我が国の最先端原子力研究開発

シリーズ解説 第4回

FBR サイクルの実用化を目指して(II)

革新的技術の具体化に向けて課題を解決

日本原子力研究開発機構 水田俊治, 近澤佳隆,
鷺谷忠博, 鈴木政浩

前回の解説では、限りあるウラン資源を有効利用し地球環境保全にも適合し、持続的な社会を支える枢要技術である高速増殖炉(FBR)サイクル研究開発が、いよいよ具体化・実用化を目指した新たなフェーズに入り、わが国ではFaCTプロジェクトを開始したことを紹介した。本稿では、革新的技術開発の具体化に向けて進めているFaCTプロジェクトの最新の動向(炉システムの研究開発および燃料サイクルシステムの研究開発)と今後の展望について紹介する。

I. 開発経緯

FBRサイクルの実用化を目指して1999年7月から2006年3月まで実施した実用化戦略調査研究では、炉型、再処理法、燃料製造法などのFBRサイクル技術に関する多様な選択肢を幅広く検討し、革新的な技術を取り入れつつ、競争力のある実用化候補概念の構築とその研究開発計画などの検討・策定を行った。国は、その研究成果を評価し、「ナトリウム冷却FBR」、「先進湿式法再処理」、「簡素化ペレット法燃料製造」の組合せを実用施設として実現性が最も高い実用システムの主概念とし、今後は実用化に集中した技術開発を行い、FBRサイクルの研究開発を加速すべきとした。また、技術的な知見を前倒しで蓄積していくことの重要性、研究開発資源の効率的利用などを考慮し、国は2050年頃までのロードマップを想定した。

日本原子力研究開発機構では、このロードマップに基づき2015年頃から技術の実証・実用化に移行できるよう、実用化戦略調査研究からステップを一步進め、FaCTプロジェクト(Fast Reactor Cycle System Technology Development Project)として主概念の実用化に集中した研究開発を開始した。

本稿では、この研究開発のうち、炉システムおよび燃

料サイクルシステムについて最先端の動向を紹介する。

II. 炉システムの研究開発

FaCTプロジェクトでは、国の評価・方針に基づき「酸化燃料ナトリウム冷却FBR」の研究開発を進めている。FaCTプロジェクトで目指すFBRでは、革新的な技術を多数採用し、経済性、安全性、信頼性の高い目標を掲げた。この目標を達成するために、第1図に示すように、研究開発において実証すべき13課題について、研究開発を行っている。経済性の向上については、高クロム鋼などの新材料の採用、冷却系ループ数の削減、コンパクトな原子炉容器、ODS(酸化物分散強化型)鋼による炉心高燃焼度化等革新技術を採用するとともに機器の大型化を図ることで、従来概念よりもプラント物量や建屋容積を低減可能なプラント概念を構築している。また、安全性については、自然循環崩壊熱除去系、受動的炉停止機構、再臨界回避対策を考慮した燃料集合体構造を採用して実用炉に求められる安全性を追求している。概念の成立性に係る課題については、実用化戦略調査研究において、大口径配管水流動試験(第1図②)、ポンプ組込型中間熱交換器の1/4スケール試験(第1図③)、1/10スケール炉上部流動試験(第1図④)、2重管蒸気発生器(第1図⑨)、自己作動型炉停止機構(SASS)(第1図⑪)、再臨界回避技術(第1図⑫)等の研究開発が実施され、従来から積極的に報告されている¹⁾。FaCTでは、より現実的に製作性および許認可性を考慮した検討が進められており、本章ではその進捗を踏まえ、最新の開発

Toward Commercialization of FBR Cycle (II): Shunji MIZUTA, Yoshitaka CHIKAZAWA, Tadahiro WASHIYA, Masahiro SUZUKI.

(2008年 8月15日 受理)

第1図 炉システムの開発課題

内容を紹介する。

1. 経済性に係る課題

(1) 配管短縮のための高クロム鋼の開発(第1図①)

高温で強度が強く、熱膨張が小さい高クロム鋼を使用することで、配管短縮および機器のコンパクト化が可能になる。これまでに改良9Cr鋼を用いて蒸気発生器(SG)の主要構造である管板や伝熱管の製作性を確認するために極厚鍛鋼板試作のための砂型鋼塊凝固試験や薄肉小径管の試作等を行った。また、熱膨張を吸収する蛇腹状の構造であるCSEJ(Convuluted Shell Expansion Joint)試験体の製作、溶接試験等を開始した(第2図)。あわせて、材料強度基準を整備するため、既存データを分析評価し、必要な試験を抽出した。これに基づき試験装置を整備し、データ取得を開始した。これらの試験に

第2図 蒸気発生器主要構造の9Cr鋼による試作²⁾

より実機の製作性を見通すとともに、設計評価手法の策定を目指している。

(2) 原子炉容器のコンパクト化(第1図④)

配管や炉容器周辺機器のサイズやレイアウトだけでなく、原子炉容器のコンパクト化についても研究開発を進めている。高温のナトリウムという特殊な環境のFBRの原子炉容器では、従来の構造設計法を適用した場合、過度に保守的な設計となるため高温構造設計評価技術が求められる。「もんじゅ」の場合は液位を制御することにより、ナトリウム液面近傍の熱荷重の低減を図っているが、実用炉では特別な原子炉容器保護設備を設置せず、コンパクトな炉容器とする方針である。ここでは、熱荷重評価、構造解析、強度評価に関する最新の技術を取り入れて高温構造設計評価技術を高度化することにより、合理的な評価および設計基準の策定を目指している。これまでに熱流動と構造の一貫評価による熱荷重設定法、設計用の非弾性解析法、原子炉容器の負荷条件に合わせた高温強度評価法の開発を進めてきた。

(3) システム簡素化のための燃料取扱系の開発

(第1図⑤)

炉内燃料取扱では原子炉容器を小径化するため、スリット付き炉心上部機構により、スリットを介して燃料交換機を炉心に出し入れ可能な構造を検討している。このため、炉心上部機構を配置したままで燃料が交換でき、原子炉容器の小径化が可能になっている(これまでは炉心上部機構を移動させるためのスペースが必要であった)。燃料交換機の実規模試験体が製作され、空气中試験および耐震評価を進めている。炉外燃料取扱では、短時間の燃料交換のための複数体移送ナトリウムポットの実規模ナトリウム試験、液体廃棄物低減を考慮した乾式洗浄システムのナトリウム試験、マイナーアク

チニド(MA)含有新燃料取扱いを考慮した新燃料キャスクの除熱評価等を進めている。

2. 信頼性向上に係る課題

実用炉においては稼働率向上の観点から信頼性向上が重要となる。機器の信頼性を運転中に確認することを可能とするため、保守補修性を考慮したプラント設計に取り組んでいる。

(1) 保守、補修性を考慮したプラント設計と技術開発(第1図⑩)

不透明なナトリウム下の保守補修を行うために、ナトリウム中目視検査装置を開発している。ナトリウム中目視検査装置は、超音波の反射波を検出・映像化しナトリウム中の機器・構造表面の様子を観察するものである。すでに、水中試験を終了し、0.2 mmのスリットが目視可能であることを確認しており(第3図)、ナトリウム中においても目標精度0.3 mmを達成する可能性がある。これまでに、従来の「圧電送信-圧電受信方式」と、受信に光ファイバを利用してセンサおよびケーブルを小型化した「圧電送信-光受信方式」を用いたセンサの最適化を行っており、今後はセンサを実際に製作しナトリウム中における性能確認を目指している。

3. 安全性向上に係る課題

(1) 受動的炉停止と自然循環による炉心冷却

(第1図⑪)

実用炉では、受動安全性の向上のため完全自然循環式崩壊熱除去系を採用している。自然循環の場合、ポンプ等の動的機器に頼らないため、より確実に事故時の炉心冷却が可能と考えられる。原子炉容器内にDRACS(直接炉心冷却系)、各中間熱交換器にPRACS(1次系共用型炉心冷却系)熱交換器を設置する計画である。DRACSとPRACS間の熱的な干渉等の自然循環時の熱流動上課題を摘出し解決方を明らかにする必要がある。これまでに1次系全体と相似な1/10縮尺モデル水試験装置の製作を終了し、今後は自然循環試験により除熱特性を明らかにしていく。

(2) 炉心損傷時の再臨界回避技術(第1図⑫)

確率論的安全評価は、軽水炉の分野においても現在盛

んに検討が進められている新しい安全評価の手法である。確率論的安全評価は原子炉で発生しう事故を広範囲に把握し、おのおの事故の発生頻度と影響を定量評価することでリスクに応じてバランスのよい安全対策を可能にするものである。安全評価に確率論的手法を適用することを目標に、炉心損傷時の安全評価手法の開発を進めており、これまでに炉心損傷進展過程および放射性物質移行挙動評価数値解析コードの整備、核分裂生成物(FP)放出・構成成分反応試験を実施し、今後、デブリ・コンクリート小規模試験、解析コード検証を実施し、確率論的安全評価のイベントツリーの技術的根拠の整備を推進している。

Ⅲ. 燃料サイクルシステムの研究開発

FaCTの燃料サイクルシステムは、先進湿式法による再処理技術および簡素化ペレット法による燃料製造技術の組合せである。

燃料サイクルシステムについては、システムとして既存の技術にない様々な革新的な技術が採用されており、12課題について、研究開発でプロセスと機器の両者の成立性を見極め実証すべきとされている。今回は第4図に示す研究開発の中から、一部について紹介する。

1. 先進湿式法による再処理技術

先進湿式法再処理は、従来の再処理技術である硝酸溶液への燃料溶解と溶媒抽出によるプルトニウム(Pu)等の除染・回収技術をベースに、経済性向上、環境負荷低減、核拡散抵抗性強化の観点から、プロセスおよび機器に革新的な技術を採用しており、本技術の確立に向けて開発を行っている。

(1) 高効率溶解技術の開発³⁾(第4図②)

運転時のオフガス発生量の平坦化、臨界安全管理を考慮した装置の小型化等の観点から、回転ドラム型連続溶解槽を対象とした開発を進め、これまでに溶解槽内部でのせん断片(ハル、ワイヤ等)の挙動や閉塞抑制のための内部構造の改良等を行っている。今後は高粉化せん断燃料の効率的な溶解方法、処理能力の向上を図る大型化を検討していく。また、清澄技術については、遠心清澄技術の開発を進めている。これまでに遠隔保守を考慮した基本構造を構築、模擬物質を用いた工学規模試験による基本特性を把握している。今後は加熱時あるいは静置時に生成が懸念される2次スラッジ(モリブデン酸ジルコニウム)の挙動評価、清澄装置等の高濃度化への対応を検討していく。

(2) 晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発⁴⁾(第4図③)

晶析法は、溶解度差を利用した分離プロセスであり、燃料溶解液のウラン(U)、Pu濃度や冷却温度を制御す

(ターゲット写真)

(目視装置による可視化)

第3図 ナトリウム中目視装置の水中試験

第4図 燃料サイクルシステムの開発課題

ることで溶解液中の大部分のUを効率的に分離回収する技術であり、下流の抽出工程で取り扱う核物質量が大幅に削減され、溶媒使用量の削減による経済性の向上、分配試薬の削減等が期待できる。これまでに照射済燃料を用いたホット基礎試験により、PuやFP元素の同伴挙動の把握、プロセス条件を評価するとともに結晶精製技術の検討にも着手している。また、機器開発では、臨界安全性、結晶ハンドリング性等の観点から、連続式の回転キルン型晶析装置を選定し開発を進めている(第5図)。今後はホット基礎試験により、FP元素等の除染係数向上を図るとともに、ホット環境への機器の適用性評価などを実施してゆく。

(3) U, Pu, Npを一括回収する高効率抽出システムの開発⁵⁾(第4図④)

抽出技術については、高レベル放射性研究施設(CPF)におけるホット基礎試験および抽出シミュレーション解

析により運転条件を最適化するためのフローシート研究、抽出器の高性能化として機器内滞留時間を短縮可能な遠心抽出器の開発を進めている。フローシート研究では、硝酸ヒドロキシルアミン(HAN)による還元分配やU, Pu, ネプツニウム(Np)の共回収技術、並びに晶析法と組み合わせた簡素化溶媒抽出法を開発している。簡素化溶媒抽出法は、抽出と逆抽出のみの単サイクル抽出技術であり、分配、U逆抽出、精製の各工程を省略することで溶媒抽出工程の取扱液量が最小化できる。また、遠心抽出器は、小型化、溶媒接触時間の短縮、起動停止の迅速化等の観点から、高燃焼度、高プルトニウム富化度燃料の処理に適している。これまでに工学規模試験(10 kg-HM/h)によるシステム特性等を把握し、耐久性、耐放射線性を評価するとともに、大型プラントへの適用性の向上のため、中性子吸収材内包型や磁気軸受型の開発にも着手している。今後、フローシート条件の最適化を進めるとともに、遠心抽出器の制御性の向上、スケールアップ検討等を実施していく。

2. 簡素化ペレット法燃料製造

簡素化ペレット法燃料製造は、溶液混合段階でのプルトニウム富化度調整や原料粉末の流動性改良に加え、ダイ潤滑型成型技術を取り入れることで、従来のFBRの混合酸化物燃料製造における粉末取扱い工程等を合理化し、燃料製造設備の簡素化を目指したプロセスである。その一方で、マイナーアクチニド(MA)を含有する燃料を製造することから、遮蔽付セル内での製造が前提となり、そのための革新的な機器を開発することとしている。このため、おのおのの工程の成立性に係る課題のほか、遠隔操作、保守・補修に適した機器の開発を行う必要がある。今回は、この中から「脱硝転換・造粒一元処理技術の開発」について紹介する。

第5図 回転キルン型連続晶析試験装置(U試験用)

(1) 脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発

(第4図⑦)

脱硝・転換・造粒一元処理技術は、再処理の製品溶液を燃料製造用原料粉末に転換する処理工程において、次の4つの技術、①Pu 富化度調整技術、②マイクロ波脱硝技術、③焙焼還元技術、④粉末流動性改良(造粒技術)から成り立つものである。

簡素化ペレット法では、溶液の混合段階でPu 富化度を燃料仕様に調整(Pu 富化度調整)することにより、ペレット製造工程での粉末の混合処理工程を大幅に省くことが可能となり、燃料製造工程の簡素化が実現できるものである。また、ペレット成型用金型に原料粉末を充填し易くするために、原料粉末の流動性向上(粉末流動性改良)を図る方策として、脱硝・焙焼還元工程後に造粒処理を併せて行うものである。

Pu 富化度調整技術については、現状の送液設備に定量供給槽を追加することで、炉心燃料仕様上要求されるPu 富化度調整精度の目標値($\pm 2.5\%$ 以下)を満足できる見通し(模擬溶液を用いた試験)を得た。MOX 粉末の機械混合に比べ、溶液段階での混合方式が粉末の均一性やPu スポット有無の観点からも非常に有利であることを確認した。

マイクロ波加熱脱硝技術については、2 kgMOX/バッチ規模で実証しており、量産化への開発を進める段階である⁹⁾。今回、脱硝容器として実績が豊富な浅皿容器と円筒容器について、マイクロ波加熱時の沸騰挙動、処理時間、得られる粉末の品質などを比較する小規模のウラン試験を実施した。この結果、得られる粉末の品質にはほとんど差はないが、円筒容器の場合はマイクロ波加熱時に発生する溶液の吹きこぼれを防止するために、容器高さが必要であることから、浅皿容器が有望と考えている。

粉末流動性改良については実験室規模(300 gMOX)の転動造粒法で、MOX 粉末を造粒することにより目標とする流動性の改良が可能であることを確認した。また、量産規模を目指した造粒試験では、粒度分布がシャープな造粒粉末を高収率で得るためには、造粒後に整粒することが有効であることがわかった。

また、微粉末の飛散防止に有効である粉末の移し替えを必要としない脱硝容器と造粒容器の共用化を図るため、攪拌羽根を容器上部から駆動する上部アクセス方式造粒機による小規模コールド試験で機器操作および顆粒性状が良好であることを確認した(第6図)。

IV. 今後の展望

FaCT プロジェクトでは、これらの研究開発を進め、2010年にその開発成果を評価し、高い確度を持った見通しで革新技術の採否を判断する予定である。また、2015

上部アクセス型転動造粒機

造粒後のWO₃粒子(左の造粒機使用)

第6図 上部アクセス型造粒機および造粒後粒子

年には主概念への採用可能性を判断できるところまで具体化させた革新技術を組み合わせ、開発目標・設計要求を満足する実用施設および実証施設の概念設計を研究開発の成果として取りまとめ、FBR サイクルの適切な実用化像を明確化することを目指す。この中で燃料・材料の開発は、高速実験炉「常陽」および高速増殖原型炉「もんじゅ」を活用しつつ進めていく。

特に、「もんじゅ」については、安全確保を前提に地元の理解を得つつ、運転再開を慎重かつ着実に進め、その後の性能試験と本格運転を通じて、所期の目標である発電プラントとしての信頼性実証およびナトリウム取扱技術を確立していくことが課題である。また、得られたデータや運転経験は、設計手法の妥当性評価、プラント信頼性実証に活用するなどにより、FaCT プロジェクトおよび実用炉の設計研究に反映していく計画としている。

また、国際協力については、研究開発のリスクや資源負担の低減を図りつつ、わが国が進めている高速増殖炉サイクル研究開発の目標を諸外国と共有することで、わが国の技術が世界標準となることを目指していく。

最後に、FaCT プロジェクトでの成果を踏まえ、2025年に実証炉の運転開始、2050年より前の高速増殖炉の商業ベースでの導入を目指していく。

本報告は、経済産業省平成19年度発電用新型炉等技術開発事業、文部科学省原子力システム研究開発事業、電力共通研究の成果の一部を含みます。

— 参考資料 —

- 1) S. Kotake, *et al.*, “Development of Advanced Loop-Type Fast Reactor in Japan(1)”, ICAPP’08, Anaheim, CA, USA, June8-12, 2008.
- 2) 日本原子力研究開発機構, 平成19年度発電用新型炉等技術開発事業報告書, (2008).
- 3) Y.Sano, *et al.*, “Dissolution of Irradiated MOX Fuel for Highly Concentrated Solution”, *Proc.Int.Conf. GLOBAL 2005*, Tsukuba, Oct. 9-13, 2005, No.259, (2005).
- 4) T.Washiya, *et al.*, “Development of Crystallizer for Advanced Aqueous Reprocessing Process”, *Proc.Int. Conf. ICONE-14*, Miami, Florida, July 17-20, 2006 No.89292, (2006).

- 5) M. Nakahara, *et al.*, "Actinides Recovery by Solvent Extraction in NEXT Process", *Proc. Int. Conf. GLOBAL 2005*, Tsukuba, Oct9-13, 2005, No.262, (2005).
- 6) M.Suzuki, *et al.*, "Development of FR Fuel Cycle in Japan(3)", *Proc ICAPP'08*, 2036-2045, Anaheim, CA, USA, June8-12, 2008, in CD-ROM.

鷲谷忠博(わしや・ただひろ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)燃料再処理

鈴木政浩(すずき・まさひろ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)燃料開発, 電磁波応用/エネルギー戦略

著者紹介

水田俊治(みずた・しゅんじ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)炉心材料, 照射効果/
ナレッジマネジメント

近澤佳隆(ちかざわ・よしたか)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)高速炉プラントシス
テム設計/燃料取扱系設計

広告記事(PRのページ)新設と募集のお知らせ

1. 広告記事(PRのページ)の募集

学会誌では, 一般広告以外の広告記事(PRのページ)を新たに掲載することとしました

・掲載場所

- ① 従来の広告のページと同じ位置
- ② 「学会誌記事の最後で会報の前」(新規)

・掲載料金

- ① 従来の広告のページと同じ位置に掲載する場合は, 一般の広告料と同じ
- ② 学会誌記事の最後(会報の前)は80,000円/頁

・広告記事のページ数: 1~2頁(2頁の場合は「見開き」とする)

・掲載条件: 広告記事ページの右上に(広告記事)または(PRのページ)と記載する

2. 広告記事原稿の提供等

・版下は広告出稿主が提供する

・カラーの場合は出稿主がカラー印刷代を負担する

・生原稿の場合は一般広告と同じ(版下・フィルム制作費として20,000円, 版下支給の場合はフィルム制作費として5,000円を別途申し受けます)

(学会誌の広告記事としてふさわしくないと編集委員会が判断した場合は掲載をお断りする場合があります)