

# 低炭素社会を 持続させる 原子力発電

電力中央研究所「電気と環境のフォーラム」

## 1 原子力発電が低炭素社会を担い続けるために

(1) 新たな原子力技術パラダイム  
低炭素社会実現に向け、低炭素排出電源による電力化を進めることが重要であることをこれまでの連載で述べてきた。本連載第5回では、「地球環境問題への対応」と「エネルギーセキュリティ確保」の両立に大きなポテンシャルを有する原子力発電に期待される役割と課題に関して、当面2050年においてCO<sub>2</sub>排出量の60%削減を達成するためのゼロ・エミ

ッション電源の大幅な拡大、具体的には9000万kW(90GW)の原子力発電設備容量の実現に焦点を当てて述べた。

大容量の電力供給が可能な低炭素排出電源である原子力発電は、その研究開発と計画の実現に長い時間がかかるという特徴を持つ。一方、技術開発の課題以外に、ウラン需給(エネルギー需給)、核拡散にかかわる国際政治動向、社会経済情勢などの影響要因があり、これらの相対的に短い時間変動に対しては機敏に対応する必要がある。また、本連載で検討している

電力化へのシフトによる必要発電設備やそれに見合う燃料サイクルの設備は、これらに関連する技術開発の進ちょくを見極めつつ中長期的に周到に整備していく必要がある。

原子力技術は、単に50年のCO<sub>2</sub>排出削減という「瞬間風速的な目標」の達成にとどまらず、ひとたび築き上げた「低炭素社会」を安定的に持続させるための柱であり続けなければならない。そのため、原子力技術体系は、上記の多様な時間特性を有する要因を相互に調整していくだけでなく、

「低炭素社会」に求められるであろう新たな技術規範、言うならば「新たな原子力技術パラダイム」ののつとつた特性を具備した上で、社会に恒常的に受け入れられていく必要がある。

原子力発電設備容量を維持していく上では、21世紀後半からは高速増殖炉(FBR)を導入し、かつ、円滑な核燃料サイクルを実現していかなければならない。では、そのような技術パラダイムとして何が求められ、現行の技術開発を通じてどのような原子力技術体系を目指していくべきであろうか。



植田伸幸

電力中央研究所 原子力技術研究所 上席研究員 原子炉システム安全領域リーダー、工学博士。原子炉システムの安全設計・評価の研究、特に、金属燃料FBRの安全研究に従事。



北島庄一

電力中央研究所 原子力技術研究所 上席研究員 軽水炉の燃料挙動の評価、被覆管の腐食・水素化にかかわる研究に従事。



坂村義治

電力中央研究所 原子力技術研究所 上席研究員 乾式再処理技術の開発研究に従事。



小林広昭

電力中央研究所 原子力技術研究所 上席研究員 軽水炉からFBRへの移行期サイクル諸量評価に従事。

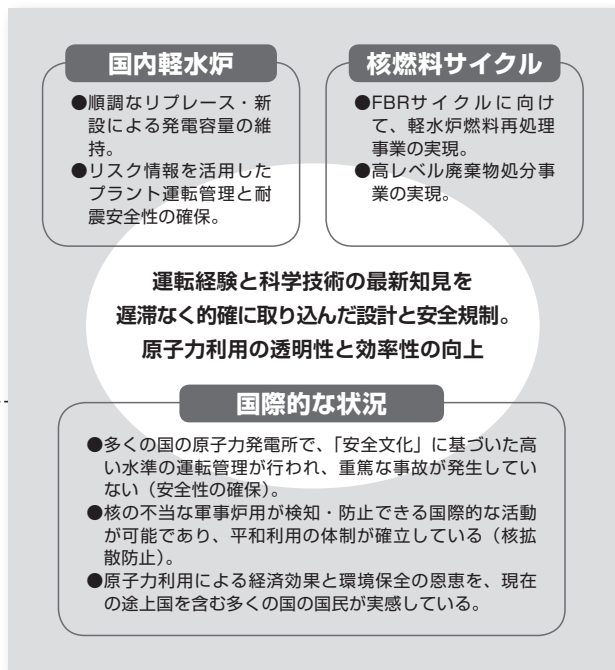


図-1 原子力発電の持続的継続に求められる2050年段階での必要条件

さらにそのためには、現状の技術開発戦略はどのような方向性を指すべきであろうか。

(2) 2050年段階で求められる原子力利用の姿

本連載の第5回で指摘した諸課題である「既設炉の活用」「新規炉の着実な建設」と「核燃料サイクルの確立」は、50年段階の目標を達成するための「必要条件」で

ある。図・1に国際情勢を含めた状況をまとめる。いずれも確実なものにするのは容易なことではないが、地道で不断の努力を行うことでこれらを同時に達成していくことは決して不可能ではない。

図・2に、原子力立国計画ベースの60GWないしはCO<sub>2</sub>60%削減シナリオの90GWを維持するためのリプレースと新設の必要設備増

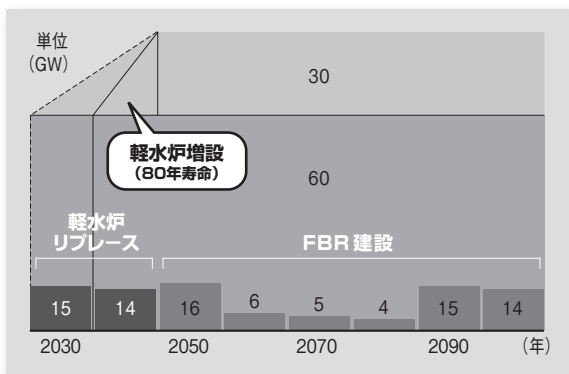


図-2 60GWまたは90GWを維持するために必要な発電設備増大量  
 60GW、90GWにかかわらず、FBRは2050年以降年間平均1.0GWのペースで建設が必要。  
 軽水炉リプレース需要は約30GW。90GW達成するためには30GWの増設が必要。早期に増設を進めたとして、20年間で約60GWの軽水炉建設が必要である。

原子力施設での具体的な安全対策や目指すべき定量的な目標、そしてその定量評価の方法は、運転経験、研究開発を通じた評価技術の進展、計算機性能の飛躍的進歩などにより改良され、かつ、精度の高いものとなってきている。こ

## 2 FBRサイクル時代 に求められる要件

以下では、こうした必要条件が達成されていること（達成しなればいけないことである）を前提として、50年段階以降の原子力利用の姿について述べる。

大量を示すが、年平均1.0~1.5GWの恒常的な建設が必要である。仮に、図・1に示す必要条件の欠落があると、この必要建設ペースが大きく減速する可能性が高い。さらに言えば、基準を超える放射性物質が環境中に放出されるような事故が国内外を問わず発生した場合、あるいは、国際的な核物質管理体制が確立できない場合は、原子力は低炭素社会を支える主役とはなり得ない可能性が高い。

表-1 将来技術に求められる要件  
(番号は以下の節に対応)

要件項目	内容
① 科学的合理性に基づく設計と安全審査	国際標準化された指針類による安全審査の効率化と透明性の確保
② 受動的安全システムの導入	信頼性の向上、安全確保方策の簡素化、シビアアクシデントの防止
③ 環境負荷の低減と自立した燃料供給	発生エネルギーあたりの核燃料の量の極小化 発生廃棄物の質的改善
④ 核拡散抵抗性の極大化	核の転用を未然に防止

うした進展に伴い、規制側は安全規制体系を見直すとともに、並行して事業者も運用の高度化を図っている。また、FBRサイクルによるプルトニウム(Pu)利用が本格化して核エネルギーが世界的に利用される社会では、国際政治的体制に加え、それを保障する技術が求められる。

50年以降も低炭素社会を維持する上で原子力技術に求められる要件を表・1にまとめる。

**(1) 科学的合理性に基づく設計と安全審査**

将来にわたって原子力発電が低炭素社会を持続的に支える上で、安全確保方策の科学的合理性を高めていく努力を続けるべきと考える。

近年米国では、審査時の安全評価に影響を与えない範囲で保全活動を合理化する方策の規制判断にリスク情報(注1)が参照されており、わが国でもその実現に向けた活動が産官学で進められている。また、改訂された耐震設計審査指針[1]において、設計地震動を超えた領域での潜在的リスクを、地震

PSA(確率論的安全評価)による「残余のリスク」として評価し、実行可能な限り合理的にこれを小さくする努力が求められているが、これはリスクを指標として安全性を管理するひとつの具体的な方向性である。

50年段階では、国際標準化された指標の下、リスク情報の活用は現在の活動の延長として十分に定着しているものと考えられるが、継続的に評価体系が内包する不確かさをより精度よく把握する努力が求められる。そして、定量的な安全目標(リスク目標)を指標とした安全確保方策を構築することにより一層の科学的合理性が得られるものと考ええる。

**(2) 受動的安全システムの導入**

次世代軽水炉では国際競争力を持たせる意味で、現行炉に比較して一桁以上低い炉心損傷確率を達成する設計が採用される傾向にある。例えば、米国で型式認定を取得しているAP1000(注2)の安全系では、基本的に非常用電源による動力を必要とせず、自然

循環や重力を駆動源とする受動的安全システムを採用している。現在進められている「日本型次世代軽水炉」プロジェクトで要素技術の開発として設定している6つのコアコンセプトにおいても、免震設計、能動的系統と受動的システムの最適組み合わせ、プラントデジタル化技術が、上記の方向性で設定されているものと考えられる。

08年5月に、米国NRC(Nuclear Regulatory Commission)は、

「Regulation of Advanced Nuclear Power Plants: Draft Statement of Policy」

(73FR26340)を発表した。その内容は、新型炉においては、固有のなしいしは受動的な手段を用いて、運転員の負荷を軽減する長い時間裕度と高い信頼性を持ち、簡素化されて保全が容易な安全系を要求している。

**(3) 環境負荷の低減と自立した燃料供給**

原子力発電を拡大することに伴い放射性廃棄物も増大することとなり、それによる環境への影響を低減する必要がある。また、原子

力発電を安定して持続させるためには、準国産資源であるPuを利用することでウラン資源に過度に頼らない核燃料サイクルを国産技術で確立することも必要である。

環境負荷を抑えるためには、放射性廃棄物の量（環境負荷への影響度を指標とした量）を低減することと、管理、閉じ込め、ないしは固定化することである。使用済み燃料発生量の削減も貯蔵負荷を下げるという面で重要といえる。これには燃料の高燃焼度化を図ることが有効である。

放射性廃棄物の環境負荷影響度の高いものに、核分裂に伴って発生し、長期間発熱するマイナーアクチニド（MA）元素群（NP、Am、Cmなど）がある。再処理により発生する高レベル廃棄物の処分体積は使用済み燃料を直接処分した場合に比べ小さいが、長期的に原子力発電を維持していく上では、さらなる処分負荷の低減が必要である。

必要な処分体積は、廃棄物の発熱量が大きく影響する。現行の

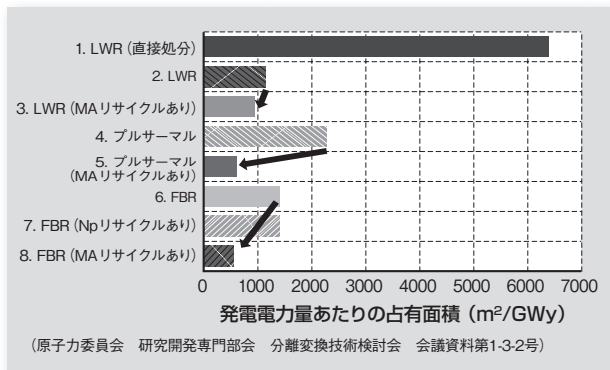


図-3 処分場の廃棄体定置面積 (発電電力量あたり：硬岩・横置き)

再処理において高レベル廃棄物として核分裂生成物（FP）と一括処分されるMAの回収・再利用が、今後の再処理技術の開発における重要なポイントとなる。すなわち、現行軽水炉の核燃料サイクルとの技術的整合性を有する、MAリサイクルシステムを含むFBRサイクル技術を実現することにより環境負荷の低減が実現できる（図・3）。

使用済み燃料の再処理は、資源の有効活用面でも重要である。特にプルサーマルの実施は、Puを含有する燃料の製造・取り扱いを通じ、将来的なFBR利用に向けた貴重な技術を蓄積していくことにもつながる。FBRはウラン資源の消費量を現行の数十分の1に減少させる、原子力発電の理想的な形態のひとつである。

**(4) 核拡散抵抗性の極大化**

IAEA (International Atomic Energy Agency) による核査察体制や核拡散防止条約といった、核の軍事転用を抑制する国際政治システムを確立する一方、技術的に核兵器への転用が著しく困難な燃

料サイクルシステムを構築することが必要である。

これまでも核転用を抑制するサイクルシステムが提案されている。基本的には、核兵器としての核的性質に至らぬような不純物や、取扱いが困難な強い放射能を持った不純物が必然的に混ざるサイクルシステムを構築することである。これを世界標準技術とすることにより、核拡散抵抗性の極大化につながる。

**3 将来の原子力技術体系の実現に向けて**

(1) 受動的安全システムを導入したFBR

電力中央研究所（以下、電中研）の将来炉の研究開発では、例えば、東芝と1988年より設計研究を進めてきたナトリウム冷却小型高速炉4S (Super-Safe, Small and Simple) がある。4Sとは、電気出力1万kW、30年間燃料無交換のナトリウム冷却高速炉（金属燃料炉心）である。その設計具体化の際の設計思想として、①受動的システムによる安全性の確保とシビアアクシ

デントの回避、②原子炉内から動的機器を排除した信頼性の確保、③免震設計による設計の標準化―などを設定した。07年10月より、東芝を代表者として4Sの米国NRC (Nuclear Regulatory Commission) への事前申請 (Pre-Application Review) を行っている。審査の公聴会において、4Sの設計思想は先に示したNRCの要求に合致するものであることが理解された。

受動的安全システムとして、4Sでは崩壊熱除去システムに自然循環を採用している。事前申請では、NRCの一般設計規則 (GDC: General Design Criteria) に沿って高速炉4Sに適合する指針を作成するとともに、今後の開発課題の同定を目的として、国内外の5人の専門家によるPIRT (Phenomena Identification and Ranking Table) を実施してNRCへ提示した。PIRTとは、評価対象が内包する現象に優先順位を付けるものであり、解析コードの検証や、新形炉の安全性検証の際に推奨される。4

SのPIRTでは代表的な過渡現象の安全評価にかかわる現象の影響度合いと、それに関する知見の度合いを同定した。安全性への影響が高いにもかかわらず知見が少ない現象ほど、研究開発の優先順位が高くなる。4SのPIRTでは、安全系の自然循環除熱にかかわる現象がピックアップされ、この分野の研究開発が重要であることを、その結論に至るPIRTのプロセスを含めて事前審査の公聴会で説明した。

21世紀後半から大幅な導入が期待されるFBRの安全評価においても、軽水炉の分野で既に確立しているであろう、最適評価コードを用いた統計的安全評価手法を適用することになるであろう。統計的安全評価手法は、保守性を合理的に扱うことにより、安全裕度を適正化しようとするものである。しかしながら、使用する解析モデルや入力データの不確かさが大きい場合には、その合理化効果には期待できない。

自然循環除熱に関しては、極低流速域での流動特性の把握が重要

とされているが、現状の計測技術では機構論的な解明は困難とされている。今後30年間の技術革新を見通したとき、革新的な計測技術が開発されるか、または、飛躍的な計算機技術の進展によるシミュレーション解析を通して、不確かさの極小化が図られるのではないかと予想する。楽観的に過ぎるかもしれないが、現状の研究開発を積み上げ長期的に取り組むことで達成できるものと考ええる。

現在、99年7月から05年度まで実施された「FBRサイクル実用化調査研究 (FS)」や「もんじゅ」などの成果に基づき、実用化に重点を置いたFACT (Fast Reactor Cycle Technology Development Project: FBRサイクル実用化研究開発) 研究が07年度より進められている。FSで主概念(注3)として選定されたFBRシステム(ナトリウム冷却150万kW2ループシステム)の現設計は強制循環除熱であるが、自然循環の適用性検討が文部科学省公募研究として実施されている。

今後の別の課題として、能動的システムを対象として開発が進められてきた最適評価コードやPSAにおける作動信頼性を、受動的システムで定量化することが挙げられる。特に、その性能は温度や圧力と言った環境に依存することから、時間依存性を持たせた評価手法の開発も必要であろう。また、こうした課題解決は、透明性の高い技術評価とそれに基づき策定された研究開発戦略に従い進めることは言を俟たない。

## (2) 次世代軽水炉の燃料開発

現行軽水炉からFBRへの移行期を担う次世代軽水炉には、使用済み燃料発生量の低減、環境負荷の低減、経済性の向上、ウラン資源の有効利用、信頼性の向上などが求められる。これらの課題を克服するため、産官学が一体となり、軽水炉燃料の高度化に取り組んでいる。

将来的な環境負荷の極小化に向けた通過点として、軽水炉においても発生エネルギー当たりの再処理する核燃料の量を最小化すること、すなわち、使用済み燃料発生

量の低減のためには、現在達成されている集合体取出最高燃焼度55 MWd/kgUを超える高燃焼度化が有効である。70 MWd/kgUまで燃焼度を増加させることに、現在に比べて使用済み燃料発生量を約30%低減できる。

高燃焼度化により使用済み燃料発生量を低減することができれば、現在懸案となっている再処理するまでの期間の貯蔵管理の負担軽減につながる。さらに、将来的にはMOX燃料の高燃焼度化にも取り組む必要がある。

また、70 MWd/kgU以上の高燃焼度を達成するためには、燃料中の235U濃縮度を現行の制限値を超える5%以上にする必要がある、関連する法体系の整備とそれに基づく燃料製造ラインの対応が急がれる。

再処理により回収したPuは、プルサーマルへの利用と同時にFBRの初期装荷燃料としての役割も持つこととなる。50年からFBRを滞りなく導入するためには、第2再処理工場を建設し、十分な

量のPuを供給する必要がある。

第2再処理工場は、六ヶ所再処理工場では基本的に受け入れることができない使用済み燃料、すなわち高燃焼度およびMOXの使用済み燃料を再処理できる能力を有することが要求される。軽水炉燃料の高燃焼度化による使用済み燃料発生量の低減は、第2再処理工場のコンパクト化につながる。

### (3) MAを閉じ込め核拡散抵抗性を有する乾式再処理技術

金属燃料炉心と乾式再処理+射出製造から成る金属燃料サイクル技術は、安全で経済性に優れることに加えて、表・1の③「環境負荷の低減と自立した燃料供給」と④「核拡散抵抗性の極大化」という点で高い潜在能力を持つ。

この技術の特長は、原子炉の燃料としてもなじみなどで用いられている酸化物ではなく、金属を使用していることである。金属は酸化物に比べて密度が高いことから、原子炉内の燃料装荷量が少なくて済むこと、燃料の増殖性能が良いことなどの特長を有する。また、

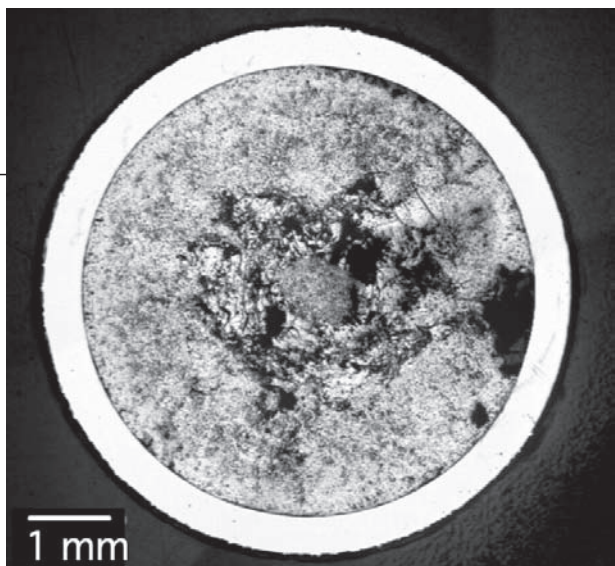
中性子のエネルギーが高いことから、MAの燃焼効率が良い。

金属燃料の再処理では、乾式再処理と呼ばれるプロセスが採用されている。すなわち、500℃で融解させた塩(溶融塩)の中で使用済み燃料を陽極として電気分解を行うことにより、ウランとPuを陰極で回収する。この時、電極ではさまざまな成分が溶解あるいは析出するが、その順番はイオン化傾向に従う。その性質をうまく

利用して、鉄陰極を用いれば金属ウランが高純度で回収され、液体カドミウム陰極を用いればPuがウランやMAと一括して回収できる。

特別なプロセスを付加しなくてもMAがPuに混ざ

図-4 高速炉フェニックスで照射したMA添加金属燃料の断面



って回収されることは、乾式再処理の優れた特長であり、一方、Puが高い純度で回収されないという面からは、核拡散抵抗性が高いことが保障される。すなわち、世界標準要件となっているであろう表1の③と④を具備した再処理システムである。

図・4は、高速炉で照射したMA添加の金属燃料の断面写真で、電中研がEU超ウラン元素研究所(ITU)と共同で実施中の研究

である。軽水炉で生成するMVAを金属燃料炉心で効率良く燃焼することを目的としている。

電中研では80年代後半から研究に着手し、日本原子力研究開発機構(JAEA)やITUなどの国内外の研究機関、大学、メーカーなどと共同で、数キログラムのウラン、約100gのPu、さらに照射燃料まで用いて着実に研究を進展させてきており、現在は実用的な工学機器開発の段階に入っている。今後は、将来の工学規模ホット試験の実施に向けて、プロセス全体の工学的実証に加えて、遠隔操作や保障措置、許認可などにも対応した研究開発を進めていく計画が構想されている。最後に世界的な研究開発状況についても簡単に記述しておく。金属燃料サイクルの発案者である米国のアルゴンヌ/アイダホ国立研究所では、金属燃料高速実験炉EBR-IIの実使用済み燃料を用いた工学試験を96年から実施してきており、これまで大きなトラブル無く合計3・5tを超える使用済み燃料を

再処理している。EUや韓国では核廃棄物の低減、インドや中国では将来のエネルギー需要の増大を見据えた高増殖性能など、国々の実情に応じた観点から金属燃料サイクルが研究されている。特に韓国とインドでは、米国や日本に続いて、工学規模ホット試験に向けた機器開発を精力的に進めている。

## 4 低炭素社会の持続的発展に向けて

研究開発に長い時間を要する原子力発電が低炭素社会を持続的に支えていくためには、地道な研究開発を継続し、その知見を随時実用化して商業利用に反映していくという、息の長い取り組みが必要である。

冒頭に述べた50年の原子力利用の姿を実現することは容易ではない。その実現のための課題と解決策については、簡単ではあるが第5回で述べたことから、今回はあえて実現できているとした50年を基点として論を展開した。50年段階での環境が整い、その後の社会

実現のための先行的な研究開発が成功裏に進んでいるとしても、さらなる長期的な目標を達成するためのハードルは高い。

実現した低炭素社会を支える原子力利用を維持発展させていくために、われわれ原子力技術者には無限の努力が求められる。

今後、原子力を取り巻く社会環境に多少の変動があろうとも、それらに柔軟に対応し得る硬直化しない機動的な開発計画の下、ブレることなく研究・開発・実証・実用のサイクルを推進し、研究開発の果実を社会に広めていかなければならないことを肝に銘じ、日々の努力を重ねていきたい。

### 参考文献

[1] 原子力安全委員会…発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針(2006年9月)

<http://www.shinsashishin-nsc.jp/pdf/1/si004.pdf>

(注1) 1原子力施設で事故が起こる確率やどのような系統・機器などの故障が大きな事故に結びつきやすいかなどを評価した情報を意味する。「残余のリスク」は、設計地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぶことにより、施設に重大な損傷事象が発生すること、大量の放射性物質が放散する事象が発生すること、あるいはその結果として周辺公衆に対して放射線被曝による災害を及ぼすことのリスクを意味する。

(注2) ウェスティングハウス・エレクトリック社が設計する加圧水型原子炉の名称。

(注3) 現在の知見で実用施設として実現性が最も高いと考えられる実用システム概念。