても、現時点

のストレステスト評価には政治的判断を含むことからこれにとらわれず、技術的に見直す考えを述べた。40年運転制については今後、バックフィット制度での検討も踏まえるとしたが、実際の延長は「相当困難」として、厳格適用を示唆した。

島崎邦彦委員は「自然が語りかけることに素直に耳を傾けること」、更田豊志委員は「常に危険性を俎上に載せて議論」、中村佳代子委員は「わかりやすい言葉で通訳し、情報を共有」、大島賢三委員は「国会事故調、チェルノブイリ被災調査の経験を活かしたい」と抱負を述べた。

(資料提供：日本原子力産業協会)

原子力規制委、防災対策指針策定に着手

原子力規制委員会は9月26日、「原子力災害対策指針」の策定に着手することを決定した。次回会合以降、自治体等関係者からの意見聴取に入り、10月中にも考え方を取りまとめる。すでに施行が始まっている原子力規制改革関連法では安全規制の転換とともに、防災対策の強化が柱に据えられており、その中で同指針の策定が規定さ

れている。この策定は、それに基づくもの。

規制委員会は、旧原子力安全委員会が3月に取りまとめた防災指針見直しに関する考え方に掲げられた防災対策区域の拡充、被ばく医療のあり方などを尊重することとし、さらに検討が必要な9項目を整理した。これら項目整理に主にあたった中村佳代子委員は、今後の検討に

際し軸とすべきこととして、(1)被災者の視点に立つ、(2)災害が中長期にわたる、(3)まだよく科学的にわかっていないことがある——ことをあげた。新指針の策定に当たっては、特に、福島原子力災害の教訓を踏まえ、長期にわたる防護措置、除染活動等に伴うモニタリングシス

テム、住民帰還に向けた考え方などにも留意する。

委員からは、「国際的状況から、かい離した状況を速やかに改め実効性ある指針とすべき」、「現存被ばく状況、事故炉従事者の被ばくなども慎重に検討すべき」といった意見があった。(同)

安全委員会が今後を展望し幕引き

原子力安全委員会は9月18日に臨時会議を開催し、新法施行に伴う同日での廃止に当たり、福島原子力災害への対応を中心とした活動を振り返った上で、今後の原子力安全確保への展望を取りまとめ発表した。

同委員会は1978年10月に原子力委員会から分離する形で発足。以来、行政庁から独立した中立的立場で安全規制に関する基本的考え方や指針類の策定、原子炉設置許可等に関するダブルチェック審査、事故発生時の緊急助言活動などに係わってきたが、9月19日の原子力規制委員会発足を機に、34年間の歴史に幕を閉じることとなった。

最終回となった18日の発表文書では2011年3月の福島第一発電所事故について、「誰もが起きてはならないものと考えていたシビアアクシデントがわが国で現実起こったもの」として、事故を未然に防げなかったことに対し、反省の意を表明している。また安全審査指針類の整備が不十分との認識のもと、10年12月に同委施策の基本方針を改定。安全の基本原則の明文化などに着手してまもなく、事故発生となったことにも悔いを述べている。

安全委員会では事故発生からの約1年半、法律に基づ

いて原子力災害に対応する技術的助言を数多く行ったほか、シビアアクシデント対策の検討、安全設計指針、防災指針などの見直しに取り組んできた。途上となっている検討状況については新たな規制組織において、法令要件化や技術基準等に反映されるよう要望した。

また、同委が11年7月に経済産業省宛に要請した総合的安全評価、いわゆる「ストレステスト」については、2次評価も含め速やかに実施することが重要であると指摘。組織においてはその取組を定着させ、安全対策の継続的改善が実現するよう求めている。

さらに今後の原子力安全に向け、事業者による「安全確保に関する一義的責任の自覚」を強く要望。規制組織には中期的な規制政策および最新の知見に基づく安全基準を定めるとともに、事業者がこれに満足せず、最高の安全水準を目指し努力していることを確認すべきとした。

各委員は、最終会合に際し所感を述べたが、常にリスクの存在を肝に銘じる謙虚な姿勢、また、安全確保の中核となる要素は「人」であることを異口同音に強調した。

(同)

学術会議、高レベル処分で暫定保管と総量管理を提言

日本学術会議の高レベル放射性廃棄物の処分に関する検討委員会は9月11日の原子力委員会で、同委員会が進めてきた検討結果を報告した。原子力委員会が2010年に学術会議に対し、検討を依頼していた。

報告書ではエネルギー・原子力政策における社会的な合意がないまま、最終処分地選定への合意形成を求めるのは適切でなく、大地震など不確実な自然現象の中で数万年以上にわたって安定した地層を確認することへの限界を指摘した。

原子力委員会への提言としては、(1)高レベル放射性廃棄物処分に関する政策の抜本的見直し、(2)科学・技術的能力の限界の認識と科学的自律性の確保、(3)数十年～数

百年の処分方策確立のためのモラトリアム期間としての「暫定保管」、および高レベル放射性廃棄物の総量上限を確定し増分を抑制する「総量管理」を柱とした政策枠組みの再構築、(4)負担の公平性に対する説得力ある政策決定手続きの必要性、(5)討論の場の設置による多段階合意形成の手続きの必要性、(6)問題解決には長期的なねばり強い取組みが必要であることへの認識——を挙げている。

これに対し原子力委員会からは、暫定保管によって次の世代に先送りすることへの懸念などについて意見が出され、今後、委員会内で報告書内容を精査していくとした。

(同)

東電が1号機格納容器内の写真を発表

東京電力は9月27日、福島第一原子力発電所1号機の原子炉格納容器内の映像を事故後初めて公開した。フラスコ型格納容器の内側の底のコンクリート面から約8.5

mの位置にある配管貫通部の閉止板に穴開け加工し、内視鏡を入れて下方を動画で撮影した。内部は水で満たされているが、少し白っぽく濁っている。

10月中旬までに CCD カメラによる内部調査、線量測定、滞留水のサンプリング、常設監視計器の取付けなど

を行う計画だ。

(同)

敦賀市に原電敦賀総合研修センターが完成

日本原子力発電の「敦賀総合研修センター」が10月1日にオープンした。17日にセンター内で開かれた開所式には、福井県・敦賀市関係者、地元議員、福井県のエネルギー研究開発拠点化計画の関係者らが参加した。

開所式で同社の濱田社長は、「教育訓練を通じて、原子力発電の最重要課題である安全確保について、世界最高水準を目標とし、先取りの精神で確実に安全を達成していく人材を育成していきたい」と述べ、同施設設置関係者への謝辞とともに、施設の積極的な活用を表明した。

この施設は、福井県エネルギー研究開発拠点化計画においても、重要施設の一つに位置づけられているもの。施設では、運転員や保修員をはじめとした同社社員の研修だけでなく、地元をはじめとする国内外の技術者や学

生なども対象に、机上研修と実習を組み合わせた体系的な研修を行う予定で、現在「公開研修コース」の受講者を募集している。

この「公開研修コース」では、原子力発電に関する「安全文化」や「安全技術」に関する知識の習得と技能の向上を図るため、設備保全や放射線管理の基礎および原子力安全等を学習する机上研修と、最新の解析ソフトを用いて原子力プラントの挙動を模擬するプラントシミュレーターや発電所の主要機器である弁、ポンプなどの分解点検を実施する実習を組み合わせた計29の研修コースが用意されている。

詳細は原電 web サイトへ。

<http://www.japc.co.jp/tsuruga-training/index.html>

(資料提供：日本原子力発電)

海外情報

(情報提供：日本原子力産業協会)

[カナダ]

UAE と原子力協力協定を締結

カナダは9月18日、アラブ首長国連邦(UAE)と2国間の原子力平和利用協力協定を締結した。国際原子力機関による保障措置の下、カナダの原子力企業が原子力機器やサービス、および豊富なウラン資源をUAEの民生用原子力市場で取り引するための枠組となる。

カナダ政府は同国の厳しい核不拡散要件を満たす国に対してのみ、原子力輸出が可能となるよう厳しく規制している。2017年以降、UAE初の原子力発電所がアブダビ首長国のプラカで完成予定となっていることから、原発用ウラン燃料も含めて、これらの品目が平和利用目的に限定利用されるよう担保しつつ、両国の原子力貿易を促進するのが、今回の協定締結の目的だ。

UAEはまた、カナダにとって中東の平和維持の重要なパートナーであるほか、同地域最大の輸出相手国であるなど経済的な機会も豊富。原子力生産品による年間収入が50億カナダドルに達する同国としては、年間10億カナダドルのウラン輸出と2万人分分の直接雇用維持のためにもUAEとの原子力貿易は無視できない案件だ。

同協定を実行に移すための行政合意文書については、翌19日にカナダ原子力安全委員会とUAEの外務省が調印済みとなっている。

ブルース A 1 号機、15年ぶりに送電網に接続

カナダのブルース・パワー(BP)社は9月19日、改修工事等で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)を約15年ぶりに地元オンタリオ州の送電網に接続した。

世界でも1サイトあたりの設備容量が最大規模である同発電所の再生に向けた動きに、州政府はもちろん、産業界関連団体らも一様に祝福のコメントを寄せている。

州政府のエネルギー大臣は「近代的でクリーンかつ信頼性の高い電力システムの構築を目指す当州にとって、今回の記念すべき出来事は2014年末までに州内で石炭火力を廃絶するための重要な一歩になった」と強調。カナダ製造業・輸出協会のオンタリオ州支部副総裁も「BP社の原子炉のように低コストで信頼性のある電源の復活は我々の経済と製造部門にとって絶対不可欠なものだ」と断言した。

ブルース A 発電所の CANDU 炉 4 基は運転実績の低迷に伴う経済性の悪化などから、90年代後半にすべて運転を休止。BP社は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が、3、4号機については機器の取り換えを後回しとし、それぞれ04年と03年に運転を再開した。2号機は今年3月に約20年ぶりに再起動。1号機も7月に原子力安全委員会から再稼働を許

可され、低出力での試験を実施していた。

[米国]

NRC, GLE 社の分子レーザー濃縮工場建設を許可

GE 日立ニュークリア社傘下のグローバル・レーザー・エンリッチメント(GLE)社は9月25日、米ノースカロライナ州ウィルミントンで計画しているサイレックス法ウラン濃縮工場に米原子力規制委員会(NRC)から建設・運転許可が下りたと発表した。これにより世界で初めて、商業規模の分子レーザー法濃縮工場建設に道が拓かれたことになる。GLE 社では商業化への最終判断は複数の要因に基づき、次の段階で下す考え。

米国では総発電量の2割を支える原子力が今後も重要なエネルギー供給源として役割を担うと認識されていることから、新たな原子炉の建設に備えて、仏アレバ社や米国濃縮会社(USEC)が遠心分離法で大規模な濃縮工場を建設中だ。

GLE 社は2006年、オーストラリアのサイレックス・システムズ社から取得した濃縮技術(六フッ化ウランを励起する分子レーザー法)を商業化・運用する独占実施権を所得。08年にはカナダの大手ウラン生産業者のカメコ社から24%の資本参加を得て、09年6月にウィルミントンでU-235を8%まで濃縮可能で、最大年間生産量6,000トンSWUとなる商業規模の濃縮工場建設で申請書をNRCに提出した。商用化実証ループを使った試験も翌7月からウィルミントンで開始し、その実行可能性の確認や商業規模施設の機器や設備、プロセスの設計を進めていた。

一方、NRCでは提案された建設計画について徹底した安全審査と環境影響審査を実施。今年2月の安全評価報告書で「施設はNRCの規定に準じており、従業員や一般大衆の健康と安全を過度のリスクにさらす心配はない」との見解を表明したほか、環境影響声明書でも「同施設が環境に深刻な影響を及ぼすおそれはない」と結論づけていた。

また、複数回の公聴会を通じて、一般からのコメントも考慮済み。ただし、GLE 社が実際に着工を決めた場合は、改めて工事計画の概要を説明する公聴会を地元で開催するとともに、建設中および操業中でも随時、検査を実施するとしている。

[スペイン]

国内最古のガローニャ原発、2013年7月に閉鎖へ

スペイン政府は9月7日の閣議後に発表した官報の中

で、サンタマリア・デ・ガローニャ原子力発電所(BWR, 46.6万kW)の運転期間延長計画が高額なコスト等を考慮して撤回されたと発表した。政府のエネルギー改革による影響が不透明だとして、事業者が6日に「認可更新を申請することはできない」と発表したのを受けたもの。

このままいけば、同炉は来年7月に閉鎖されることになる。同炉の技術的な安全性と信頼性については、原子力安全委員会(CSN)が「適切な対策を施せば2019年まで運転継続が可能」と繰り返し保証していただけない、総発電電力量の約2割を賄う原子炉8基の一角をあっさり永久閉鎖とするのか、現段階では見通せない状況だ。

閣議後の記者会見でS・サンタマリア副首相は「ガローニャ原発の運転認可延長で申請書を期限の5日までに提出しなかったのは事業者であるニューレノール社の方だ」と強調。産業エネルギー観光省が今年7月、同炉の運転寿命を13年までに制限する政令を取り消していたことから、政府が態度を一転させたとして理由を追求する記者の質問を一蹴した。

ニューレノール社の声明によると、政府のエネルギー改革計画は現在棚上げ状態にあり、今後課される税金その他が同原発の将来の稼働に直接的および間接的に及ぼす影響は不明瞭だ。同社は過去1か月間、認可申請の締切り日を延期する、もしくはエネルギー改革の詳細を提示するよう産業省に再三要請していたが、規制上の不確実性が払拭されない以上、同炉で必要となる新たな投資を正当化する決定は下せないと声明。運転継続の条件としてCSNが指示した設備の近代化など、経済的な持続性の保証には1億2,000万ユーロが必要になると説明する一方、規制上の不確実性が取り払われれば、認可延長の申請もあり得るとの考えを示唆している。

[フランス]

国内最古の原発は2016年に閉鎖

フランスのF・オランド大統領は9月14日、パリで開催されていた環境会議で演説し、フランス最古のフェッセンハイム原子力発電所(90万kW級PWR2基)を2016年末までに閉鎖すると明言した。今年5月の大統領選で、「速やかに閉鎖の準備を始める」と公約していた同原発の処遇について、今回初めて閉鎖時期を明確に示したものの。

1977年に運開した同原発1号機は昨年7月、17年まで40年間の運転延長が認められていたことから、オランド大統領の発表により実質、閉鎖が約1年前倒しされることになる。ただし、閉鎖に際しては電力の安定供給と雇用の保証が条件。同サイトを原子炉廃止措置の成功例とし、この分野の専門的知見の世界的な規範とする考えを

明らかにした。

オランダ大統領は公約の中で、フランスの総発電電力量における原子力のシェアを、現在の70%から2025年までに50%に削減することを確約。今回の演説では膨大な可能性を持つ再生可能エネルギー開発を含め、フランスではエネルギー生産の多様化が遅れていると憂慮。2011年に風力発電所の新設が前年実績より低下した点や太陽光発電設備設置の伸び悩みを指摘した。

こうした再生可能エネルギーのシェア拡大と省エネにより、温室効果ガスの排出量についてはサルコジ前大統領より大幅な削減を目指す考え。2030年までに40%、40年までには60%削減するとしている。

[ベルギー]

チアンジュ 2 号機でも亀裂を探知

ベルギー連邦原子力規制局(FANC)は9月13日、チアンジュ原子力発電所2号機(PWR, 105.5万kW)でも、8月初めにドール3号機(PWR, 105.6万kW)で探知されたのと同様の毛髪状亀裂が压力容器で探知されたと発表した。チアンジュ2号機にはドール3号機と同じくオランダのRDM社製压力容器が使われていることから、両炉を運転するエレクトラベル社はチアンジュ2号機が定期検査のため8月16日に停止した後、停止期間を延長して超音波センサーによる検査を実施中。暫定報告として、ドール3号機ほど多数ではないものの、亀裂が探知されたことをFANCに連絡した。

同社によると、発電所の専門家は現時点での亀裂の原因について「40年前に压力容器を鍛造した際、鋼材内部に生じた水素が原因(DDH)」との仮説を立てている。検査結果をすべてまとめた報告書は1週間後に改めてFANCに提出するほか、同炉の再稼働を正当化するための説明資料についても報告する予定。これらの分析・評価を通じて、FANCが同炉の今後の処遇について判断を下すことになる。

一方、技術的な分析検査が追加で行われているドール3号機に関して、FANCは同日、独立の立場の国際専門家グループとして独、仏、英、米、フィンランドおよびブルガリアから6名の専門家を招いたと発表。議長としてブリュッセル自由大学のP-E・ラポー教授を指名したほか、国際原子力機関(IAEA)および経済協力開発機構・原子力機関(OECD/NEA)からも専門家を招く予定だとしている。

FANCはまた、(1)非破壊検査技術、(2)構造力学、(3)亀裂の冶金学的な発端——のそれぞれについて分野別に調査する3つの国際作業グループを設置。各国の原子力規制当局の専門家で構成されるこれら3グループ、および検査会社であるAIBバンコット社、エレクトラベル

社からの分析情報はFANCの技術支援組織である「ベルV」が評価し、すべての作業を統合して予備評価報告書を作成する。

同報告書はFANCの科学審議会と国際専門家グループが審議することになっており、その結果次第でFANCはドール3号機を再稼働させるべきか否かを政府に勧告する段取りだ。

[スウェーデン]

バッテンフォール社が原子力専門部門を設置

スウェーデンで稼働中の原子炉10基のうち7基を所有するバッテンフォール社は9月19日に大幅な組織改編を行い、原子力事業を一括して扱う専門部門の設置を決めた。原子力発電所の操業で最高レベルの安全性が保証されることをめざす。同社は7月末に、既存原子炉を代替する原子炉の建設可能性について情報分析する申請書を放射線安全庁に提出。原子力には再生可能エネルギーとともに、今後の投資の方向性の一つとして力を入れていく方針だ。

同社の旧体制では、(1)発電、(2)配電と販売、(3)再生可能エネルギー——という3つの運営区分下に5つの事業部門が存在したが、11月1日以降の運営区分は(1)と(2)のみとなる。原子力事業部門を、持続可能資産開発部門や生産部門、資産合理化・取引部門とともに(1)の区分下に配置。再生可能エネルギー専門の運営区分は廃止することとし、事業内容ごとに分離して(1)の持続可能資産開発部門と生産部門に組み込んだ。

同社のO・ロセット最高経営責任者によると、「原子力には特別に重点を置く考えで、新設した原子力部門では既存の活動のみならず、今後可能となる活動にも焦点を合わせていく」と説明。原子力は必ずしも欧州全体の課題ではないものの、同社にとってはその他の分野とは異なる種類の集中が必要と認識しており、高いレベルの操業や安全性を保证するため、同部門全体のつながりに責任を負う考えだとしている。

また、今回の組織改革に伴い、現在の配電・販売部門の責任者が新しい原子力事業部門のトップに就任することが決定した。

[バルト三国]

三国首脳がピサギナス計画で合意

リトアニア、ラトビア、エストニアのバルト三国の首相は9月20日、リトアニアの首都ビルニユスで開催した三国閣僚会議の席上で、共同で進めているピサギナス原子力発電所建設計画に係わる課題は今後、三国の政府間

作業グループを設置して協議していくことで合意した。出資を伴う戦略的投資家として ABWR の建設を提案している日立製作所を含め、三国の地域パートナー達が出資問題などの重要課題に関する交渉を早期に終結させ、プロジェクト会社を設立することが目的。また、14日には同計画の是非をめぐる国民投票がリトアニアで実施されることから、その結果についても配慮するとしている。

ピサギナス原発計画の進捗状況と今後取るべき行動について3国が合意した内容は、首相3名の署名とともに「覚書」として公表された。

[ロシア]

カーニン4号機が営業運転開始

ロシアで29番目の商業規模の原子炉として昨年11月から試運転中だったカーニン原子力発電所4号機(PWR, 100万kW)が9月25日、営業運転を開始した。福島事故後に同国で初めて運開した同炉により、ロシアの原子力発電設備は2,519.1万kWに到達。米国、フランス、日本に次ぐ世界第4位の開発利用規模となっている。

運開記念式典にはロシアの原子力発電会社であるロスエネルゴアトム社やエンジニアリング会社のNIAEP社幹部、地元の州知事らが参加した。総合原子力企業ロスアトム社のS・キリエンコ総裁は祝辞の中で、「我が国の建設作業員は日程通りに予算内で原子炉を建設できることを実証した」と称賛。同炉に割り当てられた総予算760億ルーブル(約1,905億円)のうち約10%にあたる70億ルーブル(約175億円)が節約できたことを強調した。

同総裁によると、カーニン4号機は2005年に運開した3号機と同様、同発電所のⅡ期工事という位置付け。Ⅰ期工事に相当する1,2号機と異なり、管理システムの多重バックアップを可能にするデジタル管理機器が設置されるなど、既存の原子力発電所の中でも最先端の技術が採用されているとしている。

[UAE]

ENECが原子力導入計画、緊急時対応計画策定へ

アラブ首長国連邦(UAE)初の原子力発電所導入計画を進めている首長国原子力会社(ENEC)は9月9日、国家緊急時危機災害管理庁(NECMA)と原子力発電所における緊急時オフサイト対応計画の策定で協力覚書(MOU)を締結した。

NECMAは2007年に発足した連邦機関で、首長国や地域レベルに関係なく災害や緊急事態、危機的状況が発生した際、すべての関係機関と調整し、協力して管理にあたる責任を負う。

UAEでは今年7月、首長国の一つであるアブダビ西部のブラカでENECが原子力発電所の建設作業を正式に開始したことから、初号機が完成する2017年以降を見据え、国際社会で最も厳格な安全基準を満たした発電所とするための一側面として、緊急時計画の策定を含めた準備対策でNECMAと協力することになった。具体的な計画と戦略目標の策定では、UAEのすべての関連省庁や機関、組織の力を結集することになる。

[トルコ]

シノップ原発計画で年内にメーカー選定へ

トルコの半国営アナトリア通信は9月20日、同国政府は黒海沿岸のシノップで進めている国内2番目の原子力発電所建設計画について、年末までにメーカーを選定する予定だと伝えた。同国のT・ユルドゥズ・エネルギー大臣が記者会見で述べたもので、現時点で中国、韓国、日本、カナダの4か国のメーカーが同計画への入札を準備。「9月末までにこのうち1社をふるい落とし、残り3社の中から年末までに最終決定する」としている。

同国では2023年までに、国内3ヵ所で原発を完成させることが目標。最初の原子力発電所が立地される予定の地中海沿岸のアククユでは来年から、120万kWの原子炉4基の建設を開始する。ロシアが建設工事を受注した。

同様に原子炉4基の建設が計画されているシノップでは、日本の東芝が2010年に原子炉建設を含めた広範囲な協力を提案していたが、福島事故により交渉は中断。アナトリア通信によると、日本と同国は昨年7月に交渉を再開していた。一方、いったん交渉が打ち切られた韓国が今年になって交渉再開を同国に要請したほか、中国も同国との原子力技術協力の拡大協定に調印するなど、同計画を巡る各国の攻勢は激しさを増している。

原子力規制委員会設置法の概要

新しい原子力安全規制法制度とは

東京大学 諸葛 宗男, 東京工業大学 西脇 由弘

東京電力福島第一原子力発電所事故と、その原因調査を実施した政府事故調と国会事故調等の検討状況も踏まえ、2012年6月、独立性の高い原子力規制委員会を新設することを柱とし、原子力の安全規制制度の大幅改正を盛り込んだ原子力規制委員会設置法が国会で成立した。この法律には原子力規制委員会とその事務局の原子力規制庁の権限や役割等が定められているだけでなく、原子力基本法、原子炉等規制法、放射線障害防止法、電気事業法等、原子力に関するほとんど全ての法律の改正が盛り込まれており、原子力関係者必読の法律である。

I. はじめに

原子力規制委員会設置法(以下「設置法」という)による原子力安全規制法制度の改正は、原子力利用が始まった1957年以来、最大の原子力法制度改革である。内閣府、文部科学省、経済産業省に分散されていた安全規制組織が原子力規制委員会に一元化されたほか、原子力に関するほとんど全ての法律が改正された。本稿はその全体概要を解説し、関係者への周知の一助とするものである。

II. 法改正の概要

1. 原子力規制委員会設置法の全体構成

設置法の特徴は、全265頁のうち、法律の本文は18頁半だけで、残りの247頁が主として施行期日や他の法律の改正内容が附則として記述されていることである。本稿では、最初に本文に記載されている原子力規制委員会の概要を示し、続いて附則の主な法律の改正内容の概要を、法律ごとに解説する。参考のために、附則の条文と、解説をしている法案の条文を示す。例えば、附則第十七条による原子炉等規制法第四十三条の三の五第二項第十号であれば、(附17, 43条の3の5 2-10)と表記する。また、国会附帯決議は、例えば衆議院の附帯決議の第1項は(衆1)と、参議院の附帯決議の第23項は(参23)と表記する。

2. 原子力規制委員会の概要

(1) 三条委員会として独立性を強化

今回の組織改正の最も大きな特徴は、原子力規制委員

会が国家行政組織法第三条第二項の規定に基づく独立性の高い委員会組織とされたことである。独立性の高い三条委員会にした理由は第1条目的に詳しく記載されているが、これは国会における設置法審議経緯とも関係している^a。(設置法1, 3, 5, 6, 7条)

(2) 分散されていた安全規制機能の統合

原子力規制委員会の2つ目の特徴は、原子力安全規制が一元化されたことである。我が国の原子力規制は著しく分散化されていたが、それが大幅に原子力規制委員会に統合された。

第1の統合は政府の原子力安全規制組織の統合である。経済産業省の原子力安全・保安院と文部科学省の原子力規制組織が原子力規制委員会に統合され、その事務局として原子力規制庁が設けられた(設置法27)。従来の八条委員会の原子力安全委員会と、一次行政庁が一体化され統合された。

第2の統合は3つのSの統合である。これまでは安全(Safety)と核不拡散(Safeguard)と核セキュリティ(Security)という、いわゆる3つのSの所掌が原子力安全委員会、文部科学省、経済産業省に分散していたが、これらの安全規制が原子力規制委員会に一元化された。分散していた安全規制組織が一元化されたのは、安全規制における縦割りの弊害の除去の必要性の認識に基づく

^a当初、政府は原子力安全・保安院を経済産業省から環境省の外局に移して原子力規制庁とし、原子力安全審議会は環境省に諮問答申する八条委員会とする案を国会に提出した。これに対して自民党等の野党側から「規制組織の独立性が低かったことが東電福島第一事故の遠因だったのに、その反省が反映されていない」との指摘がなされ、原子力規制委員会を三条委員会として、原子力規制庁はその事務局とすべき、との対案が出され、結局、その野党案がほぼ全面的に採用される形で決着した。このような経緯を踏まえ、設置法第1条が詳述された。

ものである。

第3の統合は規制支援機関の統合と結集である。多くの専門家を擁している(独)原子力安全基盤機構を原子力規制委員会に統合することとなった。また、やはり多くの専門家を擁している(独)日本原子力研究開発機構及び(独)放射線医学総合研究所の業務の一部が、原子力規制委員会の共管とされた。(独)原子力安全基盤機構の原子力規制委員会への統合は安全規制の高い専門的知識の必要性の認識に基づくものであり、規制支援機関の結集は上述した規制組織の統合に伴うものである。

第4の統合は放射線障害防止法による規制と原子炉等規制法による規制の統合である。我が国の原子力利用が始まって以来、両法の規制は別の行政庁によって行われてきたが、今回の改正により、原子力規制委員会のもとで初めて一元的に規制されることとなった。

第5の統合は原子力発電所に対する電気事業法と原子炉等規制法の規制の統合である。これまでは2つの法律でモザイク模様のような規制が行われていたが、原子力安全に関する規制は基本的に原子炉等規制法に一元化されることとなった。

(3) その他の附則や附帯決議

上記の主要な新設・変更に加え、原子力規制委員会に関しては、その国会審議に際し、衆議院や参議院からの附帯決議がある。以下にその主要なものの趣旨を示す。

- ・原子力規制行政は、推進側の論理に影響されることなく行うこと。(衆1)
- ・安全神話から脱却すること。(参9)
- ・安全保障に資することを規定(cf. 3.(1))した趣旨は、3つのSの安全規制を一元的に担うという観点から加えたものであり、我が国の非核三原則はもとより核不拡散についての原則を覆すものではない。(参11)

3. 原子力基本法の改正

(1) 安全確保の目的に安全保障を追加

第二条基本方針に第二項が新設され、「安全の確保については、確立された国際的な基準を踏まえ国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全並びに我が国の安全保障に資することを目的として、行うものとする。」が追加された。この安全保障とは、非核三原則などを覆すものではなく、あくまで安全規制に関連するものであり、それは設置法第3条で原子力規制委員会の任務を「我が国の安全保障に資するため、原子力利用における安全の確保を図る」と規定していることから裏付けられる。(附12)

(2) 原子力規制委員会と原子力防災会議の設置

第一章の二「原子力規制委員会」の第三条の二「原子力利用の安全の確保を図るため、別に法律で定めるところにより、環境省の外局として、原子力規制委員会を置く。」

が新設・追加された。また、第一章の三「原子力防災会議」の第三条の三「内閣に、原子力防災会議(以下「会議」という。)を置く。」が新設・追加され、第三条の四以下に所掌事務、組織、事務局、政令への委託の条項が追加された。(附12)

4. 原子力委員会及び原子力安全委員会設置法の改正

(1) 原子力安全委員会の記述削除

原子力規制委員会について、独立した設置法が成立したことに伴い、原子力委員会及び原子力安全委員会設置法からは、題名を含め原子力安全委員会の記述が全て削除され、原子力委員会設置法とされた。(附13)

(2) 原子力規制委員会への通知等

原子力委員会に対して、「安全確保に関係がある事項について企画または審議したときは」原子力規制委員会への通知を、そして「安全の確保に関係のある事項について決定しようとするときは」原子力規制委員会の意見聴取を義務付けるよう定められた。(附13)

5. 放射性同位元素等による放射線障害防止に関する法律の改正

主務省庁が文部科学省から原子力規制委員会に変更になった。これに伴い、条文中の「文部科学大臣」が全て「原子力規制委員会」に、「文部科学省令」が「原子力規制委員会規則」に、「文部科学省」が「原子力規制委員会」に改められた。(附31)

6. 放射線障害防止の技術的基準に関する法律の改正

放射線審議会の主務省庁が文部科学省から原子力規制委員会に変更になった。これに伴い、「文部科学大臣」が「原子力規制委員会」に、「文部科学省」が「原子力規制委員会」に改められた。(附33,1条, 4条, 7条2)

7. 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律の改正

原子炉等規制法は、附則により施行が4段階に分かれ、附則十五条(既施行)、十六条(来年4月1日施行)、十七条(施行後10ヶ月以内)、十八条(施行後13ヶ月以内)となっている。後から附則が施行されることにより、原子炉等規制法の条文が条ずれすることがあり、注意が必要で、本稿では、附則施行時点での条番号を示す。

(1) 原子力規制委員会への規制の統合

原子力規制委員会が新設されたことから、原子炉等規制法全体を通じ、規制を行う主体が、経済産業省及び文部科学省(試験研究炉や、保障措置などの国際規制物質の使用等の規制)から、同委員会に変更された。

(1) 法目的に、人と環境の保護を明記

法目的に、原子力基本法の改正に合わせ、「国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全」を加え、人と環

境の保護を直接の法目的とすることとした。あわせて、「大規模な自然災害及びテロリズムその他の犯罪行為の発生も想定した必要な規制を行う」こととし、「我が国の安全保障に資すること」を明示的に法目的に加えた。さらに、「原子力施設において重大な事故が生じた場合に放射性物質が異常な水準で当該原子力施設を設置する工場又は事業所の外へ放出されること……による災害を防止」することとし、法規制の範囲を拡大し、深層防護の第四層まで、すなわち過酷事故も範囲に含むことを明確にした。(附15, 1条)

(3) 発電用原子炉の規制の設工認の変更

発電用原子炉は、別項を起こし、第四十三条の三の五以下で規制することとした。

設置許可の申請書には、従来からの「位置、構造及び設備」に加え、過酷事故に対応できるよう「炉心の著しい損傷その他の事故が発生した場合における当該事故に対処するために必要な施設及び体制の整備に関する事項」が記載事項として加えられた。(附17, 43条の3の52-10)

これに対応し、許可基準には、「その者に重大事故の発生及び拡大の防止に必要な措置を実施するために必要な技術的能力その他の発電用原子炉の運転を適確に遂行するに足る技術的能力があること」を加え、法定化された許可基準の細則を規制委員会規則に委任する規定「…原子力規制委員会規則で定める基準に適合するものであること」も加えた。(附17, 43条の3の61-4)

また、これまで事業所等の名称等の形式要件の変更だけが変更許可を要しないこととなっていたが、これに加え、災害の防止上支障がない同種の設備の追加や規則に定める軽微な変更をしようとする場合は、変更許可を要せず、届出で済むこととした。(附17, 43条の3の84)

工事計画の認可基準として、設計及び工事の品質管理の方法及びその検査のための組織に関する基準が追加(附17, 43条の3の93-3)され、工認の段階から品質保証を要求することとした。

燃料体の設計については従来、電気事業法では、燃料体検査の合格基準に経済産業大臣の認可を受けた設計であることが入っていたものが、検査を受験する者はあらかじめ「その燃料体の設計について原子力規制委員会の認可を受けなければならない(附17, 43条の3の122)」ことを明記した。

(4) 技術基準適合義務等の導入・新設

電気事業法にあった技術基準の適合義務を、原子炉等規制法に導入し(附17, 43条の3の14)、最初に技術基準ありきという法体系に変更した。維持義務を課すことによって、新知見により技術基準が改正された場合、事業者は新技術基準に適合させる義務を負うことから、バックフィットが適用されることが明確にされた。また、技術基準不適合状態に対しては命令をかける(附17, 43条の3の23)ことができる。

また、安全性向上のための評価(附18, 43条の3の29)の規定が新設された。原子炉設置者は、「…定める時期ごとに、当該発電用原子炉施設の安全性について、自ら評価をしなければならない」ことされた。本措置は、今後の法運用にもよるが、建設や運転段階に入った原子炉に対して、設計から運転管理に至る総合評価を定期的に行うものであり、米国の最終安全解析報告書(FSAR)の性格を持たせることもできる。

(5) 型式証明や型式指定の導入

原子炉施設の機械又は器具(特定機器)について、あらかじめ設計を承認し、型式証明を行うことができることとなった(附17, 43条の3の29)。型式証明を受けた特定機器は、設置許可申請書にその旨を記載することによって、審査を省略することができることとした。(附17, 43条の3の62)

この型式証明は、原子炉設置者以外も申請できる。製造事業者が型式証明を行えば、異なる多数の原子炉施設にこれを導入する際にも、既審査として取り扱われ、安全性を維持しつつ審査期間の短縮を図ることができる。「原子炉施設に係る機械又は器具」との限定が付されているが、標準設計承認(DC)へ道を開いたものといえよう。

また、型式証明に基づき、均一性を有し、技術上の基準に基づいて製造されたものであれば、「型式証明を受けた設計に係る特定機器をその型式について指定する(附17, 43条の3の301)」こととした。国内のみならず、海外で製造された特定機器にも型式指定が適用される。型式指定がなされると、工事計画の認可において「技術上の基準に適合しているものとみなす」とされる。(附17, 43条の3の94)

(6) 運転期間の導入

使用前検査が終了した後40年以内を、原子炉を運転することができる期間とした。(附17, 43条の3の31)

また、長期間の運転に伴い生ずる原子炉その他の設備の劣化の状況を踏まえ、原子力規制委員会規則で定める基準に適合していると認めるときに限り、20年以内の運転の延長を認めることとしている。(附17, 43条の3の312, 43条の3の313)

バックフィットルールは、本法改正によって導入されており、全ての原子炉は最新の知見を反映させなければならない。したがって、40年の時点では、その後20年間の見通せる経年劣化を評価して、運転期間の延長を認可することとなる。40年の運転期間導入は、巷間言われているように、最新の設計を反映するものでもなければ、原子炉の寿命を40年とした規定でもない。あえていえば、運転期間の延長は1回しか認めないことから、原子炉の寿命を60年に限ったものといえよう。

なお、原子力規制委員会設置法の国会審議において、参議院から、「運転期間40年の制限制度については、…既存の高経年化対策等との整合性を図る」こと、及び、

「本法附則に基づく改正原子炉等規制法の見直しにおいては、速やかに検討を行い、原子力規制行政の実効性を高めるため、最新の科学的・技術的知見を基本に、国際的な基準・動向との整合性を図った規制体系とすること」との附帯決議がなされており、速やかに本条文の見直しを行うこととされている。

これまでの高経年化評価は、30年を経過した原子炉について、その後20年間の健全性を見通して、10年ごとに経年劣化を評価していたが、今回の改正による40年の運転期間の設定は、従前の方法に比べ規制緩和とも見ることができるといえる。附帯決議にあるように、速やかな見直しが必要であろう。

(7) 最新知見の反映の義務

全ての原子力事業者は、原子力施設における安全に関する最新の知見を踏まえつつ、災害の防止に関し、原子力施設の安全性の向上に資する設備又は機器の設置、保安教育の充実その他必要な措置を講ずる責務を有するとの条文(附17, 57条の9)が新設された。罰則の適用はないものの、事業者は、最新知見を踏まえて安全を確保する義務があることが明確にされた。

(8) 特定原子力施設の指定

福島第一事故により、特別な管理をしなければならない原子炉が発生したことに伴い、危険時の措置(附15, 64条)を講じた原子力施設であって、災害を防止するため、又は、核燃料物質を防護するため、その施設を特定原子力施設(施設の状況に応じた適切な方法により当該施設の保安又は核物質の防護について特別の措置が必要な施設)として指定できることとなった。特定原子力施設は、特別の措置に関する実施計画を策定し認可を受け、また、実施計画の遂行状況について検査を受けなければならない。(附15, 64条の2)

(9) その他の附則や附帯決議

上記の主要な変更・新設項目に加え、国会審議を通じて、原子力規制委員会設置法の附則や国会の附帯決議があり、以下、今後、法改正につながる主要なものをあげる。

- ・(独)原子力安全基盤機構が原子力規制委員会に組入れられる(附64)ため、検査や核物質防護の一部の規定が変更される。
- ・現在、文部科学省傘下にある独立行政法人や関係団体の業務の在り方について検討を加え、必要な措置を講ずる(附65)こととなっているため、(財)核物質管理センターの保障措置業務などの位置づけが変更されることとなる。
- ・参議院の附帯決議で、「審査・検査制度については、諸外国の例を参考に、これらが形骸化することがないよう、…原子力規制委員会が厳格かつ実効的な確認を行う…ような規制体系を構築すること。」とされており、今次改正では検査制度については手が付けられておらず、今後の検討課題である。

8. 電気事業法の改正

(1) 原子炉等規制法に相当する規制を導入

これまで原子炉等規制法の適用が除外されていた発電用原子炉施設に関する工事認可や使用前検査が、原子炉等規制法の対象とされることとなった。

(2) 主務大臣に書換え

発電用原子炉施設の電気事業法の規制対象となる非原子力安全の規制の一部が原子力規制委員会の所掌とされ、適用される法令も同委員会規則となる。このため、電気事業法の当該条文の「経済産業大臣」は「主務大臣」に、「経済産業省令」は「主務省令」に読み替える。

(3) 二重規制の排除

電気事業法第百十二条の三が新たに設けられ、原子炉等規制法で規制されれば、電気事業法の相当の行政行為は適合していることとみなしたり、適用除外をすることによって、二重規制を排除することとなった。

第一項では工事計画の認可の手続きにおける電気事業法の技術基準適合の規定は原子炉等規制法第四十三条の三の九第一項に定める工事の計画の認可を受けた場合、電気事業法における技術基準に適合しているものとみなすこととしている。第二項では工事計画の届出の手続きに関しても、原子炉等規制法第四十三条の三の十第一項の規定により届出をした工事計画に関しては、電気事業法における技術基準に適合しているものとみなすこととしている。また、第三項では原子炉等規制法第四十三条の三の十一第一項の規定による使用前検査を受け、これに合格した発電用原子炉施設である特定事業用電気工作物は、電気事業法の使用前検査に合格したものとみなすこととしている。第四項では電気事業法第五十一条、第五十二条、第五十五条の規定は、原子炉等規制法及びこれに基づく命令の規定による検査を受けるべき原子力発電工作物については、適用しない、としている。(附41)

9. 原子力災害対策特別措置法の改正

原子力災害対策特別措置法は、災害対策基本法の体系のもとに位置付けられ、この法体系には変更はない。

また、従来の主務官庁が、全て原子力規制委員会に改められている。ただし、オフサイト対策の拠点となる緊急事態応急対策拠点施設(オフサイトセンター)は、内閣総理大臣が指定する(12条)こととされている。

従来、原子力安全委員会が定めていた防災指針が、原子力災害対策指針として、原子力規制委員会が定めること(6条の2)とされ、法定化された。

事業者の行う防災訓練について、その結果を原子力規制委員会に報告する規定が新設(13条の2)された。

従来、主務大臣に対し、事業者に原子炉等規制法の緊急時の措置を命令することを、原子力災害対策本部長(内閣総理大臣)が指示できていたが、これが福島第一事故の事故収束の混乱の要因であるとして削除された。これ

により、原子炉等規制法の所管である原子力規制委員会が事故収束に当たり、内閣総理大臣といえども、原子力規制委員長に事故収束に関しては指示することができなくなった(オンサイトとオフサイトの切り分け)。

また、急を要する場合は、市町村長、警察官又は海上保安官は、立退き及び屋内退避の指示(27条の2、27条の3)、さらには、警戒区域を設定し立入制限・禁止や退去の命令(27条の4)ができることとされた。

原子力基本法において、原子力防災会議が新設されることとなったが、同会議は、原子力防災に関して平常時の関係機関の連携等を任務とするものである。なお、災害対策基本法に基づく防災基本計画は、一連の原子力防災関連の法改正を受け、平成24年9月6日に改正されたが、原子力災害対策指針が定められた日に施行されることとなっている。

以下に、主要な原災法関連の附則と衆議院と参議院の附帯決議を示す。

- ・大規模災害の対処に当たる政府の組織の在り方について抜本的な見直しを行うこと(附6条7、参24)
- ・オフサイトセンターは、県庁等の交通手段が整い、通信の確保が図りやすい場所に設置すること(衆5)
- ・原子力防災会議の事務局長や事務局の在り方については、政府の防災体制の見直しや原子力規制の行政組織の見直しと併せ、見直すこと(衆8、参26)

10. 環境基本法の改正

環境基本法の対象から放射性物質を除外していた第十三条が削除され、放射性物質が環境基本法の対象に加えられることとなった。(附51)

11. 環境省設置法の改正

原子力規制委員会が外局として追加され、環境省の任務に原子力安全の確保が加えられた。(附52、3条、4条、7条、12条、13条)

12. 日本原子力研究開発機構法及び放射線医学総合研究所法の改正

日本原子力研究開発機構法は、放射性廃棄物関連の業務に関する主務大臣を文部科学大臣と経済産業大臣に加えて原子力規制委員会との三省庁の共管とし、原子力安全に係る業務については文部科学大臣と原子力規制委員会の共管となった(附69)。放射線医学総合研究所法に関しては、「原子力施設の事故により放出された放射線の人体への影響並びに事故由来放射線による人体への障害の予防、診断および治療に係るものに関する事項については文部科学大臣及び原子力規制委員会」とされ、それ以外の事項の主務大臣は文部科学大臣とされた。(附57)

13. 原子力安全基盤機構法の改正

(1) 業務範囲の拡大と明確化

業務範囲外とされていた原子炉等規制法第五十三条第二号に規定する使用施設等が、(独)原子力安全基盤機構の業務範囲に加えられた。また、第四条の機構の目的に「原子力施設及び原子炉施設の設計に関する安全性の解析及び評価並びに原子力災害の予防」及び「原子力災害の拡大の防止及び原子力災害の復旧に関する業務等」が追記され、原子力防災関連の業務が組織目的として追加・明記された。さらに、同条の後段に書かれていた「エネルギーとしての利用に関する」との限定規定が削除される等により、機構の業務範囲が拡大された。

(2) 主務大臣に内閣総理大臣を追加

これまで主務大臣は経済産業大臣とされていたが、これを原子力規制委員会に改めるとともに、原子力災害関連の業務に関しては「内閣総理大臣及び原子力規制委員会」と改められた。これは原子力防災会議の議長及び原子力災害対策特別措置法に基づく原子力災害対策本部長を内閣総理大臣が務めることに鑑みたものである。(附64、17条他)

14. 特別会計に関する法律の一部改正

エネルギー対策特別会計の目的に「原子力安全規制対策」が追記されたほか、これまで「文部科学大臣、経済産業大臣及び環境大臣」とされていたエネルギー対策特別会計の管理者に内閣総理大臣が追加された。(附72)

Ⅲ. 今後の課題

1. 国際基準との調和

今回の法改正の大きな成果は、原子力規制の体制が大幅に国際基準に調和されたことである。しかし、指針類や技術基準類は今回の改正対象となっていない。新たに発足した体制の下で一刻も早く指針類や技術基準類の国際基準との調和が進められることが喫緊の課題である。

- ・原子力利用における安全の確保に係る事務を所掌する行政組織については、この法律施行後3年以内に、この法律の施行状況、国会に設けられた国会事故調が提出する報告書の内容、原子力利用における安全の確保に関する最新の国際的な基準等を踏まえ(中略)より国際的な基準に合致するものとなるよう(中略)必要な措置が講ぜられるものとする。(附5)
- ・放射線の健康影響に関する国際基準については、ICRPに加え、ECRR(欧州放射線リスク委員会)の基準についても十分検証し、これを施策に活かすこと。また、これらの知見を活かして、住民参加のリスクコミュニケーション等の取組を検討すること。(参14)

2. 原子力規制委員会の人材育成

専門性強化に関する今後の第1の課題は(独)原子力安全基盤機構との早期の一体化である。第2の課題は、幅広い規制分野間の人事交流である。今回の法改正で事業規制、放射線規制、保障措置が一つ屋根の下に結集したことから比較的容易に実行可能である。第3の課題は、規制官の国際的視野の拡大である。第4の課題は、現場経験の強化である。保安検査官などの現場での業務を経験するとともに、早急に自前の研修施設の整備が望まれる。この課題については、以下の通り多くの、設置法の附則や国会審議の附帯決議がなされている。

- ・原子力規制庁の職員の人事へノーリターンルールを徹底し、法施行後5年以内であっても可能な限りその趣旨に沿った人事を行うこと。(附6, 衆2, 参6)
- ・原子力規制庁の職員は、職務執行の公正さに対する国民の疑惑または不信感を招くような再就職を規制する。(附6)
- ・原子力安全基盤機構との統合は一体的な原子力安全規制行政の確保に不可欠であることに鑑み(中略)関係の行政機関が一体となって取り組むこと。(衆3)
- ・職員の原子力安全に関する能力等の向上を図ることが重要であることに鑑み、国際機関や国内外の大学や研究機関との人事交流や職員の研修制度の充実のための措置を行うこと。(附6, 衆4)
- ・原子力規制委員会の委員長及び委員は、原子力事故に際し(中略)その専門的知識及び経験を生かし得るための訓練を計画的に実行すること。(参3)
- ・原子力規制委員会は、その業務の基本方針及び業務計画を規定した上で毎年その評価を実施し、特に職員の専門的能力の育成や訓練等の業務におけるPDCAサイクルの採用の試みなどその着実な実行の担保に取り組むこと。(参4)
- ・原子力規制委員会の人的又は物的な体制の拡充を図るための財源を確保し、及び勘定区分を導入すること。(附6, 参25)

3. 推進行政との関係

我が国の原子力エネルギーはまだ相当長期間にわたって基幹エネルギーの役割を果たさなければならないことは政府も認めており、再処理による核燃料リサイクルも継続して実施することを明言していることから、原子力事業の役割は従前よりいささかも減じていない。原子力事業の健全性を管轄する原子力推進行政の重要性も当分不変である。大幅に体制が強化された規制行政とバランスのとれるよう、原子力推進行政を見直すことも今後の大きな課題である。

4. 自治体との関係

今回の原子力関連法制度の改正で、規制体制としての大きな積み残し課題は自治体との関係の見直しである。現在の法制度に自治体の役割が定められていないが、実質的には長年にわたって地元住民とのコミュニケーションを中心に大きな役割を果たしており、なんらかの形で自治体を公式な枠組みに位置づけるべきではないかと考えられる。再稼働に関する自治体との協議を巡る政府と原子力規制委員会の見解の対立の原因もここにあり、今後の大きな課題である。

- ・従来からの地方公共団体と事業者との間の原子力安全協定を踏まえ、また、原子力の安全規制及び災害対策における地方公共団体の役割の重要性に鑑み、本法施行後1年以内に地方公共団体と国、事業者との緊密な連携協力体制を整備するとともに、本法施行後3年以内に諸外国の例を参考に望ましい法体系の在り方を含め検討し、必要な措置を講ずること。(参26)

5. 原子力の安全研究の再活性化

我が国の軽水炉の安全研究が近年、大幅に縮小されてきたことが今回の事故の要因の一つとなっていたことに鑑み、官民ともに軽水炉を含む原子力全体の安全研究の再活性化を図り、継続的な安全性向上の基盤を整備することが肝要である。

- ・原子力規制委員会は、原子力安全規制の課題に対する調査研究体制を立ち上げ(中略)その結果を安全規制に反映すること。また、原子力規制委員会は、原子力の安全確保のうち、その実施に関するものに責務を有する組織とされたことに鑑み、核燃料再処理の問題を含めた原子力利用全体の安全性についても担うこと。(参16)

— 参考資料 —

- 1) 原子力規制委員会設置法の概要.
- 2) 原子力規制委員会設置法要綱.
- 3) 原子力規制委員会設置法本文.
- 4) 原子力規制委員会設置法衆議院決議文.
- 5) 原子力規制委員会設置法参議院決議文.

著者紹介



諸葛宗男(もろくず・むねお)
 東京大学 特任教授
 (専門分野/関心分野)原子力規制法制システム, プロジェクトマネジメント, 原子力システム工学



西脇由弘(にしわき・よしひろ)
 東京工業大学 客員教授
 (専門分野/関心分野)原子力法工学, 国際法, 原子力安全システム工学

報告

福島第一原子力発電所から放出された放射性セシウム同位体の北太平洋における総量と分布

気象研究所 青山 道夫

東京電力福島第一原子力発電所事故に由来する人工放射性物質の海洋への輸送経路で確認された主な経路は、人工放射性物質が大気中へ放出された後、海洋へ降下する経路および海洋への直接漏洩の経路の2つである。海洋に入った後は、それらが海水とともに動くことによってその分布は変化していった。本報告では、事故前から行われていた研究の成果を紹介するとともに、事故後に行った北太平洋全域での観測結果をもとに、事故に由来する放射性セシウムが初期にどのような分布をしていたか、そしてどのように東へ輸送されたかについて述べる。また、海洋での観測結果から推定した事故による大気への放射性セシウムの放出量についても述べる。

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故(以降、東電福島第一原発事故)に由来する人工放射性物質の海洋への輸送経路で確認された経路は、(1)人工放射性物質が大気中へ放出され海洋へ降下、(2)海洋への直接漏洩、(3)河川によって海洋に運び込まれる、ことの3つである。この3つの経路のうち、最初の2つが主要な役割を果たし、初期の分布が形成された。海洋に入った東電福島第一原発事故起源の人工放射性物質の大部分は溶けていると考えられるので、その後、それらが海水とともに動くことによってその分布は変化してゆく。その場合、流れが速いところでは拡散よりも流れに従う部分が多く(移流)、流れが弱いと移流よりも拡散で広がる部分が多くなってゆく。

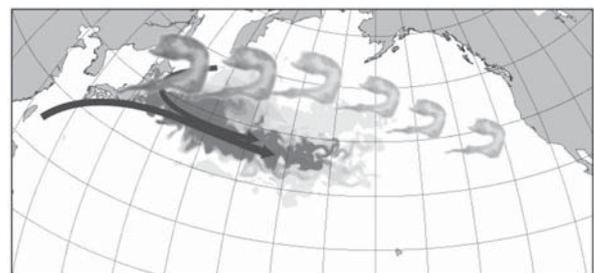
東電福島第一原子力発電所は沿岸に立地しており、事故サイト近傍の海洋では北向きあるいは南向きの沿岸に沿う流れが卓越していることから、海洋へ直接漏洩した人工放射性物質は拡散ではなく、その沿岸の流れの様相に従って輸送されたと考えられる。また、沿岸から沖合いに視点を移すと、事故サイトの沖合である本州東方沖は、日本のはるか南からフィリピン-沖縄沿いに北上してくる黒潮とアリューシャン列島から千島列島沿いに南下してくる親潮が出会い、さらに黒潮続流につながる東向きの流れが卓越している海域である。事故時には、沿岸では南向きの流れが卓越していたので、東電福島第一原発事故起源の人工放射性物質は、まず南に輸送され、その後、東に輸送されることになった。

東電福島第一原発事故起源の人工放射性物質のうち、大気を経由して海洋に沈着したものは、大気中において

海洋での輸送速度をはるかに上回る速度で北太平洋の広い範囲に輸送され、その後、降水に伴って降下する形で輸送されたことが観測からわかっている。大気では太平洋横断の速度は数日のオーダー(10 m s^{-1})であるのに対し、黒潮北側の海洋表層では年のオーダー(10 cm s^{-1})である(第1図参照)。また、海洋中の人工放射性物質の一部は、海底土との相互作用や海洋中の粒子状物質との相互作用で海水の動きとは異なる挙動をすることも忘れてはならない。

さらに東電福島第一原発事故による大気への放出量および直接漏洩量の推定は、汚染規模の把握と今後の事故収束を把握するために重要である。これらについていくつかの推定値が公表されているが、特に大気への放出総量の推定量のばらつきは大きい。その要因の一つとして、大気輸送モデルを用いて逆推定を行う際に、周囲すべての方向で逆推定に必要な近傍の放射線や大気浮遊塵の測定値が得られる内陸に立地する原子力発電所と異なり、東電福島第一原発が沿岸に立地していたため、逆推定に必要な近傍の海上側の放射線量や大気浮遊塵の測定値が得られていないことがあげられる。

著者は、海水中放射能観測結果と大気輸送モデル/海洋輸送モデルを組み合わせ、大気への放出総量の推定を行う研究を、それぞれの分野の研究者と共同して行ってきた¹⁾。本報告では、その基礎となる北太平洋での観測



第1図 輸送の概念図

Distribution and Inventory of Radiocaesium Released from TEPCO Fukushima Nuclear Power Plant 1 Accident : Michio AOYAMA.

(2012年 10月11日 受理)

結果を主に紹介し、大気への放出総量の推定結果についても紹介する。東電福島第一原発事故による海洋への直接漏洩量については、すでにほぼ決着がついており、Tsumune *et al.*, (2012)²⁾による 3.5 ± 0.7 PBqに多くの推定値が収束しつつある。

注釈：流体中(今回は海水)の物質が流れに伴って移動していく現象を「移流」と言う。また、流体中(今回は海水)の物質が時間の経過に伴って広がっていく現象を「拡散」と言う。止まっている流体での拡散は分子運動(ブラウン運動)によって引き起こされる。このような拡散を「分子拡散」と呼ぶ。流れが何らかの攪乱によって不安定になると、不規則な速度や圧力の変動を伴う流れ「乱流」になる場合がある。乱流は種々のスケールの渦から成り立っていて、それらが乱れの原因となる。この乱れによって物質が拡散される現象を「乱流拡散」と呼ぶ。実際の海洋では乱流拡散が支配的である。流れの場において、流速分布が一様分布でなくなるにより、上記の拡散以外の物質輸送が生じる。このときの拡散を「移流拡散(分散)」と呼ぶ。本稿ではこれらをまとめて拡散と称している。

Ⅱ. 海洋での東電福島第一原発事故前の観測結果

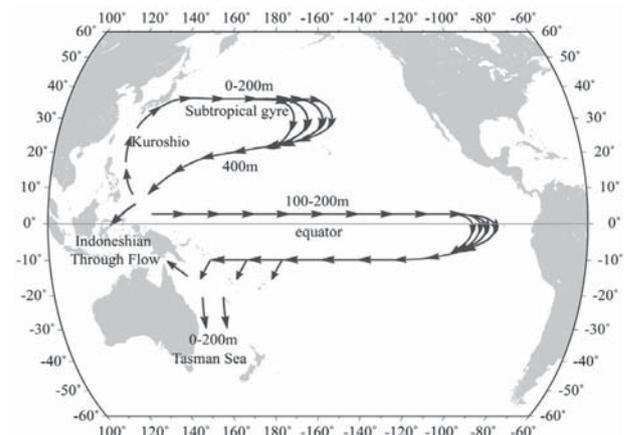
東電福島第一原発事故以前でも太平洋全域において過去の大気圏核実験起源の¹³⁷Csが検出されていた。西部北太平洋表層での¹³⁷Cs濃度は1960年代では $10 \sim 100$ Bq m^{-3} であり、その後、ゆっくり減少してきており、東電福島第一原発事故前の2000年代では $1 \sim 2$ Bq m^{-3} 程度であった^{3,4)}。また太平洋全域では、2000年代での太平洋表層での¹³⁷Csの平面分布は、西部北太平洋中緯度域に極大を示し、北太平洋亜寒帯域で極小を示す分布であった。これらは、大規模核実験による降下のパターンと海洋内部の海盆規模の輸送により形成されたと考えることができる⁴⁾。東電福島第一原発事故以降に検出された¹³⁷Csは過去の核実験起源分に今回の東電福島第一原発事故由来が加わったものと判断できる。事実、東電福島第一原発事故により放出された¹³⁴Csと¹³⁷Csの放射能比が1であることを使い、¹³⁴Csの濃度から東電福島第一原発事故起源の¹³⁷Cs濃度を推定し、観測された¹³⁷Csから東電福島第一原発事故起源分を差し引くと、その濃度は過去の核実験起源分と整合している。

¹³⁷Csが海洋表面に最も多く降下したのは大気圏核実験が盛んに行われた1960年代の前半である⁵⁾。1957年以来、50年以上にわたり、全海洋において海水中の放射性核種濃度が測定されてきた。また、Aoyama *et al.* (2006)⁶⁾は、海洋に対する付加量として重要な核実験起源の¹³⁷Cs降下量の総合評価を行った。降下物データ、土壌及び海水カラム量などを世界中から収集し、北半球での降下量を10度メッシュごとに見積った。その結果、従来、信じ

られていた国連科学委員会の報告値の約1.4倍の 765 ± 79 PBq(1970年1月時点)という値を評価値として得た。国連科学委員会で採用されている考え方「降水量は経度方向には一定」は、重要な因子である「降水量」と「成層圏-対流圏交換」の役割を正しく評価しておらず、アジア大陸東側や北米大陸東側での降下量極大域が無視されていた。そのため、従来の評価値は小さな数値となっていた。さらに作成された10度メッシュデータを使って、北太平洋に降下した¹³⁷Csの総量の評価が可能となり、1970年1月時点で¹³⁷Csは290 PBq存在していたと推定できた。

北太平洋での降下の特徴としては、日本を含む亜熱帯循環北西側での降下量が大きいことが挙げられる。2000年代での著者らの観測結果とモデルによる計算結果は、2002年の時点でおよそ85 PBqの¹³⁷Csが北太平洋に存在していたことを示しており、さらに放射壊変を考慮すると2011年の東電福島事故以前の北太平洋での¹³⁷Csの総量は69 PBqに減少していたと推定される。1970年からのこの減少は¹³⁷Csの半減期が30年であるので、放射壊変により約1/2となっているとともに、後述する北太平洋からインド洋を経由して大西洋への輸送および南太平洋への輸送による減少の結果である。¹³⁷Csは、北太平洋中緯度西部に降下したあと海洋内部の輸送過程に従って輸送された(第2図)。

降下後ほぼ40年経過した2000年代での海洋内部の分布の特徴として、亜熱帯循環南側の広い範囲で、深さにして400~600 m、密度にして $1,026.0 \sim 1,026.5$ kg m^{-3} 付近に濃度の極大が観測されていることを挙げるができる⁷⁾。これらの極大は中央モード水による¹³⁷Csの海洋内部の輸送経路を明瞭に捉えたものであり、世界で初めて明らかになった¹³⁷Csの海洋内部での3次元分布である。¹³⁷Csは、太平洋全域では海洋内部を北緯24度付近の日付変更線の東側では南西方向に輸送されるが、西端で深度が浅くなるとともに向きを変え赤道に沿う東向き輸送となり、太平洋の東端で赤道を越え、赤道の南で今度は逆方向である西向きに輸送される。亜熱帯循環に沿って南西方向に輸送された¹³⁷Csは、インドネシア通



第2図 太平洋での輸送経路

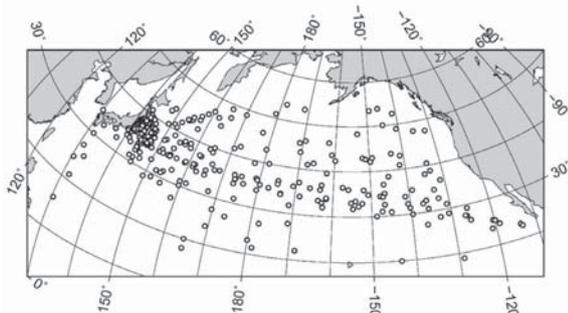
過流としてインド洋さらには大西洋まで輸送される。さらに北太平洋では亜熱帯循環に沿って日本沿岸に戻っている。このことにより、最近の日本沿岸では表層海水中 ^{137}Cs 濃度が減少してこなかった。

Ⅲ. 北太平洋全域での東電福島第一原発事故後の観測結果

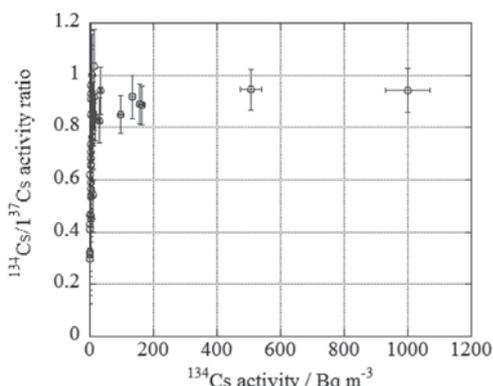
著者は、2011年4月から2012年3月にかけて東電福島第一原発事故による放射性セシウム同位体(^{134}Cs と ^{137}Cs)の広がりを知るため北太平洋全域で観測を実施した。

第3図に東電福島第一原発事故以降の太平洋での試料採取の全地点を示す。これらの地点には気象研究所単独ではなく、他の研究機関と共同で行った試料採取地点も含まれている。コンテナ船や自動車輸送船のような篤志船に依頼した場合は表面水のみ採取であり、試料量は通常2リットルとしている。観測船/研究船の場合は表面水以外に鉛直方向にも採取し、試料の量は10~20リットルである。

^{134}Cs の半減期は2年であり、過去の大気圏核実験や原子力事故等で海洋に放出された ^{134}Cs 濃度は東電福島第一原発事故以前では検出限界以下となっていたこと、および検出された ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能比はほぼ1(第4図)であり、東電福島第一原発事故サイト近傍での ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能比は $0.99 \pm 0.03^8)$ であったことから、検出された ^{134}Cs は東電福島第一原発事故由来であると判



第3図 東電福島第一原発事故以降の太平洋での試料採取の全地点



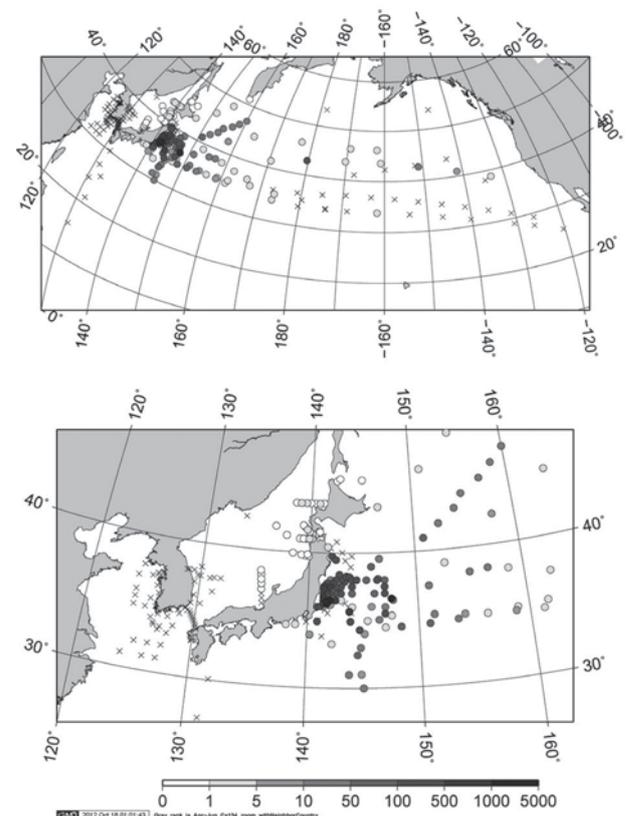
第4図 ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能比

断できる。

Ⅳ. 福島事故起源放射性セシウムの東への広がり

2011年4~6月に観測された結果を、著者ら⁴⁾のものだけでなく国内外の研究者^{9,10)}の結果もすべて合わせて第5図に示す。第5図によると、東電福島第一原発から大気に放出された放射性セシウムが日本から主に東や北東方向へ大気経路で輸送された結果を反映し、西部北太平洋高緯度域で濃度が高い。また日本海側や日本の北および南では濃度が低いことがわかる(第5図下)。また、北太平洋のところどころに大気経路で輸送されたものが局所的に降下してできたと考えられる周辺より高濃度となっている領域が北緯40度と北緯50度の間、日付変更線付近や西経140度から150度付近に見える。これらの周辺より高濃度となっている領域は、大気中を輸送されている間に降水に伴って局地的に降下した結果と判断できる。

横軸に経度、縦軸に表層での ^{137}Cs の濃度を取り、表層での ^{137}Cs の濃度が 10 Bq m^{-3} を越えていることを指標として東電福島第一原発事故起源の放射性セシウム同位体の東への広がりを見てみる(第6図)。表層での ^{137}Cs の濃度が 10 Bq m^{-3} を越える領域は2011年6月には東経160度までしか到達していなかったが(第6図(a)), その

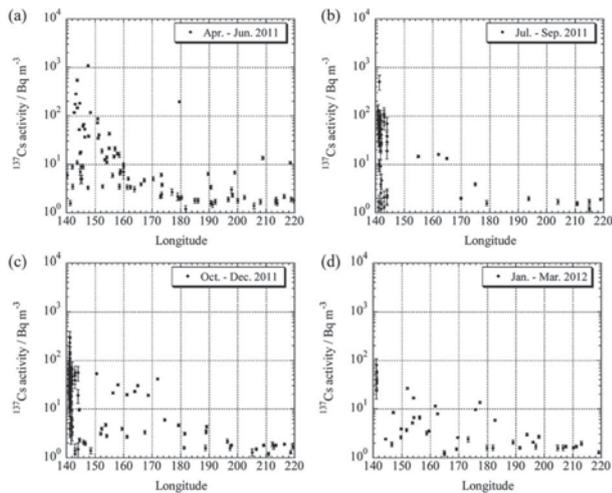


第5図 2011年4~6月の表層の ^{134}Cs 濃度(単位: Bq m^{-3})

(上: 太平洋全域, 下: 日本周辺拡大図)

○印はグレースケールと併せて濃度と場所を示す。

×印は検出下限値以下(およそ 0.4 Bq m^{-3} 以下)



第6図 東電福島事故起源放射性セシウムの東への広がり

後、海洋表層での輸送により東に移動し、2011年7～9月には東経165度まで広がっている(第6図(b))。2011年10～12月には東経170度程度まで広がっており(第6図(c))、さらにその東側の東経170度から西経170度の領域でも、わずかな表層¹³⁷Cs濃度の上昇が見出されている。さらに、2012年1～3月では表層での¹³⁷Csの濃度が10 Bq m⁻³を越える領域は東経180度線(日付変更線)付近まで達していることが観測された(第6図(d))。この観測結果から東への移動速度を見積もると、270日間で1,800 km移動したことになり、8 cm s⁻¹という推定ができる。海洋物理学の観測から見積もられているこの海域での表層の流速は4～16 cm s⁻¹であることから、得られた速度は環境中に放出されたあと海洋表面から海洋に入った後よく溶けて、海水とともに輸送されていると考えることができることを示している。

V. 大気への放出総量の推定

大気への放出量シナリオ(¹³⁴Csで8.8 PBq)を設定した3種類の大气拡散シミュレーション(MASINGAR-1, MASINGAR mk-2, MRI-PM/r)及び北太平洋スケールの海洋拡散シミュレーションを実施した(Aoyama *et al.*, in preparation)。大気や海洋に放出された¹³⁴Csと¹³⁷Csの放射能比は、すでに述べたように観測によりほぼ1であった。北太平洋の外洋域における2011年4～5月の¹³⁴Csの観測結果の総量とシミュレーション結果を比較することによって、大気への放出シナリオの補正係数を求めた。その結果、¹³⁴Csと¹³⁷Csの大気への放出量はそれぞれ15～20 PBqと推定した。北太平洋に降下した¹³⁴Csと¹³⁷Csの放射能量はそれぞれ12～15 PBqと推定した。東電福島第一原発事故以前の北太平洋におけ

る¹³⁷Csの存在量は69 PBq¹⁾であった。¹³⁷Csの直接漏洩量の推定値 3.5 ± 0.7 PBq²⁾を加えると、東電福島第一原発事故によって、北太平洋の¹³⁷Csのインベントリーは22～27%増加したと推定した。

海水試料採取に協力いただいた17隻の商船に感謝する。(株)環境総合テクノスでの著者の方法による海水試料からの放射性セシウムの抽出および金沢大学環日本海域研究センター尾小屋地下測定室での極微量放射能測定が本研究の遂行に不可欠であった。また、試料採取からデータベース作成、図表の作成について研究室のスタッフである吉村幸子、工藤智子、島田詳子、杜青青の各氏に負うところが大きかった。記して感謝します。

—参考文献—

- 1) M. Aoyama, *et al.*, North Pacific distribution and budget of radiocesium released by the 2011 Fukushima nuclear accident
< <http://nsed.jaea.go.jp/ers/environment/envs/FukushimaWS/index.htm> > (2012).
- 2) D. Tsumune, *et al.*, *J. Environ. Radioact.*, **111**, 100-108 (2012).
- 3) Y. Inomata, *et al.*, *J. Environ. Monitoring*, **11**, 116-125 (2009).
- 4) M. Aoyama, *et al.*, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 1-5, (2012).
- 5) K. Hirose, *et al.*, *J. Meteorol. Soc. Jap., Ser. II*, **65**, 259-277 (1987).
- 6) M. Aoyama, *et al.*, *J. Environ. Monitoring*, **8**, 431-438 (2006).
- 7) M. Aoyama, *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L01604, (2008).
- 8) K. Buesseler, *et al.*, *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 9931-9935 (2011).
- 9) M. Inoue, *et al.*, *J. Environ. Radioact.*, **111**, 116-119 (2012).
- 10) K. O. Buesseler, *et al.*, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **109**, 5984-5988 (2012).

著者紹介



青山道夫(あおやま・みちお)
気象庁 気象研究所
(専門分野/関心分野)地球化学, 海洋化学,
環境放射能

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3回(最終回) 建屋・機器フラジリティ評価

鹿島建設(株) 美原 義徳

標準委員会では津波 PRA 標準を2012年2月8日に発行した。この標準について3回に分けて解説し、第3回では建屋・機器フラジリティ評価手順と要求事項について解説を行う。建屋・機器フラジリティ評価とは、炉心損傷に寄与する建屋及び機器の損傷確率を求めることであり、「評価対象と損傷モードの設定」、「評価手法の選択」、「現実的耐力の評価」、「現実的応答の評価」及び「損傷確率等の評価」の手順から構成される。本稿では、それらの詳細を述べる。また、原子力学会の津波 PRA 分科会で検討を行っている、東北地方太平洋沖地震での津波波力等による被害状況に関する最新知見を反映したフラジリティ評価事例の検討状況についても触れる。

I. はじめに

日本原子力学会の標準委員会ならびにリスク専門部会では、津波の確率論的リスク評価(PRA: Probabilistic Risk Assessment)を実施することが喫緊の課題であるとの判断から津波 PRA 分科会を設置し、津波 PRA 標準(AESJ-SC-RK 004: 2011)を2012年2月8日に発行した¹⁾。

前々稿(第1回)では津波 PRA 標準の評価手順全体の概要を、前稿(第2回)では津波ハザード解析について述べた。本稿では、最終稿として、津波 PRA 標準の評価手順の中から建屋・機器フラジリティ評価について述べる。また、建屋・機器フラジリティ評価では、津波による被害事例を踏まえることが非常に重要であるので、東北地方太平洋沖地震等の最新知見を反映した評価事例の検討状況についても触れる。

II. 建屋・機器フラジリティ評価

1. 評価手順の概要

津波 PRA 標準における建屋・機器フラジリティ評価手順は、「評価対象と損傷モードの設定」、「評価手法の選択」、「現実的耐力の評価」、「現実的応答の評価」及び「フラジリティの評価」の各評価ステップから構成される。

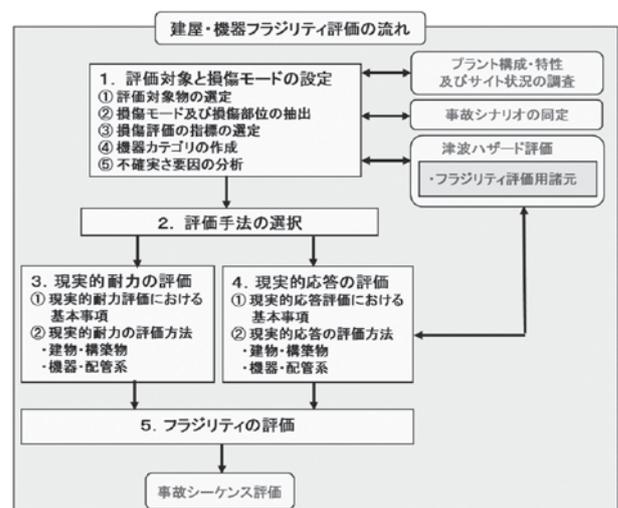
The Tsunami Probabilistic Risk Assessment of Nuclear Power Plants(3); Outline of Tsunami Fragility Analysis: Yoshinori MIHARA.

(2012年10月4日 受理)

■前回のタイトル

第2回 津波ハザード解析

る。建屋・機器フラジリティ評価では、前稿で述べた「津波ハザード評価」から得られるフラジリティ評価用津波諸元(津波水位の時間変化等)に基づき、津波による建屋及び機器の様々な損傷モードに対する損傷確率(任意の津波高さにおける現実的応答が現実的耐力を上回る確率)を算定し、その評価結果は前々稿で述べた「事故シナリオ評価」に用いることとなる。また、「事故シナリオ評価」で得られる炉心損傷頻度に影響を与える建屋・機器に対して、津波対策を実施し、フラジリティ評価を改善するプロセスを繰り返し行うことで、津波に対する全体リスクが低減されることになる。建屋・機器フラジリティ評価手順の流れを第1図に示す。



第1図 建屋・機器フラジリティ評価手順の流れ

2. 評価対象と損傷モードの設定

(1) 評価対象物の選定

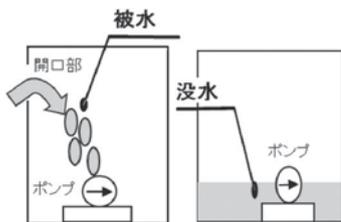
フラジリティ評価の対象は、前々稿で述べた建屋・機器リストに記載されたものとする。さらに、評価対象物の選定に当たっては、炉心損傷に大きな影響を及ぼすもの、過去の津波 PRA で安全上重要な機器とされているもの、過去の津波による被害事例から損傷しやすいことが分かっている施設及びシビアアクシデント対策に関連する建屋・機器に留意する。

(2) 損傷モード及び部位の抽出

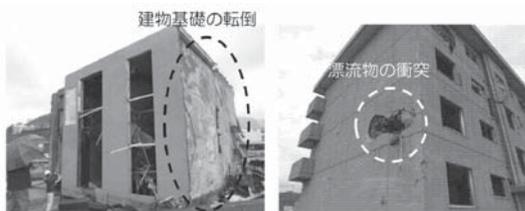
東北地方太平洋沖地震の津波による被害事例からは、様々な損傷モードが報告されている^{2,3)}。それらを踏まえて、建屋及び機器のフラジリティ評価では、津波の被水・没水(第2図)、波力(第3図(a))、洗掘(第3図(c))、漂流物衝突(第3図(b))及び海底砂移動による損傷モードを考慮する。津波の洗掘及び海底砂移動による損傷モード及び部位の抽出では、津波水位の時間変化に加えて、津波ハザード評価から得られるサイト周辺地域の隆起あるいは沈下に留意する。なお、津波による対象漂流物の選定に際しては、当該サイトに影響を与える可能性のある漂流物の位置・種類・頻度に留意し、支配的な津波波源から当該サイトまでに存在する漂流物の発生頻度が炉心損傷頻度に比べて小さい場合、もしくは、当該サイトに接岸していない船舶に対しては対象外としてもよい。

(3) 損傷評価の指標の選定

フラジリティ評価対象の損傷の程度を表すことができる現実的応答量を損傷評価の指標とする。損傷評価の指



第2図 津波による被水・没水の損傷概念



(a) 波力による転倒 (b) 漂流物衝突による局部損傷



(c) 洗掘による安定性の喪失

第3図 津波による被害事例²⁾

標は、建物・構築物及び機器に対する津波による被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動に伴う機能喪失を表す物理量の遡上高、浸水高、堆積高、応力、変位などから適切に選定する。また、損傷評価の指標は、フラジリティ曲線(当該サイト海岸線での津波水位とこの水位による機能喪失確率との関係曲線)の横軸を規定する津波水位とは異なり、この津波水位で規定された津波が対象建物・構築物の場所まで浸水あるいは遡上した場合に、それらが機能喪失する損傷確率を求めるための指標である。損傷評価の指標の一例を第1表に示す。

(4) 不確かさ要因の分析

現実的耐力及び現実的応答の評価に当たっては、それぞれの確率量に影響を及ぼす要因(以下、不確かさ要因という)を分析・抽出する。なお、不確かさは、偶然的な不確かさと認識論的不確かさに可能な範囲で分離して、整理する。例えば、津波の被水・没水の損傷モードを対象にした不確かさ要因の一例を第2表に示す。

3. 評価手法の選択

用途及び精度に応じて、対象物の現実的耐力及び現実的応答評価のための評価手法を選択する。選択に際しては、いずれかの手法を選択して評価してもよいし、適宜、組み合わせて評価してもよい。ただし、選択した評価手法の精度に応じて、認識論的不確かさを専門家による判断等に基づき適切に考慮する。なお、公開されていない新たな手法を選択してもよいが、その場合には、その手法の科学的合理性を定量的に示す必要がある。

第1表 損傷評価の指標の一例

対象設備		損傷モード	しきい値(耐力)	損傷評価の指標(応答)
屋外	取放水設備	津波波力や漂流物の衝突による破損	構造強度	応力
		浸水による取水ポンプの機能喪失	据付高	浸水高
		引き波による冷却水の喪失	炉心冷却可能時間	水位低下継続時間
	送電設備	砂移動に伴う海底地形変化による取放水口の閉塞	取放水口高	堆積高
屋内	炉心冷却設備	浸水による炉心冷却機能および熱除去機能の喪失	建屋開口高	浸水高

第2表 被水・没水による不確かさ要因の一例

損傷モード	評価項目	一般的な不確かさ要因	
		偶然的な不確かさ	認識論的不確かさ
被水没水	耐力評価	① 実験データに基づく耐水性に関する限界値 ② 複数の部品から構成された機器の設置高さ ③ 防水対策(シール等)の効果	① 実験データの統計的不足 ② 複数の津波による累積損傷の影響 ③ 防水対策(シール等)の施工誤差
	応答評価	① 潮位のばらつき ② 浸水高及び浸水深のばらつき ③ 遡上解析モデル(パラメータ) ④ 屋内での流入量評価(パラメータ) ⑤ 屋内での浸水経路評価(パラメータ)	① 遡上解析モデル(モデル化及び解析手法) ② 屋内での流入量評価(モデル化及び評価手法) ③ 屋内での浸水経路評価(モデル化及び評価手法)

4. 現実的耐力の評価

津波による被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的、機能的又は累積的損傷モードに対する現実的耐力の確率分布を評価する。津波の被水・没水による機能的損傷モードに対しては上下限値を有する確率分布を、津波の波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的及び機能的損傷モードに対しては対数正規分布を仮定する。なお、求められている評価用途及び精度等に応じて、津波の被水・没水による機能的損傷モードに対する現実的耐力をステップ関数として取り扱ってもよいとしている。例えば、津波の被水・没水による機能的損傷モードに対する現実的耐力評価の一般的な概念を第4図に示す。

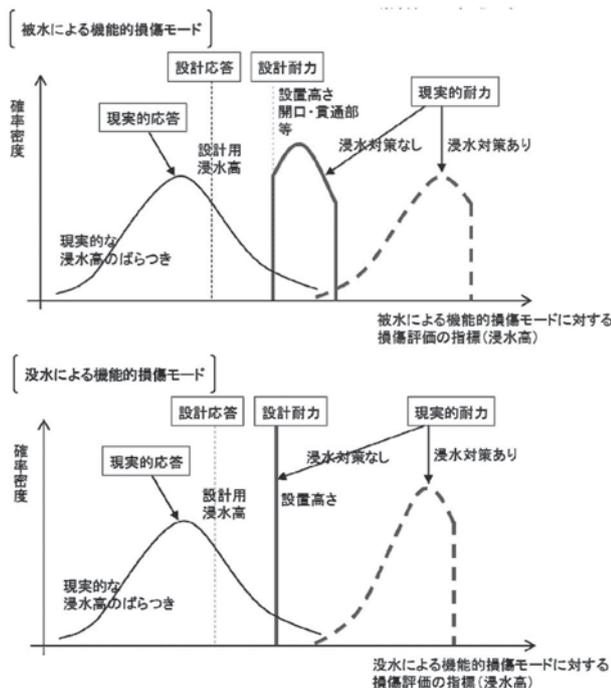
また、現実的耐力の評価は次の方法による。

- ・実験に基づく方法
- ・実験を含む経験に基づく方法
- ・解析を含む理論に基づく方法
- ・工学的な判断に基づく方法

ここで、現実的耐力評価に際しては、シビアアクシデント対策に基づく浸水対策等を必要に応じて考慮する。さらに、いずれの方法によっても確定的な損傷限界しか与えられない場合には、材料物性値などを確率変数とした不確実さ解析手法を用いて損傷限界の不確実さを評価する。材料物性値などの標準的なデータベースに関しては、地震PSA標準⁴⁾を参照してもよい。

5. 現実的応答の評価

(1) 基本事項



第4図 津波の被水・没水による機能的損傷モードに対する現実的耐力評価の一般的な概念¹⁾

津波による被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的、機能的又は累積的損傷モードに対する現実的応答の確率分布を評価する。例えば、津波の波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的損傷モードに対する現実的応答評価の一般的な概念を第5図に示す。

ここで、現実的応答の評価では、津波による浸水高、波力、流速、漂流物の衝撃荷重及び海底砂の移動量・範囲の評価に基づく現実的応答の評価が必要である。その際には、津波の押し波だけではなく、引き波による影響を考慮する。また、津波による浸水高、波力及び流速等に関連する現実的応答は確率変数として評価されるため、確定値しか与えられない場合には、評価方法を構成する各因子を確率変数とした不確実さ解析によって現実的応答の不確実さを評価する。不確実さ解析における、材料物性値などの標準的なデータベースに関しては、地震PSA標準⁴⁾を参照してもよい。

(2) 各損傷モードに対する現実的応答の評価

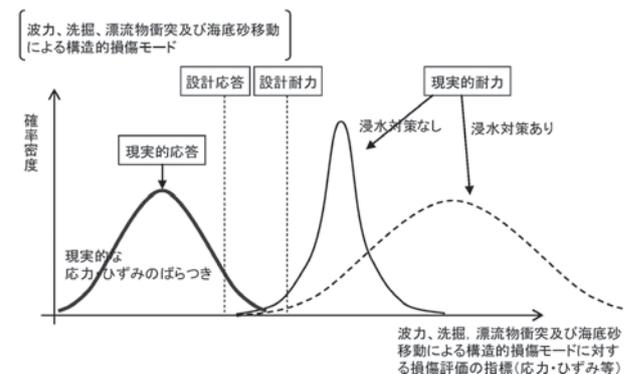
津波の被水・没水による屋外設備の損傷モードに対しては、遡上解析から得られる浸水高の評価に基づき算定する。屋内設備における津波の被水・没水の損傷モードに対しては、遡上解析、建物・構築物の局所的な構造損傷後の浸水経路及び複数の津波による累積効果を考慮し、当該機器周辺における浸水高に基づき算定する。

津波の波力による建屋・機器の損傷モードに対しては、遡上解析から得られる浸水高及び流速等に基づき、土木学会の評価法⁵⁾を用いて現実的応答を評価する。

津波の発生及び伝播に伴う海底砂移動による取放水設備の閉塞等の損傷モードに対しては、土木学会の評価法⁵⁾等を用いて津波による海底砂の移動量・範囲を評価する。

漂流物衝突による建屋・機器の損傷モードに対しては、遡上解析から得られる浸水高及び流速等の評価に基づき、土木学会の評価法⁵⁾等を用いて現実的応答を評価することが考えられる。

洗掘による建屋・機器の損傷モードに対しては、津波



第5図 津波の波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的損傷モードに対する現実的応答評価の一般的な概念¹⁾

による浸水高及び流速等に基づき、鉄道構造物等維持管理標準の評価法等⁶⁾を用いて周辺地盤の洗掘深さ・範囲を算定し、建物・構築物の安定性を評価することが考えられる。

6. フラジリティの評価

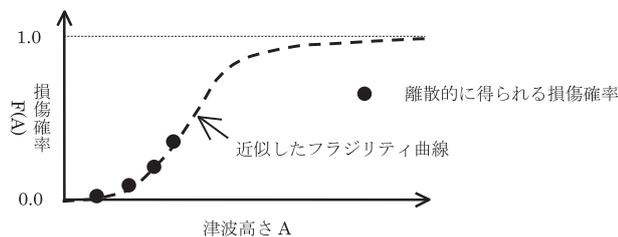
(1) 偶然的不確かさに対する評価

任意の津波高さに対する損傷確率は、津波高さがある値のときの現実的応答が現実的耐力を上回る条件付損傷確率として算定する。ここで、任意の津波高さを連続的に与えて損傷確率を求めると、結果としてフラジリティ曲線が得られるが、津波高さごとの計算量が膨大となるので、第6図に示すように、離散的に得られた損傷確率を用いて最小2乗法などによって内挿してフラジリティ曲線を算定してもよい。ただし、最小2乗法などによって対数正規累積分布関数などで近似して連続的なフラジリティ曲線を算定する場合、近似を仮定する分だけ、不確かさが増えることに留意する。

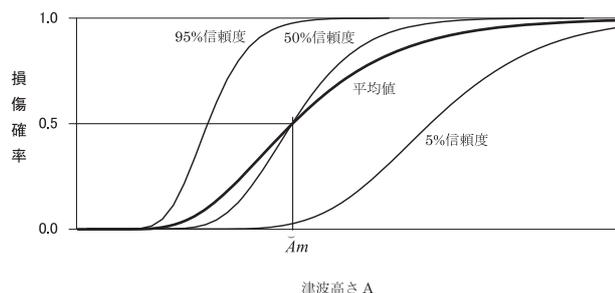
(2) 認識論的不確かさに対する評価

偶然的な不確かさに対するフラジリティ曲線の算定で得られるフラジリティ曲線の不確かさは、主として確率変数として考慮できる偶然的な不確かさであり、現実的耐力評価及び現実的応答評価において確率変数として考慮していない要因及び認識論的不確かさは、偶然的な不確かさに対するフラジリティ曲線に、第7図に示すように確率論的な考え方等を適用して信頼区間を含むフラジリティ曲線を算定する。ここで、選択した評価手法の精度等に対応するフラジリティ曲線の認識論的不確かさに関しては、専門家による判断等に基づきその値を適切に設定する必要がある。

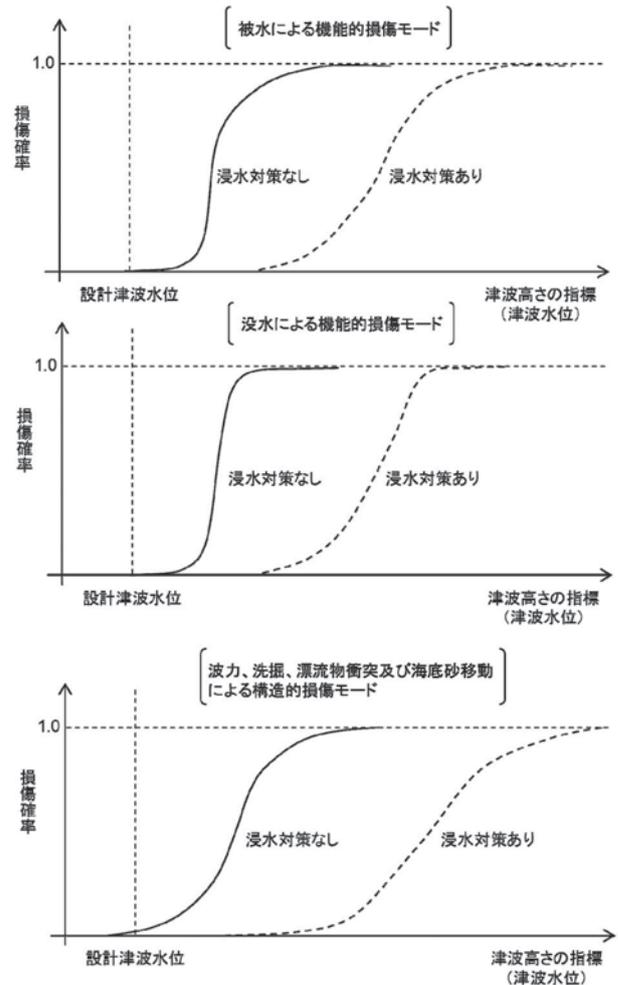
現実的耐力評価で考慮した浸水対策の有無に着目した、津波の被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海



第6図 近似したフラジリティ曲線の模式図¹⁾



第7図 信頼区間を含むフラジリティ曲線の模式図



第8図 浸水対策の有無に着目したフラジリティ曲線の一般的な概念¹⁾

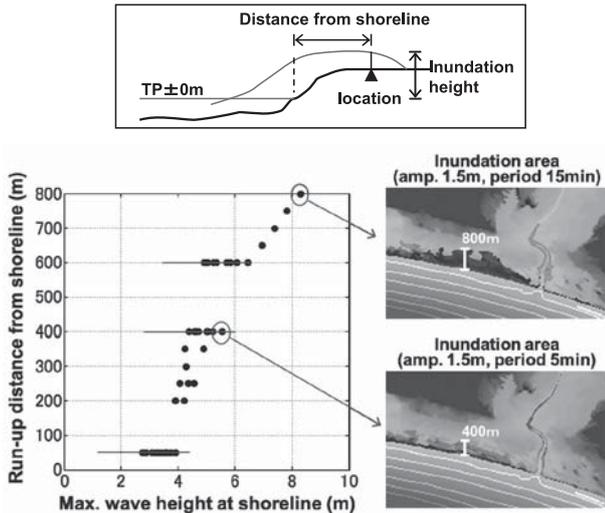
底砂移動による各損傷モードに対するフラジリティ曲線の一般的な概念を第8図に示す。

7. フラジリティ評価例

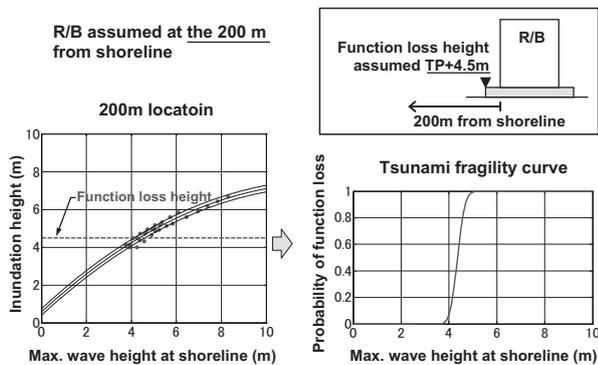
津波の被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的及び機能的損傷に至る損傷モードに対するフラジリティ評価例のうち、津波の陸上遡上を考慮した、津波の被水・没水に対するフラジリティ評価例を示す。

ここでは、開口部を有する原子炉建屋を対象とし、当該施設が立地する地点の津波による浸水高が開口部下端レベルを機能的損傷限界水位としてこのレベルを超えたときに機能的損傷モードに至ったこととする。

まず、評価対象地点の津波の浸水高(現実的応答)を評価するために、フラジリティ評価用の津波波源の設定及び、海岸線から評価対象地点までの陸上地形の影響を考慮した津波による陸上遡上解析を行う。ここでは、評価対象地点沖合に1周期分の正弦波を想定した。この正弦波の振幅及び周期をパラメータとした陸上遡上解析を行い、仮想波源ごとに評価対象地点における浸水高を評価



第9図 海岸線での最大津波水位と海岸線からの陸上遡上距離の関係



第10図 海岸線から200 m地点における浸水高(左図)と海岸線での最大津波水位の関係とフラジリティ曲線の評価例(右図)¹⁾

した。海岸線での最大津波高さや海岸線からの陸上遡上距離の関係を第9図に示す。

最後に、海岸線から200 m地点に原子炉建屋が立地するとして、機能的損傷限界水位を超える条件付き確率により求めたフラジリティ曲線の評価例を第10図に示す。

Ⅲ. おわりに

原子力学会の津波PRA分科会では、最新知見を反映するための適用事例集を本標準の別冊として作成し、今後の発行を予定している。建屋・機器フラジリティ評価に関連する適用事例としては、東北地方太平洋沖地震等の最新知見を反映した、津波の波力、漂流物衝突及び海底砂移動に対するフラジリティ評価例の作成に注力しているところである。また、建屋・機器フラジリティ評価に与える影響が大きいと考えられる、地震と津波の相互作用についての改訂版の検討も開始した。

以上に示すように、建屋・機器フラジリティ評価では現状で研究途上もしくは未開発の評価法が多く、特に以下の4項目に関しては、評価法の認識論的不確実さが大

きいため、精度の良い評価法の開発が今後望まれる。

- (1) 複数の津波による経時的な累積効果を考慮した、被水・没水による関連設備の累積的損傷に対する現実的耐力及び現実的応答評価法
- (2) 津波の洗掘による建物・構築物の安定性に係る構造的損傷に対する現実的耐力及び現実的応答評価法
- (3) 津波の漂流物衝突による関連設備の構造的及び機能的損傷に対する現実的耐力及び現実的応答評価法
- (4) 各損傷モードが複合した構造的、機能的及び累積的損傷に対する現実的耐力及び現実的応答評価法

最後に、津波PRA手法の標準策定により、我が国の原子力発電所における津波リスク評価が進み、安全設計・運転管理・安全規制などの広い分野におけるリスク情報の高度な活用による安全性の向上、意思決定プロセスの支援となることを期待するものである。

(用語解説)

- (1) 偶然的な不確かさ

データ又は現象が持つ固有のランダム性による不確かさで、構造材料及び地盤などの物性値のばらつきがあげられる。

- (2) 認識論的不確かさ

解析手法又はモデル化における知識及び認識に係る不確かさで、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かさである。

—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) 東京大学生産技術研究所, 平成23年度建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書その2, (2011.10).
<http://www.mlit.go.jp/common/000172792.pdf>
- 3) 亀田弘行, 原子力発電所の安全に対する地震工学の課題, 日本地震工学会誌, 第15号, (2011.10).
- 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) 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).
- 6) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編, 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)基礎構造物・抗土圧構造物, (2007.1).

著者紹介



美原義徳(みはら よしのり)

鹿島建設(株) 原子力部

(専門分野/関心分野)建物・構築物の耐震設計及び構造解析, 鉄筋コンクリート構造物の破壊力学及びマイクロメカニクス。

東日本大震災におけるエネルギーインフラの被害調査と問題分析

日本機械学会東日本大震災調査・提言分科会 WG5 の活動

信州大学 小泉 安郎, 神戸大学 浅野 等, 電気通信大学 大川 富雄

日本機械学会の『東日本大震災調査・提言分科会WG5 エネルギーインフラの諸問題』の活動紹介である。原子力、火力、エネルギーシステム、エネルギー政策の方面から、調査分析を行ってきた。これまでの現地調査、アンケート調査、公開情報調査と、分析検討から、WG5 内で話題となったことを中心に紹介する。

I. はじめに

日本機械学会では、2011年3月11日の東日本大震災発生後、直ちに日本機械学会会長の指揮の下、緊急タスクフォースが立ち上げられ、2年間の期限内で東日本大震災調査・提言分科会¹⁾が編成された。同分科会は7つのワーキンググループ(WG)で構成されており、本稿はそのうちの『WG5 エネルギーインフラの諸問題(主査:小泉(信州大), 幹事:浅野(神戸大), 大川(電通大))』の活動紹介である。

WG5の構成員は総勢38名であり、以下の4グループに分かれて、活動を行ってきた。

- A. 原子力 主査:小澤(関西大), 幹事:大川(電通大)
- B. 火力 主査:原口(日立), 幹事:浅野(神戸大)
- C. エネルギーシステム(送電・配電, 水力, 揚水発電, 分散電源, 太陽, 風力)
主査:刑部(東京海洋大), 幹事:中垣(早稲田大)
- D. エネルギー政策

主査:小泉(信州大), 幹事:犬丸(電中研)

WG5の活動は、機械技術者・研究者の目を通しての判断を基本に置き、現地調査、アンケート調査、公開情報調査を行い、分析検討と提言をまとめる方針で進められている。WG5内で話題となったことを中心に紹介する。

第1図に、東北地方、関東地方太平洋岸の原子力、火力発電所の立地状況を示す。日本の一大電力供給地に

Introduction of the Activity of the WG5 Damages of Energy Infrastructure in the Research Committee for the Urgent Surveys of the East Japan Great-Earthquake and Proposals of Future Measures of the Japan Society of Mechanical Engineers: Yasuo KOIZUMI, Hitoshi ASANO, Tomio OKAWA.

(2012年10月1日 受理)

なっていることが分かる。この地域が、今回の地震と津波により大きな被害を受けたことが、日本の国民の生活、経済に大きな影響をもたらしたことは言わずもがなである。

II. 原子力発電プラント

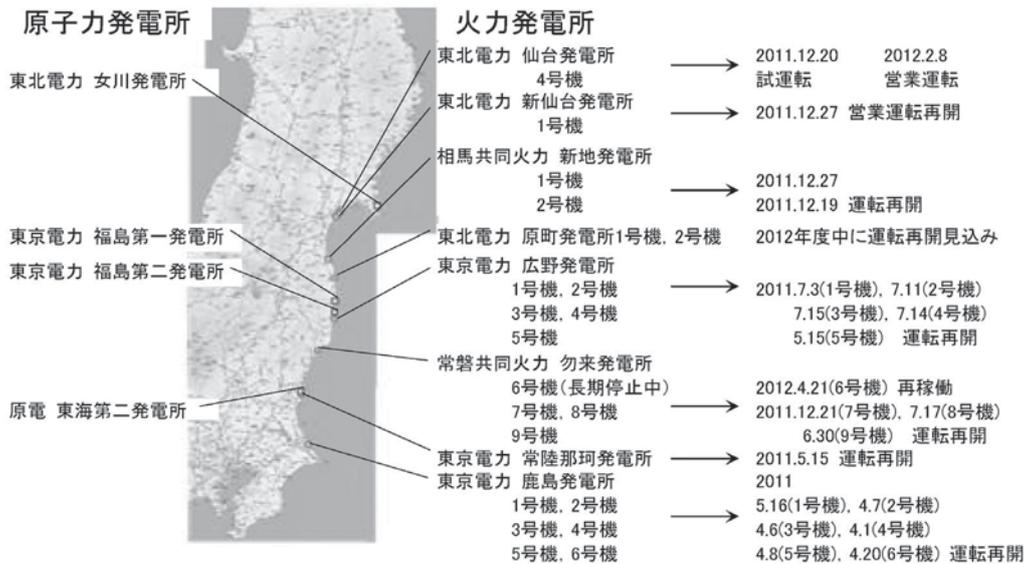
第1図中の各原子力発電所に加え、東北電力東通発電所、中部電力浜岡発電所、また日本原子力研究開発機構の研究炉を調査対象とした。

地震発生時、稼働中の炉はいずれも自動停止し、非常用電源は正常に起動した。調査したうち、外部電源の継続は7件に対し、停止は12件と多数に上っていた。地震時には、所内非常用電源確保の大切さが改めて示されている。電源盤内に地震動由来の短絡とそれによる火災発生事例があった。火災発生は地震後の対応活動に妨げになる可能性を有する。電源系統機能不全は、機器の不稼働をもたらす、場合によっては安全上見過ごせない結果を作り出す可能性があり、電源盤の地震動に対する堅牢性確保は重要と言える。

地震により、発電所への道路の崖崩れが発生していた。また、建物の天井崩落もあった。これらは、復旧対応へ影響を与えるものであり、対応が求められる。

津波では、福島第一発電所で、敷地高さを津波高さが超えてしまい、結果として不幸な事故に至ってしまった。各原子力発電所では、津波想定高さについて見直しを行ってきたが、新しい知見、学問・技術の進歩に合わせ、継続的対応の大切さが読み取れる。

津波襲来により、水冷の非常用ディーゼル発電機の冷却用海水ポンプモーターが冠水し、機能不全に陥っている。東海第二発電所で免震重要棟屋上にあったガスタービン発電機が、あるいは福島第一発電所6号機の空冷の非常用ディーゼル発電機が機能を維持したことは好対



第1図 東北地方, 関東地方太平洋岸の原子力, 火力発電所

照である。機能を維持した空冷の非常用発電機は、津波襲来後の対応に、現場での様々な工夫を通して極めて有効に働いた。非常用電源の多重性に加えて多様性確保が大切と言える。

海水ポンプエリアの浸水対策の重要性が改めて理解される。東海第二発電所では、防波壁防水工事の未完了の海水ポンプエリアに海水の浸入があり、冷却用海水ポンプが冠水して、1台の非常用ディーゼル発電機機能喪失があったが、防水工事完了エリアには海水の浸入はなく、2台の非常用ディーゼル発電機及び原子炉冷却系は機能を発揮した。このことは、津波襲来に対し、水密性を確保する防水対策の重要性が示され、技術的に対応可能であり、教訓とすべき一例と考えられる。

女川発電所では、津波対策高台配置のため敷地の冠水はなかったものの、2台の非常用ディーゼル発電機が停止している。海面水位計収納箱頂部の水密性が十分ではなく、海水がここから原子炉建屋に流れ込み、冷却水用ポンプモータが冠水して非常用ディーゼル発電機停止をもたらした。この例が示すように、水の浸入経路については細心の注意を持って対応する必要性が示唆される。

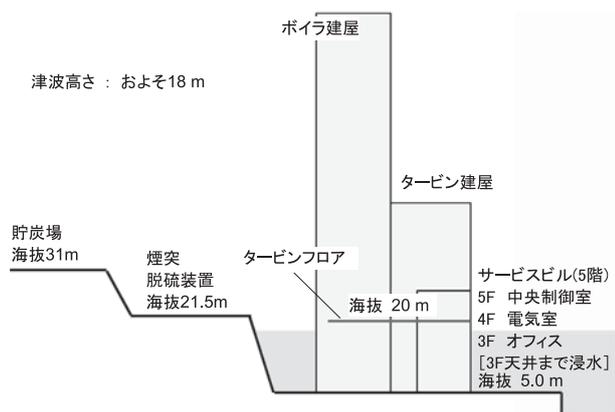
思い起こされるのは、中越沖地震のことである。中越沖地震では、耐震Sクラス機器では全く問題はなかったのであるが、Cクラス以下の部分で、例えば変電設備の火災、あるいはSクラス設備とCクラス設備の接続部分で問題が発生していた。このたびの震災、津波、その後の展開を見た場合、このことへの反省が浮かび上がる。システムは全体として統合されて初めて機能を発揮する。安全性上重要でない装置であっても、地震によってであろうと津波によってであろうとその機能喪失あるいは異常発生が、例えば火災発生のように、システム全体へ及ぼす影響をきめ細かに評価しておくことが大切と考える。

2011年10月、大阪で開催された「第19回原子力工学国際会議(ICONE 19)」の福島第一原子力発電所災害セッションで、米国原子力規制委員会(Nuclear Regulatory Commission: NRC)前委員長ディアズ氏から以下の指摘があった。ニューヨークの9.11テロの後、NRCはテロを要因として全電源喪失が発生する可能性を指摘し、いかなる状況下でも炉心冷却維持ができるようその対応を事業者に求めるとともに、日本にも伝達している。日本はそれを活用できなかったことは大変残念である、と。東海2号炉の海水ポンプエリア封止工事について前述したが、この事例は、リスク要因を人知の限り探し出し、一つ一つ丁寧にそのリスク要因を取り除いていく日々の努力の積み上げが、結局のところ原子炉の強靱性を作り出していくことを指し示しているように感じられる。このことは、技術的に不可能なことではなく、正にその可能性を東海2号炉の海水ポンプエリア防水工事例は示しているのではないかと考えられる。ディアズ氏のテロ要因全電源喪失発生への対応指摘は、要因がテロであろうとなかろうと、全電源喪失に至るリスク要因の洗い出しとそれへの対策を講じる端緒を与えることになったはずである。福島第一発電所事故のようなことを二度と起こさせないよう対応することは技術的に不可能なことではなく、技術の敗北ではないと感じられる次第である。

Ⅲ. 火力発電プラント

火力発電所では、第1図に示す調査対象において、地震、その後の津波、さらには液状化や地盤沈下によって甚大な被害を受けた。

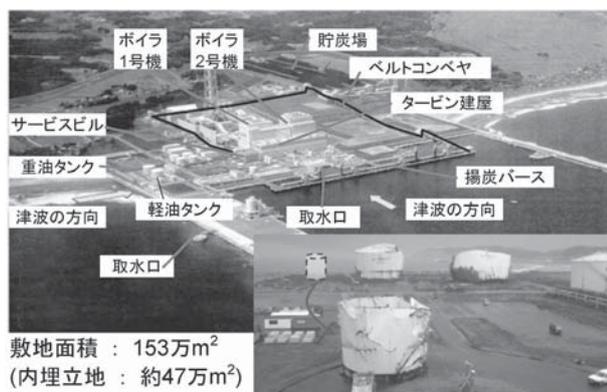
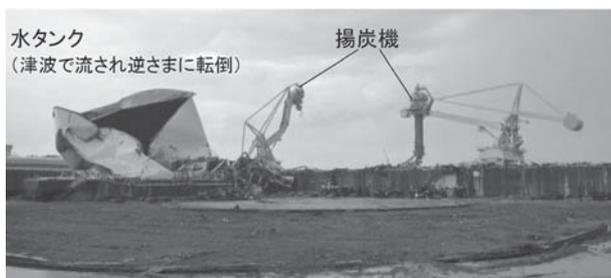
被害が最も大きかった原町火力発電所の被災状況を第2～5図に示す。第2図にあるように、18mもの高さの津波によって主要部は全て冠水した。第3図にあるように、発電所は2方向から津波に襲われた。海岸線にあっ



第2図 原町火力発電所における津波冠水状況



第5図 原町火力発電所サービスビル津波被害

第3図 原町火力発電所における津波浸入方向
(外観は津波襲来以前)第4図 原町火力発電所において津波で流された
タンクと破壊された揚炭機

た重油タンクは流され、重油は敷地内にまき散らされ、その処理に随分苦労した。第4図にあるように、水タンクは転倒し完全に破壊された。約1,000トンもある揚炭機はいとも簡単に津波によって破壊された。第5図はサービスビル2階であるが、震災前の状況は見る影もなく破壊され、車が流れ込んでいる。

原町火力発電所ほか、被害調査結果は以下のようにまとめられる。地震の揺れによる設備の被害は小さく、発電プラントは速やかに安全に停止し、ボイラや蒸気タービン等主要機器の被害は小さいものであった。ただし、配電盤からの火災発生があった。一部、人的被害があったことは残念ではあるが、所員の待避はマニュアルどおりに実施された。送電線の被害も報告されている。所内

敷地で液状化や陥没が起こり、復旧工事の大きな妨げになった。阪神淡路大震災の経験が生き、耐震設計や対応マニュアルは威力を発揮した。今後、火災発生や液状化など2次災害を想定したマニュアルの作成が課題である。

津波では、甚大な被害が発生した。押し寄せる津波の力により、重量物であるにもかかわらず、揚炭機は破壊され、重油、軽油、水タンク類はつぶされ、流された。また、冠水の結果、電気集塵器や通風機、排気設備など、体積大で軽量なものには浮力が発生し、大きく破壊された。冷却水用の種々の海水ポンプのモータが冠水し機能不全に陥った。人的被害も発生している。非常用電源の確保に改善の余地がある。非常用電源は設備の維持管理に加え、所員の安全確保のための通信用に必要である。

被災後、各火力発電所では、短期間に驚異的なスピードで復旧がなされ、長期計画停電の回避につながっている。第1図に各火力発電所の運転再開状況を示す。東京電力は、喪失、停止した福島原子力発電所発電分を、また、他地域で順次停止されていく原子力発電所発電分を代替すべく、火力発電所をフル稼働に移し、定期検査を延期あるいは短縮し、長期計画停止中の火力発電プラントを再稼働することで、供給電力の確保を図った。さらには、第6図に示すように、小型発電設備を大量に導入し、電力供給力安定化を図った。このことは、他の電力会社でも同様であった。その結果、第7図に示すように、我が国の電源から原子力発電が姿を消し、その低減分を全て火力発電に大きく頼る結果となった。現在も国内で稼働している原子力発電炉は2基のみであり、この状況は変わっていない。

この結果は、由々しき問題を我々に突きつけている。計画停止中であった火力発電所の運転開始は古く、旧型であり熱効率が低い。燃料費はかさみ、CO₂排出量の増大を招いている。原子力発電と比べればなおさらのことである。小型発電設備は、熱効率はさらに低く悪影響が大きい。これまで、エネルギー資源を持たない日本では原子力発電が電力ベースロードを担って、火力は負荷調整を担当してきた。火力発電所では、負荷調整停止時に設備点検を行い、不具合箇所への対応を行ってきた。し

東京電力における小型発電設備の導入 合計:284.36 万 kW

1. 千葉発電所 100.2 万 kW
 - ガスタービン(33.4 万kW, MHI)×3台 (2011年8~9月)
 - コンバインド化を検討
2. 姉崎発電所 0.56 万 kW
 - ディーゼル(0.14 万kW, 現代)×4台(2011年4月)
3. 袖ヶ浦発電所 11.22 万 kW
 - ガスエンジン(0.11 万kW, アグレコ)×102台
 - (2011年6~7月) リース
4. 横須賀発電所 32.96万 kW
 - ガスタービン(2.63 万kW)×7台, (2.32 万kW)×3台
 - (2.53 万kW)×3台 (2011年6~7月) リース
5. 川崎発電所 12.8万 kW
 - ガスタービン(12.8 万kW, MHI)×1台 (2011年8月)
6. 鹿島発電所 80.4万 kW
 - ガスタービン(26.8 万kW, GE)×3台 (2012年7月)
 - コンバインド化を検討
7. 大井発電所 20.9万 kW
 - ガスタービン(12.8 万kW, MHI)×1台,
 - (8.1 万kW, GE)×1台 (2011年8月)
8. 常陸那珂発電所 25.32万 kW
 - ガスタービン (2011年7月)
 - ディーゼル

電気新聞 2011年 12月 7日(水)より抜粋

第6図 緊急小型発電設備の導入

かし、火力発電所がベースロードを担当し、長期間フル稼働状態となると、設備点検は置き去りとなり、いずれ破綻が生じると十分予測される。火力発電所への依存を大きくすることは、燃料費としての海外への資産流出による経済状況の悪化、CO₂排出量の増大による環境負荷の増大、さらには安全性への懸念の増大につながり、国民に大きな負担を強いることになる。このような電源構成状態が持続可能であるか、我が国にとって望ましい状態であるか、十分議論しなければならないと言える。

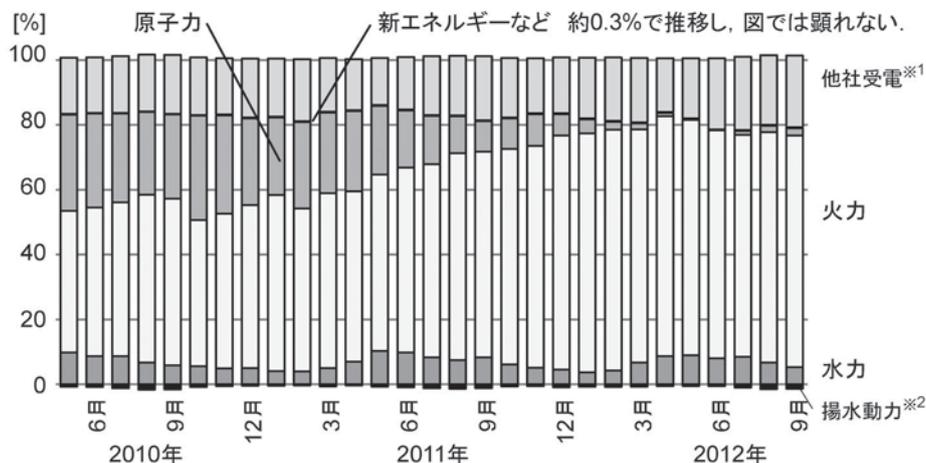
仮に、原子力発電の本格的再開がならず、あるいは再開がなったところで脱原子力の方向性となれば、現今、話題に上がる自然エネルギーですぐに代替できるとは考えられず、結局、第7図のような火力依存状態が今後継

続することになる。その場合、当然ながら熱効率改善、燃料費の節減、CO₂排出量低減は、必ず進めなければならない。新技術開発、新鋭プラントの導入が求められることになる。原子力をどうしていくか、脱原発はできるか、それに耐えうるかは、結局のところ、火力発電技術の問題になると言えなくもない。

火力発電で、第1図に示すように、驚異の早期復旧ができたことは、前述したように、地震の揺れで大きな損傷被害が発生しなかったことによる。火力発電設備の頑健さが印象に残る。しかし、これは長い技術の発展の歴史の結果であることを見逃してはならない。1800年代にボイラの大型化、高圧化が進められた結果、米国では1900年頃には、年間300~400件のボイラ爆発事故があり、年間約千人の命が失われた歴史がある。それに対処すべくボイラ規格の整備が進められ、第三者検査制度を確立し、今日の頑健な火力発電技術に至った。技術の成熟に、200年の年限を要している。この観点で原子力発電技術を見た場合、日本では商業用原子力発電が開始してから46年でしかない。この短期間によくここまで成熟したと見ることもできる。原子力発電技術の脆弱さのみに目を向けがちであるが、技術の発展には時間が必要であり、その過程で不幸なことが起きることもあるかも知れないが、それを教訓として技術の成熟を図る姿勢も必要ではないかとも感じられる。

IV. エネルギーシステム・インフラ

地震により、発電設備でブッシングや、碍子の破損が起き、耐震性強化の必要性が見られた。配電系では、阪神淡路大震災の教訓を受けてなされた改善が効果的に働き、被害率は大幅に低下していた。たゆまぬ改善の努力の大きさが感じ取れる。地盤液状化による埋設管路配電系の被害が目立っている。今後の検討が必要と言える。



※1 他社受電は電力10社以外の事業者による発電量である。

※2 揚水動力は使用電力なので負の値であり、揚水動力に使用した分、発電量は100%を超える。

電気事業連合会 電力データ (<http://www.fepec.or.jp/library/data/index.html>) を加工

第7図 発電量電源内訳の震災前後の推移(電力10社合計、発電受電電力量の総量に対する割合)

津波では、送電鉄塔の倒壊や、化学プラントで機器の物理的損壊や分電盤等の電気設備の浸水被害が起きている。防潮堤の強化も大切ではあるが、主要機器の防水強化等により減災を図ることがより効果的と考えられる。

仙台市では、ガス供給源が地震と津波で壊滅的被害を受けた。それにもかかわらず、日本海側からのガスパイプラインがあり、それによりガス供給を受けることにより、仙台市では1ヶ月でガス供給が再開されている。関東地方、東北地方は、ガス供給ネットワーク化がなされているが、他地域では不十分のようである。特に大地震発生、津波襲来が言われている東海、中京地区では、隣接地域同士、また日本海側との早期のガス供給ネットワーク化が求められる。

V. エネルギー政策

日本機械学会動力エネルギーシステム部門への登録者を対象にアンケート調査を行った。エネルギー技術関連の専門家達が現状をどう考えているかを探ることが目的であった。

アンケート結果から浮かび上がってきたことは、

- (1) 技術に対して失われた信頼回復を、機械技術者・研究者は真剣に議論し行動していく必要がある。
- (2) 日本は資源貧国であること、欧州などと異なり近隣諸国とのエネルギー相互連携が困難であること、産業を支える電力のベースロードは原子力が担ってきていることなど、我が国の現状を明確にして正しく認識することが重要である。
- (3) 長期的なエネルギーセキュリティなど、国益を考えたエネルギー政策の推進が必要である。国民の生活と産業の成長の両方を考慮し、再生可能エネルギーの適切な推進を含め、原子力の安全性を十分確保した上で、火力、原子力など既存の発電システムの特徴を見極め、最適なエネルギー供給構造の構築を目指すことが求められる。
- (4) 科学技術の発展により獲得してきた利便性や快適性(文明)を損なうことなく、省エネルギーを達成する技術に貢献することが、今後の機械技術者・研究者の大きな使命の一つである。

専門家達は、再生可能エネルギーの大切さを認識しつつも原子力を捨てきれぬものでないことを感じている。

現代人類の存立基盤は、一言で言ってしまうと食料とエネルギーと言える。現在の我々の社会は、エネルギーが安定で、大量に、しかも安価に供給されて成り立っている。このことは、1705年のニューコンメンの蒸気機関に始まる熱の動力化、すなわち火を燃やすと動力を得ることができることに突然人類が気付いたことに端を発している。熱の動力化に気付いて300年、技術の積み上げ

をなし、現在に至っている。熱を得るのに化石燃料を使用することはいとも簡単なことであるが、一方、人類は地球を守る、CO₂排出抑制という重い課題を負わされている。原子力の使用はこれに対応する重要な選択肢の一つである。

日本の姿形が、随分昔から今のような論調で最近議論される傾向を感じる。50年前の日本は、無舗装の道路で風が吹けば砂ぼこりが舞い上がる、夜の家では60 W 程度の電灯の下薄暗い部屋に家族が集う、冬になれば暖房はコタツ一つ、子供達は鼻を垂らし、平均余命も60歳そこそこの貧しい国であった。そんな中、TVから流れる米国の社会や生活情報、例えば『ビーバーちゃん』の番組から流れ出すライフスタイル、大きな電気冷蔵庫のある台所、そんなものを日本人は見つけられて、必死に働いて、追いかけて、現在を築き上げてきた。これがこの50~60年の日本の姿である。エネルギーコストを下げ、生産性を上げ、国、社会の豊かさ、快適さを蓄積してきた。これを忘れ、原子力発電所を止め、その結果として代替用に毎年、燃料費3兆円をこれまでの蓄財から海外へ払い続ける状態にある。

エネルギーは社会の基本であり、多くのことへ影響を与える。原子力について、技術をもう少し議論すべきではないか。本当に原子力は手に負えない技術であるか？危険性を押さえ込む、その術はないか？安心ではなく、合理性を持ってどこまでの安全性で許容できるか、冷静な議論をすべきと考える。きっと解決策はある。

— 参考資料 —

- 1) 東日本大震災調査・提言活動中間報告, 日本機械学会誌, 115(1123), 347-370(2012).

著者紹介



小泉安郎(こいずみ・やすお)
信州大学 繊維学部機械ロボット学系
(専門分野/関心分野)熱工学, 蒸気工学,
相変化伝熱, 気液二相流, 原子力安全性



浅野 等(あさの・ひとし)
神戸大学大学院 工学研究科
(専門分野/関心分野)熱流動現象, 気液二相流, 熱交換器



大川富雄(おおかわ・とみお)
電気通信大学 情報理工学研究科
(専門分野/関心分野)伝熱流動, 混相流,
エネルギー・環境

「福島事故は、なぜ防止できるのか」について

軽水炉問題研究会 斯波 正誼

本稿は、福島第一原子力発電所の事故のような原子炉事故を防止するため、内外の原子力発電所で実施された津波に対する対策や全交流電源喪失などに関する多数の安全対策を紹介し、これらの対策の原子炉事故に対する実効性について論じている。そして内外の軽水炉の安全対策の脆弱な部分に関する情報に注意し、安全対策を強化することの重要性を強調する。

I. はじめに

「福島事故は、なぜ防止できるのか」¹⁾は、100を超す資料を引用し、福島第一原子力発電所(以下、福島第一)事故の再発を防ぐため、内外の原子力発電所が実施した安全対策について論じており、ぜひ紹介したいと思った。

アクトン博士とヒップス氏(末尾を参照)執筆によるこの論文はカーネギー平和財団の不定期の刊行物であるカーネギー・ペーパーに掲載された。カーネギー・ペーパーは、国際政治やエネルギー問題に関する論文が取り上げられることが多い。

II. 事故の発生と拡大

2011年3月11日、宮城県沖で観測史上4番目に大きな東北地方太平洋沖地震が発生し、福島第一に襲来した。運転中の1～3号機が自動的に停止して、停止中の4～6号機とあわせて6基の軽水炉が停電した。各軽水炉に設置した非常用ディーゼル発電機が自動的に起動し安全上重要な系統や機器に電気を供給した。

約45分がたって、予想を大幅に上回る津波が襲来した。6号機を除く軽水炉の非常用ディーゼル発電機が浸水し構内の停電に加え非常用ディーゼル発電機も停止した。全交流電源の喪失である。

全交流電源の喪失のうち、1号機では蓄電池が水没し、非常用復水路が停止した。2,3号機では原子炉隔離時冷却系が数時間、作動したが、残留熱除去系などが停止、原子炉圧力容器の圧力が上昇したため、停止した。1～3号機ではこうして炉心を冷却して除熱した熱を海に捨てることができなくなった。

炉心冷却の喪失により、炉心の温度が上昇し、形状が変化し、燃料被覆管が水蒸気と反応し、水素が発生した。シビアアクシデントが発生したのである。放射性物質が原子炉建家から漏洩し周辺の空間線量率が上昇した。

炉心冷却を回復させるため原子炉圧力容器に直接冷却水を注入し圧力容器や格納容器のベントを行った。水素爆発が起こって1～4号機の原子炉建家の上部が崩壊し放射性物質が大気中や海中に漏出した。漏出量はチェルノブイル事故の漏出量の数分の1であった。2011年12月、1～3号機が冷温状態に達したと報じられた。

第Ⅲ章から第Ⅴ章では、福島第一の事故の発生と拡大に寄与した津波の襲来、全交流電源の喪失、残留熱除去系などの喪失(最終ヒートシンクの喪失)の3つの事象に対する安全対策について紹介する。

III. 津波による災害

1. 津波の予測

福島第一の海岸近くの敷地は基準潮位から5.4mから5.7mの高さであり、原子炉建家は基準潮位から10mの高さの台地上に設置された。3月11日に襲来した津波の高さは潮位計が喪失したので正確には分からないが、11.5mから15.5mと推定される。海水ポンプは海岸近くに、非常用ディーゼル発電機は台地上に設置されていたが、それぞれ津波によって喪失した²⁾。

福島第一を襲った津波の高さが想定を大幅に上回ったことについて我が国の中央防災会議は「過去数百年間に経験した最大級の津波や地震のうち、切迫性があり記録された地震動を再現できた地震について、震源モデルを考え、想定地震とした。地震動を再現できなかった貞観地震、慶長地震、延宝房総沖地震などは除外した。その結果、想定と実測との間に大きな相違が生じた。今後は全体像が十分解明できない津波や地震でも、想定地震を決定する場合には考慮する必要がある」と言っている³⁾。

ある調査によれば、1498年以来、日本列島には12回の大津波が襲来した。その全ての高さが10mを超え、そのうち6回の高さは20mを超えたという⁴⁾。内外の原子力発電所にも予想を上回る津波や地震が襲来した。2004年12月、インドのマドラス原子力発電所を津波が襲来、2007年7月、柏崎刈羽原子力発電所を中越沖地震が襲った。

国際原子力機関は、原子力発電所を襲う津波の高さを

¹⁾ "Why Fukushima was Preventable?": Masayoshi SHIBA. (2012年 10月31日 受理)

想定するには、できるだけ多くのデータを集めることを良き慣行として推奨している。ある専門家グループは、仙台平野の土壌の堆積を調査し多くのデータを収集してこの地域が何回も大津波に襲われたことを示した⁵⁾。

原子力の安全に万全を期すには、実効性の高い規範が必要であるが、我が国の原子力安全委員会が作る耐震設計安全審査指針⁶⁾は当初、津波に言及した箇所がなかった。2002年に改訂された耐震設計審査指針で、ようやく津波に言及する。日本の原子力安全規制は津波のリスクに対する認識が大変あまかった。

2. 津波に対する防護

福島第一の事故の以前から、経済開発協力機構/原子力機関(OECD/NEA)は専門家会合を開催しシビアアクシデントの発生防止や影響低減に関する知識を交換してきた。こうした知識や経験を利用すれば、福島第一や原子力安全・保安院(以下、保安院)は、事故の発生防止や影響低減のため、以下の対策を実施できたはずである。

すなわち、非常用ディーゼル発電機を高い所へ移す、非常用電源と原子炉との接続部分の防水性を強化する、防潮堤を建設する、設置目的が明確な非常用電源や冷却ポンプを防水性の良好な建家や部屋に設置する、非常用ディーゼル発電機用の燃料の確保といった対策である。これらの全部または一部を実施していれば、福島第一の事故の発生を未然に防止するか、影響を低減することができたであろう。

IV. 絶好の機会を逃がす

保安院は、供用の開始から30年以上が経った軽水炉に対して、原子力事業者が供用の延長を希望する場合には定期安全見直しを行うことを決めた。定期安全見直しは供用開始から60年を限度として、10年ごとに安全を阻害する可能性のある要因について、種々の検査を実施し、その結果に応じて延長を認めるかどうか判断することになっていた。供用の開始後に安全審査指針が改訂された場合は、最新の安全審査指針に対する適合性を審査することになっていた。

福島第一の1号機の供用の延長が申請され、定期安全見直しが行われることになった。これは、津波に対する対策を見直す良い機会であったが、構造物、系統、機器の経年劣化に重点がおかれて、津波に対する対策は全く取り上げられなかった。仮に、取り上げられていれば、津波の脅威に対する対策の実施を求めることもできたが、絶好の機会を逃がした。

東海第二発電所は福島第一の南約160 kmに位置する。この原子力発電所は津波の襲来に先立ち、津波の影響を低減して海水ポンプの喪失を防ぐ工事を実施していた。3月11日、津波が襲来したときに、工事はまだ完成していなかったが、3台の海水ポンプのうち1台が喪失した

だけで、2台は所期の機能を維持して、原子力発電所が停電しても非常用ディーゼル発電機が起動し炉心冷却を維持できたとのことである⁷⁾。

女川原子力発電所は、福島第一の北北東、約110 kmに位置する。事前の検討により、軽水炉の設置位置を当初計画から別の場所に変更した。3月11日には、福島第一などと同様に津波が襲来して、外部電源が喪失したが、非常用ディーゼル発電機は維持され、炉心冷却の喪失はまぬがれたとのことである⁸⁾。

V. 海外の良き慣行

福島第一が、良好な運転実績を記録していく一方で、海外では原子炉安全規制に携わる政府機関が、軽水炉の安全対策に脆弱な部分がないかと目を光らし、原子力事業者が軽水炉の安全上の課題の解決に工夫をこらした。

1. 全交流電源の喪失に対する対策

沸騰水型炉は、非常用ディーゼル発電機の他に非常用復水器や原子炉隔離時冷却系が設置されている。したがって全交流電源が喪失しても、一定の時間、炉心冷却を維持することができる。この間に交流電源を復旧して炉心の冷却を引き継げば、炉心の健全性を維持しシビアアクシデントの発生を防止することができる。加圧水型炉でも同様に、炉心冷却を維持することができる。

全交流電源が喪失した場合、交流電源を復旧するには以上の原則を理解しているだけでは勿論、役に立たない。予め全交流電源の喪失を想定し、予備の非常用ディーゼル発電機を設置し、作業手順書を作成し、要員を訓練し、機材や物資を揃えておく必要がある。海外の数カ国ではこれらの要求を法制化して強制力をもたせている。

1999年12月、フランスのプレイヤーズ原子力発電所に嵐が襲来し、河川の水位が上昇し、4基の加圧水型炉の交流電源の一部が停止し電話や道路も喪失した。原子炉安全規制に携わるフランスの政府機関は調査を行って、堤防が低すぎるうえ、交流電源の設置箇所の防水対策も不十分であると判断した。

フランスの政府機関は、国内の全ての原子力発電所に対し水位上昇を招く事象を特定し、原子力発電所ごとに交流電源、電話、道路の喪失を防止する対策を作成して実施するように命じた。いくつかの原子力発電所では、政府機関は堤防の嵩上げを命じた。別の原子力発電所は緊急時対応に使用する機器を防水対策が不十分な場所に設置していたが、政府機関は防水対策を強化するように命じた⁹⁾。

2. 最終ヒートシンクの喪失に対する対策

3月11日に、津波が襲来し、福島第一の海水ポンプが喪失して炉心で発生した熱を海に捨てることができなくなった。このため、原子炉圧力容器や原子炉格納容器の

内圧が上昇し原子炉隔離時冷却系が停止し、炉心や格納容器の冷却ができなくなった。

このような最終ヒートシンクの喪失に備える対策は、全交流電源喪失に備える対策ほど多くの原子力発電所で実施されてはいない。伝聞によれば、フランスのフラマンヴィユ原子力発電所の3号機は、最終ヒートシンクの喪失に備えて、代替のヒートシンクを設置した。英国のサイズウェルB原子力発電所でも核分裂反応の停止後、残留熱除去系を代替できる空冷の冷却系を設置した。

台湾の金山原子力発電所や、その他の原子力発電所は、最終ヒートシンクの喪失に備える対策を実施している。この発電所では外部電源の喪失を想定し非常用ディーゼル発電機や原子炉隔離時冷却系を設置している。加えて2基のガスタービン発電機を備え、最終ヒートシンクが喪失した場合、炉心冷却に必要な電気を供給するとともに、炉心で発生した熱を別途確保した貯水池に捨てる。この発電所においては、こうした予備の最終ヒートシンクを備えることにより炉心や格納容器の冷却が喪失することを防止している。

最終ヒートシンクの喪失のように原子炉の詳細設計に関する問題は、我が国では工事認可発給に関する安全審査で原子炉設計安全審査指針への適合性が審査されるが、設置許可発給に関する安全審査には2年間の期間を掛けるのに対して、工事認可発給に関する安全審査には3カ月程度の期間を掛けるに過ぎず、どうしても等閑になりがちである。工事認可発給に関する安全審査には、設置許可発給に関する安全審査と同程度の期間を掛ける必要がある。

3. 津波によるリスクの評価

アクトン、ヒップス両氏の論文では、殆ど触れられていないが、米国では1988年、沸騰水型炉における全交流電源の喪失のシビアアクシデントの発生に対する寄与が冷却材喪失事故などの他の事象の寄与と比べても小さくないことを見出した¹⁰⁾。このことは、非常用ディーゼル発電機の信頼性が高く、喪失確率が低いことと矛盾するように感じられる。しかし、当初少なかった外部事象に関する情報が取得されるようになると、矛盾するよう感じたのは、全交流電源の喪失確率を外部事象の影響を含めて評価していなかったためであることが分かった。

米国の原子炉安全規制では全交流電源の喪失に関する指針10CFR50.63と関連法規が1988年に制定され1998年と2007年に改訂された。そして、炉心冷却を維持しながら蓄電池を使い果たすまえに、交流電源を復旧するという原則が確立された。

2002年、世界初の外部事象に関する個別プラント調査IPEEE¹¹⁾が公表された。全交流電源の喪失については、10CFR50.63と関連法規に則った交流電源の復旧に関する対策を実施した場合と実施しない場合の軽水炉のシビア

アクシデントの発生確率が比較された。実施した場合の発生確率は実施しない場合の発生確率に比べ非常に高く交流電源を復旧する安全上の実効性が明らかになった。

2004年12月、インド洋で大津波が発生して沿岸を破壊し、いくつかの原子力発電所が停止した。国際原子力機関は世界気象機構が参加し、基準や勧告をまとめ、気象学や水門学に関する専門知識を取り入れて、原子力発電所に対する津波の脅威に関する安全ガイドを出版した。この安全ガイドは、津波の脅威の評価に必要な多くの因子を紹介している。

最終ヒートシンク喪失についても同様の比較が可能で何らかの対策を実施した場合、しない場合のシビアアクシデントの発生確率を比較して、実施の是非を判断することができるだろう。そして、台湾の事例ばかりでなくフランスや英国の最終ヒートシンク喪失に関する対策を含め検討することが必要である。

VI. なぜ、未然に実施しなかったのか

第IV章では津波の影響を低減する国内原子力発電所の対応を紹介、第V章では全交流電源喪失に対する対策や最終ヒートシンクの喪失に対する海外の原子力発電所の対応を紹介した。これらの対策を実施すれば福島第一の事故を未然に防止できたはずだが、なぜ、できなかったのか。第VI章は、この問い掛けに答えるのが目的である。

日本の原子炉の安全に対する監視が十分でない理由は、保安院が経済産業省に所属して、原子力発電を推進する政策の影響を受けるからだという見方がある、しかし、本当に問題なのは保安院が情報の取得を原子力産業界に全面的に依存していることだという。それを正すためには、米国と同様、原子力産業で働いた経験のある能力の高い技術者を多数採用する必要があるという。

海外の原子力発電所に関する運転経験情報の収集や分析は、原子力産業界も公的機関も精力的に実施していると思うが、収集した運転経験情報の活用は期待するほど実効を上げているようには見えない。米国の原子力規制委員会が収集した情報を原子力事業者に常時伝えていることを学んでほしい。

我が国の原子炉安全規制は地震を重視するが、津波に余り触れないなど、首尾一貫しないところがある。その結果、福島第一では、全交流電源の喪失に対処する作業手順書がなく、要員の訓練が行われず、必要な機材や物資が揃っていなかった。こうした見落としは、原子炉の安全をそこなう可能性が大きい、個別プラント調査の実施によって恐らく解消できるであろう。

全交流電源の喪失に対する対策は実効性を検証しないで、すなわち確率論的安全評価を行うことなく、実施を正当化することはできない。我が国の原子力安全規制は確率論的安全評価を実施せず、全交流電源喪失に対する対策を実施しなかったため、福島第一の事故を起こして

しまった。我が国の軽水炉の安全評価に、確率論的安全評価を組み込むことが、ぜひ必要である。

我が国の安全規制は決定論的安全評価のみを用いる。海外の原子力事業者には内部事象や外部事象のもたらす脅威に対する軽水炉の安全対策に脆弱な部分がないことを確率論的安全評価により検証することが求められる。国際原子力機関は内部事象や外部事象に関する個別プラント調査、すなわち、各原子力発電所の設計条件や運転条件による確率論的安全評価の実施を推奨している。

我が国の原子力事業者は、自分達の原子炉で、シビアアクシデントは絶対に起こらないと思込み、安全評価が手薄になったのではないかと。中越沖地震以後も、地震に関する個別プラント調査は試験的に実施されただけで、安全規制に関する公式の意思決定に使用するため、実施されたわけではない。

そもそも安全文化とは情報の円滑な伝達をよとする文化である。しかし我が国の原子力文化を担う人々には自分達の準備が整わないうちに外部の意見を取り入れることに消極的な人が多いという。

とはいえ、確率論的安全評価や、個別プラント調査の実施例が今後増大し、それなりの利便をもたらすことが段々と明らかになってきた。関連法規が整備されれば、我が国の原子力文化も変わっていくであろう。

津波のリスクのように、他の方法で評価することが困難な問題でも、異なる分野の専門家の協力を得れば、可能なことが、海外の情報に接し自分でも試みるうちに分かってきた。こうした協力は地震のリスク評価で試験的に行われたが、我が国でも今後増えていくであろう。

Ⅶ. おわりに

「福島事故は、なぜ防止できるのか」は、建設当初の原子炉の安全対策を繰り返し見直すことによって津波の襲来に備えられること、例えば津波が襲来しても、内外の原子力発電所が工夫した安全対策を実施することによりシビアアクシデントの発生を防ぎ、影響を低減することを示した。

一層重大なことは、他の先進諸国と異なり、日本が外部事象によるシビアアクシデント発生のリスクを軽視し、20年に亘り津波に関する安全上の課題について体系的な検討を怠ってきたことである。第V章で紹介した確率論的安全評価や個別プラント調査は、安全対策に脆弱な部分があれば、警告を発する手段であるはずである。先進諸国における原子炉安全に関する良き慣行や安全指針は、統合されつつあるが、日本と欧米との間には、未だ大きな相違があると思う。

欧米の安全規制では、原子炉安全を維持するために、不断に改良を追求してきた。日本ではバックチェックを多用してきたが、バックフィットを代替するものでなく安全上の余裕を切り詰めると「クリフ・エッジ」が紛れ

こむ可能性がある。クリフ・エッジは、条件がわずかに変化するとシビアアクシデントの発生確率が急激に増加することをいう。バックフィットやバックチェックは、安全基準を改正した場合、新基準が満足するかどうかを検証することである。しかしバックフィットは改正前と同等以上の安全上の余裕を見込んで検証するのに対して、バックチェックは余裕が改正前よりも少なくても良いとしている点異なる。

福島第一の事故後に作成された日本の関連法規の改正案の素案によると、原子力安全規制に携わる新しい政府機関は、原子力事業者に対して原子炉の改造を要求する権限を付与されるようである。

原子力安全規制に携わる新政府機関に対する権限付与と、必要な場合には原子炉の改造の命令をためらわない意思がなければ関連法規改正に関する素案は絵に描いた餅になってしまう。それを防止するために、福島第一に対する津波のリスクが、事故の直前まで高かったことを原子力事業者も政府機関も認めることが必要である。

福島第一の事故の発生が原子力発電工学や原子力発電技術に不可避免的に組み込まれ、従来知られていなかったリスクの存在を明らかにしたというわけではない。国際原子力機関の良き慣行と指針をまもり、海外にならって確率論的安全評価を使って安全対策の脆弱な部分を直していけば、福島第一の事故は、防止できるはずである。

中村進氏から「福島事故は、なぜ防止できなかったのか」という興味深い論文があることを教えて頂いた。また、本稿の作成に軽水炉問題研究会の会員の方々から助言をいただいた。お礼を申し上げる。

この調査報告は、2人の専門家によって執筆された。ジェームズ・アクトン博士は、カーネギー財団の原子力政策プログラムの上級アソシエートで、福島第一の事故については、CNNをはじめ放送網のコメンテーターとして活躍した。マーク・ヒップス氏も同じく、原子力政策プログラムの上級アソシエートで、ニュークレオニクス誌の記者や編集者として活躍した。

—参考資料—

- 1) J. M. Acton, *et al.*, "Why Fukushima was Preventable?", Carnegie Endowment, March 2012.
- 2) 福島原子力事故調査報告書(中間報告書), 3.3発電所を襲った津波の大きさ, 5頁, 東京電力, 2011年12月.
- 3) 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震, 津波対策に関する中間取りまとめ, 3頁, 中央防災会議, 地震, 津波対策に関する専門調査会, 平成26年6月23日.
- 4) "Earthquake and Tsunami in Japan on March 11 2011 and Consequences for Fukushima and Other Nuclear Power Plants," VGB Power Tech(Germany), April 15, 2011.

- 5) K. Minoura, *et al.*, "The 869 AD Jogan Tsunami Deposit and Recurrence Interval of Large-Scale Tsunami on the Pacific Coast of Northeast Japan," *J. Nat. Disaster Sci.*, 23[2], (2001).
- 6) 原子力安全委員会指針集, 内閣原子力安全委員会事務局, 大成出版社, (2008).
- 7) 国際原子力機関の閣僚会議に対する日本国政府の報告書, IV-98頁, 平成23年6月.
- 8) 前出7), IV-97頁~98頁.
- 9) Eric de Fraguier, "Lessons Learned from 1999 Blayais Flood," RIC 2010 External Flood and Extreme Precipitation Hazard Analysis for Nuclear Plant Safety Session, March 11, 2010.
- 10) 10 CFR 50.63 Loss of All Alternating Current Power, 53 FR 23215, June 21, 1988 as amended at 63 FR 50480, Sept. 22, 1998; 72 FR 49501, Aug. 28, 2007.
- 11) Perspectives Gained From the Individual Plant Examination of External Events(IPEEE) Final Report, NUREG-1742, USNRC, Apr. 2002.

著者紹介



斯波正誼(しば・まさよし)
軽水炉問題研究会
(専門分野/関心分野)軽水炉の安全工学

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—
(11月5日第5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。49巻は契約のページ数範囲で収まった。投稿者アンケートは2月頃実施。ReferenceStyle を変更する。Copyright Form の直筆版提出を厳格化する。vol.50には表紙に50周年記念を入れる。審査システムの訓練を実施予定。来年1月当初より Web 審査へ移行の予定。
- ・英文誌の50周年記念 Review 論文の進捗状況が報告された。3論文審査中。
- ・2012年の英文誌の編集委員会表彰のうち, 被引用数の多い論文データが示された。これについては次回決定。ダウンロード数

- については, 今年はデータがそろわず, 見送りとする。
- ・インパクトファクター向上策を検討した。

【学会誌関係】

- ・委員長から編集委員会の来年度予算申請について理事会の考え方の報告があった。
- ・巻頭言, 時論の記事企画の確認を行った。
- ・人材育成特集で誌上座談会を行う予定。大学, 研究機関のほか, 電力業界などからの参加者を追加する。
- ・今後の学会誌の記事企画や記事の方針について, 検討を行った。
- ・記事中に掲載される集合写真や, ページ数の超過について対応方針を検討した。

編集委員会連絡先<<hensyu@aesj.or.jp>>

核融合発電技術開発の現状と今後の展望

目前に迫る核融合連続燃焼の実現

東京大学 岡野 邦彦

核融合はいまでも「夢物語」で、実態は30年前とあまり変わっていないなどと思っていないだろうか。そうだとすれば誤解だ。いまだに発電は実現していないが、この約30年間で核融合研究は画期的に進んだ。磁場を使った閉じ込め方式では、核融合の実験炉「ITER」の建設が国際協力で進んでおり、核融合の連続燃焼と10以上のエネルギー利得の実現が見えてきた。レーザーを用いた点火方式も進んでおり、米国が建設したレーザー核融合点火装置「NIF」はすでに完成し、人類初の核融合レーザー着火を目指した実験が進む。本稿では、その現状と将来展望、そして核融合の安全性上での長を解説する。なお、わかりやすさを重視し、一部で説明の若干の簡略化などを行っていることはご了解いただきたい。

I. 核融合反応と核融合炉の基本

最初の章では、核融合反応とその燃料の特性、ならびに核融合燃焼を維持するための装置の基本構造を解説することから始めよう。

1. 核融合反応と燃料の増殖

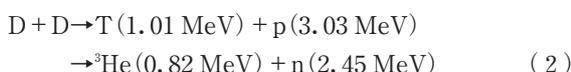
(1) 各種核融合反応とその特徴

太陽の中で起こっている核融合は、通常の水素(H)が様々な中間プロセスを経て ${}^4\text{He}$ になるものである。しかし、この反応は反応率(断面積)が大変小さいので、地上の太陽、核融合炉を実現するには、もっと反応率が高い核融合反応を利用する必要がある。現在の核融合開発が目指しているのは、重水素(D)と三重水素(T)による以下のようなDT反応である。



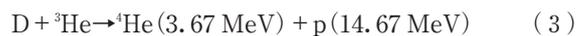
この反応は、燃料のTが β 線を出す放射性元素である点や、中性子nが発生するため炉内構造物を放射化する点などの弱点もあるのだが、反応断面積が比較的低温(といっても1億度が必要だが)で大きいことや、1回の反応で出るエネルギーも17.6 MeVと大きいことなどから、まずはこのDT反応での実用化を目指した開発が進んでいる。

将来的には、以下のような反応も考えられている。



Status and Future Prospect on the Fusion Energy Development; Toward the Continuous Fusion Burning Experiment: Kunihiko OKANO.

(2012年 8月31日 受理)



(2)のDD反応なら、Tは反応では生成するが、外部から供給する燃料の放射性はなく、重水は海水中に無尽蔵に(50兆トン!)あるので資源的にも有利だが、実現には10億度以上の高い温度が必要なのが実用化を困難にしている。発生中性子が装置を放射化する問題も残る。その点、(3)のD-He反応なら、燃料、反応生成物とも非放射性で、中性子も出ないことから放射化物の生成も少ない。ただし、わずかだがDD反応も同時に起こるので、まったく中性子やTが出ないわけではないが、取り扱う放射性ハザード(定義はIII章で説明)は圧倒的に減る。これは将来の核融合炉の目標と言える。ただ、温度は5億度くらいが必要で、DT反応に比べれば現状技術から実現までのギャップはかなり大きい。後述のように、核融合は、DT炉であっても取り扱う放射性ハザードは核分裂炉より3桁も少ないが、さらに将来的にD-He反応まで行ければ、放射性ハザードからほぼ縁が切れ、非常に安全でクリーンなエネルギーになる可能性も持っている。

(2) 燃料の増殖に関する反応

DT反応において、Dは海水中の重水から得る。重水は重水炉(CANDU)用として実用化済みの高効率な濃縮プロセスを経て得る。一方、Tは天然にほとんどないので、以下のようにリチウムに核融合反応で出た中性子を吸収させて炉内で生産する。



(5)の反応では中性子が発生することから、原理的にはTの増殖率を1以上にできる。DT核融合炉の設計では、さらに以下のような反応も加えて中性子を増倍する

ことでT増殖率を確実に1以上に設計がなされる。



ここで、 X は鉛の同位体質量数を表す。

燃料の増殖は、核融合を起こす高温プラズマ領域を取り囲む「ブランケット」と呼ばれる構造体の中で行い、プラント内で生成・循環を行う。すなわち、核融合炉では、その燃料サイクルがプラント内で閉じる。これは、燃料サイクルが広く分散する核分裂炉とは異なる核融合エネルギーの重要な特長である⁴⁾。

2. 核融合炉の基本構造

(1) さまざまな閉じ込め方式

核融合炉の実現には、燃料である重水素と三重水素を加熱して1億程度程度の温度で十分な密度のプラズマ(高温の電離気体)を生成し、かつそれを保持する必要がある。保持されたプラズマからエネルギーが逃げ出していく時間をエネルギー閉じ込め時間^{a)}という。

核融合炉で十分なエネルギー利得(核融合出力と加熱入力との比)を実現するには、1億度の達成に加え、このエネルギー閉じ込め時間とプラズマの密度との積(核融合積)が、ある一定値($10^{20} \sim 10^{21} \text{ s/m}^3$)にならねばならないことが示されている。これを実現するための研究は2つの方式で進められてきた。そのひとつは、磁場を使う。プラズマは磁場を横切れないので、磁場をうまく形成することで、高温で高密度のプラズマを空中に浮かせておくことができる。トカマク型が代表的である。茨城県那珂市には、世界の三大トカマクの一つとしてITERの基礎を築いた日本原子力研究開発機構の「JT-60」がある。磁場方式ではトカマク以外にもヘリカル型やミラー型などが研究されてきた。土岐市の核融合科学研究所には、世界最大のヘリカル装置「LHD」もあり、定常運転が可能というその特長を生かし、様々な成果を上げている。

もうひとつの方法は、強力な加熱で一瞬に1億度にして、それが飛び散る前に核融合を起こそうとする方式である。閉じ込める努力を何もしていない方法のようにも思えるが、実は飛び散るのに有限の時間がかかるのは慣性に起因することから「慣性閉じ込め」と呼ぶ。この方式ではいかにして瞬間加熱ができるかが重要で、加熱法としてはレーザーを使う方法や、イオンビームを使う方法が研究されている。

これらの方式のうち、現時点で連続的な核融合燃焼実験へと進もうとしているのは、ITER計画で採用されているトカマク型である。レーザーを使った慣性方式も、連続燃焼ではなくワンショットごとの単発燃焼ではあるが、米、仏、日でそれぞれ点火実験を目指している。

^{a)} プラズマからのエネルギー損失の時定数で、プラズマ保持時間や、燃焼継続時間とは異なる。

(2) 磁場方式核融合炉(トカマク)の概念と現状

磁場方式については、各種核融合装置の中で最も高い性能を更新してきたのはトカマクであるので、トカマクを中心に説明する。

電子とイオンが電離状態で存在するプラズマは磁力線に拘束される、という事実を利用し、ドーナツ(トーラス)状に閉じた磁場系でプラズマを保持するのがトカマク型核融合装置である(第1図)。この方式ではおよそ 10^{20} m^{-3} 程度の密度が実現可能であるので、エネルギー閉じ込め時間を数秒にすることで上記の核融合積条件の達成ができると思われる。現時点でトカマク方式によるエネルギー閉じ込め時間は1秒程度までは達成している。

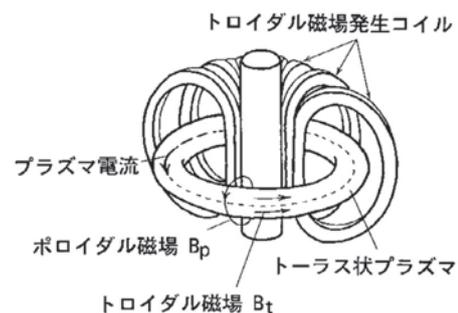
プラズマを支える磁場は第1図のトロイダル磁場 B_t とポロイダル B_p を合成したもので、磁力線はらせん状になる。 B_t は外部コイルで、 B_p はトーラス状のプラズマ中に流れる電流によって作られる。

トカマクではプラズマ中に電流が流れていなければ(B_p ができないので)プラズマは安定に存在できない。プラズマに電流を流すための最も簡単かつ最も効率が良い方法は、電磁誘導を用いることである。第1図の中央の芯に入れるコイルがトランスフォーマーの1次巻線、プラズマリングが2次巻線となるような形にコイルを構成し、1次巻線側にパルス電流を流せば、電磁誘導でプラズマに電流が流れる。ただし、この方法で駆動可能な電流はパルスのため、定常電流の駆動には粒子ビームを外部から入射する方法などが開発されている。

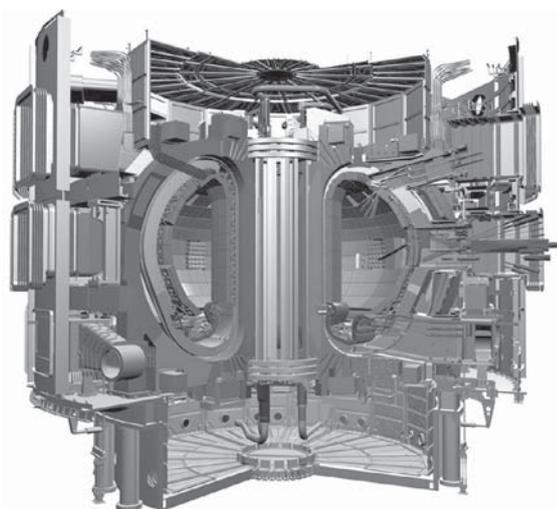
現在、このトカマク方式によって核融合の長時間連続燃焼を行う実験炉「ITER(イーター)」を国際協力で南フランスに建設中である。詳細は後述するが、ITERの建設費は1兆円規模で、トーラス状プラズマの直径が12mほどの巨大な試験装置である。閉じ込め磁場は、史上最大の超電導コイルが発生する。その鳥かん図を第2図に示す¹⁾。ITERの詳細については、II章で解説する。

(3) 慣性方式核融合炉の概念と現状

慣性閉じ込めによる核融合の概念では、直径数mmの燃料球(ターゲット)に数ナノ秒程度のパルスのレーザー、あるいは高エネルギーの粒子ビームを照射し、そ



第1図 トカマク装置の原理図

第2図 実験炉 ITER の鳥かん図¹⁾

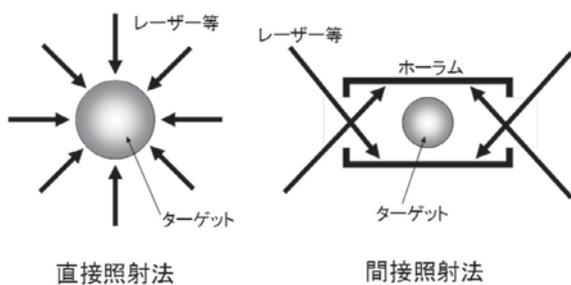
直径・高さが各30 mほどの巨大な構造物で、超電導コイルによって直径12 mのトラス状プラズマを保持する。

の光あるいはビームが発生する圧力で固体密度の数千倍まで燃料を圧縮・加熱することで核融合反応を開始させる。着火後に燃料球は膨張するが、その速度は慣性のために制限されるので、ある条件を満たせば、膨張して薄まる前に十分な核融合反応が起こるようにできる。実用炉ではそれを数 Hz で繰り返すことで連続出力を得られる。

ターゲットの照射方法には、大きく分けて、直接照射法と間接照射法の2つがある(第3図)。

直接照射法では、多数本のビームで、球対象にできるだけ一様にターゲットを照射することで圧縮(爆縮とよぶ)と加熱を行う。この方法では照射の一様性が非常に重要で、わずかな非一様性があると不安定性が成長し、ターゲットの圧縮と加熱が十分にできない。

照射の一様性を増すことでこの不安定性を緩和しようとするのが間接照射法である。ホーラムと呼ばれる重金属製の外皮の中心に燃料球を置いたターゲットを用いる。照射は燃料球を直接狙わず、ホーラム内側に照射する。ビームのエネルギーはここで X 線に変換されて燃料球を一様に照射する。この方法では照射の一様性は優れるが、X 線への変換効率が60~80%程度になることからエネルギー損失がある。

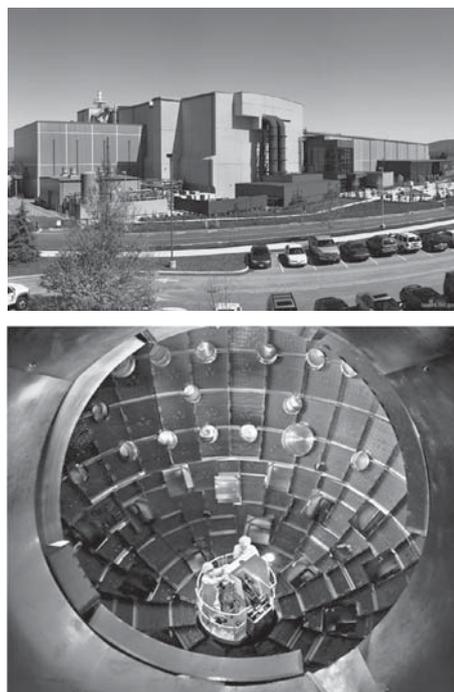
第3図 直接照射法と間接照射法²⁾

間接照射と強力なレーザーを使った核融合点火試験装置を、現在、米国とフランスが競って建設中である。建設費は3,000億円規模、レーザーパルスエネルギーは2 MJ 程度である。米国の NIF (National Ignition Facility)³⁾ と呼ばれる装置はすでに完成しており、近いうちに核融合の点火燃焼が行われる。第4図に、その巨大な建屋外観と中心にターゲットを置く集光チャンバ内部の様子を示す。チャンバ内に白い服を着た2名の作業員がいるので、その大きさがわかるだろう。

一方、レーザーを使った核融合方式には、高速点火方式という新しい流れもある。高速点火では、最初に圧縮用ビーム(数ナノ秒)を照射してターゲットを目標密度(固体密度の数千倍)まで圧縮し、その後、パルス幅が数フェムト秒(1兆分の1秒)の加熱用レーザーを入射して強制的に点火する。これはフェムト秒級の超短パルスレーザーの実現によって可能になった新しい点火方法で、通常の圧縮点火では着火できない小型の燃料球でも強制着火が可能のため、1パルスの出力が小さくても大きなエネルギーゲインが得られると期待されている。高速点火の基礎実験は、大阪大学レーザーエネルギー学研究所のレーザー核融合実験装置「激光12号」を使って続けられている。

II. ITER の状況とその目標

本章では、建設中の核融合実験炉 ITER の状況とその目標を説明する。前章で述べたとおり、レーザー方式の

第4図 レーザー核融合点火装置 NIF の外観(上)とターゲットチャンバ内部(下)³⁾

建屋の中央部の中にチャンバが入っており、奥のやや低い部分には192本分のレーザーが収まっている。

NIFは完成して、核融合着火試験は間もなく行われる。それゆえ、人類初の「核融合着火」はレーザー方式によるものになるだろう。ただし、NIFでの着火は単発ごとの一瞬であり、実用化に向けた技術的な視点で、ITERによる連続燃焼実験は極めて大きな意味を持つ。

1. ITERの状況

ITER(International Thermo-nuclear Experimental Reactorの略でイーターと読む)は、核燃焼プラズマの制御、長時間燃焼の実現、ならびに核融合工学技術の統合試験を目指した実験炉である。閉じ込め原理には磁場閉じ込めの一つであるトカマク方式を採用している。計画は、日本、米国、ロシア、韓国、中国、インドの6国とEU(これらをまとめて「7極」と呼ぶ)の国際協力で、南フランスのカダラッシュにおいて建設が進んでいる。

ITER計画は1985年、米ソ首脳会談でのレーガン大統領とゴルバチョフ大統領との間の取り決めが発端である。その後、1988～1990年に概念設計活動、1992～2001年には工学設計活動を実施した。その後、建設地を巡ってやや混乱したが、建設場所はフランスのカダラッシュに決まり、2007年10月24日にはITER国際協定が発効して「ITER機構」が正式に発足した。機構長は日本人とすることが約束されており、初代は元クロアチア大使の池田要氏が着任した。今は、2010年8月に着任した二代目の機構長、本島修氏のもとで建設が進められている。

現在、トカマク本体設置エリアのコンクリートの敷設が終了し、免震装置の設置作業中で、建設は着々と進行している(第5図)。予定通りに建設が進めば、ITERは2020年までに運転を開始する。その後、調整運転や機能追加が行われ、すべてが順調であれば、2027年には人類初の「核融合連続燃焼」が実現するだろう。期待されているエネルギー利得は10以上で、その熱出力は50万kWとなり、中型火力発電所並みの出力である。

2. ITERの目標

ITERの第1段階での目標は、核燃焼プラズマの制御・長時間燃焼であり、具体的には、エネルギー利得が10以上の燃焼プラズマを数百秒維持することである。ただし、この段階では、電磁誘導を用いた電流駆動手法(1章2節参照)を用いる。現状の実験データやITERの設計マージンから、この第1段階の目標は、かなり高い確率で、ITER運転開始後あまり時間を経ることなく達成されるものと考えられる。

ITERの第2段階の目標は、実用化の視点から、核燃焼プラズマの「完全定常化」が実現可能であることの確認である。第1段階で用いる電磁誘導による電流の駆動では原理的に数百秒以上の電流を維持できないため、第2段階では、プラズマに流す電流をビーム入射などで定常化する必要がある。シミュレーション研究や現存の大型



第5図 ITER建設状況¹⁾(上:ITER本部建屋はほぼ完成、下:本体基礎を建設中)

本体建屋を含めた36万トンを支える免震ポッド493本が見える。免震建屋の中央には第2図の本体が収まる。

装置の実験研究を通して定常化への見通しは得られている。さらに、ITERに関連する日欧共同事業として、茨城県那珂市にある日本原子力研究開発機構のJT-60を、超伝導コイルを使ったトカマク装置へと改修中で、これを用いて定常運転試験などを事前に実施し、最終的にITERでの定常燃焼の達成を目指す。

ITERのもう一つの目標は、実用化に向けた炉工学技術の確認である。ITERの出力規模は50万kWと、ほぼプラントレベルで、工学技術の試験としても大きな寄与ができる。燃焼プラズマを維持するための装置技術、kg級の三重水素を扱う技術などについては、ほぼ実用化への技術をITERによって手にできると考えられる。

一方、ITERは実験炉であって発電は必須の目的ではない。また燃料である三重水素の増殖試験は行うものの、燃料は外部からの供給が前提であり、炉内で燃料サイクルが閉じるという核融合の特長は完結しない。したがって、核融合炉をエネルギープラントとして確立する技術、たとえば、核融合エネルギーを効率的に取り出す技術、三重水素を自己生産する技術、許容される期間内に保守する技術などについては、ITERと並行する補完的研究開発と、ITERの次の原型炉で順次開発することになる。

Ⅲ. 安全性からみた核融合

最後に、将来の核融合発電プラントで予想される安全上の特性についてまとめておくことにしよう。

1. 核融合炉システムの安全上の特徴

核融合プラントの安全上での、あるいは放射性物質の取り扱い上の特徴を列記すれば以下のとおりである。

(1) 核融合炉内の移動性放射能は主に三重水素のものプラズマに含まれている燃料は数gである。ただし、ブランケットや燃料循環系には最低でも1kg程度の三重水素は存在するので、事故時のリスクはそれらを考慮しなければならない。真空容器内の放射化ダストの放射能も移動性といえるが、相対的には少ない。

(2) 核融合反応生成物はヘリウムと中性子

それゆえ核融合炉の放射性廃棄物は、反応中性子によって炉内材料が放射化されたものが主である。低放射化材を使うなどの設計上の工夫で、放射性廃棄物の量も質も大きく変えることができるので、核融合ではすぐれた低放射化材料の開発が重要である。

(3) プラズマ中の反応は異常時に必ず停止

プラズマを磁場で空中に維持しなければ、核融合反応は起こらない。レーザー方式でレーザーを入射しなければ核融合が起こるはずもない。すなわち、何らかの異常があれば、反応は停まるか、あるいは開始もしない。また圧力が上がりすぎればプラズマは不安定で、やはり反応は停止する。したがって、反応の暴走が継続するようなことは考えられず、仮に構造が破壊されるような事態でも、燃料の核的再着火はありえない。

(4) 高レベル放射性廃棄物がない

核燃料(ウラン等)由来の高レベル放射性廃棄物は、核融合では発生しない。構造材として長寿命放射能が生成しない材料を選ぶことが重要になってくる。

(5) 運転停止後の崩壊熱密度が低い

この特性は全電源損失・全冷却損失のような最悪の事態での安全性確保につながるだろう。もちろん、どれほど安全かは、設計に依存する。

2. 運用中の放射性ハザードの比較

人体に害がある毒物(放射能を含む)の危険度は、ハザードポテンシャル(HP)の大ききで示すことが一般的に行われる⁴⁾。HPの定義は、対象とする量の毒物を何倍に希釈したら人体に有害でないといわれる濃度になるか、と考えて、希釈に要する水の量(液体の場合)や空気(気体の場合)で定義する。もちろん大きい数字のほうが毒性が高い。HPは物質固有でなく、考える量によることも注意されたい。

100万kW級の軽水炉中のヨウ素 ^{131}I のHPは、その許容濃度が 10 Bq/m^3 であることを考慮すると、 5.4

$\times 10^{17}(\text{m}^3)$ 程度となる⁴⁾。

核融合炉のHPのほとんどは三重水素による。その量は炉内に滞留するインベントリーが主なので、出力規模にはあまり関係がなく、数kgのオーダーと考えられている。ちなみにITERでは炉心周辺部で 0.7 kg と予想されている。そこで、インベントリーを仮に 1 kg とし、三重水素の許容濃度が $5 \times 10^3\text{ Bq/m}^3$ であることを考慮すると、核融合炉に含まれるHPは $7.7 \times 10^{13}(\text{m}^3)$ 程度となる。すなわち、100万kW級軽水炉のHPの7,000分の1程度である。三重水素のインベントリーが数kgになるとしても、少なくともHPの値で3桁の差はあることになる。

これらの特徴は、核融合炉は原理的に安全というイメージを抱かせるものである。ただし、安全性というのは設計と一体であり、まだ実現していない核融合炉について、これらの特性だけをもって「安全性が非常に高い」と慢心すべきでない。謙虚な姿勢で開発や設計を進めることが必要だ。また、核分裂炉を核融合炉に換えても CO_2 排出量はあまり変わらないことも考えれば、実用化時点での核融合炉は火力も置換できる競合力が必要ではないか。そうであれば、安心感まで含めた安全性の目標は、さらに一段と高いところに置かなければならない。

おわりに

連続燃焼が見えてきたとはいえ、核融合実用化までの開発要素はまだ多い。現在、ITER以後の発電実証に向けた原型炉の概念設計が精力的に行われており、それによって、実用化への開発要素は明確になってきている。安全上の特長を最大に生かし、将来、世界の人々に安心して受け入れてもらえる核融合炉の開発を望みたい。ちなみにITERとはラテン語で「道」を意味するそうだ。長く困難な道ではあるが、ITERやNIFの実現で、核融合実用化の入口も見えてくるのではないだろうか。

— 参考資料 —

- 1) <http://www.iter.org/>
- 2) 原子力ハンドブック、オーム社、(2007)。
- 3) <https://lasers.llnl.gov/about/nif/>
- 4) 科学技術庁、核融合会議開発戦略検討分科会、「核融合エネルギーの技術的実現性、計画の広がりと裾野としての基礎研究に関する報告書」、平成12年5月17日。

著者紹介

岡野邦彦(おかの・くにひこ)

東京大学大学院

(専門分野/関心分野) 核融合/未来エネルギー全般とその導入戦略、運輸部門電動化の効果



ヤッカマウンテン計画の失敗とブルーリボン委員会報告書

元・原子力発電環境整備機構 河田東海夫

米国では、2009年に発足した民主党オバマ政権によって、長年の歳月と膨大な資金を費やして進めてきたヤッカマウンテン処分場計画が、廃止に追い込まれた。同政権は、行き場を失う米国の使用済燃料の新たな管理方策を検討するため、ブルーリボン委員会を立ち上げ、約2年間の検討を経て最終報告書を2012年2月26日に公表した。本報告では、計画が失敗に至るまでの経緯を振り返るとともに、同委員会の報告書の内容を紹介し、我が国の状況も含めた若干の私見を述べさせていただく。

I. ブルーリボン委員会の設置

1. 「ヤッカマウンテンはもはや選択肢ではない」

2009年1月に発足した民主党のオバマ新政権は、レーザー冷却による原子捕捉技術の開発でノーベル賞を受賞し、ローレンス・バークレイ国立研究所長を務めていたスチーブン・チュウ氏をエネルギー省(DOE)長官に指名した。チュウ新長官は、同年3月の上院エネルギー・自然資源委員会で、「ヤッカマウンテンサイトは、もはや高レベル廃棄物処分の選択肢ではない」と述べ、22年の歳月と、130億ドル以上の資金を費やし、半年前から原子力規制委員会(NRC)による安全審査が進んでいたヤッカマウンテン処分場計画を破棄する方針を表明した。オバマ新政権を支える民主党の最大実力者は、ネバダ州選出の上院議員で院内総務を務めるハリー・リード氏である。リード氏は、地元議員として、ヤッカマウンテン計画への強固な反対運動を20年以上続けてきた人物であり、その意向を強く反映した方針であった。

チュウ長官は、ヤッカマウンテン計画の破棄で行き場を失う使用済燃料の新たな管理方策を包括的に検討するために、上級有識者委員会を立ち上げることを提案した。

2. 新たなバックエンド政策を目指して

2010年1月の大統領令で「アメリカの原子力の未来に関するブルーリボン委員会」(Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future: BRC)の正式設置が命じられ、同年3月に15名のメンバーが公表された。BRCの役割は、「核燃料サイクルのバックエンドの管理に関する政策を総合的にレビューし、新たな計画を勧告すること」とされた。外交問題の専門家で、ウッドロー・ウィ

ルソン国際学術センター前理事長のリー・ハミルトン氏と、安全保障問題に関する大統領顧問などを歴任した軍事・国際政治の専門家ブレント・スコークロフト氏が共同議長を務め、委員には我が国でもおなじみのピート・ドメニチ元上院議員、リチャード・メザープ元NRC委員長、アーネスト・モニツMIT教授(クリントン政権時代のDOE次官補)などが名を連ねた。BRCは、本委員会の下に「炉と燃料サイクル技術」、「輸送と貯蔵」、「処分」の3つの小委員会を設け、延べ20数回の会合を開いて、幅広い専門家や関係者からの意見聴取を行った。また、最終処分場に関する住民合意形成で成功を取めているスウェーデン、フィンランドなども訪問し、関連施設の視察や、現地の関係者との意見交換会なども開催した。我が国では、2010年11月に近藤原子力委員長がワシントンに招聘され、日本の核燃料政策や廃棄物政策の現状を紹介した。また2011年2月にはBRCのメンバーが来日し、六ヶ所再処理工場、瑞浪の地下研究施設などを視察した。

BRCは、こうした活動を重ね、2011年7月末に報告書ドラフトをまとめて公表した。ドラフトは、本報告のほか、3つの小委員会からの個別報告からなる。その後BRCは主要5都市で公開の報告会を開き、その場で得られた意見や、別途公募で得られた意見を反映してドラフトを修正し、完成した最終報告書を2012年1月29日にDOE長官に提出した。以下、BRC報告書の内容紹介に入る前に、ヤッカマウンテン計画の来歴を紹介しておこう。

II. ヤッカマウンテン計画の不幸な来歴

1. 1982年核廃棄物政策法の制定とサイト特性調査に向けた候補地の絞り込み

米国における高レベル廃棄物管理の基本法は、1982年に制定された核廃棄物政策法(Nuclear Waste Policy

Failure of the Yucca Mountain Project and the Blue Ribbon Commission Report : Tomio KAWATA.

(2012年9月12日 受理)

Act: NWPA)である。同法は、民生用の原子炉の使用済燃料と軍用高レベル廃棄物をともに地層処分することを定め、その実施責任を DOE に負わせた。民生用高レベル廃棄物(使用済燃料)の処分に関する資金負担については、廃棄物発生者負担(polluter pays)の原則を適用し、発電量 1 kWh あたり 1 ミル(0.1セント)を電力会社から徴収する廃棄物基金制度を新設した。また、処分事業を進める実務組織として、DOE 内に民生放射性廃棄物管理局(Office of Civilian Radioactive Waste Management: OCRWM)を新設した。同法はまた、処分場計画のスケジュールについて、次のような目標期日を定めた:

- (1) DOE は、第 1 処分場向けのサイト特性調査候補地 3ヶ所を1985年1月までに大統領に勧告すること。
- (2) 大統領は、1987年3月までに、そのうち1ヶ所を第1処分場サイトとして選び、議会に提案すること。
- (3) 第2処分場に関しても、1989年7月までに3つの調査候補地を決め、1990年3月までに、その中の1ヶ所を第2処分場サイトとして議会に提案すること。
- (4) 1998年1月までに第1処分場を開設し、使用済燃料の引き取りを開始すること。

この時点では、第1処分場は西部の州に、また第2処分場は中・東部の州に建設されると想定されていた。原子力発電所の大半は東部に集中しており、その廃棄物を西部だけに押し付けるのではないという姿勢の表明である。この法律に基づき、DOE は、第1処分場向け9サイトの予備評価を開始した。その後、紆余曲折はあったものの、1986年5月に下記3ヶ所のサイト特性調査候補地を選定し、当時のレーガン大統領から了承された。

- ①ヤッカマウンテン(ネバダ州, 凝灰岩)
- ②デフスミス(テキサス州, 岩塩層)
- ③ハンフォード(ワシントン州, 玄武岩)

こうして、3候補地が決まったものの、NWPA が規定する目標期日からすでに1年4か月の遅れを生じていた。また、サイト特性調査は、当初の見込みよりもはるかに長い時間を要し、費用も当初見積り10倍の1サイトあたり10億ドル以上かかることが明らかになってきた。そのため、3ヶ所同時にサイト特性調査を進めるのは合理的でなく、最も有望なところからまず調査を始めるべきではないかという意見も出始めていた。

2. 政治的絞り込みが招いたネバダ州民の怨念: 1987年の核廃棄物政策法改定

1986年1月、DOE は、第2処分場に関して中・東部の州から12地点を有望とする報告書のドラフトを公表した。その発表は、関係する地域の議員や住民の強い反対運動を誘発した。こうした状況の中で DOE は1987年1月に、使用済燃料受け入れ開始時期を NWPA が規定す

る1998年から2003年に遅らせる計画を提示するとともに、第2処分場向けのサイト予備評価を無期延期する意向を表明した。この発表は、国中から批判を浴び、特にネバダ州などでは、中・東部の州を処分問題から解放することで、第1処分場の候補地をかかえる西部3州を孤立させようとする、卑劣なやり方だという批判が沸騰した。

当時は、共和党のレーガン政権の時代であったが、議会は上下院とも民主党が多数派を占めていた。上院でエネルギー問題に関して主導的地位にあったのはルイジアナ州選出のベネット・ジョンストン議員であった。彼は、処分場選定議論が混迷する中、候補地を一気にヤッカマウンテン一つに絞ることで、処分事業を加速することをもくろんだ NWPA の改定案を上程した。ネバダ州の知事や議員は熾烈な抵抗を試みたが、結局のところ他州の議員からの積極的支持は得られず、約半年の攻防の末、1987年末に NWPA の改定法案は成立した。この時の改定の要点は以下のとおりである。

- ・DOE は、ヤッカマウンテンを第1処分場の唯一の候補地としてサイト特性調査を進め、大統領に処分場としての適格性に関する勧告を行う。
- ・第2処分場の選定に向けた作業は停止し、2010年1月までに、その要否に関する報告書を提出する。
- ・再取出し可能貯蔵施設(Monitored Retrievable Storage: MRS)に関しては、処分場の建設許可が下りる前に建設することを禁ずる。

すでに述べたとおり、DOE が前年選択したサイト特性調査の3候補地は、ヤッカマウンテンのほか、デフスミスとハンフォードであった。デフスミスを抱えるテキサス州には下院院内総務を務めるジム・ライト議員がおり、ハンフォードを抱えるワシントン州には下院議長を務めるトム・フォーリー議員(クリントン政権時代の駐日大使)がいた。地元への処分場建設を嫌うこの二人の大物議員は、NWPA 改定法案成立に向けて積極的に動いた。一方ヤッカマウンテンの地元ネバダ州には、これといった有力議員がいなかった。前年の選挙で上院入りを果たしたばかりのハリー・リード氏が抵抗を試みたものの、新米議員の力には限界があった。ネバダ州民は、政治的弱小州への一方的押しつけを決めた1987年 NWPA 改定法を、「ネバダねじ伏せ法」(Screw Nevada Bill)と呼んでいる。ハリー・リード議員のヤッカマウンテン計画に対する粘り強い反対運動は、この時に始まった。

3. ヤッカマウンテンの安全審査開始

ヤッカマウンテンにおけるサイト特性調査は、ネバダ州の抵抗で遅れを生じ、調査坑道の建設作業が開始されたのは1992年11月であった。1997年までに直径約7.5mのトンネルがU字型(本坑道総延長7.9km)に掘削され、岩石学や水理学など、様々な視点からの特性調査が開始された。DOE は、こうした調査結果や性能評価をもとに、2002年2月にサイトが処分場として適切である

ことを当時のブッシュ大統領に勧告し、大統領は直ちにこれを承認した。これを不服とするネバダ州知事はNWP Aの規定の通りに、同年4月に「不承認通知」を上下院に提出したが、両院ともネバダ州の不承認を覆す決議案を採択し、同年7月にヤッカマウンテンは米国の正式な処分場となった。

DOEは2008年6月に8,600ページに及ぶ処分場建設・運転の認可申請書をNRCに提出した。NRCは約3ヶ月かけて申請書としての充足性を確認する受領審査を行った後、同年9月に正式受理した。NWP Aでは、NRCは正式受理後3年以内に審査結果を出すことを求められており(必要に応じ1年の延長は可能)、NRCのスタッフは精力的に安全審査を開始した。

4. リード議員による逆襲

1987年のNWP A改定で新米議員の屈辱を舐めさせられたリード議員は、次第に頭角を顕わし、2005年には当時少数党ではあったが民主党の院内総務に登りつめた。リード議員は、自らが進めるヤッカマウンテン計画反対運動の科学政策顧問として雇っていたグレゴリー・ヤッコ氏を、空席となったNRC委員の席に収めることに成功した。ヤッコ氏は理論粒子物理学で学位を持つが、政治活動にも興味を持ち、大学院時代には、原子力反対派議員として有名なエドワード・マーキ下院議員(マサチューセッツ州選出)のもとで科学フェローとして働いていた。ヤッコ氏は、あまりにも明白なヤッカマウンテン計画反対派であるため、委員就任後のはじめの1年間は同計画に関する評決への参加自粛を余儀なくされた。

2006年の中間選挙で上下院ともに民主党が勝利をおさめ、さらに2008年の大統領選でオバマ氏が勝利すると、多数党上院院内総務としてのリード議員の地位は絶大なものとなった。リード議員は、大統領選挙期間中、オバマ候補にヤッカマウンテン計画に反対する約束を取り付けた。オバマ政権が発足すると、リード議員は早速長年の目標達成に向け精力的に活動を始めた。彼は、新任のチュウDOE長官にヤッカマウンテン計画破棄を宣言させる一方で、2009年5月には、腹心の部下ヤッコ氏をNRC委員長に昇格させた。

リード議員の強力な指導の下、DOEは、2009年10月から始まる2010会計年度予算から、関連部局の閉鎖・撤収以外のヤッカマウンテン関連予算をすべてカットし、2010年9月末には計画推進の中核組織であるOCRWMを解体し、またネバダ州の現地事務所も閉鎖した。

さらにDOEは、2010年3月に、すでに安全審査中の認可申請書の撤回をNRCに申し入れるという奇策に出た。これに対しNRCの原子力安全・認可委員会(Atomic Safety Licensing Board: ASLB^{a)})は、全員一致で「連邦議会が定めた政策ののりによって提出された申請を、DOE長官が勝手に撤回する権限はない」との裁定を下した。この裁定は、リード議員の意向を汲むヤッコNRC委員

長にとってはまことに具合の悪い裁定であり、最終的な判断を上位の委員会で引き取る姿勢を見せた上で、この問題を1年間以上たなごらしにした。その間ヤッコ委員長は、2010年10月初旬に、すでに終盤に差しかかっていた申請書の技術審査作業を突然打ち切る指示を出した。当時、技術審査は、予算的制約があったものの着々と進んでおり、それまでのところ安全性を決定的に否定するような問題は出ていないとの情報が漏れ伝えられていた。そのまま進めば、ほどなく結果の公表が避けられなくなるので、それを阻止するための行動であり、2名の委員の反対を押し切った命令であった。ヤッコ委員長は、それまでの審査結果の公表を拒んだが、NRCの内部からも批判が出たため、後日、審査内容の概要版なるものを公表することでお茶を濁した。

ASLBの裁定に関するNRC委員による評決は、2011年9月になってようやく行われたが、ASLB裁定支持2名、反対2名、棄権1名と割れた。この結果を受けてNRCは2011年9月9日、NRC委員の評決が賛否同数であったため、ASLBの裁定自体は依然有効と認めつつも、「委員会の監督権限」に基づき、同月末までにASLBの審査活動のすべてを停止することを指示する指令書を発行した。

この問題については、ASLB裁定を支持し、ヤッカマウンテン計画の継続を求めるDOE長官への書簡が、民主・共和両党の上下院議員91名の連名で出されたり、軍事用の高レベル廃棄物を抱えるワシントン州やサウスカロライナ州などから、DOEの申請撤回の違法性を問う裁判が起こされている。しかしながら、これらはいずれも計画を復活させる力を持つに至らず、ヤッカマウンテン計画の破棄は、すでに後戻りができないところまで進んでおり、リード議員のもくろみは完全に成功を収めたといえよう。

III. ブルーリボン委員会最終報告書

1. 8つの主要な勧告

2012年1月26日にブルーリボン委員会からDOE長官に提出された最終報告書には、次の8項目からなる主要な勧告が盛り込まれている。

- (1) 将来の放射性廃棄物管理施設を立地するための、新たな、合意に基づくサイト選定プロセスの採用
- (2) 放射性廃棄物管理計画を遂行することを目的とし、それを成功に導くために必要な権限と原資を付与された専任組織の設立
- (3) 放射性廃棄物管理のために電力利用者が拠出する

^{a)} NRCでは、申請書の技術審査はNRCの技術スタッフがを行い、手続き論や関係者から出される様々な異議申し立てについてはASLBが審議する。ASLBは裁判所に似た機能を持っており、16人の判事を抱え、1つの案件ごとに3人の判事がついて審議が行われる。

基金を前記組織が適切に利用できるようにすること

- (4) 1つまたは複数の地層処分施設の開発のための、迅速な取り組み
- (5) 1つまたは複数の集中中間貯蔵施設の開発のための、迅速な取り組み
- (6) 集中中間貯蔵施設や地層処分施設ができると必然的に必要となる使用済燃料や(軍用)高レベル廃棄物の大規模輸送への準備の迅速な開始
- (7) 継続的な米国原子力技術の革新と人材育成への支援
- (8) 安全性、廃棄物管理、核不拡散、核セキュリティなどの分野における米国の積極的なリーダーシップの発揮

(1)のサイト選定プロセスに関する勧告は、地元の意向に反して強要する試みは成功しないという苦い経験を踏まえた最も重要な勧告であり、成功率の高いサイト選定プロセスの要件として、①合意重視のプロセス、②透明性、③段階的プロセス、④適応性のある柔軟なプロセス、⑤基準が明快で科学に基づく選定、⑥実施主体と受け入れ地元側との協力関係のもとでの遂行の6項目を挙げている。こうした進め方は、時間がかかる進め方ではあるが、住民や関係者からの信頼を醸成するうえで欠かせないプロセスであるとしている。スケジュールに関しては、期限を定めるようなやり方を避ける一方で、計画の進捗を評価できるよう、主要なマイルストーンの目標時期の提示は望ましいとしている。報告書では、建設開始までの目標期間として、処分場に関しては15~20年程度を、また集中中間貯蔵施設については5~10年程度を例示している。

(2)の実施主体については、政府の認可法人(congressionally chartered federal corporation)が望ましいとし、独立性と効率的な任務遂行のための原資の付与が必要としている。これまで民生用廃棄物(使用済燃料)も軍用高レベル廃棄物も、最終処分についてはDOEが一元的に実施責任を負っていたが、新組織をつくる場合、軍用廃棄物の処分責任はDOEに残す方がよいのではとの議論も出ている。BRCは、政府にその是非を検討する場を早急に設けることを求めている。

(3)の廃棄物基金は、本来は一般会計予算とは別枠で、独立して扱われるべきものであるが、その後シーリング適用など一般会計側の管理規制が及ぶようになり、今日では、本来の目的のためにタイムリーに基金を使うことが困難な状況に陥っている。BRCは、廃棄物基金(現在の残額は270億ドル)の管理方式を本来の姿に戻し、新たに設立される組織が、事業の必要に応じ適切に予算行使できるようにするとともに、その財務管理を厳格に監視できるシステムを構築する必要があるとしている。

(4)は、至極当たり前の勧告であるが、処分方法としては地層処分がもっとも妥当とする国際合意を追認する一

方で、超深孔処分(deep borehole disposal)の研究を進めることも勧告している。また、可逆性・回収可能性の重要性を指摘しているが、超深孔処分の場合は回収可能性を求めないという考え方もありうるとしている。

(5)では、集中中間貯蔵施設の建設を強く勧告しているが、「その実現に向けての努力が、最終処分場実現に向けての努力を損なうことになってはならない」と釘を刺している。また、福島第一発電所事故が使用済燃料貯蔵に新たな問題を投げかけたことから、米国科学アカデミー(National Academy of Sciences:NAS)に対し、以前NASが行った米国の使用済燃料貯蔵の安全性に関する調査の結論に対し、福島事故の経験がどのような影響を与えるかを精査するよう勧告した。

(6)の輸送に関する勧告は、ドラフト報告書になかったが、最終報告で新たに追加された。

(7)の技術革新に関してBRCは、現行の軽水炉直接処分方式のほかに、軽水炉燃料再処理・MOX利用方式、高速炉完全リサイクル方式、高温ガス炉直接処分方式の3方式について、安全性、経済性、資源利用効率、廃棄物処分へのインパクト、核不拡散性などの観点からの定性的な評価を実施した。そのうえで、現時点ではどれか特定の方式を選択するのは時期尚早であり、様々な不確定要因を考慮すれば、当面これら複数方式の研究開発を維持継続することが望ましいとし、DOEが2010年4月に議会に提出した「原子力研究開発ロードマップ」に基づく進め方を支持している。民主党政権下の委員会では、リサイクル方式への積極的支援は期待すべくもないが、「世界が直面しているエネルギー需給問題や温暖化問題などを考慮すれば、改良型の原子力の選択肢を温存していくことは非常に大切である」とし、革新的なサイクル技術開発への長期的取り組みの重要性には理解を示している。そのほか、技術革新をにらんだ新たな規制体系の準備や、人材育成の強化などを勧告している。

(8)では、福島事故に再び言及し、新規参入国の安全な原子力利用や廃棄物処分に向け、IAEAなどと強調して支援すべきことなどが述べられている。

2. 勧告を実施するために必要な法令改正など

報告書は、これらの勧告を実施に移す上では、関連する法令の改正が必要とし、具体的に以下のような点を列挙している。

- (1) NWPAの立地プロセスを、新たな、合意に基づくプロセスに変更する必要がある
- (2) 複数の集中中間貯蔵施設の建設を認め、処分場のスケジュールとからめることなく建設できるよう変更する必要がある(現行のNWPAでは、処分場の建設許可が出る前の中間貯蔵施設の建設を禁じている)。
- (3) 輸送に関しては、廃棄物隔離パイロットプラント(WIPP)計画で行っているように、地元側が行う広

報活動や事故対応用機材の整備などの幅広い活動を、実施主体が支援できるよう変更する必要がある。

- (4) 国から独立した専任の実施組織を設立し、またその活動を適切に監督できる体制を構築するための立法措置が必要である。
- (5) 実施組織が廃棄物基金を国の予算認可プロセスに拘束されずに行使でき、しかも財務管理について厳格な監視を可能とするような法改正が必要である。
- (6) 非核兵器国の使用済燃料管理が、安全で核不拡散規範に合ったやり方で行えるよう支援するための新法制定が必要。

報告書の最後には、法令改正を待たずに、速やかにとるべきアクションを示しており、NRCと環境省(EPA)に対しては、立地プロセスの早い段階で一般性のある安全基準を提示できるよう、検討作業を早急に開始することを求めている。ヤッカマウンテン計画では、サイトの実情を反映して安全基準や安全評価方法が変更された経緯があり、このことが、規制ルールまで事業の都合に合わせて変えられているという不信を招いた。その反省が込められた勧告である。報告書はまた、DOE長官に対し、報告書の勧告を実行に移すために、DOEの総力を結集し、強い権限を発揮できる幹部職員を指名することを求めている。

3. 米国内の反応

BRCの約2年間にわたる検討は、(1)ヤッカマウンテンのサイトとしての適格性や、申請撤回の是非については議論しない、(2)処分場等の候補地についての議論は行わない、(3)今後の米国のエネルギーミックスの中で原子力にどこまで期待すべきかという判断は行わない、という3つの制約を課した中で行われた。こうした制約を認識したうえで、米国原子力学会(ANS)や米国原子力協会(NEI)などの組織は一応8つの勧告に肯定的な評価をしているが、その一方で、両者とも、NRCは安全審査を完結させ、その成果を国民に知らせるべきであるとしている。8つの勧告は、見方によってはあまりにも当たり前の勧告であり、有識者の中からは、「こんな勧告は、BRCのようにたくさんのお金と時間をかけなくとも、専門家なら誰でもすぐに考えつく内容だ」との手厳しい批判もある。一方、シエラクラブをはじめとする原子力に批判的な団体は、BRCのメンバーは原子力産業寄りに偏っているとして一斉に報告書を批判している。

4. 勧告を受けたDOEのその後の動き

DOEは、BRCの研究開発に関する勧告を踏まえて、2012会計年度予算の調整を行い、現在「使用済燃料処分等プログラム」として次のような活動を進めている：

- ・集中貯蔵施設の概念予備検討
- ・貯蔵長期化に対応するための燃料劣化メカニズム解明などの研究
- ・輸送に関連する地域支援の枠組みの変更に係る方針

の策定

- ・発熱性廃棄物に対する岩塩挙動の解明、花崗岩や粘土層への処分技術に関する国際協力など、サイトを特定しない一般的な岩質と処分に関する研究
- ・超深孔処分概念確立に向けた研究開発計画とロードマップ作成
- ・貯蔵・輸送・処分の全てに使える汎用標準キャスクの開発
- ・廃棄物管理事業のための有効な地域とのパートナーシップの仕組みの予備検討

DOEは、2013会計年度でもこれらを継続実施するとして、6千万ドルの予算を要求している。

DOEは、連邦議会から、BRC報告書公表から6ヶ月以内に、BRCの勧告を実現に移すための実施戦略を策定することを求められているが、それから7ヶ月を経た本稿執筆時点では、その作業結果は伝わってきていない。

DOEは、1998年に使用済燃料受け入れを開始するという約束を守れなかったことから、電力会社から78件の訴訟を起こされており、連邦政府はこれまでに累積で20億ドルの違約金を支払っている。仮に2020年に使用済燃料受け入れが開始できても、違約金総計は200億ドルを超えると見積もられており、遅ればその分雪だるま式に膨らむ。違約金は、廃棄物基金ではなく、国税に基づく一般会計から支出されるが、ヤッカマウンテン計画を破棄したことによる国民へのつけの大きさは金額的にも尋常ではない。

IV. 事情は異なるが、我が国も根本に立ち返った検討が必要

1. 東日本大震災のインパクト

我が国の高レベル廃棄物の地層処分計画は、2000年から事業段階に入り、実施主体の原子力発電環境整備機構(NUMO)が、2002年末から処分場選定の第一段階である文献調査を行う地域の公募を開始した。2007年には高知県東洋町がこれに正式応募したが、強い反対運動が起こり、計画は頓挫した。その後、国とNUMOは、国民や地域への理解増進活動など取り組みを強化し、文献調査の早期開始に向けて更なる努力を重ねてきたが、その途上で福島第一発電所事故が起こり、立地活動は実質的に凍結状態に至っている。原子力への批判の高まりを受け、政府は、脱原子力依存を旗印にエネルギー政策の見直しを進めており、2030年時点における電力の原子力比率の選択肢に関する厳しい議論が続いている。こうした中、従来の再処理を前提としたガラス固化体処分に加え、使用済燃料の直接処分も考えるべきとの意見も出ている。8月23日にはNHKが、日本学術会議が、原子力委員会の要請に応じてまとめた処分事業に関する検討報告書で、「東日本大震災で、原子力政策そのものが大きく揺らいでいるなか、処分事業は根源的な課題で行き詰

まっっており、今の枠組みを白紙に戻す覚悟で見直すべき」との勧告を行ったことを報じた。同報告書では、「高レベル廃棄物を数十年から数百年程度、地上や地下に暫定的に保管し、猶予期間を利用して技術の開発や国民的な合意の形成をすべき」との主張をしている。この点は、「地層処分が長期の高レベル廃棄物管理の唯一の解」とのNAS見解を是とし、「現世代は、安全な恒久解を見出すという仕事を将来世代に押し付けてはならない」という基本的な倫理的責務を負っている」とするBRC報告の毅然たる姿勢に比べると、いかにも「問題先送り」的主張に見え、残念な気がする。

米国とは事情が大きく異なるが、我が国も処分事業を根本に立ち返って検討しなければならない状況に至っている。

2. 日米が抱える悩ましい共通課題

BRC勧告の要点を一言でいえば、従来の上から強制するやり方から、合意を重視したやり方に立地プロセスを変更せよということである。これまで王道から外れていた進め方をしていたから失敗したのであって、それを王道に戻せということである。一方、我が国の進め方は、少なくとも形の上では、BRC勧告の最も重要な部分である①、②、③に沿った形をとってきた。進め方が根本的に間違っていたということではない。それだけに、我が国が、これから新たな進め方を模索するうえでの困難性はむしろ米国よりも深刻といえる。

両国に共通する問題の一つは、国家や推進母体への国民の信頼欠如である。BRC共同議長のアムリントン氏は、報告書公表当日の上院ヒアリングで、BRC会合中、様々な参加者から「政府への不信」という言葉を150回聞かされたと述べている。米国では、候補地の政治的絞り込みが政府への反発を招き、安全基準をサイト固有のものとし、サイトの条件を反映して変更をしたことも不信を助長した。こうした状態に比べ、スウェーデンやフィンランドでは、概して国民の政府への信用度は高いといえる。日本の場合、処分問題に関しては、政府への不信というよりは信用不足というべきものであったが、昨年事故を契機に、原子力問題全般に関して政府への不信が一挙に高まっている。また、あらかじめ有望な地域を示さないまま公募で文献調査を開始しようとし、また文献調査段階の交付金を大きくしたことも、「地質条件を無視して金で釣ろうとしている」という疑念を招いた。それぞれ、こうした部分を改善していく必要がある。

もう一つの共通の課題は、中間自治体の関与のあり方の問題であろう。ヤッカマウンテンの場合、実はすべてのネバダ住民がみな反対しているわけではない。直接の地元ナイ郡の住民の8割はヤッカマウンテン計画受け入

れに今でも賛成しているのである。全人口は約4万5千人で1平方マイル当たり3人という過疎地だが、昔から地域内での核実験を受け入れてきており、国の重要事業には前向きに協力するという気風が強い。ネバダ州の強固な反対の実態は、実は隣接するクラーク郡の住民の反対であるといつてよい。クラーク郡は、巨大観光都市ラスベガスを擁する人口200万人の郡で、ネバダ州全人口の7割を占め、観光で州の収入の7割を稼ぎ出す。ラスベガスにとって、その隣に廃棄物処分場が来るのはまったく迷惑千万な話なのである。商工会議所はいったん事故が起これば不動産価値や観光収入は3割以上下落し、容易に回復しないという評価などをして、処分場計画に強固な反対をしている。ネバダ州の政治家で、そうしたラスベガス住民の声に逆らえる者はいない。ここに、我が国でも経験している処分場立地の困難さを生む基本構図が、きわめて極端に凝縮された形で表れている。その点、基礎自治体と国との間に実質的権限を持つ中間自治体がないスウェーデンやフィンランドで処分場立地が成功しているという事実はきわめて興味深い。直接の地元住民は、処分場に関するリスクとベネフィットをより真剣に考えるが、その外の住民は処分問題をより感覚的にとらえる傾向が強い。このため、合意を図るべき範囲が広がれば広がるほど、合意形成はより困難性を増すということは、きわめて自然な現象といえよう。実際、処分場立地に成功したスウェーデンにおいてすら、地元住民は8割が地層処分に賛成しているが、国民全体では5割以上が反対している。こうした問題については、政治学や社会科学の立場からのもっと掘り下げた研究がなされ、そこから何らかの示唆が得られることが望まれる。

いずれにしても、日米ともに、高レベル廃棄物処分に関しては、根本的出直しを求められており、これからその困難な作業に立ち向かわなければならない。

—参考資料—

- 1) *Report to the Secretary of Energy, Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future*, January 2012.
- 2) *Nuclear Energy Research and Development Roadmap, Report to Congress*, DOE, April 2010.

著者紹介



河田東海夫(かわた・とみお)
元・原子力発電環境整備機構 理事
(専門分野)核燃料サイクル工学、バックエンド工学

集光型太陽熱発電(CSP)の技術と市場

(財)エネルギー総合工学研究所, 吉田 一雄
新潟大学

集光型太陽熱発電(CSP)は、反射鏡で集光した太陽光をレシーバで熱へと変換し、一般には蒸気タービンを回して発電する技術である。本システムでは、蓄熱システムやボイラを組み合わせることにより、太陽が照っていない時間帯にも比較的低コストの発電が可能である。したがって、CSPは、電力需要曲線に合わせた電力供給が可能であり、ディスパッチャビリティが高い発電システムである。CSPでは太陽から直接地表に到達する直達光のみ利用できることから、中東・北アフリカ、米国南西部などサンベルトと呼ばれる地域で高効率の発電が可能であり、発電ポテンシャルも膨大である。CSPで得た電力を離れた地域で利用するため、北アフリカで発電した電力を高圧直流送電でEU諸国に送るデザータック計画も進行している。

I. はじめに

太陽エネルギーは地球外から供給される唯一の1次エネルギー源であり、その賦存量は無限であり、人類のタイムスケールから見ると悠久のエネルギー源である。日本では太陽エネルギーを用いた発電というと、太陽光発電(PV)を思い浮かべる人が多いと思うが、世界では集光型太陽熱発電(CSP: Concentrating Solar Power)も有望な発電技術の一つとして認識されている。国際エネルギー機関(IEA)の出版物で、地球温暖化抑制技術に関して記述したETP 2008では、地球温暖化抑制に重要な17の技術の一つとしてCSPが挙げられている¹⁾。

CSPは、名前の通り太陽光を一旦熱に変え発電するものである。CSPのシステムの中で太陽光を集光し熱へと変換する部分については独特の技術が必要であるが、発電には一般に蒸気タービンが用いられ、一般の火力発電所や原子力発電所と同じである。CSPの長所として、一旦熱へと変換して発電することにより蓄電池に比較して低コストの蓄熱システムが利用できることである。これにより、電力需要曲線に合わせた電力供給、すなわちディスパッチャビリティがPVに比較して低コストで可能になる。また、CSPは機械的慣性や熱慣性によりPVと比較して出力の時間変動が小さく、グリッド接続が容易であるという特徴もある。

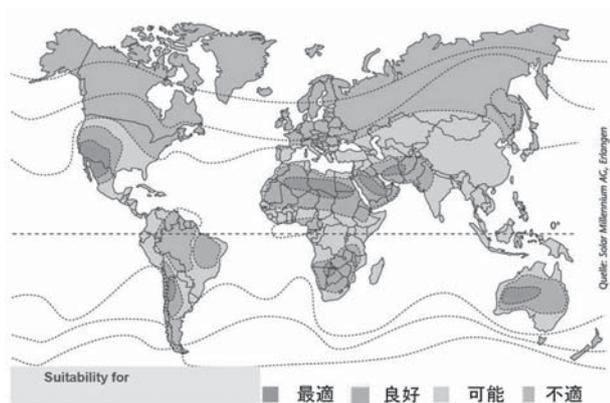
本稿では、CSPに特徴的な集光・集熱技術と蓄熱技術を中心に説明し、併せて世界のCSPポテンシャルと今後の市場の動きについてもその概略を記述する。

II. 集光・集熱技術

1. 集光の必要性和 CSPの適地

CSPにとって集光の意味は極めて重要である。太陽熱で発電する際に集光が必要な理由は、高温を得ることにより発電効率を高めるためである。これには、地表における太陽エネルギーの密度が低く、高々1kW/m²程度という背景がある。このように太陽のエネルギー密度が低い場合、集光を行わないとレシーバに熱損失が小さい真空管方式を用いたとしても、実用的には高々100℃程度でしか運転できない。したがって、発電を効率よく行うためには集光し、小さなレシーバに対してより多くの熱を与え、高温を得ることが必須になるのである。集光の程度は集光度で表すが、これは一つのレシーバへと光を反射する反射鏡の投影面積(アパチャ面積)をレシーバの面積で除したものである。

ところで、地表に降り注ぐ太陽光には太陽からまっすぐに来る直達光と、それが空気中の微粒子などによって散乱された散乱光とがある。集光するためには、太陽の光のベクトルがほぼ揃っていないといけない。したがって、集光できる太陽光は直達光(DNI: Direct Normal Insolation)のみである。このためCSPの設置に適する地域は、第1図に示すように、空気が乾燥してDNIが高いサンベルトと呼ばれる地域である。サンベルト地域では、年間の直達日射量は1,800kWh/m²以上に上り、サハラ砂漠や米国南西部など世界で最も適した地域の直達日射量は2,700kWh/m²以上になる。サンベルトは、太陽からのエネルギー量が最も高いと思われる赤道付近ではなく、北半球、南半球とも緯度がほぼ20~40度の範囲に分布している。この分布は大気の大循環によるもので、いわゆる中緯度高圧帯にあたる。この辺りは温度が



第1図 世界のCSPポテンシャル²⁾

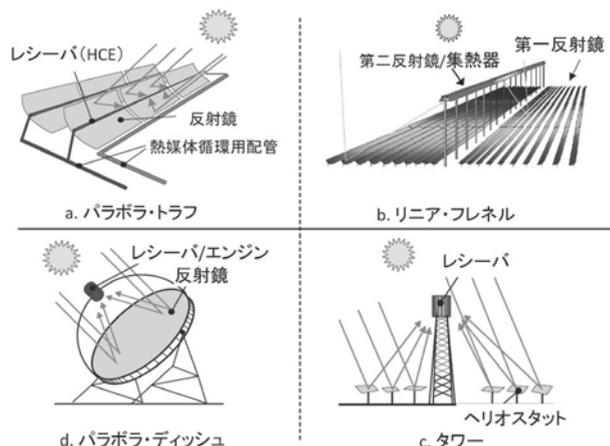
高く乾燥した下降流のため、大気中に光を散乱させる粒子などが少なく、直達光は強くなる。一方、日本は、第1図から明らかなように、サンベルト地帯にはなくCSPの設置にはあまり向いていない。

2. 集光・集熱技術の種類

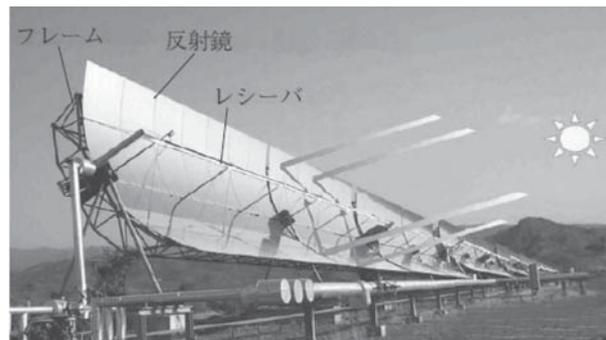
CSPの集光・集熱部分には、第2図に示す4通りの主要なコレクタ技術がある。すなわち：

- a. パラボラ・トラフ型
- b. リニア・フレネル型
- c. タワー型
- d. パラボラ・ディッシュ型

これらのコレクタは、太陽からまっすぐ到達する直達光を常時とらえるために、時々刻々と移動する太陽に合わせて向きを変えなければならない。CSPではこの太陽追尾技術が必須の技術となる。コレクタには1軸で太陽を追尾し、線で集光するタイプ(第2図上)と、2軸で追尾し点で集光するタイプ(第2図下)がある。線集光のコレクタは比較的集光度が低いため高温の運転には向いていない。稼働温度は一般に500~550℃が上限である。これに対して、点集光型は集光度が高く高温運転に向いている。特にパラボラ・ディッシュ型の集光度は高



第2図 代表的な集光・集熱技術



第3図 パラボラ・トラフ型コレクタ³⁾

く、太陽炉として使用する場合には数千℃が得られる。

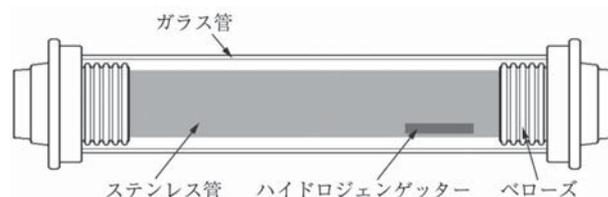
a. パラボラ・トラフ型(Parabolic Trough)

パラボラ・トラフ型は、第3図に示すように、断面が放物線形状の反射鏡の焦線上にレシーバを設置した構造である。中心軸に平行に入射し、反射鏡で反射された太陽光は焦点(焦線)へと集まる。レシーバは光から熱への変換が行われ、得られた熱はレシーバチューブ内を流れる熱媒体を加熱し、これが水蒸気を発生して蒸気タービンを回して発電する構造となっている。パラボラ・トラフ型CSPは、1980年代半ばからカリフォルニアのMojave砂漠で商業運転が行われており、他の方式に比べ圧倒的な商業運転の実績を有する。

一般にパラボラ・トラフ型コレクタは長手方向を南北方向に設置し、東から西へと移動する太陽を1軸で追尾する。アパチャ、すなわちコレクタの幅は、一般に発電に使用されるもので5~6mであったが、近年はコストダウンのために大型化する傾向にあり、最近では7.5mのものも開発されている。

レシーバは真空二重管方式が採用されている。これは、第4図に示すように、熱媒体が流れるステンレス鋼管の外側に透明なガラス管がある構造で、2つの管の間は真空になっている。ガラス管とステンレス鋼管は通常、熱膨張率が異なる。これを吸収し、なおかつ真空を維持するために、レシーバの両端にはベローズ構造を採用している。ステンレス鋼管の表面には選択吸収膜と呼ばれる特殊な被膜が形成されている。これは太陽の光をできるだけ多く吸収し、かつ放射熱損失を抑える特性を有する被膜である。

第4図において、真空部分にヒドロジェンゲッターと呼ばれるものがあるが、これは名前の通り水素を吸収



第4図 レシーバ³⁾

するものである。この水素は熱媒体として用いられている合成油が高温で使用中に徐々に熱分解をして生成されるものである。水素はステンレス鋼管を透過し、真空部分に侵入すると熱伝導率を大幅に高めるため、レシーバの熱損失は一挙に増大する。これを防ぐために水素ジェネレーターが用いられる。このような工夫により、放射熱損失と対流熱損失を可能な限り抑制し、高効率なレシーバが作られている。

熱媒体に合成油を用いた場合、その耐熱温度から稼働温度は高々400℃となっている。一方、熱バランスから考えたトラフ型コレクタの最大効率点は、一般に500～550℃程度である。稼働温度の上昇はランキンサイクル効率向上、蓄熱コストにつながり、高効率低コスト発電の実現にも有効である。このため、熱媒体として565℃程度まで使用できる硝酸塩系の熔融塩を用いる動きや、コレクタで直接水蒸気を製造するDSG(Direct Steam Generation)を採用する動きが始まっている。

b. リニア・フレネル型(LFR: Linear Fresnel Reflector)

リニア・フレネル型は、第5図に示すように、細長い反射鏡を水平に多数並べ、各反射鏡が太陽を追尾し、上方に固定されたレシーバへ集光する。平面鏡は、僅かなパラボラ断面になるようにフレームに接着される。レシーバ上部には2次反射鏡が置かれ、レシーバから外れた1次反射鏡からの反射光を再度反射し、レシーバに集める構造となっている。なお、第5図はコレクタの1モジュールを示すもので、実際の商業プラントではこれが直列につなげられ、全長800 m以上にもなる。

このタイプは、パラボラ・トラフ型と比較して風の影響を受けにくく、堅牢なフレーム構造は不要であり、コレクタは軽量・低コストとなる。質量を比較すると、パラボラ・トラフ型の代表的なタイプであるEuroTroughコレクタが135 kg/m²であるのに対し、第5図のコレクタは28 kg/m²とおおよそ1/5程度である⁵⁾。このように軽量コレクタであることから、建造物の上に設置し、吸収式冷凍機の熱源として使用するなど用途が広がっている。

リニア・フレネル型の特徴として、第2図に示すコレクタの中で土地利用率が最も高いことがある。敷地に設

置できる反射鏡(アパチャ)の面積は、パラボラ・トラフ型が30%程度であるのに対して、リニア・フレネル型の場合には60～80%と倍以上である。一方、リニア・フレネル型は構造上、パラボラ・トラフ型よりも集光効率は低いという欠点も併せ持つ。特に、太陽の高度が低い朝と夕方では、トラフと比較して集光効率が著しく低下する。しかし、上記の土地利用率が倍以上高いことから、単位土地面積あたりに得られる熱量はリニア・フレネル型の方が大きくなる⁵⁾。

リニア・フレネル型コレクタを用いた大型発電プラントも建設されているが、プロセスヒート供給などの熱利用としての用途にも期待が集まっている。そのため、世界のメーカー数はここ数年で急増し、ヨーロッパ諸国のメーカーに加えてインドやアブダビ、中国などでも製造メーカーが現れている。

c. タワー型(Power Tower もしくは CRS: Central Receiver System)

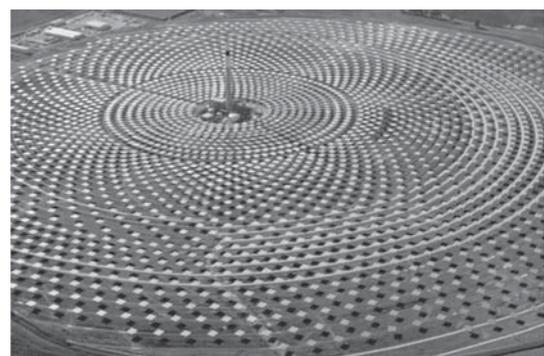
タワー型は、第6図に示すように、タワーの周りに配した多数のヘリオスタットで反射した太陽光を、タワー上部のレシーバに集め、熱へと変換して発電するものである。なお、ヘリオスタットとは太陽を追尾しながら常に一定の方向に光を反射する装置である。本プラントのタワー高さは140 m、タワーから最も離れたヘリオスタットはタワー中心から900 m 近く離れている。

タワー型の特徴は線集光と比較して集光度が高いことで、より高温運転に向いている。第6図に示すプラントは2011年に運転を開始したスペインのプラントであるが、熔融塩を熱媒体として使用し、レシーバ出口の熔融塩温度は565℃となり、それによって製造される蒸気温度も高く高効率の発電が可能である。

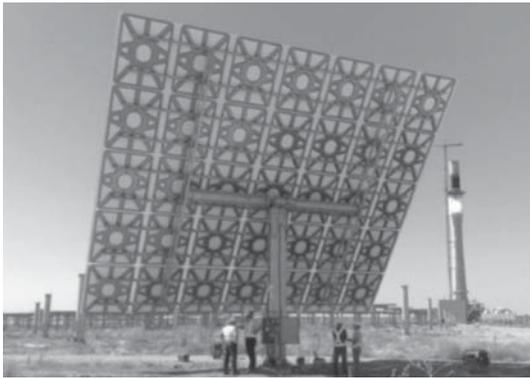
ヘリオスタットは、第7図に示すように、支柱の上に反射鏡を搭載した構造で、支柱上部の駆動部分は2軸で太陽を追尾する。第6図のプラントで使用されているヘリオスタットは反射鏡面積が120 m²/基あり、それが2,650基使用されている。第6図から明らかなように、ヘリオスタットはタワーを中心に同心円状に配置されている。この配置は単純に同心円状に配置するだけでな



第5図 リニア・フレネル型コレクタモジュール⁴⁾



第6図 タワー型プラント(Gemasolar)⁶⁾



第7図 ヘリオスタット背面(Gemasolar)⁶⁾

く、より狭い面積に多くのヘリオスタットが配置されるようになっている。また、周りのヘリオスタットとの間に入射光や反射光の干渉が可能な限り低減されるように配列方法も工夫されている。

タワー型では、熱媒体として熔融塩、水/水蒸気、空気が使用される。それぞれ長所短所があるが、最近はより蓄熱を重視しているため、蓄熱媒体としても使用できる熔融塩を重視する傾向にある。このため、熔融塩を使用するプラントが注目されており、米国でも Solar Reserve 社が110 MW のプラントを建設している。また、他メーカーも同技術の開発を急いでいる。

タワー型の発電方式は他と同じように蒸気タービンを回すランキンサイクルが一般的である。しかし、線集光と比較して集光度が高く高温を得やすい特徴を生かし、圧縮空気を太陽熱で加熱してブライトンサイクルを回して発電する技術の開発も行われている。2000年頃からヨーロッパを中心に開発が行われ、レシーバで1,000°C程度の高圧高温空気を製造しガスタービンを回すことに成功している。現在はこの技術を利用したコンバインドサイクルの開発が進行中である。

d. パラボラ・ディッシュ型(Parabolic Dish)

パラボラ・ディッシュ型は、放物面で太陽光を反射し、その焦点近傍に設置したレシーバで熱へと変換し、スターリングエンジン等により発電するものである。各種 CSP の中で集光度が最も高く、高温が得られるため高効率の発電が可能である。米国 Sandia 国立研究所の実験では、太陽光-電力変換効率は31.25%を記録している⁷⁾。一方、パラボラ曲面全体を常に太陽の方向に向けなければならないため大型化が困難であり、一般に出力は3 kW~25 kW と小型である。パラボラ・ディッシュ型はモジュラー性に優れており、分散型発電設備に適しているため、送電線の設置が困難な島しょ部、山間部などでも用いられるが、多数の装置を並べて発電するソーラ・ファームも建設されている。

Ⅲ. 蓄熱技術

現在使用されている蓄熱システムは、硝酸塩系熔融塩の顕熱を利用したシステムが主流である。これには直接方式と間接方式とがある。直接方式は第6図に示す Gemasolar などで使用しているもので、レシーバで加熱した熔融塩をいったん高温タンクにため、それを徐々に使用しながら蒸気を発生し発電する。冷えた熔融塩は低温タンクにためられ日中再び太陽熱で加熱するというプロセスを繰り返すものである。使用している熔融塩は融点が約230°Cあるが、レシーバで約565°Cに加熱されて高温タンクにためられ、蒸気製造後には約290°Cとなり低温タンクに入れられる。このシステムでは ΔT が275°Cあり比較的蓄熱コストは低い。Gemasolar は15時間の蓄熱能力があり、冬場の一時期を除き24時間運転が可能である。そのため年間の稼働率は約75%となっている。

合成油を熱媒体とするパラボラ・トラフ型プラントも熔融塩を蓄熱媒体として使用している。この場合、合成油と熔融塩で熱交換が必要なため、間接2タンク方式となっている。このシステムでは、合成油よりも熔融塩の温度が低く高々380°C程度である。一方、熔融塩の融点による制約により低温側は約290°Cとなっている。したがって、 ΔT は100°C未満となり、蓄熱コストは相対的に高くなる。パラボラ・トラフ型プラントでは蓄熱コストを下げるために、高温及び低温の熔融塩を一つのタンクに貯蔵する工夫や、上述の高温運転が可能な熱媒体の利用が考えられている。また、熔融塩の代わりに安価なコンクリートを使用する固体蓄熱方式も開発されている。

次世代の蓄熱技術の研究・開発も活発に行われている。開発の方向性としては、エネルギー密度を高くすることと低コスト化である。顕熱蓄熱に代わって注目されているのが相変化を利用する潜熱蓄熱である。稼働温度条件によりさまざまな材料が検討されている。現時点で最も有望な材料の一つは硝酸塩系熔融塩を用いるものである。これは熱伝導性が低いことが欠点であるが、それを向上させるために、グラファイトとのコンポジット化などで対応している。さらにその次の世代の蓄熱材料として考えられるのは、可逆的な化学反応を利用するものである。金属酸化物や金属水酸化物等の使用が考えられている。

Ⅳ. コスト

CSP の設備費の内訳はおよそ半分が集光・集熱関係で占められ、残りが蓄熱や発電装置などとなっている。タワー型の場合、ヘリオスタットが占める割合が40%~50%を占めており、そのコストダウンが発電コストにも大きく影響する。集光・集熱系は発電部分と比較して十分に技術開発が進んでいるとは言えない。このため、コ

レクタの研究開発, 大量生産や標準化の促進などでコストダウンを図る動きが活発である。

CSPの設備費の目安としては30~70万円/kWといわれている。設備費に幅があるのは集光・集熱方式の違いや蓄熱システムの有無及びその要領によるものである。蓄熱容量が大きくなると設備費は増大するが、発電コストはむしろ低下する。これは蓄熱の導入により稼働率が高くなり、設備費と比較して発電量が增加するためである。

燃料が無料のCSPの発電コストは、設備費と運転費が大きく影響するが、それだけでは決まらない。CSPの場合、発電コストはプラント規模が大きく影響する。10 MWのプラントを基準に考えると、80 MWのプラントでは発電コストはおおよそ半分程度になる。また、当然ながらDNIの量も発電コストに影響し、DNIが年間2,000 kWh/m²のスペイン南部と北アフリカや米国南西部のように2,700 kWh/m²以上ある地域とを比較すると、後者の発電コストは20~30%低くなる。2007年に運転を開始したラスベガス近郊のパラボラ・トラフ型のプラントの発電コストは10 c\$/kWhといわれているが、操業コストだけを考えると、3 c\$/kWhとのことである⁸⁾。

V. ポテンシャルと市場

ドイツのDLRの試算によると、パラボラ・トラフ型のプラントを世界のDNIが年間2,000 kWh/m²以上ある地域に設置すると、その発電量は年間300万 TWhになるという。なお、この試算では土地の利用制限なども考慮し、実際に設置可能な土地面積だけを考慮したものである。この電力量は世界の電力需要の150倍以上であり、日射条件が良いサハラ砂漠の200 km四方の土地に設置すると、計算上は世界中の電力需要を十分賄えることになる。

CSPプラント数が最も多いのはスペインで35基、総発電容量は1.6 GWである。これは、固定価格買取制度のおかげで近年一挙に数を増やしたものである。その他1980年代半ばから商業運転を行っている米国も一時期の停滞時期を過ぎプラントの建設が拡大している。現在は他のサンベルト地帯にも拡大中である。

CSPの適地は、第1図に示すように、必ずしも消費地に近い地域にあるわけではない。米国内のようにカリフォルニアの大消費地に近い地域に適地がある場合には問題がないが、消費地と離れていることも多く、送電線の整備が必要である。ドイツは、北アフリカの砂漠地帯でCSPを行い、地元の諸国の国内消費を賄うとともに、高圧直流送電によりヨーロッパへ送電する計画を立てている。これはデザーテック計画と呼ばれており、ヨーロッ

パ諸国をはじめ米国や日本企業も参加を表明している。現在はアラブの春の影響や、EU諸国の経済的問題のため停滞気味であるが、経済の安定を取り戻すとともに活動は活発化されると見込まれる。

VI. おわりに

CSPは古くて新しい技術であるが、自然エネルギーを用い、電力需要曲線に合わせた電力供給が可能なことから注目度は高い。しかし、CSPは直達日射しか利用できないために、サンベルトのような乾燥した直達日射量が高い地域への設置が特に有効である。CSPの主要な集光・集熱技術は4種類あるが、大規模発電設備に向くのはパラボラ・トラフ型、リニア・フレネル型およびタワー型である。現在はパラボラ・トラフ型がほぼ市場を席巻しているが、今後は高温高効率の発電が可能なタワー型や設備費が低く、発電のみならず熱供給への適用が考えられるリニア・フレネル型もシェアを拡大していくと見込まれる。サンベルト地帯は電力需要が旺盛な地域とは必ずしも一致しないが、そのギャップを埋めるのが長距離送電技術である。北アフリカで発電した電力をEUへ高圧直流送電するというデザーテック計画も進行中である。送電が不可能な数千 km 以上離れた地域へは太陽熱を利用して燃料を製造し、それを輸送する技術も開発中である。サンベルトから遠く、しかも周りを海に囲まれた日本では、太陽を利用した燃料技術が今後のエネルギー安全保障の一翼を担うと見込まれる。

— 参考資料 —

- 1) Energy Technology Perspectives 2008, IEA.
- 2) Solar Millennium 社 HP
- 3) 吉田, 郷右近, 兎玉, 太陽熱発電・燃料化技術, コロナ社, (2012).
- 4) Novatec Solar 社資料.
- 5) F. Trieb, *et al.*, Concentrating Solar Power for Seawater Desalination, DLR, (2007).
- 6) Torresol Energy 社資料.
- 7) C. E. Andraka, *et al.*, Dish Stirling Development for Utility-Scale Commercialization, SolarPACES, (2008).
- 8) C. Richter, *et al.*, Concentrating Solar Power Global Outlook 09, (2009).

著者紹介



吉田一雄(よしだ・かずお)
(財)エネルギー総合工学研究所, 新潟大学
(専門分野/関心分野)集光型太陽熱発電・
太陽熱利用, トライボロジー(摩擦・摩耗・
潤滑)



危機管理とヒューマン・マシン・インタフェースにおける課題と議論

震災を踏まえて：HMS 研究部会夏期セミナー会議報告

電力中央研究所 長谷川尚子, 電力研究国際協力機構 松村哲夫, 岡山大学 五福明夫

2012年度のヒューマン・マシン・システム研究部会夏期セミナーでは、「危機管理とインタフェース」をテーマとし、原子力分野のみならず、災害対策、航空、鉄道の各分野から講演をいただいた。東日本大震災や東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓、ならびに教訓を踏まえた新たな取組みに関する議論の中から、危機管理のあり方を考えるための多くの視点が提起された。

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震とそれに伴う大津波による東京電力(株)福島第一発電所事故(以下、1F事故)では、わが国の原子力界における危機管理の問題が露呈した。例えば、現場情報の取得、関係者間の情報共有、事象進展予測、対応策の候補の検討、適切な意思決定、対応策の実施等がいずれも円滑に進まなかった。また、これら危機管理の様々なプロセスにおいて、現場での活動を支援したり様々な組織間のチーム協調を円滑にしたりするインタフェースも、危機管理体制の充実に向けて必要な要素となる可能性がある。

そこで2012年度の夏期セミナーは、危機管理や危機への効果的対応といった観点から、東日本大震災ならびに1F事故からの教訓、また現状における体制や教育・訓練の問題点を認識し、議論を深めることをねらいとして企画された。セミナーは8月6日(月)～7日(火)に電力中央研究所大手町本部にて開催され、原子力分野だけでなく、災害対策、航空分野や鉄道分野で活躍している研究者、実務者の方々に講演者として招き、それぞれの専門の立場から講演をいただいた。

第1日目は「危機管理」をテーマとし、①BWR運転訓練センター(以下、BTC)で実施予定の1F事故に関する訓練内容、②発電所でのシビアアクシデント訓練の課題と提言、③自衛隊の震災時の災害派遣活動と同活動から得た教訓と反省、について紹介いただき、緊急対策訓練の課題などについて議論を行った。第2日目は「ヒューマン・マシン・インタフェース」をテーマとし、①航空管制行動の現場観察に基づく、チーム協調過程のモデル構築および検証、②オペレータ(鉄道運転士)の社会心理的側面(働きがいや職務の捉え方)を考慮したヒューマ

Issues and Discussions on Crisis Management and Human Machine Interfaces ; Summer Seminar Report of Subcommittee of Human-Machine Systems Research : Naoko HASEGAWA, Tetsuo MATSUMURA, Akio GOFUKU.

(2012年 9月14日 受理)

ン・インタフェース設計に関する試論が展開され、マニュアルやオペレータのモチベーションを考慮したヒューマン・マシン・インタフェースのあり方について議論がなされた。

以下では、各講演の概要と会場での主な議論を紹介する。

2. 危機管理

(1) 1F事故の振り返り・対策実践訓練のご紹介 および今後の運転訓練課題

(BWR 運転訓練センター・中島章喜 主幹)

原子力発電所運転員の持つべき技量としては、系統設備・プラント挙動・操作手順等の知識だけでなく、チームワーク、リーダーシップ、コミュニケーション等の実践的な技能が挙げられる。BTCでは、これらの技能を維持向上するための訓練の工夫に取り組んできたが、その最中に1F事故が発生した。この事故を受け、BTCでは今年度から当該事故に関する訓練の実施を計画している。

訓練は運転当直チームを対象とした正味1.5日のコースであり、1F事故の進展や事故対応の振り返りおよび緊急安全対策の理解向上を目的としている。1F事故の振り返りについては、まず座学研修にて1F事故時の1～3号機それぞれの事象の比較・整理を行った後、シミュレータ訓練にて1F事故進展の挙動や過酷な職場環境(真っ暗な中央制御室におけるプラント状況の把握や、放射線防護用の全面マスクを装着した上でのコミュニケーションなど)を体験させる。緊急安全対策の理解向上については、規制要求事項に関する知識付与にとどまらず、「どのような設備があれば炉心損傷に至らなかったか、どのような対応をすれば炉心損傷を防止できたか」に関するチーム内での議論も行い、自ら考えることで自社の安全対策や操作手順に関する理解を深められるよう工夫されている。

各種の事故調査委員会による報告書では、緊急時の情報伝達・情報共有・支援要請などの問題点や、外部状況

や家族の安否もわからぬまま事故対応に当たらねばならない現場従業員の心理的な問題も指摘された。そのため今後はさらに、発電所の緊急対策本部とのコミュニケーション、緊急対策本部に対するアサーション(主張)、リーダーシップの発揮や、緊急時対応において手も足も出ないといった不安を抱えるチームメンバに対するチーム・ビルディング(チーム構築)といったソフトスキルの知識・技能の維持向上なども運転訓練課題に含めることが検討されている。

講演後の質疑では、今後の訓練課題として、中央制御室と緊急対策本部および現場作業員とのかかわり合いなどをどう訓練に組み込んでいくか、また緊急対応時における良好事例の活用の可能性などについて議論が行われた。

(2) 原子力災害時の緊急対策本部における対処行動について (宮城学院女子大学・大橋智樹 教授)

1F事故の教訓を生かそうと、全国の原子力発電所では現在、緊急安全対策が実施されている。本講演では、ある電力会社の原子力発電所における緊急対策訓練を踏まえた訓練の現状と問題点が述べられた。

現在実施されている訓練シナリオでは、1Fと同規模の地震・津波で浸水し全電源喪失が起きたとの想定で、津波によって流入・散乱した瓦れき等のホイルローダによる除去、仮設の大容量電源装置・電源車による電源供給、消防車等による注水、建屋上部水素抜き穴の開放などが行われている。訓練は真摯に実施されているものの、現段階では冷却系配管はあくまでも健全であるとか、車両の通行ルートをホイルローダ1台で確保できるなど、かなり限定された状況での対応訓練にとどまっているなどの問題点が指摘された。

現在のシビアアクシデント訓練は、あらかじめ決められたシナリオに従って冷静に緊急時対処を実施・確認するという、いわば“基礎固め”の段階である。しかし想定外事態にうまく対処するためには、例えばチームを2つに分け、一方がシナリオを考え、一方が対処するなどの「想定外事態対処訓練」も行う必要がある。これにより、事態に対処している際に湧き起こる感情や行動を自ら体験できるだろう。さらに、現在進められている発電所と官邸等とを接続したTV会議システムの整備については、発電所での緊急時対応に官邸での意思決定が直接入ることによって現場が混乱する危険性があるとの指摘もなされた。

上記の問題点を踏まえ、今後の緊急事態対応に向けて次の提言がなされた。①事象の流れに身を任せず、一旦流れから抜けること、②現場が事故の進展を防ぐための力を最大限発揮できるよう環境を整えること、③“想定外の想定内化”は有限であると認識し、シナリオ訓練以外の想定外事態対処訓練を実施すること、④震災後に何

もかもを変える必要はないが、変えない場合であっても変える必要性の有無を検討した上で変えないことを選択すること。

最後に、原子力技術のさらなる高度化のため、電力会社や原子力業界、そしてそれらを取り巻く社会に対する提言もなされた。①問題点を臆せず指摘できる雰囲気醸成(言いづらさ、配慮からの解放)、②単なる一事実拘泥しない社会の構築(ささいな過ちを拡大解釈しない)、③主張すべきを主張できる事業者たること(甘受する文化や主張しない文化の弊害を認識すべき)、④1F事故にとらわれ過ぎないこと(1F事故再発防止への社会の強い要請に対して真摯に応えることは、安全性向上にも資する。しかし、その要請に応えようという意識が強すぎるあまりに、1F事故の再発防止があたかも安全性向上の十分条件であるかのような錯覚に陥らないように注意すべき)。

講演後の会場では、原子力発電における多様な視点からのチェック機能の不足、事故時の情報提供のあり方(知り得た情報を出した上で「これは断片的な事実であり確定的なものではない」ということも付け加えるなど)、および情報の受け手のリテラシーの問題などが議論された。

(3) 防衛省自衛隊の概要と東日本大震災における活動 (航空自衛隊 防空指揮群司令 兼 横田基地司令・日吉章夫 1等空佐)

本講演では、国家安全保障を担う自衛隊の組織体制および東日本大震災における災害派遣活動の概要、また派遣活動から得られた教訓と反省について紹介された。

防衛省では平成18年に、陸・海・空の統合運用をより円滑に実施するため、統合幕僚監部を設置し、防衛大臣が統合幕僚長を通じて指揮できるように組織改編を実施した。東日本大震災ではこの仕組みが機能し、陸・海・空を統合運用した災害派遣活動が有効であることが検証できた。また阪神・淡路大震災や新潟県中越沖地震等の教訓の蓄積により、初動対応要領や部隊活動要領などが確立されていたことから、円滑な災害派遣が可能となった。

一方、教訓として、①政治レベルの統制のとれた意思決定、②自衛隊が軍事組織として本来保有すべき自己完結性の一部欠落、③有事又は緊急事態における法制度の未確立、④大規模な津波に対する基地等の脆弱性が挙げられた。

①としては、安全保障会議も参集されず国防機能への影響を十分議論されないうえ派遣規模が決定された点(約27万人の自衛隊から10万人の派遣態勢となった)、②としては、人員増抑制政策により給食機能を外部委託していた郡山駐屯地では、原子力発電所の事故対応で人員が数倍となったものの急に給食数を増やすことができず、

隊員が長期間保存食でしのぎざるを得なかった点、また輸送能力が不足していたため部隊の移動に手間取った点、③としては、遺体の取扱い、被災民の誘導等の権限が自衛隊には与えられていない点、④としては、松島基地の津波被害などが指摘された。

会場からは、危機対応の場面における意思決定の委任の仕組みや、自衛隊で行っている演習・訓練について質問があった。意思決定の委任の仕組みについては、あらかじめ委任の範囲などが規則体系で定められているが、今回の災害のように計画段階で委任範囲を定められない場合は、指揮官が方針・命令を下す際、委任事項を明示するといった対応を取っているとのことであった。演習・訓練については、まず初歩的な基礎訓練を何度も繰り返し、次の段階でシナリオに基づいた総合的な訓練を実施、その後、指揮官の状況判断訓練として、指揮官の状況判断に基づく活動に対応して状況付与を変化させていく訓練が実施されるなど、段階的な訓練を実施していることが紹介された。

3. ヒューマン・マシン・インタフェース

(1) 航空路管制におけるチーム協調過程のモデル化

(東京大学大学院工学系研究科・古田一雄 教授)

航空需要の高まりとともに、航空管制官の認知的負担軽減や訓練の高度化によるヒューマンエラーの防止が望まれている。しかし、管制官の認知過程、特にチーム協調のメカニズムについては十分な研究が行われていない。そこで本講演では、記述的に現場観察を行い、チーム協調の相互信念モデルに基づいて観察記録の認知タスク分析を実施し、管制官のチーム協調過程のモデルを構築した研究が紹介された。

航空管制業務では、レーダ画面を監視する対空席と、他セクタ(空域)との調整を行う調整席の2名によるチームで管制業務がなされている。そこでチームの状況認識に関する相互信念モデル(個人の状況認識とチームメンバー間の相互信念によってチームの状況認識が成立すると仮定するモデル)に基づき、これら業務の現場観察記録の認知タスク分析を行った。その結果、管制官のチーム協調過程が相互信念モデルによって説明可能であることが検証された。さらにこのモデルに基づきチーム相互作用を再現するコンピュータシミュレーションを開発したところ、現場観察データの再現性が確認され、シミュレーションモデルの有効性が検証された。このようなアプローチは状況認識を共有するスキルの向上という観点から、今後、管制官のトレーニングや原子力発電所運転員のファミリー訓練、航空機パイロットのCRM訓練(航空機操縦に対してあらゆる資源を活用し、操縦チームの業務遂行能力を向上させるための訓練)等に貢献できる可能性が示唆された。

会場からは、航空管制業務と原子力発電の運転・制御

の違いについて質問があった。航空管制業務では原子力発電と異なり、管制官同士の専門レベル(expertise)は極めて類似しており、管制業務における基本戦略では個人差はほとんどない。また原子力のように原子炉系とタービン系に分かれた分業体制でプラント対応に当たるとはならず、2人の管制官のしている現象は同じである点が原子力発電の運転との相違点であり、原子力発電所のような詳細なマニュアルはなく、個人のスキルを尊重しているとのことであった。

(2) 「鉄道運転士の職務の実践と HI(ヒューマン・インタフェース)設計との関連に関する試論

(西日本旅客鉄道(株) 安全研究所・藤野秀則氏)

オペレータを取り巻く HI は、これまでは基本的にユーザビリティや認知的側面への影響という観点に基づいて設計されてきた。しかし、HI(より広くは情報環境全体)はオペレータの価値観や職務の捉え方、それらに根ざした業務遂行中の気分や働きがい、モチベーション、さらには職務行動にも影響を与えると考えられる。そこで本講演では、「HI の設計はオペレータの社会心理的側面への影響を考慮し、彼らの価値観や職務実践の全体像の設計という視点で行っていかねばならない」という考え方を提起するため、鉄道運転現場における事例に基づいた試論が展開された。

鉄道運転士は、ATS や ATC などの運転制御システムの制御範囲において、自ら工夫しながら滑らかなブレーキ制御を行うなど、上手な運転に楽しみ(働きがい)を感じている。このような運転士の自律的行動と働きがい、コミュニケーション等の関連性分析を行った結果、運転士の自律的行動は管理職層とのコミュニケーションの促進にも結びつくことが示唆された。一方、運転マニュアルでがんじがらめになっていると、管理層と話をする必要もなくなり、コミュニケーションもなされなくなる傾向にある。そのため、今後何らかの支援システムを検討する際には、運転士が自律性を感じられるような支援が良いだろう。例えば、取るべき行動を明示するシステムではなく、システムによる行動の制限を可視化しておく、制限を逸脱しそうな場合には、逸脱が顕在化する前に自動修正するシステムなどが考えられる。また、自動化システムの導入やワンマン運転などにより運転士の職務が変化すると、それに応じて働きがいの意識も変わることが観察された。

会場では、意識の高い運転士とそうでない運転士との行動(パフォーマンス)の違いや、運転制御システムが運転士のエラーの捉え方に及ぼす影響などについて議論があり、運転支援システムや運転マニュアルの導入・設定にあたっては、運転員の自律性や働きがい(モチベーション)にも配慮する必要性が示唆された。

4. まとめ

今回の夏期セミナーでは、危機管理のあり方を考えるための多くの視点が提起された。

災害対応の教訓・良好事例の活用

まず今般の災害対応における教訓・良好事例活用の観点から、関係組織を含めて取り組むべきは「①情報収集や意思決定を一元的に行う組織体系をあらかじめ構築しておくこと」および「②過去の緊急時対応の教訓だけでなく良好事例をも活用し、次に備えておくこと」と考えられる。①に関しては、現場とオフサイトの役割分担と権限委譲、そして現場への権限委譲の仕組みも考慮すべきであろう。さらに、報告・連絡といったコミュニケーションを介さなくても情報・認識共有が可能なヒューマン・インタフェースも必要となると考えられる。

緊急時対応訓練

より迅速かつ円滑な緊急時対応に向けて訓練を実施するには、まずは現行通り、基礎的な初動訓練やシナリオに則った訓練が有効と考えられる。だが今後はさらに「③過去の事例にとらわれずにリスクを想定する」という観点に基づき、過去の経験を越えた訓練シナリオに準じた訓練も試す必要があるだろう。そして想定外事態の訓練を行う場合には、「④緊急時には、一旦、その場の状況から離れて考える時間を持つ(できるだけ冷静な心の状態を保つ)」、「⑤緊急時には、現場からオフサイトに情報・物資等を要求するのは良いが、オフサイトから現場に情報を要求したり過剰な指示を出したりすることで、現場の対応を阻害すべきではない」という観点に基づく行動を意識的に実践し、対処方略を実体験として身につけることも意義があると考えられる。また、事故時に起こりえる事象と原子力発電所機器類の役割と能力についての深い知識の下で、「⑥想定外事象にも柔軟に対応できる能力の育成方法を確立すること」も重要であろう。

事故の未然予防

しかし何より重要なのは、これらの対応を要する事故自体を防ぐことである。事故の未然予防には、「⑦多様な観点でリスクを想定して確実に予防保全策を施すこ

と」、「⑧気づいたりリスクについては、積極的かつ合理的に発言すること」が必須である。また全ての緊急時対応をマニュアル化することは困難であるため、「⑨技術的側面だけでなく社会心理的側面も考慮に入れて運転員や発電所関係者の自律的な行動を促す工夫」が必要となる場合もあると考えられる。

東日本大震災および1F事故の教訓を踏まえると、危機管理においてはヒューマンエラー防止策の検討と同様、発生した事象・事例(他所の事例も含む)から教訓を導き出し、常に新しい対策や訓練を継続的に実施していくこと、また発生した事象だけにとらわれることなく不断にシナリオを考え、対応における指揮・命令系統や権限委譲のルールを整備しておくことが重要であろう。さらに、職務に対する人間のモチベーションがその内容によって変わり得ることを配慮しつつ、自動システムの導入や新しいヒューマン・マシン・インタフェースの研究開発を進めることも必要と考えられる。

著者紹介

長谷川尚子(はせがわ・なおこ)

電力中央研究所

(関心分野/専門分野)安全文化, ヒューマンファクタ教育など/産業・組織心理学



松村哲夫(まつむら・てつお)

電力研究国際協力機構(IERE)

(関心分野/専門分野)原子炉物理, 使用済燃料貯蔵, ヒューマンファクタなど



五福明夫(ごふく・あきお)

岡山大学大学院自然科学研究科

(関心分野/専門分野)ヒューマン・マシン・インタフェース, メカトロニクス, 知的システムなど



連載
講座これからの原子カシステムを担う
新原子力材料

次世代原子カシステムのための材料開発の現状と課題

第4回 SiC 複合材料

京都大学 エネルギー工学研究所 檜木 達也

低放射化特性、耐照射特性、高温強度特性、耐食性等から SiC 複合材料はこれからの原子カシステムを担う材料として、研究開発が進められている。高結晶性の SiC 繊維と SiC マトリックスで構成された SiC 複合材料は、優れた耐照射特性を示し、材料の製造技術や接合技術、評価技術の進展とともに、核融合を目指した応用から、先進核分裂炉、軽水炉被覆管へ、より近い将来の原子カシステムへの応用を目指した研究が進められている。

I. はじめに

原子力分野における炭化ケイ素(SiC)セラミックスの研究は、1960年代後半からガス炉における被覆粒子燃料への被覆材のために行われ¹⁾、照射下で安定な材料として、現在でも候補材とされている。SiC が構造材料として注目されたのは Yajima らによる SiC 系繊維の開発²⁾を発端とした、SiC 繊維強化 SiC 複合材料(SiC 複合材料)の開発に因るものである。SiC 複合材料とは、SiC セラミックスを SiC 繊維で強化した材料である。実際には、繊維とマトリックスの間に相対的に弱い炭素(C)や窒化ホウ素(BN)等の界面相を施し、亀裂が捕捉、偏向されることにより、構造材料として要求される破壊靱性を備えている。また炭化ケイ素繊維も、第1表に示されているように、酸素を多く含む第一世代の SiC 繊維(Nicalon, Tyranno Lox M)や多量の余剰 C を含む第二世代の SiC 繊維(Hi-Nicalon, Tyranno TE)、高純度 SiC で形成された第三世代の SiC 繊維(Hi-Nicalon-S, Tyranno SA)等があり、耐照射特性や高温強度特性等が異なる。

原子力分野では、核融合構造材料として1990年代初頭から本格的に検討され始めた。当初作製された SiC/SiC 複合材料は、第一世代の SiC 繊維や、第二世代の SiC 繊維で強化された材料であり、中性子照射後に十分な強度が得られなかった³⁾。気相浸透反応(chemical vapor

第1表 SiC 繊維の特性

SiC Fiber	C/Si Atomic Ratio	Oxygen Content (wt%)	Tensile Strength (GPa)	Tensile Modulus (GPa)	Density (Mg/m ³)	Diameter (μm)
Nicalon	1.31	11.7	3.0	220	2.55	14
Tyranno Lox M	1.37	11	3.3	187	2.48	11
Hi-Nicalon	1.39	0.5	2.8	270	2.74	14
Tyranno TE	1.59	5.0	3.4	206	2.55	11
Hi-Nicalon-S	1.05	0.2	2.6	420	3.10	12
Tyranno SA	1.08	<1	2.8	380	3.10	10, 7.5

infiltration: CVI)法で形成された純度の高い SiC マトリックスは、照射下でわずかにスエリングするのに対して、第一世代及び第二世代の SiC 繊維は緻密化したため、繊維マトリックス間に生じる大きな残留応力により、界面強度の著しい劣化、剥離を生じたことが原因であった。

1990年代後半に、高純度 SiC で形成された第三世代の SiC 繊維を用いた SiC/SiC 複合材料の照射後試験結果が報告され始め⁴⁾、近年のいわゆる「耐照射特性に優れた SiC/SiC 複合材料」の基礎が確立した。製造技術の進展とともに、核融合炉構造材料、液体ブランケット用インサート材⁵⁾、ガス冷却高速炉炉心材料、高温ガス炉制御棒、熱交換器、軽水炉被覆管等への応用が検討されるようになった。

II. SiC 複合材料の特徴

SiC はエンジニアリングセラミックスの中でも、下記

Materials for New Generation Nuclear Energy Systems—Current State and Future Agenda for Material Developments(4); SiC Composites: Tatsuya HINOKI.

(2012年 9月27日 受理)

■前回のタイトル

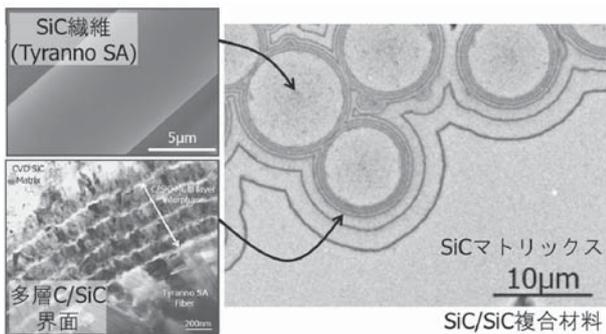
第3回 酸化物分散強化型フェライト鋼

に示すような優れた特性を備えている。

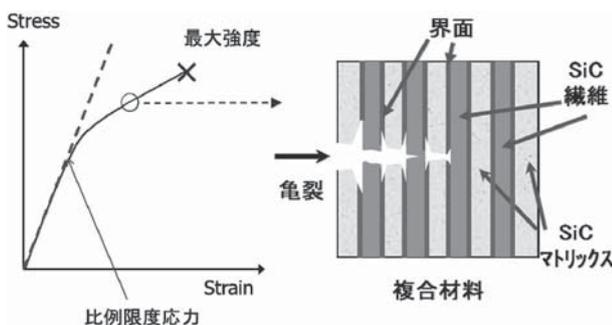
- ・ 軽量
- ・ 耐熱性(高温強度)
- ・ 耐摩耗性(高硬度)
- ・ 化学的安定性(耐酸化, 耐食性)
- ・ 高熱伝導率, 低熱膨張率
- ・ 低誘導放射化, 低崩壊熱

これらの優れた特性を維持しつつ、セラミックスの弱点である脆弱性を大きく改善させたのがSiC複合材料である。SiC複合材料は、繊維、マトリックス、繊維/マトリックス界面相で構成され、第1図は繊維、CVI法で作製した界面相(CとSiCの多層界面)、SiC複合材料の微細組織を示している。

SiC複合材の応力-歪曲線は通常、弾性限界応力までの線形領域とそれ以降の非線形領域からなる(第2図, 左図)。オフセット法などで定義される弾性限界応力は、金属材料の降伏応力に相当するが、SiC/SiC複合材料の構成要素は基本的に非弾性変形を生じないので、それ以降は、マトリックス、界面、繊維のミクロな破壊により、見かけ上の延性を示している。弾性限界応力で生じたマトリックスの亀裂は第2図の右図で示されているように、界面に進展し剥離した界面では摩擦力が生じる。これらのミクロな破壊後、応力の再分布が起こり、見かけ上の弾性率が減少する。最大強度は、理論的には繊維の強度、体積率、破断強度分布のばらつきを示す指標のワイブル係数に依存する⁶⁾。弾性限界応力を決める初期マトリックス亀裂応力はもう少し複雑で、界面の摩擦力、繊維径、マトリックスの破壊エネルギー、繊維体積率、



第1図 CVI法で作製されたSiC複合材料の微細組織



第2図 SiC複合材料の破壊挙動

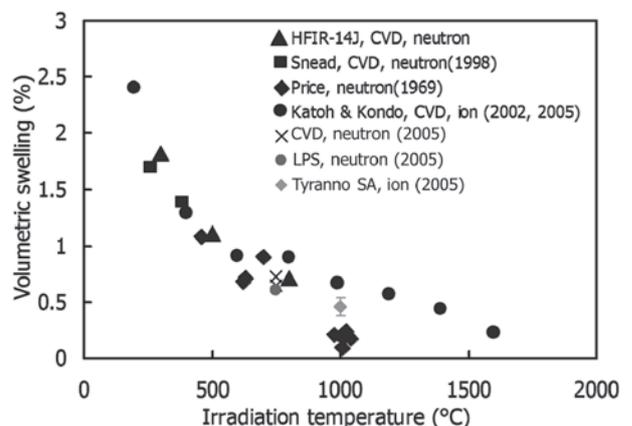
繊維、マトリックス、複合材料の弾性率に依存する⁷⁾。マトリックスの破壊エネルギーなどは、構成要素の熱膨張係数差に起因する残留応力の影響を受ける。SiC複合材料の作製温度は通常、1,000℃以上なので、少なくとも1,000℃程度までは昇温すると残留応力は緩和し、構成要素自身の劣化も生じないため、安定した強度特性を示す。1,000℃以上の強度特性は、使用する繊維の耐熱性、マトリックスの不純物等に依存するが、1,500℃以上の耐熱性を持つ材料の作製も可能である。ただし、酸化雰囲気などでは繊維/マトリックス界面にCを用いる場合は、高温で焼失してしまうため被覆等の処置が必要である。

高熱焼度化、中性子経済の点でもジルカロイよりも優れるとされていることから、軽水炉の被覆管への応用が検討されてきた。福島事故を受け、特に高温水蒸気に対する耐食性が重要となっている。材料の種類や不純物により、SiCの高温水蒸気による腐食量は変わってくるが、報告されている1,200℃の水蒸気雰囲気(10 atm, 15 %H₂O)での腐食実験では、腐食の多いSiCで2.5 μm/d程度であり⁸⁾、ジルカロイ等の金属材料とは大きく異なり、万が一冷却喪失が生じて、長時間耐えられる事故耐性を強化した炉心燃料の開発が可能となる。

Ⅲ. SiC複合材料の耐照射特性

1. SiCの照射誘起スエリング

SiCの照射下での特長として、スエリング特性が挙げられる。SiCは200℃程度以上、1,100℃程度以下の範囲では、基本的に1 dpa以下でスエリング量は一定になる。イオン照射は、照射領域において損傷勾配が生じるが、最表面で1 dpa程度以上照射すれば、照射領域全体において、スエリング量としては一定となる。第3図は、中性子照射またはイオン照射を行った高純度CVD SiCの照射温度に対するスエリング量を示したものである。中性子照射とイオン照射によるスエリングは、非常に良



第3図 SiCの照射誘起スエリングに及ぼす照射温度の影響

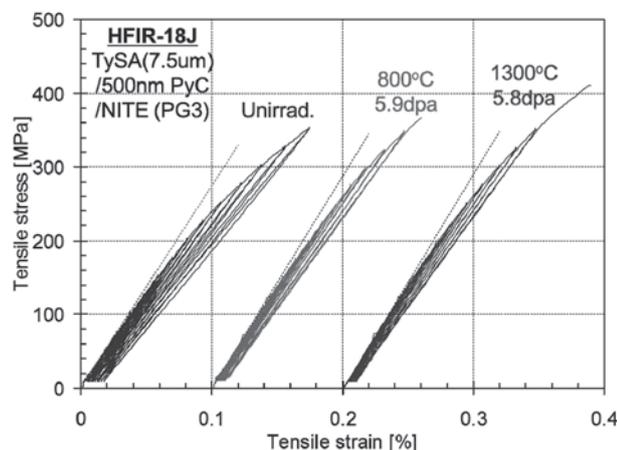
い相間関係が得られている。基本的には照射温度の上昇に伴い、スエリング量は低下する傾向にある。200℃程度以下では、アモルファス化が生じるために、照射環境下での使用には適さない。1,100℃程度以上に関しては、ボイド形成による照射量に依存したスエリングが懸念されるが、基本的には、非常に低い領域で抑えられているため、想定される照射量によっては、使用が可能であると考えられる。

2. SiC 複合材料の強度特性に及ぼす中性子照射効果

耐照射特性に優れる SiC 複合材料に要求されるのは、高純度 SiC からなる高結晶性 SiC 繊維である。また、繊維と同様にマトリックスに関しても、高結晶性 SiC が必要であり、CVI 法や液相焼結 (LPS) をベースにしたナノインフィルトレーション遷移共晶相 (nano-infiltration and transient eutectic phase: NITE) 法⁹⁾ などにより作製することができる。第三世代の繊維を用いた SiC 複合材料に関しては、繊維、マトリックスともに、高純度の SiC で形成されており、同様なスエリング特性を示すことから照射後も安定した強度特性を示す。第 4 図は、第三世代の繊維を用いて NITE 法で作製した SiC 複合材料の非照射材と照射材の除荷—負荷繰り返しの引張試験を行った結果を示したものである。ヒステリシスループ解析の結果、構成要素のスエリングや照射クリープなどにより、ループ間隔の変化、残留応力の緩和などが生じているのが明らかになったが、比例限度応力や最大強度に関して、基本的な強度特性の低下などは、中性子照射により生じていないことが明らかになった。

3. SiC 複合材料の熱伝導に及ぼす中性子照射効果

SiC は照射下での寸法変化や強度などは、非常に安定した特性を示すが、熱伝導に関しては大きく低下する傾向がある。CVD SiC は室温で 300 W/mK の高い熱伝導を有するが、フォノン散乱により高温でも低下する傾向



第 4 図 NITE 法で作製した SiC 複合材料の引張強度特性に及ぼす中性子照射効果

がある。SiC 複合材料の場合、結晶粒サイズ、気孔や C 界面相、繊維などの影響で標準的な材料で、室温で 15~30 W/mK 程度である。中性子照射により、大きく低下する傾向があり、標準的な SiC 複合材料の中性子照射材は、10 W/mK 以下に低下する。高い熱伝導が求められるアプリケーションにおいては、照射下での熱伝導の低下は大きな課題となっている。

IV. SiC 複合材料の開発の現状

1. SiC 複合材料の作製技術の現状

SiC 複合材料は耐照射特性も考慮した最適化が完了したわけではないが、基本的な作製技術は得られている。作製における技術課題は、実用化のための比較的大きな部材の作製技術開発、複雑な形状物を作製するための接合技術、耐食性を向上させるための被覆技術に移ってきている。これまでに、航空・宇宙分野で培われたニアネットシェープ成形技術(あらかじめ目的となる対象物を繊維で形成しマトリックスを含浸する方法)により、高結晶性 SiC 複合材料を用いて、米国で高温ガス炉制御棒のための要素材が作製され、国内ではガス冷却高速炉炉心材料開発で $\Phi 200 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ や $\Phi 22.7 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ の管材等が作製されている。

2. SiC 複合材料の接合技術

接合技術開発に関しても、ガラスを用いた方法や SiC セラミックスシートを用いた液相焼結を用いた方法などの開発が進められている。液相焼結を用いた方法では、外形 12 mm、内径 10 mm の管材の接合や、第 5 図に示



第 5 図 SiC 複合材料熱交換器スケールモデル

すように、熱交換器向けに、100 mm 角で内部に3段のチャンネルを有するスケールモデルを接合により作製し、更にねじ接合と無加圧の反応焼結を組み合わせたことにより、熱交換器スケールモデルに管材を接合させた複雑な形状物も得られている。

SiC 同士の接合以外にも、核融合分野においてプラズマ対向材料と期待されるタングステンとの接合、タングステンを介して、更に鉄鋼材料との接合技術開発も進められている。タングステンと SiC は熱膨張係数が近いいため、比較的容易に接合することが可能である。逆に鉄鋼材料とは熱膨張係数差が大きいと、SiC との反応が過剰に進みやすいことから、反応の抑制のためにタングステンを挟み、更に熱膨張係数差が緩和されるような金属を挟み込むことにより接合をすることが可能である¹⁰⁾。

3. 界面のない新しい SiC 複合材料の開発

SiC 複合材料は微小な亀裂を補足または分散させるために、相対的に弱い C 等の界面相を繊維/マトリックス間に施す必要があり、界面相の制御が材料の強度特性に大きく影響するため、安定した優れた特性を得るためには、CVD 法による界面形成が必要となる。これらの界面形成には、高度な制御技術と多大なコストが必要となり、SiC 複合材料の実用化にとって、大きな障壁となっている。SiC 自身は非常に優れた特性を持っていても、界面相が耐環境特性の観点で、弱点となり結果的に耐環境被覆などが必要になってしまうなどの問題点があった。C 界面を有する SiC 複合材料においては、高温酸化雰囲気中で C 界面が酸化してしまうため、基本的には耐酸化被覆が必要になってしまう。最近の試みとして、これまで SiC 複合材料の弱点であった繊維/マトリックス界面相のない、全く新しい概念の SiC 複合材料を、ポーラスマトリックスを用いることにより開発が行われている。

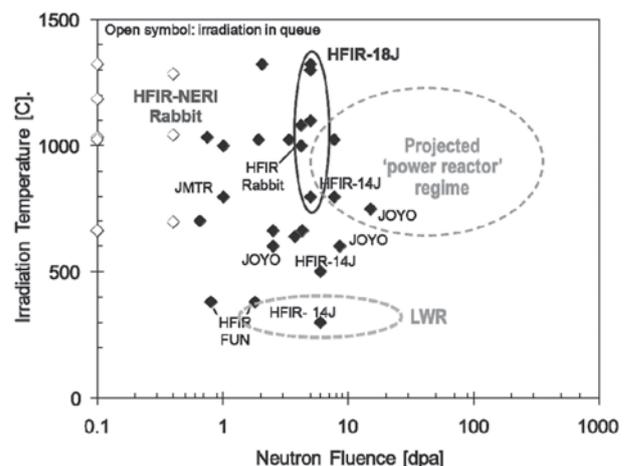
界面における亀裂の補足や分散が生じるためには、繊維とマトリックスの相対的に弱い結合や弾性率の相違等が条件となるが、ポーラスマトリックスを用いることにより、繊維とマトリックスの部分的な結合、繊維と異なる弾性率を持つことなどの理由により、界面層なしでも見かけ上の延性を示し、1,100℃、大気暴露後にも健全な材料特性を維持する結果が得られている。新材料は、界面相を必要としないため、従来材に比べて、歩留まり、コストの点で非常に有利である。繊維束内への緻密化の必要性も低いため、液相焼結法においては、繊維束とセラミックスのグリーンシートの積層により材料を作製することも可能である。従来材料に比べて、非常に安定した特性の材料を低コストで作製することが可能であるため、産業利用に適した材料として開発が進められている。

V. おわりに

原子力分野における SiC 複合材料の研究は、核融合分野での応用を目指した研究により始まったが、製造技術、評価技術の進展とともに、ガス冷却高速炉炉心材料、高温ガス炉制御棒、熱交換器、軽水炉被覆管などへの応用が検討されるようになった。特に福島の影響を受け、軽水炉の安全性を著しく向上させる手段として、高温水蒸気に対する耐食性、水素の発生の抑制などの特性を考慮し、SiC 複合材料の被覆管が米国や日本をはじめとして、世界中で検討されるようになってきている。SiC 複合材料はこれまで、比較的高い温度での利用が想定されていたため、第 6 図に示すように、中性子照射データに関しても 600℃を超えるような比較的高温のデータは充実しているが、SiC 複合材料にとっては比較的低温である軽水炉の温度域でのデータが重要になってきている。軽水炉への応用のためには、高温水腐食と中性子照射損傷との相互作用、燃料との化学反応と中性子照射損傷との相互作用などが課題である。

実用化のためには、材料規格等を含む設計規格、材料特性データベース、試験規格等が必要である。原子力分野におけるセラミックス複合材料を用いた設計規格は存在しないが、セラミックスでは、VHTR の炉心黒鉛構造物設計のため、米国機械学会で設計規格を検討中であり、これにセラミックス複合材料を加える形で検討が進められている。SiC 複合材料の特性に関しては、核融合分野における ITER-BA 活動等により材料特性データベース整備が行われている。試験規格に関しては、ASTM において、比較的充実したセラミックス複合材料向けの規格が整備されている。

耐照射特性、高温強度、耐食性などの材料の基本特性は、SiC 複合材料は非常に優れている。高い熱伝導が求められるアプリケーションにおいては、照射下での熱伝導の低下が課題であるが、熱伝導が求められる方向への



第 6 図 SiC 複合材料の中性子照射実績

C 繊維の強化, マトリックスの結晶粒サイズの増加などにより, 熱伝導の向上は可能であるが強度特性とのトレードオフの関係にある。製造性やコストは現状では問題であるが, SiC 複合材料は, 航空・宇宙分野をはじめ, 非原子力分野での利用も期待されているため, 幅広く材料が利用されることにより, 改善されるものと考えられる。良い意味でも悪い意味でも SiC 複合材料はセラミックスとも金属とも異なるため, 材料の特徴をよく理解し, 現時点での技術見通しに基づく, 金属材料の単純な代替ではない SiC 複合材料のための, 各応用分野への新たな設計が真に魅力ある原子力システムを構築していくうえで重要である。

—参考資料—

- 1) R.J. Price, *Nucl. Technol.*, **35**, 320-336(1977).
- 2) S. Yajima, J. Hayashi, M. Omori, K. Okamura, *Nature*, **261**, 683(1976).
- 3) L.L. Snead, R.H. Jones, A. Kohyama, P. Fenici, *J. Nucl. Mater.*, **233-237**, 26-36(1996).

- 4) T. Hinoki, L.L. Snead, Y. Katoh, A. Hasegawa, T. Nozawa, A. Kohyama, *J. Nucl. Mater.*, **307-311**, 1157-1162(2002).
- 5) 小西哲之, 星野毅, 柴山環樹, 中道勝, 檜木達也, 鈴木晶大, *プラズマ・核融合学会誌*, **84**[10], 646-658(2008).
- 6) W.A. Curtin, *Composites*, **24**, 98(1993).
- 7) W.A. Curtin, *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**[11], 2837(1991).
- 8) P.F. Tortorelli, K.L. More, *J. Am. Ceram. Soc.*, **86**[8], 1249-55(2003).
- 9) Y. Katoh, A. Kohyama, T. Nozawa, M. Sato, *J. Nucl. Mater.*, **329-333**, 587-591(2004).
- 10) Z.H. Zhong, T. Hinoki, H.C. Jung, Y.H. Park, A. Kohyama, *Mater. Dos.*, **31**[3], 1070-76(2010).

著者紹介



檜木達也(ひのき・たつや)
 京都大学エネルギー理工学研究所
 (専門分野/関心分野)セラミックス・セラミックス複合材料の開発, 照射効果

新刊紹介 連続体力学の話法 流体力学, 材料力学の前に

清水昭比古著, 309 p. (2012. 9), 森北出版.
 (定価3,800円) ISBN 978-4-627-94791-7

本書の帯には「テンソルという深い森を通り, 連続体力学の頂上に登るための羅針盤」と書かれており, テンソルに苦しんだ若き日々を思い出した。流体力学の基本であるナビエ・ストークス方程式を導くに当たって, 非線形項である対流項よりも線形項である粘性項の導出の方がはるかに難しい。粘性項の導出は, テンソルの概念を巧みに用いて行われるからである。本書は, このテンソルについて理解するための教科書であり, 数学的な考え方がいたるところに示された著者からのメッセージ集でもある。また, 本文中には, Coffee Break として, 6つの息抜きが書かれているが, これが非常に興味深く示唆に富んでいる。この中で著者は自らを, 巨人の肩に乗る小人であると謙遜している。ただし, 巨人の肩に乗る小人は, 巨人より少し遠くまで見えるとのことである。

さて, 本書において第1章から第4章までは, ベクトルや多変数関数等のテンソルを理解するために必要な数学のエッセンスが書かれている。続く章は以下のとおりである。

- 第5章 質点系の力学から連続体の力学へ
- 第6章 ベクトル・行列の添え字演算

- 第7章 発散とグリーンの定理
- 第8章 テンソル
- 第9章 歪みと歪み速度, 付, 微分の連鎖律
- 第10章 物質座標とラグランジ微分
- 第11章 回転と変形, その一
- 第12章 回転と変形, その二
- 第13章 応力テンソル
- 第14章 正方行列の対角化
- 第15章 構成方程式
- 第16章 保存の原理と運動量方程式
- 第17章 音速

付録 熱力学の関係式配線図

全般的に, 講義を聴いているような錯覚に落ちいる名調子の文章であるが, ところどころに本質的で深い名言が散りばめられている。また, 本書の目指すのは, 低い山から始めて足腰を慣らしつつ, 挑戦する山の高さを上げていく従来の方法ではないとのことである。最初に一番高い山に這い登らせて, あとは景色を楽しみつつ降りてくるものであるとしている。初学者には難しい内容かもしれないが, 最初に高い山に登りつめ, そこから下に大きく広がる森を見ておけば, テンソルという大きな森の中で道に迷うこともないと期待したい。

(東京海洋大学大学院・刑部真弘)

