

### 巻頭言

- 1 安寧な社会構築に向けてのこれからの学会の役割 金子成彦

### 特集 電力制度の核心に迫る

- 14 電力産業に更なる競争を導入することの意義と課題

電力市場は他産業での市場競争とは異なる側面を持ち、他産業での経験をそのまま当てはめることができない。ここでは電気事業の制度改革の意義と課題について、経済学的な観点から論じる。 大橋 弘

- 19 制度改革と地域主導型電力ネットワーク

欧米における電気事業制度改革の特徴とわが国の電力安定供給のためのエネルギー政策、電力会社に依存しない地域主導の電力供給ネットワーク整備の必要性について紹介する。 横山隆一

- 24 歴史からの提言  
—求められるビジネスモデルの転換

事故を契機に日本の電力業のあり方が根本的に見直されることになった。電力業の産業体制や電力の需給構造を、今後はいかに改革すべきか。原子力に関する政策をいかに改革すべきか。 橘川武郎

### 解説

- 38 食品中放射性核種濃度の新たな規格基準について

食品中放射性核種濃度の新たな規格基準が、4月から施行された。暫定規制値に代わる新基準値の施行までの経緯と、基準値導出の考え方について概説する。 高橋知之

表紙の絵(洋画) 「休息」 製作者 吉川祐子

【製作者より】鳥取県境港は海の恵みで一年を通じて賑わう山陰の港。四季それぞれに風情を変え時間ごとに違った表情を見せてくれます。

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)

### 時論

- 2 再生可能エネルギーに頼る脱原発政策の危うさ

今の政府が提示している選択肢は、どれも実現性に大きな疑問がある。 山本隆三

- 4 天然ガスコンバインドサイクルへの期待と課題—猪瀬構想の夢と盲点

ガスコンバインドサイクルはベースロードとしては使えない。稼働率70%もあり得ない。 吉田武治

- 6 事故に際して専門家による見解発信の重要性

事故が起きた際、専門家には最善の推量に基づいて、的確な判断とタイムリーな発言をする責務がある。 堀 雅夫

### 解説

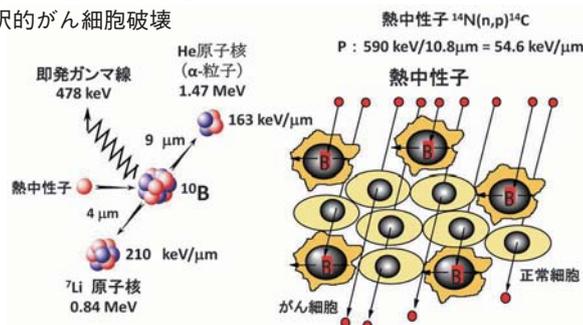
- 29 原子力災害の再発を防ぐ(その3)  
—地震工学分野から原子力安全への提言

日本地震工学会における委員会の成果を基礎に、地震工学分野から原子力安全への提言を行う。内容は、技術ガバナンス、リスク論に基づく意思決定、リスク～設計～規制の枠組み、地震工学の技術課題、原子力リスクコミュニケーション、分野間連携、からなる。 亀田弘行, 高田毅士, 蛭沢勝三, 中村 晋

- 47 放射線治療・粒子線治療と日本における医学物理士教育  
—第2回 ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)

低速中性子と原子核の反応を利用した中性子捕捉療法は近年、大きく飛躍しつつある。ここでは京都大学原子炉実験所における基礎・臨床研究を踏まえつつホウ素中性子捕捉療法(BNCT)について解説する。 小野公二

ホウ素中性子捕捉反応による  
選択的がん細胞破壊



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)

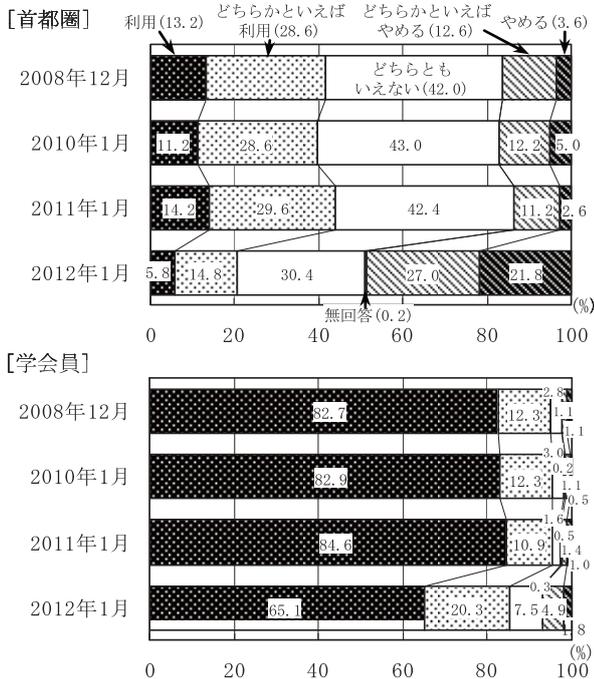
## 解説

### 42 福島原発事故以降、首都圏住民と原子力学会員の原子力に対する認識ギャップはどうなったのか？

事故以降、首都圏住民は原子力の利用に対する不安感を増加させた。一方で原子力学会員の意識に大きな変化はなく、両者の意識のギャップは増した。 **木村 浩**

#### Q 原子力発電の利用について(首都圏)

設問：あなたは、今後、原子力発電を利用してゆくべきだと考えますか、それともやめるべきだと考えますか。



## 私の主張

### 57 原子力規制委員会に望む

国会審議を通じ新設された規制委員会は、国民への説明責任を果たさねばならない。

**西脇由弘**

## 会議報告

### 59 原子力発電所の不測事態マネジメントに関する IAEA 会議参加報告

**尾本 彰**

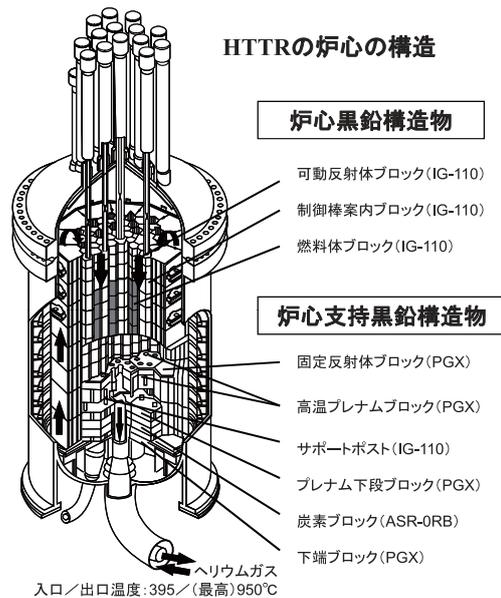
## 8 NEWS

- 政府事故調と国会事故調が報告書
- 東電が事故調査報告公表
- 原子力安全規制委員会が9月に発足
- 保安院、オフサイトセンターを見直し
- 原子力委が「選択肢」正式決定
- 原子力委、大綱策定会議を当面中断
- 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1回)

### 52 黒鉛・炭素材料

福島第一原子力事故以降、高温ガス炉がもつ固有の安全性に注目が集まっている。ここでは高温工学試験研究炉を例に、主要構造材料である黒鉛・炭素材料の使用実績と今後の課題について紹介する。 **柴田大受, 沢 和弘**



### 18 From Editors

#### 60 新刊紹介

「核不拡散をめぐる国際政治—規範の順守、秩序の変容—」

**菊地昌廣**

「今、原子力研究者・技術者ができること」 **山野直樹**

61 会報 原子力関係会議案内、主催・共催行事、人事公募、英文論文誌(Vol.49, No.9)目次、和文論文誌(Vol.11, No.3)、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

学会誌ホームページはこちら

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

# 安寧な社会構築に向けてのこれからの学会の役割



一般社団法人 日本機械学会会長，東京大学教授

**金子 成彦** (かねこ・しげひこ)

東京大学大学院修了，1981年に東京大学勤務，1985年にマギル大学客員助教授，2003年から現職。専門は機械力学・計測制御，小型分散エネルギーシステム。

福島原発事故に関する，福島原発事故独立検証委員会(民間事故調)，東京電力福島原子力発電所事故調査委員会(国会事故調)，東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会(政府事故調)，3つの事故調査報告書が出揃い，7月24日に放映された3つの委員会の委員長によるTV番組<sup>(注)</sup>では，多面的視点からのシステム設計や運用についての検討の重要性，報告書を起点としたさらなる展開の必要性が強調されていました。

日本機械学会では地震の直後に「東日本大震災調査・提言分科会」および「長期的視点からの提言検討委員会」の二つの組織を立ち上げ，機械工学に携わる技術者および研究者として反省すべき点，学ぶべき点，将来に向けて改善すべき点は何か，また日本機械学会として何が出来るかといった視点から活動を行ってきました。今回の地震の特徴は，①地震の規模が大きいこと，②引き続き起こった津波の規模が巨大であったこと，③したがって被害を受けた地域が広範にわたり被害者の数が多いこと，④原発事故と放射性物質の拡散という新たな事態への対応を迫られていること，等が挙げられます。調査項目も多岐にわたり，検討すべき課題も多様です。「東日本大震災調査・提言分科会」では7つのWGに，また「長期的視点からの提言検討委員会」では4つのWGに分かれて活動を行い，適宜全体会議を開いて活動方針の摺合せを行ってきました。これらの活動は，「震災の教訓を未来に語り継ぐ」という視点から技術的な検討を重ねたものです。また，「長期的視点からの提言検討委員会」では，①将来のエネルギー源・エネルギー利用に関する定量的評価と提言，②人工物に対する信頼性・ロバスト性の確立と危機に対する管理制御方法，③工学を社会に対して適正に説明する方法とそのための機械技術者の人材育成の3つのテーマが取り上げられています。更にはその後，④福島原発事故の教訓から学ぶ工学の原点と社会的使命～安全・安心社会構築に向けて～を追加しました。日本機械学会誌6月号にはこれまでの活動を中間報告書として纏めました。年内には，最終報告書が完成する予定です。また，日本機械学会も情報交換に参加したASME会長タスクフォースによる原発事故に関するレポート(Forging a New Nuclear Safety Construct)が6月に提出されました。

このようなデータに基づいた工学的リアリティを持った検討や纏めも重要ですが，次の段階では，社会から説明を求められている問題に対して，様々な技術的な立場から発信し，受け手に真意を理解して頂く仕組みが必要と考えます。情報の受け手の側からは，正確さを期すあまり条件や前提を詳しく述べてから本題に入る技術者の説明はまどろっこしいとの印象が持たれているようです。しかし，一步引いて見方を変えるとテレビには時間枠があり，新聞記事には分量の制約があります。したがってマスコミ報道にはクリアカットなシナリオが必要となります。技術者は事実や解析結果や考察の前提や意味をできるだけ正確に伝えたいという思いは強いのですが，その意図を相手に理解させるためにはスキルが必要と考えます。特に，グレーゾーンの存在，特定の条件下で成立する理屈を市民に理解してもらいたい時には，結果だけでなく議論の成立条件も受け手の印象の中に残すことを強く意識して工夫を凝らす必要があります。もちろん，受け手の側の準備，ものの見方自体も変えてゆく必要があります。また，情報発信については，海外に向けてのタイムリーな発信も必要です。日本人の勤勉さと諸先輩の努力で作られた日本ブランドの信用を維持するためには，情報発信が影響力を持っていると考えます。

目下，日本機械学会では，情報発信の仕組みとコンテンツ作りの二手に分かれて，社会に向けての情報発信活動の検討を続けています。効果的な発信を継続する仕組みは一朝一夕ではできません。個人と集団，一つの組織と学会間，学会を繋ぐ学術会議や工学会，それぞれが有機的に繋がり，社会への有効な発信を継続的にし続ける仕組みが必要です。盛り上がりは一過性のものであってはならないし，ボランティア活動で参加して下さっている技術者，研究者の役割分担や事務局も含めた効率の良い分業体制の構築が急務だと思います。

2012年3月11日に行われた東日本震災追悼式での野田総理の言葉の中に，「被災地の復興」，「震災の教訓を未来に語り継ぐ」，「助け合いと感謝」の心を忘れないという3つが含まれていましたが，次のステップで重要なのは「助け合い」と「感謝」だと思っています。

(注) 2012年7月24日(火)，NHKスペシャル「原発事故調 最終報告～解明された謎・残された課題～」

(2012年7月25日 記)



## 再生可能エネルギーに頼る脱原発政策の 危うさ



山本 隆三(やまもと・りゅうぞう)

富士常葉大学 総合経営学部 教授  
京都大学卒。住友商事入社，同石炭部副部長，同地球環境部長，プール学院大学国際文化学部教授を経て2010年4月から現職。

先日のテレビ朝日「報道ステーション」で、解説者が「ドイツは脱原発のためにその準備をしていた」と述べるのを聞いて呆れてしまった。福島事故後、脱原発を打ち出したドイツがその準備をしていたはずはない。なぜドイツが脱原発の準備をしていなかったかは、ドイツの原発政策に関する歴史を見ればすぐに分かる。

2002年に緑の党と社会民主党の連立政権が脱原発政策を打ち出したが、2009年の総選挙により誕生したキリスト教民主同盟など3党の連立政権は、脱原発政策を見直し原発の運転期間延長を決定した。電力料金の安定化と温暖化対策がその決定の背景にあった。

原発を長く利用する方針であったドイツが脱原発の準備をしていたはずはない。また、ドイツで導入された再生可能エネルギーによる発電の固定価格買い取り制度(FIT)は脱原発のために導入されたとの解説もあるが、これも明らかに間違いだ。FITの目的は温暖化対策、エネルギー自給率向上に加え、風力、太陽光発電設備など再生可能エネルギー関連産業の振興にあった。ドイツでのFITの導入が最初の脱原発政策導入より10年以上前の1990年であることから、FITが脱原発政策のために導入されていないことは明らかだ。

脱原発の準備をしていなかったドイツでは、今年4月から脱原発の具体策を議論する会議が政府内で開始されたが、原発の代替策の目処が立たない事態が次第に明らかになってきた。2022年に脱原発が実施された際に必要な代替電源の設備量は1,000万kWとされている。この設備の大半を北海とバルト海に建設される洋上風力発電で賄う計画を立てていたが、この実現性に大きな疑問符がついている。

ドイツでは陸上風力の建設が、適地の減少、美観などの環境問題から難しくなっている。陸上より風量と発電量が大きい洋上風力への期待が大きいのが、問題は建設場所が電力需要のあまりない北部になることだ。洋上風力の発電量を需要地の南部に送る必要が生じる。このために、送電線を敷設する必要があるが、その目処が全く立っていない。送電線敷設に対する地主の反対が強

建設ができない。

脱原発の準備ができていたどころの話ではない。ひょっとするとドイツは再々度方針を変更し、原発の利用期間を延長する可能性すらある。さらに、ドイツを含め、欧州は脱原発と報道されることもあるが、これは完全な誤解だ。

ドイツ、ベルギー、スイスは将来の原発廃止を決定した。ベルギーは代替電源を確保できることが原発廃止の条件であり、その実現は最近疑問視されているが、この3カ国の原発は2034年までに最大21基が廃止される。福島事故後に停止したドイツの8基を含め29基が廃止されることになる。一方、欧州全体では、建設中が4基、計画中が18基、構想中が19基ある。欧州全体では原発の数は増加するため、欧州は脱原発ではない。

よく知られているように、欧州の送電線は、東はロシア、中近東まで、南は北アフリカまでつながっている。特定の国が脱原発をしても地域全体で原発が増えるのであれば、電力の融通がある欧州は脱原発とは言えない。

日本でも、原発依存度低減を目的に「エネルギー・環境に関する選択肢」が、政府のエネルギー・環境会議により示された。2030年の原発比率を、0%、15%、20～25%とする3選択肢だ。選択肢の前提条件として経済成長率、選択の結果生じる国内総生産への影響、電力コスト上昇、温室効果ガスの排出数量が示されているが、その数字の見方は極めて難しい。意図的に結果を分かりにくく示しているのではないかと思えるほどだ。

例えば、原発の停止により電力料金は上昇するが、選択肢では料金上昇率ではなく発電コストが示されており、電力料金がどの程度上昇するのかがモデルの検討結果を見ないと分からない。再生可能エネルギー導入による系統整備費用、再生可能エネルギーの固定価格買い取りに伴う費用負担などが発電コストには含まれていないために、電力料金上昇率が分かり難くなっている。

3選択肢のどのケースを選択しても、電力料金は数十%から100%以上上昇すると思われる。家庭と産業には大きな影響が生じる。さらに大きな疑問は、選択肢の前

提になっている再生可能エネルギーによる発電量を達成できるのかということだ。原発による発電量の減少分を再生可能エネルギーで補う前提になっているために、原発ゼロのケースでは再生可能エネルギーの比率は発電量で35%に達している。現在の発電量は水力を含めて10%程度なので、大きな伸びが必要だ。原発20~25%のケースでも再生可能エネルギーの比率は25%から30%だ。温室効果ガスの排出量を抑制する必要があるために消費を削減する節電を前提にし、原子力に代わり二酸化炭素を排出する火力発電の量を増やせないことも、再生可能エネルギーによる発電量が多くなっている理由だ。

選択肢には2030年時点での再生可能エネルギーの設備量が示されていないが、現在の風力と太陽光の稼働率を前提にすると、風力で3,000万kW以上、太陽光で6,000万kW以上の設備が必要となる。今年の7月から日本でも導入されたFITでは、当初3年間は設備導入を促進する目的で買い取り価格は相対的に高く設定された。例えば、太陽光発電では税込で1kW時の買い取り価格は家庭用の電力料金のほぼ2倍の42円だ。それでも、今年度の設備導入予想量は風力、太陽光、地熱などすべてを合わせても250万kWだ。合計1億kW近い設備を導入するためには、どのような政策支援が必要になるのだろうか。

発電コストの高い再生可能エネルギーの導入を促進するためには、FITのような支援策が必要だ。将来設備の導入費用が下落することが予想されるが、支援策がなくても設備導入が進むほどコストが減少することはないだろう。結局、需要家の負担による支援策がなければ設備導入は進まないが、欧州では負担額が問題になってきた。

日本に先立ちFITを早くから導入し、風力、太陽光発電設備の導入が進んだ欧州諸国では、需要家の負担額が多くなったため、FITの見直しが進んでいる。制度導入当初は家庭用の設備導入が多かったが、20年以上にわたり収益が保証される極めて有利な投資であったために、事業用の大型設備建設が急増し消費者の負担額も大きくなった。そのため、数年前からスペイン、フランスなどで相次いで買い取り価格の引き下げが行われ、さらに、イタリアでは、昨年の見直しにより買い取り量にも制限が付き、全量買い取り制度ではなくなった。

FITを早くから導入し、太陽光発電設備で世界1位の2,500万kW、風力発電設備で、中国、米国に次ぐ世界3位の3,000万kWの設備導入が行われたドイツでは、水力を含めた再生可能エネルギーによる発電量のシェアは20%を超えるようになった。しかし、太陽任せ、風任せの不安定な電源が増加した結果、送電線網に大きな負担がかかることになった。国内の送電線網の能力を超えた際には、チェコ、ポーランドの送電線を通し送電が行われるために近隣諸国から抗議の声が上がっている。また、電力需要がない時に発電が行われる際には、電力を引き取ってもらうために、近隣諸国にお金を付け

て電力を引き渡すことまで行われるようになった。この資金も国民負担だ。

国民負担が大きくなりすぎたために、ドイツ政府は今年の4月から太陽光発電からの買い取り価格をさらに減額することを決定した。加えて大型の事業用施設については全量買い取りの対象外にすることにした。新しい買い取り価格は、家庭用で19.5ユーロセント、事業用で13.5~18.5セント。日本の買い取り価格の半分以下だ。さらに、太陽光発電については設備設置量が5,200万kWに達した段階で、FITは廃止になる。それ以上の導入は無理ということだ。

ドイツ政府が、再生可能エネルギー導入にブレーキをかけている理由に、送電線網の能力に加え産業振興の問題がある。風力、太陽光発電設備の製造により国内の産業を振興し、雇用を増やすこともFITの狙いだった。当初は太陽光電池メーカーQセルズ社が世界一の生産量を達成するなど政策はうまくいくようにみえた。しかし、中国メーカーが急速に力をつけ、いまや太陽電池の世界シェアは中国と台湾メーカーが合わせて74%を持つ。世界1位であったQセルズ社は中国メーカーとの競争に敗れ、今年4月には倒産してしまった。ドイツ企業の成長に寄与せず中国メーカーを助けるだけのFITの政策効果にドイツ政府は見切りをつけた。代わりにドイツ政府は研究開発などに補助金を投入すると発表している。

欧州と異なり、近隣諸国と送電線網がつながっておらず、しかも列島の形状から楕円の送電線の形態になっている日本では、不安定な再生可能エネルギーの導入には欧州諸国以上の負担が必要だ。FITにより導入を図るのは国民負担の点から問題が大きい。そもそも、欧州諸国が既に見直しを進めている「大きな負担と、産業振興を生まないという欠点」が明らかになった政策を導入するのは問題だろう。原子力を代替する発電量を中期的に再生可能エネルギーで達成することは、送電線網の形状など地理的な問題からも無理なことははっきりしている。化石燃料に大きく依存することも、エネルギー安全保障と将来の化石燃料価格が見通せないことから難しい。

結局、現実的な電力供給の方法は原発を最大限活用するしかない。失われた20年と呼ばれるように1990年以降日本経済は低迷が続いている。1990年からの20年間で日本の名目国内総生産は1.08倍になっただけだ。この間、中国は21倍、米英は2倍以上、イタリアでも1.8倍になっている。安定的で競争力のある電力供給ができなければ、失われた20年は失われた30年になる。政府が提示している選択肢では、電力価格が上昇し、供給も不安定になる可能性が極めて高い。それ以前に、どの選択肢も実現性に大きな疑問がある。現実的で国民と産業に受け入れられる選択肢を示すのは政府の責任だ。

(2012年7月15日 記)



## 天然ガスコンバインドサイクルへの期待と課題 猪瀬構想の夢と盲点



吉田 武治(よしだ・たけじ)

経営コンサルタント

2004年3月東京ガスエグゼクティブを退任。04年～08年、社団法人都市エネルギー協会会長兼中立的な非破壊検査の東京理学検査代表取締役社長。08年4月からコンプライアンス・アソシエイト代表として除染プロジェクトを含む数社とのコンサルティング契約を継続中。

### 1. まえがき

原発の再稼働が始まったが、まだその基数はわずかであり、全国で30%程度原発が担っていた電気を何で代替するかは非常に深刻な問題である。太陽光や風力などの自然エネルギーは実績に乏しい上に、固定価格買取制度(Feed-in Tariff:FIT)<sup>a</sup>などの後押し制度が動き始めたが、発電総量に占める現状の1%を倍増するのも険しい道のりであろう。そんななかで、天然ガス火力、それも“ガスコンバインド”サイクルが脚光を浴びている。東京都副知事の猪瀬直樹氏は、400億円のファンドを都が用意し、東京湾沿岸に10万kW級のガスコンバインド発電所を10基建造すると公言している。これとて、原発1基分にすぎないが、非常に夢のあるはなしである。長年、ガス事業に携わってきたものとして、ガスコンバインドとは何か、そしてその課題をリアルに論じてみたい。

### 2. エネルギーミックス

実は、原発の代替は火力発電でということもそもそも正しくはない。

火力発電は日本全体の電源構成としては60%であり、その中で燃料として石炭、石油が、いわゆるBTG(Boiler-Turbine-Generator)方式である。かたや、天然ガスは昭和50年代まではBTG方式主流で、それ以降はガスタービン方式にシフトしてきた。

BTGというのは、ボイラで燃料を燃やして、高温・高圧の蒸気を作り、それで蒸気タービンを回すことで発電している。効率は40%前後である。

発電は、供給サイドの負荷から見ると、ベースロード、ミドルロード、ピークロードに分けられる。要するに電気の供給は、この3種に対応できる電源のエネルギーミックスによって成り立っている。

3・11以前は、石炭火力は原子力に次ぐベースロードを担い、天然ガス火力がミドルロードを、そして石油火力

がピークロードを担ってきた。当然ながら、風力や太陽光などの再生可能エネルギーは“ロード(負荷)”を担うだけの実力はなかった。ここで、そもそも天然ガスは従来、ミドルロードしか担っていないのである。ではガスコンバインドサイクルならば、従来型の天然ガス発電とは違い、ベースロード電源になりうるのであろうか？結論を言おう、どうやらそれは現実的にはあり得ないということである。

原発とBTG方式のガス火力との違いは熱を発生させる仕組みであり、発生させた蒸気から電気をつくり出す仕組みは同じである。その点から言うと、BTGは経済性の問題を別にすれば、ベースロード電源とすることが可能である。

### 3. ガスコンバインドとは何か

ガスコンバインド方式は近年、改良が重ねられ改良型(ACC: Advanced Combined Cycle)と呼ばれるものが普及し始めている。ACCは高圧の天然ガスを燃焼器で燃焼させ、その燃焼ガスでタービンを回して、発電すると同時に燃焼ガスを排熱ボイラに通し、蒸気を発生させて発電するという仕組みである。つまり二段階方式で発電する。そのために、発電効率は上昇し60%以上、70%も可能とされている。ここが大きな期待がかかる所以である。もちろん、効率を無視すればガスタービンだけで運転することも可能である。

ガスタービンの仕組みは航空機に搭載されているジェットエンジンと同じである。航空機のジェットエンジンに技術的な基礎をおいたコジェネレーション(熱電併給)も沢山あり、六本木ヒルズのコジェネもそうである。

発電用は規模も大きく、1基あたり10万kWから50万kWも可能である。ただし、技術的には航空機転用というわけではなく、はじめから陸用として開発したものである。しかし、原理は同じであり、ジェット機はそれを主に電力としてではなく推進力として利用している。

ここで問題が生じてくる。ジェット機は1回の飛行時

<sup>a</sup> 再生可能エネルギーによって発電された電気を、一定の期間・価格で買い取ることを義務付ける制度。

間は長くても10時間程度であり、着陸後は整備をして安全を確認して次の飛行に移る。ジェットエンジンの翼は1分間で1万回転もするので、もしも亀裂などを見逃して飛行を続けられれば、ある一定の飛行時間を超えると翼が破損してドミノ倒しのように翼が破損して、墜落の危険にさらされる。

ACCも同じであり、墜落はしないが重大な事故につながるのである。これはBTGには見られないことである。

エネルギー経済系のシンクタンクや東京都副知事の猪瀬氏は、ACCがベースロード用として使えるので、“稼働率”が70%だと言っている。くどいが、発電効率ではなく稼働率が70%だと言っている。しかしながら、その論拠は極めてあやしい。

はっきり言おう、現状ではかなり頻繁なメンテナンスが必要になるので、ベースロードとしては使えない。稼働率70%もあり得ない。

天然ガス火力は2つのタイプがあり、BTGは効率は低い、稼働率は比較的高く維持できるのでベースロードとなりうる。一方、ACCはこれまでの運用はミドルピークであり、DSS(デリー・スタート・ストップ)が主流である。つまり、毎日一定時間停止しているのである。経済性の問題を考えなければ、原発が停止している現状では、多少の危険を勘案してもACCの稼働率を高めることのニーズは大きい。それにしたところで、従来の稼働実績である30%の稼働率を、20ポイント高めた50%が上限ではないか。ちなみに、東北電力の東新潟火力のACCは5年間(43,800時間)で13,000時間という製造メーカーの報告がある。つまり、稼働率は30%となる。

ベースロード用がトリップすると予備率がないので、ブラックアウトの恐れがあることを肝に銘じなければならない。

最新鋭のMACC(More Advanced Combined Cycle)は東電富津や川崎で稼働しており、ベースロード用と位置付けているが、タービン入口温度が1,500℃と高く、翼の冷却方式をこれまでの空気冷却から蒸気冷却方式にしている。このために、再スタートするのに蒸気が発生するまでタービンは立ち上がらないこと、並びに停止操作も時間がかかる。このような条件のもとでベースロードとして位置づけ使用している。しかし、ある一定期間、ベースロードとして使用したら、必ずジェット機のような検査を実施している。なぜ、このような検査ができるのかは、その間その分のベースロードを原子力が補完してきたからである。つまり、ガスコンバインドサイクルがベースロードと位置づけられるためには、原発の稼働が大前提になる。それだけの予備率を確保しているからである。予備率が乏しい中で、ACCをベースロードに使うのはリスクが大きすぎる。

#### 4. おわりに

太陽光や風力エネルギーは昨今、期待ばかりが先行し、安定電力にはなりえないという現実を目をつぶってしまう傾向がある。今般の政府のエネルギー・環境会議においてもそこをごまかしているといつてよい。つまり、国民はこのような重要な事実を知らされていない。

脱原発派で自然エネルギー派というのは、得てして原発の危険性のデメリットだけを過大に告知し、太陽・風力などのメリットだけを声高に主張する。またそれをビジネスにしている人々もいる。

確かに、電源構成を考えた上で自然エネルギーを増やしていくのは国産エネルギーで、持続的でありかつ環境に優しいという点でメリットがある。

しかし、自然エネルギーはお天気任せのエネルギーであり、太陽が顔を出さない時や風が強すぎても、弱すぎても電力を作ることができない。それ以上に大変なのは、時々刻々、つくられる電気の量の変動することである。つまり、系統不安定性の問題がある。電力は安定供給ができなければ、生産・物流・安全・企業活動・医療など、国民全ての社会生活の基盤は成り立たなくなる。『国民の生活が第一』というならば、今一度冷静になってエネルギーミックスを考えていただきたい。勢いで新党を立ち上げて、脱原発を掲げて先導することは、“国民の生活が第一”というスローガンに背く行為である。

原則に立ち返って考えよう。自然エネルギーの導入を可能とするためには、それに見合う他電源のバックアップが必要であり、それだけの電力の供給余力が前提となるのである。

現在のように原子力が停止して、電力不足が現実問題になっているときに、自然エネルギーを増やせば脱原発も可能だというのは、論理破綻した議論である。

原発反対派は原発容認派の日本経済への影響云々の意見には聞く耳を持たないし、論戦のルールも土俵も違うので全くかみ合っていないように見受けられる。

今一度、歴史的に築き上げてきた電力のネットワークと電源構成の組み合わせを前提にした安定供給という観点から、技術論と政策論を展開してもらいたいと思う。それが専門家と政治家の役割ではないのか。そして、原発の安全性についても技術論だけではなく、人的、組織的、風土等の問題点を徹底的に洗い出し、改善し、その結果を隠さず公表するということが政府が先頭に立って、それこそ命をかけて懸命に努力すれば、国民は必ず分かってくれると信じている。その基盤が原子力規制委員会と原子力規制庁の実効力いかにかかっている。

(2012年 7月5日 記)



## 事故に際して専門家による見解発信の重要性



堀 雅夫(ほり・まさお)

エネルギー環境システム研究者

1957年東京大学工学部・化学工学(修士)修了。日本原子力研究所、動力炉・核燃料開発事業団を経て、現在エネルギー高度利用研究会・代表など。(ブログ <http://hori.way-nifty.com>)

### ASME の報告書「新しい原子力安全構造の確立」

福島第一事故については、海外の関係学会・機関でも多くの調査・検討を行っており、その結果を経験から学んだ教訓(Lessons Learned)として整理し、自国の原子力プラントの非常時対策(Emergency Preparedness)への反映を図っている。

その中でも、米国原子力学会(ANS)は、特別委員会を結成して総合的な調査・検討を行い2012年3月に報告書(FUKUSHIMA DAIICHI:ANS Committee Report)を発表するとともに、関連各部会でも福島の実験・教訓を反映した非常時対策を産業界・規制機関などと情報交流しながら検討・立案している。

米国機械学会(ASME)では、元・原子力規制委員長のNils Diazを主査とするタスク・フォースを組織して調査・検討を行ってきたが、2012年6月に“Forging a New Nuclear Safety Construct”(新しい原子力安全構造の確立)と題する報告書を発表した。

この報告書では、福島第一などこれまでの原子力事故の経験から、「原子力プラントの過酷事故の主要な影響は、莫大なコストを社会に負わせる社会政治的(socio-political)・経済的な崩壊である」として、事故が極端な自然災害によって引き起こされたとはいえない大きな社会的影響は防ぐことができると考えられることから、このような結果は経済性と社会的受容性を持つべき原子力利用に全く反するもので容認することができないとしている。

その上で、「新しい原子力安全構造」なる概念を提唱している。これは現在の安全のフレームワークの上に作り、設計基準事故として希少な事象を含む「オール・リスク」アプローチを採り、事故時の放射性物質の放出による広範な社会的影響を防ぐためのシステムとしている。

ここでオール・リスク・アプローチとは、内部および外部事象に対して自然および人為起因の想定される事故について、リスクの評価・深層防護の確認・事故管理(AM)方策の作成などを行うことを言う。想定される事故は、設計基準事故と発生確率は低い想定される設計基準を超える事故についてリスク情報を活用して評価す

る。「クリフ・エッジ」(プラントパラメータの小さな差により結果が大きく変わる)事象も探査し、緩和策を講じる。

ASMEはこの報告書の提案に沿う新しい原子力安全構造の確立のための活動を、他の学会、産業界、世界の政府機関などと協力して、進めていきたいと述べている。

### 事故による「社会政治的影響」

この報告書では、その結論の中で事故による社会政治的影響について、次のように述べている。

「原子炉における事故の社会政治的影響は、プラントにおける事故の物理的影響よりも大きい。社会政治的影響による損害は、まさに、事故が施設近辺で生活している個人の健康と福祉にもたらす脅威の認識と危機時情報伝達の実施され方によって、決定される。

調和ある持続的な説明努力は、一般の人が確実に、技術の本質について情報を持ち、潜在的災害や関連するリスクについて正確に理解する上で、不可欠なものである。……」

これを読んで、私が10年ほど前に日本機械学会の技術者倫理研究会の報告書に書いた次の文章を思い出した。

### 専門家による見解発信の重要性

「技術者は、“Technologically correct”な判断・発言をすることが、その倫理的な役割であると考える。

“Politically correct”, 略してPCという言葉がある。「政治的に正しい」という意味で、民主主義社会においては、「社会的に正しい」と時間差がある場合もあるが、ほぼ同じと考えてよい。例えば、人種差別は良くない、性差別は良くないなどは、現代社会においてはPCになっている。

PCをもじって、“Biologically correct”, 略してBCという造語が竹内久美子著の「BC!な話」(新潮社, 1997年)で使われている。これはPCとは独立に、例えば、性によるいろいろな違いを生物学的に淡々と説明しようというものである。同様に“Scientifically correct”(SC),

“Technologically correct” (TC), すなわち「科学的に、技術的に正しい」という言葉を使うことができよう。これは、ある事柄に関して科学的、技術的な事実・知見と最善の推量に基づく見解のことを言うこととし、その時々形成される社会のその事柄に関する理解とは独立なものである。

PC, すなわち社会的な正しさは、BC や SC や TC などの多くの正しさを総合して形成されるのが社会にとって望ましいとすると、科学技術に携わるものは、SC, TC を PC に適切に含めるべく発言することが要請される。』

原子力の事故のように、科学・技術が関係した事故への対応の場合、専門家による科学的・技術的な事実・知見と最善の推量に基づく専門的見解のタイミングよい提示の必要性を感じている。原子力事故が社会一般へ与える環境・健康などの影響について、科学的・技術的な事実・知見に基づいた的確な判断とタイムリーな発言があれば、本来採られるべき措置・政策が採られ、社会にとって無駄な損失を防ぐことができる場合が多いと考えられるからである。

事故対応で言うと、まず当事者である企業、監督する官庁、判断する委員会など、関係する各機関・各段階において、専門的判断に基づく責任者の発言が重要である。さらに学会のように学術的に権威ある専門家による見解の発信が必要である。

このような科学的・技術的な事実・知見に基づく専門的見解が一般の風潮と異なる場合は、あえてそれに逆らった発言をすることは、事故の当事者でなくても、実際にはかなり難しい。しかし、その時は「反省がない」、「責任逃れ」、「信用できない」などと社会やマスコミの非難を浴びようとも、あえて専門的見解を発信すべきと考える。このような専門的見解は、より正しい対応措置・方針・政策の形成に役立ち、結局は社会の損失を防ぐことに役立つと考える。

#### 学会による見解発信の重要性

日本原子力学会は、これまで原子力技術についての研究開発の知見を集約して「標準」(基準・指針)を作成・発行してきており、また原子力に関する重要事項について学会としての見解をまとめ「ポジションステートメント」として学会の内外に公開してきている。今回の事故も含めて、いろいろな場面で学会の科学・技術的知見を集約・取りまとめたこれらの標準やポジションペーパーは、学会としての見解を関係各界、社会、政府に伝えるのに役立つと考えている。

福島第一事故において、低レベル放射線の健康影響の定量的評価は、住民の避難、これからの帰還、生活環境の除染などに関わる方針・政策を決める際の重要な判断要素である。この「低レベル放射線の健康影響」については、日本原子力学会では2009年と2010年に一般向けを含む2件のポジションペーパー(解説)を取りまとめて公開しており、また米国原子力学会もポジションステートメントとして見解を明らかにしている。

前述の米国機械学会の報告書でも、低レベル放射線の健康影響については、住民の正常な生活への帰還に関わる重要事項として、原子力、保健物理、放射線生物学などの分野を含めた、より広い科学的知見の集約の必要性を強調している。

また、福島第一事故の影響で国内の原子力発電所は定期検査後の再稼働が困難な状況にあり、これも事故がもたらした大きな社会政治的な影響である。事故を受けて、国内の原子力発電所では緊急の安全対策を講じるとともに、継続的な安全確保対策の実施・評価を行っている。この原子力発電所再稼働に関しても、専門的知見に基づく見解の発信は重要と考える。

以上のような事故の社会政治的影響に関わる重要課題に関して、専門家の集まりである日本原子力学会がこれまでの知見や作成した標準・ポジションステートメントなどをもとに、必要に応じて国内の関連学会や国際学会・機関などと協力して新たな知識・経験によるアップデートを含めて集約し、事故の社会政治的影響の軽減のためにその見解を社会に発信していくことは重要と考えており、関係各位のより一層の活動を期待するものである。(2012年7月10日 記)

#### —参考資料—

- 1) The American Nuclear Society Special Committee on Fukushima“FUKUSHIMA DAIICHI: ANS Committee Report”, American Nuclear Society, (March 2012).  
[http://fukushima.ans.org/report/Fukushima\\_report.pdf](http://fukushima.ans.org/report/Fukushima_report.pdf)
- 2) The ASME Presidential Task Force on Response to Japan Nuclear Power Plant Events“Forging a New Nuclear Safety Construct”, American Society of Mechanical Engineers, (June 2012).  
<http://files.asme.org/asmeorg/Publications/32419.pdf>
- 3) 日本機械学会「技術者倫理に関する研究会・報告者」(2002年1月)。(寄稿内容は下記サイトに再録)  
<http://bit.ly/OrpI7S>



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。

## 政府事故調と国会事故調が報告書

東京電力福島原子力発電所における事故・検証委員会(政府事故調・畑村洋太郎委員長)は7月23日、福島第一原子力発電所の事故主因は津波であるとする最終報告書をまとめた。同委員会は昨年5月の閣議決定に基づいて内閣官房に設置されたもので、10人の委員と約40人の事務局で構成。昨年12月には中間報告書を公表していた。

報告書によれば、事故は地震・津波という自然現象で引き起こされたものの、東京電力や原子力安全・保安院には事前の事故防止策や防災対策、現場での対処にさまざまな不備や不手際があったために被害が拡大したと分析。また政府にはSPEEDIの活用や住民に対する避難指示、情報提供などにおいて被災者の立場に立った対応が不十分だったことに加え、危機管理態勢に問題があったと指摘している。

その上で報告書は、①原子力の安全対策は大規模な複合災害を視野に入れる、②自然がもたらす脅威に謙虚に向き合い、シビアアクシデントに対応した防災対策を立てておく、③地域の避難計画を含め、被害者の視点を見据えたりリスク要因の点検と洗い出しを行う、④緊急時にも迅速に対応できる原子力災害時の危機管理態勢を再構築する、⑤科学的知見を蓄積し、その活用を図る、⑥東京電力をはじめ原発関係者において安全文化を再構築する——などに取り組むよう提言している。

また畑村委員長は所感の中で、「あり得ることは起こる。あり得ないと思うことも起こる」として国内外で過去に起こったことがらや経験を論理的に分析し、可能な限りの想定と十分な準備をするよう求めた。

◇ ◇ ◇

一方、東京電力福島原子力発電所事故調査委員会(国会事故調・黒川清委員長)は7月5日、福島第一原子力発電所の事故は人災によって引き起こされたとする報告書をまとめた。同委員会は昨年10月に国会の決議によって設立されたもので、10人の委員で構成。延べ1,167人へのヒアリングと被災住民約1万人を対象としたアン

ケートを行ってきた。

報告書では東日本大震災が起こる前の時点で、同発電所は地震にも津波にも耐えられることがない脆弱な状態にあったと推定。東京電力や規制当局は、津波対策やシビアアクシデント対策、あるいは大量の放射能放出が考えられる場合の住民の安全保護について、なすべきことを実施していなかったとした。

その背景には、原子力安全規制の対象となる東電と規制する立場にある規制庁との立場の「逆転関係」が発生。規制当局は電力事業者の「虜(とりこ)」となっており、その結果として、原子力安全についての監視・監督機能が崩壊していたと分析している。

またシビアアクシデント対策については、これに対応した十分な準備、レベルの高い知識と訓練、機材の点検がなされ、緊急性に運転員・作業員に対する時間的要件の具体的な指示ができる準備があれば、より効果的な事後対応ができた可能性は否定できないと指摘。事故の進展を止められなかった、あるいは被害を最小化できなかった最大の原因は「官邸及び規制当局を含めた危機管理体制が機能しなかったこと」、そして「緊急時対応において事業者の責任、政府の責任の境界が曖昧であったこと」にあると結論付けている。

さらに避難指示が住民に的確に伝わらなかった点については「これまでの規制当局の原子力防災対策への怠慢と、当時の官邸、規制当局の危機管理意識の低さが、今回の住民避難の混乱の根拠」にあると分析している。

その上で報告書は、①規制当局を監視する常設委員会を国会に設置する、②緊急時の政府の危機管理体制を見直す、③被災住民の生活基盤を回復する、④電気事業者を監視する、⑤高い独立性をもった新しい規制組織を作る、⑥原子力法規制を見直す、⑦独立した調査委員会を設け、調査を継続する——よう求めている。

(原子力学会編集委員会)

## 東電が事故調査報告公表、津波高さ想定に「甘さ」

東京電力は6月20日、福島原子力事故調査報告書を取りまとめ、原子力安全に対するこれまでの取組、発電所を襲った地震・津波の大きさと設備への影響、事故対応の状況、得られた教訓に基づく設備面および運用面の対

策について、調査・検証から明らかになった事実を公表した。今回の福島第一1～3号機が炉心損傷事故に至った直接的原因は、津波襲来ですべての冷却手段を失ったことにあると分析。津波に対抗する備えが不十分だった

ことが根本的原因との反省に立ち、想定を超える事象が発生することを基本的考え方に据え、講じるべき対策を述べている。

東京電力では2011年6月より社内委員会で事故の調査・検証を進め、12月には原因と再発防止に向けた主として設備面の対策を取りまとめた中間報告書を公表。今回の報告書では、さらに事故対応に関する運用面の課題を抽出するとともに、解析結果に基づいて原因を究明し、原子力発電所の安全性向上に寄与するための必要な対策を追加した。

なお福島第一発電所は1960年のチリ地震津波による潮位を設計条件として、国の設置許可を受けた。東京電力ではその後、土木学会の技術基準による津波高さ評価、文部科学省・地震調査研究推進本部の見解、貞観津波の

波源モデルによる試算など、自主的な検討・調査等を実施してきており、今回報告書では対策に努めてきた経緯を述べた。しかしながら津波高さ想定には「結果的に甘さがあった」ことが、事故の根本原因とその後の収束活動をも困難にした要因となったなどと分析している。

事故対応については、中間報告で示されたプラント挙動、設備機能、事故対応を困難にした障害要素など、ハード面の課題に加え、態勢・役割分担、情報公開、資機材輸送、放射線管理など、ソフト面の課題も抽出し、対策を述べた。また事故を契機に一層の安全確保に向け、安全意識・風土の醸成、リスクコミュニケーションの改善のほか、全社的なリスク管理の充実・強化を図っている。（日本原子力産業協会提供、以下同じ）

## 原子力安全規制委員会が9月に発足

参議院は6月20日に本会議を開き、民主、自民、公明3党が修正協議して取りまとめた「原子力規制委員会法案」を賛成206票、反対28票で可決した。同法案は、政府提案の原子力規制庁等設置法案と自公共同提案の「原子力規制委員会法案」を、衆院環境委員会の3党理事が協議して、自公案をベースに取りまとめたもので、政府からの独立性をより強いものとした。同委員会は3か月以内に設置される。同時に、原子力委員会の役割も原子炉等規制法の一部改訂により法的に大きく見直されることになる。

同法案には、(1)環境省の外局として「原子力規制委員会」を国家行政組織法上の3条委員会として設置、(2)現在の原子力安全委員会、原子力安全・保安院、文科省および国交省の原子力安全規制、核不拡散のための保障措置等を移管し、一元化、(3)同委員会の事務局として「原

子力規制庁」を設け、全職員のノーリターンルールの適用(5年間猶予)、(4)原子力安全基盤機構(JNES)の早急な同規制庁への統合、(5)内閣府に「原子力防災会議」(議長=首相、事務局長=環境相)を設置、(6)最新の技術的知見の反映(バックフィット制度)の導入、(7)運転期間の原則40年制限(同委員会規則で定める基準に適合する場合、1回限り最大20年間の延長可能)、(8)事故時の原子力災害対策本部長(首相)指示対象から、原子力規制委員会が行う原子力施設の安全確保を行う判断を除外、(9)委員長および委員の任期は5年(初任委員は2人は2年、2人は3年)——が盛り込まれた。規制委員会の発足施行日は、公布日から3か月以内、原子炉等規制法の改定は施行日から最大1年3か月以内で段階的に施行される。

参院では20日に賛成多数で可決された。みんなの党、共産党、社民党、新党改革、新党大地は反対した。

## 原子力保安院、オフサイトセンターを見直し

原子力安全・保安院はこのほど、原子力施設ごとに指定されるオフサイトセンターの機能、立地に関する基準見直しに向け、専門家からの意見聴取会を始動した。福島原子力発電所事故の対応で、オフサイトセンターが機能不全となり、原子力安全委員会の防災指針における対策区域の見直しが示されたことなども踏まえ、ハード・ソフト両面から改善を検討するもの。

福島原子力災害では、初動時の迅速な避難対応、市町村参集、オンサイト対策の情報集約・対応協議など、本来の役割を果たせず、さらに、避難区域が立地地点も含めて拡大し、機能が福島県庁に移転されたため、結果と

して、施設そのものは十分に機能しなかった。

これらの課題を踏まえ、保安院は、オフサイトセンターの機能、立地に関する基準見直しに着手する。安全委による防災指針見直し案が施設からおおむね5km圏内として示す「予防的防護措置を準備する区域」(PAZ)の住民避難は、緊急事態宣言と同時に自治体に指示、初動段階での避難指示は中央から直接、自治体に行くことを明確化するなど、国の幹部・関係省庁の現地参集に長時間を要したことを省み、官邸と現地対策本部の役割分担等、初動体制を見直すほか、連絡体制の抜本的強化も図る。

## 原子力委が「選択肢」を正式決定

原子力委員会は6月21日、核燃料サイクル政策の選択肢を3通りに集約して提示した「原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会」(座長＝鈴木達治郎・委員長代理)の報告内容をほぼ盛り込んだ「核燃料サイクル政策の選択肢について」を委員会決定した。政府のエネルギー・環境会議に提出する。原子力委の決定では、「どのような選択肢を選択するにせよ、将来の政策変更に対応できる柔軟性が重要」と指摘する一方、「国の燃料サイクル政策に長年にわたり協力し、関連施設を受け入れてきた立地自治体との信頼関係を崩すことのないよう」に配慮することなどを求めている。

原子力委決定として、選択肢(1)「**新規増設は行わず、できるだけ早く原子力発電比率をゼロにする**」では、使用

済み燃料の「**全量直接処分**」が適切。選択肢(2)「**原子力依存度低減を基本とし、2030年時点で原子力発電比率約15%程度まで下げる**」場合は「**再処理・直接処分併存**」が適切。選択肢(3)「**原子力発電比率は低減させていくもの、その後は新規増設を行い、一定規模20~25%を維持する**」では「**全量再処理**」が有力——とした。

それに伴うFBR開発では、(1)「**もんじゅ**」は中止、基盤研究のみ推進。(2)では「**もんじゅ**」の性能試験と定格出力運転を実施(5年程度)、実用化を判断する研究開発も実施。(3)では、実用化を前提に研究開発を推進し、「**もんじゅ**」は10年程度の運転で所期の目的を目指すべきとした。

## 原子力委、大綱策定会議を当面中断

原子力委員会は6月21日、新大綱策定会議や原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会の会議資料準備過程において、透明性の確保の点で不十分な点があり、国民の信頼を損ねた事態を反省し、策定会議の運営方法等の見直しを行う必要などから、当面の間、審議を中断することを決めた。

今後は8月に取りまとめ予定の政府の革新的エネルギー・環境戦略、特に今後の原子力発電のあり方に関する方向性や、これまでの策定会議での審議などを尊重し、原子力委として審議すべき事項を改めて検討して決めるとしている。

一方、環境省に「原子力規制委員会」を新設する法案が6月20日に国会で成立し、その改訂関連法の中(原子炉

等規制法)で、原子力委にいままで諮問されてきた(1)原子力の研究・開発・利用の計画的遂行、(2)事業者の経理的基礎——などの審査がなくなる可能性が出てきたことなどから、原子力委員会のあり方そのものの基本的事項について意見交換した。

近藤委員長は「原子力委員会のあり方まで自ら議論すべきかどうか。原子力基本法が変わり、原子力規制委員会ができる状況の中で、本来、内閣が方針を示すべき。大綱のあり方も変わってくる。政治プロセスの中で議論されるべきだ」と述べ、原子力委としては議論を行うための情報の提供や整理は行うとした。

なお委員長と全4委員の任期は来年初めまで。

## 海外情報

(情報提供：日本原子力産業協会)

### [中国]

## 原子力安全等の5か年計画承認、新設計画の審査を再開

中国の内閣に相当する國務院は5月31日に温家宝首相を議長とする常務会議を開催し、「原子力の安全性と放射能汚染防護に関する第12次5か年計画、および2020年までの長期目標」を原則的に承認した。福島事故直後の昨年3月16日の常務会議で実施決定した国内の原子力発電所の安全審査結果を受けたもの。その中で国内原子炉が中国および国際原子力機関(IAEA)の安全基準を満たしていることが保証されたとしており、暫定的に停止していた新規計画および建設前準備工事の審査・承認を再

開する条件がおおむね整ったことになる。

9か月以上に及んだ包括的な安全審査は、稼働中と建設中の民生用原子炉41基、計画中の3基のほか、研究炉および核燃料サイクル関連施設を対象に行われた。原子力安全、地震や津波等の専門家がこれら外部事象に対する耐性を中心に検証。今年2月には國務院が提案段階の状況報告書を審査し、さらなる審査と改善措置実行のための調整が行われていた。

全体的な結論としては、国内原発が「中国の安全基準とIAEAの安全基準を全面的に採用しており、国際的にも最新の安全規制・要件を満たしている」と明言。外部事象に対する耐性が十分実証されるとともに、発電所の設計、製造、建設、起動、運転にいたるまで、その品質は効果的に管理されていると断言した。また、過酷事故

の発生防止と影響緩和についても、十分なリスク管理が行われるなど安全性が保証されているとしている。

一方、露呈した問題点としては「一部の原発が最新の洪水要件を、また一部の研究炉とサイクル施設が最新の耐震性能を満たしていなかった」と指摘。過酷事故の発生防止と影響緩和についても、一部の原発で対策が不十分だったが、関連部門と企業が組織立って迅速な対応を取り、現段階で初期成果を得たとしている。

今回、原則的に承認された「原子力の安全性と放射能汚染防護に関する第12次5か年計画、および2020年までの長期目標」は「安全第一、品質第一」を基本原則としている。多重防護や新旧の対策を統合した管理、科学技術に裏付けられた防護対策など、改善を継続することや法規の遵守、厳しい監督管理と透明性の維持などを明記。全体的な目標として、機器の安全性向上を一層進めるとともに放射線の環境に対するリスクを大幅に低減すること、緊急時対応策などにより公衆の健康と環境の安全性を国際水準で維持することを挙げている。

#### [ロシア]

### ロスアトム、ホライズン社の株式 購入検討

ロシアの原子力総合企業であるロスアトム社は6月8日、英国での原子力発電所新設計画から3月末に撤退を表明したホライズン社の株式取得に関心を抱いていることを認めた。

同社のS・キリエニコ総裁は「今のところ具体的な提案はしていない」と述べる一方、同国の原子力開発計画が現在の欧州では最も意欲的だとし、これまでの核燃料供給に加えて、原子炉の供給についても同国の原子力市場への参入を目指したいと明言。この関連で同社のK・コマロフ副総裁も、4日から6日までモスクワで開催されていた「アトムエキスポ2012」で、トルコで用いた手法なら同社が投資家として、また原子炉の供給者としても同市場に参入可能だと明言していた。

英国ではドイツのE.ON社とRWE社による合併事業体のホライズン社がウィルファおよびオールドベリー両原子力発電所で、原子炉の新設用地を確保。合計600万kWの原子力発電設備建設を計画していたが、福島事故後のドイツの脱原子力政策により、両社ともに大きな財政的損失を被ったとしてホライズン社の売却を決定。新たな所有者を募集している。

ただし、ロスアトム社が英国の原子力市場に参入するには、ロシア型PWR(VVER)設計の認証手続きも含めて多くの予備的作業が必要。現在、新設計画で採用される第1陣の設計として、ウェスチングハウス社製・AP1000とフランス・アレバ社製・欧州加圧水型炉(EPR)の

2件についてのみ、包括的設計承認(GDA)審査が進められている。このため、ロスアトム社はGDAへの申請時期や審査に要する期間なども合わせて詳細を検討すると見られている。

#### [リトアニア]

### EC、ピサギナス原発計画で意見書

リトアニアのエネルギー省は6月12日、同国が進めているピサギナス原子力発電所建設計画について、ユーラトム(欧州原子力共同体)条約に基づく評価作業を行っていた欧州委員会(EC)が肯定的な意見書を公表したことを明らかにした。

それによると、同計画はリトアニアが持続可能なエネルギー供給構造を構築するのに貢献するだけでなく、バルト3国地域におけるエネルギー供給を確保し、同地域を欧州内陸部のエネルギー市場と本格統合するために重要な役割を果たすとECは評価。欧州連合(EU)域内の温暖化防止目標達成にも貢献すると指摘しており、同計画に事実上のゴーサインを与えたことになる。

意見書の公表は8日付けで行われていたが、この中でECはピサギナス計画がユーラトム条約で設定された目標、「原子力安全は運転員と加盟国の義務」を満たしていると断言。同国内の規制当局が将来、完成原発の検査を行う手続きの中で義務を全うできるよう、十分な資金と人的資源を提供する必要性を強調した。

ECはまた、この関連で具体的な勧告事項を提示。すなわち、(1)許認可手続きにEUストレス・テストの基準である外的自然災害と主要な安全機能の喪失に対する裕度の再評価を組み込むことが極めて重要、(2)(近隣でロシアが建設しているバルチック原発などのように)同地域で多量の電力輸出が可能な原子炉が新たに建設された場合でも十分な経済的優位性を有するべき、(3)リトアニア国内での放射性廃棄物処分の方針的な解決策を策定する——である。今後ECとしては、プロジェクトの進展状況とともに、これらの勧告がいかに実行に移されるか綿密に注視していくとしている。

### 国会が原発建設法案を承認、日立が ABWRを初輸出へ

リトアニアのエネルギー省は6月21日、同国の国会がピサギナス原子力発電所建設計画の事業権付与契約案を盛り込んだ法案を賛成多数で承認したと発表した。建設計画の事業権をプロジェクト会社に付与するとともに、同社への出資を伴う戦略的投資家として日立製作所を選定したこと、および日立GEニュークリア・エナジー社のABWR設計技術による計画推進を認める内容。同法

は大統領の署名により正式決定するが、隣国ラトビアとエストニアとの出資に関する最終合意をもって、日本から初めて原子力発電プラントとしての輸出が実現する。これにより原子力の導入を計画しているアジアなど新興国への輸出案件にも弾みが付くと見られている。

同国内閣が3月に承認した事業権付与契約案では、リトアニアのほかバルト3国のエストニアとラトビアおよび日立がプロジェクト会社の各20~22%を保有予定。投資総額173億リタス(約5,173億円)のうち100億~140億リタスを外国企業からの直接投資分とし、2020年末~22年までに出力135万kWのABWR完成を目指す。

エネルギー省では同法案の成立に伴い、今後周辺諸国が地域パートナーとして同計画に商業投資する機会が生まれたほか、日立がプロジェクト会社設立に向けた協議を完了し、国会の承認した条件下で合意文書に署名が認められたと指摘。

また、プロジェクト会社が事業権取得後は、設計作業を開始するために日立GE社とエンジニアリング・資材調達・建設(EPC)契約を結ぶことも可能となる。2015年までに最終投資決定が下されれば、同国でも最大投資規模のプロジェクトとなるピサギナス原発が着工する見通しだ。

### [フランス]

## 安全規制当局、事業者に対し32の安全改善策

フランスの原子力安全規制当局(ASN)は6月28日、福島事故からの教訓を元に国内の原子力関連施設の事業者に課す新たな安全性改善策を公表した。極端な自然災害や過酷事故への対応を想定したもので、フランス電力(EDF)とアレバ社および原子力・代替エネルギー庁(CEA)が対象機関。非常用電源の増強配備など、2018年までにこれら機関が成すべき作業や必要経費は、膨大な量にのぼると見られている。

フランスでは、福島事故後に稼働中原子炉等で実施した補完的安全評価(CSA)について、ASNが今年1月に結果報告書を公表。「いずれの施設も十分な安全レベルに達しており、直ちに停止を求めることはない」とする一方、安全性の実質的向上を図る設備や対策を施設ごとに取るよう各事業者に要求していた。

今回ASNが決定した改善項目は32件にわたり、各項目当たり約30点の対策を指摘。特に、施設ごとにシステムの「ハード・コア」と呼べるものを構築し、設計ベースを超える極端な事象に際しても十分な頑健性と重要な安全機能が保証されるよう安全裕度を高めるとしている。

国内の19サイトで合計58基のPWRを操業するEDFの場合、ハード・コアとして地震や洪水に対処できる大

型の電力貯蔵・供給機の設置が2018年までにすべてのサイトで義務付けられる。従来型の緊急用ディーゼル発電機は13年末までに追加で設置しなければならないほか、事故時に現場に急行する専門家やエンジニアによる「即時対応部隊(FARN)」も年末までに発電所サイトごとに配備。14年後半にも本格的な稼働が可能となるよう手配する必要があるとしている。

燃料サイクル施設を操業するアレバ社に対しては、地震や洪水の発生時にも使用済み燃料貯蔵プールに水を満たす強固な手段の設置計画を年末までに提出するよう要求。このほか、ウラン転換施設(SOCATRI)やジョルジュ・ベスⅡウラン濃縮工場、コミュレックスの6フッ化ウラン製造施設等から、事故時にフッ化水素ガスや6フッ化ウラン等が放出されるのを防ぐため、有効な対策を年内に提出するよう義務付けた。

CEAの研究開発施設については、2013年末までにMUSURCA研究炉からすべての核分裂性物質の撤去を要求。OSIRIS炉、フェニックス炉、建設中のジュール・ホロピッツ炉に関しても、地震や火災、洪水などの事象に際してナトリウムなどの冷却材を喪失することがないように、改善対策を求めている。

## アレバ社、ガス拡散法の濃縮工場を閉鎖

フランスのアレバ社はこのほど、子会社のユーロディフ社を通じて1979年から南東部のトリカスタンで操業していたジョルジュ・ベス・ウラン濃縮工場(1万800トンSWU/年)を永久閉鎖したと発表した。5月中旬に開始した最後の濃縮プロセスが終了したのを受けたものだが、同工場では33年の間、その操業が途切れることはほとんどなかったとしている。

アレバ社によると、同工場は運開当時に世界で最も効率的な濃縮技術であったガス拡散法を採用。この頃の世界のウラン濃縮市場における手本のような存在であり、約100基の原子炉に濃縮ウランを供給するなど、世界で稼働する原子炉の1/4の所要量を満たしたことになる。

近年では、電力消費量がガス拡散法の1/50で冷却水の必要量も大幅に削減された遠心分離法が世界の濃縮技術の主流になりつつあり、アレバ社は後継工場となるジョルジュ・ベスⅡの建設に30億ユーロを投入した。

### [英国]

## NDA、PRISMとEC6利用で余剰プル処分を検討

英国の原子力デコミッショニング機構(NDA)は6月27日、余剰プルトニウムの管理方法として、GE日立

ニュークリア・エナジー(GEH)社の「PRISM」炉、および CANDU エナジー社の「改良型 CANDU 6 (EC 6)」で燃焼するという2つの提案を検討評価中だと発表した。現時点で政府は MOX 燃料への転換・再利用が最も望ましいと認識。同政策をサポートできる提案を年内にも決定し、最良のプル処分方法を模索していく考えだ。

英国には現在、民生利用で分離抽出したプルトニウムが112トン存在。日本など海外所有分の28トンを含め、2018年までに140トンに達すると言われている。これを長期的に管理する方策案として、エネルギー気候変動省(DECC)は昨年2月、(1)現行の長期貯蔵を継続、(2)固化して地層処分、(3)MOX 燃料に加工して、既存炉と新設する原子炉で再利用——の3案を公開諮問に付すとともに、政府としては(3)案が最も望ましいとする予備的見解を提示した。

公開諮問後の同年12月には、この見解の適切さが確認されたとする一方、国民に財政負担をかけずに最後まで確実に管理できる代替案、および(3)案の支援策を NDA が今年の2月末から3月末にかけて募集していた。

NDA によると、これまでに4案が提案されており、それぞれの責任者と初期協議を実施。このうち GEH 社と CANDU エナジー社の2案については、軽水炉での燃料利用と並行してメリットがあるとし、詳細協議を行った後にさらなる情報提供を求めている。

GEH 社の案は小型のナトリウム冷却高速炉「PRISM」を統合燃料加工・原子炉利用ソリューションの一環として利用。2基で60万kWを発電しながら、余剰プルを MOX 燃料としてリサイクルする。同炉をセラフィールドに建設する研究パートナーとして、GEH 社は今年4月から5月にかけて英国国立原子力研究所(NNL)、マンチェスター大学と協力覚書を締結している。NDA としてはまだ、同案を信頼できるオプションの一つに加えていないものの、その技術的および商業的な確実性に絞った評価を実施中だ。

CANDU エナジー社の EC 6 は出力70万kWの第3世代炉で、フル MOX 炉心で運転しつつ発電が可能。同炉を使う案について NDA は商業的な確実性の評価と、これまでに行われた技術調査の精密化を実施中で、すでにオプションに追加済みであることを明らかにしている。

## [米 国]

### 下院がユッカ計画の審査に予算

米国の議会下院は6月6日、今年10月から始まる2013会計年度のエネルギー・水資源歳出法の修正条項を326対81という圧倒的多数で可決した。ネバダ州ユッカマウンテンにおける使用済み燃料および高レベル放射性廃棄物(HLW)の地層処分場建設計画の技術審査を完了させる経費として米エネルギー省(DOE)の予算枠から米原子力規制委員会(NRC)に約1,000万ドルを移管する内容。オバマ大統領の民主党政権が昨年9月に終止符を打った同計画の復活を目指す試みで、修正動議は共和党のJ・シムカス議員が提案したが、評決では98名の民主党員が共和党員とともに賛成票を投ずるなど、下院内で同計画の認可審査継続を望む超党派の動きは健在だ。

ユッカマウンテン計画については、政府の方針に従い DOE が2010年3月に許認可申請の取り下げを NRC に申請する一方、NRC の原子力安全許認可会議(ASLB)は同年6月、取り下げは認められないとの裁定を下した。これに対する NRC の委員5名の見解は賛否が拮抗していたが、強硬な反対論者のリード院内総務が取り仕切る上院が2012会計年度で同計画に予算を付けなかったこともあり、認可申請に関する実質的な審査活動はすべて、2011会計年度の終了とともに停止となっていた。

今年2月に DOE が提出した13会計年度の予算要求でも、ユッカマウンテン計画関連の経費は計上されず、1月に政府の有識者(ブルーリボン)委員会が DOE に提出した廃棄物の管理処分対策に関する報告書は「集中中間貯蔵施設と深地層処分場を早急に建設する」ことを勧告。ネバダ州の反対により中止につながった同計画の反省から、地元の同意に基づいたサイト選定手法を採るよう提言していた。

下院・エネルギー商業小委員会の委員長でもあるシムカス議員は、「30年もの年月と150億ドルを費やした計画であるにもかかわらず、NRC は法に準じて審査活動を完了することを拒否している」と非難。1,000万ドルの審査継続費用が認められれば、予算不足のために活動を続けられないとする NRC の弁解は通用しなくなるとしたほか、「米国民は少なくとも、ユッカマウンテンが処分場として安全か否かについて答えを知る権利がある」との見解を表明している。

# 電力制度改革の核心にせまる(その1)

## 電力産業に更なる競争を導入することの意義と課題

東京大学 大橋 弘

昨年3月11日の東日本大震災をきっかけとした東京電力福島第一原子力発電所事故を受け、政府のエネルギー政策は白紙から見直されることになった。政府は震災数か月後の7月29日に「革新的エネルギー・環境戦略策定に向けた中間的な整理」をまとめ、原発依存度の低減、分散型システムへの移行、国民的議論の展開という大きな3つの方向性を提示し、その具体化に向けての議論が現在(2012年7月執筆時点)続けられている。とりわけ原発依存度の低減は再生可能エネルギーや化石燃料への依存度を高め、エネルギーコストの更なる上昇を招き、産業や雇用の空洞化を加速する恐れがあることから、電力事業のより一層の効率化が強く求められているところである。

わが国においても、電力事業の高コスト構造が電力価格の内外価格差を生んでいるのではないかという指摘などを踏まえて、1995年より累次の電力事業制度改革が実施されてきた。発電部門の自由化、小売部門の部分自由化、そして発電部門と送電部門の会計分離などの取り組みの中で、電気事業において新たな事業者が参入し、電力料金も継続的に低下してきた。この料金低下のどの程度が制度改革によるものかは必ずしも明らかでなく、今後の更なる厳密な分析が待たれるところであるが、参加者の範囲が限られていた電気事業が一般電気事業者以外にも開放されたことによるメリットとして広く捉えられている。

本稿ではこうした背景を踏まえたうえで、電気事業における更なる制度改革(restructuring)の意義と課題について経済学的<sup>a</sup>な観点から論じてみたい。ここでいう「制度改革」とは自由化を含むが、政府規制の新たな導入や強化も念頭に入れた用語である。なお電力の制度改革については海外諸国の事情を紹介した邦語の論文も多く存在する<sup>b</sup>。本稿では、海外事情の詳しい紹介はそうし

た論文に譲り、制度改革の背景にある経済学的な考え方を若干の実証的な知見に基づいて議論したい<sup>c</sup>。

電力の制度改革の議論をする際に、本誌の関心である原子力発電をどのように位置づけるかは極めて重要な問題である。なかでもバックエンド事業は、極めて長期にわたる不確実性の高い事業であり、また費用も巨額であることから、その位置づけいかんで制度改革の議論も本来大きな影響を受ける。本稿では原子力政策の不透明な現状を踏まえ、原子力発電については分析の俎上から外して、より抽象的な観点から電力産業における更なる競争導入の意義について論じることとしたい。

本稿の構成は以下のとおりである。第I章では、経済学において観念される競争の意義・機能について紹介をする。第II章では、電力産業の特徴を踏まえたうえで、市場競争が機能するための条件について議論する。第III章では電力事業の制度改革のあるべき方向性について触れる。第IV章は結語である。

### I. 競争の概念

「競争なくして経済学に固有の意義はない」<sup>d</sup>との主張がなされるほど、競争概念は経済学にとって重要である。競争についての典型的な見方の一つは、アダム・スミスの『国富論』に代表される見方であり、自由で分権的な市場経済は、私的利益を追求する市場での競争を通じて、あたかも神の「見えざる手」に導かれるがごとく、社会的に望ましい資源配分を達成するというものである。商品の売り手と買い手が何ら事前に調整や相談をするこ

*The Heart of the Electricity System Reformation(1); Restructuring the Japanese Electricity Market*: Hiroshi OHASHI.

(2012年 7月9日 受理)

<sup>a</sup> より正確には経済学の一分野である「産業組織」の観点から議論を行う。紙面の都合から産業組織の説明については大橋(2012a)<sup>3)</sup>に譲りたい。

<sup>b</sup> 最近では、例えば服部徹(2012)<sup>6)</sup>がある。

<sup>c</sup> 本稿では、紙面の都合もありインセンティブ規制を含む伝統的な規制理論については論じない。そうした点については、例えば穴山(2005)<sup>1)</sup>を参照のこと。

<sup>d</sup> Demsetz(1968, P1)<sup>8)</sup>, “Competition occupies so important a position in economics that it is difficult to imagine economics as a social discipline without it.”

となく、それぞれが自らの利潤動機だけに基づいて行動することによって、売り手と買い手双方にとって最適な結果をもたらすというアダム・スミスの提起した見方は、『国富論』が出版された18世紀当時の近代思想の流れに沿ったものでもあり、その後大きな発展を遂げる経済学の出発点となった。売り手も買い手も市場価格に対して一切の支配力を及ぼすことができないような極限的な市場状態を表現する「完全競争」においては、価格メカニズムに委ねることによって売り手の利潤と買い手の便益との和(以下「経済厚生」という)が最大化されるという「厚生経済学の基本定理」は、経済学者の間に今でも深く浸透している。この考え方によれば、経済厚生の観点から最悪の状態である規制されない純粋な独占と、最善の状態である完全競争との間にスペクトラムが存在し、「競争性」が高まるにつれて資源配分の効率性が単調に改善されることになる。

同質財<sup>6</sup>において「競争性」とは、販売価格と(限界)費用(以下「マークアップ」という)との乖離として定義され、独占禁止法(以下「独禁法」という)の実務においては市場支配力として言及される概念である。競争性が高まれば、マークアップが減少してより多くの需要が生み出されることになることから、経済厚生が高まることになる。

独占は市場が独り占めされていることが問題であることを踏まえると、経済厚生の観点からは企業数が多い方が望ましいのではないかとの見方が派生的に出てくる。実際に米国では、1960年代のまだ競争政策に対する十分な理解がなかった頃において、競争者の数を増やすことが競争を促進させることとなるとの考え方のもと、大企業を分割したり(例えばスタンダード・オイルやAT&T)、中小企業を過剰に保護したりという政策がとられてきた。

しかしその後の産業組織を中心とする研究の中で、企業数とマークアップとの間に明確な因果関係を定立することが不可能であることが理論的にも実証的にも明らかになった<sup>7</sup>。例えば、固定費やネットワーク効果が存在することによって、生産や販売に規模や範囲の経済性が強く働くような産業においては、多数の企業に生産・販売活動をさせるのではなく、限られた少数の企業に活動を集中することが効率上も望ましい。伝統的に企業数やその関連指標<sup>8</sup>を競争性の代理指標として用いていた独禁法の実務(いわゆる「狭義の競争政策」)においても、今ではそうした代理指標は事案選別のスクリーニングに用いられ、実質的な競争性の判断には用いていないというのが一般的な理解である<sup>9</sup>。

わが国では、事業法における規制を含む「広義の競争政策」においては、まだこうした競争の理解は浸透しておらず、上で紹介した1960年代の米国のようなレベルにとどまっている印象を強く受ける。そうした点を示唆する例はわが国においては枚挙に暇がない。2例あげると

すれば、公共調達において1社だけしか応札しなかった場合には競争性がないとみなす考え方や、規制分野における競争性の尺度として、新規参入者の数が頻繁に用いられる点を指摘できるだろう<sup>1</sup>。

「競争性」は可視化できない現象なだけに、一つの指標から判断ができるとするのは危険である。この点を感じ得るために、景気判断と比較すると分りやすいかもしれない。景況判断について識者によって異なる判断が出てくるのは、景気という経済現象が多面的な側面を持つからである。例えば、雇用統計を用いての判断と在庫の統計を用いての判断とでは、景気に対する異なる含意が導き出されても不思議ではなく、他方でどちらの統計を用いるのが良いのかについて客観的な基準は存在しない。景気と同様に可視化できない市場の競争性も多面的な側面を持つ。市場占有率や新規参入者の数といった外形的・事後的な指標に惑わされることなく、実証的な知見を持つ経済学の専門家が、対象となる市場の固有性に配慮した競争性の判断を行うことが望まれる<sup>1</sup>。

## II. 電力産業の特徴と競争導入の課題

電力産業の黎明期においては、発送配電はそれぞれ強い規模の経済性が働くものと考えられた。送配電が複数社に所有されていても、それがネットワークとしてつながっている限りは物理的法則によって強い正の外部性を相互に生み出すことになる。また大規模発電の効率性が高く、また送電ロスが無視しえない程度である場合には、発電は地域独占的に行われることが経済合理的であった。

電力産業が誕生して100年以上が経過した今、こうした電力産業の持つ技術構造は少しずつ変化を始めている。送配電においてはまだ規模の経済性が強いものの、発電における規模の経済性は高効率ガスタービンの登場

<sup>6</sup> 同質財とは、消費者が購入に際して価格のみを判断要素とするような特性を持つ商品を目指す。電気は物理的には同質であるものの、もし消費者が電気の発電源について異なる価値を見出すのであれば、電気は同質財とはいえないかもしれない。本稿では簡単化のために同質財を念頭に置くが、ここでの議論は価格以外の商品特性に差異が存在するような商品に対しても本質的には成立する。

<sup>7</sup> 詳しくは大橋(2012 a)<sup>3)</sup>やそこでの参考文献を参照のこと。

<sup>8</sup> 代表的な指標としてはハーシュマン・ハーフィンダール指数(HHI)がある。この指数は市場における企業の市場占有率を二乗して和を取ったものとして表現され、例えば、わが国の企業合併審査では、案件の選定における足切基準として用いられている。

<sup>9</sup> 「独禁法は競争を保護するためのものであり、競争者を保護するためのものではない」(“The antitrust laws were enacted for the protection of competition, *not competitors*” Brunswick Corp. v. Pueblo Bowl-O-Mat, Inc., 429 U.S. 477, 488(1977)。なお、斜体は原文より)と表現されることもある。

<sup>1</sup> これらについての詳しい説明は、例えば大橋(2012 c)<sup>5)</sup>を参照のこと。

<sup>1</sup> 例えば大橋(2012 b)<sup>4)</sup>を参照のこと。

等によって若干薄れてきた。また需要家の選択肢を確保することにより、小売部門の競争を潜在的に促す重要性が認識されるようになった。こうした世界的な潮流のなかで、わが国でも発電部門や一定規模以上の小売部門における新規事業者の参入が促進された。

電力制度改革の流れの中で、わが国のみならず海外でも、電気事業における政府規制を外し、発送配電分離を行って自由化(liberalization)を推し進めるべきという見方が存在する<sup>k</sup>。しかし電力という財は、他の産業での自由化の経験を単純に应用することを許さないような独特の特徴を有している点にも注意が必要である。

まずよく言われるように、電力は貯蔵するのに極めて高いコストがかかる。揚水ダムや蓄電池などの利用は効率が良いとは言えず、電気の需給を秒単位で調整させる必要がある。電子計算能力の向上によって、こうした需給調整は容易になったとはいえ、<sup>ピボタル</sup>要になる発電機が故障停止して供給不足が生じれば、不足の電力分だけ停電になるわけではなく広範囲の停電につながるようになる。これを航空産業になぞらえると、航空機が1便欠航すると他の航空サービスが全て停止されることを意味しており、自由化が進む航空産業でも想定できないほどの深刻な外部性を電力産業は有することを示唆する。

電力逼迫に対して、需要家が価格に応じて感応的に対応することができれば、そこに電力産業を効率化する潜在的な余地が存在する。もし需要家がリアルタイムで変動する価格を観測できる技術があれば、電力逼迫時の電力価格の高騰に対応して、例えば、冷暖房の温度を調整するなどして電力消費を抑えることもできるかもしれない<sup>l</sup>。電力価格が需給にかかわらず一定であれば、需要量は電力需給に対して非弾力的とならざるを得ず、需要家負担のもと電力会社が余計に調整電源などの設備を持たざるを得ないことになる。

電力供給には設備容量制約があり、需要側でも上記のごとく非弾力的であることから、とりわけ電力逼迫時において電力市場は市場支配力に対して極めて脆弱な産業であると結論付けられる。電力供給が逼迫している時点においては、ほんの小さな発電能力しか持たない事業者であっても、その事業者の供給が需要を限界的に満たす<sup>ピボタル</sup>要の存在であるならば、その事業者は極めて高い価格を卸市場や相対取引にて要求することが可能になる。しかもこのピボタルな事業者は、自らの利潤を最大化しようとするならば、あえて供給を差し控えるという市場支配力を行使することによって、VOLL(value of lost loadの略)に近いところまで価格を釣り上げることが可能と

なる。電力市場においては、中小事業者が市場支配力を行使することが可能であることから、他の産業のように市場占有率などの指標は市場支配力を推測する際のスクリーニングとしてさえも機能しない。また電力価格の高騰において、それが市場支配力の行使に起因しているのか、単なる競争市場における需給逼迫に起因しているのかを区別することがほぼ不可能に近い。以上の点から電力産業は競争政策の運用が極めて難しい分野である。

電力市場において市場支配力の懸念が市場メカニズムによって解消されないのであれば、自由化と共に、価格に対して規制を入れるのが一つの方策である。オーストラリアやカリフォルニア州などでは価格規制(プライスキップ)を導入している。しかし規制価格をいくらにすべきかについての正解は存在しない。この価格が低ければ、電源開発が進まずに将来に需給逼迫が起こる確率を高めることになるが、高い規制価格は市場支配力の行使を容認することになりかねないからだ。需要家(特に大口需要家)が価格に対して感応的に対応できる技術的基盤が整うまでは、政治的な理由で価格規制を入れざるを得ないというのが自由化の過程にある国が直面する共通課題のようだ。

需給逼迫時における市場支配力の行使を抑制するもう一つの方策として、他地域から電力供給を可能にするインフラの拡充が考えられる。わが国においても東日本震災時における計画停電にて、地域間連系の脆弱性が問題点として指摘された。他地域からの供給が潜在的に可能であるということ自体が、市場支配力の行使を抑制に大きく寄与することになることから、連系線増設における検討ではこうした反競争効果抑制の観点も経済評価の項目に勘案していく検討を始めるべきだろう。

### Ⅲ. あるべき電力制度改革の姿とは

経済学的な観点からみた理想的な電力産業の姿は、第I章での議論を踏まえれば、電力市場の需給バランスに応じた価格がシグナルとなって、多数の売り手と多数の買い手が各々自発的に需給調整を行えるような市場環境を具備し、先物を含む卸市場での価格が中長期的な供給力確保に向けての電源開発に適切な誘因を与えることと考えてよい

しかし第II章にて議論したような電力の持つ(限界的な領域における)非弾力的な需給構造と独特な外部性の存在、加えて電力インフラの現況(特に需要家の価格感応度を高めるためのインフラ整備と広域的電力融通を可能とする地域間連系容量確保)のもとでは、電力市場では理論的に経済学が想定するようには市場機能が働かない恐れがある。

競争政策の観点からは、市場支配力に対する対応として構造規制と行為規制というおおまかに2つの考え方があり、構造規制とは、いわゆる事前規制の一種であり、

<sup>k</sup> 例えば Littlechild (2006)<sup>12)</sup>。

<sup>l</sup> もちろん電力需要の価格弾性の程度が大きな役割を果たす。筆者の知る限り、わが国では需要家レベルの個票データから厳密に推定されたことはない。本稿第IV章も参照のこと。

市場競争が行われる前に市場の構造自体に規制を行うものである。本稿の冒頭で述べた1960年代米国における企業分割がその一例である。他方で、行為規制とは市場競争が行われた事後的な結果として表れる市場成果(例えば価格や数量)に対して行政介入を行うものである。国際的には市場支配力に対する対応は、事前規制(構造規制)から事後規制(行為規制)への流れがあり、とりわけ市場構造の複雑な産業においては事後的に修正が比較的容易な行為規制を基本に考えることが、経済学的にも合理的な方向性である。本稿では行為規制のひとつとして価格規制について上に触れた。

電力産業において市場支配力への対抗として構造規制を用いることが難しい点について、以下では卸市場における強制取引と発送電分離という2点を取り上げたい。

卸取引を流動化させるための構造規制として強制的な「玉出し」がしばしば検討の俎上に上ってきた。流動性を高めるために供給を強いるという市場メカニズムに基づく規制は、先物市場(あるいはそれに相当するメカニズム)の機能不全を起こさせ、電源開発などの供給力確保にも規制を加えざるを得ない状況を作り出すことになる。

そもそも電力市場は需給両面において非弾力的なために、わが国の規制当局が市場支配力の有無の判別することはほぼ不可能である。何を以って競争性があるとするのか正しい判断が下せる保証がない中で、競争的な卸市場を形成することは現実問題として相当に難しい。LIBOR(ロンドン銀行間取引金利)において発覚した英バークレーズの不正操作を発端として国際的な入札カルテルの存在が疑われているが、そうした事態がわが国の電力卸市場に万一にも起きた場合、規制当局は課徴金減免制度が機能することを願う以外に現状として打つ手がない。物理的に9つの供給区域にほぼ閉じているわが国では、市場機能が想定通りに働かない可能性を念頭に入れた競争促進のあり方を考えることが現実的だ。

更に理想的な電力市場では、電力価格が下がるとは限らない。政策的に電力価格が低位に規制されてきた国で自由化を行えば、価格規制を外せば必ず電力の市場価格は上昇することになる。価格規制の隠されたコストを考えれば、こうした自由化は経済厚生を増進するものと経済学では評価されるが、こうした経済学的な考え方が政治的に受け入れられるかは別次元での判断となる。

次に発送分離について考えてみる。送配電部門における規模の優位性はその物理的特性から今でも重要である。累次の制度改革を通じて発送電の会計分離を進め、特に送電部門については電力会社から独立した中立機関を設置して、送配電の接続・利用に関して新規参加者が不当な取り扱いを受けることがないよう監視をする仕組みを作ったが、再生可能エネルギーの導入進展を受けて、公平な接続規制を広域的にきちんと担保することが

従来以上に大切な視点となっている。

しかし送配電部門の中立化・広域化を目指す上で、現状の一般電気事業者における垂直統合を分離するべきかどうかについては、経済学的には明確な答えがない。一般に、その産業が置かれるリスク環境や市場規模の大きさ、そして提供される財・サービスの補完性の程度などによって、選択されるべき最適な垂直的取引関係が大きく異なりうるということが経済理論的には知られている<sup>m</sup>。この点を顕著に見てとれるのは移動体通信市場の変遷であろう。垂直統合から始まったこの産業は、コンテンツ事業の拡大と共に水平分業が広がりを見せ、現在ではグーグルなどを中心に垂直統合へかじ取りの転換が見られる<sup>n</sup>。垂直統合と水平分業とのいずれが最適かは、市場環境に応じて異なるというのが経済学の理解である。

再生可能エネルギーが発電シェアを高めつつある中で、送配電部門が持つべき調整電力に厚みを必要とする局面においては、発送配電を垂直統合的に持つことのメリットがあることは見過ごせない。Economides(1998)<sup>9)</sup>やSappington(2006)<sup>13)</sup>が垂直統合のデメリットとして指摘している sabotage(差別的な接続拒否)の懸念については、垂直分離を行ったにしても垂直統合時と同様の接続規制とそのモニタリングが必要とされることを考えれば、日本の電力産業にて大きな問題とは思われない。Borenstein and Bushnell(2000)<sup>7)</sup>は経済理論的に考えられる電力制度改革における3つのメリット<sup>o</sup>のうち、系統運用については成功事例が過去に乏しいことを指摘している。わが国においても垂直分離がもたらす得失をアカデミックな研究成果も踏まえて慎重に検討をすべきであろう。

#### IV. 結語

電力制度改革の論点は多岐にわたり、本稿では競争に係る点を中心に産業組織の観点から議論を行った。電力市場は、その財の特性から他の産業における市場競争とは異なる側面を持ち、他産業での自由化の経験をそのまま当てはめることはできない。つまり電力市場においては、他産業でときにうまく説明できている経済理論の単純な延長線上で考えることはできず、実証的な観点から経済理論の現実妥当性をチェックしながら、制度設計を図る必要がある。

もちろん現在の電力市場が設備投資や需給構造の観点から効率的であるとは言いきれず、インフラ整備を中長期的に行いながら、現状に安住することなく頑強性のある電力市場を訴求していくことが重要であることはい

<sup>m</sup> 例えば Joskow(2010)<sup>11)</sup>を参照のこと。

<sup>n</sup> 移動体通信における垂直関係の変遷については大橋(2010)<sup>2)</sup>を参照のこと。

<sup>o</sup> 系統運用の他のメリットとして、設備投資の正常化と需要管理を挙げている。

までもない。

いずれにしても制度設計を考える際に参考にされる学術的な実証研究のほとんどが海外のものであるということは悲しむべき現状である。これは実証研究に対して鈍重なわが国の経済学者らが多くの責を負うものであるが、他方で、定量的なデータが日本の電力産業において余りに乏しいことも否定しがたい事実である。「供給が需要を育てる」のは電力のみならず、定量的な研究においても言えることである。わが国の電力産業を題材にした優れた実証分析が今後生まれることを強く望んで筆を擱く。

#### —参考文献—

- 1) 穴山梯三, 電力産業の経済学, NTT 出版, (2005).
- 2) 大橋弘, モバイルの産業構造と競争政策上の課題, 第3章『モバイル産業論』, 川濱昇, 大橋弘, 玉田康成編, 東京大学出版会, (2010).
- 3) 大橋弘, 「産業組織と競争政策」, 公正取引, 2012年5月号, (2012a).
- 4) 大橋弘, 「市場支配力と市場画定」, 公正取引, 2012年6月号, (2012b).
- 5) 大橋弘, 「公共調達の競争性」, 公正取引, 2012年8月号刊行予定, (2012c).
- 6) 服部徹, 「米国における発送電分離が電気事業に与えた影響—主要な自由化州を対象とした事例調査—」, CRIEPI 調査報告 Y 11036, 2012年5月, (2012).
- 7) S. Borenstein, J. Bushnell, “Electricity Restructuring:

Deregulation or Reregulation?” The Cato Review of Business and Government, (2000).

- 8) H. Demsetz, “Economic, Legal, and Political Dimensions of Competition,” UCLA WP 209, (1981).
- 9) N. Economides, “The Incentive for Non-Price Discrimination by an Input Monopolist,” *Int. J. Ind. Organization*, **16**[3], 271-284(1998).
- 10) P.L. Joskow, “Lessons Learned From Electricity Market Liberalization,” *Energy J.*, Special Issue on the Future of Electricity, 9-42(2008).
- 11) P.L. Joskow, “Vertical Integration,” Symposium in Honor of Oliver Williamson, *Antitrust Bull.*, **55**[3], 545-586(2010).
- 12) S. Littlechild, “The Market versus Regulation,” *Electricity Market Reform: An International Perspective*, (eds) F.P. Sinoshansi, W. Pfaffenberger, Elsevier, (2006).
- 13) D.M. Sappington, “On the Merits of Vertical Divestiture,” *Rev. Ind. Organization*, **29**, 171-191(2006).

#### 著者紹介



大橋 弘(おおし・ひろし)  
東京大学  
(専門分野/関心分野)競争政策, 産業組織



### 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—  
(8月3日第2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。
- ・英文誌の寄贈・交換先を見直し, 基本的には冊子体の配布を中止することとした。
- ・英文誌の50周年記念 Review 論文の依頼状況が報告された。
- ・平成24年度学会賞(論文賞)への編集委員会推薦論文の選考方法を承認した。また, 英文誌独自の表彰について検討した。
- ・PNST および和文誌のデータベース登録方針が検討された。PNST Vol. 2は Web of Science に登録申請を行った。
- ・和文誌の電子投稿審査システムを J-Stage において行うための申請をした。
- ・掲載論文内容に対するコメントに関して対応を検討した。

#### 【学会誌関係】

- ・6月22日の理事会で話題になった倫理委員会議事録の学会誌巻頭言の扱いに関する件については, 倫理委員会と編集委員会意見交換会は日取りの調整が付かず取り止め, 倫理委員会がメモを作成することになった旨の報告があった。
- ・12月号以降の主要記事の巻頭言, 時論について執筆者候補の選出を出席者に要請あり。
- ・11月号からの特別企画(特集)として掲載する「原子力の人材育成(仮)」についての記事企画の紹介があった。「今後いかに優秀な学生を確保していくか」, 学生会員と YGN との座談会, 大学・研究機関関係者との誌上座談会を企画中で, 順次掲載していくと報告があった。
- ・9月号以降の12区分の記事項目について編集企画状況について報告があった。原子力分野以外の読みものとして「サイエンス」の記事なども掲載していくことになった。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

# 電力制度改革の核心にせまる(その2)

## 制度改革と地域主導型電力ネットワーク

早稲田大学 横山 隆一

1990年代より先進諸国では、電力の安定供給、電気料金の低廉化、新規ビジネスの創出等を目的に、電気事業制度改革が推進され、主に電力供給体制への競争原理の導入が推進された。しかし、米国カリフォルニア州での電力供給危機や北米北東部や西欧で発生した大規模停電以降、欧米諸国の電気事業では、電力系統全体での供給信頼度の確保、さらに地球環境問題への対応が重要課題となった。本稿では、米国と欧州諸国における電気事業制度改革の特徴について述べ、また、東日本大震災以降のわが国の電力安定供給のためのエネルギー政策と電力会社に依存しない地域主導の電力供給ネットワーク整備の必要性について論ずる。

### I. 欧米諸国での電気事業制度改革の動向

欧米諸国では、電気料金の低減、経済の活性化や新規ビジネスの創出等を目指して、1990年代より電気事業制度改革が推進された。1980年代以降の欧米諸国における主な電気事業制度改革とそれに伴う電力市場の動向を第1表に示す。1990年代には、主に電力供給体制への競争原理の導入が推進された。しかし、米国カリフォルニア州での電力供給危機や北米北東部や西欧で発生した大規模停電以降、欧米諸国の電気事業では、電力系統全体での供給信頼度の確保、さらに地球環境問題への対応が重要課題となった。本稿では米国と欧州諸国における電気事業制度改革の特徴と電力市場の変遷について述べる。

#### 1. 米国における電気事業制度改革の特徴

米国では、卸電力市場や送電線アクセスについては連邦エネルギー規制委員会(FERC: Federal Energy Regulatory Commission)が、電力小売市場については州政府や州公益事業制度委員会が、それぞれ規制・制度設計の権限を持っている。連邦レベルの電力自由化として、1978年の公益事業規制政策法(PURPA: Public Utility Regulatory Policy Act)や1992年の国家エネルギー政策法(NEPA: National Energy Policy Act)により、卸発電分野の参入規制緩和や卸(おろし)託送制度は整備された。次いで、1996年のOrder 888により、送電網に対する無差別のアクセス(オープンアクセス)を実現することと、それに必要な情報を全ての市場参加者に無差別に提供するためのシステム(OASIS: Open Access

Same time Information System)の設置が、送電網を所有する電気事業者に対して義務づけられた。とりわけ、Order 888/889の実施により、卸発電分野で完全な自由化が行われたとされている。その後、FERCは、Order 2000において、送電網を保有するすべての電気事業者に対し、卸電力取引市場への参加者から独立し地域的な広がりを持った送電網の管理機関「地域送電機構(RTO: Regional Transmission Organization)」を設立し、それに参加することを求めた。

一方、小売分野の自由化は、1997年7月のロードアイランド州で大口需要家を対象とした部分自由化が実施されたことを皮切りに、1998年にはロードアイランド州、マサチューセッツ州、カリフォルニア州で家庭用需要家も含む全ての需要家に対する小売自由化が導入された。

しかし、2000年夏から2001年初冬にかけてカリフォルニア州で、需給逼迫により輪番停電の実施も含む電力緊急体制の発動が多発する電力危機が発生した。さらに、カリフォルニア州の公営の電力市場であるCPX(California Power Exchange)の卸電力価格は、夏季(8月)で前年同月比の5倍、冬季(12月)で同10倍以上に高騰した。この電力危機は生じた理由について複数の要因が複合的に作用したとの見方が強いが、電力需給が逼迫すれば卸電力価格は上昇・高止まりし、電力自由化が直ちに価格低下に結びつくわけではなく、電気の特質を十分に考慮した制度設計が不可欠であることを示した。さらに、2003年8月に米国北東部およびカナダ五大湖周辺に及ぶ地域で発生した停電は、電力供給における供給信頼度維持の重要性を再認識させた。

このような背景の下、2005年に成立した包括エネルギー法(Energy Policy Act of 2005)には、信頼度維持のための電力信頼度機構(ERO: Electric Reliability Orga-

*The Heart of the Electricity System Reformation(2); Recent Deregulation of Electricity Market and Stable Power Supply in Japan* : Ryuichi YOKOYAMA.

(2012年 7月10日 受理)

第1表 欧米での主な電気事業制度改革の動向

出典：参考資料1) ー4) を参考に作成

	米 国	欧 州
1990年代	1992年：国家エネルギー政策法 1996年：FERC Order888/889 [1997年：米国初のISOとしてISOニューイングランドが営業開始] [1998年：マサチューセッツ州など2州で小売自由化開始] 1999年：FERC Order 2000	【1990年：電気事業民営化・事業再編（英国）】 【1995年：NordPool設立【北欧】】 1996年：EU電力自由化指令
2000年代以降	【2000年夏～2001年：カリフォルニア州で電力危機発生】 【2003年：北米大停電の発生】 2005年：包括エネルギー法 2006年：FERC Order679（料金規制改革による送電投資促進に関する最終規則）。 FERCは NERC <sup>□1</sup> をEROとして認定。エネルギー省が国内送電混雑調査に関する報告書を発表 2007年：FERC Order 890（送電サービスの不当差別・優遇の禁止）。FERC Order 693の発表（NERCが提出した信頼度基準を承認する最終規則） 2011年：FERC Order 1000（Order890を強化し、全ての送電事業者への広域送電線計画策定プロセスの参加義務付けなど）  □1：NERC：North American Electric Reliability Cooperation □2：NETA：New Electricity Trading Agreement, □3：BETTA：British Electricity Trading and Transmission Agreement	2001年：EU再生可能エネルギー電力促進指令 【プール制に代わるNETA <sup>□2</sup> 運営開始（英国）、2000年代初頭に欧州各地域で卸電力取引所の運営開始】 2003年：改正EU電力自由化指令。EU-ETS指令（2005年から排出量取引制度を導入） 【イタリア大停電の発生】 【2004年：家庭用需要家を除く需要家を対象に小売自由化を実施（EU大）】 【2005年：スコットランド地域も統合したBETTA <sup>□3</sup> の運用開始（英）】 2006年：EU電力安定供給指令（需給バランスの維持、系統投資枠組みの構築を義務付け） 【西欧大停電の発生】 【2007年：全面小売自由化を実施（EU大）】 2009年：第三次電力自由化指令（第三次エネルギー・パッケージ）。改正EU国際電力取引規則。改正EU-ETS指令（2013年以降の排出量取引制度を規定）。EU再エネ利用促進令（2020年にEUエネルギー消費量の20%を再エネ化） ENTSO-E（EU大のTSOの協調機関）運営開始

nization)の設立や送電投資インセンティブの提供、送電線立地への連邦支援などの電力の安定供給に関する内容も織り込まれた。包括エネルギー法の成立を受けて、FERCは、料金規制改革による送電投資促進に関する規則(Order679)、送電サービスの不当差別・優遇を禁止する規則(Order890)やOrder890を強化し全ての送電事業者への広域送電線計画策定プロセスの参加義務付けた規則(Order1000)を成立させている。現在、発電税控除等の風力発電を中心とした導入促進支援策が進む中、米国では、より広域的な系統安定運用の確保や州際の大域的な電力流通設備形成の促進を重視していると言えよう。

なお、紙面の都合上、米国の小売自由化の動向に関する詳細は省略するが、米国で全面的な小売自由化を実施しているのは、一般に電気料金の高い州13州とワシントンDC、自由化を考えていない州は26州で、それ以外の州は何らかの見直しを行っている。

## 2. 欧州における電気事業制度改革の動向

1980年代後半から欧州連合(EU:European Union)は、加盟国間で財・サービスが自由に取引引きできる単一市場への統合を推進している。この市場統合の一環として、1996年に産業用や大口需要家を対象とした小売市

場の自由化や垂直統合型電気事業者への発送配電(小売)各部門の会計分離の義務付けなどを織り込んだ「EU電力自由化指令」が制定された。この指令により、加盟国は国内法を整備し、段階的に2003年までに少なくとも国内小売市場の32%を開放することとなった。さらに、2003年の「改正EU電力自由化指令」により、2007年7月からは家庭用を含む全ての需要家を対象に自由化を導入すること(全面小売自由化)などが規定された。しかし、域内の小売自由化が達成されたといえ、送電系統運用者間の協力・協調が不十分であること、各国間の国際連系線の容量が不足していることや既存の国際連系線が最も効率的に運用されていないことなどが指摘されていた。

そこで、全面自由化が実施された2007年に、欧州委員会は電力・ガス自由化に関する新たな指令案(第3次エネルギーパッケージ)を提出し、2009年6月にEU閣僚理事会で採択された。この指令では、系統運用部門の独立性の強化、系統運用者と各国規制機関の国際的な連携強化などに関する施策が打ち出された。この指令の採択を受けて、2009年7月より、EU大のTSOの協調機関として、ENTSO-E(European Network of Transmission System Operators for Electricity)が本格運営を始めた。

これに伴い、UCTE(Union for the Coordination of the Transmission of Electricity)など欧州各地域でこれまで活動してきた送電系統運用者による協調期間がすべて解散した。

このENTSO-Eは、欧州34カ国の系統運用者42社から構成される欧州全域の系統運用者(TSO: Transmission System Operator)の協調機関であり、経済性・信頼性・安定性を配慮した送電系統の協調的開発や系統情報公開(利用可能量の公開)などに加え、欧州大の10カ年系統開発計画や系統利用・運用に関する技術指針(Technical Code)の策定などの役割を担う。今後、連系量がさらに増加すると予想される再生可能エネルギー電源を考慮に入れた市場モデル構築も検討する方針である。

EU域内の電力取引についても、各国に設けられている電力取引市場間での統合が不十分で広域的な市場になっていないことが、以前よりも指摘されていた。欧州電力・ガス規制機関グループ(EREGG: European Regulators' Group for Electricity and Gas)は、2006年に欧州単一市場創設に向けて、欧州を7つの地域に分割し、各地域で統合市場の創設に取り組もうとする「電力地域イニシアチブ」を策定した。それ以降、各地域の電力取引関係者(取引所、独立規制機関、TSOなど)が協調し、国際連系線混雑管理方式や電力取引ルール、価格

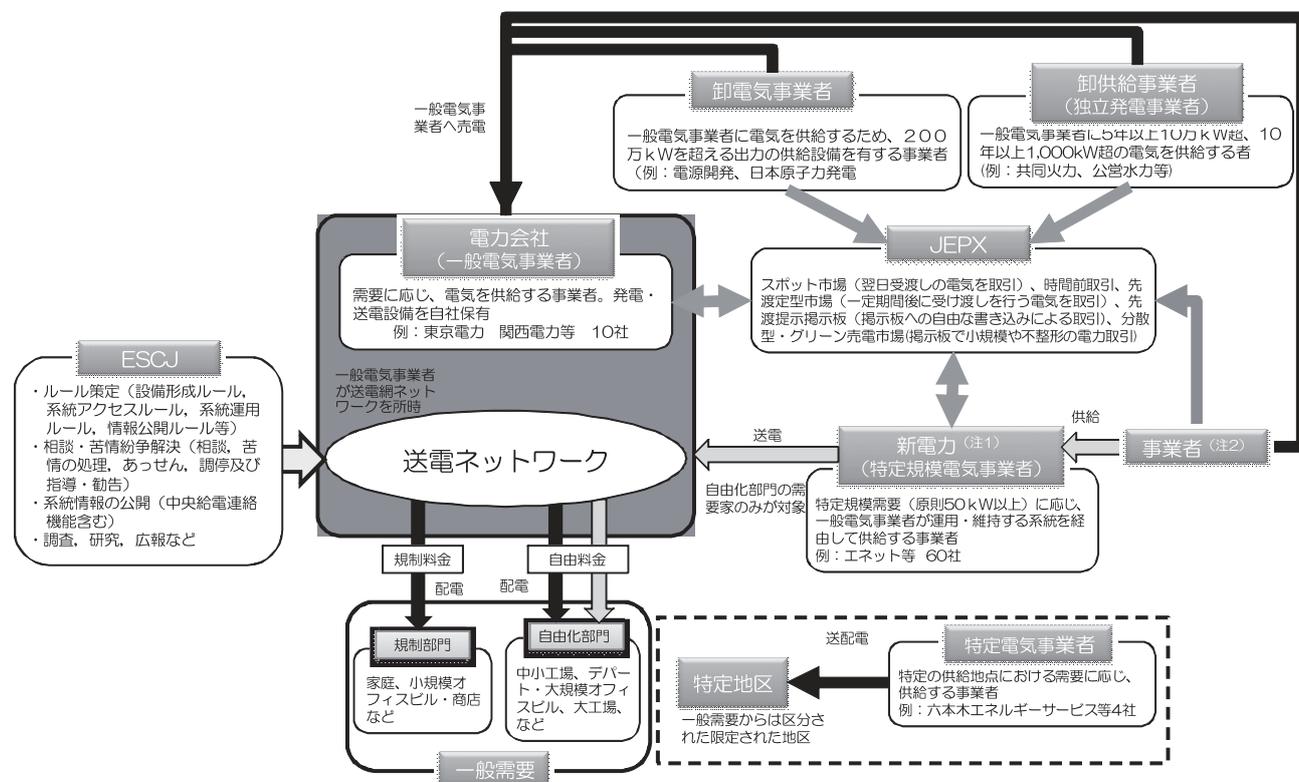
決定システムの検討などを行い、地域市場統合への準備が進められている。

## II. わが国の電気事業制度改革と安定供給

### 1. 電気事業制度改革とエネルギー政策の特徴

わが国においても、電気事業の効率化と需要家へのサービス向上を目的とした競争原理導入という流れの中で、2000年3月に電力の小売が部分自由化された。2005年4月には、改正電気事業法のもと、わが国の実績を踏まえ、発送配電一貫体制を堅持しつつ、公平・透明な競争環境を確保した「日本型自由化モデル」が打ち出され、高圧で受電されているすべての需要家まで自由化範囲が拡大された。2007年4月には電気事業分科会において、家庭部門も含めた全面自由化の是非についても検討されたが、家庭部門の需要家にメリットがもたらされない可能性が高いとして、一定期間をおいて改めて全面自由化の是非について検討されることとなった。

わが国の電気事業制度改革の特徴は、発電分野の自由化から、小売分野の段階的な自由化という慎重なアプローチを採用していること、発送電を構造的に分離せずに電力会社の送配電部門から独立した中立機関として設立されたESCJによる系統アクセスに関するルールの策定・監視などを通じて送配電部門の公平性・透明性を



出典：参考資料5)～7)などを参考に作成  
 注1：なお、特定規模電気事業者は、これまで「PPS(Power Producer & Supplier)」という名称で呼ばれていたが、経済産業省は、2012年3月から名称を「新電力」とした。  
 注2：発電という行為を行う事業者(新電力等に電気を卸売りする事業者等を含む)

第1図 わが国の電力供給の仕組みの概要

図っていることなどが挙げられる(第1図参照)。さらに、私設で参加が任意である JEPX が用意するスポット市場、時間前市場、先渡定型市場と先渡掲示板(電力先渡し情報を公開する仕組み)を通じて、経済性追求の卸電力取引を行うことができる<sup>6)</sup>。2012年には、自家用発電設備やコジェネレーション発電の余剰分を売電することのできる分散型・グリーン売電市場も新たに設けられた。

このような広域的な電力取引の円滑化や活性化に対応するため、地域間連系線に期待する機能も変化している。これに対応するため、連系線の運用容量の水準を客観的に評価し有効活用を図ってもなお、この連系線を増強する必要がある場合は、設備増強コストの増大と広域的な電力流通の活性化による利益を比較した上で設備増強の適否の判断を公平・公正に行われるようなルール化も ESCJ で行われている<sup>7)</sup>。

## 2. 電力安定供給と電源ベストミックス

一般電気事業者(電力会社)は、100年間にわたり、消費者からの厳しい要求である低廉で、良質な電力を安定的に供給することを目指し電力システムの形成に努めてきた。水資源が豊かであったわが国では、水力発電の開発から始まったが、その後の開発地点の枯渇に伴い、高度成長期には、電力の75%が輸入石油により発電されることとなった。しかし、中東戦争を機に石油危機が到来し、脱石油をはかった結果、技術的に成熟してきた原子力発電と新規に開発が進んだ天然ガスが、石油に取って代わった。さらに、廉価な電力を生産するためにスケールメリットを求め、特に原子力発電は、100万 kW を超える大規模設備として建設され、必然それらは、需要中心である都市部から遠隔の地におかれ、設備規模だけではなく地理的な広がりをもつ巨大な電力供給システムが作り上げられた。また、緊急時に電力会社間で電力融通を行うための連系用送電線も完備され、北海道から九州に至るまで全国(沖縄は除く)の電力システムがひとつに連結されている。現在、原子力、石油、石炭、天然ガス、水力からなる大規模電源が効率的に組み合わせられて運用されており、これが電源ベストミックスと呼ばれ、電力の安定供給の重要な役割を担ってきた。

## 3. 再生可能エネルギーの導入と課題

この電力供給システム形成の流れのなかで地球温暖化の原因と言われる CO<sub>2</sub> の排出削減問題が顕在化した。その対応技術として注目されたのが、太陽光、風力、地熱、地中熱(地下を深く掘ると得られる冷熱)、バイオマス、波力、潮力といった再生可能エネルギーを利用した発電である。先進各国でこれらの再生可能エネルギーの導入を積極的に進めているが、日本での目標量はいまだ少ない。太陽光発電の導入量を現在の40倍に引き上げるといった荒唐無稽な目標を掲げたにもかかわらず、太陽光発電の普及ペースが急減したため、2009年1月、経産省は緊急提言に沿って設備費用の約1割に相当する補助金

を復活させ、2011年には、国会で再生可能エネルギーの普及政策として余剰電力の固定価格買い取り制度である再生可能エネルギー特別措置法案が可決された。これにより再生可能エネルギー導入は加速されると予想され、それを受け入れるための新たなエネルギーインフラの構築が急がれることとなった。

しかし、わが国での再生可能エネルギーの普及は遅い。その理由として、日本の電力供給は、世界一の電力品質と供給安定性を保持していたことがあげられる。電気機器をコンセントに差し込みさえすれば、間断なく供給されてきた。産業、業務、家庭とも、そのような優れた電力供給に支えられて高度な社会を築いており、これに、再生可能エネルギーが入り込む余地は少なかった。太陽光や風力といった再生可能エネルギーは、お日様まかせ風まかせで出力が不安定であり、エネルギー密度が低いと設備が大型化し、コスト高となる。また、資源が偏在するため任意の場所に任意の設備を建設できないといった欠点をもっていることはよく知られている。

電力会社は、常に、供給安定性維持とコスト削減を求められているので、単に、CO<sub>2</sub> の排出削減に良いからと言って、不安定で従来の電源と比べはるかに高い設備を積極的に導入することはできなかった。昼しか出ない太陽光発電電力を夜間にも利用するのにバッテリーを入れればよいが、それでなくとも、とてつもなく高価な設置コストがさらに高くなる。一方、世界の潮流であり、商業ベースに乗った風力発電に関して言えば、電力会社は、風力出力不安定で特定供給地域の周波数が変動し、需要家に迷惑をかけることを懸念し地域ごとに導入量に制限を付けている。そこで、現在、電力会社の供給地域を超えた電力のやり取りが容易になるよう系統間連系線の拡充と運用制約緩和及び制度改革が強く求められている。

## Ⅲ. 災害に強いエネルギー社会インフラの構築

### 1. 地域主導の電力ネットワークの整備

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震により、もろくも原子力及び火力発電設備が損壊し、東京電力管内では、供給力不足が発生し、その対応として、計画停電(輪番停電)が実施された。その後、原子力発電設備の停止命令まで発せられたことにより、この電力不足は、すぐには解消されそうにもないため、電力会社においては供給力を確保のあらゆる手立てを尽くすと同時に、産業、業務、家庭のすべての分野において、節電と省エネルギー推進が必要である。

一方、大規模な電力不足を経験したことで、家庭、事務所、工場、地方自治体は、電力会社に全面依存しない自前の電源を確保しておくことの必要性を痛感した。原子力発電の代替として再生可能エネルギーを促進するための法案が成立したが、太陽光や風力発電等の再生可能

エネルギーを大量に導入すると、それらの出力変動により電力品質が悪化することが懸念され、新たな電力供給社会インフラの考え方が必要となる。そこで、地域自治体が主体となる地産地消型電力供給システムが提案されている。大規模で高価なネットワークを一度に作るのではなく、地域特性に合わせた適正規模の供給ネットワークを作り、必要に応じて随時ネットワークを増設し、相互間を連結する方式である。相互結合型の電力供給ネットワークの構築により、各種再生可能エネルギー利用電源からの地域電力供給、電力貯蔵装置の有効活用、ICTによる電力利用の効率化などが可能となり、電力会社に全面依存しないという意味で災害に強い電力供給インフラとなる。

このような地域自治体所有の発電所を中心に、行政機関、病院、警察、学校、避難所、通信基地、高齢者住宅を完備すれば、自然災害時のライフライン(電気、水、通信)確保が可能なスマートグリッドとなる。この能力は「Resiliency:回復力」とよばれ、今後の社会インフラ構築の指針となり、これは、今進められている東北の被災地の復興にも活用されるべき方式であり<sup>8)</sup>、これを實現するための制度改革も望まれる。

## 2. 再生可能エネルギーの導入促進

災害時においても入手可能な再生可能エネルギーの役割が再認識され、その導入促進に関しては、2012年7月から始まった全量固定価格買い取り制度への期待が高まっている。政府は今後のエネルギー政策の柱として、原子力発電の減少分の補完を目指し、再生可能エネルギーの導入推進を掲げており、その実現の切り札的政策として「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」を成立させた。それ以前には、2003年には、いわゆる「RPS法:電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」が施行されている。国は毎年度、新エネルギー等電気の利用目標量を定めるとともに、電気事業者に対して一定量以上の新エネルギー等電気の利用を義務付けるものであり、わが国では、利用量を義務化した固定枠制度で再生可能エネルギーの導入を進めてきた。しかし、固定枠制度と固定価格買い取り制度のどちらが再生可能エネルギーの普及に効果があるかは、国情によって異なるが、固定価格買い取り制度を入れたデンマーク、ドイツ、中国では急速に再生可能エネルギーが広がったのに対して、RPS的な制度を導入した国では遅々として再生可能エネルギーの普及が進まないという事実もあった。

今回の制度では、住宅用太陽光発電だけではなく大規

模太陽光も対象になる。しかも余剰ではなく全量が買い取り対象になるため事業としての発電が可能になった。太陽光発電以外にも、風力、地熱、中小水力、バイオマスによる発電も新たに対象に加わるため、短期的には、再生可能エネルギーの導入促進に貢献するものと考えられる。これからの課題は、高い価格で買い上げられた再生可能エネルギーのコストがすべての需要家の電気料金に上乘せされることになり、導入量の増加に伴い、どこまで需要家が負担に耐えられるかである。

電力安定供給の確保のために、総合資源エネルギー調査会・総合部会の下に電力システム改革専門委員会が2012年2月に設けられた。この委員会は、2011年12月に総合資源エネルギー調査会・基本問題委員会が示した基本的方向性を受けて、将来のエネルギーミックスのあり方と併せて、小売全面自由化の実施や、送配電部門の広域化・中立化といった電力システムに係わる専門的な検討が進められている。わが国の電力供給の30%を担ってきた原子力発電の重要性は今後も変わらないが、再稼働等の不透明さから代替策を見出しておかなければならない。とりあえずは、クリーンで調達が安定している天然ガスに頼ることになるが、再生可能エネルギーの設置価格が大幅に下がるなら、それに移行することも可能である。しかし、それははるか遠い将来と思えてならない。

### — 参考資料 —

- 1) 穴山悌三, 電力産業の経済学, NTT出版, (2004).
- 2) 岡田健司, “国内外の電気事業制度改革の動向”, 電気学会誌, 127〔2〕, 77~80(2007).
- 3) 奈良宏一編著, 電力自由化と系統技術, 電気学会, (2008).
- 4) 矢島正之, 電力政策再考, 産経新聞出版, (2012).
- 5) 電力小売市場の自由化について, 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部電力市場整備課, (2012.4).
- 6) 日本卸電力取引所ホームページ.
- 7) 電力系統利用協議会ホームページ.
- 8) 横山隆一編著, 災害に強い電力ネットワーク, 早稲田大学出版社, (2011).

### 著者紹介

横山隆一(よこやま・りゅういち)  
(現職)早稲田大学  
(専門分野/関心分野)エネルギーシステム  
計画・運用・制御の最適化



## 電力制度改革の核心にせまる(その3)

### 歴史からの提言—求められるビジネスモデルの転換

一橋大学 橘川 武郎

東京電力・福島第一原子力発電所の事故を契機にして、日本では、電力業のあり方が根本的に見直されることになった。あれだけの事故を起こした以上、電力業や原子力政策のあり方が、これまでのままであって良いはずはない。本稿では、わが国における電力業および原子力発電の歴史を振り返ったうえで、①電力業の産業体制をいかに改革すべきか、②電力の需給構造をいかに改革すべきか、および③原子力に関する政策をいかに改革すべきか、……これら3つのテーマについて掘り下げる。

#### I. 応用経営史の手法

2011(平成23)年3月11日に発生した東日本大震災に伴う東京電力・福島第一原子力発電所の事故を契機にして、日本では、エネルギー政策が根本的に見直されることになった。エネルギー政策全体の見直しが進むなかで、電力業や原子力政策の改革についての国民的関心が、かつてなく高まっている。あれだけの事故を起こした以上、電力業や原子力政策のあり方が、これまでのままであって良いはずはない。一方で、国や東京電力の責任を糾弾しているだけでは、建設的な改革は実現されない。

一般的に言って、特定の産業や企業が直面する深刻な問題を根底的に解決しようとするときには、どんなに「立派な理念」や「正しい理論」を掲げても、それを、その産業や企業がおかれた歴史的文脈(コンテキスト)のなかにあてはめて適用しなければ、効果をあげることができない。また、問題解決のためには多大な活力を必要とするが、それが生み出される根拠となるのは、当該産業や当該企業が内包している発展のダイナミズムである。ただし、このダイナミズムは、多くの場合、潜在化しており、それを析出するためには、その産業や企業の長期間にわたる変遷を濃密に観察することから出発しなければならない。観察から出発して発展のダイナミズムを把握することができれば、それに準拠して問題解決に必要な活力を獲得する道筋がみえてくる、そしてさらには、その活力をコンテキストにあてはめ、適切な理念や理論と結びつけて、問題解決を現実化する道筋も展望しうる、……これが、応用経営史の考え方である。

*The Heart of the Electricity System Reformation*(3)  
*Reforming Japan's Electric Power Industry; A Historical Approach* : Takeo KIKAWA.

(2012年 6月13日 受理)

本稿では、この応用経営史の手法を採用する。①日本の電力業の産業体制をいかに改革すべきか、②電力の需給構造をいかに改革すべきか、③原子力に関する政策をいかに改革すべきか、……これら3つのテーマについて、長期間にわたる変遷を観察することから出発し、発展のダイナミズムを析出して、あるべき改革を現実化する道筋も展望していく。

#### II. 電力業の歴史

##### 1. 日本電力業の特徴

日本最初の電力会社である東京電灯(現在の東京電力の前身)が設立されたのは1883年(明治16年)のことである。それから今日にいたる日本電力業130年の歴史については、次の3つの時代に大きく区分することができる。

- (1) 民有民営の多数の電力会社が主たる存在であり、それに、地方公共団体が所有・経営する公営電気事業が部分的に併存した時代(1883~1939年3月)。
- (2) 民有国営の日本発送電と9配電会社が、それぞれ発送電事業と配電事業を独占的に担当した電力国家管理の時代(1939年4月~1951年4月)。
- (3) 民有民営・発送配電一貫経営・地域独占の9電力会社が主たる存在であり、それに、地方公共団体が所有・経営する公営電気事業や特殊法人であった電源開発(株)、官民共同出資の日本原子力発電(株)などが部分的に併存する9電力体制の時代(1951年5月以降。1988年の沖縄電力の民営化以降は、「10電力体制の時代」となった)。

このように、日本電力業の歴史の大きな特徴は、国家管理下におかれた(2)の時代の12年余を例外として、基本的には民営形態で営まれてきた点に求めることができる。電力業は公益性の高い産業であるが、わが国の場合には、国営化や公営化の途を選んだ多くのヨーロッパ諸

国と異なり、民営で電力業を営むという方式を選択した。つまり、民有民営の電力会社が企業努力を重ねて、「安い電気を安定的に供給する」という公益的課題を達成する、民間活力重視型の方針を採用したわけである。日本電力業の歴史に評価を下すには、この「民営公益事業」という選択が適切であったか否かが、重要な判断基準になる。

## 2. 戦前の推移

第2次世界大戦以前の日本の電力業界では、多くの民営電気事業者が群雄割拠し、時には激しい市場競争を繰り広げた。その様子は、同じく民営企業でありながら、互いに競争せず、横並びの行動に終始する今日の電力業界とは大いに異なるものであった。

例えば、3月の東京電力管内の計画停電の際に大きな問題となった東西間の周波数の違いは、明治時代に2つの大きな電力会社が異なる外国メーカーから火力発電機を輸入したことに端を発する。東京電灯の輸入先はドイツのアルゲマイネ(AEG)社であり、その結果、東日本では、大陸ヨーロッパの周波数である50ヘルツが主流になった。一方、大阪電灯はアメリカのGE社から火力発電機を輸入したが、その影響で西日本ではアメリカの周波数である60ヘルツが支配的になった。

明治時代の終りに始まった水力電気ブームは、第1次世界大戦の戦後ブーム期から1920年代の初頭にかけて、最高潮に達した。そのプロセスを通じて、大同電力や日本電力のような、大容量水力開発と遠距離高圧送電とを結合させた強力な卸売電力会社が台頭したが、それらの卸売電力会社は、やがて、既存の小売電力会社である東京電灯・東邦電力・宇治川電気などとのあいだで「電力戦」と呼ばれる激しい市場競争を展開するにいたった。

## 3. 第2次世界大戦前後の電力国家管理

第2次世界大戦の足音が高まり、戦時経済統制が本格化するなかで、民間電力会社等から設備出資を受け、1939年(昭和14年)4月に全国の発送電事業を一元的に管理する日本発送電株式が誕生し、電力国家管理がスタートした。さらに、1942年4月には、配電事業を地域別に一元管理する北海道・東北・関東・中部・北陸・関西・中国・四国・九州の9配電会社が発足し、存在基盤を喪失した民間電力会社等は、ごく一部の例外を除いて解散に追い込まれた。沖縄県は、九州配電の供給区域とされた。9配電会社の発足で完成をみた電力国家管理は、終戦後もすぐには廃止されず、1951年4月まで続いた。

電力国家管理は、当初、周波数の全国的統一、地域間送電連系の抜本的拡充など、高い理想を掲げた。しかし、戦時下の資材不足もあって、これらの理想はほとんど実現されず、むしろ国家管理は、日本電力業の発展過程における「長い回り道」となった。

## 4. 「9(10)電力体制」の栄光と挫折

12年1ヵ月にわたった電力国家管理に終止符を打ったのは、1951年(昭和26年)5月に実施された電気事業再編成であった。再編成の結果、北海道・東北・東京・中部・北陸・関西・中国・四国・九州の民間9電力会社が誕生し、9電力体制が成立した。9電力体制は、1988年10月の沖縄電力民営化により10電力体制に姿を変え、今日も続いている。

電力体制の特徴は、①民営、②発送配電一貫経営、③地域別9分割、④独占、の4点に求めることができる。9電力体制をその直前の国家管理体制と関連づければ、これら4点のうち、①と②は断絶、③は部分的連続、④は連続ということになる。したがって、9電力体制を生み出した電気事業再編成固有の意義は、①と②を実現した点、および③を徹底した点に求めることができる。

電気事業再編成によって誕生した9電力各社は、1950年代後半から70年代初頭にかけての日本経済の高度成長期に、「低廉で安定的な電気供給」を実現した。この時期は、民間電力会社が企業努力を重ね、活力を発揮して、「低廉で安定的な電気供給」という公益的課題を達成した、日本電力業の歴史全体のなかでも特筆すべき「黄金時代」だったとすることができる。

なぜ、高度成長期に、日本電力業の特徴である「民営公益事業」方式は、大きな成果をあげることができたのだろうか。その理由は、次の2点に求めることができる。

第1は、のちの時代と異なり、官と民のあいだに緊張関係が存在したことである。この時期には、電力国家管理の復活をもくろむ政府と、民営9電力体制の定着をめざす民間電力会社とが、官営か民営かをめぐって、つば競り合いを繰り広げた。戦前の電気事業法が廃止された1950年から戦後の電気事業法が制定される64年までのあいだに14年間の空白期間が生じたのは、経営形態をめぐる対立が深刻だったからである。政府は、1952年に特殊法人の電源開発(株)を設立し、佐久間ダムを建設させて、官営の優位を誇示した。これに対して、9電力会社の一角を占める関西電力は、単独で黒部川第四発電所を建設し、民間でも大規模ダム開発が可能であることを示した。両者の対立は、結局、経済性の観点から電源構成の火主水従化と火力発電用燃料の油主炭従化を推進した民営方式の勝利という形で終結し、1964年に制定された新電気事業法によって、民営9電力体制が法認された。

「民営公益事業」方式の「黄金時代」が到来した第2の理由は、市場独占が保証されていたにもかかわらず、9電力各社が活発に合理化競争を展開したことである。1950年代後半から70年代初頭にかけての時期には、前後の時期とは異なり、電気料金の改定は、9社いっせいに実施されず、各社ばらばらに行われた。そのため、9電力各社は、他社よりも少しでも長く料金値上げを実施しないで済むよう、競い合って経営合理化に取り組んだ。その

結果、電源の大容量化、火力発電の熱効率向上、火力発電燃料の油主炭従化、水力発電所の無人化、送配電損失率の低下などが急速に進み、「低廉で安定的な電気供給」が実現した。この時期の9電力会社は、市場独占を保証されていたにもかかわらず、民間活力を大いに発揮し、「お役所のような存在」ではなかったのである。

1973年(昭和48年)に発生した石油ショックは、日本経済の高度成長だけでなく、9電力体制の「黄金時代」をも終焉させた。「黄金時代」を支えた①政府・9電力会社間の緊張関係、②電力会社間の合理化競争、という2つの要素が、いずれも消滅したからである。

政府・9電力会社間の距離が狭まった背景には、電力施設立地難の深刻化と原子力開発の重点化という2つの事情が存在した。

1970年代にはいと産業公害が大きな社会問題となり、その影響を受けて電力関連施設をめぐる立地難が深刻化した。この立地難を、9電力会社は独力で克服することはできなかった。電力各社は行政への依存を強めることによって立地難を緩和しようとしたのであり、1974年の電源三法の施行は、それを象徴する出来事であった。

原子力政策も、政府・9電力会社間の距離を狭めるうえで大きな意味をもった。「安定的な電気供給」を至上命題として掲げた9電力会社は、石油ショック時の石油輸入途絶への危機感をきっかけにして、原子力開発に全力を挙げた(73年には日本の電源構成に占める石油火力の比率は73%に達していた)。それは、「石油ショックのトラウマ」とでも呼ぶべき状況であったが、9電力会社が推進した原子力開発は、スムーズに進行したわけではなかった。このころには原子力発電の安全性に対する不安感が、国民のあいだに根強く広がっていたからである。十分な国民的コンセンサスが得られぬ状況下で原子力開発を進めることになった9電力会社は、政府による強力なバックアップを必要とした。このような脈絡で、原子力政策は、政府と9電力会社とのあいだの距離を狭める意味合いをもったのである。

石油ショックに伴う原油価格の急騰を受けて、9電力会社は、1974年から80年にかけて、電気料金を3度にわたり大幅に値上げした。1974年以降、9(10)電力は、電気料金を改定する際に、横並びでほぼいっせいに行動するようになった。電力業界では、カルテル的傾向が強まり、石油ショック前に作用していた「値上げ回避のための合理化競争」のメカニズムは消滅した。

「石油ショックのトラウマ」により安定供給至上主義が浸透する一方で、電気料金は上昇し、「低廉な電気供給」は過去のものになった。電力会社は、「お役所のような存在」になり、民間活力は後退した。

石油ショック後の時期にも、「安定的な電気供給」は確保されたが、「低廉な電気供給」は終焉した。石油ショック直後の電気料金値上げは原油価格急騰によるものであ

り、ある程度理解も得られたが、1980年代半ばになって、原油価格が下がり円高が進行しても電気料金が高止まりしていることに対しては、批判が集中した。これらを受けて、1995年(平成7年)から電力自由化が実施されることになった。

2008年までに4次にわたり遂行された電力自由化によって、新規参入や事業者間競争が可能な需要分野が徐々に徐々に拡大した。具体的には、2000年に契約電力2,000kW以上の特別高圧需要家、04年に500kW以上の高圧需要家、05年に50kW以上の高圧需要家が、自由化対象に組み入れられた。電力自由化開始以降、電気料金は着実に低下し、2000年代にはいつてからの燃料費の高騰にもかかわらず、1995年度から2005年度のあいだに、約18%低下した。

しかし、一方で、検討対象とされていた自由化対象を家庭分野にまで広げる「全面自由化」は、2008年に見送られることが決まった。また、自由化分野が需要全体の約6割を占めるにもかかわらず、肝心の電気事業者間の地域を越えた競争は、今までのところ、わずか1件しか起こっていない。これらの事実を踏まえれば、日本における電力自由化は道半ばにして頓挫した、と言わざるをえない。

東日本大震災の発生に伴い「計画停電」が実施されたのをきっかけにして、非常時に北海道から九州まで必要な規模の電力融通を行えるようにするため、周波数50ヘルツの東日本と周波数60ヘルツの西日本とのあいだでの電気のやりとりを可能にする周波数変換装置や、同じ50ヘルツ同士でありながらいったん交流を直流に変え、再び交流に戻すため脆弱な北海道・東北間の連系線を、抜本的に拡充、強化することを求める声が高まっている。周波数変換装置や北海道・東北間連系線が拡充されれば、電力会社間競争は、現実味を増す。

競争が本格化することは、電力の需要家にとって有益であるばかりではない。長い目でみれば、電力会社にとっても、競争はプラスに作用する。地域を越えた競争に直面し、電力各社が個性を発揮して切磋琢磨すれば、民間活力は再び向上する。日本電力業が長いあいだ採用してきた「民営公益事業方式」が光を取り戻し、本来の力を発揮するためには、現状では、電力会社間競争が大きな意味をもつ。

### Ⅲ. 原子力発電の歴史

#### 1. 原子力発電の光と影

次に、わが国における原子力発電の歴史に目を向けよう。

日本において原子力発電がスタートしたのは、1950年代半ばのことである。1955年(昭和30年)には、原子力基本法などの原子力三法が成立した。当時は、電力業の経営形態をめぐって政府と電力会社とのあいだに対立がみられたが、こと原子力発電に関しては、初めから官民協

調が成立していた。

それから今日までの原子力発電の歩みは、

- (1) 国民的期待を受けてのスタート(1955～73年)
- (2) 原子力大規模開発と国論の分裂(1974～85年)
- (3) 国策民営方式による調整(1986～2002年)
- (4) 原子力カルネサンスと政策的支援(2003～10年)
- (5) 福島第一原発事故以降(2011年3月11日以降)

という5つの時期に分けてとらえることができる。

(1)の時期には、原子力発電が「夢のエネルギー源」として国民的期待を集めていたという、特有の事情が存在した。当時は国内炭の減退によるエネルギー自給率の低下が不安視されていたが、原料のウランを輸入するものの、それを長期にわたって使用することができる原子力は「準国産エネルギー」と考えられ、期待が高まったのである。

石油ショック直後の(2)の時期には、「脱石油の切り札」として原子力発電の必要性が高まり、数多くの原発が建設された。しかし、この時期には、原子力船「むつ」の事故やスリーマイル島原発の事故などにより、原子力利用の危険性に対する認識も高まり、原発をめぐる国論は二分されるにいたった。

1986年のチェルノブイリ原発事故は、原子力発電所の危険性を世界に示した。日本国内でも高まった「脱原発」の声に対抗して原子力開発を進めるには、「国策」であることを前面に押し出さざるをえなくなった。(3)の時期には、国策民営方式による調整が本格化した。

(4)の時期には、石油・石炭・天然ガスなどの化石燃料の価格高騰、地球温暖化問題に対する危機感の高まりなどを背景にして、原子力発電の再評価が世界的に進んだ。技術的・経済的理由で再生可能エネルギーの普及が遅れる中で、原子力は、二酸化炭素を排出しない「最強のゼロエミッション電源」とみなされた。「原子力カルネサンス」が国際的潮流となったわけであるが、(5)の福島第一原発事故を契機に、その流れは変わろうとしている。

このように、原子力発電の歩みには、光と影がいく度も交錯した。原発のこれからを決めるためには、危険性と必要性の双方を直視した冷静な議論が求められる。

## 2. 原子力「国策民営」の矛盾

2011年の福島第一原子力発電所の事故が起こる以前から、日本の原子力発電事業は、民間会社によって営まれながらも、「国策」による支援(国家の介入)を必要不可欠とするという矛盾を抱えていた。

原子力発電に国家介入が必要となる事情としては、まず、立地確保の問題をあげることができる。原子力発電所の立地を円滑に進めるためには、電源三法の枠組みがなくてはならない。電源三法の枠組みとは、電気料金に含まれた電源開発促進税を政府が民間電力会社から徴収し、それを財源にした交付金を原発立地に協力する地方

自治体に支給する仕組みのことである。これは、国家が市場に介入して原発立地を確保する手法であり、民間会社は、自分たちの力だけでは、そもそも原子力発電所を立地できないことを意味する。

原子力発電への国家介入を不可避にするもう一つの事情としては、使用済み核燃料の処理問題、いわゆる「バックエンド問題」がある。使用済み核燃料をリサイクル(再処理)するにせよワンススルー(直接処分)するにせよ、国家の介入は避けて通ることができない。とくに、現在の日本政府のようにリサイクル路線を採用する場合には、核不拡散政策との整合性を図ることが必要になるが、それが、市場メカニズムとは別次元の政治的・軍事的事柄であることは言うまでもない。

これらの立地問題やバックエンド問題に加えて、福島第一原発事故は、最も重要な非常事態発生時の危機管理についても、民間電力会社だけでは対応できないことを明らかにした。自衛隊、消防、警察、そして米軍までもが福島第一原発1～4号機の冷却のために出勤せざるをえなかったことは、原子力発電事業を民営形態に任せることの「無理」を端的な形で示している。

現行の「国策民営方式」の大きな問題点は、原子力発電をめぐって国と民間電力会社のあいだに「もたれ合い」が生じ、両者間で責任の所在が不明確になっていることである。9電力各社は、むしろ、国策による支援が必要不可欠な原子力発電事業を経営から切り離れた方が、良い意味で私企業性を取り戻し、民間活力を発揮することができるのではないか。9電力会社中最大の東京電力でさえ、いったん重大な原発事故を起こせば経営破たん瀬戸際に立たされる現実をみれば、民間電力会社の株主(場合によっては経営者)の中から、リスクマネジメントの観点に立って、原子力発電事業を分離しようという声があがっても、決して不思議ではない。

## IV. 電力改革の方向性

本稿では、応用経営史の手法を採用し、①日本の電力業の産業体制をいかに改革すべきか、②電力の需給構造をいかに改革すべきか、③原子力に関する政策をいかに改革すべきか、という3つのテーマについて考察してきた。最後に、ここまでの検討を踏まえて、①～③の改革の方向性についてまとめることにしよう。

①の電力産業体制の改革については、歴史的経緯を踏まえると、日本の電力産業にとって電力自由化は、経営の自律性を再び構築する、貴重な機会であるとみなすことができる。そこでは、電力自由化の進展→電力会社による経営の自律性の再構築→電力会社の強靱なエネルギー企業への成長→エネルギー・セキュリティの確保、という論理的連関こそが強調されるべきであろう。産業体制改革のポイントは、家庭用・小口用を含めて電力小売の全面自由化を実現すること、および電力会社間競争

を本格化することにある。

②の電力の需給構造の改革については、

- (a) 需要サイドからのアプローチを重視すること
- (b) 分散型系統運用を導入し、拡充すること
- (c) 電源構成における原子力発電への依存度を低下させ、新しい形で電源構成の最適化を図ること

の3点が重要である。電源開発面から見て、日本の電力業は、

- (i) 石炭火力発電中心(1887年～1900年代)
- (ii) 水力発電中心(1910年～1950年代)
- (iii) 石油火力発電中心(1960年代～1973年、1960年代初頭は石炭火力中心)
- (iv) 原子力発電を中心にLNG火力発電と海外炭火力発電を加えた電源の脱石油化(1974年以降)

という4つの大きな時代を経験してきた。東京電力・福島第一原子力発電所事故を契機にして、日本電力業は、脱原発依存型の電源構成を擁する新たな時代、通史的に言えば「第5の時代」へ進まなければならないのである。

③の原子力政策の改革については、歴史的経緯を踏まえて

- (A) 原子力発電事業を電力会社の経営から切り離し、場合によっては国営化すること
- (B) バックエンド問題について、使用済み核燃料の再処理(リサイクル)路線一本槍を改め、直接処分(ワンスルー)路線との併用を図ること
- (C) 電源開発促進税の地方移管、具体的には原発立地自治体への移管を実現すること

という3つの方向性が大きな意味をもつ。本誌の2012年1月号に寄せた「リアルな原発のたたみ方」で筆者(橘川)が論じたように、福島第一原発後の日本は、「脱原発依存シナリオ」を採用せざるをえないのである。

①の電力産業体制改革、②の電力需給構造改革、③の原子力政策改革のいずれをとっても、それを実現するためには、電力業のビジネスモデルの歴史的な転換が必要不可欠となる。ここで言う「ビジネスモデル」とは事業の仕組みのことをさす。

①の電力産業体制改革の焦点である電力小売の全面自由化と電力会社間競争の本格化は、1931(昭和6)年以來の出来事となる。約80年ぶりの歴史的転換を实行しようというわけである。

②の電力需給構造改革のうち需要サイドからのアプローチの重視は、本格的なものとしては、日本電力業史上初めての挑戦となる。分散型系統運用の導入、拡充は、1910年代に進行した電源構成の水主火従化に伴い集中型系統運用一本槍になった状況を大きく変えようとするものであり、100年マターの大変革と言える。原子力発電への依存度の低下も、1973年の石油危機以來のパラダイムを転換させようとするものである。

③の原子力政策改革の(A)原発事業の電力会社経営からの切り離し、(B)バックエンド問題でのリサイクル路線とワンスルー路線との併用、(C)電源開発促進税の地方移管、という3点は、1950年代半ばにスタートした日本の原子力政策のあり方を根本的に変える意味合いをもつ。これもまた、事業の仕組みの歴史的転換なのである。

東京電力・福島第一原子力発電所事故を踏まえた電力改革は、これら一連のビジネスモデルの歴史的転換が起きなければ、実現されることはない。日本電力業は、求められるビジネスモデルの歴史的転換を達成しうるか、正念場を迎えている。

#### —参考資料—

- 1) 橘川武郎, リアルな原発のたたみ方, ATMOΣ, 54[1], 22(2012).
- 2) 橘川武郎, 電力改革, 講談社, (2012).

#### 著者紹介



橘川武郎(きっかわ・たけお)  
一橋大学  
(専門分野/関心分野)経営史・エネルギー産業論

# 原子力災害の再発を防ぐ(その3)

## 地震工学分野から原子力安全への提言

京都大学名誉教授 亀田 弘行, 東京大学 高田 毅士,  
原子力安全基盤機構 蛭沢 勝三, 日本大学 中村 晋

新潟県中越沖地震を契機に活動し、その途次で東日本大震災を経験した日本地震工学会の原子力発電所の地震安全に関する委員会(同時に活動した日本原子力学会の委員会と密接に連携)の成果を踏まえ、さらにその後の概念の発展を取り入れて、原子力安全への地震工学分野からの提言を行う。まず委員会の経緯と本稿の基本姿勢を述べたあと、原子力発電所の地震安全の技術課題と使命、リスク論に基づく意思決定—技術ガバナンスの基盤、リスク～設計～規制の枠組み—求められる技術ガバナンスの枠組み、原子力安全への地震工学の技術課題、原子力リスクコミュニケーションに地震工学が果たすべき役割、分野間連携の重要性を論じ、最後に総括的なまとめを述べる。

### I. はじめに

日本地震工学会の「原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会」(2008年10月～2012年3月; JAEF委員会と略称/委員長: 亀田弘行)は、原子力発電所の地震安全に係る地震工学的課題を抽出・体系化して、研究ロードマップをとりまとめた<sup>1)</sup>。同委員会は、日本原子力学会の「原子力発電所地震安全特別専門委員会」(2007年12月～2012年3月; AESJ委員会と略称/委員長: 大橋弘忠)と連携する形で設置されたもので、JAEF委員会独自の報告書<sup>2)</sup>作成と並行して、AESJ委員会の原子力安全研究ロードマップ<sup>3)</sup>の形成に地震工学の観点から貢献した。

本稿は、JAEF委員会の成果を基礎に、原子力安全に関する地震工学からの貢献を論ずるものである。ここでは、地震工学の個別技術課題に加え、総合化の技術、分野間の連携、それらを基礎とする技術ガバナンス確立という、包括的な課題を重視する。これを、福島の大震災を2度と繰り返さないために必須の要件と位置づける。

我が国の原子力事業が根本から問われている。決して起こしてはならない事故が発生した以上、それは当然のことである。そこではエネルギー政策の根幹に関わる社会的・経済的・政治的課題とともに、この巨大システムを構成する技術基盤の課題が総合的に検証されねばなら

ない。最終的には意思決定は国民の判断にゆだねられるものであり、そのための十分な判断材料が明示されねばならない。その中で、工学が果たすべき責任は、第一に技術ガバナンスの確立、第二に個別技術と総合化技術の錬磨、第三に社会との対話に集約される。

以上の認識のもとに、いま取り組むべき重要課題を論ずる。本稿に与えられた主題は地震工学からの提言であるが、目指すべきは原子力安全工学と地震工学の連携と技術の総合化であることを重視する。すなわち、日本原子力学会と日本地震工学会の両者に籍を置く視点から議論を展開する。

### II. 原子力発電所の地震安全の技術課題と使命

#### 1. 技術ガバナンスの確立

地震国日本において今後も原子力発電所の運用を続けるには、地震・津波安全に関わる「正しい技術」を用いるべきことは言を俟たないが、それ以上に、「技術を正しく運用」する仕組みが重要という命題が、東日本大震災の現実により突きつけられている。福島第一原発の事故だけでなく、過酷事故の手前で踏みとどまった女川、福島第二、東海第二原発を含む検証がこのことを示している。これは、個別の技術論を超えて、いかにして経営と規制の仕組みの中に安全の技術を明確に位置づけ、実践するかという命題であり、「技術ガバナンス」と呼ぶべき課題である<sup>4)</sup>。事故後に指摘された多くの教訓(例えば文献5)は、最終的には技術ガバナンス確立の課題に帰結する。また、技術ガバナンスの基礎となるべき基本的教訓として、①リスク概念の徹底、②「科学的想像力」の受

Prevent Recurrence of Nuclear Disaster(3); Agenda on Nuclear Safety from Earthquake Engineering: Hiroyuki KAMEDA, Tsuyoshi TAKADA, Katsumi EBISAWA, Susumu NAKAMURA.

(2012年 7月6日 受理)

容,③行動の迅速性なる3つの命題が提起されている<sup>6)</sup>。

地震・津波に対する原子力安全の技術ガバナンスを確立するためには、以下の行動規範が不可欠である。

- (1) 科学的根拠に基づくハザードモデル：「現場主義」と「科学的想像力」を発揮したハザード評価を行い、的確なリスクモデルに繋げる。
- (2) リスク論に基づく技術オプション：設計外外力(beyond-design hazard)への対応の明確化。リスク制約下でのコスト～便益(安全, BCM(business continuity management)など)トレードオフによる技術オプションの提示と選択。
- (3) 原子力安全の全体像(トータルプロセスとトータルシステム)を把握した技術評価。
- (4) 技術倫理に立脚した安全の意思決定：規制, 制度, 運用とその説明性, 透明性。
- (5) 決定過程のリスクコミュニケーション：信頼の形成がリスクコミュニケーションの目的。工学には技術説明力が求められるが、それは説得の論理でなく、信頼形成のための対話であるべき。
- (6) 分野間の協働：専門分野が細分化され、総合化の動きがない、あるいはそれを嫌悪する、さらにはその異常さに鈍感であると、問題解決の中でギャップが生じ、問題が看過される。これを防ぐのは、分野を横断するブレーンストーミングと統合による検証。

## 2. 個別技術と総合化技術の錬磨

新潟県中越沖地震による主たる地震工学的課題は、設計外外力領域における構造物・設備・機器に関する耐震裕度の定量評価であった。これに対し、東日本大震災による原子力安全への最大の技術的教訓は、炉心を守るための深層防護のフロント系に対して、深層防護の機能を支持する非常用電源や海水冷却系等サポート系の津波に対する脆弱性であった。これらの事象は互いに関連しているものであり、原子力発電所の総合的な安全のためには、地震工学・津波工学に関わる個別要素技術とともに、総合化の技術を今後とも錬磨しなければならない。そのいずれも、原子力システム安全工学の課題であると同時に、地震工学の課題でもあり、これら2つの分野の連携が重要である。

地震工学が貢献すべき個別技術には、構造物、機器、建屋、送電網等重要周辺設備、斜面の耐震性評価の高度化や耐津波工学の体系化など、総合化の技術には、地震

<sup>a</sup> リスク・マネジメント論の重要な概念であるリスク・ガバナンス(risk governance)<sup>9)</sup>を参考に、原子力安全技術の質と運用が主題であることを表現するため、「技術ガバナンス(technology governance)<sup>9)</sup>なる概念を提案する。「問題解決の行為における能動的参加者と責務、規則と約束事、意思決定の構造、技術情報の蓄積・解析・開示・運用、のすべてを有機的に包含し有効に機能する仕組みの総体」と定義する。

PRA, 地震・津波PRAのさらなる整備<sup>8)</sup>, リスク～コスト～便益(安全・BCM)評価法の整備, 外的事象と内的事象それぞれの特質を考慮したリスク論の展開, 自然災害と原子力災害の複合災害との認識により地震工学に裏付けられた原子力防災の整備, などがある。

## Ⅲ. リスク論に基づく意思決定—技術ガバナンスの基盤

### 1. リスク論による原子力安全の枠組み

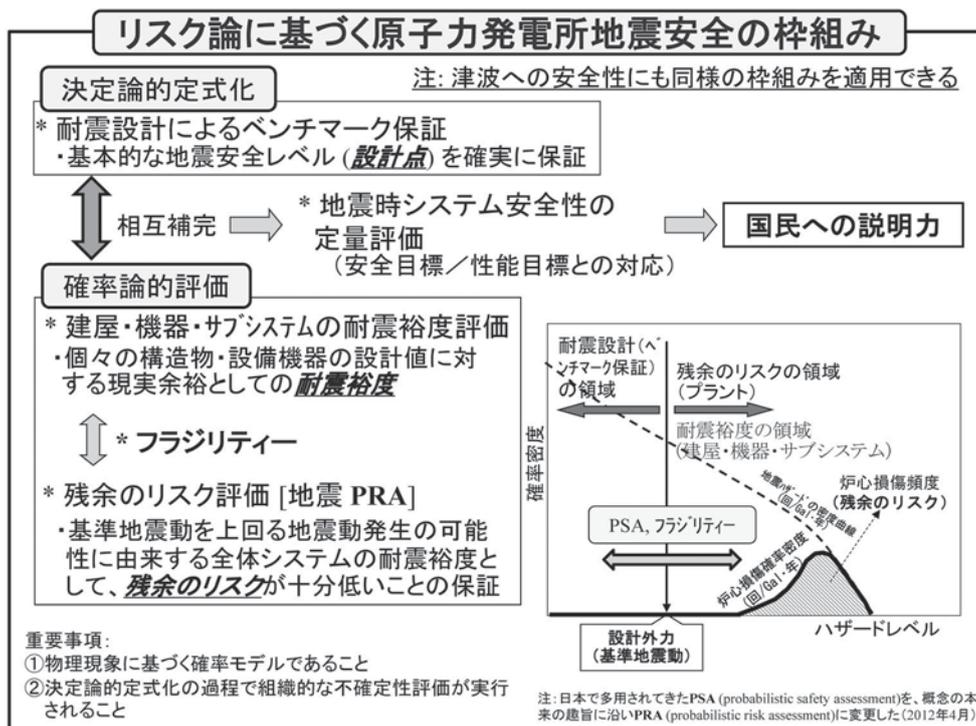
地震・津波などの自然外力は大きな不確定性を有するため、設計荷重を超える外力に曝される可能性を考慮して安全対策を万全にすることが重要である。工学的には、設計基準を超える「設計外外力」の領域における安全担保の問題であり、リスク論に基づく意思決定の枠組みが根幹となる。この概念は、規制基準では2006年に改訂された原子力発電所の耐震設計審査指針<sup>7)</sup>(以下、2006耐震指針)において「残余のリスク」として位置づけられた。

第1図に、リスク論に基づく地震安全の枠組みを示す。そこでは、決定論的な耐震設計により設計点というベンチマーク性能を保証すること、および設計地震動を超える領域で十分小さい残余のリスクを担保することにより、システム全体の安全レベルを達成する<sup>8)</sup>。

同図において、①設計点、②耐震裕度、③残余のリスクという3つのパラメータが、安全を規定する要の指標となる。特に、個別のプラント要素の設計値に対する実耐力、すなわち余裕性能を与える耐震裕度<sup>9)</sup>は、設計点と残余のリスクをフラジリティーの概念を介して結びつける。これにより、決定論的設計と確率論の評価は同一の土俵で整合性を持って議論できる。両者が相補的な役割を果たすことにより、プラント全体の耐震安全性の定量評価が行われる。設計とリスク評価は、実務においては分離されてきたが、両者の間にフィードバックの関係を成立させることにより、原子力安全確保の体系が完結すると考えるべきである。

ここまでの議論(第1図)で示されたのは炉心損傷の発生に関するリスク評価の説明であり、「レベル1のPRA手法」<sup>10)</sup>に相当する。さらに、格納容器の機能喪失により大量の放射性物質が放散する事象に対するリスク評価を扱う「レベル2のPRA手法」<sup>11)</sup>、周辺公衆の放射線被ばくによる原子力災害を扱う「レベル3のPRA手法」<sup>12)</sup>があり、日本原子力学会はそれぞれに関する実施基準を制定・発行している。地震工学は、レベル1とレベル2における過酷事故の未然の発生防止、およびレベル3に

<sup>b</sup> 我が国では、確率論的リスク評価法の用語としてPSA(probabilistic safety assessment)が多用されてきたが、目的を直接的に表現するPRA(probabilistic risk assessment)がより適切であるとの共著者間の合意に基づき、本稿ではPRAを用いる。最近、日本原子力学会でもこれまでのPSAからPRAを採用する趨勢にある<sup>13)</sup>。



第1図 原子力発電所の地震安全のリスク概念

における原子力災害への対応のための技術的事項に対して責任を分担するものである。

第1図は地震動へのリスクについて記述されているが、この枠組みは津波リスクの課題にも適用できる。その具体的な技術内容は、耐津波設計、耐津波裕度、津波に対する残余のリスクとして体系化される。津波リスク評価法については、日本原子力学会の津波PRAの実施標準が刊行されている<sup>13)</sup>。さらに、我が国では、強震動の影響を受けた直後に津波が来襲する場合は重要で、地震-津波による複合ハザードのPRAの手法整備が急務である<sup>14)</sup>。

2. リスク概念適用の緊急性

以上に述べたリスク論的枠組のもとでプラント全体のシステム安全性を定量評価することが、国民への説明力として不可欠である。メッセージの表現法は、①残余のリスクを直接定量的に示す、②現状からの改良による相対的なリスク低減効果を示す、などの形が考えられる。①をとる場合の判断指標としては、国際原子力機関(IAEA)の標準<sup>15)</sup>が国際的に認知されている。我が国では、原子力安全委員会により安全目標(案)<sup>16)</sup>(レベル3のPRAに対応)、および性能目標<sup>17)</sup>(レベル1, 2のPRAに対応)が提示されている。ただし、これら国内外の標準も、3.11を踏まえて見直しの議論が始まっている。

ところで、第1図は、2006耐震指針への改定の直後から、新指針の主旨を構造化して示すために作成・改良してきたものである。すなわち、この枠組みは現行指針のもとで実施可能である。問題は、指針改訂後に、残余の

リスクの概念を安全規制に導入する動きがあまりに遅いまま東日本大震災に遭遇し、福島第一原発の過酷事故に至ったことであり、工学的実践に深刻な反省を迫るものである(リスク論普及への筆者らの力不足を含む)。

地震国日本において、原子力事故を決して再発させないためには、設計基準を超える外力に対応するリスク概念が不可欠であることを再確認すべきである。リスク評価の方法では高度の専門性が要求されるし、その方法論は不断の改良が求められる。しかしより重要なことは、リスク概念による意思決定の枠組みを基本に据えることであり、その基本方針のもとで技術の錬磨と規制への迅速な反映を実行することである。

IV. リスク～設計～規制の枠組み一求められる技術ガバナンスの枠組み

1. リスク論に基づく規制の意義

原子力発電所の耐震設計の基本方針は、「原子力施設の放射線による被曝から個人・社会・環境を守る」ため、強震動や津波の来襲下で「原子炉を止める、冷やす、放射性物質を閉じ込める」性能を要求している<sup>7)</sup>。2006耐震指針において、将来経験する地震動強度や津波高さに介在する大きな不確定性への明確な認識が求められ、「残余のリスク」としてリスク概念が導入され、その低減を目指すべきと示されたことは、日本の原子力安全規制の歴史において画期的であった。原子力発電所の「絶対安全」を謳ってきた旧来の規制に対し、原子力安全問題をリスクという視点で捉える方向に舵を切ったことは大きな意識変革を促すものである。リスクの概念は、原子力

発電所が「安全か否か」ではなく「どの程度に安全か」を示すことの重要性を指摘しており、リスクの存在という事実を認識すれば、それを低減する種々の方策に検討が及ぶ。それは設計による対応にとどまらず、緊急時の対策を充実させることをも視野に含むことになる。しかしながら、耐震指針改訂後に、「残余のリスク」を規制に活かす歩みがあまりに遅かったことはⅢ-2節に指摘したとおりである。

リスク論の意義と有効性はすでにⅢ章で論じたが、これを安全規制の現場に適用する場面では、問題を「トータルプロセス」、「トータルシステム」と捉え、包括的にリスク低減を達成する視点が特に重要である。技術ガバナンスに不可欠の要請であり、これまでの規制活動における技術課題への取り組みに変革を迫るものである。

## 2. 「トータルプロセス」としての総合的思考の重要性

従来の地震に対する安全規制では、ハザード調査、基準地震動の策定、設計課題が個別的に検討され、それが理学や工学の専門分野ごとに細分化された中で議論される傾向にあった。本来、これらの検討作業は一連のプロセスとして扱うべきであり、相互に関連する中で耐震裕度と残余のリスクが定まる。地震動を保守的に評価しても、単独ではどれだけ発電所システムの安全性を向上させたのか不明であるし、目標安全水準に照らしてどの程度の安全水準を設計で目指しているのかは、建屋や設備・機器に付与される耐震裕度との相互関連の中で定まるものである。すなわち、単独項目の保守性に個別的に固執する議論に終わらせず、一連のプロセスを串刺しにする「トータルプロセス」の視野のもとで議論することにより、はじめて原子力発電所全体の安全性が明らかにされるのであり、この目的に合致した統合的な安全規制の枠組を構築すべきである。

細分化された検討のモードは東日本大震災以降も続いており、震災により一転、巨大連動地震の発生や地震動の評価に係る不確定性が理学分野で今まで以上に注目され、既存原子力施設の耐震検討において、「絶対安全」を志向し、著しく保守性を反映した極大地震動が選択される傾向にある。しかしながら、それだけ大きいものを採用したにも関わらず、施設の安全性に対してはまだ足りないのではという不安が残る点が問題である。これは、旧来から用いてきた「絶対安全至上主義」に問題があり、「絶対安全」が得られるまではどこまでも満足のゆく状況にならないことである。トータルプロセスを通じてのみ評価できる目標安全水準をクリアすることが安全性確保の要件であり、それを実現できるように基準地震動を選択する。すなわち、残余のリスクを評価して、その対策を検討するリスク論による意思決定の枠組を確立しなければならない。

## 3. 「トータルシステム」の頑健性の確保

原子力発電所を構成する安全確保のためのSSC (structure, system, component)、すなわち構造物・システム・機器について、個々の機能の挙動把握が重要であることは言うまでもないが、それらから構成される発電所全体の「トータルシステム」の挙動を把握することが必須である。重大事故に対するロバスト性(頑健性)確保の重要性は福島事故に顕著に現れており、発電所全体を総合的に評価し、脆弱部位の特定、安全確保のためのシステムの冗長性、独立性、多重性、多様性の向上が重要である。

また、福島事故のように、地震動による外部電源の喪失と、津波による内部電源の喪失、すなわち地震の揺れと津波の重畳により被害が拡大したことから、同時に異種のハザードが作用する場合や、複数号機を有する発電所においては、個々の号機間の被害の相互作用もトータルシステムとして取り扱う視点が重要である。

福島事故以後実施されている総合的安全性評価(いわゆる、ストレステスト)は、耐震設計上の安全評価に加えて、プラント全体の挙動における弱点の特定やクリフエッジの回避など、トータルシステムを検討する方向に踏み出している。この方向と上記のトータルプロセスが有機的に結合されて地震・津波安全の検討が進むことが重要である。

## 4. 工学課題としての安全審査—規制のあるべき姿

原子力界全体への信頼が低下している中、我が国の既設の全原子力発電所の安全性の再点検が進められ、原子力安全・保安院を中心に震災前に開始されていた耐震バックチェックに加え、震災後に開始されたストレステストが実施されている。現在進行中のストレステストでは、公開の意見聴取会で審議されることによる「公開性」、また、意見聴取会の議事録だけでなく事前の事業者へのヒアリングの議事録を公表することによるプロセスの「透明性」など適切な運営が行われている。しかしながら、一連の実施内容の「説明性」については、以下の点で向上が必要と考えられる。

すなわち、リスク論を基盤として、「トータルプロセス」と「トータルシステム」に基づく意思決定の枠組が実現されるべきである。例えば、基準地震動の設定は、「トータルプロセス」の中では設計点を定めるという一作業であり、それは設計点と残余のリスクの相対的な関係の中で決定されるべきことを上述した。最新の理学的知見を踏まえるべきは当然であるが、意思決定はリスク論に立脚する工学的判断であるべきである。これは、「トータルシステム」の安全性について、専門家に対しても市民に対しても「説明力」を持つために不可欠であり、理学的知見のみから演繹的に基準地震動を定めようとする現在の論法から脱却すべきである。この点、原子力安全に携

わる地震工学者の責務は大きいと肝に銘ずべきである。

新たに発足する原子力規制委員会と原子力規制庁は、独立性のみでなく、十分な説明力を持つ高度な専門的判断能力と責任ある規制権限を兼ね備えるべきである。それを実現する有機的・機動的な組織体制とすることが、究極の要請である技術ガバナンス実現の鍵を握る。

## V. 原子力安全への地震工学の技術課題

### 1. 個別の構造物・機器と安全システムの関係

原子力発電所の安全は、第1表に示すように、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」に係るシステムによって確保される。「止める」に係るシステムには地震動検知系や制御棒挿入系、「冷やす」には非常用炉心冷却系(高圧注入系, 低圧注入系), 残留熱除去系等, 「閉じ込める」には格納容器が「最後の砦」としての役割を担う。「止める」と「冷やす」のシステムは, 安全機能を直接果たすフロントライン(FL)と, フロントラインの機能を支援するサポートライン(SL: 海水給水系, 電源系, 信号系からなる)に大別される。高圧注入系を例にとると, フロントラインの機器はポンプ, 電動弁, 配管等, サポートラインは海水給水系の海水ポンプ, 電動弁, 配管等, 電源系の非常用ディーゼル発電機, スイッチギア等, 信号系のモーターコントロールセンター等で構成される。

地震安全については, 構造物・機器の耐震設計とシステム設計によって設計点が担保され, 設計外外力領域での耐震裕度は, それらのフラジリティーと設計点の相対的關係に基づいて評価される。以下に論ずる地震工学の技術課題は, 原子力発電所システムが持つ上記3つの安全機能と個別のプラント要素との関係を踏まえて解決することが不可欠である。

### 2. 原子力安全のための地震工学的研究ロードマップの基本構造

JAEE委員会の報告書<sup>2)</sup>では, 原子力発電所の安全のための地震工学的研究ロードマップをとりまとめたが, そこでは, 第2表に示す基本構造のもとで, 提案された多数の研究課題を整理した。ここに, 第I部(新潟県中越沖地震の影響)は2011年3月, 第II部(東日本大震災の影響)は2011年10月の時点できりまとめた。報告書では両者は別表としたが, それらを第2表に統合した。

第2表において, リスク課題の欄に「設計」と「システム評価」を含めたことに留意されたい。従来, 設計とシステム評価は別個のものとして扱われることが多かったが, 両者は孤立的に存在すべきものではない。原子力発電所のSSCに関する基準類の作成, 設計の現場, 安全クロスチェックなど, 地震安全に関する活動が目指すところは, 地震動という不確実性が高い外力に対する安全性照査というリスク課題を解決する目的(津波に対しても同様)を共有する。実務の現状では両者は別個の作業となることから, 概念的な連携が十分に行われないうらみがあるが, 包括的な技術課題の体系にこの分離した状況を固定的に持ち込むと, 事の本質を歪めることを, III, IV章において繰り返し強調した。この観点から, 設計とシステム評価を, リスク課題という共通の枠に位置づけたものである。

### 3. 具体的な地震工学的課題

JAEE委員会の報告書<sup>2)</sup>では, 第2表の枠組に従って, 具体的な地震工学的課題を整理して表にまとめ, それぞれについて解説記事を付した。その量は膨大であるので, 詳しくは同報告書を参照されたい。ここでは, それ

第1表 原子力発電所を構成する構造物や設備が安全に果たす役割

		炉心損傷評価(レベル1)		格納容器・放射性物質評価(レベル2)	公衆被ばく評価(レベル3)
	個別のプラント要素	システム		格納施設	放射性物質(FP)放出(各核種)
		FL	SL		
屋外施設	海水ポンプ室 屋外トレンチ 他	-	-		イベントツリー, フォルトツリーを用いた炉心損傷頻度評価(レベル1, 5)とFP放出量評価(レベル2, 3)
建屋	原子炉建屋 タービン建屋 他	-	-		
設備	制御棒挿入系 ←「止める」 残留熱除去系(ポンプ, 配管, 熱交換機, 電気品 他) ←「冷やす」 原子炉隔離時冷却系(ポンプ, 配管, 電気品 他) ←「冷やす」 原子炉格納容器 ←「閉じ込める」 他	○	-	原子炉格納容器	フォルトツリー例 
	非常用ディーゼル発電機(本体, 配管, タンク, 電気品 他) 原子炉補機冷却系(海水ポンプ, 配管, 電気品 他)	-	○		

注) FL=フロントライン, SL=サポートライン

第2図 地震工学的研究課題の基本構造  
(大項目の上段: 第I部(新潟県中越沖地震の影響)  
下段: 第II部(東日本大震災の影響)

基本事項		技術的・研究的な課題 (大項目)
リスク課題	設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>・要求性能 耐震強度 運転継続性 再使用性</li> <li>・意思決定方法 安全目標 残余のリスク</li> </ul>
	システム評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・セーフティーバースト概念</li> <li>・リスク評価 (地震PSA) のusability向上</li> <li>・不確定性の同定・低減</li> <li>・深層防護を反映する機能防護システムの評価</li> <li>・収束・事故シナリオ</li> <li>・本震後の対策 (連動地震、巨大余震)</li> </ul>
	情報基盤	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ナレッジデータベースの整備</li> </ul>
耐震・耐津波裕度		<ul style="list-style-type: none"> <li>・nominalな耐震裕度</li> <li>・実耐力による耐震裕度</li> <li>・応答・挙動の解析法 (設計及び評価)</li> <li>・維持・管理・診断の工学的的方法</li> <li>・安定と事故を分ける要因</li> <li>・耐津波性能に関するクリフエッジの解消</li> </ul>
ハザードの理解		<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震ハザード評価手法の高度化</li> <li>・対象地震・地震動の決定プロセス</li> <li>・水平動/上下動</li> <li>・パルスの扱い方</li> <li>・低頻度巨大災害の概念再構築</li> </ul>

らの中から特に重要と認識する項目を抜粋し、さらに現段階で必須と考えられる項目を加えて、以下に列挙する。

#### (1) リスク課題

- ・リスク論のもとでの基準地震動  $S_s$  の決定法
- ・性能設計の中での弾性設計用地震動  $S_d$  の再構築
- ・性能規定(安全性, 使用性, 耐久性)による設計
- ・健全度評価
- ・リスク論下での耐震設計(決定論)と残余のリスク(地震PRA)の統合と体系化
- ・津波PRA/地震・津波PRAの高度化(多数基立地, サポート系の機能喪失の影響)
- ・地震後対応プロセスの工学的検証
- ・リスク論・地震工学・津波工学・システム工学の連携による統合的津波対策評価

#### (2) 耐震・耐津波裕度

- ・建屋の応答評価の課題(浮き上がり, 不整形な地質・地盤構造, 強非線形~破壊領域, 詳細化モデルの応答評価法)
- ・耐力評価に関する課題(耐震裕度の評価指標導入)
- ・設備・機器の非線形地震応答解析の体系化(連成・非連成モデル, 減衰係数, 解析モデル作成の工学的判断, 実証性)
- ・応力に代わり, ひずみや累積損傷を含む裕度評価指標
- ・耐力や応答評価に含まれる保守性の明確化と合理的評価法.
- ・周辺斜面の崩壊のハザード評価と建屋に及ぼす影響
- ・津波による設備・機器のクリフエッジ低減対策(防

水・耐水・避水)の概念)

・耐津波工学の体系化

#### (3) ハザードの理解

- ・ハザード調査の有効活用の徹底(ユーザー側とプロバイダー側の関連)
- ・リスク評価における地震像の明確化
- ・正確な上下動シミュレーション法の体系化(建屋の上下共振と設備・機器への影響)
- ・震源モデルと津波波源モデルの統合的理解
- ・巨大地震・津波を含むハザード評価モデルの構築(地震動, 津波, 地殻変動)
- ・巨大余震, 誘発地震, ひずみ集中帯のハザード評価
- ・ハザード評価における観測資料と計算機科学の協働

## IV. 原子力リスクコミュニケーションに地震工学が果たすべき役割

### 1. 原子力リスクコミュニケーションの方向

北村<sup>18)</sup>によれば, 当初, 原発の多くの専門家は, リスクコミュニケーションの目的を, 相手方の意思へ影響を与えることや啓蒙・説得することとしていた。原発に反対する人々は科学技術的知識が不足しており, 正しい科学技術情報の提供により彼らの不安は解消し, 反対運動は姿を消すとの見方であった。しかしながら, 1986年チェルノブイリ事故等に伴い, 1990年代後半から専門家に対する社会の信頼が大きく損なわれ, 啓蒙・説得の目的設定は意味を失った。それ以降, 市民と専門家が協働作業を進めながら問題解決を図るとの市民参加方式による社会的意思決定の方向が, 問題を打開しようとする一部の専門家と市民の間に登場し, 実践されてきた。この方法を育てるためには, 原子力リスクコミュニケーションの実践を通して経験的知見を蓄積することが重要と指摘されている。

原子力エネルギーは潜在リスクが大きいものの, エネルギー集約型の魅力的資源という利点のもとに普及されてきた。潜在リスクの議論なしで, 魅力的資源だけを強調しても, 国民からの十分な信頼は得られない。一方では, 潜在リスクを定量評価するPRAの有用性を論じると, 有用性は理解するが「リスク論は日本の文化に馴染まない」とする意見の壁にしばしばぶつかる。日本文化の特質を論ずることは他の機会に譲るとして, 少なくとも, 原子力発電を推進するためには, 硬直した「疑似文化論」に逃避するのではなく, 原子力リスクを直視し, 市民との対話に積極的に取り組むことが必須である。すなわち, 信頼形成のためのリスクコミュニケーションこそ重要である。この前提のもとで, 原子力リスクに関する明確な科学技術的説明力が求められることに変わりはない。地震安全に関する原子力リスクコミュニケーションにおいて, 地震工学は果たすべき役割も大きい。

## 2. 地震及び津波 PRA に基づく原子力リスクに係る重要情報

地震・津波 PRA(レベル1～3)に基づく評価から、残余のリスクに係る以下の情報が生成される。すなわち、(i)炉心損傷頻度(CDF)/格納容器損傷頻度/放射性物質の放出量/公衆被ばくの程度、(ii)CDF への寄与度が高い重要な事故シーケンスおよびシステム・構造物・機器、(iii)強震動下での複数の構造物・機器の同時損傷の可能性(共通原因損傷の CDF に及ぼす影響の程度)、(iv)CDF に寄与する地震動強度と超過頻度の範囲、などである<sup>19)</sup>。これらの情報は、原発の地震安全に関する以下の事項を判断する要件となる。①安全目標/性能目標との対比から残余のリスクが適正か、国際標準から適正か、②多重防護が有効か、③システムの冗長性が有効か、④耐震重要度分類が適正か、⑤構造物・機器の補強や免震構造化等によりどの程度 CDF が低減されるか、⑥複数の構造物・機器が同時損傷した場合に多重防護・冗長性が有効か、⑦地震動評価の信頼性が適正か。

ここで注意すべきは、生成されたリスク情報の数値結果だけではリスクコミュニケーションは成立しないことで、評価条件、評価モデル、使用データ、評価結果を明示し、透明性・説明性が確保されていることが必要である。すなわち、「結果」だけでなく、結果に至る「過程」を示すことがより重要である。

## 3. 地震工学の原子力リスク評価における対応範囲と原子力リスクコミュニケーションにおける役割

原子力リスクコミュニケーションにおける地震工学の役割は、上記(i)～(iv)の情報生成を原子力システム安全の専門家と協力して実施し有用情報を同定・提供すること、結果を説明性の高い情報に加工・編集し社会や市民と双方向で繰り返し発受信すること、これにより信頼の醸成を図ることである。特に、地震・津波という自然現象の不確実さを考慮した地震・津波ハザード評価、これに基づく設計地震動・津波水位、これらを超えた領域における構造物・機器のフラジリティ(すなわち耐震・耐津波裕度)について、工学的に意味するところを丁寧に説明することが使命である。

## 4. 原子力リスクコミュニケーション実践における克服すべき課題

原子力リスクコミュニケーションの課題として、北村<sup>20)</sup>は自らの実践経験に基づき、(1)市民と専門家との双方向コミュニケーションにおける効率的討論のために、ヒューマンインタフェース技術(HI)の導入が有効であること、(2)専門家と市民とのコミュニケーション以前に、専門家間でのコミュニケーションの拙さを克服すべきことを指摘している。高田<sup>20)</sup>は、工学専門家間での工

学技術の取り扱いや適用の不整合等が討論に支障をきたしているとして、工学の立場からの「技術説明学」の活動を行っている。専門家間の溝の克服はきわめて重要な課題であり、次章で原子力安全分野と地震工学分野の連携課題として論ずる。

市民と専門家の協働作業の実践例として、原子力安全基盤機構と新潟工科大学が地元の柏崎・刈羽市民/メディア/教育機関/自治体(柏崎市、刈羽村)の協力得て、さらに国際原子力機関(IAEA)と連携して行っている原子力リスクコミュニケーションの研究がある<sup>21)</sup>。そこでは、「不毛の対立を超えて意義のある不一致」を重視するという、これまでの整合性を前面に押し出して対立を激化させる手法とは異なる、柔軟な考えをリスクコミュニケーションに包含する新しい方向の芽生えがある。

今後、ここに挙げた課題と解決のための努力が、最終的には原子力行政の中に活かされていくことを切望するものである。

## Ⅶ. 分野間連携の重要性

### 1. 原子力安全分野と地震工学分野の連携—原子力施設の地震・津波安全の必須要件

日本原子力学会が原子力安全に関する学術的進歩の中核的役割を担うべきことはいまでもない。しかしながら、地震・津波への安全課題において、原子力学会のみでは手薄なことは明らかである。

原子力発電所の安全の根幹を担う深層防護の概念は、内的事象に起因する事故に対して万全の体制が取られてきたのに対し、地震・津波の場合は、プラントの本体と周辺を含め、プラント全体が同時に影響を受ける外的事象に起因する共通原因故障が対象となること、多重性を有するサポート系の機能喪失により複数の安全上重要なフロント系が機能喪失することなど、外的事象問題に特有の課題がある。加えて、地震・津波ハザードが持つ大きな不確実性により、ハザードレベルとトータルシステムの挙動を連続的に重畳する PRA によるリスク評価が重要である。すなわち、ハザードとシステムをそれぞれの確に結びつけるため、地震工学分野と原子力安全分野の協力が不可欠である。

学会レベルでこの主旨の活動が組織的に行われたのは、著者らの知る限り、冒頭 I 章に述べた AESJ 委員会と JAEE 委員会の連携が初の試みであった。その中で、JAEE 委員会のリーダーと AESJ 委員会安全分科会幹事の間で行われた広範な討議は、両分野の連携のあり方とともに、超えるべき溝も示している(参考資料 3 の付属資料 3)。それは、分野横断的な真剣な討議がいかに重要であるかを確認させるものである。

### 2. 今後の連携の展開

この協力関係を引き続き発展させる努力が継続されて

いる。2012年3月に行われた「東日本大震災1周年記念国際シンポジウム」では、JAEF委員会とAESJ委員会のリーダーが共同で準備し、1件のキーノート講演、および4件の発表を含むセッションの運営を行った<sup>22)</sup>。また、両学会の連携活動の第2期として、日本地震工学会に「原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会」の設立を準備中であり、日本原子力学会に設立準備中の「原子力安全の論理検討会」(仮称)と連携して活動する予定である。さらに、地震工学会を幹事とする8学会により編纂が進められている「東日本大震災合同調査報告書」において、日本原子力学会と日本地震工学会が共同で「原子力編」の編集に当たることとなっている。これらはすべて、過去4年間に培われた両学会の協力の土壌の賜物である。

原子力の地震・津波安全課題において、分野間の認識のギャップを放置してよいはずはない。事故の危険は、放置されたギャップを突いて忍び寄る。地震も津波も、地盤からプラント全体まで、隙間なく(シームレスに)影響を及ぼすのであり、弱点を見逃して欲しくないことは、福島事故からも明らかである。

今後、種々の形で原子力安全に向けての多分野の協力が進むことを願ってやまない。

### 3. 原子力を取り巻く課題の整理の必要性

福島事故は多分野にわたる多様な課題を提起している。理学、工学、経済、社会、エネルギー政策、世界との関わり、等々、さまざまな分野において多くの課題、それも相互関連性が強く、それぞれの分野の中の閉じた課題ではないことが重要である。福島事故後、1年半が経過した現在においても原子力界は落ち着いた状態となっておらず、多様な問題の所在の明確化と整理が必要である。一方で事故原因の究明がなされており、その結果を早く公開し、それを踏まえて、技術的課題と課題解決の道筋を明確にすることが必要であり、それらを着実に実施してゆくことが工学の役割であるとともに、原子力界の信頼回復への第一歩と考える。

## VIII. むすび

原子力発電への国民の不信の根底には、政治への不信とともに、科学技術への不信がある。原子力発電所の新規建設はおろか、休止原発の再稼働も不確定という中で、電力不足下の社会的不安定と、進行しつつある日本経済の疲弊という現実がある。その中でさまざまな変化が進みつつある。海外展開による産業構造の変容は急速である。国民の文化的視点(自然観、科学技術観、生活観)の変化は緩やかで多様であるが、確実に進んでいる。一方、この状況下で国のエネルギー政策の変革も緩慢ではあるがようやく進み始めている。

こうした状況の中で、著者らは、原子力エネルギーの

意義を前提として本論を執筆した。温室効果ガスを排出しない大規模電源としての原子力の意義は再認識されるべきである。ただし、福島事故を決して再発させないための技術ガバナンスの確立が前提であり、安全性が必要の上位規範であることを忘れてはならない。本論がそのために一石を投ずる役割を果たすことを念願するものである。

### —参考資料—

- 1) 亀田弘行：原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会報告—新潟県中越沖地震から東日本大震災へ—(平成20年10月～平成24年3月)、日本地震工学会誌、第16号、2012年3月、pp.73-76.
- 2) 日本地震工学会：原子力発電所の地震安全に関する地震工学分野の研究ロードマップ、原子力発電所の地震安全に関する調査委員会、第I部：2011.3、第II部：2011.10(合本).
- 3) 日本原子力学会：原子力発電所の“地震安全”に関する検討報告書—地震安全ロードマップ—、原子力発電所地震安全特別専門委員会、2012.2.
- 4) Ortwin Renn, “Risk Governance towards an Integrative Approach”, IRGC White Paper No.1, International Risk Governance Council, September 2005.
- 5) 原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について—、原子力災害対策本部、2011.6.  
([http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea\\_houkokusho.html](http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html))/英語版は([http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea\\_houkokusho\\_e.html](http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html))
- 6) 亀田弘行：原子力発電所の安全に関する地震工学的課題、日本地震工学会誌、第15号、東日本大震災特集号、2011年10月、pp.97-102.
- 7) 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針、原子力安全委員会、2006年9月。  
(<http://www.nsc.go.jp/taishinkojo/index.htm>)
- 8) Hiroyuki Kameda, “Engineering Agenda on Nuclear Safety from the 2011 Tohoku-Pacific Earthquake”, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March1-4, 2012, Tokyo, Japan, keynote presentation, pp.102-121.
- 9) An Approach to the Quantification of Seismic Margin in Nuclear Power Plant, Lawrence Livermore National Laboratory, prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR 4334, July 1985.
- 10) 日本原子力学会：原子力発電所の地震を起因とした確率的安全評価実施基準2007, AESJ-SC-P 006:2007, 2007.9.
- 11) 日本原子力学会：原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率的安全評価に関する実施基準2008(レベル2

- PSA 編) AESJ-SC-P 009:2008, 2009.3.
- 12) 日本原子力学会：原子力発電所の確率論的安全評価に関する実施基準2008(レベル3 PSA 編) AESJ-SC-P 010:2008, 2009.3.
- 13) 日本原子力学会：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, 2012.2.
- 14) Katsumi Ebisawa, Hiroyuki Kameda, and Mitsumasa Hirano, "Concept for Developing Seismic-Tsunami PSA Methodology considering Combination of Seismic and Tsunami Events at Multi-Units", Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March1-4, 2012, Tokyo, Japan, pp.1575-1585.
- 15) International Atomic Energy Agency, "Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants", IAEA Standard Series No. SSG-3, 2010./based on: International Atomic Energy Agency, "Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, 75-INSAG-3Rev.1", A report by the International Nuclear Safety Advisory Group, INSAG-12, 1999.
- 16) 原子力安全委員会安全目標専門部会：安全目標に関する調査審議状況の中間とりまとめ, 2003.12.
- 17) 原子力安全委員会安全目標専門部会：発電用軽水型原子炉施設の性能目標について—安全目標に対する性能目標について—, 2006.3.
- 18) 北村正晴：原子力リスクとヒューマンインタラクション, ヒューマンインタフェース学会誌, Vol.14, No.1, 2011.
- 19) 蛭沢勝三：軽水炉の確率論的安全評価(PSA)(6), 地震PSA, 日本原子力学会誌, Vol.48, No.9, pp.676-683, 2006.
- 20) 高田毅士：“耐震安全に係る分かり易い情報伝達の検討

(2)分かり易い情報伝達への技術説明学の適用, 日本原子力学会「2012年春の年会」, N 02, pp.628, 2012.3.

- 21) 蛭沢勝三：原子力施設の耐震設計と耐震安全評価—中越沖地震からの教訓—, エネルギーレビュー, 2010.5.
- 22) Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan, Keynote HA4-1 and Session A5(Damage of Nuclear Power Stations).

### 著者紹介



亀田弘行(かめだ・ひろゆき)

京都大学名誉教授

(専門分野/関心分野)地震工学, 地震・津波PRA, 耐津波工学, ライフライン地震工学, 防災科学技術情報基盤



高田毅士(たかだ・つよし)

東京大学

(専門分野/関心分野)耐震工学, リスク評価, 信頼性設計, 確率論的力学, 技術説明学



蛭沢勝三(えびさわ・かつみ)

原子力安全基盤機構

(専門分野/関心分野)地震・津波PRA, 原子力リスク評価, 原子力防災, 原子力リスクコミュニケーション



中村 晋(なかむら・すすむ)

日本大学

(専門分野/関心分野) 地震工学, 地震地盤工学/構造安全性評価, 耐震設計法, 防災

# 食品中放射性核種濃度の新たな規格基準

京都大学 原子炉実験所 高橋 知之

東日本大震災に起因する東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故直後に設定された食品中放射性核種濃度の暫定規制値に代わる新たな規格基準について、厚生労働省の薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会に設置された放射性物質対策部会において検討がなされ、2012年4月1日から新たな基準値が施行された。本稿では、新たな基準値の施行までの経緯と、基準値導出の考え方について概説する。

## I. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災に起因する東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故により、大量の放射性核種が大気及び海洋に放出された。この事故により、食品にも高濃度の放射性核種が蓄積する可能性があると考えられたことから、厚生労働省は、2011年3月17日に、原子力安全委員会の「原子力施設等の防災対策について」<sup>1)</sup>(以下「防災指針」という)の飲食物摂取制限の指標値を暫定規制値とし、これを上回る食品については、食品衛生法第6条第2号に基づき規制を行うことを各自治体に対して通知した<sup>2)</sup>。その後、暫定規制値に代わる新たな基準値について、厚生労働省の薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会に設置された放射性物質対策部会(以下「放射性物質対策部会」という)において検討がなされ、2012年4月1日から新たな基準値が施行された。本稿では、新たな基準値の施行までの経緯と、基準値導出の考え方について概説する。

## II. 防災指針における飲食物摂取制限に関する指標値の考え方

食品衛生法上の暫定規制値として用いられた、防災指針における飲食物摂取制限に関する指標値<sup>3)</sup>は、その防護対策をとるという判断の基礎となる線量レベル(以下「介入線量レベル」という)として、放射性ヨウ素については甲状腺等価線量で年間50mSv、放射性セシウム(放射性ストロンチウムの寄与を含む)については実効線量で年間5mSvとしている。そして、この介入線量レベルに相当する食品中放射性核種濃度(以下「誘導介入濃度」という)を導出し、指標値として設定している。また、ウランや主なTRU核種についても指標値が定められている。

このうち、放射性セシウムの誘導介入濃度の導出においては、 $^{88}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ を評価対象核種として考慮している。評価の際の核種組成は、 $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ をチェルノブイル原子力発電所事故における地表空气中濃度比等から0.1と想定し、 $^{88}\text{Sr}/^{90}\text{Sr}$ 及び $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ は軽水炉における燃料の燃焼度が30,000 MWd/tの場合の代表的な生成量の割合を用いている。また、食品を「飲料水」、「牛乳・乳製品」、「野菜類」、「穀類」、「肉・卵・魚・その他」の5つのカテゴリーに分類し、それぞれに年間1 mSvを割り当てている。ここで、年間平均濃度とピーク濃度の比として0.5を用いている。年齢区分は成人、幼児、乳児の3段階として、それぞれの年齢区分について評価を行っている。「野菜類」、「穀類」及び「肉・卵・魚・その他」については、誘導介入濃度が最も低い「野菜類」同一の値に統一している。この結果、放射性セシウムの飲食物摂取制限の指標値は、「飲料水」及び「牛乳・乳製品」が200 Bq/kg、「野菜類」、「穀類」及び「肉・卵・魚・その他」が500 Bq/kgとされている。

食品安全基本法では、食品の安全性の確保に関する施策の策定に当たっては食品健康影響評価が行われなければならないとされている。ただし、3月17日に行われた暫定規制値の設定は、「人の健康に悪影響が及ぶことを防止し、又は抑制するため緊急を要する場合で、あらかじめ食品健康影響評価を行ういとまがないとき」であるとして、食品安全委員会による食品健康影響評価を受けずに定められた。よって、通知後の3月20日に、厚生労働大臣より、食品安全委員会委員長に対して食品健康影響評価の要請がなされ、食品安全委員会委員長は、3月29日に「放射性物質に関する緊急とりまとめ」を厚生労働大臣に対し提示した。このとりまとめでは、放射性ヨウ素及び放射性セシウムについて、「食品由来の放射線暴露を防ぐ上で相当な安全性を見込んだものと考えられた」とし、「今後リスク管理側において、必要に応じた適切な検討がなされるべき」とした。また、「継続して食品健康影響評価を行う必要がある」とした。

*New Standard Limits for Radionuclides in Foods:*  
Tomoyuki TAKAHASHI.

(2012年 5月8日 受理)

なお、4月4日に、高濃度の放射性ヨウ素が魚介類中から検出された。魚介類の放射性ヨウ素濃度は、防災指針において指標値が示されていないため、この時点では規制値が設定されていなかった。このため、厚生労働省は、4月5日に、魚介類中の放射性ヨウ素について、野菜類と同じ2,000 Bq/kgを暫定規制値として適用することとした。

4月8日には第1回目の放射性物質対策部会が開催され、暫定規制値を当面維持すべきであるとし、また、今後の規制値の検討に向けて、各種のデータを継続的に分析・評価する体制を構築することが必要であるとした。

### Ⅲ. 規格基準の設定の考え方<sup>3)</sup>

前述したように、新たな基準値は主として放射性物質対策部会で検討された。なお、新たな基準値は食品衛生法第11条に基づく基準とされた。この新しい基準値(以下「規格基準」という)の考え方について以下に概説する。

#### 1. 介入線量レベル

食品安全委員会は、10月27日に、食品中に含まれる放射性物質に関する食品健康影響評価書を厚生労働大臣へ答申した<sup>4)</sup>。この主な内容は以下の通りである。

- ・食品健康影響評価として、生涯における追加の累積の実効線量がおおよそ100mSv以上で放射線による健康影響の可能性がある
- ・そのうち、小児の期間については、感受性が成人より高い可能性(甲状腺がんや白血病)がある
- ・100mSv未滿の健康影響について言及することは現在得られている知見からは困難である

また、これらを受けて「今後のリスク管理は、評価結果が生涯の追加の累積線量で示されていることを考慮し、食品からの放射性物質の検出状況、日本人の食品摂取の実態等を踏まえて行うべき」とした。なお、この値はあくまで食品のみから追加的な被ばくを受けたことを前提としている。また、この値は、食品からの被ばくを軽減するための行政上の規制値、すなわち介入線量レベルではなく、放射性物質を含む食品の摂取に関するモニタリングデータに基づく追加的な実際の被ばく線量について適用されるものとしている。

この食品安全委員会の答申を受けて、10月28日に、厚生労働大臣より、新たな基準値の設定の基本的考え方として、放射性セシウムについて食品から許容することのできる線量を、2012年4月を目前に、年間5mSvから年間1mSvに引き下げるとすることが示された。

放射性物質対策部会では既にモニタリング結果に基づいて預託実効線量を推定しており、その結果、食品からの実際の被ばく線量は、中央値の濃度の食品を継続摂取した場合の推計(決定論的方法)で、預託実効線量が年間0.1mSv程度であり、また安全側の想定として、90パー

セントイルの濃度(低い方から数えて90%の濃度)の食品を摂取した場合でも年間0.2mSv程度と推計され、十分に低いレベルにあると考えられた。しかし、合理的に達成できる限り線量を低く保つという考えに立ち、より一層、国民の安全・安心を確保する観点と、食品の国際基準を作る政府間組織であるコーデックス委員会が、介入を行う必要がない「介入免除レベル」として、年間1mSvを採用していることから、介入線量レベルを年間1mSvに引き下げることが妥当と判断した。

#### 2. 規制対象核種

規格基準の設定における規制対象核種は、この基準が事故から1年以上経過した2012年4月以降の長期的な状況に対応するものであることから、比較的半減期が長く、長期的な影響を考慮する必要がある放射性核種とすべきであると考え、原子力安全・保安院が放出量の試算値<sup>5)</sup>を公表している核種のうち、半減期が1年以上の核種について考慮することとした。すなわち、<sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>106</sup>Ru, <sup>238</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Puが対象核種となる。このうち、放射性セシウム以外の核種については、測定に時間がかかること等を考慮すると、それぞれに規制値を設けて食品中濃度をモニタリングすることは現実的ではないため、これらの核種濃度と放射性セシウム濃度(<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csの濃度の合算値)の比を推定することによって、これらの核種による線量も合算した上で介入線量レベルである年間1mSvを超えないように基準値を設定することとした。

なお、半減期が約8日の<sup>131</sup>Iは2011年7月15日以降に食品から検出された報告はないことから、規制の対象とはしないこととした。また、本評価で対象としていない核種については、線量に対する寄与は小さいと考えられ、現時点において基準値設定の必要はないと判断した。

#### 3. 食品中放射性核種濃度比の推定

介入線量レベルに相当する食品中濃度限度値を導出するためには、食品中における放射性セシウム以外の核種の、放射性セシウムに対する比を推定する必要がある。原子炉施設から大気中に放出された放射性核種が農作物に移行する経路は、事故直後においては、大気から農作物に直接放射性核種が沈着することに起因する「直接沈着経路」が支配的である。なお、この直接沈着経路には、放射性核種が葉面や樹木に沈着して植物体内に取り込まれた後、可食部に転流する経路も含まれる。これに対し、原子炉施設からの放出がほぼ収束し、大気からの沈着量が減少した時点では、耕作地土壌に沈着した放射性核種が、根を通して植物体内に吸収され、可食部に移行する「経根吸収経路」が支配的となる。長期的な観点からは、この経根吸収経路を評価することが重要となる。

畜産物については、農作物と同様に、直接沈着経路あ

るいは経根吸収経路で牧草や飼料作物に放射性核種が移行し、それを家畜が飼料として摂取することにより、その家畜によって生産される畜産物に放射性核種が移行する。

河川や湖沼等の淡水系への放射性核種の移行は、事故直後に大気から河川や湖沼水へ直接沈着する経路や、その集水域に沈着した放射性核種が流入する経路が考えられる。これらの経路によって淡水に移行した放射性核種は、その河川や湖沼中で生育する淡水生物に吸収される。

また、海産物については、事故に対する応急処置等によって施設内で発生した排水が直接海水中に放出された放射性核種や、大気中に放出された放射性核種が海洋側に拡散して海面に沈着したことに起因して海水中に移行し、その海水あるいは海底土中に生育する海産物に吸収される経路が考えられる。

この規格基準が事故から1年以上経過した長期的な状況に対応するものであることから、農作物(飼料作物を含む)に対する放射性核種の移行経路は、土壌からの経根吸収経路が支配的であると考えられる。よって、農作物中の核種濃度比は、土壌中核種濃度比に土壌-農作物移行係数比を乗じることによって推定することができる。この土壌中核種濃度比は、文部科学省が作成した放射線量等マップ<sup>6)</sup>において土壌中の濃度比が得られている核種については、セシウムに対する濃度比を安全側に丸めた値を用い、濃度比が得られない場合は原子力安全・保安院の放出量試算値の比をあわせて用いることによって推定した。また、飲料水及び淡水産物の核種濃度比を推定するために用いられる淡水中核種濃度比は、放射線量等マップ<sup>6)</sup>において実測値が得られている<sup>90</sup>Sr/<sup>137</sup>Csについてはその核種濃度比を安全側に丸めた値を用い、その他の核種は土壌中濃度比の推定値と固液分配係数比から推定した。なお、これらの評価には、環境移行パラメータとして、土壌から農作物(飼料作物を含む)への移行係数、飼料から畜産物への移行係数、淡水から淡水産物への移行係数、固液分配係数が用いられるが、これらのパラメータ値は、わが国において取得されたデータとIAEAレポートに基づき、他の核種の放射性セシウムに対する濃度比が過小評価とならないように、安全側の値、すなわち他の核種の濃度が高く評価される値を選択した。

ただし、海産物に関する放射性核種濃度比は、発電所サイトから直接海洋に放出された核種の量や組成に関する情報が少なく、また、陸域のように詳細な環境モニタリングデータを用いた評価は困難であることから、他の放射性核種による線量と、放射性セシウムによる線量の寄与が等量である、すなわち総線量は放射性セシウムによる線量の2倍であるとして評価を実施した。

#### 4. 食品区分

食品区分は「飲料水」、「乳児用食品」、「牛乳」及びそれ

以外の「一般食品」の4区分とした。乳児用食品及び牛乳を別区分としたのは、食品安全委員会の「小児の期間については、感受性が成人より高い可能性」の指摘を考慮したことによる。また一般食品に細かい区分を設けなかったのは、個人の食習慣の違いの影響を最小限にすること、国民によってわかりやすい規制となること、コーデックス委員会などの国際的な考え方と整合すること等による。

これらの区分の範囲についてもあわせて検討がなされ、例えば、茶については暫定規制値では茶葉の規制値として500Bq/kgとされていたが、規格基準では、製造、加工後、飲む状態で飲料水の基準値を適用するとした。また、一般食品のうち、原材料を乾燥し、通常水戻した状態で摂取する食品については、原材料の状態と実際に摂取する状態で一般食品の基準値を適用することが適当であるとした。

#### 5. 年齢区分等

暫定規制値の導出では年齢区分を3段階としているが、規格基準の設定では、年齢区分を「1歳未満」、「1～6歳」、「7～12歳」、「13～18歳」及び「19歳以上」に細分化し、「1歳未満」以外は男女の食品摂取量の差も考慮した。また妊婦についても別途区分し、合計10分類とした。

介入線量レベルに相当する放射性核種濃度(以下「限度値」という)の算出に用いる食品摂取量は、国民の平均値に関する調査結果を参照して設定した。なお、飲料水の摂取量はWHOのガイドラインを踏まえ、「1歳未満」では1L/日、それ以外は2L/日とした。

#### 6. 規格基準値の設定

まず、飲料水について、WHO飲料水水質ガイドラインにおける放射性セシウムのガイダンスレベルである10Bq/kgを規格基準値として適用することとした。このガイダンスレベルは十分保守的なものであり、ガイダンスレベルの超過は追加的な調査の契機となるものであって、必ずしもその水が安全でないことを示すものではなく、既存又は新規の飲料水供給における日常の正常な運転条件に適用される値であるとされている<sup>2)</sup>。

食品に割りあてられる年間線量は、この飲料水濃度に相当する線量(他の核種の寄与を含む)を介入線量レベルである年間1mSvから差し引くことによって求めた。この食品に割りあてられる年間線量と、食品中の放射性核種濃度比、各食品の年間摂取量、各核種の内部被ばく線量係数、流通する食品の汚染割合を用いて、食品の限度値を導出した。なお、流通する食品の汚染割合はモニタリング検査等から得られている実測値や、流通食品に輸入食品が多く含まれる実態から、50%であると仮定した。また、「牛乳」及び「乳児用食品」は同一の基準値とす

ることとし、流通する食品の全てが汚染されていたとしても影響がない値として、一般食品の2分の1の値を基準値とすることとした。食品中核種濃度比は放射性核種の物理的壊変を考慮して計算し、最も限度値が低くなる時点の値を求めた。

このような計算の結果、限度値が最も小さくなるのは、「13～18歳(男)」の120Bq/kg(ただし、数字3桁目は安全側に切り下げて表示)であった。この結果を踏まえ、2011年12月22日に開催された放射性物質対策部会は、放射性セシウムに対する規格基準案として、一般食品については導出された限度値の最小値を安全側に切り下げた100Bq/kg、乳児用食品及び牛乳については一般食品の基準値である100q/kgの2分の1である50Bq/kgとすることを了承した。また、新しい基準値への移行に際しては、市場に混乱が生じないように、一定の範囲で経過措置を執ることが必要とした。

なお、この新しい基準値に基づく放射性セシウムからの実際の被ばく線量の推定値は、中央値濃度を用いた場合は年間0.043mSv、90パーセントイル濃度を用いた場合は年間0.074mSvとなり、介入線量レベルに比べて十分に低い値となることを確認した。

新たな規格基準案は、12月27日に、厚生労働大臣から放射線審議会に諮問され、審議が行われた。放射線審議会は2012年2月16日に、この規格基準案について「放射線障害防止の技術的基準に関する法律に定める基本方針の観点から技術的基準として策定することは差し支えない」とした上で、「食品の基準値の適切な運用に際して、測定機器の整備やそれを扱う人材の確保・育成などの体制を整備することが重要である」と答申した<sup>7)</sup>。なお、この答申には、食品に起因するリスクは既に年間1mSvよりも十分小さくなっており、新たな規制値の設定が放射線防護の効果を大きく高める手段になるとは考えにくいこと、ステークホルダー(様々な観点から関係を有する者)等の意見を最大限に考慮すべきであること、規制値をわずかに上回った場合においても、そのリスクの上昇は僅かであることが認識されるべきであり、この認識を踏まえたリスクコミュニケーションを適切に行うことが重要であること、「乳児用食品」、「牛乳」について特別の規格基準値を設けなくても、放射線防護の観点においては子どもへの配慮は既に十分なされたものであると考えられること等の意見が付された。

また、2012年1月6日～2月4日にインターネットを通じてパブリックコメントが実施され、1,877通の意見が寄せられた。これらのうち、基準値をより厳しくすべきとの観点からの意見が1,449件、子どもにさらに配

慮した基準値にするべきとの観点からの意見が819件、新基準値案は厳しすぎるとの観点からの意見が55件であった<sup>2)</sup>。

これらを受けて、2月24日に食品衛生分科会と放射性物質対策部会の合同会議が開催され、規格基準案が原案通り了承され、4月1日から施行されることとなった。

#### IV. おわりに

規格基準値は2012年4月1日から施行され、いくつかの食品について、放射性セシウム濃度が100Bq/kgを超え、出荷等が規制されたことが報道されている。食品規制に関する国民の安全と安心を得るためには、検査体制の更なる充実や、検査結果に関する迅速かつ十分な情報提供、継続的な内部被ばく線量評価、食品への放射性核種の移行に関する調査研究、基準値の考え方の周知等を今後更に進めることが重要である。

#### —参考資料—

- 1) 原子力安全委員会, 原子力施設等の防災対策について, 原子力安全委員会(2008年最終改訂).
- 2) <http://www.mhlw.go.jp>. Accessed 6 May 2012.
- 3) 原子力安全委員会原子力発電所等周辺防災対策専門部会環境ワーキンググループ, 飲食物摂取制限に関する指標について, 原子力安全委員会, (1998).
- 4) 食品安全委員会, 評価書 食品中に含まれる放射性物質, 食品安全委員会, (2011).
- 5) 原子力安全・保安院, 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機・2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価について(平成23年6月6日(10月20日修正)), (2011).
- 6) <http://radioactivity.mext.go.jp/ja>, Accessed 6 May 2012.
- 7) 放射線審議会, 乳及び乳製品の成分規格等に関する省令(昭和26年厚生省令第52号)の一部を改正する省令及び食品, 添加物等の規格基準(昭和34年厚生省告示第370号)の一部を改正する件について(答申), (2012).

#### 著者紹介



高橋知之(たかはし・ともゆき)  
京都大学 原子炉実験所  
(専門分野)放射線安全管理工学, 原子力施設  
の環境影響評価

# 福島原発事故以降、首都圏住民と原子力学会員の原子力に対する認識ギャップはようになったのか？

東京大学 木村 浩

日本原子力学会「マスメディア報道と原子力世論に関するデータベース構築と拡充」特別専門委員会は、2007年から継続的に、首都圏住民と原子力学会員を対象として、原子力に対する意識調査を実施してきた。本稿ではその調査結果の中から、首都圏住民と原子力学会員との認識のギャップが福島第一原子力発電所事故の前後でどのように変化したのかを紹介する。

## I. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災により、東海第二、福島第一、福島第二、女川、東通の各原子力発電所及び日本原燃六ヶ所原子力施設が被害を受けた。特に福島第一原子力発電所の事故(以降、福島原発事故)は広範な被害を引き起こし、これによって人々の原子力に対する意識が大きく変わったと予想される。同時に、原子力の専門家にとっても大きな意識の変化をもたらすきっかけとなっただろう。

日本原子力学会「マスメディア報道と原子力世論に関するデータベース構築と拡充」特別専門委員会(マスメディア等委員会)は、首都圏住民と原子力学会員を対象に、2007年から原子力に対する継続的な意識調査を実施してきた。そして、福島原発事故からおよそ1年後の2012年1月にも調査を実施している。本稿では、これらの調査結果の中から、首都圏住民と原子力学会員との認識ギャップに着目して、福島第一原子力発電所事故の前後でこれがどのように変化したのかを紹介する。そして、彼らが原子力学会に期待することを示し、今後の原子力と社会との関係性を考えたとき、原子力学会の役割とは何であるのかを考える。

## II. 調査の実施

社会と原子力との関係性を論じるために、市民の原子力に対する認識を測ろうとする調査や研究は数多く行われてきた。そして、これらの調査や研究から、原子力に関する有用性や不安感、信頼などが重要な心理的要因となることがわかってきた<sup>1)</sup>。また、原子力が社会に受け入れられるか否かについて論じる際には、専門家と非専

門家との認識ギャップも重要な論点となる。

そこで、マスメディア等委員会では、これらの心理的要因を測るための質問を組み込んだ調査票を作成し、一般の人々として首都圏住民と、専門家として原子力学会員を対象に、継続的な調査を実施し、経年的な意識の変化と専門家-非専門家間の認識ギャップを測定している。この「エネルギーと原子力に関するアンケート」調査は2007年1月から始まり、現在までに5回の首都圏住民調査と6回の学会員調査を実施してきた。第1表は、今までに実施した調査の概要を示している。

本稿では、これらの調査のうち、首都圏住民と原子力学会員に対して同時期に実施している2008年12月以降の調査(第2～5回首都圏住民調査・第3～6回学会員調査)を取りあげて、首都圏住民と原子力学会員との原子力に対する認識ギャップを示してゆく<sup>2)</sup>。

第1表 今までに実施した調査の概要

	首都圏住民調査		学会員調査	
対象	首都圏30 km 圏内住民		日本原子力学会員	
方法	割り当て留め置き法		1,400名を無作為抽出し、郵送法	
実施時期	第1回	2007年5月	第1回	2007年1月
	第2回	2008年12月	第2回	2008年1月
	第3回	2010年1月	第3回	2008年12月
	第4回	2011年1月	第4回	2010年1月
	第5回	2012年1月	第5回	2011年1月
	第6回		第6回	2012年1月
回収数 (回収率)	500		第1回	559(39.9%)
			第2回	591(42.2%)
			第3回	611(43.6%)
			第4回	625(44.6%)
			第5回	624(44.6%)
			第6回	611(43.6%)

*The Perception Gap of Nuclear Energy between Public and Experts after the Fukushima Nuclear Power Plants' Accident* : Hiroshi KIMURA.

(2012年 7月8日 受理)

### Ⅲ. 原子力に対する認識

本章では、首都圏住民および原子力学会員における福島原発事故前後での原子力に対する意識の変化を紹介する。最初に、一般的な関心事の中での原子力の位置づけを示したのち、原子力の社会的受容性を判断する心理的要因として大きな影響を与えと考えられる「原子力の利用・有用性」「安心・安全・信頼」に注目して論ずる。

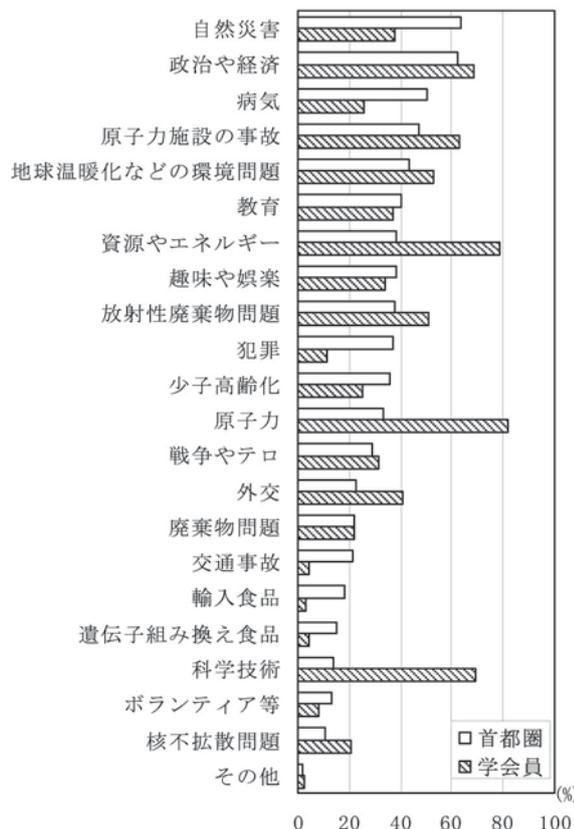
#### 1. 社会全般の事柄に対する関心

第1図に、2012年1月調査の首都圏住民と原子力学会員の社会全般の事柄に対する関心の程度を示す。

2012年1月調査において、首都圏住民が関心を持っている事柄として、「自然災害」「政治や経済」「病気」「原子力施設の事故」「地球温暖化などの環境問題」などがあげられる。スペースの関係上、福島原発事故以前の調査結果を示せないが、その変化の概要を述べると、特に「原子力施設の事故」については、福島原発事故後に関心が高まった。また、「自然災害」は以前から大きな関心を持つ項目ではあったが、2012年1月調査はさらに関心が高まっている。また、「放射性廃棄物」「原子力」に関する関心も大きく上昇している。

一方、原子力学会員が関心を持っている事柄として、「原子力」「資源やエネルギー」「科学技術」「政治や経済」

設問：以下のような事柄のうち、あなたが普段から関心を持っている事柄はどれですか。（複数選択）



第1図 社会全般の事柄に対する関心(2012年1月)

「原子力施設の事故」「地球温暖化などの環境問題」「放射性廃棄物問題」があげられる。福島原発事故以前と比べると、「政治や経済」「原子力施設の事故」「自然災害」で関心の上昇が見られる。

このように福島原発事故前後では、首都圏住民と原子力学会員にある程度の共通変化が見られる。これには東日本大震災と、それに引き続いた福島原発事故、さらには政治的混乱が影響を及ぼしていると考えられる。

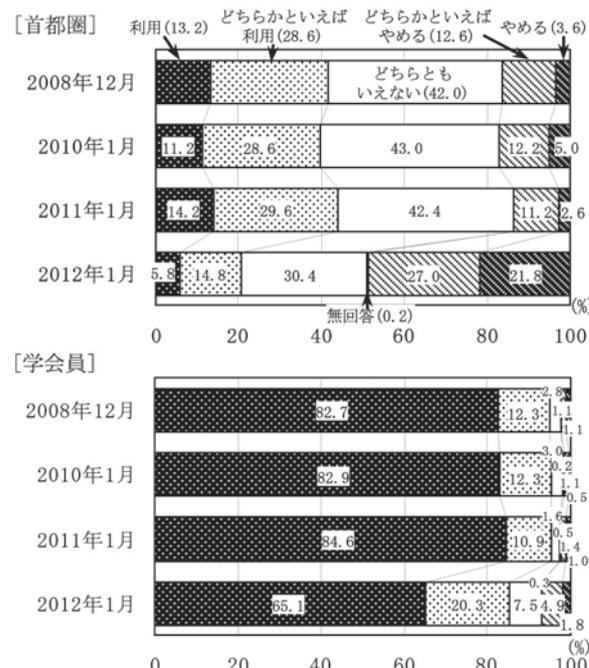
さて、2012年1月調査に戻って、首都圏住民と原子力学会員との関心のギャップを見よう。原子力学会員と比べると、首都圏住民は「原子力」「科学技術」に加えて、「資源やエネルギー」に関する関心がそれほど大きくないことが指摘できる。一方、原子力学会員は「病気」「犯罪」「交通事故」など個人的なリスクに関する関心が低い。首都圏住民と原子力学会員の社会的なリアリティの差を示すものであろう。

#### 2. 原子力の利用・有用性

第2図に福島原発事故前後における首都圏住民と原子力学会員の原子力発電の利用に関する意見を、第3図に原子力発電の代替可能性に関する意見を、第4図に20年後に発電量の最も多いと思われる電源の予測を、それぞれ示す。これらからわかることを以下に述べる。

まず、首都圏住民の意見について整理する。福島原発事故後の首都圏住民の回答では、それ以前の調査と比べて、原子力発電の「利用」の意見が減少し、「廃止」の意見が大きく増加した。また、判断を留保している中間層も多い(利用回答20.6%, 廃止回答48.8%, 中間回答30.4

設問：あなたは、今後、原子力発電を利用してゆくべきだと考えますか、それともやめるべきだと考えますか。



第2図 原子力発電の利用

%)。そして、例えば第3図のように、原子力発電には代替電源があるという認識が大きくなったほか、原子力発電の地球温暖化に対する抑止力、再処理によるエネルギー確保など、原子力発電の個別具体的な有用性に関しても認識が減少している。

これに関連して、2012年1月調査では、今まで以上に新エネルギーへの期待が増大した。実際に、20年後に発電量をもっとも多い電源として、新エネルギーによる発電をあげる人が半数を超えている(57.6%)。

一方、原子力学会員においては、福島原発事故後も、大勢は原子力発電の「利用」の意見であり、そして、原子

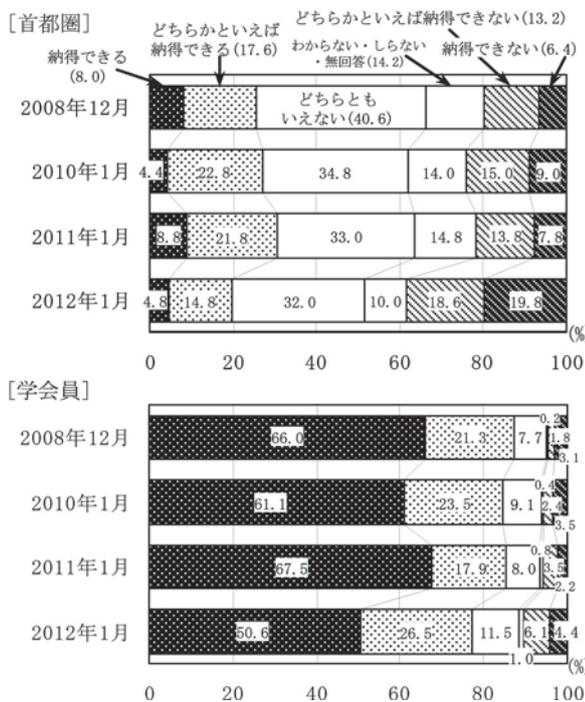
力発電の有用性を認めている。しかし、以前までと比較するとその割合が減少している。また、判断を留保する中間層が7.5%、「廃止」の認識が6.7%となり、わずかではあるが増加していることがわかる。原子力学会員の中にもこのような変化が現れていることは興味深い。

原子力の代替可能性について、福島原発事故後はその認識が若干減少している。また、20年後における主力電源としては、以前は原子力発電という意見が多かったが、2012年1月調査では火力発電との意見が増えている。

首都圏住民と原子力学会員を比較すると、原子力発電に対する利用-廃止の意見の中にもともとあったギャップが、福島原発事故後はさらに大きくなったといえる。

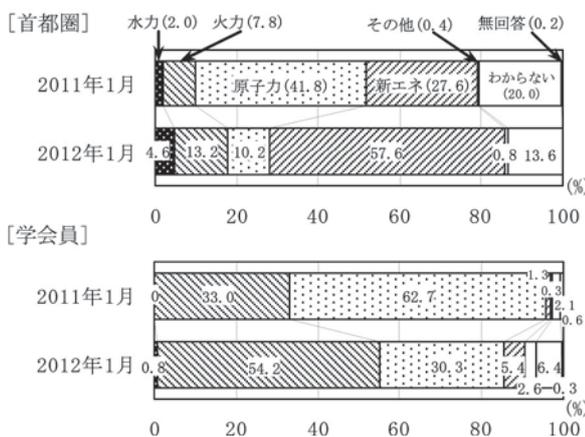
また、2012年1月調査では、20年後における最も発電量の多い電源の予測として、原子力発電をあげる意見が減ったことは、首都圏住民と原子力学会員で共通している。しかし、代替エネルギーの有無、将来のエネルギーについては大きなギャップが存在し、首都圏住民は新エネルギーに期待する一方、原子力学会員は原子力発電を代替できるのは火力発電であると考えている。

設問：日本での原子力発電による現在の発電量を考えると、近い将来に原子力発電に代わる発電方法はない。



第3図 原子力発電の代替可能性

設問：あなたは、20年後の日本では、発電量の最も多いのはどの発電だと思いますか。



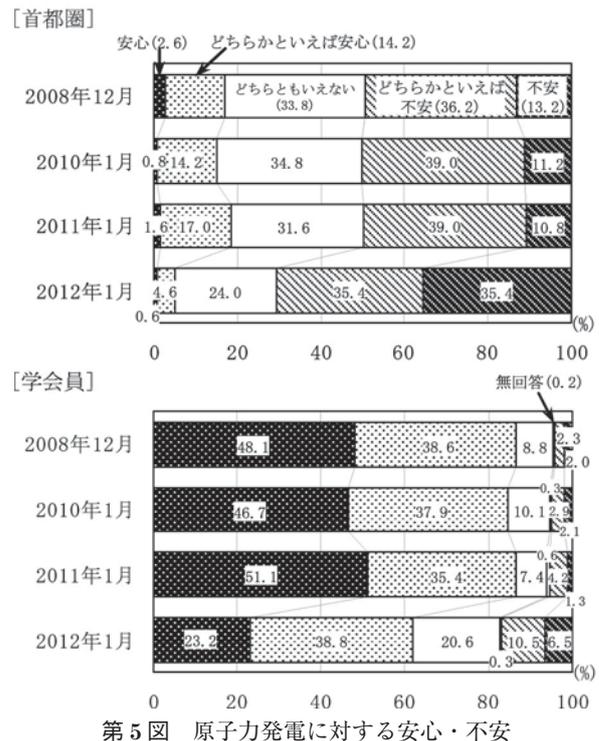
第4図 20年後における発電量の最も多い電源の予測  
※同設問は2011年1月調査以降に組み入れた。

### 3. 安心・安全・信頼

第5図に、福島原発事故前後における首都圏住民と原子力学会員の原子力発電への安心-不安の変化を示す。

原子力発電の利用に対する安心-不安について、福島原発事故以前でも首都圏住民のおよそ半数が不安との意見であった。そして、2012年1月調査では、70.8%が不

設問：あなたは原子力発電の利用について、安心ですか、それとも不安ですか。



第5図 原子力発電に対する安心・不安

安との意見を示しており、福島原発事故が首都圏住民に不安感を高めたといえる。ここでは示していないが、具体的な安全性に関する質問項目においても、例えば長期間運転している発電所の安全性低下や、地震に対する原子力発電所の危険性という認識は、福島原発事故以前も多くの人が持っていたが、2012年の調査ではさらに多くの人がその認識をもつようになった。福島原発事故以前まで具体的な事柄に対する安全-危険の判断を留保していた中間層が、危険側の認識に変わったと思われる。

原子力学会員においても、福島原発事故以前と比べると、安心という意見が減り、およそ6割にとどまった。その他、長期間運転している発電所の安全性低下に関しても、福島原発以前の調査ではこれを否定する者が多かったが、2012年1月調査はその割合が逆転した。また、地震に対して原子力発電所は危険という認識に対して否定的だが、2012年1月調査はその程度が減少した。とはいえ、首都圏住民と原子力学会員の意識には、依然大きなギャップが存在する。

ところで、第6図上部には、福島原発事故の予見性についての調査結果を示した。これをみると、福島原発事故の予見性に関して、首都圏住民は福島原発事故のよう

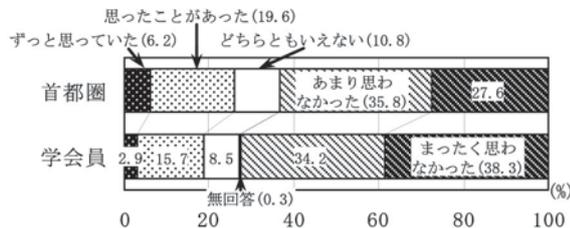
な事故が起こると思っていた人より、思っていなかった人のほうが多いことがわかる(思っていた：25.8%・思っていなかった：63.4%)。同様の傾向は原子力学会員にも見られ、この傾向は原子力学会員のほうが強い(思っていた：18.6%・思っていなかった：72.5%)。

ここで、福島原発事故以前の調査における関連項目(100年間の原子力発電施設からの放射能漏れによる一般人死亡発生の可能性)の結果を第6図下部に併せて示した。これによると、首都圏住民はこのような事故が起こるかと考えていた者が多い。そして、この事故発生を予測する回答者の割合は、福島原発事故が起こると思っていた回答者の割合よりも多いことがわかる。これは、福島原発事故以前には、原子力発電所の事故に対して現実感を持ってなく、漠然とした不安感の一環としてのイメージに基づいて回答していたが、2012年1月調査では福島原発事故を経験し、事故に対するイメージが具体的になった、すなわち、福島原発事故は、以前に想像していた事故イメージ以上のインパクトを持っていたため、2012年1月調査では、「思っていなかった」側の回答が増えたものと推測される。

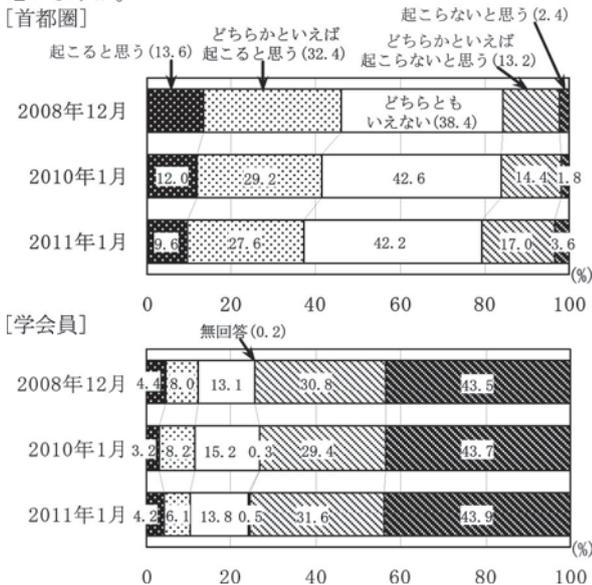
原子力学会員についても、福島原発事故は起こるとは思っていなかったという回答が多い。福島原発事故は、首都圏住民のみならず、原子力学会員にとっても驚くべき出来事であったのだ。

第7図には、原子力に携わる人たちの安全確保の意識や努力を信頼できるかどうかについての認識を示す。2012年1月調査では、首都圏住民において「信頼できる」

設問：東日本大震災が起こる前に、福島第一原子力発電所の事故のような事故が起こると思っていましたか、それとも思いませんでしたか。

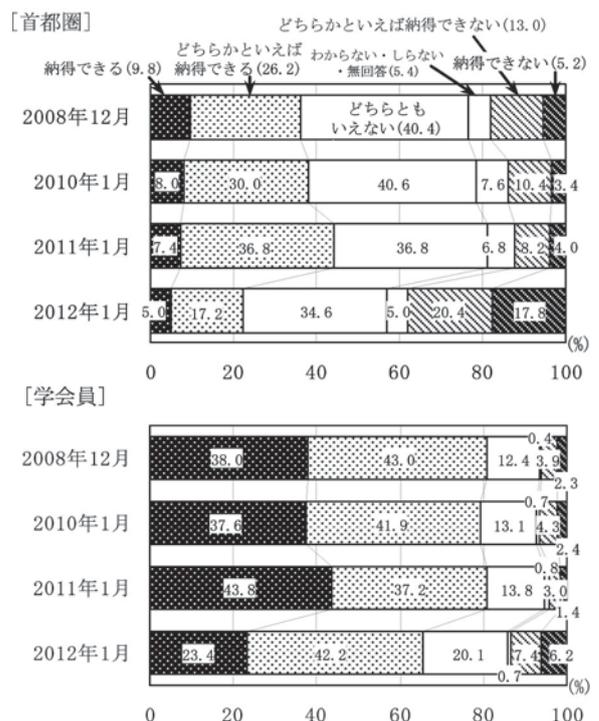


(参考) あなたは、日本で今後100年の間に、原子力発電施設から放射性物質が敷地外に漏れて、一般の人びとが死亡するような事故が起こると思いますか、それとも起こらないと思いますか。



第6図 大規模な原発事故の可能性

設問：原子力に携わる人たちの安全確保に対する意識や努力を信頼している。



第7図 原発の安全確保の意識や努力に対する信頼

の回答が減少し、「信頼できない」の回答が大きく増加した。それ以前の調査は徐々に信頼側に変化していたが、その傾向は急激に変化した。原子力学会員においては、福島原発事故以後も信頼側の回答が大勢を占めているものの、以前と比較すると、その割合は減少している。

#### 4. まとめ

ここまでの結果を簡単にまとめておこう。福島原発事故は、首都圏住民の原子力についての関心を喚起した。原子力発電の利用については懸念を示すようになり、不安感が増加した。そして、原子力業界に対して抱く不信感が大きくなった。

一方、原子力学会員については、福島原発事故前後で、大勢としては、その意識に大きな変化は見られず、結果として、首都圏住民との意識のギャップはやや増した。しかし、若干なりと原子力発電の廃止の意見や、原子力に対する不安感が増えたり、業界に対する信頼感が減少したりする動きが見られるようになっており、今後の動きを注意深く見守る必要がある。

### IV. 学会に期待すること

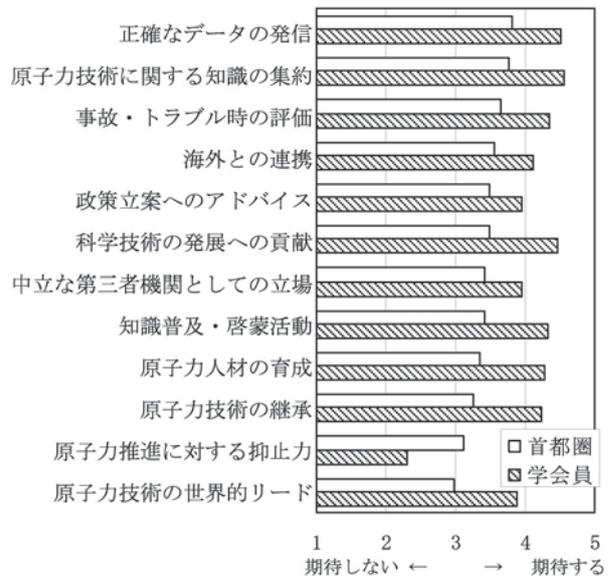
さて、ここまでに示してきた意識を踏まえて、原子力学会は今後どのような活動をしてゆけばよいのだろうか。ここでは、この問題を考えるうえで参考となる資料として、原子力学会に期待される役割についての意識を示しておこう。第8図に、首都圏住民および原子力学会員の結果が示されている。

首都圏住民は原子力学会に対して多様な役割を期待していることがわかる。その上位3つは「正確なデータの発信」「原子力技術に関する知識の集約」「事故・トラブル時の評価」である。そして、原子力学会員が期待している役割のうち、住民がそれほど期待していないものとして、「知識普及・啓蒙活動」「原子力人材の育成」「原子力技術の継承」があげられる。この結果をどう見ればよいのか。

福島原発事故を受けて、首都圏住民が原子力学会に期待する役割は、事故時の対応が可能となる体制の構築であるといえよう。しかし、原子力発電の有用性を低く感じるように変化したためか、長期的な役割は現時点では期待されていないように見受けられる。

原子力の将来は、現在まさに国の方針いかに委ねられており、それを予見することは難しい。しかし、それがどうなろうと、原子力技術の維持、人材の育成は長期間必要となる。原子力学会は、人々が求めているような適切な事故対応能力の確保はもちろんのこと、長期的視野にたって今やっておかなければならないことを、適切なメッセージにして人々に送り続ける必要があるのではないだろうか。

設問：以下のような事柄について、あなたは日本原子力学会に期待しますか。(逆転換算した5段階評価の平均値)



第8図 原子力学会に期待すること(2012年1月)

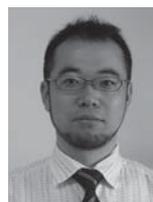
本報告は、日本原子力学会「マスメディア報道と原子力世論に関するデータベース構築と拡充」特別専門委員会が原子力安全基盤機構より受託をうけて、平成17~23年度に実施した「原子力に係る安全規制の意識等調査」等の結果を踏まえたものである。また、本調査データは日本原子力学会社会・環境部会のホームページより公開されている。本件に関する問い合わせは、上記ホームページをご覧ください。筆者(kimura@nuclear.jp)まで。

最後に、調査の検討段階から実施にいたるまで、土田昭司氏(関西大学)、篠田佳彦氏(若狭湾エネルギー研究センター)を始め、委員の方々に大変お世話になった。ここに謝意を表す。また、調査に回答くださった多くの方々、学会員の方々に感謝する。

#### —参考資料—

- 1) 例えば、下岡 浩，“原子力に対する公衆の態度決定構造”，日本原子力学会誌，35〔2〕，115(1993)。
- 2) 日本原子力学会，平成23年度「原子力に係る安全規制の意識等調査」報告書(原子力安全基盤機構の委託事業)，(2004)。

#### 著者紹介



木村 浩(きむら・ひろし)  
 東京大学  
 (専門分野)原子力や高レベル放射性廃棄物に関するリスク・コミュニケーションや社会制度設計

## 解説シリーズ

## 放射線治療・粒子線治療と日本における医学物理士教育

## 第2回 ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)

京都大学 原子炉実験所 小野 公二

低速中性子と原子核の反応を利用したがんの中性子捕捉療法は、1990年代における基礎研究と関連技術の進展に支えられ、21世紀に入って大きく飛躍した。世界初の中性子捕捉療法用の加速器中性子源も開発され、薬事承認を得るため治験開始の手続きが進行中である。これらには我が国における研究の成果が大きく貢献している。本稿では、特に京都大学原子炉実験所における基礎・臨床研究を踏まえつつホウ素中性子捕捉療法(BNCT)について解説する。

## I. 中性子捕捉療法の基礎

1. 核反応 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ を利用すると選択的細胞照射が可能である

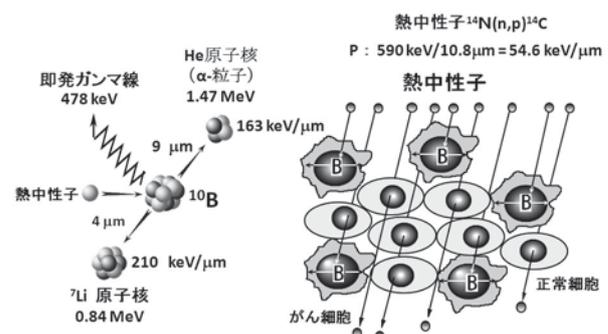
電荷を持たない中性子、特にエネルギーの低い熱中性子は原子核に捕獲されやすく、捕獲された原子核の分裂を誘発する。人体に熱中性子が照射されると、主に窒素-14原子核と $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ の反応を起こし、陽子を放出する。この確率(中性子捕獲断面積)は1.81barn( $10^{-24}\text{cm}^2$ )で、水素原子核などに比して桁違いに大きい。なお、水素原子核などとの反応で放出されるのはガンマ線である。ホウ素の安定同位体であるホウ素-10(天然存在比:19.9%)の場合、熱中性子との反応確率は3,595barnで、窒素-14原子核と比べて約2,000倍大きい。そして原子核は $\alpha$ 粒子と $^7\text{Li}$ 原子核に分裂する。これら粒子は細胞直径よりも短い $9\mu\text{m}$ と $4\mu\text{m}$ を走行し停止するので、反応が生じた細胞だけを破壊する。この反応を利用したのがBoron Neutron Capture Therapy(BNCT)で、アイデアは1936年にLockerによって提案された<sup>1)</sup>。

$\alpha$ 粒子と $^7\text{Li}$ 原子核が停止するまでに飛跡の周囲に与える $\mu\text{m}$ 当たりのエネルギー(LET)は各々163keV/ $\mu\text{m}$ 、210keV/ $\mu\text{m}$ で放医研の臨床使用炭素イオン線のLETをはるかにしのぐ。したがって生物効果も大きく、X線に抵抗性のがん細胞をも容易に破壊する。X線の細胞への効果は酸素の有無に大きく影響され、酸素がない場合はある場合に比べて等しい効果を得るには3倍の線

量が必要である。しかし、これらLETの高い粒子では酸素の有無に影響されない。がん組織には一般に低酸素状態の細胞が存在する。この点が正常組織と異なるがんの特徴でもあるが、そのためX線治療ではこの低酸素状態の細胞が再発の芽となると考えられている。ただ、考慮しておかねばならないのは $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ の陽子もLETが54.6 keV/ $\mu\text{m}$ でLETの高い放射線である点と、生体は単位体積当たり極めて多数の窒素-14原子を含むので、 $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ による線量の寄与もまた大きい点である。それは以下の線量(Gy)計算式からも分かる。

$$\begin{aligned} \text{線量} = & \{^{14}\text{N} \text{ 濃度(重量\%)} \times 6.78 + ^{10}\text{B} \text{ 濃度(ppm)} \\ & \times 7.431\} \times 10^{-14} \times \text{熱中性子フルエンス}(n/\text{cm}^2) \\ & + \text{熱外中性子線量} + \gamma \text{ 線量} \end{aligned}$$

$^{14}\text{N}$ の重量%として平均値2.4%を用いると、がんの $^{10}\text{B}$ 濃度が20ppm以上で、かつ、正常組織には $^{10}\text{B}$ が集積しないと仮定すると、がんは約10倍量の高LET放射線を受け、事実上のがん選択的照射が達成される(第1図)。画像で捕らえ得るがん病巣はもちろんのこと、捕らえられない微小ながん病巣をも周囲の正常細胞に損傷を与えずに破壊できる。



第1図 ホウ素中性子捕獲反応による選択的がん細胞破壊

*On the Frontiers of Radiation & BNCT Cancer Therapy and Medical Physicists Training*(2); *Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)*: Koji ONO.

(2012年 7月22日 受理)

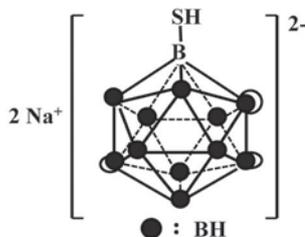
第1回 X線がん治療の現状, 課題, 展望

## 2. BNCTの成功には腫瘍集積性のあるホウ素化合物が重要

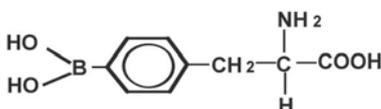
BNCTによるがん治療が成功するかどうかはホウ素化合物で決まる。世界初のBNCTは米国で1951年に膠芽腫(最も悪性度の高い脳腫瘍で5年生存率は通常5%以下)を対象に行われたが、結果は芳しくなかった。ホウ素化合物が選択的に病巣に集積しなかったのが理由とされた。そこで、ホウ素化合物の開発に多くの努力が払われることとなった。その結果、現在、臨床研究で使用可能なホウ素化合物はBorocaptate Sodium(BSH)とアミノ酸誘導体のpara-boronophenylalanine(BPA)の2種である。BSH(第2図(a))はホウ素原子12個を含むNa塩で水溶性が高い。主に悪性脳腫瘍に用いられ、1968年、畠中によって脳腫瘍のBNCTで用いられた<sup>2)</sup>。脳には血液脳関門があり、脳に不要な物質が脳組織へ浸透するのを妨げる関所機能があるが、膠芽腫ではこの関門が破綻している。BSHはこの破綻に乗じて膠芽腫に浸透し滞留する。

一方、BPA(第2図(b))はメラニンの出発物質であるチロシン類似のホウ素化合物で、これを臨床開発した三島は、当初、悪性黒色腫(黒子のがん)に特異的な化合物と考えていた。事実、悪性黒色腫では正常皮膚の3~5倍も集積する。1987年、三島による世界初の悪性黒色腫BNCTで使われた<sup>3)</sup>。

その後、黒色腫特異的集積性は否定され、様々ながんを集積することが分かった。その機序はがん細胞で活性が亢進しているアミノ酸トランスポーターを介しての取り込みである。がんは正常細胞よりも活発に分裂し、増殖している。そのために蛋白合成で原料となるアミノ酸を正常細胞以上に必要としている。BPAの集積はこうしたがんの特徴を利用している。ただ、固形のがんの中の全てのがん細胞が活発に分裂しているわけではない。多くのがんで50%以上のがん細胞は分裂・増殖を停止した休止期にある。そのため、BPAはそうしたがん細胞への効果が小さい弱点がある<sup>4)</sup>。がんの中の<sup>10</sup>Bの分布を画像解析技術で調べると、BPAでは分布に不均一があ



第2図(a) BSH(Borocaptate Sodium)



第2図(b) BPA(para-boronophenylalanine)

ることが分かっている。ただ、BPAの弱点である不均一な分布は集積機序の異なるBSHの併用で緩和できる。

長年にわたりがんを選択性良く、かつ高濃度で集積する理想的な化合物を求める努力がなされたが、人に投与されたもので両化合物を超える薬剤はまだ出現していない。現在、研究努力の多くはDrug Delivery System(DDS)技術でホウ素化合物を効率の良く選択的に腫瘍へ送達することに向けられている。一方、臨床で確立された手法でもって選択的な送達を図る試みもある。動脈塞栓術(がんを栄養している動脈を塞栓する技術)の応用、がんの栄養動脈からのホウ素化合物の注入などであり、既に多発の肝臓がん、頭頸部がんが試行され、点滴による全身投与では実現できない高いがんでのホウ素濃度と選択性が得られている。

## 3. 個別患者での治療の成功には患者ごとのBPAの集積性の事前検索が役立つ

ホウ素化合物のがん：正常組織集積比(Tumor/Normal tissue ratio:T/N)が事前に分かれば、効果が期待できる患者を選択してBNCTを実施できる。<sup>18</sup>Fで標識したBPAを用いたPETでがんと正常組織(血液など)の取り込み比をある程度の精度で予測することが可能である<sup>5)</sup>。<sup>18</sup>F-BPA PETの画像はMRI画像の造影陽性域とよく一致し、膠芽腫では、がん細胞の密集度の高い箇所では対側正常脳の約7倍の集積を示す症例も経験した。この場合、治療時の大量BPA投与でもT/N値が変わらず、かつ、ホウ素化合物は均一に分布すると仮定すると、がん細胞と隣接の正常脳細胞に与え得る生物学的X線等価線量(同じホウ素濃度でもがんと正常細胞への生物効果の差を勘案し、かつX線の効果に換算した線量)の比は8を超える。

T/N値の外にもう一つ重要な点はホウ素濃度である。先に述べたように、生体の単位体積当たりの窒素原子は極めて多い。したがって、仮にT/N値が大きくてもホウ素の絶対濃度が低ければ<sup>14</sup>N(*n, p*)<sup>14</sup>Cに由来する非選択的な陽子線量がホウ素由来線量の選択性を完全に滅殺する。前述したように、がん細胞に必要な<sup>10</sup>B濃度を20ppmとすると、1分子に1個の<sup>10</sup>Bを含むBPAでは細胞内のBPA濃度は2mMとなる。この高い濃度を達成するには、抗がん剤とは桁違いな量のホウ素化合物を投与する必要がある。それはホウ素化合物に著しい低毒性を要求する。高いがん選択性と極めて低毒性で大量投与が可能な性質を併せ持たねばならない点に新規ホウ素化合物開発の困難があり、BSHとBPAの登場以来、各々44年と25年が経過したにも関わらず、これらに優る薬剤が出現していないゆえんはここにある。

#### 4. Compound Biological Effectiveness (CBE) factor は便利な概念

BNCTの効果は $\alpha$ 粒子とLi原子核に由来するので、これら粒子のRBEが求まれば、後は組織中のホウ素濃度と熱中性子のフルエンスで線量が簡単に決まりそうに思えるが、実はそうではない。問題は特に正常組織の反応である。正常組織は複数の種類の細胞から構成されている。これら細胞で生じる反応の複合したものが正常組織の反応として出現する。しかし、各種の細胞が各々どのような割合で最終反応に寄与しているかは分かっていないし、X線なら全ての細胞が均等に受ける線量も、BNCTではホウ素化合物の集積が細胞種によって異なるので、たとえ正常組織の単位体積当たりのホウ素濃度が同じでも、組織の種類が異なると最終の反応は全く異なってくる。我々が通常知り得るのは単位体積当たりの平均化されたホウ素濃度でしかない。そこで、ホウ素が血中と等濃度で組織に均一分布すると仮定して線量を求め、この線量を基準に実用上のRBEを決めている。この実用上のRBEがCBE factorで、次式で表される。

$$\text{CBE factor} = \frac{\text{X-ray ED50} - (\text{Thermal beam component of ED50} \times \text{RBE})}{^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li component of ED50}}$$

CBE factorは、ホウ素化合物と組織の組み合わせごとに動物実験によって求められている。BSHとBPAでは、脳、皮膚、粘膜、肺、肝で値が得られている。皮膚と肝は日本人研究者によって決められた<sup>6,7)</sup>。

#### 5. BNCTには高いフルエンス率の中性子源が必要

腫瘍の深さにもよるが、腫瘍のホウ素濃度が70~80 ppmの場合、1時間程度で治療を完了するには体表面での中性子のフルエンス率は $5 \times 10^8 n/cm^2 \cdot s$ 以上でなければならず、この中性子フルエンス率は研究用原子炉でしか得られなかった。また、熱中性子では約3 mm深部でフルエンス率がピークとなった後、15~16 mmごとに半減する。そこで、深在性腫瘍では十分な中性子を最深部まで到達させることが難しいので、かつて、膠芽腫のBNCTでは開頭手術下に中性子を照射する術中照射が不可欠であった。現在はエネルギーのやや高い熱外中性子(0.6 eV~10 keV)を用いており、脳腫瘍のBNCTでも術中照射は不要である。熱外中性子は生体元素との核反応でエネルギーを失い熱中性子に変わるが、表面での熱中性子フルエンスはピーク(2~3 cm深部)の約1/3であり、皮膚の線量を大幅に低減できる。

1990年以降、我が国では、京都大学原子炉(KUR・5 MW)と日本原子力研究開発機構4号炉(JRR4・3.5 MW)が利用されてきたが、JRR4は昨年の東北地方太平洋沖地震以降、運転を休止している。

## II. BNCTの実際

### 1. 効果が期待できる症例の選択には<sup>18</sup>F-BPA PETがある程度役立つ

前に述べたように、効果を期待するには患者ごとのホウ素化合物集積のおおよそのT/Nを事前に把握する必要があり、BPA-BNCTでは<sup>18</sup>F-BPA PETがよく使われる。

### 2. 線量の表示には生物効果を勘案した生物学的X線等効果線量が使われる

BNCTの線量はホウ素濃度と中性子フルエンスから計算した物理線量に前述のCBE値を乗じた生物学的光子等価線量Gy-Eqで表示する。各組織のホウ素濃度は、即発ガンマ線分析あるいはICPによって測定した血中ホウ素濃度を基に、又、がんではそれに<sup>18</sup>F-BPA PETで調べたT/Bを乗じて推定する。中性子フルエンス分布の計算には米国オハイオ州立大学が開発し、研究用に提供しているSERAあるいは原子力研究開発機構が開発したJCDSを用いる。動物実験で得たCBE値は個体差が小さいので正常組織線量は信頼性が高い。片やがんではホウ素化合物分布の不均一が不可避であるので、血中ホウ素濃度とPETデータから計算されるがん線量は真のそれとは異なることを理解しておく必要がある。更にBSHではこうしたホウ素濃度を推定する検査法はまだ実現していない。一般にがんの制御の可否はがんに与えられた最低線量で決まるが、BNCTではそれをいかに決めればよいか未解明である。以上の理由から、正常組織の耐容線量で照射時間を決めるのが合理的であり、がんの線量は不確かさであるゆえに、誤解を避ける意味で、我々は極力使用しないようにしている。

### 3. BNCT実施の標準的な手順

BNCTの手順を膠芽腫の初回治療で行う場合を例に述べると、下記ようになる。

BSH(100mg/kg)とBPA(500mg/kg、果糖複合体として溶解)を、各々1および3時間で点滴投与する。BSHの投与は中性子照射の12時間前である。BPAは500mg/kgを最初の2時間は毎時200mg/kgで投与し、3時間目の1時間に100mg/kgを投与する。この投与では最後の1時間の血中ホウ素濃度が極めて安定しており、照射開始直前の血中濃度に基づいて精度よく照射時間を決定できる。

中性子フルエンス率は患部体表面に置いた金線の放射化量で実測する。膠芽腫のBNCTでは正常脳線量を $\leq 13$  Gy-Eq、皮膚線量を $\leq 10$  Gy-Eqに制限している。腫瘍(MRI画像上の造影陽性病変)の計算上の線量は $\geq 40$  Gy-Eqが目標であるが、多くが深部で線量不足になるため、最深部から脳表までを3層に分け、通常分割(2 Gy/f)でX線8 Gy, 16 Gy, 24 Gyを追加照射する。

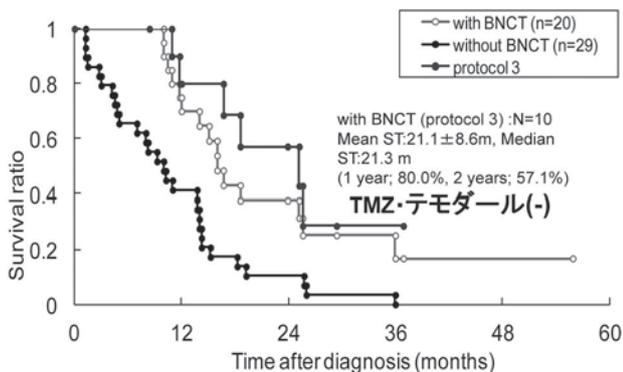
### Ⅲ. 実施例が示すがんへの選択的効果

#### 1. 悪性神経膠腫

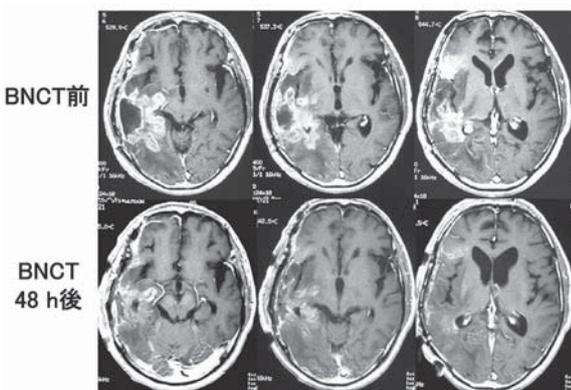
大阪医科大学脳神経外科との共同研究では、診断時からの生存期間中央値が17.3~23.0ヵ月に達している(第3図)<sup>8)</sup>。更に直近のデータによると2年生存率は50%を超える。

患者側バイアスを除くため、患者側の複数の予後因子を組み合わせたRPAクラス分類(RTOG提唱)に従い結果を解析すると、TMZ併用X線治療で報告されている成績と比較しても対応する全クラスでBNCTの方が良好であった。確定的な結論を得る目的で、現在、多施設共同臨床研究が実施されている。BNCTでは極めて大きい線量を1回で照射できる結果、照射後早期に腫瘍影の顕著な縮退、浮腫域の縮小が認められる特徴がある(第4図)。

生存率の上昇と生存期間の延長から、原発巣の制御は顕著に改善したと判断しているが、その一方で、脊髄等へ播種が顕在化した。2年以降の生存率の低下はこれに因るところが大きく、播種対策も今後の研究課題の一つである。



第3図 治療歴のない膠芽腫患者に対するBNCT (京大原子炉Gと大阪医大脳外科Gの共同研究)



第4図 BNCTによるGB(造影病変)の急激な縮小

#### 2. 再発頭頸部がん

標準治療後に再発した頭頸部がんは一般に有効な再治療がない。こうした症例にBNCTを試行したところ奏功率は>90%で、24%の長期生存率を得ている。制御が不可能な再発腫瘍でも腫瘍の完全消失を得た症例がある。巨大な腫瘍が左顔面の皮膚を破壊し、病巣からは血性滲出液が絶えない再発耳下腺がんが、2回に分割したBNCTと縮退が不良の耳介下後部の腫瘍への1年後の追加BNCTで完全に退縮した。一方、皮膚反応は軽度発赤までで、乾性落屑も生じなかった。BNCT後の手術を予定してBNCTを行った別症例では、旧のがん中心部は瘢痕のみであったが、同じ中性子の照射野内には健全な耳下腺の残存が認められ、効果のがん選択性が確認できた(川崎医大・栗飯原私信)。

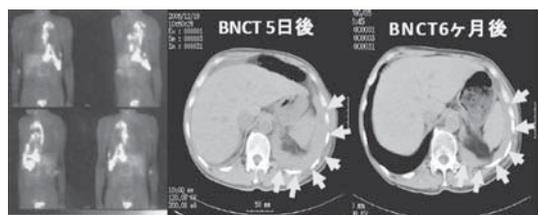
### Ⅳ. 今後の展望

#### 1. 一つの臓器全体を照射するBNCTの可能性

一つの臓器全体に広がったがんへの放射線治療は、がん細胞の放射線感受性が高い場合や逆に臓器の耐容線量(有害な反応を起こすことのない最大線量)が十分に高い場合にのみ可能である。特に画像で確認できるような病巣が存在する場合の適応は放射線感受性の高い胚芽腫、髄芽腫などに限定され、耐容線量が低い肝臓や肺のがんでは適応は困難である。しかし、BNCTの細胞選択的照射の特長を活かせばこうした臓器のがんにも適応できる可能性がある。

我々はラットで肝がんモデルを作成し、肝動脈にBSH溶液と油性造影剤リピドールを懸濁液にして注入したところ、数十倍のT/Nが得られた。 $\alpha$ オートラジオグラフィ上でのホウ素分布は病理組織標本上の腫瘍と見事に一致した。点滴投与でのホウ素濃度は正常肝の方が高いこと、BPAを点滴投与した場合のT/Nは通常3~5に留まると比較すると、TAEによるBSH閉じ込めは大変に有用で、2005年より多発肝臓がんへのBNCTを試みている<sup>9)</sup>。また、ホウ素化合物を封入した別種の塞栓物質(wow-emulsion)による研究、BSHに直接的なターゲティング能を与えるべく標識した薬剤開発など様々な試みがなされている。

胸膜全体に拡がる悪性胸膜中皮腫は形状が複雑であり、がんに接する正常肺の線量を耐容線量以下に抑えつつがんを治癒させるに十分な線量を照射することは高精度X線治療技術をもってしても難しい。がん細胞の胸腔内移植で作成した胸膜播種マウスを、ガンマ線、中性子線、BNCTで治療すると、BNCTでのみ重篤な肺障害なしに生存期間の延長が得られた。実際の胸膜中皮腫患者でも<sup>18</sup>F-BPA PETで腫瘍に選択性のある集積が認められたので、2005年12月、アスベストによる悪性胸膜中皮腫の患者に世界初のBNCTを施行し、BNCT後数日での胸部激痛の消失等、QOLの顕著な改善と腫瘍の



第5図 顕著な効果を示した悪性胸膜中皮腫例



第6図 BNCT用サイクロトロン中性子照射システム

縮小が確認できた(第5図)。

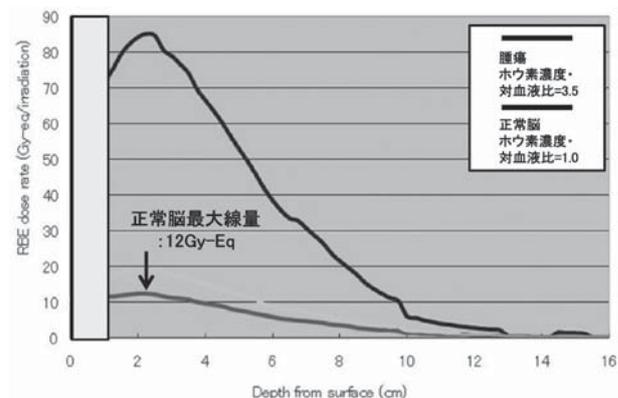
現在、多施設共同の悪性胸膜中皮腫に対する臨床研究がKURを使って進行中である。

## 2. 加速器中性子源開発の成功

原子炉は優れた中性子源であるが、規制や場所選択の不自由等によって臨床上の制約が非常に大きい。BNCTが承認がん治療へ発展するには、制約を受けない小型加速器中性子源が不可欠である。我々は住友重機械工業㈱と共同でサイクロトロン中性子源の開発に成功した(第6図)。

30 MeV, 1 mAの陽子がBe標的に衝突して発生する高速中性子を減速して熱中中性子とするBNCT用加速器中性子照射システムである。目標としたフルエンス率が得られビームの物理・生物特性試験も完了した。サイクロトロンとしては2 mAまでの加速を確認している。本システムの中中性子が体内で生む熱中中性子のフルエンス率は、最高の2~3 cm深部でKURの約1.7倍、5 cm深部では2倍である。臨床での照射時間の大幅な短縮が可能で、患者負担の軽減と照射精度の向上が期待できる。深部線量分布を平均的な成人脳をモデルに正常脳線量 $\leq 12$  Gy-Eqの条件で計算すると、大脳正中部に相当する8 cm深部の膠芽腫は計算上、20 Gy-Eqの照射を受けることになる(第7図)。

一方、KURでは同条件で15 Gy-Eqである。効果の向上を期待させる<sup>10)</sup>。現状の原子炉BNCTとは異なり年間利用時間の大幅な増加によって2~3回の分割



第7図 腫瘍と正常脳の深部線量分布

BNCTも可能で、より安全で効果的なBNCTが実現できる。

BNCTはがん細胞選択的照射の特長によってがん放射線治療を別次元に押し上げ、20世紀のがん放射線治療を支配してきたパラダイムを革新する可能性を持っている。

### —参考資料—

- 1) G. L. Locher, *Am. J. Roentgenol.*, **36**, 1(1936).
- 2) H. Hatanaka, *et al.*, *Nippon Acta Neuroradiol.*, **9**, 37-40 (1968).
- 3) Y. Mishima, *et al.*, *Lancet*, **12**, 388-389(1989).
- 4) K. Ono, *et al.*, *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, **34**(5), 1081-1086(1996).
- 5) Y. Imahori, *et al.*, *Clin. Cancer Res.*, **4**, 1833-1841(1998).
- 6) J. Hiratsuka, *et al.*, *Radiat. Res.*, **128**, 186-191(1991).
- 7) M. Suzuki, *et al.*, *Jpn. J. Cancer Res.*, **91**, 1058-1064 (2000).
- 8) S. Kawabata, *et al.*, *J. Radiat. Res.*, **50**, 51-60(2009).
- 9) M. Suzuki, *et al.*, *Jpn. J. Clin. Oncol.*, **37**, 376-381 (2007).
- 10) H. Tanaka, *et al.*, *Appl. Radiat. Isot.*, **67**, S258-S261 (2009).

### 著者紹介



小野公二(おの・こうじ)  
京都大学 原子炉実験所  
(専門分野/関心分野)放射線腫瘍学(特にホウ素中性子捕捉療法), 放射線(中性子)生物学

連載  
講座これからの原子力システムを担う  
新原子力材料

次世代原子力システムのための材料開発の現状と課題

## 第1回 黒鉛・炭素材料

(独)日本原子力研究開発機構 柴田 大受, 沢 和弘

東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故以降、原子力の安全性向上が課題になっている。日本原子力研究開発機構では、高温ガス炉の固有の安全性に注目し、本質的に安全な高温ガス炉の検討を進めている。高温ガス炉は、黒鉛減速、ヘリウムガス冷却の原子炉であり、水素製造、高効率発電等に用いることのできる魅力的な炉型である。本稿では、高温工学試験研究炉(HTTR)を例に取り、炉心の主要な構造材料である黒鉛・炭素材料の使用実績を紹介するとともに、高温ガス炉の実用化に向けて、黒鉛・炭素材料の今後の研究開発課題について紹介する。

## I. 概要

東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故以降、原子力の安全性向上が国際的な課題になっている。日本原子力研究開発機構(原子力機構)では、高温ガス炉(HTGR: High Temperature Gas-cooled Reactor)の固有の安全性に注目し、本質的に安全な高温ガス炉の検討を進めている<sup>1)</sup>。高温ガス炉は、黒鉛減速、ヘリウムガス冷却の原子炉であり、燃料には、熱分解炭素や炭化ケイ素等のセラミックスで多重に被覆した直径1 mm程度の被覆粒子燃料を用いており、炉心から最高1,000℃近くの高温のヘリウムガスを取り出し、水素製造等の熱源や高効率発電に用いることができる。高温となる炉内の主要な構造物には、黒鉛・炭素材料が用いられており、高温・中性子照射環境下で構造物としての健全性を保つ必要がある。本稿では、黒鉛・炭素材料を炉内構造物に使用することで留意する点を述べ、今後の高温ガス炉の実用化に向けた黒鉛・炭素材料に関する研究開発課題等を紹介する。

## II. 高温ガス炉開発の状況

高温ガス炉の開発は、欧米で1960年代から80年代にかけて、実験炉、原型炉が建設・運転され、蒸気タービンによる発電システムの基本性能が実証された<sup>2)</sup>。90年代に入り、我が国では原子力機構が試験研究炉である高温

工学試験研究炉(HTTR: High Temperature Engineering Test Reactor, 熱出力30 MW)を建設し<sup>3)</sup>、高温ガス炉の安全性実証や核熱を利用した水素製造の研究開発等を進めている。HTTRでは、2004年に世界で初めて原子炉出口冷却材ヘリウムガス温度約950℃を達成し、また2010年には、原子炉出口温度950℃で50日間の連続運転が成功した。さらに、原子力機構は、2030年代以降に商用展開する高温ガス炉システムとして、高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR-300)及び水素製造とガスタービン発電を行う電力水素併産型高温ガス炉システム(GTHTR-300C)の設計を行ってきた。また、小型高温ガス炉システム(熱出力50~200 MW)の2030年代の展開を目指し、HTTR, GTHTR-300の設計をベースとして、蒸気タービン発電及び産業・民生への高温・低温の蒸気供給を目的とした小型高温ガス炉システムの概念設計を進めており、カザフスタン等との協力を実施している<sup>2,4)</sup>。

海外では、米国において、次世代炉の代表として高温ガス炉の導入が検討されている。次世代原子力プラント(NGNP: Next Generation Nuclear Plant)計画において、熱出力が最高600 MW、原子炉出口温度750℃の高温ガス炉を用いて、高温蒸気を化学工業、石油精製の分野に供給する電気/蒸気併産高温ガス炉システムの設計検討が進められている。また、中国でも出口温度約700℃の実験炉HTR-10(熱出力10 MW)が建設され、蒸気タービンによる発電試験が実施されている。また、商用高温ガス炉発電プラントHTR-PM(750℃、蒸気タービン、熱出力250 MW×2基)の建設が山東省の石島湾において進められている<sup>2)</sup>。

世界規模の国際協力としては、日、米、EU、韓、仏、加などが参加する第四世代原子力システム国際フォーラ

Materials for New Generation Nuclear Energy Systems—Current State and Future Agenda for Material Developments(1); Graphite and Carbon Materials: Taiju SHIBATA, Kazuhiro SAWA.

(2012年 6月4日 受理)

ム (GIF) において、次世代原子力システムの一つとして超高温ガス炉 (VHTR: Very High Temperature Reactor) が選ばれ研究開発が進められている。VHTR の基本概念は、熱出力最大600 MW、原子炉出口ヘリウムガス温度900℃以上、正味発電効率~50%等であり、核熱を水素製造等の熱源や高効率発電に用いることを目指し、水素製造技術開発を含めて国際共同研究開発が進められている。

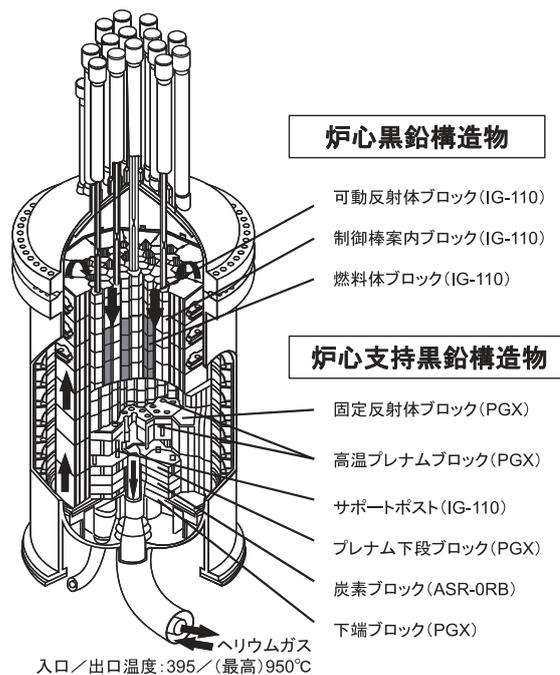
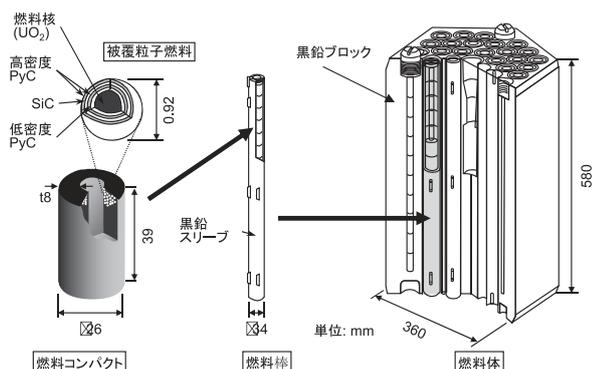
## II. 炉内黒鉛(炭素)構造物の特徴

第1図に HTTR の燃料体の構造を示す<sup>3)</sup>。被覆粒子燃料を黒鉛マトリックスとともにコンパクトに焼結し、それを黒鉛製のスリーブに挿入し、燃料ブロックに装荷する構造である。高温ガス炉には、このようなブロック型の燃料体を用いるタイプ(ブロック型)と、被覆粒子燃料を直径6 cm 程度の球状に焼結した燃料球を用いるタイプ(ペブルベット型)とがある。以下では、高温ガス炉の炉内構造物への黒鉛(炭素を含む)材料の利用について、HTTR を例として記載する。

### 1. 炉心の構造

第2図に HTTR の炉心の構造を示す<sup>3)</sup>。黒鉛構造物はその機能及び交換の可能性を考慮して、炉心黒鉛構造物と炉心支持黒鉛構造物とに分類される<sup>5)</sup>。炉心黒鉛構造物は供用期間中に交換が可能で、中性子照射量の多い位置で使用され、また炉心支持黒鉛構造物は交換を予定しない永久構造物で、中性子照射量の少ない位置で使用される。第1表に HTTR で使われている IG-110黒鉛、PGX 黒鉛、ASR-0RB 炭素の特性値を示す<sup>3)</sup>。黒鉛材料は、原料や製造方法によってその特性値が大きく異なり、炉内の黒鉛構造物の設計においては、材料試験で得られる物性値とそのばらつきを適切に考慮する必要がある。

HTTR の冷却材は圧力4 MPaのヘリウムガスであり、原子炉入口/出口温度は395/950℃(最高)である。炉心の黒鉛構造物は高温環境下で使用され、運転時には最



第2図 HTTR の炉心の構造<sup>3)</sup>

第1表 IG-110, PGX, ASR-0RB の特性値(標準値)<sup>3)</sup>

	IG-110黒鉛	PGX黒鉛	ASR-0RB炭素
かさ密度*	(kg/m <sup>3</sup> ) 1.78 × 10 <sup>3</sup>	1.73 × 10 <sup>3</sup>	1.65 × 10 <sup>3</sup>
平均引張強さ*	(MPa) 25.3	8.1	6.8
平均圧縮強さ*	(MPa) 76.8	30.6	50.4
縦弾性係数* (±1/3Su勾配)**	(GPa) 7.9	6.5	8.7
平均熱膨張係数 (20~400℃)	(10 <sup>-6</sup> /K) 4.06	2.34	4.4
熱伝導率 (400℃)	(W/(m・K)) 80	75	10
灰分 粒径	(ppm) 100以下 (μm) 平均20	7000以下 800以下	5000以下 2000以下

\*: 室温での値  
\*\*: 応力-ひずみ曲線における基準引張強さ及び基準圧縮強さの1/3の点を結んだ直線の勾配

高1,200℃程度の高温となる箇所もある。冷却材ヘリウムガス中に多くの不純物が含まれると高温環境下で黒鉛構造物が酸化され、強度や熱特性等が劣化するため、黒鉛の酸化を抑制する等の観点から、ヘリウムガス中の不純物濃度は厳しく管理されている。例えば、HTTRにおいては、炉心出口のヘリウムガス温度が900℃以上となる場合の水分濃度の管理目標値は0.2 ppmとされている。

第2図に示した炉心黒鉛構造物は、六角柱状の燃料体黒鉛ブロック、制御棒案内ブロック等から構成され、それらの物性値等に与える高速中性子照射の影響が顕著で、設計及び安全性評価の際に照射の影響を考慮する必要がある。炉心黒鉛構造物に使用される材料は、耐放射線性、耐腐食性及び高強度を有する原子炉級微粒等方性黒鉛 (IG-110黒鉛) である。HTTR の場合、例えば、炉心黒鉛構造物である燃料ブロックの高速中性子照射量の設計上の制限値は約1.5 × 10<sup>25</sup> n/m<sup>2</sup> (E > 0.18 MeV) であり、この値を超えないように交換することとしている。

後述するが、これは中性子照射により黒鉛構造物に蓄積される残留応力が、黒鉛材料の許容応力を超えないように定めたものである。黒鉛は、原料や製造方法によってその特性が大きく異なるため、高強度を有するIG-110黒鉛を用いることで、長期間の使用と安全上の裕度を確保している。

また炉心支持黒鉛構造物は交換を予定しない永久構造物で、中性子照射量の少ない位置で使用され、炉心を支持し荷重を圧力容器へ伝えるとともに熱遮へい、放射線遮へい等の機能を有する。高強度が必要なサポートポスト等にはIG-110黒鉛が、固定反射体ブロック等には大型の構造物が製作可能な原子炉級準等方性黒鉛(PGX黒鉛)が、また、断熱性を必要とする炉床部断熱層には黒鉛より断熱性の高い炭素(ASR-0RB炭素)が使用されている。

## 2. 黒鉛構造物の設計

### (1) HTTR で用いた規格基準

HTTRの黒鉛構造物の設計、製作にあたり、日本原子力研究所(現 原子力機構)では、所内外の協力を得て1989年に「高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針」を定めた<sup>5)</sup>。黒鉛構造設計方針では、例えば、炉心黒鉛構造物の設計においてゆるやかな応力制限とする反面、中性子照射下における照射寸法変化及び照射クリープを考慮した粘弾性応力解析について規定している。一方、炉心支持黒鉛構造物に対しては、座屈破壊を防止する規定等が盛り込まれている。さらに、設計方針には、それまでの研究開発の結果に基づいて、IG-110、PGX、ASR-0RBの設計用データが定められている。

また、HTTRの炉内黒鉛構造物の製作にあたり、設計方針で定められた材料の特性を保証するため黒鉛検査基準を定めている。そこでは、材料検査として、原料の段階で銘柄検査(原料の種類)を実施し、素材の段階で銘柄検査(かさ密度、固有抵抗、熱膨張係数、灰分、曲げ強さ、組織検査、異方比、熱伝導率)、不純物検査(ホウ素当量、放射化性不純物)、機械的強度検査(引張強さ、圧縮強さ)、高温寸法安定性検査を実施することとしている。特にIG-110黒鉛については、粗加工の後に内部欠陥の検出を目的とした非破壊検査を行うこととしている。

### (2) 実用炉のための規格基準の整備

これまで、実用高温ガス炉の黒鉛構造物についての標準化した規格体系は整備されていなかった。そのため、2008年に日本原子力学会に「高温ガス炉黒鉛構造規格化のための調査検討」特別専門委員会が設立され、世界的な高温ガス炉開発の状況を踏まえ、HTTRの黒鉛構造設計方針等を実用高温ガス炉の条件まで拡張するための要件を不偏的立場から調査検討し、その結果を将来に体系的な規格を策定する際の基礎とすべく「高温ガス炉

黒鉛構造物規格原案」が取りまとめられた<sup>6)</sup>。検討にあたっては、ASMEで検討されている黒鉛構造物の規格案についても調査し、対応部分については整合性が考慮された。

規格原案は、総則、設計規格、材料規格・製品規格、供用期間中検査・維持基準からなる包括的な体系となっている。黒鉛構造物への中性子照射効果、酸化効果、座屈等の評価については黒鉛構造設計方針等が参照され、新たに設計の妥当性の評価に確率論的評価の採用を認めるとともに、破壊防止の観点から破壊力学的手法の適用を考慮に入れた維持基準が設けられている。特に照射データに関しては、HTTRの使用条件を超えた範囲では、これまで系統的な検討がなされてこなかったため、複数の黒鉛銘柄に対する照射データを用いた内外挿方法により、より広範囲の照射条件に適用できる照射効果曲線が提示されている。

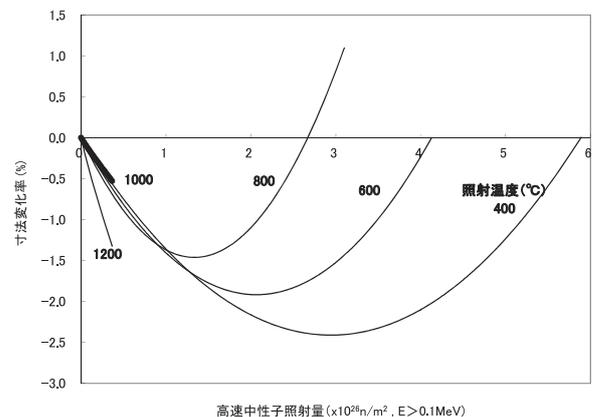
## IV. 今後の課題

### 1. 中性子照射効果の評価

前述のように、黒鉛は原料や製造方法によってその特性値が大きく異なり、また、同一の銘柄に関しても特性値に比較的大きなばらつきを有する。このような材料に対しては、中性子照射効果もばらつきを有するため、黒鉛構造物の設計においてはこれらを適切に考慮する必要がある。そのためには、理論に基づく照射効果の評価が重要であり、以下に例として代表的な特性である照射寸法変化、照射クリープについて述べる。

#### (1) 照射寸法変化

高速中性子照射によるIG-110黒鉛の寸法変化率を第3図に示す<sup>7)</sup>。これは、上述の規格原案において、照射データを用いた内外挿方法により定められた照射効果曲線である。寸法変化率は照射温度によって大きく異なり、照射の初期には、寸法は照射量の増加に従って収縮する。収縮のメカニズムは、個々の結晶は照射により黒鉛結晶の基底面に平行なa軸方向へ収縮、基底面に垂直なc軸



第3図 高速中性子照射によるIG-110黒鉛の寸法変化率<sup>7)</sup>

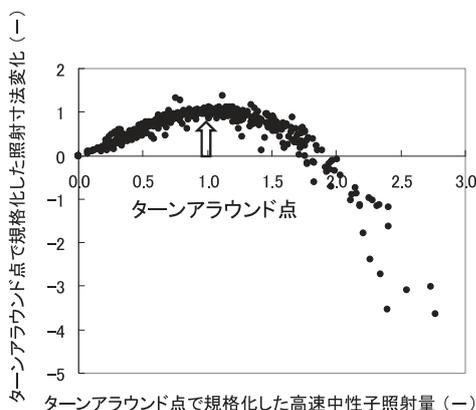
方向へ膨張するが、多結晶体中に含まれる気孔やマイクロクラックによりc軸方向の膨張が吸収されるため、多結晶体としては収縮すると理解されている。

また、中性子照射量がさらに多くなると、例えば、IG-110については、照射温度600℃で約  $2 \times 10^{26}$  n/m<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV)の照射量で寸法変化率は極小点(ターンアラウンド)を経て収縮から膨張へと転じる。この挙動は他の原子炉用黒鉛材料にも共通の現象で、寸法収縮に伴って発生した応力により新たなマイクロクラックが発生し、膨張するものと説明されている。

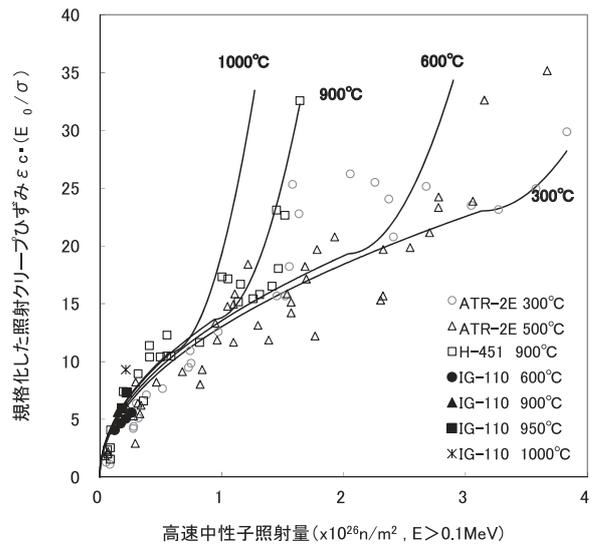
第4図は、IG-110黒鉛、H-451黒鉛、ATR-2E 黒鉛の照射温度300~900℃のデータについて、それぞれの材料でターンアラウンド点の照射量及び寸法変化率をそれぞれ1として規格化し整理したものである<sup>7)</sup>。黒鉛の照射寸法変化率は、黒鉛銘柄、照射温度によって異なるが、ターンアラウンド点を基に整理すれば、各種の照射データを汎用的に評価できることを示している。このように、照射寸法変化は黒鉛の結晶、気孔の状態と密接に関係しており、今後、理論に基づき照射寸法変化を評価する式を高度化していくことが重要な課題である<sup>8)</sup>。その際、黒鉛の微細構造を考慮して評価式を汎用化することで、様々な黒鉛にも適用可能なものとするのが重要である。

(2) 照射クリープ

原子炉の運転中、黒鉛構造物には自重等による応力のほか照射寸法変化や温度勾配によって応力が生じる一方で、照射クリープによって応力が緩和される。照射クリープを表す式の一つとして、以下に示す Maxwell モデル(定常照射クリープ)と Kelvin モデル(遷移照射クリープ)を直列に結合したモデルが挙げられる。定常照射クリープ係数は、温度が高くなるに従い大きくなる。第5図は、IG-110黒鉛に加え、H-451黒鉛、ATR-2E 黒鉛についての実験データを示したものであり<sup>7)</sup>、定常クリープ領域の照射量を超えた3次クリープ領域における評価モデルの開発が今後の課題である。



第4図 ターンアラウンド点で規格化した照射寸法変化 (IG-110黒鉛, H-451黒鉛, ATR-2E 黒鉛)<sup>7)</sup>



第5図 照射クリープデータ (IG-110黒鉛, H-451黒鉛, ATR-2E 黒鉛)<sup>7)</sup>

$$\epsilon_c = a \frac{\sigma}{E_0} \{1 - \exp(-b\gamma)\} + K\sigma\gamma \quad (1)$$

$\epsilon_c$ : 照射クリープひずみ

$\sigma$ : 応力

$\gamma$ : 高速中性子照射量

$a, b$ : 遷移照射クリープ変数

$K$ : 定常照射クリープ係数

$E_0$ : 照射前の縦弾性係数

ここで、 $K$  は照射温度  $T$ , 定数  $C_1, C_2$  を用いて  $\exp(C_1T + C_2)$  に比例する形で表される。

2. 黒鉛物性の汎用的な評価モデル開発

黒鉛の許容応力を定める上で基本となる基準強さの設定には、黒鉛材料の強度のばらつきが考慮されている。さらに、炉内での環境効果として、中性子照射による強度増加、酸化による強度減少を考慮することとしている<sup>5,6)</sup>。

原子炉の運転に伴い、炉心黒鉛構造物には熱や中性子照射により残留ひずみが蓄積されるため、それによる残留応力が黒鉛の許容応力を超えないよう設計する必要がある。強度の強い黒鉛を用いることは、残留応力の蓄積が応力制限に達するまでの照射量の増加、すなわち運転期間の長期化が可能であることを意味している。そのため、高い信頼性を持った高強度の黒鉛の開発は、黒鉛の高性能化として重要な課題である。また、黒鉛の強度特性に影響するき裂の発生、進展の過程は、黒鉛の微細構造に依存するため、これらを考慮した汎用的な評価モデルを開発することで新たな材料設計への展開が可能となる。

### 3. 黒鉛の耐酸化性の向上

高温ガス炉は、その固有の安全性により、いかなる事故が発生しても、炉心溶融が起こらず、大規模放射能放出に至らない原子炉となり得る炉型の一つである。原子力機構では、いかなる事故が発生した場合でも、特段の機器・設備に頼ることなく物理現象のみにより原子炉を静定させ、環境に有害な放射性物質を放出させない、本質的に安全な高温ガス炉の検討を進めている<sup>1)</sup>。高温ガス炉の炉心の黒鉛スリーブは、被覆粒子燃料を保持し、冷却材流路を確保する役割を担っており、本質的安全な高温ガス炉のためには、空気侵入事故が発生しても、被覆粒子燃料の機械的な破損を防止する必要がある。そのため黒鉛の耐酸化性を向上させることが重要な課題である。

産業分野では、黒鉛の耐酸化性を向上させるため表面層に SiC を付与する等の技術が開発されている。これらの技術を高温ガス炉の炉内材料に適用するためには、高温や照射環境での寸法変化による耐酸化層への影響、耐酸化層の健全性の評価方法等について研究を進め、炉内材料としての成立性を示すことが重要である。

### 4. C/C 複合材料等の応用

HTTR では、金属製(アロイ 800 H)の制御棒要素を使用しているが、実用炉である VHTR では、炉心ガス温度の高温化と出力密度の向上による炉内の高温化のため、原子炉スクラム時の高温においても繰り返し使用が可能な、金属材料に代わる C/C 複合材料等の耐熱性材料の開発が必要である。

C/C 複合材料は強化材である炭素繊維の配向方向によって材料特性に高い異方性を有し、破壊メカニズムであるき裂の発生・伝播が複雑なため、精度の良い強度評価が困難である。また、中性子照射や酸化により、繊維/マトリックスの微細構造の変化に起因する強度変化や物性変化を生じるため、炉内構造物としての健全性評価のためには照射効果、酸化効果を的確に把握することが重要である。将来的には HTTR を用いることで、C/C 複合材料製の制御棒の成立性を示すための実証試験を行うことが可能となる<sup>9)</sup>。

### 5. その他

その他、長期的な課題として、使用済み黒鉛のリサイクル技術開発、黒鉛構造物の中に生成する C-14 の分離技術の開発等が挙げられる<sup>10)</sup>。前者は、黒鉛の製造時において、使用済み黒鉛を原料の一部として使用するものであり、混合する割合と製品の材料特性との関連を把握することが重要である。後者については、中性子照射に

より炉心を構成する黒鉛構造物中に生成する C-14 は半減期が 5730 年と長期であり、使用済みの黒鉛構造物を効率的に処分するためには、C-14 を効率的に分離することが重要である。今後 HTTR の炉内から使用済み黒鉛構造物を取り出した際には、C-14 の分離等の研究に活用することができる。

## V. おわりに

高温ガス炉は、安全性が高く、水素製造、高効率発電等に用いることのできる魅力的な炉型である。本稿では、炉心の主要な構造材料である黒鉛・炭素材料の使用実績及び今後の研究開発課題について紹介した。今後、更なる研究開発の進展とともに、高温ガス炉の実用化が期待される。

### — 参考資料 —

- 1) H. Ohashi, *et al.*, *AIP Conf. Proc.*, 1448, 50-58 (2012).
- 2) 大橋弘史, 他, *JAEA-Technology* 2011-013, (2011).
- 3) S. Saito, *et al.*, *JAERI* 1332, (1994).
- 4) M. Ogawa, *et al.*, "NNC RK Bulletin" *Journal*, Issue 4 [48], 34-39, Dec. 2011.
- 5) 日本原子力研究所 大洗研究所高温工学試験研究炉設計室, 他, *JAERI-M* 89-006, (1989).
- 6) T. Shibata, *et al.*, *JAEA-Research* 2009-042, (2010).
- 7) E. Kunimoto, *et al.*, *JAEA-Research* 2009-008, (2009).
- 8) T. Shibata, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **47**[7], 591-598 (2010).
- 9) M. Eto, *et al.*, *IOP Conf. Series, Materials Science and Engineering* 18, 162003, (2011).
- 10) 角田淳弥, 他, *日本原子力学会和文論文誌*, **2**[4], 546-554 (2003).

### 著者紹介



柴田大受(しばた・たいじゅ)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)原子炉用黒鉛・セラミック材料



沢 和弘(さわ・かずひろ)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)高温ガス炉用被覆粒子燃料

# 私の 主張

## 原子力規制委員会に望む

東京工業大学 西脇 由弘

我が国の新たな原子力規制機関として、この9月に原子力規制委員会が新設されることを前提として、本稿を投稿する。

### 1. 原子力規制委員会の設立

我が国の原子力規制機関については、2011年3月11日の福島第1事故というシビアアクシデントを契機に見直しの機運が高まり、昨年8月に政府は、環境省の外局として原子力規制庁を新設することを閣議決定した。これに対し自由民主党は、塩崎泰久議員を中心として「原子力規制組織に関するプロジェクトチーム」を立ち上げ、東京大学原子力法制研究会の研究成果も活用しつつ、福島第1事故という未曾有の大惨事の再発を防止し、国民の安全を確実に確保するためには新しい独立した原子力規制組織が必要であり、政府案では不十分として、国家行政組織法の三条委員会である原子力規制委員会を新設する方針を固めた。

原子力規制庁の新設という政府案の対抗法案として、本国会に、自民・公明の両野党が共同提案として原子力規制委員会(以下規制委員会と略す)設置法案を提出し、大議論が繰り広げられた。この論戦を通じ、政府案が退けられ野党提案をもとに規制委員会設置法が成立するという憲政史上まれにみる国会での大逆転が行われた。国会論戦の最も重要なポイントは、原子力の規制組織を、平時から緊急時に至るまで、政権や閣僚の思惑、経済・エネルギー政策、その他あらゆる政治、行政からの圧力から完全に独立し、原子力の安全性に科学的・客観的に責任を持つ組織とすることにあった。規制委員会の職員は、今後の組織運営や規制実務の推進に当たって、この国会の意思を最重要視する必要がある。

### 2. 規制委員会の特色

規制委員会を理解するためには、規制委員会設置法やその附則のみならず、附帯決議や国会における提案者の説明を読み解く必要があり、そこから得られる主な特色を以下に記述する。

規制委員会は、委員長や委員を国会同意人事とする三条委員会とするほか、関係行政機関の長に対する勧告権を有する、高い独立性が確保された組織である。

現在、文部科学省の所掌とされている放射性同位元素等や保障措置などの規制及び原子力の安全に関する研究者や技術者の養成や訓練なども、規制委員会の所掌とされた。これにより、原子力分野を一元的に規制する強力

な規制委員会が誕生した。今後、(独)日本原子力研究開発機構(JAEA)や、財団である核物質管理センター及び日本アイソトープ協会との連携について、業務のみならず組織の在り方についても見直しを行うこととされている。

推進官庁からの分離のため、規制委員会の職員には、発足当時からノーリターン・ルールを原則として適用し、例外の5年間を除き出身元の官庁には戻れず、更に幹部職員を含め出身元官庁の関係団体等への定年後の再就職が禁止されている。同時に、規制委員会の専門性の向上のため、保安院の規制支援機関であった(独)原子力安全基盤機構(以下JNESと略す)を廃止し、その職員を公務員化して規制委員会と一体化することとなった。JNESの規制委員会への統合を可能な限り速やかに行い、また少なくとも現行の給与水準を確保した上で処遇の改善を行うこととされた。

原子力防災に対しても、福島第一事故における政治の過剰介入による混乱の反省に立ち、オンサイトの規制権限は規制委員会にあり、総理の指示権も及ばないことが明確にされた。また、平時のオフサイト対策についても、原子力災害対策指針の策定を始め、技術的・科学的判断を要するものは規制委員会が行うこととされた。また、オフサイト対策の迅速な実施のため、政府の防災組織の在り方を見直し、大規模災害の延長上に原子力災害の対応体制を置くとともに、オフサイトセンターは県庁等の交通・情報の拠点に置くこととされた。

また、設置法成立時点で国会事故調査委員会等が報告を行っていなかったこともあり、これら内容を踏まえるとともに、原子力の安全確保が我が国の安全保障に係ること及びより国際基準に合致したものとなるよう、3年以内に内閣府への移行を含め検討を加え必要な措置をとるといふ、いわゆるサンセット条項が組み込まれている。

さらに、人材の確保に関連し、新採用の定員を十分確保すること、資格等の取得も考慮した給与体系の整備その他の処遇の充実を図ること、留学や国際機関・外国政府機関への派遣及び在外公館等における勤務の機会を確保すること、能力向上のための研修施設と研修体系を整備すること、委員会の体制の拡充を図るため独自財源を確保することなどが求められている。

### 3. 規制委員会の職員に求めること

国会論戦によって、政府案ではなく、野党の自公の議員提案をもとに規制委員会が設立されたことは、国会という場を通じて、より国民の意思を反映した組織として

規制委員会が適しているとされたことを意味する。規制委員会の職員は、法案提出者の説明をはじめ国会審議の議事録を熟読することが必要である。

規制委員会は、許認可、予算及び人事のいずれにおいても、高い独立性を有した組織となっている。しかし、国会においても審議されたように、独立性を保つために最も重要なことは、被規制者のみならず他の誰にも依拠せず、規制委員会自らの力で判断できる専門的能力を持つことである。

また、規制委員会は、原子力の安全確保という国民からの付託に応えるため、国民への説明責任を果たす必要がある。これまでは、審議会の場を通じて、行政の意思決定を公開してきたが、これからは、規制機関自らが、何が問題点で、それをどのように考え、いかにして結論に至ったかを国民に説明しなければならない。このためには、規制委員会自らの意思決定のプロセスを透明にすることが求められる。情報公開法に基づく不開示情報に該当しない情報の公開はもちろんのこと、規制委員会の職務執行が国民から見える形になるよう情報発信を行っていくことが必要である。透明化によって、組織の活動が国民に分かるようになるだけでなく、個々人の能力まで国民から見えるようにすることは、職員の専門的能力の向上の観点からも望ましい。

さらに、規制委員会は、原子力という潜在的に大きな危険を有する技術の規制を行っているのであるから、その安全性の立証は、基準に基づく技術的裁量の幅が少ない行政によって行わねばならない。科学的・技術的判断に基づく客観的な基準を適正手続きに基づき策定し、規制の実施部門は基準に則り淡々と法の執行を行うという、デュー・プロセスを確立・実施することが求められる。

規制委員会は、原子力安全・保安院の原子力規制部門、JNES、放射線規制や、保障措置などの文部科学省の原子力規制関連部門から成る混成部隊となる。組織風土が異なる3つの部門が同一組織となるのであるから、これらの融合と一つ屋根の下に住むという連帯意識の醸成がまず必要である。これら各部門が克服すべき課題を抽出したい。

旧保安院パートは、原子力の各種事業等の規制の実施部門となろう。これまでの規制業務からの連続性があると思われがちであるが、JNESという規制支援機関に依存せず自ら判断を行いうるよう、安全解析、確率論的安全評価や各種安全研究について、咀嚼し規制に利用しえる専門的能力を身に付けることが求められる。

旧JNESパートは、これまで原子力安全委員会が策定してきた各種指針類にかわり、規制基準を制定・改正していかなければならない。これまでは、保安院の支援機関として基準原案の策定を行ってきたのであるが、今後

は規制委員会の一員として基準の発効まで行わなければならない。規制に直接携わる者としての責任を自覚せねばならない。また、旧JNESパートの職員の年齢構成は高齢者に偏っており、これらの方々の知見によってJNESの活動が支えられてきた。公務員化するに当たって高齢者の待遇に配慮するとともに、若い職員は、有能な諸先輩の経験と知識を受け継ぎ、基準策定活動の第一線に躍り出なければならない。

旧文部科学省パートは、ともすればトラブルの発生やIAEAの査察などの受け身の対応が目立っていた。今後は、国民の安全を守るためには何をなすべきかという、プロアクティブな思考や行動が求められる。その際、規制委員会のテロ対策部門との連携や組織統合、さらには、自衛隊や海上保安庁、及び警察庁・警視庁などの実力組織との連携強化も課題である。

なお、(財)核物質管理センターにおいて実施されている保障措置検査等は、財団に行わせしめる性格のものでなく、本来、国自らが実施すべきものであることから、これを規制委員会が行うことも検討すべきである。

これらの各部門を率いていくのは、委員長や委員の見識ある指導が必要である。統一された価値観のもとに共同して行動する組織となるには、遠い道のりが必要であろう。研修の充実、海外諸機関や在外公館への派遣による国際感覚の醸成にも配慮することにより、早期に規制組織としての組織文化を形造ることを望む。

#### 4. 最後に

規制の独立性は、孤高を意味するのではない。被規制者の実態を知り対話を行うことが、実効ある規制の第一歩である。また、技術的に高度な原子力規制は、安全研究の成果の規制への反映が不可欠であり、世界の規制機関や内外の学会等との情報交換や交流は欠かせない。

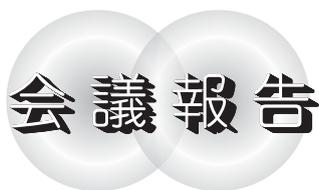
規制機関には何よりも透明性が求められるが、国民の多様なニーズにルールに従うだけの杓子定規な対応を行うだけでは、国民の信頼は得られない。国民への説明責任を果たすためには、広範な国民の要求に対し、謙虚に国民の意見を聞き、誠実に応えることが必要である。

規制委員会は、テクノクラート集団である。高度な技術的事項を規制する新しい規制機関の在り方を、歴史の呪縛を受けている日本の行政組織の中で模索し、新しい組織の在り方を提示していくことが求められる。

(2012年7月13日 記)

#### —参考文献—

- 1) 原子力規制委員会設置法。
- 2) 衆議院環境委員会-6号, 平成24年6月15日。
- 3) 参議院環境委員会-8号, 平成24年6月20日。



## 原子力発電所の不測事態マネジメントに関する IAEA 会議参加報告

IAEA Technical Meeting on managing the unexpected-from  
the perspective of the interaction between ITO

2012年6月25～29日(ウィーン, オーストリア)

福島事故に関する IAEA 行動計画の一環で、2012年6月25～29日にウィーンで開催の IAEA Technical Meeting on managing the unexpected-from the perspective of the interaction between Individual, technology and Organization”に参加した。会議は、組織論/行動科学/システム工学分野と原子炉安全の専門家40人強が参加し、深層防御強化、人と組織、体制を含めたシステム安全の構築、福島事故の人的組織安全文化等の背景因子などを議論した。

### 1. 深層防御強化

防御の厚みを増すための①“practically eliminate”基準を確率論に依拠しつつも重大な事態に至るシナリオ評価に注意を払い決定する考え方、②層間独立性の重要性が論議された。

### 2. 人と組織、体制を含めたシステム安全の構築

レジリエンス(復元力あるいは弾性。予期されない変動条件でも柔軟に対処し所定の成果を得ること)研究で知られた E. Hollnagel, K. Sutcliffe, J. Paries, K. Roberts が参加し、航空/医療/火災/石油分野の事例を踏まえ、レジリエンスを教育・実践できた組織体の成功例を紹介していた。Hollnagel は、従来の機器故障、マンマシーンインターフェイス(TMI以降)、組織安全文化(チェルノブイル以降)に負の要因を探し出して事故を少なくする方法から、予期されない変動条件でも柔軟かつ強靱に対処し成功すべく転換を図ることが必要と強調していた。即応力・監視力・予見力・学習力(response, monitor, anticipate, learn)強化がこれにつながる。レジリエンスを持った組織の特徴は、組織構成員の高い能力と相互信頼、信頼性と安全が大切という価値の共有、変化を見逃さない注意深さ、予期しないことが起こりうるという心の備えと対応する柔軟性への心がけ、組織の多様な専門家とのコミュニケーションと不測事態に対処できるストレス対処能力を備え、人生に前向きな姿勢を持っているなどで、専門書やwebでの紹介で紹介されている。レジリエンスは、不測事態発生時の対応の側面に目が行きがちだが、重要なのは事前予測による柔軟な備えと anticipate もキーワードにある。

### 3. 福島事故

事象連鎖における問題点を洗い出し技術的対応措置を取るだけでは、歴史的に積み重ねられてきた組織文化的な問題や規制や社会とのインターフェイス問題等への対処を欠き、別の原因/パターンの重大事故を防げない恐れがある。事故の背景にありうるこれら問題を、深層防

御の劣化、「原子力界はなぜ事故を防げなかった」調査、事故調査報告書を基に洞察し、安全文化(想定条件を超える事態の考慮、ベストプラクティス学習の不足、システム安全より機器安全重視、外因事象やテロ攻撃などによる機器/チーム/通信の損傷という事態に柔軟に対処できるアクシデントマネジメントの不備など)、技術と組織と社会とのインターフェイス(社会的安全目標の不備、prisoner's dilemma 問題を含め継続的な安全性向上の不足)、技術能力と技術理解(頻繁な異動、技術のアウトソーシング)、安全のオーバーサイト等が議論された。

### 4. 専門家会議のまとめ

人と組織更には体制を含めたシステム安全を構築するにあたり、レジリエンス能力を涵養することの重要性が強調されたものの、福島事故に即した分析は紹介されず、組織論/行動科学/システム工学分野と原子炉安全分野の専門家によるシナジーがよく得られたとは言い難い。来年6月開催の類似テーマでの IAEA 会議ではこの点の改善が必要と思われる。

### 5. 感想

「福島事故1周年」と題し、今年3月開催のフランス原子力学会年次大会は、福島事故に鑑みた安全のパラダイムシフトは「レジリエンス」と「責任ある利用」と総括していたが、この考えが IAEA も含めて欧米で広がりつつあるなか、我が国の安全性改善が、組織およびシステムに内在するレジリエンスの不足よりも技術対策、それも地震津波という直接要因への対策に焦点が置かれている点に鑑み、これら非技術的な観点をも含めた不測事態への対応能力強化を今後の原子力システム構築と工学教育で考える必要がある。レジリエンスの高い組織における特性として観察される相互信頼、人生への前向きな姿勢など安全文化という assumption に属する価値観の共有は重要と思われる。システム安全を議論する上で組織のもつ特性あるいはシステムのもつ特性の持つ意味合いについては、HRO(High Reliability Organization)理論や NAT(Normal Accident Theory: 複雑で相互に強いリンクのあるシステムではむしろ事故発生が常態)理論が知られ、殊に後者は TMI の分析で知られる。福島事故を NAT 理論から見ると、深層防御のレベル4とレベル3とがサポート系の点でリンクがあったことが挙げられよう。システムとして深層防御のレベル間の独立性を高め、組織として高いレジリエンス能力を持つような努力が必要とされると思う。

(東京工業大学・尾本 彰, 2012年7月6日記)

## 新刊紹介 核不拡散をめぐる国際政治 規範の順守、秩序の変容

秋山信将著, 230 p. (2012.3), 有信堂光文社.  
(定価5,500円) ISBN 978-4-8420-5565-7

本書は、原子力平和利用の政治的な側面である核不拡散をめぐる国際環境を、「原子力カルネッサンス」を踏まえ、福島事故を契機に再整理している。特にNPT第4条に記載されている加盟国の「原子力平和利用の奪い得ない権利」(以下「奪い得ない権利」と略す)の解釈と原子力が伸長した場合に惹起される核テロへの懸念を中心に、最近の核不拡散情勢を精緻分析し、これまでの規範と将来の秩序の変容について議論している。

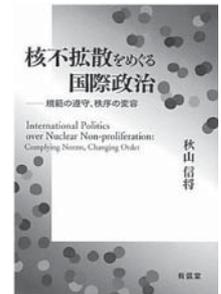
著者は現在、一橋大学院法学研究科にて教鞭をとっているが、これまで、広島平和研究所、国際問題研究所軍縮・不拡散促進センター等で核不拡散や核軍縮に関連する研究に携わっており、核不拡散をめぐる国際政治を論ずる第一線の研究者である。

本書では第一章から第三章で、核不拡散の実効性を高めるための様々な措置に関する議論や導入の過程を分析し、核不

拡散の規範遵守機能を論じている。特に第三章においては、核不拡散に直結する技術の集約を意図してIAEAから提案された核燃料サイクルの多国間管理構想を介して、「奪い得ない権利」の許容限界を論じている。第四章と第五章では、近年核不拡散上の懸念事項として挙げられているイラン問題を事例として、国際社会の対応について議論している。第六章では、米国の核不拡散政策のダブルスタンダードではないかといわれている米印原子力協力協定問題を米国の政策的な意図を精緻に分析し、課題を明示している。最終章では、「奪い得ない権利」と実質的なNPTの実効性について分析し、核不拡散レジームの規範構造と実際の遵守対応の変化を、米国の政策を基軸に分析し将来を予見している。

原子力平和利用には、核不拡散に関する国際政治への配慮が不可欠であり、原子力に携わる科学技術者は、このような国際政治の社会科学的な視点を具備しておくことは肝要である。その意味で正確な情報分析と明確な論点を提起している本書は、原子力に携わる者の必読の書である。

(核物質管理センター・菊地昌廣)



## 今、原子力研究者・技術者ができること

有富正憲編著, 241 p. (2012.3), 培風館.  
(定価2,200円) ISBN 978-4-563-01931-0

福島第一原子力発電所事故の一連の経過と対応について、原子力安全・保安院と東京電力等から公開された資料を基にして分析し、そこから得られる教訓をまとめ、二度と炉心溶融事故を起こさないためには、どうすれば防止できるかを、原子力研究者・技術者の責任としてまとめた書である。

本書は、原子力分野の研究者や技術者を想定して書かれているが、一般読者にも読めるように、わかりやすい用語解説などを配慮して記述されている。その内容は、事故発生の時間の経過を詳細に分析し、従来のシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネジメントの不備や本来の深層防護思想に対する欠落を鋭く指摘し、多くの提言をまとめている。また、原子力の専門職に求められる資質や役割についても述べられており、手順書に従うだけのマニュアル人間ではない専門職の育成が一層重要であると結ばれている。

第1編では、福島1～3号機における事故進展と操作・判断の事実関係が述べられており、第2編では、原子力に不案内な読者向けに原子炉の基本的な概念と特徴が記述されてい

る。第3編においては、シビアアクシデントとアクシデントマネジメントとは何かについて述べられ、現場の技術者や事業者トップが、はたしてアクシデントマネジメントの認識があったか？またマネジメントの観点から福島1～3号機の事故対応を分析し、不備がなかったか？について評価している。その中で、従来のアクシデントマネジメント対策には深層防護の考え方が正しく反映されていないと指摘している。

第4編では、全交流電源喪失に加え、最終ヒートシンク喪失時でも炉心溶融を防止できる方法を提言して、アクシデントマネジメントの見直しを求めるとともに、現在、政治問題化している再稼働に向けてのストレステストの位置づけと再起動に向けた提言をまとめている。

本書は、原子力安全の向上には、アクシデントマネジメントの再構築が不可欠であり、現場の研究者や技術者がこれから注意して考えていかなければならない事項を再確認することのできる良書である。将来の原子力を担う原子力専攻の学生にとってもよい教科書である。

(福井大学・山野直樹)

