

### 巻頭言

#### 1 廃止措置へ統合と連携強化を

山名 元

### 時論

#### 2 もんじゅ・原子力機構・日本の原子力

もんじゅで再度、事故を起したら原子力機構のみならず、原子力全般に対しても極めて厳しくなるであろう…。

齋藤伸三

#### 4 電子制御屋の反省

電子制御の分野は、急速な変化をとげつつある。その変化に対応していくことは、たやすいことではない。

新 誠一

### 解説シリーズ

#### 核燃料サイクルフロントエンド (1)

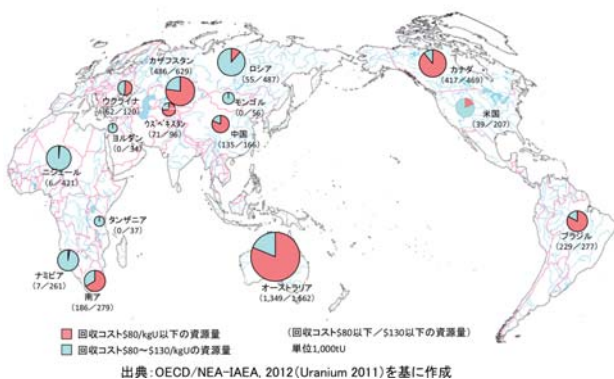
#### 17 ウラン資源の特異な市場構造と需給動向

ウラン市場は過去の遺産である二次供給源が市場に出回り、成熟した市場になり得ていない。市場の変遷を振り返り、ウラン資源の特異性を精査することにより、将来の見通しを概観する。

小林孝男

世界のウラン資源量分布 (在来型既知資源 <\$130/kgU)

全世界: 533万tU (2011年1月1日現在)



#### 表紙の絵(洋画)「雪の村」 制作者 立木雅子

【制作者より】 オーストリアのチェスキーを旅した時に、一部溶けかけた雪の上にもまた新たな雪がしんと降りかかる冬景色は、深く印象に残りました。肩を寄せ合うような町並みが、また屋根の赤色や壁の茶色が、村人の希望を連想させてくれました

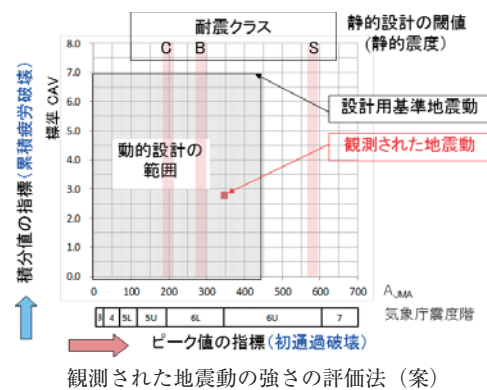
第44回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

### 解説

#### 12 原子力発電所の耐震性能を知る —地震発生後の電力安定供給のために

わが国の原子力発電所は新潟県中越沖地震と東北地方太平洋沖地震を経た。ここから得られた知見を概括し、地震発生後の電力安定供給のための施策を提案する。

落合兼寛



### 解説シリーズ

#### 高レベル放射性廃棄物の可逆性と回収可能性 (4) 最終回

#### 28 R&R 国際会議内容の紹介(その2)と今後への期待

前回に引き続き、処分事業の実施段階における可逆性・回収可能性(R&R)の一環として開催された国際会議より、人文・社会科学分野の学者・専門家やNGO組織からの発表を中心に紹介する。

田辺博三

### 解説シリーズ

#### 世界の原子力事情 (4)

#### 34 欧州と国際機関

福島第一原子力発電所事故後、ドイツが原子力発電から撤退を決めた一方、今後も継続利用あるいは新たに導入しようとしている国があるなどと、対応は多様である。

日置一雅, 桜井 聡

## 解説シリーズ

出力が変動する再生可能エネルギー発電の  
大量導入と電力システムの進化 (2)

### 39 柔軟性向上のための新技術

今回は、需要の能動化や再生可能エネルギー発電の  
制御と出力予測を取り込んだ電力システムの需給運用  
の高度化に焦点をあてる。 荻本和彦

## 解説シリーズ

モデリング・シミュレーションの高度化 (2)

### 45 V&V のための精度保証付実験データ

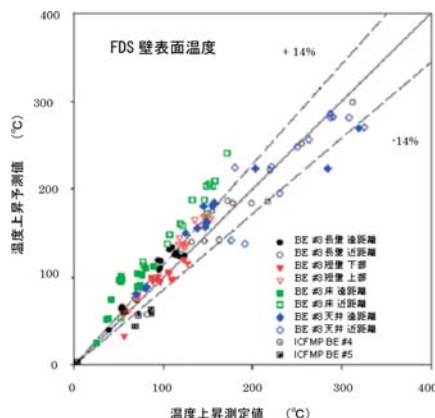
日本の知識集約物としての計算コードは必須であ  
り、今すぐに取り掛かる必要がある。さもないと、20  
年後には韓国製や中国製の計算コードで設計された原  
子炉を輸入する事になるであろう。 岡本孝司

## 解説シリーズ

モデリング・シミュレーションの高度化 (3)  
最終回

### 50 V&V の実施の国際動向と適用

V&V は解析コードの結果の信頼性を保障するた  
めの手法だ。その国際動向と適用の具体例として  
NUREG-1824 を紹介する。 笠原文雄



FDS による壁温度の予測と試験実測値との比較例

## 報告

### 55 原子力シニアネットワーク連絡会 (SNW) 第 14 回シンポジウム —原子力は信頼を回復できるか？

原子力が国民の信頼を損ねた原因は何か、信頼回復  
には何が必要か、原子力界は何を反省すべきか。

針山日出夫

## 6 NEWS

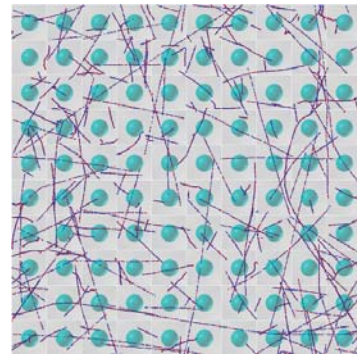
- 福島第一 5, 6 号機の廃炉を正式決定
- 政府、廃炉施設の技術要件を了承
- 汚染水対策、国内外の提案 780 件に
- 規制委が柏崎刈羽 6, 7 号機の審査開始
- 信頼できる情報源はマスメディアが優位
- 海外ニュース

## 解説

### 23 放射線生物学の最前線—DNA 損傷機 構と損傷修復の分子シミュレーション

複雑な階層構造を持つ生物システムが、放射線スト  
レスに対してどのように応答するか。放射線の照射に  
より生じる DNA 損傷と修復の過程におけるシミュ  
レーション研究の最前線を解説する。

横谷明徳, 高須昌子, 石川顕一



2 次電子平衡成立条件で 1mGy の <sup>137</sup>Cs  $\gamma$  線が  
照射された細胞集団中のトラック分布

## 会議報告

### 57 燃料サイクル国際会議 GLOBAL 2013

太田宏一

- 58 新刊紹介「溶融物の物性」 村上 毅
- 59 会報 原子力関係会議案内、人事公募、共催行事、  
次年度会費請求のお知らせ、意見受付公告、英文論  
文誌 (Vol.51, No.2) 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、学会ホームページの「目安箱」  
(<http://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/>

# 廃止措置へ統合と連携強化を



国際廃炉研究開発機構 理事長

山名 元 (やまな・はじめ)

東北大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。動力炉・核燃料開発事業団（現・日本原子力研究開発機構）主任研究員，京大助教授を経て，2002年より現職。国際廃炉研究開発機構理事長を併任。著書は『間違いだらけの原子力・再処理問題』、『それでも日本は原発を止められない』など。

この8月より，技術研究組合 国際廃炉研究開発機構（IRID）の運営に携わっている。福島第一原子力発電所1～4号機の廃炉に中長期的に必要なR&Dを，現場での廃炉の取組と整合させながら統合的に進めることが，この新組織の重要な使命である。この業務に就いて以降，重要に感じている点が3つある。その一つが，(1) 廃止措置における時間軸に沿ったリスク管理戦略の重要性，二つ目が，(2) 技術的チャレンジと技術的統合や分野・組織・国境を越えた連携の重要性，三つ目が，(3) この廃止措置の極めて重い意義の再確認とこれに対する責任ある取組体制の重要性である。

先日，近藤原子力委員長から「廃炉ではなく，廃止措置ではないか」という指摘を頂いた。新組織の名称には「廃炉」が含まれるが，確かに「廃炉」というと「炉を廃する」と，意味が広く漠然と感じられる。我々が目指すのは，“管理状態にある損傷施設を，最終的に管理から外したクリアな状態に持ち込む措置”であり，委員長の指摘は納得できる。廃止措置という長い取組においては，上記(1)のリスク管理戦略の重要性を感じる。短・中・長期の時間軸に沿ってリスクをどのように低減させて最終的な「End state（目標とする終了状態＝出口戦略）」に持ち込むかの戦略が問われる。トラブルや気象等によるリスクを最小化しつつ可及的速やかに燃料デブリ等のハザードの除去と安定化を進め，長期的には“End state”に収斂させるという，長期の戦略が問われるのである。

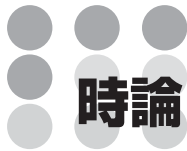
この難しい取組に不可欠なのが，上記(2)の技術的な統合と広い連携である。技術分野を越えた技術の取り込みや国内外の組織との連携は，廃止措置に必要な時間やコストを短縮し，より現実的で好ましい“End state”を達成する上で必須である。汚染水対策，燃料デブリ取り出し工法，遠隔技術や安全確保の技術，廃棄物処理処分最適化技術等のあらゆる面において，個別の技術を包含する統合的なエンジニアリングや，組織や国境を越えた組織の連携が必要である。分野間の協同や異分野連携が今後の廃止措置の加速の鍵になるであろう。

上記の(3)でいう取組体制の重要性は，「日本の原子力技術への信頼」という観点から強調したい。原子力は，フロントからバックエンドに亘る一貫した“閉じ込め”を前提とした技術であるが，この閉じ込め系が破壊されてしまった。一部の政治家やメディアをはじめ多くの国民は，原子炉から地層処分に至る“閉じ込め能力”に対する不信を，技術や運営体制に対して突き付けているのである。また，福島第一への取組は，海外から「日本の原子力技術やその責任体制の信頼」を問う視点からウオッチされている。福島第一への責任ある取組は，世界からわが国の原子力全体に突き付けられた課題だという認識を持ちたい。原子力関係者が広く連携し，しっかりした戦略に基づいて取り組める体制の構築が期待される。廃止措置の推進，研究開発，技術判断の責任体制を明確化した上で総力体制を構築することがわが国の原子力の再生に繋がる，という思いを，政府や関係組織と広く共有したいものである。IRIDは，このための最初のステップとして設立された組織であると言ってよい。

以上のことは，松浦祥次郎氏（日本原子力研究開発機構理事長）が語る「INTEGRITY：完全性，統合性，誠実さ」（本誌Vol.55（No.9）の巻頭言）の重要性に通じる。福島第一の廃止措置こそが，INTEGRITYによって進めるべき技術的チャレンジであり，この取組のための場としての原子力学会に期待するところは大きい。

(2013年 11月22日 記)





## もんじゅ・原子力機構・日本の原子力



齋藤 伸三 (さいとう・しんぞう)

日本原子力研究開発機構もんじゅ所長  
 東京大学工学系大学院修士課程修了。日本原子力研究所副理事長、理事長、原子力委員会委員長代理を経て、2013年から現職。

**1. もんじゅの度重なる事故、トラブル、不祥事**  
 高速増殖炉もんじゅは、1995年12月にナトリウム漏れ事故を起し、長期にわたる運転停止状態に至った。2010年5月には、一旦運転再開にこぎつけたが、炉心確認試験終了後に炉内中継装置の落下事故により再度停止を余儀なくされた。さらに、点検機器の変更手続きの不備、点検時期を超過した機器等が14,000点以上に上り、2013年5月29日に原子力規制委員会より原子力機構に対し、原子炉等規制法36条並びに37条に基づき保安措置命令及び保安規定変更命令が言い渡され、保安措置命令が解除されない限り使用前検査を進めるための活動を行わないこととされている。

今回の事案に関して原子力機構では根本原因分析を実施し、①プラントの長期停止による組織の技術力の低下、②保守管理上の問題に関するトップマネジメントのコミットメント及び管理職層のマネジメント力の不足、③保守管理活動の周到な計画の不足、④組織の技術力維持や法令遵守に係る理解、意識の取組が不適切であり、業務遂行上の技量や意識の不足、⑤職員のモチベーションの低下、業務遂行のためのコミュニケーションや意欲の不足等が挙げられている。これらは内部調査・検討・評価で挙げたものである。

一方、地元等では、「度重なる事故、トラブルのたびに再発防止策を作成したと言ってきたが、何ら変わっていない、1兆円を投資して何ら成果も出ていないのでは民間企業であればとうの昔に破産している。」との批判も出ている。世間の目はもんじゅに対して厳しく、もんじゅで再度、事故を起したら原子力機構のみならず日本の原子力全般に対しても極めて厳しくなるであろうと深い危惧の念を抱き憂慮せざるを得ない状況に追い込まれている。

### 2. 原子力機構改革ともんじゅの現状

文部科学省は、原子力規制委員会の措置命令等を踏まえ、文部科学大臣を本部長とする「日本原子力研究開発機構改革本部」を5月28日に設置し、原子力機構改革案

をまとめた。その中で、安全を最優先とした業務運営、国の政策上、優先度の高い業務の重点化等々が指摘されているが、もんじゅに関しては、特に、理事長の直轄組織とすること、運転管理に専念する発電所組織にスリム化し、付帯的な業務は別の支援組織で行うこと、プロパー率の低い保守管理部門に要員の増強を図ること等が提言された。

原子力機構は、並行して理事長を本部長とする「原子力機構改革推進本部」を設置し、文部科学省の改革案を踏まえつつ「機構改革計画—自己改革—新生」へのみち—を取りまとめた。改革の理念として、①原子力機構のミッションを的確に達成する「強い経営」(トップマネジメント)の確立、②国民の信頼と安心を回復すべく安全確保・安全文化醸成に真摯に取り組む、③事業の合理化を実行、④もんじゅ改革の断行を挙げている。これを受けて、10月1日に、やはり理事長を本部長とする「もんじゅ安全・改革本部」を設置し体制、風土、人の面から改革の具体策を検討している。体制では、「もんじゅ」組織を運転・保全・管理に集中したものとし、その他の業務は支援組織とする。保守管理等の経験者を他事業所及びキャリア採用により約60名投入し技術力、プロパー率を上げるとともに安全確保に必要な予算を追加措置した。特に、プロパー率が低いプラント保全部は38%から43%に上げた。そもそも、本来、自らが保守管理しなければならない研究開発段階の原子力プラントでプロパー率が極めて低いこと自体が問題である。また、自立的な運営管理体制をより効果的に確立するために経験豊富な電力会社の技術者の追加派遣をお願いするとともに、点検漏れが起こらないよう電算機による「保守管理業務支援システム」を構築し運用を始めた。風土の改革は理事長、所長と現場職員との直接対話を実施し、安全意識の改革・技術力向上への発揚、安全文化醸成、品質保証体制の向上等徹底した組織風土の変革を求めている。人の改革では、個人の能力を高め現場力を強化することにより、モチベーションを高めマイプラント意識が定着することを目指している。副所長にも担当部

室を割り当て積極的に部室課長，一般職の職員とのコミュニケーションを持たせるようにしている。

### 3. もんじゅ運転再開への険しい道のり

もんじゅの改革は緒に就いたところであるが，運転再開までには幾多の険しい山が待ちかまえている。まず，原子力規制委員会から言い渡された保安措置命令の解除及び保安規定変更命令に向けた取り組みを実施し，求められた書類を提出してとされねばならない。並行して進めている敷地内の破碎帯が活断層ではないとの機構評価結果の了解も必要である。

その上で，現在，軽水型原子力発電所に関して進められている新規制基準適合性に係る審査と同様な審査を受ける必要がある。特に，もんじゅは研究開発段階にある発電所と位置づけられ，ナトリウム冷却炉であり，新規制基準も更に検討を深めることとされている。軽水炉に課した新基準を参考にしつつも，新設ではない既設のナトリウム冷却高速炉であるもんじゅの特性も考慮に入れた基準が望まれる。無論，最終的に守るべきことは過酷事故が発生しても敷地境界付近の公衆及び環境に放射性物質の放出による許容されない影響を与えないことは軽水炉と同様である。もんじゅとしても適切な新規制基準に適合する対応をせねばならないが，現在，炉心は燃料を装荷したままであり，ナトリウム温度は低温停止状態と言っても約200℃である。このような条件下で追加工事として何が出来るか，また，それに要する経費が国民，政府に認められる範囲であるかにも留意しつつ，最終的に守るべき安全確保策を練らなければならない。

### 4. 原子力機構再活性化と日本の原子力

原子力機構の改革の理念については上述したとおりであり，強い経営力を発揮するために戦略企画室等の設置，現状の8研究開発部門・17事業所を6事業部門に集約することとしている。これらは，原子力安全研究・防災支援，原子力科学研究，核融合研究開発，福島研究開発，バックエンド研究開発，高速炉研究開発の部門である。しかし，この中には，役割を終え整理・廃止措置を行わなければならない大型施設が多々あることには変わりはない。

一方，原子力機構は，福島事故処理のような問題解決のための研究開発や規制の求める安全研究，更にはその先を予見した安全研究（例えば，過去における原研の炉心損傷に係る研究）とその基礎・基盤となる研究開発及び確実に産業界の先鞭となる研究開発こそ国民の付託に応え，社会に貢献するものであり，その成果は国民から評価されよう。

しかし，もんじゅにおいて，これ以上の事故，トラブル，不祥事を起せば，政策的にも原子力機構の解体もしくは解体的な出直しが求められると予測される。後者で

処理され，残すべきものを残し，他は清算事業団として処理するのであれば歓迎すべきことではないかとの向きもあろうかと思うが，その清算は多くの面で少なからず日本の原子力産業界に影響を及ぼし，原子力発電の運転再開が軌道に乗るまでは時間を要する状況の中，新たな混乱を招くことは必定であろう。このためにも，もんじゅの新たな失敗は許されず，また，核燃料サイクル論の足を引っ張ることは避けねばならない。

### 5. 改めてもんじゅの役割

もんじゅの役割については，文部科学省に設置された「もんじゅ研究計画作業部会」で審議され，その結果は経済産業省の総合資源エネルギー調査会に報告されている。今後，策定される「エネルギー基本計画」にどのように位置づけられるかが焦点となる。文部科学省としては，もんじゅの役割として，①高速増殖炉プラントの技術成立性の確認を含む高速増殖炉技術開発の成果の取りまとめ，②高速増殖炉/高速炉システムを活用した廃棄物の減容及び有害度の低減等を目指した研究開発，③原子力発電システムとしての高速増殖炉/高速炉の安全技術体系の構築を目指した研究開発としている。①は高速炉開発の当初から目指した目的であり，発電プラントとしてナトリウム/水の熱交換による蒸気発生器をはじめ諸技術の成立性を確認し信頼性高く安全に発電することである。②は高レベル放射性廃棄物中の長半減期のマイナーアクチニドの核変換を高速炉で行おうとするものであり，数10年来の課題となっている。加速器駆動システムとの比較，燃料中にどの程度マイナーアクチニドを混合出来るか等研究課題としては多くが残されている。③は特に，東電福島第一原子力発電所事故を踏まえた新たな課題に既設炉あるいは新設炉として如何に取り組むべきか実機をベースに研究開発することになる。

その他，高速炉開発では，今やロシア，そしてインドがトップグループにあり，いわゆる日米欧圏では，もんじゅ，常陽が唯一の実在する高速炉となってしまっていること，非核兵器国で唯一核燃料サイクルが認められていること等を勘案した長期のエネルギー政策としての判断が必要となる。

なお，もんじゅの運転再開には国民や立地自治体の理解が欠かせないことは言うまでもなく，研究計画についても，これまでの開発経緯を踏まえ，効果的・効率的に，かつ国民にその過程・成果が伝わるよう明確な目標をもって研究を推進していくという観点から，年限を区切った目標を掲げ，その評価を行い，その後の研究の継続の可否を決めることも文部科学省の作業部会で求められている。まずは，もんじゅの組織・体制の立て直し，職員の技術力および法令遵守意識の向上，安全文化の醸成を浸透させることが喫緊の課題である。

(2013年 11月17日 記)



## 電子制御屋の反省



### 新 誠一 (しん・せいいち)

電気通信大学情報理工学研究科教授

1980年東京大学大学院修士課程修了。同年、東京大学助手。1987年工学博士(東京大学)。筑波大学、東京大学の助教授を経て、現職。技術研究組合制御システムセキュリティセンター理事長、計測自動制御学会会長。

1954年生まれの私にとって、ここまでの電子制御屋人生は変化、変化の面白さである。あまりの変化の速さと多彩さに流されてきたと言ってもよい。この年に至り、面白さを見直し伝えていかなければならないという思いが強くなってきた。それは、電子制御屋としての反省でもある。走りながらの反省を聞いてもらう前に、少しバックグラウンドをお話したい。

私は小学生の時にエレクトロニクスの魅力に囚われた。真空管、トランジスタ、ICという変遷と混乱の中で中学生時代はアマチュア無線にのめり込んだ。並行して、技術家庭科の先生が持ち込んだ1960年代のブルーバードをいじらせてもらった。

高校生の時にトランジスタ式のコンピュータに出会い、100ステップ弱の最小二乗法のプログラムを作成して物理の課題を解いた。同じころにインテルが4ビットマイコンを開発した。

大学では大型計算機が幅を利かせていた。ここで、本格的なプログラミング教育に出会った。専門課程に進むとマイコンボードの組み立てが課外授業であった。同じころ、制御論の授業を受けて、物を動かす設計を数学で行う制御の道を志した。

大学院時代の指導教官であった北森先生(東京大学名誉教授)からは「制御は哲学である。」「現場で使える理論を作れ。」という難しい信念を叩き込まれた。大学院終了後、先生の研究室の助手になり、大型計算機、制御用計算機、ミニコン、パソコン、組込ボードを監理する立場に立った。並行して、鉄鋼、紙パルプ、セメント産業などの素材製造の制御を現場の技術者と取り組んだ。電子制御屋としての出発点である。

1988年に筑波大学に移籍して独立した。その頃から、マイコンが家電や自動車に普及し始め、私の産学連携の枠組みも大きく広がった。丁度、インターネットの走りが筑波大学では整備されつつあった。そして、電話回線や携帯電話もデジタル化が進み、NTTや携帯電話キャリアとの共同研究も始まった。

原子力関係では「ふげん」の冷却管劣化の電子計測を動力炉・核燃料開発事業団と始めた。その流れでもんじゅの電子制御の一部にも関わらせて頂いた。

以上のように、マイコンが産業機器、自動車、家電などに広がる波に乗って、電子制御屋として連携する業種が広がっていった。それが、2000年前後から有線や無線でネットワーク化する流れとなり、HEMS (Home Energy Management System) や全ての物をネットワーク化するというユビキタスネットワークという形で立ち上がり始めた。

さて、反省であるが、ネットワーク化が本格化する頃から、情報系ではセキュリティが大きな課題になりつつあった。制御系にも同様の課題があることを多くの技術者は認識していた。その認識を共有して、計測自動制御学会産業応用部門の有志が産業用ネットワーク部会を足場に、制御系セキュリティの研究・活動を始めた。これは日本電気計測器工業会およびJPCERT/CCと連携した活動に発展した。

このような地道な取り組みは行ってきたが、現実の制御系のサイバーセキュリティ対策が不十分だったことが反省すべき点の一つである。懸念は2010年夏のstuxnet出現で現実化した。これは1MB弱のマルウェアにも関わらず、イランのウラン濃縮工場に致命的な打撃を与えたと言われている。そのソフトは芸術的と言ってもよいほど精緻に作られ、エンジニアリングツールやUSBメモリー経由で制御系に侵入して、遠心分離機の回転数を乱すことで故障率を上げる仕組みである。つまり、制御系の欠点を知り尽くしている多数の専門家が多額の資金を得て制作されたものと思われる。

2011年3月11日には、御承知のように東日本大震災が起こり、電気も、ガスも、水も、通信も止まった。stuxnetの出現と震災という二つの出来事を受けて、経済産業省の支援を受けて技術研究組合制御システムセキュリティセンター(CSSC)が2012年3月に発足し、今年4月には被災地である宮城県多賀城市に東北多賀城本



部を設置し、5月に開設記念式典を挙行了。詳細は別な機会に紹介したい。私は先の反省に基づき、このセンターの理事長を引き受けるなど昨今は制御システムセキュリティ対策に東奔西走である。

さて、もう一つの反省点はプリウス問題である。2009年秋にLexus GSのアクセルペダルがフロアマットと干渉して乗員が全て亡くなるという事故があった。それに引き続き、プリウスのブレーキが濡れた鉄製のマンホールの蓋の上を通過時に一瞬利かなくなるという問題が浮上した。さらに、カロラの電子スロットルが暴走するという訴訟が米国で頻発した。これらをまとめてプリウス問題と呼びたい。

プリウスは結局、百万台規模のリコールを行ったが、技術屋としては納得がいかない。濡れたマンホールの蓋ではブレーキが利かないのは当たり前。逆に、このような場合はブレーキを踏むなど教習所では習った。

もっとも、これは30年以上前の常識。この問題に絡んで多数のマスコミから接触があったが、編集者やディレクターに自動車の基本知識が無いことを痛感した。車離れが著しい。

車離れは都会だけ、地方では車が無くては生活できないと批判を受けることが多いが、都会、地方を問わず車への関心が薄れているのは事実である。実際、書店にいけば20世紀に幅を利かせていた車雑誌が隅に追いやられているか、皆無となっている。昔の男の子は車の話をすると盛り上がった。今は、スマホの話で多少は盛り上がるが、21世紀という時代になって技術への関心が急速に薄れているのは肌で感じる。

現在の車はエレクトロニクスの塊である。ガソリンエンジン車でも原価の40%ほどはエレクトロニクス関係の費用である。ハイブリッドになると60%以上、電気自動車になると80%近くがエレクトロニクスである。このため、自動車のオーナーができるメンテナンスは限られている。それどころか、ボンネットを開けると見えるのはエンジンカバーだけと、メンテナンスはディーラーへという道筋が出来上がっている。

ACC, ABS, LKA, TRC, EFI, EBA などなどの電子制御の略語があるが、元の言葉を言える方は専門家か強度のオタク。全ての詳細を知っている人は皆無だろう。実際、ガソリン自動車に使われている全ソフトウェアは1000万行クラスとなっている。A4用紙で40万ページ。単体の制御でも数十万行なので、A4で1万ページ程度。これでも読めない。

つまり、もう一つの反省点は電子制御を複雑にしたため、一般の方の理解を越えたものを多数普及させたことである。もっとも、一万ページ。ソフトの作成者も全容は把握できない。数十万行のソフトは数百人の共同作業で作成される。それも開発キットに組み込まれるソフトウェアライブラリーや過去から引き継がれているライブ

ラリーを結合して作られている。専門家の理解も越えている電子制御が世界を席巻しているのが実態である。

現代人、特に日本人はスマホ、ICカード、家電、自動販売機、自動改札、自動ドア、エレベータ、照明、空調、電気にガスに水道、下水など訳の分からぬ電子制御に囲まれて生きている。このままでは、人と機械の乖離が大きくなるばかりである。これについても反省だけでなく対策が必要である。

電子スロットルの問題は最終的に米国の交通局やNASAまでもソフトウェアを詳細に点検し問題無しのお墨付きを2012年1月にトヨタ自動車は得た。それだけでなく、賛辞ももらった。しかし、失った信頼は大きなものである。トヨタ自動車は自分のソフトに自信があったが、それだけでは足りないことに気づき、このようなソフトの安全性の国際標準化活動を私に要請した。

これを受けて、情報処理推進機構(IPA)内に消費者機械WGを設置してもらった。同時に、ミドルウェアの標準団体であるOMG(Object Managing Group)でロボットの安全性の標準化を行っている産業技術総合研究所に協力をお願いした。そして、計測自動制御学会の国際標準化委員会にも消費者機械標準化をサポートするWGを設置してもらった。

消費者機械とは変な名称である。これは、オーナーが消費者で必ずしも専門家ではない電子装置ということである。

IPA、産業技術総合研究所および計測自動制御学会の後押しがあり、ソフトウェアのすり合わせ設計に応じて相互依存性の文書を作成するための標準化作業が2013年3月に始まった。

このように電子制御屋として30年以上に渡って頑張ってきたつもりであったが、セキュリティの確保と安全性の担保は大きな反省点である。反省の下、御紹介したようなCSSCやOMGでの活動を進めている。しかしながら、まだまだ不十分である。電子制御を専門家にも消費者にも分かりやすいものにしていく努力が必要である。並行して、セキュリティ対策も進めていかなければならない。

このような活動には、モデル化が効果的だと考えている。動作モデルに基づく安全性確保とセキュリティ確保である。メカも、エレキも、ソフトも、人も数学モデルで記述し、統合的に扱うという学問としてMBSE(Model Based Systems Engineering)がある。これをベースに安全性とセキュリティを高めていきたい。

もっとも、このような活動は一人ではできない。多くの方の支援が不可欠である。これまでも多数の組織、多数の方々の支援を受けてきたが、さらに大きな輪の中で反省を活かしていきたい。皆様にご支援をお願いする。

(2013年11月4日記)



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

## 福島第一 5, 6 号機の廃炉を正式決定

東京電力は2013年12月27日に、新たな再建計画となる総合特別事業計画をまとめた。計画では柏崎刈羽原子力発電所が順次、再稼働することを想定し、電気料金の値下げと収益の改善をめざす。

また、東電は12月18日、福島第一原子力発電所の5号機と6号機を廃炉にする方針を正式に決めた。2014年1月31日付けで廃止する。両機については安倍首相が9月に東京電力に対し、廃炉を決めるよう要請しており、これをうけて東電では地元の大熊町、双葉町に伝え、了承を得ていた。また福島県には19日に、

正式に伝えた。東電では今後、両機があるこの施設を、原子炉建屋内の遠隔除染や格納容器内部の調査、燃料デブリの取り出し装置などの実物大のモックアップ試験（実機実証試験）に活用する予定。

これにより福島第一原子力発電所は、6基すべてのプラント（合計469.6万kW）が廃炉となる。なお同発電所は東電初の原子力発電所として、1971年3月に1号機が営業運転を開始して以降、42年間で累計約9,340億kWhの電力を発電してきた。

（原子力学会編集委員会）

## 政府の政策会議、廃炉研究施設の技術要件を了承

福島第一原子力発電所に関する政府の廃炉対策推進会議は11月14日、燃料デブリ取り出しなどに必要となる放射性物質の分析・研究を行う施設に関する基本的考え方、立地の技術的要件を了承した。中長期ロードマップに従い、既に立地点の決定した遠隔操作機器・装置の開発実証施設とともに、日本原子力研究開発機構が建設・運営主体となって検討を進める研究開発拠点施設

で、燃料デブリや汚染水処理後の2次廃棄物などの性状把握、処理・処分技術の開発を行う。

立地場所は、迅速かつ精度の高いデータの提供が重要で、福島第一発電所の構内または隣接地を第一に挙げた。今後、原子力機構では、施設の整備に向けて候補地の評価を行う。

（資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ）

## 汚染水対策、国内外の提案 780 件に

福島第一原子力発電所事故炉の汚染水問題に関する政府の対策委員会は11月15日、国内外から寄せられた計約780件の技術提案を整理した。

9～10月にかけて募集した技術提案は国際廃炉研究開発機構の技術チームにより、(1)汚染水貯留、(2)汚染水処理、(3)港湾内の海水浄化、(4)建屋内の汚染水管理、(5)地下水流入抑制の敷地管理、(6)地下水の挙動把握、(7)その他——に整理・分類され、適用、効果発揮の可能性な

どからレビューを行った。

海洋放出が懸案となっている処理水からのトリチウム分離に関しても数多くの提案があり、効率性などを確認する必要から、貯蔵技術とも合わせて既往の知見を収集整理すべきとしている。これら提案は対策委員会で精査し、年内目途に取りまとめる汚染水処理対策の全体像に盛り込まれる。

## 規制委が柏崎刈羽 6, 7 号機の審査開始

原子力規制委員会は11月21日、東京電力の柏崎刈羽原子力発電所6, 7号機（ABWR、各135.6万kW）の新規制基準に係る適合性審査会合を開始した。東京電力は9月27日に規制委員会に審査の申請を行っていたが、福島第一事故炉の汚染水問題などにより、これまで非公開のヒアリング実施にとどまっていた。新基準のも

とでのBWRに係る審査は初めて。

会合では申請内容の説明に先立ち、東京電力の姉川尚史常務執行役が、事故を踏まえた安全対策を当事者としての「重要な責務」と認識し、自ら安全性向上に努める決意で規制委による審査に臨む姿勢を示した。

同社は敷地周辺の活断層評価、地震・津波評価、その



他の自然現象に対する損傷防止対策、重大事故対策と有効性評価など、新基準を踏まえた対応状況を説明した。これに対し規制側からは、炉心損傷発生時の格納容器

破損防止対策として設置するフィルタベント設備に関し、地元安全協定に基づく了解が必要との申請時の条件に鑑み、性能の「熟度」を問う声もあった。

## 信頼できる情報源はマスメディアが今も優位、国環研が調査

国立環境研究所が11月14日に公表した「日本人のライフスタイルに関する世論調査結果」によると、環境問題を含む社会の出来事についての情報源を3つまであげるとして尋ねたところ、90%以上がテレビ、75%が印刷された新聞、23%がラジオと回答。インターネット関連は合計で20%程度にとどまり、マスメディアはまだ優位であることがわかった。

信頼できる情報源について地球環境問題と原発関連について聞いたところ、いずれも「テレビ、新聞、雑誌などに出演して発言するジャーナリスト・評論家」を過半数の回答者が選択。「大学や様々な研究機関の研究者・学者」は3割弱の回答で、マスメディアの役割の重要性がさらに認識される結果と分析している。原子力発電所

の事故については8割近くが事故被害について心配していると回答した。

食料の購入については6割が産地を確認していると回答。2割が農産物を購入する際に放射能汚染がありそうな産地を避けると回答した。

調査のまとめのなかで、同研究所は、「そもそも放射線に関する知識が曖昧な状況であることもわかった。東日本大震災後の、変化への対応について、様々な施策や放射能に関する知識などの周知にマスメディアの役割はますます重要になると思われる」としている。

この調査は2013年2月に、全国3千名の成人男女を無作為に選んで実施、1,121名からの有効回答が得られた。

## 海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

### 【米国】

## B&W 社、SMR 開発で共同出資者募集

米エネルギー省(DOE)による認可・技術支援を受けながら電気出力18万kWの小型モジュール炉(SMR)「mPower」を開発しているバブコック&ウィルコックス(B&W)社は11月13日、2022年までに初号機を完成させる建設準備活動等のために共同出資者の募集を加速すると発表した。

mPowerは受動的安全系を備えた地下建設式・一体型PWRとなる予定で、B&W社は同設計を開発するチームとして、「ジェネレーション mPower (GmP) 社」を2010年にベクトル社と設立。顧客のテネシー峡谷開発公社(TVA)とも連携し、テネシー州オークリッジにあるTVAのクリンチリバー・サイトでmPower初号機の商業運転開始を目指している。

DOEは「米国の技術でクリーン・エネルギーを作り、世界に輸出する」というコンセプトの下、民間とのコスト折半によりmPowerのような有望なSMR設計2件の商業化を22年までに実証支援するプログラムを実施中だ。13年4月に初年度分の支援金7,900万ドルを

B&W社に支払う資金調達協力協定書に調印したのに続き、8月には2,050万ドルを追加。最終的に連邦予算から2億2,600万ドルが提供されることになっている。

一方、B&W社はこれまでに3億6,000万ドル以上をmPower開発計画に投入したが、今後、建設段階に進んでいく上で経費はさらに膨らむとの予測がある。このため、十分な資源を今後数年間にわたって確保する必然の一步を踏み出し、商業化の成功を確実なものとするには、GmP社も企業として成熟すべき時期に來たと判断。実際、同設計では14年にも米原子力規制委員会(NRC)による設計認証(DC)審査を正式に開始する予定で、mPowerを間断なく認可の取得と建設の段階に移行させるために、GmP社株の過半数を譲り渡せるパートナーを産業界から幅広く確保したいとしている。

## 規制委、ユッカマウンテン計画の審査を再開

米原子力規制委員会(NRC)は11月18日、ネバダ州ユッカマウンテンにおける高レベル放射性廃棄物処分場の建設認可申請手続きで安全評価報告書(SER)の完成・発行を準備するようスタッフに指示した。これは、米エネルギー省(DOE)が2008年に提出した認可申請につ

いて、連邦巡回控訴裁判所が2013年8月に審査の再開をNRCに命じたのに対応する措置。委員らはまた、NRCスタッフが環境影響審査を完了させるのに必要な環境影響声明書(EIS)・補足文書の準備をDOEに要請しており、残された予算内で出来る範囲の作業を徐々に進めていく考えと見られている。

ユッカマウンテンでの処分場建設計画はオバマ大統領による打ち切り決定、および2012会計年度に認可申請審査の予算が付かなかったことなどを理由に、NRCがすべての審査活動を11年9月末で終了した。SERは同審査における主要な技術文書で全5巻組。2010年8月に導入部にあたる第1巻が発行されたものの、後続の巻は審査の打ち切りにより完成されず、規制上の結論を含まない非公式の技術評価文書が発行されていた。

しかし、11年度末時点で約1,100万ドルの予算が放射性廃棄物基金に残っており、裁判所は「少なくともこれを使い果たすまでは法的に義務付けられた認可プロセスを速やかに継続すること」を職務執行命令としてNRCに要求。NRCはこの予算を最も効果的かつ生産的に活用するため、9月30日までの期間に関係者から幅広く意見募集するとともに、関連予算の情報収集を行っていた。

## 控訴裁、廃棄物基金訴訟で 積立金徴収の停止指示

コロンビア特別区の連邦巡回控訴裁判所は11月19日、電気事業者など州の公益事業団体の監督機関を代表する法定公益法人協会(NARUC)による訴えを認め、連邦政府の放射性廃棄物基金(NWF)に対する原子力発電事業者からの積立金徴収を停止するよう米エネルギー省(DOE)に命じる判決を下した。使用済み燃料を含む高レベル放射性廃棄物の処分がユッカマウンテン計画に替わる処分候補地が示されない現状では、DOEが「徴収は法的に適正」と評価できないのは明らかであるとの判断に基づくもの。

米国の原子力発電事業者は1982年の放射性廃棄物政策法(NWPA)の下で原子力による販売電力1kWh当たり0.1セントを電気料金に上乗せして需要家から徴収。NWPAに明記された計画に従い、DOEが1998年1月までに使用済み燃料の引き取りを開始するというところで契約を結び、ネバダ州ユッカマウンテンにおける深地層処分場建設プログラムのためにNWFへの払い込みを続けてきた。

しかし、オバマ政権は2009年にこの処分場建設計画の打ち切りを決定。基金への払い込み停止を求めるNARUCの同年7月の要請をDOEが拒否したことから、

NARUCと米原子力エネルギー協会(NEI)は10年4月に訴訟を起こした。だが、この時は料金徴収継続の正当性を主張するDOEの年次評価書の内容が認められ、産業界側の訴えは却下されている。

今回判決が下された訴訟は、DOEによる徴収料金の適正評価そのものの信憑性について11年3月にNARUCが提訴した案件。この料金は処分プログラムの実施に十分な見積り額に基づいて定められるが、80年代初頭以降に産業界が積み立てた額は利子を含めて約300億ドルにのぼり、年間7億7千万ドルが操業開始に至らない計画のために払い込まれていることになる。

## ボーグル4でコンクリート打設、 米国でCOL取得の4基が着工

米国サザン社傘下のジョージア・パワー社は11月21日、ボーグル原子力発電所サイトで4号機用原子炉建屋のコンクリート打設を成功裏に完了したと発表した。同サイトでは2013年3月に同3号機で同じ作業を実施しており、これにより、新たな原子力許認可制度の下で12年2月に30数年ぶりの建設・運転一括認可(COL)が発給された両炉およびV・Cサマー2、3号機の4基すべてが本格着工したことになる。3、4号機の営業運転開始時期はそれぞれ、2017年第4四半期とその1年後を予定している。

4号機の設計は3号機と同じく出力110万kWのウェスチングハウス(WH)社製AP1000を採用。原子炉系統のベースマットは格納容器や遮へい建屋などの土台となる予定で、3号機と同様、厚さ1.8mのコンクリートを76m×49mの面積に敷設するため、5,350m<sup>3</sup>のコンクリートを41時間かけて流し込んだ。この作業では、エンジニアリング・資材調達・建設(EPC)契約を請け負ったWH社とCB&I社、およびジョージア社とサザン社の調整により、専門技能職500名を含む作業員600名が参加したとしている。

## エネ省がGEに劣化ウラン売却、 パデューカでレーザー濃縮も

米エネルギー省(DOE)の環境管理部は11月27日、保有している劣化六フッ化ウラン(DUF<sub>6</sub>)の売却先としてGE日立ニュークリア(GEH)社傘下のグローバル・レーザー・エンリッチメント(GLE)社、および仏アレバ社を選定したと発表した。2013年7月に公表した在庫DUF<sub>6</sub>の売却提案依頼(RFO)に対する企業からのオファーを審査した結果決定したもので、GLE社の提案にはケンタッキー州パデューカで米国濃縮会社が6月

に操業を終了した DOE 所有のガス拡散濃縮工場サイトとインフラ設備を再利用し、GLE 社がサイレックス法レーザー・ウラン濃縮工場を建設・操業する可能性も含まれる。DOE は「政府にとって最大の恩恵をもたらす提案だ」と高く評価しており、ほどなく両社との詳細交渉に入る考えだ。

DOE は現行のエネルギー・プロジェクトや軍事計画の必要量を超えた余剰の劣化ウラン、天然ウラン、低濃縮ウランを UF<sub>6</sub> の形でパデューカとオハイオ州ポーツマスのサイトに保管・管理中。これらを処分する選択肢の一つとして、認可を持つ企業体への売却によりパデューカ施設の浄化コストを低減するとともに、高給技術職の雇用をケンタッキー州にもたらすことができるとしている。

GLE 社は UF<sub>6</sub> をレーザー分子法で励起・濃縮する技術の独占商業化・運用権を豪州サイレックス・システムズ社から獲得しており、ノースカロライナ州ウィルミントンで商業規模（最大年間生産量 6,000 トンの濃縮工場を建設・運転する認可を 2013 年 1 月に米原子力規制委員会から取得済み。これに加えて、DOE のパデューカでも同様の濃縮工場建設を検討しており、拘束力のない建設提案を含む「関心表明書」を同じ時期に DOE に提出していた。

## 【フランス】

### アレバ社、オランダ・ボルセラ発電所用の MOX 燃料生産開始

仏アレバ社は 11 月 4 日、オランダのボルセラ原発（PWR、50 万 kW）に初めて装荷されるウラン・プルトニウム混合酸化物（MOX）燃料集合体の生産を 10 月からメロックス施設で開始したと発表した。同発電所はオランダで唯一、稼働中の原発で、事業者の EPZ 社は 2008 年に燃料供給の多様化を決定。アレバ社に MOX 燃料の製造を依頼した。

13 年になってオランダ政府は同社に対し、2014 年に 8 体の MOX 燃料集合体を同炉に装荷、それ以降は毎年 12 体装荷していくことを許可。オランダはドイツ、スイス、フランス、日本などに次いで、プルサーマルの実施計画、あるいは実績がある 7 番目の国となった。

EPZ 社は過去 30 年近く同炉からの使用済み燃料の再処理をアレバ社のラアーグ工場に委託しており、処理量はこれまでに 375 トンに及んだ。アレバ社では、MOX 燃料の利用により、EPZ 社は使用済み燃料のリサイクルにともなう経済的および環境上の恩恵を全面的に享受できると強調した。

## 【ブルガリア】

### 国内 3 基目の建設計画を発表、AP1000 を 1 基増設

ブルガリアの D・ストイネフ経済エネルギー大臣は 11 月 25 日、5、6 号機のみが稼働するコズロドイ原子力発電所サイトに、ウェスチングハウス（WH）社製の第 3 世代設計・AP1000 を採用した 7 号機を増設する計画を発表した。2012 年 3 月に、ロシア製の 100 万 kW 級 PWR を 2 基建設するベレネ原発計画が頓挫したのに代わるもので、P・オレシャルスキ首相はエネルギー関係のパートナーをロシア以外に多様化する狙いに言及した模様。年内にも閣議決定し、2016 年に起工式などの建設準備を始めたいとしている。

ブルガリアでは 2006 年に当時の社会党政権がベレネでのプロジェクトの主契約者としてアトムストロイエクスポート社を選定して建設計画を進めていたが、12 年 1 月に発足した中道右派政権は同年 3 月に同計画を打ち切り、その代わりにコズロドイ原発に 1 基増設する計画を検討。ベレネ用に購入済みのロシア製機器を WH 社製の計装制御系や燃料、および親会社の東芝製タービン発電機と組み合わせるハイブリッド化構想について、WH 社に実行可能性調査を依頼していた。

しかし、13 年 2 月に同国各地で電気代の高騰に対する抗議デモが多発したのを受けて同政権は総辞職。コズロドイ 7 号機増設計画の行く末が危ぶまれていたが、5 月末に誕生した社会党の率いる中道左派連立政権は、国内でコンスタントに増加する電力消費に対応するためには、新たなエネルギー・プロジェクトが必要との判断に至った。

## 【ハンガリー】

### 米エネルギー省、ハンガリーから HEU を排除

米エネルギー省（DOE）は 11 月 4 日、核兵器に転用可能な高濃縮ウラン（HEU）をハンガリー国内からすべて取り除くことに成功したと発表した。

世界中に残存する悪用されやすい核物質をすべて防護すべきだという B・オバマ大統領の 2009 年のプラハ演説に基づくもので、米国がハンガリー、ロシア、国際原子力機関（IAEA）の 4 者間で調整した複数年の国際的な努力により、核セキュリティ分野で新たな一歩が刻まれたと強調。ハンガリーは同大統領の呼びかけ以降に国内から HEU を完全に除去した 12 番目の国になった。

最終的に、ハンガリーからは核兵器 9 個分の製造に



十分な量の HEU を搬出。最後に残っていた HEU 49.2kg は過去 6 週間の間に 3 便の航空貨物でロシアに輸送された。08 年と 09 年および 12 年に実施した輸送でも 190kg の HEU がロシアに移送されており、民生用原子炉で燃料として使用するため低濃縮ウラン (LEU) に希釈されている。

濃縮度 20% を超えるハンガリーの HEU は元々、原子力研究所内のブダペスト研究炉で使用するため、ロシアから調達された。09 年に同国の研究者らは DOE の国家核安全保障局 (NNSA) と協力して、同炉を LEU 仕様に変更することに成功。同炉ではそれ以来、危険な核物質を使用することなく健全な研究活動が続けられている。

09 年以降の国際的な連携を通じて HEU の完全な除去が行われたのはオーストリア、チリ、チェコ、リビア、メキシコ、ルーマニア、セルビア、台湾、トルコ、ウクライナ、ベトナムの 11 か国・地域。これらも含め、DOE がこれまでに世界の 40 か国以上から移送あるいは処分した HEU とプルトニウムの総量は 5,000kg 以上にのぼり、25 か国からは完全に HEU が取り除かれたとしている。

### 【ルーマニア】

## 中国がチェルナボーク計画に出資へ

中国広核集团有限公司 (CGN) は 11 月 25 日、ルーマニアのチェルナボーク原子力発電所 3、4 号機完成計画について同国の国営原子力発電会社 (SNN) と意向表明書 (LOI) に調印したと発表した。詳細は明らかにしていないが、CGN はすでに 2011 年 10 月、同完成計画への投資に関心を表明し、SNN と守秘義務協定を締結。同計画では複数の外国企業が出資を取りやめるなど暗礁に乗り上げていたが、CGN の出資意思いかんにより改めて動き出す可能性が高まった。

今回の LOI は、中国の李克強首相がルーマニアの首都ブカレストを訪問したのに合わせて結ばれた両国間における複数分野の協力合意の一つ。両国首相の立ち合いの下で CGN の賀禹・会長兼最高経営責任者 (CEO) と SNN の D・ルラヘ総裁が調印したが、これに先立ち、ルーマニア政府の原子力担当部門と中国の国家能源局は原子力平和利用に関する両国間の協力覚書 (MOU) にも調印している。

チャウシェスク政権の崩壊にともない 91 年に中断した 3、4 号機の建設作業について、SNN は 08 年に新たな管理会社となるエネルゴニュークリアを設立。出力 72 万 kW の加圧重水炉「CANDU6」2 基を完成させる計画だった。

しかし、イタリア電力公社や鉄鋼メーカーのアルセロール・ミタル社など出資を約束していた 6 社のうち、フランスの GDF スエズ社、チェコ電力、独 RWE 社、スペインのイベルドロラ社がその後の経済不況により 11 年に撤退。これにより SNN 社の出資比率が 8 割を超えることになり、ルーマニア政府は共同出資が可能な新たな投資家を募集していた。

### 【ベラルーシ】

## 初の原子力となる 1 号機で コンクリート打設

ベラルーシの国営ベルタ通信は 11 月 6 日、同国初の原子力発電所建設計画で 1 号機原子炉系統部分のコンクリート打設が開始されたことを伝えた。フロドナ州オストロベツで 120 万 kW 級のロシア型 PWR (AES-2006 シリーズ) 2 基を建設するため、ロシアのアトムストロイエクスポルト (ASE) 社が 2012 年 7 月に請け負ったターンキー契約に基づいて本格的な工事が開始。1、2 号機の完成はそれぞれ、2018 年夏と 20 年 7 月を予定している。

旧ソ連邦に属し、ウクライナと隣接するベラルーシは 1986 年のチェルノブイリ事故で多大な被害を被った。しかし、エネルギー資源が乏しいという国内事情もあり、A・ルカシェンコ政権は福島第一原発事故直後の 2011 年 3 月に初の原発建設でロシアとの二国間協力を合意。2012 年 11 月には、総工費の 90% をカバーする 100 億ドルの低金利融資をロシア政府が 25 年間で提供を約束するなど、同国の全面的な支援を背景に、同プロジェクトは急速な進展を遂げている。

着工に際してベラルーシは、国際的な公約に関わる準備作業や地元でのインフラ整備を完了したほか、プロジェクトに対する内閣の承認を 9 月 30 日に取得。同国の原子力委員会が原子力と放射線源の利用活動を許可したのに続いて、ルカシェンコ大統領は 11 月 2 日、同計画の建設工事開始を ASE 社に許可する政令に署名していた。

### 【パキスタン】

## 中国の協力でカラチ 2、3 号機に着工

パキスタンの N・シャリーフ首相は 11 月 26 日、合計出力 220 万 kW という同国最大の民生用原子力発電所建設計画の着工式を、同国最大の商業都市カラチで開催した。中国の支援により、既存のカラチ原子力発電所のⅡ期工事として 100 万 kW 級の 2、3 号機 (K-2 および K-3) を 6 年計画で建設するというもの。これにより

同国で慢性的な電力不足を根本的に解消したい考えた。

これは同国政府による一連の電源開発プロジェクトの一部であり、風力や火力、石炭火力でも同様に大規模な設備の新設を計画。政府は「原子力ビジョン 2050」に基づいて、50年までに約4千万kWの原子力設備容量構築を想定しており、シャリーフ首相は「今後数年間に同構想実現のための堅固な基盤が築かれることになる」と明言している。

同国ではすでに、カナダから導入した13.7万kWの重水炉が南部のカラチで、また、中国核工業集团公司(CNNC)の資金援助と技術支援協力を受けて北部のチャシュマに建設した1、2号機(各30万kW級PWR)が稼働中。3、4号機(各30万kW級PWR)の建設工事もCNNC傘下の上海核工程研究設計院(SNERDI)の主導で2011年に開始されており、同首相は新たな原子力プロジェクトに着手することは、パキスタンを頻繁な輪番停電から解放するという目標に向けた、国のエネルギー史における輝かしい第一歩になると強調した。

採用設計については、チャシュマの4基(CP300)に改良を加えたACP1000になるとの報道があるが、正式発表はされていない。

## 【ブラジル】 アングラ3号機計画で 仏アレバ社と正式契約

仏アレバ社は11月7日、ブラジルのアングラ原子力発電所3号機の完成計画を支援するため、同国連邦政府が管理するエレクトロプラス電力傘下のエレクトロ・ニュークリア社と12億5,000万ユーロの契約を正式に締結したと発表した。最初に着工してから30数年を経て、同炉は2018年5月に発電を開始する予定だ。

ブラジルでは現在、アングラ原発の1、2号機が唯一稼働中。3号機の建設工事では1976年に独シーメンス社に130万kW級PWRの機器が発注されたが、景気の後退等により作業は着工から2年後の86年に一時中断した。その後の06年、政府は国内のエネルギー需要増に対応し、エネルギー構成要素のバランスを取るために3号機の建設作業再開を決定。エレクトロ社は11年、同炉を140万kW級のPWRとするため、アレバ社から一部の機器を購入することで同社と協力合意していた。

アレバ社が提供するものは、1次冷却系の機器やエンジニアリング・サービス、および次世代型のデジタル式計装制御系などで、機器の据え付けや起動時の作業の監視支援も行う。同社としては3号機の設計を既存の稼働

中原子炉に最新の改良を盛り込んだものにする考えで、安全性に関しては特に、国際原子力機関の安全指針はもちろん、福島事故後にブラジルの安全規制当局が設定した基準にも対応させる方針。具体的には、冷却水タンクと電力供給システムを追加するとともに、水素再結合物、フィルタ付きベント・システムを設置するとしている。

## 【国際】 カザフとカナダが原子力協力協定、 ウランの転換で技術移転

ウラン生産量で世界第1位のカザフスタンと第2位のカナダが11月13日に二国間原子力協力協定(NCA)に調印した。両国が規制品目の核物質や原子力機器および関連技術を輸出入するための法的枠組となるもの。実質的には、カナダの大手ウラン生産業者・カメコ社からカザフの国営原子力企業カザトムプロムへの技術移転を通じて、原発用燃料製造を目的とした両社のウラン製錬・転換協力を一層深めていく道が拓かれることになる。

NCAへの調印はカナダのJ・ペアード外相とカザフのA・イセケセフ副首相兼産業・新技術大臣がカザフの首都アスタナで行った。両国はともに、豊富なウラン資源に恵まれているものの、カザフにはまだ商業用原子炉は稼働していない。カナダ側はNCAによって「急成長しつつあるカザフの原子力市場にカナダの原子力産業がアクセスする機会が創出され、共同の研究開発や事業を拡大していくことが可能になる」と歓迎。カザフ市場に対する原子力技術や機器およびサービスの輸出、カザフへの投資促進により、カナダ原子力産業の成長と雇用創出につながるほか、国際的な原子力安全とセキュリティも強化していきたいとの抱負を述べた。

カメコ社とカザトムプロムは2007年に結んだ了解覚書に基づき、08年にカザフのウルバ冶金工場に容量1万2千トンの六フッ化ウラン転換設備を設置する合併企業を49対51の比率で設立する計画に合意。この転換設備にはカメコ社の技術を採用することとし、両社は実行可能性調査の第1段階を開始することで意見の一致を見た。カメコ社はまた、カザフのインカイ鉱山を操業する合併企業体の60%を保有しており、同鉱山の年間ウラン生産量を1,040万ポンドまで倍増する計画も進めていた。

# 原子力発電所の耐震性能を知る

## 地震発生後の電力安定供給のために

原子力安全推進協会 落合 兼寛

わが国の原子力発電所は、全く特性の異なる2つの大地震、2007年新潟県中越沖地震と2011年東北地方太平洋沖地震にも耐えて、その安全関連施設のみならず、発電所全体の地震の揺れに対する耐性が優れているとの知見が得られている。本稿は、これらの経験に基づく知見を概括し、あわせて地震発生後の電力安定供給のための施策を提案するものである。

### I. はじめに

2011年3月11日に発生した巨大地震による津波は869年の貞観地震の再来とも報じられたが、貞観地震の後には、878年に関東地方、880年に中国地方、881年に京都と地震が続き、東南海地震に相当する仁和地震が887年に発生している。日本全体が地震の活動期に入ったとの指摘もあるなかで、2020年の東京オリンピック開催準備では、人間が制御できない自然現象、例えば東南海地震によって日本の産業活動が一時的にでも停滞することのリスクも想定する必要があるだろう。

3月11日の東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方の太平洋沿岸の多くの発電所が地震動と津波によって発電を停止したが、幸いにして本震直後の電力網が不安定となる広域停電は免れ、被災地域も徐々に電力供給が回復していった。その陰には、多くの関係技術者の献身的な努力に加え、2007年の中越沖地震で原子炉が自動停止した東京電力柏崎刈羽原子力発電所の4基（電気出力計4,912MWe）が復旧しており、全出力運転を続けてくれたことも大きいと考えている。

原子力発電所はどの程度の耐震性を有するのであろうか？地震時安全性は多くの地震を経験して立証できたが、発電能力はあるのだろうか？大地震発生後にも安定した電力を供給して世の中の期待に応えるためには、今何をなすべきであろうか？考えてみたい。

### II. 原子力発電所の耐震性の実力は？

#### 1. 地震動の強さを表す指標

地震荷重により応力評価して構造詳細を決定する耐震設計では、質量に掛けることで地震荷重を算出する加速

*Capacity of NPPs against Earthquake & Proposals to Prepare for Post-Earthquake Electric Supply* : Kanehiro OCHIALI.

(2013年 10月31日 受理)

度値が重視されるが、加速度、特に地震動の加速度最大値は必ずしも設備の損傷に結びつかないことがよく知られている。このため、地震被害の視点から地震動の強さを表す、加速度に代わる指標(DIP: Damage Indicating Parameter)として古くから種々の指標が提案されている。最も一般に馴染みの深いのは震度階であり、地震による物の壊れ方は国によって異なることから、各国でその国情に沿った震度階が使用されている(日本では地震計の観測記録から計算される計測震度をもとに、気象庁震度階が地震直後に公表される)。また、特に原子力発電の分野では、標準CAV(Standardized Cumulative Absolute Velocity)という指標が米国の地震動評価に用いられている。それらの指標の定義式を見ると、震度階は下記に示すピークパラメータに、また、標準CAVは積分パラメータに位置づけられ、この両者を組み合わせることにより、直下地震や巨大地震の地震動特性を加速度最大値よりも適切に評価することが出来るようになる。

#### 【指標の分類例と地震被害のモード】

##### ○ピークパラメータ

初通過破壊(構造物の応答が最初に破壊レベルを越えたときに生じる破壊;延性破壊, 塑性崩壊, 座屈など)に対する指標

##### ○積分パラメータ

累積疲労破壊(累積値があるレベルに達したときに生じる破壊;疲労破壊など)に対する指標

ここで、計測震度( $I_{JMA}$ )は次式にあるように、その算出過程で対数をとることから、耐震性の高い施設の損傷が予想される領域では値が飽和する傾向があり、DIPとしては、式中の $A_{JMA}$ を用いることが国際原子力機関(IAEA)の国際耐震安全センター(ISSC)の検討で提案されている。

$$I_{JMA} = 2 \log A_{JMA} + 0.94$$



この  $A_{JMA}$  は加速度の単位を有する指標であるが、観測された地動加速度の高振動数域(ほぼ 10Hz 以上)と低振動数域(0.5Hz 以下)にフィルターをかけ、さらに加速度の継続時間や速度値についても考慮した、いわば設備の損傷に配慮した有効加速度としての性格を有している。

一方、標準 CAV は簡易的には次式で定義されるように、加速度の絶対値を積分したものであり、地震動の振動波形の速度を足し合わせた(すなわち、エネルギーに關係する)指標と考えられている。

$$CAV = \sum_{i=1}^n \int_{t_i}^{t_{i+1}} |a(t)| dt$$

ここで、 $a(t)$ : 加速度時刻歴

$t_i$ : 0.025G (G: 重力の加速度) を超える時間幅(1秒間刻み)の総数  $n$  について足し合わせる

### 2. 原子力発電所で観測された地震動の特色

原子力発電所で観測された3月11日の巨大地震本震の地震動波形は、複数の震源位置とその規模、発生の時刻差、観測点の地盤条件などによって複雑に変化し、第1図に示すようなものとなっている。図には新潟県中越沖地震の観測波形も比較のために記載しているが、この地震はマグニチュードが6.8の規模であることから地震動の継続時間は短いが、柏崎刈羽原子力発電所では図に

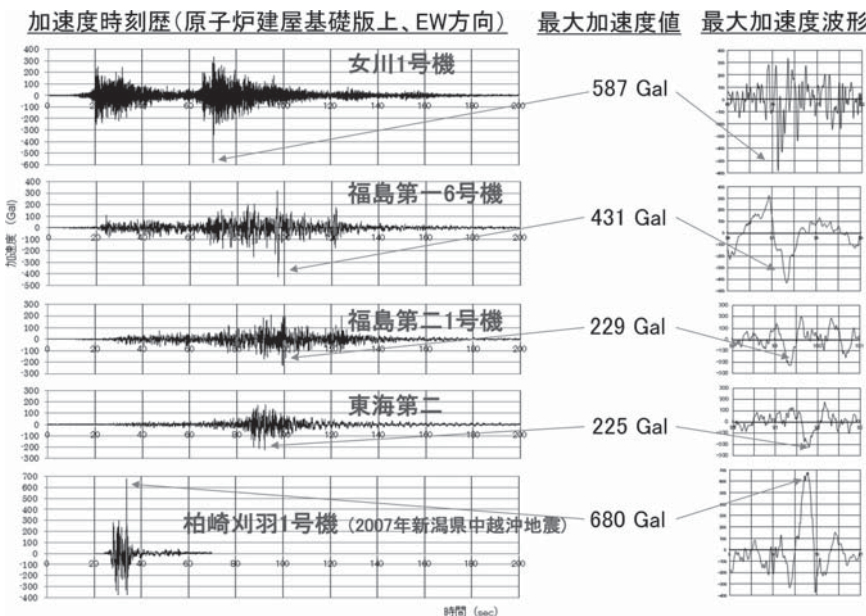
示すようなパルス状の波形が観測されている。

第1図にはこれらの地震動波形から計算した DIP を表示しており、最大加速度値では見えなかった地震動の破壊への影響が見えてくる。すなわち、新潟県中越沖地震ではピークパラメータの  $A_{JMA}$  が際立って大きく、初通過破壊への配慮が必要である。このような比較的継続時間(パルス幅)の長い加速度パルスは1995年の阪神淡路大震災でも観測され、構造物の破壊につながったとされている。一方、巨大地震では主要動の継続時間が長いことから積分パラメータの標準 CAV が特徴的に大きく、累積疲労破壊が特色となる可能性を示している。東日本大震災では体育館などの吊り天井の落下が多数報告されており、継続時間の長い主要動による破壊の特徴が現れていると思われる。

### 3. 原子力発電所の地震被害と地震動

2005年の宮城県沖地震以降、5回に及ぶ「設計基準を超えた」と称された地震動を26基のBWRプラントが経験したが、安全関連設備の損傷は報告されていない。また、耐震クラスB、C(原子力発電所設備の耐震クラスは第1表参照)の設備の損傷も極めて限定的なものであった。

これまでに原子力発電所で観測された地震動を  $A_{JMA}$  と標準 CAV で整理すると、第2図に示すようにそれらの地震動の特徴が明確に示される。また、図に中実のマーカで示している観測点では、例えば擦り傷のよう



#### 図の補足説明

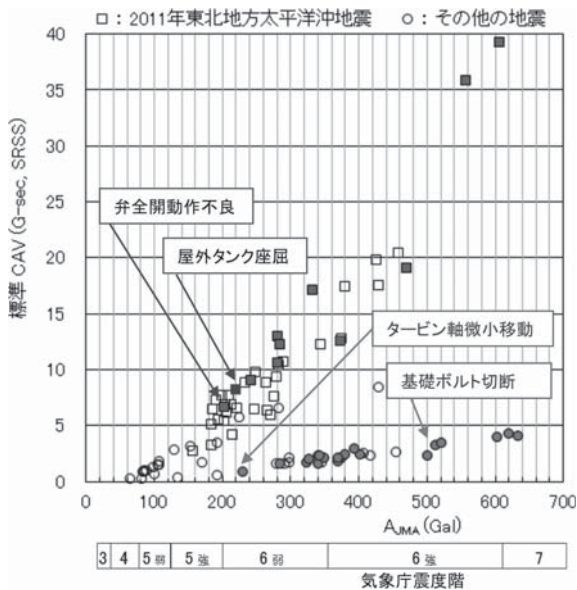
図には観測された加速度値の時間変化、「時刻歴加速度波形」を示している。特に「初通過破壊」については、加速度ピークの形状が影響していると考えられることから、最大加速度値が観測された部分の3秒間のみを拡大したものが右側の図であり、各観測波形によって形状が異なる様子を見ることができる。  
(注: 図中 Gal は  $cm/s^2$  を示す加速度の単位で、例えば、200Gal は重力の加速度 (G) の 0.2 倍にはほぼ相当している)。

原子力発電プラント 原子炉建屋基礎版上	最大加速度 3方向合成値	気象庁震度階 (計測震度)	DIP	
			$A_{JMA}$	標準 CAV
女川1号機	637Gal	6弱(5.6)	225Gal	6.9G-sec
福島第一6号機	460	6弱(5.7)	266	6.4
福島第二1号機	290	6弱(5.5)	202	5.4
東海第二	262	5強(5.3)	157	2.7
柏崎刈羽1号機	685	6強(6.0)	346	1.7

#### 表の補足説明

最大加速度値は女川原子力発電所が福島第一原子力発電所より大きいですが、有効加速度は逆転していることが分かる。

第1図 地震動時刻歴波形(例)の最大加速度値と DIP



第2図 観測記録のDIPとB, Cクラス設備の損傷分布

な軽微なものを含めて、耐震クラスB, Cの設備の何らかの損傷が電力会社の詳細な点検によって報告されている。図には観測点でのDIPのしきい値となるような損傷事例も示している。

図では、 $A_{JMA}$  が200 Gal程度以上で軽微な損傷を含めた何らかの損傷が見られる。この $A_{JMA}$ 値は耐震クラスCの静的震度に近い値であり興味深い。新潟県中越沖地震では柏崎刈羽原子力発電所の屋外に設置された変圧器(耐震クラスC)の基礎ボルトがせん断破壊しており、また、東北地方太平洋沖地震では女川原子力発電所のタービン建屋に設置された、同じく耐震クラスCの高圧電源盤内の吊り下げ設置型開閉器が短絡している。両地震に共通的には屋外設置の薄肉円筒型貯水タンクの座屈現象が発生しており、 $A_{JMA}$ のしきい値が比較的小さいところにあることを示すと考えられる。これらはいずれも一般産業施設と類似した損傷形態であるが、地震動入力及び耐震設計内容が明確な設備の損傷データとして極めて貴重である。

#### 4. 地震の揺れに弱い設備と強い設備

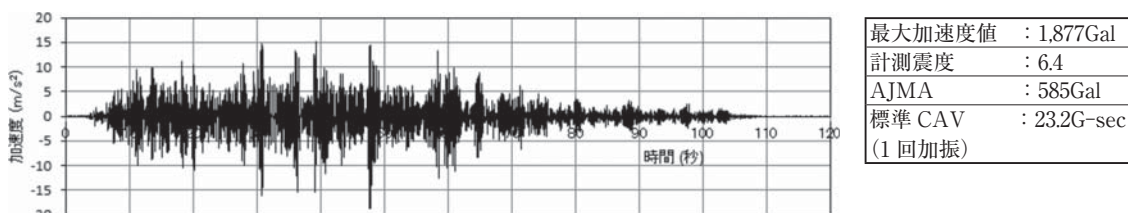
適切なDIPを選択して地震動の特性と構造物の損傷メカニズムを結びつけることにより、地震動に対して脆弱な設備と本質的に強い設備を選別することができるようになる。

発電能力に関して $A_{JMA}$ のしきい値となっているのは

蒸気タービン発電機であり、設置位置(タービン架台上)で230Gal程度の有効加速度を受けるとタービン発電機のスラスト軸受の支持構造に変形(ズレ)が生じてタービンの動翼と静翼が接触する(これは低速タービンを使用する火力発電とも共通で、発電出力と設計内容にも依存すると考えられる)。このモードはタービン軸方向に大きな地震荷重を受けたときの初通過破壊であり、この対策を施すことによって発電能力のしきい値は大幅に向上する。一方、同じ初通過破壊に属する基礎ボルトの損傷は、東京電力が実施した確認試験<sup>1)</sup>によれば、設計許容値の裕度が小さく、設計者が余裕を考慮して断面算定を行うことが重要であることを示している。事実、設計者は大きな余裕を考慮しており、第2図に示す事例でも、しきい値となる $A_{JMA}$ 値は約510 Gal(震度階6強)となっている。

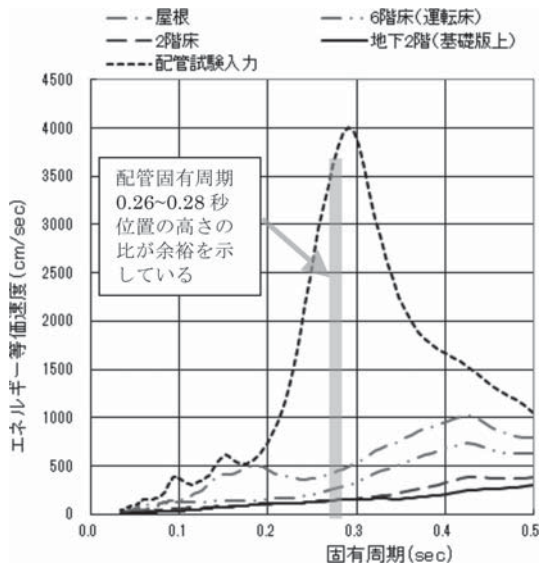
これまで地震の揺れに起因する溶接配管の損傷事例は極めて少なく、耐震技術者の間では、通常の溶接配管は地震の揺れでは損傷しないと考えられてきた。NUPEC/JNESが実施した大型振動台による実規模配管の終局強度試験<sup>2)</sup>では、設計限度の内圧を加えた口径約200mmの鋼製配管を大型振動台上に3次元に配置し、地震荷重で壊れやすくするために錘をつけ、サポートのエネルギー吸収を少なくするような工夫をして加振した結果、第3図に示す人工的な地震動波形(配管を壊すために共振するよう配慮したもの)を5回繰り返して、やっと配管のエルボ一部に貫通亀裂を生じさせることに成功している。

この4回目の加振完了時の標準CAV( $23.2 \times 4 =$ 約90 G-sec)と実際に発電所で観測された波形(例えば、第1図の福島第一原子力発電所6号機原子炉建屋基礎版上の値6.4G-secなど)を比較すると、多くの配管が設置された建物主要床面では10倍以上の耐震余裕を有していることが分かる。また、地震応答に重要な固有振動数の影響を考慮するため、エネルギースペクトルを比較する手法<sup>3)</sup>を適用してみると、第4図の通り4回の加振によって配管に加えられたエネルギー(破線で示す曲線の、配管固有周期0.26~0.28秒のエネルギー等価速度値)は、巨大地震時の観測値に比べて極めて大きく、仮に福島第一原子力発電所6号機原子炉建屋で最も揺れた屋根に類似の配管が設置されたとしても、8倍程度(下の階では約20倍程度)の耐震余裕があったことになる。



第3図 配管終局耐力試験時の振動台上加速度波形 (JNES提供)





第4図 エネルギースペクトルによる評価例 (福島第一6号機と NUPEC/JNES 配管試験比較)

東北地方太平洋沖地震という限界的な地震動によって、配管の累積疲労破壊に対する耐震性能が極めて高いことが確認されたことの意義は大きく、配管が脆い材質で出来ていないか、腐食が過度に進んでいないか、溶接の欠陥はないか、ネジ継ぎ手部に大きな力がかからないか、更には、地盤沈下や配管が接続された機器の移動などにより過大な強制変形を受ける構造となっていないかというポイントが点検などによって確認されれば、事実上、耐震性の評価は不要といえるであろう。

この溶接配管の例にみられるように、サイクリックに作用する慣性力による地震荷重は、内圧などの一方向に長時間作用する荷重と異なり、応力種別上は1次応力と2次応力の中間的な特性をもつと考えられており、現在の耐震設計の基準は極めて安全側の評価を与えている。

### Ⅲ. 「地震に強い原子力発電所」を目指して

#### 1. 耐震クラス B, C 設備の耐震性

ここで、耐震クラス B, C の設備は第1表に示すように、基準地震動を用いた動的設計ではなく、静的な荷重によって設計されていることに留意せねばならない。

また、初通過破壊に対していえば、耐震クラス B, C の設備がこれまで述べてきたような高い耐震性を有するという事実は、地震国日本の長い経験に基づき、簡便で

かつ設計者の理解が容易とされている静的設計の手法が極めて有効であることも示している。

静的設計法の地震荷重を定める静的震度は発電所の立地点によらず、また、適用される指針改訂の年代、基準地震動の見直しの有無によらずに、初通過破壊に対する原子力発電所の耐震性能を生み出している。この荷重を静的(時間によらず)に評価し、応力状態を弾性範囲内とする手法によって、 $A_{JMA}$  値を静的震度としたときの計測震度、すなわち、クラス C の設備では計測震度 5.5 (震度 6 弱) 程度の耐震性能を有すると考えている(第2図参照)。

1995 年の阪神淡路大震災では、震度 5 弱が観測された地点で火力発電所にボイラ鉄骨関係の損傷が発生している。すなわち、原子力発電所の耐震性は、発電能力という観点でも火力発電設備よりも優れていることになる。

東南海地震では、多くの原子力発電所の立地点は想定される震源域から遠く、距離減衰によって震度 5 弱から 6 弱程度が想定されることから、ハード上の追加対策を施すことなく、地震後の電力供給に主要な役割を果たすと期待される。

一方、一般産業施設も大地震で得られた貴重な教訓を踏まえて耐震性が強化されている。「地震に強い原子力発電所」との期待に応えるためには、耐震クラス B, C の設備についても、一般産業施設の耐震設計基準と同等以上の耐震性をもたせることが望まれる。

#### 2. 地震発生後の対応ガイドラインの整備

2011 年は米国の原子力発電所にとっても多難な年であった。11 月に発生した米国バージニア州 Mineral の地震では、North Anna 原子力発電所(971MWe, 963MWe の PWR 2 基)が設計基準を超える地震動に遭遇し、外部電源の喪失、安全保護系の作動による原子炉自動停止を経験しながらも、3 ヶ月後には再起動し、現在も安定した電力供給を行っている。地震で自動停止し、事業者の大変な努力にもかかわらず、地震発生後 3 年経っても再起動していなかった柏崎刈羽原子力発電所(2~4 号機)との差は、何によるものであろうか。

第一には、米国では約 20 年前に全プラントの耐震余裕評価を実施しており、観測された地震動が、幸いにして耐震余裕評価で想定した地震動の強さを下回っていたことが挙げられるが、地震後の対応を示すガイドラインが米国では既に整備されており、原子力規制委員会(NRC)及び事業者がそれに沿って粛々と点検、評価作業

第1表 原子力発電所の設備に考慮される設計用地震荷重

原子力発電設備の耐震クラス	耐震設計で考慮する荷重	設計荷重の比率
S (旧指針のクラス A) (原子力発電所の安全上重要な設備)	クラス C の 3 倍の静的荷重 基準地震動による動的荷重	3 以上
B (放射線に係る設備で、影響の小さいもの)	クラス C の 1.5 倍の静的荷重 (共振について動的に検討)	1.5
C (一般の設備と同等の耐震性を有する設備)	建築基準法並みの静的荷重 (全プラント一律)	1 (約 0.2 G に相当)



を進めることができたことも大きな要因と考えている。

米国では1986年のPerry原子力発電所(商業運転開始前)で設計基準を超える地震動を観測したことを契機として、1989年に地震後の対応に関する民間指針(EPRI NP-6695)を作成し、1997年にはNRCが認定している。

また、2005年の宮城県沖地震を契機として、IAEAのISSCで安全報告書(Safety Report Series 66)の作成を開始し、2012年に発行された。これに併行して日本原子力技術協会(後に原子力安全推進協会(JANSI)に改組)に組織された「中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会」(略称SANE委員会)では日本の特殊条件を反映した地震後の健全性評価ガイドラインを発行しており、その活用が期待される。

それら一連の活動の中で課題として残されたDIPの選定や地震時の原子炉自動停止の必要性などが現在もIAEAで継続検討されており、技術検討書TECDOCのドラフトが完成して内部レビューを実施中である。

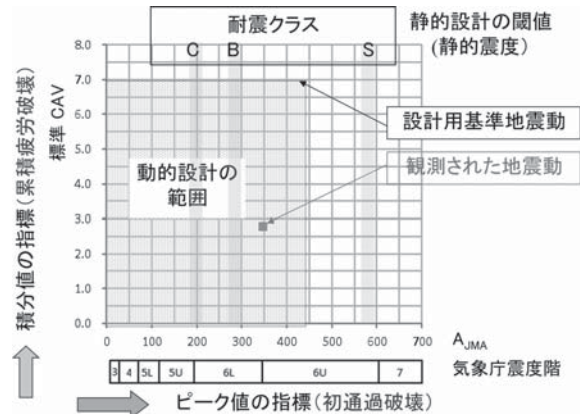
例えば、DIPの選定については、本稿で述べてきた $A_{JMA}$ と標準CAVが有力な候補として挙げられ、それらを2次元の座標とする評価法(第5図参照、目次にカラー図掲載あり)が提案されている。

### 3. 地震スクラムの必要性和設定値

「日本の原子力発電所は地震で直ぐに停止する。地震に弱い」との誤解も生じているが、これは、我が国の原子力発電所は観測された地震動の大きさによって自動的に原子炉を停止するシステム(原子炉保護系の一部)の設置が義務付けられており、その作動レベル(加速度値)が低く設定されていることによる。

このシステムは、我が国が初めて英国から導入した黒鉛減速ガス冷却型の原子炉(東海1号炉、現在廃炉中)の地震時制御棒挿入を確実にを行うための施策であったが、その後の軽水炉では制御棒の地震時挿入性が実証されており、原子炉に異常があった場合は原子炉保護系が作動して制御棒挿入信号が発せられることなどから地震計の信号による自動停止は不要との考えがあり、その必要性に関する国際的な議論が続いている(地震後の電力供給を重視する観点などから、米国ほかの多くの諸外国では地震計を用いた原子炉自動停止は実施していない)。

特に我が国の問題は、原子炉を自動停止させる地震動の設定レベルは旧耐震設計審査指針の設計基準地震動S1程度に設定することが妥当とされているにもかかわらず、技術的な根拠のない極めて低い値としている例があり、基準地震動が見直されているなかで放置されていることであろう。原子力発電所の耐震能力が明確となった現在、適切な設定値、更にはより合理的な原子炉自動停止信号の選択などの改善が望まれる。



第5図 観測された地震動の強さの評価法(案)

## IV. まとめ

### 1. スクリーニングなどソフト技術の深化

2つの大地震を経験することによって、地震動の特性と損傷との関係、特に、どのような地震に対して、どのような設備が脆弱であり、また極めて耐震余裕が大きいか明らかとなってきた。これらの知見を、例えば、地震時リスク評価の基本であるスクリーニング(リスクに寄与しない因子は評価対象から除外する)、更には、前述の原子炉自動停止信号の適性化、地震影響を迅速に評価するための地震動計測、塑性エネルギー吸収係数を用いた耐震余裕の評価などに生かしていくこと、すなわち、ハード技術に裏付けられたソフト技術の深化が、予想される大地震に備える原子力発電所にとって重要であろう。

### 2. 原子力発電所への期待

大地震発生時には、社会的安全性の観点から、電力供給が極めて重要であり、被災地では電力の復旧を多くの人たちが心待ちにしている。

大地震の経験を踏まえて、原子炉の自動スクラム設定値を本来の目的に沿ったものとするなどの対策を実施し、地震後の電力供給に原子力発電所の優れた耐震性能を役立てていただくことを願って止まない。

#### — 参考資料 —

- 1) 長澤和幸, 他, 「加振試験による機械基礎定着部の健全性評価検討」, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, (2009).
- 2) 原子力安全基盤機構, 04基構報-0002, 平成16年6月.
- 3) 皆川佳祐, 他, 「エネルギー釣合式による機械構造物の地震時疲労寿命評価」, 日本機械学会論文集, 75巻760号, (2009).

#### 著者紹介



落合兼寛 (おちあい・かねひろ)  
原子力安全推進協会  
(専門分野/関心分野) プラント計画・設計, 外部事象対策

## 解説シリーズ

## 核燃料サイクル—フロントエンド

## 第1回 ウラン資源の特異な市場構造と需給動向

石油天然ガス・金属鉱物資源機構 小林 孝男

地球上にウラン資源は十分存在し、エネルギー資源として長期間持続可能である。しかしながら、ウラン資源は常に安定供給が可能かという点必ずしもそうではない。その理由は、銅などの金属資源と違ってウランの市場構造がいまだ成熟していないからである。ものの市場は通常、需要量と生産物の供給のバランスで成り立っているが、ウラン市場は、ウランという元素の持つ宿命から過去の遺産である2次供給源が市場に出回り、いまだに成熟した市場になり得ていない。この不安定のため、ウラン生産者は需要に合わせた生産をタイムリーに行うことが難しいのである。ウラン市場の変遷を振り返り、ウラン資源の特異性を精査することにより将来の見通しを概観する。

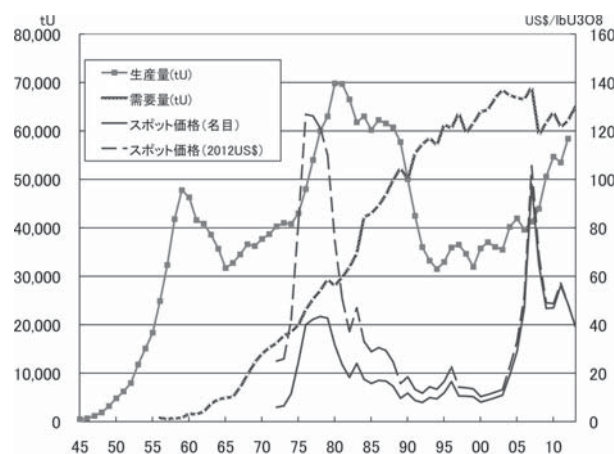
## I. はじめに

ウラン資源には、原子力発電用の燃料としての表の需要と核兵器材料としての裏の需要がある。裏の需要は半世紀のあいだ決して公にされることなく政治の駆け引き材料にされてきた。1945年から1980年代まで、おそらく60万トン以上のウランが核兵器製造を目的として生産された(第1図<sup>1,2)</sup>)。この数字は世界のウラン生産量と原子力発電需要量(+西側商用在庫量)の引き算であるが、このような推測が可能になったのはごく最近で、特に1990年以前は東側諸国のウラン保有状況に関する情報が皆無であり、様々な憶測が飛び交いウラン市場の不透明さの主要因となった。実際、原子力発電需要をはるかに上回るウラン生産が1980年代後半まで続いたのは、市場が不透明で、かつ、オープンでなかったからとしか説明できない。

1990年の冷戦終了以降、状況は一変した。軍事用の需要が不要となり、ロシアをはじめとする東側諸国の余剰ウランと西側電力事業者の余剰ウランが市場に流れ込み、ウランスポット価格はUS\$10/ポンドU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>以下に下落した。東側諸国の軍事用ウラン鉱山や米国などの小規模鉱山は閉山をやむなくされ、生産量は需要量を下回るようになった。さらに1994年からは、米ロ契約に基づく解体核高濃縮ウラン(HEU)の希釈による商用利用が始まった。ロシアは約1,400トンの軍事用HEUを保

*Nuclear Fuel Cycle—Front-end (1) ; Uranium resources, its specific market structure and prospects of supply and demand :*  
Takao KOBAYASHI.

(2013年 10月31日 受理)



データ：需要量・生産量はOECD/NEA-IAEA, 2012。ただし、2011年需要は日本の稼働率を考慮し修正。2012-2013年需要はWNA Market Report 2013に基づく。スポット価格はUx Consulting (1987/2以前はTradeTech)に基づく年平均。2013年スポット価格は9月末までの平均。実質価格は米国GDP実質価格デフレーター(2013/4)に基づき調整

第1図 ウラン生産・需要量とスポット価格の推移

有するとされていたが、このうち500トンのHEU(152,000tUの天然ウランおよび濃縮作業量92,000tSWUに相当)を希釈して、製造したLEUを1994~2013年の間、米国に輸出するという契約である<sup>2)</sup>。この結果、余剰ウランやロシアHEUなどのウラン2次供給源が原子力需要量の40%を上回るという異常な状態が長期間続くこととなった。

この状況は2003年4月、カナダのマッカーサーリーバー鉱山の事故による中断をきっかけに一変した。スポット市場に出てくるはずの余剰ウランが出てこないことが明らかになったからである。2004年以降もウラン価格が上昇したが、各国のウラン鉱山は急には増産がかなわず、さらに、建設中のシガーレイク鉱山の出水事故、投機家の市場への参入も相まって、スポット価格は

一時 US\$136/ポンド  $U_3O_8$  まで高騰した。ウランがいつでもスポット市場から調達できると油断して戦略在庫を持たなかった電力事業者は、原子炉を動かすためどんなに高くてもウランを購入せざるを得なかった。

2011年の福島第一原発事故以降、ウラン市場は再び不況を迎え、現在ウラン価格は US\$35/ポンド  $U_3O_8$  前後で推移しており、いつまでこの低迷が続くのか先が見通せない状況が続いている。これまでに経験した過去の経緯を踏まえ、同じ過ちを繰り返さないためにもウラン市場の特異性を正しく認識し、将来に備えることが重要である。

## II. ウラン市場の特異性

### 1. 2次供給源の存在

2次供給源とは、各年にウラン鉱山から生産されるウランとは別に市場に供給されるウランまたはその代替物質である。その主なものとしては、①電力事業者などが保有する商用在庫(戦略在庫、パイプライン在庫および余剰在庫がある)、②軍用在庫(ロシア HEU)、③政府所有在庫(米国 DOE の所有在庫が大半を占める)および④使用済燃料の再処理によって生ずる回収ウラン・MOX 燃料がある。

上述した通り、1990年代にはこれら2次供給が需要量の40%以上を占めていた。しかし、2003年以降、①の電力事業者の余剰在庫はほとんど底をつき、商用在庫からのウランはほとんど市場には放出されなくなった。その代わりにという訳ではないが、電力事業者は高価なウランを節約するため、濃縮のテール濃度( $^{235}U$ の割合)を下げて年間のウラン需要を減少させた(第1図において、2007年から2008年にかけてウラン需要が約1万tU減少しているが、これは需要量を計算するときのテール濃度基準を0.30%から0.22%に変更したため)。テール濃度の適正化によるウラン節約は、目に見えない2次供給と言えるかもしれない。

②のロシア HEU から米国へのウラン供給は2013年に終了することになっている。しかしながら、ロシアはなお大量の軍用ウランを有しており、これを今後どのように利用するかについてはいまだ不透明なままである。後述するように、残存するロシア HEU が今後、商業市場に出回るかどうかは、ウラン市場に及ぼす最も大きな不安定要因である。

### 2. ウラン購入から燃料装荷までに3年

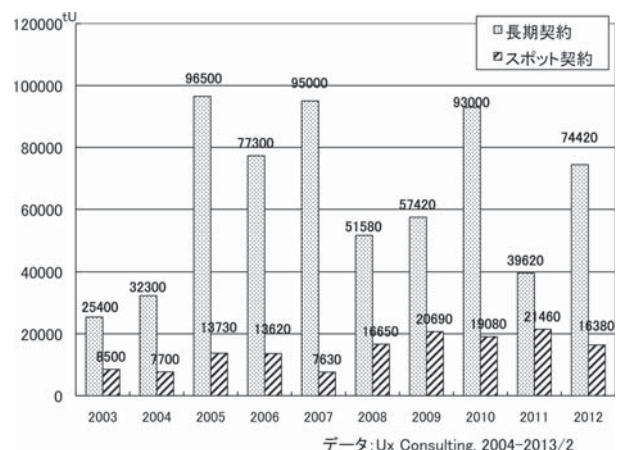
鉄・銅などの金属資源も石油・天然ガスなどの化石エネルギー資源も、ほとんどの原料資源は購入後数ヶ月以内に消費される。これに対しウランは、購入後原子炉に挿入して使用されるまでに、転換・濃縮・再転換・燃料製造の工程を経て燃料集合体に加工され、一般にそれぞれ別の工場(多くの場合は別の国)で処理されるため、輸

送期間も含めて通常2~3年を要する。原子炉でのウラン需要量は鉱山の生産から2~3年後に判明するため、需要に合わせた生産調整を行うことが難しく、これは市場の好不況の揺れ幅が大きくなることを意味する。福島原発事故が起こって原発が次々と運転を中止しても、すでに生産(購入)したウランは蓄積され続けるので、その影響が最も大きく市場に反映されるのは原子炉が止まってから2~3年後ということになる。

### 3. 契約形態は相対契約で長期契約が主

上記2とも関連するが、ウランの調達は原子力発電所の運転計画に合わせて計画的に行わなければならない。また、原子炉の建設費は1基数千億円と巨額であるうえ、電力事業者は電気を安定的に配電するという公共の義務を負っており、運転すべきときに燃料がないから稼働できないなどという失態は絶対に許されない。このような理由から、電力事業者は、多少価格が高くとも信頼できるウラン生産者から相対契約で、かつ5~20年間の長期契約でウランを購入することが一般的となっている。とはいえ、スポット契約で調達する方が通常は低価格であるため、スポット市場からの調達を併用する電力事業者もある(2003年まではもっぱらスポット市場から調達する事業者もあった)。最近の数年は再びスポット契約量が増える傾向にあるが、スポット契約のうち、電力事業者の購入分は30~50%であり(50%以上の契約はトレーダー間による買い回し)、原子炉で使用されるウランのおよそ9割は長期購入契約により調達されている(第2図)。

スポット市場での取引量は実質1割に過ぎないのであるが、問題はそのスポット取引で決まる価格が米国コンサルタント(Ux Consulting や TradeTech)によって公表され、それがほとんどの相対契約の指標となっていることである。ウラン生産者や採鉱企業の活動もスポット価格の影響下にある。わずかな量の取引で決まるスポット価格は、揺れ幅も大きく、投機家による影響も受けや



第2図 世界のウラン購入契約量



すくなるため市場の不安定要因となっている。

### Ⅲ. ウラン需給を左右する主要因

不安定なウラン市場の将来を見通すためには、目先のスポット価格の動向ではなく、ウラン需給を左右する本質的な要因を分析することが重要である。その主要因としては、①原子力発電計画の見通し、②世界のウラン資源量、③ウラン探鉱、鉱山開発・生産動向、④2次供給の見通し、⑤市場心理などが挙げられる。

#### 1. 原子力発電計画の見通し

原子力発電とウラン資源に関する世界の情報を定期的に取りまとめ公表している代表的な国際機関としては、国レベルのOECD/NEA-IAEAと民間レベルのWNA(World Nuclear Association)とが存在する。今年9月に発行されたWNAのマーケットレポート(WNA 2013<sup>2)</sup>)によると、世界の原子力発電容量は、現状の370GWeから、標準ケースで2020年には433GWe、2030年には574GWeに延びると予測されている。福島原発事故以前の状況を踏まえたWNA 2011の標準ケース予測(2020年471GWe、2030年614GWe)に比べると約9%の伸び率減少となった。また、2013年標準ケースを踏まえたウラン需要量は、現状の62,000tUから、2020年には77,600tU、2030年には97,450tUに増加するが、やはり2011年予測に比べると約9%の伸び率減少となった。

現時点の世界の原子力発電建設計画を眺めてみると、建設中の原子炉が68基、計画中の原子炉が166基あり、これらは中国、インドをはじめとするアジアおよびロシアをはじめとする東欧に集中している(第1表)。計画

第1表 世界の原子力発電とウラン需要

		2013年9月末時点						2013 ウラン 需要量 tU
		原子炉数		建設中		計画		
		炉数	GWe	炉数	GWe	炉数	GWe	
北米	米国	100	99.0	3	3.6	9	10.9	19,622
	カナダ	19	13.6	0	0.0	2	1.5	1,764
	合計	119	112.5	3	3.6	11	12.4	21,386
中南米	メキシコ・アルゼンチン・ブラジル	6	4.4	2	2.2	1	0.0	803
	合計	6	4.4	2	2.2	1	0.0	803
西欧	フランス	58	63.5	1	1.7	0	0.0	9,320
	ドイツ	9	12.0	0	0.0	0	0.0	1,889
	英国	16	10.0	0	0.0	4	6.7	1,828
	スウェーデン・スペイン・ベルギー他3ヶ国	34	28.8	1	1.7	0	0.0	5,630
	合計	117	114.3	2	3.4	4	6.7	18,667
東欧	ロシア	33	24.3	10	9.2	28	29.2	5,090
	ウクライナ	15	13.2	0	0.0	2	1.9	2,352
	チェコ・ブルガリア・ハンガリー他6ヶ国	20	11.8	2	0.9	16	14.7	2,323
	合計	68	49.2	12	10.1	46	45.8	9,765
アジア	日本	50	44.4	3	3.0			366
	韓国	23	20.8	5	6.9	6	8.7	4,218
	中国	17	13.8	30	30.8	59	66.4	6,711
	インド	20	4.4	7	5.3	18	15.1	1,326
	台湾・パキスタン・イラン・UAE他6ヶ国	10	6.5	4	3.5	19	19.3	1,521
	合計	120	90.1	49	49.4	104	109.5	14,142
アフリカ	南アフリカ	2	1.8	0	0.0	0	0.0	305
	合計	2	1.8	0	0.0	0	0.0	305
世界全体		432	371.9	68	71.2	166	176.9	64,978

データは主に WNA Website, 2013/9 に基づく

中というのは、許認可、資金手当てもしくは政府によるコミットメントなどにより建設計画が具体化しているもので、検討段階の不確実な計画は含んでいない。

地域または国別に見てみると、西欧ではドイツ(9基)が2022年まで、ベルギー(7基)が2025年まで、スイス(5基)が2034年までのフェーズアウトを決めており、縮小傾向は避けがたい。一方、英国はヒンクレア原発2基建設について、この10月に英国政府とフランス電力庁(EDF)が電力価格・資金確保等の建設前提条件に合意し、2020年前半の運転開始がほぼ確定した。米国では、34年ぶりに4基の新規建設が認可され、うち2基の建設が2013年に開始されたが、一方で原子炉のトラブルや安価のシェールガス発電に比べての経済性劣化により、5基の古い原子炉が閉鎖された。現状では一進一退の状況であるが、長期的にはシェールガスの低価格が持続するとは考えにくいので、原子力発電は現状規模を維持すると予測する。

何と云っても、世界のウラン需給に最も大きな影響を及ぼすのは中国の原子力発電計画である。2010年に中国は、カナダの Cameco、フランスの Areva およびカザフスタンの Kazatomprom から合計6.4万tUの長期購入契約を締結した(第2図)。建設中の30基が2013年から次々と立ち上がるのに備えての調達と推察される。一方、現在停止している日本の50基(実質48基)について、WNA 2013の標準ケースは、2020年までに31基が運転再開と見込んでいる。この見通しがどちらに振れるかによる影響はもちろん大きいですが、新規の原子炉は初装荷時に通常の燃料装荷(100万kW級の場合、平均175tU/基)の3倍のウランを必要とするので、需給に及ぼす影響はより重要である。

#### 2. 世界のウラン資源量

先に述べたOECD/NEA-IAEAは、世界のウラン資源量を加盟各国からのアンケートに基づいて2年毎に取りまとめている(通称レッドブック)。ウラン資源量はその回収コストと算定精度のカテゴリーに区分されているが、近い将来に利用可能な在来型既知資源量は、回収コストがUS\$130/kgU以下の533万tUである(第2表<sup>1)</sup>)。

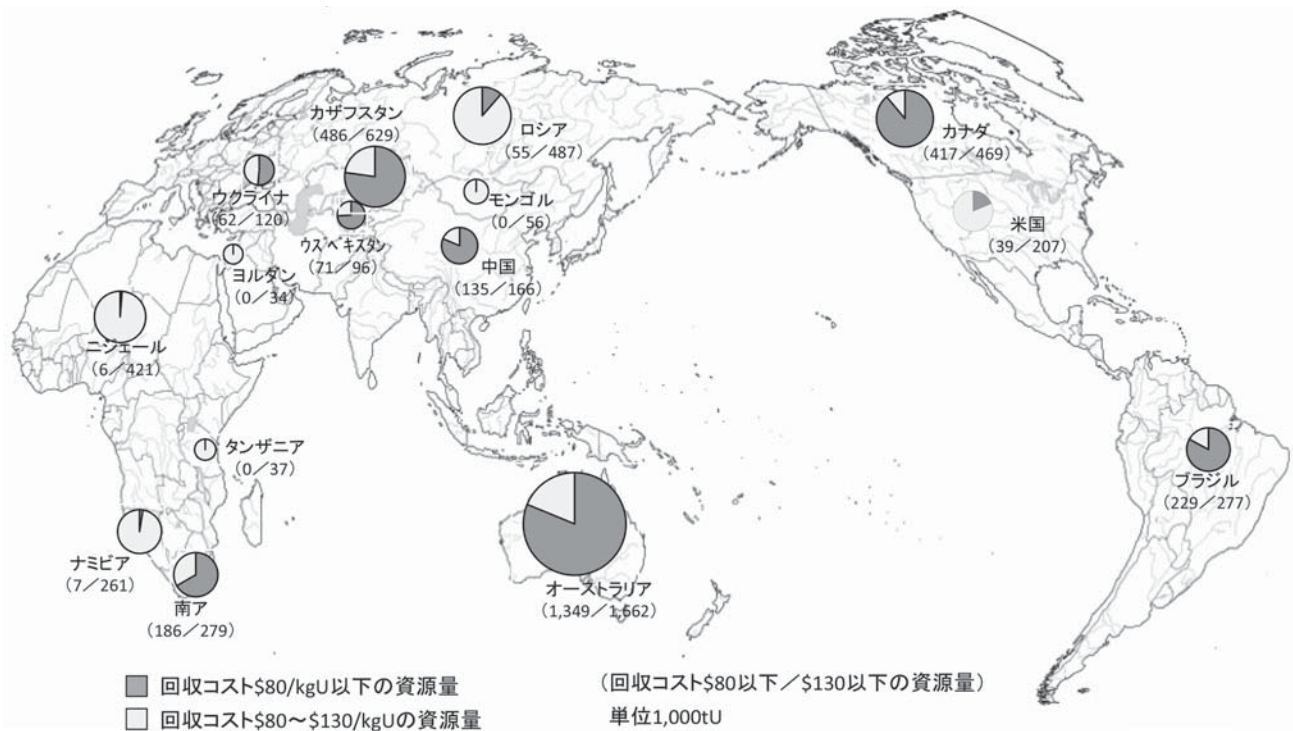
533万tUの世界分布をみると、オーストラリア、カ

第2表 世界のウラン資源量(レッドブック 2011に基づく)

コスト区分	既知資源(万tU)		未発見資源(万tU)		在来型資源 総計(万tU)
	確認資源	推定資源	予測資源	期待資源	
コスト区分なし	—	—	—	—	373(359)
<US\$260/kgU	710(631)		284(291)	386(390)	1,753 (1,671)
<US\$100/ポンド U3O8)	438(400)	272(230)			
<US\$130/kgU	533(540)		270(281)	354(374)	
<US\$50/ポンド U3O8)	346(353)	187(188)			
<US\$ 80/kgU	308(374)				
<US\$30/ポンド U3O8)	201(252)	106(123)	162(170)		
<US\$ 40/kgU	68(80)				
<US\$15/ポンド U3O8)	49(57)	19(23)			

注( )内の数字はレッドブック 2009。低コスト区分の資源量は高コスト区分の資源量の内数

全世界：533万 tU (2011年1月1日現在)



出典: OECD/NEA-IAEA, 2012(Uranium 2011)を基に作成

第3図 世界のウラン資源分布(レッドブック 2011に基づく在来型既知資源&lt;US\$130/kgU)

ザフスタン、ロシア、カナダ、ニジェール、南アフリカ、ブラジル、ナミビア、米国の順に資源量が多く、この9カ国で世界の88%を占める(第3図)。ウラン資源は世界各地に比較的まんべんなく分布しているが、なぜか低コスト資源(US\$80/ポンド $U_3O_8$ 以下)の大半は、オーストラリア、カザフスタン、カナダに集中している。

533万 tU という資源量は、今後原子力発電の需要が拡大することを前提としても、半世紀の間は利用に耐える量と言える。さらに、地質学的には今後の探鉱によりウラン資源量は追加発見が可能であるが、この詳細は次回で述べることにする。ウラン資源の存在ポテンシャルは豊富であるが、発見しやすく、開発しやすい資源は減少しつつあるので、今後の継続的探鉱努力が必要なことは言うまでもない。

### 3. ウラン探鉱、鉱山開発・生産動向

#### (1) 探鉱動向

2003年後半からのウラン価格上昇に反応して、カナダ、オーストラリアの小規模探鉱会社(ジュニア)が何百も誕生し、 Cameco, Arevaなどのウランメジャーおよびロシア、中国などの国営企業も活動を活発化させ、2007~2008年をピークに世界はウラン探鉱ブームに突入した。2009年以降、ウラン価格の低下に伴いウラン探鉱活動は徐々に勢いを減じつつあるが、この間にカナダ、オーストラリア、ナミビアなど資源国において、い

くつかの重要な新規鉱床の発見および既知鉱床延長部における追加発見が行われた。主要な新規発見としては、カナダのラフライダー、フェニックス、オーストラリアのフォーマイル、ナミビアのFusabの各鉱床が、追加発見としては、オーストラリアのオリンピックダム鉱床深部延長、レンジャー3 deep 鉱床、ナミビアのLanger Heinrich 鉱床、Etango 鉱床、タンザニアのMukju River 鉱床などが挙げられる(第3表)。

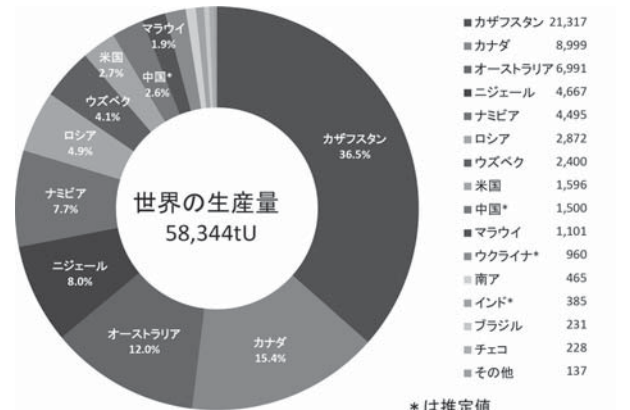
#### (2) 鉱山開発・生産動向

第3表に世界の生産センターを示す。2004年頃には約4万 tU/年しかなかったウラン鉱山の生産容量は、2012年には約58,000tU/年にまで増大した。しかし、この増大分の9割以上はカザフスタンの生産増によるものであった(第4図)。ウラン不足が顕著になり、ウラン価格が高騰したにもかかわらず、カザフスタン以外のほとんどの生産センターは、生産容量を思うように拡大できなかったのである。鉱山の開発には、採掘・製錬などの技術的な課題の克服に加えて、十分な資金の確保と環境影響評価などの許認可をクリアするため長期間を要するのが一般的である。これに対し、カザフスタンでは許認可の取得が比較的容易なうえ、ウラン資源の99%はロールタイプ(酸化還元境界にウランが沈殿濃集するタイプで、鉱体断面がロールパンの先端のような形状を呈する)の砂岩型ウラン鉱床でISL法(インシチュリーチング法)による生産が可能である。この手法は、ウランを採掘せず地中で溶かして溶液のまま地上に回収するた

第3表 世界のウラン生産センター

国名	鉱床・鉱山名	現在の埋蔵量 (tU)	平均品位 (%)	現状	2012 生産量 (tU/年)	所有者	
カナダ	ラビットレイク鉱山	15,190	0.65	2017 年まで生産予定	1,460	Cameco	
	マックリーク/ミッドウエスト (JEB 製錬所)	20,110	2.76	2014 年から JEB 製錬所でシガーレイクの鉱石を処理	0	Areva/ Denison/ 海外ウラン	
	シガーレイク	122,250	12.8	2014 年後半生産開始予定。2018 年以降 (6,920tU/y)		Cameco/ Areva/ 出光・東電	
	マッカーサーリバー (キーレイク鉱山で製錬)	172,180	11.65	2018 年から製錬所を 8,462tU/y に拡張	7,493	Cameco/ Areva	
	ミレニウム	34,810	3.72	2020 年頃生産開始予定		Cameco/ JCU (日)	
	シアグリーク	36,860	1.11	探鉱中		UEX	
	ラフライダー	22,290	4.08	2008 年発見。探鉱中。2012 年 Rio Tinto が Hathor を買収		Rio Tinto	
	フェニックス	23,070	14.1	2009 年発見。探鉱中		Denison/ Cameco/ JCU	
	キガベック/シッソズ	51,600	0.4	2020 年頃生産開始予定		Areva/ JCU/ 大宇	
	米国	ハイランド/スミスランチ・ノースピュート	18,540	0.059	ISL 生産中	423	Cameco
ウーローグリーク		7,233	0.075	2011 年 ISL 生産開始	239	Uranium One(U-1)	
クロピュート		7,920	0.14	ISL 生産中	308	Cameco	
ヘンリーマウンテン他 (ホワイトミサ製錬所)		4,190	0.18	鉱山以外の処理ウランを含め、ホワイトミサで製錬	500	Energy Fuel	
アルタメサ		不明	不明	ISL 生産中	106	Mestena	
バラングナ/ゴリアド		3,550	0.05	2010 年生産開始	56	Uranium Energy	
ランス、ロスクリーク、ニコルズランチ他				2013-2014 に ISL 生産開始予定			
レンジャー 3		34,652	0.041	2012 年末露天探鉱終了	3,147	ERA (Rio Tinto 68.3%)	
レンジャー 3 deep		28,240	0.29	2016 年以降坑内掘生産見込			
ジャベルカ		120,130	0.41	開発待機中			
オーストラリア	キンタイア	24,940	0.47	建設着手は 2015 年以降		Cameco/三菱商事	
	イーリリー	55,580	0.11	2012/8 Cameco が権益購入		Cameco	
	ウィルナ/レイクメイトランド	21,770	0.038	2013/4 環境認可取得完了。695tU/y を計画		Toro/ 日豪ウラン/伊藤忠	
	オリンピックダム	2,108,900	0.023	坑内掘。2013 年に生産容量を 3817tU/y に拡張	3,419	BHP Billiton	
	ピバリー	17,810	0.15	ISL 生産中	385	Heathgate	
	フォーマイル	27,300	0.27	2013 年に生産開始予定。Beverley で処理 (820tU/y)		Heathgate/Aliance	
	ハナムーン	2,500	0.20	2013 年に生産中断	131	Uranium One(U-1)	
	アールリット	49,700	0.17	露天掘生産中	3,065	Areva/Sopamin	
	アークター/アコラ	50,530	0.30	坑内掘生産中	1,506	Areva/Sopamin/海外ウラン	
	イムラレーン	143,770	0.10	2015 生産開始予定。5,000tU/y を計画		Areva/Sopamin/ Korea Resources	
ニュージーランド	テクィダ (アゼリック)	13,000	0.2	2012 生産開始	115	中国/Sopamin	
	Rössing	98,460	0.025	露天掘生産中	2,289	Rio Tinto (68.6%)	
	Langer Heinrich	66,650	0.047	2007 年生産開始	1,955	Paladin	
	Trekkopje	26,000	0.013	本格生産当面延期	251	Areva	
	Etango(Goanikontes)	81,850	0.017	2012 に DFS 完了		Bannerman	
	Husab	197,270	0.034	2012 年末 開発開始		中国/Epangelo	
	南ア	バーレルリバー	50,000	0.05 (推定)	生産中。金の by-pro.	460	AngloGold
	マラウイ	Kayelekera	17,840	0.068	2009/4 生産開始	1,101	Paradim/マラウイ政府
	タンザニア	Mukju River	45,920	0.025	2011/6 ARMZ が Mantra を買収。2012/11 EIS 認可		ARMZ (ロシア)
	ブラジル	イタタイア	76,100	0.08	2013/9 EIS 提出。		INB (ブラジル)
チェコ	Caetite(ラコアレアル)	12,700	0.26	露天掘生産中	231	INB	
	Dolní Rozinka (Rozna)	2,000	0.1-0.3	坑内掘生産中	228	DIAMO (チェコ)	
	Kanzhugan//Mynkuduk/Uvanas/Karamurun 他	88,910	0.047	ISL 生産中	3,270	Kazatomprom (Kaz)	
	Central Mynkuduk	46,919	0.032	伊藤忠が購入契約	1,580	Kaz	
	Vostoc 他(鉱脈型)	10,464	0.167	坑内掘生産中	370	Kaz	
	Akdala/Southern Inkai	35,390	0.039	ISL 生産中	2,965	U-1/Kaz	
	Moinkum 2.3/Tortukuduk	52,350	0.074	ISL 生産中	3,654	Areva/Kaz	
	Inkai (JV)	146,470	0.047	2009 年 ISL 生産開始	1,870	Cameco/Kaz	
	Zarechnoye	16,552	0.064	2009 年 ISL 生産開始	942	Kaz/U-1	
	Budenovskoe	41,290	0.093	2008 年 ISL 生産開始	3,337	Kaz/U-1	
ロシア	West Mynkuduk	24,845	0.032	2008 年 ISL 生産開始	810	Kaz/住友・開電	
	Kharasan 1, 2	59,124	0.105	2009 年 ISL 生産開始	1,123	Kaz/丸紅他(U1)	
	Semizbai/Irkol/Zhalpac	60,776	0.045	2009 年 ISL 生産開始	1,230	Kaz/中国	
	Priargunsky	115,379	0.18	坑内掘生産中	2,011	ARMZ	
	Dalur/Khiagda	59,988	0.05	ISL 生産中	861		
	ウクライナ	Michurinskoye/Vatutinskoye	77,070	0.1	坑内掘生産中	780	VostGOK
	ウズベキスタン	Novokostantinovskoye	93,630	0.14	2011 年坑内掘生産開始	180	
	中国	Kendykube/Ketmenchi/Severny/Bukina/Beshkak/Lyavlyakan 他	114,600	0.026-0.18	ISL 生産中	2,400	Navoi MMC
	インド	相山/下庄/蓮山(開成龍)/伊梨 (ISL) 他	166,100	0.1-0.3	生産中 (坑内掘、ISL)	1,500	CNNC
		Juduguda/Turamdih/Tummalapalle 他	72,800		坑内掘生産中	385	UCIL
合計		5,196,062		合計	58,136		

データ：各企業 Website, WNA Website, Red Book 2011 他



\*は推定値

データ：WNA Website, 2013/5

第4図 2012年の国別ウラン生産量

め、従来型製錬所の建設を必要とせず、初期投資が少額でかつ短期間での生産が可能である。同国内の多くの ISL プロジェクトは、海外企業の積極的導入政策も功を奏し早急に立ち上がることができた。

今後、ウラン需要の増加に応じて世界のウラン生産容量を臨機応変に増大できるかという点、それは大いに疑問である。新規鉱山の開発に関しては、世界第2の大規模鉱山となる予定のシガーレイク鉱山(122,250tU, 平均品位 12.8%U)は、開発中の 2006 年 10 月に出水事故により坑内が水没し、当初 2008 年となる予定の生産開始が大幅に遅れた。地上からの凍結技術等により軟弱地盤の問題を克服し建設費約 C\$2b. を要したが、鉱山の建設はほぼ完了し、2014 年後半から生産が開始されるのはほぼ確実で、2018 年以降にフル生産 (6,920tU/年) に至ると予定されている。しかし、その他のほとんどの新規鉱山の開発は、現在のウラン価格 (~ US\$35/ポンド U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) では採算見通しが困難であり、中断または延期を余儀なくされると予想される。開発が本格化するためには価格上昇が前提条件となる。既存鉱山についても同様のことが言える。唯一増産が可能なのはカザフスタンであるが、これまでのような大幅増産は期待できない。鉱量枯渇が近い鉱山もあるため、既存鉱山の生産容量は長期的には減少に向かうと予想される。

#### 4. 2次供給の見通し

既に述べたとおり、商業在庫からのウランはほとんど市場には出回らず、また、米国 DOE の在庫の放出量は 1,800 ~ 2,700tU/年と限定されている<sup>3)</sup>。回収ウラン・MOX 燃料の利用量も 1,500tU 相当/年程度に限定されている<sup>4)</sup>。したがって、不確定要素の大きい 2次供給はロシアの軍用 HEU に限られる。

ロシア HEU は、1999 年以降、毎年 30tU の HEU (約 9,000tU + 5,500tSWU) が LEU に希釈され、米国 USEC に輸入されてきたが、これが 2014 年以降は消滅する。この突然の輸入量減少を防ぐため、2008 年にロシアの



ウラン輸入を制限する米ロ間契約を変更緩和し、2014～2020年まで、ロシアから直接、米国企業に米国ウラン年間需要の約20%以内のLEU(約5,000tU+約3,000tSWU)を輸出できるようになった。ロシアTenexは、2011年にUSECとの間で、2022年まで年間2,100tSWU相当のLEUを供給し、そのウランコンポーネント(濃縮ウランは、原料となる天然ウランと濃縮作業量との2つの価値からなる)約3,500tUを取り戻す契約を締結した。

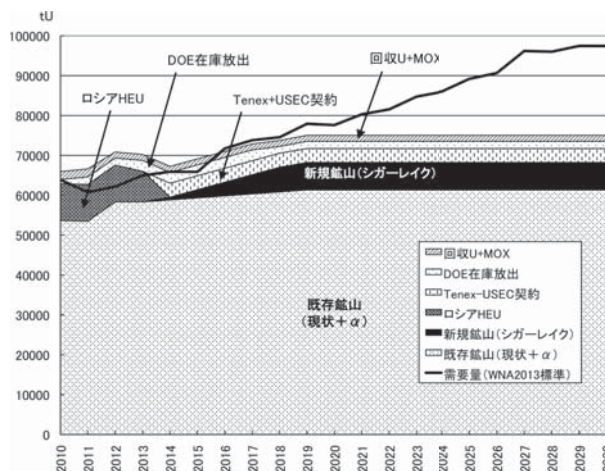
ロシアの国内ウラン生産量は3,000tU/年以下と限られている。ロシア国有企業ARMZは、2013年にカザフスタンに4,750tU/年のウラン生産シェアを有するUranium Oneを吸収し、自給ウラン量を7,630tU/年に拡大した。しかし、ロシアは自国の需要約5,000tU/年に加え、ウクライナとアルメニアに約1,500tU/年、旧CISを含むEU諸国に約5,000tU/年を輸出しており<sup>4)</sup>、さらに、中国・インド・イラン・トルコ・ベトナムなどロシア炉輸出国へ燃料供給することを考慮すると、明らかに天然ウラン不足である。有り余る濃縮容量を有するロシアとしては、USECへLEUを輸出して返還される3,500tU/年は非常にありがたいウラン供給源と言える。外向きには、ロシアはこれ以上の軍事用HEUの取り崩しを否定しているが、今後もHEU希釈を継続する可能性は大きいと考えられる。

#### IV. ウラン需給の見通し

上述のウラン需給に影響する主要因について以下のように仮定し、需給見通しを試みた。

- ・WNA 2013の標準ケースをウラン需要とする。
- ・既存ウラン鉱山の生産容量はカザフスタンなどの微増(3,000tU/年)と推定。
- ・新規鉱山はシガーレイク鉱山のみが計画通り生産を開始すると推定。
- ・ロシアは3,500tU相当の軍事用HEU取り崩しを継続すると推定。
- ・DOEは2013年に発表した計画どおり、1,800～2,700tU/年を市場に放出すると推定。
- ・回収ウラン・MOX燃料の利用は1,500tU/年と推定。

上記仮定に基づくと、ウラン需給は2018年頃まではおよそバランスし、2019年以降にウラン不足となる(第5図)。ウラン価格が上昇に転じ、新規ウラン鉱山の開発が可能になるのは2020年以降になると予想される。



第5図 2030年までのウラン需給見通し

ただし、需要と供給の主要因には以下の振れ幅があることに注意しつつ、今後の動向を見守っていかねばならない。特に、2014年以降、ロシアが軍事用HEUの商用利用を継続するか否かの変動要因は、外からは見えないが確実に市場に影響してくる重要要因である。

##### (1) 長期的要因

中国の需要増：現在～2030年：約18,000tU/年

##### (2) 中期的要因

中国の需要増：現在～2020年：約6,000tU/年

日本の需要増：現在～2020年：約4,000tU/年

##### (3) 短期～長期的要因

ロシアHEUの利用の有無：3,500～5,000tU/年

##### (4) 突発的要因

大規模鉱山の事故：3,000～7,500tU/年

##### — 参考資料 —

- 1) OECD/NEA-IAEA, Uranium 2011(レッドブック2011), 2012.
- 2) WNA(World Nuclear Association), The Global Nuclear Fuel Market-Supply and Demand 2013-2030 (WNA Market Report 2013), 2013.9.
- 3) DOE, Excess Uranium Inventory Management Plan, 2013.7.
- 4) EURATOM Supply Agency, Annual Report 2012, 2013.10.

##### 著者紹介



小林孝男 (こばやし・たかお)

石油天然ガス・金属鉱物資源機構

(専門分野/関心分野)ウラン探鉱/地質学・地球科学全般

## 解説

## 放射線生物学の最前線

## DNA 損傷機構と損傷修復の分子シミュレーション

日本原子力研究開発機構 横谷 明德,  
東京薬科大学 高須 昌子, 東京大学 石川 顕一

放射線は、今や医療現場においては治療や診断など国民の健康生活に不可欠な要素である一方、福島における低線量被ばくに対するリスク評価など、放射線に関わる研究者が取組まなくてはならない課題は数多くある。複雑な階層構造を持つ生物システムが放射線ストレスに対してどのように応答するかについては、分子、細胞あるいは個体など様々なレベルでの実験が行われている。一方、これらの実験により得られた知見から法則性を抽出し、放射線応答の一般化したモデルを構築することが求められる。コンピュータの高性能化により、最近ではこれらのモデル研究も新しい領域に入りつつある。放射線の照射により生じる DNA 損傷・修復の初期の物理・化学的過程から DNA 修復に関する生物学的過程及びアト秒領域における DNA-電子相互作用に焦点を当てた理論研究など、シミュレーション研究の最前線を解説する。

## I. 序

放射線と生体物質との相互作用の物理・化学・生物学の基礎過程の知見が集約され、これまでにモンテカルロ法により一般化した損傷生成モデル化が提案されてきた。特にマイクロな線量分布から DNA 損傷の空間分布を導き、DNA の鎖切断や塩基損傷とこれらが局所に集中して生成した 2 本鎖切断 (DSB) やクラスター DNA 損傷の収率が評価されている。II 章では、これらの計算結果及びこれらを実験の結果と比較を行った最近の研究を紹介する。また、DNA 修復タンパク質による生体修復過程を計算に取り込む試みもなされている。このためには、実験あるいは分子動力学計算による、様々なタイプの DSB と修復のタンパク質の相性、つまり修復確率のデータの整備が不可欠である。それを旨とした 1 例として、III 章で DNA 末端のいわゆるテロメア構造部位とこれに結合するタンパク質の研究を紹介する。一方、放射線の初期過程研究は今やフェムト秒からアト秒 ( $10^{-18}$  秒) の世界へと入りつつある。入射時の放射線が何であろうと、DNA と直接相互作用する主要な役者はトラック末端で発生する 2 次電子、特に低エネルギーの電子と言われている。技術の進展に伴ってアト秒レーザーが開発されようとしており、そのひとつの応用先として

*Front Line of Radiation Biology ; Simulation studies of radiation damage to DNA and its repair* : Akinari YOKOYA, Masako TAKASU, Kenichi ISHIKAWA.

(2013 年 9 月 25 日 受理)

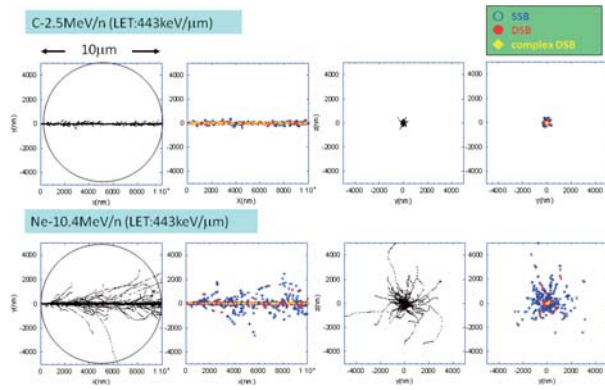
DNA-電子相互作用の研究が想定されている。IV 章では、その理論的研究と応用の可能性を紹介する。

## II. 微視的エネルギー付与分布に依存した放射線 DNA 損傷シミュレーションとその実験的検証

放射線による生物への影響の多くは、DNA 損傷が原因であると考えられているが、どのような損傷が、どのような過程を経て、どのような影響が観測されるのか不明な点が多い。日本原子力研究開発機構では、放射線が生体に入射し物理・化学過程を通して DNA に損傷を与えるまでの過程を詳細にシミュレーションするシステムを構築し、放射線の量・種類・エネルギーに対して生成される DNA 損傷の種類や量、分布を調べている。

渡邊らは、モンテカルロ飛跡構造計算コード (TRACION) を用いて、ガンの放射線治療にも用いられているイオンビームの飛跡 (トラック) を計算するとともに、これらの飛跡に沿った細胞内における DNA の 1 本鎖切断及び 2 本鎖切断型損傷の空間分布を DNA 損傷計算コード DBREAK によりシミュレートした (第 1 図の上下のそれぞれ 4 枚が炭素イオン及びネオンイオン)。これらの結果は、免疫染色法を用いて実際に炭素及びネオンのイオンビームを用いて得られた DNA の 1 本鎖切断 (SSB) 及び 2 本鎖切断 (DSB) の細胞核内分布を調べた実験結果<sup>1)</sup>を精度よく再現した。

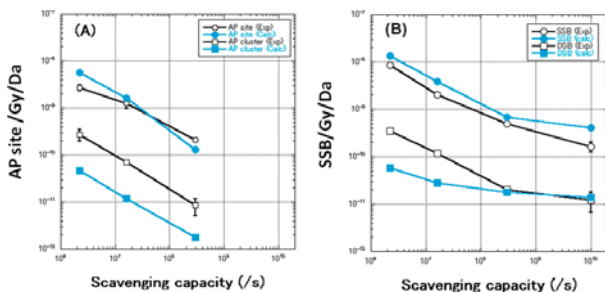
さらに DNA 損傷の生成量を定量的に検討するため、実際に放射線医学総合研究所の HIMAC にて炭素イオ



第1図 細胞中に入射された同一LETの炭素及びネオンイオンのトラック構造と、これにより生成するDNA損傷の空間分布  
DNAの1本鎖切断(SSB)は青丸, 2本鎖切断(DSB)は赤丸で, また塩基損傷を末端に持つ複雑なDSB(complex DSB)は黄色菱形で示した。

ンビームをDNAに照射し, 得られた実験結果とシミュレーション結果の比較を行っている。今回は鎖切断や塩基損傷に加え, これまで計算されていない塩基脱離部位(APサイト)と呼ばれるDNA損傷と, これが10nm程度の局所に複数個同時に生じるため修復を阻害すると考えられる“クラスター損傷”について, これらの収率の試料中のラジカル補足能依存性を調べた(第2図, 横軸はラジカル補足能(scavenging capacity), 縦軸は損傷収率)。ラジカル補足能を変えると, 水の放射線分解によるOHラジカルなどのフリーラジカルによる間接的なDNA損傷効果とDNAへ直接のエネルギー付与効果の比を制御することができる。モデルは実験で得られたSSB及びAPサイトの収率<sup>2)</sup>を極めて良くシミュレートしていることが確認されたが, DSBやAPサイトを含むクラスター損傷については, 計算値がやや低いため現在モデルの改良を進めている。

またこれらの開発された飛跡計算コードを利用することで, 福島で問題となる<sup>137</sup>Csからの低線量γ線の細胞集団内における飛跡と損傷分布についても計算が行われた(第3図)。このような低線量域の大きな特徴は, 標的細胞ごとの線量や標的内部の線量の分布に大きな違い

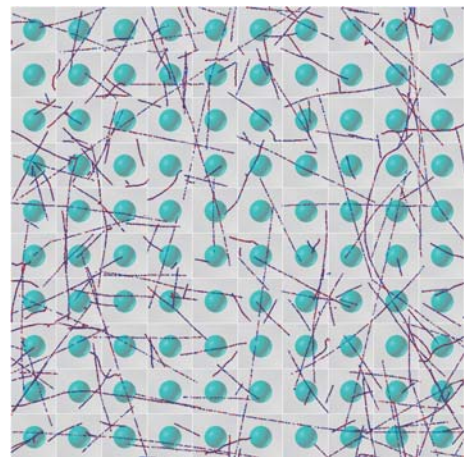


第2図 シミュレーション及び実験で得られたDNA損傷の収率(A): APサイト及びこれを含むクラスター損傷収率, (B): 1本鎖切断と2本鎖切断。シミュレーションは青, 実験値は黒で示した。

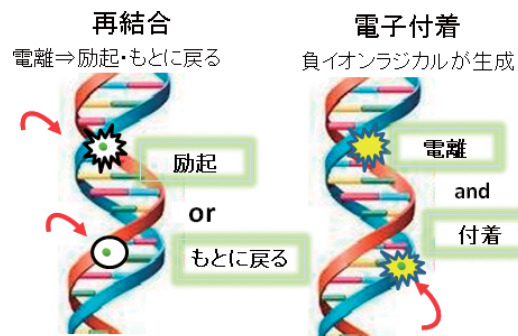
が生じていることにある。微小領域内におけるエネルギー付与を記述するマイクロな吸収線量の観点からどのように低線量を捉えるかについて, 渡邊が最近の総説<sup>3)</sup>で論じているのでそちらも参照されたい。

ごく最近, 甲斐らにより放射線がDNAと相互作用した直後のフェムト秒領域での事象のシミュレーションが開始された。これまでの研究では, イオン化の結果生じた正イオンと放出された負電荷をもつ電子との直接の相互作用は扱われてこなかった。しかしDNAが高い価数にイオン化された場合, 電子はこれらの正電荷を感じながら運動すると予想されるため, これらのクーロン場における電子の運動を考慮することが必要である。引き戻された電子がDNAとどのような再結合あるいは付着を起こすかに依存して損傷の空間密度が変わるため, 上述した難修復性のクラスターDNA損傷の新しい生成メカニズムとして注目される(第4図)。

本研究ではまず単純な系として水に電子線が入射された場合の電子について, イオン化の結果生じた正イオンのクーロン場中の電子の運動をニュートンの運動方程式を解くことで, またその後の弾性・非弾性散乱等はモン



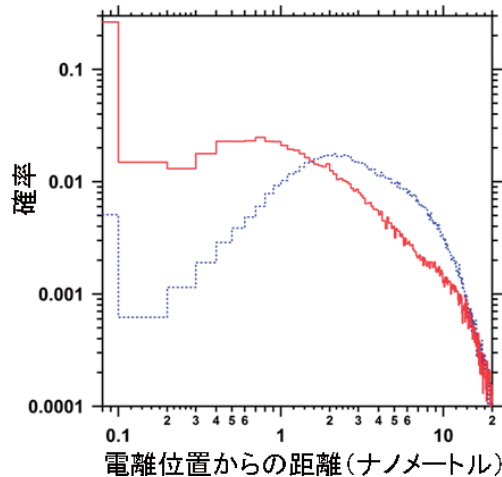
第3図 2次電子平衡成立条件で1mGyの<sup>137</sup>Csγ線が照射された細胞集団中のトラック分布  
細胞は単層培養された集団で, 細胞ひとつは1辺16μmの四角形, 核は直径8μmの球とした。10細胞×10細胞=細胞100個分を表示した。



再捕獲⇒損傷の密度が変化

第4図 再捕獲によるDNAの損傷の空間密度への影響





第5図 水中における入射 500fs 後の 2 次電子の空間分布 (赤):クーロン力を考慮した場合, (青):しない場合。横軸は最初の電離位置からの距離を示す。

テカルロ計算によりその軌道を計算した。電子線のエネルギーとして水の酸素から発生する Auger 電子とほぼ等しい 500eV とし, 入射 500 fs 後にこの電子の飛跡に沿って生じた 2 次電子の挙動を解析した。その結果, 親イオン近傍 (0.3nm 以内) に引き戻される 2 次電子の数は, 第 5 図に示すように全体の約 30% にも達することがわかった。

さらに, 有限の長さを持つ DNA 分子上に不均一に生じた複数の正電荷により生じたクーロン場中をどのように電子が運動するかを, 同様にシミュレートした<sup>4)</sup>。その結果, イオン化により発生した電子のうち低エネルギーのものは再び DNA イオンに引き戻され“再捕獲”されることが示唆された。最近では, 高輝度の放射光 X 線や自由電子レーザーによって, 高密度に電離を起こした生体分子の近傍における電子の振る舞いが注目されており, この分野への貢献が期待される。(横谷明徳)

### III. テロメア DNA とタンパク質の分子動力学

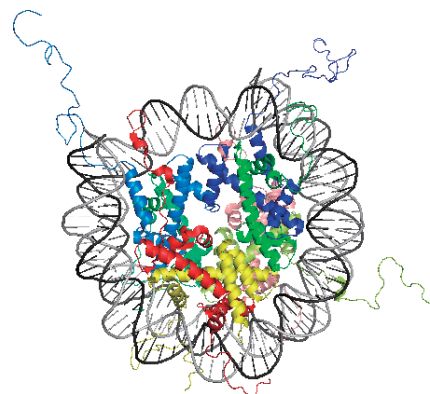
放射線による DNA 損傷修復の基礎として, 損傷を受けやすい DNA のテロメア部分とタンパク質の相互作用を研究することは重要である。本章では, 生体分子の分子動力学シミュレーションによる研究方法について述べた後, テロメア DNA とタンパク質への応用に触れる。

著者が所属する東京薬科大学生命科学部生命物理学研究室では, 生体分子やソフトマターをテーマに, 主に分子動力学シミュレーションによる研究を進めている。分子動力学の基本となるのは, ニュートンの運動方程式である。対象とする系は, 全原子モデルを使うことが多いが, いくつかの原子を一粒とみる粗視化モデルも用いられている。粒子間の力は, 非結合部分には, レナードジョーンズポテンシャルが用いられることが多い。結合部分には, バネポテンシャル, 二面角ポテンシャルなどを用いる。電荷がある場合は, 静電相互作用を用い

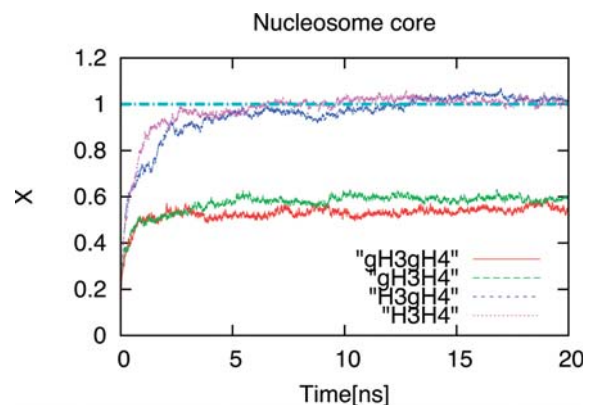
る。このような相互作用は, GROMACS や AMBER などの既存ソフトの中に用意されていることが多い。タンパク質に金属が含まれる場合は, 金属の周りのポテンシャルが既存ソフトにないこともあり, その場合は量子化学的計算<sup>5)</sup>によりポテンシャルを決める必要がある。

このような分子動力学の手法を用いて, 当研究室では, タンパク質の繊維化, 細胞接着ペプチド, 糖尿病関連ペプチドなどについてシミュレーションにより研究を進めている。また, 第 6 図に示したように, DNA とヒストン 8 量体 (DNA と結合している 8 量体タンパク質) との複合体であるヌクレオソームコアのシミュレーションを行い, 8 量体のうちの一つであるヒストン H3 にある突出領域 (テール) の構造や運動を議論した<sup>6)</sup>。このテールが欠損した場合についても計算を行い, その RMSD (根平均 2 乗変位) に対する欠損しない場合の RMSD の比を X とし, 時間変化を第 7 図に示した。H3 テール欠損の場合に X 値が小さくなっており, H3 テールがヌクレオソームコア全体の動きに影響を与えていることがわかる。

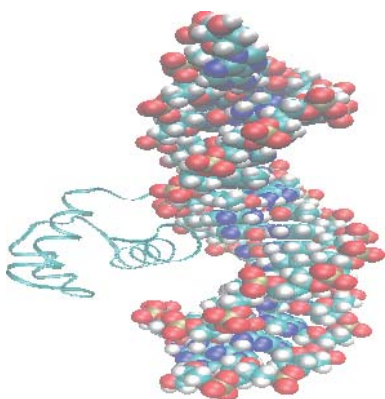
また, 溶媒の水などの影響をランダム力で代用するブラウニアン動力学の手法もある。ランダム力を加える場合は, 散逸揺動定理を満たすために, 運動方程式に減衰項が必要である。シミュレーションで動かす自由度を減らすことにより, シミュレーションが速く進むというメ



第 6 図 ヒストン 8 量体と DNA の複合体



第 7 図 ヌクレオソームコアの X 値の時間変化 赤と緑が H3 欠損の場合である。



第8図 テロメア DNA とタンパク質のシミュレーション

リットがあり、粗視化モデルで大体の構造を得たい時に使われることが多い。乱数を用いることから、モンテカルロシミュレーションに近い分子動力学になる。

さて、放射線被ばくを考える場合、DNA 末端にあるテロメア部分が重要である。テロメアは細胞の寿命を決める部分であり、テロメアが短くなると DNA が不安定になり、細胞が老化し、細胞死が起こる。放射線損傷によりテロメアが被害を受ける可能性がある。第8図に示すように、上坂充先生、冠城雅晃氏(東京大学上坂研大学院生)らとの共同研究により、テロメア維持タンパク質の TRF1, TRF2 とテロメアの親和性に関して分子動力学を用いて解析が行われている。

このように、生体分子の構造や動き、さらに放射線損傷に関連したテロメアとタンパク質の親和性の研究において、分子動力学は重要である。コンピュータの速度や容量の増加により、さらに大きい系の長時間の計算が可能になるであろう。また、全原子モデルの計算結果を使って粗視化モデルを作成し、計算方法もモンテカルロシミュレーションを行うことにより、より大きな系の長時間の振る舞いを研究することができる。今後の発展が期待される。(高須昌子)

#### IV. アト秒・フェムト秒の電離ダイナミクス

その名の通り、電離放射線の影響はイオン化から始まる。個々の原子・分子の電離はアト秒( $10^{-18}$  秒)という非常に短い時間スケールで進行する。また、電離直後に発生するアト秒～フェムト秒の時間スケールの電子系の動的变化が、DNA 損傷や修復、生体分子への影響が大きい低エネルギーの2次電子生成にとって重要であることが知られるようになってきた<sup>7)</sup>(本稿II章も参照)。フェムト秒レーザーを用いた高次高調波発生技術の進歩により、アト秒光パルスを発生することが可能になったことで、このような電子運動の研究(アト秒科学<sup>8)</sup>)が注目されている。本章では、アト秒～フェムト秒の電離過程を第一原理計算する手法について説明する。これまで、電離は単に電子が出てくる過程として見られるだけであっ

たが、下に紹介するような電子相関、多電子効果の研究が、放射線生物効果の解明に貢献することを期待する。

#### 1. 時間依存シュレーディンガー方程式シミュレーション

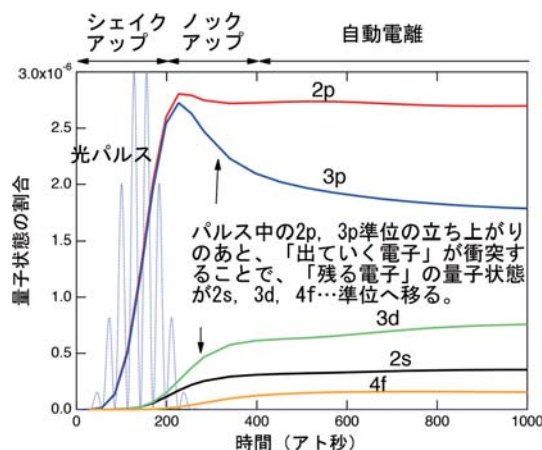
光や軟 X 線の場合における  $N$  電子原子の振る舞いは、電界との相互作用を含む時間依存シュレーディンガー方程式 (time-dependent Schrödinger equation: TDSE) で記述される。波動関数を空間グリッド上の値で表し、その時間発展をクーロン相互作用の項も含めて厳密に計算することが、水素原子、ヘリウム原子、リチウム原子、水素分子については可能になっている。

アト秒極端紫外 (XUV) 光パルスによる励起ヘリウム原子のイオン化の計算例を紹介する。光子エネルギー 72.9 eV の 5 サイクルパルスによる  $1s2p^1P$  励起状態のイオン化でできるイオンの各準位の、ポピュレーションの時間変化の計算結果を第9図に示す。パルスが終了する 200 アト秒以降では準位間のポピュレーション移動が起こっていることが分かる<sup>9)</sup>。これは「内側から出て行く電子」が「残る電子」に衝突する(ノックアップ現象)電子相関のために起こっている。一般に、光電効果など電離は一瞬の出来事ととらえられがちであるが、アト秒時間スケールでみると、第9図に見られるような時々刻々の変化があるのである。

#### 2. 多電子ダイナミクスのシミュレーション

電子の数が増えるにしたがって、上記の TDSE 法の計算量は急激に増加して実行不可能になる。この困難を回避するため、我々は、現実的な計算量で多電子系のイオン化をシミュレーションできる新しい手法である、時間依存完全活性空間自己無撞着場 (TD-CASSCF) 法を開発している<sup>10)</sup>。

この方法では、電子系を外場に反応しない frozen-core, 外場に応答するが閉殻構造を保つ dynamical-core, 外場にフルに揺さぶられる active の3つに分け



第9図 光子エネルギー 72.9 eV の 5 サイクルパルスによる  $1s2p^1P$  励起状態の 1 光子電離でできるヘリウムイオンの、各準位のポピュレーションの時間変化 (TDSE 計算)

る。この ansatz に対して時間依存変分原理を適用することで、第一原理的な計算方法を導出できる。全電子を active にすれば厳密計算であるが、core を導入することで計算量を抑えている。第 10 図に、強レーザー場中の 1 次元 (LiH)<sub>2</sub> モデル分子のイオン化の進行の計算結果を示す。TD-CASSCF 法を使えば、全電子を active にした厳密計算 (MCTDHF) とよく一致した結果が得られることが分かる。(石川顕一)

## V. 結言

今や計算機シミュレーションは、放射線生物学の最前線のツールとして、トラック構造計算はもとより DNA 損傷生成、DNA 修復の動力学計算、さらには極短時間ダイナミクスなど様々な最新の研究領域をリードする重要な役割を担っている。複雑な階層構造をもつ生体システムの放射線応答を理解するためには、まだ実験の技術革新を待たなければならない局面が多々ある。今回紹介した新しい研究の試みは、単に得られた実験データの再現を目指した“モデリング”に留まらず、実験が追いついていない未踏の領域を推定するための有力なツールであることも強調したい。これらを可能にするのは、やはりその基盤には計算機本体であるハードウェアの進歩があることは言うまでもない。この意味で計算機科学は、1 位とか 2 位とかを論じる性質のものではないのである。

紙面の関係で今回は紹介できなかったが、生体をひとつの巨大な“システム”として捉える、いわゆる“システムズ・バイオロジー”という新しく、かつ激しい潮流が世界で流れ始めた。従来の生物研究者は、これをプロテオミクスやメタボロミクスなど、いわゆる分子生物学の

オミックス研究の延長と捉える向きがあるが、このような表層的な網羅解析と考えることは的を射てはいない。熱力学的には非平衡状態にある細胞内の多数の反応を相互にフィードバックをかけ合うストレス応答の集合として捉え、非線形な連立微分方程式の解としてコンピュータを用いて解析的に得る。これにより、外場からの刺激など新しい局面にどのようにシステムが応答するのか？という予測が可能となる。日本原子力研究開発機構をはじめ、大学でも理論と実験の両面から試験的な取り組みが開始されている。このようなシステムズ・バイオロジーで構築されたアルゴリズムは、生体以外の人工システムのロバストネス評価等への応用も期待される。生物学的な知識・経験に加え数学的な素養を備えた新しい人材の育成が急務である。

### — 参考資料 —

- 1) R. Watanabe, S. Wada, Y. Funayama, Y. Kobayashi, K. Saito, Y. Furusawa, *Radiat. Prot. Dosim.*, **143**, 186-190 (2011).
- 2) T. Shiina, R. Watanabe, I. Shiraiishi, M. Suzuki, Y. Sugaya, K. Fujii, A. Yokoya, *Radiat. Environ. Biophys.*, **52**, 99-112 (2013).
- 3) 渡邊立子, 放射線生物研究, **47**, 335-346 (2012).
- 4) T. Kai, M. Higuchi, K. Fujii, R. Watanabe, A. Yokoya, *Int. J. Radiat. Biol.*, **88**, 928-932 (2012).
- 5) T. Miyakawa, R. Morikawa, M. Takasu, K. Sugimori, T. Mizukami, K. Kawaguchi, H. Saito, H. Nagao, *Prog. Theor. Chem. Phys.*, **26**, 525-543 (2012).
- 6) R. Fujimori, Y. Komatsu, M. Fukuda, T. Miyakawa, R. Morikawa, M. Takasu, *AIP Conf. Proc.*, **1518**, 602-605 (2013).
- 7) T. Jahnke, *et al.*, *Nature Phys.*, **6**, 139-142 (2010).
- 8) F. Krausz, M. Ivanov, *Rev. Mod. Phys.*, **81**, 163-234 (2009).
- 9) S. Sukiasyan, K. L. Ishikawa, M. Ivanov, *Phys. Rev. A*, **86**, 033423 (2012).
- 10) T. Sato, K. L. Ishikawa, *Phys. Rev. A*, **88**, 023402 (2013).

### 著者紹介



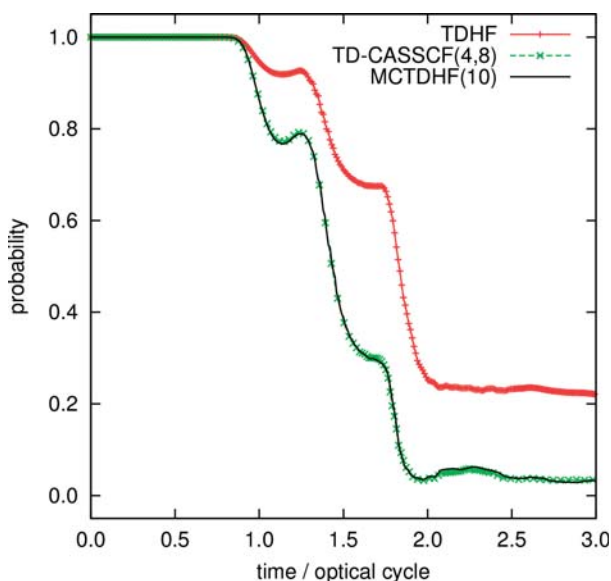
横谷明徳 (よこや・あきなり)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)放射線生物物理学



高須昌子 (たかす・まさこ)  
東京薬科大学 生命科学部  
(専門分野/関心分野)生体分子のシミュレーションによる研究



石川顕一 (いしかわ・けんいち)  
東京大学  
(専門分野/関心分野)光量子科学



第 10 図 波長 750nm, ピーク強度  $4 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$  のレーザーパルスによる 1 次元 (LiH)<sub>2</sub> モデル分子における基底状態ポピュレーションの変化(イオン化の進行) TDHF 法に比べて, TD-CASSCF 法は厳密計算 (MCTDHF) 法とほとんど同じ結果となっている。



# 高レベル放射性廃棄物処分の可逆性と回収可能性

## 第4回(最終回) R&R 国際会議内容の紹介(その2)と 今後への期待

原子力環境整備促進・資金管理センター 田辺 博三

処分事業の実施段階における可逆性・回収可能性(R&R)が各国で取り上げられ、議論が行われるなど関心が高まっている。第4回の解説では、前回に引き続き、R&Rプロジェクトの一環として開催された国際会議より、事業、政策、規制の関係者以外の人文・社会科学分野の学者・専門家やNGO組織などからの発表を中心に紹介する。また、今後への期待を検討した。

### I. はじめに

シリーズ第3回では、R&R国際会議の「政治研究・社会科学研究からのキーマッセージ」セッションにおける6件の人文・社会科学分野の学者・専門家からの発表を紹介した。本稿では、その発表に関するグループ討議の結果を紹介し、第II章以降に、地元のNGO組織などの発表内容の紹介と全体のまとめを行う。

「政治研究・社会科学研究からのキーマッセージ」セッション後、参加者は6つのグループに分かれて、何がキーマッセージか、放射性廃棄物統治における人文・社会科学の役割、経済性研究の位置付け、各国の共通性と特殊性から学んだことは何か、の設問に関して討論を行った。グループから挙げた意見の主なものを以下に示す。

- ・実施主体は市民からの合意形成を得るために、信頼性を構築するツールとしてしばしば回収可能性とモニタリングを使用している。
- ・しかしながら、実施主体は回収可能性が有する潜在的な負の影響もまた示す必要がある。
- ・たとえ回収が技術的に適用可能になったとしても、最も重要な事項は“なぜ回収が必要か”をいかに決定するかである。
- ・R&Rについてはそれぞれ異なる解釈がされている。安全性に対しても、社会科学と科学技術で異なっている。

*Reversibility & Retrievability (R&R) for Geological Disposal of High-level Radioactive Waste (4) ; Sociological Discussions about R&R in R&R conference (2) : Hiromi TANABE.*

(2013年 11月7日 受理)

■前回のタイトル

第3回 R&R 国際会議内容の紹介(その1)

- ・閉鎖後の回収の問題は、私たちが考えている以上に複雑である。市民に対してミスリーディングをしてはいけない。
- ・回収可能性は技術/自然科学研究の結果からもたらされたものではなく、市民との対話への回答である。
- ・ベルギーで実施されたような市民との対話は、国の方針として利用されるR&Rについて議論する良いスタートとなる。

### II. R&R 国際会議における非技術専門家などからの発表(その2)

#### 1. 「地元のステークホルダーとNGO組織からの期待」

##### (1) フランス CLIS de Bure(ビュール地域情報フォローアップ委員会)の発表—「R&Rについての意見」—

地層処分に関して情報発信・普及を行う地域委員会であるCLISの見方は、本当に可逆性と回収可能性が必要とされるのは処分場閉鎖後のことであり、処分セルと容器、モニタリング/監視と記憶保存についての技術的な解決策のための検討を行わなければならないと考えている。また、パッケージの回収可能性ということとパッケージ中の廃棄物の回収可能性ということとを分けて考えることも適切であると考えている。可逆性の条件に関連する法律の制定に向けた公開討論会と議会で議論の期間において、CLISはR&Rの概念を明確にし、本当の可逆性を提案したいと考えている。

(2) 英国西カンブリア放射性廃棄物安全管理 (MRWS) パートナーシップの発表—「英国の“放射性廃棄物の安全管理”プログラムにおける R&R」—

英国では、サイト選定プロセスは地元の自発的な関心表明で開始され、建設まで6段階で進める方針である。現在カンブリア州、コーブランド市、アラデル市が関心表明を行い、助言組織として西カンブリア MRWS パートナーシップを発足させている<sup>a</sup>。

西カンブリアが関心表明を行った理由は、地域住民は原子力産業に大変なじみがある、地層処分対象廃棄物の約70%がこの地域に存在している、どのような処置がとられようと地域社会は影響を受けるということである。

パートナーシップの役割は、基準を設ける、基準に対して情報を評価する、3つの議会に勧告を行う、関心のある幅広いコミュニティを巻き込むことである。

パートナーシップの作業は、6つの分野(安全・セキュリティ・環境、地質学、地域社会の便益、処分場概念、ステークホルダーの満足の確保、公衆の意見集約)に関する作業を行い勧告に反映することである。

R&Rについては、放射性廃棄物管理に関する独立した諮問組織の CoRWM (放射性廃棄物管理委員会) と、管理方針を決定しサイト選定プロセスを実施している政府 Defra (環境・食糧・農村地域省) は可能な限り早い閉鎖を支持している。しかし、3つの自治体は有意な期間のモニタリングと回収可能性を取り入れた段階的地層処分を支持している。MRWS 白書は回収可能性オプションを将来の地域社会と規制機関との議論のために保持している。R&Rについてはまだ詳細に議論する必要はないが、次の段階に進むかどうかの議論においては主要な問題になるものと理解されている。

(3) ドイツ Atomausschuss Lüchow

Dannenberg<sup>b</sup>の発表—「ドイツにおける放射性廃棄物の最終貯蔵<sup>c</sup>に関して進行中の論争」—

ドイツのアッセ試験処分場では処分した廃棄物の回収が決定されている<sup>d</sup>。この経験から、ドイツでは永久に回収可能な貯蔵を要求する声が大きくなっている。しか

<sup>a</sup> 2013年1月に第4段階に進むかどうかの各議会の投票が行われた結果、カンブリア州議会の否決によりサイト選定プロセスからの撤退が決まった。

<sup>b</sup> 高レベル廃棄物の地層処分候補地であったゴアレーベン (2013年7月にサイト選定法案が成立・発効したことから新たにサイト選定を行うことになった) が所在する Lüchow Dannenberg 郡議会下の委員会で、正式名称は「Ausschuss Atomanlagen und öffentliche Sicherheit (原子力施設 および公衆安全委員会)」。

<sup>c</sup> 処分のことを意味していると思われるが、原文のとおり貯蔵とした。

しながら、ステークホルダーによって回収可能性を要求する背景にある意図が大きく異なっている。ゴアレーベンが所在するニーダーザクセン州では、操業期間中、すなわち数十年は鉱山を開けておき回収可能性を維持すると述べている。少数派の他の人々は、将来世代が廃棄物を無害化する魔法の技術を開発するまで回収可能な貯蔵技術ということを考えている。アッセ試験処分場の最終貯蔵における経験の後、反対派と非政府組織もまた長期もしくは永久の回収可能性あるいは少なくとも修復可能性を主張している。ドイツにおける処分場の失敗経験は杜撰さや警告の無視によるだけでなく、概念とサイト選定の決定における考察が不十分であったことが原因であった。大部分の人々にとって回収可能性と修復可能性は放射性物質の再利用オプションではなく、予期しない事故が起きた場合の安全活動だと思われている。彼らは概念の選択、サイト選定および責任主体に対する信頼が欠けていると表明している。地圏は永続性があるように思われるが、例外ではない。その挙動を理解しはじめてからそれほど長期間が経っていない。

これらの背景から、最終貯蔵の必要な要件は、長期間後であっても予期しない事故が起きた場合は放射性物質を回収可能にするということである。

(4) スウェーデン MKG (核廃棄物のレビューのための NGO 組織) の発表—「使用済燃料最終処分場における閉鎖後の回収可能性の長所と短所に関する環境的な見解」—

使用済燃料の処分における長期の環境と保障措置の懸念には、数十万年にわたる放射線リスク、十万年以上の核拡散リスク、将来すべてにわたる化学リスクがある。

閉鎖後の回収可能性の倫理について、スウェーデンでは長期安全性が常に第1の原則であるが、原子力廃棄物評議会 (元 KASAM (放射性廃棄物国会評議会)) は1980年代後半に、次に示す核廃棄物処分場の“倫理的原則”と呼ばれるものも発表している。

・最終処分場は管理と修復手段(すなわち回収可能性)を不可能としないように設計されるべきである。

背景にある哲学は将来世代の負担を最小限にすることであり、持続可能性原則にもとづいている。これはスウェーデンの環境法典に取り込まれている。この原則は KBS-3 概念 (スウェーデンで実施された使用済燃料の最

<sup>d</sup> アッセ試験処分場では、1960～70年代に岩塩鉱山跡を利用して低・中レベル放射性廃棄物の試験的な処分が実施された。その後、地下水の浸入により岩塩中の処分坑道の安定性が確保できなくなる可能性が示されたことから、2009年に閉鎖する方針となった。閉鎖方法について、放射性廃棄物の回収、同鉱山のより深い地層への処分、特殊なコンクリートによる埋め戻しという3つのオプションが検討された結果、閉鎖手続の実施主体である BfS (連邦放射線防護庁) は2010年1月に放射性廃棄物の回収を選択した。

終処分に関する研究報告書(1983)で提示された地層処分概念)を前提に策定された。

理想的な環境では、回収可能性はすべての意思決定プロセスで考えを変更できること、他のより安全で技術的に進んだ処分方法を実行できること、使用済燃料が原子力エネルギーの製造にさえも利用できること、処分場が損傷した場合に修復できることを意味する。この理想的なシナリオのもとでは、回収可能性は最も魅力的で肯定的な考えである。

一方、われわれの通常の複雑な世界では、懸念されるセキュリティを考慮しなければならない。燃料と燃料中のプルトニウムは重大なセキュリティリスクを提起し、この懸念においては回収可能性が問題となる。

モニタリングとサーベイランスは十万年も必要ではないかもしれないが、そのような管理の必要性は将来世代に対して明らかに負担を課すことになるだろう。もしプルトニウムが取り除かれた再処理の高レベル廃棄物だけが問題であるとすれば楽観的な状況になるだろうか。残念ながらノーである。長期プルトニウムエネルギー経済性が確立し、第4世代高速増殖炉が運転開始する場合にのみ、この肯定的なシナリオが可能になるだろう。このようなことになるかどうかは非常に不確実であり、“プルトニウムエネルギー経済”は環境とセキュリティのリスクを含んでいる。

もし回収可能性が純粋に“良いもの”ではないとすれば、われわれの結論は何だろうか。世界のエネルギーの将来がどのようなものになるかという観念を持つことがより重要なものとなる。環境保護運動では原子力が長期的に使える可能性があるだろうということに十分気が付いているものの、環境的に維持可能な将来エネルギーの基準に適合しないと主張されている。したがって優先すべき(よりもっともらしい)シナリオはこの後半の半世紀に向けた原子力後の世界であり、原子力エネルギーも核兵器も過去のものとなっているシナリオである。

将来世代に向けたわれわれの第1の責任は基礎がしっかりした結論を出すことであり、可能な限り早く処分場を掘り始めることではない。そのような決定を永久に遅らせることはできないことは理解しているが、われわれは少なくとも世界のエネルギーの将来に関してより良い理解を得るように努力すべきである。それまではより高い長期安全性とセキュリティを提供する可能性のある代替方法を開発すべきである。ただし、閉鎖前の回収可能性は関心として残っている。

#### (5) スイスチューリッヒ州公共事業部の発表—

「中間的な”ステークホルダーのR&Rの考え”—

スイスにおける州は国家と地域レベルの間にある公的なプレーヤであり、その州にある潜在的な処分場候補地域を支援し保護するとともに、国家核廃棄物プログラ

ムにもとづいて実施中のサイト選定手続きをフォローし進めている<sup>e</sup>。

R&Rを維持することには主に2つの動機がある。

- ・潜在的に価値のある物質に接近可能とすること。
- ・安全性を評価すること。

回収可能性自体は第1に優先されるものではない。放射性廃棄物処分場の第1の目標は、長期受動的安全性である。

しかしながら現在、最終処分の静的な概念から積極的な管理に移行している。この方法論の変化によって、積極的な管理を法律のさまざまな要件やメカニズムの中に組み入れた複合的な概念になっている。2005年に施行された原子力法にはEKRA(放射性廃棄物の処分概念に関する専門家グループ;EKRA概念はシリーズ第3回参照)から勧告された“監視付き長期地層処分”が適用されている。これは通常の処分概念に有効な管理、モニタリングおよび回収可能性を含めたものである。通常、処分はオプションとして“閉鎖後の”地表の環境モニタリングを行えるように設計されてきた。この方法論の変化あるいは修正の動機は、将来世代による持続可能な開発、すなわち防護と管理の両方の観点から踏まえたものであった。長期安全性の主目標に照らしてチェックするために、管理可能性は回収可能性よりも先に、処分概念に組み込まれていることが確認され要求されるべきである。この意味で、回収可能性と回収は2番目の管理であろう。

要約して言えば、R&Rは州がその候補地域の地域住民の被信託人としての役割に応じるための手段である。技術的、政策的なレビューを統合することにより、より品質の良い決定や成果に導く。それは社会・技術的、望むらくは政治システムの信用を向上させるかもしれない。

#### (6) グループ討議のまとめ

発表後、参加者は6つのグループに分かれて、地域のステークホルダーから提示されたR&Rへの期待の議論、R&Rへの期待における各国の特殊性から学んだこと、放射性廃棄物の段階的意思決定プロセス、長期の評価・モニタリング・費用引当・記録保存への地域参加の改善のための機会と限界、国内・国際的なレベルでの放射性廃棄物に関する政策課題の設定における地域ステークホルダーの位置付け、という設問に関して討論を行った。グループからあげられた主な意見を以下に示す。

- ・R&Rに関する期待は当然、国によって異なる。
- ・回収可能性の必要性を判断するための基礎となる判断材料がない。

<sup>e</sup>本発表の背景には、2005年に施工される以前の原子力法にもとづく制度では一部の許可発給権限が州にも付与されていたが、新たな原子力法にもとづく制度ではこの権限は連邦政府に一元化されたことがある。



- ・さまざまなステークホルダーの参加は、プロジェクトの初期の段階からなされるべきである。
- ・初期の段階に、ステークホルダーの参加のためのルールを作るべきである。これらはさまざまな状態での意思決定に関して透明性を向上させる。
- ・国と政治レベルでの明確な位置付けが重要である。
- ・技術的な観点での意思決定において、ステークホルダーの参加には限界がある。しかしながら、WIPP<sup>f</sup>でのドラム缶の回収(第3回参照)は、安全性の観点ではないという意味で、地方の意志の反映の結果である。
- ・ステークホルダーの参加は長期モニタリングを実施するための鍵となる。

## 2. 「将来世代に対する最適な選択と義務」

### (1) フランスエコール・ポリテクニクの発表—「可逆性：エンジニアの見解」—

フランス憲法第28条(1793年)では“ある世代はその法律を将来世代に強いるべきではない”としている。

フランスの2006年の法律では地層処分場は可逆的でないものではないものであり、正確な内容は2015年に議会で議論される新しい法律によって定義されることが義務付けられた。可逆性はエンジニアによって提唱された懸念ではなく、社会的要求によって創造されたものであり、議会によって支援され公式化された。1991年以来、この義務の意味することが徐々に明確になってきた。初期のころは、可逆性は処分場に定置した廃棄物がある一定期間取り出すための技術的、財政的な能力を意味していた。次第に Andra が提示した定義(第3回参照)が受け入れられた。

可逆性の利点：

いくつかの技術的安全性に関する懸念は廃棄物を定置した後でのみ認識される、廃棄物が資源として認められ取り出し可能性(recoverability)が望ましくなる、規制が変更される、代替処理技術やより良い処分技術が開発される、あるいは施設の構成要素を修正する、といった可能性に対して可逆性があれば対応できる。

科学者とエンジニアにとっては、可逆性は他の利点を持っていることも分かっている。処分場の可逆性は、情報を入手するためにはコストと時間(数十年の操業)がかかるが、知識の状況、得られた経験、欠けているデータの段階的な評価を可能にすることによって、行うべき決定のアジェンダを設定するためのしっかりとした根拠を提供するものとなる。

可逆性の欠点：

- ・可逆的な処分場は頑健性に劣る可能性がある。
- 処分場を建設するエンジニアは、地下水の動きが遅く

なるような設計を選択する。しかしそのような設計はキャニスターへの接近をより困難にすることから、回収可能性を困難にする。地質学的なシールは自然プロセスの数百万年以上にわたる作用によってゆっくりと形成されてきた。その連続性への影響を少なくするために、立坑、アクセス坑道、地下坑道の掘削においてすき間を小さくするなどの工夫が行われることによって、回収可能性がさらに難しくなる。

- ・より古くなった(開けたままの)処分場は安全性が低下する。

処分場が非常に長期間可逆であるということは長期安全性を損なう可能性がある。掘削、換気あるいは熱発生によって岩体にもたらされる擾乱は、可能な限り小さくし短い期間でなければならない。

- ・(閉鎖を)延期することによって問題が生じる。

不完全なままの可逆的な処分場は、困難な決定を次世代に移譲し易くすることから、2006年法律で排除されたオプションである不適切な地下中間貯蔵施設になるために、技術的、財政的な負担を伴うことになる重大なリスクがある。最大限の選択の自由が将来世代に残されなければならない。次世代は熟考の末に、われわれが望まないオプションだとしても、無限の貯蔵が1番のオプションだと決定するかもしれない。しかしながら、われわれの義務は、いつか将来世代がその時が来たかと判断した時に、可逆的な処分場を閉鎖できるように設計することである。

- ・目標のランク付け。

処分場は、いつの日か可逆であることを終了することができるような方法で設計されなければならない。操業期間中の作業員と公衆の安全性は、少なくとも他の原子力施設に要求される基準と同等のレベルでなければならない。この条件に適合すれば、可逆的な処分場は少なくとも不可逆な処分場と同等に安全なはずである。

### (2) スウェーデンウプサラ大学の発表—「将来世代に対するオプションの選択と義務—スウェーデンの見解」—

スウェーデンの現在の規制では処分した高レベル廃棄物の回収可能性は必須の要件ではない。核物質及び原子力廃棄物の処分の安全性に関するSKI(原子力発電検査機関)の規則(SKIFS2002:1)は以下のようである。

第8条 処分された核物質または原子力廃棄物の監視または処分場からのそれらの回収を容易にするための措置、または処分場への侵入を困難にするための措置については、それらの措置が安全性に与える影響を解析し、SKIに報告しなければならない。

実施主体のSKB社(スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社)は回収可能性が要求されないとしても、処分場の閉鎖前だけでなく閉鎖後も回収の可能性があることを強

<sup>f</sup> WIPP：廃棄物隔離パイロットプラント、米国の国防活動から発生するTRU廃棄物の地層処分場。

調している。

原子力廃棄物評議会はIAEA(国際原子力機関)と合同で国際セミナーを開催し、そこで回収可能性を必要とする理由として、「処分場が予想通りに性能を発揮していない場合には、修復活動を行うことができなければならない」、「新しい技術や経済性条件が一部の廃棄物、特に使用済燃料を有益な資源とする可能性がある」および「放射性廃棄物の危険性を少なくするか無害にする新しい技術が開発される可能性がある」を挙げている。

回収可能性の欠点として、「将来回収が可能となるように処分場を適合させるための追加コスト、あるいは回収そのもののコスト」と「長期安全性への影響」を指摘している。原子力廃棄物評議会としては、もし回収と長期安全性の間に矛盾があるとするならば安全性を選択すべきであるという見解である。

原子力廃棄物評議会は、2010年の研究展望報告書の中で回収の技術的可能性、法的な条件および倫理的な質問を考察しており、以下の見解を示した。

- ・閉鎖前段階のR&Rを準備することは処分場の長期安全性を強化する可能性がある。
- ・核変換と第4世代原子炉の可能性によって閉鎖前の回収がより重要になる。
- ・長期の安全性と保障措置は将来世代の自治の原則よりも優先されなければならない。最後の高レベル廃棄物キャニスターが処分された後は、不必要に遅延することなく閉鎖される必要がある。

### (3) フランス Association “Décider Ensemble<sup>5)</sup>”の発表—「将来世代に対するオプションの選択と義務」—

地下研究所のあるMeuse県で選ばれた役人として、わたしはどれだけの市民が彼らの質問に対する回答を必要としているかを知っている。住民の要求に答え、科学的な内容を理解できるようにするためには相当の努力が必要である。オーフス条約<sup>h)</sup>が注意しているように、本当の市民参加が要求されている。

R&R概念は科学と倫理の懸念の交差点にある。言いかえれば、技術は(安全第1だけでなく可能であればコストに関して)われわれ自身が設定する倫理的な指針に対して答えるものでなければならない。可逆性概念は、将来世代が望むのであれば、われわれの決定を後戻りさせる可能性を残す責任があることを暗示している。

フランスは2006年の法律で可逆性を選択した。ただし、現状では正確な定義がなく、2013年の公開討論会

<sup>5)</sup> Décider Ensemble は、フランスにおいて対話および共同して物事を決定する文化を根付かせること(参加型民主主義)を目的とした非営利組織である。

<sup>h)</sup> 「環境に関する、情報へのアクセス、意思決定における市民参加、司法へのアクセスに関する条約」。

の後に2016年の新しい法律で可逆性の定義が設定されることになっている。もし市民がこの問題を理解するすべての鍵を持っているとすれば、市民と一致する可逆性の概念をどうやって定義するのか。さらに、R&Rを可能にしておくためにどんな手段を置くべきなのか、われわれ自身に問わなければならない。

### (4) ベルギーアントワープ大学の発表—「回収可能性に関するコメント」—

可逆性は廃棄物処分サイトの計画、建設、操業段階に必要な要素であると理解している。責任のあるプロセスはプロセスのある段階を可逆にする可能性を有している。もう一つの問題は回収可能性である。現在廃棄物と考えられているものが将来回収されることが起こるだろう。したがって、それを処分場の計画段階に考慮すべきである。4つの歴史的教訓が、将来世代の回収についての決定をわれわれがコントロールできないということを教えている。その一つはエジプトのファラオの墓の盗掘である。過去のエジプトのファラオの墓は、接近を防ぐための自然と工学的なバリアと処罰体系があったけれども、墓泥棒の悪事を防ぐことはできなかった。さらに合法的な探検家、ついには考古学者が出現した。今から約500年後には、同じようにもととの計画や命令を無効にするような活動があり得るだろう。他の教訓は、文化財は千年存続可能なこと、文化のソフト面はハード面よりも長く存続すること、千年は人間の歴史的想像力と記憶構築の範囲内であると紹介した。

これらの歴史的教訓から、われわれは地層処分場の安全計画作りにおいて、遠い将来の処分場サイトにおいて何が起こるかについて全く管理できないことを前提としなければならない。しかし、このことによって以下の原則の適用から免れることはできない。

- ・将来世代に対して過度の負担を課さないこと。
- ・すべての不測の事態においてもサイトの安全性を保証しなければならない。

もし仮に積極的な維持をしないでもよいような処分場サイトを建設したとしても、最初の最も重要な期間においては確実にサイトの健全性が保持されることを保証しなければならない。

この候補としては、付加価値アプローチがあり、出来るだけ多くの方法でサイトに関連し地域社会に役に立つことを、数奇を凝らして、象徴的なレベルで、経済的あるいは文化的に行うことである。この方法ではサイトは地域社会の財産となり、大事にされ好まれるものとなる。そのようなサイトは健全性がより保証されるものとなる。

現在処分場の設計に関与しているエンジニアは、人間の挙動を理解し、シナリオを開発し、安全性への回答を行わなければならないだろう。回収のために計画を立て

ることは回収計画を立てることよりもずっと幅広い範囲を含んでいる<sup>i</sup>。

### 3. NGO 組織などからの発表のまとめ

本稿では、「地元のステークホルダーと NGO 組織からの期待」から 5 件、「将来世代に対する最適な選択と義務」から 4 件の発表の紹介を行った。内容を区分すると、サイト選定段階における地域社会の参加と R&R の見解（フランス CLIS、英国パートナーシップ）、R&R の長所と短所に関する環境とエンジニアの異なる立場からの論点（スウェーデン政府諮問組織・NGO 組織、フランス大学）、サイト選定に決定権のない中間的立場の関わり方（スイスチューリッヒ州）、R&R の実経験と今後の対応（ドイツの地元郡委員会）、国の R&R 方針の決め方に対する意見（フランス非営利組織）、将来世代が回収することを前提にして現世代が対処方法を検討することの重要性（ベルギー大学）という幅広いものであった。第 3 回で紹介した発表と合わせて、これらの発表やその背景にある活動を知ること、わたしたちは多くのことを学ぶことができるだろう。

## Ⅲ. おわりにと今後への期待

地層処分事業の実施段階における R&R が各国で取り上げられ、議論が行われるなど関心が高まっていることから、国際的な動向について解説した。

地層処分場の開発において R&R が果たす役割は多くの国で認識されており、それらは主に地元住民などとの対話や政治的判断の結果出てきた要求にもとづいていた。しかし、R&R の取り入れの程度は国によって異なっている。これは、その国の政治的、社会的情勢や国民性などによって、R&R への要求の程度が異なっていることが背景にある。例えば、フィンランド、フランスの 2 カ国が 2025 年までに、スウェーデンは 2029 年に操業を開始する計画である。これらの国での R&R への対応を見ると、スウェーデンとフィンランドでは特段の設計の対応（例えば回収を容易にする設計的配慮）を行っていない。またフィンランドでは回収可能性は公衆とのコミュニケーションにおいて重要な役割を果たさなかったとも述べている<sup>4)</sup>。一方、フランスでは第 2 回で触れたように、法律の要求を満たすために処分場の設計において回収可能性を維持する工夫が随所にみられる。このように R&R の取り入れの程度は国によって違いがある。興味深いことは、このような対応の違いとその国での社

会的受容性に直接的な関連が見られないことである。

このような違いがあったとしても、R&R は地層処分事業が社会に受け入れられる方策の一つとして重要なものである。わが国では原子力安全委員会の「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方（第 1 次報告）」（2000 年）において“回収の可能性”が取り入れられた。これは、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」の国会審議において出された要望を受けたものであった。現在、総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 放射性廃棄物ワーキンググループにおいて、サイト選定プロセスを促進するためのさまざまな方策が検討されている。今後 R&R についても議論されることが予想されるが、各国の状況を参考とする場合には、その背景についても十分理解し、さらにわが国に適した方策とするにはどうしたらよいかという議論を欠かすことはできないだろう。また、そのような議論においては、国民との対話の機会などをつくり、そこで処分の進め方のオプションの一つとして R&R を提示し、国民との対話において決めていくという進め方をすることが大切であろう。そのような方法をとることによって、社会が方策の決定への参加意識を共有することができるならば、サイト選定の実施を受け入れてもらうきっかけとなるかもしれない。ここで注意すべきは、R&R プロジェクトで言及されているように、R&R を不十分な安全性を補完するものと考えてはいけないことである。R&R は処分事業の段階的意思決定に社会が参加しやすくする方策の一つと考えるべきである。R&R を含む新たな進め方が審議され、社会との合意形成が図られ、地層処分事業の新たな一歩が進むようになることを期待したい。

最後に、R&R 国際会議に関する内容のまとめ等の議論に川久保政洋氏が参加したことを注記する。

#### — 参考資料 —

- 1) OECD/NEA, Reversibility and Retrieval (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel, (2011).
- 2) EC, Concerted Action on the Retrieval of Long-lived Radioactive Waste in Deep Underground Repositories, EUR19145 EN, (2000).
- 3) OECD/NEA, Proceedings of the “R&R” International Conference and Dialogue, (2012).
- 4) OECD/NEA, Summarised Reasons to Retrieval and Reversibility (R&R) Questionnaire Issued to NEA Member Countries in May 2008 (2010).

#### 著者紹介

田辺博三（たなべ・ひろみ）

本誌, 55 [9], p.29 (2013) 参照.

<sup>i</sup> IAEA, 放射性廃棄物の処分, 個別安全要件, No.SSR-5(2011) では、「処分施設または、その廃棄物を故意に擾乱する活動に参加する権限のあるいかなる個人に関わる線量およびリスクも、この状況において、その様な活動は、計画被ばく状況を構成するものであるため、考慮する必要はない。」として意図的な侵入に対して影響の低減を求めている。



# 世界の原子力事情

## 第4回 欧州と国際機関

日本原子力研究開発機構 日置 一雅, 桜井 聡

一言で「欧州」と言っても、2013年10月現在、EU加盟国だけでも28か国あり、国によってエネルギー政策も異なれば、稼働中の原子力発電所を有する14か国の中でさえも、核燃料サイクル政策や放射性廃棄物の最終処分計画の進展はまちまちである。原子力利用に関して、各国の対応が多様であることには、欧州各国が送電網で連結されており、電力の輸出入が可能であるという背景がある。本稿では、国際原子力機関(IAEA)と、欧州内のいくつかの国における、東京電力福島第一原子力発電所事故後の原子力開発の動向について概説する。

### I. 国際機関の動向

#### 1. IAEAの動向

##### (1) 原子力安全行動計画(Action Plan on Nuclear Safety)

2011年6月、IAEAは福島第一原子力発電所事故の発生を受けて、ウィーンで閣僚級会議を開催した。この会議で、原子力安全行動計画を策定することが決まり、IAEAが作成した行動計画案は、同年9月の理事会および総会で加盟国によって承認されたのち即座に実行に移された。本行動計画<sup>1)</sup>は下記の12項目から成る。

1. 原子力発電所の安全評価
2. IAEAによるレビュー
3. 緊急事態への準備と対応
4. 規制機関
5. 事業者(運転者)
6. IAEA安全基準
7. 国際的な法的枠組み
8. 原子力新規導入予定国
9. キャパシティ・ビルディング(組織的な能力の構築)
10. 放射線からの人および環境の防護
11. コミュニケーションおよび情報発信
12. 研究開発

この計画に基づく活動から得られた知見は、IAEAが

*Current Trends in Nuclear Energy (4) : European Countries and International Organizations* : Kazumasa HIOKI, Satoshi SAKURAI

(2013年10月18日 受理)

■前回タイトル

第3回 米国・カナダの原子力開発の動向

現在作成中の福島第一原子力発電所事故報告書に反映されることになっている。

##### (2) 福島第一原子力発電所事故報告書

2012年9月に開催されたIAEA第56回総会で、天野事務局長は「福島第一原子力発電所事故の包括的な報告書を2014年末までに完成させる」と宣言した。IAEAでは、原子力安全・セキュリティ局のFlory事務局長をヘッドとしたコアグループを結成し、約40加盟国の規制機関・電力・メーカー等および関連する国際機関から約130名の専門家の支援を受けて、報告書の作成を開始した。報告書は、1. 事故発生の経緯、2. 安全評価(事故発生原因と教訓等を含む)、3. 緊急時計画と対応、4. 放射線影響、5. 事故後の復旧(オンサイトおよびオフサイト)の5つの章から構成され、事実関係を客観的に評価し、事故で得られた教訓を整理し、今後の世界の原子力安全の向上に貢献することを目的としている。この報告書の取りまとめにあたって、IAEAに助言を与えるため、国際技術アドバイザリーグループ(ITAG)が設立された。ITAGは国際原子力安全グループ(INSAG)、国際放射線防護委員会(ICRP)、国際連合食糧農業機関(FAO)、国際労働機関(ILO)、経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)、原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)、世界原子力発電事業者協会(WANO)、世界気象機関(WMO)などの国際機関の上級専門家からなり、ITAGの議長はINSAGの議長であるMeserve氏が務めている。2014年6月には報告書のドラフトを作成し、2014年12月に完成することを目指している。

以上のように、IAEAは原子力安全の向上に取り組んでおり、原子力安全がIAEAの重要任務であることに間違いはないが、一方、原子力安全だけがIAEAの仕

事ではない。IAEAには、保障措置局、原子力科学・応用局、原子力エネルギー局、原子力安全・セキュリティ局、技術協力局、管理経営局の6つの局があり、いずれも重要な任務を担っている。2014年のIAEAの通常予算の総額は3億4千万ユーロ強であり、その内訳は、原子力検証(Nuclear Verification)が全体の約4割を占め、原子力発電(Nuclear Power)、原子力技術の応用(Nuclear Technics)、原子力安全とセキュリティ(Nuclear Safety and Security)は各10%程度である。また、IAEAの仕事が原子力安全だけではないことは、IAEAが過去1年間に開催した閣僚級会議のテーマからも明らかである。

- ・「原子力安全」福島、2012年12月
- ・「21世紀の原子力」サンクトペテルブルグ、2013年6月
- ・「核セキュリティ」ウィーン、2013年7月

### (3) IAEA第57回総会におけるIAEA事務局長の演説

2013年9月に開催されたIAEA第57回総会において、天野事務局長が行った演説<sup>2)</sup>の中から、何点かを紹介する。

- ・今年はいゼンハワーが、かのAtoms for Peaceの演説を行ってから60年となる。
- ・原子力はエネルギーセキュリティと持続可能な発展を達成する上で重要な役割を果たす。
- ・今後20年間は、原子力利用は特にアジア地域において成長し続ける。
- ・今後数年以内に、新たに原子力発電所を導入する予定の国がいくつかあり、これらの国々を支援することが重要である。
- ・より一層高い安全性を有した小型炉が役立つ。
- ・原子力技術は発電だけでなく、環境や水の管理、癌治療、ツエツエバエの根絶などに利用される。
- ・イラン新政府との建設的な議論を通じて、問題を解決するために最大の努力をする。

## 2. EUの動向

EUおよびスイス+ウクライナの原子力発電所の安全性を再評価するため、ストレステストを実施した。その結果、EU域内145基(稼働中134基)のうち直ちに炉を停止しなければならないような問題は発見されなかったが、以下の安全性改善の余地が指摘された。

- ・地震と洪水のリスク：地震に対して54基、洪水に対して62基でリスク評価が不十分。リスク計算は1万年の時間幅で行うべき
- ・地震計測器：121基で地震計測器の設置または改善が必要
- ・フィルター付ベント設備(FCVS)：32基で未整備

- ・重大事故時の対応設備：81基で設備が不十分
- ・緊急時バックアップ制御室：24基で未整備

ストレステストの結果に対応して、安全性向上のために加盟国が作成した「国家行動計画」のピア・レビュー会合が2013年4月に開催され、サマリー・レポートが欧州原子力安全規制機関グループ(ENSREG)のWEB siteで公開されている<sup>3)</sup>。2014年には、各国における安全性向上作業の進捗状況を欧州委員会(EC)がレビューする予定である。また、規制体制の見直し、オフサイト緊急時対応の見直し、原子力発電所の寿命延長と老朽発電所の建て替え、原子力安全国際協力、廃棄物管理、国際基本安全基準(BSS)、原子力損害賠償、原子力安全のための研究と訓練、IAEAとの協力、などが重要項目であると認識して取り組んでいる。

## II. 欧州各国の動向

### 1. 原子力発電から撤退しようとしている国

#### (1) ドイツ

2011年に発生した福島第一原子力発電所事故の後、ドイツは2022年までに原子力発電からフェイズアウトすることを決定した(エネルギー転換政策)。なお、医療等への原子力技術の利用は2022年以降も継続する予定である。

2013年9月末時点で、ドイツ国内では、9基(12,696 MW)の原子力発電所が運転中であり、2013年上半年期には48 TWh発電した。まだあと約8年運転する予定であるが、今後は原子力発電所の廃止措置と放射性廃棄物処分の技術開発に重点を移行していく予定である。放射性廃棄物処分場は、一旦はゴアレーベンに決まったが、ドイツ内閣は再度選定しなすことを決定した。連邦政府および州政府の24名からなる調査委員会が2015年末までに勧告を出す予定である。

風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーは、政府からの補助により急激に増加している。それに比して送電網の整備が遅れている。電力の輸出入が行われるヨーロッパでは、株式市場のように、電力の価格が時々刻々変動する。需要の少ない時間帯には、電力取引価格がゼロに近づくときもあり、採算の悪い火力発電所は次々に閉鎖されつつある。他方、再生可能エネルギーへの補助金のために電力税は上がり続け、一般家庭の支払う電力料金は高騰している。1 kWhあたり28セントにもなり、エネルギー転換政策の見直しを求める声も出ている。ドイツ企業は、ポーランドなどの人件費の安い国に拠点を移す動きもある。中国産の格安の太陽光発電パネルのEUへの輸入については、最低価格と年間輸出総量の上限を定めることでEUと中国が本年8月に合意した。

## 2. 今後も原子力発電を利用しようとしている国

### (1) フランス

2012年5月に行われた大統領選挙では、オランド氏が現職のサルコジ氏を僅差(51.64%-48.36%)で破って大統領に就任した。また、6月に行われた国民議会選挙では、与党で原子力に批判的な左派(社会党と緑の党)が341議席を占め、右派の227議席を大きく上回った。オランド氏の原子力政策をまとめると以下となる。

- ・原子力発電の比率(75%)を2025年までに50%に縮減。このため、「エネルギー移行に関する全国討論」を実施して複数のシナリオを討論し、2013年9月提出を目指して「エネルギー移行計画法案」を作成
- ・2016年末までにフェッセンハイムの2基の原子炉を閉鎖
- ・2017年までに新設する原子炉はフランマンヴィルの欧州加圧水型炉(EPR)のみ(国内2基目のEPRと予定されるパンリー3号機の開発見送りが確定的)
- ・使用済燃料の再処理と混合酸化物(MOX)燃料の利用を継続
- ・地層処分場の設置に向けた取組みを進め、公開討論を2013年に実施
- ・福島第一原子力発電所事故後に開始された原子力安全に係る取組みを踏まえ、その過程で示された提言をすべて実施
- ・最高レベルの安全性に基づく原子力輸出の推進

2012年11月に開始された「エネルギー移行に関する全国討論」(全国討論委員会開催)は、最後の全体会議が7月18日に行われ、総括文書の策定が一応は成功した。当初、15項目の勧告を盛り込んだ報告書を策定するはずであったが、経営者団体と農業団体が報告書の内容に問題があるとして、これを承認しない立場を表明したため、「勧告」という言葉を使わず、「総括」という言葉の下で意見をまとめた文書と位置づけることに後退した。

具体的な提案としては、二酸化炭素の排出量を毎年3%削減すること、原子力の占める割合を2025年までに50%に削減することについて政府がその進捗を連続的に確認すること、エネルギー効率化のための研究開発を行い2030年までにエネルギー消費を20%削減すること、経済的な評価を実施した上で2030年までにバイオマスによるエネルギー生産量を石油換算で2千万トン相当にすること、政府がエネルギー削減の計画を明確に示すことにより企業や投資家からの適切な投資を促すこと、エネルギー移行実施の枠組として、エネルギー移行理事会(現在の国家エネルギー協議会に替わるもの)を創設してエネルギー移行に対する意見具申およびエネルギー移行状況の定期的レビューを行うことなどが挙げられる。総括文書は9月に開かれる環境会議の機会にフランス政府に正式に提出され、政府はこれを踏まえて大綱法案を策定し、2014年初旬に国会審議を開始する予定

である。

2016年末までに閉鎖することを公約としたフェッセンハイムの2基の原子炉について原子力安全機関(ASN)は、必要な安全対策の実施を条件に今後10年間の運転継続を、1号機は2011年7月に、2号機は2013年4月にそれぞれ認めている。求められた安全対策は、コンクリート基礎の厚みと面積を増して炉心溶融事故発生の場合のコリウム(炉心溶融物)に対する耐性を強化することおよび緊急時の冷却システムの整備(補給水源のための地下水汲み上げ装置)であり、1号機はこれらの工事を2013年6月までに終了し、2号機では現在工事が進められている。これらの工事はたとえ2016年末に両発電所が閉鎖されるとしても、それまで運転を継続するためには必要な措置である。フランス電力(EDF)は両発電所の運転継続を望んでおり、エネルギー移行に係る報告書の中で閉鎖される原子力発電所として特定されることがなかったこともあり、今後、フェッセンハイム原子力発電所の閉鎖については紆余曲折が予想される。

2016年の運転開始を目指して建設が進められているフランマンヴィルのEPRでは、建設コスト予測が2011年7月発表の60億ユーロから85億ユーロへ引き上げられた。その上方修正の理由としてEDFは、蒸気供給システムの設計変更、福島第一原子力発電所事故を踏まえた安全基準の厳格化などを挙げた。また、溶接ミスが見つかったことが原因で工事が中断されたなどのトラブルもコスト増加の一因となった。

地層処分場の設置に向けた取組みでは、環境・持続可能開発・エネルギー省とASNが放射性廃棄物管理計画2013-2015を発表し、高レベル放射性廃棄物および長寿命の中レベル放射性廃棄物管理の研究開発および2013年から2015年にかけて次の段階に入る地層処分プロジェクト(Cigéo)を推進する方針が示された。放射性廃棄物の地層処分場の建設については2006年6月28日の法律により、ビュール市(ムーズ県とオートマルヌ県の境界にある)の研究施設とは分離された形で、地層処分場を建設する方針が固まっている。

計画では、施設は2019年の着工、2025年の完成を予定しており、2006年の法律は、開所から100年間を、技術および費用面で合理的な条件下において、廃棄物を回収することが可能な「可逆的期間」とすることを義務付けている。また、公開討論会の実施も定められており、第1回会合が5月23日にビュール市で、第2回会合が6月17日にバー・ル・デュック市でそれぞれ招集された。しかし、反対派の妨害行為により、開会からわずか30分足らずで中止となった。このため、当初10数回の開催を予定していた公開討論会は、インターネット上で実施されることとなった。

以上のように、オランド大統領の公約実現に向けての道のりは、フランス経済は困難な状況にあるため同大統領



領の支持率が急低下していることもあいまって、平坦なものではないと予想されている。最近の世論調査(対象者1,054名)によると、「段階的な脱原子力」に賛成したのは53%で、「賛成しない」は45%だった。一方、原子力に不安と回答したのは、2011年4月では56%であったが、2011年夏には45%、2013年3月の世論調査では42%に低下している。

## (2) スウェーデン

スウェーデンでは、総発電電力量(1,529億kWh - 2011年)のうち水力(43%)と原子力(39%)が大部分を占め、再生可能エネルギー(12%)、石炭(6%)が続いている。同国の法律では、新たな水力発電の大規模開発が禁止されていることに加え、建設が可能とされる地域の住民の反対が強いため、水力にこれ以上の発電容量を期待することは実質的に不可能な状態にある。また、風力発電が利益を出すために必要な電力料金は1,000kWhあたり645クローネと見積もられており、原子力発電の295クローネよりもかなり割高となる。そのような事情により、原子力に対する期待は高い。

米国スリーマイルアイランド原子力発電所事故後の1980年に行われた国民投票の結果を受け、議会は2010年までに国内全12基の原子炉を閉鎖することと新規原子炉の建設禁止を決議したが、これまでに閉鎖されたのはパーセベック1号機と2号機(いずれもBWR)のみである。

2010年6月には、議会で新規原子炉建設禁止の撤廃がわずか2票差で可決され、国内で運転中の原子力発電所をリプレースする場合のみの条件付きではあるが、新規建設ができることになった。同年9月の総選挙で中道右派4党が連立する与党連合が勝利したことにより、この流れは少なくとも次回の総選挙(2014年)までは変わらないものとみられる。しかし事業者の対応は慎重で、過去の原子力政策の変遷、野党が新規原子炉建設禁止措置を復活させると公約していることなどを挙げ、一様に次回の総選挙が終わるまでは新規原子炉の建設を決定する予定はないと公言している。

最近のトピックスとしては、リングハルス3号機・4号機などの運転期間を最長60年に延長する計画が検討されていることが挙げられる。原子力発電所を運営するバッテンフォール社は原子炉の運転期間を50年としてきたが、2013年から2017年までに約160億クローネをかけて大規模な改良工事を行うことにより、原子炉の運転期間をさらに延ばすことが可能であるとしている。

放射性廃棄物管理の分野では、高レベル放射性廃棄物の最終処分地にフォルスマルクを選定したことが注目されている。2011年には使用済燃料処分場の建設許可申請書が規制当局であるスウェーデン放射線安全機関(SSM)に、処分方法及び立地選定に係る許可申請書が環境裁判所にそれぞれ提出され、審査が進められてい

る。早ければ2015年に建設開始、2025年頃には処分事業が始まる見通しである。

## (3) スペイン

スペインにおける原子力の割合は、2012年で20.58%を占め、前年に比べて6.4%増加した。また、発電設備容量に占める原子力の割合は7.2%であるが、設備利用率は88.82%から89.84%とわずかながら増加している。

一方でスペイン政府は、財政難を理由に売電収入に対する6%の課税と核燃料税の導入を2012年に決定した。これを受けて、スペインで稼働中では最古のガローニャ原子力発電所(1971年運転開始)は、2013年中に1億5,300万ユーロが追加課税されるのを避けるために、予定を半年早めて2012年末までに運転を最終的に停止し、2013年7月には運転免許が失効した。これによりスペインで稼働している発電用原子炉は8基となった。

同発電所は福島第一発電所第1号機と同タイプのものであるが、スペイン政府は安全の確保を条件に再稼働の可能性を検討するとしている。運転事業者であるNuclenor社も、同発電所が廃止措置の初期段階にあるとしているが、条件が許すのであれば運転許可の再申請の可能性を排除するものではないと示唆している。

このようにスペインは、経済状況による影響を受けつつも、今後も原子力発電を利用していこうとする方針に大きな変化はないとみられる。

## (4) フィンランド

フィンランドでは、今後も原子力発電の利用を継続する予定である。オープンサイクルを採用しており、使用済燃料の再処理は行わず、そのまま放射性廃棄物として処分する。2000年にオルキオトがサイトに選定され、最終処分計画が着々と進んでいることに、強い誇りと自信を示す。パブリックアクセプタンスを獲得できた最大の理由は、規制機関に対する信頼であるとし、国民とのコミュニケーションの重要性を強調する。処分費用は30億ユーロ強の予定とのことである。フィンランドの人口は約550万人であるので、負担額は国民一人あたり500ユーロを超える。

一方で、世界初号機となるフィンランドのEPR(オルキオト3号炉)建設は難航しており、当初は2009年に運転開始の予定であったが、数度にわたる工期の延長を経て現在は2016年運転開始となっている。

## (5) チェコ

チェコは原子力の平和利用を推進している。現在稼働中のドゥコヴァニの4基とテメリンの2基はいずれもロシア型加圧水型原子炉(VVER)である。テメリンにもう2基建設することを計画している。核テロ対策として、研究炉での高濃縮ウランの使用を全廃し、低濃縮ウランに切り替える9年間に及んだプロジェクトを今年完了した。

### (6) ブルガリア

2007年からEUの加盟国となったブルガリアには、かつてはコズロドゥイにVVERが6基あったが、1号機から4号機までが2006年末に閉鎖された以降は、5号機と6号機の2基(2,000 MWe)だけが運転中である。ベレネに原子力発電所を2基新設する計画は、資金問題等で難航している。ブルガリアは、2013年にIAEAの総合原子力規制評価サービス(IRRS)を受けるなどして、西欧並みの安全を保ちつつ、原子力利用を継続しようとしている。

## 3. 新たに原子力発電を導入しつつある国

### (1) トルコ

ヨーロッパとアジアにまたがる国トルコは現在、EUに加盟申請中である。トルコにはまだ原子力発電所がないが、電力需要が増加しており、2030年までに10,000 MWe必要になると見込まれている。このため、2020年までにアックユにVVER1200を4基建設することをロシアと合意した。さらにシノップにもう5,000 MWe分の原子力発電所を建設する計画である。これらが完成すれば、今後10年から15年以内にトルコの原子力発電容量は10,000 MWeになる予定である。

## 4. 今後原子力発電を導入することを検討している国

### (1) ポーランド

ポーランドには現在、原子力発電所はないが、2024～2025年に導入すべく検討を進めている。また研究炉の使用済燃料があるため、国内に地層処分施設を建設することも計画している。ポーランドでは現在、全電力需要の約90%を石炭火力で発電している。このため、二酸化炭素排出権取引価格は、大きな関心事である。

## Ⅲ. 国際協力

近年IAEA加盟国間では、包括的核燃料供給サービス(CFS)や小型中型炉(SMR)に関する議論も行われている。

CFS概念には新燃料の供給だけでなく、使用済燃料や放射性廃棄物の発生国以外における貯蔵あるいは処分も含まれる。このことは、「使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約」<sup>4)</sup>の前文(xi)に述べられている自国内処分の原則に反すると思われるがちであ

るが、実は同じ前文(xi)の後半には、他国の施設を利用することにより、むしろ安全かつ効率的な管理が可能となる場合もあり得ることが明記されている。

EU内には、原子力発電所を1基だけ有する国や、原子力発電所はなく研究炉だけを有する国もある。これらの国々には、量は多くないが、安全に最終処分しなければならない使用済燃料や高レベル放射性廃棄物がある。また、これからSMRを導入しようと考えている国の多くは、放射性廃棄物を安全に処理・処分することが困難である。現在は、他国で発生した放射性廃棄物の輸入を法律で禁止している国がほとんどであるが、米国の半分ほどの面積しかないEU内の各国に地層処分施設を建設することが最も安全かつ効率的であるかどうかは議論・検討の余地が残されている。

今年のIAEA総会で米国代表が提唱したAtoms for Peaceの時代を超えた先のAtoms for Prosperityの時代はいつやってくるのだろうか。

### — 参考資料 —

- 1) 原子力安全行動計画(Action Plan on Nuclear Safety)  
<http://www.iaea.org/newscenter/focus/actionplan/reports/actionplann130911.pdf>
- 2) 2013年9月に開催されたIAEA第57回総会における天野事務局長の演説  
<http://www.iaea.org/newscenter/statements/2013/amsp2013n18.html>
- 3) "ENSREG National Action Plans — Summary Report"  
<http://www.ensreg.eu/node/1343>
- 4) 使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約  
[http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/treaty156\\_8.html](http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/treaty156_8.html)

### 著者紹介



日置一雅 (ひおき・かずまさ)  
日本原子力研究開発機構  
ウィーン事務所長  
(専門分野/関心分野) 原子力安全, 放射性  
廃棄物管理安全



桜井 聡 (さくらい・さとし)  
日本原子力研究開発機構  
パリ事務所長  
(専門分野/関心分野) 分析化学, 核不拡  
散・核セキュリティ

## 解説

# 出力が変動する再生可能エネルギー発電の 大量導入と電力システムの進化 (2)

## 柔軟性向上のための新技術

東京大学 荻本 和彦

世界そして我が国で、持続的なエネルギーシステムの構築に向け、再生可能エネルギーへの期待が高い。再生可能エネルギー導入の大きな割合を占める太陽光発電や風力発電など、出力の変動する再生可能エネルギー電源の導入を含め将来の電力システムの課題と対策について、技術面、制度面に分けて紹介する。

前回の(Part-1)では、変動する再生可能エネルギーの大量導入の影響とそれに対応するための柔軟性 (flexibility) の向上のための総合的な考え方を紹介した。(Part-2)では、これらのうち新しい需給調整方策である需要の能動化、再生可能エネルギー発電の制御と出力予測を取り込んだ電力システムの需給運用の高度化に焦点をあてて解説する。

(Part-1)技術編では、Variability から発生する需給調整の課題、そしてそれを解決するためのFlexibility向上について述べ、その中での再生可能エネルギー発電の調整力の活用必要性について述べた。

### III. 需要の能動化の需給調整への貢献

本節では、個別のエネルギー利用と電力システム全体での残余需要の平準化の2つの目的を、料金シグナル型の間接制御により実現する2つの需要の能動化の例を紹介し、需要の能動化の実現方法について考える。

#### 1. ヒートポンプ給湯機の試算例<sup>16)</sup>

ヒートポンプ給湯機(以下HP給湯機)は、貯湯槽を利用してエネルギーを蓄積することができ、お湯を大量に使う夜の時間帯までに十分な量のお湯を沸かしておけば利用者の利便性を損なわないため、運転時間の自由度が大きい機器の一つである。また蓄電池は、充放電によるエネルギー損失はあるものの、エネルギーの蓄積装置であり、充放電の時間を制御することで需給の能動化による需要調整に効果的な機器である。

前日に時間別の電力価格信号を受信し、それを基に

*High Penetration of Variable Renewable Generation and Evolution of a Power System (2) ; Innovative technologies for the enhancement of flexibility* : Kazuhiko OGIMOTO.

(2013年 11月 25日 受理)

■前回タイトル

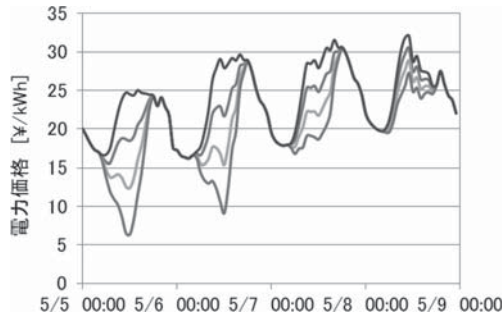
第1回(Part-1) 新たな課題と柔軟性向上の考え方

3kWの太陽光発電(以下PVという)が設置された家庭において電気料金が最も安くなるようにHP給湯機(熱出力3kW)および蓄電池(入出力1.5kW、蓄電容量6kWh、入出力損失15%)の運転計画を立てて運用した場合の、料金信号の違いによる影響の試算を行った。HP給湯機の成績係数(COP: Coefficient of Performance)は、外気温度、沸き上げ温度、給水温度の関数として与え、貯湯槽の蓄熱容量は40MJ、蓄熱損失は毎時1%とし、2003年5月1~14日の1時間単位の電力・給湯需要量、日射量、外気温度、給水温度、電力価格を入力データとした。5月の連休は、PV発電量が大きく、需要が小さい期間であるため、1年のうちで電力需給バランス調整が最も難しくなると考えられている。

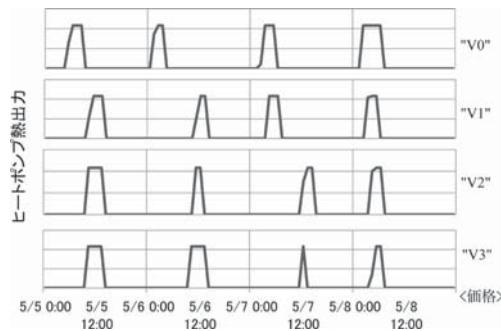
第6図の5月5日から5月9日の例に示すように、電力システム全体の負荷と日射量の大きさに応じて4通りの電力価格を設定した。システム負荷が小さいときは価格を低く、大きいときは高くしたものをV0とし、V1からV3は日射量に応じて昼間の電力価格を下げた。価格の下げ幅はV3ほど大きく設定した。5月5日は祝日のため負荷が小さく、また、5日6日は天候が良く、7日8日は曇天であった。また、系統に売電する場合は、購入するときの電力価格より1円/kWh安い設定とした。

第7図の1軒の住宅における5月5日から5月9日のHP給湯機の運転計画は、電力価格によって運転時間が変化しており、適切な価格設定により需要のシフト量を調節できることを示している。また、昼間にHP給湯





第6図 電力価格の設定



第7図 電力価格によるHP給湯機の運転時間

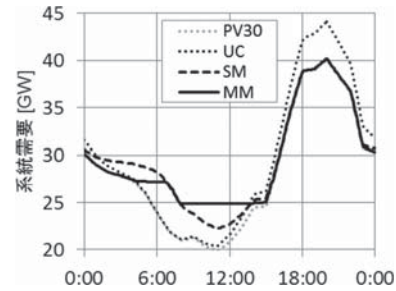
機を運転することによりPVの余剰電力を吸収し、価格V3では、家庭から流出する電力(逆潮流)の最大値を10%低減することで配電系統における電圧上昇の影響を緩和する効果も得られた。

## 2. 電気自動車の試算例<sup>17)</sup>

将来、電気自動車(EV: Electric Vehicle)が大量に普及すると、その充電負荷は電力システムに大きな影響を与える可能性がある。しかし、需要の能動化としてEVの充電制御を行うことにより、その影響の緩和に加え、新たな需給調整力としての機能も期待されている。

東京電力管内にPVが30GW導入され、EVが1日あたり1,000万台利用される将来を想定して、自宅駐車場における充電制御の影響の試算を行った。EVの半数は通勤用で、残りが買い物やレジャーなど非通勤用と仮定して確率的に決定した走行パターンを用い、1台ごとに適した充電時刻を決定し、春の晴天日における電力システム全体の負荷への影響を分析した。分析では、帰宅直後に3kWで充電を開始し80%の充電状態まで充電を行う制御(UC: Uncontrolled Charging)、1台1台の最適化により電力システムの軽負荷時間帯に充電する制御(SM: Single-car Management)、アグリゲータがまとめて管理・制御を行い電力システムの軽負荷時間帯に充電する制御(MM: Multi-car Management)の3つの充電方法を比較した。

第8図に試算結果を示す。元需要からPVの発電量を差し引いた系統の残余需要(PV30)に対し、UCでは夕方から夜にかけての帰宅時に充電開始が集中し、夜の負



第8図 EV充電制御による電力システム負荷曲線

荷のピークを5GW程度押し上げる結果となった。これに対し、SMやMMでは、早朝から昼にかけての軽負荷時間帯に充電が行われて最低負荷の引き上げが行われる。特にアグリゲータが管理するMMでは、5GW程度の最低負荷の引き上げが行われ、効果的に残余需要が平準化されることが分かる。

## 3. 需要の能動化の実現に向けて

需要の能動化の実現に向けては、集中、分散双方のエネルギー管理が本来の需給調整の目的を有効にはたすために協調することが基本である。

さらに、生活に不可欠なエネルギーシステムの運用に関わる技術であることから、効果的であるばかりではなく、個別の利用および電力システム全体としてセキュリティが確保されていて、機器の事故ばかりではなく、悪意のある侵入・妨害にも強いことが必要である<sup>18)</sup>。

これらの条件を満たしつつ、個別のエネルギー利用の価値の向上を実現することで、新しい技術の普及が可能となり、需要の能動化が実現すると考えられる。

## IV. 再生可能エネルギー発電の需給調整への貢献

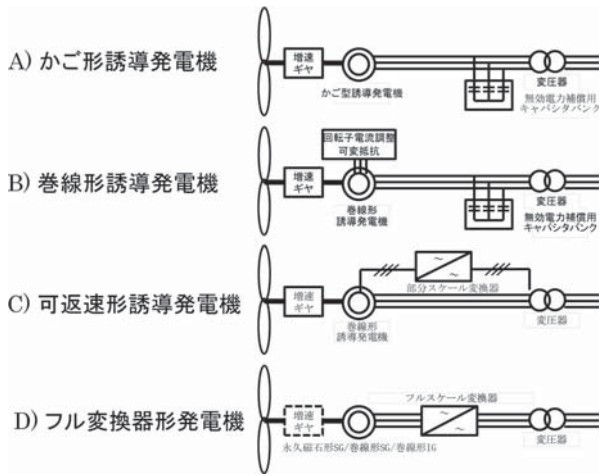
本節では、世界で大規模な導入が進められている風力発電を中心に、Flexibility向上への出力制御(Active Power Control, 電圧調整のためのReactive Power Controlと区別する意味では「有効電力制御」という)の貢献の可能性について述べる。

### 1. 風力発電機のタイプと特性

Flexibility向上への再生可能エネルギー発電自身の貢献の可能性を考えるためには、それぞれの発電方式の特性を理解する必要がある。

風力発電には、風車、発電機、制御方式などにより多くの方式があるが、数百kW以上の大型風力発電では、現在、3枚翼のプロペラ風車による、主として4種類の発電方式(第9図参照)が用いられている<sup>19,20)</sup>。

タイプAは、かご型誘導発電機による定速運転機であり、系統併入時の突入電流を低減するために、ソフトスタート回路を設けている。タイプBは、巻線型誘導発電機で回転子の2次抵抗制御による部分可変速度運転



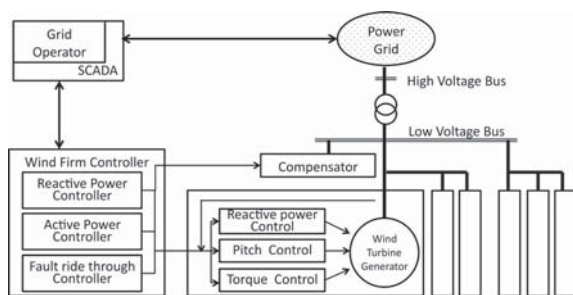
第9図 風力発電システムの種類

機であり、タイプAと同じくソフトスタート回路を設けている。タイプCは、巻線型誘導発電機で回転子の2次励磁制御による可変速度運転機であり、回転速度により固定子回路と回転子回路の双方で有効電力を出力し(Doubly Fed)、回転子の周波数と電流を制御することで、広範囲に回転数を制御することができる。タイプDは、誘導発電機、直流励磁型同期発電機、永久磁石型同期発電機など各種の発電機をAC/DC/AC変換器により接続する可変速度運転機である。

新しいタイプほど設備費は高くなるが、発電効率向上、発電機の機械的なストレスや系統へ与える影響の低減など、各種の機能が向上する。現在の新設設備はタイプCが主流であり、タイプDの割合も増加している。

風力発電機の制御は、発電機の定常的、過渡的、事故時の各種保護・制御を組み合わせで行われる。定常運転における発電機制御は、ピッチ角制御を組み合わせ、有効電力、無効電力の制御が行われるが、電力システムの需給調整の課題の解決に関係するのは出力(有効電力)制御で、ピッチ角制御とトルク制御で行われる。(第10図参照)

風力発電機の出力制御は風況に応じた最大出力制御が基本で、起動できるCut-in風速から定格出力可能な風速の間の部分負荷領域と、その点から強風に対する機器保護のために運転を停止するCut-out風速までの定格出力運転の領域に分けられる。これに対し、近年、電力システムの需給調整の課題の深刻化のもと、この問題を

第10図 系統と連系した風力発電の出力制御<sup>21)</sup>

緩和するための貢献が風力発電に求められている。

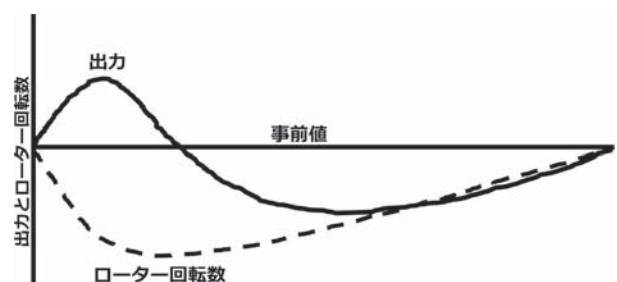
## 2. 電力システムに貢献する風力の出力制御

電力システムの需給調整の課題への風力発電の貢献としては、従来は、系統事故時の運転継続(Fault Ride Through)機能や、需給状況に応じた出力抑制(Upper Limit Control: 最大出力以下の出力での運転)、さらには出力変化速度制限制御(Ramp Rate Limit Control: 出力の変化の速さを制限する)といった、風力発電自体が原因となる問題の緩和が行われてきた。しかし、近年では、電力システム全体の需給調整への積極的な貢献として、「(Ⅲ.1)電力システムの運用」で述べた系統周波数制御の2つの領域への新たな適用が可能となっている。

第一の領域は、従来の同期発電機の慣性力領域での慣性模擬制御(Inertial Control または Kinetic Energy Control: 同期発電機の慣性応答による出力変化模擬)と、ガバナーフリー領域でのガバナ模擬制御(同期発電機のガバナーフリー応答による出力変化模擬)である。火力、水力発電機では、同期化力とガバナ制御は異なる原理による応答であるが、風力発電機ではこれらを模擬する制御としては原理が同じであり、両者の模擬制御の間に本質的な違いはない。

この領域の制御は、通常、発電機事故時の応援としての増出力が求められることが多い。風車の持つ慣性力を活用して過渡的な増出力を行うと、数秒など一定時間後、回転数の低下を回復するために発電出力の減少が必要になる(第11図参照)というトレードオフがある。従って、模擬制御においては、電力システムのニーズに合わせて、可能な増出力とその結果避けられない減出力を組み合わせることが重要となる。更なる工夫として、定常状態で最適回転数以上の回転数で運転しておくという、ピッチ制御とトルク制御を含めた発電機制御をより高度に組み合わせた手法も実現されている。

第二の領域は、常時の負荷周波数制御である。この領域では、常時、増出力と減出力の両方の応答が必要とされる。この領域でも、ピッチ制御、トルク制御を含めた発電機制御を組み合わせられた制御により行われるが、第一の領域のように電源事故など稀頻度ではなく、常時の動作が求められるため、発電電力量の低下に加え、風力発電機の疲労などを考慮することが必要となる。



第11図 慣性制御のイメージ

これまでは、風力発電機単体のイメージでの説明であったが、風力発電所は、一般に多数の風力発電機によるウィンドファームの形態となっている。従って、第一、第二の双方の領域の周波数制御信号は、まずウィンドファームなどに入り、個別の発電機に配分される（前掲の第11図参照）。従って、この制御信号を、個別の発電機の運転状況に応じて最適に配分する技術が重要であり、一部実用化されている。また、第二の領域の場合、一つの電力システムの中の多数のウィンドファームに、中央からの制御信号を最適に配分する技術も重要である。

### 3. 再生可能エネルギー発電の出力制御

太陽光発電はインバータで連系されるため、風力発電のタイプDと同様の考え方で出力制御をすることができる。風力発電との違いは、回転体などエネルギーの蓄積要素がなく慣性応答の模擬などはできず、最大電力から抑制方向の制御のみが可能である。太陽光発電モジュールは、日射により変動する直流電圧源であり、インバータの直流側電圧との差で流れる電流と直流電圧の積である出力の最大値追跡(Maximum Power Point Tracking)制御を基本とし、交流側の有効電力、無効電力の両者を制御する。もう一つの違いは、風力発電では数千から数十万kWのウィンドファームが多数設置されるのに対し、太陽光発電では、数千～数万kWのメガソーラーもあるが、屋根置など建物に設置される100kW未満の無数の小規模設備から構成される割合が大きい。このため、各太陽光発電は、技術的に制御可能であっても、制御信号を送り、受信し、制御する設備の費用が高むことが課題となる。

バイオマス発電は、出力調整の特性は火力発電と同じであり、周波数制御を行うことに大きな問題はない。潮力、波力など、出力が変動してもその周期が長い発電技術の場合は、導入量が増えれば、周波数調整などには有効な電源になる可能性がある。

再生可能エネルギー発電を含め、柔軟性向上は、それぞれの発電方式の技術的特性、運用状況に応じた最適な役割分担が重要と考えられる。ABB, GE, Siemens, VESTASなどの各風力発電メーカーは、特色のある出力制御機能を開発し、世界の市場に投入することで、欧米を始めとする様々な電力システムにおける連系要件を満たすばかりではなく、先進的な試みにも挑戦している。

我が国では、経済産業省の次世代送配電システム最適制御技術実証事業において、先進的な、中央の電力需給制御と、分散エネルギーマネジメントによる太陽光発電の制御技術が開発されている<sup>22)</sup>。風力発電においても、今後の導入の促進と並行して、出力制御技術を開発する必要があると考えられる。

## V. 電力システムの需給運用の高度化

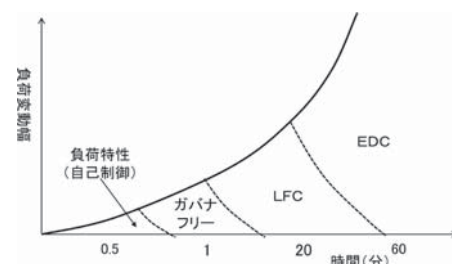
### 1. 電力システム需給運用

第I節で述べたように、再生可能エネルギー発電の大きな出力変動は、電力システムにおいて不可欠な瞬時から年間など様々な時間レンジでの需給調整を困難にする。この需給調整の問題に対し、電力システムでは様々な特性を持った電源の起動・停止と負荷配分を前日に計画し当日の運用を行い実際の変動に応じて修正することにより様々な余力(予備力)を確保している。現在の電力システムの予備力は、需要変動や発電機事故などの毎日の運用における予備力と、燃料途絶、需要の増加に対する新規電源の開発の遅延といった需給構造に係る予備力に大別される。従って、広義には、石油の備蓄や、ドイツで2013年10月から実証試験が開始されたPower to Gasや我が国の再生可能エネルギー輸送・貯蔵に関する技術開発などで注目される、余剰電気の水素あるいは何らかの燃料媒体への転換・貯蔵も長期的なエネルギー貯蔵として予備力と考えることもできる。しかし、ここでは、近い将来の日本でも課題となると考えられる日々の需給変動に対応する予備力に着目する。

まず、電力システムの通常の需給運用について見てみよう。電力系統の負荷は時々刻々変動する。これらの変動に対し、応答の早い順に、各発電所が自端で周波数を検出して自律的に出力を調整する制御(GOV: Governor Free Control)、系統の周波数を一定に保つ負荷周波数制御(LFC: Load Frequency Control)、発電機の経済性を考慮した経済負荷配分制御(EDC: Economic Load Dispatching Control)を階層的に構成して行われている。しかし、それでも調整しきれない速い需給の差の変動が先に述べた慣性応答で吸収され周波数の変動(次に述べる慣性力の領域)となり、瞬時から長い時間領域まで電力システムの需給バランスを保つよう設計・運用されている<sup>23)</sup>(第12図参照)。

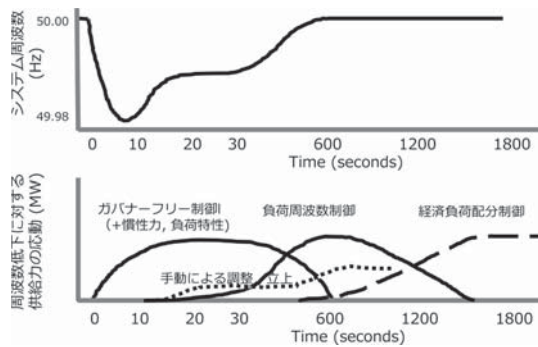
これらの調整を遅滞なく実施できるように電力システムの中で運用予備力(発電の余力)が確保されている。

次に、第13図には、大規模な電源あるいは電源送電線の事故時の供給力の不足により周波数が低下し、これに対応して各種予備力が応動する様子が示されている。事故直後、不足した電力に対し交流で接続された発電機



第12図 周波数制御の分担<sup>24)</sup>





第13図 大規模電源脱落時の周波数、予備力応答状況例

の回転エネルギーからエネルギーが供給される。これは同期化力という交流で接続された発電機や電動機(モーター)の間に働く力によるもので、制御によらない物理現象であり、慣性力(イナーシャ)と呼ばれる。その後は第12図に示した各種制御が働く。

まずガバナーフリー制御が働いて周波数を一定の値に回復する。その後、負荷周波数制御が火力・水力発電所の発電指令値を修正して50Hz、60Hzなどの規定周波数への復元を図り、並行して手動による水力などの立ち上げ、出力調整が行われる。さらに必要に応じて停止中の火力を起動し、最終的に経済負荷配分制御が経済性を考慮して運転予備力の保有量を事故前の状態に戻す。

瞬時々の需給バランスが必須である電力システムでは、交流で連系された発電機の回転エネルギーが最終の調整余地となっていることは、交流システム安定性の重要なポイントである。また、電力システムに需給上の問題が発生する場合の多くは、周波数に加えて電力システムの広い範囲で電圧も低下するので、その低下により需要自体が減少特性を持っていることも需給の安定性を保つ要因である。

これに対して、今日および将来の電力システムでは、需要と供給両面で徐々にではあるが着実な変化が起きている。第一は需要の特性の変化である。エアコン、ファン、照明など従来は交流モーターあるいは単純な抵抗負荷であり、インバータを介したエアコン、ファン、LED照明などに変わることで、電圧、周波数の変動に対しそれを補償する方向に働いていた特性が、需要側では安定運転、省エネルギーとなるが、電力システムから見ると周波数や電圧によらず一定の負荷、すなわち、アンバランスを緩和できない方向に変化している。

第二は発電側の特性である。従来の交流電源が、風力や太陽光発電の場合のようにインバータによる連系になると、同期化力の働かない電源となり、電力システム全体の同期化力で結ばれた慣性が低下し、小さな需給変動でも周波数が変動しやすく、周波数を制御した場合の安定性が低下する。このような現象は欧米の再生可能エネルギー発電の導入が先行している地域では実際に観測され、今後その傾向は継続すると想定されている。

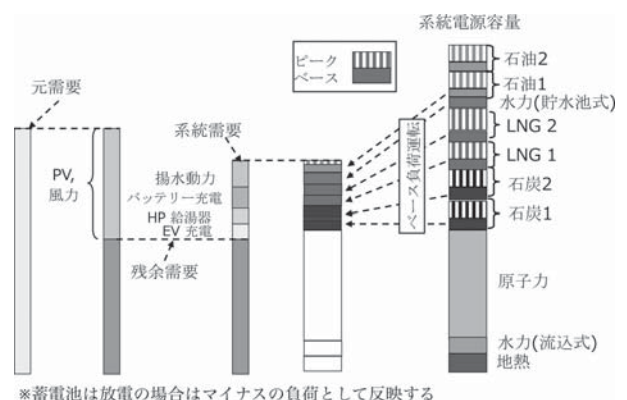
このように、今後の電力システムでは、風力発電や太陽光発電の大量導入による変動の増加と調整力を発揮する電源の運用量の低下という課題に加えて、電力システム全体の特性が、需要の特性の変化や慣性の低下により、「劣化する」傾向もある。Lawrence Berkeley 国立研究所が米国の連邦エネルギー規制委員会 (FERC) の依頼で行った検討<sup>25)</sup>によれば、変動する再生可能エネルギーの、導入に伴う電力システムの周波数変動への影響については慎重な検討が必要とされている。

なお、これまで有効電力に関する需給調整に焦点をあてて述べてきたが、再生可能エネルギーには、有効電力ばかりではなく、無効電力、高調波、低周波共振、事故中、事故後の電圧・周波数変動時の運転継続、発電復帰特性、単独運転、再起動などについても様々な貢献が求められる。北米電力信頼度協議会 (NERC) による検討<sup>26)</sup>では、以下で述べる出力制御を含め、再生可能エネルギー発電の貢献のニーズと方向性が議論されている。

## 2. 出力予測を含む需給運用の高度化

再生可能エネルギー発電の導入による需給調整の課題解決のため、電力システムの需給運用は、需要の能動化や再生可能エネルギーの出力調整など、これまでに述べた方策を最適に活用できる方向に徐々に変化する必要がある。再生可能エネルギー発電の増加と並行して、出力変動の特性の分析・把握と水力発電や火力発電の需給調整力の最大活用からはじまり、再生可能エネルギー発電の出力予測<sup>27)</sup>を組み合わせた前日の運用計画や当日運用を導入し、これらと並行して、再生可能エネルギー発電の制御、需要の能動化、複数の電力システムの連系を積極的に活用した運用が必要になると考えられる。第14図に、再生可能エネルギー発電の変動性を評価して、火力発電機が、電力システム全体の需給調整力を増加させるために部分負荷運転を行うイメージを示す。

需給調整を含めた運用計画において需給調整用の電源の効率低下を回避し、再生可能エネルギーの発電電力の抑制を最小限にするためには、電力システムの運用に数



第14図 電源の柔軟運用による調整力確保

日、数時間、場合によっては数分後までの様々な時間レンジでの出力予測が重要となる。

出力予測には、長期に適した気象予測による方法、短期に適した統計的手法、衛星データによる手法（太陽光発電の場合）などがある。気象予測においては、気象の予測データや実績データを蓄積・分析することで、天気の数値予報<sup>28)</sup>の手法や運用方法（発表時間・内容、予測スパンなど）を、より再生可能エネルギーの出力予測に適したものに改善することが求められる。

電力システム運用のための太陽光発電や風力発電の出力予測としては、先に述べた「ならし効果」を考慮した広域の合計発電電力の予測が基本であり、そのためには広域での日射予測や風況予測に基づく、広域での出力予測技術が必要となる。広域の日射予測、風況予測については、将来の発電設備の配置を含めた予測結果の検証のためのデータが存在しないため、現在、広域の日射量、風況、発電電力のデータの蓄積・分析に、将来のならし効果に関する想定を含めた技術開発が行われ、衛星観測データの活用も重要な手法となりつつある。

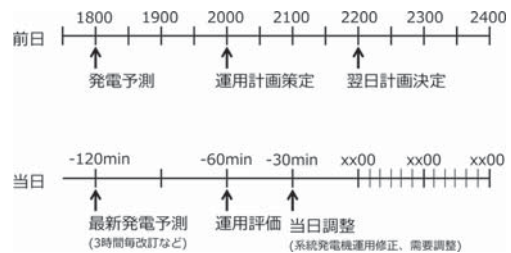
出力予測に必要な精度は、太陽光発電や風力発電の導入量の増加による新たな変動の増加、火力・水力発電の運転の確保可能量、部分負荷運転や発電機の起動停止の自由度、それらに伴う経済性などの関係で決まる。今後は、安定な需給運用のためには前線の通過などに伴う極端な天気の変化の場合に発生する大きな出力変動であるランプ現象の予測を含め、電力システムの安定な需給運用に必要な要素を押さえた出力予測技術に進化させることが重要と考えられる。第15図に出力予測を取り入れて、前日に需給計画を策定し、当日も需給計画を改訂する電力システムの需給運用のイメージを示す。これらのあり方は、次節(Part-3)で述べる電力市場の姿と密接な関係を持つ。

本(Part-2)では、今後の多くの電力システム共通の課題である柔軟性向上のための新技術である需要の能動化と再生可能エネルギー発電の制御、そしてすべての柔軟性向上対策を最適に活用するための電力システムの需給運用の高度化について解説した。

(次回に続く)

#### － 参考資料 －

- 16) 池上貴志, 他: 電気学会論文誌, Vol.130-B, No.10, pp.877-887 (2010).  
 17) 池上貴志, 他: 電気学会論文誌, Vol.133-B, No.6, pp.562-574 (2013).



第15図 将来の電力システムの需給運用のイメージ

- 18) 荻本和彦, 他: 電気学会平成23年電力・エネルギー部門大会講演論文集, 16.08\_7-08\_12 (2011).  
 19) IEC White Paper: Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage, (2012).  
 20) European Wind Energy Association (EWEA): "Powering Europe: wind energy and the electricity grid", (2010), 風力エネルギー学会による和訳, <http://www.jwea.or.jp/publication/PoweringEuropeJP.pdf>.  
 21) J. Aho, et al.: Tutorial of Wind Turbine Control for Supporting Grid Frequency through Active Power Control, NREL/CP-5000-54605, (2012).  
 22) 横山明彦 [実証概要] ~再生可能エネルギー大量導入に向けたスマートグリッドの現状と将来展望, 馬場旬平 電力需給状況に応じた需要側機器制御技術と実証試験概要, 荻本和彦 系統全体での需給計画・制御技術の開発, 電気学会 全国大会シンポ「スマートグリッド実証事業 現状と今後の展望」講演資料, (2013).  
 23) 日本電力調査委員会「日本電力調査報告書における電力需要想定および電力需給計画算定方式の解説」, p.109, 113, 120, 126, 159 (2007).  
 24) 電気学会: 技術報告 No. 869, pp.54-56,60 (2002).  
 25) J. H. Eto, et al.: Use of Frequency Response Metrics to Assess the Planning and Operating Requirements for Reliable Integration of Variable Renewable Generation, LBNL, (2010).  
 26) North American Electric Reliability Corporation (NERC): 2012 Special Assessment Interconnection Requirements for Variable Generation, (2012).  
 27) 荻本和彦, 他: 電気学会新エネルギー・環境 メタポリズム社会・環境システム合同研究会資料, FTE-12-38, MES-12-09, (2012).  
 28) 気象庁ホームページ: <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.htm>.

#### 著者紹介

荻本和彦 (おぎもと・かずひこ)  
 本誌, 56 [1], p.24 (2014) 参照.

## 解説シリーズ

# モデリング・シミュレーションの高度化

## 第2回 V&Vのための精度保証付実験データ

東京大学 岡本 孝司

現在のコンピュータ技術の進歩は大きなものがある。これに対して、その解析結果を検証するための実験データベースは、コンピュータが出力する情報に対して、非常に疎でかつ精度の劣ったものが多い。このため、現在の解析コードに合った情報量を持つ精度保証付実験データ取得手法開発と、データベース構築が必須となる。知財としてのデータベース構築と合わせて、国産の計算コードを世界戦略として構築する事が前提である。日本の知見集約物としての計算コードは必須であり、今すぐにでも取り掛かる必要がある。さもないと、20年後には韓国製や中国製の計算コードで設計された原子炉を輸入する事になるであろう。

### I. はじめに

「モデリング・シミュレーション技術」は、原子力基盤研究の中でも最も重要な戦略技術の一つである。東日本大震災の1週間前の3月2日に、「モデリング・シミュレーション技術」に関するワークショップが東京大学本郷キャンパスで行われた。モデリング・シミュレーション技術に対する我が国における研究課題を抽出し、その重要度・緊急度を議論することで、5年後に向けた方向性を明らかにすることを目的としていた。

日本はモデリング・シミュレーション技術の研究開発では、世界をリードする実力を持っている。モデリング・シミュレーションに関する国際会議では、日本からの先端的な発表が数多くなされており、また、国際的にも高く評価されている。これに対して、現場で用いられているソフトウェアのほとんどは、欧米の計算コードが用いられており、国産のコードは限られるほどである。このギャップは、なぜ生ずるのであるのか？ 上記のワークショップにおいても、ユーザーからは信頼性の高い計算コードが必須であることや開発に伴う大きなリスクに対する危惧のコメントなどがうかがわれた。このため、十分な実績のある海外の計算コードを用いることが、リスク回避のためにも重要な考え方の一つであったのであろう。

これは、20世紀の間は良かったのかもしれない。

*Improvement of Modeling and Simulation (2) ; Accuracy proven experimental database for V&V : Koji OKAMOTO.*

(2013年 11月5日 受理)

■前回タイトル

第1回 我が国における国産コード開発プロジェクトの紹介

2001年の同時多発テロを受けて、米国においては解析コードについてもセキュリティーの観点から、海外にはソースコードの提供を行わなくなった。このため、ブラックボックスとして解析コードを利用することになり、海外の解析コードを利用し続けることのリスクが顕在化してきた。つまり原子力システムとして、安全を担保すべき根幹となる解析コードの信頼性を、海外に依存することになる。つまり一番重要なソフト部分を、商品とすることができなくなるだけではなく、万一、解析コードに瑕疵があったとしても、それを証明する手段も失われ、その責任までを引き受けなくてはならなくなる。最も付加価値の高い部分を、海外に依存することになる。

さらに福島第一の事故を受けて、日本国内での新規立地が困難になるとともに、海外戦略の重要性が相対的に高まり、設計や安全に用いられる解析コードや規格をはじめとするソフトウェアがますます重要な戦略物資になってきている。この時にも、システムの中核を海外のブラックボックス解析コードに依存するという事になり、他国に比べて不利になるとともに、やはり大きなリスクを負うことになる。

従来から日本はハードウェアを輸出してきた。一方、これからはハードだけでは儲けが少ないため、ハードウェアとソフトウェアを組み合わせて輸出しなくてはならない。ソフトの中で、最も重要なものが、シミュレーション技術である。また、そのシミュレーション技術の基礎となるモデリングである。これらを取りまとめ、知識の結集としての規格基準と合わせて、モデリング・シミュレーション技術が構成される。

残念ながら、日本のモデリング・シミュレーション技



術は、個々の技術は優れているかもしれないが、総合的なシステムとしては、欧米に大きく後れを取っている。このことに気が付いた韓国と中国では、2000年以降、国家戦略としてモデリング・シミュレーション技術のシステム化と国産化を諮っている。残念ながら、日本企業や日本政府の動きは非常に鈍い。将来、日本が直面するであろう大きなリスクについての備えをすすめることを説いているが、目の前の小さなリスクに手一杯のようである。このままでは、韓国製や中国製の原子力システムを日本が購入する日も遠くない気がする。

## II. モデリング・シミュレーションと V&V

シミュレーションを取り巻くハードウェア・ソフトウェアの進歩は、目覚ましいものがある。新しいハードやソフトが毎日のように開発され続けている現在、世界と互角以上に戦うためには、オリジナリティーの高いソフトウェアを開発するだけでなく、ソフトウェアの品質保証として V&V (Verification & Validation= 検証と妥当性確認) を担保することが重要になってきている。

これには、物理モデルとそのコーディングの信頼性を保証する Verification (検証) と、シミュレーション結果がシステムとしての挙動を正しく模擬できていることを保証する Validation (妥当性確認) がある。原子力プラントの安全設計を担保するだけでなく、より合理的で効率の良い(競争力のある)原子力プラントを設計・製作して売り込むためにも、その信頼性検証、妥当性確認が鍵となってきている。第1図に、V&V と、それに基づく Assessment (予測) による実機推定の過程を模式的に示す。要素試験などで確認・検証されたコードを用いて実機の設計を進め、その安全を評価していく。ここでは、不確かさの評価が重要であり、V&V をより高度化することによって、Assessment における不確かさの幅を低減することが可能になる。つまり、より精度の高い設計を実施することが可能になり、安全性をより高めることができる。もしくは、より安全な原子炉の設計を実施す

ることができるようになり国際競争力を高めることができるようになる。

シミュレーション品質保証の一環としての V&V に関しては、日本計算工学会の標準がある。また、原子力分野で扱うモデリング・シミュレーションの V&V 一般に関しては、日本原子力学会の標準委員会でも標準化が進められている。

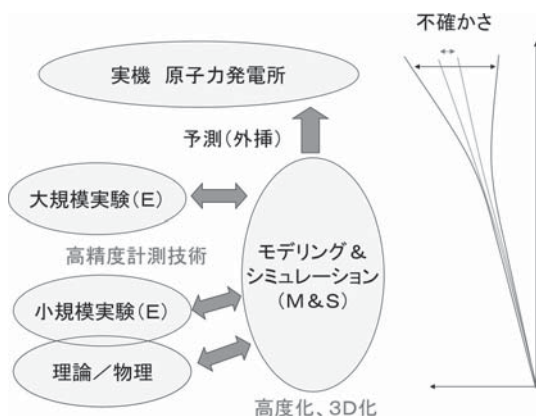
このように、シミュレーションコードが正しくモデル化されていることと計算結果が正しく現実を模擬できていることを保証するための手段として、V&V 手法の標準化が進められてきている。この流れは、今後も変わらない。

国際的な流れとしては、V&V の重要性は古くから指摘され、AIAA (米国航空宇宙学会) や ASME (米国機械学会) などでも V&V 手法の標準化が進められてきた。例えば、ASME においては、構造設計におけるシミュレーションの V&V として V&V10 が 2006 年に標準化されている。また、流体解析における V&V についても、V&V20 として 2009 年に策定されている。さらに、現在、原子力分野における熱流動解析手法の V&V として、V&V30 の策定が進められている。原子力分野においては、NRC (米国原子力規制委員会) の CSAU が有名であり、この手法に沿った標準として、日本原子力学会の統計的手法による熱流動設計基準も作られている。

## III. 精度保証付実験データベース

シミュレーションコードが正しく現実を模擬できていることを示すためには、必ず検証をするための現実のデータが必要となる。これには、実験によりデータを取得することが一般的である。したがって、シミュレーション技術の V&V においては、コードそのものの信頼性だけでなく、コードの妥当性を保証するための実験データの信頼性も重要である。実験データがなくては、V&V は意味をなさない。つまり、V&V に用いることができる、実験データは知的財産となる。

従来から、様々な実験データは文献の形で提供されている。事象の複雑さや対象の大きさなど、様々な形があり得るが、シミュレーションによって模擬できるだけの情報を提供することが重要である。近年、シミュレーションコードの出力は、非常に膨大となり、例えば、微細な 3次元挙動や時間変動挙動を詳細に出力することができるようになってきた。一方、旧来の実験データは 1次元的な時系列変動や、場合によっては平均値を提示するだけで精一杯である。つまり、シミュレーションコードの情報量に比較して、実験で得られる情報量の質と量が格段に小さいという問題が明らかになってきている。いわゆるベンチマーク問題と同様の考え方であるが、近年のシミュレーションコード情報量に匹敵する、より詳細なデータベースが重要になってきている。



第1図 V&V と予測(Assessment)による不確かさ低減

これらのことを踏まえて、シミュレーションコードのV&Vに用いることの出来る実験データベースの必要条件について考えてみる。一言でシミュレーションコードといっても、千差万別である。ある一点における物理量のバルクな時間変動を追いかけるだけの単純なものから、3次元空間における複数の物理量の相関を解く複雑なもの、さらには、非線形な支配方程式をある境界条件の下で解くものなどいろいろである。これらのコードに対する検証用データには、必要条件として次の2点が挙げられる。実験における境界条件、初期条件が明確であるとともに、得られた計測結果に対する物理量が明確であることと不確かさが評価されていることである。

### 1. 境界条件の精度保証

まず、実験における境界条件及び初期条件が詳しくわかっていることが必須である。対象の大きさをはじめ、物理量には不確かさが必ず存在する。実験結果に大きな影響を与える境界条件と、さほど影響がない境界条件はある程度経験的にわかっていることが多い。特に、結果に大きな影響を与える境界条件については、その境界条件の持つ不確かさをあらかじめ評価しておくことが必要である。

例えば、もっとも単純な例として、直径100mmの円管内に水を平均流速1m/sで流すことを考える。レイノルズ数は10万であり乱流状態である。境界条件としては、まず対象物となる円管の寸法が重要である。直径100mmといっても実際には製作公差がある。これらは円管の材質や製作工法にも依存する。もし板曲げ溶接で円管が作られているとすると、真円度、溶接部の盛り上がりや円管の歪などが流動に影響する可能性もある。表面粗さなども影響する。最も重要なのは、円管の断面積である。直径の公差が1mmであれば、長さの誤差は1%になり、断面積では2%となる。円管を流れる流体の流量を通常は、流量計で計測する。流量計にもよるがその誤差は比較的大きい。浮子式流量計であれば、読み取り誤差も無視できない。また、流量計は通常、流体の温度や粘性係数などの影響も受ける。例えば5%の誤差があると考えられる。そうすると、流量と断面積が流束に与える誤差は、それぞれ独立であると考えると、5.4%となる。1,000mm/sで流れていると考えていても、 $1,000\text{mm/s} \pm 54\text{mm/s}$ の誤差があることになる。

これらの誤差は従来から考慮されていた誤差である。一方、近年のCFD(数値流体力学)コードで、特に乱流を計算する場合には、様々な乱流モデルがある。k- $\epsilon$ モデルといった単純なものから、LES(Large Eddy Simulation:高精度な数値解法)や場合によってはDNS(Direct Numerical Simulation:乱流の直接数値解法)なども用いられる。シミュレーションコードでは、一般に、流れが発達していることを仮定し、流入の乱流量については、あらかじめ周期境界条件などで計算して求め

ることが多い。しかし、現実の実験では必ずしも流れが十分に発達していることは望めない。助走区間を十分にとった場合であっても偏流成分が残っていることもある。

このため、精度保証付実験データでは、まずは、これらの誤差要因となる境界条件の精度を明確化することが必要である。通常の実験では、実験で設定された情報のみが提供されるが、その時にどれだけの誤差があるかを明示することが必要になる。

一方、境界条件を直接計測する技術も近年は発達してきている。例えば、上記円管の場合、透明円管であれば、レーザー計測によって3次元の詳細な形状情報を高精度に計測することが可能になっている。また、粒子画像流速測定法(PIV)を用いることで、計算の境界条件となる流入速度分布を詳細に計測することも可能である。PIVは従来は、定常もしくは瞬時の2次元速度分布を計測することしかできなかった。近年、100万画素の高解像度で、毎秒1万コマ計測できるカメラが容易に手に入るようになり、時間方向には10kHzオーダーの変動計測が可能になってきている。さらに、限られた計測範囲ではあるが、トモグラフィックPIVなどにより、3次元計測についても、可能になっている。つまり、平均速度分布だけではなく、速度変動スペクトルや速度勾配テンソルなどの情報も実験的に得ることができる。これらを、シミュレーションの境界条件として用いることで、従来は大きかった境界条件に対する誤差を低減することも可能になる。

なお、当然のことであるが、PIVの計測結果に対しても誤差が載っている。画像処理であるため、どうしても1~5%程度の誤差は載る。その他、実験においても、レーザー照明の誤差、カメラの誤差、レンズによる画像歪など考慮すべき複数の誤差要因がある。得られた情報を平均化することで、ランダム誤差は減少できるが、バイアス誤差は減らせない。PIVに関する誤差の議論は、PIVハンドブック<sup>1)</sup>に詳しい。

周波数スペクトルを入力として用いる場合には、これらのランダム誤差が特に高周波数成分に大きく載って来ること知られている。これらの、計測データとしての性質をよく把握したうえで、境界条件として用いることも重要である。精度保証付実験データとしての境界条件としては、これらの情報とその誤差の特徴を明示して与えることが必要であろう。

### 2. 計測データの精度保証

実験によって得られたデータには誤差が載る。よって、通常はエラーバーなどによって誤差範囲を明示的に示すことが行われる。誤差要因を考えると、このエラーバーで表示される誤差には境界条件の誤差、計測方法に起因する誤差、非定常状態をサンプリングすることによる誤差など複数の誤差が載って来る。

境界条件の誤差は前項で考察したように、バイアス誤

差として最後まで残る。計測方法に起因する誤差は、ランダム性とバイアス性の双方をもつことが多い。例えば熱電対でも、起電力自体は物理現象であっても、個体差やアンプ、A/D変換器などのシステム全体で誤差が載る。また、計測対象の温度と熱電対の温度(起電力)の間にも、熱伝導による時間差や空間平均などによる誤差が載って来る。これらを含めて計測方法に起因する誤差が評価される。なお、境界条件の項でも述べたが、全く別の手法によって、計測値を校正することが可能であれば、バイアス誤差は修正が可能である。

現象の非定常性に伴う誤差は、複数回の計測によってある程度評価できる。サンプリングのランダム性が担保できることが前提である。もし、境界条件や計測方法に起因する誤差がランダム性のみであり、バイアス性を持たない場合は、境界条件や計測まで遡って複数回の計測を行うことで、ある程度の評価が可能となる。しかし、バイアス誤差は必ず残るため、その評価を行うことが必須となる。

これらの評価によって、計測結果の精度を保證するデータベースを構築する。実験における計測精度に関しては、ASMEにTest Uncertainty (PTC19.1)の標準が存在する。

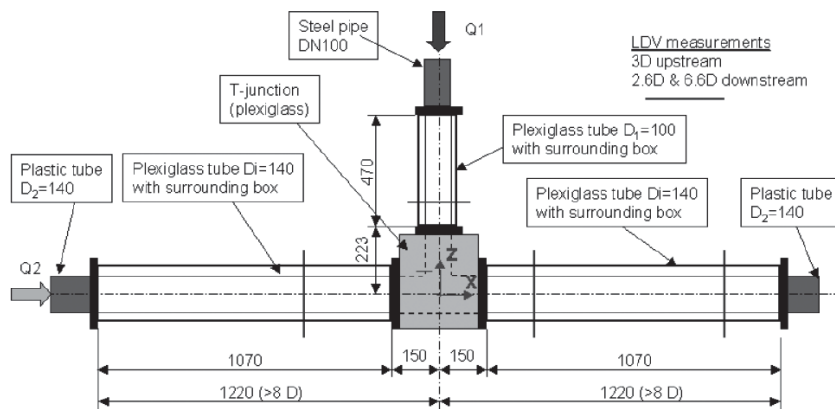
なお、近年のコンピュータ技術の発達に伴い、計測手法についても、コンピュータを応用した技術開発が盛んである。従来は点計測で温度や圧力、速度といった物理量の計測が行われていたが、上述のように画像処理を用いることなどによって、3次元空間の時系列変動データを高精度で計測できる手法が開発されてきている。速度に対しては、上述のPIV手法が大きく発達し、時系列2次元データ計測技術として確立されている。従来のレーザードップラ流速計やホットワイヤ流速計10,000個に相当する情報量を簡易に得られる。また、3次元空間の3次元速度勾配テンソルも計測できる。温度情報についても、LIF(レーザー誘起蛍光法)やPSP(感圧塗料)などの技術により、2次元ないし3次元の温度や速度の同時計測も可能になってきている。X線CT(コンピュータ

断層撮影)なども同時計測や高周波数計測技術も開発されてきている。これらの最先端の計測技術を用いた、高精度で情報量の多いデータを計測し、それをデータベース化していくことが望まれる。なお、情報量が大きくなると、計測データと計算データを比較する手法も困難になっていくと予想される。単純に時間平均をとったり、時空間スペクトルでの比較は比較的簡単であるが、非線形現象における実時間の比較などはあまり意味がない。また、一般に計測データの方が時空間密度が薄く、時空間データといってもローパスフィルタがかかったデータになっている。そのフィルタ特性を把握しつつ比較する手法を開発していくことが重要であろう。

### 3. 標準問題

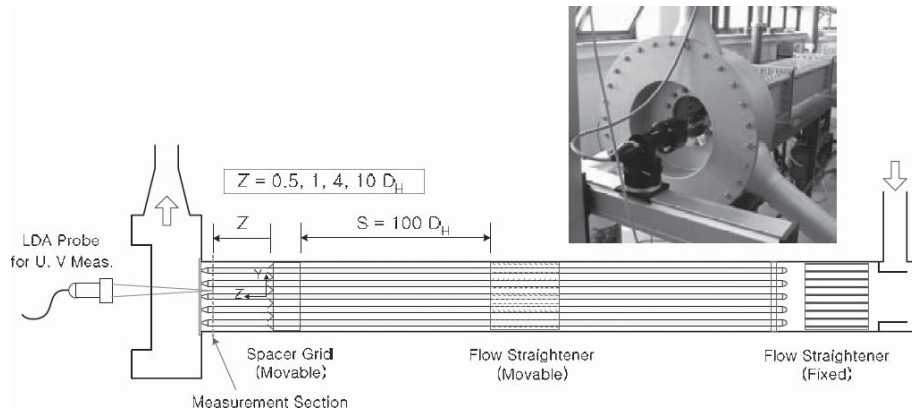
従来からベンチマーク問題として、様々なデータが提供されてきた。しかしながら境界条件の不確かさに対して、十分なデータが提供されているベンチマークはさほど多くはない。CFD4NRSという国際ワークショップが2年に1回、連続して開催されてきている。原子力安全に数値流体シミュレーション(CFD)を用いるための様々な議論を進めてきている。この中で、継続的にベンチマーク問題に関する議論と実践が進められている。2010年には、温度差のある流体がティーで混合するミキシングティーに関するベンチマークが行われた<sup>2)</sup>。(第2図)実験データについては、境界条件を含めて詳細なデータがとられている。特に周波数情報が重要であり、これらの条件を含めた実験データベースとして提供されている。2012年には、5×5ロッドバンドル後流に関するベンチマークが行われている<sup>3)</sup>。(第3図)主としてレーザードップラ流速計によるデータを中心に、境界条件の誤差を含めたデータが提示されている。現在は、来年実施されるベンチマークとして、格納容器内水素挙動に関する課題が提示されている。現状は比較的単純な課題に対するCFDの利用を中心に研究協力が進められている。

特に二相流や化学反応などのような非線形性の強い流れや課題に関しては、その境界条件の誤差評価自体も厳



第2図 ミキシングティー試験装置<sup>2)</sup>



第3図 5×5ロッドバンドル試験装置<sup>3)</sup>

しい状況にある。例えば気泡径分布や頻度などが流れ場に非線形な影響を与えることはよく知られており、流動様式としてまとめられている。これらの再現性や、特に様式境界近傍における不確かさは大きくなり、実験データベースとしての価値を高めるためには、これらの情報をいかに精度良く提供できるかが重要となっている。

#### IV. おわりに

いずれにせよ、現在のコンピュータ技術の進歩は大きなものがある。これに対して、その解析結果を検証するための実験データベースは、コンピュータが出力する情報に対して、非常に疎でかつ精度の劣ったものが多い。このため、現在の解析コードに合った情報量を持つ精度保証付実験データ取得手法開発と、データベース構築が必須となる。このためには、境界条件や実験パラメータの精密な設定、境界条件等が正しく設定されている保証(境界条件の計測)、そして、最終的な実験データの精度を保証するシステムの構築が必要である。不確かさ評価(Uncertainty Analysis)だけにとどまらず、不確かさを制御することも重要になる。精度保証付実験データ概念を明確化することによって、これらのデータベースは知的戦略財産とすることも可能になる。モデルの検証(Verification)は比較的小型の実験で可能であり、大学や研究機関で戦略的に実施すべきである。

一方、大型の試験においては、妥当性確認(Validation)のための精度保証付実験データの取得が必要である。これらの精度保証付実験データの整備戦略を明確化し、重要度・緊急度の高いものから戦略的に進めることが必須である。なお、大型の試験装置を維持することは、日本国の優位性を担保するために必須である。多度津の振動台を廃棄した後に、大規模な地震が続き、より安全な原子力システムに繋がる研究が停滞したことは否めない。長期的な視点を持った戦略が必須である。

なお、知財としての精度保証付実験データベースを構築していくことと合わせて、国産の計算コードを世界戦略として構築することが前提である。海外の計算コード

のためにデータベースを構築することも重要であるが、日本の知見の集約物としての計算コードは、必須である。従来から、国産コードを開発してきた経験があるが、残念ながら全く成功していない。これは、単なるコード開発が目的化してしまったことと、ユーザビリティやメンテナンスに十分な資源がなかったこともその一因であると考えられる。

では、過去と同じ轍を踏まないために、どうするべきか。全体の安全解析プロセスの中で、日本の優れた知見の集約物としての計算コードを作り上げることである。V&V標準を前提とし、この標準に合致したコードに、全日本の知識を集約させる。単なる計算コード開発ではなく、規制システムの改革も合わせて考えていくことで、原子力安全を担保していく。例えば、コード認証なども一つの方法であろう。なお、ユーザーを巻き込み、ニーズを明確化した上で、ユーザビリティやメンテナンスまで考慮することが必要である。

さもないと、20年後には韓国製や中国製の計算コードで設計された原子炉を輸入することになるであろう。安全が担保されればそれでも良いのかもしれないが、日本の知識・技術力を集約したコードが重要であり、そのためには精度保証付データベースの構築も重要である。

#### — 参考資料 —

- 1) 可視化情報学会編, PIVハンドブック(2002).
- 2) <http://www.oecd-nea.org/html/nsd/docs/2011/csni-r2011-5.pdf>
- 3) <http://www.oecd-nea.org/html/nsd/docs/2013/csni-r2013-5.pdf>

#### 著者紹介

岡本孝司(おかもと・こうじ)

東京大学

(専門分野/関心分野) 原子力安全, 原子炉熱流動, シビアアクシデント, 可視化情報学



# モデリング・シミュレーションの高度化

## 第3回(最終回) V&Vの実施の国際動向と適用

原子力安全基盤機構 笠原文雄

V&Vとは、解析コードの結果の信頼性を保障するための手法で、解析コード開発および解析評価において非常に重要であるが、従来、確固とした方法論が確立していなかった。近年、米国機械学会(ASME)において技術標準化され、その重要性が増していることから、日本原子力学会においてもガイド作成を目指して活動中である。

本稿では、「モデリング・シミュレーションの高度化」解説シリーズの最終回として、V&Vの国際動向、適用の具体例として米国原子力規制委員会(NRC)と米国電力研究所(EPRI)による、原子力施設の火災評価に適用するための火災モデルの機能検証とパラメータの予測性能の妥当性を検討した報告書(NUREG-1824)を紹介する。

### I. はじめに

V&V (Verification and Validation) は米国機械学会(ASME)による標準化<sup>1,2)</sup>以前にも米国航空宇宙工学連盟(AIAA)<sup>3)</sup>、米国原子力学会(ANS)<sup>4)</sup>等でガイドが作成されており、解析コード開発等に適用されているが、現在、当学会で策定中のガイド<sup>5)</sup>では、モデリング・シミュレーション(M&S)の立場から、

- ・モデル検証(Model Verification)：数値モデルが、その基礎となる数学モデルを忠実に表現し、かつ数学モデルの解をデジタル計算機の打切り誤差および収束許容値において導くことを確認する実施プロセス、
- ・モデル妥当性確認(Model Validation)：モデルが、その所期の利用目的の観点から、対象とする実現象を満足できる幅で予測できることを確認する実施プロセス、

とした定義を採用しガイド策定を進めている。前2報では、解析コード開発および実験を中心にV&Vの必要性和重要性が述べられてきたところであるが、原子力分野は炉心の挙動からプラントシステム全体の挙動さらに自然災害を起因とする外的要因に対する影響などシミュレーションによる現象予測技術に対するニーズがますます高まっている。このような背景から、予測技術の信頼性を確保するための考え方、手順、確認方法等をガイド

*Improvement of Modeling and Simulation (3) ; Global trend of V&V application and implementation* : Fumio KASAHARA.

(2013年10月1日 受理)

■前回タイトル

第2回 V&Vのための精度保証付実験データ

として標準化することは非常に重要である。おりから米国においてV&Vに焦点をあてた国際会議ASME V&Vシンポジウム2012が昨年5月に開催された。そのV&Vの概要紹介として状況をお知らせするとともに、その適用の具体例として、わが国でも今後必要性の高い技術と思われる火災リスクのシミュレーションに対するV&V評価活動についての報告書(NUREG-1824)<sup>5)</sup>の概要を紹介する。

### II. ASME V&V シンポジウム

#### 1. シンポジウム

ASME V&VシンポジウムはV&Vに焦点を当てた国際会議で、かつ多方面の分野を対象とした過去にない規模の会議であり、2012年に第1回<sup>6)</sup>が開催され、2013年も第2回が開催されている。第1回では不確かさの定量化、妥当性確認の方法、V&Vの具体的な適用、V&V標準作成活動、パネル等の14の分野(トラック)を2日半4分野の並行セッションで発表する形式で進められた。ASMEでは、2006年に最初のV&V標準V&V10(計算固体力学標準)を作成し、その後、2009年にV&V20(CFD・伝熱標準)を発行した。会合の印象ではそれらのV&V標準に基づいたモデル検証・解検証(verification)を行い、その後、試験との比較による妥当性確認(validation)を行って解析コードの信頼性を示す方法論の実践活動が活発に行われているとの印象を持った一方、原子力システムの設計・安全性に関する標準(ASME V&V30)の進捗に関心が持たれたが、V&V10および20が扱う対象に比較して、V&V30が扱う対象はその規模および現象の複雑さのハードルが高いことも

あって、進捗が遅れているようであった。

最後のパネルセッションでは米国の軍関係、連邦航空局 (FAA)、食品医薬品局 (FDA)、標準技術研究所 (NIST)、国立研究所 (PNNL) および我が国の日本原子力研究開発機構 (JAEA) など幅広い分野の参加者から V&V 関連の現状とその考え方が述べられたが、事業者側は試験に代わる設計・開発のツールとして、効率化、コスト削減を目的にシミュレーションを用いるが、規制する立場として受け入れるにはどのような要求をすべきか、双方にとって適切なガイドとはどのようなものかなどが議論の焦点として挙げられた。

## 2. プログラム

プログラムに掲載された論文数は合計 185 件 (V&V2013 では 160 件) で、トラック別ではトラック 3: Validation Methods for Solid Mechanics and Structures が 27 件で一番多く、次はトラック 2: Uncertainty Quantification, Sensitivity Analysis, and Prediction およびトラック 12: Validation Methods の 26 件であった。ただし熱流動関係では、トラック 4: Verification and Validation for Fluid Dynamics and Heat Transfer の 19 件に、トラック 7: Verification for Fluid Dynamics and Heat Transfer の 12 件を加えると合計 31 件となり、熱流動関係の発表が一番多いと言える。その他 V&V 標準作成活動 (トラック 11) で 13 件、医療機器の標準 (V&V40) に関するセッションも設けられていた。

なお、V&V2013 では V&V2012 に比べセッション数が 3 件、論文数で 23 件減少している。

### (1) プレナリー

プレナリーセッションでは、新たに標準作成活動を開始した医療機器の標準 (V&V40) に係る発表を皮切りに、ASME の標準作成活動に最初から関わってきた W.L. Oberkampf 氏 (サンディア国立研究所で長年実験および解析に従事) による V&V のこれまでの経緯および今後のチャレンジ、P.J. Roach 氏 (CFD の権威) による計算物理とその妥当性検証の考え方、最後に ORNL の D. B.Kothe 氏による CASL (軽水炉の高度シミュレーション: Computation for Advanced Simulation of Light Water Reactors) の講演があった。

Oberkampf 氏の発表では、米国電気学会 (IEEE) に始まり、米国原子力学会 (ANS)、防衛省 (DoD) の V&V ガイドの歴史を述べ、シミュレーションのゴールは不断の改善による信頼の獲得であり、その手段として、モデリング・シミュレーション (M&S) の V&V が重要であること、また、それへのチャレンジ要素として、V&V 計画、妥当性確認の指標、結果の外挿性、対象の予測性能における課題について述べた。この報告は、原子力安全分野での適用を図る学会が目指す方向性に合っており、

今後の標準作成活動を進めていく上で大いに参考になった発表であった。

一方、CASL の発表では PWR プラント (1/4 炉心) を可能な限り直接モデル化する大規模シミュレーション (3 億 3,400 万メッシュ!) の例を示し、今後の米国における出力増強、寿命延長、高燃焼度化等へのシミュレーション適用能力を実証させる意欲を示した。これもシミュレーションが目指す一つの方向性であろう。

なお V&V2013 では、医療機器の (M&S) V&V、宇宙船設計における不確かさと余裕の定量化手法、原子力プラントの最適手法 + 不確かさ (BEPU: Best Estimate Plus Uncertainty) 手法における V&V など、2012 同様、題材が多彩である。発表資料の一部は WEB で閲覧可能である<sup>7)</sup>。

### (2) 熱流動分野

聴講した熱流動分野の発表では、ASME V&V 標準に従って解析および実験を行い、その誤差、不確かさを評価して解析コードの信頼性および妥当性を確認したという内容が多く、既存解との比較による「コード検証」、メッシュ数依存による数値誤差を評価する「解検証」、さらに試験結果との比較を実施しており、標準が現場で活用されているという感じを受けた。

### (3) 原子力関連分野

原子力分野での V&V 適用については、軽水炉、試験施設を対象にしたシステムコードの V&V、CFD コードによる軽水炉、溶融塩炉、ガス炉、試験施設等の局所現象の V&V、ナトリウム冷却炉における火災解析コードの V&V、検証用データベースの整備等、適用対象もコードもバラエティのある内容であった。ここでは、熱流動分野でのアプローチのように V&V 標準を単純に適用するだけでは解決が困難であり、特にシステムコードの V&V においては、不確かさを定量化するために CSAU (Code Scaling And Uncertainty quantification) や BEPU 手法を適用し、パラメータの選定には重要な現象を同定し、階層付ける PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table) を用いるオーソドックスな手法が多かった。

### (4) V&V 標準の開発

V&V 標準開発のセッションでは、米国の連邦航空局 (FAA) による規制機関における解析認証における V&V の考え方、商用コード (ANSYS) に対する V&V 標準、数値溶接力学における V&V 標準化、フランスの原子力事業者 (EDF) における安全評価のための V&V、当学会の V&V ガイドの構想、日本非線形 CAE 協会 (JANCAE) の構造解析分野の V&V 活動、米国原子力分野の新たな V&V 標準案 (ANS 10.7)、自動制御に組み込まれたソフトの V&V、原子力システム解析分野を対象とする ASME V&V30 の開発状況および信頼性標準 NQA-1 と CFD・伝熱標準 ASME V&V20 との関係等、広範囲で



非常に興味のある発表が多かった。

### 3. シンポジウムのまとめと今後の展望

V&V2012 および 2013 では、広い分野の M&S・V&V の実践活動の状況および標準策定の情報が得られており、シミュレーションの信頼性確保に重要な会合として今後も注目する必要がある。

## Ⅲ. 火災解析モデルの V&V に関する報告書 (NUREG-1824)

### 1. 報告書の概要

NUREG-1824「原子力発電プラントへの適用のために選択された火災モデルの検証と妥当性確認」は、NRC と EPRI が共同で原子力発電所の申請で一般的に使用されている 5 つの火災モデルの検証と妥当性確認 (V&V) (以下「同研究」という。)を行い、その結果を取りまとめたものである。同研究では V&V の評価対象火災モデルとして、多数のモデルの中から、性能および数値的・数値的な取り扱いに関して広い範囲を代表する 5 つの火災モデルを選択し、各々について検証を行い、火災実験データと比較することによって予測性能を定量化し V&V を行っており、その詳細は報告書の分冊としてまとめられている。

なお、以降の図表は同報告書の図表を基に和訳して整理したものである。

### 2. 火災モデルの V&V のアプローチ

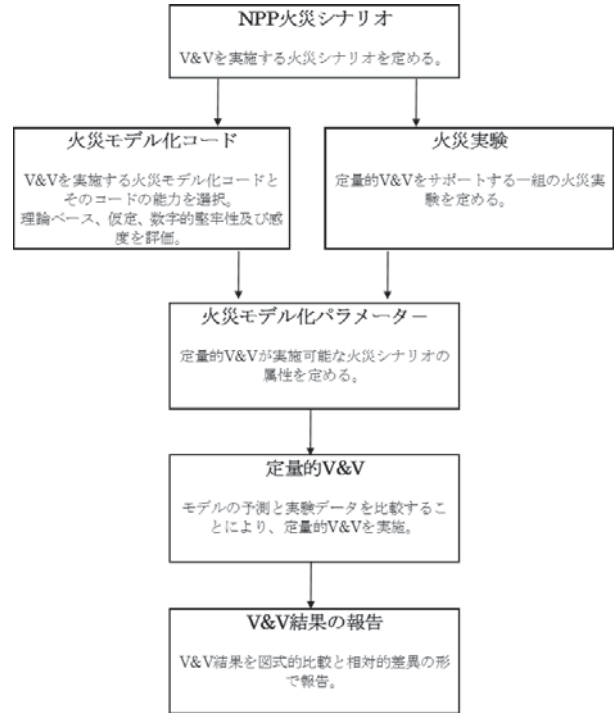
火災モデルの V&V の確立されたプロセスとして、米国材料試験協会 (ASTM) E1355「決定論的の火災モデルの予測能力評価のための標準ガイドライン」がある。同研究では ASTM E1355 と整合の取れた定量的 V&V 研究とするために第 1 図に示すアプローチが採用された。同図からはモデル検証がどこで実施されているのか明確でないが、5 つの火災モデルの各々について分冊の 4 章で詳細が示されている。

#### (1) 火災モデル

選定された火災モデルの特徴、作成者およびモデルの仮定を第 1 表に示す。同表からモデルは EXCEL ベースの 2 つの工学的計算ライブラリー (FDTs (NRC), FIVE (EPRI)), 2 つの 2 ゾーンモデル (CFAST (米国国立標準技術研究所: NIST), MAGIC (フランス電力公社: EdF)) さらに CFD 手法に基づくフィールドモデル FDS (NIST) と多彩なモデルを評価対象にしているが、後に述べるように簡易モデルであっても評価対象パラメータを限定すれば、適用範囲を満足する性能を有することがわかる。

#### (2) 実験

解析結果の妥当性確認に使用された実験は下記の 3 試験シリーズである。試験シリーズには、多くの実験が含ま



第 1 図 火災モデルの V&V 研究アプローチ

第 1 表 選定された火災モデルの特徴,作成者および仮定

モデル	FDTs	FIVE	CFAST	MAGIC	FDS
作成者	NRC	EPRI	NIST	EdF	NIST
タイプ	Excel	Excel	2ゾーンモデル	2ゾーンモデル	CFD
モデル・仮定	主として下記の文書に準拠しており、使用している支配方程式及び仮定は最新の火災現象計算手法として科学界で一般的に認識されている。 ・NFPA火災防護ハンドブック ・SFPA火災防護工学ハンドブック	支配方程式は火災現象に対するさまざまな側面の推定に使用される式のライブラリであり、主に下記の文書に準拠している。 ・SFPA火災防護工学ハンドブック	支配方程式 ・質量保存則 ・エネルギー保存則 ・ベルヌーイの式(換気口での流速) 仮定 一区域を2ゾーンに分割し、各ゾーン内では均一な特質(温度、ガス濃度)を仮定	支配方程式 ・質量保存則 ・エネルギー保存則 ・ベルヌーイの式(室開口部での流速) ・理想気体の法則 仮定 部屋を2ゾーンに分割(高温ガス層、下部層)し、各ゾーン内では均一の温度、密度を仮定	支配方程式 流体力学モデル:ナビエ-ストークス方程式 燃焼モデル:混合比燃焼モデル 放射熱伝達:放射熱輸送方程式 形状:直線グリッドによる境界条件:全ての固体表面で熱境界条件と材料の燃焼挙動についての情報を割り当て

NRC : 米国原子力規制委員会

EPRI : 米国電力研究所

NIST : 米国国立標準技術研究所

EdF : フランス電力公社

まれており、このうちのごく一部が同研究のために選ばれた。

#### ①ファクトリーミューチュアル研究所およびサンディア国立研究所 (FW/SNL) 試験シリーズ

1980年代の中頃にNRCの資金提供の下に、サンディア国立研究所にて実施された一連の火災試験。試験施設は実規模大の部屋で、典型的なNPPで運用されている換気率を模擬するように設計された。

#### ②規格基準局 (NBS) 試験シリーズ

3室の続き部屋にて、異なった9組の実験の各組を数回繰り返して合計45の試験を実施した。続き部屋は、比較的小さい2つの部屋と短い連絡通路経由でつながっている長い廊下で構成されている。廊下と外部との間の

扉の開閉状況等に着目して試験を実施した。

③国際共同火災モデルプロジェクト(ICFMP)ベンチマーク演習試験シリーズ

ICFMPは火災モデルの実証のために異なる機関の試験結果を相互に利用するために計画された、相互に関連するプロジェクトである。試験シリーズは、ベンチマーク演習(BE)と呼ばれる。このV&V研究には、BE #2, 3, 4および5の実験データが含まれている。それぞれの簡単な説明は次の通りである

(3) 火災モデル化パラメータの選択

火災モデル化の観点からは、ほとんどのNPPは同様の構成と火災ハザードを有していることから、火災シナリオは同様のモデル化パラメータにより特性付けられている。その結果、同V&V研究プロジェクトチームは、以下の典型的なNPP火災モデル化パラメータを選定した。

①高温ガス層温度

火災プルームにより部屋の上部に移送された高温ガスが蓄積する高温ガス層の温度。発火源から離れた標的の損傷の評価に重要。

②高温ガス層高さ

標的が高温ガス層の影響範囲にあるかを判別

③天井ジェット温度

火災プルームの流れが天井に衝突する時にできる、高温ガス層より温度の高い浅い層

④プルーム温度

発火源上に上昇する浮揚性流で天井ジェットと高温ガス層より温度が高い

⑤火炎高さ

標的が発火源近くに配置されている場合に重要

⑥標的に対する放射熱流束

火災事象における重要な熱伝達モードの一つ

⑦標的に対する総熱流束

対流熱伝達による標的の温度評価に重要

⑧壁に対する総熱流束

部屋の熱バランス評価に重要な壁、床および天井を通じて伝達する熱流束

⑨壁温度

境界を通過する熱損失の決定に必要な標的の温度  
火災モデル化解析の最も一般的な目的パラメータ

⑩標的の温度

火災モデル化解析の最も一般的な目的パラメータ

⑪煙濃度

運転員が火災時に措置を実施する場合に重要

⑫酸素濃度

燃焼挙動に直接的に影響を与えるパラメータ

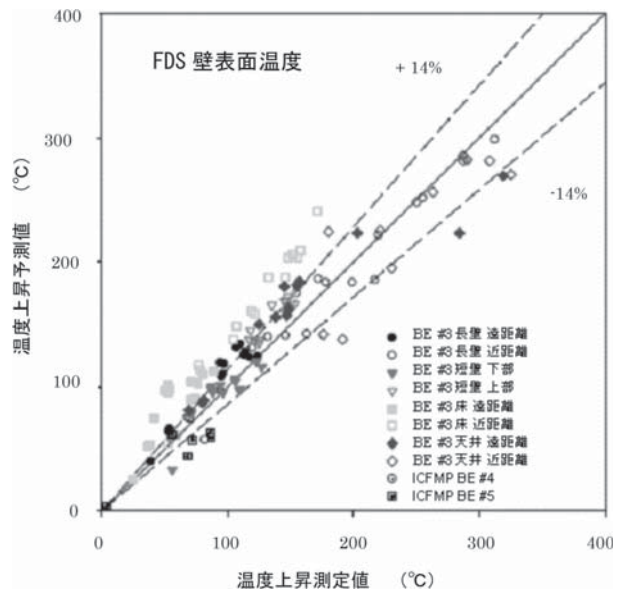
⑬室内圧力

隣接する区画への煙の移動評価に必要

第2表にそれぞれの火災モデルの上記パラメータ評価性能を示す。

第2表 火災モデルのパラメータ評価性能

火災モデル化特性	火災モデル				
	FDT <sup>8</sup>	FIVE	CFAST	MAGIC	FDS
高温ガス層温度	有り	有り	有り	有り	有り
高温ガス層高さ	有り	無し	有り	有り	有り
天井ジェット温度	無し	有り	無し	有り	有り
プルーム温度	有り	有り	無し	有り	有り
火炎高さ	有り	有り	有り	有り	有り
標的に対する放射熱流束	有り	有り	有り	有り	有り
標的に対する総熱流束	無し	無し	有り	有り	有り
壁に対する総熱流束	無し	無し	有り	有り	有り
壁温度	無し	無し	有り	有り	有り
標的の温度	無し	無し	有り	有り	有り
煙濃度	無し	無し	有り	有り	有り
酸素濃度	無し	無し	有り	有り	有り
室内圧力	無し	無し	有り	有り	有り



第2図 FDSによる壁温度の予測と試験実測値との比較例

(4) 妥当性確認と適用

火災試験とモデルの予測からの推定ピーク値を用いて前項(3)に列挙したパラメータに対して(1)式により相対的差異が計算された。

$$\varepsilon = \frac{\Delta M - \Delta E}{\Delta E} = \frac{(M_p - M_o) - (E_p - E_o)}{(E_p - E_o)} \quad (1)$$

ここに、 $\Delta M$ :モデル予測のピーク値( $M_p$ )と周囲の値( $M_o$ )の間の差異

$\Delta E$ :実験結果( $E_p$ )と周辺の値( $E_o$ )の間の差異

FDSにおける壁温度の予測と試験による実測値との比較例を第2図に示す。

また、選定された各火災モデルの妥当性を試験結果との比較に基づき評価した結果を第3表に示す。同表に示す判断基準から各火災モデルの性能とパラメータの予測適用の妥当性がV&V研究によって定量的に判断可能となることが重要である。

第3表 火災モデルのパラメータ評価性能

パラメータ	火災モデル				
	FDTS	FIVE改訂1	CFAST	MAGIC	FDS
高温ガス層温度 (上層部温度)	黄	黄	緑	緑	緑
高温ガス層高さ(「層インターフェース高さ」)			緑	緑	緑
天井ジェット温度(「標的」/ガス温度)		黄		黄	黄
ブルーーム温度	黄	黄			緑
火災高さ	緑	緑	緑	緑	黄
酸素濃度			緑	緑	緑
煙濃度			黄	黄	黄
室内温度			緑	緑	緑
標的溫度			黄	黄	黄
放射熱流速	黄	黄	黄	黄	黄
総熱流速			黄	黄	黄
壁温度			黄	黄	黄
壁に対する総熱流速			黄	黄	黄

分類定義：以下の二つの基準に基づいて分類

基準1：モデルの物理的過程が実施する計算に適しているか？

基準2：実験およびモデル入力データの不確さを超えるような計算上の相対差異があるか？

緑：両方の基準(即ち、モデルの物理的過程が行われる計算に適していることおよび計算された相対差異が実験の不確さの範囲内かその近くにあること)を満足している。

黄：基準1を満足するが、結果が実験の不確実性の範囲外にあることからモデルの適用に注意すべきである。

赤：第一の基準が満たされない場合、この特定の火災モデルは使用すべきではない。(実際にはこのようなモデルは無かった。)

無色：モデルの機能に該当しない。

### 3. 結果と結論

- (1) 火災防護に関する意志決定のために火災モデルを用いるには、モデルの限界と予測能力をよく理解する必要がある。
- (2) NRC, EPRI および NIST が実施した V&V 研究によって、5つの火災モデルの予測能力について、貴重な知見が与えられた。
- (3) V&V で確認された火災モデルの予測能力は、モデルによる予測と該当する実験測定値の間の定量的な相対差に基づいたものである。この予測能力は、試験における測定値の不確かさも考えに入れたものである。
- (4) ただし、考慮した実験は、NPP で見られる配置を代表したものであるが、ユーザは目的のシナリオに適用できるか否かを、別途決めなければならない。

## IV. おわりに

本解説シリーズでは、第1回で我が国における国産コード開発プロジェクトに関連して、国内のソフトウェア等に関するニーズを調査し抽出するとともに、モデリング・シミュレーション高度化対象技術の全体像を把握したうえで専門家の意見を踏まえ優先度付けを行った。

また、第2回では、V&Vの重要な要素である実験について、解析コードに合った情報量を持つ精度保障付実験データ取得手法開発とデータベース構築が、国産コードを世界戦略として開発するための前提であることを述べた。第3回の本稿では、V&Vの実施の国際動向を述べ、適用の具体例として原子力施設の火災モデルに関する報告書を概括した。

原子力分野はプラントの事故時の挙動、さらに自然災害を起因とする外的要因に対する影響など、シミュレーションのための解析コードに対するニーズがますます高まっており、日本の優れた知見の集約物としての国産解析コード開発は必須であり、早急に着手する必要がある。その解析コード信頼性を確保するための考え方、手順、確認方法等をガイドとして標準化するため、当学会の標準委員会基盤応用専門部会シミュレーションの信頼性分科会が活動中であり、現在、来年度中の完成をめざしてガイド素案の内容について審議中である。これらの情報がモデリング・シミュレーションの高度化の参考になれば幸いである。

### － 参考資料 －

- 1) Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics (V&V10 - 2006).
- 2) Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer (V&V20 - 2009).
- 3) Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations, AIAA-G-077-1998, Reston, VA, 1998, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- 4) Guidelines for the Verification and Validation of Scientific and Engineering Computer Programs for the Nuclear Industry, ANS, 1987 (R1998), ANS-10.4-1987.
- 5) EPRI 1011999 and NUREG-1824, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications," US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, May 2007.
- 6) <http://www.aesj.or.jp/sc/committees/c-a2sc.html>.
- 7) <http://www.asmeconferences.org/VVS2012/CallForPapers.cfm>.

### 著者紹介

笠原文雄 (かさはら・ふみお)

原子力安全基盤機構

(専門分野/関心分野) 原子力プラントの安全解析, シミュレーションの信頼性, 火災防護





## 報告

原子力シニアネットワーク連絡会(SNW)  
第14回シンポジウム

## 原子力は信頼を回復できるか？

原子力シニアネットワーク連絡会 針山 日出夫

今年8月3日、東京工業大学デジタル多目的ホールにてSNW主催の第14回シンポジウムが開催された。これまでは、原子力の有すエネルギー安全保障上の普遍的有利性を根拠とするわが国のエネルギー政策や安全確保の在り方などに着目したSNWシンポジウムの企画を多く手がけてきた。一方、東電福島第一原発事故で国民の反原発感情は決定的に増幅され、今日になってもなお多くの国民が原子力の安全性、信頼性に対し懸念を抱き、原子力発電所の再稼働に違和感や疑念をもっている現実がある。今回のシンポジウムでは、一般市民と原子力界の間のコミュニケーションや安全認識などにまだまだギャップがあることを真摯に受け止め、原子力の利活用にはまず国民の信頼回復が最優先との視点に立って国民目線のテーマ設定を行った。原子力が国民の信頼を損ねた原因は何か、信頼回復には何が必要か、原子力界は何を反省すべきか等を踏まえて今後の原子力の進め方について各界の有識者から貴重な意見を頂いた。今回はこれまで最多の250名の原子力関係者と市民の方々に参加いただき盛会裏に終了した。

## 1. シンポジウム概要

斎藤伸三 SNW 会長の開会挨拶の後、JR 東海会長葛西敬之氏による「日本のエネルギー政策～原子力の役割」と題する基調講演が行われた。要旨は2.項に後述する。

引き続き、「原子力の信頼回復」というテーマで小出重幸氏(日本科学技術ジャーナリスト会議会長)を座長に、以下5名のパネリストによるパネル討論が行われた。姉川尚史氏(東京電力常務)、岡本孝司氏(東京大学大学院教授)、中村多美子氏(弁護士)、西澤真理子氏(リテラジャパン代表)、金氏顯氏(エネルギー問題に発言する会、元三菱重工業)。パネルの概要は3.項に記す。閉会の挨拶は金子熊夫エネルギー戦略研究会会長が行い、約250名の参加者を集め盛会裏に終了した。

## 2. 葛西敬之氏の基調講演要旨

葛西氏は、旧国鉄時代の経験を振り返り、自分が正しいと信じることを貫くためにリーダーは如何にあるべきかについて、警世の箴言を開陳、参加者の共感を誘った。講演の冒頭で①多数の死者を出した三河島事故や鶴見事故を乗り越えて鉄道の安全運行基盤構築に注力しつつ1964年の東海道新幹線の開通にこぎつけた先輩諸兄の改善努力の足跡と②肥大化した組織の固定費に呻吟し経営

の崩壊寸前にあった国鉄を分割民営化という合理化達成で救った実績を紹介した。この実績に照らして非日常的な厳しい状況下での指導的立場にある者の行動の要諦について、リーダーの覚悟と組織を牽引する覇気と見識、物事を進めるための仲間との連繋の重要性を強調した。

また、輸送サービス事業とエネルギー供給事業との類似性に言及して、公共事業では行政と政治から多くの影響を受けるがサービスの停止は組織にとっても受益者にとっても致命的であり回避せねばならぬと指摘。更に最近のエネルギー危機と原発停止による国富の流出に鑑み、この状況を招いた政治姿勢とマスメディアの報道ぶりについても『東電福島の事故で、政権自体がパニックに陥り、それが国民にまで伝播してしまったことは全く不幸なこと。マスメディアは科学的な根拠を示さず放射能の恐怖ばかりを喧伝した。また、大衆迎合主義で原発を全面停止してしまったことは国を誤らせたもので政治史に残る汚点』との指摘を行った。

最後に、原子力の役割について、『原子力発電は安全にマネージできること、放射能とは日常生活の中で共存し有益に活用できるものであること、日本の産業は原子力を活用した安価な電力なしに成り立たないこと』について世界の様々な権威者の知恵も借りて冷静な議論を進めることが肝要であり、現政権は民主党政権時代のエネルギー政策の棚卸をすることが喫緊の課題であると締めくくった。

*The 14th Nuclear Symposium hosted by Nuclear Senior Network, Atomic Energy Society of Japan : Hideo HARIYAMA.*  
(2013年 11月10日 受理)

### 3. 原子力の信頼回復に係わるパネル討論

パネル討論は、まず小出座長によるテーマ設定の背景説明と討論の視点についてのリマークがあり、続いて各パネリストから各々の経験や立場でのテーマに照らしたキーノートの説明があった。そのあと、座長から信頼回復に関わる様々な論点についてパネリストの意見を求める形で効率的に討論が進んだ。最後に、座長から本日の討論のまとめが示された。以下にこれら討論の要点を列記する。

#### <小出座長によるリードリマークの要点>

英国では国家的緊急時に首相直属の首席科学顧問が専門家の意見を横断的にまとめて政府に科学的助言を与え、それを踏まえて政府が国民へ分かりやすいメッセージを発信する仕組みになっている。日本はこれを学ぶべき。国家的緊急時の際には権威者がまず決断し情報を発信することが重要。正しい情報をタイムリーに出さなければ不安が増幅し科学的に根拠のない流言が拡散し社会が著しく混乱する。科学と社会を結びつけるにはコミュニケーションの視点が重要。信頼回復のためには、情報は誰のために、何のために伝えるのかという根本に立ち返って国民の理解を広める情報提供努力と効果的なコミュニケーションの仕組み作りの知恵と努力が望まれる。

#### <各パネリストのキーノートの視点：発言順>

- 原発の安全性、信頼性向上に取り組んだ歴史と一定レベルで慢心したことの産業界としての反省(金氏氏)
- 東電福島事故の原因・対策・反省の総括と東電としてのこれからの改革の取り組みについて(姉川氏)
- 原子力は一体何が問題か？安全な原発の構築は可能、信頼回復には俯瞰的な粘り強い説明が肝要(岡本氏)
- 原子力関係者は相手との信頼関係を構築する努力を惜しむな。そのために、誰に何を分かってもらいたいかを、そのために何が必要かを真剣に考えるべし(中村氏)
- 安全を安心につなげるために何が必要か？それには真の信頼関係構築が大切。リスクコミュニケーションでは聴く側より伝える側の問題の方が大きい(西澤氏)

#### <パネル討論での主なディスカスポイント>

- 国民目線での原子力界(産業界、行政、規制)や原子力専門家への信頼感が育まれない根本原因は何か？
- マスメディアの報道姿勢は如何か？断片だけを誇張して、冷静に全体像を把握できる情報を流しているか？
- 国や事業者は国民の立場で不安解消のための打ち手について国民に納得ゆく説明をしているか？
- イメージや印象論で安全安心を判断する一般市民に対する伝える側の姿勢と努力は果たして十分か？
- 原子力規制委員会の安全判断の硬直性や審査業務の閉鎖性、非効率性が信頼回復の一つのポイントか？
- 産業界のさらなる安全向上に向けた取り組みは？
- 国民のリスクリテラシーの醸成が必要ではないか？
- 信頼回復のための顔が見える対話が重要では？

- メディアの顔が見えないのは不気味では？

- メディアとの付き合い方や情報提供の工夫が必要？

#### <小出座長によるパネル討論のまとめ>

原子力発電所は科学技術の集大成の結晶であるが、大事故を起こしたために社会からの信頼が失墜した。科学技術の問題を社会にうまく伝えることが出来なかったために技術領域を超えて社会の問題が拡大した。原子力の信頼回復のためにはこのトランスサイエンス領域での有効なコミュニケーションを進めることが肝要。このためには現代社会ではリスクゼロはないことを伝え、科学技術には不確実な部分が必要存在することも市民に理解してもらおう努力が重要。そのための新しい手法として、マスメディアではなく、顔の見える範囲を対象としたミドルメディア手法も有効かと期待する。このやり方なら意見対立している問題であってもお互いの意思疎通が容易になり、生活言語で科学と社会をつなぐことがより容易になる。また、分野を超えて理解し合う風土と哲学の醸成とその実践も重要である。

### 4. シンポジウムを終えての報告者所感

今回のシンポジウムは多彩な登壇者とテーマ設定が時宜を得ていることから大盛況であった。

シンポジウムでは信頼回復のための実践的なリスクコミュニケーションの重要性が指摘された。しかし、「絶対安全でなければ不安全」と感じる感覚的ゼロリスク志向の国民に対するリスクコミュニケーションの定着は容易ではなく、その成果を辛抱強く待つ姿勢も肝要であろうと思量する。原子力エネルギーの利用は資源に恵まれないわが国にとっては極めて重要であるが、残念ながら国論は割れている。この理由の一つに、歴代の政府が原子力の利活用を強く覚悟し腹を括らなかつたことと、原子力の便益とリスクについて真剣且つ丁寧に国民に説明してこなかったことが考えられる。

更に国民が理解しやすく納得できる原子力発電所の安全目標が設定されていない現状ではリスクコミュニケーションが空回りすることも危惧される。原子力の利用によるリスクの上限を欧米のごとく最悪リスク(死亡リスク)との対比で具体的に示すことが必要ではないだろうか。その上で、これまで真剣にリスクコミュニケーションを実践してこなかった政府行政機関と産業界は怠慢を反省し、真摯な取り組みに注力することが大切である。

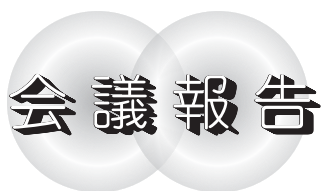
#### 著者紹介

針山日出夫(はりやまひでお)

原子力シニアネットワーク連絡会  
対話幹事

(専門分野/関心分野)原子炉保全工学、  
核燃料設計製造技術/エネルギー安全保障  
政策





## 燃料サイクル国際会議 GLOBAL 2013

GLOBAL 2013: International Nuclear Fuel Cycle Conference  
2013年9月29日～10月4日 (ソルトレークシティ, 米国)

2013年9月29日から10月4日までの6日間、米国ソルトレークシティで将来の燃料サイクルおよびこれに関連する高速炉や新型炉、再処理、廃棄物処理/処分等に関する国際会議「GLOBAL2013」が開催された。本会議は1993年から2年ごとに開催され(日本では1997年に横浜、2005年につくば、2011年に幕張で開催)、今回で20年の節目を迎え、主催者発表によれば、およそ380名が参加したとのことであった。

冒頭に米、仏、英、日、韓、IAEA、OECD/NEAの各国および国際機関から合計10件のプレナリー発表が行われた。エネルギーセキュリティや温暖化対策の観点から、原子力発電の重要性は変わらず、これまで以上の安全性や効率の向上が重要であること、また様々なオプションがあるものの、多くの国で燃料サイクルの開発が進められていることなどが報告された。日本からは「福島事故からの回復に向けた検討」および「日本における燃料サイクル技術の現状」についての2件の報告があった。

技術報告は、原子力利用・持続性、現行燃料サイクル技術、革新燃料・炉心、新型燃料サイクル、核不拡散技術、国際協力およびPAに関する内容の口頭発表(326件)とポスターセッション(32件)があった。(分類は報告者による。件数にはキャンセル分を含む。)発表は複数のセッションに分かれて同時並行的に行われたが、半数以上は、新型燃料サイクルに関するものであった。

ここでは、本会議の主要テーマである将来の「再処理や新型炉、廃棄物処理/処分技術」に関する技術報告を中心に会議の概要を紹介したい。

### ○新型燃料サイクル技術

各国の将来計画や先進/改良湿式法または乾式法といった革新的な再処理技術に関する多くの報告があった。AREVA(仏)からは、ウラン燃料以外の燃料、例えば軽水炉MOX燃料や高速炉MOX燃料の再処理は“技術的挑戦”であること、Puの増加に伴って溶解しきれないPuO<sub>2</sub>が増加し設備容量も問題となるため、酸化溶解ユニットを有する新たなせん断・溶解建屋(TCP施設)の建設を検討していることが示されるなど、現実に則した開発計画が紹介された。

### ○革新燃料・炉心技術

UO<sub>2</sub>、MOX、窒化物、金属、熔融塩燃料など様々な新型燃料やトリウム炉、金属冷却高速炉、加速器駆動型炉、超臨界圧炉、重水炉など、多岐にわたる炉型についての開発が報告された。2013年3月に高速炉に関する

国際会議(FR2013)がフランス・パリで開催されてから、間もなかったことが影響してか、フランスによる高速炉開発に関する発表は、Amを添加したUO<sub>2</sub>ブランケット燃料からのガス放出やスエリング評価試験の紹介、MA添加燃料の挙動解析コードの検証など、少数に留まった。

日本の機関からは、福島第一原子力発電所での事故に絡み、燃料デブリの特性や廃炉に向けた技術開発に関する最新知見の報告もあった。

会議の最後を飾るクロージングディナーでは、米国INLを中心とする大学、メーカー等によるコンソーシアムで、現在、サブミクロン～炉心レベルまでの燃料挙動を詳細に解析するマルチスケール統合ツール(対象スケールによって、Moose, Bison, Marmotといったモジュールに分割)の開発を進めていることが紹介された。

### ○廃棄物処理/処分技術

AREVA(仏)では、La Hagueのガラス固化設備によって、2012年までに16,000m<sup>3</sup>以上の廃液を約17,000本のガラスキャニスタに転換しているとともに、2010年にはCEA(仏)と共同でガラス研究所LCVを設立し、現行技術の改良や新技術開発などを展開していることが紹介された。

ANL(米)では、乾式再処理による金属廃棄物を詳細に分析し、MoとTcがbcc相であることが報告された。LANL(米)では、先進湿式再処理で分離されるTcとPUREXから排出される不溶解残渣Tcの金属固化を検討しており、低温プレス後に1,550℃まで加熱することで、10%のTcがNi母材と均質に混合することなどが報告された。さらにSANL(米)で実施している、再処理工場から放出されるオフガス中のヨウ素を吸着した銀-モルデナイトを低温焼結ガラスで固定化する研究について、ヨウ素の揮発や浸出性などの重要な要素技術データについて報告された。

本会議は、燃料サイクルに関する最大規模の国際会議であり、その中で報告者が聴講できたものは、ごく一部に限られる。それでも、将来の原子力利用の行方を把握する上で有用と思われる各国・機関の政策や技術動向、将来計画などの情報が入手できる良い機会であった。国際的には、今後も原子力発電の果たす役割は非常に大きいと言え、そのための確実な技術開発とデータの蓄積、国際情勢把握の継続が望まれる。

(電力中央研究所・太田宏一、  
2013年11月1日記)



## 新刊紹介

### 熔融塩の物性 イオン性無機液体の構造, 熱力学, 輸送現象の微視的側面

田巻 繁著, 328p. (2013.9), アグネ技術センター, (定価 4,200 円)

ISBN978-4-901496-69-8 C3043

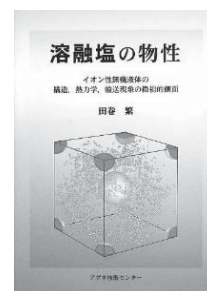
熔融塩とは、塩化ナトリウムに代表される塩を融点以上で溶解した液体であり、反応媒体や熱媒体として工業的に利用されている。工業利用の代表例としては、アルミニウム製錬における電解浴としての利用が挙げられる。また近年では、エネルギー・環境技術への応用を目指し熔融塩を利用した様々な研究開発が行われており、今後、伝熱・蓄熱、燃料電池、2次電池、廃棄物処理、金属精錬・リサイクル、機能性材料創製等の分野での応用がますます盛んになると思われる。さらに、熔融塩は耐放射線性が高いという特徴をもつ。そのため、原子力分野においてもその特徴を生かした利用が大いに期待されており、原子燃料サイクルや分離・変換シナリオにおける使用済原子燃料の乾式処理や、熔融塩炉に関する研究開発が続けられている。

上記の様々な熔融塩の利用、さらには新たな応用分野の開拓には、本書のタイトルである熔融塩の物性の理解が必要不可欠であることは言うまでもない。しかしながら、これまでも熔融塩に関する書籍がいくつか出版されているものの、本書のようにその物性を詳細に解説した書籍はなかった。

本書では、熔融塩の熱力学から始まり、熔融塩における構造、電気伝導、イオンの拡散、熱伝導および粘性について、理論を中心に、実験、解析からシミュレーションまで分かりやすく解説されている。本書で読者は、熔融塩の物性を基礎から系統的に学ぶことができるであろう。熔融塩を対象としている、またはこれから対象にしようとしている研究者には、本書に挙げられている参考文献等と照らし合わせながら、さらに深い理解を得ることをお勧めする。

本書が広く活用されることで、熔融塩の実社会での応用がますます活発になることを期待する。

(電力中央研究所・村上 毅)



### 目安箱への投書のご案内

日本原子力学会 編集委員会

編集委員会は、読者・会員・投稿者・査読委員等からのご意見、ご提案をいただき、よりよい学会誌・論文誌編集活動を目指すべく、意見窓口「目安箱」を設けております。

- ・学会誌・論文誌の企画、編集、掲載記事や論文に関すること。
- ・論文査読方針・審査方針およびシステムに関すること\*
- ・新刊図書の書評の推薦

などについてのご意見・ご要望がございましたら、学会ホームページ

<http://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>, または E-Mail : [aesj2005meyasu@aesj.or.jp](mailto:aesj2005meyasu@aesj.or.jp)

にてお寄せください。編集委員会にて検討後、担当者より回答させていただきます。

学会誌、論文誌の編集活動への皆様の積極的なご参加をお願いいたします。

\*個々の査読コメント等に関するお問い合わせ、ご意見等については受け付けかねますので、ご了承ください。