

金属燃料サイクル技術の研究開発の現状と将来の展望

平成 11 年 10 月 25 日
(財)電力中央研究所

1. はじめに

電力中央研究所(電中研)における高速増殖炉技術関連の研究開発は、電力が進めてきた実証炉開発を支援し、材料・構造設計研究、耐震設計研究、熱流動研究など幅広く行ってきており、それぞれに成果を出してきているが、ここでは高速増殖炉による核燃料サイクルの将来のシナリオ検討に深く関わる研究開発として、金属燃料サイクル技術を中心にその現状と将来展望を述べる。

2. 研究開発の経緯

高速増殖炉はその本来の意義が燃料生産性にあるため、当初は中性子のエネルギーを落とさない金属燃料が選ばれていた。しかし、金属燃料は照射時に燃焼に伴いスエリング(燃料が膨張すること)することがなどが分かり FBR 開発からは遠ざけられた。その後、米国アルゴンヌ国立研究所(ANL)の研究で、スエリングがある程度進行した後は進まなくできる設計法があることが分かった。さらに、ANL では金属燃料の乾式再処理、燃料製造技術の開発を進め、これらが高い経済性を持つ可能性があることが明らかになった。これらの成果に基づき、ANL では金属燃料による炉と燃料サイクル一体型(IFR)概念を提案し開発を進めていたが、時の政権の方針により中止に追い込まれた。

一方、電中研では FBR として種々の本質的な利点を有する金属燃料と乾式法によるそのリサイクル技術に着目し、昭和 60 年頃から金属燃料 FBR と乾式リサイクル技術の開発を進めている。

3. 研究開発の目的

経済性に優れ、環境負荷の低減が可能であり、核拡散抵抗性にも強い将来を展望した FBR とその燃料サイクルを確立する。これらを実現できる有力な技術候補である「金属燃料 FBR・乾式リサイクル技術」を開発することを目的としている。

4. 金属燃料 FBR・乾式リサイクル技術の概要と特徴

4.1 全体のシナリオ

将来の原子力エネルギーを支える FBR 技術として金属燃料 FBR とその燃料リサイクルに乾式再処理を採用した燃料サイクルを構築する。またその乾式再処理は軽水炉から発生する酸化物燃料にも適用し、金属に転換することにより高速増殖炉による燃料サイクルを軽水炉につなげる。その生成物は金属状のウランやプルトニウムの他にマイナーアクチニド元素(ネプツニウム、アメリシウムやキュリウム等をいう)の超ウラン元素を含み、それらは金属燃料中で効率よく燃焼させる。また湿式再処理工場から発生する高レベル廃液

中の超ウラン元素も乾式技術で分離、回収し、金属燃料サイクル中で燃焼させる。このように軽水炉燃料サイクルと高速炉燃料サイクルを統合した「金属燃料 FBR・乾式リサイクル システム」を確立する。

4.2 金属燃料 FBR・乾式リサイクル システムの特徴

- ① 経済性に優れる：再処理や燃料製造プロセスが単純になり、FBR 炉も同規模の酸化物を燃料とした炉に比しコンパクトになるため、経済的な有利性が期待できる。
- ② 環境負荷の低減が可能である：乾式再処理ではウラン、プルトニウムだけでなく長半減期のマイナーアクチニド元素も一括して回収しリサイクルされるため、マイナーアクチニド元素が廃棄物にならない。さらに酸化物燃料炉心と比較すると 30・40%再処理量が低減できることや、分離に用いる溶媒等のリサイクルが基本的に可能なため廃棄物量が低減できる。
- ③ 核拡散抵抗性や物的防護性に優れる：乾式再処理では原理的にプルトニウムが単独で回収できないため、軍事用転換が困難である。さらに製品は放射線が極めて強いのでテロリスト等による盗難が難しい。
- ④ 炉と再処理施設の併設立地(コロケーション)に適している：再処理と燃料製造が一つの施設で一連の流れの中でできるため、原子炉、再処理、燃料製造が同一施設で可能となる、このため新燃料や使用済み燃料輸送作業が大幅に低減(ほとんど無し)できる。

4.3 金属燃料 FBR の概要とその特徴

(1)燃料の概要と特徴

①概要

- ・ 溶融させた燃料成分をモールド(鋳型)を用いて加圧して一気に鋳込むことにより燃料棒を製造する(射出成型法による燃料製造)。
- ・ 金属燃料には U-Pu-Zr からなる合金を燃料として用いる。燃料と被覆管(ステンレス鋼)の間には熱伝導媒体として金属ナトリウムを用いる。

②特徴

- ・ 酸化物燃料に比し燃料中の核燃料物質の理論密度が高い(金属(U-Pu-Zr)；15.8g/cm³、酸化物(MOX)；11.8 g/cm³、窒化物燃料(MN)；14.3g/cm³)

③課題

- ・ 金属燃料は熱伝導が良いという特徴があるが、被覆管との共存性の確保や燃料の溶融温度が低いため、運転中の燃料温度の高温化には限りがある。

(2)金属燃料炉心の概要と特徴

①概要

- ・ 実用的に満足できる炉心出口温度として 500℃以上、最大線出力密度約 500W/cm、燃料の達成燃焼度として 150MWd/kg 以上が可能である。

②特徴

- ・ 核燃料物質の密度が高く、且つ熱伝導度が良いことから高出力密度化が可能で、酸化物燃料に比べ炉心が約 20%コンパクトになる。

- ・高い密度に加え増殖性が良いために増倍時間が短い。また同一の燃料生産性を得るとすれば、酸化物燃料炉心に比べブランケット燃料が半減できる。このため再処理量が約30-40%低減できる。
- ・燃料温度が低いことから受動的な安全確保の上で有利である。

4.4 乾式技術の概要と特徴

(1)概要

- ・燃料集合体を解体、切断後、金属燃料を陽極として溶融塩中(LiCl-KCl)中で電解精製により固体陰極にウラン、液体陰極(カドミウム)にプルトニウムや一部のマイナーアクチノイド元素を回収する。さらに還元・抽出により溶融塩中に残存している超ウラン元素を回収する。回収したウランや超ウラン元素は高温で蒸留により付着した塩やカドミウムを除去した後、射出法により燃料に再加工する。
- ・酸化物燃料に適用する場合には、電解精製に先立って、リチウムなどの還元剤を使って酸化物を金属に転換する。

(2)特徴

①高い経済性

- ・高速炉燃料のリサイクルに必要な性能を、電解精製や射出成型などの単純なプロセスで達成できるため高い経済性が期待できる。

②廃棄物の低減

- ・マイナーアクチノイド元素がプルトニウムとともに回収されるため、廃棄物中の超ウラン元素(TRU)量が大幅に低減できる(群分離工程を付加する必要がない)
- ・溶融塩や液体金属等の溶媒が放射線によって劣化しないため、繰り返し利用できる(廃棄物量の低減)

③処理対象にできる燃料の幅が広い

- ・燃料形態によらず幅広く燃料再処理に適用できる。前、後処理プロセスを付加することにより UO_2 、MOXさらには窒化物にも適用できる。
- ・高燃焼度燃料、MOX燃料など高放射線を有する使用済み燃料にも特に大きな課題なく適用できる。

(3)高温プロセスに起因する課題

- ・ほとんどの主要プロセスが500℃で運転されるため、容器材料等の選定にあたっては溶融塩や活性金属に対し耐食性の高い材料の選定や開発が必要となる。
- ・湿式法に比べこれまでの経験が少ない。

5. これまでの研究開発の状況

(1) 金属燃料 FBR 炉心

- ・電中研では金属燃料炉心で、150MWeの小型から1500 MWeの大型炉心までの設計研究を行い、出力規模によらず高燃焼度、コンパクト化など実用炉に必要な経済性の達成が可能なことを明らかにした。
- ・ANLでは実験炉EBR-II等で各種の過渡試験が行われ、高い安全性が確保できる可能

性が示された。

- ・エネルギーの高い余剰中性子により効率良く、超ウラン元素の消滅を図ることが可能であることを明らかにした。

(2) 金属燃料

- ・米国では EBR-II を使った多くの照射試験が行われてきた。U-Zr 燃料については約 13500 本、U-Pu-Zr 燃料では約 600 本程度の照射が行われ、そのうち約 1500 本は 10at% 以上の燃焼度が達成されている。またそれらの照射後試験も実施され、高燃焼度まで健全に運転できることが実証されている。
- ・また電中研では、超ウラン元素研究所との共同で、超ウラン元素を含んだ燃料ピンを製造し、平成 12 年からの仏高速炉フェニックスでの照射試験を待っている。
- ・燃料と被覆管との共晶挙動の把握を電中研で進めており、これまでに炉心出口温度 500℃以上が達成できることを明らかにしている。

(3) 乾式リサイクル

- ・乾式再処理については、ANL で開発が進められてきたが、米国の積極的にプルトニウム利用は行わないという方針のもと、平成 6 年 9 月にその研究開発は中断された。(平成元年から本分野で電中研は DOE と共同研究、電力は原電が代表して平成 4 年から共同研究に参加)
- ・現在は ANL で使用済み燃料処理試験へとプログラムを変更して、電解精製で使用済み燃料からウランだけを回収する試験を実施している。これまでにドライバー燃料 100 集合体(重金属量 410kg)、ブランケット燃料 13 集合体(重金属量 618kg)からウランを回収した。
- ・電中研では小規模な TRU の分離試験(米国ミズーリ大学において)を実施し、ウラン、プルトニウムだけでなく、ネプツニウム、アメリシウムのマイナーアクチニドも 99% 以上の回収が可能であることを実証した。
- ・さらに原研との共同研究でも、電解精製により金属プルトニウム、ネプツニウムの回収に成功している。
- ・現在、少量の使用済み燃料等(十数グラム～数十グラム規模)を用いて、実際に乾式法でリサイクルするプロセスの実証に向けて、欧州連合超ウラン元素研究所にホット施設を設置したところである。
- ・また、プルトニウムを用いたプロセスの試験を実施するため、核燃料サイクル機構とも共研を開始した。

6. 電中研における国内外研究機関との協力と課題

電中研では TRU を用いた試験などを国内外の幅広い機関の協力を得て実施している。

(1) 電中研内部での研究

- ・燃料・炉心設計手法の開発と設計研究
- ・模擬物質を用いたリサイクルの基礎的試験
- ・リサイクルのプロセスフローの確立
- ・装置設計手法の開発とプロセスの設計研究

(2)国内機関との協力

①大学(京都大学、名古屋大学、東北大学)

- ・ウランやトレーサー量のネプツニウムを用いた基礎データの取得
- ・ウランと希土類元素合金の熱力学データの所得

②日本原子力研究所

- ・ウラン-ジルコニウム合金燃料と被覆管材との共晶反応に関する基礎検討
- ・プルトニウムやウランを用いた電解精製技術の開発

③核燃料サイクル開発機構

- ・プルトニウムを用いた乾式再処理プロセスの検討(平成11年下期から共研開始)
- ・リサイクルシステムの設計評価(平成11年下期から共研開始)

④国内メーカー

- ・要素技術のウラン試験

(3)国外機関との共同研究

①アルゴンヌ国立研究所

- ・プルトニウムを用いた実験研究による乾式再処理プロセスと装置開発
- ・使用済み燃料を用いた実規模リサイクル試験(ホット試験に入る前に中断)

②ボーイング社(旧ロックウェル社)、ミズーリ大学

- ・超ウラン元素を用いた基礎研究
- ・実験室規模での超ウラン元素の分離実証試験

③超ウラン元素研究所

- ・マイナーアクチニド含有金属燃料の特性試験、照射燃料の製作、フェニックス炉での照射試験
- ・超ウラン元素、使用済み燃料を用いた実験室規模によるリサイクルプロセスの実証

④英国AEAテクノロジー社

- ・U-Pu-Zrと被覆管材との共晶に関する炉外試験
- ・超ウラン元素を用いた酸化物の金属への還元試験

7. 今後の研究開発の課題と実用化へのシナリオ

これまでの基礎的な研究開発の結果として、金属燃料 FBR と乾式リサイクルのプロセスが確立でき、機器、装置類の概略設計を行い、有力な候補技術として提案できる段階に至っている。

しかし、金属燃料 FBR/乾式リサイクルは湿式技術に比べこれまでの経験が少なく、開発には様々な課題がある。主要な技術課題としては、炉については

- ・被覆管との共存性を含めた燃料の照射試験データの蓄積および炉心損傷時の安全性確保のシナリオの明確化

乾式リサイクル技術については、

- ・使用済み燃料プロセスを用いた各プロセスの実証、工学レベルの装置設計、高温融体の自動移送技術の開発、耐食性の高い高温材料の選定や開発

があげられる。これらの研究開発には原研、核燃料サイクル開発機構などを含めた国レベ

ルの支援が必要である。

さらに、実用化へのシナリオとしてはプロセスの実証や工学装置の検討の後に、実用炉を見通した小規模出力の炉とその燃料リサイクルを実証する一体型リサイクル試験施設へ発展させて行くことが考えられる。

現在、本原子力長計策定会議や国、電力が一体となって進めている FBR 実用化戦略評価研究で今後の FBR システムが検討されている段階であり、そこで行われる開発計画策定に積極的に協力していきたい。