

課題目標・目的及び研究成果

研究開発課題名（研究機関名）： <p style="text-align: center;">FBRの円滑な導入のための柔軟な燃料サイクルに関する研究開発 （日立GEニュークリア・エナジー株式会社）</p>											
研究開発の実施者： <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none;">機関名：日立GEニュークリア・エナジー(株)</td> <td style="width: 50%; border: none;">代表者氏名：深澤哲生</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">機関名：(株)日立製作所</td> <td style="border: none;">代表者氏名：笹平 朗</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">機関名：(財)電力中央研究所</td> <td style="border: none;">代表者氏名：井上 正</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">機関名：(独)日本原子力研究開発機構</td> <td style="border: none;">代表者氏名：湊 和生</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">機関名：(国)北海道大学</td> <td style="border: none;">代表者氏名：佐藤正知</td> </tr> </table>		機関名：日立GEニュークリア・エナジー(株)	代表者氏名：深澤哲生	機関名：(株)日立製作所	代表者氏名：笹平 朗	機関名：(財)電力中央研究所	代表者氏名：井上 正	機関名：(独)日本原子力研究開発機構	代表者氏名：湊 和生	機関名：(国)北海道大学	代表者氏名：佐藤正知
機関名：日立GEニュークリア・エナジー(株)	代表者氏名：深澤哲生										
機関名：(株)日立製作所	代表者氏名：笹平 朗										
機関名：(財)電力中央研究所	代表者氏名：井上 正										
機関名：(独)日本原子力研究開発機構	代表者氏名：湊 和生										
機関名：(国)北海道大学	代表者氏名：佐藤正知										
研究期間及び予算額：平成18年度～平成20年度（3年計画） 204,711千円 <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 60%;">平成18年度</td> <td style="width: 40%;">82,525千円</td> </tr> <tr> <td>平成19年度</td> <td>68,590千円</td> </tr> <tr> <td>平成20年度</td> <td>53,596千円</td> </tr> </table>		平成18年度	82,525千円	平成19年度	68,590千円	平成20年度	53,596千円				
平成18年度	82,525千円										
平成19年度	68,590千円										
平成20年度	53,596千円										
項目	内 容										
1. 目的・目標	<p>本研究開発で対象とする革新的原子力システムは、FBRの円滑な導入を可能とする経済性、柔軟性に優れた燃料サイクルシステムである。我が国の軽水炉からFBRへの移行期については、多角的な検討を行って、経済性や核不拡散性に優れ、使用済燃料貯蔵量の低減にも寄与する等、我が国の政策や社会的ニーズを満たすとともに国際的な要求にも応えられるサイクルシナリオを明らかにし、それを実現するシステムを構築して必要技術を開発することが急務である。</p> <p>(1) 軽水炉からFBRへの移行シナリオの検討</p> <p>これまでFBRサイクルの研究開発はもっぱらFBRしか存在しないFBR平衡期を対象に最適化が行われて来た。一方、軽水炉からFBRへの移行期には、軽水炉からも使用済燃料が発生し、軽水炉使用済燃料再処理で回収したプルトニウム(Pu)はFBRの立上げに利用されるため、余剰Puを所有しない基本方針に則った使用済燃料対策・再処理政策が重要である。また、移行期にはFBRの導入に伴う社会的、国際的、技術的側面から様々な不確実性があるため、柔軟な対応が求められる。このようにFBRの移行期サイクルは平衡期と大きく違っており、移行期サイクルとして最適なシステムを構築する必要がある。これらを踏まえ、本研究開発は、軽水炉からFBRへの移行期サイクルの幅広いシナリオを対象に、Pu需給量、使用済燃料の組成に応じた必要再処理量、軽水炉使用済燃料貯蔵量等の物量解析を行い、経済性、核不拡散性及び柔軟性を評価して我が国に合った柔軟で効率的な燃料サイクル像を構築する。</p> <p>(2) 柔軟性のある燃料サイクルシステム技術の検討</p> <p>考案した柔軟な燃料サイクル構想(FFCI)を標準システムと比較して図1に示す。FFCIは軽水炉使用済燃料のウラン(U)の分別を行い、残渣を「リサイクル原料」としてFBRの導入状況により直ちにFBR再処理に送るか、簡易加工して一時貯蔵するかの選択が可能なものである。FFCIはリサイクル原料の採用によりFBRの導入状況に柔軟</p>										

に対応することができるので、軽水炉再処理(ウラン分別)の稼働率を高め、経済性に優れる。さらにFFCI のリサイクル原料は軽水炉使用済燃料と同等以上の放射線量率を有しており、核不拡散性でも優れている。本研究では、FFCI の枢要(革新)技術であるリサイクル原料の模擬試験物質を製造して基礎物性試験を行い、得られる基礎物性データを用いて貯蔵設備の除熱性能や未臨界安全性を評価して成立性を確認する。リサイクル原料の貯蔵設備は、組成等の近い高レベル廃棄物(ガラス固化体)貯蔵設備を参考に、分かりやすい安全性で社会的受容性を確保する。

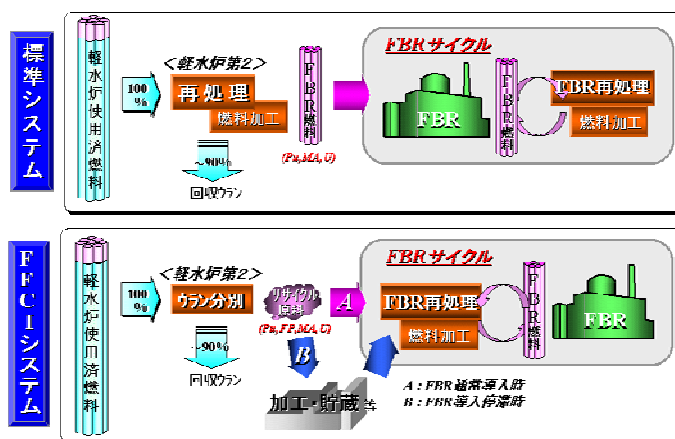


図1. FBR 移行期の燃料サイクルシステム例

本事業の全体計画を以下に示す。

【1. 軽水炉からFBR への移行シナリオの評価検討】

- ①FBR 移行期サイクルシナリオ検討:国の原子力政策大綱で示された2050 年から運転寿命を終えた軽水炉を高速炉で建替えていくという案を基本シナリオとし、サブシナリオとしてFBR 導入開始時期が2040 年に早まった場合及びFBR導入速度が基本シナリオの半分が遅れた場合等を検討する。また、FBR 立上に必要な軽水炉ウラン燃料及びMOX 燃料は今後の高燃焼度化等を考慮して評価を行う。
- ②燃料サイクルシステム検討:FBR 移行期サイクルに対応するサイクルシステムとして標準的システムと柔軟性のあるFFCI システムを対象として検討する。また、種々の柔軟性確保手段を採用した燃料サイクルシステム内の核物質の流れ、物量を解析する「柔軟性解析コード」を開発し、各システムの柔軟性を検討する。
- ③物量・経済性評価:「柔軟性解析コード」の解析結果からFBR 移行期の燃料サイクルの物量・経済性を解析評価する「経済性解析コード」を作成する。本コードで、再処理、燃料加工、貯蔵設備等のサイクル関連設備の必要設備規模を求め、既存コストデータを用いて各システムの経済性を評価する。
- ④まとめ:種々のサイクルシナリオと燃料サイクルシステムの組合せにおいて、経済性、核不拡散性、必要再処理容量、軽水炉使用済燃料貯蔵量等の評価結果をもとに、総合評価を行い柔軟性のある移行期燃料サイクルシステムを確立する。その結果に基づき、技術開発課題の抽出と開発ロードマップを作成する。

【2. 柔軟性のある燃料サイクルシステム技術の検討】

	<p>リサイクル原料の製造技術は「FBR 実用化戦略調査研究」や米国 GENP (国際原子力エネルギーパートナーシップ) 等で採用され、世界標準と考えられる先進湿式再処理技術のウラン粗取技術を代表として選定し、酸化物リサイクル原料模擬物質を製造して基礎特性試験を実施する。</p> <p>①サイクルシステム技術基礎特性試験：模擬リサイクル原料の基礎特性を試験により確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・酸化物リサイクル原料調製基礎試験と充填方法検討：酸化物リサイクル原料の試験試料を製造する装置、充填装置、基礎特性測定装置を整備し、基礎試験により実験手順を定める。また、充填方法を検討する。 ・酸化物リサイクル原料の試験試料の製造と性状分析：酸化物リサイクル原料としては主成分であるウラン、希土類、アルカリ土類、アルカリ元素を含む模擬試料を、硝酸溶液から蒸発乾燥、焙焼して製造する。この試料につき、比表面積、粒径、粒子形状、かさ密度、真密度、流動度、充填前の熱伝導度等を測定する。 ・充填、焼成試料の特性試験：充填、焼成試料の基礎特性(熱伝導度と充填率)を測定し、備蓄施設の評価に資する。 <p>②サイクルシステム技術成立性評価：ガラス固化体貯蔵施設をモデルに備蓄施設の概念設計を行い、リサイクル原料の基礎特性(熱伝導度と充填率)に基づき除熱性能及び未臨界安全性を評価し、備蓄システムの技術成立性を確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・技術調査：既存設備のリサイクル原料備蓄システムへの適用性を調査検討する。 ・除熱性能の評価：ガラス固化体貯蔵設備における構造を基本モデルとし、想定されるリサイクル原料の基礎特性(熱伝導度と充填率)の範囲に基づいて、除熱性能の試算を行い、熱的に妥当な備蓄施設のモデルを構築する。 ・臨界安全性解析：仮想事故として、事故時冷却性が十分確保できずにリサイクル原料が熔融した事象を想定し、通風管ピッチ、Pu 富化度を設定して臨界特性の解析評価を行う。 <p>【3. 技術評価委員会の開催】</p> <p>本開発の計画、推進内容についてレビューを受けるため、技術評価委員会を開催する。</p> <p>【4. まとめ、評価】</p> <p>平成 18 年度～20 年度の成果をまとめ、当初計画に対する達成状況を評価する。また、今後の開発課題をまとめる。</p>
<p>2. 研究成果</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 成果 ・ 副次的な成果 ・ 論文、特許等 	<p>【研究開発項目 1：軽水炉から FBR への移行シナリオの評価検討】</p> <p>[得られた成果]</p> <p>①FBR 移行期サイクルシナリオ検討</p> <p>軽水炉から FBR への移行期における幅広いシナリオを対象に、Pu 需給量や必要再処理量等の予備物量解析を行い、柔軟で効率的な燃料サイクルシステムに関する詳細評価に用いる検討シナリオを物量の変動を網羅する観点から抽出した。各種燃料形態に関する再処理、燃料加工技術の調査からシナリオ検討ケースに適合する再処理法、燃料加工法を選定し、燃料サイクルにおけるマイナーアクチノイド(MA) 処理の調査から MA の処理方法を選定して、選定結果に基づきシナリオ検討ケースを作成した。次に、FBR 移行期の燃料サイクルシステム</p>

の検討をするためのシナリオの絞込みを行った。絞込みに際しては、FBR 導入開始時期や導入速度は重要かつ経済性への影響の大きいことから、重点化して絞込み・選定を行い、14 のシナリオケースを選定した。また、燃料燃焼度について、45 GWd/t から60 GWd/t へ移行する時期を、2020 年から、60 GWd/t への移行がない場合まで変化させ解析し、FBR 移行期間の物量への影響が小さいことを確認した。

②燃料サイクルシステム検討

標準システムとFFCI システムの燃料サイクルシステムを対象とした、FBR 移行サイクルにおけるPu 需給バランス、回収U 量、使用済燃料貯蔵量等を解析評価するためのプログラム「柔軟性解析コード」の基本コード作成及び試計算を実施し、本解析コードの適用性を評価した。完成させた「柔軟性解析コード」を用いて、製品核分裂性Pu (Puf) の貯蔵量の制限がない場合及び20 t 以下と制限した場合に対して絞込んだ移行期サイクルシナリオにおける、標準システムとFFCI システムの軽水炉再処理量、使用済燃料貯蔵量、MOX 燃料加工量、製品Puf 貯蔵量、リサイクル原料貯蔵量等のサイクル諸量を解析した。その結果、FFCI システムは、標準システムより各種諸量を低減可能であり、柔軟性に優れていることが分かった。また、FFCI は、ウラン分別再処理後の少量/高Pu 濃度/高線量率のリサイクル原料の一時貯蔵オプション導入により、再処理導入容易化(処理量または機能が約1/2)、使用済燃料/製品Pu 貯蔵リスク低減(貯蔵量が約1/2~1/10)、貯蔵後の方針決定余裕確保(使用済燃料と同等の線量率で長期貯蔵も可能)、FBR 導入への迅速対応(Pu 濃度が使用済燃料の約10倍)など、各種リスクを低減した上で原子力環境の変化に容易に追従できる柔軟性を有している。

③物量・経済性評価

FBR 移行サイクルの軽水炉再処理、FBR 燃料製造、貯蔵設備等の設備容量、経済性を解析するためのプログラム「経済性解析コード」の基本コードを作成し、試計算により本解析コードの適用性を評価した。完成させた「経済性解析コード」を用いて、FFCI と標準システムの経済性評価を行うため、絞込んだ各燃料サイクルシナリオについて、六ヶ所再処理と関連燃料サイクルの事業コストデータを用いて、FBR 移行期燃料サイクル事業費単価を解析した。その結果、FFCI システムは、標準システムより事業費単価を20~40%程度低減できることが分かった。国際的にも高額である六ヶ所再処理のコストデータ以外に、低額である先進再処理のコストデータも用いて評価して、同等の事業単価低減効果が得られること及び六ヶ所再処理データによる経済性評価結果の妥当性を確認した。

④まとめ

柔軟性、経済性、核不拡散性、環境負荷低減性、信頼性に対して評価し、総合評価を行うための手法を検討した。金属燃料FBR・再処理の燃料サイクルは、酸化燃料サイクルと比較して、核分裂性プルトニウムの必要量が少なく低増殖でよいこと、FBR 再処理量が低減できることが分かった。また、FFCI システムと標準システムの総合評価を行い、FFCI は技術課題はあるものの柔軟性、経済性、核不拡散性、環境負荷低減性の観点で優れていることが分かった。さらに、FFCI の技術課題を摘出し、2050 年頃までの開発ロードマップを作成した。

【研究開発項目 2 : 柔軟性のある燃料サイクルシステム技術の検討】

[得られた成果]

①サイクルシステム技術基礎特性試験

・酸化ウランリサイクル原料調製基礎試験と充填方法検討

酸化ウランリサイクル原料の模擬試料としてU及び模擬核分裂生成物(FP)等を含んだ少量の試料を調製し、形状等を調べるとともに、貯蔵容器への充填方法の検討を行った。また、酸化ウランリサイクル原料模擬試料の特性測定を行う熱伝導度測定装置、粉体特性測定装置を整備し、特性測定のための実験手順を定めた。

・酸化ウランリサイクル原料の試験試料の製造と性状分析

定めた実験手順に基づき、酸化ウランリサイクル原料の模擬として、U及び模擬FPを含む試料を、硝酸溶液から蒸発乾燥、焙焼して製造するとともに、形状、組成、粒径、比表面積等の性状分析を行った。平均粒径は、小粒径試料で約1~2 μm 、大粒径試料で約17 μm であることが分かった。

・充填、焼成試料の特性試験

製造したU及び模擬FPを含む模擬酸化ウランリサイクル原料について、熱伝導度測定装置などを用いて、充填試料の熱伝導度、充填率などの基礎特性を測定した。大粒径試料の熱伝導度は空気中で0.14~0.23 W/m/K、He中で0.25~0.36 W/m/Kであり、いずれの場合も小粒径試料より1.8倍程度高い値を示すことが分かった。また、測定した模擬酸化ウランリサイクル原料の熱伝導度データを、リサイクル原料の備蓄施設の成立性評価に供した。

②サイクルシステム技術成立性評価

・技術調査

既存設備とリサイクル原料特性を調査し、ガラス固化体貯蔵設備がリサイクル原料備蓄に適用できる見通しを得た。

・除熱性能の評価

既存のガラス固化体貯蔵設備の構造、除熱機能及びリサイクル原料の基本特性、特に発熱密度に基づいてリサイクル原料備蓄施設の除熱性能を試算した。次に、サイクルシステム技術基礎特性試験の評価結果をもとに、リサイクル原料備蓄施設の除熱性能を評価し、熱的に最適な備蓄施設のモデルを構築した。その結果、粒径約17 μm の模擬リサイクル原料の場合、中心温度は目標値の約850 $^{\circ}\text{C}$ (目標1000 $^{\circ}\text{C}$ 以下)となり、十分な除熱性能を有していることが分かった。

・臨界安全性解析

リサイクル原料備蓄施設における冷却不足によるリサイクル原料溶融の仮想事故について、起こりうる事象を想定し、本事象に適用するに当たって適切な臨界解析の手法を調査した。次に、備蓄条件と使用済燃料仕様を設定して臨界特性の解析評価を行い、臨界安全上の備蓄施設仕様をまとめた。1次元の汎用炉心計算コードシステムを用いて、臨界安全上の備蓄施設仕様の検討に用いた臨界解析手法の妥当性を評価した結果、核物質の高さ約7cmは臨界厚さの約12cmより十分低くなり、臨界安全性を確保できることが分かった。

リサイクル原料と使用済燃料、高レベル廃棄物の貯蔵を比較すると、リサイクル原料のPu濃度はFBR使用済燃料と同等で、発熱量は三者同等である。したがって、臨界はFBR使用済燃料貯蔵と、除熱は使用済燃料や高レベル廃棄物と同等の安全性を有しており、リサイクル原料の安全性は問題なく確保できるものと考えられる。

【研究開発項目 3：技術評価委員会の開催】

本開発の計画、推進内容についてレビューを受けるため、技術評価委員会を開催した。委員会で得られた、柔軟性、経済性、備蓄安全性の評価方法等の有益なコメントを本開発計画や成果のまとめ方に反映した。

【研究開発項目 4：まとめ、評価】

[得られた成果]

平成18年度～平成20年度の成果をまとめ、当初計画に対する達成状況を評価し、十分な成果が得られたことを確認した。また、今後の開発課題をまとめた。

【事業全体】を通して

軽水炉からFBRへの移行シナリオを網羅的に検討して、考案したFFCIシステムが標準システムより柔軟性、経済性等で優れていることが分かった。この際、技術評価委員会などのコメントに従い、検討ケースを拡張し、複数の経済性評価データ・手法を用いてFFCIの優位性を確認した。また、当初予定になかったが、模擬リサイクル原料の粒径を調整して、熱伝導度の粒径依存性を把握し、ガス成分の平均自由行程で説明できることを明確にした。大粒径の模擬リサイクル原料で測定された熱伝導度を用いて解析評価し、リサイクル原料一時貯蔵施設の除熱安全性を確保できること、及びFBRの再臨界評価手法を参考にして解析し、臨界安全性を確保できることを明らかにした。

【論文、特許等】

- Transition Period Fuel Cycle from Current to Next Generation Reactors for Japan, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 44, No. 3, March 2007
- Uranium Recovery in LWR Reprocessing and Plutonium/Residual Uranium Conditioning in FBR Reprocessing for the Transition from LWR to FBR, Proc. ATALANTE 2008, Montpellier, May 2008
- Flexible Transition System from LWR Cycle to FBR Cycle, Proc. 10th OECD/NEA Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Mito, October 2008
- Flexible Fuel Cycle R&D for the Smooth FBR Deployment, Proc. 16PBNC, Aomori, October 2008
- Flexible Fuel Cycle Initiative for the Transition from LWR to FBR, International Workshop for Asian Nuclear Prospect, Kobe, October 2008
- Flexible Fuel Cycle System for the Transition from LWR to FBR, Proc. ICAPP' 09, Tokyo, May 2009
- Transition Period Fuel Cycle from LWR to FBR, Proc. GLOBAL2009, Paris, September 2009
- FBR円滑導入のための柔軟な燃料サイクルに関する研究開発-(1)～(4), 日本原子力学会「2007年秋の大会」
- FBR円滑導入のための柔軟な燃料サイクルに関する研究開発-(5), 日本原子力学会「2008年春の年会」
- FBR移行期サイクル諸量に対する諸パラメータの影響度評価, 日本原子力学会「2008年春の年会」
- FBR円滑導入のための柔軟な燃料サイクルに関する研究開発-(6)～(10),

	<p>日本原子力学会「2008年秋の大会」</p> <ul style="list-style-type: none"> ・FBR円滑導入のための柔軟な燃料サイクルに関する研究開発-(11)～(15), 日本原子力学会「2009年春の年会」 ・FBR円滑導入のための柔軟な燃料サイクルに関する研究開発-(16)～(18), 日本原子力学会「2009年秋の大会」
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実施計画の進捗 ・革新的なブレイクスルー ・成果及び発展性 	<p>【実施計画の進捗】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・計画に従って、計画した成果が得られていると評価できる。 <p>【革新的なブレイクスルー】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・先進湿式再処理法と簡素化ペレット法をレファレンスとしつつ、独自の立場から、移行期のシナリオの検討、柔軟性のある技術の提示とコスト評価を行った本研究の成果は、大いに先見的示唆を有すると評価できる。 ・軽水炉からFBRへの移行期の燃料サイクルシステムとして、提案された柔軟性を有する概念は、将来のオプションの一つとして期待される。 <p>【成果及び発展性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今後の技術開発の課題が明らかになっていると思われる。第一ステップとしては十分な成果が得られていると評価できる。 ・FBRの導入速度等のシナリオの想定によっては、経済的といえるのか不明なところはあるが、ある程度柔軟に経済性を確保できる方策があることが示されたことは有意義と考える。 ・燃料サイクルシステム技術にリサイクル原料の基礎試験として紛体特性に取り組まれている点、ならびに模擬燃料の粉末特性を精査しHe中の実効熱伝導度への影響を評価している点は、実態の把握という観点で充分評価できる。 ・技術的な成立の目途のあるウラン分別技術が存在し、今後、経済性を含めた分別技術の絞り込みが行われるものと期待する。 ・リサイクル原料の硝酸への溶解性、リサイクル原料取扱施設の除熱・臨界対応について、さらに深く検討してもらいたい。
<p>4. その他</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・柔軟性のある燃料サイクルシステムとして多様なケーススタディを行っており、また技術評価委員会などを通じて学識経験者の意見を聞くなど、多様な意見を取り入れて研究を進めたことは評価できる。