

### 巻頭言

#### 1 ドイツ電力自由化

「核電気」100%のメニューあります!

川口マーン恵美

### From Abroad

#### 24 Scientific Wanderlust Across The Ocean 海の向こうの研究放浪記(2)

ーオーストリア編

「内向き志向な日本の若者」であった私がIAEA職員としてウィーンで働きはじめて、9年がたった。

大塚直彦

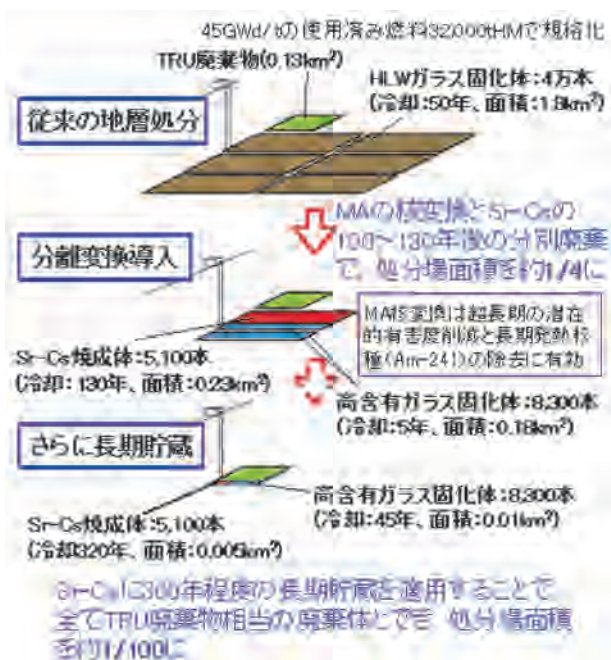
### 解説シリーズ

#### 長寿命核種の分離変換技術の現状

#### 49 第1回 分離変換の意義と分離変換システム

長寿命核種の分離変換技術の現状を4回に分けて紹介する。今回は分離変換の意義と、分離変換を効果的・効率的に行うために研究開発が進められている分離変換のシステムについて解説する。

「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会



### 時論

#### 2 ドイツのエネルギー転換 その現状と文化的背景

三好範英

#### 4 危機に立つ日本の科学技術

永田好生

### 特集

#### 1 F 事故による環境回復に伴う廃棄物の管理 と除去土壌の減容・再生利用の取り組み

#### 12 30年後の絵姿を描くための技術開発を ー除去土壌は2千分の1まで減容化濃縮

大迫 政浩

#### 13 環境中における事故由来の放射性物質 汚染廃棄物の総合的な管理

1 F 事故で発生した汚染廃棄物は、特措法で管理される。管理や埋立処分における留意事項について述べる。

遠藤 和人

#### 15 再生利用を目指した粘土鉱物へのCs 吸脱着機構解明

除染で生じた除去土壌をどうするのか。処理の前提となるセシウムの粘土鉱物への吸着機構についての最新知見を紹介する。

矢板 毅

#### 17 中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用 技術開発戦略の概要

除染で発生した除去土壌は中間貯蔵開始後、30年以内に県外で最終処分する。その道筋を紹介する。

金子 悟 ほか

#### 19 除去土壌の再生利用の安全評価

除去土壌を土木構造物へ限定的に再利用した場合の追加被ばく線量評価を行った。

澤口拓磨 ほか

#### 21 低レベル放射性廃棄物の処分費用の 積算

除去土壌のうち再利用できない土壌は最終処分される。そのための施設はどのようなものになるのか。

仲田久和 ほか

## 29 IoT を巡る国内外の動向 —スマートマニュファクチャリング へ向けたドイツ、アメリカ、日本の 活動

IoT が次世代の産業・社会・経済のインフラとして急速に進展しつつある。これをビジネス環境の変化として捉え、ものづくりの現場で新たな付加価値をどう創出していくか。 澤田浩之

## 34 アブダクションによるデータ解析 —計算予測結果を読み解く力

シミュレーションを設計過程において活用するためには、それが紡ぎ出す膨大なデータの読解力が必要である。 中島憲宏

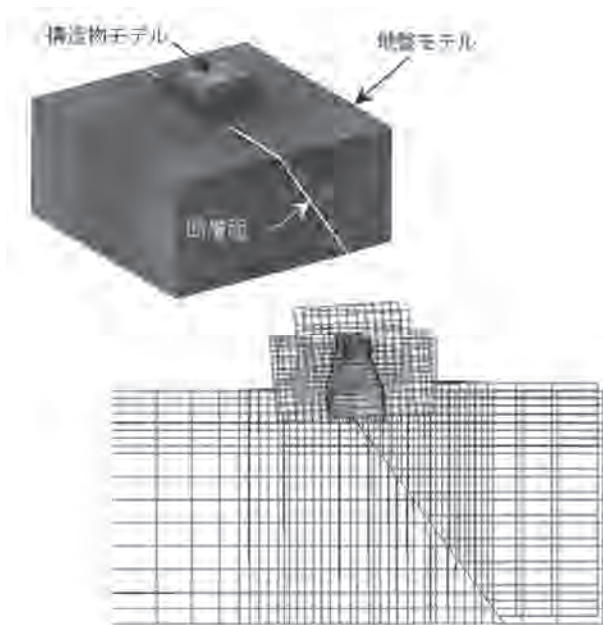
### 解説シリーズ 断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策

## 39 (その3) 断層変位のハザード評価

「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会がとりまとめた報告書「断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策」のシリーズ解説として断層変位のハザード評価について紹介する。 鈴木義和 ほか

## 44 (その4) 建物・構築物及び土木構造物に対する影響評価

断層変位の原子力施設に対する影響評価のうち、建物・構築物及び土木構造物に対する影響評価について紹介する。 辻 弘一 ほか



上は構築物—地盤全体モデルの例、  
下は断層変位を受ける構築物の変位量のイメージ

## 6 NEWS

- 京大、実験装置の利用運転を再開
- エネ白書、1F 廃炉は「着実に進捗」
- 「もんじゅ」廃止措置基本方針を決定
- 海外ニュース

### 解説シリーズ 「世界の原子力事情」(2)

## 54 原子力の開発利用をめぐる米国の動向

米国は福島原子力発電所事故後に国内の原子力発電所の安全対策を強化し、原子力を主要な基幹エネルギーとして維持していく方針を堅持している。

内藤明礼

### 連載講座 福島 の環境回復に向けた取り組み (第4回)

## 57 汚染土壌の除染、減容化および再生利用を目指した物理処理及び新しい熱処理法開発への試み

1F 事故後に発生した汚染土壌をどうするか。減容化除染と再生利用をめざして原子力機構と国立環境研究所が取り組んできた吸着機構の解明と物理的除染および減容と熱処理に関する研究を紹介する。

矢板 毅, 伊藤 健一, 万福 裕造 ほか

### 理事会だより

## 62 新たな Web リニューアルに向けて

高橋 信

- 63 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 共催行事, 新入会一覧, 平成 29 年度役員紹介, 第 50 回学会賞受賞候補者推薦募集, 「2017 年秋の大会」見学会案内, 英文論文誌 (Vol.54, No.8) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「目安箱」(<https://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>)にお寄せください。

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

## ドイツ電力自由化「“核電気”100%のメニューあります！」



作家

川口マーン恵美 (かわぐち・まーん・えみ)

ドイツ、シュトゥットガルト在住。著書に『住んでみたドイツ8勝2敗で日本の勝ち』（講談社+α新書）、『ドイツの脱原発がよくわかる本』（草思社）、『世界一豊かなスイスとそっくりな国ニッポン』（講談社+α新書）など多数。

ドイツでは1998年より電力が自由化された。その目的は、電力市場に競争の原理を取り込み、電気料金を下げることだ。以来、インターネットには価格比較サイトが山ほどでき、住所とおよその使用電力量を入力すると、何十もの販売会社の、何百ものメニューが出てくる。そこから価格で選ぶ人もいれば、電源ミックスによって選ぶ人もいる。「100%再エネ電気」も結構な人気で、これを選べば、自分は社会的意識が高く、環境保護に役立っているような気分になれる。一方、メニューの多さに怖気付き、何も選ばず、従来通りの電力会社の標準仕様の電気を使い続ける私のような人もいる。

ドイツのボンにenergy という会社がある。スイスの電力販売会社 Gaiem GD の子会社で、2015年より電気とガスを販売している。この会社の特徴は、変な名前のメニューを売っていること。たとえば「森への愛」と「ウィンド・フリー」は、いずれも水力100%の電気。「ウーマンパワー」は同じ水力でも、女性がCEOを務める会社の作る電気だとか。

energy社は風力電気を勧めない。その理由は、いくら増えても電気の安定供給に貢献できない。景観や森の生態系を壊す。そして、毎年1万羽のトビが風車に突っ込んで命を落とすetc。

また太陽光もNG。本来は食物生産のための土地をパネルが占領しているのはおかしいし、パネル製造時に出る有害物質は、CO<sub>2</sub>よりずっと温暖化を早めるからとか。そういえば、将来、膨大な数の、有害物質を含む使用済みパネルの廃棄がどうなるのかについても、まだ誰も何も考えていない。

そんなわけでenergy社は主に水力電気を販売しているが、実はだからといって、水力が理想だと考えているわけでもないらしい。厳密に言えば、ダムも自然を壊し、魚を殺す。

では、何を勧めているかという、再エネの中では地熱。メニューにある「地熱のヴィーガン」は100%地熱からの電気だ。

ヴィーガンというのはヴェジタリアンのグレードアップしたもので、肉や魚だけでなく、卵もチーズも牛乳もカツオ出汁も、動物由来のものはすべて拒否する。つまり、ヴィーガンのように過激に自然を守りたい人は、風や太陽や水ではなく、地熱の電気を選びなさいというわけだ。

energy社には、もう一つお勧めのメニューがある。ズバリ、原発電気100%の「核電気」。同社のホームページによれば、原子力発電は1kWhにつき3mgの核廃棄物を出すだけで、自然に与える悪影響は何もないとか。

この「核電気」はロゴが面白い。ドイツの反原発派はすでに40年来、「原発？ノー・サンキュー」と書かれたバッジを使っているが、「核電気」のロゴはこれに引っ掛けて、「原発？イエス・プリーズ」。もちろん、「核電気」メニューは料金が一番安い。

ただ、どの販売会社のどのメニューを選ぼうが、コンセントから出てくる電気自体はもちろん変わらない。原発と銘打った電気を売るためには、売ったと同量の原発電気をドイツの系統に入れる義務があるだけだ。水力も同様。

そこで、親会社であるGaiem GDが活躍し、energy社が販売する量に応じて、スイスの原発や水力の電気をドイツに入れる。EUでは送電線が血管のようにつながっているの、電気はどこからでも持ってこられる。また場合によっては、ドイツの原子力発電会社やスウェーデンの水力発電会社と売買契約を結んでおき、消費量に従って顧客から集めた電気代を支払うようにすれば良い。

電力の自由化を20年前にやったドイツでは、電気代は下がらず、平均的な家庭が負担している再エネ賦課金は、すでに月々21ユーロ(約2,700円)に達している。その横で、増え続ける再エネの尻拭いばかりやらされている電力会社は、配当金もろくに出せないほど落ちぶれてしまった。

それでもドイツ政府はあと5年で原発をすべて止め、世界に範を垂れる気である。ただ、後に続く国はない。素直に従っているのは、どうやら日本の野党だけのように思われる。

(2017年5月9日記)



## ドイツのエネルギー転換 その現状と文化的背景



三好 範英 (みよし・のりひで)

読売新聞 編集委員

東京大学教養学部教養学科関連社会科学分科卒業、読売新聞社入社。前橋支局などを経て、バンコク、プノンペン、ベルリン特派員を務める。著書に、『蘇る「国家」と「歴史」』（芙蓉書房出版）、『ドイツリスク』（光文社）。

私は今からほぼ4年前の2013年3月まで、計3回9年5か月間、ドイツ・ベルリンの新聞社特派員を務めた。勤務期間にドイツのエネルギー政策は大きく動き、日本でもドイツの脱原発政策を中心に関心は高かった。自ずと取材、報道する機会も増え、帰国後、そうした取材結果をまとめた「ドイツリスク『夢見る政治』が引き起こす混乱」(光文社、2015年9月刊)を上梓し、ドイツのエネルギー問題の現状を報告した。

周知のように、ドイツは2011年3月11日の福島第一原発事故を受けて原発全廃を決め、2015年1基、17年1基、19年1基、21年3基、22年3基をそれぞれ廃棄するスケジュールを法制化した。それとともに、地球温暖化対策などから再生可能エネルギー(以下再エネ)の導入計画も定め、総発電量に再エネが占める割合を25年40~45%、35年55~60%、50年に少なくとも80%にする計画を策定した。この野心的なエネルギー政策は「エネルギー転換」(以下「転換」と呼ばれている。

特派員当時の私の取材で、この「転換」はすでに多くの困難に直面していた。その結果を本にまとめ、2年近くが経過したが、今回、調べ直してみると、問題の大きな構図は変わっていない。

確かに再エネ導入は進んでいる。2016年には、総電力使用量の31.7%を占めるまでになった。しかし、というよりも、だからこそ、というべきだろうが、以下のような問題がむしろ深刻化している。

第1は家庭用の電気料金値上げに歯止めがかからないことである。当初から固定価格買い取り制度(FIT)を再エネ普及の制度的基礎とすれば、電気料金が高騰することが予想された。実際、消費者に転化される賦課金の高騰により、電気料金は2000年から14年まで2倍以上値上がりした。

このためドイツ政府は、特に非効率で賦課金高騰の主原因だった太陽光発電の買い取り価格を下げるなどの措置を取った。さらに、2014年には再エネ法を改正して、

再エネの全量買い取りを修正し、電力市場への売却を義務づけるダイレクト・マーケティング導入などの改革を実施した。これが功を奏し、2015年の電気料金は前年比でやや下がった。しかし、16年は微増となり、予測ではなお2020年~25年頃まで電気料金は上昇すると見られている。

第2に電気の安定供給が危うくなっている。ドイツ連邦ネット庁報告書(2016年4月)によれば、北部の洋上風力発電所が送電可能となること、2017年末までに南部バイエルン州にあるグントレミンゲン原発が廃止されること、ドイツ北部と南部を結ぶ高圧送電線の建設がはかどらないことで、北部で電気が余り南部で不足する状況が発生する頻度は一層高まる。南部で電気が不足した際に急遽、電気を供給するための石炭、ガスによる予備発電所(ドイツ、イタリア、オーストリア)の必要性はさらに増す。

需給のバランスが崩れそうになった時に、送電線網を運営する系統業者は、発電業者に発電量を増大ないし縮小するよう「給電指令」することを認められている。ただ、こうした指令を受け、発電業者などが必要とした費用に関しては補償しなければならない。最終的には消費者の電気料金に転嫁される。

再エネの大量導入にともない指令の頻度は増加しており、対象となった電力量は2015年16,000GWhで前年の3倍、かかった費用は2015年4億1,200万ユーロと前年比で倍増した。

第3に温室効果ガス(CO<sub>2</sub>)排出が一向に減らない。温室効果ガス排出量は再エネの増加にもかかわらず、15年が前年比0.7%増、16年が同0.9%増である。このままでは、2020年までに1990年比で40%の削減目標の達成は相当難しい。

経済の好況などの事情もあるが、石炭、褐炭発電が依然として総発電量の40%を占め、比重が減らないことも背景となっている。電力市場で再エネの多量の電気が流

れ込むため市場価格が下落し、発電業者はコストの安い褐炭発電を減らせない。

コンサルタント会社マッキンゼーの2016年の報告書では、「気候温暖化防止、経済性、供給の安定性確保という目的を、現状では平行して実現することはできない」と結論づけている。今後、原発廃棄が進む中で、これらの目的の実現が一層困難になることが予想される。

さて、日本人の中には、仮に「転換」の現状に大きな問題があったとしても、堅実な実務能力など肯定的イメージを根拠に、ドイツ人のことだから困難を克服して予定通り目標を達成するだろう、と考える人も多いのではない。

私はその見方にかなり懐疑的である。というのは、まず計画に関して、どこまで実現可能性を詰めて策定したのか、疑問に思わせる先例があるからである。

例えば、ドイツ政府の電気自動車普及計画は、2020年までに100万台の電気自動車普及をうたう。しかし、2017年までに50万台の目標のところ、2016年末までに3万4,000台が走っているに過ぎない。

計画開始から1年の2011年5月、首相府で開かれた記者会見で配布された中間報告書は、イラスト、グラフも多用した、補遺を含め100ページを超える冊子だった。6年後の今、目標と実際の余りのギャップに、この報告書の詳細な未来像には何の根拠があったのだろう、と考えてしまう。私はこうしたドイツ政府の文書を見ると、ヘーゲル哲学の壮大な観念の体系を連想してしまうが、ある日本の外交官は、ドイツは良くも悪くも政治主導で国民の受けを狙うため、日本のように官僚が下から積み上げて策定する計画ではないからでは、と言っていた。確かにそういう側面もあるだろう。

また、今のドイツ人は大規模公共事業に関して非常に消極的であり、問題を抱えた事業も多い。ドイツのリニアモーターカー「トランスラピート」は現在中国の上海を走るのみで、ドイツ国内では建設できなかった。2022年冬季オリンピックへの立候補をミュンヘン市などが、24年夏季オリンピックはハンブルク市が検討していたが、両方とも住民投票で否決された。ベルリンの新空港は2012年に一旦、開港が決定され、開港セレモニーも準備された。しかし、消火設備の不備を理由に突如延期され、その後、すでに5年が経つが新たな開港日程が決まらない。「転換」実現に不可欠なドイツ南北を結ぶ高圧送電線建設も例外ではなく、各地で反対運動に直面し一向にはかどらない。

それでは、なぜドイツは、成算があるのかどうかはつきりしない「転換」に走り出したのか。

まず、強調したいのは、「転換」は経済合理性に基づく決断ではなく、理念的な、言葉を換えればイデオロギー的な動機に基づく決断ではないか、と見られることである。つまり、「転換」をエネルギー問題としてだけ捉え、単にコストや、原発のリスクだけから、論理的にその理由を導くことはできない。むしろ、歴史的に蓄積されたドイツ人の考え方、振る舞い方のクセに関する考察こそが、「転換」の理由を理解するカギだと思う。

その際、チェルノブイリ事故(1986年)の経験が指摘されるが、私がドイツでリスク論などの専門家に話を聞いた範囲では、同事故の経験が脱原発決定の直接の理由であるとする人はいなかった。この事故以前から西ドイツは世界で最も反原発運動が盛んな国だったし、同事故ではヨーロッパの広範囲が汚染されたが、最も激しい反応を見せた国は西ドイツだった。つまり、なぜ事故の前からドイツでは反原発感情と、それを下敷きにした反原発運動が活発なのか、を問わねばならない。

無関係と思われるだろうが、ナチズム、とりわけホロコースト(ユダヤ人殺戮)の歴史的経験が強く影響しているのではないか。この歴史の負の遺産から、ドイツ人、とりわけ知識人は、道徳的であらねばならない、道徳的な姿をとりわけ外国に向けて見せねばならない、という意識が強い。物事の認識においても道徳的判断が過度に絡まってくる傾向がある。エネルギー問題に関しては、原子力エネルギーを、その危険性などから道徳的な悪と捉え、再エネを地球環境に良いという意味で道徳的に正しいもの、と極端に2分化して考える傾向につながっているように感じられる。

さらに遡れば、ナチ時代以前からの、理念を先行させがちな国民性も考えねばならない。すでにドイツ観念論に言及したが、ドイツ人の国民性は、この数世紀の間、ロマン主義や、とりわけ森に対する愛着を中心とした自然観などによって特徴付けられてきた。

私はこうしたドイツ人の特性を、現実的、計画的という日本人がドイツ人に対して懐きがちなイメージを裏切る形で、「夢見る人」と先述した拙著の中で表現した。少し時間軸を長くにとって、こうしたドイツ人の国民性を知ることなくしては、今回の「転換」の理由を深く理解することはできないだろう。

(2017年5月10日記)



## 危機に立つ日本の科学技術



永田 好生 (ながた・よしお)

日本経済新聞社 編集委員  
 広島大学総合科学部卒、日本経済新聞社入社。大阪経済部、科学技術部、産業部、日経産業消費研究所、豊橋支局などを経て2007年より現職。科学技術分野の取材が長く、「論点解説 日経 TEST」「科学なぜ謎ミステリー」などの共著がある。

### I. 「ネイチャー」誌の特集

英科学誌「ネイチャー」は日本の科学を特集した3月23日付の別冊で、「日本の科学研究はここ10年で大きく失速している」と指摘した。近年になって自然科学分野のノーベル賞受賞者が相次いで登場し、高い競争力を維持している企業も多い。そんな日本になぜこんな指摘が出るのか、いぶかしむ声はあるが、科学技術に関係している人たちの間では、至極当たり前の話として受け止められた。日本の科学技術の実情はどうなっているのだろうか。失速ととらえられた理由は何だろうか。

### II. 論文の質・量とも地位低下

ネイチャー誌は主に科学研究費と論文発表件数の推移を分析し、日本の科学力はかつての輝きを失いつつあると判断した。中国をはじめ多くの国々がイノベーションの創出を目指して研究開発予算を増やしているなかで、日本政府の科学研究費は2001年から2017年まではほぼ横ばいで推移。国立大学への交付金の削減で教官1人当たりには分配される研究費は減り、個人の好奇心に基づく研究ができなくなった。任期のないポストを設けられず、若手が腰を落ち着けて研究できる環境が失われている。

影響は論文発表数に表れた。データベースに収録された主要な論文を国別に分けて調べると、世界は2005年から2015年の10年間で80%増加しているのに対し、日本は14%増にとどまり世界に占めるシェアが低下した。引用回数が多い「ハイインパクト論文」に限ると、日本は米国とともに発表数が減少した。中国が急増し、英国やフランス、ドイツの欧州勢もわずかだが増やしている。日本が伝統的に強いといわれる工学や材料の分野でも10%以上減り、凋落ぶりが顕著だ。国際共著論文や新分野を切り拓く挑戦的な論文の数が少ない点が、日本の課題といわれる。

日本が躍進した1980年代、ネイチャーやサイエンスといった科学誌は、欧米先進国に追い付け追い越せと切磋琢磨する日本の科学技術を報告した。才能ある若いリーダーを起用し長期的な視点でプロジェクトを任せる

「創造科学技術推進事業(ERATO)」のようなユニークな事業を紹介した。一方で、自ら基礎研究を行わず応用研究や改良研究で市場を席卷する「基礎研究ただ乗り論」を振りかざし、警戒する議論も起きた。批判を免れようと日本政府は「ヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラム」など国際貢献事業を始めた。応分の負担に応じる姿勢を示し先進国に仲間入りする転換期だった。四半世紀を経て取り上げた日本に対する論調は一転し、世界の中で埋没しかけている姿だった。

### III. 慢性疾患のような状態に

2016年のノーベル生理学・医学賞は大隅良典・東京工業大学名誉教授が受賞し、2000年以降の日本の受賞者は米国籍を取得した2人を含め17人に達する。先端的な研究成果を事業化する大学発のベンチャー企業も活躍し始めた。特殊ペプチドで創薬を支援するペプチドリームは東京大学から、外骨格型ロボット「HAL」を販売するサイバーダインは筑波大学から、クモの糸を高強度繊維として工業化したスパイバーは慶応義塾大学から誕生し、優位な事業展開が期待されている。ある意味、衝撃的な今回のネイチャー誌の特集に対し、「失速」というほど日本の科学技術は弱体化していないという反論もある。

日本ほどの人口と経済規模があると、科学技術の変調はすぐに表面化しない。だが、科学技術の研究現場や政策に近い人ほど、今回の特集は「すでに分かっていたこと」と感想を話す。国立大学の独立法人化以降、活動に自由度は増したが、大学改革や評価のための事務作業など研究や教育以外に関わる労力が増えた。政府の研究事業では5年以内に社会に還元できる成果を求める、短期出口志向が強まり、基礎的あるいは純正な研究に挑みにくくなった。国内研究環境の劣化と世界の追い上げを肌で感じていたからだ。

じわじわと体をむしばむ慢性疾患のように病状は進行し、気付いたときは手遅れの事態になっている可能性が高い。国難とも呼べる危機的な状況に近いのではないかと感じる理由はいくつかある。

#### IV. 危機脱出への道は

これから日本が世界で競いあう産業は、科学技術に立脚した知識集約型になっていくだろう。日本は著しくこの分野に弱い。具体的にはかつて「サイエンス・ベース産業」と呼ばれもした、半導体産業や製薬業界が相当する。半導体では、最小線幅 10nm に迫りつつあるシリコンの加工にナノテクノロジーが総動員される。創業についてはゲノムやたんぱく質の構造解析などに対する理解が不可欠だ。対象をモデル化し、スーパーコンピュータでシミュレーションする計算科学も信頼できる水準に高まってきた。こうした分野で世界トップに太刀打ちできる日本のプレーヤーは少なく、産学連携の世界的な拠点もない。

木村英紀・東京大学名誉教授は著書「ものづくり敗戦」の中で、日本のものづくりの弱点として、①理論②システム③ソフトウェア——の3点を挙げた。情報通信技術が様々な産業の基盤になるにつれて、この弱点は一段と厳しさを増す。あらゆるものがつながる IoT やビッグデータ、人工知能の開発と応用が避けて通れない現在、日本が2番手、3番手に甘んじざるを得ない状況は何としても克服しなければいけない課題だ。

日本の丁寧なものづくりは世界で高く評価されている。職人芸にも例えられ、暗黙知によって守り続けられるだろう。そういう製品・サービス分野はなくなるとは思わないが、極めて限定的な市場にしかならない。ハイエンドでももう少し大きな市場をきちんと押さえたいける競争力を付けていくためにも、理論・システム・ソフトウェアに強くなる必要がある。

日本の研究や政策は、知識集約型で先陣を切って進む体制になっていない。喜連川優・国立情報学研究所所長は「日本の研究はリアクティブだ」と指摘している。先進国に仲間入りするため自助努力を重ねたことは間違いないが、科学技術的に困難な壁を乗り越える際、他の先進国にあった成功モデルをキャッチアップすることができた。フロントランナーになると、先行モデルはない。多くの失敗を繰り返すし、新たな発想を生み出して挑戦を続けなければいけない。政策立案や研究計画の策定、計画の評価、研究者の人选、資金投入の仕方、体制の組み方などなど、日本はいまだキャッチアップ型のままではないだろうか。

米国防高等研究計画局(DARPA)の運営方式を模した内閣府の「革新的研究開発推進プログラム」(ImPACT)は、フロントランナー型の政策に移り変わろうとする試みだが、まだ既存の産学官連携と大きな違いはなく、規

模も小さい。新しい政策をいかに発展させていくのか、行政から全分野の研究者、産業界も交えてもっと知恵を絞る必要がある。

#### V. 洗練された大学運営を

大学には課題が山積している。全ての大学が平等に総合化する政策とは決別し、機能と役割分担を決めて経営する段階に入ったが、まだ緒に着いたばかりだ。この流れを本格的にしなければいけない。

研究大学として世界で認められる存在になるには、日本の大学経営は余りにも未熟だ。例えば学部・学科の縦割り組織の硬直化は深刻で、新しい研究に挑むダイナミズムを生み出せない。海外企業と産学連携を組もうとしても専任の事務スタッフがおらず対応できない。研究成果がなくても安定な教官ポストに就いたままで、評価と人事システムが一体化していない。戦後に確立した大学制度が機能不全を起しているにもかかわらず、経営刷新ができないのは致命的だろう。

一方で、学術の多様性を失ってはいけない。画一的な物差しによる、安易な選択と集中政策は、大学としての深みをそぎ、研究活力を損ない、組織としての魅力がなくなってしまう。綿密な経営が求められる。

そのためにはしっかりした財政基盤が大前提となる。国立大学への交付金削減はようやく歯止めがかかりそうだが、いつまで国の支援に頼り続けられるだろうか。米国の著名私立大学ほどの基金をもつことは無理としても、もう少し厚くしないと行けない。

経済界の支援がもっとあれば、状況が改善する大学も出てくるだろう。しかし、企業が大学に対し多額の資金を提供すれば、投資に対する見返りが必要になる。判断を誤れば企業統治上の問題を問われるし、税制面の利点もなく、この作用は働きにくい。また日本企業は国内の大学をあまり信頼しておらず、前向きに投資する経営者はいないかもしれない。日本企業の経営自体も最近では極めて保守的で、イノベーション創出を唱えながらそれにふさわしい投資をする経営者は限られている。

私たちが新聞紙面で科学技術政策を取り上げる。2016年12月から2017年1月に5回にわたり「危機に立つ日本の科学技術」と題した読み物を掲載した。関係者の間では賛同を得たが、広く読者の共感を得たとはいえなかった。日本人がノーベル賞を受賞した時に関心が高まるだけでなく、将来の日本、さらには人類のために科学技術の重要性を認める社会になるよう願っている。

(2017年6月10日記)



## 京大、実験装置の利用運転を再開

京都大学は6月21日、大阪府熊取町にある臨界集合体実験装置 KUCA(出力 100W)の運転を再開した。同装置は新しい規制基準に対応するために2014年3月に運転を停止。その後、無停電電源の設置や火災・竜巻対策などの改造工事を行った上で2014年9月に、規制委に原子炉設置変更承認申請書を提出。規制委は今年6月20日に合格証を交付した。

KUCAは国内で大学が所有する唯一の臨界実験装置。これまで4千人を超える学生が、実験装置を使った基礎実験や燃料の取り扱い、原子炉運転操作を学んできた。

なお、同大の研究用原子炉 KUR(同 5,000W)は現在、規制委による検査中で、8月上旬にも運転を再開する見込み。

(原子力学会誌編集委員会)

## エネルギー白書、福島第一廃炉「着実に進捗」と評価

経済産業省資源エネルギー庁は6月2日、2016年度のエネルギー白書を公表した。白書ではエネルギーを巡る最近の状況と主な対策について、「福島復興の進捗」、「エネルギー政策の新たな展開」、「国内外のエネルギー制度改革とエネルギー産業の動向」の3本柱で取りまとめ紹介している。白書は同日閣議決定された。

「福島復興の進捗」では東日本大震災と福島第一原子力発電所事故を「日本のエネルギー政策全体の転換点」と位置付け、3.11後に顕在化したわが国の資源・エネルギーを巡る諸課題を記述。福島第一原子力発電所廃炉の取組については、「対策に一部の遅れはあるものの、全体としては着実に進捗してきている」と、中長期ロードマップに基づく進展に一定の評価を示した。

「エネルギー政策の新たな展開」では、わが国のエネルギー安定供給確保に向けた資源開発動向、経済成長と環境保全を両立させる省エネ・再エネ政策の現状を説明。電力システム改革の動きについては、総合資源エネルギー調査会下に設けられた小委員会・ワーキンググループでの課題整理・制度設計に関する議論を紹介した。原子力政策に関しては電力自由化が進み、経済効率性の追求を目指した競争環境が進展した状況下においても「安

全規制に受け身で対応するのではなく、自らの意思で常により安全を高めていく」必要性を訴えている。さらに同調査会の自主的安全性向上・技術・人材ワーキンググループの議論に触れながら、規制機関や事業者、メーカー、関係省庁などすべての原子力関係者が、それぞれの立場で安全性向上を追求しながら、相互に指摘し合い、さらなる高みを目指す「継続的な原子力安全性向上のための自律的システム」を構築する必要があると述べている。

一方、市場自由化が先行する欧州のエネルギー企業については、国内市場での競争激化とリスクが高まる中で、日本企業が海外市場への積極的展開を図っている状況が、国外売上高比率などのデータを通じて示された。コラムでは米国ベンチャー企業のニュースケール社における小型原子炉 SMR の開発について言及。1基ごとの出力を5万kWと小さくし、冷却が容易となり安全性が高まるとともに、工場で製造したユニットを現場で組み立てることで、工期短縮やコスト削減にもつながっていることを紹介している。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

## 政府、「もんじゅ」廃止措置基本方針を決定

原子力研究開発機構「もんじゅ」廃止措置に向けた関係府省による推進チームは6月13日、(1)政府一体の指導・監督、(2)国内外の専門家による第三者評価、(3)廃炉実証のための実施部門創設——を柱とした廃止措置が安全かつ着実に進められるための基本方針を決定した。

2016年12月に、「もんじゅ」を運転再開せず廃止措置

に移行するとした政府方針が示されており、これを踏まえた基本方針では、国内外の英知を結集した人材の確保、適切な予算措置とともに、使用済み燃料やナトリウム、放射性廃棄物の搬出および処理処分について、政府一体で責任を持って取り組むとしている。使用済み燃料は炉心からの取り出し作業が完了するまでの概ね5年半



以内に、その方法および期限などの計画を決定した上、再処理をするために速やかに搬出する。また、ナトリウムについても安全措置を確実に実施した上で、再利用や売却も含め、同じく県外への搬出を速やかに実施するなどとしている。

これをうけて原子力機構は「もんじゅ」廃止措置の基本的計画を策定し、推進チームにより了承された。基本的計画では「立地地域並びに国民の理解を得つつ、安全を最優先に廃止措置を進める」ことを掲げ、原子炉等規制

法に基づく廃止措置計画の認可から、概ね 30 年で廃止措置作業を完了することを目指すとしている。また、国内初のナトリウム冷却型高速炉の廃止措置となることから、知見やデータの収集・蓄積に努めるほか、地元経済に大きな影響を与えないよう人員(約 1,000 名)を当面維持するとともに、地元企業参入や雇用拡大に向け、技術交流を通じた双方向活動や福井県の「エネルギー研究開発拠点化計画」への積極的参画など、地域振興に貢献していくことも明記された。

## 海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

### 【スイス】

## 国民投票で段階的な脱原子力を決定

スイス連邦政府は 5 月 21 日、改正エネルギー法に相当する「2050 年までのエネルギー戦略」に関する国民投票を実施し、過半数の 58.2% が賛成票を投じたと発表した。同戦略を反映した改正法案は、原子力発電所の新設禁止やエネルギー消費量の削減、エネルギーの効率的利用改善、再生可能エネルギーによる発電量の拡大など、同戦略を段階的に実行に移す最初の政策を網羅。2016 年 9 月に連邦議会の上下両院が同法案を承認したものの、右派政党が「コストがかかりすぎる」との異議を唱えたことから国民投票が行われた。今回の結果を受けて最終決定した同法案は 2018 年初頭に発効する見通しになり、スイスの既存原子炉 5 基は約 50 年間の平均的運転期間を終えたものから順次閉鎖されるほか、化石燃料の輸入量削減や国産再生可能エネルギー開発の推進といった具体策が実行されることになった。緑の党は 2016 年 11 月、既存原子炉の運転期間を 45 年に制限し、脱原子力を 5 年前倒しで達成するイニシアチブを国民投票にかけたが、急激な電力不足に陥ることへの懸念からスイス国民の 54.2% がこれに反対していた。なお、国内でムーレバルク原子力発電所を所有する BKW 社は 2016 年 3 月、同発電所の運転にともなう規制面や技術面、政治経済面での影響を考慮し、2022 年まで運転可能だった同発電所を 47 年目の 2019 年 12 月で閉鎖する方針を発表。脱原子力に向けた 1 基目になる予定である。

2011 年の福島第一原子力発電所事故を契機に、スイスの連邦参事会(内閣)は 2034 年までに国内原子炉すべてを段階的に閉鎖する方針を固めており、「2050 年までのエネルギー戦略」を策定。これにともなう一連の政策を 2013 年 9 月に改正法案として決定した。スイスにおい

て包括的なエネルギーの転換を図るというのが趣旨で、近年のエネルギーの低価格化や世界的なエネルギー市場の変化、新技術の急速な発達、気候変動が環境や経済社会に与える影響などに対応しつつ、国内のエネルギー供給を保障する狙いがあると説明している。

原子力部分について同法はまず、規制当局が安全性を保障する限りスイスでは原子炉の運転継続が可能であるものの、大型機器の経年化により経済性も低下し、原子力発電所は閉鎖や廃止措置に至ると指摘。既存原子炉が閉鎖された場合、これをリプレースする新設原子炉建設の承認発給を禁止するが、原子力技術そのものを否定するわけではないので、同分野の研究については継続的な実施を許すとした。同法は次に、原子力発電所からの使用済燃料を再処理しないことを規定している。2005 年の原子力法で議会は、再処理目的の使用済燃料輸出を 10 年間凍結すると決定。その後、この規定は 2020 年まで延長されていたが、今回の改正により再処理は完全に禁止し、廃棄物として処分することになった。英仏への委託再処理にともなう廃棄物の返還が 2016 年 12 月で終了したことから、今後新たに廃棄物が返還されることはない見通した。また、原子力発電所を代替する電源について、改正法はエネルギーの効率的利用と再生可能エネルギーの開発を促進すると明記。脱原子力が完了する前にこれらを進めてエネルギー・システムの移行を図る一方、冬季の電力輸入は継続する方針を示している。

再生可能エネルギーの開発規模について、同法は 2020 年までに少なくとも 44 億 kWh、2035 年までに少なくとも 114 億 kWh を風力、太陽光、バイオマスなどの国産再生可能エネルギーで賄うとしている。現在、総発電量の 6 割を賄っている水力については、2035 年までに少なくとも 374 億 kWh 発電できるよう拡大する方針。水力と風力で大型設備を開発したり、エネルギーの効率的な利用を図ったりする上で必要な資金のうち、年間 4 億

8,000万スイス・フラン(約547億円)を電気代として追加徴収するが、4人家族の平均世帯における増加分は年間40フラン(約4,562円)程度だとした。また、石油や天然ガスなどの化石燃料に対する税制等を通じて、4億5,000万フラン(約513億円)を追加で確保。これにより、ビルなどの建物におけるエネルギー消費量削減プログラムを実施するとしている。

### 【フランス】

## EDF、アレバ NP 社と原子炉系統製造会社を設立

フランス電力(EDF)の理事会は5月17日、同グループとアレバ NP 社のエンジニアを統合し、原子炉系統や制御システムの製造を専門とする「エドバンス社」を創設することを承認した。財政難に陥ったアレバ社について EDF は2015年6月、原子炉機器・燃料の設計・製造部門であるアレバ NP 社の買収方針を公表。それ以降、フランスで始まった原子力産業界再編の一環であるとしており、EDF とアレバ社はすでに2016年7月、今回の専門会社創設構想を含めた覚書に調印していた。「発電事業者/サプライヤー・モデル」の一部となるエドバンス社を通じて、EDF は原子力発電所新設プロジェクトに対する準備・管理体制を整えるとともに、日本や中国の大企業との連携を維持しつつ新規顧客のニーズに合った一層競争力のあるフランス提案を原子炉系統の輸出案件で行っていく考えだ。

エドバンス社はフランス内外で新設される原子炉の基本設計に加えて、原子炉系統と制御システムを含むプロジェクトの関連調査や資機材調達支援、機器の組立・起動を担当することになっている。資本の8割を EDF が保有する一方、残り20%はアレバ NP 社が保有する予定。EDF が担っている原子力産業界のリーダー的役割を統合して今年末までに創設される。エドバンス社が発足した後、アレバ NP 社は1次系とその関連機器、安全関連の制御システム、計装機器および原子炉の運転サービスといった同社の基幹事業に集中することになる。EDF グループの J. - B. レビィ会長兼 CEO は、「原子炉系統の設計・建設に関する両社の専門的知見を一つ屋根の下にまとめることで、フランス原子力産業界は原子力発電所を新設する際、一層効率的に機能できる」とコメント。これにより、フランスおよび国際的な原子力市場において、さらなる競争力の強化が図られるとの認識を示した。

### 【米国】

## ANS、既存原子力発電所の運転継続で意見書

米原子力学会(ANS)は5月16日、「米国の商業用原子力発電所：重要な国家資産」と題する意見書を公表し、連邦政府と州政府の両レベルで原子力発電を支援する政策を取るべきだと勧告した。米国の既存の原子力発電所は、国内送電網の信頼性や米国のエネルギー自給、地球温暖化防止、世界的な核拡散防止などの面で重要な役割を担っているにも拘わらず、そうした恩恵への補償を行わない電力市場によって経済性が損なわれれば、これらの役割を果たすこともできなくなると指摘。ANSとしては、既存の原子力発電所の運転継続を支持し、将来的な経済性を改善するための活動を支援していくと明言している。

ANS の認識によると、米国内の原子力発電所を継続的に運転することで国内外の安全保障と経済的繁栄が維持されるだけでなく、信頼性のあるクリーン・エネルギー供給、電源の多様化、安全性と核不拡散関係の国際基準に対する米国の影響力などが保証される。しかしながら、国内の多くの電力市場は原子力の持つ有益な特質を認識しておらず、適切な補償も行っていない。このような歪みが結果的に、複数の原子力発電所を早期閉鎖に追い込み、新規の原子力発電所建設を財政的に難しいものとし、米国の電力システムにおける将来的な信頼性をも損なう可能性があるとした。ANS はまた、原子力が米国の総発電量の約20%を賄うとともに、国内の全自家用車が年間に排出する約6億トンのCO<sub>2</sub>とほぼ同量の排出抑制に貢献している事実にも言及。発電用燃料の多様化にも貢献しているほか、その高い信頼性と1日24時間フル稼働できるという性質により、近代的な産業社会を支える上で重要なクリーン・ベース・ロード電力を供給する理想の電源になっている点を強調した。

## トランプ政権、ユッカ計画復活しても SMR 支援は打ち切り

米国の D. トランプ大統領は5月23日、同政権初の予算教書を2018会計年度(2017年10月～2018年9月)予算として議会に提出した。3月に公表した予算案の骨子どおり、オバマ前政権が打ち切ったネバダ州ユッカマウンテンにおける使用済燃料の深地層処分場建設計画の許認可審査活動再開、および中間貯蔵プログラムの開始について新たに予算措置を提案しているものの、原子力発電所の新設計画に対する融資保証プログラムや、官民

の予算折半で進めていた小型モジュール炉(SMR)商業化支援プログラムへの予算措置を終了すると明記。米原子力エネルギー協会(NEI)は同日の声明で、連邦政府が使用済燃料の引き取り義務履行に向けた意志を示したことに感謝する一方、米国の原子力産業界が繁栄していく上で必要な連邦政府の投資が、非常に重要な現時点で打ち切られることへの失望感を表明した。国内の既存商業炉 99 基についても、運転継続を支援する予算措置が含まれていない点に落胆したと述べており、この予算案が最終決定するまでに重要な原子力プログラムが継続されるよう議会とトランプ政権に働きかけたいとしている。

原子力を管轄するエネルギー省(DOE)の予算は、2017年度で承認された予算継続決議レベルから 5.6%削減されて 280 億ドルとなった。このうち、原子力関係の研究開発支援活動を主目的とする原子力分野全体の予算は、28.7%減の 7 億 300 万ドル。連邦政府の説明によると、2018 年度予算は幅広い民生用原子力産業における初期段階の研究開発支援に集中する方針で、技術が成熟しつつある後期段階の研究開発では特定の企業に利益が出ることから、民間部門で完成させるのが望ましいとした。このため、有望な 2 つの SMR 設計について、開発と設計認証(DC)審査および 2020 年代半ばの商業化を支援する目的で 2012 年に開始したプログラムを廃止するとし、現行予算の 6,250 万ドルを削除。理由として、同プログラムの支援を受けたニュースケール社が今年 1 月、同社製 SMR 設計の DC 審査を原子力規制委員会(NRC)に申請したことや、テネシー峡谷開発公社(TVA)が昨年 5 月、将来的な SMR 立地に向けて、クリンチリバー・サイトの事前サイト許可を申請した事実に触れた。2018 年度は、先進的な SMR 開発への支援金 2,000 万ドルを含む初期段階の次世代原子炉技術に対する投資支援を、「原子力実用化技術」関係の項目に含めている。

放射性廃棄物関連では、統合廃棄物管理システム予算の 2,250 万ドルと使用済燃料処分研究開発予算 6,250 万ドルを「核燃料サイクル」関係の研究開発予算から削減する一方、新たに「ユッカマウンテン放射性廃棄物処分場 & 中間貯蔵」と名付けた勘定科目を設定。既存の 2 つの勘定科目である「放射性廃棄物処分」と「軍事用廃棄物処分」からそれぞれ 9,000 万ドルと 3,000 万ドルを都合し、合計 1 億 2,000 万ドルの予算を確保すると提案した。使途の内訳は 2011 年 9 月に NRC が停止した深地層処分場建設認可申請審査の再開に 9,040 万ドル、使用済燃料中間貯蔵施設の開発開始に 660 万ドル、およびこれら 2 件の管理運営費合計として 2,300 万ドルとなっている。米国では放射性廃棄物法に基づき、政府が 1998 年までに原子力発電所から使用済燃料の引き取りを開始するこ

とになっていたが、ユッカマウンテン計画の頓挫により、使用済燃料は全米の原子力発電所サイトで貯蔵中。深地層処分場の許認可審査再開と中間貯蔵計画の開始により、DOE はこの義務の履行に向けた作業を加速できると強調した。

### 【アルゼンチン】

## 4 基目と 5 基目の原子炉建設で中国と請負契約

中国核工業集团公司(CNNC)は 5 月 17 日、アルゼンチンで 4 基目の原子炉となる加圧重水炉(PHWR)と 5 基目となる同国初の PWR 建設計画について、アルゼンチン国営原子力発電会社(NA - SA)と一括請負契約に調印したと発表した。両者はすでに 2015 年 11 月中旬、4 基目に関する技術・商業契約と 5 基目に関する協力枠組協定を締結しており、これらの計画に対する投資額 150 億ドルのうち、85%は中国工商銀行などを通じて中国側が支援することになっていた。しかし、同月下旬のアルゼンチン大統領選挙で政権が中道右派に交代。計画の再検討が行われていたと見られている。今回の契約により、70 万 kW 級のカナダ型 PHWR 設計「CANDU6」を採用した国内 4 基目のアトーチ原子力発電所 3 号機は 2018 年に着工するほか、中国が知的財産権を有する輸出用第 3 世代設計「華龍 1 号」を採用したアルゼンチン 5 基目の原子炉が 2020 年に着工することになった。5 基目の建設サイトについては、同国南部のパタゴニア地方になるとの情報があ

る。今回の契約は、北京で開催されていた「一帯一路フォーラム」でアルゼンチンの M. マクリ大統領が中国の習近平国家主席と会談した際、両国間における複数の合意項目の 1 つとして結ばれた。両首脳立ち会いの下で、NA - SA と CNNC、および CNNC 傘下のエンジニアリング企業である中国中原対外工程公司の幹部が契約文書に調印。CNNC はこの調印により、中国が輸出に成功した基数は合計 8 基になると強調している。

アルゼンチンでは現在、エンバルセとアトーチの両原子力発電所で合計 3 基の PHWR が稼働中。この PHWR 路線と並行して軽水炉の導入も進めており、ロシアとは 2010 年にロシア型 PWR(VVER)の建設可能性調査に関する合意文書を交わしている。一方、中国は CNNC と中国広核集团有限公司(CGN)双方の第 3 世代 PWR 設計を一本化した「華龍 1 号」設計の標準化を進めているが、PHWR についても 2002 年から、CNNC がカナダ型 PHWR(CANDU 炉)を秦山 3 期工事として運転中。CANDU 炉メーカーの SNC ラバリン社とは 2014 年、「CANDU6」と「改良型 CANDU6(EC6)」技術に基づ

く第3世代原子炉を、中国で共同建設していく協力覚書を結んだ。また、同じ年にカナダ連邦政府と中国国家能源局は、新型 CANDU 炉の開発と第3国市場への輸出を含めた民生用原子力分野で、両国間の協力を進展させる覚書に調印している。4基目の PHWR 建設については、昨年11月に NA-SA が SNC ラバリン社と6か月間の「プロジェクト前契約」を締結。長納期品の予備設計や安全分析、許認可支援、およびその他の技術サービスが、カナダ側から提供されていた。

## 【インド】

### 政府、国産化進めた加圧重水炉 10 基の建設を承認

インド首相府は5月17日、国内原子力産業の急速な発展を促進するため、N. モディ首相を議長とする閣議で70万kW級の国産加圧重水炉(PHWR)10基の建設を承認したと発表した。インドは2032年までに原子力発電設備容量を6,300万kWとし、2050年までに総発電量に占める原子力の割合を25%まで拡大するため、国産 PHWR の建設を推進中。1971年にカナダ型 PHWR (CANDU 炉)をラジャスタン発電所として導入して以降、国内原子力産業界における技術の国産化は大幅に進展している。インド原子力発電公社(NPCIL)の S. K. シャルマ総裁は4月12日の原産年次大会で、マディア・ブラデシュ州チュタカ、ラジャスタン州マヒ・パースワラー、カルナータカ州カイガ、ハリヤナ州ゴラクプールの4サイトで、70万kW級 PHWR を新たに合計10基建設する準備活動が活発に行われていると発表。今回これらが正式に閣議決定したと見られている。

首相府の発表では、インドでは22基、678万kWの原子力発電所が稼働中であるのに加えて、現在建設着手中、建設中、あるいは試運転中の9基、670万kWが2021~2022年に運転開始する予定。政府間協定により国外メーカーから軽水炉を導入する計画も徐々に具体化しており、すでにタミル・ナドゥ州のクダンクラム原子力発電所でロシア型 PWR の1,2号機が営業運転中のほか、3,4号機の着工記念式が2016年10月に行われた。フランスとはアレバ社製欧州加圧水型炉(EPR)をマハラシュトラ州ジャイタプールで6基建設する計画の実現に向け、NPCIL とフランス電力が昨年3月、協力覚書の改訂版に調印。アンドラ・ブラデシュ州コバダで米国籍のウェスチングハウス社製 AP1000 を6基建設する計画については、3月末の同社の倒産法申請により先行き不透明となったものの、米印両国首脳が2016年6月の声明の中で、サイトでの準備作業が始まったことを明らかにしていた。

首相府によると、10基まとめた建設承認は本格的な国産化イニシアチブの一部という位置づけであり、原子力部門で最も重要な「インド国産化プロジェクト」の一つ。同部門が掲げる意欲的な目標に沿って国内産業に約7,000億ルピー(約1兆2,000億円)相当の機器製造を発注し、インド原子力産業界が高度な国産技術力を備えたものに変化するよう支援する。同プロジェクトにより、建設計画のスケール・メリットが大幅に向上し、コストと工期の効率性は最大限に拡大。間接雇用も含めて約33,400人分の雇用創出が期待されるとしたほか、国内産業に製造発注することで、原子力発電所の機器製造に関するインドの能力増強が大きく前進するとの認識を示した。

また、今回の10基は、最も厳しい安全基準に適合したインド最新の PHWR 設計を採用する予定。その建設を承認することによって、首相府としては、インドの科学者には高い技術力を身につける能力があるとの強い信念を示す意図があった。そのため、国産化プロジェクトにおける設計や開発は、インドの原子力科学と産業が急速な発展を遂げてきた証拠であり、国産 PHWR 技術の全てにおいて、原子力科学者達が専門的スキルを獲得したことを明確に示していると強調した。首相府はさらに、今回の閣議決定が、国内エネルギー・ミックスでクリーン・パワーの利用を最優先するとしてインド政府の低炭素化戦略を反映していると指摘。原子力によって、インドの近代化に必要なベースロード電源を長期的に確保するとともに、地球温暖化防止に向けた国際的な努力の促進と経済の持続可能な発展、エネルギー自給という誓約を果たしていく方針だと明言している。

## 【国際】

### IEA、「温暖化防止に寄与する原子力の拡大に政策支援を」

国際エネルギー機関(IEA)はこのほど、世界的な「エネルギー技術の開発見通しに関する年次報告書(ETP)」の2017年版を刊行し、クリーン・エネルギー技術の開発を促すには断固たる政策的アクションとマーケット・シグナルが欠かせないとの見解を表明した。世界のエネルギー・システムは歴史的な変革に向けた動きをさらに加速しているとした上で、今回初めて、クリーン・エネルギー技術の開発促進と拡大にとまない、地球温暖化対策で生じるチャンスと課題に焦点を当てており、IEAがこれまでに検討した以上に意欲的なシナリオについても考察。原子力に関しては、設備を拡大すれば世界の気温上昇を2度Cに抑える一助になると明言しており、それには明確な政策的支援と産業界における経費削減努力が

重要になると勧告している。

ETP 最新版はまず、世界では一層多くの人々が生活水準向上のために電気を活用しており、電気器具や消費財に対する需要が高まっていると指摘。電気自動車や自律走行車のような革新的輸送技術の開発もまた、電力需要を押し上げており、このような傾向や技術開発が今後 40 年間で世界のエネルギー部門の再編成に向け、どのように展開していくか解説している。本報告書では特に、エネルギー技術の開発を促すとともに世界中で進展中の電化から恩恵を得るには、決定的な政策アクションとマーケット・シグナルが必要になると明言。送電容量や貯蔵能力、デマンドサイド管理技術といった一層頑健かつ高性能なインフラへの投資が、低炭素で効率的かつ統合された柔軟性のある堅固なエネルギー・システムの構築には必要だと述べた。それでも、各国政府による近年のエネルギー政策は地球温暖化の防止目標を長期的に達成するには不十分であり、IEA が評価した 26 の技術のうち、目標を満たせるだけの開発が順調に進展しているものは 3 つに過ぎないと指摘。政策的に明確なシグナルが発せられた部分では大きな進展が見られるものの、多くのエネルギー技術が適切な政策的支援を受けていないとの認識を示した。

ETP 最新版では基本開発ケース・シナリオを「参照技術シナリオ(RTS)」と呼んでおり、パリ協定に基づく誓約も含め、既存の温暖化防止目標とエネルギー目標を考慮した。もう一つは世界の気温上昇を 2 度 C 未満に抑える道筋を示した「2DS」シナリオで、2060 年までに世界の発電部門による CO<sub>2</sub> 排出量を差し引きゼロにすることを想定。どの道筋を選択しようと、エネルギー技術の研究段階から本格的な開発にいたるすべての段階において、技術革新への政策的サポートが重要になると結論づけており、それによって、エネルギー供給保証やエネルギー・システムの変革にともなう環境上、経済上の恩恵が得られるとした。また、エネルギー政策立案者にとって最も重要な課題は、エネルギー・システム毎に孤立した状態から離れ、全体を 1 つに統合できるよう変えていくことだと示唆している。

原子力に関しては、技術毎の進展状況を追跡調査した項目の中で 2016 年の開発傾向をとりまとめており、同

年に追加された設備容量が 1990 年以降で最高値の 1,000 万 kW だったとした。新規着工した設備容量は引き続き変動傾向にあり、前年実績の 880 万 kW から 320 万 kW に低下したものの、過去 10 年間の平均値は 850 万 kW になると指摘。2DS シナリオの目標を達成するには、年間 2,000 万 kW ずつ、容量を追加していく必要があるとしている。

世界の総発電電力量のうち約 11% が原子力によるものであり、低炭素電源の発電量に限るとシェアは 3 分の 1 まで上昇。しかし、パリ協定では使用するエネルギー技術を特定しておらず、2016 年末までに 163 か国が自主的に決定した約束草案(INDC)のうち、原子力発電を明確に国家戦略に含めていたのは、中国やインドなどわずか 10 か国だったとした。また、既存炉の早期閉鎖も引き続き 2DS シナリオの目標達成上、大きな脅威となっており、米国では低価格な天然ガスに支配された電力市場で多くの原子炉が閉鎖の危機にさらされていると ETP は明言。2016 年はまた、フランスで(鋼材組成関連の)安全性調査が実施されたため、同国の原子炉が多数オフラインだったことを説明した。

ETP 最新版はこのほか、各国の原子力発電開発計画や建設中の原子炉に採用されている第 3 世代設計について触れた後、推奨されるアクションとして以下の点を明記した。すなわち、原子力発電設備の開発を拡大することで、2DS シナリオの不足分を補う一助となり得るだけでなく、世界的な低炭素化に向けて多大な貢献が可能という原子力の潜在能力を十分発揮することができるとした。ただし、これには明確かつ一貫性のある政策的支援が既存炉や新規原子炉に対して必要であり、その他のクリーン・エネルギーとともに原子力開発も奨励する制度がこれに含まれる。さらに、不確定要素にともなう投資リスクの軽減努力も必要だと指摘しており、具体的には許認可や立地のプロセスにおいて明確な要件が定まっていること、建設の最終承認を受ける前に巨額の資本支出が不要とすること、などを挙げた。原子力産業に対しては特に、経済的な競争力を維持するために、建設コストや資金調達コストの削減で可能なアクションをすべて取らねばならないと勧告している。

1F 事故による環境回復に伴う廃棄物の管理と除去土壌の減容・再生利用の取り組み

はじめに 30年後の絵姿を描くための技術開発を  
除去土壌は2千分の1まで減容化濃縮

国立環境研究所 大迫 政浩

**KEYWORDS:** radioactive waste, contaminated soil, interim storage facility, volume reduction, technological strategy

福島第一原発事故によって環境中に放出された放射性物質により、人口が密集する日本の国土は広範囲に汚染され、過去に経験のない環境問題を私たちに突き付けた。それから6年以上が経過し、福島の復興は新たなステージに入っている。

行政的には、原子炉等規制法では十分に対処できないいわゆる「オフサイト」の環境汚染問題に対して、放射性物質汚染対処特別措置法を新たに制定し、除染措置と汚染廃棄物処理の二本柱で環境回復への取り組みが推進されてきた。現在は、除染措置は避難指示区域内の帰還困難区域を残して、ほぼ終了しつつある。

今後は、除染等によって生じた大量の除去土壌と汚染廃棄物を双葉・大熊両町に設置する中間貯蔵施設に運び入れ、輸送開始後30年以内という期限までに、福島県外の最終処分までを完了しなければならない。

一方、30年後を見据えた技術的な絵姿はまだ描かれていない。それを具体的に描くには、必要とされる技術要素の研究開発を急がなければならない。環境省が平成28年4月に策定した「中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略」によれば、平成30年度を中間目標として分級処理技術開発の先行実証を進め、その後熱処理等の他の減容化技術を実証し、平成36年度を戦略目標と設定し実事業に移行するとした。同時に、最終処分方式の検討を進め、具体化していくとしている。また、減容化のためには、放射性セシウムの分離後の生成物（浄化物）の再生利用が必須であり、基準等の基本的考え方等を整備し、モデル事業等を進めながら地域の理解醸成を図っていかなければならない。

筆者らは、30年後の絵姿として、分級処理や溶融技術

等の熱処理技術、洗浄技術等を組み合わせることによって高度な減容化を達成し、浄化物の再生利用と減容化された濃縮物の最終処分を実現できると考えている。2千万立米とも言われている除去土壌等を2千分の1程度まで減容化濃縮し、最終処分への負荷を軽減することで大幅なコスト低減も可能である。濃縮物は、現行の「低レベル放射性廃棄物」のコンクリートピット処分に準じた方式が参考になると考えているが、濃縮物の最終廃棄体の放射性セシウム濃度は、コンクリートピット処分の上限値である1,000億Bq/kgよりも相当程度低くなるものと推測している。

減容化技術は、大きく湿式/乾式分級法、化学抽出法、熱処理法に大別される。分級法は、放射性セシウムが微粒子ほど高い濃度で吸着している特性を利用して、分級により微粒子と粗粒子を分けて、濃度の低い粗粒子を分離し再生利用等に供する方法。化学抽出法は、酸などの薬剤により強制的に吸着結合した放射性セシウムを土壌から脱離、または母体となる結晶構造を壊して分離させる方法。熱処理法は、高温による溶融や焼成により放射性セシウムを高効率で揮発分離させる方法。生じる溶融スラグや焼成物は土木資材に有効利用可能。

これらの減容化技術を組み合わせて適用することにより、最終的に放射性セシウムが濃縮された残渣物が生じる。現在の想定で、熱処理/洗浄プロセス後の廃吸着剤が残ると考えると、その放射性セシウムの濃度は数千万あるいは数億Bq/kgのレベルになる可能性がある。原子力分野における「低レベル」の範疇になり、安定化の後にコンクリートピット処分相当の対応が一つの考え方であり、今後は、安定化処理や最終廃棄体化が重要な研究開発対象である。

以上のような状況のもとに、当学会の2017年春の年会において、バックエンド部会による企画セッションが開催された。5名の講演者により、汚染廃棄物の総合的管理、粘土鉱物へのCs吸着機構、国の減容・再生利用技術開発戦略、再生利用の安全評価、処分費用の観点から発表がなされ、活発な討議がなされた。以下では、各講演内容についての概略を紹介し、オフサイト問題の現状に関して理解を共有するとともに、当学会が今後取り組むべき課題の解決に向けての一助にしたい。

*Challenges for management of radioactively contaminated wastes and volume reduction and reuse/recycling of removed soil derived from the activities for environmental remediation after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident : Masahiro Osako, Kazuto Endo, Tsuyoshi Yaita, Satoru Kaneko, Youichi Kamiya, Kouji Yamada, Kiyohiko Eino, Hitoshi Goda, Takuma Sawaguchi, Shizuka Takai, Katsuhiro Umezawa, Seiji Takeda, Takashi Okada, Hisakazu Nakata, Akihiro Sakai, Hiroya Amazawa, Yoshiaki Sakamoto.*

(2017年4月12日 受理)

1F 事故による環境回復に伴う廃棄物の管理と除去土壌の減容・再生利用の取り組み

# (1) 環境中における事故由来の放射性物質汚染廃棄物の総合的な管理

国立環境研究所 遠藤 和人

事故由来放射性物質によって汚染された廃棄物の多くは一般環境中の広範に存在しており、除去土壌を含めなくても数百万トン(複数年での合計)を処理しなければならない状況である。そのため、特別措置法という形で制度が作られ、ガイドラインも整備することで総合的、かつ体系的な管理体制が整えられている。ここでは、8,000 Bq/kg 以下の特定一般廃棄物や特定産業廃棄物に着目し、溶出特性や、最終処分場への埋立処分における留意点等を整理した。

**KEYWORDS:** *Radiocesium, 8,000 Bq/kg, landfill, leachate, adsorption*

## I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故により、事故由来放射性物質(Cs-134 と Cs-137)によって汚染された土壌や廃棄物が東日本の広範にわたって多量に発生している。これら汚染物については、「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」(以下、特措法とする)が平成 23 年 8 月 30 日に交付され、オフサイトにおける総合的な管理のための制度が整備された。福島県内外を問わず、多量の除去土壌が発生しているが、本論では、汚染廃棄物である一般廃棄物や産業廃棄物に着目し、その管理状況や埋立処分における留意事項について述べる。

## II. 放射性物質汚染廃棄物に対する初動

我々の家庭から出されるごみは一般廃棄物に分類されており、一般廃棄物の可燃物は、通常、中間処理として焼却処理が施され、燃えかすである主灰と飛灰の多くが埋立処分されている。また、下水道で集められた汚水は、下水処理場で処理されて副次産物として下水汚泥が排出される。この下水汚泥は、セメント原料として利用されたり、焼却して下水汚泥焼却灰(産業廃棄物)となる。平成 23 年 5 月、福島県内の下水処理場から発生する下水汚泥ならびにその溶融処理スラグ等の放射能濃度が高いことが明らかとなり<sup>1)</sup>、その対応として 5 月 12 日に「福島県内の下水処理副次産物の当面の取扱いに関する考え方」を原子力災害対策本部がとりまとめ、翌 6 月 16 日には上水汚泥等も含めて「放射性物質が検出された上下水処理等副次産物の当面の取扱いに関する考え方」が発出された。追加被ばく防護と汚染拡大防止のため、運搬や保管に対する留意点が示されると共に、埋立処分に対しては跡地利用制限を設けた埋立基準 8,000 Bq/kg

という閾値が初めて設定された。6 月 23 日には、環境省が「福島県内の災害廃棄物の処理の方針」を発出しており、上下水処理等副次産物と同様に主灰や飛灰についても 8,000 Bq/kg までは埋立可能とし、8,000 Bq/kg を超過する廃棄物(後に指定廃棄物として分類される廃棄物)は一時保管することが適当とされていた。一方、福島県外については、同年 6 月 27 日に南関東において 8,000 Bq/kg を超える一般廃棄物焼却飛灰が観測され<sup>2)</sup>、翌 28 日には「一般廃棄物焼却施設における焼却灰の測定及び当面の取扱いについて」という事務連絡が環境省より発出された。この事務連絡にしたがって家庭ごみ由来である一般廃棄物焼却灰の放射能濃度の一斉調査が実施されたため、一般廃棄物については、この 7 月の測定値が最も古い値となっている。

特措法が公布された翌日、平成 23 年 8 月 31 日には、これまで一時保管が適当とされてきた 8,000 Bq/kg を超える指定廃棄物に対しても埋立処分する方向に変更された。特措法では処理基準の具体等については記されておらず、「省令で定める方法により」という文言が使われており、その省令である特措法施行規則(以下、規則とする)は同年 12 月 14 日に環境省令第 33 号として施行され、放射性物質汚染廃棄物等への体制が概ね整った形となった。また、規則の公布に伴い、廃棄物関係ガイドラインも公表され、平成 25 年 3 月に第 2 版が発刊されている。オフサイトにおける総合的な管理の枠組は、廃棄物処理法を基本とし、従来の廃棄物管理による公衆衛生対策と同時に、放射性物質に対する被ばく防護と環境保全への対応が継続されている。

## III. 汚染廃棄物の現状

福島県外、県内(一部の県内市町村を除く)を含み、8,000 Bq/kg 以下の特定一般廃棄物や特定産業廃棄物については、廃棄物最終処分場に埋め立てられており、そ

の量は毎年、数十万トンに及ぶ。“8,000 Bq/kg 以下であれば、従来の方法によって安全に埋立処分が可能である”としつつ、焼却灰等の濃度が比較的高い地域(都道府県単位)を指定して上乗せ基準を課せる形で管理を行っている。廃棄物中の放射能濃度は半減期等にしたがって徐々に濃度が低下するため、濃度が低い地域や処理施設については徐々に除外されている<sup>3,4)</sup>。

福島県外の指定廃棄物(8,000 Bq/kg 超過)については、現在、現場等の仮置場にて保管が継続されており、その総量は約2万8千トンである<sup>5)</sup>。事故後6年を経過しているため、指定時の濃度よりも低下してきており、廃棄物の濃度を再測定して8,000 Bq/kg 以下となったものについては、指定廃棄物の解除が進んでいる状況である<sup>6)</sup>。県内の指定廃棄物については、現時点での保管量は約16万トン<sup>5)</sup>となっており、除染廃棄物の処理等が進むにつれて若干増加し、かつ、対策地域内廃棄物等の特定廃棄物を合わせて、約65万m<sup>3</sup>を既存の管理型産業廃棄物最終処分場に埋立処分する予定である<sup>7)</sup>。

#### IV. 汚染廃棄物の特性

廃棄物の埋立処分のための管理は、地下水汚染を防ぎつつ、放流水基準を満足することであるため、溶出濃度の値を用いる。先述した汚染廃棄物の埋立基準は、廃棄物の濃度であるため、言い換えると含有量基準となっている。このことは、処分場管理者にとって困惑する基準であり、主灰と飛灰の著しい溶出性の違いが埋立基準に反映されていないため、結果的には放流水が濃度限度を超過する事例が散見される結果をもたらした<sup>8)</sup>。主灰や下水汚泥焼却灰から放射性セシウムはほとんど溶出しませんが、一般廃棄物の飛灰(ばいじん)からは、6時間でほぼ8割の放射性セシウムが溶出し<sup>9)</sup>、逐次抽出試験結果でも水溶態やイオン交換態の割合が8割程度となっている<sup>10)</sup>。一方、放射性セシウムは土壌に対して非可逆的な吸着を示し、その分配係数が大きいことが知られているが、処分場内では吸着阻害物質である数千ppmのカリウムや窒素成分がアンモニア態として存在しており、分配係数が一般環境の10分の1から100分の1にまで低下する<sup>11)</sup>。以上より、埋立処分という長期管理を考えれば、溶出率は100%と考えた方が良く<sup>12)</sup>、埋立処分場内の液固比を考慮し(溶出試験に比較して廃棄物層の液固比が小さいので、浸透水濃度が溶出試験結果の約30倍になるとして設定)、中間覆土や保護土の吸着特性等を保守的に設定して放流水中に含まれる放射性セシウム濃度を評価可能なモデルを提案し<sup>13)</sup>、実処分場を巡回して処分場管理者と対話することによって適正管理を促している。

#### V. 最終処分場における埋立時の留意点

特定一般廃棄物を廃棄物最終処分場に埋め立てる際の

上乗せ基準の詳細は、廃棄物関係ガイドラインに記されているが、先述した廃棄物からの溶出、吸着特性等を把握し、どのようにして埋め立てれば浸出水へと溶出ししないのか、ということを考えることが重要である。“汚染されている、では、遮水”という発想になる場合が多いが、放射性セシウムのように易水溶性であり土壌親和性が高い場合には、遮水よりも、水を通して対象物質を除去するような吸着層を用いる土壌浸透工法の方が有利である。易水溶性の放射性セシウムを下部遮水によって止めようとするれば、高濃度浸透水が生成されて、汚染ポテンシャルが増加することになる。

特定一般廃棄物や特定産業廃棄物の埋立処分における留意事項は以下の8項目である。①「汚染飛灰を水と接触させない」、②「汚染飛灰の下を遮水しない」、③「汚染飛灰の下には土壌系吸着層を敷設する」、④「汚染飛灰を臭突(ガス抜き管)の近くに埋めない」、⑤「汚染飛灰を法面集排水管近くに埋めない」、⑥「汚染飛灰を下流側や下の方に埋めない」、⑦「汚染飛灰の上に有機性廃棄物を埋めない」、⑧「汚染飛灰の埋立が終わったら上部を遮水する。遮水が必要なのは、この上部のみ」。

#### — 参考文献 —

- 1) 福島県災害対策本部、県中浄化センターにおける下水汚泥の放射能調査結果について、平成23年5月1日記者発表資料、2011。
- 2) 東京二十三区清掃一部事務組合、放射能測定結果及び焼却飛灰の一時保管について、平成23年6月27日報道資料、2011。
- 3) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課長・産業廃棄物課長、環廃対発第121109305号、環廃産発第121109300号、平成24年11月9日、2012。
- 4) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課長・産業廃棄物課長、環廃対発第16033013号、環廃産発第16033017号、平成28年3月30日、2016。
- 5) 環境省、指定廃棄物について、[http://shiteihaiki.env.go.jp/radiological\\_contaminated\\_waste/designated\\_waste/](http://shiteihaiki.env.go.jp/radiological_contaminated_waste/designated_waste/)、平成29年4月30日閲覧、2017。
- 6) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課長・産業廃棄物課長・指定廃棄物対策担当参事官、環廃対発第1604281号、環廃産発第1604281号、平成28年4月28日、2016。
- 7) 環境省、フクシマエコテッククリーンセンター埋立処分実施要綱(案)、平成26年5月、2014。
- 8) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課長・産業廃棄物課長、廃棄物最終処分場における焼却灰等の埋立処分について(注意喚起)、事務連絡、平成23年9月21日、2011。
- 9) 独立行政法人国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター、放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分(技術資料 第四版)、第4章、放射性セシウムの溶出挙動、pp.32-41、2014。
- 10) 山田正人・遠藤和人・倉倉宏史・石森洋行・大迫政浩、第2回焼却灰等からの放射性セシウムの溶出と吸着、放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分について、日廃センター情報、Vol.12, No.2, pp.12-15, 2012。



- 11) 石森洋行・遠藤和人・山田正人・大迫政浩, 廃棄物埋立地における放射性セシウムに対する土壌吸着特性とその影響因子, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol.28, pp.39-49, 2017.
- 12) 遠藤和人・石森洋行, 汚染飛灰からの放射性セシウム溶出特性に関するバッチとカラム溶出試験結果の比較, 第51回

地盤工学研究発表会講演集, pp.2215-2216, 2016.

- 13) 遠藤和人・石森洋行・山田正人, 特定一般廃棄物の埋立処分による放射性Csの動態評価に関する一考察, 第4回環境放射能除染学会研究発表会講演集, 2015.

1F 事故による環境回復に伴う廃棄物の管理と除去土壌の減容・再生利用の取り組み

## (2) 再生利用を目指した粘土鉱物への Cs 吸脱着機構解明

日本原子力研究開発機構 矢板 毅

除染によって生じた膨大な除去土壌を如何に処分するか? これは, 30年以内の最終処分に向けての大きな課題である。減容化に関する技術としては, これまで環境浄化などで用いられてきた処理法である分級, 化学処理, 熱処理などいくつかの方法論が考えられるが, それぞれに一長一短があり, 放射性Csの処理という視点で方法論を再度見直し, 最適化する必要があると考えられる。本稿では, 特に対象となる粘土鉱物への吸着機構についての最新の知見について紹介すると共に, これらの情報を参考に開発を試みている除染および土壌の再生利用などについて解説する。

**KEYWORDS:** Waste volume reduction, Reuse, Milling, Low-temperature melting, Salting out, Radioactive Cesium, Sorption mechanism, Synchrotron radiation

### I. はじめに

福島第一原子力発電所(1F)の事故により大量の放射性物質が飛散し, これに伴い国や地方自治体の主導で広範囲な除染が行われた。ここで生じた汚染土壌については, 仮置場, あるいは中間的な保管施設などで保管・管理がなされている。その廃棄物等の処理には, 膨大なコストがかかる可能性が指摘されているが, 30年以内の処理を見据え, 実装可能な処理方法の検討が各所で進められている。1F事故によって放出された放射性Csが汚染土壌中の粘土鉱物に多く吸着しているということは, これまで多くの研究により指摘されてきている。そのような背景のもと我々のグループでは, 1F事故以後, 原子・分子レベル分析に基づく詳細な粘土への吸着メカニズムについて明らかにしてきた。本稿では, 既存の分級法をはじめ基礎的研究知見を基にした物理的減容化および熱処理によるCs除去・再生利用に関する研究結果の一部を紹介する。

### II. 粘土への吸着機構について

様々な土壌廃棄物の研究の過程で, 放射性Csの存在に関して, その多くの部分が粘土へ吸着しているということが指摘されている。図1は, 福島の畑で採取された土壌を分級し, その分画に含まれる放射性Csの濃度を示した結果である。この結果は, 土壌試料のほんの一例に過ぎないが, 粘土分画と考えられる20 $\mu$ m以下の粒子中

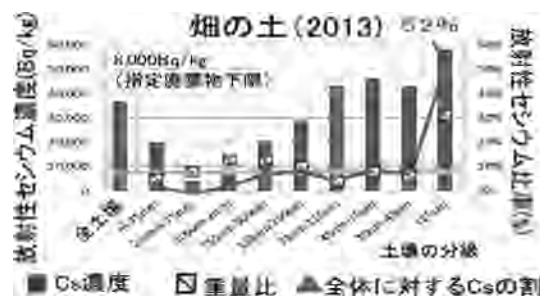


図1<sup>1)</sup> 2013年に採取された福島土壌中粒子に存在する放射性Csの例

に高濃度に存在し, 全体のCsの52%以上のCsが濃縮していることが分かる。この土壌においては, 全体の50%近い放射性Csが, 他のフラクションにも存在している事が分かるが, 簡単な洗浄あるいはイオン交換的なメカニズムで脱離してくるもの以外は, 安定的に粘土に取り込まれた形でそれぞれの分画に存在する物質に吸着していると推定されている。

粘土鉱物は, 一般的にイオン交換機能などがあり, この機能によりCsも簡単に溶出してくることが予想されるが, 実際は, 土壌に存在する放射性Csは予想以上に粘土鉱物から溶出してこないことが報告されている。さらに詳細に検証した結果, 黒雲母が風化途中にあるような黒雲母(風化黒雲母: WBと略す)などに濃縮し<sup>2)</sup>, 特に強く結合することも改めて明らかとなった<sup>2)</sup>これは, 図2に示したような, 2:1型の粘土層間内部にある程度の集団で侵入し, 層間を閉じた後, 共有結合性を示す強

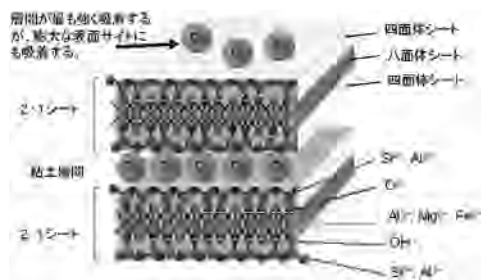


図2 2:1型粘土の概要とCs吸着サイト

\*図のような層間に存在するCsは極めて安定であり、一方、その他の表面サイト等に吸着したCsは比較的容易な化学処理で溶出すると考えている。

い結合をする事などが、第一原理計算<sup>2)</sup>、小角散乱法<sup>2)</sup>、走査型X線顕微鏡<sup>2)</sup>などの研究手法により明らかになってきている。このような安定な吸着状態を作る傾向は、極微量Csにおいて見いだされやすいことも高輝度放射光と高感度検出器の組み合わせで明らかになりつつある<sup>2)</sup>。すなわち、環境放出されたキャリアフリー(孤立系の極微量状態)の放射性Csは、飽和吸着状態を含む十分な量を吸着させた粘土に対するCsの溶離実験では高い脱離効率を得られる方法、例えばかなり強い酸溶液で加熱処理するような場合でも、実土壌からは剥離することが難しいことがあることなども辻褃が合う。特に本稿では、化学処理については取上げて述べないが、図2の表面サイトに吸着しているような比較的剥離しやすい状態にあるCsは、薬剤が吸着サイトに到達しやすいことに加え、強い相互作用をしていないと予想されることから化学処理によっても十分な剥離効率が期待できる。一方、風化黒雲母などで、層間に取り込まれた安定的な電子状態を取っているCsの剥離については、改めて新しい処理法を検討する必要がある、以下その結果の一部を紹介する。

### III. 物理的除染と減容化

物理的粉碎：粘土の構造及び電子状態との関係が重要な事は既に述べた。このような特異な吸着点では、粘土の基本骨格を成す $\text{Si}^{4+}$ や $\text{Al}^{3+}$ などが例えばそれぞれ $\text{Al}^{3+}$ や $\text{Fe}^{2+}$ などと置換し、層間電荷を高めると共に、層間に存在する膨潤水の構造化を促進させることが指摘されている。(水素結合でのネットワーク形成を促すこと<sup>2)</sup>)さらに、ネットワーク構造を破壊するという全く逆の性質を持つCsがこの特異な吸着点に侵入すると、Csが局所的に濃縮、さらに粘土と強い結合を形成し、吸着状態を局所的により安定化させる<sup>2,3)</sup>。すなわち、このCsの高度な安定的吸着は、粘土そのものの構造が極めて重要であり、この安定化を助ける粘土の最低単位の構造を破壊することで、Csを取り出せる可能性がある。図3に“純粋な雲母のみ”による試料を粉碎することによるX線回折パターンの時間変化について示した。これ

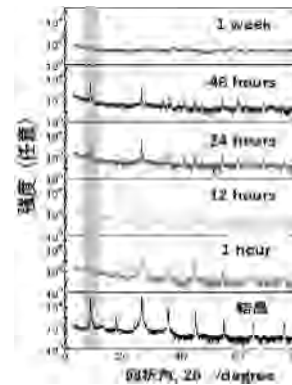


図3 黒雲母結晶を粉碎した場合の結晶構造の時間変化

\*ハイライトされた回折ピークは、雲母層間の底面反射を表す。

によれば約1週間程度粉碎する事により回折パターンが消失し、粘土の結晶構造が壊れていることがわかる。結晶構造の破壊は、Csの吸着安定状態が低下したことになり、簡単な化学処理による溶離が可能となる。ただし、実試料に関しては、様々な強度の鉱物が共存することから、その粉碎効率は、純粋な鉱物のみとは異なることも指摘されており、ゆえに分級処理などの前処理を加えることで、粉碎法は一つの有力な処理法となる可能性があることがわかる。

### IV. 熱処理と再生利用について

物理的な粉碎が比較的有効であることを示したが、回折パターンとして検出限界以下の微少な構造が残っている可能性もある。これを完全に破壊する方法がいわゆる熱をかける溶融法などである。この方法は、究極のCs取り出し法であるが、エネルギーを加え、アルカリ塩を加えるなどのコストがかかることから膨大な廃棄物全てに対して適用することは難しい。また、反応後の主灰は除染されているものの、不要な廃棄物になる可能性もある。そこで我々は処理コスト削減を目指した新しい溶融法を検討している。原理としては、混ざり合わない2つの塩を加えることによる融点降下と冷却過程の制御による鉱物の析出を利用する方法である。これには低温処理によるコストダウンを図り、さらに析出した鉱物を再利用しようという意図がある<sup>2)</sup>。以下の図4は、SPRing-8のJAEAビームラインで得られたCs塩析過程をEXAFS法によりその場観察した結果である<sup>2)</sup>。図4の絵に示した様にマークしたピークのシフトはCsの塩化物相への塩析過程(除染過程)を示している。また残渣の鉱物化は、Csを取り出すためのドライビングフォースでもあり、再生利用にむけた新規物質形成過程でもある。今後、新しい有用鉱物の生成についても検討してゆきたい。

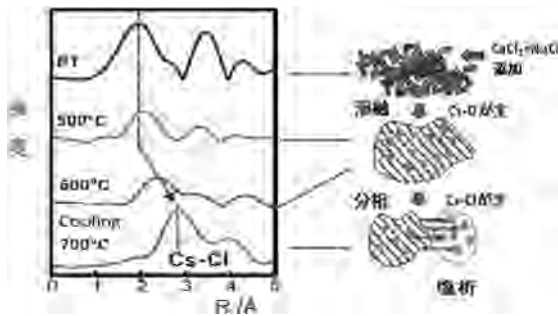


図4 粘土を含む熔融塩におけるCs塩析過程に関するCs-K吸収端EXAFS動径構造関数によるその場観察

## V. 終わりに

30年以内の最終処分に向けては、新しい技術開発が不可欠であると考えている。一方、実装に向けては10年以内の研究技術的確立が不可欠であり、基礎科学から応用までの知見を結集し、環境修復という大問題に取り組む必要があると考えている。

### — 参考文献 —

- 1) 伊藤他, 原子力学会和文論文誌, 11(4), 255(2012).
- 2) T.Yaita et al, GER, 20, 33(2016)他.
- 3) T. Ikeda, J.Chem. Phys., 145, 124703 (2016).

## 1F 事故による環境回復に伴う廃棄物の管理と除去土壌の減容・再生利用の取り組み

# (3) 中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略の概要

環境省 金子 悟, 他

福島県内の除染等の措置に伴い生じた除去土壌等については、中間貯蔵開始後30年以内の県外最終処分の完了に向けて、環境省は、平成28年4月に「中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略」を策定した。さらに、除去土壌の再生利用の実現に向けて、同年6月に「再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方について」を取りまとめた。以下、これらの概要について解説する。

**KEYWORDS:** Interim Storage Facility, Contaminated Soil, Volume Reduction, Recycling, Final Disposal, Technology Development Strategy

## I. はじめに

福島県内における除染等の措置に伴い生じた除去土壌等の発生量は最大約2,200万 $\text{m}^3$ と推計されている。この除去土壌等については、中間貯蔵・環境安全事業株式会社第三条第二項等において、「中間貯蔵開始後30年以内に福島県外で最終処分を完了するために必要な措置を講ずる」ことが国の責務として明記されている。

県外最終処分の実現に向けては、最終処分必要量を低減することが鍵となる。そのためには、大量の除去土壌等をいかにして効率的に減容処理するか、その結果生じる本来貴重な資源である放射能濃度の低い土壌等を再生資材として利用可能とする技術的・制度的条件等をいかに整えるかが課題となる。さらに、必要となる最終処分場の構造、面積等、最終処分の方向性の検討につなげる技術的側面をいかに絞り込んでいくかが課題となる。また、再生利用及び最終処分の実現に向けては、全国的な理解が不可欠である。

環境省は、これらの課題の解決に向けて、平成28年4

月に、「中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略」(以下、「技術開発戦略」という。)を策定した。また、本戦略においては、除去土壌の再生利用の実現に向けて、放射線影響に関する安全性の確保を前提とした再生利用の基本的考え方を取りまとめることとされており、同年6月に「再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方について」(以下、「安全な利用に係る基本的考え方」という。)を策定した。

以下、技術開発戦略及び安全な利用に係る基本的考え方の概要について解説する。

## II. 技術開発戦略の概要

### 1. 目的

30年以内の県外での最終処分に向けて、減容・再生利用技術の開発、再生利用の推進、最終処分の方向性の検討、全国的な理解の醸成等について、今後の中長期的な方針を示すことを目的とする。

## 2. 減容・再生利用技術の開発

土壌等の減容・再生利用に必要な技術の開発の目標や優先順位を明確にし、処理を実施するための基盤技術の開発を今後10年程度で一通り完了する。

## 3. 再生利用の推進

再生利用は、管理主体や責任体制が明確となっている一定の公共事業等における盛土材等の構造基盤の部材に限定し、追加被ばく線量評価に基づき、追加被ばく線量を制限するための放射能濃度の設定や覆土等の遮へい措置を講じた上で、適切な管理の下で使用される。

これを実現するために、実証事業、モデル事業等を通じて、地域住民等のステークホルダーや幅広い国民の理解・信頼を得つつ、関係府省庁、自治体等と連携して再生利用先の具体化を図り、できるだけ早期に再生利用を本格化させる。

## 4. 最終処分の方角性の検討

最終処分場の選定のためのプロセスを開始する前提として、技術開発の進捗状況や再生利用の将来見込みを踏まえて、最終処分が必要な土壌等の放射能濃度や量を段階的に絞り込み、最終処分される土壌等や処理後の濃縮物の性状、最終処分場の構造や必要面積について一定の見通しを立てる。

最終処分場の構造等の検討に当たっては、最終処分の対象となる土壌等が、原子力発電事業等に伴い発生する複数の核種を含む放射性廃棄物とは異なり、核種が<sup>134</sup>Cs及び<sup>137</sup>Csに限定され、その濃度も放射性廃棄物のうち放射能レベルの比較的低い廃棄物の濃度(<sup>137</sup>Csで最大1,000億Bq/kg)に比べて大幅に低いことが想定されること等を踏まえるものとする。

## 5. 全国的な理解の醸成等

中間貯蔵開始後30年以内の福島県外での最終処分を実現するためには、再生利用や最終処分に対する全国的な理解が必要不可欠であることから、関係府省庁、自治体、関係団体、専門家、学術・教育機関、NPO等と連携して情報共有や相互理解を進めつつ、国民に対する情報発信、普及啓発等の取組を地道に、かつ継続して進める。

## III. 安全な利用に係る基本的な考え方の概要

### 1. 基本的な考え方

#### (1) 再生資材の使用を限定するための措置

除去土壌の再生利用は、管理主体や責任体制が明確となっている公共事業等における盛土材等の構造基盤の部材に限定するとともに、再生資材の紛失や目的外使用を防止するために、再生資材の検収時、保管時において、受入量の管理、分別保管、持出しの管理を行う。

#### (2) 被ばく線量を制限するための措置

用途ごとの被ばく評価を基に再生資材の放射能濃度の設定及び覆土等により遮へい及び飛散・流出を防止する設計・施工・管理を行う。

## 2. 追加被ばく線量

特措法基本方針において減容化、運搬、保管等に伴い周辺住民が追加的に受ける線量が1mSv/年を超えないようにすることとされていることを踏まえ、再生利用に係る周辺住民・施設利用者及び作業員の追加被ばく線量については、1mSv/年を超えないようにする。ただし、周辺環境が一定程度汚染されており電離放射線障害防止規則(以下、「電離則」という。)又は東日本大震災により生じた放射性物質により汚染された土壌等を除染するための業務等に係る電離放射線障害防止規則(以下、「除染電離則」という。)の対象となる場合は、当該規則を適用し、作業員の追加被ばく線量は5年で100mSvかつ1年間につき50mSvを超えないものとする。さらに、破損時等を除く供用時においては、周辺住民・施設利用者に対する追加的な被ばく線量をさらに低減する観点から、放射線による障害防止のための措置を必要としないレベル(0.01mSv/年)になるように適切な遮へい厚を確保する等の措置を講じる。

## 3. 再生資材の放射能濃度

### (1) 放射能濃度の制限

再生資材を利用する施設を施工する際には、被ばく線量を個々に計測して管理することは現実的でないことから、作業員が放射線防護のための特別な措置を講じることなく施工でき、供用中には施設利用者が特別な制限なく施設を利用し、また、問題なく周辺に居住できるよう、周辺住民、施設利用者及び作業員に対する追加被ばく線量が1mSv/年を超えないことを条件として、用途ごとの追加被ばく評価計算から再生資材中の放射性セシウム(<sup>134</sup>Cs + <sup>137</sup>Cs)の放射能濃度レベル(Bq/kg)(以下、「1mSv/年相当濃度」という。)を算出し、再生資材の放射能濃度をこの濃度以下に制限する。

### (2) 再生資材として利用可能な放射能濃度レベル

再生資材の放射能濃度は、万一の場合も速やかに補修等の作業を実施できるよう、確実に電離則又は除染電離則の適用対象外となる濃度として、特措法の規制体系における斉一性も考慮して、8,000Bq/kg以下を原則とし、用途ごとの追加被ばく評価計算から算出される1mSv/年相当濃度がこれ以下の場合には、その濃度とする。

## 4. 再生利用の段階的な進め方

再生資材を利用した事業を想定し、実証事業やモデル事業を実施し、再生資材に利用、管理における留意点を

整理した「再生利用手引き(仮称)」を作成し、再生利用の必要性や放射線に係る安全性に関する知見を幅広い国民と共有するための啓発、対話、体験のための具体的取組等をそれぞれ段階的に進める。

#### IV. おわりに

中間貯蔵開始後 30 年以内の県外最終処分に向けて、今後 10 年程度で基盤技術の開発を一通り完了し、再生利用を本格化することを目指し、減容処理技術及び再生利用技術の開発、再生利用の推進、最終処分の方向性の検討等の取組を総力をあげて進めることとする。他方、再生利用先の具体化、本格実施や、全国的な理解・信頼の醸成等の取組は、その後も長期的に継続実施してい

く必要がある。

また、最終処分方式の具体化、最終処分地に係る調査検討・調整、整備、搬入、中間貯蔵施設からの除去土壌等の取り出し・搬出方法の検討、跡地利用の検討等のプロセスを基盤技術の開発完了後に本格化する必要がある。現時点において、これらのプロセスの具体的な工程を示すことは現実的に困難であるが、今後 10 年程度の間技術開発のみならず、再生利用や最終処分の方向性の検討を精力的に進めることにより、戦略目標の時期までには、その時点での各種検討の進捗を踏まえて、最終処分の実施に向けたある程度具体的な工程を示すことができるよう最大限努力していく。

### 1F 事故による環境回復に伴う廃棄物の管理と除去土壌の減容・再生利用の取り組み

## (4) 除去土壌の再生利用の安全評価

日本原子力研究開発機構 澤口 拓磨, 他

環境省は福島県内における除染等の措置に伴い生じた土壌(除去土壌)を再生資材化し、放射線影響に関する安全性を確保しつつ、適切な管理の下で利用する方針を示した。本評価では除去土壌の再生利用に係る指針等の策定に資するため、当該再生資材を 4 種類の土木構造物(道路・鉄道盛土、防潮堤、海岸防災林、最終処分場)に利用することを想定し、施工時、供用時、災害時における作業員および一般公衆に対する追加被ばく線量評価を行った。また、その結果から、当該線量を制限するための放射性セシウム濃度や施設の設計条件についての検討を行った。

**KEYWORDS:** *Removed Soil, Reuse, Radioactive Cesium, Safety Assessment, Fukushima Nuclear Plant Accident*

#### I. はじめに

福島県内の除染等の措置に伴い生じた大量の除去土壌等は、中間貯蔵を経た後、福島県外で最終処分することとなっており、その実現に向けては、当該処分量の低減等が鍵である。環境省は、汚染の程度を低減させる適切な処理を行い、用途に応じて適切に放射能濃度を制限した再生資材を、安全性の確保を大前提としつつ地元の理解を得て利用する考えを示した<sup>1)</sup>。そこで、本評価では、除去土壌の再生利用に係る指針等の策定に資するため、当該再生利用に係る作業員および一般公衆の追加被ばく線量を評価し、当該線量を制限するための放射性セシウム( $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ )濃度の算出や施設の設計条件についての検討を行った。本報告は当該再生利用の「基本的考え方(H28.6)」<sup>1)</sup>に反映した評価結果を示したものである。

#### II. 評価の概要

再生利用の前提<sup>1)</sup>として、再生資材は無条件に市場に

流通できるクリアランス制度とは異なり、管理主体や責任体制が明確な公共事業等における土木構造物へ限定的に利用される。本評価で対象とした土木構造物は、道路・鉄道盛土、防潮堤、海岸防災林、最終処分場の 4 種類とした。また、特定の場所での利用や特別な制限は想定せず、各土木構造物の典型的な仕様や構造を設定するとともに、再生資材が利用される構造部材(盛土材、中間覆土材、最終覆土材、土堰堤材)ごとの評価とした。なお、再生資材の利用の開始時期は福島第一原子力発電所事故から 5 年後とし、 $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の存在割合は 0.209 : 1 とした。

本評価ではこれらを前提とし、以下の評価を行った。

##### 1. 再生利用可能な放射能濃度レベルの評価

施工時から供用時において通常想定されるシナリオ・被ばく経路を対象に、再生資材中の単位放射性セシウム濃度(1Bq/g)による追加被ばく線量を評価した。また、上記線量結果から作業員および一般公衆に対する全ての

表1 再生利用可能な放射能濃度レベルおよび5,000 または 8,000Bq/kg の再生資材を利用した場合において作業者と一般公衆が受ける追加被ばく線量の最大値

工事の種類	遮へい材厚さ(m)	再生利用可能な放射能濃度レベル(Bq/kg) 決定経路	追加被ばく線量(mSv/y)									
			5,000Bq/kgの再生資材を利用した場合				8,000Bq/kgの再生資材を利用した場合					
			作業者	一般公衆(経路別)	作業者	一般公衆(経路別)	作業者	一般公衆(経路別)	作業者	一般公衆(経路別)		
遮へい土	一般	5,000	遮へい土作業者・外部	0.75	遮へい土作業者・外部	0.003	周辺居住者(子ども)・外部	0.003	遮へい土作業者・外部	0.003	周辺居住者(子ども)・外部	
	遮蔽			0.015	0.0015	0.0015	0.0015					
	遮蔽	5,000	遮へい土作業者・外部	0.01	遮へい土作業者・外部	0.010	周辺居住者(子ども)・外部	0.010	遮へい土作業者・外部	0.010	周辺居住者(子ども)・外部	
	遮蔽			0.015	0.0015	0.0015	0.0015					
	遮蔽	8,000	遮へい土作業者・外部	0.75	遮へい土作業者・外部	0.003	周辺居住者(子ども)・外部	0.003	遮へい土作業者・外部	0.003	周辺居住者(子ども)・外部	
	遮蔽			0.015	0.0015	0.0015	0.0015					
防護壁	遮蔽壁(高さ1m)	5,000	遮へい土作業者・外部	0.75	遮へい土作業者・外部	0.003	利用者(子ども)・外部	0.003	遮へい土作業者・外部	0.003	利用者(子ども)・外部	
	遮蔽壁(高さ1.5m)			0.015	0.0015	0.0015	0.0015					
	遮蔽壁(高さ2m)	8,000	遮へい土作業者・外部	0.75	遮へい土作業者・外部	0.003	利用者(子ども)・外部	0.003	遮へい土作業者・外部	0.003	利用者(子ども)・外部	
	遮蔽壁(高さ2.5m)			0.015	0.0015	0.0015	0.0015					
	遮蔽壁(高さ3m)	7,000	遮へい土作業者・外部	0.66	遮へい土作業者・外部	0.003	利用者(子ども)・外部	0.003	遮へい土作業者・外部	0.003	利用者(子ども)・外部	
	遮蔽壁(高さ3.5m)			0.015	0.0015	0.0015	0.0015					
	遮蔽壁(高さ4m)	7,000	遮へい土作業者・外部	0.66	遮へい土作業者・外部	0.003	利用者(子ども)・外部	0.003	遮へい土作業者・外部	0.003	利用者(子ども)・外部	
	遮蔽壁(高さ4.5m)			0.015	0.0015	0.0015	0.0015					
	遮へい土	一般	5,000	遮へい土作業者・外部	0.82	遮へい土作業者・外部	0.003	周辺居住者(子ども)・外部	0.003	遮へい土作業者・外部	0.003	周辺居住者(子ども)・外部
		遮蔽			0.015	0.0015	0.0015	0.0015				
		遮蔽	8,000	遮へい土作業者・外部	0.82	遮へい土作業者・外部	0.003	周辺居住者(子ども)・外部	0.003	遮へい土作業者・外部	0.003	周辺居住者(子ども)・外部
		遮蔽			0.015	0.0015	0.0015	0.0015				
敷物・緑地の作業者		敷物・緑地の作業者・外部	13,000	敷物・緑地の作業者・外部	0.10	敷物・緑地の作業者・外部	0.003	敷物・緑地の作業者・外部	0.003	敷物・緑地の作業者・外部	0.003	敷物・緑地の作業者・外部
		敷物・緑地の作業者・外部			0.015	0.0015	0.0015	0.0015				
	敷物・緑地の作業者・外部	8,000	敷物・緑地の作業者・外部	0.09	敷物・緑地の作業者・外部	0.003	敷物・緑地の作業者・外部	0.003	敷物・緑地の作業者・外部	0.003	敷物・緑地の作業者・外部	
	敷物・緑地の作業者・外部			0.015	0.0015	0.0015	0.0015					
	敷物・緑地の作業者・外部	8,160	敷物・緑地の作業者・外部	0.81	敷物・緑地の作業者・外部	0.003	敷物・緑地の作業者・外部	0.003	敷物・緑地の作業者・外部	0.003	敷物・緑地の作業者・外部	
	敷物・緑地の作業者・外部			0.015	0.0015	0.0015	0.0015					

注) 作業者(施工時、供用時)、一般公衆(供用時)が受ける追加被ばく線量はそれぞれ1mSv/y、10μSv/yを超えないことを前提とした。

被ばく経路に対して追加被ばく線量が(平成23年11月閣議決定特措法基本方針を踏まえ、「基本的考え方」<sup>1)</sup>で示された)1mSv/yを超えない条件を満足する再生資材中の放射性セシウムの濃度(1mSv/y相当濃度)を算出し、それらの最小値を「(土木構造物に)再生利用可能な放射能濃度レベル」とした。

2. 供用時の一般公衆に対するさらなる線量低減の条件検討のための追加被ばく線量評価

1. で行った追加被ばく線量評価結果から、通常の供用時の一般公衆に対する追加被ばく線量が、放射線による障害防止のための措置を必要としないレベルである0.01mSv/y(10μSv/y)を満足する設計(遮へい材として働く構造物材の厚さ)条件についての検討を行った。

3. 災害による土木構造物の変状・崩壊を想定した場合の追加被ばく線量評価

供用時において仮に地震等の災害による土木構造物の変状・崩壊が生じた場合の追加被ばく線量を評価し、災害時および復旧時の作業者および一般公衆が受ける追加被ばく線量が1mSv/yを超えないことの確認を行った。

また、当該追加被ばく線量評価結果の保守性、信頼性を確保するため、評価シナリオの設定では、土木構造物の施工時(施工作業、周辺居住など)、その完成後の供用時(土木構造物の直接的な利用、周辺居住など)、および災害時(自然災害により崩壊した構造物の復旧作業など)において、線源である再生資材からの直接的な被ばくや線源からの放射性セシウムの環境中への移行に伴い生じる被ばくの可能性がある状態を、文献調査や聞き取り調査による情報を踏まえて具体的に記述した。また、各シナリオにおける被ばく対象者と被ばく形態(外部被ばく、粉塵吸入や経口摂取による内部被ばく)を具体化し、現

実的かつ網羅性のある被ばく経路を設定した。評価モデルは、原子炉施設等のクリアランスレベル評価等<sup>2,3)</sup>、評価実績のある既往の評価モデルと基本的に同じとした。評価パラメータの設定では、対象とする土木構造物の設計や施工等に関する情報および既往のクリアランスレベル評価<sup>2)</sup>のパラメータ値を考慮し、現実的、代表的な値を設定することを基本としたが、複数のバリエーションが考えられる場合や不確実性の大きい場合は保守的な値を設定した。また、外部被ばく線量換算係数は、各土木構造物の上記設計情報等に基づき具体的な線源体系を設定し、評価経路ごとに保守性を確保できる対象者の位置を決め、QAD-CGGP2R<sup>4)</sup>またはMCNP5<sup>5)</sup>で計算した。

III. 評価結果

1. 再生利用可能な放射能濃度レベルの評価

単位濃度の再生資材を各土木構造物に利用した場合の施工時シナリオ、供用時シナリオにおける作業者および一般公衆の追加被ばく線量をPASCLR2<sup>6)</sup>を用いて評価し、その結果から算出した決定経路(最も線量が高くなった被ばく経路)の1mSv/y相当濃度を表1に示す。用途ごとの当該濃度は5,300~13,000Bq/kgとなった。

2. 供用時の一般公衆に対する線量低減の条件検討

1. の結果を踏まえ、全土木構造物に対し追加被ばく線量が1mSv/yを超えない条件を満足する再生資材中放射性セシウム濃度レベルとして5,000Bq/kgを選定した場合、および放射性物質汚染対処特措法に基づく指定廃棄物の基準等を考慮して8,000Bq/kgを選定した場合の決定経路の追加被ばく線量を表1に示す。前者は、30~40cm以上の遮へい材厚さで一般公衆の追加被ばく線量が0.01mSv/y以下となった。後者も、30~50cm以

表2 災害時における追加被ばく線量評価結果

土壌 種別	再生資材の 放射能濃度 (Bq/kg)	追加被ばく線量(mSv/y)の算定値(被ばく経路)	
		作業者	一般公衆
道路盛土 鉄道盛土	5,000	0.40	0.25
	8,000	0.64	0.40
防潮堤 海岸防 災林	5,000	0.51	0.013
	8,000	0.81	0.020
	5,000	0.52	0.0042
	8,000	0.84	0.007
埋設型盛土	5,000	0.30	0.013
	8,000	0.47	0.018

上の遮へい材厚さで同線量めやすを満足した。しかし後者は、作業者の追加被ばく線量が中間覆土、土堰堤以外の用途で1mSv/yを超えた。この結果を踏まえ、環境省は、年間の作業期間に応じた再生利用可能濃度を示し、これを超えないようにすることを可能とした<sup>1)</sup>。

### 3. 災害時における追加被ばく線量評価

2. と同様に、再生資材中放射性セシウム濃度レベルを5,000Bq/kg および8,000Bq/kg に選定し、道路・鉄道盛土、防潮堤、海岸防災林の盛土材として利用した場合

に対し、災害時シナリオにおける作業者および一般公衆が受ける追加被ばく線量を表2に示す。災害時における用途ごとの最大追加被ばく線量は、被ばくの影響が大きい作業者でも0.30~0.52mSv/y(5,000 Bq/kgの場合)、0.47~0.84mSv/y(8,000Bq/kgの場合)となり、全ての用途で1mSv/yを超えない結果となった。

※本評価は、環境省「平成27年度最終処分に向けた技術開発戦略策定調査」として実施したものである。

#### — 参考文献 —

- 1) 環境省、再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方、2016。
- 2) 原子力安全委員会、原子炉施設及び核燃料使用施設の解体等に伴って発生するものうち放射性廃棄物として扱う必要のないものの放射能濃度について、2004。
- 3) 独立行政法人原子力安全基盤機構、JNES-RE-2011-0004、2012。
- 4) Y. SAKAMOTO & S. TANAKA, JAERI-M90-110, 1990。
- 5) X-5 Monte Carlo Team, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Ver.5, LA-UR-03-1987, 2003。
- 6) 武田聖司 他, JAEA-Data/Code 2006-003, 2006。

## 1F 事故による環境回復に伴う廃棄物の管理と除去土壌の減容・再生利用の取り組み

### (5) 低レベル放射性廃棄物の処分費用の積算

日本原子力研究開発機構 仲田 久和, 他

福島県内の除染等の措置に伴い生じた除去土壌のうち、再利用できない土壌は最終処分されると想定される。その際には処分施設の設計検討を行うこととなるため、同施設の施設設計や最終処分を合理的に行ううえで参考できる事項を紹介する。日本原子力研究開発機構は、全国の研究機関、大学、民間企業で保管されている低レベル放射性廃棄物を浅地中へ埋設処分する事業の実施主体である。今後、処分施設の立地場所が確定しだい、施設設計、建設を行い、約12万m<sup>3</sup>の放射性廃棄物を50年間かけて埋設する計画である。同計画の立案に際して、一般的な立地条件での予備的な施設設計を行い、放射性廃棄物の処分に要する費用の積算を行った。その知見をもとに、処分費用の積算方法の概要、除去土壌の最終処分のための費用評価に関する事項を述べる。

**KEYWORDS:** Low level radioactive waste, Disposal costs, Design of disposal facility

#### I. はじめに

再生利用可能な除去土壌を分離した後の除去土壌は最終処分される。除去土壌の最終処分場の設計検討に資することを目的とし、研究施設等から発生する低レベル放射性廃棄物の処分方法を参考として、合理的な設計に向けた費用評価上の課題を検討した。

検討に際しては、遮水工を設置したトレンチ型処分施設(付加機能型トレンチ処分施設)の概念設計<sup>1)</sup>の結果を例に、その費用評価法を適用して実施した。同施設で

は、埋設対象廃棄物中のセシウム137の放射能濃度が10万Bq/kgを上限とし、また、金属・コンクリート等の安定五品目以外の性状の廃棄物の埋設を想定している。これらの条件(濃度上限値、埋設対象物の性状)が除去土壌の放射能濃度、性状と類似していることから本検討で取り上げた。

処分施設の費用積算では、イニシャルコストとして土地購入費、設計費、埋設施設建設費、埋設作業関連設備費、附属施設建設費等がある。また、ランニングコストとして操業費、保守点検費、設備維持費、ユーティリ

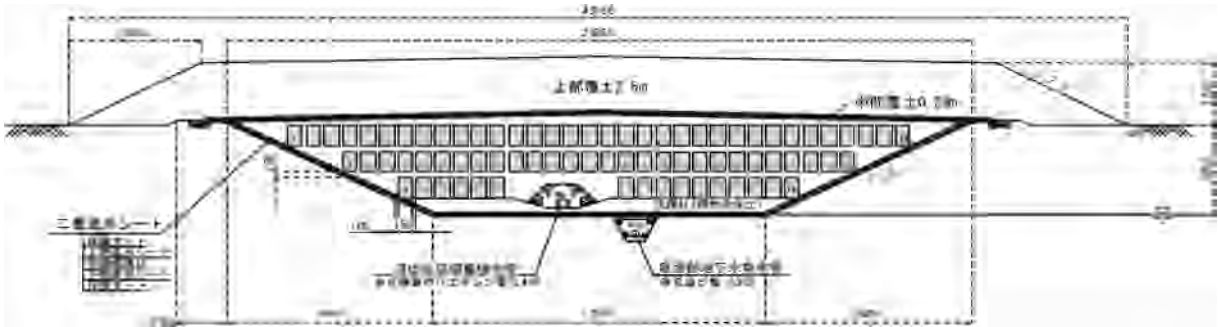


図1 付加機能型トレンチ処分施設の短尺断面図

ティー費等がある。異なる処分場の費用を比較検討する場合は、同じ費用項目のみを比較したり、処分場の規模を容量で規格化するなど条件を整理することが必要となる。今回は、付加機能型トレンチ処分施設の建設費のみを対象に、単位容量あたりの建設費について検討する。

## II. 付加機能型トレンチ処分施設の構造と費用積算の方法

### 1. 付加機能型トレンチ処分施設の構造

図1に付加機能型トレンチ処分施設の短尺断面図を示す。同施設は、廃棄物の処理及び清掃に関する法律の規制を受ける管理型処分場のうちクローズド型処分場と同等の構造である。掘削面積(地表部)は190m×30m、深さ4m、法面勾配1:2であり、掘削容量は約16,000m<sup>3</sup>である。

底部及び法面部の遮水工は遮水シートを2重とし、地下水位より高い位置に敷設する。上部覆土中には1重の遮水シートを敷設する。掘削地内には200リットルドラム缶に収納した放射性廃棄物(廃棄体)を約17,500本(3,500m<sup>3</sup>)設置する。廃棄体間の隙間には埋設後の陥没防止のため中間覆土を充填する。

### 2. 費用積算の方法

表1に付加機能型トレンチ処分施設の建設費の積算結果を示す。本検討では、同施設の建設費用として、掘削土工事、遮水工設備、地下水モニタリング用の集排水設

備の工事数量に、公開されている工事単価を乗じた直接工事費の積算を用いた。なお、積算の方法は、国土交通省土木工事積算基準を使用した。管理費、諸経費等は含まれていない。工事単価のうち、公開されていない工種の単価は、専門メーカーの見積もりに基づいている<sup>2)</sup>。

## III. 除去土壌の最終処分に係る費用評価のための課題

### 1. 付加機能型トレンチ処分施設の費用評価から得られる知見

同施設では、建設費のうち遮水工の設置費が約7割を占める。このため、遮水シートを敷設する総面積を小さくすると費用面で有利となる。また、処分施設の容量に対する除去土壌の量(埋設効率)をできるだけ高くすると費用面で有利となる。

これらの単価(建設費(円)÷埋設対象物量(m<sup>3</sup>))への影響を図2に示す。図2中①に、約1.6万m<sup>3</sup>の規模の付加機能型トレンチの単価を示す。①から埋設効率を向上させた場合、図2中①から②へと単価を低減できる。

また、①から付加機能型トレンチの規模を大きくすると、図2中①から③へと単価を低減できる。これは、処分施設の規模を大きくすると、処分施設の容量と表面積の比(処分施設の総表面積÷処分場の容量)が小さくなり、遮水工の設置費が抑えられるためである。

以上より、埋設効率及び処分施設の規模(スケールメリット)が単価を検討するうえで考慮すべき事項となる。

表1 付加機能型トレンチ処分施設の建設費 (直接工事費のみ考慮)

項目	積算方法	費用 (百万円)	
建設費	掘削土工事	掘削土量(190m×30m×4m)×170	3
	遮水工	掘削面積(190m×30m)×10	5
	埋設体	埋設体数(17,500本)×100	17
	中間覆土	埋設体間隙(17,500本)×100	19
	遮水シート	掘削面積(190m×30m)×2	11
管理費	正定数	10	60
	変動数	10	10
地下水モニタリング設備	集排水設備	15	
合計		112 (百万円)	

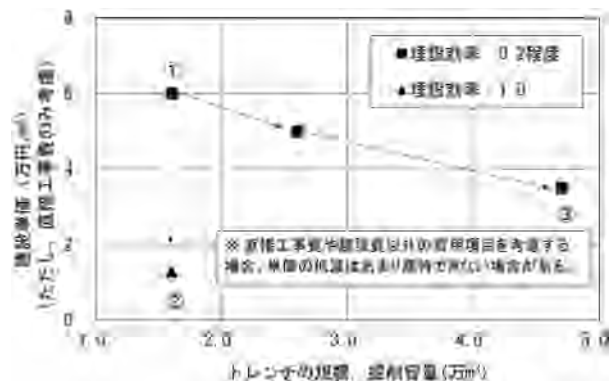


図2 付加機能型トレンチの規模と建設単価の関係



## 2. 除去土壌の最終処分に係る費用評価のための課題

### (1) 埋設効率について

付加機能型トレンチ処分施設は、原子炉等規制法の技術基準等により、放射性廃棄物を容器等に収納することや、その周りに土砂等を充填し、埋設後空げきが残らないように措置することとなっており、埋設効率はあまり高くない。一方、除去土壌の最終処分場では、放射性物質汚染対処特措法に基づくものであるため、原子炉等規制法の技術基準のとおり容器へ収納する必要はなく、また、埋設対象物が土壌であり、直接締固めができる。

このことから、埋設効率を向上させることが期待できる。その際に、粉塵の吸入防止のような被ばく低減のための措置、管理を適切に行いつつ、産業廃棄物の処分のように多量の物量を効率的に埋設する方法を検討することが重要となる。これを考慮した除去土壌の減容、埋設の手順を検討し、埋設効率の高い処分場の設計をすることにより合理的な処分が行われるものとなる。

### (2) 処分場の規模について

研究施設等から発生する低レベル放射性廃棄物の処分施設の場合、実際の処分費用を評価する際には、インシヤルコスト、ランニングコスト以外にも想定される費用項目を積算している。多くの費用項目のなかには、付加機能型トレンチ処分施設の建設費のようにスケールメリットが期待できる費用項目があるが、例えば、廃棄物の定置・埋設の役務費のように、物量が増えれば増えるほど単純に増加する、スケールメリットが期待できない費用項目がある。これらの費用項目を総合的に考慮して処分場の規模の検討を進めることが、合理的な最終処分に向けて重要となる。

### － 参考文献 －

- 1) JAEA-Technology2012-031 研究施設等廃棄物浅地中埋設処分施設の概念設計。
- 2) JAEA-Technology2016-019 研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設の遮水機能の設計検討。

### 著者紹介

大迫政浩 (おおさこ・まさひろ)

国立環境研究所

遠藤和人 (えんどう・かずと)

国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター

矢板 毅 (やいた・つよし)

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門  
物質科学研究センター

金子 悟 (かねこ・さとる)

環境省 除染・中間貯蔵企画調整チーム

神谷洋一 (かみや・よういち)

環境省 除染・中間貯蔵企画調整チーム

山田浩司 (やまだ・こうじ)

環境省 除染・中間貯蔵企画調整チーム

永野喜代彦 (えいの・きよひこ)

環境省 除染・中間貯蔵企画調整チーム

合田 均 (ごうだ・ひとし)

環境省 除染・中間貯蔵企画調整チーム

澤口拓磨 (さわぐち・たくま)

日本原子力研究開発機構 安全研究センター

高井静霞 (たかい・しずか)

日本原子力研究開発機構 安全研究センター

梅澤克洋 (うめざわ・かつひろ)

日本原子力研究開発機構 福島環境安全センター

武田聖司 (たけだ・せいじ)

日本原子力研究開発機構 安全研究センター

岡田 尚 (おかだ・たかし)

日本原子力研究開発機構 福島環境安全センター

仲田久和 (なかた・ひさかず)

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門  
埋設事業センター

坂井章浩 (さかい・あきひろ)

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門  
埋設事業センター

天澤弘也 (あまざわ・ひろや)

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門  
埋設事業センター

坂本義昭 (さかもと・よしあき)

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門  
埋設事業センター

## From Abroad

# Scientific Wanderlust Across The Ocean

## —海の向こうの研究放浪記，オーストリア編—

国際原子力機関 大塚 直彦  
理化学研究所

ポストドクの任期満了を間近にひかえて研究拠点を日本からオーストリアに移した筆者が、当地にて職場の内外で経験してきたことを思いつくままに記す。前編ではアメリカにおける研究生活の様子が電車の車窓を映しだすがごとく描きだされたが、本編では時がゆったりと流れるウィーンの生活を、路面電車の車窓から眺めるがごとく描いてみたい。

**KEYWORDS:** *Job application, Duty travel, English communication, Life in Vienna, Heuriger*

### I. はじめに

ウィーン市北西部のホーヘ・ヴァルテ (Hohe Warte) という小高い丘に建つアパートに移って6年が経つ。庭にはさくらんぼがたわわに実る桜の大木があり、いままきに満開である。花が一斉に咲き出す復活祭前後のこの時期はウィーンの四季の中でも本当に素晴らしい。今年は職場脇のドナウ放水路 (Neue Donau) で昼休みにスケートが楽しめるほどに冬が厳しかったこともあり、春の喜びもまたひとしおである。ヌスベルク (Nussberg) のワイン畑に枯れ木のごとく立っていたぶどうの木が日に日に緑に色づいていく様子が我が家の居間からもよく分かる。ホーヘ・ヴァルテのこの一角は建築家ホフマン (Josef Franz Maria Hoffmann, 1870-1956) が手がけた「芸術家のコロニー」(Kunstler-Kolonie) なる家屋群となっており、このうちマーラー夫人の継父の住み家であった隣家は観光客の被写体となっている。丘の縁の公園のベートーベン像は、彼がそこにかつて湧き出していた鉱泉を求める湯治客であったことを伝える。公園の一角のミヒャエル教会は立派な教区教会であり、そびえたつ鐘楼が時を知らせてくれるのはありがたい。近所のベートーベンの「遺書の家」を訪ねると「あの教会の鐘の音が聞こえなくなったことでベートーベンには耳の不具合に気づきました」と説明されることがあるという。「遺書の家」の通りにはホイリゲ(ワイン酒場)が軒を並べる。学生時代のパイプオルガンの先生と筆者が偶然の再会を果たしたほどに日本人観光客が多い。天気の良い週末に赤



図1 居間から見たミヒャエル教会とヌスベルク

ん坊を連れ出してはホイリゲの門をくぐり、木陰の乳母車の傍らで数杯のワインを楽しむことができたのはもう大分前のことで、その子供も今や「お父さん、またホイリゲ?」と連れ出すのは容易でない。

そんなウィーンにすっかり馴染んだ(と思い込んでいる)筆者は、少年時代には「大人になったら世界を股にかけて活躍する人になりたい」などと思ったことは一度たりともなかった。むしろ、海外生活と自分との関わりなど考えることのない(そしてできれば関わりたくない)「内向き志向な日本の若者」であった。その筆者がウィーンに職を求めることになった理由は、ひとつには「データ収集」というそれ自身では論文にならない仕事を続ける数少ない選択肢がIAEAにあったことである。また、IAEAの会議に出席してはモーツァルトのCDなどを求め、それを研究室で再生しながらの土産話が尽きない教授の存在も私のウィーンへの気持ちを大いに後押しした。国際機関は研究者の勤務先として一般的とはいえない

*Scientific Wanderlust Across The Ocean ; Austria* : Naohiko Otuka. (2017年5月9日 受理)

いが、期せずしてIAEAに職を得た日本人研究者の生活や仕事について、思いつくままに紹介してみようと思う。以下は一個人の経験であり、また筆者がその経験をした当時と現在では色々なことが異なっている可能性があることなど、予めご了承ください。

## II. IAEAに職を得るまで

IAEAをはじめ国際機関の職員になるための一般的な方法は空席公告の出た職位への応募であり、公募書類を日常的に書いている若手研究者にはなじみやすい。応募書類の作成はウェブブラウザを通じた入力で行われるようになっており、印刷した書類を郵便局に持参して簡易書留で送る日本の公募対応よりも楽である。推薦書の添付は不要で照会先(reference)を記すだけで済むのも良かった。ある公募のために作成した入力を別の公募に転用することも非常に簡単であり、実際IAEAの公募に片っ端から応募している人もいろいろいるらしい。私の在職する核データ課(Nuclear Data Section)では公募1つにつき100名前後の応募者がいるが、求める人材と応募者の専門性の合致度でかなりの絞りこみがかかり、そこから面接に呼ばれるまでが第一関門である。現在は応募と面接の間にSONRUというコンピューター相手のテストがあるようで、筆者が応募した当時にそんなテストがあったら、この記事を書くこともなかったであろう。

面接はビデオ会議システムを用いたものであった。良いタイミングで某大手英会話教室が夏期短期集中コースの早割広告を出していたので、そこに想定問答を持ち込んで5日ほど連日朝から夕方までマンツーマンで相手をしてもらった。これを面接当日の午前中まで続けてから、午後に教室のある渋谷からビデオ会議室のある飯田橋まで移動して面接本番に臨んだ。面接を行うであろう部課長のしゃべる英語がどうしても聞き取りにくいことが分かっていたので、面接の数ヶ月前にあった会議で彼らの声を密かに録音したのであるが、何度再生してもよく聞き取れぬままであった。同じ録音機に面接本番も録音したのだが、これは恥ずかしくて未だに再生できない。

最終的に自分が選考されたことを伝えられたのは応募締切からおおよそ7ヶ月後であった。一般に時間を要するIAEAの職員選考の中であって、私の選考は比較的迅速に行われたという印象を持っている。

## III. 引っ越しと家さがし

IAEAとの契約が有期であることから、日本での年度末までの雇用期間を使いきってからIAEAに赴任したかったのであるが、「できるだけ早く赴任して欲しい」という当時の課長の強い希望に押され、年度末を待たずにウィーンに赴任した。引越は先のアメリカ編と同様、幾つかの業者がやってきての見積もりにはじまる。常勤職を得るまで何度も引越があるつもりで家財は押入れ一間



図2 ドルンバッハの電停(ウィーン市17区)

分に納まるように減らしていたので、見積もりはあっという間に済んだ。引越当日は業者が梱包をすべてやってくれるという具合で、理学部の大八車に家財を積んで牽いた経験もある筆者は大変に感動した。一定量は航空便で送ることができたが、緊急性のあるものが特に思いつかず、赴任後にすぐ必要となりそうな研究室の資料類を航空便でおくった。日本人の場合、IAEAの赴任に際しての査証取得は不要であり、赴任後は滞在資格があることを示すLegitimationkarteというオーストリア政府発行の身分証を常に持ち歩くことになる。オーストリア国内であればこの身分証と日本の免許証で車の運転ができる。また赴任後の住民登録(Meldezettel)も永らく行っていなかったが、子供の小学校(Volksschule)入学手続きに必要なだったのでついこれを行ったところ、さっそく送られてきたのが国営放送(ORF)の受信料の請求書であった。

ポストク暮らしの長い私にとって、支給された着任手当は失職時に備えて可能な限り貯蓄しておくべきものだったので、ウィーン到着後に向かったのはフリードリヒ・エンゲルス広場にあるユースホステル(朝食付一泊20ユーロ)であった。このユースホステルには洗濯機が見当たらず、汚れた衣類を担いで(今はなき)ウィーン南駅から列車でプラチスラバに向かい、開設間もない日本大使館に単身赴任していた政治学研究者の友人宅におしかけた。当時のスロバキアはシェンゲン圏外にあり、洗濯が目的の入国であれ旅券の携帯が必須であった。やがて、洗濯の問題はじめ頻繁な予約更新や部屋移動などユースホステル暮らしには不自由の多いことが分かり、職場のハウジングサービスが紹介する賃貸物件を廻りはじめた。ウィーン大学前から路面電車でウィーンの森の方向へ20分ほど行ったドルンバッハ(Dornbach)にあったのもそのうちの1軒である。ぶどう畑が見える大きな窓のついた屋根裏部屋が気に入って、赴任後一ヶ月ほどでここに移住した。当時ここから職場に向かうには路面電車と地下鉄2路線を乗り継がねばならなかったが、ド

ルンパッハの緑の豊かさはそれを補って余りあった。ここを引き払ってかなりになるが、玄関の呼び鈴のところにはなぜか未だに筆者の表札が残っている。

#### IV. 仕事場の日常

IAEA の職員は大きく専門職員 (Professional Staff) と一般職員 (General Staff) に分けられる。たとえば核物理を駆使して核データに関する仕事を行う筆者は専門職員であり、会議や出張に関する事務手続、データ入力、論文の入手などを通じて筆者の仕事を支援するのは一般職員である。部署によっては分析や機器管理を担当している一般職員もいる。一般職員は日本の大学でいう事務職員・技術職員の位置づけに近いが、中には博士の学位を持つような人もいる。

研究機関ではないにも関わらず、IAEA は図書館機能が非常に充実している。筆者の場合、核反応実験の結果が報告された論文に日々目を通す必要があり、核データ考古学<sup>1)</sup>との関係で古い論文や入手困難な論文を求めることが珍しくない。核物理関係の主だった雑誌は IAEA の図書館がほぼ冊子体で所蔵しているし、雑誌によっては電子版へのアクセスも確保されている。IAEA が所蔵しない雑誌、レポート、学位論文の類も IAEA 図書館の優秀な職員が取り寄せてくれ、「よく見つけ出したなあ」と感心することも多い。そんな筆者の自慢の種でもある IAEA 図書館がセクション (課) からユニット (係) に格下げされてしまったのは残念。

核データ課の最も重要なミッションは最新の核データや原子・分子データを数値データベースの形に整備し、それを解説・補足する文書とともに加盟国に提供することである<sup>2)</sup>。IAEA の情報担当部署が 2016 年 5 月のアクセス統計を Google Analytics で分析した結果が手元にあるが、これによれば IAEA ドメインのウェブ閲覧数 (page view) の約 8 割を核データ課のウェブサイト (www-nds.iaea.org) の閲覧が占めている。これらのデータベースの整備はいずれも世界中の研究者の協力を得て行われているが、職員も背景となる物理を相当程度理解したうえでその取りまとめにあっている (自分で理解しないと気がすまないという物理屋の性格が影響しているものと思われる)。そういう仕事の仕方をしているので勤務時間も長くなりがちで、筆者も第一子が 1 歳になるころまで終電での帰宅が珍しくなかったし、特に 2010 年に地下鉄が週末の終夜運転を始めてからは金曜の帰宅時間が夜明け前になることすらあり、家族には申し訳ないことであった。奥さん不在の時期は必ず終電近くまで職場にいるキューバ人、20 時頃の奥さんからの電話で慌てて職場を出るウクライナ人、日曜に職場に行くとかならずいるオランダ人、などなど核データ課の同僚には仕事熱心な人が多い。

核データ課では居室のドアは開けたままになってい



図 3 IAEA 本部近くの池でそり遊びする子供たち

る。査察官の居室などを除けば IAEA では居室のドアに鍵がかからないので、不在時ですら居室のドアは開けっ放しである。最近定年退職した同僚 (ロシア人) がドアを閉めるのは、本国にいる耳の遠い年配の研究者と電話をするときであった。居室のドアが開いているので同僚同士いつでも気軽に議論できる雰囲気だが、核データ課にはさらに 10 時と 15 時に Coffee Club がある。当番の課員が珈琲を抽出し、用意ができると “Coffee is ready” というメールを課員に出す。すると気の向いた課員が集まってきて珈琲茶碗片手に雑談、というそれだけのことであるが、これが課員同士の意思疎通をはかる貴重な場になっているように筆者は思う。

毎年 1 月になると、去る 1 年の成果と来る 1 年の計画をウェブシステムに入力し、その内容についての上司とのやりとりも含めて報告書 (Performance Review Report) にまとめる。論文数は課全体の成果指標 (Performance Index) ではあるが、職員個人の論文数は問題にならない。

給与に関しては国連共通制度 (UN Common System) の俸給表が適用される。年金は国連合同職員年金 (UNJSPF) に加入することになり、5 年以上在職すると受給資格が生じる (5 年未満在職では利子をつけて掛け金が退職時に返却される)。祝日は年に 10 日あり、これはオーストリアの祝日 (年 13 日) とは必ずしも一致しない。オーストリアの建国記念日 (10 月 26 日) は IAEA の祝日でもある。しかもこれが週末に重なった場合、振替休日のないオーストリアの人々が暦通りに出勤するのに、IAEA はわざわざ振替休日を確保して祝意を表す。健康保険に関してはベルギーの民間保険会社が運営するものかオーストリアの国民健康保険 (Wiener Gebietskrankenkasse) を選ぶことになり、筆者は前者を選んでいる。まず全額を自分で支払ってから所定の様式を埋めて領収書とともに保険会社に送ると、保険会社負担分が筆者の口座に振り込まれる仕組みである。領収書を取って置かねばならない、医者にかかる都度様式に数字を埋めて領収書とともに保険会社に送付しなければな

らない、保険会社からの振込は忘れた頃にやってくる、など日本の健康保険に比べて面倒が多い。

## V. 会議と出張

IAEA での日常的な仕事の多くは既に日本でも経験していたことであったが、会議や出張については、手続きなどに独特なものも多く、新鮮に感じるが多かった。

一定規模以上の会議の開催にあたっては、ウィーンにある各国の政府代表部に参加者の推薦を依頼し、それに対する返信を受けて、IAEA は参加者に招待状を発送する。オーストリアへの入国に際して査証が必要となる参加者にとっては、この招待状を時間に余裕を持って受け取ることが大切となる。会議はウィーン以外で開催することも可能で、筆者の場合これまでに日本のほか、中国、スロバキアなどで開催したことがある。ウィーン以外で会議を開催する場合には現地政府との協定 (Host Government Agreement) が必要となる。これに関して記憶に残っているのは、ある国際機関の本部で会議を開催したときのことである。その本部が設置されている現地の政府との協定手続きをはじめたところ、官憲の力の及ばない国際機関敷地内での安全確保に関する条文の問題点を現地政府から指摘され、他方、開催の意図を現地政府に問い合わせたことに対して (現地政府と独立して任務を遂行する立場である) 国際機関側から懸念が表明され、と思わぬところで時間を要した。

出張の準備の中で IAEA らしいと感じることのひとつは、国連の安全保安局 (Department of Safety and Security) が提供する “Basic Security in the Field” という教程 (e ラーニング) の受講である。車が襲われたらどうするか、地雷地帯に迷いこんだらどうするか、宿泊の際にはどのような部屋を選ぶか、難民に配給を行う際にはどのようなことに配慮するか、などフィールド活動の多い国連らしい項目が並んでいる。出張にあたっては通常の旅券に代わるものとして国際連合通行証 (通称「レセパセ」*laissez-passer*) を用いる。日本旅券所持者に査証を免除している渡航先であっても、出張の際にはこのレセパセに査証を貼り付けて渡航する。かつては国連ウィーン事務局にレセパセの発行機能があったが、IC 旅券化されて以降は国連ジュネーブ事務局で発行されたレセパセをウィーンで受け取る方式が変わった。このレセパセを有効な旅行証明書として承認することは「国際連合の特権および免除に関する条約」によって国連加盟国に義務付けられているはずなのだが、ある常任理事国はレセパセを認めておらず、ここに出張する際には日本の旅券に査証をもらってでかけている。この査証 (O ビザ) を知人に見せたところ「これは歌手や野球選手など特殊技能の持ち主に発給されるものだ」と珍しがられた。筆者が赴任した当時はロシアもレセパセを認めていなかったが現在は認めているようである。



図4 絶壁上で弁当を広げる学生(インド・ミゾラム州)

用務後に有給休暇を取ってからウィーンに戻ることも可能で、鉄道好きの筆者は、初のロシア出張の際にモスクワからウィーンまで 36 時間かけて列車で帰ってきた。ベラルーシ・ポーランド国境で軌間が広軌から標準軌になる関係で、国境のプレスト駅で台車交換のために車両ごとジャッキで持ち上げられたのには驚いた。出張で訪ねたロシアの都市の中では閉鎖都市サーロフも思い出深い<sup>3)</sup>。この3月にはインド東部のメガラヤ、ミゾラム両州での用務を終えたあとに、友人とミャンマー(ビルマ)国境に近い山岳地域をハイキングした。辺境の地を行軍させられた餓死寸前の日本兵のことを思うたびにため息が出た。ちなみにミゾラム州には Bekang という日本の納豆とほぼ同じ食品がある。友人のおばあさん手造りのものを彼の自宅でご馳走になり、うまいといったところ、ハイキングの際にわざわざ納豆とご飯を弁当箱に詰めて持たせてくれた。インド北東部が日本やインドネシアとともに納豆大三角形の一角を担っていることを、中尾佐助が照葉樹林文化との関係で指摘している<sup>4)</sup>。納豆の手作りはアンモニア臭が発生するなど容易でないが、インドでの納豆との出会いをきっかけに家内が試みたらうまくいって、今ではこれが毎朝我が家の食卓にのぼる。

日本在住時は特に関心もなく訪問する機会もなかったアジア諸国に IAEA の用務で訪れる機会が増えたことは筆者の視野を大いに広げた。日本学術振興会の事業「アジア地域における原子核反応データ研究開発の学術基盤形成」の関連行事にウィーンから参加する機会を何度か得たことは、アジア諸国の研究者との関係強化に大いに役立ち、現地の大学院生の公刊論文作成に参加するなど様々な形で交流を深めている。かつて筆者に無縁なバックパッカーの世界であったインドを訪れる機会も多く、しかし胃腸に何の問題もなく滞在を終えられたことが未だかつてない<sup>5)</sup>。渡航先によっては、あらかじめ職場の旅行医療室 (Travel Clinic) に立ち寄って肝炎・腸チフス・黄熱病などの予防接種を受け、世界保健機関 (WHO) が作成した予防注射手帳に記録をもらう。予防接種のないマラリアについては予防薬を渡されるが、副作

用の強さに恐れをなして、未だ服用には踏み切れない。

## VI. 仕事以外のこと

赴任後、気ままな独身生活から所帯を持つ生活に移行したことは、筆者の人生の一大転機であった。「ウィーン愛憎」<sup>6)</sup>という在留邦人の一部で良く知られた本には、市役所にて格安かつ雰囲気ある結婚式を挙げるくだりがある。これを真似ようと、それまで何の接点もなかった役所に書類を受理してもらうまで何度も通い、役人の祝辞の理解に必要だということで法廷通訳とも打ち合わせをした。披露宴は身内のごく小規模なものを現在の我が家近くのホイリゲで行った。子供は二人ともウィーン生まれだが、オーストリアは日本同様に血統主義をとるので、両親とも日本人である家庭では国籍選択の問題は生じない。子供たちはドイツ語の幼稚園に通っており、上の子はこの秋から地元の初等学校(Volksschule, 4年制)に進学する。成績の付け方など先生に相当依存するようで、また独語や数学に少しでも悪い成績がつくと中等教育学校(Gymnasium, 8年制)への進学が厳しくなると聞く。次年度に新入生を担当する先生の情報を集めて小学校応募時に希望を伝えるなど、母親の苦労は絶えない。普段の家族サービスの不足を補うべく夏にはまとまった休暇を取るように心がけている。過去2年はオーストリア最高峰であるグロースグロックナー山(Großglockner, 3,798 m)山麓の東チロルの村に1週間ほど滞在し、家族で連日ハイキングを楽しんだ。

ウィーン国際センター(Vienna International Centre)にはIAEA以外にも国連工業開発機関(UNIDO)などいくつもの国際機関が同居している。これらの機関に勤務する邦人職員とその家族が親睦を深める場を提供するのが「在ウィーン国際機関邦人職員会」(UNVJ)である。2011年以降、講演会や演奏会などの行事を年に数回開催している。

## VII. 英会話に関する私見

研究室の教授に連れられてIAEAの会議に出始めた頃の筆者は議論が全く理解できなかったが、教授は大胆にもその私を単独で会議に送りこむようになった。当該分野の論文を読み続け、各国の関係者と議論をつづけるうちに、その場しのぎの英会話でもなんとかなりそうだという気がしてきた。相手の話す内容の理解が話題の背景知識の有無に相当に依存するらしい、と気付いたのもこの頃である。「英語で仕事ができるかどうか不安のある人は、英語を十分マスターするまで応募は差し控えてほしい。」という意見もあるようだが、管理職に応募するなどの場合は別として「習うより慣れる」でもいいのか。海外での実務を通じて英会話が上達すれば儲けもの。もっとも、応募者の印象は面接に大きく左右されるようなので、運良く面接通知がきたら、複数の外国人

を相手とする想定問答の徹底練習をお勧めしたい。

## VIII. おわりに

以上、筆者のウィーンでの生活について思いつくまま書きならべてみた。専門職員以上のIAEAの職員千名余のうち邦人職員は20名前後である(この他に費用を日本側が負担している職員が20名~30名いる)。この数字に大きな変動はなく、ウィーンの日本政府代表部も2015年の学会の春の年会でIAEAの採用に関するセッションを企画するなど、ここ数年邦人職員増強に特に力を入れている。実績ある専門家を期限付で採用する仕組みなので日本からの応募者が少ないのはやむをえない。ただ、筆者以外にも出向元を持たない理学系研究者2人が専門職員として長期在職されており、研究内容がIAEAの事業と合致するポスドク研究者にとってIAEAへの応募は検討の余地があると思う。また、IAEAにて定年(65歳)を迎えるという方法もあり、私の赴任後にも複数の専門家が企業を辞めてIAEAで活躍されている。インターン制度を利用する邦人大学院生も多く、筆者も若さあふれる邦人大学院生との職場やホイリゲでの交流を楽しんでいる。今なら官民協働実施の留学支援制度「トビタテ!留学JAPAN」なども活用できそうである。

核データは普遍的な物理量であり、その信頼性向上を通じてあらゆる平和利用に備える核データ事業は、各国の研究者が英知を結集して当たる国際事業に極めてふさわしい。“Atoms for Peace”という標語を掲げるIAEAでその任に当たれることを日本の原子核物理研究者として誇らしく思っている。その勤務が充実するあまり帰宅の遅くなりがちな筆者に対して家族は大変に寛容である。これらのことに謝意を表して本報告を終える。

### — 参考資料 —

- 1) 大塚直彦・河野俊彦, 核データ考古学 Nuclear Data Archaeology, 核データニュース No.106, p72 (2013).
- 2) 大塚直彦, 国際核データベース, 放射化学 第31号, p12 (2015).
- 3) 大塚直彦, サーフ訪問記, 核データニュース No.101, p69 (2012).
- 4) 中尾佐助, 料理の起源, 吉川弘文館 (2012).
- 5) 大塚直彦, インドの核データ収集 EXFOR ワークショップに参加して, 核データニュース No. 99, p21 (2011).
- 6) 中島義道, ウィーン愛憎—ヨーロッパ精神との格闘(中公新書), 中央公論社 (1990).

### 著者紹介



大塚直彦 (おおつか・なおひこ)

国際原子力機関 原子核科学・応用局理化学部核データ課  
(専門分野/関心分野)原子核物理, 核反応理論・実験, 核データ

# IoT を巡る国内外の動向

## スマートマニュファクチャリングへ向けたドイツ、アメリカ、日本の活動

産業技術総合研究所 澤田 浩之

IoT が次世代の産業・社会・経済のインフラとして急速に進展しつつある中、これを単なる技術革新に留まらないビジネス環境の変化として捉え、ものづくりの現場で新たな付加価値創出の枠組みを築き上げることが求められている。ドイツの Industrie 4.0、アメリカの Industrial Internet や Manufacturing USA を追う形で、日本でも官民を巻き込んだ活動が進められている。そのような中で、ものづくり企業には、IoT を活用した新たなものづくりの展開を考えることが必要とされている。

**KEYWORDS:** *Industrie 4.0, Industrial Internet, Standardization, Industrial Value Chain Initiative, Robot Revolution Initiative*

### I. はじめに

ドイツが2013年に第4次産業革命、いわゆるインダストリー4.0を提唱して以来、IoT (Internet of Things, モノのインターネット) が世の中の注目を集めている。その基本にあるのは、「通信技術と計測技術が進歩した結果、様々なデータを大量に取得できるようになったので、これらのデータを有効活用すれば、今までできなかった何かすごいことができる。」という考えであり、インダストリー4.0は、この考えに基づいた製造産業におけるビジョンを提示したものと言える。

本解説では、国内外の製造業周辺におけるIoTを巡る動きや、国際連携および標準化活動の状況について紹介する。

### II. 各国の動向

#### 1. ドイツの動き

ドイツでは、政府が2010年に発表した「High-Tech Strategy 2020 Action Plan」の一環として、製造業の高度化を目的とした産学官共同のアクションプランである

*International and Domestic Trends over IoT: Activities for Smart Manufacturing in Germany, U.S. and Japan*: Hiroyuki Sawada.

(2017年5月22日 受理)

Industrie 4.0 が推進されている。Industrie 4.0 は、サプライチェーン間および工場内の生産設備や部品間をネットワークでつないだ高度な製造システム(つながる工場、考える工場)を実現することでドイツ製品の輸出競争力を強化し、さらに生産設備間の情報交換のためのドイツ発の国際標準規格を作ることを通じて、ドイツ生産技術(ドイツ製の生産設備)で世界の工場を席巻することを意図しているとされる。参加主体は政府(総額3.5億ユーロ以上を助成、連邦経済エネルギー省、連邦教育研究省)、企業(ドイツ内外の主要企業: Siemens, SAP, Bosch, Daimler, ABB など)、大学である<sup>1)</sup>。

Industrie 4.0 は、現実世界をセンサーやデータを通じてサイバー空間に取り込み、サイバー空間におけるシミュレーション・分析で得た解析結果や予測を現実社会へとフィードバックする Cyber Physical System (CPS) による第4の産業革命と位置づけられ、開発・生産・サービスといったバリューチェーンで扱う情報を細かくリアルタイムに吸い上げ、これを製造装置の制御や生産管理に用いることで効率、品質、生産性、信頼性、市場投入までの時間を大きく向上させることを企図している。これを実現するために、工場をつなげるための標準化とオープン化を特に重視しているのが大きな特徴である。

ドイツでは元々2006年に初めて「High-Tech

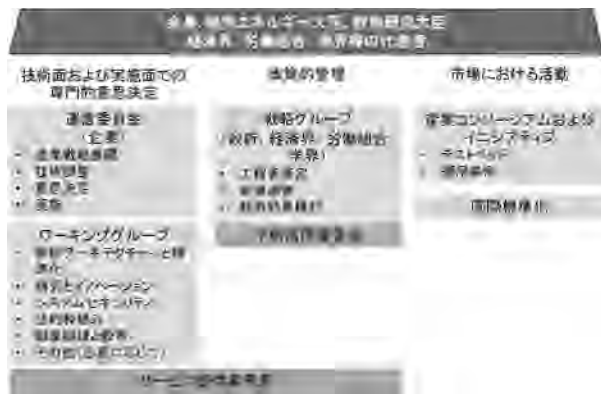


図1 Platform Industrie 4.0

Strategy」を策定し、その中で情報・通信・製造技術を重点化し、複数の研究開発プロジェクトを実施してきた。Industrie 4.0は、これらの研究開発プロジェクトを包括し、発展させるものとして位置づけられる。

Industrie 4.0の運営は、2013年4月に発足したPlatform Industrie 4.0<sup>2)</sup>という体制のもとで行われ、電機、通信、機械の工業会である3団体(ドイツ電気・電子工業連盟(ZVEI)、ドイツIT・通信・ニューメディア産業連合会(BITKOM)、ドイツ機械工業連盟(VDMA))が事務局を務めてきた。2015年3月には、政治的な管理を行う戦略グループが加わって体制が一新され、以下の5つの重点分野についてそれぞれのワーキンググループによる取り組みを進めている(図1)。

- (1) 参照アーキテクチャーと標準化
- (2) 研究開発とイノベーション
- (3) システムセキュリティ
- (4) 法的枠組み
- (5) 職業訓練と教育

なお、ここでいう参照アーキテクチャーとは、Industrie 4.0を構成する要素と機能を定義するものである。

これまで、Industrie 4.0の牽引役はSiemensやSAP等の大企業が務めており、さらに、固有技術を抱える中堅企業なども推進を支えている。Platform Industrie 4.0事務局は、これらの企業に加えて、大企業よりもエンドユーザーに近く、細かな要求に応えられる中小企業がニッチなニーズをくみ取り、Industrie 4.0を通じて連携し、付加価値の高い製品を製造していくことを期待している。一方、中小企業の間にはindustrie 4.0に対する警戒感もあり、また、主体的にIndustrie 4.0に取り組むことも困難である。

そこで、VDMAによる「インダストリー 4.0 導入ガイドライン」の発行や、Industrie 4.0の体験・相談窓口となるコンピテンスセンターの立ち上げなど、中小企業へ向けた取り組みが行われている。また、実証工場(テスト

ベッド)をベースとしたユースケース創出団体である Labs Network Industrie 4.0 の設立や、フラウンホーファー IPA による製造業向けアプリケーション構築・運用クラウドプラットフォーム Virtual Fort Knox の提供といった、Industrie 4.0 の概念を具体化する活動も進めている。

## 2. アメリカの動き

米国では、General Electric (GE)が中心となり、IBMやAT&T、Intel、Cisco Systemsも加わって2014年3月に創設されたIndustrial Internet Consortium (IIC)<sup>3)</sup>によって、Industrial Internetが推進されている。

Industrial Internetは、General Electric (GE)が2012年に提唱した産業用機器とITの融合に関するコンセプトである。Industrial Internetは産業用機器やセンサーをインターネットで接続し、データ分析技術と組み合わせることによる製造ソリューションサービスを提供することで既存産業の大幅な効率化や新産業の創出を目指しており、現在は、GEの得意分野(航空、電力、医療、鉄道、石油・ガス)を主たる対象としている。IoTを用いた製造革新という点では共通するが、ドイツのIndustrie 4.0があくまで製造が主役であるのに対し、Industrial Internetは、製造業のサービス事業化に力点をあてている点が異なる。

IICでは、Industrial Internetシステム構築のためのガイドラインを発行し、これに準拠した検証試験環境(テストベッド)の提案を参加企業から受け付けている。承認を得た企業は、そのテストベッドを用いて、現実に近い形でIoTソリューションの検証を行う。

IICが産業分野に重点を置いているのに対し、オフィス用あるいは家庭用機器の通信を対象とした業界団体の動きも活発である。2013年、Qualcommを中心としたAllSeen Allianceが設立され、2014年には、Intelが中心となってOpen Interconnect Consortium(OIC)を立ち上げ、さらにGoogleが主導してThread Groupを設立した。2016年、OICを継承したOpen Connectivity Foundationが設立され、これにはQualcomm、Microsoft、Electroluxも参加している。これらの団体が目標としているのは、国際標準規格の策定ではなく、既存の規格の範囲内での実装レベルの標準化であり、いわば業界標準の確立である。その中で、AllSeen AllianceとOpen Connectivity Foundationは機器接続用のソフトウェア、Thread Groupは無線通信プロトコルが対象である。

IoTでは、大量のデバイスがインターネット経由でクラウドに接続されることになるため、その通信やデータ処理に大きな負担が掛るものと予想される。それに対応し、デバイスとクラウドの間を取り持つソリューションを与える技術としてフォグコンピューティングという概



念が Cisco Systems により提唱され、2015 年、その開発と普及を目標とした OpenFog Consortium が設立された。創設メンバーは、ARM, Cisco Systems, Dell, Intel, Microsoft, プリンストン大学エッジ研究所である。

産業という点で見ると、ビッグデータ、人工知能への積極的投資が顕著である。政府関係では、ビッグデータイニシアティブ(ビッグデータ利活用に向けた2億ドル以上の研究開発投資)を進め、一方民間では、IT企業による人工知能への投資が活発化しており、Google による Deep Mind Technologies 社の4億ドルでの買収や IBM の Watson 事業強化が進められている。

このように、消費者に近い川下の領域での活動が活性化する一方、米政府は、川上の領域も押さえて米国の競争力を強化するため、3Dプリンタなどの米国が先行する製造技術に関わる横断的な研究イニシアティブ National Network for Manufacturing Innovation (NNMI) を2012年から進めている。NNMIは、民間資金とのマッチングによって設立する製造革新研究機構 (Institutes for Manufacturing Innovation, IMI) をネットワークで連携させるものであり、官民による共同研究の推進を目的としている。初期計画では15のIMIを設立し、10年間で45のIMIをNNMIに含めるとされる。NNMIは2016年10月に Manufacturing USA<sup>4)</sup>として組織が改編され、2017年4月現在、以下の14のIMIが設立されている。

- (1) America Makes(3Dプリンティング)
- (2) Power America(パワーエレクトロニクス)
- (3) LIFT(軽量金属材料)
- (4) DMDII(デジタル製造・設計)
- (5) LACMI(先進複合材料)
- (6) AIM(光集積回路)
- (7) NextFlex(フレキシブルプリントドエレクトロニクス)
- (8) AAFOA(先端機能繊維)
- (9) CESMII(スマート製造)
- (10) ARM(先進ロボット製造)
- (11) ARMI(細胞組織工学)
- (12) NIIMBLE(バイオ医薬品)
- (13) RAPID(化学プロセス)
- (14) REMADE(材料リユース・リサイクル・再製造)

### 3. 日本の動き

経済産業省が刊行しているものづくり白書では、IoTの進展により、ものづくり産業も大きな変革を遂げると予想し、製造業の新たなビジネスモデルへの対応を重要な課題として位置づけている。さらに Industrie 4.0 等

の各国の動きも見据え、我が国のものづくり産業の今後の方向性を検討することが必要としている。

具体的な国の動きとしては、ロボット革命実現のための推進母体として2015年5月に創設された「ロボット革命イニシアティブ協議会(RRI)<sup>5)</sup>」の「IoTによる製造ビジネス変革WG」の活動が挙げられる。2015年度には、産業機械及び中堅・中小企業についてのサブ幹事会を構成し、IoTの活用や協調領域の抽出、普及方策等について検討を実施した。それらの検討結果は、それぞれ中間報告書、報告書として公開されている。2016年度には、4月に発表された日独共同声明を受けて、(1)産業サイバーセキュリティ、(2)国際標準化、(3)規制改革、(4)中小企業、(5)人材育成、(6)IoTおよびインダストリー4.0に関する研究開発、の6分野でドイツ Platform Industrie 4.0との連携を行うため、その体制整備を行った。この他、サブ幹事会による検討の継続や、より具体的なテーマを少人数で議論するためのサブWGによるユースケース作成等を進めている。

2015年10月に総務省と経済産業省により設立された「IoT推進コンソーシアム<sup>6)</sup>」は、IoTやビッグデータ、人工知能などに対応し、企業や業種を超え、産官学でのデータ活用を促進するための組織である。大規模ICTサービス(センサーネットワーク)基盤テストベッドの整備やケーススタディのための企業マッチングイベントの開催、ユースケースに基づいたB2B(企業間取引)におけるデータ流通形態に関する審議、IoTセキュリティガイドラインの発行などを行っている。また、海外との連携促進のため、2016年10月には、Industrial Internet Consortium 及び OpenFog Consortium と MOU(覚書)を締結した。

経済産業省の事業「スマートマニュファクチャリングに関する国際標準化・普及基盤構築」は、IoTを活用したスマート製造に関わる国際標準化提案を目標としたものである。産業技術総合研究所と国内企業6社とで製造設備や機器を用いた実証実験を行い、それに基づいてデータ共有が可能な協調領域と秘匿すべき競争領域を定義し、データ共有のためのルールとして標準化する。ここで得た知見はドイツなどとも共有し、実際に世界で通用する提案を目指すとしている。

民間の動きとしては、2015年6月に設立された Industrial Value Chain Initiative (IVI)<sup>7)</sup>が注目される。これは、日本機械学会で2014年に組織された「インターネットを活用した『つながる工場』における生産技術と生産管理のイノベーション研究分科会」で得られた知見をもとにした組織で、日本の製造業のゆるやかな連携を基本としている。IVIでは、「つながる工場」のコンテンツの作り方、それを作るための場を提供することを目標とし、各社のしくみの個別性を許容した上で、その外側にある共通部分でつながることを志向している。

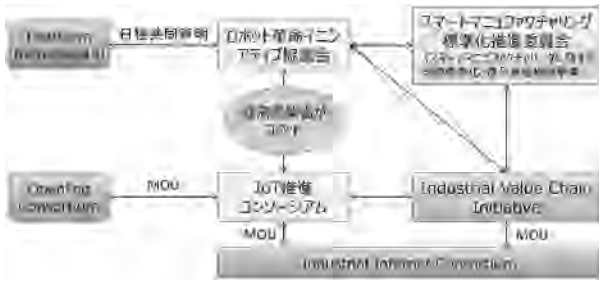


図2 国内組織の関係と海外機関との提携状況

IVIは、現在、この分野において国内で最も活動が活発な団体であると言え、2016年6月には一般社団法人化している。参加企業が構成する複数のワーキンググループが、それぞれの課題に基づいてAs-IsとTo-Beからなる業務シナリオを設定し、解決策を議論してシステム設計・試作を行うという、ボトムアップアプローチを採っている。多くの企業を取り込んだIVIの活動は海外からも注目されて高い評価を得ており、2017年4月には、IVIとIndustrial Internet Consortiumとの間でMOUが締結されている。

図2は、以上に述べた国内組織の関係と海外機関との提携状況を表したものである。図中、矢印は連携関係があることを示している。これらの組織には共通するメンバーも多く、参加者レベルでの情報共有もなされている。

### III. 国際標準化および国際連携の動き

#### 1. 国際標準化へ向けたドイツの動き

2013年4月、「戦略的イニシアティブINDUSTRIE 4.0実現に向けた勧告(Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0)」というタイトルの提言書が、ドイツ工学アカデミー(acatech)や有識者で構成されるドイツの産官学共同プロジェクト「Industrie 4.0 Working Group」からドイツ政府に提出された。この提言書により国際標準化がIndustrie 4.0の最重要課題として位置づけられることになった。2013年10月には、ドイツ規格協会(DIN)から以下の事項が提案されている。

- ・ Industrie 4.0プロジェクトの成功のためには標準化が最も重要
- ・ Industrie 4.0は、ドメイン、階層の境界、ライフサイクルフェーズを通じて、前例のないシステム統合を必要とし、コンセンサスベースの標準に基づいて構築されることによって成功
- ・ 標準化と技術課題は、国際標準化団体IEC、ISOや外部の組織とも密に協調することが不可欠

2014年4月、「Industrie 4.0に関するドイツの標準化

ロードマップ 1.0 版」がドイツ電気技術者協会(VDE)から公表された。このロードマップでは、Platform Industrie 4.0の標準化作業グループにおける検討作業を踏まえ、Industrie 4.0に関連する既存標準の概要や、Industrie 4.0を実施する上で求められる標準化ニーズ、今後の適切な標準を策定するための具体的提言が述べられている。

#### 2. 国際標準化活動の状況

IECやISOを舞台とした国際標準化活動は、2014年6月、IEC標準管理評議会(Standard Management Board, SMB)直下に、戦略グループSG8「Industry 4.0 - Smart Manufacturing」が発足したことに始まる。Smart Manufacturingに関わるIECおよびISOの組織の概略を、図3に示す。

戦略グループ(Strategic Group, SG)は、対象分野に関連する国際標準の開発担当技術委員会(Technical Committee, TC)及び小委員会(Sub-Committee, SC)に勧告を出す有期限組織である。SG8の活動は2016年6月に終了し、その後を受けて、Smart Manufacturingに関わるロードマップ作成等を行うためのシステム評価グループ(System Evaluation Group)SEG7が発足している。

これと並行してIEC市場戦略評議会(Market Strategy Board, MSB)ではSmart Manufacturingに関わる白書の発行に取り組み、2015年10月に「Factory of the Future」、翌2016年10月に「IoT 2020: Smart and Secure IoT Platform」の2つの白書を発行している。

IEC/TC65/SC65E/ahG1は、IEC/TC65の複数のグループが互いに重複や不整合が生じないように協調し、ユースケースをベースにSmart Manufacturing情報モデルの要件を定めることを目的として、2016年3月に発足した。その背景には、Smart Manufacturing実現のためには、個々の要素技術間の整合を取ることが必要との認識があったものと考えられる。

2016年4月には、将来像から想定される標準化要件の整理を行い、TC65全体の標準群のフレームワークやシステム・アーキテクチャなどの開発活動を提案すること

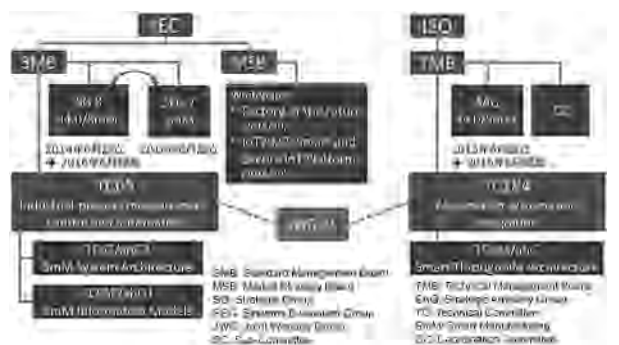


図3 Smart Manufacturing 関連のIEC およびISO 組織図

を目的として、IEC/TC65/ahG3が発足した。

一方 ISO では、2015 年 10 月に戦略諮問評議会 (Strategic Advisory Group, SAG)「Industry 4.0/Smart Manufacturing」が発足し、各種参照モデルの比較検討を行った。参照モデルとは、Smart Manufacturing の概念とそれに関わる標準規格との関係を俯瞰的に把握するためのモデルであり、ドイツの Reference Architecture Model for Industrie 4.0 (RAMI4.0)、IIC による Industrial Internet Reference Architecture (IIRA)、アメリカ国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) のモデルなどが知られており、日本からも、IVI が Industrial Value Chain Reference Architecture (IVRA) を提案している。SAG の報告は 2016 年 9 月に技術管理評議会 (Technology Management Board, TMB) に提出され、その中で Smart Manufacturing のビジョンが述べられている。この報告を受けて、TMB は、Smart Manufacturing に関わる各委員会間の調整を行う Coordinating Committee (SMCC) の設立を決議した。

2016 年 6 月、IEC/TC65 は、Smart Manufacturing 参照モデルの標準開発を目的とした Joint Working Group (JWG21) の設置を ISO/TC184 へ提案した。これを受けて ISO/TC184 では、この提案への対応と JWG21 設置準備を行うため、ahG「Smart Through Life Architecture」が発足した。

以上の経緯を図 4 に示す。図中の矢印は活動の対応関係を表している。

### 3. ドイツが牽引する国際連携

Industrie 4.0 のシナリオに従って、ドイツは国際連携も活発に行っており、2015 年から積極的に 2 国間連携を進めている。

- (1) 独中 Industry 4.0 覚書 (2015 年 7 月)  
ドイツ経済エネルギー省 (BMWi) と中国工業標準化部との間で覚書締結
- (2) Plattform Industrie 4.0 - Industrial Internet

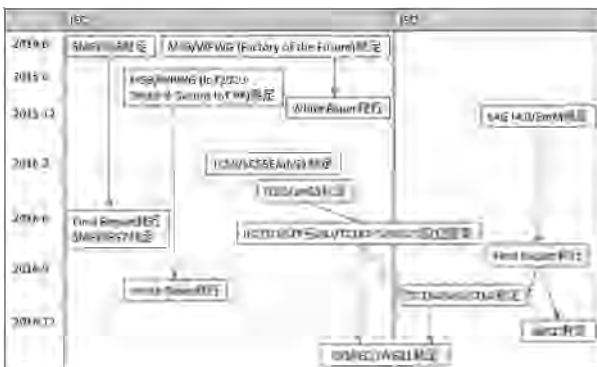


図 4 国際標準化活動の経緯

Consortium 連携合意 (2016 年 3 月)

- ・ RAMI4.0 と IIRA の相互運用性確保
  - ・ テストベッドの相互アクセス
- (3) 独仏共通行動計画 (2016 年 4 月)
    - ・ シナリオおよびユースケースの共有
    - ・ 独仏共通国際標準化ロードマップの作成
    - ・ テストベッドの相互アクセス
    - ・ 教育および研究協力
  - (4) 日独共同声明 (2016 年 4 月)
    - ・ ドイツ経済エネルギー省 (BMWi) と経済産業省との間で締結 (次官級)
    - ・ ドイツ Plattform Industrie 4.0 とロボット革命イニシアティブ協議会との連携

日独の関係では、2017 年 3 月に閣僚級の署名となるハノーバー宣言を発表し、さらなる連携強化を進めている。

## IV. おわりに

IoT の進展により、業務管理、事業展開、市場戦略などの面で、ものづくりに大きな変化が生じると考えられている。このときに鍵となるのは、計測技術や通信技術、あるいはビッグデータ処理や人工知能といった個々の技術そのものよりも、むしろそれらを使いこなし、ビジネスに結び付ける技術であり、構想である。

Industrie 4.0 で謳われている「つながる工場」と同様のコンセプトは、過去の研究開発事業などでもすでに言われてきたことであり、それ自体は決して新しいものではない。だが、当時、実用化は遠いとされてきた技術も、現実世界で運用可能とするための環境が整いつつある。

そのような中で、ものづくり企業には、IoT をどのように活用し、自身がどのようなものづくりを展開できるのかを考えることが求められている。

### — 参考資料 —

- 1) 科学技術振興機構、主要国における次世代製造技術の研究開発に係る政策動向、G-TeC 報告書 (2015)。
- 2) <http://www.plattform-i40.de>
- 3) <http://www.iiconsortium.org>
- 4) <https://www.manufacturingusa.com>
- 5) <https://www.jmfrri.gr.jp>
- 6) <http://www.iotac.jp>
- 7) <https://iv-i.org>

### 著者紹介



澤田浩之 (さわだ・ひろゆき)

国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
(専門分野/関心分野) 設計工学、数式処理、  
製造業における IT 利用技術

# アブダクションによるデータ解析

## ——計算予測結果を読み解く力——

日本原子力研究開発機構 中島 憲宏

シミュレーションを設計過程において活用するためには、それを使いこなす技術の他に、シミュレーションが紡ぎ出す膨大なデータの読解力が必要である。設計案に対するシミュレーション解の分析や評価過程に、人工物工学が提唱する「どの視点も取り入れた仮説・法則や行為を導出するためのアブダクション基盤」を取り入れ、想定外や見落としなどを最小化できるように人工知能などを活用したデータ解析技術の取り組みなどを概観する。

**KEYWORDS:** *Data analysis, Structural analysis, Assembly, Neural network, Design engineering, Computer aided design, Design Science, Artifacts, High Performance Computing, Artificial Intelligence*

### I. はじめに

設計は、多数の人間がかかわっている問題である。設計問題では、設計条件が定められるものの必ずしも厳格に規定されていない場合や、設計作業を行うために必要となるデータが不足している場合もある。また、設計の結果となる設計解と設計条件の関係は複雑であり、一般的にはよくわからない問題とされている。このような設計過程を科学する学術としての設計科学や、設計過程の効率化や設計対象の高品質化などを目指す設計工学という分野がある。それらの総合化体系を目指す学術として人工物工学が存在する。

設計過程において、設計解が出たとしても、その評価は必ずしも定まるわけではない。どういう結果が最も好ましいかを客観的に選択するために、複数生まれうる設計案を比較する必要がある。当然のこと、設計案の比較は多元的となり、異なる解の比較は論理的に判断することが難しい。このような設計空間にシミュレーションという設計計算技術はどうかかわるべきであろうか。また、シミュレーションが出力した計算結果をどのように分析し、評価するべきであろうか。

全く初めての設計対象と長年にわたり改修設計されてきた設計対象とでは、設計条件数やデータ量も異なる

*Data analysis based upon abduction ; For better understanding the result discussion in computational science and engineering :*  
Norihiro Nakajima.

(2017年5月31日 受理)

が、ここでは、個別の設計案件にとらわれることなく設計過程にシミュレーションという道具を導入した場合、シミュレーションの紡ぎ出す結果をどのように読み解けるか、いわゆる人工知能技術を活用したデータ解析技法とその関連技術について解説する。

シミュレーションという一般の設計計算手段よりも幾分か高度化された道具を用いると、どうかすると与えられた計算モデル、あるいは選択したモデルやシミュレーション手段の準備といった計算結果を得る過程に多くの時間をかけ、結果が出たことに満足してしまう傾向を否定できない。シミュレーションという道具を使いこなすのに疲れて、その結果を吟味しないのでは、まさに「もったいない」。加えて、せっかくシミュレーションという道具を使い、それが紡ぎ出した多くの情報を全て明察しないのでは、何のためにシミュレーションという道具を用いたのかということになる。一方で、厳密な意味での至大な設計解を求めることは相当困難であると述べた通り、その設計解がどれだけ求めるものに近づいたのかを知ることは、大きな価値がある。

設計およびシミュレーションの実施では、ある種の先入観を持って取り組まざるを得ないが、その先入観を躊躇なく改めるべきときに改められることは肝要である。そのためにも、先入観を改めた「より良い」設計解、例えば想定外な発現を縮小できるような設計解を創出する方法論の確立が重要である。完全なる要求仕様が設計対象に与えられたとしても、一般的にそれらの仕様を満たす設計解を解析的に求めることはできないのだから、なん

らかの初案を作って要求仕様を満たすまで改案するための分析過程は必須である。先入観は必要悪であるがゆえに、初案を肯定あるいは否定できる手段として、シミュレーション結果を様々な視点から分析しうるアブダクションを基盤としたシミュレーション結果の分析ツールを、筆者は提案している。

## 1. シミュレーションと結果の分析・評価

### (1) 設計と解析

目的を明示されている設計計算は、理論計算など単機能な計算手段で十分である。設計過程においてシミュレーションを活用する意義は、目的とする設計計算解を求めるだけでなく、どの視点も取り入れて計算結果を吟味することにある。フロント・ローディング設計に代表されるように、設計案ができたなら、まずはシミュレーションをする。その結果、当該設計案に対して、想定外や思いも知れない問題や過剰設計箇所が見つかるかもしれない。これは設計案をシミュレーションにより創出しようというものではない。シミュレーションはあくまで分析ツールであって、統合化ツールにはなりえないからである。重要なことは、どの視点も取り入れて設計案を分析してみるという行為である。

もしシミュレーションを単に設計計算の代替道具としてのみ使うのであれば、シミュレーション結果の分析は、定められた事項についてのみ分析すればよい。しかし、シミュレーションが出力する情報は多岐多様にわたり、従来の設計過程では必要としなかったデータまで出力できるため、これらの計算結果を吟味することにより、発見的に問題点や過剰設計箇所あるいは想定外の設計結果を見出せる可能性がある。余談だが、設計の目的事項だけを分析するのであれば、目的にあった単機能の計算を行えば十分であり、シミュレーションを実行したとしても単なる設計案の確認のためだけにというジレンマに陥る。この議論は、シミュレーションは設計過程に不要であるという計算機援用設計論という方法論への批判である。実際、シミュレーションを設計過程に導入するだけでは、この不要論問題は解決しないのである。

### (2) 人工物工学

吉川弘之元東京大学総長は、1992年に人工物工学を次のように提唱した<sup>1)</sup>。

「現在、我々は、環境、貧富、安全、健康など、多くの困難な問題(現代の邪悪なるもの)に直面している。これらに共通する点は、人類の安全と豊かさを求めてきた行為の結果として、全く予期せず生じた問題であるということである。人類はこれまで、知恵を駆使し、学問を構築することによって、多くのものを生み出してきた。しかし、現在の学問は領域性と視点の限定によって構築されたものであり、これらの問題の解決のために適用でき

ないのはおろか、むしろこれらの問題を生ぜしめた原因となっている。その解決のためには、人間が創出するものすべてを対象とし、領域を否定し、どの視点も取り入れることが可能な新たな学問を構築する必要がある。これは、従来の演繹を基盤とする学問ではなく、仮説・法則や行為を導出するためのアブダクションを基盤とした学問である。それを人工物工学と呼ぶ。」

ここでアブダクションとは、仮説形成や仮説的推論と和訳されることが多いが、推論という帰納法の一つであり、個別の事象を最も適切に説明しうる仮説を導出する論理的推論であり、個別的・特殊な事例から一般的・普遍的な規則・法則を見出そうとする論理的推論の方法のことである。帰納とは、演繹ではない推論をさし、具体的には枚挙的帰納法、類推、アブダクションの三種がある。ここで、数学的帰納法や構造的帰納法などの帰納法と称されるものは、名前上は帰納法とされているが、演繹手段であるものが多い。

演繹は、仮定と規則から結論を導く。仮定と規則に合致しているならば、その結論は真となる。妥当な演繹は、仮定が真であれば結論も真であることを保証している。帰納は、仮定したことが結論を伴ういくらかの事例を観察した結果、その規則はたぶんそうであろうと考えられるとし、ある程度確実であると推論する。帰納は、推論した規則が真であることを保証していない。

設計過程においては、先入観を持って取り組むことが強いられると前段で述べた。この先入観こそが仮説として立てられていく。しかし、人工物工学的には、あらゆる視点が肝要であるため、一つの先入観ではなく、複数の先入観から仮説を立てることになる。複数の先入観をいかにして立案すべきであろうか。逆説的にシミュレーションが紡ぎ出した膨大なデータのすべての組み合わせを考慮し、推論する考え方は、まさに視点限定を解除する方法となりえる。ここで、計算科学の出番がくる。なぜなら計算機は、ある領域をすまなく一面網羅する作業や処理を得意としているからである。つまり、膨大なデータの組合せを、計算機を用いて情報分析し、その結果から出力される多様な仮説を設計者に開示し、様々な視点からの分析結果を設計者に知ってもらおうのである。

## 2. データを活用するとは

人工物工学にもとづく設計では、データをどう活用するかが最大の課題である。シミュレーションが紡ぎ出した膨大なデータをどのように分析し、評価すべきか。演繹的な手段は容易に準備できる。体系化された経験則や技術者の勘、多くの設計対象物に対する寸法や性能、特性、動作条件等にかかわる推奨値や設計にかかわる報告書などが含まれるデータベース、工学的な例えば材料力学や統計学等を用いた定理や理論を駆使して、シミュレーションが紡ぎ出したデータを演繹的に分析あるいは

評価できる。これに加えて、仮説・法則や行為を導出するためのアブダクションを基盤とした分析あるいは評価を実現すれば、人工工学的な考察にもとづく設計過程を一部実現しえる。

人工工学では、データ活用を強化するモデル論が議論されている。人工物には多くのIT技術が含まれつつあるからでもあるが、人工物そのものや人工物システムの設計では、データをどう活用するかは、領域性と視点限定を排除していく上で重要な課題である。シミュレーションが紡ぎ出すデータの価値は、これらデータから抽出しうるデータの意味を判断して決まる。例えば、構造解析の場合、変位の持つ設計上の意味である。変位が許容量を超えると、その部品が機能しなくなる場合、変位量というデータの最大変位量すなわち許容量という仕様が変位量の評価において意味を与える。演繹的には、その許容量を超えたか否か、あるいはその値近傍にどのくらい近づいたかなどは分析・評価できる。このような分析は自動処理が容易である。モデル内では、許容量は変位量の意味ではなく、また変位量そのものでもないの、意味のメタファー表現となる。メタファーの表現は、「変位量は許容量である。」というように直接的に許容量の属性を変位量に移して記述するものである。こういったデータを活用していくためには、データベースすなわちデータ表現を記述するモデルが必要となる。シミュレーションが紡ぎ出すデータとそれらのメタデータ、そしてこの二つを連想結合させるデータがモデル内で記述される。このような、いわゆる知識ベースなどに類するデータモデルを構築することで、いわゆる人工知能技術を活用したデータ解析技法の確立が可能となる。

## II. 人間が考えるようなデータ解析

### 1. 生物学的な情報処理

電子的に動作する計算機械をコンピュータと呼ぶが、現在普及しているコンピュータはノイマン型と呼ばれるものが主流である。このノイマン型コンピュータを発明したジョン・ルートヴィヒ・フォン・ノイマンは、原子力分野にも大きくかかわった数学者であり物理学者である。演算能力に長けたノイマン型コンピュータに対して、コンピュータの機能を人間の知的活動に近づけたいという「思い」は誰にでもあったし、その思いを今も抱くこの分野の研究者は少なからずいる。ノイマンも例外ではなく、自己増殖オートマトンの理論を構築し、生物学的な情報処理やコンピュータの発案を同時期にしている<sup>2)</sup>。生物学的なコンピュータ例えばニューロ型コンピュータの発案もノイマン型コンピュータと同時期の1940年代に行われている。その流れは1980年代に至って、神経回路網プロセッサとして発表されている<sup>3,4)</sup>。情報工学の分野では、マルチタスク処理やデーモンと呼ばれるバックグラウンドプロセスとして動作するプログ

ラム、エージェントとそのマルチ化などが生物学的な情報処理技術の促進に寄与した。設計工学の分野では、沖野により自律的に自己の諸元を決定する概念として、オブジェクト指向の前身的あるいは揺籃期的存在であるモデル論が提唱され、1982年には具現化したものが現れ、1988年に生物型生産システムが提唱されている<sup>5)</sup>。人間社会はあいまいさがともなうということから、不正確さと不確実性を取り入れるためにファジー集合を情報工学に取り入れ始めたのは1960年代である。エキスパートシステムも1970年代に研究レベルではほぼやりつくされた。以上のように、人間の脳内処理を情報処理化しようとする研究は、それなりに長い歴史の中で行われてきた。中世の時代ではないがこの頃、人工的に知能を創るといことは、それこそ神をも恐れぬ研究だという議論もあったほどである。

Million Connections Per Second という生態情報処理速度を計る単位がある。これは1秒間に何百万回情報伝送がされるかというもので、人間の場合 $10^9$ MCPSと推定されている。そのようなことから、かのパーセプトロンとの係りも深いミンスキーのThinking Machine、いわゆる並列計算機の提案が始まる<sup>6)</sup>。心はどうはたらくのか？人間の知能についての新しい考え方を示し、心とは、「一つ一つは心を持たない小さなエージェントたちが集まってできた社会」と提示する。これが計算機内脳の一つの概念である。ちなみに彼が1954年に書いた学位論文は、Neural Nets and the Brain Model Problemである。

### 2. ニューロ

Deep Learningという言葉により、第4次か第5次かのニューラルネットワークや人工知能ブームが訪れている。人間の神経細胞を計算機上に具現化したものをニューロンと呼び、このニューロンを活用したシステムや仕組みをニューロコンピューティングであるとか、ニューラルネットワークなどと呼んでいる。研究の最終目標は、人間に近い能力を持ったコンピュータシステムの実現である。人間の脳が科学的に解明されているわけではないので、分かる範囲と推察可能な範囲で人間の脳をお手本にして、研究が進められている。

計算機上に具現化されたニューロンは、ユニットとかセルあるいはProcessing Elementなどと呼ばれ、多入力1出力を基本とする。出力の特性関数として0と1が切り替わるようなステップ関数や0から1へ滑らかに変化するようなシグモイド関数など様々な応答特性が提案されている。このニューロンをたくさん集めて結合させることで脳のモデル化を進めており、ニューロンを計算機上でネットワーク化し、システムを形成している。ネットワークの形式ではそれぞれのニューロンが直接結合する相互結合型ネットワークや上下の階層間のニュー

ロが互いに結合する階層型ネットワークなどがある。ニューロンは外部環境に合わせて自身を変化させて調整するという学習機能があり、これを自己組織化と呼んでいる。簡単に言えば、自動プログラミングに相当する。この学習機能は、多入力の入力データにそれぞれ重みをつけるというもので、100個のニューロンの相互結合型ネットワーク型の場合だと、99の入力に重みがそれぞれ割り振られることになる。この重みを例えば0から9までに整数で与えるとすれば、10段階の重みと100個のニューロンからなるシステムでの組合せ(10の100乗)について重みをどうつけるかという評価をしなければならなくなるため、高性能な計算機が必要となるわけでもある。この評価処理においては、教師付きと教師なし型の学習方式が提案されており、外部から正解を与えるものを教師付き学習と呼んでいる。

人間の脳の神経細胞は百億個以上あるともいわれており、それに近づくためのシミュレーション環境として、超並列かつ高度分散処理を可能とするコンピュータが必要である。京(毎秒1京回の浮動小数点演算ができることから、 $10^7$ の和式の単位から由来として命名)というコンピュータで705,024並列、現在、世界最高水準といわれる中華人民共和国の神威・太湖之光で10,649,600並列であり、Thinking Machineの具体化が見えつつある<sup>7)</sup>。

### III. Cerebral Methodology in Data Analysis

設計計算においてシミュレーションを有効活用しようとするならば、シミュレーションが出力しうる全ての情報を活用すべきである。設計者は設計の目的のために何をすればよいかは理解しているが、シミュレーションが何を出力しうるか、その詳細までは必ずしも見えていない。そこで、CAEシステム等が具備するポスト・プロセッサや可視化ソフトウェアにより、シミュレーション結果の確認をするだけで終わらせないために、シミュレーションが紡ぎ出すデータをくまなく分析・評価するためのシステムとして、Cerebral Methodology in Data Analysis Systemを提案している<sup>8, 9)</sup>。

これは、一つに当該設計案に対して、想定外や思いも知れない問題や過剰設計箇所を確認できるようにするための研究でもある。このシステムでは、演繹的データ解析と帰納的データ解析を図1に示すように分散並列計算で実現している。演繹的データ解析処理部では、規定、規程、科学則、工学則、技術則、設計則、経験則等からシミュレーションが紡ぎ出すデータを統計的技法により分析する。帰納的データ解析処理部では、枚举的帰納、類推(Analogy)、仮説形成(abduction)からシミュレーションが紡ぎ出すデータを分析する。それぞれに作図可視化解析と作画可視化解析処理部を設けているが、これはCAEシステム等が具備するポスト・プロセッサ機能と同等のものであり、シミュレーションが紡ぎ出した

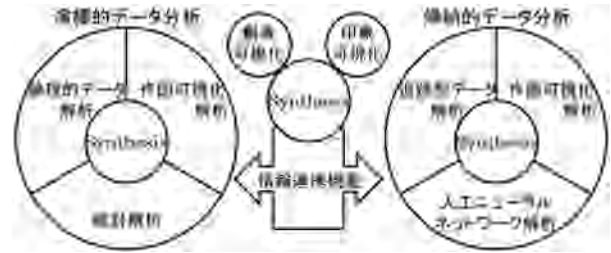


図1 Cerebral Methodology for Data Analysis System



図2 四辺形有限要素の等高線模式図

データそのものを可視化し、シミュレーションが紡ぎ出したデータの分析結果を視覚的に提示し、ドキュメント化するものである。作図可視化解析処理部では、情報可視化(グラフ等の作画)を行う。作画可視化解析処理部では、画像・映像可視化、可視化画像の画像解析結果の可視化を行う。Synthesis処理部は、シミュレーション結果の設計データモデルを駆使して、知見の統合化をする。そして分析結果の帰結を求めるために、Cerebral Methodology for Data Analysisでは演繹的な分析と帰納的な分析の両方結果を統合(Synthesis)して、一つの結論を導く。

本システムの一つの特長であるニューラルネットワークを用いたアブダクション解析は、濃度特長処理による画像データのパターンマッチングにより実現している。有限要素法を用いた構造解析の結果得られた物理量、例えば応力値を等高線で描画した場合、一つの有限要素における等高線図は図2に示すような、濃淡分布に分類できる。濃度特長処理では、図2に示すように濃淡が一つの四辺形有限要素内で変化するマスクパターンを用意しておき、実際の四辺形要素の等高線図画像における標本点の色を観測し、四辺形要素内の全ての標本点の濃度の総和を濃度特長として出力する。このとき、四辺形要素内を  $n \times n$  の格子状に分割した小領域をそれぞれ標本点とすれば、 $n$  の数が多いほど精緻な特長抽出となる。

具体的には、四辺形要素内等高線パターンを  $S(u, v)$ 、マスクパターンを  $MP(i, j)$  とし、標本点の座標を  $(u_p, v_p)$  としたとき、その標本点での濃度  $C(u_p, v_p)$  は、  

$$C = \sum \sum MP(i, j) \cdot S(u_p+i, v_p+j)$$
 である。

このようなやり方で、時刻歴変化のある可視化した画像の類似性を比較し、四辺形有限要素の画像を個々にパターンマッチングしながら状態を推論する。これは数値でもできることだろうとの反論もあるが、数値で行う場合には同じとみなす閾値の設定に恣意的な操作が加わ

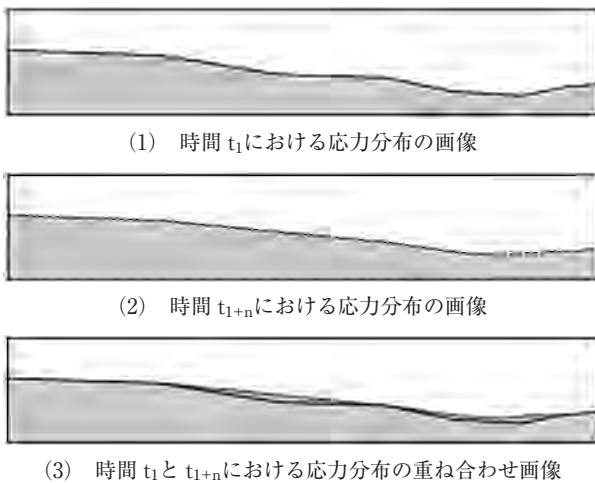


図3 応力分布の画像比較模式図

る。ニューラルネットワークを用いた解析では、閾値と言えさうではあるが、ある程度、こんな感じという曖昧な推論をしていくことが可能となる。これにより、図3の(1)と(2)に示すような実線と破線で示した等高線図は、それらに違いはあるものの図3の(3)のように人間の目で見て概ね一致しているという推定が可能となる。すなわち、シミュレーションの結果データから判断論理を導出し、仮説形成をしながらデータ解析を行うことになる。例えば、50秒間の時刻歴変化のあるシミュレーションが0.1秒刻みで計算結果を出力した500ステップ分の状態図を当該機能で分析した結果、図3の右手方向に応力負荷がかかっているということがミーズス相当応力の分布からわかり、これを仮説として、剪断力の分布などを同様な手段で分析していくことにより、帰納的帰結として図3の右手方向の耐力要件を評価することになる。このように人工物工学的な手段により、本システムは帰納的分析や帰納的帰結、すなわちアブダクションに重きをおいた分析を実現している。

本システムのもう一つの特長であるデータを活用したどの視点も取り入れて計算結果を吟味する機能は、演繹的な分析と帰納的な分析の両方結果を統合(Synthesis)する機能により具現化している。ここでいう統合とは、演繹的な分析結果と帰納的な分析結果という知を比較分析した結果を、本システムが有するデータモデルから伝達される知により判断する過程である。図3を例にとれば、演繹分析では、過大応力は見当たらないと判定するも帰納分析では応力の分散には偏りがあり、しかも特定の部位にのみ集中する傾向がある、となる。この二つの分析結果を比較することにより、この設計対象が必ずしも均一の断面をもった構造である必要はないというような総合知を獲得するのである。

#### IV. おわりに

多くの設計工学や設計科学に従事された方々は、経験

則や技術者の勘をきちんと体系化すべきであると主張してきている。また企業においてもノウハウの蓄積は重要とされ、継承されてきている。こういった経験則や特性値等を活用して、分析や照合を行うことの必要性はよく認知されている。しかし設計上、絶対はない。すなわち、モレやヌケは人間が考える以上あり得るし、コストや目的の限定からくる仕様外の議論はついてまわる。その意味では、エキスパートシステムのような演繹的手段のみでは人工物工学的な分析は不十分である。一方で、PL法に代表されるように製造側の責任は、消費者側によって訴求されるものでもある。想定外を排除していくためには、利用できるもの、例えば人工知能や計算科学をどんどん利用して、人間の英知を設計の中で高めていくべきと考える。人工物工学が重要と考えるあらゆる視点からの行為、例えば観察という行為を考えるとアブダクションを用いた仮説形成による分析は必要不可欠である。必要なデータだけを分析しているとすれば、シミュレーション活用として「もったいない」のである。

#### — 参考資料 —

- 1) 藤田豊久, 太田順(編), 人工物工学入門, 東京大学出版会, (2015).
- 2) Neumann, J.V. (高橋秀俊監訳), 自己増殖オートマトンの理論, 岩波書店, (1975).
- 3) Farhat, N.H., Psaltis, D., Prata, A. and Paek, E., *Optical implementation of the Hopfield model*, *Applied Optics*, Vol.24, No.10, pp.1469-1475, (1985).
- 4) Takeda, M. and Goodman, J.W., *Neural networks for computation: number representations and programming complexity*, *Applied Optics*, Vol.25, No.18, pp.3033-3046, (1986).
- 5) 沖野教郎, 生物型生産システム-集中から分散へ, 朝倉書店, (1993).
- 6) Minsky, M. (安西 祐一郎訳), 心の社会, 産業図書, (1990).
- 7) <https://www.top500.org/lists/2016/11/>
- 8) 木野千晶, 鈴木喜雄, 西田明美, 櫛田慶幸, 林幸子, 中島憲宏, 認識能力を備えたデータ解析システム概念設計, 日本計算工学会論文集, 2008(P200818), pp.1-8, (2008).
- 9) 木野千晶, 鈴木喜雄, 宮村浩子, 武宮博, 中島憲宏, 物理的意味の認識を可能とするデータ解析システムのための科学概念語彙モデルの提案, 日本計算工学会論文集, 2009(P200922), pp.1-8, (2009).

#### 著者紹介



中島憲宏 (なかじま・のりひろ)

日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター, 東京大学 人工物工学研究センター

(専門分野/関心分野)設計工学, 構造解析, 計算科学, 可視化, 認知科学



## 断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策

「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会 鈴木 義和, 他

日本原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会は、その検討成果を「断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策」と題して報告書に取りまとめ、日本原子力学会ホームページで公開している。同報告書の解説シリーズである本稿では、断層変位のハザード評価について紹介する。

**KEYWORDS:** *fault displacement, geological investigation, numerical simulation, Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA)*

## I. はじめに

日本原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会(主査：奈良林直(北大)、以下「本調査専門委員会」という)は、活断層の活動等に伴って生じる断層変位も外部ハザードの一つと捉え、断層変位の施設に与える影響に関する工学的な評価手法について、関連する多分野の専門家の協働により調査・検討を行った。2014年10月からの2年半の調査・検討の成果をとりまとめ、報告書「断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策」を本年3月末に公表した。

([http://www.aesj.net/sp\\_committee/com\\_dansou](http://www.aesj.net/sp_committee/com_dansou))

本稿では、解説シリーズ(その1)<sup>1)</sup>、(その2)<sup>2)</sup>に引き続き、施設の影響評価を実施するに際して入力情報となる断層変位のハザード評価に関して、本調査専門委員会で体系的にとりまとめた内容について、概要を紹介する。

## II. 断層変位について

地盤には、断層面に沿ったずれ(断層変位)や、傾斜撓み等の変形を生じる場合がある(以下「地盤の変位・変形」という)。これら地盤の変位・変形は、震源断層の活動に伴って生じるものと、震源断層の活動以外を成因とするものに大別される。震源断層面上のすべりが大きい場合には、地表地震断層として地表に断層変位が出現す

る。特に同様な活動が繰り返し起きた結果、主要な地表の痕跡(変位・変形)は断層崖等の変動地形を形成して、活断層として認識されている。しかし、地表地震断層とは大地震時に地表に現れる断層の総称であり、その中には、震源断層の地表延長部である主断層及び主断層から派生した分岐断層と、それらの周辺に副次的に生じた副断層がある(図1)。

国内の活断層について、その活動間隔を調査した結果によれば、平均活動間隔は数千年、短いものでは数百年、長いものでは数万年である。よって、最近の地質年代である後期更新世以降(約12万~13万年前以降)に最低でも1回は活動していると考えられる。また、地表における1回当たりの変位量は数十cm~数m~10m程度である。副断層の変位量について、高尾ほか(2013)<sup>3)</sup>は、国内の気象庁マグニチュード(Mj)5.8以上の107地震を調査し、副断層が発生した19地震について整理し、主断層の変位量で基準化した副断層の変位量(副断層の変位量÷主断層の変位量)と主断層からの距離を整理している。副断層の変位量は主断層の変位量に比べ小さく、主断層からの距離が離れるに従い変位量は減少する傾向にある

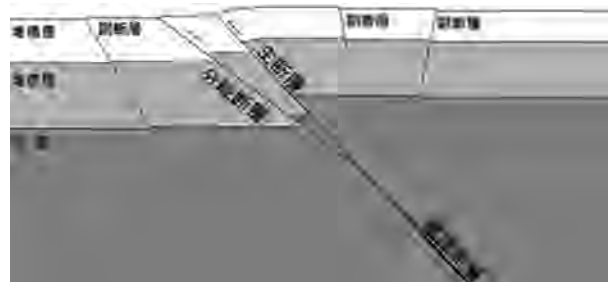


図1 断層の形態

*Risk evaluation method for fault displacements by engineering approach (3) ; Hazard analysis for fault displacements : Yoshikazu Suzuki, Makoto Takao, Kazuo Tani, Haruo Yamazaki, Koji Okumura, Kazuo Konagai.*

(2017年5月29日 受理)

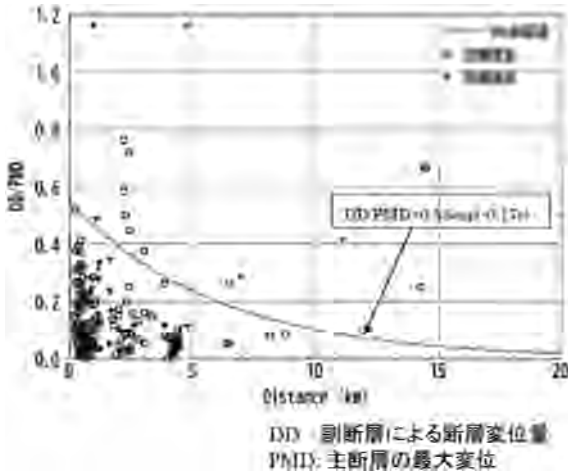


図2 主断層からの距離と基準化した副断層の変位量

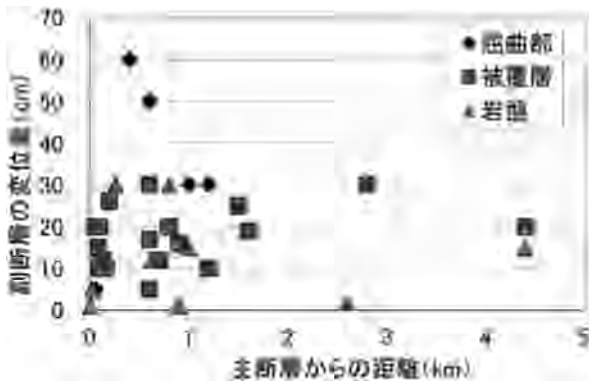


図3 主断層からの距離と副断層の変位量

(図2)。また、原子力安全推進協会(2013)<sup>4)</sup>は、明治以降の約120年間に国内で発生したMj6.5以上の地震について、地表地震断層の調査記録から変動地形に対応しない箇所に出現した副断層の変位量を抽出し、整理している(図3)。

一方、後者すなわち震源断層の活動以外を成因とする断層については様々なものがある。変位・変形が将来起こり得るものについては、その成因に応じて施設に対する影響評価を行うことになるが、本稿では前者の震源断層の活動に伴って生じる変位・変形を対象に述べる。

### Ⅲ. 断層変位ハザードの評価手順

断層変位ハザードの評価手順の概要を図4に示す。まず、施設が立地する位置を含む敷地及び敷地周辺の地形・地質・地盤調査を実施し、断層の分布や活動性等に関する評価を行う。

検討においては、決定論的な検討に用いる断層変位量(以下「検討用の断層変位量」という)と、確率論的な検討で用いる断層変位ハザードカーブの双方を扱う。

### Ⅳ. 地形・地質・地盤調査

施設の設置地盤に存在する断層が施設に及ぼす影響に

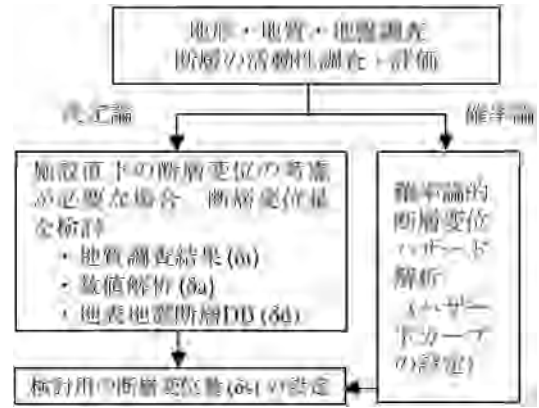


図4 評価手順

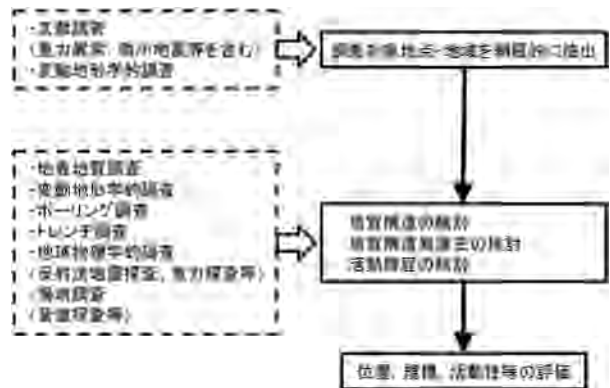


図5 断層調査の流れ

ついて検討するため、詳細な地形・地質・地盤調査により断層の分布・性状並びに後期更新世以降の活動を評価する必要がある。

図5に断層調査の基本的な流れを示す。文献調査、変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査等を適宜組み合わせ、施設設置位置、敷地及び敷地周辺の地質・地質構造を把握し、断層の分布、規模、性状、活動時期等を明らかにする。

#### 1. 断層の活動性の調査・評価

断層の活動性評価については、地形・地質と断層の形成順序から活動年代を決める手法(上載地層法)の適用を基本とするが、後期更新世以降の地層が欠如するなど適用が困難な場合には、12万~13万年以前の岩脈・鉱脈等との接触関係(鉱物脈法)、断層物質性状等の観点から総合的に判断する。これらの手法により断層の最新活動年代を評価する場合には、周辺の地質構造発達史等を踏まえた総合的な評価を行うことが重要であり、断層の連続性や変位・変形の分布や性状、応力場の観点を考慮して、調査結果が整合的であることを慎重に検討することが必要である。

#### 2. 断層変位量の調査・評価

後期更新世以降の活動を否定できない断層等について

は、断層変位地形の調査、断層露頭の観察、トレンチ調査、ボーリング調査を適宜組み合わせることで断層の活動年代を把握し、その年代に対応する地層の特徴(例えば、火山灰等)から1回当たりの変位量を推定する。例えば、累積変位と活動回数から1回当たりの平均変位量を求めたり、各回の活動に対する変位量が分かる場合にはばらつきも含めて評価する。

断層変位の痕跡は、時間経過に伴って侵食・堆積などの作用を受けて徐々に失われていくため、断層の分布や変位が全長にわたって確認できることは期待できず、地層に被覆されて断層運動の痕跡が地層中に残っている地点のみで調査することになる。このような制約の中において、取得された変位データから活動1回当たりの変位量を評価する上では、その断層において地震のたびに同様の変位分布が繰り返されていたのかなどを検討しておくことも重要である。

また、後述する数値解析による設置地盤の変位・変形量を評価する際の基礎地盤モデルには、地盤の物性(物理特性、強度特性及び変形特性)を適切に反映する必要があるため、ボーリング調査、トレンチ調査、弾性波探査等を実施するとともに、原位置試験及び室内試験を適切に選択して実施する。

**V. 断層変位ハザードの評価**

後期更新世以降の活動を否定できない断層が施設基礎面にあると判断された場合、当該断層の変位量を評価する。検討用の断層変位量は、地質調査結果、数値解析及び地表地震断層データベースに基づいて設定するものであり、具体的な検討方法について、以下に順に述べる。

**1. 地質調査結果に基づく変位量  $\delta_i$  の検討**

敷地におけるボーリング調査、トレンチ調査、試掘坑調査などの調査結果から得られた1回当たりの変位量がある場合は、最大限これを活用することとし、これに不確かさを適切に考慮して  $\delta_i$  を設定する。

具体的には、敷地における1回当たりの変位量の分布状況から推定した施設位置での変位量を平均値として捉え、敷地の地質調査結果から不確かさの度合いが把握できる場合はそれを活用し、把握できない場合は後述する地表地震断層データの調査結果に基づく不確かさを考慮した上で  $\delta_i$  を設定する。

**2. 数値解析に基づく変位量  $\delta_a$  の検討**

数値解析による設置地盤の変位・変形量の評価に当たっては、敷地内で地質調査によって推定された変位の再現性を確認することにより、評価に用いる解析手法、解析モデルが適切かどうかを確認する。その後、不確か性を考慮したパラメータスタディを実施した上で設置地盤の変位・変形量を評価する。

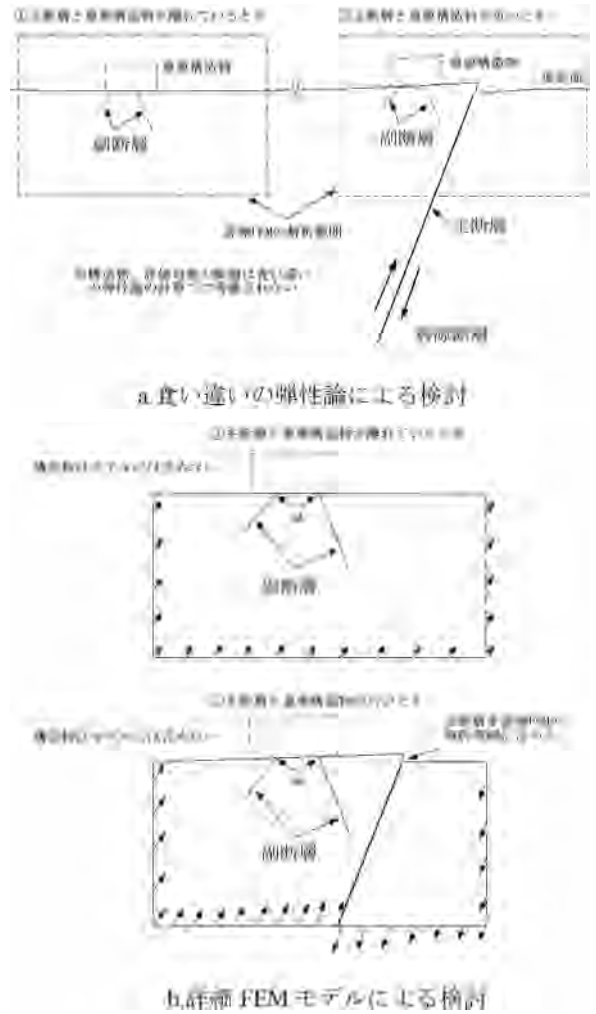


図6 数値解析による設置地盤の変位・変形評価のイメージ (評価対象が副断層の場合)

**(1) 解析手法**

数値解析手法は食い違い理論による弾性解を用いる手法(以下「食い違いの弾性論」という)及び設置地盤の詳細FEM解析を基本とする。

食い違いの弾性論により、震源断層の破壊によるすべり量を断層面に静的な変位として与え、半無限地盤中の変位分布の弾性解を得ることができる。断層活動に伴う地殻変動による観測変位が弾性理論でもある程度説明できることから、この手法により広域的な地殻変動を求め(図6a)。

次に、評価対象施設の設置地盤の変位・変形量を求めるために、詳細FEMモデルによる静的弾塑性解析を実施する。食い違いの弾性論により詳細FEMモデルの境界での変位量を算出し、変位あるいは換算した地殻応力を境界条件として与える(図6b)。

詳細FEM解析による設置地盤の変位・変形量評価においては、地形・地質・地盤調査の結果に基づき、設置地盤のモデル化を適切に行う。このとき、構造物はモデル化しない。また、主断層が構造物に近い場合は主断層

表1 検討用の断層変位量  $\delta_s$  の設定方法

項目	地質調査結果に基づく $\delta_i$	数値解析結果に基づく $\delta_a$	地表地震断層データベースに基づく $\delta_d$
不確かさを考慮した設定値	敷地内の1回当たりの変位量 + 敷地内外のデータから求めたばらつき(例えば、標準偏差)	パラメータスタディ結果 (例えば、断層形状等の震源に係る条件、断層及び地盤の強度・変形特性、初期地圧等)	データベースから求めた平均値 + データベースから求めたばらつき(例えば、標準偏差)
$\delta_s$	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>\delta_i</math>, <math>\delta_a</math> 及び <math>\delta_d</math> を総合的に勘案して、構造物と地盤との境界に与える変位量を設定</li> <li>・ 1回当たりの変位量のデータがあるか又は推定可能かどうか、変位の原因となった地震が敷地周辺にあるかどうかの判断を踏まえ、<math>\delta_i</math>, <math>\delta_a</math> 及び <math>\delta_d</math> を十分に吟味した上で <math>\delta_s</math> を設定</li> <li>・ <math>\delta_s</math> の設定に当たっては、PFDHAの結果を参照する。</li> </ul>		

が含まれるように解析領域を設定し、そのずれ変位を考慮する。

食い違いの弾性論以外の手法として、波数積分を用いる方法や断層の動力学的シミュレーションを必要に応じて検討に用いる。また、有限要素法に代わり粒状体モデルを用いた解析手法を用いることも考えられる。個別要素法、粒子法等の粒状体解析手法では、多様な破壊形態を表現することが可能である。

#### (2) 設置地盤における変位量の検討

設置地盤における変位・変形量は、構造物と地盤との境界で評価する。変位・変形量には種々の不確かさが存在するため、詳細FEM解析で用いる断層の強度・変形特性、岩盤の変形特性等について合理的に変動範囲を定め(例えば、平均値+標準偏差)、それぞれの因子を組み合わせることでパラメータスタディを行うことにより考慮する。

### 3. 地表地震断層データベースに基づく変位量 $\delta_d$ の検討

既に構築された主断層及び副断層の変位量に関するデータベースや、独自に構築または追加したデータベースに基づき、敷地内における評価すべき断層とデータベースにおける断層を比較し、活動履歴・規模、地形条件、地質条件等の類似性から、 $\delta_d$  を設定する。

$\delta_d$  の設定に当たっては、断層長さ(または地震規模)と断層変位量との関係式を主断層の変位量の推定に活用できる。また、先に述べた原子力安全推進協会(2013)<sup>4)</sup>のデータベース等を副断層の変位量の推定に活用できる(図3)。 $\delta_d$  の設定に当たっては、 $\delta_i$  や  $\delta_a$  と同様に地表地震断層データの調査結果を踏まえて不確かさを適切に考慮する。

### 4. 検討用の断層変位量 $\delta_s$ の設定

地質調査結果に基づく  $\delta_i$ 、数値解析に基づく  $\delta_a$ 、地表地震断層データベースに基づく  $\delta_d$  を総合的に勘案して、構造物と地盤の境界に与える検討用の断層変位量  $\delta_s$  を設定する。その際、敷地における当該断層の1回当たりの変位量のデータがあるか又は推定可能かどうか、そ

の変位の原因となった地震が敷地周辺にあるかどうかを踏まえて  $\delta_i$ ,  $\delta_a$  及び  $\delta_d$  を十分に吟味した上で  $\delta_s$  を設定する。 $\delta_s$  の設定に当たっては、確率論的断層変位ハザード解析(以下「PFDHA」という)の結果を参照する(表1)。参照に当たっては、例えば、基準地震動  $S_s$  や基準津波  $T_s$  の策定において地震動や津波の確率論的ハザード評価を参照しており、 $\delta_s$  の年超過頻度が  $S_s$  や  $T_s$  の年超過頻度( $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$ 程度)と同程度あるいはそれ以下であることを確認する方法が挙げられる。

施設基礎面に後期更新世以降の活動を否定できない断層が複数分布する場合は、活動性、断層のずれの方向、断層破碎部の幅、硬さ及び固結の度合い、断層条線等から得た断層運動像、断層の空間的な広がり、施設に与える影響等を考慮して、必要に応じて複数の断層を選定し、断層毎に  $\delta_s$  を設定する。

### 5. 想定を超える断層変位量の評価

想定を超える場合であっても過酷事故緩和策等を策定して万一に備えることが重要である。この観点から、検討用の断層変位量  $\delta_s$  を超える変位量に対してリスク情報を得ていくために、想定を超える断層変位量を設定することができる。その場合、 $\delta_s$  を割り増しして設定する方法等が考えられる。例えば、 $\delta_s$  を係数倍して設定する方法や、 $\delta_s$  を設定する際に参照した年超過頻度を更に下回るレベル毎に設定する方法等が挙げられる。想定を超える断層変位は、このように必要に応じて複数設定して、リスク情報を得ていくことができる。

### 6. 確率論的断層変位ハザード解析

前節までに示した決定論に基づく  $\delta_s$  の評価と並行して、 $\delta_s$  設定時の参照用及びその後の確率論的リスク評価に供する目的で、PFDHAを実施する。PFDHAの実施に際しては、Youngs et al.(2003)<sup>5)</sup>、Petersen et al.(2011)<sup>6)</sup>、高尾ほか(2013,2014)<sup>3,7)</sup>に示された方法及び評価式(経験式)を用いて評価地点における1年当たりの変位-超過頻度関係を算出することができる。実施例を図7に示す。

PFDHAで得られる変位量は、 $\delta_s$ と同様に、構造物と

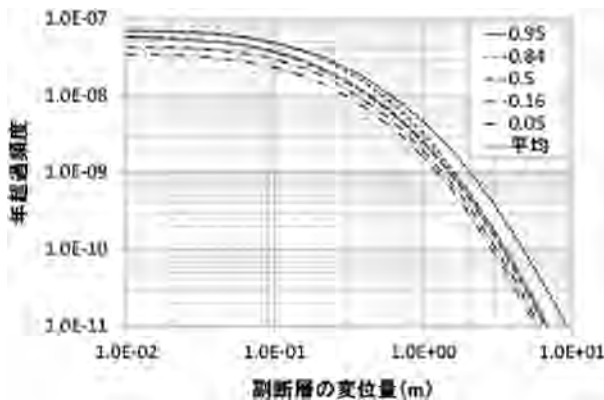


図7 PFDHAの実施例(図中凡例の数値はフラクタルの値)

地盤の境界位置において定義されるものであり、当該構造物が設置されていない状態での変位量である。施設への影響評価に当たっては、構造物が設置されていない状態での変位量を再現できるようにFEM等の解析モデルの境界条件を設定した上で、構造物が設置されている状態での変位量を計算する必要がある。

## VI. まとめ

本稿では、断層変位のハザード評価に関して、これまでに関連分野で得られている知見を最大限活用し、不確実さも考慮した適用可能な方法として体系的に取りまとめた。

断層変位のハザード評価に関する今後の課題として

- ・断層の活動性の評価に当たり、上載地層法が採用できない場合を想定して断層内物質を用いる方法等、その他の手法の適用性拡大及び精度の向上
- ・実際の地表地震断層変位の再現解析や断層模型実験の再現解析による数値解析手法の高度化
- ・PFDHAの更なる高度化に関して、新たに得られた情報を断層変位量の評価式に反映すること等が挙げられる。

今後とも知見の蓄積を継続し、関連する学術分野間での連携・協調を深化させながら、より一層信頼性の高いものにしていく努力が必要である。

### — 参考資料 —

- 1) 奈良林直, 断層変位に対する工学的なリスク評価(その1)断層変位に対する原子力安全の考え方, 日本原子力学会誌,

Vol.58, No.9, p.21-25, 2016年.

- 2) 奈良林直ほか, 断層変位に対する工学的なリスク評価(その2)施設影響評価における裕度評価手法の適用, 日本原子力学会誌, Vol.58, No.9, p.26-31, 2016年.
- 3) 高尾誠ほか, 確率論的断層変位ハザード解析手法の日本における適用, 日本地震工学会論文集, 第13巻, pp.17-36, 2013年.
- 4) 原子力安全推進協会, 原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書, 2013年.
- 5) Youngs, R.R., *et al.* A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA), *Earthquake Spectra*, Vol.19, No.1, pp.191-219, 2003.
- 6) Petersen, M.D., *et al.* Fault displacement hazard for strike-slip faults, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 101, pp.805-825, 2011.
- 7) 高尾誠ほか, 確率論的断層変位ハザード解析の信頼性向上, 日本地震工学会論文集, 第14巻, 第2号, pp.16-36, 2014年.

### 著者紹介

鈴木義和 (すずき・よしかず)

原子力安全推進協会

(専門分野//関心分野)原子力土木, 耐震・耐津波工学

高尾 誠 (たかお・まこと)

東京電力ホールディングス株式会社

(専門分野/関心分野)応用地質, 確率論的リスク評価

谷 和夫 (たに・かずお)

東京海洋大学

(専門分野/関心分野)地盤工学, 岩盤工学, 土質工学, 地震防災, 応用地質, 資源開発

山崎晴雄 (やまざき・はるお)

首都大学東京名誉教授

(専門分野/関心分野)地形学, 第四紀学, 地震地質学

奥村晃史 (おくむら・こうじ)

広島大学

(専門分野/関心分野)第四紀学, 地震学, 火山学, 年代学

小長井一男 (こなが い・かずお)

横浜国立大学

(専門分野/関心分野)地震工学, 地盤防災工学

## (その4) 建物・構築物及び 土木構造物に対する影響評価

# 断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策

「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門員会 辻 弘一, 他

日本原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門員会報告書の解説シリーズである本稿では、断層変位の原子力施設に対する影響評価のうち、建物・構築物及び土木構造物に対する影響評価について紹介する。

**KEYWORDS:** *fault displacement, risk evaluation, nuclear power plant structure, ultimate capacity, best estimate response, margin evaluation*

### I. はじめに

本稿では、断層変位の原子力施設に対する影響評価のうち、地盤に生じる断層変位が直接的に作用する建物・構築物及び土木構造物に対する一連の影響評価手法について概要を紹介する。

### II. 対象構造物及び評価方針

評価対象は、建物・構築物では発電用原子炉施設のうち安全上重要な機能を有する設備(例えばコンクリート製原子炉格納容器や使用済燃料プール)及び安全上重要な機能を有する機器・配管系等に対する支持構造物(例えば原子炉建屋)であり、土木構造物では、支持構造物に加え、非常時における海水の通水機能を求められる施設(例えば海水管ダクト)である。ここではそれらを総称して構造物という。

以下、紙面の都合上、建物・構築物を対象にした評価手法を中心に紹介するが、基本的な考え方は土木構造物に対しても適用できる。

安全性の評価は、常時又は運転時に作用する荷重と検討用の断層変位、さらに必要に応じて地震時荷重を考慮し、これら荷重に対して、安全上重要な施設として要求される機能を保持すること、機器・配管系に対する支持構造物として要求される機能を保持すること、及び構造

物全体としての限界状態(変形能力、終局耐力)に対して余裕を有していることを確認することをもって行う。

具体的には、対象とする構造物と周辺地盤を適切にモデル化した解析モデルに、断層変位やその他の荷重を与え、構造物に生じる変位、応力・ひずみ等を算出して、構造物が受ける損傷と有すべき性能・機能を考慮することにより断層変位に対する安全性を評価する。

解説シリーズ(その2)で紹介した全体評価手順に従いリスク評価方法(裕度評価および確率論的リスク評価)を下記の①～③に分類した。

- ①設計上の許容限界に対する裕度評価：検討用の断層変位に対して、確立された構造強度の評価体系の中で、評価対象である構造物の応答評価及び耐力評価を行う。したがって、応答が耐力を上回る場合には、当該構造物は要求性能を満足していないため、必要に応じて対応策を講じ、その有効性を確認する。
- ②終局限界に対する裕度評価：検討用の断層変位もしくは想定を超える断層変位に対して、最新知見を反映した決定論的な評価体系の中で、評価対象である構造物の実剛性に基づく応答評価及び実耐力に基づく耐力評価を行う。したがって、応答が耐力を上回る場合には、当該構造物は要求性能を満足していないため、その評価結果を用いた事故シナリオ及び事故シーケンス評価を行い、必要に応じて対応策を講じ、その有効性を確認する。
- ③確率論的リスク評価(PRA)：断層変位ハザードに対して、最新知見を反映した確率論的な評価体系の中で、評価対象である構造物の現実的応答評価及び現実的耐力評価を行う。ここでは、現実的応答が現実的耐力を

*Risk evaluation method for fault displacements by engineering approach (4) ; Risk evaluation method for structures* : Hirokazu Tsuji, Yoshinori Mihara, Kazuo Matsumura, Kazuo Tani, Katsumi Ebisawa, Tsuyoshi Takada.

(2017年5月29日 受理)

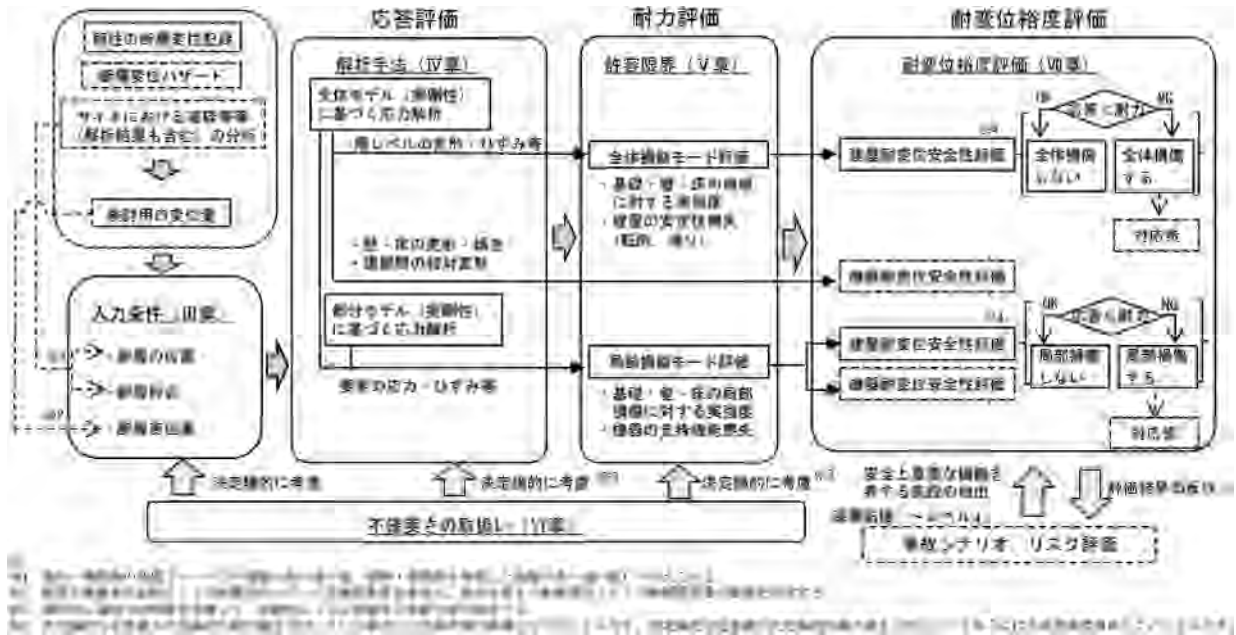


図1 構造物(建物・構築物)に対する影響評価フロー(②終局限界に対する裕度評価)

上回る確率をフラジリティ曲線として評価し、これを入力として事故シナリオ及び事故シーケンス評価を行う。

このうち、建物・構築物における②終局限界に対する裕度評価の評価フローを図1に示す。

### III. 入力条件

構造物に対する断層変位の入力、構造物直下に断層変位が生じる場合は、断層の変位量を対象構造物に作用させる。さらに、断層変位が構造物近傍で発生した場合でも、地盤全体の傾斜や撓みにより構造物に影響を与える可能性があるため、構造物近傍で発生する断層変位も対象となる。いずれの場合も、断層変位ハザードの評価において設定された変位量が、構造物がない状態での構造物直下レベルで再現できるようにしたものを用いる。

一般的には、モデル化した地盤の境界に、対象とする断層のずれの向き(変位量の向き)に一樣な強制変位を与えることで、想定された構造物直下での断層変位が再現されるようにする。このとき、評価に必要な断層変位のパラメータは、①断層の位置(長さ、走向)、②断層形式(断層の傾斜角とずれの方向)、③変位量となる(図2参

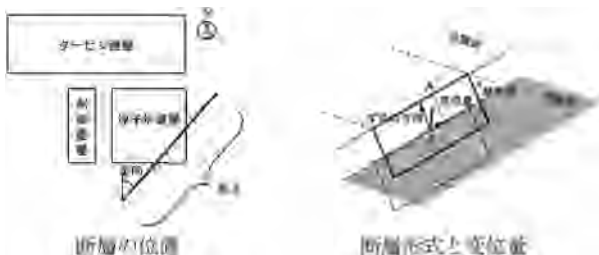


図2 入力として断層変位を考慮する場合に必要なパラメータ

照)。

### IV. 解析手法

#### 1. 解析モデルと解析手法

断層変位に対する構造物及び周辺地盤の解析モデルは解析対象物と目的によって異なり、多岐にわたる。

一例として「構造物-地盤全体モデル」を図3に示す。炉心損傷頻度の評価を念頭においた構造物全体の損傷状況及び機器・配管系への検討条件を算定するために用いられ、建屋各部位をシェル要素又はソリッド要素により、地盤をソリッド要素等によりモデル化し、3次元非線形有限要素法による構造物-地盤連成解析を行う。構造物-地盤間は、ジョイント要素等の剥離及び滑りが考慮できる要素でモデル化する。断層面はジョイント要素等によりモデル化する。ここで、ジョイント要素のパラメータ(付着力、摩擦係数等)は、試験結果や既往知見に基づき適切に設定する。地盤の領域は構造物の影響がない範囲で設定する。



図3 構造物-地盤全体モデルの例

## 2. 解析手順

常時応力(地盤応力及び建屋自重)を考慮し、自重解析と地震時解析を実施する。地震時解析においては、必要に応じ地震時の断層変位に加えて、地震時の揺れによる影響を考慮する。なお、地震時(本震及び余震)の揺れによる影響は、断層変位発生時刻を考慮して、静的もしくは動的に組み合わせるものとする。

## 3. 解析結果の出力

基礎・壁・床の崩壊及び局部損傷に係る耐変位安全性を評価するために、各節点の変位及び各要素の発生応力もしくは発生ひずみを出力する。

あわせて、動的機器の機能損傷及び渡り配管等の構造損傷に係る機器・配管系の耐変位安全性評価に資するために、当該箇所での変位及び回転角を出力し、建屋の傾斜及び建屋間の相対変位を評価する。さらに、基礎・壁・床の局部損傷に起因する機器・配管系の耐変位安全性評価に資するために、前述の当該箇所での変位及び回転角に加えて、当該箇所での発生応力もしくは発生ひずみを出力し、評価エリアにおける損傷状況を評価する。

解析結果の出力のうち、断層変位を受ける構造物の変位量のイメージを図4に示す。

## 4. 解析コードの検証

IV章1~3に示された解析手法に適用する解析コードに関しては、断層変位時に支配的な損傷モードに対して、実際の被害事例や実験結果と比較を行って解析手法の妥当性の検証が必要である。

しかし、実際に観測された断層変位による構造物の被害事例を対象としたシミュレーション解析を実施した事例は極めて少ない。妥当性が検証された数少ない事例の一つとして、1999年トルコ・コジャエリ地震(モーメントマグニチュード7.4)、1999年台湾・集集地震(同7.6)等の地表地震断層を対象とした調査及び解析を行った Faccioli et al. (2008)<sup>1)</sup>が挙げられる。

また、地表地震断層による建屋全体の実被害事例ではないものの、熊谷ほか(2011)<sup>2)</sup>による断層変位に対する支配的な損傷モードの一つである基礎版の面外せん断破壊実験を対象としたシミュレーション解析による解析



図4 断層変位を受ける構造物の変位量のイメージ

コードの妥当性の検証例がある。

以上に示す解析手法を用いて、構造物の損傷が比較的軽微であれば、断層変位に対する構造物の応答評価が可能であると考えられる。

## V. 許容限界

### 1. 損傷モード

表1に断層の種類と損傷モードの関係を示す。断層変位に伴って考慮すべき構造物の損傷モードは、基礎版及び耐震壁の曲げ破壊あるいはせん断破壊であると考えられる。地震応答に伴う建屋の損傷モードと比較して、構造物下部における損傷が支配的なことが特徴である。

### 2. 許容限界の目安値

#### (1) 基礎底面の傾斜に係る許容限界

断層変位に伴う基礎底面の傾斜による影響については、基本的には日本建築学会「建築基礎構造設計指針」に記載された傾斜の基準値が参考になる。しかし、同指針の解説に記載されている「建物に生じる沈下量を目安の数値を用いて評価することはあくまでも便宜的な手法であり、原則は沈下によって建物の構造部材に生じる応力を照査することによって評価すべきことを忘れてはならない」に従って、IV章1に示した解析モデルに基づいて詳細な部材応力解析を行った上で、V章2.(2)の鉄筋コンクリート部材の許容限界の目安値を適用することで評価することが望ましいと考えられる。

#### (2) 鉄筋コンクリート部材の構造的あるいは機能維持上の許容限界

裕度評価に用いる許容限界として、柱・梁の曲げ終局強度については日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」に、耐震壁のせん断限界・曲げ限界については日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC4601)」あるいは日本機械学会「発電用原子力設備規格コンクリート製原子炉格納容器規格(JSME

表1 断層の種類による損傷モードの関係

断層形式	建屋への作用	耐震壁の損傷モード	床・基礎版の損傷モード
正断層	縦ずれ変位	面内せん断破壊	面外曲げ破壊 面外せん断破壊
逆断層	縦ずれ変位	面内せん断破壊	面外曲げ破壊 面外せん断破壊
	断層走向直交方向の圧縮	面外曲げ破壊 面外せん断破壊 (地下部)	-*
横ずれ断層	横ずれ変位	面外曲げ破壊 面外せん断破壊 (地下部)	-*

\*応力は発生するものの、損傷を与えるレベルには至らないと判断



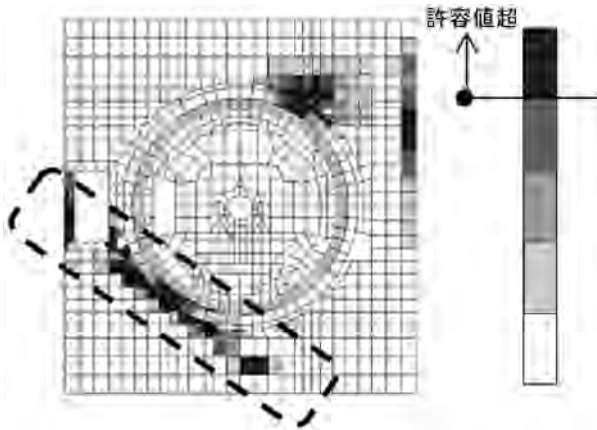


図5 基礎版を横断する連続した損傷のイメージ

SNEI-2014)に、梁のせん断性能については日本建築学会「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(RC-N)」にまとめられている。

また、確率論的リスク評価(PRA)に用いる許容限界等としては、日本原子力学会標準として「原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準：2015」(以下「地震 PRA 標準」という)にまとめられている。

3. 損傷範囲

断層変位による損傷は、局所的な損傷にとどまる場合と全体損傷に及ぶ場合があり、対象範囲と損傷の拡がりについて十分に留意する必要がある。

局所的な損傷として、機器アンカー及び配管サポート等の支持機能喪失があるが、これは当該局所部位における許容限界の超過によって評価できる。また、特定の部屋の機能損傷は、その床を横断するような許容限界の超過により評価できる。

構造物全体の損傷は、基礎版あるいは耐震壁を横断するような連続した許容限界の超過により評価できる。全体損傷のイメージを図5に示す。

VI. 不確かさの取り扱い

確率論に基づくリスク評価においては、評価対象とする事象や評価プロセスに含まれる様々な不確かさを考慮する必要がある。この不確かさをもたらす要因は、一般に物理現象のランダム性に係る偶然的な不確かさ(aleatory uncertainty)と知識及び認識の不足に係る認識論的不確かさ(epistemic uncertainty)に区別されるが、地震 PRA 標準においては、地震ハザード評価及びフラジリティ評価に含まれるこれらの不確かさ要因を整理し、リスク評価に考慮する方法が提示されている。

一方、断層変位に対するリスク評価は、地震 PRA と同様に地震が起因事象となるものの、ハザード評価の対象は地震動ではなく断層変位であり、現状はフラジリティ評価においても動的問題ではなく静的問題として取り扱うこと等が地震 PRA とは異なっている。したがっ

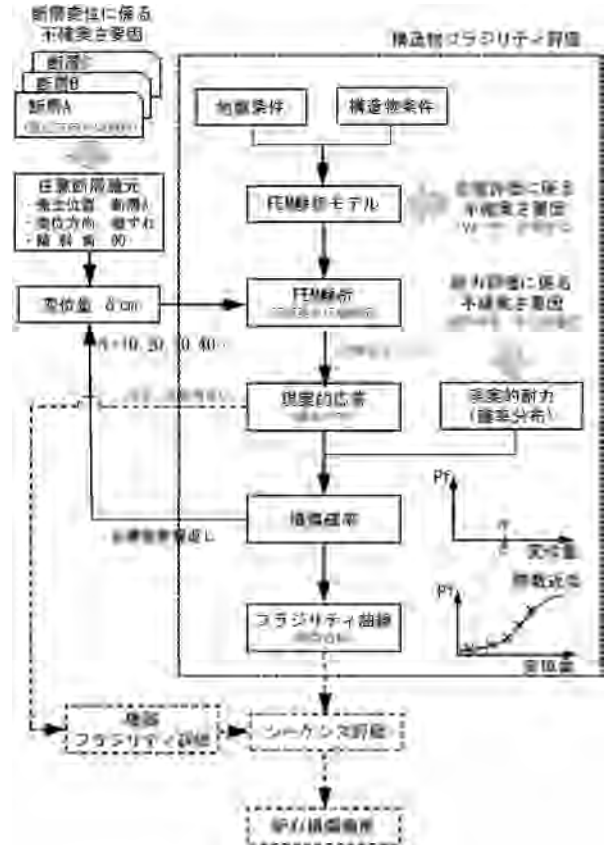


図6 断層変位に対する構造物フラジリティ評価フローの例

て、断層変位に対するフラジリティ評価で考慮すべき不確かさ要因は、地震動に対するものとは異なる観点で設定する必要がある。

特に、断層変位に対するリスク評価において、最も大きな不確かさの一つとして断層変位の位置が挙げられる。断層変位が施設に与える影響は、断層変位の位置で大きく異なるため、解析規模を考慮すると図6に示す評価フローのように、断層変位の位置や断層形式を選定し、選定した位置で変位が発生した場合の条件付き損傷確率として評価することが現実的である。

VII. 耐変位裕度評価

1. 構造物の耐変位安全性評価

II. で述べたリスク評価手法「①設計上の許容限界に対する裕度評価」及び「②終局限界に対する裕度評価」では、崩壊(全体損傷)及び局部損傷の観点から、IV. で得られる構造物の応答とV. から得られる構造物の許容限界を比較することで、検討用の断層変位に対する決定論ベースの構造物の安全性評価を行う。なお、地震時の揺れによる構造物の耐震安全性評価は、基本的にはJEAC4601等の規格・基準に従うものとする。

2. 構造物フラジリティ評価

「③確率論的リスク評価(PRA)」は、基本的には地震 PRA 標準と同様な流れであり、詳細は地震 PRA 標準を

参照されたい。断層変位に対する構造物フラジリティ評価フローの例を図6に示す。

なお、断層変位単独のフラジリティ評価を当面の目標とし、地震時の揺れとの重畳フラジリティは、今後の課題とする。

## VIII. まとめ

断層変位に対する構造物の影響評価のより一層の高度化に向けては、以下の課題を挙げることができる。

- ・断層変位と地震動の重畳による構造物への影響を合理的に精度よく評価するための手法を構築する必要がある。
- ・断層変位による被害事例のシミュレーション解析は、構造物が剛体回転するような比較的被害が軽微であったものを対象としており、地表地震断層によって全体及び部分的に崩壊したような構造物を対象としていないことから、解析コードの妥当性検証については更なる取組みが望まれる。
- ・断層変位が作用した場合の地盤-構造物間の非線形な相互作用及び地盤の進行性破壊を精度よく評価するための応答解析手法の構築及び検証事例の蓄積が必要である。
- ・断層変位や地殻変動に起因した地盤変状が作用した場合の基礎底面の傾斜に係る損傷限界の不確かさ、鉄筋コンクリート部材(基礎版及び地下外壁)の面外曲げもしくはせん断耐力の不確かさに関しては、実験による検証も含めて、部材全体及び部材局所の損傷評価のためのデータの更なる蓄積が望まれる。
- ・断層変位が作用した場合の機器アンカーや配管サポート等のコンクリート部の支持機能喪失に係る応答及び耐力を合理的に精度よく評価するための手法を構築して、検証事例を構造物及び機器・配管系で連携して蓄積していく必要がある。
- ・断層変位に対する構造物フラジリティ評価に関しては、偶然的・認識論的不確かさに係る標準データの整理・分析・定量化、更なる試算例の蓄積等が必要である。
- ・断層変位によって土木構造物が局所的に材料の限界値に達していても、目標性能及び要求性能への寄与

度が低く、要求性能に対して土木構造物が機能維持していることもあるため、保守的と考えられる現状の限界値よりも目標性能及び要求性能への寄与度が高い破壊モード及びそれに対する限界値を整備することが必要である。

## － 参考資料 －

- 1) E.Faccioli *et al.* Fault rupture-foundation interaction: selected case histories, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, Issue 4, 2008 年.
- 2) 熊谷仁志ほか, RC 基礎スラブの面外せん断終局強度に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 659 号, 2011 年.

## 著者紹介

辻 弘一 (つじ・ひろかず)

原子力安全推進協会  
(専門分野/関心分野)原子力建築耐震工学

美原義徳 (みはら・よしのり)

鹿島建設  
(専門分野/関心分野)原子力建築耐震工学, 外的事象 PRA

松村和雄 (まつむら・かずお)

北陸電力  
(専門分野/関心分野)原子力土木耐震工学

谷 和夫 (たに・かずお)

東京海洋大学  
(専門分野/関心分野)地盤工学, 岩盤工学, 土質工学, 地震防災, 応用地質, 資源開発

蛭沢勝三 (えびさわ・かつみ)

電力中央研究所  
(専門分野/関心分野)地震・津波等外的事象に対する原子力リスク/防災・減災/リスクコミュニケーション, 高レベル廃棄物地層処分

高田毅士 (たかだ・つよし)

東京大学  
(専門分野/関心分野)信頼性工学, 耐震工学, リスク評価, リスクマネジメント

## 第1回 分離変換の意義と分離変換システム

## 長寿命核種分離変換技術の現状

## 「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会

日本原子力学会「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会は、国内外における分離変換技術や関連する技術の研究開発状況について調査・分析してきた。長寿命核種分離変換技術の現状について、4回に分けて紹介する。第1回では、分離変換の意義は何であるのかを解説するとともに、分離変換を効果的・効率的に行うために研究開発が進められている分離変換のシステムについて解説する。

**KEYWORDS:** *Partitioning, Transmutation, Long-lived nuclide, Radioactive waste, Minor actinide, Fission product, Fast reactor, Accelerator-driven System*

## I. はじめに

今後の原子力利用のあり方にかかわらず、高レベル放射性廃棄物処分は解決すべき課題である。2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」<sup>1)</sup>では、原子力政策の再構築の節において、対策を将来へ先送りせず着実に進める取組として、「使用済燃料対策を抜本的に強化し、総合的に推進する。」とし、その中で、「将来の幅広い選択肢を確保するため、放射性廃棄物の減容化・有害度低減などの技術開発を進める。」としている。「具体的には、高速炉や、加速器を用いた核種変換など、放射性廃棄物中に長期に残留する放射線量を少なくし、放射性廃棄物の処理・処分の安全性を高める技術等の開発を国際的なネットワークを活用しつつ推進する。」などと記載されている。

この長寿命核種分離変換技術を導入しても、地層処分は必要であるが、分離変換技術は、地層処分等の負担軽減を目指した技術として、世界的にも活発に研究開発が進められている。本解説シリーズでは、長寿命核種分離変換技術の現状について、4回に分けて紹介する<sup>2)</sup>。

*Present State of Partitioning and Transmutation of Long-lived Nuclides (I); Significance of Partitioning and Transmutation and Partitioning and Transmutation Systems: Research Committee on Partitioning and Transmutation of Radioactive Waste.*

(2017年5月30日 受理)

## II. 分離変換の意義

## 1. 分離変換技術とは

わが国では、使用済み燃料に含まれるUおよびPuを再処理により分離・回収して有効に利用し、高レベル廃液に含まれるマイナーアクチノイド(MA)のNp, AmおよびCm, ならびに核分裂生成物(FP)を高レベル放射性廃棄物として地層処分することを基本的な方針としている。分離変換技術は、高レベル放射性廃棄物に含まれている種々の核種をその処理方法や利用目的に応じて、いくつかのグループまたは元素(核種)に分離するとともに、長寿命核種を短寿命核種または安定核種に核変換し、放射性廃棄物処分の負担軽減等を目指すものである。

高レベル放射性廃棄物から、初期の数百年間の高い放射能と発熱量の主要因である<sup>90</sup>Sr(半減期: 28.79年)および<sup>137</sup>Cs(半減期: 30.08年)を分離・回収できれば、残りの廃棄物は発熱量が少なくなり、発熱量制限がある廃棄物の減容ができる。分離・回収した<sup>90</sup>Srおよび<sup>137</sup>Csの、別途の管理が必要となるが、元素の性質に応じたより安定性のある固化体等にして処分することもできる。

また、高レベル放射性廃棄物から、長期間にわたり放射能が継続する要因である長寿命核種およびその親核種を分離・回収し、核変換により短寿命核種または安定核種にできれば、残りの廃棄物は数百年程度で放射能レベルが減衰し、放射性廃棄物処分の有害度の低減など負担軽減に繋がると考えられる。長寿命核種およびその親核種としては、<sup>237</sup>Np(半減期: 214.4万年)、<sup>241</sup>Am(半減期: 432.6年)、<sup>243</sup>Am(半減期: 7,370年)、<sup>244</sup>Cm(半減

期：18.11年)といったMA核種、ならびに $^{99}\text{Tc}$ (半減期：21.11万年)、 $^{129}\text{I}$ (半減期：1,570万年)、 $^{135}\text{Cs}$ (半減期：230万年)などのFP核種が挙げられる。

使用済み燃料の特徴として、軽水炉MOX燃料の場合、 $\text{UO}_2$ 燃料と燃焼度が同じでも、使用済み燃料中のMA核種の割合が多い。また、再処理せずに使用済み燃料のまま貯蔵しておく、 $^{241}\text{Pu}$ (半減期：14.29年)の $\beta$ 崩壊により、使用済み燃料中の $^{241}\text{Am}$ の量が顕著に増加する。 $^{241}\text{Am}$ の量を冷却期間0年と10年で比較すると、 $\text{UO}_2$ 燃料の場合には10倍以上に、MOX燃料の場合には約5倍に増加する。

長寿命核種を上で挙げたが、すべての核種を短寿命化できるわけではない。たとえば、 $^{135}\text{Cs}$ については、中性子捕獲と $^{136}\text{Cs}$ の $\beta$ 崩壊により安定核種である $^{136}\text{Ba}$ に核変換することができるが、FPには安定核種の $^{133}\text{Cs}$ が $^{135}\text{Cs}$ よりも多く含まれており、同位体分離しなければ、 $^{133}\text{Cs}$ の2回の中性子捕獲により、 $^{135}\text{Cs}$ を核変換するよりも多くの $^{135}\text{Cs}$ を新たに生成することになる。MA核種は、中性子捕獲の場合は他の放射性核種になるが、核分裂させれば短寿命核種または安定核種になるので、効率的に核分裂を起こす高速中性子を用いて、MA核種を核分裂させることが考えられる。FP核種は、核分裂を起こさないで、中性子捕獲を利用することが考えられる。どの核種を核変換の対象にするかは、核変換の効果と経済性のバランスを考慮する必要がある。

## 2. 分離変換の効果

### (1) 被ばく線量の低減、不確実性の低減

放射性廃棄物を経口摂取した場合の被ばく線量で定義される潜在的有害度を図1に示す。

図1には、使用済み燃料(U, Pu, MA, FP)、再処理によりPuとUを回収した後の高レベル放射性廃棄物(MA, FP)、および分離変換後の廃棄物(FP)を、濃縮ウラン燃料の原料とした天然ウラン9tの潜在的有害度とともに示している。使用済み燃料の潜在的有害度が原料とした天然ウランの潜在的有害度を下回るまでに要する時間はおよそ10万年であるが、再処理後は約1万年、分離変換後は数百年まで短縮されることがわかる。

ただし、経口摂取に係る地下水シナリオに基づく標準的な核種移行モデルにおいて、処分による影響の最大値は $^{135}\text{Cs}$ によってもたらされるため<sup>3)</sup>、MAの分離変換を実施したとしても、分離変換は、地下水シナリオに基づく最大線量に対して限定的な効果しか与えない。

一方、ボーリングのような人間侵入シナリオや、隆起浸食による廃棄物の地表への露出シナリオのように、地下水を介さず人に直接接触するシナリオを想定し、ガラス微粉を吸入した場合は、潜在的な吸入摂取毒性を図2に示すように、MAの分離変換の効果が顕著である。

人間侵入時等(人為事象)の影響評価、あるいは発生の

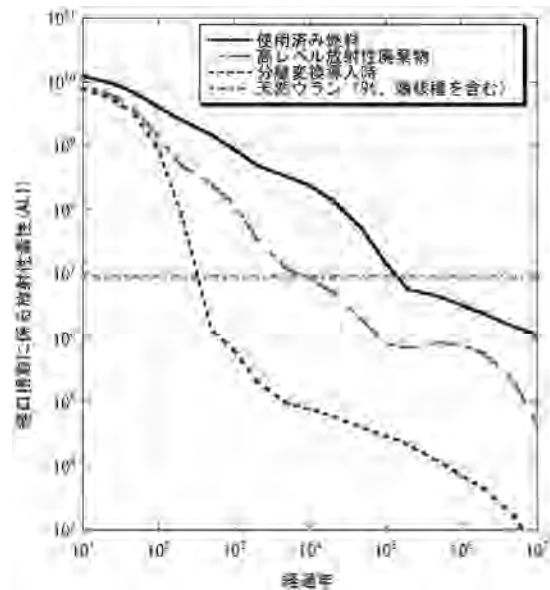


図1 使用済み燃料1 t-HMあたりの経口摂取毒性の経時変化(条件： $\text{UO}_2$ 燃料PWR、炉内滞在時間5年、燃焼度45 GWd/t、再処理で99.5%のUおよびPuを回収、分離変換で高レベル放射性廃液から99.5%のMAを回収)

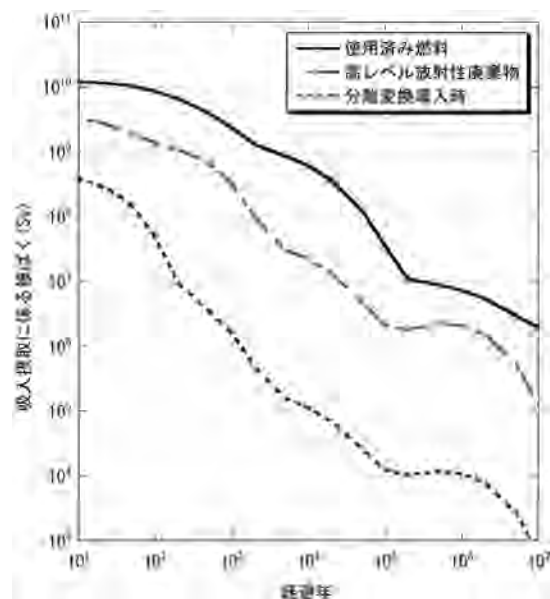


図2 使用済み燃料1 t-HMあたりの吸入摂取毒性の経時変化(条件：図1と同様)

可能性が著しく低い自然事象(稀頻度事象)による影響評価においては、放射性核種量が直接影響する。数十万年の超長期にわたる人間活動や地殻変動の予測等に相当の不確実性が伴うことから、分離変換は処分場影響の不確実性低減にも寄与すると考えられる。

### (2) 処分場規模の低減

高レベル放射性廃棄物の処分では、ガラス固化後、地下300メートル以深の安定な地層に処分する地層処分が考えられている。地層処分場の設計においては、緩衝材などの各部温度制限を考慮した熱設計をする必要がある。

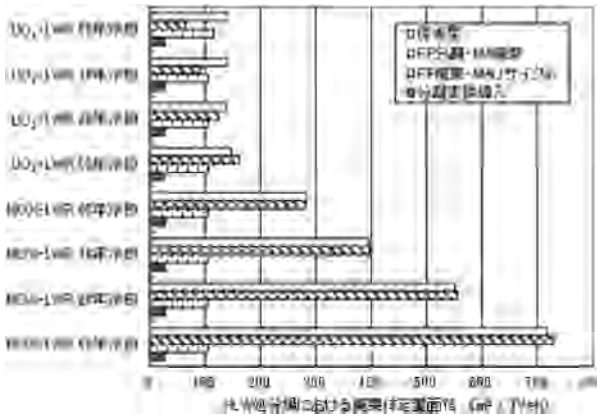


図3 軽水炉使用済み  $UO_2$ 燃料および軽水炉使用済み MOX 燃料を5~50年冷却後に再処理して発生するガラス固化体を地層処分した際の廃棄体定置面積

冷却期間5~50年の軽水炉使用済み  $UO_2$ 燃料およびMOX燃料を再処理した場合、ならびに分離変換を実施した場合の単位発電量あたりの処分場面積を図3に示す。図中の「従来型」は、使用済み燃料を再処理してPuとUを回収した後の高レベル放射性廃棄物をガラス固化して地層処分する従来の概念であり、分離変換を実施しない。一方、「FP分離・MA廃棄」は発熱性FPの $^{90}Sr$ および $^{137}Cs$ の分離のみを実施しMAはガラス固化する概念、「FP廃棄・MAリサイクル」はMAの分離と核変換を実施し残りのFPは一括して処分する概念、そして「分離変換導入」はMAを分離変換し、FPの $^{90}Sr$ および $^{137}Cs$ の分離後各々に適した形態で処分する概念である。ここで、MAを分離変換する場合には、廃棄物中の99%のMAを回収するものと仮定している。

軽水炉使用済み  $UO_2$ 燃料( $UO_2$ -LWR 5~50年冷却)とMOX燃料(MOX-LWR 5~50年冷却)の「従来型」を比較すると、とくに冷却期間が長い場合にMOX燃料の処分場面積が大きくなるのがわかる。これは、使用済みMOX燃料中には $^{241}Pu$ 含有量が多く、冷却期間の長期化にともない $^{241}Am$ の量が増加するためである。冷却期間の短い使用済み  $UO_2$ 燃料( $UO_2$ -LWR 5年冷却)では、FPの $^{90}Sr$ および $^{137}Cs$ の分離の効果がMAリサイクルに比べて大きく、両者を組み合わせた「分離変換導入」が最も効果が高い。しかし、冷却期間が長くなるとともに、使用済みMOX燃料と同様に $^{241}Am$ の影響が大きくなるため、FPの $^{90}Sr$ および $^{137}Cs$ の分離のみの効果は、ほとんど見られなくなる。全体を通じて、MAリサイクルのみの定置面積は100  $m^2$ /TWeh程度であり、効果が見られる。また、分離変換の導入で、さらに30  $m^2$ /TWeh程度にまで小さくすることができる。

冷却期間が長期化すると、処分場熱設計に対する $^{241}Am$ の影響が大きくなり、分離変換技術の意義が大きくなる。また、MA核変換を実施した上で、FPの $^{90}Sr$ および $^{137}Cs$ の分離処分と組み合わせることが効果的である。

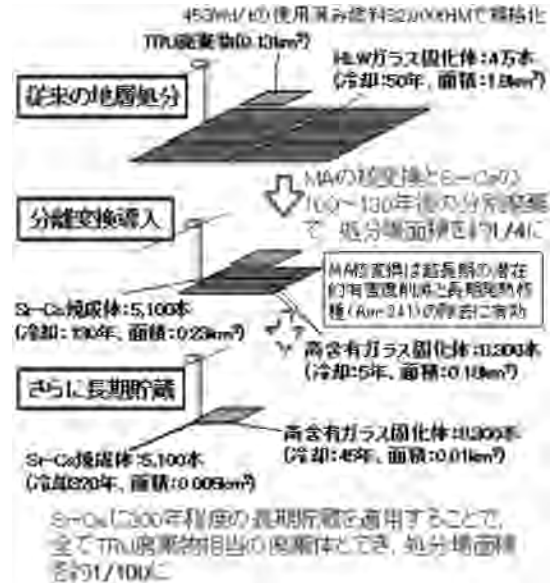


図4 分離変換技術導入による廃棄体定置面積低減効果

発熱性FP( $Sr$ および $Cs$ )を分離後に焼成体として固化後、100年以上の長期にわたって冷却してから処分する方法を検討した結果を図4に示す。現行ガラス固化体概念を用いて、六ヶ所再処理工場相当の800 t/年の処理を40年間続けた後は、定置面積約1.8  $km^2$ の処分場が必要となるが、仮にMA核変換と焼成体の130年貯蔵を行なうことで面積を約25%程度まで削減でき、さらに、仮に320年貯蔵を実施した場合には、約1/100程度にまで削減できることを示している。図中の「高含有ガラス固化体」とは、 $Sr$ 、 $Cs$ 、および白金元素等を取り除いた後に残るその他のFPをガラス固化したものであり、発熱量は小さく、また早く減衰する。320年長期貯蔵した焼成体と高含有ガラスの発熱量は極めて小さく(~4 W/体)になっており、TRU廃棄物のハル・エンドピース廃棄体と同等と見なせることから、TRU廃棄体と同様に大断面坑道内に集積して処分する処分概念を構築できる可能性を示唆している。

(3) 放射性廃棄物処分の一般原則と分離変換技術

放射性廃棄物処分の一般原則として、「放射性廃棄物の最小化」と「防護(被ばく低減)の最適化」が挙げられる。分離変換技術の導入により、地層処分場面積の大幅な低減と、高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度の大幅な低減、すなわち放射性廃棄物処分の物理的・時間的負担を軽減して、放射性廃棄物の処分を合理化できる可能性が高く、世代間負担や地域間負担の公平性の観点から、重要な技術であると考えられる。

III. 分離変換システム

総合的なシステムとして分離変換技術を捉えた場合、比較的有望な概念として考えられているのが、発電用の高速炉を用いたシステム(高速炉利用型)と核変換専用の

小規模な燃料サイクルを商用発電サイクルに付加したシステム(階層型)である。

### 1. 発電用高速炉を用いたシステム

核変換処理において、中性子による核変換を行うためには、処理対象となる長寿命核種を生み出した原子炉自体を利用することが考えられる。この方法では、使用済み燃料から回収した核変換対象核種を再度原子炉に装荷するので、核変換対象核種を完全に無くすことは原理的に不可能であるが、核変換対象核種の MA 等の量をある一定の平衡値に保つことはできる。また、発電等のエネルギー利用を行いながら核変換処理も行えるという一石二鳥のシステムとすることができる。

MA の核分裂反応は高エネルギー領域で大きくなるので、MA の核変換処理には高速中性子を用いるのが効率的である。熱中性子領域の中性子捕獲反応を利用して、核分裂しやすい核種に変換した後に核分裂させる方法も考えられるが、この場合には、1 個の MA を核分裂させるのに複数個の中性子が必要であるために、効率的な核変換ができない。したがって、発電用原子炉を MA の核変換システムとして用いる場合は、核変換処理の効率の面から高速炉を用いる場合が断然有利である。

高速炉に MA を装荷する高速炉利用型分離変換システムでは、高い核変換率を目指すことよりも、発電用高速炉としての炉心特性に大きな影響を与えない範囲で効率的な核変換を行うことを目的として、概念検討が進められている。高速炉への MA 装荷方法として、全ての燃料に均質に MA を混合する概念と通常の燃料体とは別に MA を装荷した燃料体を装荷する概念があり、前者を高速炉均質型、後者を高速炉非均質型と呼ぶ。それぞれのシステム概念を図 5 に示す。

高速炉に MA を燃料として入れると原子炉の安全性の観点からいくつかの問題点が生じるために、高速炉均質型では、装荷できる MA は燃料の 5% 程度に制限される。高速炉非均質型では、ターゲット燃料とも呼ばれる MA 含有燃料集合体は MA を高濃度に含有(約 20%~30%)するが、やはり安全性の観点から、全炉心に占める MA 含有燃料集合体の割合が制限(約 20%~30%)されるため、サイクル全体での MA 核変換性能は均質型と同等となる。

燃料中の MA 濃度は、高速炉の核的な安全性の余裕とトレードオフの関係にあるとともに、新燃料の発熱量とトレードオフの関係にある。いずれの場合でも、MA 含有燃料の取扱いには、ホットセル内の遠隔操作が必要である。高速炉非均質型では、高速炉均質型に比べ、MA 含有燃料の集合体あたりの発熱量が増加するが、その全取扱重量は大きく低減される。一方で、高速炉非均質型では、炉心燃料には、MA を含有しない従来型高速炉に関する既存の燃料製造技術が適用できるが、MA 含有燃料とは別のリサイクル処理が必要となる。それぞれ



図5 高速炉利用型分離変換システム概念  
(上図：高速炉均質型，下図：高速炉非均質型)

一長一短があり、日本では高速炉均質型、フランスでは高速炉非均質型を主要候補概念としている。

### 2. ADS を用いた階層型システム

階層型分離変換システムは、核変換を主目的とした核変換専用サイクルを商用の発電サイクルに付加した概念であり、そこで用いられる核変換システムを専焼システムと呼ぶ。階層型分離変換システム概念を図 6 に示す。

核変換を主目的とする専焼システムとしては、これまでに専焼高速炉と加速器駆動システム (Accelerator Driven System: ADS) が検討されてきた。専焼システムでは、できるだけ効率よく MA の核変換を行うために、MA を主成分とした燃料を用いることになる。また、MA の発生量を抑えるために、 $^{238}\text{U}$  をできるだけ使わないことが求められる。したがって、専焼高速炉では  $^{238}\text{U}$  を含まない燃料を用いることから、安全上重要なドブラー反応度が小さくなるとともに、MA を多量に含むために遅発中性子割合が小さくなり、臨界制御が難しくなる。一方、ADS は、高速炉に比べて開発項目が多いものの、炉心を未臨界状態で運転するために臨界超過になりにくいこと、燃料組成の自由度が比較的大きく多様な MA 含有燃料への適用性が良いこと、などの特長がある。このため、階層型分離変換システムの MA 専焼システムとしては、ADS が第一候補とされている。

階層型分離変換システムは、商用発電サイクルの様々な炉型や燃焼・冷却履歴の使用済み燃料に柔軟に対応す

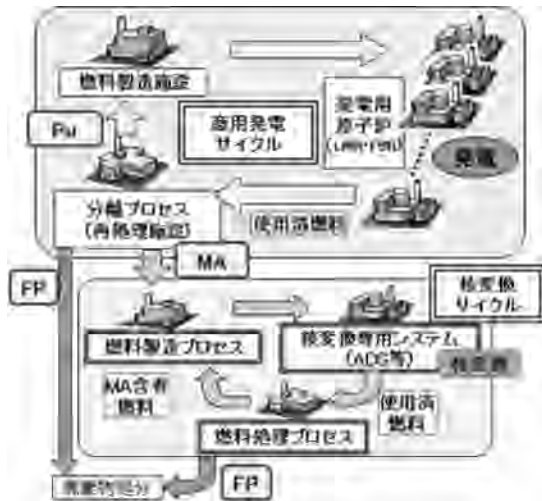


図6 階層型分離変換システム概念

ることが可能である。また、燃料製造や燃料処理等の関連施設を ADS 等の核変換専用システムと同一サイト内に集約配置し、MA をサイト内に閉じ込めて、商用発電サイクルから隔離するとともに MA 含有燃料の輸送の負担を最小化することで、MA 核変換を効率良く行うことができる可能性がある。一方で、MA を集中して取り扱うには、MA の崩壊熱や放射性崩壊に伴う  $\gamma$  線や自発核分裂および  $(\alpha, n)$  反応による中性子等に対する対策が必要であり、核変換システムだけでなく、燃料製造や燃料処理等の燃料サイクル関連技術に関しても開発課題が多い。

### 3. その他のシステム

ここでは MA 以外の Pu もしくは Pu と MA、または長寿命核分裂生成物 (LLFP) の  $^{99}\text{Tc}$  および  $^{129}\text{I}$  を核変換対象とする核変換システムを紹介する。

わが国では、使用済み燃料の再処理と高速炉サイクルへの移行を前提としている。この場合は、Pu は資源であり核変換の対象ではない。しかし、核不拡散の観点から Pu 減量のニーズがある場合や、仮に原子力発電からの撤退を考慮する場合には、使用済み燃料中の多量の Pu と少量の MA の処理処分を考慮する必要がある。使用済み燃料を直接処分せずに、専用の原子力システムで Pu と MA を効率良く核変換/燃焼するための種々の原子炉が検討されている。

軽水炉を代表とする既存の熱中性子炉で、Pu の核変換は可能である。ただし、熱中性子炉で燃焼した Pu 核変換用燃料中の Pu は、同位体組成が高次化して熱中性子での核分裂性が小さくなっているため、連続して熱中性子炉に装荷することが困難である。そのため、一度燃焼した Pu 核変換用燃料は再処理されることなく直接処分される。このようなワンスルーでの核変換を行う方法として、直接処분을念頭に岩石型燃料を用いる核変換

システムやガス炉を用いたシステムが提案されている。

一方で、高速中性子を用いたシステムでは、使用済み Pu 核変換用燃料中の Pu の臨界性低下が問題になりにくい。Pu 核変換用燃料を再処理し再び核変換することで、90%以上の非常に高い核変換率の達成が可能となる。この場合、Pu 核変換用燃料に MA を添加することにより、MA の核変換による高レベル放射性廃棄物の潜在的毒性低減を併せて狙うことができる。核変換専用炉として、PRISM などの高速炉<sup>4)</sup>や、ADS、熔融塩高速炉の概念が提案されている。また、既存の軽水炉をベースにして、できるだけ中性子エネルギーを高くして Pu と MA をマルチサイクルして最後の 1 炉心まで燃やし尽くすことが可能な RBWR 概念<sup>5)</sup>も提案されている。

LLFP については、LLFP の核変換ターゲットを高速炉の炉心内あるいはブランケット領域に装荷する方法が提案されたが、取出し時の LLFP の核変換率は十数%程度と低かった。最近の検討例では、LLFP を燃料に混合する装荷方法等の工夫によって 20%を超える核変換率も得られているが、経済的ペナルティ等の課題がある。

#### — 参考資料 —

- 1) エネルギー基本計画, 平成 26 年 4 月 (2014). [http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/](http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/)
- 2) 「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会, 分離変換技術総論, 日本原子力学会 (2016).
- 3) 核燃料サイクル開発機構, “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ - 総論レポート,” JNC TN1400 99-020 (1999).
- 4) B. S. Triplett, et al., “PRISM: A Competitive Small Modular Sodium-Cooled Reactor,” Nucl. Technol., 178, 186 (2012).
- 5) 日野哲士他, “核廃棄物の環境負荷を低減する軽水炉システム,” 日立評論, 96, 516 (2014).

#### 著者紹介

湊 和生 (みなと・かずお)

日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野) 核燃料, 核燃料サイクル

辻本和文 (つじもと・かずふみ)

日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野) 原子炉物理, 核変換システム

田辺博三 (たなべ・ひろみ)

元原子力環境整備促進・資金管理センター  
(専門分野/関心分野) 放射性廃棄物の管理処分

藤村幸治 (ふじむら・こうじ)

日立製作所  
(専門分野/関心分野) 原子炉物理, 高速炉・核変換システム

## 原子力の開発利用をめぐる米国の動向

日本原子力研究開発機構 内藤 明礼

米国では東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所事故から得られた教訓を基に、国内の原子力発電所の安全対策を強化する一方、原子力を主要な基幹エネルギーとして将来にわたって維持していくことが重要だとの認識を再確認した。DOEとNRCの協力の下、2050年頃の次世代炉の導入を視野に、液体金属冷却高速炉、高温ガス炉、熔融塩炉等の幅広い開発が進められている。

**KEYWORDS:** *Fukushima Daiichi, Nuclear Power Plant, Nuclear Energy Policy, DOE, NRC, Safety Review, GAIN, SMR, Generation Four, Advanced Reactors*

## I. はじめに

東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所(1F)事故以後、我が国の国内世論と比して、海外では“Lessons learned from Fukushima”というキャッチフレーズがポピュラーになったが、このレッスン(1F事故を教訓に既存の原子力発電所の安全対策を可能な限り高めるとともに、より固有安全性が高い技術を開発する)を最も忠実に実践している国の一つが米国である。

前段の安全対策については、事故後いち早くNRCが全国の原子力発電所の緊急安全点検を実施するとともに、9.11テロ後の対策に加え地震・洪水等に関する安全対策実施計画を策定した。これらについては今日までに殆どが完了し、米国において1F事故から得た教訓への対応はすでに過去のものとなりつつある。

後段の新技术開発については、オバマ政権の後期においてDOEが新たに導入したGAIN(Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear)プログラム等により、2050年頃の次世代炉の導入を視野に、液体金属冷却高速炉、高温ガス炉、熔融塩炉等の幅広い開発が官民共同で進められている。

昨年行われた大統領選挙においても、原子力政策は殆ど議論にならなかったが、これは共和党、民主党ともに推進する理由は異なるかもしれないが、原子力を主要な基幹エネルギーとして今後も維持していくことが重要と考えているからである。以下に1F事故以後の米国の動

*America's resolution and moves in terms of nuclear development and use* : Akinori Naito.

(2017年5月8日 受理)

きについて概況をまとめる。

## II. NRCの対応

1F事故後の米国の対応は極めて迅速だった。米軍が中心となって行われたトモダチ作戦を始め米国の事故収束への貢献は計り知れないが、専門家による情報収集も速やかに行われ、事故発生1週間後にはNRCによって国内の原子力発電所運転事業者に対して事故状況と9.11テロ以降の指示事項(SBOへの対応等)が再周知された。さらに、3月23日には国内の原子力発電所の安全性レビューとその結果に応じた改善勧告を行うためのタスクフォースを結成し、直ちに評価作業に着手した。筆者は2011年4月に緊急開催されたIAEAの福島イベントに出席したが、当時のヤツコ委員長が紹介したこれらの対応策を聞いて感銘を受けたことを記憶している。

その後、NRCはタスクフォース勧告の中から設計外事象の緩和措置等特に重要な安全対策項目(Tier-1)を抽出するとともに、最終的に緊急度等に基づきTier-1(速やかに実施)、Tier-2(更なる技術評価が必要ですがすぐには実施できない)、Tier-3(更なる調査が必要)と優先順位を付け、実施計画に沿って安全対策の確立を進めてきた。以下に現時点(2017年2月現在)での進捗状況の概要を示すが、重要な安全対策項目については、一部プラントにおける地震・洪水リスクの再評価、設計外事象の緩和に関する命令への対応、フィルターベント設置が事業者多大な財政負担を強いるとして大きな議論になり計画を修正したMark-1及びMark-2型のBWRに対するベント系統強化対策を除き、2016年中にほぼ対応が終了している。



表1 タスクフォースによる改善勧告とその進捗状況

	勧告の内容	現状
外部事象への防御	2.1 地震及び洪水対策の再評価 2.2 定期的なハザードの再評価 2.3 地震及び洪水の危険に関する現場評価 その他の外的ハザードの再評価	実施中 評価完了 終了 評価完了
設計外事象の影響緩和	4.1 設計外事象の緩和に関する基準策定 4.2 設計外事象の緩和に関する命令 5.1 過酷事故対応の強化ベント設置命令* 5.2 その他格納容器設計に関するベント* 6 水素の制御及び影響緩和 7.1 使用済み燃料プール監視計器の強化 7.2-7.5 使用済み燃料プール給水能力強化	最終案完成 実施中 実施中 終了 終了 終了 最終案完成
複数機事故を想定した危機管理対策強化	8.1-8.4 オンサイト危機管理対応強化 9.1-9.4 危機対応に関する規則整備 10.1-10.2 その他危機管理対策の分析評価 10.3 ERDS* の実現可能性評価 11.2 & 11.4 意思決定と公衆教育	最終案完成 最終案完成 最終案完成 終了 終了
規制哲学	1 規制体系の再評価 12.1ROP* 内の深層防護要求 12.2 過酷事故に関する職員訓練の強化	終了 終了 終了
放射線影響評価	11.3 EPZ* 内の常時放射線監視 (その他) 格納容器ベントフィルター/浄化対策 EPZ 範囲の10マイル以上の拡大 10マイル圏外の住民へのヨウ素剤事前配布 使用済み燃料の貯蔵施設への迅速な移送	評価完了 終了 終了 終了 終了

- \* 5.1 過酷事故対応の強化ベント設置命令：Mark-1, Mark-2型に関するもの
- \* 5.2 その他格納容器設計に関するベント：Mark-1, Mark-2以外の炉に関するもの
- \* 10.3 ERDS：Emergency Response Data System
- \* 12.1 ROP：Reactor Oversight Process
- \* 11.3 EPZ：Emergency Planning Zone

### Ⅲ. 原子力の位置づけ

1F事故の発生を受けて、オバマ大統領(当時)は6日後の3月17日に声明を発表し、原子力に関して「将来の重要なエネルギー源」であることを明確に述べた。

衆知のとおり、米国は長い間新規原発建設がなかったが、オバマ政権は政府による融資保証策等により新規原発建設を促し、Vogtle-3・4号機、V.C. Summer-2・3号機(共にAP1000、残念ながら工事が遅れWH破産の原因となった)が新たに建設されるなどの動きが出ている。(これ以外にも7機の原子力発電所が統合許認可(Combined Operating Licenses (COLs)を受給)昨年10月にはWatts Bar2号機が商用炉としては20年ぶりに新規運開を迎えた。

新規原発建設を促す一方、既存の原発についてはNRCが99機中84機について寿命延長(60年運転)の認可を出す(さらに8機について審査中。また、4機については更に20年の寿命延長の意向を事業者が表明)など、後述するSMR、次世代型非軽水炉の導入までの活用を図っている。

一方で、電力自由化の進んでいる州において、多くは

経済的な理由から早期閉鎖に追い込まれるプラントも出ているが、ニューヨーク州のFitzPatrick原子力発電所のように、州の財政支援を受けて別の事業者が買収、運転を継続することを決めたプラントもある。(ニューヨーク州やイリノイ州は二酸化炭素を排出しない原子力をクリーンエネルギーとして位置付け、財政支援を行う法案を可決している)

オバマ政権は、パリ協定締結の実現等地球環境温暖化防止に積極的に取り組んだが、化石燃料に代わる主要なエネルギー源として、再生可能エネルギーとともに原子力エネルギーをキーププレイヤーに位置づけたとすることができる。

### Ⅳ. DOEの研究開発政策

#### 1. SMRの開発

SMR(Small Modular Reactor)は文字通り小型のモジュールタイプの原子炉であり、広義には非軽水炉タイプも含むが、通常は軽水炉を指す。現在、建設が具体化しているのはNuScale社が計画しているもので、これは最大12のモジュールを組み合わせて運転することが可能(出力総計約570MWe)である。



図1 左は NuScale 社の SMR 概念図(同社 HP より), 右は HTGR 用に開発が進められる TRISO 燃料(アイダホ国立研究所 HP より)

12 のモジュールはすべて 1 つの制御室でコントロール可能であるほか、自然循環を利用した設計(循環ポンプがない)で、固有安全性が高いのがセールスポイントになっている。NuScale 社は既に設計認証を NRC に申請しており(2017 年 3 月 15 日受理)、2019 年中の認可取得と 2026 年の運転開始を目指している。SMR の開発に当たり、DOE は設計・許認可関連費用の 50% を負担する等の財政支援を行った。

## 2. 次世代炉の開発

SMR の次に DOE が既存の軽水炉のリプレースとして期待しているのが次世代(第 4 世代)炉である。我が国の「もんじゅ」のようなプロジェクトはないが、DOE は様々な形での支援策を講じている。その中でも、GAIN プログラムはアイダホ国立研究所をとりまとめ機関として、国立研究所、国立大学等の持つインフラの民間による利用促進を図るほか、GAIN Voucher プログラムによる財政支援を通じて民間(主な事業者だけでも 18 社が次世代炉の開発に携わっている)主導による技術革新・成熟を目指している。

次世代炉の炉型としては現在 6 炉型が候補となっているが、その中でも高温ガス炉(HTGR)及び液体金属(Na)冷却高速炉(LMFR/SFR)が重点開発技術とされている(今年になってこれに熔融塩炉が加わる)。DOE は 2030 年までに少なくとも二つの非軽水炉技術の成熟を図るとしている。

また、このような DOE の活動に呼応し、NRC も新型炉導入を見据え、設計基準を始めとする規制基準策定や品質保証体制の整備に取り組んでいる。これらの活動はパブリックコメントを募集して公衆の意見に耳を傾けるとともに、Stakeholder、すなわち事業者の意見や要望を取り入れながら進められている。次世代炉の導入に向けて、DOE と NRC が文字通り両輪となって民間事業者・

イノベーターの技術開発を支えていると言えよう。

現在は第 4 世代炉国際フォーラム(GIF)等の国際協力を通じた活動が主であるが、米国は本気で次世代炉開発を目指している。事実、HTGR については官民折半での実証炉建設構想があり、その他の炉型を含め、きっかけがあれば SMR 同様一気にプロトタイプ炉の建設・運転、商用化と雪崩を打って進むことも、上記のような現状からは可能性のない話だとは思われない。

## V. 新政権の動向・まとめ

以上、1F 事故以後の米国の動きを簡単に追ってきたが、最後に新政権の動向を紹介してまとめたい。昨年 11 月の大統領選挙においてトランプ共和党政権が誕生した。(同時に行われた上下院選挙でも共和党が多数を占めた。)

冒頭記したように、この選挙において原子力政策はほとんど争点にならなかった。民主党(クリントン候補)はオバマ政権の政策を踏襲し、地球温暖化対策という観点で原子力利用を認める立場であり、共和党(トランプ候補)はエネルギーセキュリティの観点から原子力を支持するというように、理由は異なったものの原子力の開発利用を進めるという点では同一であり、ことごとく対立した両候補の政策の中で最も差異がなかったと言われたほどである。

先日発表された大統領の予算教書(青写真)を見ても、原子力関連予算が大幅に削減されると予測するに足る記述はない。一方で、新たなプロジェクトを立ち上げるという動きもない代わりに、高レベル廃棄物処分や使用済み燃料の中間貯蔵に必要な施策については着実に進めるという方針が示されている。

これらを見る限り、原子力の開発利用については、ユッカマウンテンという象徴的な問題を除き、前政権の政策を受け継いで進められていくものと考えるのが妥当であろう。

### — 参考資料 —

- 1) DOE ホームページ <https://www.energy.gov>
- 2) NRC ホームページ <https://www.nrc.gov>
- 3) America First A Budget Blueprint to Make America Great Again ホワイトハウスホームページ [https://www.whitehouse.gov/sites/whitehouse.gov/files/omb/budget/fy2018/2018\\_blueprint.pdf](https://www.whitehouse.gov/sites/whitehouse.gov/files/omb/budget/fy2018/2018_blueprint.pdf)

### 著者紹介

内藤明礼(ないとう・あきのり)

日本原子力研究開発機構  
ワシントン事務所長



## 福島環境回復に向けた取り組み

## 第4回 汚染土壌の除染、減容化および再生利用を目指した物理処理及び新しい熱処理法開発への試み

日本原子力研究開発機構 矢板 毅 他,  
宮崎大学 伊藤 健一,  
農業・食品産業技術総合研究機構 万福 裕造

本稿(第4回)では、1Fの事故後に伴う環境汚染に対して事故からの復興へ向けて取り組んだ減容化除染と再生利用に関連する研究への取り組みについて、日本原子力研究開発機構(JAEA)と国立環境研究所(NIES)が取り組んできた吸着機構の基礎から物理的除染および減容と熱処理に関する研究を紹介する。

**KEYWORDS:** decontamination, volume reduction, physical treatment, heat treatment, recycling

## I. はじめに

福島第一原子力発電所(以下、1F)の事故により大量の放射性物質が飛散し、除染によって取り除かれた土壌は、汚染土壌として管理がなされている。また今後これらの処理・処分には、膨大なコストがかかるという可能性が指摘されている。それゆえ最終処分については最適な方法をとることが不可欠であるため、事故後6年が経過した現在も、汚染土壌の大幅な減容化を含めた処理方法の検討が各所で進められている。1F事故によって放出された放射性セシウム(Cs)は、汚染土壌中の粘土鉱物に多く吸着していることは、今回の1F事故に加え、大気中核実験、原子力関連施設の事故等の経験に基づく多くの研究により指摘されている。しかしながら、広範囲な環境回復を本格的に実施するという福島事故に対する対応においては、これまでの報告による吸・脱着メカニズムのみでは、十分に説明出来ない事も多く、基礎に立ち返り、本質を改めて明らかにする必要性も生じてきた。そこで我々のグループでは、1F事故以後、原子・分子レベル分析に基づく詳細な粘土への吸着メカニズムの解明を実施してきた<sup>1)</sup>。本稿では、既存の分級法等につ

*Challenges for enhancing Fukushima environmental resilience (4): Development of physical and heat treatment methods on aiming at decontamination, volume reduction and reuse of contaminated soil*: Tsuyoshi Yaita, Mitsunori Honda, Iwao Shimoyama, Kenichi Ito, Yuzo Manpuku, Takuya Tsuji, Daiju Matsumura.

(2017年5月9日 受理)

■前回タイトル

第3回 環境放射線モニタリング調査・評価技術の開発

いて解説すると共に、基礎的研究知見を基にした開発中の物理的減容化法および熱処理によるCs除去・再生利用に関する研究結果の一部を紹介する。

## II. 物理的除染・減容化

## 1. 物理的処理による減容化

土壌汚染分野では汚染土壌の搬出量を削減して環境負荷と浄化コストを縮減するために、高濃度の汚染部位を除去して低濃度汚染部位を現場で利用する分級洗浄法が用いられてきた。その基礎技術は、鉱工業分野における選鉱が基盤となっており<sup>2)</sup>、除染土壌減容化においても選鉱技術のさらなる応用が期待されている。

## 2. 分級処理

分級処理(size classification)は、一般に土壌の粒径による分別手法を指すが、ここでは物理的処理を総括して分級とする。このうち、一般的な操作を基本分級、分級の精密化のために加える操作を高度分級と区分して説明する(表1)<sup>3)</sup>。

## (1) 基本分級

①分別: 別除去土壌等のうち、保管中に線量が減衰して所定の値以下となったものについては、土質の調整等のみで再生利用できる可能性がある。この場合減容処理前の線量測定においてスクリーニング(選定)され、減容処理対象土壌が分別される。対象土壌についても、分級処理の適用性を鑑みて、砂質土や粘性土等、土壌の種類や物性、あるいは内容物で分類される。有機物や汚泥等の場合は、分級ではなく焼却、脱水等の別処理となる。

次に、破袋・解砕された土壌から、木材片や植物体、岩や大きな石等をスクラバーやバケット等で篩って分

表1 主な土壤減容化処理技術の一覧<sup>3)</sup>を参考に作成

区分	操作	主な処理技術	対象土・適用土壌	減容率(%)	
				実験実績	代表値
基本分級	分別	ソーティング、スクリーニング	主にフレコン袋等 バルク土壌		
	分離	分離、浮選	解砕後の土壌		
	分級	分級(乾式)	砂質土(粘性土以外)	57~57%	40%
		分級(湿式)	砂質土(粘性土以外)	12~97%	70%
高度分級	研磨	ミル	硬質土・砂質土	粗粒が高度度の土壌で効果	
		研磨、粉碎			
	剥離	分散剤・攪拌、超音波	解砕後の土壌全般		
選別	磁力選別	分散後の土壌全般	酸化鉄等、パーミキュライト、普通角閃石等を回収		
	比重選別等	分散後の土壌全般			

離・除去する。小さな有機物を多く含む場合は、浮選等により土壌と分別する。浮選後の分級は湿式となる。

②分級：水は土壤粒子を引き合わせるため、乾式は粒子同士の分離や、高度分級における研磨処理の際に有効といえる。また、数十mm以上の粗粒の分級では乾式あるいは有姿でも可能である。ただし、乾燥処理と防塵措置を要する。

通常の土壌は湿潤であることから、細粒分の分級は湿式が一般的である。粒径250~75 $\mu$ m程度までは振動篩やスクリーン等、それ以下は主にサイクロン等で分級される。篩やスクリーンは粒径で区分されるのに対して、サイクロン等は遠心分離の原理であるため、分離には粒子の真比重や形状等の影響を受ける。したがって、Csを吸着する比重の軽い粘土鉱物粒子は、その大きさによらず広い粒径区分の範囲に分布して、減容効率を阻害する場合があると考えられる。そのため、粘土鉱物を多く含む粘性土等は、基本分級だけでは減容効果が低い<sup>4)</sup>。

## (2) 高度分級

①研磨・剥離：分級後に粗粒分の線量が下がらない場合、粘土鉱物等の微粒子が粗粒分に付着・残留していることが多い。これらはミル等による処理で表面の研磨による剥離が可能である<sup>5)</sup>。ただし、剥離後の微粒子は再凝集、再付着して残留しやすく分散処理の併用が必要である。

②分離・分散：室内試験では超音波処理が一般的だが、実処理では導入し難いため分散剤等が用いられてきた。しかし、分散剤は湿式処理後の土壌微粒子の回収に際して凝集沈殿を阻害するために処理効率を下げる。そこで、汚泥の流動化処理等で使用される工業用高出力超音波発生装置等による機械的な分散が実用的かつ有効と期待されている。

③選別・回収：減容処理の高効率化のためには、研磨・剥離・分散等により効果的に分散された土壌粒子から、粘土鉱物等のCsを吸着する粒子のみを選別・回収する方法が必要である。例えば、磁力選別では、汚染土壌から鉄を含む黒雲母やパーミキュライト、普通

角閃石が回収可能である<sup>5, 6)</sup>。ただし粒径が小さいほど磁性性が低下するため、特定の微粒子を凝集させて回収効率を改善する等の改善が必要である。

## 3. 粉碎処理によるCs吸着構造変化

前項で述べたように、ミル等による粉碎処理は、再付着などの問題があるが、粗粒分からの剥離以外の本質的な意義について新しい知見が得られたのでここで述べる。粘土鉱物に取り込まれたCsイオンの吸着サイトはいくつか想定されているが、層間サイトに存在するCsイオンは、粘土鉱物の層構造に上下から挟み込まれておりイオンの移動が容易ではない。粘土鉱物に取り込まれたCsイオンの局所構造をX線吸収微細構造(X-ray absorption fine structure, XAFS)法によって測定した報告によると、層間サイトに吸着されたCsイオンの配位構造では、最近接元素としては、配位酸素のみならず、ケイ素の存在も観測されている<sup>7~9)</sup>。この結果は、層間サイトに吸着されたCsイオンは、閉層した粘土鉱物の層構造に強く固定されていることを示唆している。すなわち、仮に粘土鉱物の層構造を破壊できれば、粘土鉱物からCsイオンを容易に取り出せるという仮説が成り立つ。そこで層構造を物理的に破壊することによりCsイオンの局所構造がどのように変化するかを調べた。層構造の粉碎は酸化ジルコニウム製の遊星型ボールミル(LP-M2, 伊藤製作所)によって300rpmの回転速度にて行った。ボールミルを施した試料に対してX線回折パターンを調べることで、破壊度の評価を行った。ボールミル処理前後の粘土に対しCsを200ppm程度吸着させ、Csイオンの局所構造評価を、上記に述べたXAFS法を用いて行った。XAFS実験は、SPRING-8 BL14B1におけるCs K吸収端を利用した蛍光法にて測定した。粘土の層構造破壊のモデル化合物として、黒雲母を用いた。

粘土鉱物の層構造は、ボールミルによる物理的圧力によって破壊される。図1(a)下のスペクトルはボールミルによる処理を1週間施した黒雲母についてのX線回折パターンである。黒雲母は層状構造を有しているため、ボールミル処理前の状態では底面反射の鋭いピークが観測されるが、1週間のボールミル処理による物理的粉碎により、底面反射ピークがほぼ消失していることが見て取れ、層状構造を持たない物質へと変性していることが理解される。

Cs K吸収端によるXAFSスペクトルから、層構造の破壊に伴いCsイオンの局所構造がどう変化するかを確かめることができる(図1(b))。ボールミル処理前のXAFSスペクトルのフーリエ変換においては、最近接の酸素配位(2.2Å)のみならず、次近接のケイ素の存在による(3.2Å)強いピークも観測されている。一方、1週間ボールミル処理を施した試料に関しては、次近接のケイ素の存在を示すピークがほぼ消失していることが理解さ

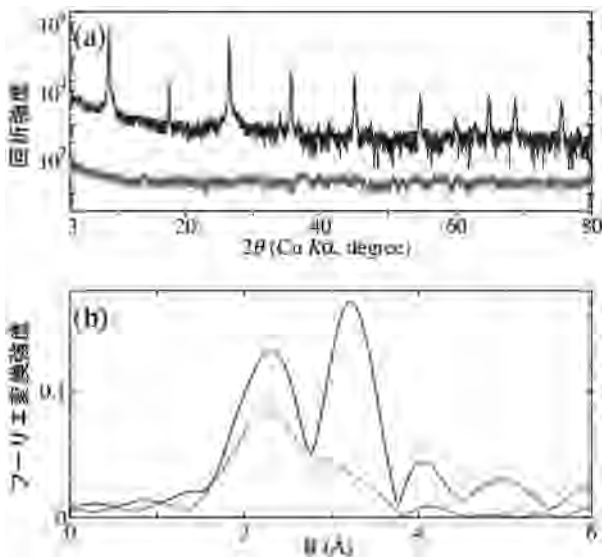


図1 ポールミル処理前後における黒雲母の(a)X線回折パターン、及び、(b)XAFSスペクトルのフーリエ変換処理後は、1週間ポールミル処理を行った後の結果を示している。

れる。これらの結果は、粘土の層構造と取着したCsの局所構造との関係には強い関係があり、粘土の層構造の破壊は、Csの取着状態を変化させ、不可逆性をコントロールできる可能性がある事が分かる。

### III. 熱処理

#### 1. 減容化率と主灰の性状について

ここでは、現在取り組んでいる熱処理による汚染土壌等の減容化について説明する。高度処理法については、焼却あるいは熔融による減容が試験として行われている。例えば、相馬郡飯館村の最表層には、粘土鉱物(族)として、カオリナイト、パーミキュライト、スメクタイト、雲母粘土鉱物が同定されている<sup>10)</sup>が、純粋な鉱物のみならず、より実機に近い複雑な土壌において、高温加熱による生成物を検討する必要がある。そこで異なる母岩の風化生成物に由来する土壌の加熱熔融処理からはじめ、その生成物の特性解析をした。

試薬(和光)のFeOOH(ゲータイト)、 $\gamma$ -Al(OH)<sub>3</sub>(ギブサイトキ)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ヘマタイト)、日本粘土学会標準粘土試料の月布モンモリロナイト(JCSS-3101)、関白カオリナイト(JCSS-1101b)、および表2の土壌の熔融を行った。各試料量(10g)を、焼成電気炉を用いて、室温から1,550℃まで3時間かけ昇温し、1時間保持後、6時間で室温まで降温した。冷却後、XRD、XRF、XPS、SEM-EDS等により生成物の同定を行った。

結果、1,550℃までの熔融により、ゲータイトからはヘマタイト、ギブサイトからはコランダム、ヘマタイトからは物性変化をとまなうものの、ヘマタイトのままであった。月布モンモリロナイトではムライト、珪線石、

表2 実験に用いた試料と熔融後の重量減(%)

試料	産地	重量減(%)
1. 月布モンモリロナイト	群馬県伊勢沼原	8.26
2. 花崗岩風化土壌	岡山県倉敷市	3.95
3. 粘板岩風化土壌	大分県津久井	3.91
4. 斑岩風化土壌	新潟県佐和田	12.84
5. 花崗岩風化土壌	佐賀県高野町	18.79
6. 花崗岩風化土壌	新潟県新潟市	19.27
7. 玄武岩風化土壌	福岡県糸島市	16.80
8. 花崗岩風化土壌	熊本県津久井	15.87
9. 花崗岩風化土壌	福岡県和歌	8.81
10. 花崗岩風化土壌	千葉県市川	9.11
11. 花崗岩風化土壌	茨城県美濃町	17.97
12. 花崗岩風化土壌	世田谷区野川	28.52

ヘマタイト、クリストバライトが生成したが低結晶性であった。カオリナイトからはムライトおよび珪線石が生成した。とくにモンモリロナイトの熔融後の生成物は焼結体とならず、葉片状となった。また、土壌試料では、熔融により重量減をとまない(表2)、減容する。しかし、斑岩、安山岩、玄武岩、石灰岩の熔融後においては緻密な焼結体は生成せず、顕著な空隙が認められる粒状物質が緩やかに固結した不定形の塊状物質が認められた。この原因は、出発物質中の石英の含有量に依存するものと考えられる。それぞれの土壌から生成した鉱物種や量比は異なるが、主成分鉱物としては、ムライト、珪線石、ヘマタイト、クリストバライト等が主成分鉱物である。各土壌は焼成電気炉における1,550℃、1時間の保持により熔融し、降温中に結晶化が開始される。SEM-EDSにより、各土壌からの生成物には明瞭な元素の偏析あるいは分配が認められた。とくに熔融後の生成物の断面では、表面におけるFe<sup>3+</sup>の存在が顕著であった。Csイオンは、主として土壌中の粘土鉱物、とくにスメクタイト、パーミキュライトの結晶構造における層間に存在する。Csの分離、濃集あるいは脱離を考慮し、さらに減容と資材化とを推進する場合には、除染により削剥された表層土壌の細粒画分を集め固化した後に、加熱熔融するなどの工夫が必要である。

比較的規模の大きな試験結果による土壌、焼却灰等の熱処理には、熔融状態まで達するか否かで大まかに分類でき、焼成法<sup>11)</sup>と熔融法<sup>12)</sup>に大別される。さらに焼成法は、1,300℃以上の高温領域において焼き固める方法や1,100℃程度の低温でほぼ土壌の性状を残す方法等がある。いずれも添加剤を加えて加熱することによりCsの除去効率が向上する点で共通している<sup>13)</sup>。これらの手法は、加熱温度、添加剤が種々に異なるが、いずれの手法で得られる浄化物も再生利用可能であり、90%以上のCs除去効率を有する。

#### 2. 反応促進剤を用いた熱処理

##### —その場観察を用いたCs除去過程解明—

前項で述べたように、これまでの熱処理法は1,000℃以上の加熱を要する。熱処理のコストの一部としては、この高温処理に負う部分もあり、我々は反応促進剤

の添加による融点降下現象を利用して、溶融反応温度の低温化を目指した。この目的のため、放射光 X 線を用いたその場観察による Cs 除去過程解明と反応最適化にむけた取り組みを実施している。本研究において我々は福島風化過程にある黒雲母(WB)をモデル土壌として用いた。WBは阿武隈山地の花崗岩に由来し福島では広く存在するが、他の粘土鉱物に比べてCsに対する特異的な取着特性を持ち、WB中に固定されたCsはイオン交換では除去しにくいことが知られている<sup>14)</sup>。そこで単なる加熱処理に加え、WBに対して反応促進材として混合塩(NaCl - CaCl<sub>2</sub>)を用いる加熱処理により、Csの脱離機構について、SPring-8を用いるEXAFS法によるその場観察分析を行った。本実験結果の一部は、本号 p.17 の「特集 1F 事故による環境回復に伴う廃棄物の管理と除去土壌の減容・再生利用の取り組み(2)」の「IV. 熱処理と再生利用について」の項「図4 粘土等溶融塩におけるセシウム塩析過程に関するCs-K吸収端EXAFSその場観察」に示してあり、これを併せて参照していただくとありがたい。

混合塩(NaCl - CaCl<sub>2</sub>)の添加がWBに及ぼす影響を調べたところ、混合塩の添加が無い場合、200-700℃加熱においてほとんどのCsはWB中に保持されたが、混合塩を添加した場合、加熱するにつれてXAFSスペクトルが徐々に変化する事が分かった。(本号 p.17, 図4 参照)

また加熱後室温に戻した時は、未加熱時と完全に異なるXAFSスペクトルを観測した。その場観察EXAFS解析による動径構造関数(RSF)の結果から、加熱過程で部分的にCs-Cl結合が形成され、冷却によりCsが完全に塩化物相に析出することが分かった<sup>15)</sup>。そこで加熱後の試料に対して複数回の水洗いを行った試料について蛍光X線分析による定量解析を行った。その結果、混合塩添加を施して700℃加熱、その後に冷却した試料については、Cs除去率が~100%を達成した。

### 3. 反応促進剤を用いた熱処理

#### —再生利用への可能性—

前項の加熱処理後における鉱物の状態を理解するために、その構造変化をXRDで調べた。本実験には、0.8 wt%の非放射性<sup>133</sup>Csを取着したWB粉末に対し、低压環境(14Pa、ただし前項の実験は減圧下ではない)で前項と同様な加熱処理を行い、組成と構造変化をX線蛍光分析(XRF)とX線回折(XRD)、及び透過型電子顕微鏡(TEM)により調べた。図2の左(Salt free)に示すように塩無添加の場合は400、700℃でほぼ同様のXRDパターンが得られ、700℃まではWBの結晶構造が保たれることがわかった。一方、図2の右(NaCl-CaCl<sub>2</sub>添加)は400℃と700℃で全く異なるXRDパターンを示しており、塩添加の場合に大きな構造変化が生じたことを示している。さらに、TEMを用いた構造解析(東大・小暮敏

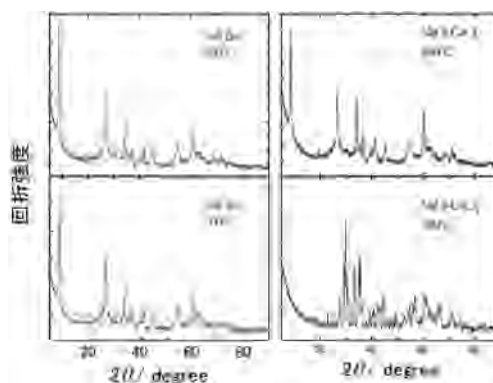


図2 低压加熱処理後のWBのXRDパターン

博教授)により、700℃では普通輝石(augite, Ca (Mg, Fe<sup>3+</sup>, Al) (Si, Al)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)が主要生成物であったことがわかった。

普通輝石は単鎖のイノケイ酸塩鉱物に属し、シリカ単鎖の間に酸素配位数の異なるM1, M2サイトが存在する。M1サイトにはAl<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>といったサイズの小さい陽イオンが占めるのに対し、M2サイトはFe<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>といったサイズの大きい陽イオンが占める。ところがこれらに比べイオン半径はるかに大きいCs<sup>+</sup>はどちらのサイトにも入ることができず、普通輝石形成と共に排出されることになる。これが700℃という比較的低い温度でCsが除去された原因と考えられる。

これらの結果は、添加剤の調整、それに伴う化学反応の制御により様々な生成物が得られる可能性を示唆しており、処理温度の低減だけでなく、産業利用のニーズにあった生成物を再利用することで土壌廃棄物の減容化、さらには有用な物質の生成による再生利用を促進する事が期待できる。今後は、試薬・雰囲気依存性について系統的に調べることで熱処理法の高度化・効率化を図りたいと考えている。

## IV. 終わりに

福島第一原子力発電所事故からの復興へ向けた研究開発は事故後6年が経過し、次の段階へ移りつつある。それは廃棄土壌中でのセシウムの状態の正確な把握、これに対応した適切な新しい技術の開発、さらにこれら技術の成熟を経た後の社会実装へ向けた取り組みである。社会実装に向けては福島県内外において十分な理解を得ることが必須となる。環境回復に向けた技術開発においては、開発初期段階からの地元のニーズや要望を反映する必要がある。我々のグループでは現在社会実装の問題を検討している研究グループとの連携も開始しつつある。英知を結集した取り組みを今後ステップアップさせて、環境回復および処理土壌の再生利用へ向けた除染・減容への取り組みを加速させていきたい。

－ 参考資料 －

- 1) 例えば, Yaita, T. et al.: Global Env. Sci., 20, 33-43 (2016).
- 2) 大和田秀二・監修, 所千晴・副監修, 伊藤真由美, 大木達也, 柴山敦・訳: *Wills' 選鉱技術・鉱物処理・回収のための実用入門書*, 第7版, pp.129-154, pp.261-316, 2014.
- 3) 除染・廃棄物技術協議会: 除染に伴って発生する除去土壌の再生利用に関する提案書, 108-125, (平成23年10月).
- 4) 伊藤健一: 粘土科学, 54, 2015.
- 5) 伊藤真由美, 湊川和貴, Carlito Baltazar Tabelin, 広吉直樹: 第22回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集要旨集, 389-391(2016).
- 6) 佐々木侑輝ら: Radioisotopes, 62, 461-464(2013).
- 7) B. C. Bostick, M. A. Vairavamurthy, K. G. Karthikeyan, J. Chorover: Environ. Sci. Technol. 36, 2670-2676(2002).
- 8) Tsuji, T. et al.: Clay Science, 18, 93-97(2014).
- 9) 矢板毅, 池田隆司, 松村大樹: 日本原子力学会誌, 56, 366-371(2014).
- 10) 八田珠郎ら: 粘土科学, 57, 64-65(2013).
- 11) 本間健一ら: 粘土科学, 52, 71-73(2014).
- 12) 釜田陽介ら: 溶融による放射能汚染廃棄物からの放射性Csの分離に関する基礎研究, 第26回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿 2015, 383-384.
- 13) 大迫政浩ら: 放射性Csを含む除去土壌等の熱処理に関する技術評価(2015). [http://www.nies.go.jp/shinsai/cs\\_heat-treatment\\_201510.pdf#search=熱処理に関する技術評価](http://www.nies.go.jp/shinsai/cs_heat-treatment_201510.pdf#search=熱処理に関する技術評価) (2016年7月閲覧).
- 14) 小暮敏博, 向井広樹, 甕聡子: 地球化学, 49, 195-201(2015).
- 15) Honda, M et al.: ACS Omega 2, 721-727(2017).

著者紹介

矢板 毅 (やいた・つよし)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)アクチノイド化学, 放射光 X 線分光, 福島の実環境回復

本田充紀 (ほんだ・みつのり)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)放射光物性科学/放射光その場観察, 福島環境回復へ向けた溶融塩電気化学法による分離回収

下山 巖 (しもやま・いわお)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)放射光軟 X 線を用いた分光及び分子軌道計算/福島汚染土壌のCs除染法開発

伊藤健一 (いとう・けんいち)

宮崎大学

(専門分野/関心分野)土壌・水質汚染/有害元素, 溶出リスク, 汚染対策技術)

万福裕造 (まんぷく・ゆうぞう)

農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター

(専門分野/関心分野)資源循環システム工学/汚染土壌減容, 再生利用と環境負荷の軽減・回復

辻 卓也 (つじ・たくや)

日本原子力研究開発機構

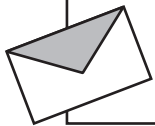
(専門分野/関心分野)X線吸収分光/X線による粘土鉱物中のCs吸着構造の解明

松村大樹 (まつむら・だいじゅ)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)X線吸収分光/「その場」, 「オペランド」, 「時分割」観察による触媒や水素吸蔵材料の反応機構解明

## 理事会だより



### 新たな Web リニューアルに向けて

平成 27 年 5 月から Web をリニューアルして現在のページとなっておりますが、アクセススピードが大変遅くご迷惑をお掛けしております。会員サービス委員会は Web ページの管理運用だけがそのミッションではありませんが、会員サービスのメディアとしては、Web ページは大きな役割を果たしておりますし学会の外への「顔」という役割も担っておりますので、この問題は重要課題でした。当初はネットワーク上でサーバを置いている ISP 会社の回線か契約の問題であろうかと考えており、サーバの場所を変えるか契約を変えることで対処可能かと考えておりましたが、いろいろと調べていくうちにそう簡単な問題ではないということが明らかになってきました。前回のリニューアルを行う際に、サービス向上の一環としてショッピングカート機能を導入し、書籍等の購入申込みを直接行えるような機能を追加したのですが、その際に使ったプラグイン(CMS に機能を追加するためのモジュール)が内部処理の負荷を高めたことが一つの要因である可能性が分かってきました。実際にはこれだけが原因ではないのですが、この段階で簡単な修正をするだけではスピードの向上は望めないということがわかり、会員サービス委員会で、運用開始以降出てきている問題点の解消も含めて新たに業者を選定し改修を行うという方向に進めるということを決定致しました。その後、本年 4 月には複数の業者から一つの業者に絞り込み、現在改修に向けて作業を開始しております。学会員の皆様にはご不便をお掛けしておりますが、今秋にはレスポンスが今よりは格段に向上したサイトに生まれ変わる予定ですのでそれまでお待ち頂ければと思います。

学会 Web の応答スピードの件はある意味技術的な問題ですが、その中身に関しても会員サービス委員会では議論を行ってきました。その一つが Web コンテンツの管理の問題です。現状では Web ページの日々の管理に関しては事務局の中でそのページに関連する担当者が自律的に行って頂いております。この体制自体には問題は無いのですが、学会の顔となるトップページの管理に関しては、最終的な責任を誰が負うかという点が現状では明確に定まっておらず、トップページに載せるべき情報の交通整理に事務局が苦勞しているということが会員サービス委員会に上がってきました。つまり、関連するイベントや組織の情報をできるだけ目立つようにトップページに載せて欲しいという要望が来た場合、それを認

めるか否かという問題です。要望に応じて無条件でトップページに載せてしまった場合、トップページの情報が多くなりすぎて、(以前のページのように)見にくいページになってしまう可能性が高いのです。この判断はその情報の学会全体としての位置付けを考慮して判断すべきことであり、事務局だけでその判断をすることはできません。実はホームページの運用に関しては、広報情報委員会に「ホームページの維持に関する規約」というものがあり、トップページの管理責任者としては「事務局長」がその任を負うとなっております。しかし、事務局長が全てを判断することは困難ですし、Web の実質的なコンテンツの内容を決めているのは会員サービス委員会という事情もあります。このような状況を改善し、広報情報委員会と会員サービス委員会の Web ページに関する連携を深めるために、合同の WG を立ち上げることとし準備を進めております。元来、Web ページに関して関係の深い両委員会との連携がほとんどなかったという点は問題ですので、今後は情報コンテンツに関しても連携して対処していきたいと考えております。

もう一つの課題は会員専用ページとそこでの情報提供の問題です。会員専用ページに関しては「会員にならないとアクセスできない情報を準備しそれによって会員増強を図る」という意図があり、それに関して会員サービス委員会で議論を行って参りました。その結果としては、いろいろあるのではないかと考えていた会員限定コンテンツの内容が意外に乏しいことが明らかになりました。例えば過去の報告書や資料という案もありましたが、事務局への一年間のリクエスト数はそれ程多いわけではなく、このような情報の提供が学会員であることに対するサービスであると考える会員は少ないのではないかと結論になりました。実は現在の会員ページでも、会員限定情報は提供できるので、会員にとって真に有用でどうしても欲しいという限定情報があればそこで提供することも可能です。

Web の運用と改修に関しては会員の皆様からのご意見を尊重して参りますので、今後ともよろしく御願ひ申し上げます。

(理事・会員サービス委員会幹事 高橋 信)

「理事会だより」へのご意見、ご提案の送り先  
rijikaidayori@aesj.or.jp