

評価の詳細

研究開発課題名（研究機関名）：

燃料取扱い系システムの開発

（日本原子力発電株式会社）

研究開発の実施者

機関名：日本原子力発電株式会社

代表者氏名：小竹庄司

機関名：独立行政法人日本原子力研究開発機構

代表者氏名：宇都成昭

研究期間及び予算額：平成18年度～平成21年度（4年計画） 1,695,604千円

研究開発予算

平成18年度	334,141千円
平成19年度	919,527千円
平成20年度	257,200千円
平成21年度	184,737千円

項目	内容
1. 目的・目標	<p>【研究開発目標】</p> <p>燃料取扱い系の開発課題は、経済性向上のための原子炉容器のコンパクト化に適用可能なこと、MA含有量が多い高発熱燃料の交換・輸送効率を向上させることである。本技術開発課題では、ナトリウム冷却炉の経済性を向上させる燃料取扱い系システムを開発する。</p> <p>(1)スリット付き炉上部機構に適用可能な燃料交換機の開発</p> <p>FSフェーズIIでは原子炉容器のコンパクト化を狙っていることから、回転プラグを小径化可能なスリット付き炉上部機構と整合する燃料取扱い系とする必要がある。また、定検期間を短縮し稼働率を向上させるために、燃料交換期間を14日程度とすることも目標である。ここでは、実用炉の原子炉構造との取り合い条件と合致する燃料交換機概念と概念を成立させるために必要な要素技術を開発する。</p> <p>期待される成果は、燃料交換機概念図及び技術的成立性の根拠となる要素技術開発データである。</p> <p>本技術開発課題における具体的な開発要件は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・取扱う集合体：炉心燃料集合体、制御棒、遮蔽体を炉心内の所定の位置、中継ポット、移送用ポット間で取扱いができること。 ・地震応答：技術検討書記載の入力地震動でも安全機能を有する設備に影響を及ぼさないこと。 ・燃料交換速度：約30分で移送用ポットとの間で燃料交換を可能とすること。 <p>(2)燃料集合体を2体同時移送可能なナトリウムポットの開発</p> <p>原子炉容器と炉外燃料貯蔵槽（EVST）の間の燃料移送に用いる燃料交換作業の効率化に有効な2体同時移送可能なナトリウムポットを開発する。本体ナトリウムポットでは異常時の冷却源はナトリウムポットを収納する容器の外面の空気冷却であり、その冷却パスには複数流路の自然循環流動、輻射熱伝達、熱伝導が含まれる複雑なものとなる。異常時にも燃料が十分</p>

に冷却され、かつ炉上部機構をコンパクトにできる小径のナトリウムポット概念を開発することが課題である。ここでは、ナトリウムポット概念を構築し、概念を成立させるための要素技術を開発する。

期待される成果は、ナトリウムポット概念及び技術的成立性を示す除熱データである。

本技術開発課題における具体的な開発要件は以下のとおりである。

- ・冷却条件：ナトリウムポット移送中のいかなるポジションで停止した場合にも燃料集合体1体あたり最大22.4kWの発熱量を持つ集合体を、燃料温度を制限値以下（24時間以内：630℃、24時間以上：600℃）に冷却できること。

(3)使用済燃料の直接水プール貯蔵に適用する燃料洗浄システムの開発

FS フェーズⅡでは液体廃棄物量及び固体廃棄物量低減のために、廃棄物を極力少なくする燃料洗浄方法の導入と使用済燃料を密封缶に封入することなしに水プールに直接浸漬・貯蔵する概念の導入を検討している。炉心燃料は内部ダクト付き集合体であり、ダクト内の滞留ナトリウムを効率よく排出・不活性化し直接水プール貯蔵可能とすることが開発課題である。ここでは、液体廃棄物量を低減させ、かつ効率良く使用済燃料からナトリウムを除去可能なシステム概念を構築し、概念を成立させるために必要な要素技術を開発する。

期待される成果は、ナトリウム除去及び不活性化のシステム概念とシステム評価結果及び技術的成立性を示すナトリウム除去性能データである。

本技術開発課題における具体的な開発要件は以下のとおりである。

- ・システム概念：燃料取扱い系に洗浄システムを付加し、建屋等を大型化する必要がないコンパクトなシステムとする。
- ・システム評価：洗浄後に集合体に金属ナトリウムが存在しないこと。

(4)TRU 燃料輸送時の除熱技術の開発

FS フェーズⅡでは TRU を含有した燃料を炉心燃料として使用することを想定しており、新燃料の発熱量が大きいことが特徴である。ここでは、品質の確保、遮蔽、冷却性、高い輸送効率をバランスさせた新燃料輸送方式を開発する。

期待される効果は、新燃料輸送概念と技術的成立性を示す除熱性能データである。

- ・新燃料発熱量：集合体あたり 1～3kW の範囲
- ・輸送効率：輸送効率向上のため、できるだけ多くの新燃料（5～10 体程度）を1度に輸送できることを目標とする。
- ・安全性：容器は燃料輸送に関する認可を所定の研究開発後に取得できる見込みを有すること。

【全体計画】

(1)スリット付き炉上部機構に適用可能な燃料交換機の開発

①燃料交換機概念の構築

FS フェーズⅡの2案（パンタグラフ式、マニプレータ式）について、基本構造・仕様を検討する。また運転機能・性能、保守・補修性、異常時対応性等の観点で評価を行い、開発対象となる燃料交換機を選定する。

②燃料交換機アーム実規模動作試験

製作公差やアームの軸等のガタが大きく影響することが予想されるため、実規模大の試験装置を製作する。また、剛性及び振動特性、アーム

	<p>開閉、グリッパ昇降、爪開閉の基本的動作及び動作速度・時間並びに位置決め精度等に関する試験を行い設計データを取得する。</p> <p>③実機適用性評価</p> <p>前項の試験結果を踏まえて、実機設計を行い、構造、仕様を設定する。また、地震時の剛性、燃料交換時のアームの位置決め精度及び燃料交換時間等の要件に関して適用性を評価する。</p> <p>(2)燃料集合体を2体同時移送可能なナトリウムポットの開発</p> <p>①フィン形状・コーティング条件確認試験</p> <p>試作より、ナトリウムポット表面に安定した加工、施工ができるフィン形状及びコーティング条件を選定する。</p> <p>②輻射率測定試験</p> <p>輻射率測定試験装置を製作する。また、試験片のナトリウムへの浸漬度合い、試験片の温度をパラメータとして輻射率を取得する。</p> <p>③ポット除熱試験</p> <p>ナトリウムポットを模擬した試験体を製作するとともに、原子力機構の設備であるナトリウム伝熱流動試験装置の一部に、試験体を取り付ける。試験では、実機の間接冷却を模擬した条件で行い、ヒータの発熱量及び試験体各部及び間接冷却の流量、温度等からフィン付きナトリウムポットの伝熱性能を確認する。</p> <p>④ポット除熱量解析</p> <p>ナトリウムポットの除熱性を評価するための解析モデルを構築する。構築した解析モデルについては、ポット除熱試験及び既往の試験等を用いて検証を行うとともに、ナトリウムポットの実機解析を行う。</p> <p>⑤成果の評価</p> <p>上記④の実機解析結果に基づき、燃料の健全性を評価するとともに、ナトリウムポットの冷却方式の成立性について評価を行う。</p> <p>(3)使用済燃料の直接水プール貯蔵に適用する燃料洗浄システムの開発</p> <p>①乾式洗浄試験</p> <p>試験体は、内部ダクトの形状を模擬した試験体と実機燃料集合体を模擬した試験体を製作する。内部ダクト試験体を用いた試験では、ドレン完了時間と乾式洗浄後のナトリウム残留量を計測する。模擬集合体を用いた試験では、乾式洗浄後のナトリウム残留量を計測する。なお、乾式洗浄の条件については、実機条件を基本とする。</p> <p>②実機適用性評価</p> <p>試験結果に基づき、実機燃料集合体のナトリウム残留量を評価するとともに、使用済燃料プール等の関連設備に与える影響を定量的に把握する。</p> <p>(4)TRU 燃料輸送時の除熱技術の開発</p> <p>①冷媒液体の調査、検討</p> <p>ヘリウムガスより高い伝熱性を有する冷媒の候補を調査する。また、化学的安定性、放射線、高温環境並びに高速増殖炉用の新燃料キャスクへの適用性等を評価し、キャスクに適用する液体冷媒を選定する。</p> <p>②新燃料輸送キャスクの概念検討</p> <p>ヘリウムガスを冷媒とした5～10体用の輸送キャスクの概念を検討する。またこれをベースに液体冷媒キャスクの概念を検討する。</p> <p>③燃料集合体温度解析</p>
--	--

	<p>前項で検討した概念に基づき、ヘリウムキャスク及び液体冷媒キャスクの温度解析を行い、キャスク本体及び燃料集合体の温度を確認する。また、最大収納体数を把握するための解析も実施するものとする。</p> <p>④設計データの取得</p> <p>構築したヘリウムキャスク及び液体冷媒キャスクの概念について、TRU含有燃料の発熱量とキャスクの最大収納体数の関係を把握する。また、許認可を想定した今後の技術開発課題並びに開発計画を検討する。</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）スリット付き炉上部機構に適用可能な燃料交換機の開発】</p> <p>[得られた成果]</p> <p>(1)燃料交換機構造の選定</p> <p>FS フェーズⅡで提案されたパンタグラフ式及びマニプレータ式燃料交換機に関し、運転機能・性能、保守・補修性及び異常時対応性の観点で比較評価を行った。両案とも技術的な成立性の観点では同等であるが、折り畳みが不可能となった異常時に対して、1本の駆動軸（可動筒）を外部から強制的に引上げる操作のみでアームが折り畳めるパンタグラフ式の方が適用性は高いと評価し、開発の対象としてパンタグラフ式燃料交換機を選定した。</p> <p>(2)燃料交換機アーム実規模動作試験の実施</p> <p>選定したパンタグラフ式燃料交換機に関し、実規模大の試験装置を製作し、位置決め性能試験、剛性確認試験、加振試験、引抜挿入試験等を実施した。位置決め性能試験では、アーム開閉、グリップ昇降等の動作速度、加速度、位置決め精度等に係るデータを取得した。剛性確認試験、加振試験及び引抜挿入試験では、燃料交換機の静的荷重に対する剛性、振動特性及び燃料取扱い時の剛性に係るデータを取得した。</p> <p>(3)実機適用性評価</p> <p>試験データに基づき、燃料交換機の実機設計を行い、各部仕様を具体化した。また、剛性、位置決め精度及び燃料交換時間等の実用炉の要件に基づき評価を行った。</p> <p>①剛性</p> <p>実機燃料交換機の構造に基づき、解析により、弾性設計用地震動Sdにおける燃料交換機の各部変位及び応力を評価し、許容値を満足することが分かった。</p> <p>②位置決め精度</p> <p>試験データ並びに、熱伸び、浮力等の影響を考慮して、X、Y、Z方向に生じる誤差を評価し、許容値以内に収まることを確認した。</p> <p>③燃料交換速度</p> <p>ナトリウムポットにて搬入される2体の新燃料と炉心の2体の使用済燃料との交換に要する時間は、約58分となった。このことから、実用炉で目標としている1体当たりの炉内燃料交換時間30分を満足することが分かった。</p> <p>以上により、本業務で構築した実機燃料交換機について、実用炉で要求されている剛性、燃料等を取扱うための位置決め精度及び燃料交換時間を満足することから、実用化の見通しがあることを確認し、所期の目標を達成した。</p>

	<p>【研究開発項目（2）燃料集合体を2体同時移送可能なナトリウムポットの開発】</p> <p>[得られた成果]</p> <p>(1)ポット表面の仕様設定 試作試験に基づき、フィン形状を設定するとともに、コーティングとして高速フレイム溶射法を設定した。</p> <p>(2)輻射率測定試験 コーティング施工した試験片のナトリウム付着時における輻射率特性データを取得した。</p> <p>(3)ポット除熱試験 実機大のポット試験体を用いて、実機環境におけるポットの除熱量データを取得した。試験結果について解析を行い、案内管にナトリウムが多量に付着した場合には、除熱量が低下し、輻射率が約0.1程度まで低下する可能性があることがわかった。</p> <p>(4)ポット除熱量解析 ナトリウムポットの除熱量を評価する解析モデルを構築し試験データに基づき検証した。ポット除熱試験で確認されたような輻射率の低下がある場合には、間接冷却のみでは燃料の健全性確保が困難であるため、FaCTでは、間接冷却に加え、直接冷却にて補完する方式に変更した。実機解析では、この変更した冷却方法に対して解析を行い、除熱性評価データを取得した。</p> <p>(5)実機適用性評価 実機解析で得られた結果に基づき、設定した燃料集合体の許容温度600℃を満足する冷却系の条件を把握した。 以上により、実機ナトリウムポットについて、燃料集合体の許容温度を満足する冷却系の条件を把握し、所期の目標を達成した。</p> <p>【研究開発項目（3）使用済燃料の直接水プール貯蔵に適用する燃料洗浄システムの開発】</p> <p>[得られた成果]</p> <p>(1)乾式洗浄試験の実施 内部ダクト試験体の試験では、内部ダクト内ナトリウムのドレン性が良好で、多量のナトリウムが存在せず、残留量も高々10gであり、内部ダクトの洗浄性に与える影響が小さいことが分かった。また、模擬集合体の試験結果より、乾式洗浄後のナトリウム残留状況は、表面に薄く付着している程度であった。</p> <p>(2)実機適用性評価 内部ダクト試験体及び模擬集合体を用いた試験データに基づき、実用炉燃料集合体の残留量ナトリウム量を把握した。設計検討用の残留量としては、保守性を考慮して設定した。また、ナトリウム残留状況から、従来の不活性化処理が適用できると判断し、ナトリウム不活性化システム及び使用済燃料プール浄化系及び使用済燃料処理工程への影響を評価し、支障がないことが分かった。 以上により、FaCTで検討している内部ダクト付き燃料集合体の洗浄性を定量的に把握するとともに、残留するナトリウムが不活性化処理等の</p>
--	--

	<p>関連するシステムに支障のないことを確認し、所期の目標を達成した。</p> <p>【研究開発項目（４）TRU 燃料輸送時の除熱技術の開発】 [得られた成果]</p> <p>(1)冷媒の選定 気体の冷媒では、ヘリウムガスを冷媒として選定した。また、液体の冷媒については、ヘリウムガスより冷却性が高い冷媒として水、ナトリウム、NaK を候補として抽出し、取扱い性、開発課題の観点から水を選定した。</p> <p>(2)新燃料輸送キャスクの概念検討 新燃料輸送キャスクについては、既存のインフラ条件等を考慮し、5 体用及び 10 体用のヘリウムキャスク及び水キャスクの構造概念を構築した。</p> <p>(3)燃料集合体温度解析 構築した概念に基づき、キャスク全体解析、燃料集合体内温度解析を実施した。5 体用、10 体用ヘリウムキャスク及び 5 体用、10 体用水キャスクの各々の健全性が成立する燃料集合体 1 体当たりの発熱量を把握した。</p> <p>(4)設計データの取得 上記の燃料集合体温度解析の結果に保守性を考慮して、5 体用及び 10 体用ヘリウムキャスクの新燃料 1 体当たりの発熱量はそれぞれ 2.2kW 以下、1.9kW 以下、また、5 体用及び 10 体用水キャスクについてはそれぞれ 2.9kW 以下、2.1kW 以下とした。また、構築したヘリウムキャスク及び水キャスクに関して、許認可を想定した技術開発課題並びに開発計画を検討した。</p> <p>以上により、高発熱TRU含有新燃料の輸送システムとして、1~3kWの新燃料を5体~10体収納できる候補概念を選定し、所期の目標を達成した。</p> <p>【事業全体】を通して 「使用済燃料の直接水プール貯蔵に適用する燃料洗浄システムの開発」で実施した乾式洗浄試験では、試験体表面に残留するナトリウムの不純物の試験に与える影響が懸念されたため、400℃のナトリウムに浸漬し、不純物除去する工程を追加した。この結果、不純物は除去され、試験を支障なく終了することができた。ナトリウム機器等の保守・補修時には、残留しているナトリウムにより不純物が形成される可能性がある。そのため、本件の成果も考慮し、ナトリウム機器の不純物の除去方法について今後検討する必要がある。</p> <p>【論文、特許等】 口頭発表 6 件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Development of Advanced Loop-Type Fast Reactor in Japan (4) An advanced design of the fuel handling system for the enhanced economic competitiveness (ICAPP08、2008 年 6 月) ・ Conceptual Design for Japan Sodium-Cooled Fast Reactor (3)Development of advanced fuel handling system for JSFR
--	--

	<p>(ICAPP09、2009年5月)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高速増殖炉サイクル実用化研究開発における燃料取扱設備の検討 (1)燃料交換機の気中モックアップ試験 (原子力学会 2009年度秋の大会、2009年9月) ・ 高速増殖炉サイクル実用化研究開発における燃料取扱設備の検討 (2)乾式洗浄試験 (原子力学会 2009年度秋の大会、2009年9月) ・ 高速増殖炉サイクル実用化研究開発における燃料取扱設備の検討 (3)新燃料キャスク伝熱数値解析 (原子力学会 2009年度秋の大会、2009年9月) ・ JSFR 実用炉の概念設計 (11) 簡素化燃料取り扱いシステム (原子力学会 2010年度秋の大会、2010年9月) ・ 高速増殖炉サイクル実用化研究開発における燃料取扱設備の検討 (4) 使用済燃料洗浄後のナトリウム付着量評価 (原子力学会 2010年度秋の大会、2010年9月) ・ 高速増殖炉サイクル実用化研究開発における燃料取扱設備の検討 (5)MA 含有新燃料キャスクの除熱性能評価 (原子力学会 2010年度秋の大会、2010年9月) ・ Development of the JSFR fuel handling system and mock-up experiments of fuel handling machine in abnormal conditions (ICAPP10、2010年6月) <p>ポスター発表 3 件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Development of Transfer Pot for JSFR Ex-vessel Fuel Handling (FR09 : 高速炉システム国際会議、2009年12月9日) ・ Development of Spent Fuel Cleaning method for JSFR (FR09 : 高速炉システム国際会議、2009年12月9日) ・ Thermal Analysis on Shipping Cask for JSFR Fresh Fuel (FR09 : 高速炉システム国際会議、2009年12月9日)
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 研究開発の成果 ・ 技術の卓越性 ・ 成果の発展性 	<p>【研究開発の成果】</p> <p>各研究開発項目とも、当初目標の達成見通しが得られており、相応の成果が得られたものと評価できる。なお、TRU燃料キャスクの開発については、冷媒としてヘリウムガスを用いたキャスクの有効性は示されたが、実際の燃料集合体で発熱量が増加する場合は水キャスクへ変更が不可欠となり、輸送システム全体の変更が必須となることも定量的に明らかにされるなど重要な知見が得られたことから、今後具体的なシステム全体設計を行う際においては、燃料集合体発熱量設計と連携して進めてもらいたい。</p> <p>【技術の卓越性】</p> <p>各研究開発項目とも実験や解析によりデータを取って技術成立性の定量的なクライテリアが示されており、所期の成果が得られたと評価できる。燃料取り扱いシステム開発では様々な異常事態も想定した定量的な設計データベースが構築されている。2集合体ポットの開発では、間接冷却方式に加え、直接冷却方式を併用した概念に提案することにより、ナトリウム付着時でも当初の目標を達成できる見通しを得ている。今後、経済性、信頼性の観点から、案内管内筒面のナトリウム付着と輻</p>

	<p>射率の関係については、「もんじゅ」設計のために実施された関連研究成果も踏まえ、さらに解明しておくことが望ましいと考える。</p> <p>【成果の発展性】</p> <p>各研究開発項目ともFaCT側との連携を図りながら進められた基盤技術であり、得られた成果は、ナトリウム冷却高速炉の実用化に向けて貴重なデータベースが構築され、大いに貢献したと評価できる。</p>
4. その他	<p>燃料交換機の開発においては、今後実用化に向けて想定される様々な故障時の復旧対策もさらに検討を充実させる必要がある。</p>