

### 巻頭言

- 1 「反原発・脱原発」論議のまやかし  
宮 健三

### 時論

- 2 「神の国意識」の崩壊  
日本は特別だという意識が、さまざまな神話と不幸とを紡ぎだす。 広瀬弘忠
- 4 津波被害の教訓—学会活動の現場から  
土木学会では原子力発電所の地震・津波安全に関する調査研究を行っている。 当麻純一

### 東日本の巨大地震に学ぶ(5)最終回

- 12 東日本の巨大地震に学ぶ  
東北地方太平洋沖地震と東日本大震災を振り返り、事故を防ぐという視点で、それぞれの時点でやるべきであったことを考えてみたい。 尾池和夫

### 論点 「原子力」を考える

- 15 自然エネルギー発電の可能性と限界—過大な期待への警告  
国内の自然エネルギー発電の導入可能量は、総発電量の15%が限度だ。このため電源構成は当面、原子力、火力、水力が主体であり続ける。 林 勉
- 21 原子力は持続可能なエネルギーか? 市場・デモクラシー・倫理が決める原子力の行く末  
「ベストミックス」から「持続可能なエネルギー」へと大きな方向性を転換し、経済合理性、民主主義、そして正義や倫理を反映したエネルギー政策に転換することが望まれる。 飯田哲也

### 解説

- 25 福島事故の収束と環境回復に向けて  
—日本原子力研究開発機構の活動

原子力機構による福島への協力活動は、国に対する技術的助言や環境モニタリングや除染作業、事故収束に向けた知見や技術の提供など多岐にわたる。 佐久間 実、佐田 務



校庭の土壌中の空間線量率を調査

- 29 放射能汚染地域の除染を急ごう  
—主な除染方法の原理  
伊達市、飯舘村での除染試験から

「放射性物質汚染対処特措法」により、地域の除染が本格化する。NPO 法人放射線安全フォーラムが中心となって実施した除染試験の結果を基に、主な除染方法の原理を解説する。

吉田善行



アスファルト、コンクリート表面切除用のショットブラスト機

- 34 低炭素型水素エネルギーシステム

低炭素型水素エネルギーシステムは、国内または海外の低炭素の一次エネルギー源から水素を製造し、輸送し、国内で利用するものである。その要素技術である水素製造、輸送・貯蔵、利用の各技術について述べる。 石本祐樹

表紙の絵(洋画) 「モンパルナスの朝」 製作者 中西 繁

【製作者より】 パリ、モンパルナス大通りとラスバイユ大通りの交差点。パブロ・ピカソ広場と呼ばれている。交差点を人々はメトロやバスに急ぎ、通勤の車やバスやトラックが慌ただしく行き交い始める。冬の光は凍てついた空気に反射して輝き、長い影を路面に落とす。パリの一日が始まる。

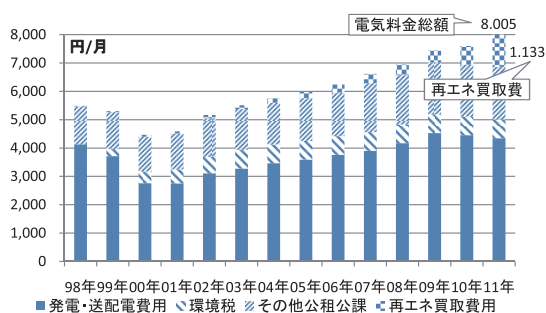
第42回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

## 解説

### 39 再生可能エネルギー大量導入における課題—ドイツの事例から

ドイツでは、2020年までに総消費電力量の35%を再生可能エネルギーで賄う目標が掲げられている。しかし、この目標を達成するためには、さまざまな問題を克服する必要がある。

伊勢公人



ドイツの一般家庭の月額電気料金とその内訳

### 43 EU ストレストテスト調査報告—EU 本部及び欧州各国でのインタビュー調査報告

国が実施を始めたストレストテスト。この6月からEUが実施しているものをやったものである。EU本部、EU主要国の規制機関及び主要な事業者インタビューし、ストレストテストのねらいと概要及び当面の対応について調査した。

諸葛宗男, 吉田智朗

### 47 最近の核セキュリティの国際動向と日本の基本姿勢(1)IAEA核セキュリティ勧告文書の解説

IAEAは、核セキュリティ・シリーズに関する3つの勧告文書を発行している。これらによって核セキュリティのすべてがカバーされている。

宮本直樹, 草間経二, 飯田 透

### 52 原子力システムの確率論的リスク評価の動向と今後への期待—第2回「原子力学会におけるリスク評価関連標準の整備と今後の計画」

成宮祥介

## 連載講座 第7回 材料が支える原子力システム

### 61 照射技術

原子炉など照射環境にある材料の照射研究では、炉心内での照射条件の制御と、照射条件の標準化が必要である。これらの照射技術の変遷と、今後の照射技術の展望について述べる。

鳴井 實, 四竈樹男

## 6 NEWS

- 廃棄物処理や除染措置で政府方針
- 行政刷新会議、原子力を議論
- 原子力発電コスト8.9円/kWh
- 再発防止顧問会議が改革案
- 福島第一の中長期措置検討結果
- 東電が賠償額1兆109億円と試算
- 東電が事故調査報告
- 原子力機構が除染モデル実証へ
- 日本製鋼の海外受注堅調
- 学会会議が福島事故を総括
- 学会がベトナム原子力学会、原子力協会と協定締結
- 海外ニュース

## 解説シリーズ 第3回 ヒューリスティックな最適化手法とモデリング

### 57 遺伝的アルゴリズムと差分進化法

今回は差分進化法(Differential Evolution法)について紹介する。また、これと関連の深い遺伝的アルゴリズムについてもあわせて解説する。

相吉英太郎, 岡本 卓, 小林容子

## 会議報告

### 66 臨界安全国際会議 ICNC 2011 三好慶典

## ジャーナリストの視点

### 68 「原発を支えた双葉の人々」

桑折しのぶ

### 42 From Editors

### 67 新刊紹介 『Nuclear Hydrogen Production Handbook』 若林利男

### 69 会報 原子力関係会議案内、共催行事、人事公募、「原子力学生国際交流事業」平成24年度派遣学生募集要項、意見受付公告、英文論文誌(Vol.49, No. 2)目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

- 学会誌ホームページ

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

- WEB アンケート

学会誌記事の評価をお願いします。

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

# 「反原発・脱原発」論議のまやかし



日本保全学会 会長

宮 健三 (みや・けんぞう)

東京大学大学院原子力工学系博士課程修了，工学博士。ITER 国際諮問委員，慶應義塾大学大学院特別研究教授などを歴任。東京大学名誉教授。専門は原子炉機器工学，電磁構造工学，保全学。

福島原発事故の悲惨さと低放射能汚染は前代未聞の出来事であり，福島県の苦渋と避難民の方々のご苦勞は察して余りある。原子力に対し，ささやかな貢献を心がけてきた筆者にとっても，今回の事故は痛恨の極みである。

この不幸を教訓にするにはどうしたら良いか，事故後9か月を経た今，知恵を絞る時期にきている。事故から逃げるのではなく，苦渋の思いを抱きながらも，これを更なる国の発展につなげて行くという願いは国の将来を危ぶむ国民に共通のものだからである。

現在，福島原発事故を受けて反・脱原発の「空気」が吹き荒れ，風雲急を告げている。「こと」はエネルギー問題であるだけでなく国家の運命を総合的に決める問題でもあるので，事故を情緒的に捉えて国の将来を決めてはなるまい。資源に恵まれない日本，激動している国際情勢，産業の空洞化，といった諸課題を国際的視点に立って分析することが不可欠で，事故の悲惨さと国内に閉じた議論だけで原発廃止を決めるのは，国家百年の計を誤ることになる。

我々は戦後の歴史教育の中で日本の近代史についてまともな教育を受けていない。歴史の本質に接する機会がないため基軸となる判断基準を持ってない。また歴史認識が希薄なため判断基準が「状況倫理」に左右されやすく，反原発が国の衰退に繋がることさえ考えなくなっている。

基軸がないと判断は糸の切れた凧のようになる。そこで，我々は神の代わりに「絶対」という非現実的な概念を基軸にしてきた。安全神話という「絶対」は推進派にとって極楛となり，反対派はこれを利用してきた。原発では，事故故障はゼロ，放射能放出量もゼロ，でなければ気が済まない，という非常識。我々は長い間，この「絶対」にどれだけ翻弄されてきたことか，今はその極楛を解き放つ時である。

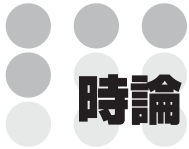
絶対の反対は「相対的把握」であって他と比較することである。「何故私は今ここにいるのか」というカントの有名な「Why 問題」は絶対問題で永久に解けない。社会通念上，意味のない「解けない問題」は解かなくてもよいという認識は重要である。この意味で福島問題もいつか相対化されるべきである。TMI 1号機は隣接の2号機が炉心溶融したにもかかわらず現在運転中。チェルノブイリ事故に見舞われたウクライナは現在15基を運転中で倍増計画を持つ。また，原発否定の論拠は自然エネルギーへの期待であったが，その主張の技術的信憑性が高いとも思われない。このような「問題の相対化」が社会通念になることを期待したい。

ところで，原発問題は「何故問題」，「ルーツ問題」，「落とし所問題」に分けるべきで，「原発を不要とする理由は何か」(何故問題)，また「その歴史的根拠は何か」(ルーツ問題)が体系的に分析されなければならない。このような思考過程を経て問題の解決(落とし所問題)に至る。反・脱原発の主張にはこのような体系的な検討は見られない。また，国家的危機管理意識も希薄。さらに，日本の将来に対する責任感も感じられない。

こう考えてくれば，福島事故以前を「正」と考え，事故後を「反」と捉え，それらの矛盾を止揚したのものとして「合」を導出するというヘーゲルの「弁証法」は示唆に富む。その結果，「合」は，事故から最大限の教訓を得，今までにない高い安全性を持った原子炉を開発し，以て世界に貢献し，我が国の未来を確実にすることではないだろうか。

(2011年 12月 9日 記)





## 「神の国意識」の崩壊



広瀬 弘忠(ひろせ・ひろただ)

安全・安心研究センター センター長  
東京女子大学名誉教授  
東京大学文学部心理学科卒。同大学助手。  
東京女子大学文理学部助教授を経て同大学  
教授。2011年3月に停年で退職。文学博士  
(東京大学)。  
安全・安心研究センター設立。著書に「人  
はなぜ逃げ遅れるのか」「巨大災害の世紀を  
生き抜く」(ともに集英社新書)など多数。

### 1. 日本は特別な国なのか

かつて、ある現職の総理大臣が、「日本は神の国であるぞということを国民の皆さんにしっかり承知して戴く……」と述べた。そんなに昔の話ではない。日本は特別な国だという国民の意思を代弁したものとも理解できる。

日本ほど安全な国はない、という言い方にも、世界の他の国とは違うのだという「特別意識」が表れている。現実には、日本が世界の中で際立って安全だという根拠はないにもかかわらずである。女性といわず子どもから高齢者までが深刻な被害に合う通り魔殺人事件や集団暴行、強盗殺人が頻発し、家庭内暴力、自殺者の激増など、日本社会がけっして安心できる状況でも環境ではないにもかかわらずである。

東日本大震災の折にも、被災者は忍耐強く、大混乱のなかでも礼儀正しい、ということ海外のメディアも日本のメディアも強調した。しかし、一般的には、災害で被災した国民に自粛ムードが強まるのは、日本だけの現象ではない。災害直後には、緊急対応を可能にする「非常時規範(Emergency Norm)」が自然に成立してくる。この規範の特徴は、運命共同体意識の自覚と野放図で利己的な行動の抑制である。禁欲的で愛他行動が顕著になる。ただ日本の場合には、結婚式も旅行もとりやめる、テレビコマーシャルも中止して、「大切なあなたへ」というタイトルの乳がん・子宮頸がんの検診を訴えるキャンペーンなどのACジャパン(旧公共広告機構)による広報だけを流すというきわめて極端なところまでいったところが特異なだけである。

例えば、2001年の全米同時多発テロ9・11直後のアメリカが、国をあげて喪に服していたことは、われわれもよく知る事実である。1年後の9・11にも、全米の教会で祈祷が捧げられ、ニューヨークのグラウンドゼロでは壮大な鎮魂の儀式が行われた。全米あげての犠牲者追悼が行われたのだ。ニューヨークでは、5番街の市立図書館前でクワイアが賛美歌をうたい、メトロポリタン美術館の館内ではオーケストラがレクイエムを演奏していた。ブロードウェイの劇場は休演した。ヨーロッパでも、

国家的な惨事があった場合には、服喪宣言をすることはよくあるようだ。危険を恐れて安心を求め、死者を悼んでひそやかに時を過ごすということに、民族や国民による違いがあるようには思えない。

### 2. 技術力への過信

1994年1月17日、アメリカ・カルフォルニアのロサンゼルス・ノースリッジでM6.7の直下型地震が発生した。死者は57人で、高速道路の橋桁が落ち、道路網は寸断された。現地を視察した日本の土木学者たちは、これは耐震化を十分に行わなかった結果で、日本の高速道路ではとうてい起らない人災だと断じたものである。ところがどうだろうか。そのまさに1年後の1995年1月17日には、M7.3の直下型地震による阪神・淡路大震災が発生した。名神高速道路は落下し、山陽新幹線も橋脚が倒壊した。日本の高速道路も最新鋭の鉄道も、ロサンゼルスのもと同じような脆弱性をもっていたことが実証されたのだ。

1979年3月のスリーマイル島(TMI)の原発事故のときも同様だった。日本の原子力関係者は、日本の原発では、あんなへまなことは絶対起らないと胸を張ったものである。アメリカではこのTMI事故以降、原発に対する世論が急激に厳しくなったが、日本では、その影響はだいぶ緩和されたものになっていた。原子力関係者の自信が、市民の反原発への緩衝剤になっていたのかもしれない。1986年4月のチェルノブイリ原発事故のときにも、日本の原子力関係者には同様の反応があった。ソ連(当時)の独自開発による原子炉で、黒鉛を減速材に使っていたこと自体が問題で、もともと事故に対して脆弱だった、あるいは運転操作員の資質と管理体制が問題などという、批評家的議論が行われ、日本では決してあんなことは起らない、という結論が嘲笑を込めて語られていた。

### 3. 原発無謬性の心理的根拠

日本の原発の無謬性を多くの原子力関係者が信じるよ

うになった理由には、心理学的な説明が可能である。国策として原子力発電を押し進めていくためには、国民に安全性を納得してもらわなくてはならない。国も原子力関係者も説得者としての役割を演じてきたのである。熱心に説得すればするほど、説得は自らにも向けられる。良き説得者であるためには、説得内容を信じることが必要である。無謬神話は、無謬性を説得する過程で形成されていったものとして理解できる。そのような神話の培地は、日本人は優秀だ、アメリカヤソ連(当時)で起ったような不手際は起るはずがない、という選民的なメンタリティである。

#### 4. 福島第1原発事故は人災

福島第1原子力発電所が起こしたレベル7の過酷事故の原因を全て巨大津波に負わせて、天為のなせるわざと考えるのは間違いだ。津波が背後から押し、人為が前から引き倒した結果として事故が発生したと考えるべきだ。非常用ディーゼル発電機の配置上のミスや、ベント、注水の遅れについてはこれまで指摘されてきたところだ。1号機の非常用復水器はバッテリーの直流電源を失うと弁が閉じること、圧力容器の水位計は誤表示の可能性があることなどに関しては、知識も訓練もなかったと言われている。

私たちは東日本大震災の3か月後に、全国の15歳から79歳までの男女1,200人に調査員が面接し調査票への記入を依頼して後に回収する方法(面接留置調査法)で、アンケート調査を行った。この調査の中で、東日本大震災で起きた「地震」「津波」「原発災害」のうち、最も深刻な被害を与えた災害は何か、と尋ねている。結果は、原発災害だと答えた人が55.4%、津波が24.0%、地震が19.1%、無回答が1.5%であった。日本人の過半に及ぶ人々が、福島第1原子力発電所がもたらした原子力災害は、今回の大災害の中心に位置していると考えている。そこで、原発災害が最も深刻な災害だと答えた55.4%の人々に、何が原発災害の原因だと思うか、という質問をしたのである。回答は、「東京電力の原発に対する安全管理」が第1で、以下「津波」「政府の原発に対する監督・管理」と続く。つまり、これらの人々は、今回の原発災害を人為災害であると見ているのである。津波は、はからずも福島第1原子力発電所が本来的に持っていた脆弱性を露わにしたという認識である。

#### 5. 原子力災害との共存の覚悟

もし、我々の社会が原子力エネルギーを将来とも利用しようとするならば、原発事故との共存を考えなければならない。私はものごとに対して、楽観的なスタンスを持つことには基本的に賛成である。しかし、将来への具体的なシナリオもなしに、情緒だけをその成分とする期待にのみ基づいて行動することには反対である。それは、やがて脆くも崩れ去る新しい神話を作り出す作業にほかならないからである。

ニューヨークタイムズの記事によれば、原発災害以後、福島県では6万人以上が県外に去っている。その多くは再び戻ってこないかもしれない。一方、チェルノブイリ事故では、30万人以上の人々が汚染地を去っている。住む家を失い、日常生活や経済活動、医療サービス、行政、交通、通信、ライフラインなどのインフラが破壊されたところには、帰るすべがないのである。これは原子力災害に限らない。生活できないところに戻るには相当の勇気がある。例えば2005年8月のハリケーン・カトリーナで水没したニューオーリンズでは、20万人もの人が戻って来ないのである。仕事もない、病気になっても治療する病院もないところに帰ってくることができる人は、一体どのような人々なのか。

#### 6. 除染神話の創成

私は除染を積極的に進めるのは良いことだと考える。だが、かりに年間20ミリシーベルトを安全規準値として、国家予算を大量投入して除染し、2年で年間10ミリシーベルト、次の段階で5ミリシーベルトが達成されたとしよう。いったい誰が帰還し生活するだろうか。莫大なコストをかけて計画が実現したとして、政府は、そこで誰がどのような生活を営むことができるか把握しているのだろうか。多額の国費を使って、除染神話を作っているにすぎないのではないか。国は汚染された広範囲の土地を積極的に買い上げまたは借り上げ、住民に対する十分な補償をすることで、新しい場所で新しい生活を営めるよう支援するのが最も賢明な施策である。全ての大災害は非可逆的变化をもたらす。特に、原子力災害による深刻な被害を被った地域を旧来の姿に戻すことは不可能だと知るべきだ。

(2011年12月20日 記)



## 津波被害の教訓—学会活動の現場から



当麻 純一(とうま・じゅんいち)

(財)電力中央研究所 参事  
知的財産センター所長

1954年生まれ。早稲田大学大学院建設工学修士卒。博士(工学)。専門は、地盤耐震工学。土木学会地震工学委員会委員長(平成21年, 22年), 土木学会原子力土木委員会委員長(平成23年~)。

### はじめに

筆者の属する土木学会原子力土木委員会では原子力発電所の地震・津波安全に関する調査研究を行っており、近年では活断層評価技術、基礎地盤・周辺斜面の安定性評価技術、屋外重要土木構造物の構造健全性評価技術、津波評価技術などを課題として取り上げてきている。このため、筆者は今回の地震・津波に際して、委員会の既往の調査研究成果がどのように影響したか、学会として現在および今後なすべきことは何か、という問題意識で委員会内外の多くの方と議論を進めてきている。

### 明暗を分けた津波対策

震災後、土木学会による調査研究の一環として東北電力女川原子力発電所を訪問する機会を得た。すでに報いられているように、主要設備は整地レベルである O.P.+14.8 m(O.P.+とは女川原子力発電所工事用基準面からの高さ。以下は単に+と記す。)に設置されていた。1号機の設置許可申請は昭和45年であるが、昭和43年から55年にかけて、東北電力では外部有識者による専門委員会を設け、歴史的な津波の記録や学術論文等を踏まえた議論を行った上で、この高さが妥当と判断した。その後も新しい知見や技術を取り入れ、考古学、堆積学による津波痕跡調査、数値シミュレーション解析などにより、この高さで津波に対する安全性は確保できることを確認してきた経緯がある。

現地で私が大きな関心をもったのは、取水設備から原子炉建屋附属棟への海水の流入である。これは、1号機よりも海側にある2号機の海水ポンプ室内に追加設置した津波対策(引き波)用の水位計の上蓋が津波(押し波)で開口したことにより、海水が開口部を通して配管・ケーブル洞道などを伝わり、配管の貫通部から附属棟内に侵入し非常用ディーゼル発電機の補機冷却水ポンプ1系統を水没させ、その結果、当該の発電機が起動不可になったというものである。

1号機設置許可(昭和45年)当時の判断による敷地高さの確保によって今般の津波(潮位計の観測で約13 m)の敷地内への大量侵入を防げたのは対策の良好事例として

多くの識者が認めるところであるが、取水設備から原子炉建屋附属棟への海水の流入に関して、追加設置した水位計が弱点となった。これは、津波の押し波に対して、水位計の設置場所および止水処理が十分でなかったものであり、機器系(レベル計の上蓋)からの浸水を発端として、土木系(海水ポンプ室)と建築系(原子炉建屋附属棟)との境界部を経由してこの建屋内の機器系(補機冷却水ポンプ)に波及的影響を及ぼした点は、水平展開すべき大きな教訓と言える。

女川発電所では緊急安全対策の工事が進められており、土木系では、前記の整地レベル(+13.8 m。地殻変動により敷地全体が約1 m沈降した)に高さ約3 mの防潮堤を600 mにわたって築いて、合計約17 mの高さによる防護で、今回程度の津波の来襲に備えるものである。この防潮堤はセメント改良土により築造される計画で、説明によれば、基準地震動に基づいた地震力に対して安定であることを計画段階で確認しているとのことである。非常用ポンプエリアへの浸水を防ぐため、高さ2 mのポリカーボネイト製の防潮壁を設置する計画のあることも聞いた。前記の水位モニタからの海水侵入に対する措置(蓋の固定)はすでになされていた。土木の視点からのみではあるが、徹底的な津波対策が発電所内でなされているのを実際に見ることができたのはよい機会であった。

現在、各原子力発電所においてのストレステスト結果が出されつつある。検討の前提や手法の妥当性、安全の評価基準や再稼働条件との関係が不明など批判的な議論が多いが、ストレステストを念頭においた緊急安全対策を実際に見聞きし、ストレステストがシステム安全上の弱点を潰すことに役立っていることは確信した。

### 津波高さ推計手法の標準化

福島第一発電所も女川発電所も、設置許可申請時には個々にはその時点での技術により津波水位の推計がなされていたが、体系化された津波シミュレーション手法により、統一性をもった評価検討が実施される環境が整ったのは、土木学会原子力土木委員会津波評価部会による



「原子力発電所の津波評価技術」が平成14年2月に公表されてからである。各サイトはこれに基づき、設置許可の安全審査や、バックチェックがなされてきている。

土木学会の津波評価技術は、原子力施設的设计津波の設定として、断層運動が直接の原因で生じる津波による水位変化を数値計算で求める標準的な方法を体系化したものである。実際に津波水位を推計するにはこの利用者が計算条件を設定して行う。当時、いや現在でもこれに代わる技術標準のマニュアルはなく、公表以降、原子力発電所の津波安全を事業者が検討する際のよりどころとされてきている。

この津波評価技術は、これに先立つ政府報告書「地域防災計画における津波対策強化の手引き(国土庁ほか関係7省庁、平成9年3月)」の公表を踏まえた調査研究の進展に基づいている。すなわち、それ以前では既往最大津波を対象津波としていたが、それを基本としつつ、別途想定し得る最大規模の地震津波を検討し、既往最大津波との比較検討を行った上で、常に安全側の発想から対象津波を選定する、という内容であった。これは地震観測技術の進歩に伴い、空白域の存在が明らかになるなど、将来起こりうる地震や津波を過去の例に縛られることなく想定することが可能になってきていることを考慮したものであり、画期的な方針提示であったと言える。

土木学会の津波評価技術は、上記7省庁の「手引き」では細部に触れられていなかった「津波波源の設定」と「数値計算」について集中的な検討を行い、事業者の実務に役立つようにマニュアルとしての体系化したものである。日本海溝のように、プレート境界付近に想定される地震に伴う津波の波源に対しては、過去に起こった最大級の地震津波に加え、念のため「将来発生することを否定できない地震に伴う津波を評価対象とする」との方針が明記されている。

この参考資料には、この海域で繰り返し起こっている既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの規模(マグニチュード)と同等以上の規模の値が領域ごとに示された。ただし、この時期、津波堆積物による貞観地震(869年)の評価が学術的に発表され出していた頃であるが、津波波源モデルとしてこの津波評価技術に取り入れられるには、まだ至らなかった。

### 新知見の反映

震災前の時点まで、東京電力では福島第一発電所の津波高さに関して、設置許可時(+3.122 m)、その後、土木学会手法による推計(+5.4~+6.1 m)、地震調査研究推進本部(以下、地震本部)の「1896年明治三陸地震級の地震が日本海溝沿いのどこでも起こる」という見解(平成14年7月)を採用した推計(+8.4~+10.2 m)というように、津波の評価を行ってきている。さらに、貞観津

波に関する研究論文を参考にしたシミュレーションからは+7.8~+8.9 m程度の津波高さを推計している。また、東北電力では女川発電所の津波高さとして、設置許可時(1号機+3 m程度、2,3号機+9.1 m)と、その後、土木学会手法による推計(+13.6 m)とがなされた。

いずれも、原子力安全・保安院によるバックチェックが進行中であった。津波水位の推計において、地震・津波に関する新知見が審査にどのように活かされるかは大きな関心事であるが、バックチェックの妥当性の確認がなされる前に今般の震災があった。

東北地方太平洋沖地震自体は予測できなかったが、少なくとも「三陸沖から房総沖にかけての日本海溝のどこでも1896年明治三陸地震級の津波地震が発生する」との地震本部の見解が津波評価技術に反映されていれば、今般の被害は大幅に軽減されたはずであるという批判が震災後にある。

これは、改訂に数年以上を要するような学会技術標準に、自然科学の最新知見をどのように取り込むかという問題提起とも受け止める。利用者の裁量の余地を多くすると、異なる利用者間でのクオリティの差異が生じやすい。逆に、利用者の裁量の余地を少なくすると、均質化は期待できるが、マニュアル技術者を産む土壤となる。これは、科学技術と社会的合意形成に係る基本問題であり、津波の分野だけでなく、原子力安全に関わる各分野においての重要な課題と考える。

### 異分野間の一層の交流を

土木学会では、継続的に審議を重ね、平成21年には「確率論的津波ハザード解析の方法」を委員会資料として取りまとめ、その後、若干の修正を経て平成23年9月にホームページ上で全文を公開した。この手法においては、地震本部の「1896年明治三陸地震タイプの地震が日本海溝沿いのどこでも起こる」というケースもロジックツリーの中に取り入れられている。また、再現期間の長い貞観地震タイプも対象地震として扱っている。すなわち、既往地震・津波を基本としつつ、地震本部や学術研究での新たな知見を考慮に取り入れての検討を継続してきている。「確率論的津波ハザード解析の方法」は、津波の確率論的リスク評価に関する日本原子力学会標準に反映されてもいる。

地震・津波に係る不確かさや新知見を原子力安全の技術体系のなかでどのように扱うか、原子力工学、地震学、津波工学、土木工学などそれぞれのコミュニティは他方の技術動向に常に注意を払い、原子力発電所システムの安全という観点から一層の交流をすることが、いま求められている。

(2011年12月19日記)



このコーナーは各機関および会員からの情報をもとに編集しています。お近くの編集委員(目次欄掲載)または編集委員会 hensyu@aesj.or.jp まで情報をお寄せ下さい。資料提供元の記載のない記事は、編集委員会がまとめたものです。

## 政府、廃棄物処理や除染措置で基本方針決定

政府は2011年11月11日の閣議で、「放射性物質汚染対処特別措置法」に基づく基本方針を決定した。自然被ばく線量および医療被ばく線量を除いた「追加被ばく線量が年間20mSv以上の地域は、当該地域を段階的かつ迅速に縮小することを目指す。また、追加被ばく線量が年間20mSv未満の地域については、(1)長期的な目標として追加被ばく線量が年間1mSv以下、(2)13年8月までの2年間で、一般公衆の年間追加被ばく線量を11年8月

末と比べて、放射性物質の物理的減衰等を含めて約50%減少を実現、(3)子どもについては、同60%減少した状態を実現——としている。

このほか、国の指示で立ち入り制限されている地域などを「除染特別地域」に、追加被ばく線量が1mSv以上となる地域を「汚染状況重点調査地域」として指定する。

## 行政刷新会議、原子力・エネルギーについて議論

行政刷新会議の提言型政策仕分けが11月20日から23日まで都内で行われた。これまで実施してきた事業仕分けの深化をねらうもの。初日は、原子力・エネルギー等について議論した。

原子力関係研究開発については、原子力機構の人員費および管理費を削減し、透明で公正かつ競争性のあるガバナンスに向けた見直しを求めた。

高速増殖炉の技術開発については、12年夏のエネルギー・環境戦略で決定されるが、「もんじゅ」を用いた高速増殖炉研究開発の存続の是非を含め、従来の体制・計画を抜本的に見直し、国民が納得できる結論を出すべきとした。ITER計画は、国際交渉を進めて更なる日本の負担削減の努力を続けていくよう提言した。

原子力発電所の立地対策等については、周辺地域整備

資金の取り崩しや資金規模の縮減、電源立地地域対策交付金の事故対策や防災・安全対策への充当などを検討すべき課題として挙げた。一方、最終処分積立金、再処理積立金については、最終処分・再処理等の目的に真に合致する事業のために適切に管理・使用し、取り崩した積立金の使途の情報開示徹底を求めた。原子力発電環境整備機構の広報事業や地層処分実規模設備整備事業は効果に直結しないとして見直しを求めた。

さらに、エネルギー特区制度の存廃も含めて徹底した見直しに踏み出し、研究開発体制のガバナンス問題の改善、省庁の縦割りを超えた一元管理の仕組みの導入等も検討すべきとした。まとめとして、今回の議論を踏まえた提言を必ず実現するため、関係閣僚間でしっかりと議論をする場を設けることとした。

## 原子力発電コスト8.9円/kWh、好条件の風力、地熱と同等

政府のエネルギー・環境会議の「コスト等検証委員会」(委員長=石田勝之・内閣府副大臣)の第7回会合が12月13日、東京・霞が関の第4合同庁舎で開かれ、原子力発電をはじめとする各電源別発電コストを試算した報告書案を提示し、議論した。原子力発電は福島第一原子力発電所事故を踏まえ炉心溶融事故が発生する可能性も勘案。従来試算項目に加え、新たに社会的費用として(1)事故リスク対応費用、(2)政府関連予算など政策経費を加えて、1kWh当たり8.9円と試算した。04年の試算5.9円に比べて約51%増加したものの、発電条件の良い風力や地熱と同等か、石炭火力やLNG火力と肩を並べる程度にとどまった。

試算では電源ごとにモデルプラントを設定。原子力発

電所の場合は直近7年間に稼働した4発電所の平均値として、出力120万kW、建設費4,200億円の数値を採用。割引率3%、設備利用率70%、稼働年数40年の条件では、1kWh当たり8.9円となった。ただしこれは、福島事故が完全には収束していないため、除染費用など損害額も今後も増大する可能性があるとして、「下限の数字」としている。

内訳は、資本費2.5円(04年試算比、0.2円増)、運転維持費3.1円(同1.0円増)、核燃料サイクル費用1.4円(同0.1円減)、今回これに加えて、福島事故後の追加的安全対策0.2円、政策経費1.1円、事故リスク対応費用0.5円以上」となっている。



## 再発防止顧問会議，改革に向けての7原則，「透明性」「国際性」を追加

政府の「原子力事故再発防止顧問会議」(座長＝松浦祥次郎・元原子力安全委員長)は11月22日，原子力安全規制改革に向けた提言の骨子を示し議論した。8月の政府による改革基本方針に掲げられた「規制と利用の分離」，「一元化」，「危機管理」，「人材の育成」，「新安全規制」の5原則に加え，「透明性」と「国際性」も合わせた「改革に向けての7原則」に基づき，進めるべき具体的対応策，中長期的課題を座長試算としてまとめたもの。

5原則のポイントとしては「組織の判断が最新の科学的知見に従って客観的に行われることを担保すること」を指摘し，政府に対し，今後の具体的な制度設計に当たって，留意すべき事項を述べた。また顧問会議として，迅速かつ正確な情報公開を通じた「透明性」の確保により国民の信頼性を醸成すること，「国際性」のある組織・人材・規制を確立し，原子力安全に関する国際協力体制の構築をリードしていくことを掲げている。ことに，「透明性」に関して，国民の安全に直結する情報は，「どのような理由があっても，速やかに公開すべき」と強調している。

2012年4月の新設を目指す「原子力安全庁」の独立性確保の要件としては，新組織下に置かれる「原子力安全審

議会」の「第三者性」とともに，自身で独立した判断が行えるよう仕組みを整え，基礎となる技術的能力を備えることをあげた。現行の「ダブルチェック」に関し，「一面形骸化し，同時に規制機関とチェック機関との役割分担の不明さを招いた」との反省に立ち，審議会の性質としては個別の許認可等には関与せず，安全規制の実効性や改善についてチェックし，主務大臣らに勧告する権限を与えることが適当との考えを述べている。また，新組織を環境省の下に設置する方向については，同省がこれまで地球温暖化対策を推進する観点から，「原子力政策に依存していた事実は受け止めなければならない」としながらも，今回の事故に伴う放射能汚染対策への最前線での取組や，環境汚染に対する規制行政としての経験・実績などから，原子力安全行政を担う十分な意義があるとしている。

さらに，安全規制の実効性向上を目指し，新知見や新技術を既存の施設，その運用に確実に反映する法的仕組み「バックフィット対策」や，原子炉の安全・リスクの評価・公表を通じた安全確保の取組の「見える化」，シビアアクシデント対策の法制化など，新しい規制体制への変換にも期待をかけている。

## 原子力委員会，福島第一の中長期措置検討結果を決定

原子力委員会は12月13日，福島第一原子力発電所における中長期措置に関する検討結果について承認，決定した。委員会には中長期措置検討専門部会の部会長を務めた山名元・京都大学大学院教授が出席し，報告書の内容を説明した。

報告書では，今後の措置として，(1)国が廃止措置完了まで責任を持って安全確保に向けた制度や体制の整備および事業者の監督・指導を行い，国民に対しわかりやすく説明を行う，(2)事業者は放射線防護など万全な体制を整備し，早い段階から安全規制機関と十分な協議を行って取組を計画する，(3)国は保障措置についてIAEA等の関係機関と十分調整する，(4)国は透明性確保のため第三

者で構成される機関を設置し，取組状況を評価する仕組みを構築する，(5)燃料デブリや放射性廃棄物の性状分析や処理試験等の実施に必要な設備を福島第一原子力発電所の近傍に設置する，(6)現場を模擬したモックアップ施設を現場付近に整備する，(7)事故原因や中長期措置の技術的内容，現場の調査結果など詳細に記録して広く公開し，今後の原子力安全確保のため利用できるようにする，(8)将来の地域発展の核となるような産業の育成および雇用創出や人材育成に貢献することを念頭に中長期措置実施とその研究開発に取り組む——ことを提言している。

## 東電が特別事業計画，要賠償額1兆109億円と試算

東京電力と原子力損害賠償支援機構は11月4日，福島原子力発電所事故に伴う被災者への迅速な賠償と，その実現のための経営改革に向けた「緊急特別事業計画」を公表した。

今回の特別事業計画では，賠償請求手続きの改善等や確実な賠償金支払いにより安心を確保すると同時に，経営合理化の具体的道筋を明示することを当面の課題とし

て取りまとめている。今後の東京電力の経営のあり方については，中長期的視点から抜本的改革に向けて見直しを図り，来春をめどに，同計画を改定した「総合特別事業計画」として示されることとなった。経営改革に当たっては，政府の経営・財務調査委員会の報告書で示された「10年間で2兆5,455億円」を超えるコスト削減を達成することとしている。

損害賠償に関しては、国の審査会が今夏に示した中間指針の基準に基づき、現時点で合理性をもって確実に見

込まれる要賠償額を1兆109億800万円と見通した。

## 東電が事故調査報告、当事者として事実を整理

東京電力は12月2日、福島原子力発電所事故の調査結果を当事者として初めて中間報告書の形で公表した。社内に調査委員会を設置し、事故の当事者として、これまでに得られた事実を整理、評価・検証するとともに、主に設備面の再発防止対策を検討し、取りまとめたもの。

今回の中間報告では、既に、IAEAに対する日本政府としての報告書にも盛り込まれた事故の発端となった大地震・津波の概況、事態進展の経緯・対応状況に加え、それらの分析を通じて導き出された技術的課題を踏まえ、炉心損傷防止のための対応方針、今後の原子力発電所の運転に活かすべき具体的な対策を取りまとめている。

大地震発生後に来襲した史上まれな津波により、福島第一発電所は主要建屋設置エリアの全域が浸水、1～6号機の交流電源は、6号機の非常用ディーゼル発電機1

台を除きすべて喪失し、1, 2, 4号機では、交流電源喪失時に監視機能を確保する直流電源盤も被水、さらに、原子炉の除熱や各設備を冷却するために必要な冷却系もすべて被水し使用不可となったなどと、津波による設備の直接被害の状況を説明している。事故進展を踏まえた重要な機能の喪失に至る要因の相関を整理した上で、中間報告では、「事故は津波による浸水を起因として、多重の安全機能を同時に喪失したことによって発生しており、『長時間に及ぶ全交流電源と直流電源の同時喪失』と『長時間に及ぶ非常用海水系の除熱機能の喪失』がその要因」と分析した。

東京電力では今後も、放射性物質の放出、人的リソース、情報公開等について、調査を継続し、順次公表していく考え。

## 原子力機構が除染モデル実証へ

日本原子力研究開発機構は11月7日、除染モデル実証事業の選考結果を発表した。福島県の警戒区域等に指定されている12市町村での年間放射線量率の低減化を図るため、安全、効率的かつ効果的な除染モデル実証を行う方策について幅広く関係者からの参画を求める取組み。4市町村ごとのA(南相馬市他)、B(田村市他)、C(広野町他)のグループに分かれる。

選定結果(代表企業名のみ)は、Aが大成建設、Bが鹿

島建設・日立プラントテクノロジー・三井住友建設、Cが大林組。

また同機構は、今後の除染作業に活用し得る優れた技術の有効性を評価するため、10月に除染技術に関する公募を実施し、11月9日に305件の応募の中から25件の技術提案を選定した。各応募提案は2,000万円程度を事業予算として見込んでおり、計5億円規模。

## 日本製鋼の海外からの大型機材受注堅調、福島事故後も500億円受注

大型原子力機材の製造大手、日本製鋼所(佐藤育男社長)が発表した2011年度決算見通しによると、2011年3月の福島事故後も、フランス、中国など海外からの受注を中心に約500億円の新規受注があったことが明らかとなった。国内の原子力論議をよそに、事故後も海外から原子炉圧力容器や蒸気発生器などの実需が変らずに入っていることが浮き彫りとなった。

日本製鋼所は11月18日、投資家向けの決算説明会を開いた。今期12年3月期の売上高は2,270億円(前期比6.6%増)と当初予想を若干上回った。営業利益は当初予想よりは25億円多いが、220億円と同22.5%減と大幅に予想

を下方修正した。営業利益率も前期13.3%だったものが、9.7%にまで低下する見込み。

電力・原子力の受注済み案件のうち、製造未着手でかつ長期にわたって着手が見込めないと判断した案件約118億円分を受注残から差し引いたが、来期以降は、計画通り進むものと見ている。それでも今期の新規受注は498億円となる見込み。結果、11年度末の受注残高は計804億円で、うち6割程度の約500億が福島事故以降の新規受注分であることを明らかにした。フランス、中国からの新規受注が多いという。

## 学術会議が福島事故を総括 新知見の反映に後手

日本学術会議(会長=大西隆・東京大学大学院教授)は

11月26日、東京・港区の講堂でシンポジウム「東京電力

福島原子力発電所事故への科学者の役割と責任について」を開催した。約220名が参加した。

事故状況の説明や学術会議のこれまでの対応説明の後、原子力、化学、土木、機械、放射線医学、経済学の各分野から報告された。

原子力学会の対応を説明した田中知・同学会長は、「世界標準が日本になぜ取り入れられていなかったのか」と問題を投げかけ、(1)新しい知見を安全基準に反映させるプロセスが整備されていない、(2)過去に安全と認定したものの安全性をさらに向上させる改善への抵抗が大きい——点を指摘。「事故時に蓄積された知見を当局等に提示し速やかに実行せしめることはできなかったのか？」

との自問自答に対しては、(1)学術界として当局に提言できるシステム整備が十分でない、(2)蓄積された知見を迅速に提供できる情報整理が十分でない——などと問題点を示した。

また吉川弘之・元日本学術会議会長(元東京大学総長)は「可能性を提案する科学者と、政治家の意志決定に影響を与える科学者の役割が必要で、その間の連続性をつくらなければならないか、また誰がそれをやるのかが課題だ」とし、いずれにしても福島の復興に科学者がどう貢献できるかが問われている、と総括した。

(以上の資料提供は日本原子力産業協会)

## ベトナム原子力学会・ベトナム原子力協会と相互協力協定締結

日本原子力学会は2011年12月26日、ベトナム原子力学会(Vietnamese Nuclear Society)ならびにベトナム原子力協会(Vietnamese Atomic Energy Association)と相互協力協定を締結しました。

この協定は、両国間の学術的な交流および協力関係を推進することを目的とし、積極的な人的交流や情報交換を図ろうとするもので、本学会としてはベトナムが10カ国目の締結国となります。

協定書の署名は、田中会長、T.D.Thiep VNS 会長、V.H.Tan VAEA 副会長により、ベトナム・ハノイ市で行われました。



### 海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

#### [国際]

## 仏露が原子力協力で共同宣言、第3世代炉を輸出基準に

フランスとロシアの両国政府は2011年11月18日、原子力協力に関する共同宣言を公表した。既存炉のみならず、今後新たに建設する原子炉についても福島事故を教訓とした安全確保の優先を共通誓約とするほか、静的安全性を備えた第3世代炉を新規輸出炉の基準技術としなければならないと明言。ナトリウム冷却高速炉など第4世代炉についても、双方の研究機関が協力して開発ロードマップを策定していく。来春に大統領選挙を控えたフランスでは、野党が既存炉の半数を止めるなどの脱原子力政策を打ち出しているが、同国の現政権は「可能な限り高い安全性を追求する原子力政策こそ最も責任ある判断」との姿勢を崩していない。

同宣言は第16回仏露政府間協議の場で決定されたもの

で、両国は5件の商業契約と原子力を含めた7件の合意文書に調印。幅広い分野で協力を促進する方針だ。原子力共同宣言にはフランスのF.フィヨン首相とロシアのV.プーチン首相が署名しており、「福島事故後の世界で両国の原子力協力は重要なステップだ」と強調している。

両国はまず、今後のエネルギー需要を持続可能な方法で賄い、温暖化防止に責任ある態度で臨むには原子力産業の発展が重要任務であると再確認。その競争力、供給保証性、低炭素性などの面で有利であることを共通認識とした。

また原子力政策においては安全確保を最優先事項とし、国際原子力機関(IAEA)が9月に採択した安全性向上のための行動計画案を歓迎。福島事故によってこの目的に向けた国際連携強化の必要性が実証されたと指摘した。同事故の教訓を受け入れつつ、両国は世界中で最高レベルの安全性を追求していくことで意見が一致。そうした要求を満たせる第3世代炉を、新たに輸出する基準設計としなければならないとしている。



[EU]

## 「共通の安全基準必要」、ストレス テスト中間報告

欧州委員会(EC)は11月24日、福島事故から想定される事象への安全裕度再評価のため、欧州連合(EU)域内の商業炉143基で実施したストレステストの中間報告書を公表した。

稼働中の原子炉を有する14か国の規制当局が、9月中旬までにECに提出した進捗状況を取りまとめたもの。原子力安全の共通基準を定める新たなEU立法の制定など、域内安全規制の枠組で一層強化する余地がある政策分野を特定している。

今後は、各国が年末までに提出する結果報告を2012年1月から4月までピアレビューする。6月末をめどに最終報告書を欧州理事会に提出する計画だが、原子炉の立地から操業まで、EUレベルで共通の基本原則と安全要件、最小限の技術的基準を構想していく方針だ。

中間報告書では稼働中原子炉を持つEU加盟14か国に加えて、2009年末に最後の原子炉を閉鎖したリトアニア、および近隣のウクライナとスイスも同様のレポートをECに提供。独自の国内原子炉の安全性再評価を実施したロシアも、EUのピアレビュー参加には関心を示している。

ストレステストから得られた最初の教訓として、ECはさらなる改善活動が必要な分野を以下のように定めた。すなわち、(1)新たなEU立法によって、原子炉の立地から設計・建設、操業にいたるまで共通の基準を設定する。また、その条項に従って各国の原子力規制当局の独立性を高める、(2)加盟各国は国境を越えた原子力リスク管理計画を策定し、緊急時に一層の備えを確保するとともに、それぞれの対応行動を調整する、(3)原子力賠償について欧州としての対応を取り、被害者は居住国に関係なく同等の補償を得ることとする、(4)EUの研究プログラムを原子力安全に集中させる——である。

全体的な印象としてECは「共通の手順で各国が実施合意したテストだったが、実際は書式も詳細さの度合いもバラバラだった」と指摘。特に地震リスクについては、国ごとに様々な方法で評価されていたという。

このため、ECは最終報告書の作成に向けて、地震や洪水、極端な気象条件、電源喪失、冷却機能の喪失等に対する安全裕度の評価には詳細な共通体系を用いることで各国規制当局とも合意。炉心溶融など深刻な損傷を伴う過酷事故の管理については、特別に詳細な一章を設けるとしている。

[米国]

## ノースアナ原発が運転を再開

2011年8月の地震で停止していた米国のノースアナ原子力発電所(90万kW級PWR2基)が11月11日、米原子力規制委員会(NRC)の許可を得て運転を再開した。2か月以上をかけた詳細な点検と試験、耐震解析等により、地震は同発電所の機能を損なわなかったと実証されたもの。

同発電所を所有するドミニオン社役員およびNRC検査官が見守る中、中央制御室の運転員は1号機の起動プロセスを開始した。ドミニオン社では同炉の安全な稼働を確認した後、2号機でも同様のプロセスを実施する計画で、両炉が定格出力に達するには10日ほどかかるとしている。

同原発の2基は8月23日の午後2時頃、マグニチュード5.8の地震により自動停止した。一時、外部電源を喪失したものの、バックアップ電源により安全系は通常通り機能。深刻な機器の損傷や外部への放射能漏れはなかった。

NRC検査チームの10月3日の報告書によると、地震による揺れは同発電所の設計認可レベルを超えていたが、安全系の機能や機器、各種システムともに問題は認められなかった。また、同月中旬まで両炉の運転再開に向けて必要な措置を審査していた別チームは21日に報告書をNRC委員達に提出。これらに関する公聴会を経て、委員は両炉の運転再開は可能との結論に達していた。

[ベルギー]

## 連立政権、脱原子力法に従い2015年 から段階的に閉鎖

ベルギーで稼働中の原子炉、全7基を操業しているエレクトラベル社の10月31日付けの発表によると、同国の連立政権は2003年に成立した脱原子力法に従って国内原子炉の運転期間を40年までとし、15年から段階的に閉鎖していくことを10月30日付けで合意決定した。前政権が09年に条件付きで約束した古い原子炉3基の運転期間10年延長を覆す内容。同社および親会社のGDFスエズ社は、差し当たり廃止措置の準備チームを設置する一方で、政府が今後打ち出す政策の詳細を注意深く検討し、09年の議定書で約束された権利を留保できるよう努めていく考えだ。

ベルギーでは03年、緑の党政権が2025年までに脱原子力する政策を打ち立てた。しかし代替エネルギーの手当がつかず、前政権は09年10月に専門家グループによる勸

告を受け、2015年に40年の運転期限を迎えるドール1, 2号機とチアンジュ1号機の運転期間を10年延長。その代わりに、エレクトラベル社が年間2億150万～2億4,500万ユーロの拠出金を2010年～14年まで納めることで合意していた。

その後、前政権は2010年4月に内閣総辞職に追い込まれ、同年6月に総選挙を実施。その結果、北部のオランダ語系の政党と南部の仏語系政党が激しく対立し、運転期間延長法を正式に制定し得ないまま、1年以上も組閣交渉を続けていた。主要8政党の交渉人達は10月半ばにようやく、新たな国家改革案で合意したと伝えられている。

エレクトラベル社によると、今回の決定は古い原子炉3基の閉鎖時期を1～3年程度延期し、その間に設備容量の不足分を補うための投資の実施を念頭に置いている。同社は、そうした発想は原子力部門特有の安全上の制約や産業界の現状を考慮しておらず、すべてが非現実的だと非難した。

政府決定に従い廃止措置の準備チームを設置した後は、運転期間延長用の投資額約10億ユーロを今後の電力供給保証のために転換可能か否か評価したいとしている。

なお、ベルギーでは現在、総発電電力量の約51%を原子力で供給。不足電源設備を補う財源が必要となるため、現政権は、古い炉の運転期間延長の見返りに前政権が要求した拠出金に替えて、年間10億ユーロの税金徴収を検討中と伝えられており、今後の動きが注目されている。

### [サウジアラビア]

## 韓国と原子力協力協定を締結

サウジアラビア国営通信によると、同国政府は11月15日、韓国と原子力平和利用分野における二国間協力協定を締結した。

将来の同国初の原子力発電所建設に向けた法的枠組となるもので、両国間の科学技術・経済面での協力促進のほか、安全確保と環境保護を最優先とした原子力導入協力が目的だ。

具体的な協力分野は、原子力発電炉および研究炉の設計・建設、操業、メンテナンスに加えて、安全性およびセキュリティの確保と緊急時対策、人材育成など。工業や農業、医療で利用可能な放射性同位元素の生産も含ま

れるとしている。

協定への調印は、韓国外交通商部の金星煥大臣と、サウジが2010年、設立した「アブドラ国王・原子力および再生可能エネルギー都市(KA-CARE)」のH.ヤマニ総裁が行った。サウジでは急速な人口増加と経済規模の拡大に伴い、エネルギー需要が年率8%で増加。同総裁によると、この需要量は今後20年間で3倍に膨れあがる見込みで、安全で持続可能かつクリーンな発電が可能な原子力と再生可能エネルギーの開発は重要な課題だ。また、原油の節約にもつながるため、今後も世界の原油市場に継続して原油供給が可能になるとしている。

### [台湾]

## 既存炉の運転認可は延長せず

台湾の馬英九総統は11月3日に今後の新たな原子力政策を発表し、現在運転中の原子炉で40年の運転認可が切れた後はこれらを延長せず、「原子力のない社会」に向けて段階的に手順を進めていくとの方針を明らかにした。

同総統の国民党政権は元来、原子力推進派であり、建設工事が長引く龍門原子力発電所の早期運開を目指している。しかし、福島事故発生を受けて同原発建設に反対する大規模なデモが展開され、来春に実施を控えた総選挙および総統選挙戦でも原子力が争点として浮上。こうした背景から、野党・民進党が打ち出した脱原子力政策寄りの方針を打ち出さざるを得なくなったと見られている。

ただし、同総統は龍門原発については福島事故の教訓から追加の改善策を手当中だと強調。厳しい安全要項をすべてクリアすれば営業運転を開始させると約束した。また、同原発の運開後は原子力開発利用計画全体も含めた国家エネルギー政策を4年ごとに見直しし、原子力の廃止を決定してしまう前に電力の使用制限等の影響について検討すると説明。「原子力のない社会」を実現する具体的な日程目標には言及しなかった。

台湾では台湾電力公社が3サイト・6基の原子炉すべてを操業。99年からは4サイト目として、ABWR2基からなる龍門原発の建設工事を進めているが、政治環境に翻弄されいまだに完成していない。同社はまた、09年7月、運開後40年の認可が18年と19年に切れる金山原発の2基について、20年の認可延長を原子能委員会(AEC)に申請したが、福島事故発生を受けてAECはこの審査を中断した。

## 連載 東日本の巨大地震に学ぶ(5/最終回)

## 東日本の巨大地震に学ぶ

(財)国際高等研究所 尾池 和夫

## I. 巨大地震のシナリオ

歴史に「もしあの時」というのは無意味であるというのを承知で、2011年東北地方太平洋沖地震と、それによる東日本大震災を振り返り、事故を防ぐという視点で、それぞれの時点でやるべきであったことを考えてみたい。

一般の防災行政にはさまざまな制約があり、最悪の場合を想定して対策を実行するには多くの困難を伴う。しかし、原子力発電所のように、危機管理を格別の体制で行わなければならない場合には、過去に立ち返って、想定シナリオを書き直してみることも、再び同様の災害を起こさないために重要なことである。

1960年代まで、地震学は統計的地震学の時代であり、過去の資料を収集整理して、そこから地震発生の統計的な性質を見出すことが中心課題であった。その時点ではわかっていなかった地震発生源の物理がその後急速に進展した理論的研究で明らかになった。プレートの相対運動で生み出されたストレスが解放されることによって起こる地震の仕組みが、1980年代には明確に理解されていた。その新しい知見がそれぞれの立場で活かされていたら、今回の巨大地震による災害は、大きく軽減されたことは間違いない。福島第1原発が1980年代に設計されていたら、海拔35mの高台のまま、その台地を利用したであろう。

災害の後、多くの人が「想定外」という言葉を使った。しかし、この言葉には「想定できなかった」という意味と「想定しなかった」という意味があり、全く意味するところが異なっている。少なくとも今回の巨大地震について学術的に「想定できなかった」ことは存在しない。

地震の統計的な性質の中でも最も基本的なものはマグニチュード別頻度分布である。一般に多くの現象に見られるように、地震も規模の大きなものは少なく、小さいものは多い。広い範囲で十分な期間をとると、M(マグニチュード)とM別頻度の対数の関係は直線関係になることが知られており、例えば気象庁が示した日本の地震に関する1949～1998年のM別頻度分布からは、M7以上の地震の数が不自然に欠如している状況が見られた。今回の巨大地震とその前震や余震で、この歯抜けの部分が、かなり埋められることになった。

このような自然現象の最も基本的な性質は教科書にあって、学生は講義で知っているが、それで終わってし

まって、以後それを常時監視することはない。しかし、基本的なことを、もっと虚心坦懐に見ていることが危機管理の視点からは必要なことなのではないだろうか。

## II. 地震予測と被害想定

1995年兵庫県南部地震の後、地震の研究成果が市民に、あるいは防災対策を実行する機関にも十分伝わっていなかったという反省があって、政府に地震調査研究推進本部が置かれ、そこに政策委員会と地震調査委員会が置かれた。これらの委員会の議論をもとに、活断層、地下構造などの調査が行われ、地震発生の長期予測が発表されてきた。

島崎邦彦は『科学』(2011年10月号)の論文で、地震調査推進本部の長期予測の内容と、国の防災対策の基本を定める中央防災会議、および東京電力の防災対策の経緯との間の関係を詳しく述べた。それによると、2006年9月に原子炉施設の耐震設計審査指針が改定され、それによって2008年4月に東京電力が政府の予測した地震により、福島第1原子力発電所に来襲する津波を試算して、最大波高10.2m、遡上高15.7mという結果を得ていた。

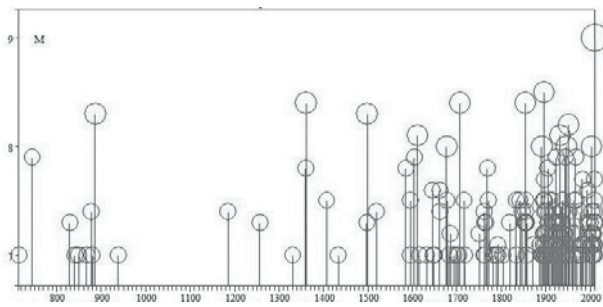
この予測に基づく対策がすぐに実行されていたら、どれほど災害が軽減できたか、どのような対策方法が有効であったかということ、原子力発電所の技術に関わる専門家たちに、ぜひ分析してほしいと思う。

中央防災会議の2011年1月1日現在の大規模地震の予測の図を見ると、東北地方南部の太平洋沖だけ、潜り込み運動をしているプレート境界であるにもかかわらず、大地震の発生が予測されていなかったことがわかる。なぜ、そのような不自然な想定になっていたのか、その背景を分析することも、将来の日本の災害対策のために重



第1図 2011年1月1日現在の中央防災会議「大規模地震の概要」





第2図 715～2011年の本州付近のM7以上の地震の時系列

要なことであろう。

日本にはきわめて長期間の地震に関する歴史資料がある。もちろん都の置かれた近畿に詳しい歴史があるのは当然であるが、地方であってもM7を超える地震が陸に起これば何らかの記載が残るであろうし、大津波があれば都の記録に残るであろう。そのような目で理科年表にある日本の地震の表から、M7以上の東北から九州の地震の時系列を描いて、それを単純に見ると、実に1000年規模の長期間の地震活動期を今迎えているように見える。日本のように歴史の記録があるからこそ、それが言えるのかもしれない。

地震は過去に蓄積されたストレスの解放という現象であり、解放された時点から次の地震にいたるストレスの蓄積が開始される。東北日本では貞観の時代に巨大地震が起こって、それから1000年が経過したから、数cm/年で太平洋プレートが潜り込んでいるから、プレート境界には数10mずれるだけのひずみが溜まっていたことになる。

### Ⅲ. 巨大地震による震災

今回の巨大地震の発生でさまざまな災害が起こった。強震動で、地盤の液状化、斜面の崩壊、建造物の破壊などが発生し、地表や海底の急激な変動で、地盤の沈下と大津波が発生し、それらが長期的、あるいは短期的に被害をもたらせた。また、しばらくは余震や大地の変動がさらにゆっくり継続する地盤の余効変動でも被害が増幅される可能性がある。また、狭い意味の余震のほかに、余震域から離れた場所でも大地震や噴火が誘発されることも予想される。

液状化したり崩壊したりする可能性のある土地を造成して売る企業に対して、将来どのような情報提供を義務づけるかを、震災対策の研究者から具体的に提言してほしい。沈降して100年以上回復しないであろう沿岸の土地の租税の制度の検討も大きな課題である。

余効変動に関しては実測例が少なく、それぞれの場合に違った動きをするから、予測が難しい。測定を続けながら検討することが必要である。

自然の仕組みとして地盤の沈降は、日本列島の特徴の1つである干潟を生み出す仕組みであり、沈降した地域を積極的に干潟として生産に活用するという視点もあつ

ていと提唱している研究者がいる。そのような見方も参考にして、地域の人びとが復興計画を決めなければならない。

地盤沈下の量は、牡鹿半島で1.2mの沈下が基準点での測定値の最大であり、沈降量が大きかったのは、陸前高田市で84cm、石巻市で78cmなどであった。福島第1、第2発電所でも1m近く沈降した。

2011年東北地方太平洋沖地震で、東京電力福島第1原子力発電所のある大熊町は震度6強の揺れであった。最大加速度は原発の設計値の約126パーセントの550ガルを記録し、発電所の施設とその近くに強震動による多くの破損があった。強震動を検知して稼働中の1～3号機は自動停止したという。

日本で観測された強震動の加速度の参考値をあげると、1995年兵庫県南部地震では最大加速度818ガル、2008年岩手・宮城内陸地震では最大4,022ガルで、今回の巨大地震では、築館での2,933ガルを最大として10ヵ所で1,000ガルを超えた。

強震動によって福島第1原発に電力を供給していた送電線鉄塔1基が倒壊して外部電源を喪失した。また送電線の断線やショート、関連設備の故障などで外部電源が喪失された。この鉄塔は津波の来ない高さにあった。また事務棟の書棚などが倒壊し、天井パネルが崩落した。

本震後、天井の墜ちた事務棟から免震重要棟に機能を移した。この免震重要棟は、東京電力が、発電所施設における震災などの災害が発生した際に対策本部を設置する目的で建設した建物であり、鉄筋コンクリート造で免震構造になっている。会議室、通信設備、電源設備、空調設備などが備わっていて、震度7の揺れで初動対応に支障を来たことがないようにと、中越沖地震の教訓として建設された。現在、福島第1の事故対応で現場職員が待機する作業拠点として使われている。入り口で放射線量を測り、窓を鉛の板で覆い、汚染物質を除去する装置があり、防護服を脱ぐことができる場所となっている。寝泊まりしている職員もいる。

今回の巨大地震では、仙台でも東京などでも多くの天井が墜ちた。建築基準法で、柱や壁など建物の骨組みに当たる部分は建設確認の際に適合判定を受ける。非構造部材の天井には、明確な基準と検査義務がない。

福島第1、第2原子力発電所の免震重要棟で観測された地震記録では、福島第1の方が大きく、基礎部で最大加速度は756ガル、上部構造の応答は、1/2～1/3に低減されていたという。なぜ事務棟は天井が墜ちるような構造だったのか、震度7に耐える免震重要棟を作っておきながら、なぜ実際の巨大地震を想定して日頃からそこで仕事をしていなかったのか、発電所の仕事に素人の私にはよく理解できない。

### Ⅳ. 津波の想定

何よりも大きな災害となったのは、大津波の来襲によ

るさまざまな被害である。東京電力福島第1発電所では、津波の最大を5.7m、福島第2原発では最大5.2m、女川原発では9.1mと想定していたという。実際に来た津波の波高は福島で14mほど、女川では敷地14.8mの高さぎりぎりであったという。

非常用ディーゼル発電機が起動したが、大津波が本震発生の41分後(15時27分)から数回にわたって来襲し、電源施設を衝撃力で大きく破壊して、海水が地下室に浸水して非常用電源が水没し、2次冷却系海水ポンプ、オイルタンクが流失した。

このような事態になるまでの地震現象を時系列的にたどって、もし巨大地震の発生をあらかじめ想定して、地震に関する万全の監視体制をとっていたらどのような可能性があったかを、思考実験で考えて見たい。

まず、一般の防災対策と異なり、2000年以後には原子力発電所独自の地震活動予測の仕組みの導入が考えられる。日本列島の下に潜り込む海のプレートの潜り込み口の中で、福島県沖だけが長期間動いていないということと、本州はほぼ東西に圧縮されて全体に縮んでいるということが明確に把握されていたから、福島県の沖にはやがて巨大地震が起こってひずみが解消されるということが、2000年頃には予想された。

巨大地震の想定があって原発の独自の地震監視システムが整っていたとしたら、そこでは本震は予測できた可能性が高い。2011年2月中頃から群発地震が集中的に起こり始め、3月9日から10日にかけて明瞭で規模の大きな前震群の活動があった。それによってさらに大きな地震の発生が迫っているということになる。そこで具体的な待ち受けの態勢が立ち上がる。もちろん空振り覚悟である。

日本は世界で唯一、緊急地震速報が実用化されている国である。今回の巨大地震でも精度の高い速報が出た。今回の巨大地震の本震の時には、NHK総合テレビで国会中継が放送されていた。陸に地震動が到着するまでに緊急地震速報が画面に出た。新幹線も独自の安全システムが整備されていて制御された。発電所も独自に備えていたとしたら、気象庁からの情報も受けながら観測データを専門の知識を持つ職員が監視していたはずである。

14時46分、震度7の揺れが観測され、14時49分、気象庁が岩手、宮城、福島など太平洋沿岸に大津波警報を発令した。震度7の揺れが宮城県栗原市で観測され、広い範囲で震度6弱以上の揺れがあったことも速報されていた。14時50分、首相官邸危機管理センターに官邸対策室を設置、15時32分、釜石市で最大4.2mの津波を観測した。16時12分、全閣僚出席の緊急災害対策本部ができた。

釜石東中学校では、津波の情報で行動したのではなく、地震動を感じて津波を直感して逃げた。隣の小学校は3階に逃げていたが、中学生を見てそこから逃げ出し

た。結果的にその3階も津波に呑まれた。海岸で揺れたら、まず逃げて、津波情報はそこからいつ戻るかを判断するために利用するというのが、一般の人にとっての情報の使い方でないといけないとは思っている。ましてや原発ではそれ以上の安全策がなければならない。

大きい揺れが長く続いたことから体感だけで地震学者の私には巨大地震が東日本に起こったと分かったのだから、揺れてから津波が来るまでの時間でもさまざまなことが実行できた。その50分ほどの間に、原子力発電所ではどのような対策が可能であったであろうか。原発の専門家によるそのような分析が、未来の事故を防ぐために必要である。

## V. 次の巨大地震に備えて

次の巨大地震はどこに起こるかは不明である。環太平洋のプレート境界に沿って候補地はいくつもある。日本では、西南日本の南海トラフに沿っては、2030年代に起こると予測されており、その他にも北海道から千島列島の沖や九州から南西諸島に沿っても、また伊豆マリアナ地域でも起こる可能性がある。東アジアの地震活動は世界的に見ても全体として活発であり、プレート境界に限らず大地震は各地で起こるが、M9近くの巨大地震が起こるのはやはりプレート境界である。

日本列島では、糸魚川-静岡構造線に沿って陸地にもプレート境界が走っている。ユーラシアプレートと北米プレートの出合っている場所を、糸魚川ジオパークでは見ることができる。北米西海岸北部のカスケディア沈み込み帯には、1700年に巨大地震が起こり、近い将来、次に巨大地震が起こる可能性が指摘されている。

巨大地震が近い将来、少なくとも西南日本では、南海トラフに沿って起こることは間違いなく、この場合には2030年代の後半という発生時期の予想がある。その前に内陸の活断層帯がいくつか動く。1944~1946年の南海トラフの地震が小さ目であったので、次の地震はM9クラスの巨大地震になる可能性が高い。海洋研究開発機構(JAMSTEC)では、南海トラフの海底の動きをとらえる観測機器のネットワークを敷設しつつあり、すでに豊富な情報が得られ始めている。その情報が市民や防災組織に理解される仕組みが整えられて、次の西南日本の巨大地震の時には、地震発生を待ち構えて防災対策が動いている状況を実現してほしいと願っている。

(2011年11月15日 記)

### —参考文献—

尾池和夫, 日本列島の巨大地震, 岩波科学ライブラリー; 島崎邦彦, “予測されたにもかかわらず、被害想定から外された巨大津波”, 科学, 2011年10月号, pp.1002-1006.

### 著者紹介

尾池和夫(おいけ・かずお)

本誌, 53[10], 675 (2011)参照.



# 自然エネルギー発電の可能性と限界 過大な期待への警告

エネルギー問題に発言する会 林 勉

わが国の自然エネルギー発電はどれだけ有効かについて、導入目標、導入可能ポテンシャル等から評価したが、最大導入可能量は総発電量の15%ぐらいが限度であることを示した。現実にはこれを達成するためには高いハードルがあることおよび自然エネルギーを導入する上での様々な問題点やドイツの例も踏まえた政策上の問題点についても考察した。電源別構成は当面、原子力、火力、水力が主体であり続けるというのが結論である。

## I. はじめに

3.11の福島事故以来、原子力への依存から脱却すべきであるとの風潮が高まっている。原子力に替わるべきエネルギー源として、自然エネルギーがにわかに注目を集めている。政府もエネルギー政策の見直しを始め、自然エネルギーの積極的拡大政策をとっている。このこと自体は世の趨勢としてやらなければならないことではあるが、問題は自然エネルギー偏重論であり、原子力、火力も不要との極端な議論もある。一般の方が安易にこのような議論にくみし、政治的ポピュリズムでわが国のエネルギー政策が自然エネルギー偏重に大きく傾くと、将来の経済、社会に取り返しのつかない悪影響を及ぼす懸念がある。可能性と限界について冷静にいろいろな角度から検討し、過大な期待への警告をする。

## II. 自然エネルギーの特徴

### 1. 利点

自然エネルギーとは、太陽光、風力、波力・潮力、流水・潮汐、地熱、バイオマス等、自然の資源で定期的、反復的、間欠的に補充されるものを言う。利点としてよく言われていることは、①CO<sub>2</sub>を発生させることがなく、地球温暖化の懸念がないこと、②一度設備を作れば、エネルギー費用が原則としてかからないこと、③国産エネルギーであり、エネルギーセキュリティの点で有利、④自然にあるエネルギーで親しみやすく受容性が高い等である。これらは確かに大きな利点であり、エネルギー資源問題や地球環境問題への切り札として注力すべきことは当然である。しかしながら、同時に重大な問題点も有しており、これらの点についても検討しておかなければ

ならない。

### 2. 問題点

自然エネルギーは私たちの生活の場に身近に存在するだけにエネルギー密度が非常に小さいことと、自然の大きな変動に左右される特質がある。一方、私たちの現代社会は高度の技術社会であり、安価で安定した大量のエネルギーを必要としている。自然エネルギーといえどもこの現代社会の要求に応えられなければならない。そうなる大規模かつ集約した規模で経済性を追求した設備が必要になる。これらを実現するためには様々な困難な社会問題に直面する。これらを時間をかけて解決していかなければならない。

当面、自然エネルギーは利用コストが高く、そのままでは普及しないので、様々な補助金が必要である。これらは税金やエネルギー利用価格として反映され、一般国民、消費者がその負担をすることになる。補助金により自然エネルギーが拡大すると負担はますます大きくなり限界を超える。そうしないためには、その間に大きな技術革新による大幅な設備価格の低減が必要であるが、技術革新はどこまで期待に応えられるかは未知数である。

大規模化すると新たな社会問題を引き起こす。身近な親しみやすい自然エネルギーが変貌し、これまでの社会に対する脅威の姿も見せ始める。例えば、とうもろこしからエタノールを抽出し、自動車用燃料として利用することが、ブラジル・米国等で大規模に行われているが、とうもろこしの需要急拡大による価格高騰で、とうもろこしを主食としている発展途上国の経済に大きな打撃を与えている。バイオマス発電用植物の大規模栽培は食物栽培との競合になり、食品の高騰をもたらす可能性がある。風力発電は広大な土地を必要としているが、景観、騒音、低周波振動、バードストライク等の問題がすでに顕在化しており、太陽光発電も大規模化すると広大な土

*Possibilities and Limits of Natural Energy Power Generation*: Tsutomu HAYASHI

(2011年 12月12日 受理)



地を日陰にすることになり、土地の荒廃をもたらす。地熱発電は地中から硫黄、ヒ素などの有害物質を大気中に拡散させるなどの可能性もある。また地元の温泉業者との地熱利用の権益上の問題も発生する。このようなことから立地地元の了解取得などの困難な問題は規模が拡大するに伴い大きくなっていくものと思われる。

このような問題については、海外では立地条件がわが国ほど困難ではないので、比較的順調に導入拡大が進んでいる国もある。これら海外に学びわが国も早急に自然エネルギーを拡大すべきとの論調があるが、安易にこれに賛同することは危険である。わが国の特殊性、制約等を十分に考慮した慎重な対応が必要である。

以下に、自然エネルギー導入としてわが国が最も注力している太陽光、風力発電を中心として解説する。

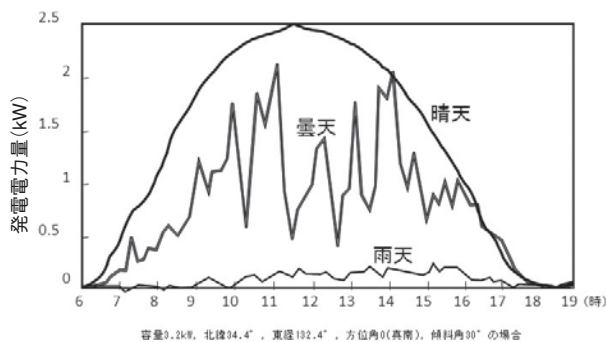
### Ⅲ. 太陽光、風力発電導入の問題点と対応策

#### 1. 出力変動

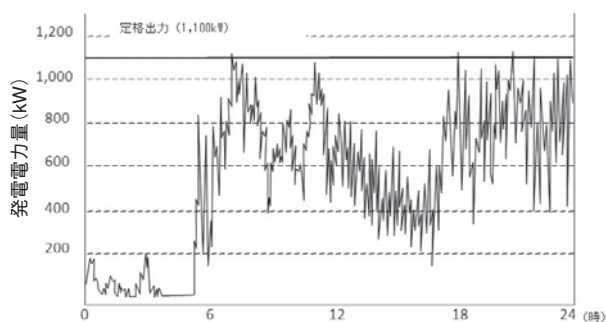
太陽光、風力発電の最大の問題点は振幅の大きな出力変動をすることである。

太陽光は第1図に示すように、発電量は夜間ゼロになり、晴天でも山状の形になり、曇天では雲の異動に伴い激しく変動し、雨天ではほぼゼロになってしまう。風力は第2図に示すように、一日の中でも激しく変動しゼロになる時間帯が存在し、第3図に示すように、月間では数日間ゼロになることが数回見られる。

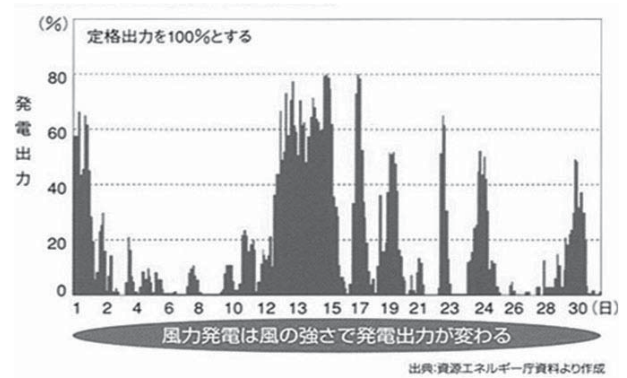
このように変動が大きく、設備利用率は太陽光で12%程度、風力は陸上で20%、洋上で30%程度にしかならな



第1図 太陽光発電の出力変動(春季)<sup>1)</sup>



第2図 風力発電の出力変動(日間冬季)<sup>1)</sup>



第3図 風力発電の出力変動(月間)

い。安定電源として利用するには大型の蓄電池または補間電源としての火力発電設備を併用しなければならない。このための費用は莫大になるが、現在評価されている発電原価にはこれらに要するコストは含まれていない。

#### 2. 広大な面積

太陽光や風力は単位面積当たりのエネルギー密度が低く、大容量発電には広大な面積が必要になる。最もエネルギー密度の高い原子力発電所の面積と比較すると、100万kW級発電所で、太陽光発電は約100倍で山手線とほぼ同じ面積が必要となり、風力発電は約340倍で山手線の3.4倍の面積が必要となる。わが国では遊休地が少なく広大な用地取得が困難な現状がある。

#### 3. 導入促進のための法的措置

自然エネルギーの発電原価は現状ではかなり高い。1kW時あたりの発電原価は、太陽光：約48円、風力：10～14円、水力：8～13円、火力(LNG)：7～8円、原子力：5～6円と評価されている。この現状では太陽光はとて競合できないので、世界各国共に手厚い補助政策がとられている。わが国では設備導入時の補助金制度とRPS(Renewable Portfolio Standard)法という発電事業者に対する導入義務量の設定と固定価格買取制度(FIT)が導入されている。太陽光発電についてのFITは平成21年から導入され、現時点で住宅用42円、非住宅用40円、いずれも余剰電力が対象で期間は10年間となっているが、平成23年8月26日国会で成立した「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案」では、太陽光、風力、中小水力、地熱、バイオマスを対象に買取価格、期間をこれから決めることになっている(太陽光については引続き余剰分のみ)。具体的には再生可能エネルギーの種別、設置形態、規模等に応じて、中立的な第三者委員会の意見に基づき、関係大臣(農水、国交、環境、消費者担当)が協議して決定することになっており、法律の適用は平成24年7月1日からである。

#### 4. 今後の導入目標

自然エネルギーの今後の導入目標については、「減原発」の政府方針の中では今まで以上に大きく拡大する方針になると思われるが、その詳細はまだ見えてきていない。これまでの目標では、資源エネルギー庁の太陽光発電の最大導入シナリオでは2020年で1,400万 kW、2030年で5,300万 kWで、そのうち住宅用が3,200万 kWで6割(全住宅の約90%)、非住宅用が2,100万 kWで4割となっている。風力発電は資源エネルギー庁の最大導入ケースでは2020年で500万 kW、2030年で670万 kW、大きく見積もっている NEDO のロードマップでは2020年で1,000万 kW、2030年で2,000万 kW としている。

これらの目標値は現在の状況から前項で述べたような様々な促進政策を実行してその最大努力で積み上げたものである。一方、このような積み上げ方式とは別に、わが国に太陽光、風力の開発可能な資源がどれだけあるかという評価も行う必要がある。次に、この導入ポテンシャルについて解説する。

#### 5. 我が国の導入ポテンシャル

太陽光や風力資源は無限にあるとの説があるが、実際にはいろいろな制約があり限界がある。環境省はこの限界を見極めるために、わが国の「再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書」を平成23年3月にまとめた。この報告書では、導入ポテンシャルを3段階で評価している。第1段階は「賦存量」と定義されており、何らの制約も考慮しない最大ポテンシャルである。第2段階は「導入ポテンシャル」と定義されており、エネルギーの採取・利用に関する種々の制約要因による設置の可否を考慮したポテンシャルである。第3段階は「シナリオ別導入可能量」と定義されており、基本シナリオとして、「再生可能エネルギーの全量固定価格買取制度」(FIT)の導入および技術開発によるコスト縮減等を想定した上で事業収支シミュレーションを行い、税引前収益率(PIRR)がおおむね8.0%以上となるものを集計している。太陽光発電、風力発電の評価結果のまとめをそれぞれ第1、2表に示す。

第1表 太陽光発電(非住宅系)の導入可能設備容量<sup>3)</sup>

設備容量(万kW)	導入ポテンシャル	シナリオ別導入可能量		
		FIT対応シナリオ	FIT+補助金	FIT+技術革新シナリオ
公共用建物(学校、市役所等)	2,300	0	0~1,000	0~1,000
発電所、工場、倉庫等	2,900	0	0~1,400	20~1,400
低・未利用地(最終処分場等)	2,700	0	0~130	0~130
耕作放棄地(森林化、原野化)	7,000	0	0	0~4,700
合計	15,000	0	0~2,000	20~7,200

第2表 風力発電の導入ポテンシャル<sup>3)</sup>

設備容量(万kW)	導入ポテンシャル	シナリオ別導入可能量		
		FIT対応シナリオ	FIT+技術革新シナリオ	FIT+補助金
陸上	28,000	2,400~14,000	27,000	13,000~26,000
洋上	160,000	0~300	14,000	30~33,000
合計	190,000	2,400~14,000	41,000	13,000~59,000

太陽光発電は住宅用と非住宅用があるが、住宅用については老朽住宅や特殊住宅を除いて、原則として全戸に設置可能であると考えられることから、この報告書では非住宅用のみを扱っている。非住宅系については公共建物や発電所、工場、倉庫、低・未利用地、耕作放棄地等が対象になるが、これらは事業採算ベースで考えなければならず、その条件次第で導入可能量は大きく左右される。導入ポテンシャルは合計で15,000万 kW あるものの、導入可能量についてはFITのみのシナリオでは導入可能量はゼロになっている。FITに補助金をつけるか技術革新により設置費用を半減以下にできるとした時のみに導入が可能となっている。前項で述べた2030年の非住宅系の目標値は2,100万 kW であり、かなり厳しい限界値であることがわかる。

風力発電の導入ポテンシャルは洋上で特に大きく、陸上と合わせて190,000万 kW もある。導入可能量についてはFIT対応シナリオだけで可能なのは陸上に限定されてくるが、陸上だけでも2030年の目標値2,000万 kW を超えるので余力があると言える。当面は陸上主体であるが、洋上の技術革新が進めばポテンシャルは非常に大きいものがある。しかし、わが国の陸上風力には許認可規制がいろいろあり、このために建設に数年を必要とする。また電力会社は不安定電源に対応できる範囲内での購入計画しかない。一方、入札希望業者は多く、数倍~数10倍の競争になる。入札を少しでも有利にするために小分けして臨むのでどうしても小規模の物が多くなってしまふ。このようなことから、わが国の風力発電は小規模で建設期間が長いという特徴があり、海外の案件に比較して業者にとっては魅力が少なくなっており、海外展開が主体となっている現実がある。

これに加え環境への影響評価の要求が高まってきて、環境省では2012年から環境アセスメントを原子力、火力と同様に、法的規制の対象として実施する予定である。これが実施されると、さらに数年建設期間が長くなり、ますます厳しい状況になることが予想される。風力の導入ポテンシャルは高いが、かなり偏在している点も考慮しておかなければならない。陸上では北海道・東北に導入ポテンシャルの75%が偏在している。洋上では九州・北海道・東北に導入ポテンシャルの約70%が偏在している。いずれも電力の大需要地域とは離れており、有効利用のためには全国レベルの送電網の拡張が必要であり、長期間と莫大な投資が必要である。

## IV. 自然エネルギーによる発電量の規模

### 1. 太陽光発電

Ⅲ-4節で述べたように、太陽光発電の2030年の最大導入目標は5,300万 kW であり、これが達成できても年間発電量は560億 kWh(設備利用率12%)であり、わが国の年間総発電量約1兆 kWh の5.6%に過ぎない。



## 2. 風力発電

同様に、風力発電の2030年のNEDOの最大目標は2,000万kWであり、これが達成できても年間発電量は350億kWh(陸上主体なので設備利用率20%)であり、総発電量の3.5%に過ぎない。

## 3. その他の自然エネルギー発電

環境省の導入ポテンシャル調査報告書<sup>2)</sup>によれば、導入可能量は中小水力で110~300万kW、地熱で110~480万kWとされている。これらを合計して、220~780万kWであり、総発電量の1.5~5.4%(設備利用率80%と想定)程度にしかない。その他についてははまだ研究段階または導入可能性が低いなどの利用により、定量的に評価する段階にはないのが現状である。しかし、これらは太陽光や風力のような変動電源ではなく安定電源なので利便性は高い。

## 4. 自然エネルギー全体

以上、総合して最大導入可能発電量は自然エネルギー合計で総発電量の15%程度である。これはポテンシャル調査の上限値あるいは政府機関の最大目標値に基づくものであるため、実現には高いハードルを抱えるものであり、2030年はおろか最終目標に近いと言わなければならない。またこれを達成するためには相当量の補助金、助成金の上送電網の整備、電源安定化投資等のエネルギー政策が必要になるうえに大幅なコスト低減が必要となる。これらエネルギー政策の問題点について以下に解説する。

## V. 自然エネルギー政策の問題点

### 1. ドイツの政策<sup>4)</sup>

自然エネルギー政策の成功例としてドイツをあげることが多い。ドイツは1991年に固定価格買取制度(FIT)を導入し、2010年末で総電力消費量の17%が再生可能エネルギーとなっており、わが国もドイツを見習えとの主張が多くなされている。本当にそうだろうか。これらの第1の主張は固定価格買取制度(FIT)の費用負担による電気料金の上昇は僅かで、今後、コストダウンが進めば既存電源と同水準の経済性が達成できるというものである。実際はどうであろうか。FITについては、買取価格と卸電力価格の差の追加的費用負担は2010年の1年間で88億ユーロ(約1兆円)の多額になっており、また買取期間は15~20年の長期に及ぶため、この負担額はそのまま2030年頃まで毎年継続される。さらに新規分が毎年加算されるため、その額は拡大していく。当初は少なくともこの負担額はどんどん拡大していくことを学ぶべきだ。

第2の主張はCO<sub>2</sub>削減効果が大きいということである

が、このために支払ったコストが非常に大きく、費用対効果が少ないという実態がある。風力発電のCO<sub>2</sub>削減コストは54ユーロ/トンCO<sub>2</sub>、太陽光発電のそれは716ユーロ/トンCO<sub>2</sub>である。一方、国際的なCO<sub>2</sub>排出権価格の相場は15~20ユーロ/トンCO<sub>2</sub>と比較して、風力発電は約3倍、太陽光発電は30倍も割高になっている。

第3の主張は再生可能エネルギー関連産業の雇用創出効果が大いであるということであるが、太陽光発電は半導体と同じような同一製品(パネル)の大量生産であり、中国が得意とする分野であり、圧倒的低価格で世界シェアの約60%をカバーしており、導入国の産業、雇用への寄与は思うように伸びていないのが実態である。

第3表にドイツのここ10年間の発電量構成の年度推移を示す。確かに太陽光、風力は著しく伸びているが、風力は頭打ち、太陽光もFITが大幅に下げられているので、今後、頭打ちになると思われる。FIT実施後20年で太陽光2%、風力6%というのが実態だ。これらの量もわが国の電力量に対する割合からいうとそれぞれ約1%、3%でしかないことを理解しなければならない。

### 2. わが国の政策

わが国のFIT制度は始まったばかりであり、その影響はまだ見えてこないが、約20年先行するドイツの実態をよく見て学ばなければならない。極端な補助政策は将来に大きな負担を残し、わが国経済を破綻させかねないので、バランスのとれた政策が肝要である。

わが国のエネルギー環境政策として、鳴り物入りで実施された「バイオマス・ニッポン戦略」がある。これは平成14年12月に閣議決定され、これまでに予算総額6.5兆円を費やした巨大プロジェクトである。この主眼点は、地球温暖化防止、循環型社会の形成、競争力のある新たな戦略的産業の育成、農林漁業農山漁村の活性化等であり、これを実現するために全国の該当市町村にバイオスタウンを実現させるというものである。この実態はどうであったか。総務省は平成23年2月にこの事業の実態調査結果を公表した。それによれば農林水産省を始めとする6省が関与した214事業で効果は皆無、92事業で使った費用の把握もできていないとの厳しいものであった。

エネルギー環境事業はどうしても地方自治体を巻き込んだものになるが、開発面も多くなる事業では研究設備

第3表 ドイツの発電量構成の年度推移<sup>4)</sup>

億kWh	2000年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年(%)
合計	5,720	6,290	5,710	6,300	5,900	6,140(100)
再生可能合計	380	740	910	920	960	1,040(17)
風力	94	310	400	406	390	365(6)
バイオ	25	140	194	199	260	291(5)
水力	260	273	285	270	247	259(4)
太陽光	0.6	22	31	44	66	120(2)



等の箱物に予算が多く注ぎ込まれるが、その研究への注力が不足していたり、目標だけが独り歩きして達成の見込みがないものであったり、また箱物の運営予算が不足して効果が出せない等の様々な要因が重なったためと思われる。これから各種自然エネルギーを大々的に導入していく時には必ず同様な事態が起こることを覚悟しなければならない。この例は背伸びした実態を伴わない美辞麗句に彩られた政策の失敗例として今後の教訓にしなければならない。

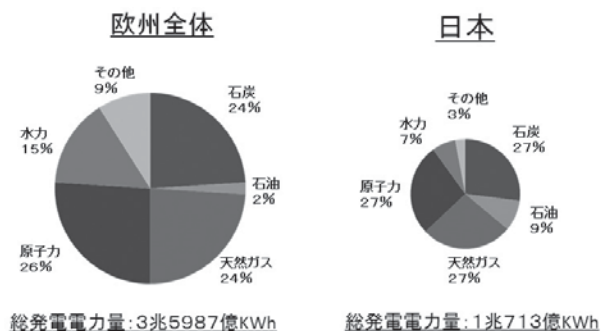
## VI. 電力構成のありかた

### 1. 総量構成

以上述べてきたように、わが国として安易に原子力を止めて自然エネルギーに頼ることはできないことが理解していただけたと思う。それではエネルギー構成のありかたについて考えてみよう。ドイツは脱原子力を決めて、自然エネルギー依存強化政策をとっているため、わが国もこれを見習えという主張がある。しかしドイツはヨーロッパという環境の中で近隣諸国との連携も含めたエネルギーミックスのなかでバランスを取っていることも十分に認識しておく必要がある。ヨーロッパ中には第4図に示すように、ガスパイプラインが張り巡らされており、ロシア、北海油田、アフリカ等から豊富な天然ガスが供給されている。またノルウェー、スウェーデン等の北欧には豊富な水力資源があり、北海沿岸地帯は常に強い風が吹き、風力発電の適地が多く、さらに南欧では強い太陽光に恵まれており、ドイツには豊富な石炭資源があり、またフランスはわが国と同様、エネルギー資源に恵まれていないが、早くから原子力強化政策により電力の80%近くをまかない、余剰電力を周辺各国に輸出している等の環境がある。ドイツは原子力をやめてもフランスから原子力による電気を導入し、北欧の水力やガスパイプライン網による天然ガスに頼ることができる。ここが全くわが国のような島国と異なるところであり、安易に外国に学べという主張は成立しない。



第4図 ヨーロッパにおける天然ガスパイプライン網<sup>1)</sup>



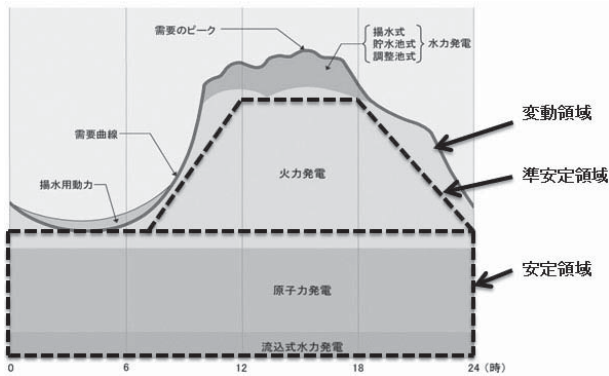
総発電電力量:3兆5987億kWh 総発電電力量:1兆713億kWh  
第5図 欧州全体と日本の2010年電力構成比較<sup>3)</sup>

第5図に欧州全体と日本の電力構成を示す。ドイツはこのような欧州全体としての中での電源構成を保ちながらエネルギー政策を実施していることと、電力量は欧州全体の1/6程度であり、原子力の政策変更での影響は薄められていることを理解しなければならない。一方、わが国の発電規模は欧州全体の約1/3で1国としては巨大な量となっている。その構成は欧州全体とよく似ており、バランスのとれた物となっている。国のエネルギー政策はその命運を左右するものであり、エネルギーセキュリティを考慮した対応が必要である。

原子力をやめて自然エネルギーに偏重することは前述してきたように大きな問題があり、現実的に実現することは不可能である。原子力に変わって天然ガスに依存するにしても、わが国にはガスパイプラインはなく、すべて液化ガス(LNG)にして専用タンカーで運んで来なければならない。LNG利用のためには輸出港、受入れ港に液化専用施設の建設が必要であり、このためには巨額の投資が必要であり、長期購入契約の上で初めて実現可能になる。わが国の電力会社は長期契約で一定量のLNGを確保している。今回、原子力発電所の多くが停止して運転できない状況のなかで、各電力会社はLNG輸入量を拡大した。長期契約以外の方はスポット買いになる。LNG市場は長期契約が主体でスポット市場は元々小さいので、需要拡大により、価格は敏感に反応する。今年の3月以降は急騰し、11月中旬時点で約8割高となっている。このようにエネルギーは国際的マーケットに強く影響されるので、わが国が「脱原子力」政策を打ち出すことで、LNGはもとより、石油、石炭等の主要エネルギー資源が高騰することもその代償として十分に考慮しなければならない。

### 2. 需要の時間変化を考慮した構成

エネルギー構成は総量としてのありかたのほかに需要の時間変化についても考慮しなければならない。第6図にわが国の福島事故以前の状態を示す。昼間のピーク時と夜間の最低時では倍半分の開きがある。この中に自然エネルギーをどのように組み込むのがよいかについて考えてみたい。太陽光と風力主体ではⅢ章で述べたように



第6図 わが国の電力需要の時間変化(文献1)に筆者が加筆

ゼロになる時間帯があり、対応できないことは明確である。この需要曲線を破線で示すように、安定領域、準安定領域、変動領域に分けて考える。基本的に夜間の最低水準までの一定必要量の安定領域については、安定した電源が望ましい。これまでのように水力、原子力を主体として、自然エネルギー電源の中の中小水力・地熱のような安定電源を加えることがよいと思われる。準安定領域については、変化部分は直線的であり、太陽光、風力のような激しい変動以外の電源なら対応できる。現在はこの領域は火力がまかっているが、CO<sub>2</sub>削減の観点からは化石燃料を極力減らすことが必要である。原子力でもこの程度の変動には容易に対応できるので、原子力の割合を現在以上に増加させて対応することも可能であり、これが最も経済的であると思われる。もちろん太陽光、風力でも出力安定化したものについて対応可能であるが、このためには多大な投資が必要であり、基本的には経済性評価の観点から望ましくない。最後の変動領域は発電量(kWh)の面で太陽光・風力発電による発電量に近いものになろう。必要ときに期待できるものではないという点で、実際には太陽光・風力はこのようなピーク電源にはなりえないのではあるが、火力発電によるバックアップを得て変動を吸収すれば発電量の面で貢献できる。すなわち、夏の昼間のピークには太陽光がもっとも活躍できるし、夜間や風の強い悪天候の時には風力が活躍できる。

## Ⅶ. まとめ

以上、述べてきたように、自然エネルギー発電は最大限導入可能量は、太陽光、風力で約9%、中小水力、地熱、などの安定電源で約6%程度である。

これらの目標として実現するのは大変である。現在最も実現性が高いと思われる住宅用の太陽光発電では2030年で約90%の住宅に設置することが目標となっているが、自分の身の回りの住宅を見てもほとんどの住宅で実現していない現状および1戸当たり300万円近い投資が可能なのか甚だ疑問だからである。ドイツで強力なFIT政策を実施し、20年間でわが国の発電量の約1%しか賅っていないことを認識すべきである。その他の自然エネルギー発電も当面、大規模開発のめどは立っていない。主力は原子力・火力・水力にならざるをえない。

### —参考資料—

- 1) 日本原子力文化振興財団, 「原子力・エネルギー」図面集, (2011).
- 2) 平成22年度「再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書」, 2011.3.
- 3) IEA「Renewables Information 2010および2011」より作表.
- 4) 浅野賢司, 再生可能エネルギー政策論, エネルギーフォーラム社, (2011).

### 著者紹介



林 勉(はやし・つとむ)

「エネルギー問題に発言する会」運営委員,  
元・日立製作所  
(専門分野/関心分野)原子力全般/環境・エネルギー問題全般

# 原子力は持続可能なエネルギーか？

## 市場・デモクラシー・倫理が決める原子力の行く末

環境エネルギー政策研究所 飯田 哲也

東日本大震災と福島原発事故は、日本の近現代史にとって第三の転換期となる。これを機に「ベストミックス」から「持続可能なエネルギー」へと大きな方向性を転換し、経済合理性、民主主義、そして正義や倫理を反映したエネルギー政策に転換することが望まれる。持続可能なエネルギーではない原子力は縮小・廃止を目指し、その道のりは市場と民主主義に委ねるべきだろう。環境ディスコースなき日本の知と政治の退廃という現実から出発し、私たち国民自らの手で、まともな環境エネルギー政策に改革すべきときだろう。

### I. 第三の転換期

2011年3月11日に発生した東日本大震災によって引き起こされた東京電力福島第一原発事故が、世界史に残る地球規模の重大事故であることに疑問の余地はない。すでに「戦後」が「震災後」という言葉に置き換わりつつあるように、この大震災と原発事故は、日本の近現代史にとって、明治維新、そして太平洋戦争敗戦に次ぐ、第三の転換期となるに違いない。

単に大震災と原発事故の大きさが故ではない。現状でも「冷温停止」と呼ぶものの、メルトダウンした核燃料の状況や場所さえ把握できておらず、ましてや放射能の閉じ込めや事故の収束にはまったく目処が立っていない。今後、事故炉そのものの廃炉処理や周辺の除染や放射能汚染の管理を考えると、この先何百年にも及ぶ管理や対応を要するものと見込む必要があるだろう。チェルノブイリ原発事故は、旧ソ連邦崩壊の引き金を引き、世界史を変えたと指摘される。同じようにこの事故は、日本社会に途方もなく「大きな負債」をもたらした事実が、日本史を変える「政治のマグマ」となりうる。

また、数々の失敗と不作為を積み重ね、行き詰まっていた日本の原子力政策・エネルギー政策という実態もあった。その一つが政官業学メディアなどから構成される閉鎖的で排他的な利益共同体＝原子力ムラという構造である。この事故はそうした社会構造が招いた人災にほかならない。地震・津波や電源喪失など、かねてから指摘されてさまざまな危険性に対して、しかるべき措置も取らないまま、根拠もなく「安全安心」の進軍ラッパを吹

き鳴らし、異論を排し掻き消していた様子は、太平洋戦争時の軍国主義に酷似している。しかも、事故が起きて以後、事故を起こした当事者も安全規制の当局も誰一人として責任を取った人間がいない。こうした機能不全が誰の目にも露わになった原子力ムラへの不信と、責任あるべき立場の人間達に蔓延する無責任感覚も、人々に変革へのマグマを呼び覚ますことだろう。

加えて、3・11前に横たわっていた「大きな背景」もある。日本では、イエを中心とする家族・地域社会といった伝統的な社会構造が、歴史的に急速に変質する一方で、個を中心とする社会システムが整備されないままであった。高度成長期は覆われてきたその矛盾が、経済の低成長期を迎えて一気に露わとなった。社会保障制度や国民皆保険制度など戦後日本を支えてきた社会システムが壊れてゆき、一部はイエの変わりを担ったカイシャもグローバル競争で余裕がなくなり、非正規雇用や派遣切りといった社会格差現象を生んだ。地域社会も、中央集権や大規模商業施設などによる収奪で人とカネがどんどん失われるスパイラル現象が進んでいる。こうして個人が、ますます剥き出しでリスクにさらされるようになっていく。こうした状況が生んだ自民党と官僚への不信と不満が民主党への政権交代を実現したのだが、その民主党政治も機能不全を露呈した。もはや政治と官僚に対しては、政治不信・官僚不信を越えた絶望感すら漂っているというのが、日本社会の現状であり、これも大きな変化を避けられない歴史のマグマであろう。

### II. ベストミックスから持続可能性へ

こうした大変革期でありながら、また世界史に残る地球規模の重大事故でありながら、日本での議論は混沌し混沌としている。これはいまだに「旧い考え」に凝り固まった政治家や官僚、専門家などが、そのまま「新しい問題」

*Is the Nuclear Energy a Sustainable Energy? ; The End of Nuclear Energy Governed by Market, Democracy and Ethics ; Tetsunari IIDA*

(2011年 11月28日 受理)



を解こうとしているからだ。「新しい考え」に従えば、方向性ははっきりとしている。

### 1. 持続可能なエネルギーという思想

これまでの日本のエネルギー政策は、安定供給・経済成長・環境保全の「3E」を目指す「ベストミックス」を掲げてきた。しかし、歴史的に眺めてみると、石油ショックとその後の価格低迷、湾岸戦争、地球温暖化、電力自由化など、その時代時代に出現するエネルギー政策の問題群に対して、その都度、個別に泥縄的に対処してきた結果として現状があるにすぎず、その実態は無原則といっても差し支えない。しかも、安全保障も脆弱で、温暖化対策にも失敗し、先進国でもっとも高いエネルギー費用と、惨憺たる結果が現実なのである。

今後、日本が依拠すべき「新しい考え」とは「持続可能性」にほかならない。1987年の国連ブルントラント委員会で公定されたこの思想は、いわば環境と経済と社会とを統合する考えであり、地球規模かつ世代間の公平性を内包する。これをエネルギー面で読み解けば、再生可能なエネルギーと資源を再生可能な範囲で利用することが筆頭に来る条件となる。

この点から、化石燃料と原子力利用は明らかに持続可能ではない。資源の有限性と偏在性という「入り口」や不公平性の問題に加えて、化石燃料には地球温暖化や大気汚染などの環境影響を伴い、原子力は今回の福島原発事故のような破局的な事故リスクと超長期にわたる核廃棄物問題を伴う「出口」の問題があるためだ。時間が掛かったとしても、分散型の自然エネルギー社会を目指していくことが唯一の道であり、必然となる。

### 2. パラダイムの転換

こうした持続可能性を大きな目標として置き、これから目指すべきエネルギー政策をデザインする上で、新しい考え方の枠組み(パラダイム)が必要となる。筆者の考えるパラダイムは、おおむね以下の3つである。

- ・大規模集中から分散ネットワークへ
- ・供給側から需要側へ
- ・技術解から政策・市場・社会側での対応へ

東日本大震災によって合計で2,000万kWもの原発や火力発電所が事故・損壊・停止をした結果、計画停電など東日本は大混乱に陥った。これまで規模や立地の効率性の観点から目指してきた大規模集中型のシステムの脆弱性が露呈した。今後は、インターネットのアナロジーから考えても、分散ネットワーク型の電力・エネルギーシステムを目指していくことが不可欠であろう。

また、従来は「安定供給」の名の下に需要は絶対視され、それに見合うだけの供給を必ず用意する、いわば極端な供給側の視点であった。今後は、需給調整やピーク電気料金など需要側管理(DSM)といった需要側の視点を重視し活用することが必要となる。

これは方法論でいえば、これまであまりに技術解を重

視していた姿勢から、政策・市場・社会側での新しい仕組み作りや旧来の障害解消といった対応を重視して問題解決する方向性とも重なる。

### 3. 問題の構図

こうした前提に立って、我々が直面している問題を見ると、大きく次の3つからなる。

まず、原子力問題は、短期的な再稼働問題から、その後の脱原発依存の具体化や原発輸出を基本的に、後述のとおり「独立変数」として扱うほかない。

第2に、短期的な電力需給問題である。仮に原発が全停止しても、適切な政策によって電力の安定供給が可能であり、そこでは需要側管理(DSM)がカギを握る。

第3に、中長期的な自然エネルギーの拡大である。海外では「第4の革命」と評される自然エネルギーが、日本ではあまりに立ち後れているが故に、「群盲像を評す」が如き批判が横行する。その虚妄を解いておこう。

### 4. 原子力の行方

今後、原子力をどうしてゆくのか。何と言っても、原発事故がまだ収束していないことを忘れてはならない。加えて、事故原因の解明やそれを元にした安全規制の抜本的な立て直し、損害賠償や放射能の除染、そして半永久となるであろう廃炉処理など、どれ一つとして目処が立っていない。

しかも3・11によって原子力ムラの虚ろな実態が、誰の目にも明らかになった。そもそも無意味で成立見込みのない核燃料サイクル、行き場のない核廃棄物処分、形式だけの安全規制、政官業はもちろん、司法まで含む癒着の実態、原発マネーで買われた地域の民主主義など、目を覆わんばかりだ。

原子力の行方を考える上で、こうした実態をしっかりと踏まえる必要がある。これまでのような現実を踏まえない空想的な議論(原子力は低コスト、安全性を高めることは可能、核廃棄物の処分は可能など)は、国民や歴史に対してあまりに無責任であろう。

#### (1) 原子力は持続可能なエネルギーではない

はじめに、原子力は持続可能なエネルギーではないという原則を確認しておく。ウラン資源は有限であり、高速炉の実用化を前提とする核増殖サイクルは、もはやあまりに非現実的である。破局的な事故リスクを抱えつつ、絶えずやっかいな核廃棄物を生み出し続ける原子力は、その定義において持続可能ではない。したがって、時期はともあれ「脱原子力依存」をすすめて、やがては廃止してゆく「脱原発」が論理的な帰結となる。

#### (2) 民主主義と市場に委ねる

問題は、40年後か、10年後か、あるいはこのまま再稼働させずに閉鎖していくのか、「脱原子力依存」のペースだ。これはイデオロギー論争的になりがちだが、経済合理性と民主主義に委ねればよい。経済合理性とは、「次の事故」に備えて、原発発電者に対して青天井の損害賠

償保険への加入を義務づけることだ。市場社会では顕在化したリスクに対して自己責任を追うことは当然だろう。民主主義については、原発国民投票を実施すべきだろう。もはや原発問題は、代議制で議論すべき課題ではなく、全国民が負うべき課題となった。直面する再稼働問題は、電力需給と切り離れた上で、国民に信頼されるような安全規制体制に立て直し、事故原因を踏まえた上で、全ての原発の安全基準の再点検が大前提だろう。

### (3) 倫理的に判断する

また、これまでの原子力・エネルギー政策には、正義や倫理の観点が欠落してきた。ドイツは福島原発事故後に設置した倫理委員会の答申に沿って、脱原発を政治決定した。一定の地域が失われかねないリスクを含む原子力の運転を継続することは「儲けは電力会社、リスクは国民」という不正義な状態であり、将来世代に核廃棄物を先送りせざるを得ない原子力は、非倫理的であるとの判断からだ。

### (4) 国策民営を解体する

従来の原子力体制は、「国策民営」と呼ばれるとおり、国と電力会社との責任が曖昧であった。そのことも安全規制が空洞化した背景の一つであろう。市場に委ねる部分と国の役割を明確に線引きする必要がある。

世界最大級の東京電力でさえ一つの原発事故で破産しかねないという現実を目の当たりにして、原子力発電所を国有化するという議論が起きている。脱原発を定めたときには一定の合理性のある方向性だが、過去の国の直営事業は、原子力はもちろん、あらゆる分野で非効率であったという「実績」があることを踏まえる必要がある。また現在の体制で進めるのであれば、上で述べたとおり、民間事業者の自己責任を飛躍的に高める必要がある。

いずれにせよ、従来の閉鎖的で排他的な原子力ムラの中心にあった「国策民営」の原子力体制を、外に開かれた構造に造り替える必要がある。

### 5. 電力需給の柱となる需要側管理(DSM)

3・11直後の「無計画停電」の大混乱に始まり、夏の電力ピークに向けて「脅し」にも似た「電力不足問題」も、夏が空けてみれば「空騒動」に終わった。大震災と原発事故の直撃を受けたはずの東京電力では、昨年よりも2割も電力需要が下がり、電力供給不足はまったく心配なかったのだ。

一連の「空騒動」ではっきりしたのは、40年前の石油危機の時代から、国の政策が進化していないことだ。具体的には「供給側目線」と「強制命令的姿勢」の2つだ。

昨年よりも電力需要が2割も下がったのは、確かに国による「電力制限令」のおかげだが、あまりにも市場や価格シグナルを無視した硬直的・強制的・一律的な施策だった。しかも、前年のピーク需要(6,000万kW)に固執し、需要側管理(DSM)を促す施策も皆無だった。

ピーク時間はきわめて限られている。昨年の実績では

5,900万kWを越えた時間はわずかに5時間、4,500万kWを越えたのも165時間(年間の2%)に過ぎない。その限られた時間帯にピーク料金を設け需要抑制を促すべきだろう。また、大口需要家と電力会社との間で需給調整契約を結んでおり、たとえば東京電力では430万kWもの減らし代がある。こうした柔軟で市場を活用する施策を、今からでも導入すべきだろう。

つまり、短期的に最も有効な代替電力は、原子力でもなく、また天然ガスでも自然エネルギーでもなく、市場と情報を活用した需要側管理(DSM)なのである。

### 6. 自然エネルギーという「第4の革命」

自然エネルギーは、今すぐに原発を代替するかたちで普及することは難しい。しかし、原発は独立変数で扱い、また短期的な電力需給に見通しが立つならば、中長期的な視点で自然エネルギーの普及に全力を尽くすことが、今の日本にとってもっとも望ましい選択肢となる。

純国産エネルギーであり、真正正銘な「安全安心」なエネルギーである。中長期的には原発の代替となるだけでなく、GDPの5%もの輸入費用に達する化石燃料を節約できる。しかも、折から「第4の革命」と呼ばれるほど市場が急成長しており、短期的にも経済産業政策と地域経済政策として期待できる。たとえば現状は、住宅用だけの市場で年間100~150万kW規模(およそ5千億円市場)にすぎない国内の太陽光発電だが、全量買取制度が施行され、メガソーラーが実現する2012年度には、数倍となる数兆円規模の市場が期待できる。これほどの民間市場が一挙に出現する可能性があるのだ。

にもかかわらず、あまりに日本が立ち後れてきたために、「為にする批判」が横行している。たとえば「自然エネルギーは高い」という批判だが、太陽光発電以外の自然エネルギーは十分に低コストである上、高いと批判されてきた太陽光発電も近年は急激にコストが低下している。青天井の損害賠償保険を含めるととんでもない高コストとなる原発や過去10年で5倍も高騰した化石燃料を「回避」するメリットも含めると、実は自然エネルギーこそがもっとも経済競争力を持つ。

また「自然エネルギーは不安定」という批判も、個別の電源の変動と電力システム全体の需給調整を意図的に混同して、国民を混乱させる典型的な議論だ。日本のように変動する自然エネルギー電源の比率が小さい地域では、そうした変動は全体の電力需給の中で吸収されるため、問題にならない。スペインのように全体の2割程度まで風力発電の比率が大きくなると、気象予測などを活用しつつ、水力発電や天然ガスを用いた全体での需給調整でカバーしている。

日本の場合、送電設備などハード面の整備も必要だが、その前に地域独占の電力会社が他の地域の電力会社と一緒に全体的な需給調整をする体制や仕組み、経験がないことが最大の問題なのである。



さらに剰余が大きくなれば、国際連系を含む大規模な送電網(スーパーグリッドなど)の拡充や「賢い送電網」を利用した需要側管理、蓄電など、多様なオプションで自然エネルギーの変動を吸収することができる。

### Ⅲ. 根底にある知と政治の退廃

以上に述べた環境エネルギー政策の大きな方向性のほかにも、損害賠償と原発事故処理問題、発送電分離など独占的な電力市場の抜本的な見直し、温暖化政策の見直し、そして省庁再編を射程に入れた原子力・エネルギー行政の刷新が不可欠である。

ところが現状を見ると、事故に至る経緯も事故が起きてからの措置も、あまりに無策無能ぶりを露呈した原子力ムラの人々が、いまだに誰も責任を取っていないことに驚くほかない。しかも太平洋戦争と違うのは、「戦犯」が「敗戦」を理解せず責任も取らず、いまだに進軍ラッパを吹き鳴らしているため、政策論議が混乱していることだ。福島第一原発事故が発生して以来、マスメディアでもネットメディアでも、あまりにも無責任な「専門家」の言説を目の当たりにしている。

これほどの事故を目の当たりにしながらも、なぜデタラメな言説がまかり通るのか。結論すれば、日本の知識人総体の中心にぽっかりと空いている「知の空洞」が問題の本質なのではないか。ここでいう知識人とは、大学教授や専門家に留まらず、政治家、官僚、評論家、ジャーナリスト、カリスマブロガーなど、一定の言説(ディスコース)を構築する役割を担っている人々を指す。海外とくに欧州の環境政策コミュニティが構築し共有している「環境ディスコース」という知の共通基盤が、明らかに日本には欠落している。

ディスコースとは、社会的な言論活動の総体のようなものを指すが、単なる事柄の記述ではない。無数の言論活動(ディスコース)を通じて、「共通意味世界(民主的な合意に基づく統治を可能にするための共通認識を醸成するための枠組みを持つような社会)」が構成され、それが「社会」(social world)を構築していくという共通理解が、少なくとも欧州知識人にはある。環境ディスコースとは、環境分野で行われてきた無数のディスコースの集積を通して構築され、発展しつづけている「歴史を背負った共通意味世界」であり、欧州の環境政策(環境法、環境政治、環境研究など)の共通認識の枠組みの土台となっている。

具体的には、1960年代からの「汚染」と「環境規制」の発展、1970年代の「エネルギーと原子力論争」、1980年代の「持続可能な開発」概念に結実した「環境と経済の統合」(エコロジック近代化)、1990年代以降の「リスク社会」やグローバル化・気候変動、というかたちで展開してきた環境政策とそれを構築してきた無数の言論活動の総体が環境ディスコースなのである。

それを通して、「自然自体の価値」など環境規範や、「汚染者負担原則」「拡大生産者責任」などの環境原則、そして「持続可能な開発」などの鍵概念が、それぞれ内実を伴って共有されてきた。

右往左往する原子力ムラからの言論を、そうした視点から眺めると、ほとんどデタラメに近い。共通意味世界を構築するための継続的な知的貢献ではなく、その場しのぎの場当たりの発言にしか見えない。環境ディスコースを構築することなく、その都度、「落としどころ」で泥縄の対応をしてきた日本の環境エネルギー政策には、少なくとも5つの重要な「忘れ物」がある。

その代表が、言うまでもなく原子力だ。北欧では1970年代、ドイツでも1980年代に乗り越えてきた原子力論争を、日本は「国策」の名の下に避けて通り、いまだに消化していない。実は米国や英国も十分に消化してきたとは言い難いが、少なくとも経済合理性からの議論は経ているのに対して、日本はそれも避けてきた。その反動で、3・11直前まではナイーブな原子力復古主義が幅を利かしてきた。

第2の「忘れ物」は、電力市場改革だ。これは、電力会社対経済産業省の総力戦となり、最終的には「日本型電力自由化」、すなわち見せかけだけの「自由化」で事実上の現状維持となった。本来であれば、環境エネルギー政策としての共通意味世界を構築すべき言論が、経済学の一分野(公益事業の規制緩和)に矮小化され、さらには組織間バトルへと堕ちてしまったことも、原因の一つだ。

第3の「忘れ物」は、環境税だ。税自体が日本では密教中の密教である上に、他省庁かつ多くのステークホルダーにまたがるため、これまでほとんどまともな政策論議の場が与えられず、「アジェンダに乗るかどうかが」唯一の争点だった。

原子力ムラに象徴される日本の閉鎖的な環境エネルギー政策コミュニティでは、そうした原則を踏まえた未来志向の立体的な環境ディスコースを築くかわりに、定量的なエネルギーモデルを奉ってきた。そうしたエネルギーモデルによれば、現実とはいっさい無関係に、原発はもっとも安く未来永劫増えてゆくという、規範性もなく現実離れしたシナリオになるのである。

3・11以後従来の反省に立ち、国民に開かれた熟慮民主主義に基づいて、現実に立脚し、かつ経済合理性と規範性を高い次元で両立させた立体的な公共政策としての原子力・エネルギー政策に改めるべきときではないか。

#### 著者紹介

飯田哲也(いいた・てつなり)  
環境エネルギー政策研究所 所長  
(専門分野/関心分野)環境エネルギー政策/  
持続可能なエネルギー社会の実現





# 福島事故の収束と環境回復に向けて 日本原子力研究開発機構の活動

日本原子力研究開発機構 佐久間 実

東京電力㈱福島第一原子力発電所で事故が起きた昨年3月11日、日本原子力研究開発機構は対策本部を設置し、機構の総力をあげて福島への協力活動を始めた。その内容は、国に対する技術的助言や環境モニタリングや除染作業、事故収束に向けた知見や技術の提供など多岐にわたる。本稿では事故発生以来、原子力機構が行ってきた協力活動のあらましを紹介する。

昨年3月11日に東京電力㈱福島第一原子力発電所で事故が発生すると、指定公共機関である日本原子力研究開発機構は鈴木篤之理事長を本部長とする対策本部を設置し、事態の把握と収束に向けてさまざまな活動を始めた。

事故直後には政府からの要請に応じ、原子力安全委員会をはじめとする政府機関へ専門家を派遣し、事故進展シナリオ解析や放射能の環境拡散解析などを開始。またひたちなか市の原子力緊急時支援・研修センターでは、放射能分析や被ばく線量測定のための地元への職員派遣を始めた。その第1陣となる環境モニタリング要員7名は12日未明に自衛隊の百里基地をヘリコプターで出発し、10時から福島県内でモニタリング活動を始めた。

さらに5月6日には、福島支援本部(11月21日に福島技術本部に改組)を立ち上げて対応体制を強化。福島県内の環境修復に向け、実施できることから早期に取り組むこととし、除染の実地試験、除染講習会への講師派遣、ホールボディカウンタ測定、放射線に関するご質問に答える会の開催を始めた。また航空機による環境放射線の広域測定、計算モデルによる空間線量評価などの活動も開始。6月末には福島市に事務所を開設し、7月には福島大学との連携協力協定を結んだ。

一方、福島第一原子力発電所の事故収束に向けた技術協力については、政府と東京電力による統合対策室の特別プロジェクトチームに常時参加。とくに破損燃料や滞留水の浄化処理処分に係る技術開発と基盤整備の協力を重点的に行っている。

## 原子力事故対応者は延べ3万人超

原子力機構による現在の福島協力体制は、理事長を本部長とする福島技術本部が司令塔の役割を果たしている

*Assistance to the Fukushima Daiichi NPP Accident:*  
Minoru SAKUMA.

(2011年 11月14日 受理)

同本部の下には福島環境安全センターと復旧技術部、企画調整部がある。このうち福島環境安全センターのスタッフは兼務者や除染事業のための雇用者を含めて約140名で、福島県内放射線モニタリング・マップ作成や環境修復方法などを担っている。復旧技術部(同15名)は燃料の処理技術や滞留水の処理技術など、サイトでの収束活動が主。そして企画調整部(同13名)は、これらの総括や関係機関との調整を行っている。なお震災後、機構が国や福島県内などに派遣した延べ人数は約4万人で、今も常時、50人前後の職員が活動を行っている。

その内容は大きく①福島県における除染への取り組み、②福島第一原子力発電所事故の収束に分けられる。ここからは、それらの内容について紹介する。

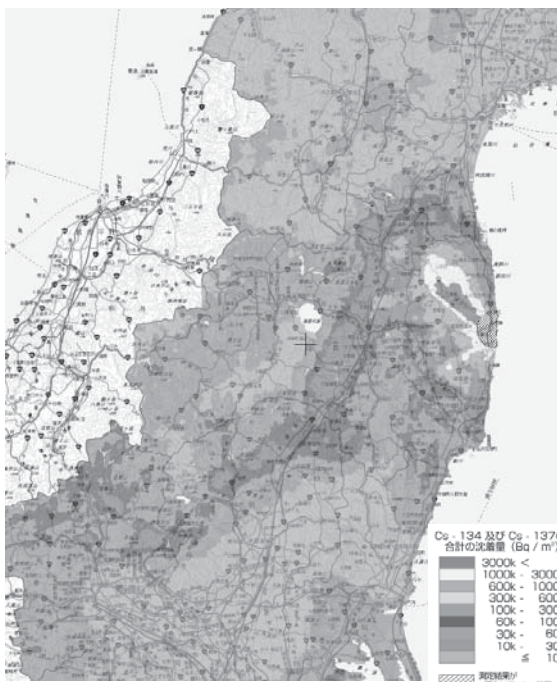
## 放射性物質による汚染状況を把握

福島県における除染への取り組みでは、(1)放射性物質による汚染状況の把握、(2)学校、公園等の個別施設を対象とした除染手法の確立、(3)地域全体を対象とした除染に関わる実証試験、(4)福島県民への放射性物質による環境影響に関する情報提供を行っている。

このうち放射性物質による汚染状況の把握は、まずサイトから80 km 圏内を2 km、その外側の地域を10 kmのメッシュに分割。各メッシュの代表地点から土壌試料を採取したり、走行サーベイシステムを利用したりすることにより、放射性核種濃度分布マップと線量率分布マップを作成している(第1図)。これは文部科学省の委託事業として、全国の大学や研究機関と連携協力して実施しているものである。さらにサイトから離れた広い範囲については、小型検出器を搭載したヘリコプタを使用し、上空から広域モニタリングを実施している。

## 個別施設ごとに除染手法を確立

放射性物質による汚染状況の把握と同時に進めているのが、学校や公園等の個別施設を対象とした除染手法の



第1図 セシウム134及びセシウム137を合わせた沈着量  
(11月22日の文部科学省のHPより)

確立である。このうち学校の除染については、福島大学附属中学校と幼稚園の校庭と園庭で実証試験を実施。校庭では表面から5cm程度の深さまでの土をはぎ取り、その分を同量の山砂で覆った。その結果、対策前に比べ、空間線量率を1/10~1/20に下げることができた。対策前は、地表に近づくほど放射線量が高かったのに対し、対

策後はその差がほとんどなくなった。なお除去した土壌については、校庭に深さ1.5mのトレンチを掘り、その底面と側面に遮水シートを設置した場所を仮置き場として保管した。

また同校ではプールの除染を行った。屋外プールの水にはセシウムが含まれていたため、ゼオライトと凝集剤を用いてプール水中のセシウムを吸着させ、水をろ過して排水、生成した沈殿物は遮水シートで包んで土のうで覆って保管する方法を採用した。この結果、除染前には1lあたり200Bqを超えていた放射性物質濃度は、除染後には検出限界以下になった(第2図)。なお機構では、これらの試験で得られた成果を「学校プール水の除染の手引き」として、HPで公開している。

地域全体を対象とした除染では、伊達市と南相馬市の一部区域をモデル地区として選定。地区内の家屋や畑、道路、森林などの放射線量を測定した後、対象に応じた除染方法の実証試験を行っている。具体的には建物の屋上や樋のごみの除去やふき取り、庭での落ち葉かきや高木のせん定、表土のはぎ取りや客土など。今後は対象ごとにさまざまな方法を実施した上で、効果や除染に伴って発生する除去物の量、その管理、コストや安全性評価を行うことで、実践的な除染方法を選定していく。

森林を対象に行った予備的除染試験では、木の枝打ちと落ち葉かき、除草、堆積有機物の除去を行うことで、作業前に比べ表面線量率を半減させることができた。

さらに内閣府の委託事業として、警戒区域や計画的避難区域等の12市町村を対象に、除染モデル実証を始め



第2図 上図は校庭の土壌中の空間線量率を調査しているところ、下図はプールの除染作業の様子



た。対象とする市町村を3つのグループに分け、公募により採択された業者が除染を行い、効果や経済性、安全性などを評価する。

### 福島県の人たちの被ばく量を測定

福島県に住む人々への放射性物質による環境影響に関する情報提供では、「除染業務講習会」への専門家の派遣や「放射線に関するご質問に答える会」の開催、ホールボディカウンタによる福島県民の人たちの測定を行っている。

このうち「除染業務講習会」は、福島県が県内企業を対象に除染に関する専門知識や技術を持った作業員の養成を目的として開催しているもの。2012年度末までに3千名の参加が予定されており、機構ではこの講習会に専門家を講師として派遣している。

「放射線に関するご質問に答える会」は、福島県内の幼稚園、保育園、小・中学校からの申し込みに応じて開催しているもの。放射線に関する説明と、保護者や先生からの質問に回答している。昨年7月から始めており、今年1月までに約140か所で実施する予定である(第3図)。この説明会には毎回、数名の放射線の専門家や研究者からなるチームを派遣している。これに対応するため機構では、560人を派遣要員として登録している。

ホールボディカウンタ(WBC)による測定は、福島県からの要請により、計画的避難区域や警戒区域にある市町村に住む人々を中心に実施しているもの。1日で100人前後の測定を実施しており、昨年12月末までに計8千人の測定を実施する予定である(第4図)。

機構の原子力緊急時支援・研修センターに設けた健康相談ホットラインでは、これまで約3万件の問合せに対応してきている。また機構では、国の原子力災害対策本部や福島県災害対策本部が発行した住民のための除染マニュアル作成にあたって、その技術的支援を行ってきている。そのほか原子力機構では、福島大学と昨年7月に連携協力協定を締結。環境修復に関する研究協力などを行っている。さらに、こうした活動を強化する方針である。



第4図 ホールボディカウンタによる全身計測  
(写真は機構職員をモデルとしたもの)

### 炉心冷却や滞留水処理などを検討

事故収束に向けた取組みは、炉心の長期冷却や高いレベルの放射性廃棄物の貯蔵・処理方法の検討などサイト内での取組みと、ロボットを利用した遠隔操作技術に対する支援、放射線管理要員の育成研修等からなる。このうちサイト内対応では、原子力委員会の東京電力福島第一原子力発電所における中長期措置検討専門部会に参画して、同発電所のステップ2以降となる中長期的対策の検討を進めている。

具体的には炉内燃料の破損程度の推定や燃料取り出し方策の検討、熔融燃料体の特性評価、熔融燃料体の処理・処分方策の検討など。また高濃度に汚染した滞留水の浄化に伴って発生する廃ゼオライトや廃スラッジなどの放射性廃棄物について、その貯蔵や処理方法の試験・検討を進めている。

一方、サイト内にはまだ、放射線のレベルが高すぎるため、人間が立ち入ることができない場所がある。そんな環境での活躍が期待されるのが、ロボットである。当機構はこれまで、ロボット3台を準備している。このうち「JAEA-1号」は屋内のガレキを除去できる機能のほかに、耐放射性カメラと放射線計測機を搭載。「JAEA-2号」は水スプレーやブラシで除染できる性能を備えた。「JAEA-3号」はガンマ線を可視化できる装置を搭載し、昨年9月下旬から現地で稼働を始めた。これら进行操作す



第3図 「放射線に関するご質問に答える会」のよう



第5図 ロボット「JAEA-1号」(左上)、「JAEA-2号」(右上)、「JAEA-3号」(左下)、これら进行操作する操作車(右下)



る操作車「TEAM NIPPON」は、すでに2台がサイトに投入されている(第5図)。

また人材育成では資源エネルギー庁から委託を受けて、放射線管理要員等の育成研修を行っている。対象者は東京電力株が協力企業の社員に呼びかけて募集した250名。昨年末までかけて研修を実施していく計画である。

—参考資料—

東日本大震災に伴う原子力機構の対応状況について

<http://www.jaea.go.jp/jishin/past.html>

除染の手引き(JAEA発行)

<http://www.jaea.go.jp/fukushima/josentebiki.html>

<http://www.jaea.go.jp/fukushima/josenvtr.html>

学校プール水の除染の手引き(同)

<http://www.jaea.go.jp/02/press1.shtml>

放射線に関するご質問に答える会での説明資料(同)

<http://www.jaea.go.jp/fukushima/pdf/setsumeipdf>

環境モニタリング班の1日

午前6時起床、仕事が終わるのは夜の10時、それが5日間続いて一区切り。原子力機構が行っている福島での環境モニタリング班の活動は、そんなサイクルで行われている。

震災からまもないころ、私はこの環境モニタリング班の生活サポートを担当した。

福島でのさまざまな協力活動の拠点となっているのが、市内にある国民宿舎。ここで毎日、朝夕のミーティングを行う。宿泊場所もここ。夜は3つの大部屋で、それぞれ12人が雑魚寝で寝る。

サポート係の一日の最初の仕事は、昼食の買い出しに始まる。起床時刻は4時半。みんな夜遅くまで仕事をしているから、少しでも長く寝かせてあげたい。だから熟睡しているみんなを起こさないよう、目覚ましなしで起床し、そっと布団を抜け出す。その足で食料品店へ向かい、前日予約していたおにぎりやパン、お茶のペットボトル30人分を受け取る。震災後には福島市内でも多くの店舗や飲食店が被害を受けた。このころは職員たちの食事の確保が、サポート班の重要な役目だった。



6時に起きた仲間たちは、宿舎で質素な朝食をすませた後にミーティング。それが済むと、おにぎりやパンを昼食用に車に積み込み、モニターを積んだ車3台で宿を出発する。それぞれの車で放射線量を測定するのは、1台あたり十数か所。それらを効率よく回るために、車には最適ルートがGPSに読みこまれている。昼食は、その合間にとる。すべてを測定して宿舎に戻るの夜8時ごろ。そそくさと夕食をすませ、ミーティングに入る。すべての作業が済むのは夜の10時ごろで、それから入浴となる。その後のわずかな時間が、みんなの自由時間となる。

そんな生活が5日間続いて、1回の支援活動が終了する。

\* \* \*

私が行ったのは昨年4月上旬のころ。宿舎の近くを流れる阿武隈川の川沿いでは桜が満開だった。例年だと花見でにぎわう場所だと聞いた。けれども今年は、花見をする人はおろか、足を止めて桜を見る人さえ全くいなかった。(佐田 務)

# 放射能汚染地域の除染を急ごう

## 主な除染方法の原理—伊達市，飯舘村での除染試験から

NPO 法人 放射線安全フォーラム 吉田 善行

2012年1月1日に全面施行の「放射性物質汚染対処特措法」のもと、福島第一原子力発電所事故で汚染された地域の除染が本格化する。避難中の住民の一刻も早い帰還のために、効率よく除染作業を進めなければならない。今後、必要な技術開発項目も残されてはいるものの、これまでの除染実証試験等の結果に基づいて、基本的な除染方法はほぼ固まってきている。本稿では、NPO 法人 放射線安全フォーラムが中心となって実施した除染試験の結果を基に、主な除染方法の原理を解説する。

### I. はじめに

東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故によって、大量の放射性セシウム等が環境中に放出され、広い地域が汚染された。避難生活を余儀なくされている住民が元通りの生活を取り戻すには、まずは生活圏の放射性セシウムを除去するほかに手立てはない。国は、2011年8月下旬に「汚染への対処に関する特別措置法」を制定し、2012年1月1日にこれが全面施行され除染作業が本格化する。避難住民の一日も早い故郷への帰還のために、迅速な除染の実施が必要である。そのためには最適な除染方法を適用する必要がある。方法の選択に当たっては、除染対象の種類、物量、性状、放射能濃度のほかに、目指す除染効率、発生する廃棄物の量、必要経費、実施期間、作業員の安全性などの多岐にわたる要因を考慮しなければならない。

NPO 法人放射線安全フォーラムは2011年5月以降、日本原子力研究開発機構、地方自治体、民間企業などとの協力のもと、福島県伊達市及び飯舘村で放射性セシウムの除染試験を進めてきた。全村が計画的避難区域に指定されている飯舘村では、とくに空間線量率が高い長泥地区の民家、農地を対象に、5月19～20日及び26～27日に除染試験を実施した。これには4日間、延べ約60人の専門家が従事した。また、下小国、月舘地区に100世帯を超える特定避難勧奨地点を抱える伊達市では、学校、集落、桃畑、里山等を対象に、7月上旬から9月末までの間、試験を実施した。そのうち富成地区の小学校、幼稚園の除染では、7月2～17日の期間中11日間、延べ

370人の専門家に加えて、学校、地元、PTA 関係者、一般ボランティア等が多数従事した。

本稿では、これらの除染試験の結果から導き出した“最適な除染方法は何か”を整理し、除染の実践において方法を選択する際の一助となるようその原理を解説する。

### II. 除染方法の原理

#### 1. 土壌表層を薄く剥ぎ取る方法

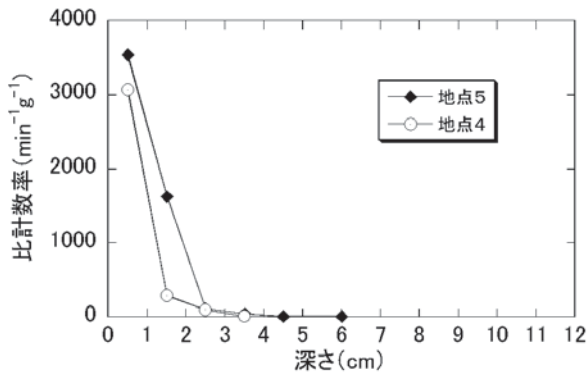
除染の対象のうち、最も大きな割合を占めるのが広大な大地の表面の土壌である。その大地は、宅地、公共施設用地、工業用地、農業用地、山林……と多彩な目的に利用されているが、汚染された土壌について共通している点の一つだけある。それは、土壌中の放射性セシウムが、地表のごく浅い部分に濃縮されて留まっているということである。そのことは本節で述べる土壌の除染方法と大いに関係している。

すなわち、2011年3月中旬にこの大地の表面に降下した放射性セシウムは、速やかに土壌表層部に存在する粘土鉱物の粒子と結合して捕捉された。一たん捕捉されたセシウムは極めて安定であるため、それ以降、土壌中をほとんど移動せず、また水溶液中にセシウムイオンとして溶け出すこともなく、土壌の表層付近に留まった。粘土鉱物中の負の電荷を有する空孔や隙間に、セシウムイオン(正の電荷を有する)が強く結合すること、及びその空孔や隙間の大きさが水溶液中のセシウムイオンの大きさ(直径が約 $5 \times 10^{-8}$ cm)とほぼ等しいため、捕捉される強さがさらに増すからである。

放射性セシウムが土壌表層付近に留まっていることを示すデータがある(第1図)。飯舘村長泥地区の牧草地において放射性セシウムの深さ方向の分布を調べた結果である(2011年5月19～20日にサンプリング、測定)。表面から3cmほどの深さの土壌中にほぼ全ての放射性セシ

For Promoting Remediation of Contaminated Area ; Principle of Remediation Methods—From Tests at Date-city and Iitate-mura in Fukushima Prefecture : Zenko YOSHIDA.

(2011年 11月 9日 受理)



第1図 牧草地土壌表層での放射性セシウムの分析<sup>1)</sup>

ウムが濃縮されていることがわかる。牧草地だけでなく、同地区内のビニールハウス用農地や水田、あるいは伊達市の小学校敷地、果樹園などにおいても、深さ数 cm ~ 5 cm 以内の土壌表層付近に放射性セシウムが留まっていることを確認した。

以上のような土壌中でのセシウムの特性から、最も効率的な土壌の除染方法は、この表層部分を丁寧に剥離することである。ここで剥離する際に、廃棄物の発生量を極力少なく抑えるために、できるだけ薄く表層部を削り取ることが大切である。このような土壌表層剥離作業にはできるだけ、鍬やシャベルを使った人力での作業が望ましい。伊達市の小学校敷地内の草地や砂利道などの除染作業には、学校PTAの父兄、地区の住民、ボランティアが多数参加した。これにより、広い校内の除染が効率よく実施された。なおこのような人力での作業の際に砂塵が舞う条件下では、後述するPIC法の採用、あるいは少なくとも散水しながら作業するなど、飛散防止対策が必要である。

人力によらない方法として、伊達市の民家の敷地内で重機(パワーシャベル)を用いて土壌表層を剥離する方法を試みた。剥離する土壌の厚さが10 cm 以上になったため高い除染効率は得られたものの、土壌廃棄物の発生量が倍加した。重機を使うにしても、より薄く土壌表層を剥離できる機械等の改良、開発が必要であろう。

例外的に、重機を活用できる場合がある。例えば、牧草が比較的均一に生育している牧草地などの除染には、牧草除去用の専用機の使用が効果的であると思われる。

また、伊達市の桃畑で土壌表層を剥離する除染方法を試験したが、桃畑などの果樹園の除染での特別な留意点は、土壌を剥がす際に、土壌表層付近に広く張っている樹木の根を痛めないことである。できるだけ丁寧に、薄く、人力で作業することが望ましい。厚さ2 cm 及び5 cm の表層を真空吸引機を併用しながら園芸用シャベルで剥ぎ取る方法でそれぞれ40% (2 cm 剥離) 及び80% (5 cm 剥離) 程度の除染効率が得られた。ただし除染対象が広い面積を有するので、果樹園の表層剥離に適した専用機械の開発なども必要であろう。

土壌表面を薄く剥離する方法としてポリイオンコンプレックス(PIC)法<sup>1)</sup>を試みた。この方法は、高分子陽イオンと高分子陰イオンを溶解した水溶液を土壌表面に散布し、土壌内部に浸透して固化する高分子錯体(ポリイオンコンプレックス:PIC)で土壌表層部を固定化し、PICと共に土壌表層部を剥離することを原理とする。比較的少量(例えば土壌の2 wt%程度)のPICを浸透させることによって土壌表層を固定化できることが本法の特徴である。第2図に、ビニールハウス用農地の土壌表層をPICで固定化して剥離したときの土壌表層の薄片を示す。このPIC法のもう一つの有効性は、土壌の剥離作業中の土壌粉塵の飛散を抑制できる点にある。比較的粉塵が飛散しやすい乾燥したビニールハウス用農地での試験において、PIC法を採用することによって土壌粉塵の飛散率を1/2~1/3以下に低減できることを実証した。

PIC法の有効性は、飯館村の民家、農地、伊達市の集会場などの試験で実証された。いずれの試験においても、PIC法で土壌表面の放射性セシウムを効率よく除去できることを確認した。

適用例として、飯館村の農用地の除染にPIC法を適用した試験結果は以下の通りである。除染前に牧草地、水田及びビニールハウス用農地で測定した土壌表面の放射能濃度(GMサーベイメーターによる計数值)は $1.7 \times 10^4$ cpm,  $4.3 \times 10^4$ cpm 及び $1.6 \times 10^4$ cpmであった。PIC法による土壌表層剥離法で、牧草地、水田、ビニールハウス用農地、いずれにおいても放射性セシウムの80~95%を除去することができた。

土壌表層を剥離する方法とは別に、土壌中のセシウムを水溶液中にセシウムイオンとして溶出することを前提として、数多くの吸着剤や抽出剤を利用する方法が提案されている。しかし上述のように非常に安定な形態で存在する土壌中のセシウムを水溶液中に溶解することは一般的には難しい。もちろん高温の酸や水溶液を用いて土壌中からのセシウムの溶出を加速することはできるが、



第2図 ビニールハウス用農地の除染に用いたポリイオンコンプレックス(PIC)で固定化して剥離した土壌の薄片<sup>1)</sup>



広大な大地の土壤の除染方法としては現実的ではない。

## 2. コンクリート、アスファルト表面を薄く切除する方法

コンクリートやアスファルトの表面を汚染している放射性セシウムは、これらの母材に含まれる粘土鉱物の粒子と強く結合している。そのため、コンクリートやアスファルトのごく表面付近に濃縮されており、土壤中の放射性セシウムと同様にほとんど移動することはない、また水溶液中に溶け出すこともない。したがって、これを除染する最も適した方法は、専用の機械を用いて、コンクリート、アスファルト表面の1 mm 程度あるいはそれ以下の薄い層を削り取る方法である。

アスファルト及びコンクリート表面の薄層剥離による除染に各種装置の適用を試みた。中でも、鉄球(約1 mm 径)を対象物表面に高速度で衝突させて削り取る、ショットブラスト機を用いる方法が最も効果的であった(第3図)。同装置を用いると、1回の走査で0.1~0.2 mm の厚さのアスファルト表面を剥離でき、これによって約85~90%の放射性セシウムを除去できること、走査を2回繰り返すと除去効率は90%以上になることなどを実証した。

アスファルト路面にはしばしば大小の亀裂があるが、そのような箇所ではショットブラスト機を用いても除去効率は50~70%程度に低下する。そこでは真空吸引装置を併用し、亀裂内の土砂、ゴミ等を排除することによって高い除去効率が得られる。また、除染後の亀裂部には充填剤を注入し、再汚染の防止対策を施すのが望ましい。

コンクリート表面の除染にもショットブラスト機は有効である。また、コンクリート製の階段などの狭隘な対象物には、グラインダー(コンクリートカンナと呼んでいる)が有効である。コンクリート表面を薄く(約0.5 mm 厚さ)切除することによって、十分に高い除去効率が得



第3図 アスファルト、コンクリート表面切除用のショットブラスト機(株アトックスによる写真提供)

られた。なお、切除作業の際には、同装置に集塵機能を接続し、コンクリート微粉末の飛散防止を図る。

適用例として、伊達市の小学校においてアスファルト、コンクリート部の除染にこれらの表面切除用の機械を用いた結果は以下の通りである。除染前の空間線量率は、校舎に向う坂道のアスファルト舗装の通学路で5~8.5  $\mu\text{Sv/h}$ 、校舎前のアスファルト舗装の広場で0.7~1.6  $\mu\text{Sv/h}$ 、広場からグラウンドに降りる長いコンクリート階段で1.2~1.8  $\mu\text{Sv/h}$ であったが、除染の結果、ほとんど全ての地点で空間線量率が低減した。例えば、最も空間線量率が高かったアスファルト舗装の通学路でも全て0.6~1.0  $\mu\text{Sv/h}$ と顕著に線量率が下がった。

これらのアスファルト表面を機械的に剥離する方法とは別に、各種の酸溶液、塩溶液を用いてアスファルト表面から放射性セシウムを溶出する“化学的除染法”を試みた。最も高い除染効率が得られた塩酸(1 mol/l)、硝酸(1 mol/l)、あるいはクエン酸ナトリウム(1 mol/l)で溶出させる方法でさえ、除去効率は20%程度に留まった(長縄ら、私信)。

## 3. 高圧で水を吹き付けて洗浄する方法

建造物の屋根や壁面にルーズに付着した埃などにも放射性セシウムが沈着している場合が多い。屋根瓦、雨樋や壁の表面に高圧で水を吹き付けて、埃とともに放射性セシウムを洗い流す高圧洗浄法が比較的簡便であり、広範囲の除染に有効である。とくに高所の除染には現時点では最良の方法である。ただし、瓦に沈着した放射性セシウムが瓦の表面にかなり強固に吸着している場合も多く、これには高圧洗浄のみでは十分な除染効率は得られない。瓦に沈着した放射性セシウムが高濃度であるような場合には、洗浄剤を用いてブラシで擦る方法を併用するなどの特別な処置が必要である。また、洗浄操作中に生じる放射性セシウムを含んだ霧状の水滴の飛散を低減すること、排水の流路を管理して放射性セシウムが周辺に拡散しないようにするなどの対策が必要である。

校舎の屋上、ベランダ等の除染に高圧洗浄法が有効であった。例えば、ベランダ部の苔、汚泥、落葉などを洗い流すことで約90%の放射性セシウムを除去できた。

プールサイドに敷いてあるゴム製マットを除染する際に、市販の酸性洗剤を用いてデッキブラシあるいはポリッシャーなどで擦った後、高圧洗浄する方法で90%以上の高い除染効率が得られた。また、プールサイド側溝の除染でも、苔、土砂、枯葉等を真空吸引機で除去した後、高圧水洗浄する方法が有効であった。

アスファルトやコンクリートで舗装された路面の除染に、高圧洗浄法や各種洗剤を併用してポリッシャーで表面を擦る方法を試みたが、十分な除染効果は得られなかった。

#### 4. 汚染物そのものを撤去する方法

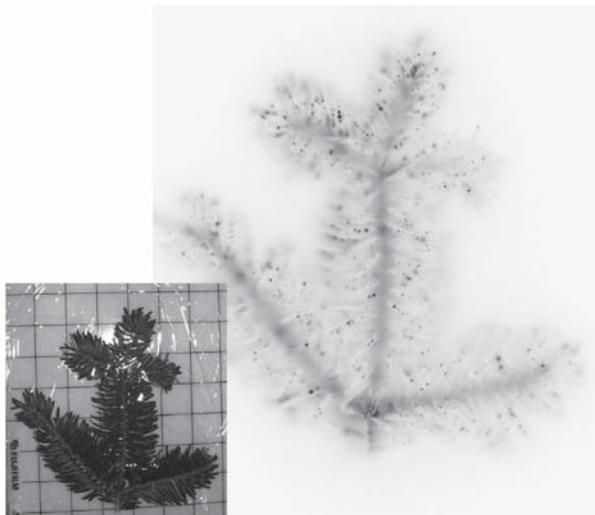
可能であるなら、放射線源そのものを取り除く方法が最も除染効率がよく確実な方法である。この除染方法の適用例は数多いが、飯館村及び伊達市での除染試験の結果を以下に例示する。

飯館村民家の除染試験において、除染に先立って放射線源の実態を明らかにした結果、この民家周辺に存在する主な放射線源は、①屋根瓦などの建造物の表面に沈着したもの、②敷地内の土壌表層に沈着したもののほかに、③雨樋部に堆積している汚泥に沈着したもの、④雨樋の集水ピット周辺の土壌に濃縮されたもの、⑤裏庭に堆積した杉等の落葉、腐葉土に沈着したもの、⑥屋敷周辺の杉やモミの常緑樹の葉の表面に沈着したもの、等があることがわかった。これらのうち③～⑥の線源については、それらを撤去するのが最善の方法である。

すなわち、雨樋に溜まった堆積物や集水ピットに溜まった汚泥はできるだけ取り除く。これによって、例えば雨樋部の放射能の75～90%を除去することができた(例えば、雨樋部の表面の放射能濃度をGMサーベイメーターで測定した結果、除染前の $4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$  cpmが除染後には $1 \times 10^4$  cpm以下に低減)。なお、堆積物や汚泥が粉塵として飛散するような場合には、あらかじめ前述のPIC法で汚泥を固定化した後、取り除くのが望ましい。

裏庭に堆積した杉等の落葉も撤去するのがよい。また裏庭や横手の斜面には腐葉土の上に雑草が生えた状態になっており、同地点の放射能濃度が比較的高い(例えば、 $1.5 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$  cpm)。ここでは、腐葉土、草を全て除去し、さらに薄く土壌を削り取ることによって放射能の60～80%以上を除去できた。

飯館村民家の屋敷裏の針葉樹林に生育していたモミの葉を採取し、オートラジオグラフィで放射性セシウムの有無、分布を調べた結果を第4図に示す。黒さが濃



第4図 モミの葉のオートラジオグラフィ<sup>2)</sup>  
黒く写っている箇所放射性セシウムが沈着。

いほど放射性セシウムがより多く存在することを示す。この結果から、葉や小枝にほぼ均一に放射性セシウムが沈着していることがわかった。詳細については文献<sup>2)</sup>を参照されたい。杉やモミの常緑樹の葉の表面に沈着した放射性セシウムは強固に結合しており、水などで洗浄するだけでは除くことはできない。枝打ちあるいは伐採などで撤去する必要がある。

飯館村民家の除染試験で、除染前に、母屋の玄関内、和室、台所、廊下などの全9地点で線量率を測定した。4～10  $\mu$ Sv/hと全体にかなり高いが、とくに裏庭に面した部屋の外壁付近(6.5～9.6  $\mu$ Sv/h)が高く、裏庭にある線源からの寄与が大きいことが示唆された。また、雨樋からの集水ピット近くの廊下付近の線量率も高かった。全ての除染作業を終了した後、母屋内の放射線量率を測定した結果、除染前に高い線量率を示した裏庭に面した部屋、及び雨水ピット近くの廊下における線量率は低減し、9地点全ての線量率が3.0～4.3  $\mu$ Sv/hでほぼ一定値を示した。しかし、得られた除染効果は十分とはいえず、今後さらに除染する必要がある。民家周辺の杉やモミの木を広範囲(例えば民家から約50 mの範囲)にわたって伐採することで更なる線量率の低減が可能であると考えられる。

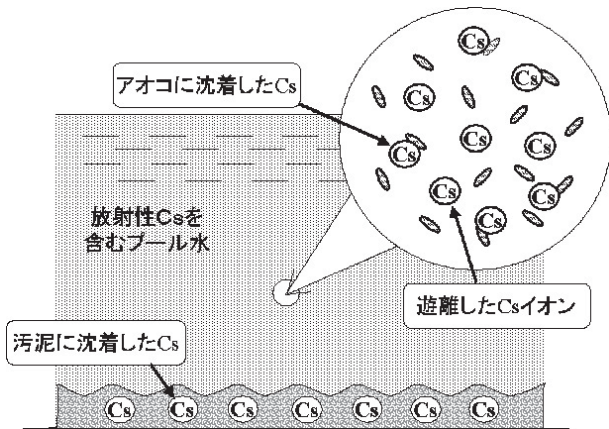
伊達市で実施した里山の除染試験の結果は以下の通りである。落葉樹林は、新緑前の2011年3月中旬、葉をつけていなかったため、降下した放射性セシウムの大部分は地面を覆っていた前年秋の落ち葉、腐葉土に沈着した。現時点(2011年秋)での最も効果的な落葉樹林の除染方法は、前年の落ち葉、腐葉土を撤去することである。2011年10月に実施した伊達市の里山での除染試験において、落ち葉を清掃するだけで30～60%の除染効率が得られることを確かめた。さらに落ち葉、腐葉土の下部の土壌を薄く剥ぎ取ることによって除染効率を高めることができた。一方、2011年春以降に生育した広葉樹の葉には放射性セシウムはほとんど付いておらず、除染の対象にはしなくてよい。

常緑樹林(主に杉林)の除染については、地表の落ち葉の撤去だけでは除染効率は10%程度と低く、地表の土壌を約5 mm厚さで表層剥離する必要があることがわかった。これによって約90%の除染効率が得られた。なお上述の通り、常緑樹の葉の部分は高程度に汚染されているので、枝打ち、伐採等の対策が必要である。

#### 5. 水の浄化、排水

学校のプールには、前年(2010年)秋から水が満たされたままになっており、プールの底には砂塵や落葉などから生じた汚泥が溜まっている。また水中にはアオコ類が繁茂している。プール水中に降下した放射性セシウムは主に、これらの汚泥あるいはアオコに結合、沈着した状態及び水中に遊離したイオンの状態で存在する(第5





第5図 プール水に含まれる放射性セシウムの化学形態

図)。例えば、伊達市富成小学校のプールの場合、全体の平均の放射性セシウムの濃度(すなわち、プール水全体をかき混ぜてほぼ均一にしたのち採水して分析した濃度)は約650 Bq/kgであったが、そのうち約70%が汚泥に沈着、約10%がアオコに沈着、約20%が遊離したセシウムイオンとして溶存することがわかった。

プール水の浄化<sup>3)</sup>には、まずアオコと遊離のセシウムイオンを含む“上部水”を浄化、排水した後、プール底に溜まった汚泥を回収する方法が効果的である。上部水の浄化方法を以下に示す。容量1トンのポリエチレン製タンクに上部水をポンプで汲み取り、これに少量のゼオライト粉末を加えた後、凝集剤(ポリ塩化アルミニウム溶液)を適量加え、ゼオライト粉末とアオコを凝集沈殿させる。上澄み水をポンプで排水した後、沈殿部を麻袋などを用いてろ過しながら排水し、沈殿部を回収する。プール底に溜まった汚泥は麻袋などを用いてろ過しながら排水し、汚泥は回収する。

上記の方法でプール水を浄化した後、プールに水道水を満たした状態で1～2日放置し、水中の放射能濃度を測定した結果、検出限界(約10 Bq/kg)以下であることを確かめた。また、プールサイドの除染によって、除染前の空間線量率2～8  $\mu\text{Sv/h}$ を0.7～0.8  $\mu\text{Sv/h}$ まで低減することができ、プールの使用が可能になった。

この水の浄化法は、プール水以外の溜まり水などの除染にも適用できる。富成小学校の校舎脇の蓮の池の除染にも同法を適用した。今後、農地に点在する溜め池などの除染にも同法が適用できると考えられる。

### Ⅲ. まとめ

基本的な除染技術の原理を解説した。除染対象に応じて適切な方法を適用しなければならない。一部、今後、早急に開発しなければならない技術、機械等もある。除染作業の実践とともに、迅速な対応が望まれる。また、除染で発生する廃棄物は適切な方法で管理、処分されなければならない。2011年10月29日には、環境省から中間貯蔵施設等についての基本的な考え方が提示された。廃棄物の仮置き場、中間貯蔵施設の設置を促進し、汚染地域の除染が加速されることを願ってやまない。

最後に、本稿の内容の基礎となった伊達市及び飯館村での除染試験は、NPO 法人放射線安全フォーラム副理事長の田中俊一氏が主宰し、福田達也氏、多田順一郎氏(以上(株)千代田テクノ)及び同社の皆さん、鹿嶋薫氏、斉藤浩氏(以上(株)アトックス)及び同社の皆さん、熊沢紀之氏(茨城大学)、長縄弘親氏、大貫敏彦氏(日本原子力研究開発機構)及び両研究グループの皆さん、伊達市役所、コープふくしまの関係者の皆さんはじめ、地域の方々、全国からのボランティアの方々の協力の下で実施されたことを付記し、謝意を表す。

#### —参考資料—

- 1) 長縄弘親, 熊沢紀之, 斉藤浩, 他, “ポリイオンコンプレックスを固定化剤として用いる土壌表層の放射性セシウムの除去—福島県飯館村における除染試験の速報”, 日本原子力学会和文論文誌, 10, 227-234(2011).
- 2) 坂本文徳, 大貫敏彦, 香西直文, 他, “オートラジオグラフィを用いた福島第一原子力発電所起源の放射性降下物の局所的な分析解析”, 日本原子力学会和文論文誌, (2012), 掲載予定. (早期公開中: <http://www.jstage.jst.go.jp>)
- 3) 学校プール水の除染の手引き, 日本原子力研究開発機構ホームページ(<http://www.jaea.go.jp/fukushima>)

#### 著者紹介



吉田善行(よしだ・ぜんこう)  
日本原子力研究開発機構・東京大学  
(専門分野)アクチノイド溶液化学, 主に電気化学的手法による分離・分析化学



# 低炭素型水素エネルギーシステム

(財)エネルギー総合工学研究所 石本 祐樹

低炭素型水素エネルギーシステムは、国内または海外の低炭素の1次エネルギー源から水素を製造し、輸送し、国内で利用するシステムである。このシステムを構成する要素技術である水素製造、輸送・貯蔵、利用の各技術について述べる。低価格の低炭素水素を導入した場合のシミュレーションを行った結果、エネルギー需給構造に求められる条件を満たしうる技術オプションとして、本システムの有効性を示した。

## I. はじめに

国際エネルギー機関の World Energy Outlook 2010<sup>1)</sup>では、2035年においても化石燃料がエネルギー供給の大部分を担い、石油価格も長期的に上昇すると報告されている。また、温室効果ガスの削減も避けては通れず、温室効果の主要部分を占めるCO<sub>2</sub>の排出量の低減が必須である。これを実現するためには、エネルギー供給および需要の両面から長期を見据えた取組みが必要となる。

わが国では、東日本大震災以降、エネルギー需給構造について政府や専門の研究機関にとどまらない範囲で検討が行われ、盛んに意見表明等が行われている。筆者の所属する財団法人エネルギー総合工学研究所においても「東日本大震災を踏まえたわが国のエネルギー需給構造のあり方に関する検討」と題して、中長期的なエネルギー需給構造に求められるロバスト性について提案している<sup>2)</sup>。

水素エネルギーは、燃焼(化学反応)時に温室効果ガスを排出しないという優れた環境特性と、再生可能エネルギーを含む多様な1次エネルギーから製造可能という供給安定性から、地球温暖化対策・エネルギー安定供給に貢献できるエネルギー媒体として期待されている。水素はこれまで国内において1次エネルギーから製造した2次エネルギーとしてとらえられることが多かった。そこで本稿では、海外における再生可能エネルギーやCO<sub>2</sub>回収貯留(CCS)を備えた化石燃料改質由来の水素をまとめて低炭素水素と定義し、低炭素水素のエネルギーバランス表上の1次エネルギーとして取り扱うことを述べ、水素エネルギー関連技術開発の現状と今後を展望する。II章では、水素エネルギーシステムを構成する水素製造技術、水素輸送・貯蔵技術、水素利用技術の現状を述べ、III章では、今後の展開として安価な低炭素水素を日本に

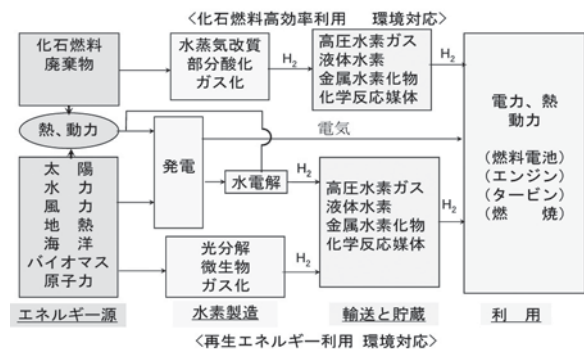
導入した場合の試算結果の例を示す。

## II. 水素エネルギーシステムにおける技術

### 1. 水素エネルギーシステム

水素は、原理的にすべての1次エネルギーから製造可能なエネルギー媒体であり、エネルギー供給の安全保障への貢献が期待される。また利用時にCO<sub>2</sub>を発生しないエネルギーキャリアであるため、CCSと組み合わせた石炭および天然ガスや、再生可能エネルギーや原子力エネルギーから製造すれば、CO<sub>2</sub>排出削減にも貢献できる。

水素エネルギーシステム概念は、1970年代初頭に、水素をエネルギーキャリアとする再生可能エネルギーの供給・利用システム(第1図の下半分)として提唱された。今日、燃料電池自動車(FCV)や定置用燃料電池の早期実用化という明確なニーズに対応し、当初提案された水素エネルギーシステム概念は、中・長期的な課題として位置づけられ、そこに到達する中間過程では、化石燃料ベースの水素供給システム(第1図の上半分)も対象に加えるべきであるとの考え方が提示された。したがって、「水素源」としては、短中期的には化石燃料が中心的な役割を果たし、中長期的には、これに再生可能エネルギーやCCSを備えた化石燃料由来の水素が加わっていくことになるものと考えられる。産業競争力懇談会



第1図 水素エネルギーシステム<sup>3)</sup>

も報告書<sup>4)</sup>において中長期的に再生可能エネルギー由来の水素の割合が増加していく同様の絵姿を描いている。

再生可能エネルギー由来の水素を考えると、再生可能エネルギーは世界に広く分布している資源であるが、利用可能なエネルギー密度には分布があり、このエネルギー密度は、エネルギー転換時の経済性と密接に関係する。日本国内でも日照条件や風況がよい地域は存在するが、海外にはさらに条件のよい再生可能エネルギー供給地となりうる国・地域が存在する。したがって、原料となる再生可能エネルギーが十分に安価で、利用時の水素の価格が国内において製造した水素と遜色なければ、利用者は国産・輸入の区別をせず、利用するものと考えられる。化石燃料由来の低炭素水素についても、例えば、産炭地で安価に産出され、これまで量的にはあまり利用されていなかった低品位炭のガス化技術とCCSを組み合わせた技術により製造される低炭素水素が国内において製造した水素よりも安価に輸入できれば、利用者の選択肢の一つとなろう。このように国外で製造した低炭素水素を輸入することで、輸入した低炭素水素を石油製品やLNGのようなエネルギーバランス表における1次エネルギーとしてとらえることも可能と考えられる。

## 2. 水素製造

### (1) 水素製造の現状

現在、全世界で年間4,000万トン(約4,500億Nm<sup>3</sup>)の水素が生産され、化学産業と石油精製でそれぞれ40%が利用されている。製造原料は、2003年の全世界の水素需要の48%は天然ガス、30%は石油および石油化学プロセスのオフガス、18%は石炭、4%が水電気分解である<sup>5)</sup>。一方、国内では、年間約200億Nm<sup>3</sup>の水素が生産されているが、化学産業と石油精製においてそのほとんどが化学原料や燃料として自家消費されており、市場で取り引きされる量はここ数年で1.5億Nm<sup>3</sup>前後である<sup>6)</sup>。

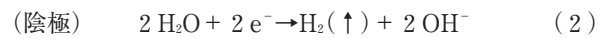
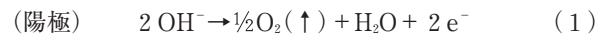
### (2) 水素の製造方法

水素製造は多様な技術があり、水の電気分解、化石燃料の改質、バイオマスからの製造、熱化学法、製鉄プロセスや石油精製、石油化学などの副生水素、光触媒による水分解などが上げられる。本項では、水電解、化石燃料における水素製造、熱化学法、光触媒を紹介する。

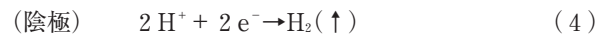
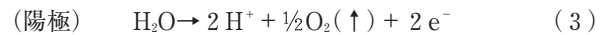
水電解は、発電可能なすべての1次エネルギーから水素を生産できる技術である。現在は、アルカリ水電解および固体高分子水電解の2つの技術が主導的である。電気分解によって生成される水素の純度は高く、低い精製負荷で固体高分子燃料電池に供給可能である。電気分解による水素製造の課題は、水素コストに占める電力費が大きく、水素コストが高い点である。コストダウンおよび高効率化を目指して、新たな試みとして、高圧水電解、高温水蒸気電解、固体酸化物形電解などが検討されている。

アルカリ水電解および固体高分子形水電解の反応式を下記に示す。

アルカリ水電解の電極反応



固体高分子水電解の電極反応



アルカリ水電解では、(1)式に示すように陽極で水酸イオンが酸化され、酸素が生成する。一方、陰極では、アルカリ溶液に含まれるNa<sup>+</sup>やK<sup>+</sup>は還元されず、水が還元され、水素が発生する。日本では、槽電圧を下げるために溶液の温度が100℃以上の高温型のアルカリ水電解装置の研究も進められた。これにより商用のアルカリ水電解装置のセル電圧1.8~2.0Vに比べて0.1V程度セル電圧を低下させている。しかし、高温のアルカリ溶液の腐食性に耐えうる耐食性の高い材料が必要となり、装置の材料コストが増加する。したがって1980年代半ば以降、技術開発は、溶液の温度は100℃以下で、電極の改良によって槽電圧の低下と高電流密度化を目指す方向に進んでいる。

化石燃料からの水素製造は、水蒸気や酸素を添加して、触媒上で反応させる方法が一般的である。天然ガスの水蒸気改質や石炭のガス化による水素製造が代表的な処方である。

天然ガスを改質し水素を取り出す製造方法は、小規模分散型の水素生産が主流となる水素エネルギーの市場導入期における最適の選択となる可能性がある。エネルギー総合工学研究所における水素供給価格の分析においても、オンサイト天然ガス改質が最も水素を安価に供給できると分析している<sup>7)</sup>。ここでは、代表例として、メタンの水蒸気改質による水素製造法を紹介する。

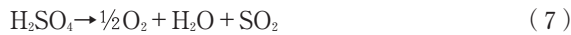
メタンと水蒸気を700~850℃、3~25気圧で反応させ、水素と一酸化炭素を生成させる。ここで生成された一酸化炭素はシフト反応により低減され水素濃度が高くなる。(6)式の反応は、吸熱反応であるため、反応熱の供給が効率に影響を与える。大規模生産では85%まで効率が向上し、コスト低下も期待される。実用技術であり、技術課題は高効率化と高価な貴金属触媒の削減等である。

反応式は、以下で表される平衡反応である。



熱化学法は、複数の反応を組み合わせた熱化学反応サイクルを用いて、熱エネルギーのみで水を分解する方法である。熱源として原子力および太陽熱が考えられている。硫黄とヨウ素を用いるIS(Iodine-Sulfur)法が最も検討が進んでおり、高温ガス炉を熱源として900℃における予想効率は43%である。日本原子力研究開発機構が

開発している IS 法のプロセスは、以下に示す 3 つの反応を用いて、水を水素と酸素に分解し、その他の物質は循環する<sup>8)</sup>。



当面の開発目標は、原子力発電と水電解を組み合わせた場合の効率を達成することであろう(約28%=原子力発電熱効率34.5%×水電解効率80%)。国内では、日本原子力研究開発機構を中心に研究が進められており、実験室規模の装置において電気ヒータで反応に必要な熱を供給し、1週間程度30 l/hの水素の連続製造が可能となっている。現在は規模を拡大するとともに、厳しい腐食環境で使用できる耐食材料を用いた機器の開発が行われている。

石油精製、石油化学では、接触改質反応の副生物、エタン・ナフサ分解装置等の石油化学プラントからの副生物として水素が発生する。また、プラント内でさらに水素が必要な場合に水蒸気改質装置で水素を製造している。全世界の製造容量は2000年で1,900億 Nm<sup>3</sup>である。原油の重質化や硫黄分の増加に伴い、水素化分解および脱硫反応の水素需要も増加が見込まれることから、今後の石油製品の需要動向や輸入原油の性状も外部へ出荷できる水素の量に影響を与える。一方、製油所の水素製造装置はスケールメリットを生み出し、水素製造コストを引き下げることも期待される。

国内では、水素の製造と消費のバランスから、石油業界で64億 Nm<sup>3</sup>、石油化学業界で13億 Nm<sup>3</sup>、アンモニア業界で10億 Nm<sup>3</sup>が供給可能と見られる。固体高分子形燃料電池向けには高純度の水素が必要なため、PSA (Pressure Swing Absorption) 設備等による精製が必要である。精製の際のオフガスにも水素が含まれているため、これらの精製ロス等を考慮すると供給可能な量は合計で71億 Nm<sup>3</sup>と見積もられている<sup>9)</sup>。

コストの観点からは、償却の進んだ既存の水素製造設備を利用するため、固定費を抑えられることが強みである。また、製造プロセスが高压である場合は、供給する際の昇圧に必要なコストを押さえられることが可能である。参考文献<sup>9)</sup>では、純度97%の水素製造コストが11.1~12.0円/Nm<sup>3</sup>と報告されている。

太陽光と光触媒による直接分解は、半導体が光エネルギーを化学エネルギーに変換することにより水を分解するものであるが、潜在的には太陽光発電・電解よりも設備投資額が低くなることが期待される。商業化のためにはプラントの工学設計なども必要であるが、将来的には水素製造に大きなインパクトを与える可能性を持っている。

### 3. 水素輸送・貯蔵

製造した水素は、水素を需要する場所まで輸送し、利用時まで貯蔵する必要がある。現在は、高压ガスでの輸送が主流であり、高純度水素を利用するユーザーを中心に液体水素輸送が増加している。海外では日本とは異なり、数百 km にわたる水素パイプラインが運用されている。また、有機ハイドライドと呼ばれる水素添加と脱水素反応が高い収率で行える物質を水素キャリアとして利用する研究も盛んに行われている。さらに水素吸蔵合金の研究も日本が世界のトップを走っている分野である。本項では、高压ガス、液体水素、ハイドライドによる輸送・貯蔵技術を紹介する。

高压水素の輸送方式は、単体容器、集合容器(カードル)、トレーラ、ローダがある。単体容器では、クロモリブデン鋼などを用いた継ぎ目なし容器が一般的に用いられている。充てん容量は10 Nm<sup>3</sup>程度で、充てん圧力は14.7~19.6 MPaが多い。集合容器は、単体容器を10~30本フレームに固定したもので、単体容器に比べ、より多くの水素が供給できる。充てん圧力は14.7~19.6 MPaが多く、充てん容量は70~300 Nm<sup>3</sup>がある。複数の単体容器をまとめて取り扱える利点がある一方、重量があるため防爆仕様の受入れ設備・機器が必要になる。

さらに輸送容量が増える場合は、トレーラやローダが用いられる。トレーラは、複数の長尺容器とフレームが車両に固定されており、トラクタ(牽引車)によって牽引される。供給先では、トレーラを切り離して納入する。トレーラの充てん容量は2,000~3,200 Nm<sup>3</sup>で、充てん圧力は19.6 MPaが一般的である。ローダは、長尺容器をフレームに固定したものが車両に積載されており、充てん圧力は14.7~19.6 MPa、充てん容量は1,000 Nm<sup>3</sup>前後が一般的である。フレームには車輪があり、台車部分が傾斜して地上に降りてくるものをセルフローダ、台車の高さと同じ高さの架台等に平行移動するものをスライドローダと区別している。

以上の容器はすべて鋼製であり、輸送重量のうち水素の割合は数%に過ぎない。FCVなどに搭載されているtype-3容器(アルミライナーを炭素繊維複合材料で補強)、type-4容器(樹脂製のライナーを炭素繊維複合材料で補強)のような複合材料容器を用いた軽量化による輸送効率向上と複合材料容器の低コスト化が課題である。

液体水素は、製造された大半がロケット用燃料として、航空宇宙研究開発機構に供給・販売されてきた期間が長かったが、2005年に操業を開始したハイドロエッジでは、宇宙開発用以外にこれまでの圧縮水素による供給を置き換える形で一般工業用への供給も増加させており、その流通量を増やしている。

第1表に液体水素、液体ヘリウム、メタン(LNG)の物性値比較を示す。燃料として大量に取り扱われているLNGと比較すると、沸点が低く、低温脆化など材料



第1表 液体水素、液体ヘリウム、メタン(LNG)の物性値  
(文献10)から抜粋)

項目	液体水素	液体ヘリウム	メタン(LNG)
標準沸点(K)	20.3	4.2	111.6
飽和液密度(kg/m <sup>3</sup> )	70.8	125.0	442.5
飽和ガス密度(kg/m <sup>3</sup> )	13.4	16.9	1.818
潜熱(kJ/l)	31.4	2.55	225.9

選定や設計の際に留意する必要がある。また、潜熱が小さく蒸発しやすい性質を持っているため、容器の断熱性能はLNGに比べて格段に高いものが要求される。

水素の輸送に適していると考えられている有機化合物は有機ハイドライドと呼ばれている。有機ハイドライドは常温常圧で液相であるものも多く、ケミカルタンカーやローリーなど、輸送方法が確立していることも利点である。有機ハイドライドを利用した水素輸送では、水素製造箇所でも水素添加反応を行い、水素需要地で水素脱離反応を行う。これらの反応のうち、特に水素脱離反応は吸熱反応であり、低温での反応が進行するような物質の選択、もしくは反応工学的な工夫が必要になる。

有機ハイドライドの一例としてトルエンとメチルシクロヘキサンを用いた場合の反応式を示す。理想的にはメチルシクロヘキサン1分子で水素分子が3分子輸送可能である。



水素添加反応の触媒については開発済みであるが、添加する水素である副生水素に含まれる硫黄分などの対被毒特性に優れた触媒の開発が課題となる。水素脱離反応では、反応効率の向上、副反応の抑制を目的とした触媒や反応器の開発が進められている。メチルシクロヘキサンの脱水素触媒は、ラボスケールで8,000時間以上の耐久性を持つことが示されている<sup>11)</sup>。また、水素を大量に利用する際には、エネルギー効率向上のためにオンサイトでの吸熱反応に用いる効率的な熱供給方法の構築が必要であると考えられる。

FCVに水素を供給する水素ステーションは、供給する水素をその場で製造するオンサイト型と別の場所で製造された水素を水素ステーションにまで輸送するオフサイト型に分けられる。オンサイト型水素ステーションは水素製造、精製、圧縮、貯蔵、供給に関連する機器から構成される。化石燃料からの水素製造技術は成熟しており、メンブレンリフォーマによる改質効率の向上やオンサイト用ステーション向け製造装置の小型化が課題といえる。オフサイト型水素ステーションは、ステーションで水素を製造せずステーションまで輸送された製品水素をFCV等に供給する。構成機器は、圧縮、貯蔵、供給機器となる。

FCVおよび水素ステーションの実証事業であるJHFC(Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project)では、平成14年度から平成22年度にわたって圧縮水素ガスまたは液体水素を供給するステーションが運用された。第2期の報告書では、2015年の普及開始に向け、オフサイトステーションを含む水素サプライチェーン技術の確立、本格普及を想定した規模の実機による高稼働ベースの運転実証、普及段階の水素供給価格の低減の見通し、70 MPaステーションにおける未解決課題の実証などが提言されている<sup>12)</sup>。

#### 4. 水素利用

水素利用機器で代表的なものはFCVと定置用燃料電池である。発電向けに閉サイクルの水素燃焼タービンも検討が進められた。他にも水素を需要する機器は多く存在するが、本項ではFCV、定置用燃料電池について述べる。

FCVは、水素と酸素の化学反応により発生した電力をモータに供給して走行する自動車である。従来、FCVの技術開発の課題とされてきたのは、航続距離、低温始動性、高出力化の問題であった。航続距離の問題は、車両の効率改善や搭載する燃料タンクの35 MPaから70 MPaへの高圧化によって解決されつつある。低温始動性については、開発の結果-20℃での始動が可能になっている。燃料電池の高出力化については、各メーカーのFCVの改良が発表されるたび、燃料電池スタックのコンパクト化、高出力化が報じられ、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンの乗用車の出力と遜色ない程度となっている<sup>12)</sup>。

FCVの普及に向けて、今後は低コスト化、耐久性・信頼性の向上が欠かせない。ある自動車メーカーでは、材料や設計など技術面から10分の1、さらに量産効果で10分の1にし、100分の1を達成するとしている。具体的には、燃料電池スタックのコストの大きな割合を占める白金触媒の使用量の低減や使用材料の大量生産、生産技術の改良があげられる。耐久性の向上には、実走行条件における燃料電池スタックの劣化機構についての評価精度を向上させ、電極触媒の劣化を抑制する必要がある。

定置用燃料電池システムは、家庭や店舗、工場を利用先とし、都市ガス、LPG、灯油を燃料に電力と熱を供給するコジェネレーションシステムの一つである。電力に加えて燃料電池の排熱をお湯として利用することで、総合効率(発電効率、熱効率の和)を上げて温暖化ガスの排出量の低減に貢献できる。

家庭用定置型燃料電池システムは、「エネファーム」と名付けられて政府からの補助も受けながら市場投入が開始されている。固体高分子形燃料電池については、これまでに累計で約14,000台が導入された。平成23年10月

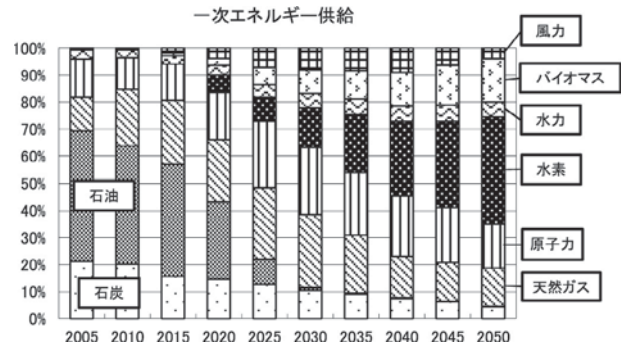
より固体酸化物形燃料電池の家庭用1kW級製品が発売された。固体酸化物形燃料電池では、作動温度が高温のため、エネルギー効率が高い、燃料が純水素でなくともよいなどの特徴があるが、固体高分子形燃料電池に比べて起動に時間がかかることや、耐久性に関する課題の解決に向かって研究開発が進められている。

### Ⅲ. 今後の展望

はじめに、海外または国内における低炭素型水素エネルギーシステムについて述べた。本章では、安価な低炭素エネルギー由来の水素が日本に導入できた場合についての試算例を示す。試算は、(財)エネルギー総合工学研究所の統合評価モデル GRAPE<sup>13)</sup>のエネルギーモジュールを用いた。このモデルでは、エネルギー需要を発電、発電・運輸以外の需要(主として熱需要)、運輸需要に分け、様々な制約条件を満たしながらコストを最小化するエネルギー需給構造を求めることができる。この試算では、2020年に1990年比25%(このうち10%はクレジット等により削減するとしてエネルギー起源CO<sub>2</sub>を15%削減)、2050年に80%減の制約条件を課してエネルギーコストが最小になるように最適化した。水素はCIF価格25円/Nm<sup>3</sup>で必要な分だけ供給されるとし、水素の需要機器は、発電部門に大規模な水素発電所、発電・運輸以外の需要では、水素ガスタービンコジェネ、水素ガスエンジンコジェネ、水素の直接燃焼、運輸部門は水素燃料電池自動車、水素内燃機関自動車を技術の選択肢として設定した。日本の1次エネルギー供給構造を試算した結果を第2図に示す。2050年に向けて化石燃料の比率が徐々に下がるとともに、水素によるエネルギー供給の割合が上昇していくことがわかる。2050年の水素エネルギー輸入額はエネルギー全体の5割弱となった。試算は2010年に行ったため、将来の原子力の比率など震災の影響を考慮した計算ではないが、安価な低炭素水素が調達できた場合に、経済性と温暖化対策を両立させる技術オプションの一つであることが示された。

#### —参考資料—

- 1) *World Energy Outlook 2010*, OECD/IAE, (2010).
- 2) 都筑和泰, 森山亮, 他, 東日本大震災を踏まえた国内エネルギー需給構造のあり方に関する検討(中間報告), 季報エネルギー総合工学研究所, Vol.34, No.2, 2011.7.
- 3) 化学工学会編, 最近の化学工学55, 21世紀の循環型社会を支えるエネルギー化学工学, p.20(2003).



第2図 安価な低炭素エネルギー由来の水素が日本に導入できた場合の日本の1次エネルギー供給構造試算例

- 4) 産業競争力懇談会「燃料電池自動車・水素供給インフラ整備普及プロジェクト【低炭素社会を目指して】」, 2009年3月.
- 5) *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, OECD/IEA, (2005).
- 6) 日本産業・医療ガス協会, 定期統計 圧縮水素出荷実績, (2010).
- 7) 「水素シナリオの研究-1 成果報告書」, エネルギー総合工学研究所, 2005年3月.
- 8) A. Terada, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**[3], 477-482 (2007).
- 9) 石油産業活性化センター, 水素社会における水素供給者のビジネスモデルと石油産業の位置づけに関する調査報告書(PEC-2002 P-04), 2003年3月.
- 10) 日本エネルギー学会編, エネルギー便覧 プロセス編, 16. 水素エネルギー, コロナ社, (2005).
- 11) 岡田佳巳, 斉藤政志, 真壁利治, “有機ケミカルハイドライド法による水素貯蔵・輸送システム用脱水素触媒の開発”, *水素エネルギーシステム* **31**[2], p.8, (2006).
- 12) JHFCプロジェクト報告書, (2010).  
<http://www.jari.or.jp/jhfc/data/report/index.html>
- 13) 黒沢厚志, “世界長期エネルギー供給における非在来型天然ガスおよびコールベッドメタン増進回収の分析”, *日本エネルギー学会誌*, **86**[2], 87-93(2007).

#### 著者紹介



石本祐樹(いしもと・ゆうき)  
(財)エネルギー総合工学研究所  
(専門分野・関心分野)CO<sub>2</sub>フリー水素エネルギーシステム

# 再生可能エネルギー大量導入における課題 ドイツの事例から

海外電力調査会 伊勢 公人

ドイツでは、2020年までに総消費電力量の35%を再生可能エネルギーで賄うことが目標として掲げられている。しかし、この目標を達成するためには、様々な問題を克服する必要があると考えられる。再生可能エネルギー発電の大量導入においては、そのコスト負担ばかりでなく、既存電源の構成変化、送電線の運用や増強などの問題も看過できない。わが国の再生可能エネルギー導入のための制度設計においては、これらの点も含めて、あらゆる角度からの詳細な検討が望まれる。

## I. はじめに

ドイツでは2011年に、2002年から実施されてきた脱原子力政策を一部見直し、既存の原子力発電所の運転期間の延長を図ろうとしていた。しかし、その矢先に福島原子力発電所の事故が発生した。事故を契機に原子力政策が再検討された結果、連邦政府は既存原子力発電所の運転期間延長を破棄する決定を下した。この結果、原子力発電所は2022年までに全廃されることとなった。

代わりにドイツで期待されているのが、再生可能エネルギーである。総消費電力量に占める再生可能エネルギー電力の割合(2010年実績、17%)を2020年までに35%にまで引き上げる目標が掲げられている。

しかし、その目標達成のためには、顕在化する諸課題を克服する必要があると考えられる。ドイツは、2010年現在で2,720万 kW の風力発電、1,732万 kW の太陽光発電を導入し、その他の再生可能エネルギーを加えると計約5,600万 kW の再生可能エネルギー発電設備を導入している中で、すでに様々な問題が浮上してきている。本稿では、その中から日独両国にとって共通の課題となるであろう以下の2点について取りあげ、わが国へのインプリケーションを示すこととしたい。

第1は、再生可能エネルギー導入に伴う消費者負担額の増加である。これは、まだ発電コストが高く、したがって固定価格買い取り(FIT: Feed-in Tariff)制度による買い取り価格が高い水準に設定されている太陽光発電設備の設置量が急増していることによる。

第2は、再生可能エネルギーが導入されることによる電源構成変化による課題である。風力や太陽光などの再

生可能エネルギー電源の運用には出力変動を伴うので、再生可能エネルギー電源をFIT制度などで優先的に導入した場合、従来の電源構成に変化をもたらし、その結果、電力供給のコストを上昇させる可能性がある。また、過剰な再生可能エネルギー電力の導入は経済的な従来型の電源までも市場から退出させてしまう可能性も指摘されている。

## II. 買い取り価格の設定の困難さと 消費者負担額の増加

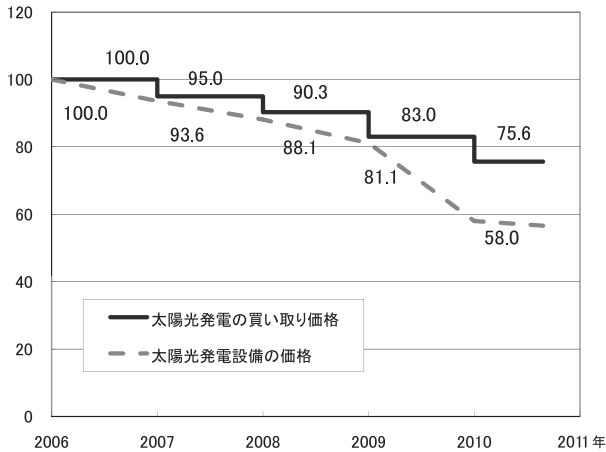
FIT制度は、再生可能エネルギー発電設備の設置者が、設備の運転期間内に建設等の投資費や運転費に加えて適正な利潤を回収できるように、同設備からの発電電力を長期間にわたって固定価格で買い取りすることを保証する制度である。買い取り価格の設定は、政府が最終的に決定するものであるが、従来型発電設備とは異なり、技術の革新と累積導入により、発電原価が急激に低下している太陽光発電等の再生可能エネルギーによる電力の買い取り価格の水準を決定するのはかなり難しい仕事と言わざるを得ない。

ドイツのFIT制度は、想定される将来の発電原価の低下を織り込み、運転開始年が先になるほど当該の設備による電力の買い取り価格は低下するように設計されている。また、定期的に発電原価と買い取り価格の乖離もチェックしている。しかし、発電原価の算定の基礎となる発電設備(システム)価格は市場で価格が決まる一方で、電力の買い取り価格は法律で決まっているため、その改定には議会を通す必要がある。そのため、買い取り価格の調整の遅れは完全には回避できない問題である。遅れが生じた場合には、システム価格と電力の買い取り価格の乖離が生じる結果、太陽光発電を設置する一般家庭や事業者が太陽光発電を行うことで、より大きな利潤を得

*German Challenges for Large Scale Deployment of Renewable Energies* : Kimihito ISE.

(2011年 10月31日 受理)





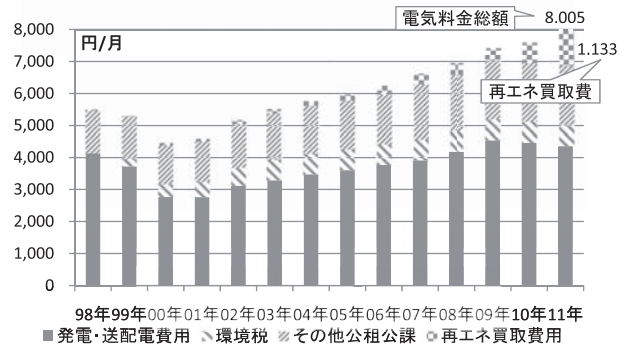
(注) 100 kW 以下の太陽光発電設備の場合

第1図 太陽光発電の買取り価格と発電設備(システム)価格の指数比較  
(出所) ドイツ連邦環境省 HP(www.bmu.de)

られる状況になる。2009年と2010年はまさにそのような状況となっていたことが、太陽光発電の買取り価格と太陽光発電設備の価格を指数化して比較した第1図から明らかであろう。

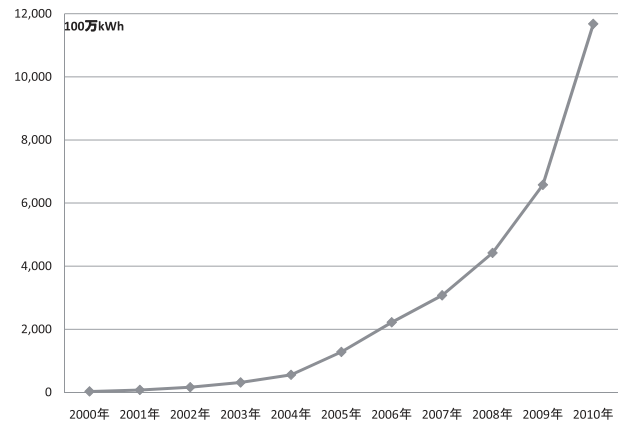
以上の結果、想定されていた2009年の太陽光設備の新規導入量が約70万 kWであったのに対して、実際は約380万 kWが建設された。その後、連邦政府は、FIT制度を規定する再生可能エネルギー法(Erneubare-Energien-Gesetz: EEG)を2010年に改正し、買取り価格を改定した。その際には、同年以降に太陽光発電を年間300万 kWずつ導入していき、2020年までに累計4,200万 kWを導入するシナリオを新たに描いてみせていた(Deutscher Bundestag(2010))。しかし、2010年の太陽光の導入量は約740万 kWとなり、2011年に三度のEEG改正を余儀なくされた。

ところで、太陽光発電の買取り価格は何度も見直されてはいるが、いまだ数ある再生可能エネルギーの中でも最も高い水準にある。そのため、最近の太陽光発電の大量導入は、一般家庭の電気料金水準を上昇させる大きな要因となっている。第2図は、年間消費電力量が3,500 kWhの一般家庭の月額電気料金支払い額とそれに占める各費用項目の内訳を表しているが、ここに示している費用の項目の中で最近、特に増加が著しいのがFIT制度による再生可能エネルギー発電の導入費用(第2図の「再エネ買取費用」)である。同費用は2010年には約600円であったが、2011年には約1,100円を超える水準となった。この費用が増加しているのは、上述したように買取り価格の高い太陽光発電の導入量が急増しているためである(第3図)。2011年現在では、再エネ買取費用の55%が太陽光発電の買取りによるものとなっている。



(注) 1 ユーロ = 110円 で換算

第2図 ドイツの一般家庭の月額電気料金とその内訳  
(年間消費電力量3,500 kWhの場合)  
(出所) ドイツエネルギー・水道事業連合会 HP  
(www.bdew.de)より作成



第3図 ドイツにおける太陽光発電量の推移  
(出所) 連邦環境省 HP(www.bmu.de)より作成

### Ⅲ. 再生可能エネルギー導入による他の電源への影響

以上では、固定価格買取り制度による費用負担の問題を見てきたが、ここでは再生可能エネルギー電源が導入されることによる他電源の維持・投資等に対する影響をドイツで行われた既存の研究に依拠して考えてみよう。

#### 1. ベース電源への影響

2007年にドイツ・ケルン大学エネルギー経済研究所で行われた研究(Wissen and Nicolosi(2007))では、再生可能エネルギー電力が導入されることによる電力価格への影響をみるためには、再生可能エネルギー電力が導入されることによって生じる全体の発電設備構成の変化も考慮する必要があるとしている。風力などの出力が変動する再生可能エネルギー発電の導入が増えると、その出力変動を調整するために必要となるピーク電源とミドル電源への利用が増える一方、相対的にベース電源の利用が低下することになる。このことがベース電源への投資の判断の際に考慮され、ベース電源への設備投資が相対的

に低下する、と Wissen and Nicolosi は想定している。

Wissen and Nicolosi は、2000年以降の再生可能エネルギー電力の導入量(kWh ベース)をみれば、既存の電源の構成に何がしかの影響を与えたことが想像できるとしている。90年代には再生可能エネルギー電力の導入は比較的緩やかに進められていたが、EEGが施行され始めた後は再生可能エネルギー電力が急速に導入されている。再生可能エネルギー電力の平均導入量は、90年代が年平均約12億 kWhであったのに対して、2000～2006年の間では年平均53億 kWhとなっている。

加えて、EEGには2020年を見据えた再生可能エネルギー電力の高い導入目標が掲げられており、それらが火力などの電源の閉鎖や電源設備投資の判断に少なからずとも影響を与えたであろう、と Wissen and Nicolosi は述べている。

特に、彼らは、電源の廃止に対する影響は相対的に大きく、再生可能エネルギー電力の導入がなければ少なくとも第1表に示した廃止発電設備の一部については廃止時期を遅らせることができた想定している。同表には、2001～2005年の間に廃止された約600万 kWの火力発電設備を示している。そのうちの43%は、運転期間が30年以下で廃止された発電所である。しかし、通常、天然ガス火力と石油火力は30年以上運転が継続されている。石炭火力や褐炭火力については、40年以上運転を継続するプラントも珍しくない。そのため、閉鎖されたすべての発電所が再生可能エネルギー電力の導入がなければさらに運転期間を延長できたと判断するには無理があるが、閉鎖された発電所のうちのいくつかの発電所の運転期間を延長できたと考えるのはそれほど無理のない仮定であろう、と Wissen and Nicolosi は述べている。

## 2. ピーク電源への影響

II章で述べた太陽光発電設備の系統連系量増加は消費者負担額の上昇につながるだけでなく、ガス火力などのピーク用電源の建設にも影響を及ぼす可能性が指摘され始めている。

前節で述べたように、出力の不安定な再生可能エネルギー電源の導入に伴い、ピーク電源の必要性が高まるものの、Bode and Groscurth(2011)などの研究では、太陽光発電増加がピーク電源を建設するインセンティブを弱める可能性を指摘している。これは、太陽光発電量が昼

間のピーク時に増加するため、同時間帯に供給しているピーク電源の売電収入を減少させる効果を持つためである。しかし、太陽光発電は太陽が照らないときは昼間の時間帯でも発電できないので、ピーク電源を保持しておく必要は太陽光発電の導入前も導入後も変わらない。

したがって、太陽光発電を大量に導入し続けるのであれば、ピーク電源を保持するための何らかの仕組みを新たに考える必要がある。そうした仕組みや制度は、ドイツだけではなく、再生可能エネルギーの大量導入を計画している欧州諸国で広く議論されているが、ベストプラクティクスと言える市場設計ははまだ見つけられていない。

仮に、上述したピーク電源建設のためのインセンティブ(補助金等)を導入した場合、コストの高い太陽光発電の導入費用に加えて、補助金等の費用が発生することになる。

前出のBode and Groscurth(2011)では、十分に制度設計に時間をかけ、また、制度設計変更による追加的な費用負担を回避するためには、太陽光発電の導入量に上限値を設けるべきとの提言がなされている。ドイツ政府が試行錯誤しているFIT制度の買取り価格による太陽光発電の導入量の調整は極めて難しいというのが彼らの主張である。買取り価格を太陽光発電の原価(太陽光発電の設備費用)を割り込むような水準に買取り価格を設定すれば、太陽光発電の導入量を抑えることができるが、その場合には太陽光発電産業への悪影響を及ぼすので、むしろ導入量の上限値を設けることが望ましいというのが彼らの主張である。

## IV. おわりに

本稿では、ドイツの再生可能エネルギーの大量導入にどのような課題があるのかを例示した。そこからわが国が学ぶべきは、再生可能エネルギー電源と従来電源の二項対立ではなく、それらを時間軸も考慮した上で活用する制度設計を考えることにある。

現行の技術を前提とすれば、再生可能エネルギー電源と従来電源は共存せざるを得ない。太陽光発電や風力発電の出力変動は、貯蔵技術が経済的な選択肢と考えられるまでは、従来電源で調整する必要があるためである。再生可能エネルギー電源の導入を急ぎ過ぎると、経済的な従来電源をも市場の外に押しやり、その分だけ過大な消費者の費用負担を招いてしまう可能性がある。

また、ドイツのような自由化された電力市場においては、太陽光発電の導入が増えた場合には、出力変動の役割をも担うピーク電源の維持、建設が難しくなるという点も、わが国で制度設計するのに十分に配慮しておかなければならない問題である。

本稿では、再生可能エネルギー導入による他電源への影響と消費者負担の問題を中心に取り上げたが、再生可

第1表 2001～2005年の間に廃止された設備容量

(単位:MW)

	運転年数			計
	30年以下	30～40年	40年超	
褐炭火力	325	242	316	883
石炭火力	77	1,307	545	1,929
天然ガス火力	1,558	1,212	58	2,828
石油火力	714	0	0	714
計	2,674	2,761	919	6,354

(出所) Wissen and Nicolosi (2007)

能エネルギー電源の導入は送電線の建設や運用にも影響を及ぼす。ドイツでは、冒頭に記した再生可能エネルギーの導入目標を達成するためには、3,600 kmに及ぶ送電線を新設しなければならないとされている。送電システムの運用も再生可能エネルギーの系統接続の増加により次第に困難になってきており、課題は山積している。

わが国における再生可能エネルギー導入のための制度設計においては、本稿で取り上げた問題も含め、あらゆる角度からの詳細な検討が望まれる。

—参考資料—

- 1) S. Bode, H-M. Groscurth, "The Impact of PV on the German Power Market," *Z. Energiewirtschaft.*, 35〔2〕, 105-115(2011).
- 2) R. Wissen, M. Nicolosi, *Anmerkungen zur aktuellen Diskussion zum Merit-Order Effekt der erneubaren Energien*, EWI Working Paper, Nr. 07/3, (2007).

著者紹介



伊勢公人(いせ・きみひと)

海外電力調査会

(専門分野)環境経済学, 産業組織論

## 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—

(1月13日第7回編集幹事会)



### 【論文誌関係】

- ・原発事故関連論文の受理・審査・掲載状況が報告された。
- ・英文論文誌2012年1月号Web掲載は1月16日の週, 1-2月号冊子体は2月中旬発行予定。国際顧問委員会メンバー候補を決定した。また, 標準Keywordsリスト案を検討した。
- ・審査区分の再編についての調整がほぼ終了したので, 最終確認の後, 運用することとした。
- ・投稿論文審査関係と意見書への対処について検討した。
- ・JNSTの2010年インパクトファクターが報告された。2008年のSupplementsの影響が残っている。
- ・国際会議録PNSTをJST文献データベースに加えることとした。なお, Web of Knowledgeは審査中である。

### 【学会誌関係】

- ・2月号以降の執筆依頼中の記事について学会誌編集工程表で確認し, 5月号以降の記事企画について議論した。
- ・学会誌として特に重要な巻頭言/時論の執筆者候補を慎重に審議した。
- ・1月号からスタートした『論点』(原子力についての考え方の異なる2名の著者の解説を同時掲載)の今後の計画を検討した。
- ・4月号から5ヶ月間, 新ジャンルの記事種別として『視角(これからの原子力)』を設け, 原子力界や他分野の有識者に執筆依頼することにした。毎号, 執筆者3名(各1ページ)でスタート。
- ・5月号以降の主要記事として取り上げるテーマとして「核燃料サイクル」「再生可能エネルギー」を選んだ。

編集委員会連絡先<<hensyu@aesj.or.jp>>



# EU ストレステスト調査報告

## EU 本部及び欧州各国でのインタビュー調査報告

東京大学 諸葛 宗男, 電力中央研究所 吉田 智朗

定期点検を終えた原子力発電所が地元自治体の了解が得られず、再稼働ができない状況が続いている。国は事態打開のため、新たにストレステストを実施することを決めた。この6月からEUが実施しているものをやったものである。筆者らはEU本部、EU主要国の規制機関及び主な事業者インタビューし、実際にどのようなストレステストを実施しているのかを調査した。

### I. 全体概要

今回の調査<sup>a</sup>の目的は、我が国が実施しているストレステストの基になったEUで行われているストレステストの実態を調査し、我が国のストレステストの参考にすることである。そのため、計画を作成したEU本部及びEU主要国の安全規制当局と、実際にストレステストを実施している事業者インタビューし、聞き取り調査を行った。その結果、EUが実施しているストレステストは基本的に我が国が実施中のストレステスト(2次)と同じで、設計裕度と深層防護の堅固性を確認するものであることが改めて確認できた。我が国のストレステストとの最も大きな相違点は、EUではストレステストの結果を何の合否判定にも用いないとしている点である。我が国がストレステスト(1次)を再稼働条件にしていることと大きく異なっている。

#### 1. 訪問先と訪問日程

インタビュー先は合計6ヶ所である。まず、ストレステストの全体取りまとめを行うEU本部の原子力部、そして、主要国の規制機関として、英国ONR<sup>b</sup>、フランスASN<sup>c</sup>、ドイツBMU<sup>d</sup>の3ヶ所、そして事業者として英国のヒンクリーポイントB原子力発電所とフランス電力EDF<sup>e</sup>本社の2ヶ所の合計6ヶ所である。

各機関の応対者と訪問日程の詳細を第1表に示す。

#### 2. 調査結果の概要

##### (1) ストレステストとは

ストレステストの目的は大別して2つある。その1つ

*Interviews with the European Union and Principal EU Nations on the Stress Tests (Comprehensive Safety Evaluation)*: Muneo MOROKUZU, Tomoaki YOSHIDA.

(2011年 11月15日 受理)

第1表 訪問先と訪問日程

No	月日	地名	時間	訪問先
1	9/12 (月)	サマーセット	10:00~ 14:30	英・ヒンクリーポイントB原子力発電所 マイク・ハリソン所長他
2	9/13 (火)	ロンドン	10:30 ~ 12:30	英・原子力規制局(ONR) Chief Inspector, Nuclear Installations and Executive Head : マイク・ウェイトマン博士他
3	9/14 (水)	パリ	14:00~ 15:30	仏・原子力安全規制機構 (ASN) コミッショナー: ピエール・ジャメ氏他
4	9/15 (木)	パリ	8:30~ 10:00	仏・フランス電力 (EDF) 本社 発電技術部門主任オリビエ・パード氏他
5		ブリュッセル	15:00~ 17:00	欧州機構 (EU)・欧州委員会 (EC) 原子力部ハインリッヒ・ヒック氏他
6	9/16 (金)	ボン	9:30~ 12:00	独・連邦環境・自然保護・原子力安全省 (BMU) ビーター・ハートリッヒ博士他

は福島事故と同じように、全交流電源喪失と最終ヒートシンク喪失に直面した場合、施設がどれだけ持ちこたえられるかを調べることである。2つ目は深層防護の安全対策の堅固さの確認である。具体的には全交流電源喪失と最終ヒートシンク喪失に見舞われた時、用意してあった安全対策が次々と喪失する状況を調べ、それによって技術面と組織面の両面から現状の深層防護と事故管理体制の問題点を評価し、改善点を抽出する。

##### (2) スケジュール

EUのストレステストの実施スケジュールを第2表に示す。

##### (3) 福島事故の教訓の反映

EU本部の実施要領では、年内に実施するストレステストは“現状設備のまま”で実施することとされており、

<sup>a</sup> 日本技術者連盟主催の「EU主要諸国の原子力発電所におけるストレステスト調査団」

<sup>b</sup> 英国の原子力規制局 the Office for Nuclear Regulation の略称。

<sup>c</sup> フランスの安全規制当局 Autorite de Surete Nucleaire の略称。大統領直属の組織。

<sup>d</sup> ドイツの原子力規制機関である連邦環境・自然保護・原子炉安全省 Bundesministerium fur Umwelt の略称。

<sup>e</sup> フランス電力 Electricite de France の略称。

第2表 EUのストレステスト実施スケジュール

	進捗報告	最終報告
事業者報告 (→各国規制当局)	8月15日	10月31日
国別報告 (→欧州委員会)	9月15日	12月31日
欧州委員会 (→欧州理事会)	12月9日	2012年6月

福島事故の教訓の反映は来年以降、6月の最終報告までに実施するとのことである。

#### (4) 国内ストレステスト

EUのストレステストは原子力発電所だけを対象としているが、これとは別に各国とも国内ストレステストを実施している。国内ストレステストの実施範囲は、①EUからの指示範囲、②EUストレステストの対象外となっている燃料サイクル施設を対象としたもの、③セキュリティを対象としたものの3つである。国内ストレステストはEUストレステストと同じ日程で実施されており、各国政府は事業者から提出される国内ストレステストの中からEUストレステスト分だけを抽出してEUに提出するとのこと。セキュリティに関する報告は他国に公開しないし、国内にも公開しないとのこと。

#### (5) 特記事項

ストレステストの結果の合否判定は行わない。再稼働の条件としている我が国とは明確に相違している。

## II. 訪問先ごとのインタビュー結果

訪問時点で安全余裕の解析等はまだ実施の途中であったため、今回のインタビューではストレステストの基本的な考え方や緊急対策の概要が主な議論の焦点となった。以下は、訪問機関ごとに行った質疑応答の要点についてまとめたものである。

### 1. EU原子力部

#### (1) ストレステスト実施決定の経緯

福島第一事故発生4日後、エッティンガー委員は各国の閣僚、原子力安全規制官、事業者、メーカーを招集し、EU各国の原子力発電所を安全評価(ストレステスト)の対象とすることを決定した。しかし、ストレステストの実施に関する法的根拠がないことから、「自主的に」実施することとなった。各国政府はストレステスト実施に積極的ではなかったが、事業者は前向きだった。その10日後にストレステスト実施について合意され、5月にストレステストの仕様について合意に至った。

#### (2) ストレステストの位置づけ

EU法規によれば、原子力安全の一義的な責任は原子力事業者が負う。ストレステストは事業者による自主的活動である。各国で同じ内容のストレステストを実施したいと考えている。また、ウクライナやロシアなど、周辺諸国にもストレステスト実施対象国を拡げていく意向である。この活動は、IAEAの協約の枠内で全世界的に実施するよう、交渉を進めている。

#### (3) ストレステスト実施の目的

市民に対して原子力安全に関して発信するメッセージを一本化し、明確化すること。政治的に世論を誘導する意図はない。EUは、原子力の安全に関して「中立である」という立場をとっている。テスト結果については各国の首脳に判断してもらう。

#### (4) シビアアクシデント発生時のEUの関わり方

シビアアクシデントに対しては、事業者と政府それぞれに対応の責任がある。政府の役割は、事故が発生した発電所と外部との連携を確保することである。政府が事業者に事態収拾そのものを指揮するようなことがあってはならず、決定権は現場にあるべきである。その意味で、EUの側からは、福島第一事故の際における意思決定のプロセスがよく見えず、理解しがたい点があった。

EUにおいては、福島第一事故の教訓として、シビアアクシデント発生時に加盟国各国に警報を発信する緊急時アラートシステム("ECURIE")を設置した。各国に対しては非常時体制の整備を促す。なお、EUが現場に出勤することはない。

#### (5) 対象施設・対象範囲

EU各国の自主的活動なので、国により発電所以外の施設を対象範囲に含めても構わない。セキュリティについてはEU仕様には含まれていないが、各国の責任において実施し、各国間相互で連携する。

#### (6) シビアアクシデント対策

対策改善方策の国によるばらつき調整については、体制、法的システム、EU介入の余地などを検討中である。今は現状把握の段階である。

## 2. 英国原子力規制局(ONR)

### (1) EUストレステストの意義

背景にある哲学は、継続的向上である。教訓を学び、活かし、この先の方向性を考え、新しいリサーチが必要かどうかを探る。具体的には、設計基準の地震ハザード、洪水ハザード等に対する対応能力と安全余裕を示し、それを踏まえて安全性向上策を練ることを要求している。

### (2) 事故後、情報の乏しい時期に実施決定した理由

現状わかっていることからなるべく早く教訓を学ぶことが重要だからである。そのために細かいことをチェックする必要はない。実際、テスト開始前の5月の時点で、国内レビューにより26項目の推奨事項を抽出した。

### (3) 一般公衆へのアピール

ストレステストには、一般公衆に安全性をアピールするという意図はない。どこまで安全余裕があるかという技術的なテストである。原子力エネルギーの利用を継続するかどうかはEU各国独自の意思に委ねられている。

### (4) 評価結果に対する判断について

普段と同様に、どのような合理的な手段によって安全性を向上できるかを考える。その背景には、リスクは合

理的に可能な限り低減すべき(ALARP)という考え方がある。結果に対して、規制当局としての基準は設定していない。基準を設定すると事業者はその基準を達成して終わってしまう。このテストは合否判定テストではなく安全裕度がどこまであるかを調べるテストであり、規制当局としては、事業者が事態を理解しているか、緊急時にどれだけ対応できるか、制御の仕方がわかっているか、合理的に可能な限り低リスクを低減できるかを確認したいと考えている。事業者には、テストの結果を踏まえて、常に安全性の向上を目指すことを求めている。

#### (5) 事故発生時の規制当局と事業者の責任分担

事業者はオンサイトのセキュリティ、安全責任を担う。規制者はこれを全体的に俯瞰して、事業者の措置が不適切と判断すれば直接指示を出す。オフサイト緊急センターは警察上層部によって組織され、警察、救急車手配などの緊急対策をとる。政府、規制当局からも技術アドバイザーが派遣される。

#### (6) 「クリフエッジ効果」について

クリフエッジとは安全余裕に関するもので、設計基準を超えた先にある、劇的にリスクが増加し安全性が低下するところを意味する。具体的な定義はない。EU ストレステストでは、事業者に対し、100年に1回くらいの事象のクリフエッジ効果はないように、また1万年に1回で起こる事象程度まで考慮してほしいと考えている。

福島第一の事故で問題となった津波と水素爆発はクリフエッジ効果ではなく、設計基準の不備およびシビアアクシデントの分析不足と考えられる。想定外の事象をクリフエッジとは呼ばない。

### 3. フランス原子力安全機関(ASN)

#### (1) 新旧発電所による評価視点の違い

発電所の新旧による評価視点の違いはない。なぜなら、10年ごとの定期安全レビューで、旧式の発電所は、合理的な範囲で最新の発電所にあわせて設備の近代化が図られているからである。このときの設備改善は規制要求であり、事業者が受容しなければ運転認可は下りない。

#### (2) 評価結果に対する安全余裕の判断基準

テストの着地点が不明確なので、あらかじめ判断基準を定めることはしていない。事業者の提案してくる内容と全体的な状況を見て判断基準を考える。

### 4. ドイツ連邦環境・自然保護・原子炉安全省(BMU)

#### (1) 福島第一事故への対応

通常、国外事象では起動しない非常時センターを起動し、1ヶ月間24時間体制で予防策を検討した。日本へも技術支援者を派遣した。放射能汚染拡散のシミュレーションを実施し、東京にある幾つかの大使館に情報提供した。このようなシミュレーション能力を持つ研究機関

は世界に10程度あり、大事故の際の協調は不可欠である。

#### (2) 事故発生時の規制当局と事業者の役割分担

事業者の役割は原子炉保護、オフサイトBMUの役割は事業者の監督、周辺の放射能防護と明確化されている。

#### (3) AM 設備について

水素再結合器、フィルタード・ベント、サンプバックフラッシング(配管に水や窒素ガスを逆流させてサンプストレーナの詰まりを除去すること)、1次系と2次系のフィード&ブリード(蒸気を逃がしながら注水を行って原子炉を冷却すること)など多くのAM対策を導入している。特にフィルタード・ベントは全プラントに導入済みである。

AM設備設置はRSK(原子力安全委員会)との調整に基づき事業者が判断しており、完全に規制化されていない。想定する外部事象の選択は、設備や法規制の変化に応じて検討し、10年ごとの定期検査で確認している。最新のデータを用いた確率論も活用している。設計で想定する地震や洪水は、 $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$ /年の規模である。

外部電源喪失に対し、ディーゼル発電機の燃料は72時間分以上の備蓄がある。バッテリーの容量は2時間分程度である。最終ヒートシンクはN+2の冗長性(動作に必要な数Nに加えて2つ予備を用意しておくこと)が規制要求である(通常使用する河川以外の水源を備えておく)。

### 5. ヒンクリーポイントB発電所

#### (1) 改良型ガス冷却炉(AGR)の特長

出力密度が低く、減速材(黒鉛)の熱容量も大きいため、冷却機能が全て失われても炉心損傷まで24時間かかるので、全交流電源喪失は緊急安全上問題にはならない。非常用電源については、ガスタービン型発電機を4台保有している。また、炭酸ガス冷却材喪失に備えて窒素生成プラントを建設中である。

#### (2) 緊急時対応策

震災直後にJapan Earthquake Response Programmeを設置した。ストレステストの結果から、洪水防止対策や耐震設備の強化など今後の改良点を抽出する予定(Resilience Enhancement Programme)。災害防止については、地域の設備・サービスへの依存度を下げ、電力会社自身で自治する方向に向かっている。

地域のインフラが使用できない事態を想定し、非常用ポンプ、ポータブルな淡水化装置、窒素生成装置、通信装置、重機、クレーン、Control Center, Personal Protection System, 線量測定機器など、緊急時に必要な機器を、サイトから20 km以上離れ、かつ5 m以上高いところに保管することを決めた。

緊急時、軍隊に応援要請することを考慮し、機器の一部を軍隊が使用する装備と同じにしている(例：水陸両



用車, ヘリ搬送機材など)。他の発電所から応援できる体制も整えた。

### (3) シビアアクシデント発生時の責任体制

現場対応には電力会社の取締役会が責任を持ち, 日本のように国に指揮権が移ることはない。

## 6. フランス電力(EDF)

### (1) ストレステストの位置づけ

フランス国民の中でも原子力に対する不安が増大している中, テストの進め方や結果の評価については地元とのコミュニケーションが, とりわけ重要と認識している。ストレステスト結果が不良であればプラント運転再開を禁じるというものではない。

### (2) 通常の改善事項

10年ごとの定期安全レビューにおいて, 補完的要求事項を出して対応している。フランスの発電所(計63 GW)の平均的経年は25年。形式は出力別に3形式があるが, それぞれに改善の水平展開を実施している。耐震性向上のための改造は1970年代初頭から実施し, Forsmark 発電所の電源喪失事象を受けた改造工事も実施した。

### (3) 緊急時対応策

緊急時の職員動員体制については, EDF は独自に FARN(Force d'Action Rapide Nucléaire)と呼ぶシビアアクシデント即時対応チームを設置しており, EDF の所有する58基の原子力発電所のどこで緊急事態が発生しても24時間以内に対応チームを派遣できる体制を整えている。このチームが, 水, 非常用電源, 通信手段の確保等を行う。ASN と連携して緊急時動員訓練も実施している。

## Ⅲ. 我が国のストレステストへの提言

今回の調査に基づいて我が国のストレステストに対して以下の2点を提言する。

### (1) ストレステストの位置付け

ストレステストは技術的なテストであって一般公衆に安全性をアピールするためのものではない, という EU の根本的な考え方に従って, 我が国のストレステストの位置付けを明確に技術的なものとすることを提言する。

### (2) 継続的改善のしくみの確立

我が国の試験検査にこれまでのような国の合否基準をクリアしているか否か, という単純なものだけでなく, EU の考え方を導入することを提言する。すなわち, ストレステストのように, 現状設計の実力がどれだけあるのかを明示すれば施設ごとのリスクの度合いが明確化する。それをどのように改善するかは各事業者の判断に委

ねる。この際, 事業者は常に ALARP の原則に沿ってリスクを合理的に可能な限り低減するよう努める。この方式の利点は, 改善が継続的に行われる点にある。もし合否基準が示されてしまうと, 事業者はそれをクリアするだけで満足し継続的努力が止まってしまう, 知らぬ間に安全性が劣化してしまう恐れがあるからである。

## Ⅳ. あとがき

今回のインタビューで得られた情報の中には計画書を読んだだけでは読み取れない貴重な情報も多々含まれており, EU のストレステストの全貌を知ることができた。各国の規制機関及び事業者とも本調査団の訪問を快く受け入れ, インタビューでの質疑応答にも率直に応じてくれた訪問先各機関には, この場を借りて深謝申し上げる。

また, 各訪問先で福島事故情報について山のように質問を受けた。我が国の国際的な情報発信がいかに乏しかったのかを痛感させられた。今後, 関係各方面での改善を要望したい。

### —参考資料—

- 1) EU ストレステスト実施開始(2011年6月1日 EC 委員会)  
[http://ec.EUropa.EU/energy/nuclear/safety/stress\\_tests\\_en.htm](http://ec.EUropa.EU/energy/nuclear/safety/stress_tests_en.htm)
- 2) 東京電力株式会社福島第一原子力発電所における事故を踏まえた既設の発電用原子炉施設の安全性に関する総合評価の実施について(2011年7月22日経産省)  
<http://www.meti.go.jp/press/2011/07/20110722010/20110722010.html>
- 3) 米国 NRC の福島事故タスクフォース報告  
<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1118/ML111861807.pdf>

### 著者紹介



諸葛宗男(もろくず・むねお)  
東京大学  
(関心分野/専門分野)原子力法工学, 社会的受容性/プロジェクトマネジメント, 原子力化学工学, 原子力法制度



吉田智朗(よしだ・ともあき)  
電力中央研究所  
(関心分野/専門分野)リスク情報活用技術, PRA 用データの統計分析

## 解説

## 最近の核セキュリティの国際動向と日本の基本姿勢

## 1. IAEA 核セキュリティ勧告文書の解説

核物質管理センター 宮本 直樹,

日本アイソトープ協会 草間 経二, 日本原子力研究開発機構 飯田 透

国際原子力機関(IAEA)は、核セキュリティ・シリーズの基本文書を近々発刊予定である。また、2012年3月には、韓国ソウルにおいて第2回目の核セキュリティサミットが予定されている。我が国は、福島第一原子力発電所の事故によって、原子力発電所の更なる安全を確保することは言うまでもないが、核セキュリティに係る国際的な動きに適確に対応することが求められている。本解説では、今号で、核セキュリティ・シリーズの3つの勧告文書の解説、次号で、我が国の国際公約の状況や福島事故後の核セキュリティ対応等について報告する。

## I. はじめに

2001年9月11日に米国で発生した同時多発テロ事件(以下、「9.11テロ」という)を受け、翌2002年にIAEAは「核セキュリティ計画(Nuclear Security Plan)」と呼ばれる行動計画を策定し、それまでの核物質防護に関する活動を包含する形で核セキュリティを強化するための一連の取組みを開始した。

核セキュリティ計画の中で、常に優先的に実施されてきた活動が、核セキュリティ・シリーズ文書の策定であった。核セキュリティ・シリーズ文書の枠組みはピラミッド型となっており、重要度に応じて上位から下位に「基本文書」、「勧告文書」、「実施指針」、「技術手引き」と分類されている。

2011年1月、勧告文書に位置づけられる3文書が出版された。従来、日本では核物質防護に関する国際的な動向を把握し、その動向を踏まえてIAEAの勧告文書を含む国際標準を満たすように核物質防護体制を整備してきている。その意味で、上記3勧告文書は今後の日本の核セキュリティ体制の整備に大きな影響を与えると思われる。

以下に、これら3勧告文書を理解する上でのポイントや今後、国内で検討しなくてはならないであろう課題について、実際に作成作業に参加した3名の執筆者が、それぞれの勧告文書について解説する。

## II. 「核物質および原子力施設の防護に関する核セキュリティ勧告(INFCIRC/225/Rev.5)」の概要と適用への課題

## 1. 核セキュリティ強化の背景

9.11テロは、自らの死を恐れず、豊富な資金力と組織力を有し、情報収集力にも長けた非国家主体が行う攻撃の脅威を見せつけ、核物質防護の概念に大きなインパクトを与えた。

核物質防護対策が講じられ始めた1970年代、その主眼は原子力反対派による原子力施設への不法侵入防止に置かれていた。東西冷戦が終結した1980年代末以降現在までは、非国家主体等による核物質の盗取や原子力施設に対する妨害破壊行為の防止がその目的となっている。

しかし、9.11テロにより、原子力施設に対する非国家主体の脅威が想定していたレベルを大きく超えるものであることが明白となった。加えて、放射性物質を盗取してそれを発散させることにより環境や公衆に放射線影響を与えるという「ダーティ・ボム」も新たに対処すべき脅威と考えられるようになった。こうした脅威レベルの深刻化や対処すべき脅威の拡大は、従来の核物質防護対策だけでは不十分であり、より包括的な対応が必要だということを国際社会に認識させた。

このような国際認識を受け、IAEAが新たに打ち出したのが「核セキュリティ」という概念である。IAEAによれば、核物質防護とは「核物質の不法移転や原子力施設に対する妨害破壊行為の完遂を防止するための一連の措置」<sup>1)</sup>とされるのに対して、核セキュリティとは「核物質、その他の放射性物質あるいはそれらの関連施設に関する盗取、妨害破壊行為、不法アクセス、不法移転またはそ

*Current International Movement of Nuclear Security and Japan Fundamental Position ; 1. Overview of the IAEA Nuclear Security Series, Recommendation documents : Naoki MIYAMOTO, Keiji KUSAMA, Tooru IIDA.*

(2011年 9月30日 受理)

他の悪意を持った行為に対する予防, 検知および対応」とされている<sup>2)</sup>。この比較が示すように, 核セキュリティの概念には, 従来の核物質防護に加えて, 放射性物質の防護, 核物質や放射性物質を用いた不法行為の未然防止, 発生した不法行為の事後的な対応という, より包括的な取組みが含まれている。

## 2. INFCIRC/225/Rev.5に示された強化策のポイント

INFCIRC/225/Rev.5は, 従来の核物質防護措置を, 核セキュリティという概念に基づいて強化する際のポイントを取りまとめた文書だといえる。以下に, INFCIRC/225/Rev.5に示された強化策のポイントをいくつか紹介する<sup>3)</sup>。

第1に, 各国が行う脅威の評価(Threat Assessment)や各国が策定する設計基礎脅威(Design Basis Threat: DBT)<sup>4)</sup>と一致する場合には, 原子力施設に空から接近する脅威(Airborne Threat)や, 一定程度離れた距離から原子力施設を攻撃する「スタンドオフ攻撃(Stand-off Attack)も考慮すべきということが記載され, 国ごとに現実的な脅威を念頭に置いた対策を講じることが要件化された。

第2に, 各国の脅威評価やDBTが悪意ある強い意志を有する敵対者を含む場合には, INFCIRC/225/Rev.4では可能とされてきた高放射能核物質の防護区分を緩和すべきか否かについての検討を慎重にすべきであると明示され, 自らの死を恐れないような敵対者を想定する場合には, 各国は, 「自己防衛性(Self-protection)」を有する高放射能核物質であってもその防護区分を緩和するという判断を慎重に行うと共に, もし過去に防護区分を緩和した事例があればその妥当性を十分に検討することが求められた。

第3に, INFCIRC/225/Rev.4ではほとんど言及がなかった内部脅威者(Insider)対策について, 定義を明確にした上で, 内部脅威者に対しても遅延措置を考慮すること, 施設内の防護上重要度の高い区域においては二人一組で相互に監視し合うような常時監視によって内部脅威者による不法行為を検知すること, などの記載が追加され, 外部からの脅威に対してだけでなく潜在的な内部の脅威に対しても対策を講じることが要件化された。

第4は, 防護上重要度の高い施設の場合には, 敵対者と施設の警備担当者による実戦を想定した「武力対抗演習(Force-on-Force Exercise)」などの適切な演習を含む「性能試験(Performance Testing)」を行うべきことが記載され, 施設の対応能力をより現実的に評価することが求められた。この性能試験とは, 国により事前に定められた防護要件をクリアするために, 事業者が自らの裁量で規定した基準による防護措置が効果的であるかを判断するために行う試験を意味している。

## 3. 今後, 国内で検討が必要だと思われる課題

2011年9月現在, INFCIRC/225/Rev.5の具体的な防護要件を国内規制に取り入れるための検討が現在進行形で進められているが, 今後, 次の2点についての検討が特に必要ではないかと思われる。

一つ目は, 新たな脅威認識に対応した防護要件を整備するというINFCIRC/225/Rev.5成立の精神を国内規制に反映させていくということである。上述のように, INFCIRC/225/Rev.5は9.11テロを受けて, 世界を取り巻く脅威環境の変化を踏まえた対応の強化を図った。日本においても, 国内外の脅威環境を改めて分析し, 現状の脅威認識を踏まえた上で核セキュリティ勧告としてのINFCIRC/225/Rev.5の個別防護要件を国内規制に取り入れていくべきであろう。

二つ目は, 現在の核物質防護検査制度を改善していく中で, 原子力施設の防護能力の実効性を評価し確保するための対策を講じていくということである。日本では, 2005年に核物質防護検査制度が導入された。これまでの検査によって, 原子力事業者が法令に記された防護措置を講じていることは確認されている。しかし, それら防護措置が実際の脅威に直面した際に期待される性能を確実に発揮することができるか否かを判断することは, 現在の記述ベース(descriptive-based)の評価手法だけでは困難である。そこで, それら防護措置の性能を確認する性能ベース(performance-based)の評価手法の導入を検討する時期にきている。その際, INFCIRC/225/Rev.5に記載されたような模擬演習の実施も, 一例として検討に値するであろう。

## Ⅲ. 「放射性物質及び関連施設に関する核セキュリティ勧告」の概要と適用への課題

### 1. 本勧告の目的

「ダーティ・ボム」の脅威などのように, 放射性物質への悪意のある行為の懸念があることから本勧告文書が策定された。

本勧告文書の目的は, 規制免除レベルを超える密封されていない放射性物質, 密封された放射性物質, 核燃料物質が盗取され, その後, 被ばくを起し発散させること及び妨害破壊行為を防止することを目的としている。

内容を見ていくと, ここに書かれているのはセキュリティ体制の要素が書かれている。これらはすでに「核セキュリティ基本文書」に記載されている基本的な要素について若干の解説が加えられたものである。これら要素の適用にあたって注意すべき点が記載されているが, 具体的なセキュリティ対策については記載されていない。本稿では, 勧告文書を理解するうえでのポイント及び国内で検討しなければならない課題について説明する。



## 2. 放射性物質の利用を過度に制限することなく セキュリティを確保する

放射性物質は世界中で医療・産業・農業・教育といった様々な分野で使用されており、社会の発展に欠かせない存在になっている。日本においても医療を中心として利用されている。利用と安全とセキュリティのバランスを取ることが重要である。これは今回の勧告文書作成に携わった多くの方の共通認識であった。

国情に応じ、利用形態に応じ、かつ利用を不当に制限することがないようなセキュリティ対策を実施し、またその対策が安全確保の対策と矛盾することがないようにすることは困難が伴う。そのため本勧告では、各国が法令や指針への取り入れを実施するうえでの参考となる勧告を用意している。

## 3. セキュリティ対策を実現するための規制の ツールを国に提供

一般的な勧告として、悪意のある行為の検知、遅延、対応そして抑止することを示している。これを実現するために規制のツールとして、各国の脅威評価の実施、放射性物質へのセキュリティ要件の適用にあつては等級別取組を用いること、等級別取組を用いるための区分分けシステムを示し、規制の手法として規範的手法、性能基準に基づく手法、これらを複合した手法と3つのツールが示されている。

区分分けシステムについては、出発点として放射線源の安全とセキュリティに関する行動規範<sup>5)</sup>に示されているD値や放射性物質安全輸送規則に示されているA値を考慮できると示されている。各国で区分分けシステムを確立することが必要である。なお、D値はすでに「密封された放射性同位元素であつて人の健康に重大な影響を及ぼすおそれがあるものを定める告示」<sup>6)</sup>において規制管理を外れた時に人の健康に影響を与える放射能として、A値についても、「放射性同位元素又は放射性同位元素によって汚染された物の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示」<sup>7)</sup>において放射性輸送物の種類(A型とB型)を分ける放射能として国内法令に定められている。

これらのことを考慮すると、放射性物質の使用・保管時のセキュリティを考える時についてはD値を基にした区分分けを、輸送時のセキュリティを考える時はA値を基にした区分分けを用いることができると考えられる。

また、安全規制はセキュリティ対策にも寄与すること、すべての放射性物質がセキュリティ上の懸念を有していないことからセキュリティ対策が必要な物質を区分分けシステムにより明確にすることが、利用を不当に制限しないことにつながると考えられる。

次に規制の手法を考える必要がある。規制の手法とし

て、規範的手法、性能基準に基づく方法、これらを複合した方法の3つが示されている。放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律による許可届出使用者は約6,000事業所、医療法による放射性医薬品使用者は約1,300機関ある。区分分けにより、特にセキュリティ対策を講じる必要がある物質を特定してもなお数百を下らない事業所があると考えられる。各国とも状況は同様なので、各国の取り組みを参考にしながら国内の状況を考慮して実施可能な規制手法を考える必要がある。

## 4. ツールを活かした使用中、輸送中のセキュリ ティ対策の実施

それぞれの場面に応じたセキュリティ対策についての解説及び等級別取組を用いた時の達成すべき目的の範囲が記載されている。

悪意のある行為を抑止し防止するために検知、遅延及び対応のセキュリティ機能を十分に実施するように設計されたセキュリティシステムを構築すること。このシステムの目的には等級別取組を用いることにより、悪意のある行為を防止することからその可能性を低減することまで範囲が認められている。

セキュリティ管理措置、出入管理の対処、個人の信頼性確認、情報の防護、セキュリティ計画の準備、訓練及び資格認定、計量・管理、在庫管理及び事案の報告を実施することを含むセキュリティ管理を実施することが記載されている。実施に当たっては各国の国内法令や利用の状況を考慮することが求められている。例えば出入管理では、医療機関や教育機関での使用方法を考慮し、付き添いなしの立入りが許可された個人による付き添い(放射線技師による付き添い)又は監視(CCTVによる治療中の監視など)がある場合、あるいは放射性物質のセキュリティのための補完的措置(学生実習中の放射性物質の管理)が実施された場合には立入りが許可されている。また、個人の信頼性確認では、国の慣行に従って確認されることが求められており、個人の信頼性確認措置は、等級別取組を用いると本人であることの確認から、当局による身元調査まで範囲があることが認められている。

## 5. 今後の運用に向けた課題

放射性物質を規制する法律は、放射線障害防止法、医療法、薬事法、獣医療法、原子炉等規制法と多く、規制を担当する行政機関も文部科学省、厚生労働省、農林水産省、経済産業省にわたっている。各行政機関が協力して区分分けを検討し、等級別取組を考慮したセキュリティ対策を策定し、規制の手法を使用状況にあった手法を検討する必要がある。

また、実施する事業者は、安全への取り組みを考慮し、他の分野のセキュリティ対策と調和した放射性物質のセ

セキュリティ対策を策定する必要があると考える。

すでにIAEAは放射線源のセキュリティ実施指針<sup>8)</sup>や放射性物質のセキュリティ実施指針<sup>9)</sup>を公表しているが、これは事例として公表されたものであり、今回発行された本勧告に基づいて我が国において国内の状況に応じたセキュリティ対策が、行政と事業者が協力して策定されることを希望している。

#### IV. 「規制上の管理を外れた核物質及びその他の放射性物質に関する核セキュリティ勧告」の概要と適用への課題

##### 1. 本勧告のねらい

本勧告文書は、規制上の管理を外れた核物質又はその他の放射性物質(以下、規制上の管理を外れた物質という)が関わる犯罪行為又は不法行為の抑止、検知と対応に有効となるよう、IAEA加盟国及びその所管当局に対する核セキュリティ体制の能力の確立又は向上に資する勧告を提供するために新規に作成されたものである。さらに、規制上の管理を外れた物質を規制上の管理下に置き、必要に応じて犯罪容疑者を訴追又は引き渡すことを確実にするための国際協力の支援に関するIAEA加盟国への勧告を提供することを目的として作成された。ここで「規制上の管理を外れた」とは、核物質又はその他の放射性物質が、何らかの理由で管理不在となって適切な許認可を受けた状況にないことを指している。

したがって、本勧告文書は、前記の2つの勧告文書が対象とする範囲を外れて、核物質又はその他の放射性物質がそれを管理する者の管理下から離れ、紛失、行方不明又は盗取された、あるいは密輸された状況に置かれて、核セキュリティ事案に巻き込まれた当該物質をどのように検知するか、また当該物質が犯罪行為又は不法行為に使われた後の処置をどうするかということが主な対象である。したがって、事業者が行う対応への勧告というよりも、規制当局、法執行機関(警察)、税関、国境警備隊等の国の所管当局による対応への勧告が主として記述されている。

##### 2. 規制上の管理を外れた物質のための核セキュリティ体制

規制上の管理を外れた物質が関わる核セキュリティ事案に対処するために効果的かつ効率的な行政上、司法上、立法上及び規制上の枠組みを確立し維持する責任は国にあり、所管当局が割り当てられるべきとしている。また、これらの責任が複数の所管当局に分かれる場合には、個々の所管当局の役割及び責任を調整する調整機関又は委員会のようなメカニズムが必要であるとしている。

##### 3. 勧告の内容

###### (1) 予防措置に関する勧告

核セキュリティに係わる犯罪行為又は不法行為を思いとどまらせるための抑止効果として、その行為の重大性に見合う適切な罰則の導入、押収した物質の出所、起源を特定するための核鑑識の導入について記述されている。また、機微情報を保護するための情報セキュリティ、核セキュリティ活動に関わる職員の信頼性確認、確実に脅威が存在し核セキュリティが重要であると考えられる核セキュリティ文化の醸成の必要性について記述されている。

###### (2) 検知措置に関する勧告

規制上の管理を外れた物質の存在の検知は、機器警報(携帯型又は固定型の検知機器による警報)や情報警告(医学的監視、国境モニタリングを含む様々な情報源からの報告など)によって達成されることから、国は検知のための国家戦略を策定し、責任を割り当てた所管当局がこれを実施すべきとしている。また、これらの検知措置を運用し維持するために必要な予算及び職員を割り当てるべきとしている。

###### (3) 対応措置に関する勧告

様々な核セキュリティ事案及び異なる影響の程度に対応するためには等級別取組を採用すべきとしている。核セキュリティ事案に対応する所管当局は、核セキュリティ文化を策定し、適切な装備と訓練された職員を擁して、核セキュリティ事案への対応計画を策定するとともに、その実施の責任を割り当てるべきとしている。所管当局は、核セキュリティ事案が発生したか否かを決定するための評価を実施し、核セキュリティ事案と決定された場合は、国は関係する国際機関及びその他の国に当該事案を通知すべきとしている。国は等級別取組を用いて、押収した核物質又はその他の放射性物質について出所、履歴及び移転の経路を同定するために核鑑識技術を適用すべきとしている。また、所管当局は、対応措置の継続性を確実に維持すべきとしている。

###### (4) 国際協力に関する勧告

国は、核セキュリティ事案に関する正確かつ検証された情報を、直接又は必要に応じてIAEAや国連等の国際機関を通じて情報交換すべきとしている。また、核セキュリティ事案に伴って潜在的に影響を受ける国に対して、情報提供すべきとしている。

また、国は核セキュリティ事案の検知と対応の能力を強化する目的で、他国による要請に応じて技術協力及び支援を提供すべきとしている。

さらに、核セキュリティ事案に係る刑事訴訟に関する有効な協力を提供するための相互の法的支援を提供すべきとしている。

規制上の管理を外れた物質を押収、回収又はその他の方法で取得した国は、当該物質を厳重に保管し、規制上

の管理下に戻すために関連する国と協働すべきとしている。また核鑑識技術に関する支援を奨励している。

#### 4. 今後の適用上の課題

規制上の管理を外れた物質に関わる核セキュリティ事案に対処するためには、行政、司法、立法に関わる多くの国の機関が関与することとなる。したがって、本勧告文書の実施に当たって国はまず、予防、検知、対応の各措置と国際協力の実施責任がどの所管当局にあるかを明確にするとともに、個々の所管当局の役割及び責任を調整する調整機関又は委員会はどこかを明確にする必要がある。

## V. まとめ

核セキュリティ・シリーズ No.13(核物質及び原子力施設の物理的防護に関する核セキュリティ勧告(INFCIRC/225/Rev.5))<sup>10)</sup>及び核セキュリティ・シリーズ No.14(放射性物質及び関連施設に関する核セキュリティ勧告)<sup>11)</sup>は、核物質又はその他の放射性物質の関連施設内における物理的防護措置に関する勧告とともに、当該物質の紛失、行方不明又は盗取された旨の所管当局への報告前に当該物質を発見、回収するための勧告についても記述している。これに対して、本勧告文書である核セキュリティ・シリーズ No.15(規制上の管理を外れた核物質及びその他の放射性物質に関する核セキュリティ勧告)<sup>12)</sup>は、所管当局への当該物質の紛失、行方不明又は盗取された旨の報告後に当該物質を発見、回収するための勧告について記述している。こうしてこれら3つの勧告文書によって核物質又はその他の放射性物質に関わる核セキュリティの全てがカバーされることとなる。

#### —参考資料—

- 1) IAEA Nuclear Security Series No.13, "Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities(INFCIRC/225/Revision 5), January 2011.
- 2) IAEA General Conference Document, GC(49)/17, "Nuclear Security—Measures to Protect Against Nuclear Terrorism", Report by the Director General, 23 September 2005.
- 3) INFCIRC/225/Rev.5の特徴や特筆すべき防護要件についてのより詳細な分析については、拙稿「研究ノート：IAEAの核セキュリティ・シリーズ文書『核物質および原子力施設の防護に関する核セキュリティ勧告(INFCIRC/225/Rev.5)』の分析」, 日本軍縮学会『軍縮研究第2号』(信山社, 2011年)71頁参照。

- 4) 英語では Design Basis Threat。INFCIRC/225/Rev.5は DBT を「核物質の不法移転または妨害破壊行為を企てるおそれのある潜在的内部者および/または外部からの敵の属性および性格。これに対して、核物質防護システムが設計され、評価される」と定義している。
- 5) Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources, IAEA/CODEOC/2004, IAEA, Vienna, (2004).
- 6) 密封された放射性同位元素であって人の健康に重大な影響を及ぼすおそれがあるものを定める告示(平成21年10月9日 文部科学省告示第168号)。
- 7) 放射性同位元素又は放射性同位元素によって汚染された物の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目を定める告示(平成2年11月28日 科学技術庁告示第7号)。
- 8) Security of Radioactive Sources, IAEA Nuclear Security Series No. 11, IAEA, Vienna, (2009).
- 9) Security in the Transport of Radioactive Material, IAEA Nuclear Security Series No. 9, Vienna, (2008).
- 10) 国際原子力機関, 核物質及び原子力施設の物理的防護に関する核セキュリティ勧告(INFCIRC/225/Rev.5), IAEA 核セキュリティ・シリーズ No.13, IAEA, ウィーン, (2011).
- 11) 国際原子力機関, 放射性物質及び関連施設に関する核セキュリティ勧告, IAEA 核セキュリティ・シリーズ No.14, IAEA, ウィーン, (2011).
- 12) 国際原子力機関, 規制上の管理を外れた核物質及びその他の放射性物質に関する核セキュリティ勧告, IAEA 核セキュリティ・シリーズ No.15, IAEA, ウィーン, (2011).

#### 著者紹介



宮本直樹(みやもと・なおき)  
(財)核物質管理センター  
(専門分野/関心分野)核セキュリティ, 核物質防護, 核不拡散



草間経二(くさま・けいじ)  
(社)日本アイソトープ協会  
(専門分野/関心分野)放射線管理, 放射線測定



飯田 透(いいた・とる)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)核物質管理, 核物質防護, 輸送



# 原子炉施設の確率論的リスク評価の動向と 今後への期待

## 2. 原子力学会リスク評価関連標準の整備と今後の計画

関西電力(株) 成宮 祥介

第2回目となる今回は、日本原子力学会標準委員会リスク専門部会が手がけてきた確率論的リスク評価(PRA)手法あるいはその活用に関する標準(名称は実施基準であるが)の状況を紹介する。同専門部会では、種々のPRA標準策定を積極的に進めてきており、PRAの品質(技術的妥当性)を確保する上で重要な役割を果たす“技術基盤”を提供している。さらに、標準の講習会を適宜開催し、PRA標準の理解はもとよりリスク評価手法並びにその考え方を広く伝播するとともに、リスク研究者・技術者の議論の場としてリスク評価研究専門委員会も設けている。

### I. PRA 標準策定の背景と目的

#### 1. 学協会規格の取組の背景

欧米諸国では、学会、協会、国際会議等の中立組織により、公開の場で公平に選ばれたメンバーにより、特定の組織の利益だけに偏ることのない公正な民間規格が様々な技術分野において策定されている。

我が国原子力界においても、より迅速に新知見や運転経験などを規制に反映するため、原子力安全委員会(以下、「原安委」)においては指針体系化の議論で指針の性能規定化と民間規格活用が検討され<sup>1)</sup>、原子力安全・保安院(以下、「保安院」)においては技術基準の性能規定化と民間規格活用が検討されていた<sup>2)</sup>。日本原子力学会、日本機械学会、日本電気協会においては、それぞれ民間規格を策定することを目的とした組織を設置し、公正、公平、公開な立場での民間規格策定に取り組むこととなった。日本原子力学会では、1999年9月に標準委員会を設置し、原子力施設の設計、建設、運転、廃止措置などの広範な活動において用いられる技術に関し、合意される内容を文書化した“標準”を策定してきている<sup>3)</sup>。標準委員会の傘下には、専門分野によりリスク専門部会を初めとして4つの専門部会を設けている。

#### 2. リスク専門部会の組織

PRA標準の策定は当初、発電炉専門部会にて行われ

ていたが、2008年から組織を見直し、PRA標準の策定に特化した組織として「リスク専門部会」が設置された。

ここで、リスク専門部会の標準名称について説明を付す。2011年制定の津波PRA標準から、リスク専門部会の標準においてPSA(Probabilistic Safety Assessment: 確率論的安全評価)ではなくPRA(Probabilistic Risk Assessment: 確率論的リスク評価)を用いることにした。両者は同じ意味で用いる。ただし、既存の標準名は改定時に変更することになっているので、当面は過渡期として両方の名称が並立することになる。本解説においては、これに則り既存の標準名称以外は全てPRAと記載した。

リスク評価は、原子力施設の設計思想や設備性能などを基に、システムとしての包括的な安全性を定量的不確実さとともに示す手法であるので、極めて専門性の高い分野である。そのため、リスク評価手法、データ分析およびリスク情報活用などにかかる標準だけを別途取り扱うことにより、議論の専門性、迅速性、深層性をより高めることを狙い、独立の部会とした。一方、リスク評価手法の起因となる事象には、設備故障や人的過誤などの内的ハザードだけでなく、地震、津波、火災などの外的ハザードも含むため、それらの現象にかかる専門家も分科会への参画を求めてきた。部会での審議には、そういった多様な専門知識が必要になるため、建築、サイクル施設の専門家も参画している。その結果、リスク専門部会の委員数は30名近くになっている。

1つの標準を1つの分科会で策定しているため、現時点で9つの分科会がある。地震PRA手法は地震ハザード解析、建物設備フラジリティ解析、システム解析の3

*Current Status and Future Expectation concerning Probabilistic Risk Assessment of NPPs; 2. A Technical Overview and Future Plans of Development of AESJ Standards for PRA: Yoshiyuki NARUMIYA.*

(2011年 12月20日 受理)

段階から構成されることと、さらに、例えば地震ハザード解析には地震工学、地盤工学などの専門家が、フラジリティ解析には建築工学、機械工学などの専門家が検討に加わる必要があるため、全ての専門家を一つの分科会に集合することは議論の効率が悪い。そこで、3つの作業会を組織し、策定作業を分担させるとともに、若干名の委員を複数作業会に参加してもらうことにより、円滑な調整が行われるよう工夫した。

### 3. PRA 標準の位置づけと目的

発電炉専門部会(当時)において最初に取り組んだ標準は停止時 PSA 手順(当初の名称)であった。これは当時、定期安全レビュー(PSR)において停止時状態におけるリスク評価の実施が取り入れられるところであったため、その品質確保のために整備したものであった。その後、原安委において安全目標<sup>4)</sup>、続いて性能目標<sup>5)</sup>が検討されていくことと並行して、レベル1 PSA 標準(炉心損傷までの評価、以下「L1 PSA 標準」)およびレベル2 PSA 標準(放射性物質放出までの評価、以下「L2 PSA 標準」)の策定に着手し、さらに、レベル3 PSA 標準(環境影響評価までの評価、以下「L3 PSA 標準」)の策定も開始した。このように、必要な分野の標準を優先的に策定してきた。L3 PSA 標準にまで拡張したことで、内的事象を起因とする全ての運転状態(出力運転中、停止時)における炉心損傷から放射性物質放出を経て環境影響のリスク評価まで行える標準が整備できた。

一方、保安院と原子力安全基盤機構(以下、「JNES」)は、リスク情報活用に備えて PRA の技術的妥当性を定めた品質ガイドラインを公表した<sup>6)</sup>。これには、PRA が備えるべき品質にかかる要件が記載されているので、原子力学会の PRA 標準は、このガイドラインに記載された性能規定を具体化する仕様規定の位置づけになる。PRA の活用としては様々なパターンがある。事業者が自らの原子力プラントの安全性を評価し脆弱点を見出したい場合は、原子力学会 PRA 標準に準拠した方法で PRA を行うことにより、評価の客観的妥当性が確保できる。また、規制当局が PRA のレビューにおいて、技術評価・エンドースされた PRA 標準に準拠していることが示されることを審査すればよい(第1図)。

さらに、原安委の耐震設計審査指針の改訂(平成18年

9月)において、地震時のリスク定量評価の必要性が議論されたことから、PRA 標準を外的事象まで拡大すべく、地震 PRA の標準の分科会を設置した。現在、内部溢水 PRA および津波 PRA の標準の分科会が活動している。

これらの PRA 標準に一貫して謳われる目的は、「PRA 手法およびそれから得られるリスク情報を活用するために、公平、公正、公開の原則を遵守し審議・合意した内容を示すこと」である。この目的に沿って制定された PRA 標準を使用することにより、次の利点が期待できる。

- (1) 最新かつ適切な品質の PRA を実現できる。
- (2) 実施した PRA が学会標準に適合していることを示すことにより、その妥当性を客観的に示せる。
- (3) PRA の妥当性をレビューする場合に、標準に適合している部分はレビューが簡略化可能。
- (4) 開発・整備した新しい手法やデータがあれば、分科会に提案することで標準化可能。

## II. PRA 標準のラインアップと概要

### 1. PRA 標準の種類

発電炉専門部会(当時)およびリスク専門部会を通じて、現時点で9つの標準が策定・改訂され、1つの標準が策定中である(第1表)。

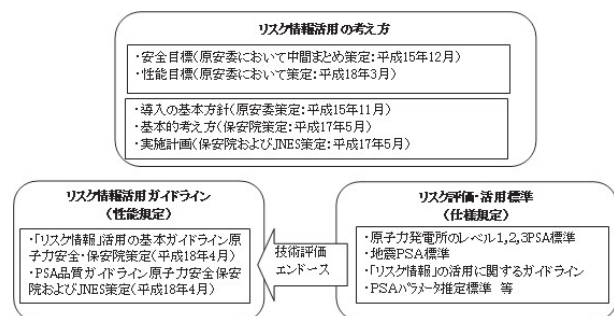
第1表 リスク評価関連標準一覧(2011.12.19現在)

標準名称	担当分科会	発行
レベル1 PSA 標準	レベル1 PSA 分科会	2008.4
レベル2 PSA 標準	レベル2 PSA 分科会	2008.4
レベル3 PSA 標準	レベル3 PSA 分科会	2008.4
停止時 PSA 標準	停止時 PSA 分科会	2011.11
PSA 用パラメータ推定標準	PSA 用パラメータ分科会	2010.6
地震 PSA 標準	地震 PSA 分科会	2007.3
リスク情報活用標準	リスク情報活用ガイドライン分科会	2010.10
津波 PRA 標準	津波 PRA 分科会	2011.12
内部溢水 PRA 標準	内部溢水 PRA 分科会	策定中
PRA 共通用語集	(リスク専門部会)	2011.12

### 2. PRA 標準の構成

原子力学会標準は、規定であるところの「本文」、「附属書(規定)」から構成される。さらに、評価例などを参考に記載する「附属書(参考)」と、検討の背景や説明を記載した「解説」が付く場合もある。PRA 標準もこの形式に則って策定されている。

PRA 標準の共通的な簡条(章のことを原子力学会標準では簡条と称する)として「適用範囲」「引用規格」「用語及



第1図 規制機関の文書と PRA 標準

び定義、略語「文書化」については、全てのPRA標準の本文に記載されている。「適用範囲」には、そのPRA標準が規定しているPRAの範囲を記載する。「引用規格」では本文と附属書(規定)において、他の規格を引用している場合に、それらの規格名称を列挙する。原子力学会の他のPRA標準が記載されている場合が多い。「用語及び定義、略語」には、標準内で用いた用語と定義を記載し、さらにLOCAなどの略語のリストも記載している。なお、PRA標準には、イベントツリーのように、複数のPRAで共通して用いる用語がある。標準ごとに同様の定義をすることになるが、標準の種類により、また作成した時期により、定義内容が違うことがある。それはPRA標準を使う者あるいは組織(以下、「使用者」)に混乱と不便を強いることになり兼ねないので、2011年、PRA共通用語集を制定した。これにより、各PRA標準には、そのPRAで固有に使用する用語が定義されることになり、PRA用語への理解が深まることが期待される。

PRA手法の内容に相当する箇条の最初として、当該PRAの「評価手順」が規定されている。PRAの各ステップには一応の順序はあるが、フィードバックして、それ以前に評価した結果を詳細にするなどの調整を繰り返す場合がある。そのような実態に則した手順を「評価手順」の箇条で示すことにより、様々な使用スタイルにも対応できるよう工夫した。次に「プラント構成・特性の調査」の箇条を設けている。PRAは原子炉施設の機器の仕様だけでなく、システムとしての構成、特性、さらに機能を把握することが必要になる。系統図や配置図、運転操作手順書などの収集と内容調査に加え、プラントウォークダウンの実施も規定している。現場設備に関して図面からだけでは相対配置や操作の困難さが分からない場合があるので、現場を実際に歩き、図面や手順書の不足を補うものである。特に、津波PRAや内部溢水PRAなどでは、例えば水が流入する開口部を図面と現場を照らし合わせることで重要なシナリオを見つけることにつながる。

それ以降の数箇条をかけて、当該PRAの方法が規定されている。最後の「文書化」には、PRA報告書の記載内容を規定するだけでなく、PRAの利用やレビューなどにおいて、容易な理解のために、文書化したものを残しておくことも規定している。

なお、PRAの妥当性を確保する規定事項として、専門家判断の活用、ピアレビュー、品質保証活動の3項目を附属書(規定)に記載している。これはPRAの妥当性を示すために実施する事項として規定しているが、まだ実施経験が少ないため、今後、本文への入れ込みまでは、附属書(規定)の形で、全てのPRA標準に付けている。

### 3. PRA標準の特徴

標準は、一般的に仕様規定である。PRA標準の場合

にも、具体的な方法を規定してはいるが、必ずしも特定の方法の手順を規定しているわけではない。PRAは様々な目的に使用される。例えば、どの系統・機器がリスク上重要かを把握することを目的とする場合と、プラント全体のリスクを概略的に把握することを目的とする場合とでは、PRAの詳細さが異なる。前者に用いる場合には、注目する機器あるいは部位のモデル化が必要であり、故障率などのパラメータも機器単位のものを使用することが望ましい。そういう多様な目的に対応できるように、PRA標準では、使用者が選択したり考案したり拡張できるように、いくつかの工夫をしている。

#### (1) 複数の方法の規定

求める評価精度あるいはPRAの目的によっては、複数の方法を提示し、使用者の判断に任せる方が良い場合がある。つまり、一つの方法だけでは、保守的過ぎる評価結果になったり、影響の小さな事故シナリオ解析に手間をとったために重要シナリオが手薄になる可能性があるからである。例えば、地震PSA標準のフラジリティ解析としては、“現実的耐力と現実的応答による方法”、“現実的耐力と応答係数による方法”そして“耐力係数と応答係数による方法”の3つのいずれか、あるいは組合せを用いることを規定している。これにより、リスクに効かない設備のフラジリティは係数を用いる方法で求められるので、リソースをリスク重要度の高い機器に振り向けられる利点がある。また、L1 PSA標準の「6. 成功基準の設定」では、成功基準解析(緩和設備がその安全機能を達成するために必要な台数などの条件を求める解析)の方法として熱水力解析・構造解析を原則とすることを規定しているが、目的によっては保守的なデータを用いてもよく、また設置許可申請における解析で適用可能であればそれを用いてもよい、としている。

#### (2) 使用者自らが考察・判断する規定

標準は使いやすく、分かりやすいことが重要であるが、解析マニュアルのような標準にしてしまうと、使用者の判断がPRAプロセスに入る余地がなくなるおそれがある。また、PRAの最大の特徴の一つが不確かさの定量化であり、そのために必ずしも実験や解析による知見が既存しているとは限らない。PRAのプロセスの随所で、工学的判断を行う必要があることから、使用者は常に広く深く思考していることが求められる。これに対応するため、PRA標準では、方法を複数提示して、使用者が自らPRAの目的と照らし選択するようにしている。あるいは明示的に方法を示す場合でも、考慮すべき点を列挙し、考察と判断を行うことを規定している。例えば、L1 PSA標準の「5. 起因事象の選定と発生頻度の評価」では、考慮すべき起因事象のリストを限定しているわけではない。見落としなく起因事象を同定することを規定している。他にも、地震PSA標準のハザード解析やフラジリティ解析でも、用いる入力データを限定す



るのではなく、調査結果や実験・解析結果などから、作成する方法を規定している。地震 PSA 標準の「6.6.3 耐力係数と応答係数による方法」では、各係数の中央値と対数標準偏差の算出方法を示しているが、非線形領域での応答の補正のように、現象を想起しつつ係数を調整する必要がある。そこで、解説に多数の例示を載せることで、使用者が考察できるように導いている。

### (3) 使用者が応用できる規定

標準を用いた結果は、一定の品質の成果が出るべきである。一方、標準に規定されていることと異なる方法を取る場合には、その適切性を別途示す必要がある。第1回の解説で述べられているように「PRA は、理論的に考え得るすべての事故シーケンスを対象」とするので、使用者が実際の施設の状況をよく調査、分析し、系統・設備の設計情報、保守管理情報などを広く把握することが必要になる。

例えば、停止時 PSA 標準の「5. プラント状態(POS)の分類」では、POS 分類法として、プリ POS を用いてグルーピングする方法、あるいは構成設備の状態から POS を更に細分化する方法も許容している。使用者がより詳細な PRA を行う場合に応えている。

### (4) 多数・多種の例示の掲載

PRA 標準は、(1)から(3)項で述べたように、PRA 標準は、使用者の“思考プロセスのガイダンス”とも言えるだろう。しかし、一定の PRA 品質を確保する必要もあるため、使用者任せの標準にはできない。そこで、多数、多種の解析例、パラメータ例などを附属書(参考)に記載している。地震 PSA 標準では、400ページ以上にわたる、ハザード解析、フラジリティ解析などの評価例を掲載し、使用者の参考になるように便宜を図っている。

## 4. 津波 PRA 標準の特徴

上記の構成および特徴について、最新の津波 PRA 標準を例に説明する。

### (1) 構成

津波 PRA 標準の簡条5は、「プラント構成・特性及びサイト状況の調査」となっており、他の標準と異なり、サイトの調査を行うことが規定されている。津波は複数のプラントを含むサイトに来襲する。サイト敷地の形状、道路、さらに建屋への水の進入路などの調査が必要になる。これらを図面等で調べるとともに、書類情報で不十分と判断した設備について、サイト・プラントウォークダウンを行うことも規定している。

もう一つ、特徴的な簡条は「事故シナリオの同定」である。これは地震 PSA 標準にも規定されている。外的事象は影響プロセスが多様で、広範に及ぶ場合もある。そこで、最初に津波で起こる事態を想起する。特に直接の被害だけでなく、漂流物の衝突などの間接的被害も考慮する。

### (2) 複数の方法の選択

フラジリティ解析の現実的耐力あるいは応答を求める方法として、実験に基づく方法、経験に基づく方法、解析に基づく方法、工学的判断に基づく方法の4つを提示している。

### (3) 使用者自らが考察・判断する規定

津波 PRA 標準簡条6の「事故シナリオの同定」においては、津波が来襲し、遡上していく過程を、過去の被害などを参考に自ら想起し、引き起こされる影響を広く抽出することを規定している。

### (4) 使用者が応用できる規定

フラジリティ解析において、浸水対策が施されている場合の影響は、没水、被水のモードでは耐力をステップ関数としてもよい、としている。この時に単純に水位で耐力を設定するのではなく、浸水経路や開口部の高さ、形状なども考慮すべきとしている。使用者は、浸水対策の内容により、フラジリティカーブに機器・システムの特性・状況に応じた補正を行うことができる。

### (5) 評価例

評価例は新しい津波被害などを反映したものである方が役に立つ。そこで、津波 PRA 標準では、評価例は別冊として発行する予定である。津波 PRA 標準の附属書(参考)としても、使用するパラメータの設定例などは記載しているが、今回の東日本大震災の知見を反映した最新の評価例を提供することが重要と考えた。別冊にすることで、適宜評価例を更新し、最新知見を踏まえた津波 PRA 結果が得られることを期待するものである。

## Ⅲ. PRA 標準の活用普及と整備計画

### 1. PRA 標準の講習会

原子力学会標準の発行後、講習会などを行い、内容の理解促進に努めることになっているが、リスク専門部会では、PRA 標準の発行後のみならず、積極的に PRA 手法の理解・普及を図るために、定期的に標準の講習会を実施することとしている。2002年10月に PRA 標準としては1回目となる停止時 PSA 手順の講習会を開催して以来、第2回：地震 PSA 標準(2007年12月)、第3回：L1 PSA, L2 PSA, L3 PSA, パラメータ推定の各標準(2010年8月)、第4回：L1 PSA, パラメータ推定の各標準(2011年9月)、そして第5回：地震 PSA 標準(2011年12月)と、今まで5回開催しており、各回30名から50名程度の多くの参加者を集めている。講師から丁寧かつ適切な説明が行われることはもとより、受講者から積極的に質問、意見が出され、双方向の活発な講義になっている。

なお、講習会では、PRA 標準の説明を行うが、PRA 手法に馴染みの薄い参加者のために、PRA 手法の基本にも触れて講義している。今後は、PRA 手法への理解度あるいは使用状況に応じた種類の講習会を計画するこ

とも考えている。

## 2. PRA 技術の開発・研究へのサポート

PRA 標準は、技術的に開発・整備され、試評価が試みられ、実評価の予定があるなどの条件の下で、策定を行っている。PRA の分科会では、標準としての記載内容に多くの議論を費やすことになるので、手法開発や整備に関する議論ができない。また、標準が策定されている PRA 手法でも問題点の検討や、改善、工夫などのための意見・情報交換が必要である。そこで、リスク評価研究専門委員会を2011年に立ち上げた。PRA に関するあらゆるテーマに関して、意見交換や相談、情報交換を行う場として、また若い研究者・技術者の交流の場として活用してもらいたいと考えている。

## 3. PRA 標準の整備計画

リスク専門部会では、必要性と手法の整備状況などを鑑みて、今まで標準を策定・発行してきた。策定過程において、上述のように使用者の便宜を考慮して数々の工夫を試みてきた。2009年に部会傘下にリスク評価基準体系化戦略タスクを設置し、約2年にわたり、今後の PRA 標準の策定計画を検討してきた。特に、東日本大震災以後は、外的事象の複合に着目し、標準としての扱いを議論しているところである。

その主な論点は、①外的事象ハザードの選択、②外的事象の複合における評価方法、③既存 PRA 標準の見直し、④PRA 品質確保のための要件、⑤国際展開、である。①については、我が国の原子力施設に考慮すべき外的ハザードへの拡張およびそれらの複合事象の分類方法を検討する。具体的には、火災 PRA 手法および地震起因複合事象を中心に標準化可能性を検討している。②は、例えば地震と津波の重畳のように、ハザードカーブのシビアリティの横軸が異なる(地震では地震動、津波では津波高さ)場合の扱いのような新たな課題である。③は、定期的な改定に備えるだけでなく、実プラントへの適用をしている PRA 標準については問題点の解決、部分的に未成熟な技術分野がある PRA 標準については解析方法の開発、などへの取組計画を検討する。④は、いずれの PRA 標準にも規定されている、専門家判断の活用、ピアレビュー、品質保証活動の3項目の記載内容と構成について検討する。⑤としては、PRA にかかる国際会議(PSAM, PSA 2011など)にリスク専門部会の活動を積極的に提示し意見交換を行ってきており、今後も継続する。さらに、PRA 標準の英語訳を作成し、米国 ASME/ANS, IAEA などと詳細なレベルで、標準にかかる意見交換を行えば、我が国の PRA 標準、ひいては手法のレベル向上にもつながると期待する。

## IV. PRA 標準の将来の姿

リスク専門部会は、我が国で唯一 PRA の手法・データ、活用にかかる標準を作成してきている。内的事象は全ての運転状態で環境影響までリスク評価が可能な標準を提供している。さらに外的事象についても、地震、内部溢水、津波と拡張し、火災や複合事象も検討していく。また、起因事象、人的過誤確率、共通原因故障などシステム解析にかかる手法の深化にも取り組みたい。PRA は不確実さを定量化する方法であるので、その結果は不確実さ幅を伴ったものになる。そのため、意思決定に供する際に重要な要素となる不確実さの扱いを検討していきたい。さらに、PRA が実施設へ適用され、様々な意思決定に供されると認められるほどの高い品質が確保できる PRA 標準を目指したい。このために、標準の規定内容を充実させることはもとより、PRA 標準の使用経験や気付き事項などを標準策定の場へフィードバックするよう心がけたい。また、標準の講習会だけでなく、リスクあるいはリスク評価手法を分かりやすく説明する教科書も準備していきたい。このような様々な取組を行うことにより、PRA 標準への信頼が上がり、PRA を意思決定に用いることにも理解が広がると期待する。

### —参考資料—

- 1) 原子力安全委員会, “安全審査指針の体系化について”, 平成15年2月.
- 2) 原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会, “原子力発電施設の技術基準の性能規定化と民間規格の活用に向けて”, 平成14年7月22日.
- 3) 日本原子力学会 標準委員会委員長の挨拶  
<http://www.aesj.or.jp/sc/about/aisatsu.html>
- 4) 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”, 平成15年12月.
- 5) 原子力安全委員会 安全目標専門部会, “発電用軽水型原子炉施設の性能目標について—安全目標案に対応する性能目標について—”, 平成18年3月28日.
- 6) 原子力安全・保安院/原子力安全基盤機構, “原子力発電所における確率的な安全評価(PSA)の品質ガイドライン(試行版)”, 平成18年4月.

### 著者紹介



成宮祥介(なるみや・よしゆき)  
関西電力株  
(専門分野)原子力発電所の安全評価, 確率的リスク評価

## 解説シリーズ

# ヒューリスティックな最適化手法とモデリング

## 第3回 遺伝的アルゴリズムと差分進化法

慶應義塾大学 相吉 英太郎,

千葉大学 岡本 卓, (株)テプコシステムズ 小林 容子

第3回は、前回で解説した Particle Swarm Optimization (PSO) より良好な計算性能を有するといわれている差分進化法 (Differential Evolution 法) について紹介する。この手法では、いわゆる進化的手法の代表ともいえる遺伝的アルゴリズムに由来する交叉演算が用いられる。そこで、遺伝的アルゴリズムについてもあわせて解説する。

### I. はじめに

前回の解説によって、ヒューリスティックな最適化手法とはどのような手法であるかについて、おおよその理解が得られたと期待するが、その特徴をまとめると、

- (1) 最小化または最大化したい関数の形状が数式で具体的に表現されていなくても、その値を計算することができれば、最適解の探索が可能であること
- (2) 関数の勾配(微分)のような解析的な情報を用いずに、大域的最適解が高い精度で求められる一方、そのための数理的な保証が与えられていないこと
- (3) 試行的にとられた複数の探索点を干渉させながら大域的最適解を求めるが、その干渉のさせ方は経験則に基づいており、数理的な根拠に乏しいこと

といえる。つまり、極論すると、数学的な裏付けがないまま、その手法の提案がされているといってもよい。その代表例が前回の PSO であるが、今回は、この手法より大域的最適解の探索能力が高いとされている差分進化法 (Differential Evolution 法: 以下 DE と略記) について解説する。ところで、DE の特徴の1つは、複数の探索点の間で交叉演算が用いられることであるが、この演算は選択演算とともに、進化的手法、進化計算と称される計算手法の特徴となっている。そこで、それらの由来となった遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: 以下 GA と略記) についても解説する。なお、DE は連続変数最適化手法であるのに対して、GA は、0-1組合せ最適化手法であることに注意してほしい。

### II. 遺伝的アルゴリズム

生物が環境に適応していくメカニズムを取り入れた計算手法として話題となった GA は、1960年代の適応システムの研究を起源とするが、システム最適化の分野だけでなく、制御工学やロボット工学など、様々な分野に用いられるようになったのは、1989年の Goldberg の書籍<sup>1)</sup>の出版によるところが大きい。また、より良い解候補を逐次的かつ確定的に生成したり、探索に不必要な解候補を理論的に排除したりする方法ではないため、最適解への収束性や最適解を得る保証が理論的にはなく、ある程度良好な解をほどほどの計算効率で得られる、という意味でヒューリスティックな手法といえる。

GA が有名になったのも、進化の概念を計算手法に取り入れた話題性だけでなく、計算手法として本質的に斬新な特徴にもあるといえる。それらを列挙すると

- (1) 従来の手法における解の探索は、単一の探索点を逐次更新するのに対して、複数の探索点(以下では「探索点群」と称する)を用いること
- (2) 探索点群の要素である探索点の「対(ペア)」に対して、「交叉」とよばれる新しい演算(以下では「交叉演算」と称する)を導入すること
- (3) 探索点群に対して、その要素である探索点の「複製」や「消滅」を考慮した演算(以下では「選択演算」と称する)によりその群全体を更新すること

であり、これらを生物の進化のメカニズムに比喻させたことが、話題性を生むことになったといえよう。GA には、さまざまな改良手法が登場しているが、もっとも標準的な Simple GA とよばれる手法について説明する。

GA では、0-1変数最大化問題

$$\begin{aligned} \max_x f(x) \\ \text{where } x_n \in \{0, 1\}, n = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (1)$$

Heuristic Optimization and Modeling (3): Genetic Algorithm and Differential Evolution: Eitaro AIYOSHI, Takashi OKAMOTO, Yoko KOBAYASHI.

(2011年 9月26日 受理)



を想定し, さらに目的関数は  $f(x) > 0$  であるとする。このため, 最小化問題や目的関数  $f(x)$  が負の値もとりにう場合は, 最大化問題への変換や目的関数の値域の変換が必要である。0-1変数最大化問題(1)に対するGAの計算手順は以下のとおりである。

遺伝的アルゴリズム(GA)の計算手順

Step 1 [初期点群の生成]:  $P$  個の探索点の初期値として,  $\mathbf{x}^p(0), p=1, \dots, P$  を与え, 初期探索点群を  $X(0) = \{\mathbf{x}^1(0), \dots, \mathbf{x}^P(0)\}$  とおき, 交叉率(crossover rate)  $c_r$  と突然変異率(mutation rate)  $m_r$  を設定し,  $k=0$  とする。

Step 2 [評価]: 探索点群  $X(k)$  の  $P$  個の探索点の目的関数値  $f(\mathbf{x}^p(k)), p=1, \dots, P$  を計算する。

Step 3 [終了判定]: 計算終了条件を満たしていれば, 探索中の最良点

$$\mathbf{x}^{\text{best}}(k) = \underset{q \in \{1, \dots, P\}}{\operatorname{argmax}} |f(\mathbf{x}^q(l))|, q=1, \dots, P, l=0, \dots, k$$

を大域的最適解とみなして終了する。

Step 4 [選択]: 探索点群  $X(k)$  から,  $P$  個の探索点を選択して, 探索点群  $X'(k)$  を構成する。このとき, 探索点  $\mathbf{x}^p(k)$  は, 確率

$$r^p(k) = f(\mathbf{x}^p(k)) / \sum_{p=1}^P f(\mathbf{x}^p(k)) \quad (2)$$

で選択される。

Step 5 [交叉]: 探索点群  $X'(k)$  の探索点をランダムにペアリングし, 各ペア  $\{\mathbf{x}^{p_1}(k), \mathbf{x}^{p_2}(k)\}$  について, 交叉率  $c_r$  で, 以下の演算を行う(第1図を参照)。まず, 交叉点  $\bar{N} \in \{1, \dots, N-1\}$  をランダムに選び,

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_n^{p_1}(k) &:= \begin{cases} \mathbf{x}_n^{p_1}(k) & n \leq \bar{N} \\ \mathbf{x}_n^{p_2}(k) & \text{otherwise} \end{cases} \\ \mathbf{x}_n^{p_2}(k) &:= \begin{cases} \mathbf{x}_n^{p_2}(k) & n \leq \bar{N} \\ \mathbf{x}_n^{p_1}(k) & \text{otherwise,} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

$\forall n=1, \dots, N$

と更新する。ここで「:=」は更新を意味する。

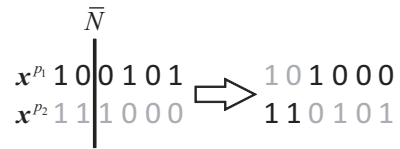
Step 6 [突然変異]: 探索点群  $X'(k)$  の探索点,  $\mathbf{x}^p(k), p=1, \dots, P$  の成分ごとに, 突然変異率  $m_r$  でその値を以下のように反転する。

$$\begin{aligned} x_n^p(k) &:= 1 - x_n^p(k) \quad \text{with probability } m_r, \\ \forall n=1, \dots, N, p=1, \dots, P \end{aligned} \quad (4)$$

Step 7 [探索点群の更新]:  $X(k+1) = X'(k), k:=k+1$  として Step 2 へ戻る。

上述のGAのアルゴリズムにおける選択演算にはルーレット選択, 交叉演算には一点交叉とよばれる演算を用いている。選択演算と交叉演算には, このほかにも様々な方法が提案されている。例えば, 交叉演算の1つである一様交叉は, 交叉点を選ばずに, すべての成分ごとにランダムに値を互換する, すなわち,

$$\begin{cases} \mathbf{x}_n^{p_1}(k) := \mathbf{x}_n^{p_2}(k), \mathbf{x}_n^{p_2}(k) := \mathbf{x}_n^{p_1}(k) \text{ with probability } 0.5 \\ \mathbf{x}_n^{p_1}(k) := \mathbf{x}_n^{p_1}(k), \mathbf{x}_n^{p_2}(k) := \mathbf{x}_n^{p_2}(k) \text{ otherwise} \end{cases}$$



第1図  $N=6, \bar{N}=2$  の場合の一点交叉の例

$$\forall n=1, \dots, N$$

と更新する。

GAでは, Step 4の選択演算によって, より目的関数値の良い値を与える探索点が, 探索点の更新に用いられる探索点群  $X'(k)$  内に多く複製され, より目的関数値の悪い値を与える探索点は消滅する。そして, 探索点群  $X'(k)$  内の探索点のペアに対して, 交叉演算が Step 5で実行されると, 新たな  $P$  個の探索点が生成される。このような選択演算と交叉演算による探索点の生成と消滅が, GAの最大の特徴といえよう。GAは, 複数の探索点を用意するにもかかわらず, 個々の探索点をその番号で識別し, それを計算終了時まで継続的に保持してその軌道を考慮するPSOとは, 本質的に異なる計算論的特徴を有しており, この特徴が「進化的手法」といわれる新しい概念が提案される契機となったゆえんでもある。なお, 突然変異演算は, ハミング距離1の(ビット列の1成分のみが異なる)近傍で新たな0-1組合せの解候補を生成する演算であり, 必ずしもGAに固有の演算とは限らない。

なお, 本解説では, 0-1組合せ最適化手法ではなく, 連続変数最適化手法に焦点を絞っているので, GAについては, 以上のような計算手法としての特徴のみの言及にとどめることにする。

### III. 差分進化法

GAにおける「交叉演算」を利用した連続変数最適化手法として, 差分進化法(DE)とよばれる手法が, 1995年にPriceとStornによって提案された<sup>2,3)</sup>。PSOの更新式は, 複数の探索点が干渉した慣性系の力学系に基づく更新式と解釈されるのに対して, DEの更新式は, GAを特徴づける「交叉演算」によって探索点の更新が行われるため, PSOのように力学系として解釈することはできない。しかし, 連続変数最適化問題に対するヒューリスティック手法としては, その大域的最適解の探索性能が, とくに決定変数の数が少ない問題において, PSOより良好であるとされている。

制約のない連続変数最小化問題

$$\min_x f(x) \quad (5)$$

に対するDEの計算手順を以下に示す。

#### 差分進化法(DE)の計算手順

Step 1 [初期点群の生成]:  $P$  個の探索点の初期点として,  $\mathbf{x}^p(0), p=1, \dots, P$  を与え, 拡大率  $c_0$  と交叉率  $c_r$  を設定し,  $k=0$  とする。

Step 2 [差分による変種点生成]: 第  $p$  探索点以外の互いに異なる探索点を無作為に 3 点選び,  $\mathbf{x}^{q_0}(k), \mathbf{x}^{q_1}(k), \mathbf{x}^{q_2}(k)$  とし, これらを用いて第  $p$  探索点の変種点  $\mathbf{y}^p(k)$  を

$$\mathbf{y}^p(k) = \mathbf{x}^{q_0}(k) + c_0(\mathbf{x}^{q_1}(k) - \mathbf{x}^{q_2}(k)) \quad (6)$$

により生成する。これを  $p=1, \dots, P$  に対して繰り返す。

Step 3 [交叉]: 探索点  $\mathbf{x}^p(k)$  と変種点  $\mathbf{y}^p(k)$  との交叉演算

$$u_n^p(k) = \begin{cases} y_n^p(k) & \text{with probability } c_r \\ x_n^p(k) & \text{otherwise} \end{cases}, n = 1, \dots, N$$

$$u_N^p(k) = y_N^p(k)$$

により, 試験点  $\mathbf{u}^p(k)$  を生成する(第 2 図参照)。ただし  $\bar{N} \in \{1, \dots, N\}$  はランダムに選んだ成分番号である。これを  $n=1, \dots, N$  に対して繰り返す。

Step 4 [評価]: 第  $p$  探索点  $\mathbf{x}^p(k)$  と試験点  $\mathbf{u}^p(k)$  に対する目的関数値,  $f(\mathbf{x}^p(k)), f(\mathbf{u}^p(k))$  を計算する。

Step 5 [探索点の更新]: 第  $p$  探索点  $\mathbf{x}^p(k)$  を

$$\mathbf{x}^p(k+1) = \begin{cases} \mathbf{u}^p(k) & f(\mathbf{u}^p(k)) < f(\mathbf{x}^p(k)) \\ \mathbf{x}^p(k) & \text{otherwise} \end{cases}$$

により更新する。この更新を  $p=1, \dots, P$  に対して繰り返す。

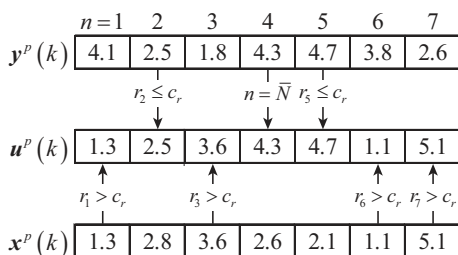
Step 6 [終了判定]: 計算終了条件を満たしていれば, 最良点

$$\mathbf{x}^{\text{best}}(k+1) = \operatorname{argmin}_{p=1, \dots, P} \{f(\mathbf{x}^p(k+1))\}$$

を大域的最適解とみなして終了する。そうでなければ,  $k:=k+1$  として Step 2 へ戻る。

ここで, DE と GA との違いに言及しておく, GA を特徴づける探索点集合に対する「選択演算」に対応する機構はなく, 目的関数値に応じた自律的な更新が Step 5 において探索点ごとになされることである。また Step 3 の「交叉演算」は, GA のような互換的な「交叉演算」ではなく, 探索点ごとに Step 2 で生成された変種点からの成分を一方的に取り入れる「交叉演算」である。

ところで, 上述の DE のアルゴリズムは「DE/rand/1/bin」とよばれるアルゴリズムである。DE には, 様々な亜種が存在し, それらは「DE/x/y/z」という形式で名付けられている。具体的には, x/y が Step 2 の変種点の



第 2 図 一様交叉 ( $r_n$  は 0 以上 1 以下の一様乱数値。  $r_n \leq c_r$  を満たすことは, 確率  $c_r$  でアタリが出たことと同じ意味になる。)

生成方法を示しており,  $z$  が Step 3 の交叉演算の種類を示している。例えば, 変種点の生成式(6)には, 現時点の探索点からの最良点方向  $\mathbf{x}^{\text{best}}(k) - \mathbf{x}^p(k)$  を利用した

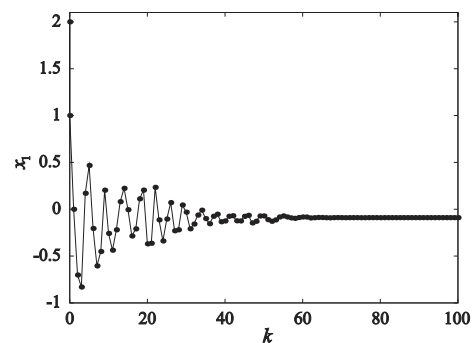
$$\mathbf{y}^p(k) = \mathbf{x}^p(k) + c_0(\mathbf{x}^{\text{best}}(k) - \mathbf{x}^p(k)) + c_0(\mathbf{x}^{q_1}(k) - \mathbf{x}^{q_2}(k)) \quad (7)$$

が考えられており, これは「rand-to-best/1」と名付けられている。この変種点生成式は, PSO の更新式において, 慣性項と  $p$ -best 項を削除する代わりに, 右辺第 3 項の差分項を追加したものである。また, Step 3 の交叉演算には, GA の一点交叉を応用した指数交叉とよばれる演算が考えられている(詳細は紙面の都合上略す)。

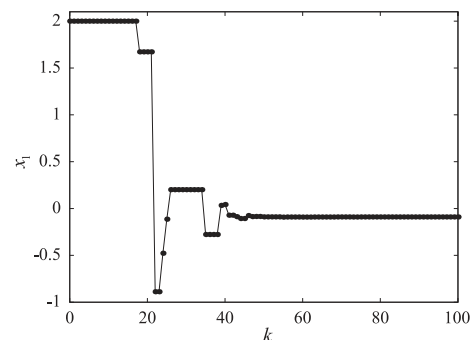
## IV. PSO と DE の性能比較

第 2 回の解説で用いた例題 Six-hump Camelback 関数最小化問題に対して, PSO と DE の計算性能を比較した結果を示す。PSO による探索軌道を第 3 図(a)に, DE による探索軌道を第 3 図(b)に示す。第 3 図は, ある探索点の変数成分の 1 つである  $x_1$  の探索軌道を時系列で示したものである。まず, PSO では, 振動的な軌道が減衰しながら, 最適解に「まさに」収束している, すなわち, 第 2 回で説明した古典的な最適化手法の特徴をある程度残しながら探索を行っている。一方, DE では, 交叉演算の効果により, 軌道が突発的な変化を繰り返し, より優れた状態に遷移しながら, 最適解を得ている様子がわかる。このように, DE は, PSO や古典的な最適化手法とはまったく異なる探索過程を経て最適解を得ていることが理解できる。

次に, 第 1 回の[付録 1]に記した「コイルバネの最適



第 3 図(a) PSO による時系列探索軌道



第 3 図(b) DE による時系列探索軌道

第1表 コイルバネの最適設計問題での最適化性能

	精密ペナルティ法	2乗ペナルティ法
PSO	29	21
DE/rand/1/bin	98	99
DE/rand-to-best/1/bin	56	96

設計問題]に PSO と DE を適用した結果を示す。この問題は、不等式制約条件付き問題であり、こうした問題に PSO や DE を適用する場合には、制約条件付き問題を、等価な制約条件のない問題に変換する必要がある。この問題変換の手法としては、ペナルティ法が一般的に用いられるが、これについては、[付録]を参照されたい。コイルバネの最適設計問題に対して、初期点をランダムに変更しながら100回探索を行ったうち、大域的最適解が得られた回数を第1表に示す。表中の DE/rand/1/bin は、「差分進化法の計算手順」の場合であり、DE/rand-to-best/1/bin は、PSO と類似の変種点更新式(7)を(6)式の代わりに用いた場合である。精密ペナルティ法と2乗ペナルティ法については、[付録]を参照されたい。第1表から、コイルバネの最適設計問題においては、PSO よりも DE の方が優れた結果となっていることがわかる。この問題は、決定変数の数は3つしかないが、目的関数と制約条件式の形状に起因して、優れた解同士がある変数空間上で離れた位置に存在する。PSO は、第3図(a)で示したように、優れた解に振動を伴いながら徐々に近づくのに対し、DE は、突発的な変化を繰り返しながら、優れた解をまさに「発見」することによって探索を進めている。したがって、優良な解候補が離れて散在しているような最適化問題に対しては、変数の数が多くなければ、より発見的な手法である DE が優れた探索を行うことができるといえよう。変種点生成法の違いについては、rand/1演算の方が優れた結果となっている。これは、rand-to-best/1演算では、すべての探索点が同じ点  $\mathbf{x}^{\text{best}}(k)$  を参照するため、rand/1演算より変種点生成の多様性が欠けているためであると考えられる。

## V. おわりに

「差分進化法」と称するヒューリスティックな最適化手法を解説したが、その特徴は「変種点生成」と「交差演算」であり、その発案には何ら数理的な根拠がないといつてよい。具体的には、GA や DE の「交叉演算」は、2つのベクトル量の成分の交換であり、生物の「交配」にヒントを得ているのに対し、このような演算は、従来の数学にはない。また、生物の「淘汰」に相当する「選択演算」も、探索点そのものの消滅や複製を意味し、探索過程を質点の挙動とみると、その質点の消滅や発生を意味し、その現象を数理的に解析することは困難である。以上のように

な意味において、GA や DE は、数理的根拠のないヒューリスティック手法であるといえ、計算手法としての有効性の検証は、コンピュータシミュレーションに頼らざるをえない。一方で、最適化手法のユーザが解きたい問題に適するように容易に改良することができる点や、実際の設計現場で容易に利用することができる点で、可能性を秘めている手法といえる。

### —参考資料—

- 1) D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, (1989).
- 2) R. M. Storn, K. V. Price, *Differential Evolution—A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces*, Tech. Rep. of International Computer Science Institute, No. TR-95-012, (1995).
- 3) K. V. Price, R. M. Storn, J. A. Lampinen, *Differential Evolution—A Practical Approach to Global Optimization*, Springer, (2005).

### 著者紹介

相吉英太郎(あいよし・えいたろう)

岡本 卓(おかもと・たかし)

小林容子(こばやし・ようこ)

本誌, 53[11], p.781 (2011)参照.

### [付録]

等式-不等式制約条件付き最適化問題

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \\ \text{subj. to } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (8)$$

に対する解法としては、制約条件式を目的関数に組み込んで得られる拡大目的関数

$$P(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + r \left[ \sum_{i=1}^m (\max\{0, g_i(\mathbf{x})\})^\alpha + \sum_{i=1}^l |h_i(\mathbf{x})|^\beta \right] \quad (9)$$

に関する無制約最適化問題

$$\min_{\mathbf{x}} P(\mathbf{x}) \quad (10)$$

に変換して解くペナルティ法が簡易的でよく用いられる。ここで、 $\alpha$ ,  $\beta$  はゼロでない自然数で、 $\alpha = \beta = 1$  の場合を精密ペナルティ法、 $\alpha = \beta = 2$  の場合を2乗ペナルティ法という。問題(8)と問題(10)の最適解は、前者の場合は、ある有限の正の値  $r$  に対して一致するのに対して、後者の場合は、 $r$  の値を無限大にした極限において一致する(実用上は、十分に大きな値にする)。なお、第1表の計算では、精密ペナルティ法では  $r = 1$ , 2乗ペナルティ法では  $r = 100$  としている。



連載  
講座材料が支える原子力システム  
より高い信頼性のために

## 第7回 照射技術

東北大学 鳴井 實, 四竈 樹男

原子炉やその他の照射環境下での材料の照射研究には、試験研究炉等の原子炉を利用した照射研究が不可欠である。そのためには炉内試験研究に炉心内での照射条件、すなわち、照射温度、中性子スペクトル、照射中雰囲気等の制御が重要であり、また、照射場ごとに異なる照射条件の標準化が必要である。この課題を解決するべく、国内外において照射技術の確立と改良が行われてきた。本稿では、これらの照射技術の変遷と、今後の照射技術の展望について述べる。

## I. はじめに

原子炉やその他の照射環境下での材料の照射研究は、軽水炉、高速炉、核融合炉等の材料開発の分野などで長い歴史をもっている。しかし、従来行われてきている試験研究用原子炉を利用した研究成果は、充分満足するものではなかったのが現実である。その原因は、炉内試験研究に最も重要な要素である炉心内での照射条件、例えば、照射温度・中性子スペクトル・照射中雰囲気等の制御が不十分なことに起因している。これら照射条件は照射場ごとに異なるため、照射損傷等の試験研究は照射条件の標準化が必要となった。1980年後半よりこの課題を解決するべく、国内外において項目ごとに照射技術の確立と改良を行い、現在では照射損傷等に係る照射後データ取得が普遍的、そして再評価も可能な形で実現可能となっている。

今回は、主に大学が材料試験炉 JMTR (Japan Materials Testing Reactor)、および「常陽」(ナトリウム冷却高速炉)より支援を受けて取得した照射技術の変遷と、現在、試験可能な照射試験、そして今後の照射技術の展望について述べることにする。

## II. 照射技術の変遷

## 1. 概要

JMTRをはじめとする世界の主な試験研究炉(第1表)を利用した原子炉における材料開発研究は1950年代より開始され、軽水炉、高速炉、核融合炉の材料安全性研究、材料開発研究が現在まで鋭意進められてきた。また、並行して原子炉照射に必要な不可欠な照射技術の開発試験も同様な経緯をたどってきた。JMTRでの大学関係の照射試験の実績は、1990年代までは温度測定なしの無計装キャプセル(密封型、リーキー型)総数101体と温度計測キャプセル51体であった。その製作設計に係る技術内容は、海外依存型であり、JMTRの特性を十分に活かしたものではなかった。しかしながら、1990年代にキャプセル設計・製作から照射試験および照射後試験に至るまでの新しい照射技術手法が検討、確立され、その結果として、JMTRを利用した多様な高精度キャプセル照射が、現在までに総計86体実現したことは世界に誇れるものである。その経緯を経て、第2表に示すように、JMTRでの照射技術を基軸に、高速炉である常陽や、FFTF(Fast Flux Test Facility)、HFIR(High Flux Isotope Reactor)、BR2(Belgian Materials Testing Reactor 2)の海外炉を利用した高精度照射試験が逐次展開され、国際的な照射場を利用した研究が実現した。

## 2. 歴史

## (1) 材料照射用キャプセル

JMTRでの主な材料研究用キャプセルについて、1990年代以前に発生した技術的問題点を克服するために、キャプセルの構造解析・設計製作手法・照射手法などを詳細に分析検討した。また、原子炉運転側や試料提供者側との議論を重ね、現在では、多様なニーズに応える照射キャプセルを考案し、各種の照射試験を可能とした。

*Materials for Nuclear Energy Systems—Towards High Reliability*(7); *Irradiation Techniques*: Minoru NARUI, Tatsuo SHIKAMA.

(2011年10月1日 受理)

第1回 軽水炉用ステンレス鋼

第2回 高速炉炉心用改良ステンレス鋼

第3回 Ni基合金

第4回 低合金鋼

第5回 軽水炉燃料部材に用いられるジルコニウム合金

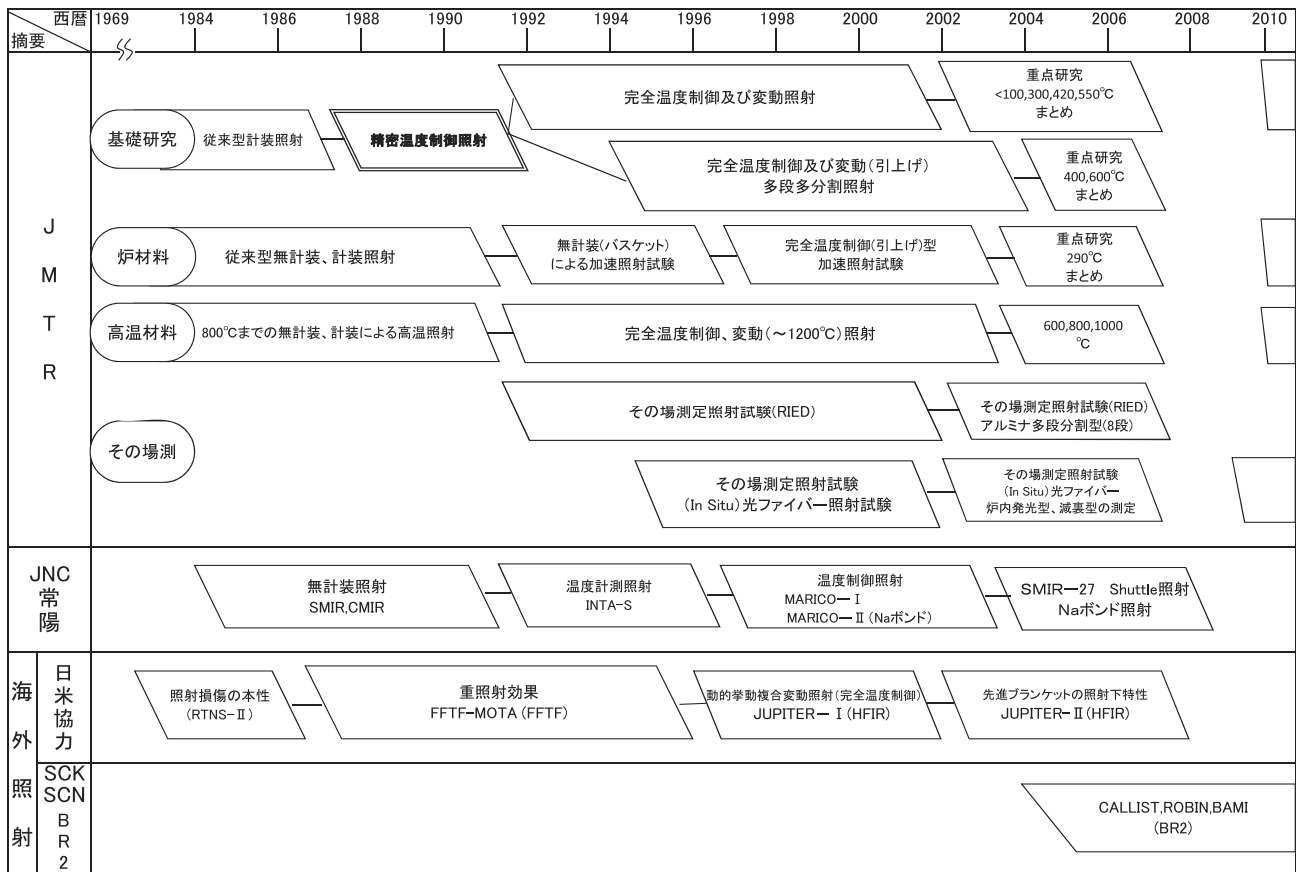
第6回 機能性材料

第1表 世界の主な試験研究炉

原子炉 摘要	BR 2	HFIR		ATR (ITV)	JOYO	JMTR
		※1 T. Position	※2 RB. Position			
高速中性子束(mv)	3×10 <sup>14</sup>	2×10 <sup>15</sup>	4×10 <sup>14</sup>	5×10 <sup>14</sup>	3×10 <sup>15</sup>	4×10 <sup>14</sup>
熱, 中性子束(mj)	3×10 <sup>14</sup>	3×10 <sup>16</sup>	1×10 <sup>15</sup>	4×10 <sup>14</sup>		4×10 <sup>14</sup>
線量/年	~ 1 dpa	20-30 dpa	7 dpa	12 dpa	6-50 dpa	~ 4 dpa
冷却	水	水	水	水	Na	水
キャプセル	無計装	無計装	計装	計装	計装	計装
照射温度	50~400℃	80~800℃	80~400℃	200~700℃	350~800℃	80~1000℃
特徴	・軽水炉条件 ・低温照射 ・中性子量制御	・核変換 ・中性子遮へい(Eu2O9) ・In-Situ計測 ・温度制御		・Liボンド ・温度制御 ・In-Situ計測	・Naボンド ・完全温度制御 ・>350℃重照射	・完全温度制御 ・In-Situ計測 ・中性子調整 ・中性子量制御 ・炉内グループ

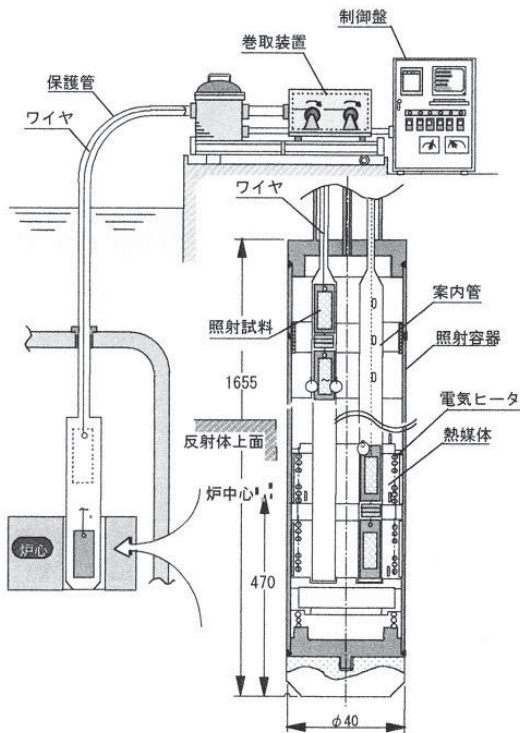
※1 T: Target, ※2 RB: Removal Beryllium

第2表 大学での照射リグ開発の変遷



これまでの検討から、原子炉内での照射試験の最も肝要な要素は、照射試料に対する雰囲気管理と照射温度の精密管理であることが判明した。本節では一例として照射温度の精密管理について述べる。原子炉照射研究においては、原子炉運転の開始及び終了時のある一定の出力での中性子照射が行われている時間帯に、目標温度より低い温度で照射されることが避けられないが、このときの温度履歴と試料に発生する欠陥の型と濃度がよく対応することが判明した<sup>1)</sup>。この原子炉出力変動時の温度変動の影響を避けるために、完全温度制御キャプセルが開

発され<sup>2)</sup>、同時に、ヒータ温度制御技術の改良により、照射中に温度変動が可能なキャプセルも開発された。また、それと並行して、原子炉運転中に一部の試料を炉心より引き上げるシステムの開発が行われ、1997年に照射試験を開始した。第1図に示す引上げ型キャプセルの開発により、速度論的解析を進めるために必要な中性子フラックスや中性子スペクトルが、一定の条件の下での材料の照射挙動の時間変化を計測する技術を確立するとともに、1本のキャプセルで複数のデータを採取することにより、照射研究の時間短縮と同時に照射費の低減を実



第1図 引上げ型多分割キャプセル

現できた<sup>3)</sup>。この技術を応用し、原子炉材料の加速照射試験研究のため、運転中に装荷試料の3割程度を引き上げることに成功した。双方とも引上げ手法は、安全な手動によるワイヤ炉外巻き上げ方式で、炉心部上端より700 mmの位置まで引き上げた。これらの完全温度制御キャプセルの総合試験として、2004年より重点研究を開始し、最終的な性能確認と、材料照射挙動に関する重要な成果を得ることに成功した。

## (2) 高温材料キャプセル

1,000℃までの高温照射は海外での照射技術を継承し、Mo・Wの熱媒体を用いてガンマ線発熱により高温照射を行っていた。しかし、熱媒体の加工性、照射後の高誘導放射能、熱電対の温度評価の不安定性、試料の酸化等の問題点が提起された。そこで、現在では、熱媒体としてSUS 316、熱電対としてW-Reを使用し、酸化についてはジルコニウム酸素ゲッターを使用して、電気ヒータと真空温度制御により1,200℃までの照射試験を行っている。なお、1,200℃照射試験試料では一部試料が熱媒体と固着する事態が生じた。そこで、改良のために熱媒体へのアルミナ溶射や、セラミックススペーサの使用などの検討を開始した。

## (3) その場測定キャプセル

動的照射効果研究のための、原子炉内でのその場測定では計測手法の開発が重要である。1990年以降においては加速器等を用いた基礎的な研究が行われてきた。また、照射誘起応力腐食割れ(Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking: IASCC)の原子炉内その場測定には電気的測定法が用いられたが、感度等に問題があり、そ

れに代わって光ファイバを用いた歪のその場測定技術の開発が開始された。また、これと並行して、動的照射効果(電気的、光学的、熱的特性)を受けやすいセラミックス材料(機能性材料)を強放射線場で使用する動きが核融合炉材料開発の中で出てきた。

このような要求に対応すべく、1992年以降、炉外よりのアクセスが良好で、かつ、温度制御技術、照射技術が高度なJMTRを用いた、光ファイバを用いた電気抵抗等のその場測定キャプセルの開発を開始した。本キャプセルの照射中の問題点は、炉心は压力容器・冷却水・水・遮へい体などに取りまかれ、炉心と炉外測定系は約20 mの間隔があるという条件下で、炉心内の試料からの微弱電気信号を精密測定する点であり、全体に整合がとれた測定手法の開発が重要である。また、原子炉運転中には電気的ノイズと光学的ノイズが発生するため、炉心内試料から微弱な情報信号を得ることは極めて困難であると同時に、試料環境の温度雰囲気等の制御は難しく、科学的実験に必須の制御された条件でのデータ採取のためには多くの工夫と改良を要したが、これにより炉内の電気抵抗測定ではアルミナ等の照射誘起電気伝導現象(Radiation Induced Electrical Conductivity: RIC)が計測された<sup>4)</sup>。

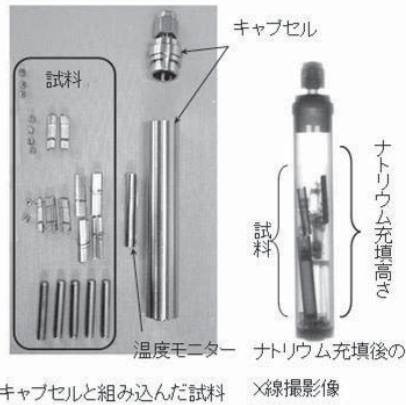
また、金属ガラス等の電気特性(電気伝導度)についても4端子法を用いた試験を開始した。照射試験に用いた光ファイバは熔融シリカで、細径のため脆く、しかも計測長が約20 mと長いとため、光ロス、ファイバの断線発生を考慮した。炉内試験は、炉心発光および炉内光減衰測定を主とし、光ファイバの本数は20本程度である<sup>5)</sup>。

## (4) 常陽照射キャプセル

高速炉「常陽」を用いた照射試験は、旧サイクル機構大洗の技術支援を受け、高速炉特有の炉の構造・冷却システム等の難題を解決しながら、無計装 SMIR (Structure Materials Irradiation Rig), CMIR (Core Materials Irradiation Rig), 温度計装型 INTA-S (Instrumented Test Assembly Special) キャプセルを用いて開始された。これらのキャプセル照射により、国内初の高速中性子による照射試験(数 dpa)を行ったが、高出力・高温ナトリウム冷却での重照射条件下では、照射量は満足するが照射試料の温度管理は困難をきたし、100℃前後の誤差が発生し、照射データの信頼性が著しく低下した。

その後、1995年頃には、常陽においてもオンラインによる温度計測・制御が可能なキャプセルが熱望され、炉外での金属ナトリウム中での電気ヒータの健全性、耐久性確認試験を大学とサイクル機構とで共同で行い、温度制御型材料照射装置 MARICO-II (Material Testing Rig with Temperature Control) を完成させた。このキャプセルでの照射試験の特徴は、制御された試験温度での重照射試験であり、損傷評価過程が明確化された<sup>6)</sup>。Na ボンドキャプセル(ナトリウム液体金属環境での試料照射





第2図 Na ボンドキャプセル

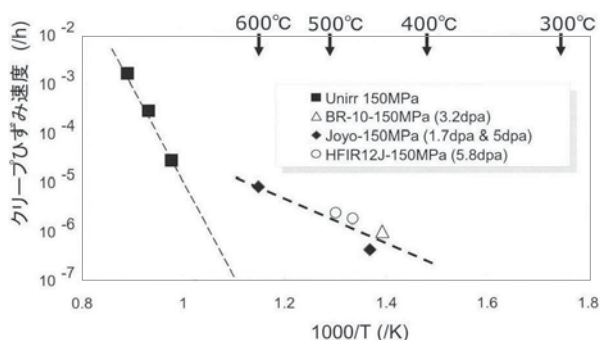
容器)による各種雰囲気重照射試験を完了したが、炉外搬出時のトラブルで、現在も炉心に保管された状態にある。

2004年以降の常陽照射試験では、照射期間短縮のために無計装 SMIR を利用したシャトル照射を開始し、第2図に示すように、照射容器内にナトリウム金属を注入した Na ボンドキャプセルを製作し、照射試験を開始した。このボンドキャプセル内には各種試験片と同時に、照射中の膨れを利用したインパイルクリープチューブを挿入し、クリープデータを採取した。温度監視はクリープ管型温度モニタを同時に挿入することにより行った。

この常陽データをもとに、HFIR や ATR (Advanced Test Reactor) で照射されたバナジウム金属のクリープデータを考察すると、第3図に示すように、正確に予測ライン上に反映された。このように、世界の複数の原子炉を利用して得られた低線量領域から高線量領域までの高精度クリープデータ<sup>7)</sup>が報告されたことは、照射技術に対する基盤の高さが証明された一例でもある。

### (5) 海外照射

大学での海外照射の開始は、1981年からの日米科学協力事業「核融合炉材料照射研究」として、米国の D-T 核融合中性子源 RTNS-II (Rotation Target Neutron Source-II) を利用した研究である。この事業においては、純金属やモデル合金について、極低温より高温までの正確な温度管理のもと系統的な温度依存性を調べ、0.1

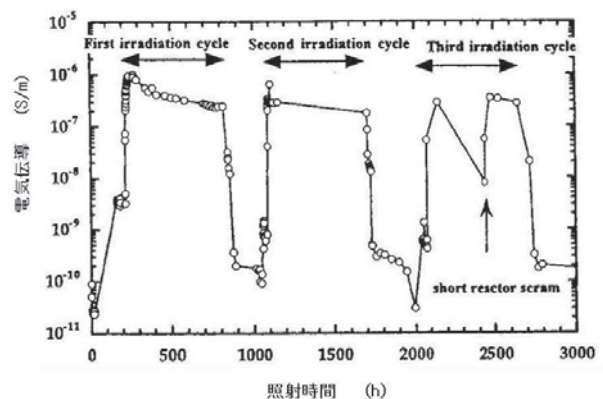


第3図 各照射温度におけるクリープ変形

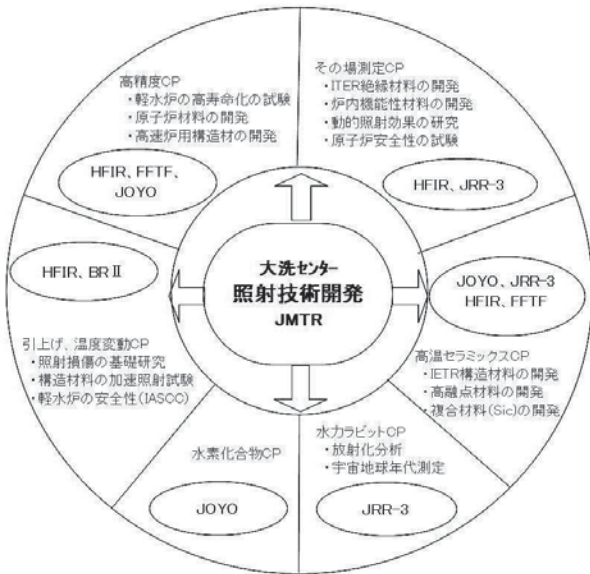
dpa 以下の低照射量における低温での照射欠陥の導入過程や照射硬化等の照射効果の基礎研究で成果を上げた。この成果をもとに照射手法の改善改質が行われ、世界中の各照射炉でも照射手法が逐次改良され現在に至っている重要な転換時期でもあった。

次いで、高速炉を利用した高フルエンス領域 (~60 dpa) での材料特性変化の研究が FFTF/MOTA (Fast Flux Test Facility/Materials Open Test Assembly) を利用して盛んに行われ、照射済試料は日本に搬入され重照射試験研究が幕開けした。その後、HFIR, ATR を利用した動的挙動および複合変動効果の研究が進められ、これらの研究には JMTR で開発された照射技術が大きく貢献した。動的挙動効果のためのその場測定技術は、JMTR キャプセル構造を基本とし、第4図に示すような重照射下でのアルミナの照射挙動に関して重要な知見をもたらした複合変動効果の研究では、JMTR 照射済み温度変動キャプセルのデータと HFIR 温度変動キャプセルを同じ変動温度条件のデータで比較することにより、低・高フルエンスの差異による損傷過程解明という研究目的を達成した。2000年代に入り、HFIR では先進核融合ブランケット材料の照射下特性試験が行われ、JMTR, 常陽で照射した結果の比較検討が進行中である。

一方、JMTR が2006年度より停止したため、代替炉として水冷却で同様出力の BR 2 炉(ベルギー)の利用が始まった。照射は2006年より開始され、無計装キャプセル CALLISTO (CApability for Light water Irradiation in Steady state and Transient Operation) (軽水炉条件型, 290°C), BAMI (BASKET for Material Irradiation) (低温型, <100°C), ROBIN (ROtating Basket with Instrumented) (中性子量調整型, 200~400°C) を利用して、高速中性子による照射試験 (0.5 dpa 以下) を行い、2007年には国内での照射後試験が開始された。また、照射の国際化に伴い、安全性、信頼性の観点より照射期間が長期化することを想定し、BR 2 側と大学側との技術協力を締結して ROBIN, BAMI キャプセルの製作は、日本国内での設計製作完了後に BR 2 へ送付し、照射が行われ



第4図 アルミナの照射誘起電気伝導現象



第5図 大洗センターで利用可能な照射キャプセル

ている。このような国際的な照射場利用に向けたキャプセルと設計製作の標準簡素化，照射期間の短縮は完成された照射技術の集大成でもあると考える。

### Ⅲ. 利用可能な炉内照射試験

現在，大学が利用可能な原子炉でのキャプセルは，試験研究の目的に応じて，JMTRを基軸に常陽，BR 2，HFIR等に分配され，炉の特徴を生かした炉内試験が行われている。各炉での利用可能なキャプセルの名称を第5図に示す。

### Ⅳ. まとめ

原子炉による高精度制御照射研究の進展は，国内外の原子炉関係者，研究者，照射技術者が一体となって照射場に参画し，高度化に向け積極的に進めてきた努力が結実したものといっても過言ではない。今後の照射技術に関する展開の様相は，安全，安心な原子力体制に向けた照射試験，科学的な材料開発研究，原子力科学研究を主体に進むことが予想される。そのためには，温度制御，雰囲気制御，その場測定技術等について，より高レベル

な照射技術の確立がさらに重要である。そのためには照射担当者が照射全体をサポートし，照射技術の提案から照射後試験の終了までを管理する方式が肝要である。本方式を採用して，試験終了時に各部署担当者の出席のもと照射全体を見直し，照射の健全性，安全性，目的達成率等をキャプセルごとに検討，考察しながらフレキシビリティのある照射技術の構築が必要であると考え。なお，本報告にあたりJMTR，常陽，照射技術者の御協力と御支援を頂き，心より感謝いたします。最後に，本稿をもとに原子力材料開発の今後の展開に興味を持ち，新たに挑戦してみようとする読者の一助となれば幸いです。

#### —参考文献—

- 1) 桐谷道雄，科研費補助金(総合A)研究成果報告書，(1992)。
- 2) M. Narui, T. Shikama, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **212-215**, 1645-1648(1994)。
- 3) M. Narui, T. Sagawa, T. Shikama, *J. Nucl. Mater.*, **258-263**, 372(1998)。
- 4) T. Shikama, M. Narui, *et al.*, ASTM, STP-1175, (1993)。
- 5) T. Shikama, T. Kakuta, M. Narui, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **225**, 324-327(1995)。
- 6) 揃 政敏，片岡 一，宮川俊一，原子力学会誌，**40**[2]，124(1998)。
- 7) K. Fukumoto, M. Narui, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **45**[2]，171-178(2008)。

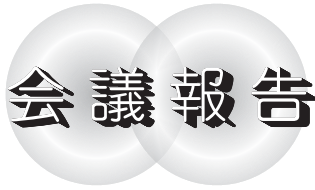
#### 著者紹介



鳴井 實(なるい・みのる)  
東北大学  
(専門分野)原子炉照射技術



四竈樹男(しかま・たつお)  
東北大学  
(専門分野)原子炉材料，照射損傷



## 臨界安全国際会議 ICNC 2011

International Conference on Nuclear Criticality

2011年9月19～22日(エジンバラ市, 英国)

2011年9月19日から22日までの4日間、英国のエジンバラで「臨界安全国際会議 ICNC 2011」が開催された。本会議は1983年から4年ごとに開催され(日本では1987年に東京, 2003年に東海村), 今回は, 21カ国から約270名, 日本からは14名が参加した。冒頭, 英米仏日から基調報告が行われ, 報告者は Key note speech として, 福島第一原子力発電所の状況と臨界安全問題について発表した。会議は9つの技術セッション(TRACK)で構成されている。本稿では, 最終日の総括報告を中心にして, 会議の概要を紹介することにした。

### ○臨界安全基準, 運転経験(TRACK1-2: 発表38, 22件)

国際規格 ISO(臨界事故評価モデル, MOX 最少臨界量, PWR 燃料への燃焼度クレジット適用例), IAEA の基準(輸送規則に関わる核燃料の適用除外条件)等が報告された。臨界解析例としては, 貯蔵容器の解析, 構造材の評価方法, 最終処分における燃焼度クレジット効果等がある。また, 臨界警報基準に関わる最少核分裂総数, 周辺線量等について報告された。

### ○臨界実験, 臨界解析と核データ評価, 不確実性評価 (TRACK3-5: 発表27, 28, 14件)

未臨界, 超臨界実験を含めたデータの再評価と国際協力が進んでいる。OECD/NEA/NSC の下, 活動している国際臨界安全ベンチマーク実験評価プロジェクト(ICSBEP)は, 2010版ハンドブックを発刊し, 553件の評価報告書には, 4,551個の臨界・未臨界データが収納されている。また, 軽水炉の高燃焼度化を目指した動向として, 燃料の高濃縮度化, 新たな可燃性毒物などに関わる臨界実験計画が報告された。米国では, エネルギー省(DOE)がロスアラモスの実験研究施設(LACEF)を中心に, 中速スペクトル体系の臨界実験, パルス炉を用いた線量測定, アクチニド核種の反応度・反応率測定を柱とした実験計画を進めている。報告者は, STACY の更新計画を発表したが, 海水中の塩素, 可溶性中性子吸収体の効果等の実験可能性の質問があった。

実験誤差の要因分析は ICSBEP で詳細に実施されているが, 最近では, ベンチマーク解析の不確実さの評価が注目されており, 計算コード及び核データライブラリーの断面積誤差に起因する不確実さについての報告が多くあった。また, ベンチマーク計算の有効性の指標として, 検証体系と評価体系の間の類似性についての議論が進められ, 本会議でも ORNL の TSUNAMI コードに基づく感度係数を用いた報告があった。なお, フランス

の  $k_{\text{eff}}$  のバイアス・不確実性分析ツール RIB, ICSBEP のデータ検索ツール DICE のワークショップがあり, 詳細な使用方法が説明された。

### ○臨界事故評価(TRACK 6: 発表15件)

これまでは最少臨界量が小さい溶液体系の評価が中心であったが, 異常時も含め固体燃料等にも適用性が高い3次元空間動特性コードの開発が必要である。過渡実験を行う装置である SILENE 及び TRACY のデータについての包括的な報告があった。また, JCO 臨界事故解析, Y12プラント・使用済燃料プール解析等が報告された。事故評価は, 主要な核燃料体系の事故規模と線源評価を迅速にできるシステム整備が重要である。

### ○燃焼度クレジット, 廃棄物管理, 教育等 (TRACK7-9: 発表22, 10, 7件)

高燃焼度燃料に対する臨界管理に関しては, 燃料の組成変化, 核分裂生成物の蓄積による反応度効果を考慮する燃焼度クレジットの導入が, 廃棄物の処理処分を含めチャレンジングなテーマであり, 種々の適用方法が報告された。会議では, 使用済燃料の臨界評価, 未臨界の判断基準(集合体, 貯蔵プール, 輸送キャスク等), 運転履歴に基づく炉心全体の臨界計算手法, 軸方向中性子束分布の影響(端部効果)など, 個別の検討が多く報告された。PWR に比べて照射履歴が複雑な BWR について, 運転履歴(各サイクルでの運転パターン, 制御棒位置, ボイド分布等)に着目した精度評価が重要である。

### ○福島原子力発電所問題

現状炉内の情報が不足しているが, 各国の参加者と個別に以下のような技術的問題を議論した。BWR 炉心の燃焼計算精度の詳細評価, 溶融燃料の組成(含水率, 吸収体)の不確実さを考慮した臨界評価と制限値, 中性子毒物・海水注入等の核的評価, 冷温停止時の再臨界評価と検知方法。フランスからは特定の課題についての研究協力が提案された。なお, 国際協力については, 本会議後, 同地で開催された OECD/NEA/NSC の臨界安全ワーキングパーティ(WPNC)の本会合でも, 今後の中長期対策に対応して臨界計算, コード検証, 臨界管理基準等について, 専門家グループが技術課題を抽出することとなった。臨界安全, 炉物理, 事故評価等, 領域を越えた実効的な研究開発が求められている。

(日本原子力研究開発機構・三好慶典,  
2011年10月31日 記)



## 新刊紹介

### Nuclear Hydrogen Production Handbook

Edited by Xing L. Yan, Ryutaro Hino, 921 p. (2011. 3),  
CRC Press.

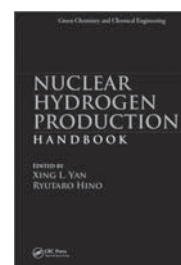
(定価£146.00) ISBN 9781439810835

水素は、燃焼時に水のみを生成し、二酸化炭素等の温室効果ガスをほとんど排出しないという特徴を有している。将来の水素需要としては、主には燃料電池として利用し、家庭用自動車などの運輸部門での使用が期待されているほか、製鉄等での活用が考えられている。しかし、地球上に水素は単体でほとんど存在せず、商用に使用するためには、大規模、高効率かつ経済的な水素製造方法の確立が必要である。このような現状を鑑み、近年、原子炉を用いた水素製造システムが注目され世界各国で研究・開発が進められている。

本書は、水素製造法の基礎、原子力での水素製造システム、水素製造に関わる応用科学・技術、世界の研究開発の現状、将来展望を総合的にまとめたものである。世界各国の原子力水素製造に関する専門家46名が今までの研究成果等を基に精力的に執筆し、集大成としてまとめられたと考える。

第1章では、世界経済における水素の役割及び原子力による水素製造の概要について述べている。第2章では、水素製

造法、具体的には、電気分解法、水蒸気電解法、熱化学分解法(IS法等)、水蒸気改質法、バイオマス法、放射線分解法について、原理、研究開発、工業化等について示している。第3章では、原子力水素製造システムの仕組み、特徴、設計等について、軽水炉(BWR, PWR,



CANDU), 高温ガス炉, ナトリウム冷却高速炉, 高温ガス冷却高速炉, 熔融塩炉, 鉛冷却炉, 核融合炉等の幅広いシステムについてまとめている。第4章では、それぞれの技術の詳細、工業化に向かっての課題等について述べている。具体的には、高温水蒸気電解技術、IS法熱化学技術、原子力石炭ガス化技術、ハイブリッド熱化学技術、水素製造プラントの建設、プロセスの材料、安全性、運転・保守、ライセンス等である。第5章では、世界の研究開発の現状、将来の計画について、アルゼンチン、中国、EU、日本、韓国、米国等対して述べている。また、付録も充実しており、水素製造に関連する物質の基礎的データも豊富に掲載されている。

本書は、原子力を用いた水素製造技術に関係する研究・開発者のみならず、これから、この分野の研究・開発に取り組んでいこうと考えている若手研究者にとっても、バイブル的な書物となると考える。また、工学系大学院の授業における参考資料としても大いに有効であると考えられる。

(東北大学・若林利男)

### 学会誌アンケートシステムのご案内

編集委員会では、多くの読者からのご意見をうかがうため、学会のホームページを利用した Web アンケートを導入しております。学会誌に関する感想や意見をお寄せください。学会誌では Web 上で回答いただいたデータをもとに、記事の方向づけを進めていく方針です。

皆様からのご回答をお待ちしております。

#### <アンケートの回答方法>

- (1)学会誌アンケート専用の Web サイト (<http://atomos.aesj.or.jp/enq/>) を開き、回答する号をクリックしてください。
- (2)当該号の記事が表示されましたら、それぞれの記事の「内容」、「書き方」について6段階で評価をお願いします。回答は、一部の記事に対する評価だけでも構いません。また、記事に対するコメントなどがありましたら「理由・コメント」欄の「回答する」をクリックしていただき、記入をお願いします。回答が終わりましたら「次へ」をクリックしてください。
- (3)次のページでは、学会誌全体に対する評価や意見、今後掲載を希望する記事、編集委員会への要望などを記入できる

画面が表示されます。回答は意見のある項目のみで結構です。記入されましたら「次へ」をクリックしてください。

- (4)一番最後のページでは、あなたご自身についておうかがいする画面が表示されます。ここでいただいた情報は、アンケート結果を全体で集計する際にのみ、限定して使わせていただくものです。
- (5)「送信」をクリックすると、終了です。

なお、(2)、(3)のページでは、途中まで入力した回答の内容を保存することができます。詳しくはページ下部にある説明をご覧ください。

## ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

### 「原発を支えた双葉の人々」

北海道新聞 桑折しのぶ

昨年3月19日から、福島県双葉町の人々取材している。町には東京電力福島第1原発5、6号機が立地する。町人口の2割の約1,500人が同日、町役場機能とともに、さいたまスーパーアリーナに避難してきた。

ある男性(当時54)は原発で働き、東日本大震災発生から1週間後の3月18日まで双葉町内にいた。避難指示が出た後も、町には、大事な文房具を取りに来た子どもや「動きたくない」高齢者がいて、12人を車で南相馬市に送り届けたという。

男性は事故対応で「呼び出しがあれば、また(双葉へ)行く」と言った。怖くないか聞くと、「迷惑かけたから、それで飯食ってきたから当たり前」と、たばこの煙を吐いた。

息子が東電の下請け会社に勤める女性(当時64)にも会った。埼玉へ着いたとたん、息子が呼び戻された。「心配だけでも、息子が(双葉へ)行って仕事してくれるなら、何も言うことない」。目が潤んでいた。

双葉の人々の言葉からは、原発のマチの住民として、原子力発電が、国内の総発電量の30%をまかなってきたという自負を感じた。

原発は町に雇用をもたらし、歳入の3割強を電源3法交付金などが占め、町民の多くが恩恵を受けた。人がなくなった町内には、「原子力 明るい未来のエネルギー」と書かれた看板が掲げられている。

しかし今、町は丸ごと立ち入り禁止の警戒区域だ(2011年12月18日現在)。町民は昨年3月末、町役場に徙い、アリーナから埼玉県加須市の旧高校の建物に移った。約640人(同月現在)が、教室に畳を敷いた部屋で、避難所暮らしを続けている。

自宅には戻れない。家財道具もない。農漁業や自営業、地元企業に勤める人など大多数は仕事を失った。友人も散り散りになり、人間関係も失った。

今後「人生の拠点をどこに置くか」を考えるが、そのための情報と資金が足りない。

双葉町民が、さいたまスーパーアリーナに避難する前日の昨年3月18日、日本原子力学会は「国民の皆様へ 東北地方太平洋沖地震における原子力災害について」と題する会長声明を出した。

声明は、地震と津波の規模が想定を超えていたとし、専門家として助言、情報発信などの役割を果たす決意を示した。その上で、こう結んだ。「原子力が人類のエネルギー問題解決に不可欠の技術であることに思いをいたし、(中略)社会の発展に寄与するよう新たな決意で取り組んで参ります」

原子力の専門家に、いま一度、思いを巡らせてほしい。原子力が「エネルギー問題解決に不可欠の技術」である前提には、原発の存在と、原発や関連企業で働く作業員、原発が建つ町で暮らす人々の存在があることに。

原発のマチに生きる人々は、原子炉工学や放射線、核燃料に詳しい人ばかりではない。しかし原子力発電は、その人々の営みと、自負に支えられてきた。福島第1原発事故は、双葉町で、町民7千人分の営みを大きく狂わせた。

震災発生と避難から日がたつにつれ、双葉の人々は、悩み、怒ることに疲れてしまったと感じる。

ある男性は避難所の廃校跡を「ウチ」と呼び、思わずそう呼んだ自分を笑った。三陸の復興のニュースを見て「ずるい」と言った少女もいた。双葉の人々がどう生活を立て直すか。千年に一度と言われた災害の年が暮れようとしている今、その道筋は見えていない。

「福島の再生なくして、日本の再生なし」。野田佳彦首相は、震災復興に向け、そう言った。記者は、双葉の人々の救済なくして、原子力に明日はあり得ないと思う。

原子力を土台や周縁で支える人間の営みに想像力を巡らせず、一人歩きする技術は、「社会の発展に寄与」することは決してない。むしろ、新たな事故を生む危険性をはらむ。そう訴えるため、双葉の声を拾い続けるつもりだ。

(2011年12月18日 記)



桑折しのぶ(こおり・しのぶ)

北海道新聞東京報道センター記者  
2003年入社。札幌圏部、苫小牧報道部を経て現職。文部科学省と震災遊軍を担当。