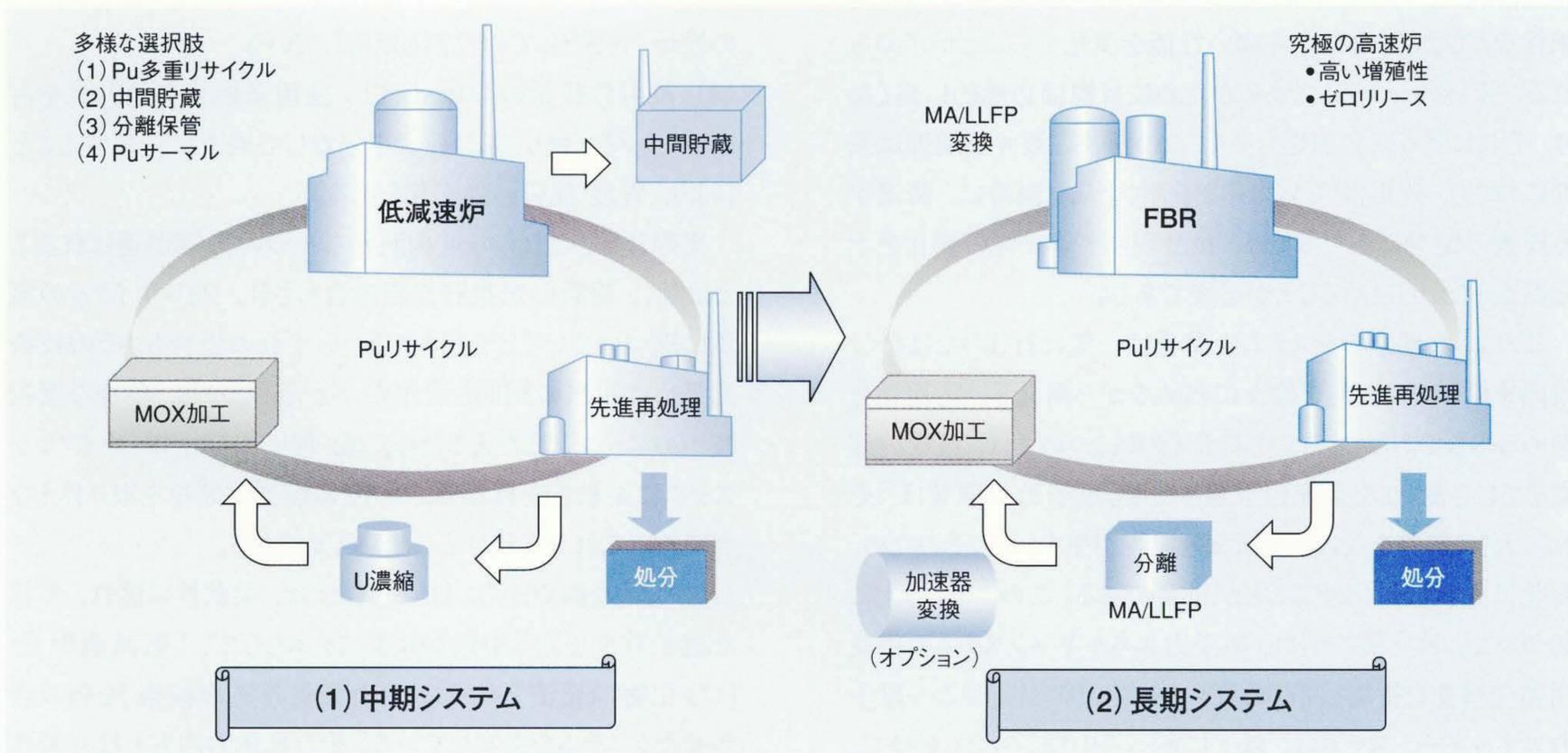


エネルギーの将来を担う次世代原子炉システム

Next-Generation Nuclear Reactor Systems for Future Energy

山下 淳一 Jun'ichi Yamashita 持田 貴顕 Takaaki Mochida
河村 文雄 Fumio Kawamura



注：略語説明 MOX (Mixed Oxide), MA (Minor Actinide), LLFP (Long-Lived Fission Product), FBR (Fast Breeder Reactor)

Puリサイクルの全体構成

将来の原子力システムは、低減速炉と先進再処理によるプルトニウム多重リサイクルを基本にして、燃料サイクルの多様なニーズに柔軟に対応できる中期システムを経て、高速炉を基本とした長期システムの原子炉システムに移行する。

将来に予想される地球環境問題やエネルギーセキュリティ問題を解決するためには、原子力によるリサイクルシステムの開発・実用化が不可欠である。わが国が目指すべき究極の原子力システムは、高速増殖炉によるプルトニウムリサイクルである。しかし、このような理想のシステムは開発に時間を要することから、移行期を経て段階的に実現されると考えられる。

日立製作所は、この移行期でのリサイクルシステムへの取り組みとして、軽水炉によるプルトニウムリサイクル炉、すなわち低減速炉と、次世代リサイクル技術の開発に取り組んでいる。

低減速炉は、現行の沸騰水型プラントを基本としているもので、炉内の燃料と制御棒を変更することにより、ウランの燃焼からプルトニウムの燃焼、リサイクルにも対応できる軽水炉である。リサイクルには多様な燃料形態に柔軟に対応する必要があるため、フッ化物揮発法を基本とした先進再処理技術に基づく新しい燃料サイクルが不可欠となる。

これらの原子炉システムは、現行の軽水炉での技術開発の成果に基づくものであり、将来の高速炉を中心とした燃料サイクルにも引き継がれるものとなる。

1 はじめに

有限の地球環境の中で、人口の急増、資源・エネルギーの多消費、地球規模の汚染の拡大(地球温暖化)という課題を克服しながら、人類が持続的な発展をしていくためには、エネルギー問題の解決がきわめて重要である。

21世紀には、地球規模の環境問題やエネルギーセキュリティ問題が深刻化すると考えられる。小資源国のわが国でこれを解決するためには、原子力による燃料リサイクルシステムの早期開発・実用化が必要不可欠である。

ここでは、日立製作所が取り組んでいる次世代原子炉システムについて述べる。

2 将来の原子力エネルギーシステム

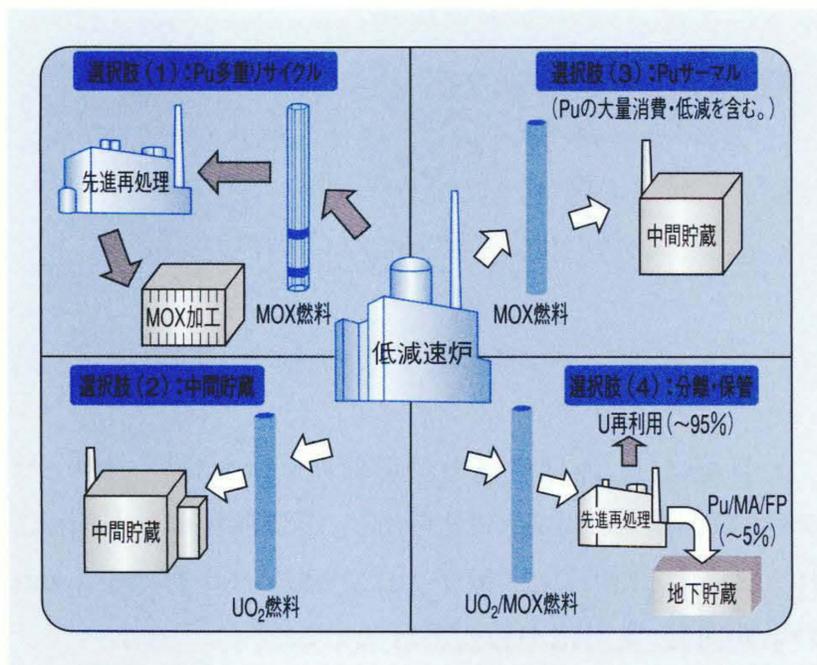
2.1 全体システム構想

小資源のわが国が目指すべき究極の原子力システムは、高速増殖炉によるPuリサイクルである。このシステムでは、エネルギー問題や地球環境問題はもとより、安全性・経済性・信頼性などさまざまな面から高い性能を満足することが求められる。究極のシステムであるがために目標は必然的に高くなり、それに伴う開発課題も多く、この解決に要する期間は長期にわたり、費用は大きくなると予想される。同時に、関連する技術の開発にあたっては、社会環境やニーズの変化を十分踏まえながら進めることが必要である。

このような理想のシステムの開発は一気に行うのではなく、段階を踏んで、性能を徐々に高めながら開発し、実用化を進めるべきである。また、燃料サイクルについては、技術の確立までにさまざまな状況が予想される。原子力の開発は、それに大きく影響を受け、多様な選択肢が生まれる。そのため、変化に柔軟に対応することが重要である。このような考えに基づいて、日立製作所は、原子力エネルギーシステムの中長期開発構想を提案している(前ページの図参照)。この原子力エネルギーシステムは、以下に述べる中期システムを経て、長期システムへと引き継がれていく。

2.2 中期システム

中期システムでは、安全性・信頼性はもちろんのこと、燃料サイクルへの柔軟性と経済性が特に重要であると考えられる。燃料サイクルについては、今後予想されるさまざまなニーズに柔軟に対応していくために、多様な選択肢があることが望ましい。今後想定される選択肢には、以下のようなものが考えられる(図1参照)。



注：略語説明 MOX(Mixed Oxide)、MA(Minor Actinide)、FP(Fission Product)

図1 燃料サイクルの多様な選択肢

低減速炉では、多様な燃料サイクルの選択肢に柔軟に対応できる。

(1) Pu多重リサイクル：原子力がエネルギー問題を解決するための理想の姿であり、原子炉とリサイクル技術が一体となってPu多重リサイクルを行う。

(2) 使用済燃料中間貯蔵：燃料サイクルの運用の柔軟性を確保する有力な手段として、使用済燃料の中間貯蔵がある。

(3) Puサーマル：Puサーマルは燃料リサイクルを確立するうえで重要な役割を果たすものであり、フランスなどでは、Puの燃焼・消費としての役割も期待している。

(4) 放射性核種の分離・保管：使用済燃料の約95%を占めるウランと、残り5%の核種を分離して別々に管理することにより、管理・保管の効率化を図る。

実際には、これらの選択肢から一つの方策が選ばれることはなく、複数の選択肢が組み合わせられ、Puリサイクルの実現に近づいていくと予想される。いずれの場合も、その技術開発には相当の期間と費用がかかる。しかし、多様な選択肢へのニーズにこたえるためには、同一の原子炉・サイクルシステムに柔軟性を持たせ、システム要素の簡単な取り替えなどにより、これを実現することが重要である。

このような観点から、日立製作所は、柔軟性に優れ、多様な選択肢を与える中期炉型システムとして、「低減速炉」と「フッ化物揮発法をベースとした先進再処理技術」を組み合わせたシステムを提案している。その具体的内容と日立製作所の取り組みについては3章と4章で述べる。

2.3 長期システム

長期的には、化石燃料はもちろんのこと、ウラン235も枯渇する。このため、Puリサイクルの実現は必然であると考えられる。このような、長期での原子力の役割としては、単にエネルギーセキュリティにとどまらず、放射性廃棄物の低減など幅広い観点から、高い性能を満足させることが求められる。

その有力な候補として、Na冷却炉を用いたFBR(Fast Breeder Reactor：高速増殖炉)が考えられる。これを実現させるためには、水冷却炉やガス冷却炉を含めた幅広い選択肢の検討を行い、理想に近いシステムに向けての研究開発を行う必要がある。

3 低減速炉の開発

3.1 炉心燃料の構成

低減速炉は、現行の沸騰水型プラントシステムを採用したものであり、原子炉内の燃料集合体や制御棒の取り替え部品を入れ替えることにより、ウランの高燃焼はもとより、PuリサイクルやPuサーマル燃焼などさまざまな炉心を可能とするものである。

日立製作所が取り組んでいる、柔軟性に富んだ低減速炉の概念案を図2に示す。この原子炉でPuリサイクルを行う場

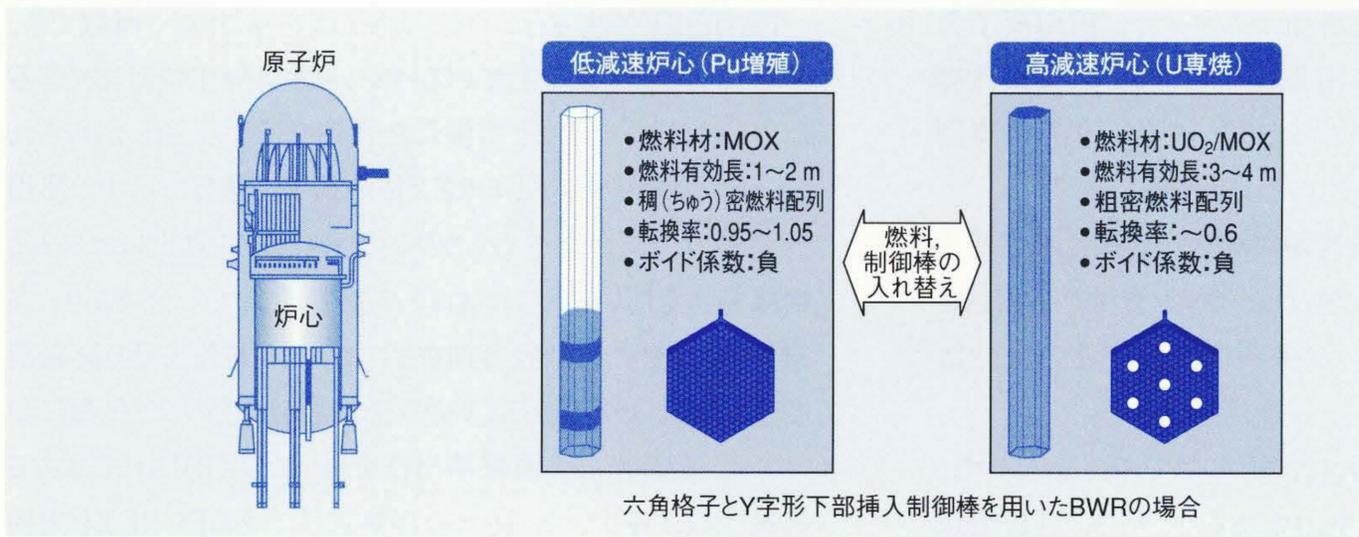


図2 柔軟性に富む低減速炉の概念

燃料と制御棒の入れ替えにより、ウラン専焼用の高減速炉からPuの増殖に適する低減速炉まで、燃料サイクルに柔軟に対応できる。

合には、炉心内の中性子として、速度の速い高速中性子を多くする必要があり。このため、炉心は、核分裂によって発生する高速中性子をなるべく減速しないで利用する「低減速炉心」とする。

燃料集合体の形状は、六角形または四角形であり、燃料有効長は1~2 mである。燃料棒は稠密で、間隔は1~1.5 mmである。

一方、ウラン燃料の利用に最適な「高減速炉心」の場合は、燃料有効長が3.7 mである。燃料棒は粗密で、間隔は3~4 mmである。中性子をいっそう減速させるために水ロッドを採用していることから、従来の軽水炉炉心とほぼ同等の構造である。

このような原子炉では、仮に何らかの理由によってPu燃料の供給が止まるような事態が起こっても、ウラン燃料を装荷し、高減速炉心とすることで、継続して発電することができる。このような炉概念を採用できるのは、軽水炉、特に沸騰水型炉の優れた特質である。

減速材となる軽水を効果的に排除し、良好な冷却特性を維持するために、低減速炉の炉心を構成する燃料棒は六角稠密に配列される。一方、燃料集合体の形状は、六角形または四角形である。

六角形とする場合の一例として、RBWR (Resource-Renewable Boiling Water Reactor)の例を図3に示す²⁾。制御棒の断面は、六角の燃料格子に合わせて、Y字形となる。RBWRは、燃料棒の稠密な配置が容易であり、転換比も1以上になり、Puリサイクルによるエネルギーの長期安定供給に適している。

一方、ABWR-II (Advanced BWR-II)を基本とした場合には、燃料集合体は四角形で、転換比は1を下回るが、現行のBWRと比べて、燃料と制御棒の炉内構成の変更が少ないという特長がある(図4参照)³⁾。また、燃料の一部にUO₂燃料棒を使って燃料のPu所要量を少なくすることにより、軽水炉再処理からのPuの供給が小さい移行期でも、低減速炉を容易に立ち上げることができる。

また、沸騰水型軽水炉の特長である、ボイド(蒸気泡)による負の反応度フィードバックを維持することにより、現行の軽水炉並みの安全性を確保する設計としている。

3.2 低減速炉の効果

2030年から低減速炉が導入され、軽水炉が廃炉になる場合を考えると、現行の軽水炉がすべて低減速炉に置き換わるには約100年かかるが、この間のウランの累積使用量は、Puリサイクルによって全世界のウラン埋蔵量の6%程度にとどまる。

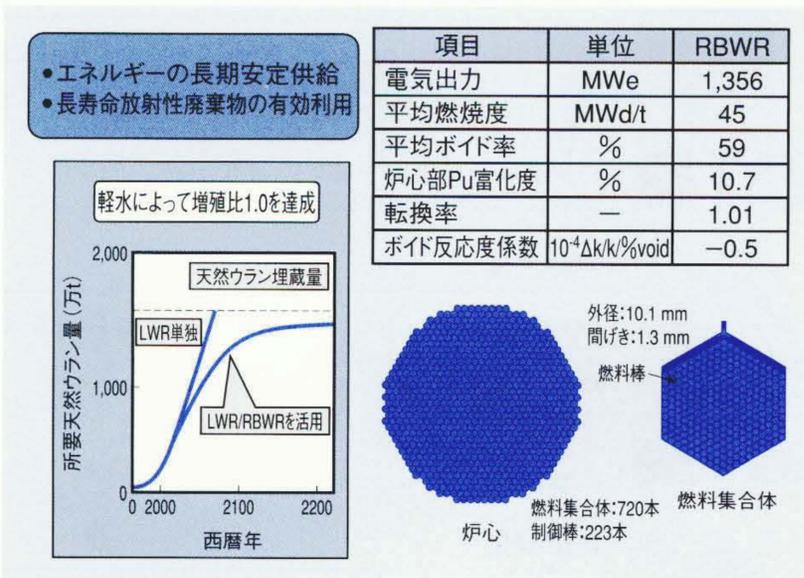


図3 低減速炉の例(RBWRの例)

六角燃料格子の採用により、燃料を稠密に配列することができる。この配列は、低減速状態を実現するのに適している。

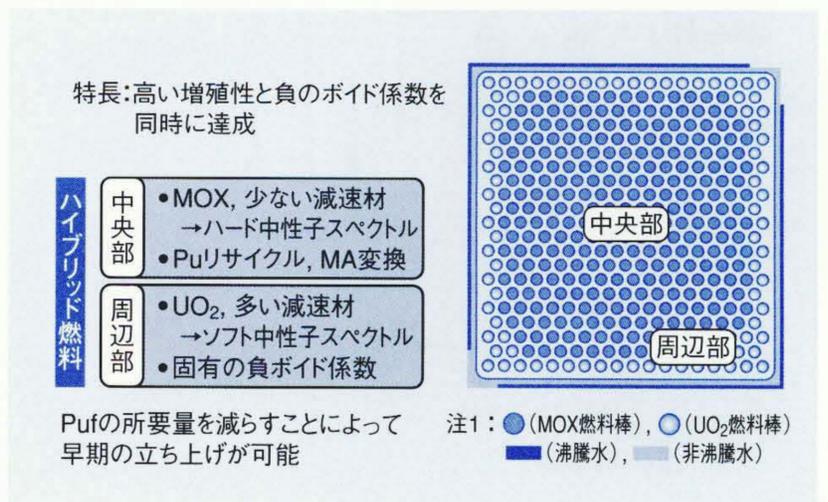


図4 低減速炉の例(ABWR-IIの例)

UとPuのハイブリッド燃料を用いてPufの所要量を減らすことにより、低減速炉の立ち上げが少ないPu量で可能となる。

その後もウランの使用量は増加するが、わが国の原子力による発電量が世界の10%を占めることに呼応して、全世界のウラン埋蔵量の約10%に当たる150万 tを使い果たす時期は、2200年ころまで延長されるものと予想できる。

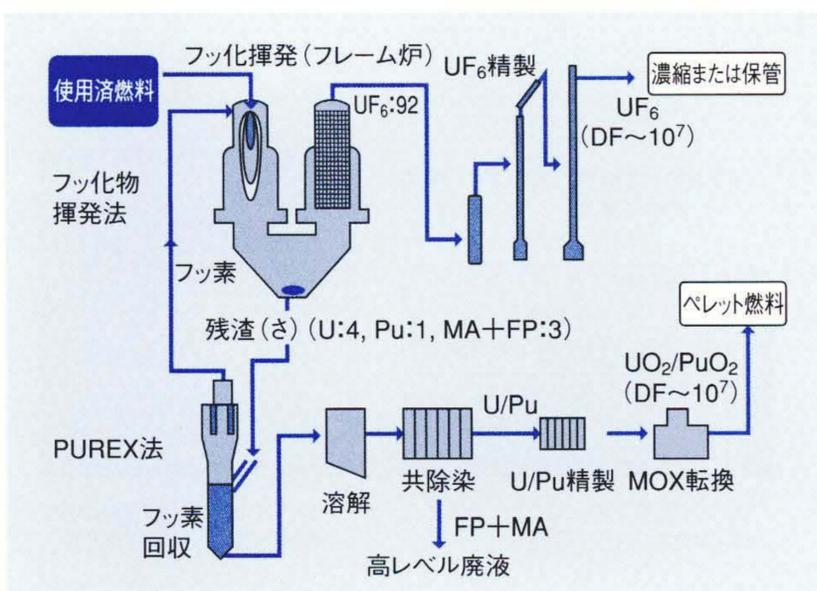
したがって、21世紀を低減速炉による移行期として、高速炉を22世紀初めまでに導入できれば、ウラン資源を枯渇させることなく、原子力によってエネルギー供給を持続することは十分可能である。

このように低減速炉の導入は、軽水炉での実績を持ち、実現性が高く、かつコスト競争力があることから、21世紀以降のエネルギーの持続的確保につながる。

4 先進リサイクル技術の開発

軽水炉時代から低減速炉時代を経て、FBRの平衡期が確立されるまでの移行期では、軽水炉燃料の再処理によって得られる回収ウランは、再濃縮してリサイクルするか、必要となる時期まで一時的に貯蔵されることになる。また、PuはMOX(PuとUの混合酸化物)として低減速炉などで再利用でき、将来はFBRで利用することができる。

ウランとMOXを高精製度で回収する再処理技術としては、溶媒抽出法を用いた「PUREX法(湿式再処理法)」がすでに実用化され、建設中の青森県・六ヶ所村の再処理工場で採用されるが、再処理コストが比較的高いことが指摘されている。一方、1980年代まで開発が続けられた再処理法に「フッ化物揮発法」がある。この方法は、ウランの精製がコンパクトになる点で優れている。そのため、ウランの精製にはフッ化物揮発法を、Puの精製にはPUREX法をそれぞれ用いる、相補的で優れたハイブリッド再処理法としてFLUOREX(Hybrid Process of Fluoride Volatility and Solvent Extraction)法を考案し、開発に取り組んでいる。



注：略語説明 DF(Decontamination Factor)

図5 FLUOREX法の概略構成

FLUOREX法は、軽水炉と低減速炉の共存期間のための原子燃料再処理法である。フッ化物揮発法とPUREX法の組み合わせにより、効率のよい再処理を行う。

FLUOREX法では、ウランとMOXを高除染で回収でき、燃料加工として確立しているペレット燃料加工に対応できるため、経済性の点などで優れた性能を持つ見通しが得られている。開発中のFLUOREX法の構成を図5に示す。使用済燃料の大部分を占めるウランのうち、90%以上にはフッ化物揮発法を用いる。これはコンパクトな設備で十分であり、高速分離、NaFなどの吸着剤などにより、 10^7 程度までの高精製度に行える。残る10%以下のウランとPu、FPのフッ化物については、酸溶解後、溶媒抽出法を用いたPUREX法によって処理し、このPuでは、従来の再処理法であるPUREX法と同等の精製度を持つMOXを得ることができる。

5 おわりに

ここでは、将来を担う原子力エネルギーシステムとして、低減速炉を用いたリサイクルシステム概念と、要素としての原子炉、および燃料リサイクル技術について述べた。

日立製作所は、電力会社や原子力関係機関の協力と指導を得ながら、今後も、このエネルギーシステムの開発を進めていく考えである。

参考文献

- 1) 天野, 外: 持続的原子力発電の21世紀への展望, 日本原子力学会「2002年春の年会」予稿集, F47~49(2002)
- 2) R. Takeda, et al.: General Features of Resource-Renewable BWR(RBWR) and Scenario of Long-term Energy Supply, International Conference on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems(GLOBAL 95) (Sept.1995)
- 3) T. Kondo, et al.: Study on High Conversion BWR with Island Type Fuel, International Congress on Advanced Nuclear Power Plants(ICAPP) (June 2002)

執筆者紹介

山下 淳一



1969年日立製作所入社, 電力・電機グループ 原子力事業部所属
現在, 原子力プラントの技術開発取りまとめに従事
工学博士
日本原子力学会会員, 米国原子力学会会員
E-mail: junichi_yamashita @ pis. hitachi. co. jp

河村 文雄



1976年日立製作所入社, 電力・電機グループ 原子力事業部 サイクルプロジェクト部 所属
現在, 先進的燃料サイクルの技術開発取りまとめに従事
工学博士
日本原子力学会会員, 化学工学会会員
E-mail: fumio_kawamura @ pis. hitachi. co. jp

持田 貴顕



1980年日立製作所入社, 電力・電機グループ 原子力事業部 原子力計画部 所属
現在, 軽水炉原子炉システムの設計, 安全評価に従事
工学博士
日本原子力学会会員, 米国原子力学会会員
E-mail: takaaki_mochida @ pis. hitachi. co. jp