2. 21世紀に向けての原子力の展望

東京電力 榎本聡明, 関西電力 松村 洋, 中部電力 池田紘一

I. はじめに

20世紀後半、軍事から開始された原子力のエネルギー利用は、21世紀を目前に控えた現在、世界の1次エネルギーの7%、電力の18%を占め、エネルギー選択肢の一つとしての地位は確立しているといえよう。しかし、現在、エネルギー需給は緩和し、エネルギーが安価に安定的に入手可能なこともあって、石油危機の記憶は風化してきており、さらに、電気事業の自由化の進展もあって、原子力発電は、他のエネルギーとの厳しい競争の場におかれている。そこで、現在の社会を見つめ、21世紀の社会を展望することにより、将来の原子力について、電気事業者の視点から考えてみたい。

1980年代末になって、第2次世界大戦以来続いていた東西冷戦構造は崩壊し、世界は市場経済の枠組みに組み込まれることとなった。この一つの原因としては、コンピュータや通信の発展とも相まった、世界のボーダーレス化、情報化によるものといえよう。こうした市場経済の流れは今後も継続すると考えられる。

20世紀の工業化社会は、先進工業国に大いなる繁栄をもたらした。20世紀初頭に比較して、世界人口は4倍に、世界のエネルギー消費量は5倍に増大した。人類が今後も繁栄を続けるには、持続的成長の維持が必要といわれており、そのためには、今後も増大するエネルギー需給を満足させることが一つの条件となる。現在、先進国の成長は鈍化してきているが、途上国は今後も急速な発展を続けると予想されており、21世紀は途上国の世紀となるであろう。

一方、20世紀の社会は、繁栄と同時に、地球環境の汚染、破壊といった負の側面も合わせ持っており、環境の有限性を考えれば、21世紀の社会は地球にやさしい循環型社会へ転換することが必要である。

このため、エネルギー面から21世紀の社会を見れば、エネルギー選択肢を多様化し、世界レベルでの最適なエネルギーを組み合わせ、エネルギー源の確保と環境負荷の低減を同時に進める必要がある。これは、これまで繁栄を享受してきた先進国の責務ともいえるものである。

そこで、原子力の役割をエネルギーセキュリティ、地球環境問題、経済性の3つの視点から再確認してみたい。

エネルギーセキュリティについては、前述のように、現在、世界のエネルギー需給は緩和基調で推移し、エネルギー価格は安値で安定しており、短期的な問題となること

はない。しかし、長期的にみれば、石油の中東依存度は再び上昇することは確実であり、資源は有限であることから、日本のような少資源国かつ地政学的条件の国においては、セキュリティ確保の観点から、エネルギー選択肢を多様化しておくことの重要性は不変であると考ええる。

その意味で、技術立国を旨とする日本として、技術の力で少量の資源から莫大なエネルギーを生み出す原子力を選択肢として確保する重要性に揺るぎはない。

地球環境問題については、今後、ますますその重要性を高めるものと考えられ、1998年の京都議定書での温室効果ガス排出削減目標を満足させるには、省エネルギーと原子力、再生可能エネルギーの果たす役割が重要である。

これまでエネルギー消費量が小さかった途上国に、エネルギー消費量の多い先進国並みの温室効果ガス排出抑制を求めることはできず、今後、途上国の成長による温室効果ガスの排出量増加を先進国側と途上国の協力で地球レベルで補おうとすれば、おのずと原子力の役割を高めざるを得ないだろう。

経済性については、前述のように、化石燃料価格が低位で安定しており、原子力にとっては厳しい状況にある。しかし、直接価格には含まれない、例えば、備蓄に係る費用などエネルギーセキュリティコスト、二酸化炭素固定化のための費用や廃棄物処分に係る費用など、環境コスト等の外部コストを公正に評価することが必要である。原子力発電においては、これらの通常外部性に係る費用の多くがすでに内部化されており、総合的に評価すれば、その経済的競争力は十分確保できると考えている。

このように原子力は、21世紀の社会で重要な役割を果たしていくべきエネルギー源であり、以下では、原子力の個別課題について展望してみたい。

II. 原子力開発上の課題

1. 原子力発電

現在、日本においては、軽水炉50基、新型転換炉1基の計45GWが運転中である。発電電力量の30%を占め、燃料別では最大のものとなっている。導入の初期の時期においては、事故・故障により、設備利用率は低迷していたが、現在では設備利用率が3年連続して80%を越え、世界的に見て極めて優れた安全水準にある。

原子力発電を将来とも確実なエネルギー源とするには、安全を最優先とすることはその前提条件であり、核不拡散の確保や経済性の確保なども重要である。

(1) 安全の確保

安全確保については、技術的な安全性は、これまでの原

Sohmei ENOMOTO (Tokyo Elec. Power Co.)
Hiroshi MATSUMURA (Kansai Elec. Power Co.)
Koichi IKEDA (Chubu Elec. Power Co.)

子力施設の運転実績から、十分に成熟してきているといえる。もちろん、安全にはまだ知らないことが残っていると認識し、不断の努力を怠らないとの謙虚さが必要なことはいうまでもない。安全は、技術のみで達成することはできず、仕組みや人間の意識において安全を最優先にする風土が必要であり、これは、セーフティカルチャーの醸成といえることができる。

一方で、社会の質的な変化により、原子力のような巨大な技術に対しては、市民から透明性への要請や計画に対する参加意識が高まっており、市民に安心感を持てるようにすることが必要である。この場合、一たん、社会的な大事故が起きて損なわれた安心のレベルは、その後の安全運転によって回復するには大変な努力を要し、大事故を繰り返せば、いずれは社会に受け入れられる許容レベルに回復できなくなることを十分に肝に銘ずるべきである。

また、設計上あり得ないような苛酷な事故への対策を充実することにより、将来的に事故による影響の心配が不要な発電所を実現できるよう努めることも重要な課題である。

(2) 核不拡散の確保

東西冷戦の終結により冷戦解消の果実を享受するはずが、これまでの籐が外れた結果、かえって地域紛争の激化を招いており、核拡散防止条約は無期限延長されたものの、イラクでの核疑惑やインド、パキスタンでの核実験、北朝鮮問題など、水平拡散の懸念は強く、国際的核不拡散システムの再構築が必要となっている。IAEAでは「93+2計画」により査察の強化を目指しており、また、包括的核実験禁止条約への署名やカットオフ条約等新たな核不拡散の枠組みの提案がなされている。

将来のアジアでの原子力の展開や日本での原子燃料サイクルの確立を考慮すれば、日本は、核不拡散に積極的に取り組み、世界の模範となる必要があるであろう。

(3) 経済性の確保

商業利用にとって、経済性の確保は最重要課題の一つであり、自由化された電力市場において、将来的にも十分なコスト競争力を維持できるよう、運転保守費および建設費の削減、設備利用率の改善および運転寿命の延長等の努力が続けられている。

運転保守費の低減については、実績の評価により点検項目・点検周期の見直し、作業効率の向上に努めることにより、設備の信頼性を確保しつつ、費用の低減を進めている。また、建設費の低減については、設計の標準化、簡素化、あるいは、建設工程、工法の合理化が進められている。さらに、設備利用率の向上については、定期検査間隔の延長および定期検査期間の短縮が効果的である。こうした対策を進めることにより、将来的には、設備利用率は現在の80%台から90%台の達成が可能となろう。

(4) 高経年化対策

来年には、日本の最初の商業用軽水炉が、運転開始以

来、30年を経過することになる。日本では、すでに51基の軽水炉が運転しており、今後、運転年数の長い炉について安全性、信頼性を確保しながら、経済的な運転を継続することがますます重要となってくる。

運転年数の長い原子力プラント(高経年化プラント)に対する検討の結果、一部の機器については点検を充実する必要があるものの、大部分の機器については補修・取替等の適切な対応により、60年間の運転を仮定しても技術的には問題ないとの結果が得られた。点検を充実すべき項目については、運転開始30年目以降の保全計画に反映し、10年ごとに行われる定期安全レビューの際に再評価することとなる。また、高経年化に関連する研究開発課題が抽出されており、今後、研究開発が進められる予定である。

(5) 今後の発電炉の方向

将来の発電炉の方向には、従来からの大型炉路線を踏襲するものと、新しい概念、例えば「静的安全性」や「低環境負荷特性」、を探索するものとに大別されよう。

大型炉路線は、現在の軽水炉が原理的には確立されたものであること、スケールメリットがあることなどから、従来の技術の延長線上で、仕組みの合理化を目指す路線である。しかし、この路線では、原理的な限界があることはいうまでもない。

もう一方の路線は、概念の転換、あるいは、技術的ブレークスルーを要求するものである。現在の研ぎ澄まされた技術からタフな技術への転換、熱電気変換効率のブレークスルー、長半減期核種の系内への閉じ込めなど、さまざまな原理、価値を追求した結果として生まれてくる可能性がある。もちろん、これは炉だけにとどまらず、燃料サイクル、バックエンドを統合したシステムとしての整合性のある開発が重要である。ただし、技術的可能性、安全性などの他に、経済的成立性を常に念頭に置くことを忘れてはならない。

軽水炉の一つの方向としての固有安全炉、原子燃料リサイクルを念頭に置いた統合型高速炉等、着実な技術開発により、選択肢の多様化が期待される。

2. 原子燃料サイクル

原子燃料サイクルの確立は、日本のエネルギーセキュリティや技術セキュリティの確保からも、原子力を21世紀の循環型社会と整合させる視点からも、重要な技術である。もちろん、国内での原子燃料サイクル確立には、経済性が重要な要素であり、密接に関係する原子炉側との整合をとりつつ、コスト削減の努力を継続する必要がある。

(1) ウラン濃縮

日本のウラン濃縮技術開発は、原子力開発における自主性確保の観点から、動燃事業団(現、核燃料サイクル開発機構)によって遠心分離法の開発が進められ、青森県六ヶ所村に民間の商業ウラン濃縮工場を操業するに至っている。

一方、ウラン濃縮役務の需給は緩和し、役務料金の市況

は軟化していることから、国内ウラン濃縮事業においてもコスト低減が強く求められている。

そこで、遠心分離機の高度化に取り組むとともに、すでに米国、フランスで開発が進められ、潜在的に大幅なコスト低減が期待できるレーザー法によるウラン濃縮技術の開発に取り組んできた。

日本原燃(株)六ヶ所ウラン濃縮工場は1992年3月に運転が開始され、金属銅の遠心分離機により、1999年1月現在1,050t SWU/年の規模で操業中である。コスト低減を目指した遠心分離機の高度化が進められており、現在、複合材料銅の遠心機が開発され、さらに、性能を高めた高度化機の開発を進めている。

一方、原子レーザー法は、特定の同位体だけを選択的に励起・電離する波長のレーザーを照射し、生成したイオンを電氣的に回収して、同位体を濃縮する技術である。この技術をU濃縮に適用する場合、天然Uから1回のプロセスで約5%の濃縮Uが得られる見通しであり、その経済性から次世代のU濃縮技術として日、米、仏それぞれ独自に技術開発を進めている。我が国では、1987年からレーザー濃縮技術研究組合によって技術開発が進められ、理論的な理解および各種要素技術の開発が進み、技術的な成立性が見通しが得られつつある。

(2) 再処理とプルサーマル

使用済燃料の再処理は、原子燃料サイクルの要となる技術であり、現在、日本原燃により、青森県六ヶ所村で年間800t規模の商業用再処理工場が建設されている。

日本では、技術セキュリティの確保、Pu利用の主体性の確保の観点から国内再処理を原則としている。

再処理により取り出されたPuは、利用効率の高い高速増殖炉で利用することが基本であるが、高速増殖炉の実用化までは軽水炉で利用することとし、電力会社により利用計画が進められている。

一定規模で軽水炉でPuをリサイクル利用することは、将来の本格的Pu利用時代に備え、Pu利用技術を実践なものとし、Pu利用のための条件整備するために重要であり、また、これはU資源の有効利用につながるものである。

高速増殖炉の実用化時期は、世界的エネルギー需給の緩和状況や高速増殖炉のコスト競争力の確保に必要な技術開発にまだまだ時間を要することから、相当先のことと考えられるが、上記の観点から、六ヶ所再処理工場については、計画通り進めることが必要である。また、六ヶ所再処理工場に続く第2再処理工場については、六ヶ所再処理工場の運転状況や再処理の技術開発状況を勘案し、2010年頃、その方針が決定される予定である。

高速増殖炉時代においては、高速増殖炉の燃料は、軽水炉燃料の場合とは異なり、燃料中にマイナーアクチニド核種の存在が許容でき、また、現在用いられている酸化燃料以外の金属燃料あるいは窒化物燃料の採用の可能性もあることから、再処理についても、現在、商業化されている

ピューレックス法以外の再処理方式、例えば、除染工程を簡略化した改良湿式法や、コンパクトな再処理を可能とする乾式法等についても選択肢として考えられ、今後の技術開発が期待されている。また、経済性に優れていることはもちろん、Pu利用の観点からの核不拡散性、21世紀の循環型社会における要件などの観点からも優れた技術を開発することが必要である。

(3) 使用済燃料の中間貯蔵

使用済燃料は、再処理により、含有されるPuやUを利用することで、資源小国の日本として貴重な資源と考えられる。このため、これをリサイクル資源として備蓄し、有効利用する計画である。

我が国の使用済燃料の年間発生量は、現在、900t程度、2010年頃1,400t程度、2030年頃1,900t程度と見込まれており、再処理能力を上回る使用済燃料は、再処理するまでの間、資源として貯蔵する必要がある。

これまでは発電所内において使用済燃料を貯蔵していたが、貯蔵量の増大に伴い、発電所外にも貯蔵施設を設けることが必要となっており、2010年までに発電所外での貯蔵を開始すべく努力しているところである。

使用済燃料の貯蔵の方式としては、プールおよび金属キャスク、コンクリートキャスク等の方式がすでに国内外で実用化されており、特に、技術的な問題はない。

(4) 高速増殖炉の開発

「もんじゅ」事故の結果、高速増殖炉(FBR)開発を検討するため設置された、原子力委員会傘下のFBR懇談会は、FBRを我が国の将来の非化石エネルギー源の有力な選択肢の一つと結論しており、今後も実用化に向けて技術開発を着実に進めていく必要がある。

FBRは、燃料をリサイクルすることによってUの飛躍的な有効利用を図ることができるため、再処理などの燃料サイクルを炉の開発と整合性をもって研究開発することが必要である。

さらに、FBRの実用化にあたっては、将来のエネルギー源として選択され得る経済性の実現が必要である。

これまで電気事業者を中心に進められてきたFBR実証炉(トップエントリー方式ループ型炉、出力66万kW)の開発では、現行軽水炉建設費の1.5倍の経済性を達成し、いつでも基本設計に入れる技術レベルにある。実用化には更なる経済性、安全性を追求した技術開発を進めることが必要である。

FBRサイクル技術については、核燃料サイクル開発機構を中心に開発を進められてきた。FBRでは炉とサイクルが密接不可分であり、これまで、どちらかといえば炉の開発に重点が置かれてきたが、今後は、炉とサイクルの整合性を持った開発が望まれる。

したがって、経済性確保に重点を置き、系統簡素化、安全機能範囲の極小化系、乾式再処理技術等の新たな炉およびサイクル技術のコンセプトについて核燃料サイクル開発

機構を中心に幅広く検討し、民間のニーズを反映したFBR実用化像を早期に構築するとともに、実用化に必要な技術を開発、確立することが望まれる。

こうした技術開発において、FBR原型炉「もんじゅ」は、FBRの運転保守技術、Na取扱い技術等の確立に重要な役割を果たすものであり、早期に運転を再開し、運転経験を蓄積し、技術開発にその経験をフィードバックさせるとの期待が高い。

3. バックエンド対策

バックエンド対策は、まさしく原子力にとっての環境問題である。原子力においては、来るべき21世紀の循環型社会の原則に従い、資源リサイクル、廃棄物発生量抑制、廃棄物減容、分別管理、適切な処分などにより環境負荷を極小化できる見通しがある。

バックエンド対策のうち、最大の課題である高レベル廃棄物対策についても、2030～40年代前半にも、地層処分が可能となるよう技術開発、制度整備が進められている。

(1) 原子炉の廃止措置

日本の発電炉の廃止措置は、運転終了後できるだけ早い時期に解体撤去し、跡地は原子力発電所用地として有効利用することを基本方針としている。

廃止措置費用については、標準工程に基づき見積もられており、110万kW級原子力発電所の場合約300億円程度(1984年度価格：放射性廃棄物の処分費は除く)である。

廃止措置に伴って発生する廃棄物は、金属廃棄物およびコンクリート廃棄物が主体であり、例えば、110万kW級原子力発電所で50～55万tであり、このうち、97～99%が放射性廃棄物として扱う必要のないレベルに該当し、再利用の検討が進められている。

現在、日本初の商業炉である東海発電所は、1998年、運転を停止しており、廃止措置およびこれに伴う廃棄物処理処分の現実化に邁進、2001年を目途に制度整備が進められている。

(2) 放射性廃棄物処理処分

原子力関連施設から発生する放射性廃棄物は、発生する施設や含まれる放射性核種、濃度により、さまざまであるが、日本では、使用済燃料の再処理により取り出される高レベル廃棄物とその他の低レベル廃棄物に大別される。

低レベル廃棄物には、原子力発電所から発生するもの、原子燃料サイクル施設から発生するものがあり、含まれる放射性核種の種類、濃度により、適切に区分し、区分に応じて合理的に処分されることとなっている。

発電所からの低レベル廃棄物のうち、液体廃棄物を濃縮し、固化した均質固化体については、青森県六ヶ所村の埋設センターにおいて浅地中への埋設が実施されており、配管、容器、フィルタなどの雑固体廃棄物については、すでに制度が確立されている。炉内構造物や使用済み制御棒など放射能レベルが比較的高く、現在の埋設濃度上限値を超え

る廃棄物の処分については、地表から50～100m程度の深さに処分する等の方針が決定されており、今後、原子力安全委員会において、具体的な安全基準等の策定について審議される予定である。

本来、放射性廃棄物として扱う必要のない廃棄物を一般産業廃棄物並の処分や再利用を可能とするためのクリアランスレベルの設定に向けて、1997年5月から原子力安全委員会において国際原子力機関(IAEA)や海外各国の動向を踏まえた検討・審議が行われており、1999年3月には報告書が取りまとめられる予定である。

高レベル放射性廃棄物については、安定な形態に固化した後、30年から50年間程度冷却のための貯蔵を行い、その後、地下深い地層中に処分することを基本方針としている。2030年代から遅くとも2040年代半ばまでを目途に処分場を操業開始することとしており、処分場建設のスケジュールを考慮すれば2000年を目安に処分事業の実施主体を設立する予定であり、今後、制度整備が行われる。

処分のための技術開発については、核燃料サイクル開発機構が中心となって行われており、2000年前までに研究成果の取りまとめ(第2次取りまとめ)を公表し、地層処分の安全性に対する技術的拠り所が示される予定である。

原子燃料サイクル施設から発生するTRU核種を含む廃棄物に関しては、1990年代末を目途に具体的な処分概念の見通しを得ることを目標として研究開発を進めることが原子力委員会の方針として示されており、核燃料サイクル開発機構と電気事業者は1997年7月に共同作業チームを編成し、これまで行ってきた研究成果を基に具体的な処分概念の取りまとめ作業を行っている。

III. おわりに

以上述べてきたように、原子力は、21世紀における世界のエネルギー供給を支える柱の一つと考えており、特に、資源小国である日本にとっては、基軸となるエネルギー源とも位置づけられよう。これから21世紀中頃までに、軽水炉における更なる経済性の達成や高経年化対策、原子燃料サイクルの確立、FBRサイクルの技術開発、バックエンド対策等、多くの技術開発課題があり、原子力の将来を確実なものとするためには、こうした課題の一つ一つを着実に実施に移し、解決していく必要がある。

これらを円滑に推進するためには、原子力路線を選択し、開発が本格化した1960年代から70年代のように、情熱を持った若い世代が原子力界に競って身を投ずるような環境を作れるかどうかが鍵となろう。

こうした動きが大きな流れとなるように、原子力学会を中核に、幅広い技術的、人材の基盤が育成され、21世紀の世界に貢献できる原子力技術が確立されることを期待する。

(1999年3月2日稿)