5.　技術報告(2)燃料サイクルシステム

本章では、「技術報告(2)燃料サイクルシステム」で示された下記の資料を掲載する。

5.1　再処理システムの研究開発の進捗

小山　智造（原子力機構　次世代原子力システム研究開発部門
次世代再処理システムユニット長）

5.2　燃料製造システムの研究開発の進捗

滑川　卓志（原子力機構　次世代原子力システム研究開発部門
次世代燃料製造システムユニット長）

This is a blank page.

5.1　再処理システムの研究開発の進捗

小山　智造
（原子力機構 次世代原子力システム研究開発部門 次世代再処理システムユニット長）

報告要旨

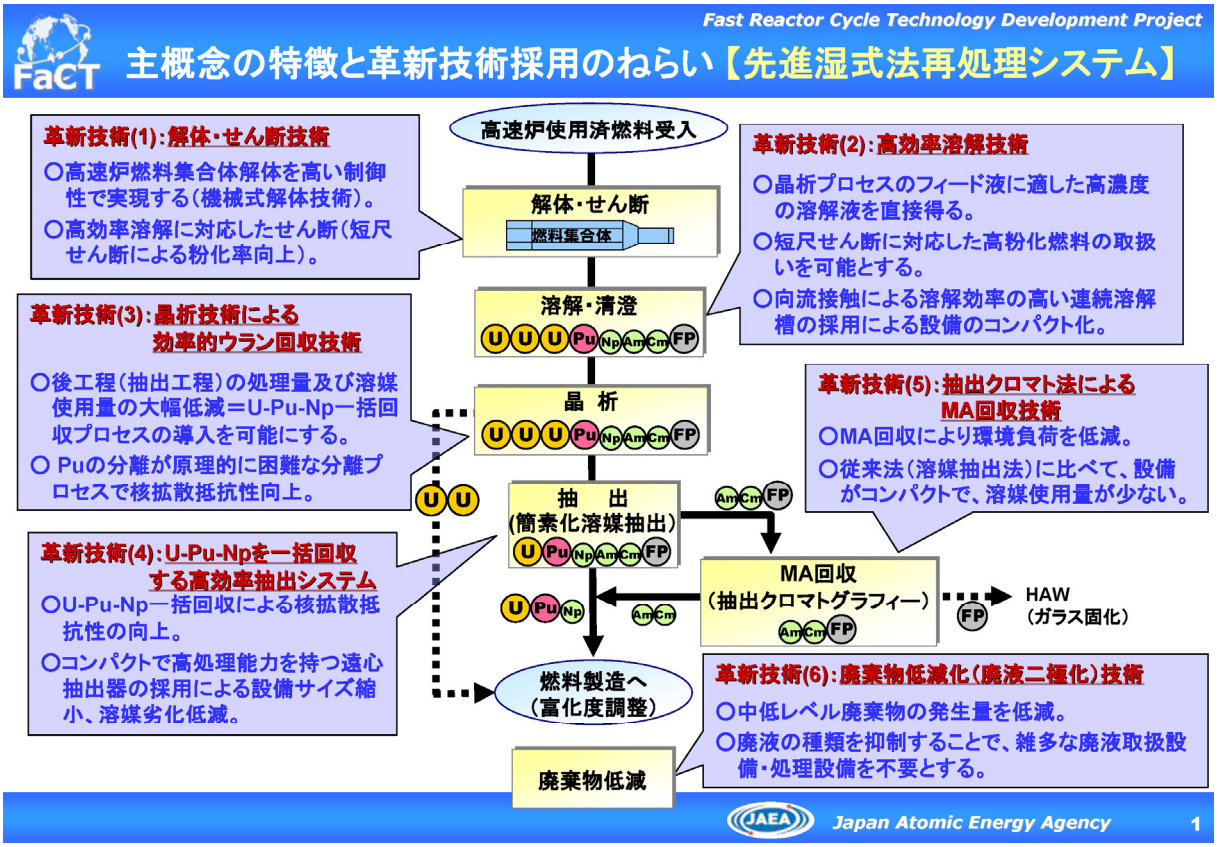
高速増殖炉実用化研究開発プロジェクト（FaCT Project）における再処理システムの研究開発の進捗状況を概説しました。具体的には、6 つの革新技術について、当初設定した主な成果目標と 2008 年度末の実施状況を示し、これらをもとに今後の展開と目標達成の見通しを示しました。また、実用施設概念設計については、2008 年度までの合理化検討内容を示すとともに、2009 年度より施設概念設計を行い、設計要求への適合性を確認することを述べました。更に、LF 移行期の再処理に関する検討概要と今後の進め方を示しました。

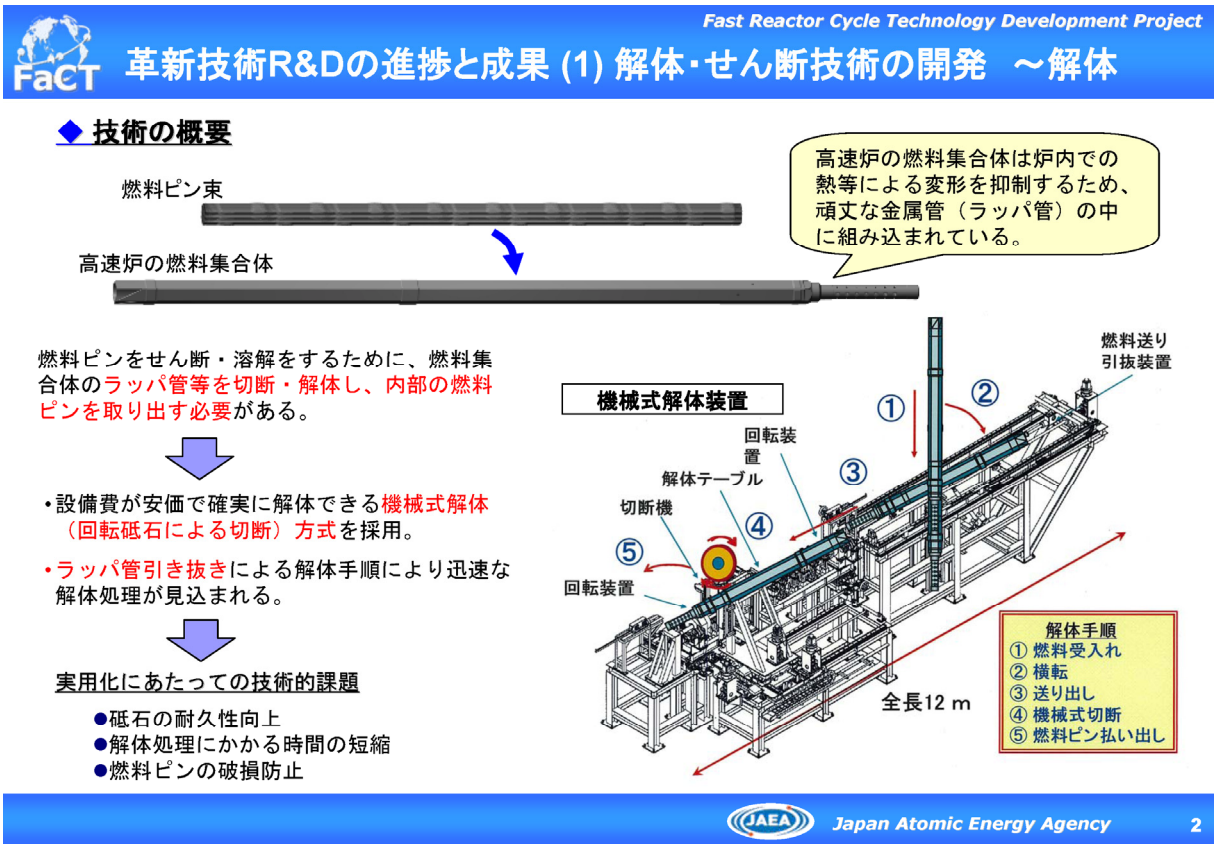
This is a blank page.

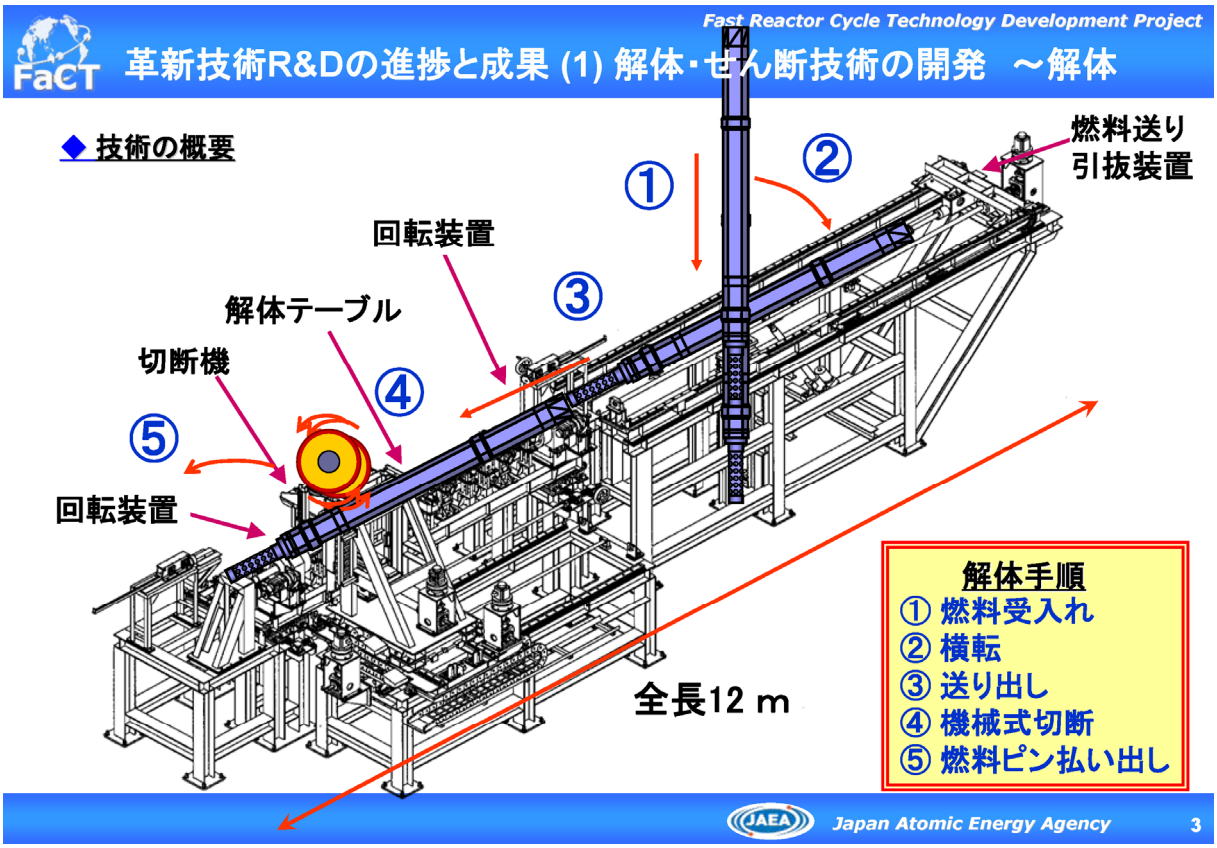
FaCTプロジェクト中間報告会
～再処理システムの研究開発の進捗～

2009年8月7日

独立行政法人日本原子力研究開発機構
次世代原子力システム研究開発部門
次世代再処理システムユニット
小山智造




Fast Reactor Cycle Technology Development Project
革新技術R&Dの進捗と成果 (1) 解体･せん断技術の開発 ～解体
◆ 技術の概要
燃料ピン束
高速炉の燃料集合体
高速炉の燃料集合体は炉内での熱等による変形を抑制するため、頑丈な金属管（ラッパ管）の中に組み込まれている。
燃料ピンをせん断・溶解をするために、燃料集合体のラッパ管等を切断・解体し、内部の燃料ピンを取り出す必要がある。
・設備費が安価で確実に解体できる機械式解体（回転砥石による切断）方式を採用。
・ラッパ管引き抜きによる解体手順により迅速な解体処理が見込まれる。
実用化にあたっての技術的課題
●砥石の耐久性向上
●解体処理にかかる時間の短縮
●燃料ピンの破損防止
機械式解体装置
燃料送り引抜装置
回転装置
解体テーブル
切断機
回転装置
全長12 m
解体手順
① 燃料受入れ
② 横転
③ 送り出し
④ 機械式切断
⑤ 燃料ピン払い出し
Japan Atomic Energy Agency
2


Fast Reactor Cycle Technology Development Project
革新技術R&Dの進捗と成果 (1) 解体･せん断技術の開発 ～解体
◆ 技術の概要
燃料送り引抜装置
回転装置
解体テーブル
切断機
回転装置
全長12 m
解体手順
① 燃料受入れ
② 横転
③ 送り出し
④ 機械式切断
⑤ 燃料ピン払い出し
Japan Atomic Energy Agency
3

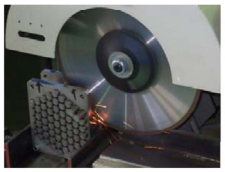
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (1) 解体・せん断技術の開発 ～解体

開発課題 燃料ピン損傷確率を抑えた安定した解体（切断）制御技術の成立性の提示

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 解体時の燃料ピンの破損本数を数本以下にできる解体システム概念を提示し、その有効性を模擬環境下で実証すること。	◆ もんじゅ相当の模擬燃料集合体を用いた機械式切断試験により、1集合体当たりの解体で燃料ピンの破損を1本以下に抑えられることを確認した。	燃料ピンの破損については、現状でも目標達成済であるが、追加の機械式切断試験を実施し、信頼性のより高い評価結果とそれに基づく解体システム概念を提示することにより、その概念の有効性を実証ができる。
(2) 集合体1体の解体操作において切断工具を交換せずに済む解体システム概念を提示し、その有効性を模擬環境下で実証すること。	◆ 各種切断工具材料を試験し、切断性能・耐久性の観点からCBN砥石を選定した。 ◆ もんじゅ相当の模擬集合体を用いた機械式切断試験において、砥石を交換せずに、1集合体が解体可能であることを確認した。	実用炉集合体を模擬した部分試験体を用いて機械式切断試験を実施することにより砥石を交換せずに1集合体を解体できることを確認するとともに、これまでの成果に基づき解体システム概念を提示することにより、その有効性を実証できる。

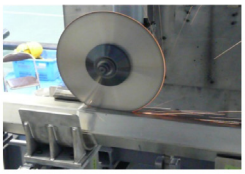
もんじゅ模擬集合体 クロップカット試験



（切断試験状況）

（切断面）

もんじゅ模擬集合体 スリットカット試験



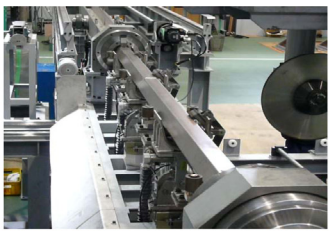
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (1) 解体・せん断技術の開発 ～解体

開発課題 燃料ピン損傷確率を抑えた安定した解体（切断）制御技術の成立性の提示

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(3) 集合体1体の解体を2時間以内に可能とする解体システム概念を提示し、その有効性を模擬環境下で実証すること。	◆ 左記の解体操作試験が可能な試験装置を設計・製作・設置した。	もんじゅ相当の模擬燃料集合体について2時間以内の解体が可能な条件を設定し、製作した試験装置を用いた解体試験によって確認するとともに、これまでの成果に基づき解体システム概念を提示することにより、その有効性を実証できる。
(4) 全体システムを統合し、集合体の受入から解体後の燃料ピン及び廃棄物の払出までを連続して実施可能であることを模擬環境下で実証すること。	◆ 左記の解体操作試験が可能な試験装置を設計・製作・設置するとともに、動作確認を実施した。	製作した試験装置を用いて模擬環境下で集合体解体の一連の工程を連続して実施できることを示すことにより、全体システムを実証することができる。

解体システム試験装置



Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (1) 解体・せん断技術の開発 ～せん断

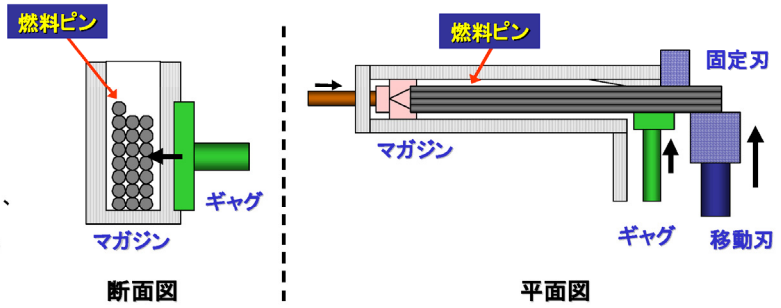
◆ 技術の概要

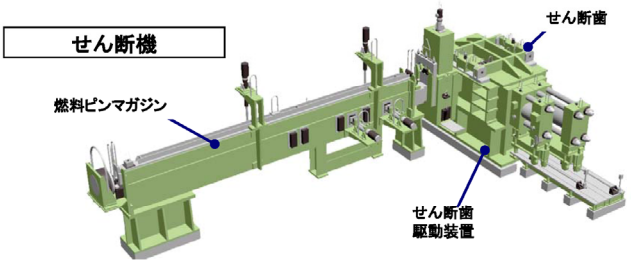
酸化物燃料の溶解を効率化するには被覆管内から燃料片を取出し、燃料を細かく砕くことが効果的。

- せん断する長さを短くすることにより、燃料の粉砕による粉化の程度を大きくするとともに、被覆管の外に出てきやすくする。
- 既存せん断機の改良で対応できる。

実用化にあたっての技術的課題

- 1cm程度の長さでせん断
- せん断長のバラツキを少なくする。
- 解体されてバラバラになった燃料ピンを円滑に取り扱う。





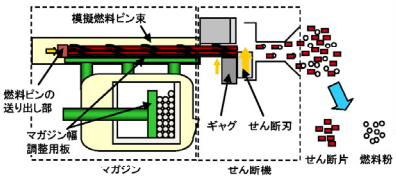
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

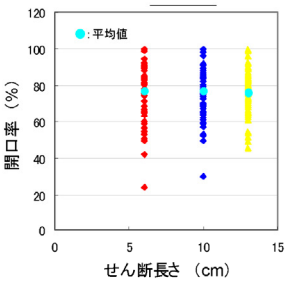
革新技術R&Dの進捗と成果 (1) 解体・せん断技術の開発 ～せん断

開発課題 所定の燃料粉化率(50%)が得られる短尺せん断技術の成立性の提示

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) せん断長さを均一化できる条件を示し、その有効性を模擬環境下で実証すること。	◆ ピンの並び方や押し出す方法を工夫することにより、所定の長さで均一にせん断できることを確認(1cm±0.5cm;信頼性幅95%)した。	現状でも目標達成済であるが、追加のせん断試験を実施し、信頼性のより高い評価結果を示すことにより、せん断長さを均一化できる条件の有効性を実証できる。
(2) 所定の燃料粉化率を確保できる技術条件を示し、その有効性を模擬環境下で実証すること。	◆ 模擬環境下での試験によりせん断長さとせん断後の燃料粉化率の関係を明らかにし、所定の燃料粉化率を得る条件を特定した。	照射後の燃料ピンの模擬性を向上した試験体を用いた試験を実施し、信頼性のより高い評価結果を示すことにより、所定の燃料粉化率を確保できる条件の有効性を実証できる。

せん断パラメータ試験





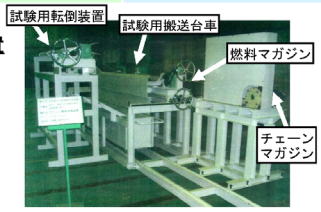
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (1) 解体・せん断技術の開発 ～せん断

開発課題 所定の燃料粉化率（50%）が得られる短尺せん断技術の成立性の提示

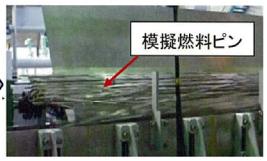
2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(3) 集合体1体のせん断を2時間以内に可能とするせん断システム概念を提示し、その有効性を模擬環境下で実証すること。	◆ 左記のせん断操作試験が可能な試験装置を設計・製作・設置した。 ◆ 短時間試験結果での簡易的評価により2時間以内での処理が可能となる技術的根拠が得られた。	もんじゅ相当の模擬燃料集合体（解体済）について、製作した試験装置を用いたせん断試験によって、2時間以内に1集合体をせん断できることを確認するとともに、これまでの成果に基づきせん断システム概念を提示することにより、その有効性を実証できる。
(4) 全体システムを統合し、燃料ピンの受け取りからせん断終了までを連続して実施可能であることを模擬環境下で実証すること。	◆ 左記のせん断操作試験が可能な試験装置を設計・製作・設置した。 ◆ 上記試験装置の動作確認時にピンのバラケ・不揃いの問題が発生。解決方針（ピン移送時の落下距離を低減する）を検討し試験装置を改良した。	製作した試験装置を用いて模擬環境下でせん断の一連の工程が連続して実施できることを示すことにより、全体システムを実証することができる。

燃料ピン装荷試験装置



燃料ピン束転倒操作中の様子

燃料ピン束マガジン装荷後の状況



Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (2) 高効率溶解技術

◆ 技術の概要

晶析プロセスで必要な高濃度の溶解液（500g/L）を得るために、粉化率を高くした短尺せん断燃料を受け入れて高濃度での溶解処理を連続的に行う。

- Pu富化度の高い高速炉燃料の取扱いが可能な溶解槽を採用。
- 粉化燃料を安定的・効率的に溶解できるように向流接触で溶解操作を行う。

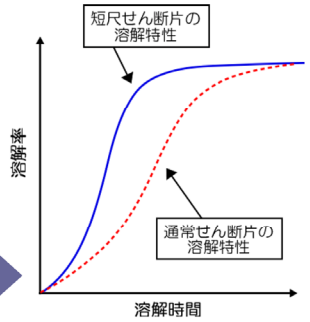
実用化にあたっての技術的課題

- 高粉化燃料を所定時間内に所定の濃度で安定的に溶解するプロセス条件
- 実用施設が要求する処理能力を達成できるようにスケールアップ
- ハルやワイヤ等を溶解液から円滑に分離できる機器構造

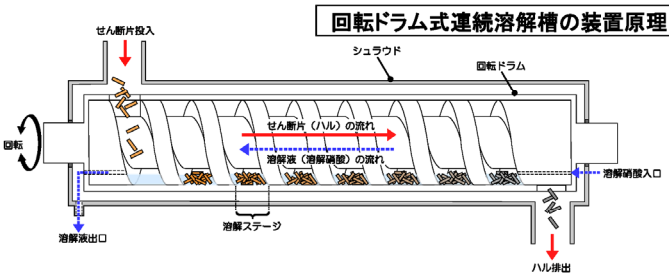
高効率溶解プロセスの原理

短尺（1cm）せん断

<せん断片>
ピン開口率が増加
<粉化率>
ピン外に出てくる燃料粉の割合が増加・小粒径化



回転ドラム式連続溶解槽の装置原理



Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (2) 高効率溶解技術

開発課題 ≪プロセス開発≫ 高濃度溶解液が得られる安定したプロセス条件の把握

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 高粉化率のせん断燃料投入時においても突沸等急激な溶解反応を起こさない運転条件を示すこと。	◆ 粉化率を高めたウランペレットを使用した溶解試験を行ない、溶解反応がマイルドになる燃料投入速度や溶解条件を確認した。	既に目標を達成済み。
(2) 粉化燃料溶解により、500g/Lの溶解液が20kg/hの速度で得られる溶解プロセス条件をホット試験等のデータに基づき示すこと。	◆ 常陽使用済燃料を用いた溶解試験を行ない、粒径が2mm以下の燃料の溶解速度は、粉体としての溶解速度と同等であることを確認した。	せん断片長、撹拌及び亜硝酸濃度が溶解速度に及ぼす影響を評価するためのホット試験等を行うことで、20kg/hの速度で500g/Lの溶解液が得られる溶解プロセス条件を提示できる。
(3) 高濃度溶解条件下における不溶解残渣、二次スラッジの特性を把握し、適切な技術的対応を示すこと。	◆ スラッジの基礎データとして、使用済燃料の溶解試験後の不溶解残渣・再沈殿物の重量データを取得した。 ◆ 二次スラッジとして代表的なモリブデン酸ジルコニウムについて基礎試験を行い、硝酸濃度と生成量の関係を確認。 ◆ 高濃度溶解液の清澄に対応するための遠心清澄機の改良方策（ウラン析出防止方策、等）を検討した。	◆ 左記不溶解残渣の元素分析を行い、組成データを取得する。 ◆ 二次スラッジを化学的に除去する方策を確認する。 ◆ 高濃度溶解液に対する清澄性能を確認する。 ◆ 以上により、不溶解残渣、二次スラッジに対する対応策を提示することができる。

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (2) 高効率溶解技術

開発課題 ≪機器開発≫高濃度溶解液に対応した溶解槽内部構造の確立

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) ハル、ワイヤ等の固体成分を円滑に分離・排出するとともに、粉体燃料を保持できる構造を提示すること。	◆ せん断により粉化された燃料が溶解槽へ落下するまでにオフガス系へ移行する挙動を把握するための試験を一部実施した。また、模擬環境（コールド試験）において、固体成分の分離・排出を評価するための試験を準備中。	◆ 左記試験において粉体燃料がオフガス系へ移行する量を確認する。 ◆ 模擬環境において、固体成分の分離・排出を評価するための試験を行う。 ◆ 以上により、固体成分の分離・排出及び粉体燃料を保持できる構造を提示することができる。
(2) 内部構造が溶解槽の溶解性能に及ぼす影響について技術的知見を示すこと。	◆ 実用規模の溶解槽の内部構造を決定するため処理能力に対するスケールアップ手法の検討を行った。 ◆ 20kg/hの処理能力を満足しうる内部構造（寸法、形状等）の検討を一部行った。	部分モックアップ機を用いての試験結果を基に、これまでのウラン溶解試験による知見も参考に、内部構造の違いと撹拌・移送性能及び溶解性能の関連性に関する技術的知見を提供できる。
(3) 臨界安全性、耐食性、製作性についての技術的知見を示すこと。	◆ 耐食材料について模擬溶解液を用いた腐食試験（溶解槽特有の擦過腐食を模擬）を行い、ZrよりもTi-5Ta、SUS310Nbが優れていることを確認した。 ◆ 製作性に関する検討においては、材料調達性及び製作方法について今後詳細に評価すべき点を明確にした。	◆ 模擬不溶解残渣共存下での残渣蓄積等に伴う局部腐食を評価する。 ◆ 溶解槽に関する臨界安全性評価を行い、20kg/hの所定寸法の設定を行うと共に、製作性の観点から溶解槽構造の成立性を確認する。 ◆ 以上により、臨界安全性、耐食性、製作性に関する知見を提示できる。

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (3) 晶析技術による効率的ウラン回収システム

◆ 技術の概要

FBR燃料サイクルでは、再処理製品には軽水炉再処理ほど高い除染係数は必ずしも必要ではないので工程簡素化の余地がある。

- 高速炉はPu富化度が高く、また高速中性子はFPに吸収されがたいため、FP不純物許容量が多い。
- MA含有燃料取扱のため、燃料製造は完全遠隔で実施。

- 高濃度の溶解液を冷却するとUのみ結晶化することを利用して、溶解液からUを富化度調整可能な量だけ粗分離する。
- 原理的にUとPuの完全分離が出来ないため、核不拡散性が高い分離技術。

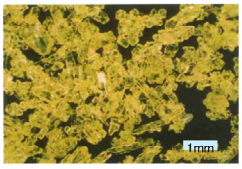
実用化にあたっての技術的課題

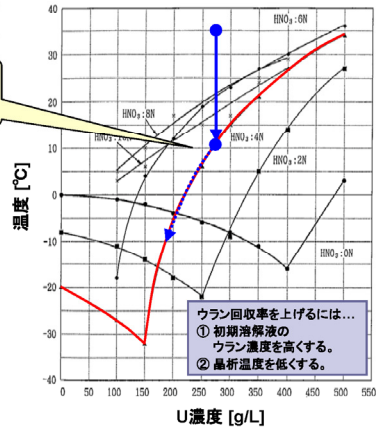
- 必要とされるU回収率を得るためのプロセス条件
- 必要とされる除染係数を得るためのプロセス条件
- 連続的に晶析を行い、U結晶と溶解液を分離する装置の開発

晶析プロセス原理

溶解液を冷却していくと、ある温度でウラン結晶が析出し始める。

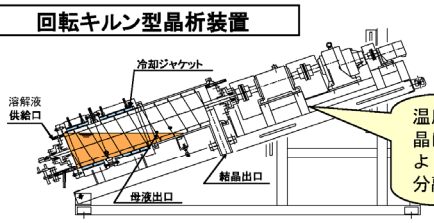
硝酸ウラニル結晶





硝酸ウラニルの溶解度曲線

回転キルン型晶析装置



温度低下により析出したU結晶は回転するスクリューにより上部へ移動し、溶液と分離される。

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (3) 晶析技術による効率的ウラン回収システム

開発課題 ≪プロセス開発≫ U回収率70%、100以上の除染係数が得られる連続晶析プロセス条件の成立性の提示

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 70%のU回収率が得られるプロセス条件をホット試験等のデータに基づき示すこと。	◆ ホット試験により、70%のU回収率を達成できること、またU回収率を10%以内の誤差で評価出来ることを確認した。 ◆ 小型工学規模U試験の結果から、連続晶析装置と結晶洗浄機を組み合わせて運転することにより、70%のU回収率を達成できることを確認した（実機における運転条件を明確化）。 ◆ U回収率の制御因子の一つである晶析温度について、40～-10℃まで制御可能な冷却システム要素試験装置を製作し、その有効性を確認した。	既に目標を達成済み。
(2) 上記回収率を得る条件において、100以上の除染係数（DF）が得られるプロセス条件をホット試験等のデータに基づき示すこと（脱水・洗浄の効果を含む）。	◆ Puについては、晶析前に原子価を調整することで所定のDFを達成可能。 ◆ FPについては、模擬FPを使用したウラン試験、使用済燃料を使用した試験において、一部のFP（Cs、Ba）のDFが目標値より低くなることを確認した。 ◆ 上記原因を調査した結果、Baは溶解度が低いために温度低下により析出してくること、CsはPuと複塩を生成して析出してくることが原因であることを究明した。	◆ Csについては、硝酸濃度や晶析温度によって、複塩の析出をより抑制できる可能性があるため、その条件におけるホット試験を実施して問題解決方策の有効性を確認する。 ◆ 結晶洗浄機の性能向上のためのウラン試験を実施し、Ba（溶解度の低いFP）のDF改善についての有効性を確認する。 ◆ 以上により、DF目標値を達成可能な条件を見出す。

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (3) 晶析技術による効率的ウラン回収システム

開発課題 ≪機器開発≫ 工学規模晶析装置及び晶析システム、周辺技術成立性の提示

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 低温における連続運転性、非定常事象の検知性についての技術的知見を示す。	◆ 8～-10℃の運転温度で8時間にわたる連続試験を行い、特筆すべき問題は生じなかったことを確認した。 ◆ 非定常事象把握試験で得られた事象項目に対して必要な計装機器の整理を行い（差圧計、流量計測ポット等）、その応答性を確認した。	既に目標を達成済み。
(2) 液位より下部に存在する軸受について、長期耐久性、漏洩防止を考慮した概念を提示し、その成立性を示す。	◆ 軸受方法の調査・比較検討に基づき、漏洩防止のために貫通部を無くすことができるとともに、スラリ（U結晶・溶液混合物）に対する耐久性が期待できる滑り軸受方式を選定した。 ◆ 選定した方式に基づく構造検討を行い、模擬環境における耐久試験から15,000時間程度の耐久性を有することを確認した。	既に目標を達成済み。
(3) 臨界安全性を考慮した結晶分離機の概念を提示し、その成立性を示す。	◆ 臨界安全性、結晶閉塞防止を考慮した機器概念を提示した。 ◆ 大型機による結晶分離性能は検証済み。	臨界安全性を考慮した小型機の結晶分離性能を確認することにより、機器の成立性を確認することができる。
(4) 高濃度溶解液を移送・計測する周辺技術についての概念を提示し、その成立性を示す。	◆ 高濃度溶解液の性状（密度・粘性）、取扱い温度制限を考慮して既存移送装置（エアリフト、サイフォン等）の改良による概念を提示した。	高濃度ウランを使用した試験において、左記概念の成立性を確認することができる。

Japan Atomic Energy Agency 14

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (4) U,Pu,Npを一括回収する高効率抽出システム

◆ 技術の概要

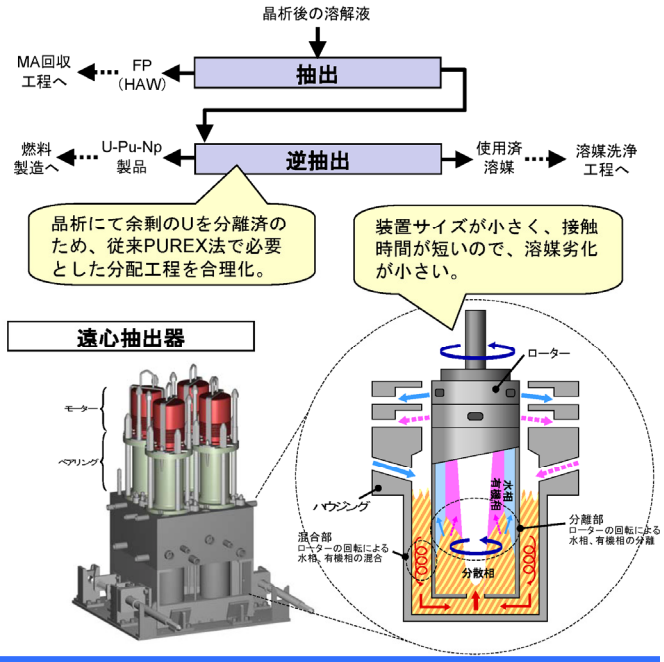
晶析後にPu富化度が30%になった溶解液から、U-Pu-NpをFPから分離して一括回収する。

- 特別な試薬を用いず、硝酸濃度を制御することでNpをU、Puと共に抽出。
- 抽出装置は、コンパクトで装置内インベントリの小さい遠心抽出器を使用することで経済性の向上と溶媒劣化低減を図る。

実用化にあたっての技術的課題

- 目的とする回収率・除染係数を満足するフローシート条件
- 駆動部耐久性の向上

U,Pu,Npの一括回収を行う溶媒抽出法



Japan Atomic Energy Agency 15

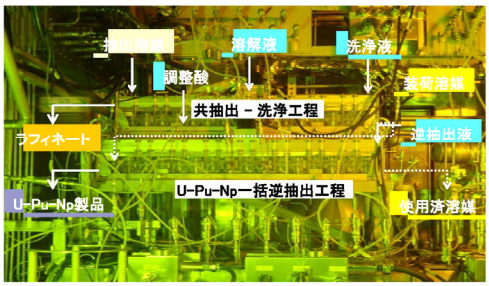
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

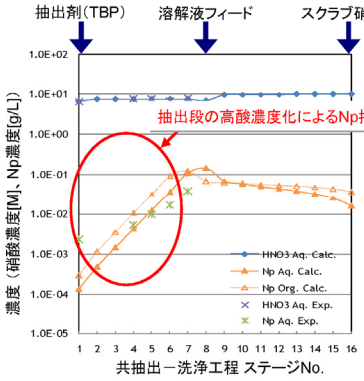
革新技術R&Dの進捗と成果 (4) U,Pu,Npを一括回収する高効率抽出システム

開発課題 ≪プロセス開発≫ 最適な一括回収プロセス条件の確立

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) U及びPuの回収率99.9%、Npの回収率99%及び除染係数10^4(一部FPを除く)を達成するプロセス条件をホット試験等のデータに基づき示すこと。	過去の知見及び計算コードを使用して左記目標を満足しうるプロセス条件を検討し、設定した。さらに、この条件に基づき使用済燃料を用いたホット試験を実施し、左記目標を満足することを確認した。	既に目標達成済み。

CPF 小型遠心抽出器による抽出試験





U-Pu-Np 一括抽出試験結果

元素	廃液	溶媒(共抽出段出口)
U (%)	<0.1	>99.9
Pu (%)	0.03	99.97
Np (%)	1.0	99.0

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (4) U,Pu,Npを一括回収する高効率抽出システム

開発課題 ≪機器開発≫ 所定の処理能力、安定運転、耐久性について成立性を提示

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 処理量300L/h(200tHM/yの先進湿式再処理プラントに配備される抽出器システムの処理能力に相当)を段効率0.95以上で達成する抽出器システムの概念を提示し、成立性を実証すること。	◆ 処理量300L/hの抽出器システムを用いたウラン試験において段効率を確認し、段効率がほぼ100%であるシステム概念を提示した。 ◆ 多数の抽出器を駆動する観点から、システムの起動・停止手順の詳細化を行った結果、起動(全工程の酸平衡、ウラン平衡)約120分、停止(全工程のウラン追い出し、溶媒追い出し)約220分となり、短時間での立ち上げ・停止が可能であることを定量的に確認した。 ◆ 以上により、抽出器システムの成立性を実証した。	既に目標達成済み。
(2) 10年以上にわたって安定運転が可能であるための技術概念(装置及び保守方法含む)を提示し、その有効性を示すこと。	◆ 転がり軸受と比較して耐久性向上が期待できる磁気軸受に関して、耐放射線性を評価し、2×10^7R(0.2年分)の照射で樹脂部等の脆弱部品を特定した。その後、改良した部品を用いて照射試験を実施し、約4×10^8R(4年分)の耐久性があることを確認した。 ◆ 転がり軸受と比較して耐久性向上が期待できる磁気軸受に関して、硝酸水溶液を用いた耐久性試験を実施し、これまでに安定運転5000時間(約1年分)を達成した。 ◆ 実用施設における保守方法の手順を作成し、保守試験を実施してその手順による保守時間を測定することによって有効性を確認した。	◆ 耐放射線性試験、耐久性試験を継続し、その実績データにより、安定運転を可能とするための磁気軸受の概念とその有効性を示すことができる。 ◆ 保守方法の有効性については、既に目標達成済み。

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (5) 抽出クロマト法によるMA回収技術

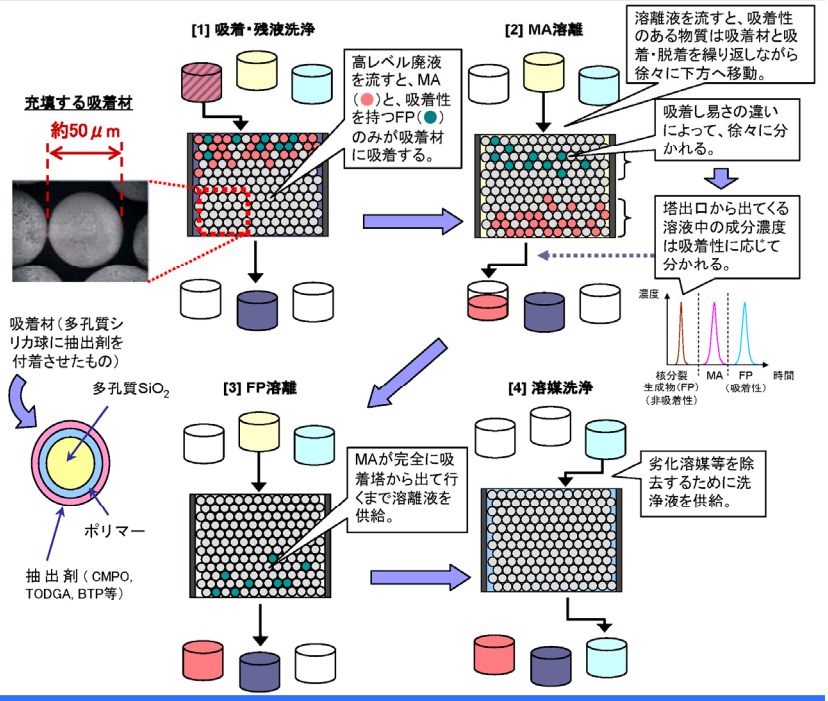
◆ 技術の概要

U-Pu-Np抽出後の高レベル放射性廃液中からAmとCmを回収する。

従来のMA回収技術である溶媒抽出法（SETFICS-TRUEX法）より、設備をコンパクトにでき、試薬使用量も少ない抽出クロマト法を応用。

実用化にあたっての技術的課題

- 目的とする回収率・除染係数を満足する抽出剤の選定及びフローシートの構築
- 工学規模で実用に耐えうる装置・設備の開発（運転制御、遠隔保守を考慮）
- 安全性・信頼性の確認



Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (5) 抽出クロマト法によるMA回収技術

開発課題 ≪プロセス開発≫ 所定のMA回収率、除染係数が達成できるフローシートの提示

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 候補となる抽出剤を用いて所定の分離・回収性能（Am・Cm回収率99.9%、FPの除染係数100）を満足する最適なフローシート条件を提示し、その妥当性を試験データ及び計算コードを用いて示すこと。	◆ 分離塔内での反応過程を組み込んだ流動解析コードを構築し、コールドでの試験結果を定性的に再現できることを確認した。	◆ 最適なフローシート条件を検討するとともに、その有効性をホット試験にて確認することにより最適なフローシート条件を提示することができる。 ◆ 提示するフローシート条件について、試験結果と、構築した計算コードによる計算結果から、妥当性を確認することができる。
(2) 分離性能、安全性、使用済吸着材の処理容易性等の観点からRI試験等のデータに基づき抽出剤の比較・評価を行うこと。	◆ 候補となる5種類（CMPO、HDEHP、R-BTP、TODGA、TRPEN）について分離性能データをRI試験等により取得した。 ◆ 候補となる5種類について耐酸性、耐放射線性、耐熱性に関するデータをコールド・照射試験等により取得し、それらの結果に基づき使用できる条件を明確化した。 ◆ 候補となる5種類のうち、4種類（CMPO、HDEHP、TODGA、R-BTP）について使用後の処理・処分方法及び回収方法に関するデータを整理するとともに、その方法の検討を行った。	◆ 2008年度末までに取得した分離性能データ、安全性データ及び処理容易性データ並びにTRPENの処理・処分方法及び回収方法に関するデータ取得により、最適なフローシート選定に資するための抽出剤の比較・評価に必要なデータが取得できる。

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (5) 抽出クロマト法によるMA回収技術

開発課題 ≪機器開発≫ 所定の処理能力、安定運転性、安全性の成立性を示す

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 1日当たり750Lの高放射性廃液からMAを回収できる装置を模擬液を用いた工学規模コールド試験により実証する。	◆ 模擬液を用いた工学規模コールド試験により、所定の流量において分離性能確保に重要な塔内流速分布の平坦化を確保する方法を構築し、有効性を確認した。	左記試験設備を用いた試験により、所定処理能力の確保が可能であることを実証することができる。
(2) 吸着材の抜き取り・再充填操作を含むシステム全体の安定運転が可能な設備概念を示す。	◆ 遠隔操作で吸着材をスラリー化（吸着剤と水を混合）して移送する試験を行い、その方法での抜き取り・再充填操作が可能であることを確認した。 ◆ 運転に必要な制御ロジック及び計装設備を具体化した。	工学規模コールド試験において、左記に示した遠隔での通常運転、抜き取り・再充填操作の妥当性を実証することにより、安定運転が可能な設備概念を提示することができる。
(3) 分離塔が何らかの原因で閉塞を生じる場合に生じうる以下の現象に対して安全を確保可能な方策を提示し、その有効性を試験により示す。 （想定する現象） 放射線による放射線分解ガスの発生 崩壊熱による温度上昇	◆ 放射線分解ガスの発生を模擬した試験を実施した結果、ガスの蓄積、液体の流れの乱れを観測した。 ◆ 分離塔内温度はジャケット及び塔内への通液により制御が可能であることを確認した。閉塞による温度上昇の変化を定量的に予測し、時間余裕を考慮した対応策を検討した。 ◆ 考えられる異常事象の抽出・整理を行い、それらの検知・抑制方法についての概念を提示した。 ◆ 異常時の対応方法について検討を行い、遠隔操作での対応方法を提示した。	◆ 放射線分解ガスの発生について、照射試験によりその挙動の観測、発生量データの取得を行い、ガスの蓄積防止に必要な吸着材の抜き取り・再充填頻度を算出して示す。 ◆ 温度上昇について、通液による熱排除が有効であり、閉塞に対してはフィルタ洗浄や吸着材交換により対応可能であることを示す。これらについて模擬試験にて実証することにより、安全確保可能な方策とその有効性を提示することができる。

Japan Atomic Energy Agency 20

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (6) 廃棄物低減化（廃液2極化）技術

◆ 技術の概要

再処理プロセスから発生する廃液を、高レベル放射性廃液と極低レベル廃液の二種類に限定する。

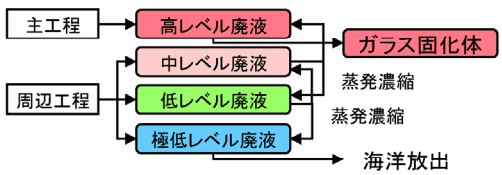
- 金属塩（Na塩等）を含む試薬を極力使用しない。
- 濃縮と凝縮を繰り返すことにより高放射性廃液と極低レベル放射性廃液に分離する。

実用化にあたっての技術的課題

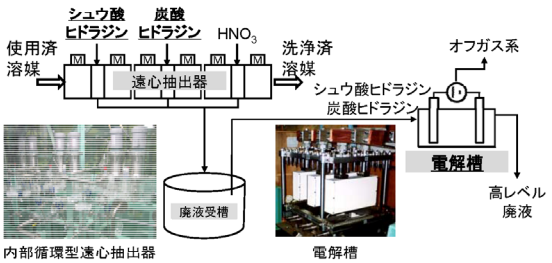
- オフガス中のヨウ素除去工程、分析工程で使用される試薬については、既存再処理施設技術の適用もしくは改良
- 溶媒洗浄工程で使用する試薬としてソルトフリー試薬を用いるため、洗浄性能の確認及びその安全な分解処理についての技術開発

洗浄試薬としてシュウ酸ヒドラジン及び炭酸ヒドラジンを採用
使用後は電解等によりN_2, CO_2等へ分解

廃液二極化の概念



ソルトフリー試薬による溶媒洗浄技術



Japan Atomic Energy Agency 21

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (6) 廃棄物低減化（廃液2極化）技術

開発課題 ≪プロセス開発≫ 周辺工程におけるソルトフリー化プロセスの基本的成立性の提示

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) ソルトフリー試薬（炭酸ヒドラジン、シュウ酸ヒドラジン）の溶媒洗浄性能が従来のNa洗浄と同等となるプロセス条件を示す。	◆ ソルトフリー試薬による実廃溶媒の洗浄試験をバッチで実施し、Ru、Puの洗浄性能が従来のNa洗浄（炭酸ナトリウムを使用）と同等であることを確認した。	遠心抽出器と実劣化溶媒を用いた洗浄試験を実施することにより、Na洗浄と同等の性能を持つプロセス条件を示すことができる。

開発課題 ≪機器開発≫ ソルトフリー試薬分解技術の基本的成立性の提示

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 使用済のソルトフリー試薬の電解処理において、不純物共存下においても分解率99%が得られる電解条件を示す。	◆ 不純物非共存のコールド環境下で、電解によるソルトフリー試薬の分解率99%以上を確認した。	実使用済廃液を使用したホット試験により、要求される分解率を満足する電解条件を明示することができる。
(2) 電解処理時の分解生成物の気相への移行率を十分低く抑えるための条件を示す。	◆ 不純物非共存のコールド環境下でのソルトフリー試薬の分解試験により、生成物の気相への移行率は十分低いこと（0.05%以下）を確認した。	不純物共存下における挙動についてのコールド試験を行うことにより、分解生成物の生成・気相への移行を十分低く抑えるための条件を示すことができる。

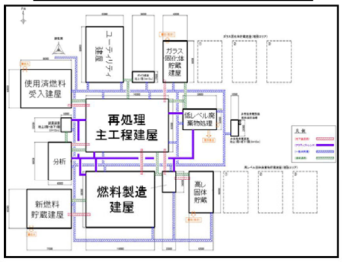
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

実用施設概念の設計研究

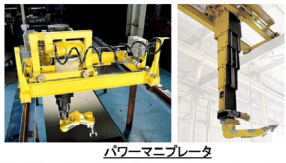
FaCT開始から2008年までは施設全体合理化の観点に基づく以下の設計研究を実施。

保守・補修性の検討	建屋構成の予備的評価	分析負荷の評価
開発中の装置は遠隔保守を必要とするものが多いため、信頼性確保の観点から、保守可能性の確認と、施設保守設備の要件を検討した。	実用化戦略調査研究（FS）にて提案した一体型建屋に対して、先行施設で採用されている機能別建屋方式を適用した場合の建設費に与える影響等を評価した。	運転管理費低減に向けて、先進湿式法再処理施設の分析負荷を評価し、改善点を抽出した。
【結果】 ◆ 解体機、せん断機、溶解槽については既存の遠隔保守機器を用いた保守が実用的な時間内で可能であることを確認。 ◆ 一部の保守作業に時間がかかるものがあるため、詳細機器設計時に作業負荷軽減の工夫をすることが望ましい。	【結果】 ◆ 収納する設備の機能と耐震クラス別に建屋を分けるとした場合、13建屋に分割される。 ◆ 機能別建屋方式を採用した場合、建屋と電気・換気設備のコストは合計で20%程度増加（全体建設費で10%に相当） ◆ 機能別建屋方式では建設期間短縮の効果等も期待できるため、総合的な優劣判断のためにはより詳細な評価が必要。	【結果】 ◆ FS設計では建設費低減のため、溶液を貯留する槽類の容量が少なく、その影響として工程管理のための分析頻度が増加している。 ◆ FaCTの設計では、機器コストと分析負荷間の関係の適正化と、自動化などの省力化に配慮することが必要と判断された。

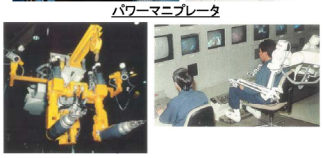
機能別建屋方式での分割イメージ



遠隔保守機器



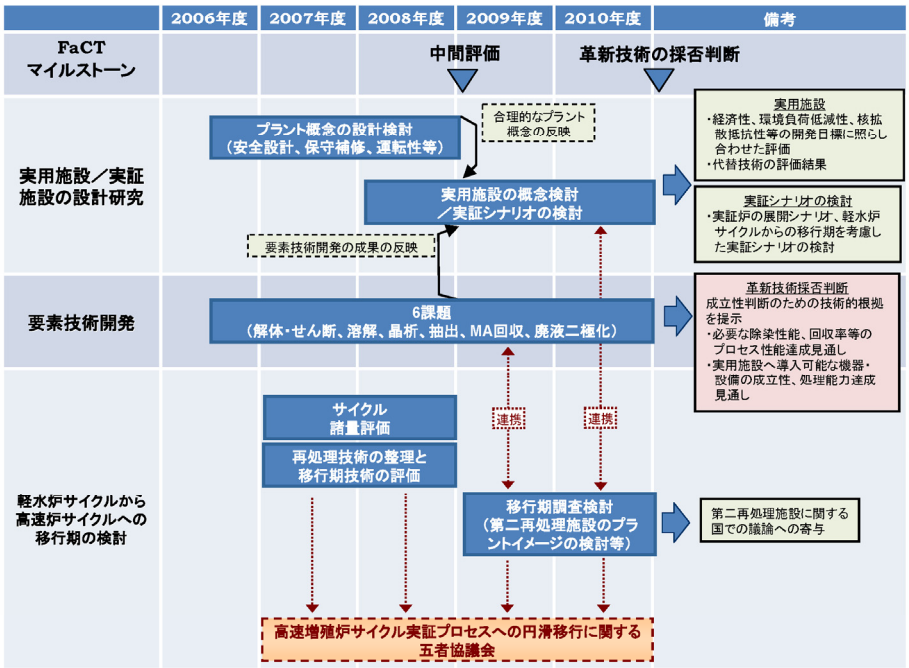
パワーマニプレータ



両腕型サーボマニプレータ

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

実用施設概念の設計研究



2010年の主な成果目標

- 開発目標及びそれを踏まえた設計要求を設定する。
- 200tHM/y規模の実用燃料サイクル施設の設計研究を実施し、革新技術の採否による施設概念への影響評価（設計要求への適合性評価）を行う。

今後の展開と達成の見通し

- これまでのシステム設計検討の結果に基づき施設仕様及び設計方針を具体化
- 再処理システムの革新技術R&D成果に基づく実用施設のプロセス設計、機器設計、保守・補修設計、安全設計等を行う。これにより、設計要求への適合性を確認できる。
- 代替技術についても比較評価することにより、その適用性を確認できる。

Japan Atomic Energy Agency 24

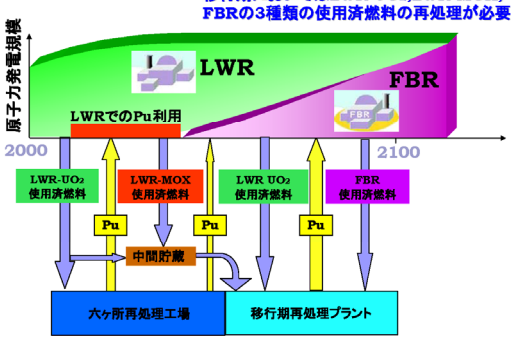
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期検討について

高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会での検討

- **「軽水炉から高速増殖炉への移行期」に係る視点の追加が重要**
  再処理需要（対象燃料）の変化に対応、
  軽水炉サイクルインフラを活用、…
- **「第二再処理工場」のプラントイメージの検討が必要**
  第二再処理工場はL/F両方の燃料を処理するべきだが、
  設備共用の考え方などをどのようにすれば合理的か？

移行期においてはLWR-UO_2,LWR-MOX,FBRの3種類の使用済燃料の再処理が必要



原子力の将来像に係る更なる検討を実施 ⇒ サイクル諸量を解析

- 軽水炉使用済燃料は六ヶ所再処理工場に引き続き2047年から1200t/y程度の処理が必要
- 高速増殖炉導入開始後5~10年に100~200t/y程度の高速増殖炉使用済燃料の処理が必要。その10~20年後に100~200t/yの処理量増加が必要で、最大で500~800t/yの処理規模が必要

「第二再処理工場」の再処理プロセスの選定の準備を実施
⇒プロセス選定の試行を行い課題点を抽出

- 現在の技術的知見に照らして、第二再処理で採用するプロセス技術としてはコプロセッシング法が最有力、先進湿式法等も選択肢
- さらに以下の要件が指摘された：
  ・核拡散抵抗性にかかる検討の強化、研究開発体制の強化

Japan Atomic Energy Agency 25

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期検討について

2010年までの再処理技術研究開発計画

○FaCTは設計研究を強化し、将来サイクル検討や核不拡散検討を充実させる。

○別途「移行期調査検討」において共用化プラントの比較検討やコプロセッシング法開発を進める。

○FaCTと「移行期調査検討」は緊密に連携をとりながら進める。

○上記枠組みは、FaCTの2010までの成果を受けた国の評価及び移行期調査検討の結果を踏まえて改めて見直されるものと考える。

Japan Atomic Energy Agency 26

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

中間取りまとめ時点での状況と見通し　－ まとめ －

革新技術		現在の状況	2010年までの見通し
解体せん断	解体	解体技術開発として機械式切断工具の寿命、切断時間の評価試験を実施。また解体システム試験設備を製作し、一連の解体手順を問題なく実施できることを確認。	これまでに得られた成果に加え、工学規模の試験装置を用いたシステム試験、設計検討等を実施することで計画通り**成果目標としている技術根拠を示せる見通し**である。
	せん断	せん断技術開発として燃料ピンを1cm程度の短尺でせん断する方法と操作条件を取得した。	
高効率溶解		ウラン試験により粉化燃料の安定的な溶解条件、ホット試験により粉化燃料の溶解速度を評価した。 連続溶解槽開発としてスケールアップ性、軸受耐久性等に関する評価を実施した。	これまでに得られた成果に加え、小規模での溶解試験、工学規模での試験、設計検討等を実施することで、計画通り**成果目標としている技術根拠を示せる見通し**である。
晶析技術による効率的ウラン回収システム		晶析条件最適化のためホット試験・ウラン試験等により晶析時不純物同伴挙動を評価した。 晶析装置開発のため、装置構造及び周辺設備の検討を行うとともに、小型装置を用いたウラン試験により通常運転時、非定常挙動等の装置特性を把握した。	これまでの成果からは、一部のFP元素について成果目標としている除染係数を満足させる結果が得られていないため、原因の解明と有効な対策を検討し、**2010年までに試験等を積み重ねて達成可能な条件を見いだすように努める**。
U-Pu-Npを一括回収する高効率抽出システム		プロセス最適化のため、ホット試験によりU-Pu-Np一括回収プロセスの成立性（除染係数、HM回収率）を評価した。 遠心抽出器開発として多数基の抽出器を連結したウラン試験により運転特性データを取得した。また、遠心抽出器の耐久性向上のため磁気軸受の開発を実施中。	これまでの成果に加え、一括回収プロセスホット試験、工学規模システム試験等を実施することで、計画通り**成果要求としている技術根拠を示せる見通し**である。
抽出クロマト法によるMA回収技術		各種抽出剤の分離性能、耐放射線性の比較評価試験を実施中。 工学規模での要素機器試験により分離塔内流動特性や安全性に係わる温度特性データを取得した。	これまでの成果だけでは成果要求への可否が判断できる状況にはないが、各種試験及び検討を当初計画通り進めることで2010年には**成果目標の評価に必要な技術根拠を示すことができる見通し**である。
廃棄物低減化（廃液二極化）技術		溶媒洗浄でのソルトフリー試薬の分解生成物に係る挙動評価や装置構造材腐食検討を行い、安全上の重大な問題となる可能性は低いことを確認した。	オフガス洗浄工程・分析工程のソルトフリー化、余剰硝酸分解技術の検討を計画通り進めることで2010年には**成果目標の評価に必要な技術根拠を示すことができる見通し**である。

Japan Atomic Energy Agency 27

5.2　燃料製造システムの研究開発の進捗

滑川　卓志
（原子力機構 次世代原子力システム研究開発部門 次世代燃料製造システムユニット長）

報告要旨

高速増殖炉実用化研究開発プロジェクト（FaCT Project）における燃料製造システムの研究開発の進捗状況を概説しました。具体的には、6 つの革新技術について、当初設定した主な成果目標と 2008 年度末の実施状況を示し、これらをもとに今後の展開と目標達成の見通しを示しました。また、実用施設概念設計について、大型セルに対して比較的近未来に実現可能な小型セル方式の検討内容を示しました。更に、今後の技術開発の留意点として、技術開発の連携強化及び実証炉燃料製造準備を示しました。

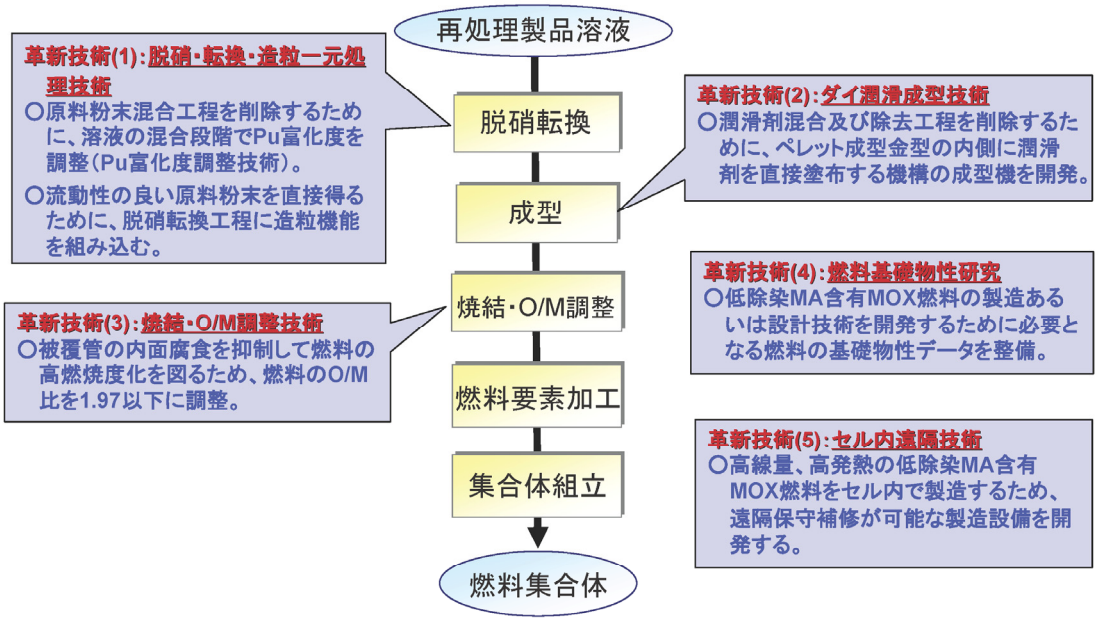
This is a blank page.

FaCTプロジェクト中間報告会
～燃料製造システムの研究開発の進捗～

2009年8月7日

独立行政法人日本原子力研究開発機構
次世代原子力システム研究開発部門
滑川卓志

主概念の特徴と革新技術採用のねらい【簡素化ペレット法システム】



Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (1) 脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発
原料粉末調整プロセスの開発

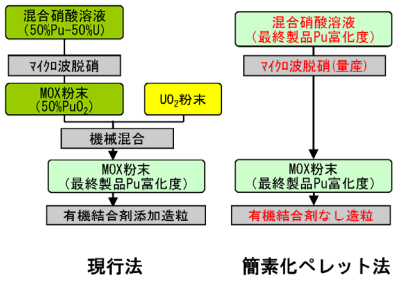
◆ 技術の概要

- 原料粉末調整工程において、溶液混合によるPu富化度調整、有機結合剤を用いない造粒機能を組み込み、転換工程で流動性の良い顆粒粉末を直接得られる技術を開発する。
- 原料粉末調整プロセスの開発においては、小規模な試験装置(1kg MOX/バッチ規模)を用いたMOX試験により、プロセスの工学的な成立性を確認する。

実用化にあたっての技術的課題

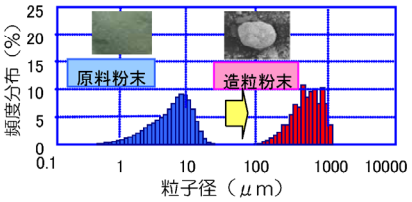
- ペレット製造に適したMOX粉末（Carrの流動性指数60以上、比表面積3～5m²/g)の製造条件の確立
- 収率の向上策
- 脱硝工程から造粒工程まで同一の容器を用いる一元処理技術の開発（上部アクセス造粒機の開発）

現行法と簡素化ペレット法の比較



粉末粒径と粉末流動性との関係
粉末粒径:大 → 粉末流動性:大

造粒による流動性の改善



粒度分布の比較

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (1) 脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発
転動造粒プロセスの開発

開発課題 簡素化ペレット法による原料粉末調整プロセスの工学規模での成立性を提示

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 1kg MOX/バッチ程度の簡素化ペレット法原料粉末調整工程の試験設備を整備し、小規模MOX試験を実施する。	◆ 小規模MOX試験（1kgMOX/バッチ程度）の2009年度試験開始に向けて準備中（現在、U試験中）。	◆小規模MOX試験（1kg MOX/バッチ程度）を実施し、得られるMOX粉末の物性値（流動性指数、比表面積）等のデータを取得する。
(2) 製品粉末物性の目標値として、金型への充填性の観点から粉末流動性指数（Carr指数）が60以上、ペレット焼結性の観点から比表面積が3～5 m²/gの流動性改良粉末が、収率80%以上の収率で得られることを確認する。	◆ 予備的試験実施状況： ・250g UO_2/バッチ規模の転動造粒装置によるウラン試験結果：Carr指数80以上、比表面積が約5m²/g ・300g MOX/バッチ規模の転動造粒装置による「常陽」照射試験用の原料粉末調整結果： Carr指数が74、比表面積が3.9 m²/g ◆ 250g UO_2/バッチ規模の小規模なウラン試験での収率は50%程度であり、粉末のみに水分(結合剤)を噴霧添加して容器壁面を濡らさないようにすること等、収率を向上させる方策を策定した。	◆小規模MOX試験（1kg MOX/バッチ程度）により、MOX粉末の物性値（流動性指数、比表面積）が目標値を満たすことを確認する。 ◆収率向上を図る工夫をした装置のモックアップ試験により、収率が目標値を満たすことを確認する。 ◆簡素化ペレット法の粉末調整プロセスの工学規模での成立性を評価する。

転動造粒機(有機結合剤無し造粒)

転動造粒機内部の様子 (UO_2造粒粉末)

上部アクセス造粒機

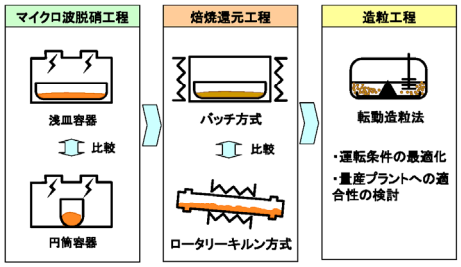
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (1) 脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発
粉末調整量産技術開発

◆ 技術の概要

●量産技術開発においては、プロセス開発で用いられている装置をスケールアップし、ウラン試験により、5kgHM/バッチの能力を有することを確認する。

量産に適したプロセスの選定方法



実用化にあたっての技術的課題

●量産に適したプロセスの選定
●量産スケールのマイクロ波脱硝加熱装置(40kW級）の開発
●量産スケールの脱硝容器（内径600mm）の製作性の検討
●量産スケールの転動造粒装置の開発

量産スケールの脱硝容器の試作試験例

形状加工後(焼成前)
(材質：窒化珪素)

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (1) 脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発
粉末調整量産技術開発

開発課題 脱硝及び造粒設備の量産性（1時間あたり5 kgHM/バッチ）見通しを提示

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) マイクロ波脱硝技術の量産性見通しに関する技術的根拠を提示すること。	◆ 脱硝技術の脱硝容器形状の選定：円筒容器における突沸による噴きこぼれを防止するため、容器内液位の4.4倍の容器高さを要することから、ハンドリングや設備保守上の課題がある。一方、工学スケールでの運転実績が豊富である浅皿容器の方が量産開発に適するとの結論から、量産開発の脱硝容器として浅皿容器を選定した。	◆脱硝技術に関しては、試験調査により、量産規模の浅皿容器の製作性に関する見通しを得るとともに、電磁場解析等により量産規模のマイクロ波脱硝オーブンの設計検討を実施する。これらを総合して量産性見通しの技術根拠を提示する。
(2) 造粒技術の量産性見通しに関する技術的根拠を提示すること。	◆ 造粒技術に関しては、量産規模（5 kgHM/バッチ）のコールド試験により、流動性指数が80以上の粉末を得ることができた。今後は収率の向上を目指す。	◆造粒技術に関しては、量産規模の造粒機を製作し、その収率をウラン試験等で確認し、これにより量産性見通しの技術根拠を提示する。

円筒型脱硝容器

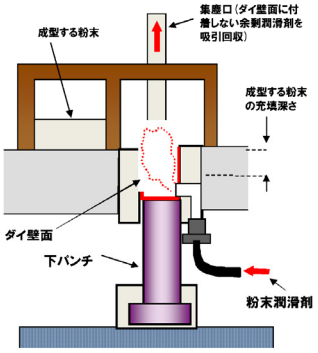
浅皿型脱硝容器

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果(2) ダイ潤滑成型

◆ 技術の概要

簡素化ペレット法のダイ潤滑方式のペレット成型技術について、小規模MOX試験により、ダイ潤滑成型の工学規模での成立性見通しを確認する。



ダイ壁面への潤滑剤塗布状況

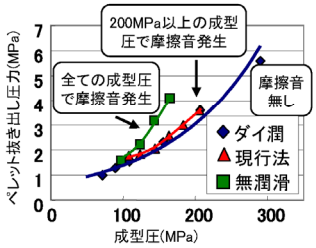
粉末潤滑剤（エアロゾル状）をダイ下方から噴霧してダイ壁面に塗布する

潤滑剤を成型体内部に含まないので、成型原料顆粒への潤滑剤の混合工程及び潤滑剤を除去するための予備焼結工程の削除が可能となり、プロセスの簡素化に貢献できる。

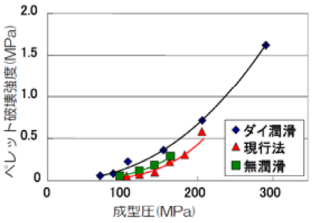
実用化にあたっての技術的課題

- ●ダイ潤滑成型の最適成型条件の確立
- ●設備のモジュール化による遠隔保守可能な量産対応のダイ潤滑成型装置の開発

ダイ潤滑機構の概要



潤滑性能試験結果



成型体の強度試験結果

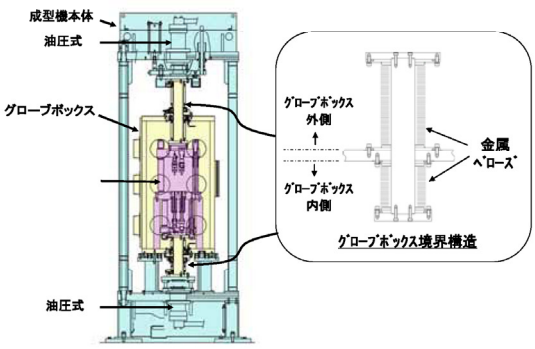
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (2)ダイ潤滑成型

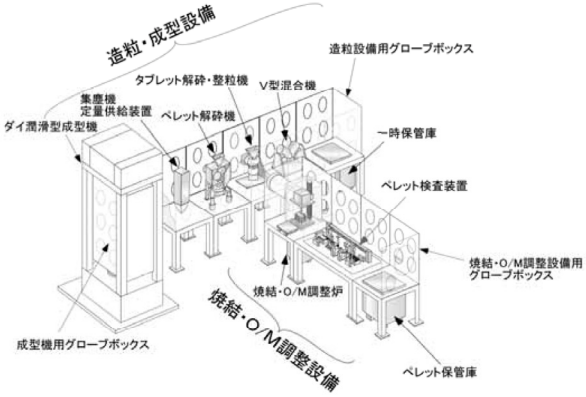
□小規模MOX試験設備を整備中

・ダイ潤滑成型機の保守性を向上するため、MOX粉末を取り扱うダイセット部のみをグローブボックス内に配置し、駆動部等をグローブボックス外に配置した。

・潤滑剤の最適塗付量を確認するため、潤滑剤噴霧量を少量制御できる機構を組込んだ。



設計したダイ潤滑型成型機概略図



小規模MOX試験設備イメージ図（鳥瞰図）

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (2)ダイ潤滑成型

開発課題 ダイ潤滑成型技術の工学規模における成立性の提示

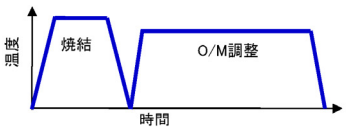
2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 簡素化ペレット法により調整した原料粉末を用い、ダイ潤滑成型の工学規模での成立性を評価する。	◆ プルトニウム富化度調整済の流動性改良MOX原料粉末を用い、従来型成型機でダイ潤滑を手作業で模擬して成型することにより、約550個（約2kgMOX）の良好なMOXペレットを得ることができ、プロセスの原理的成立性に係るデータを得ることができた。 ◆ 簡素化ペレット法調整原料粉を用いた小規模MOX試験用ダイ潤滑成型設備（数kgMOX/バッチ）の整備を実施中である。 ◆ 小規模MOX試験設備として整備を進めているダイ潤滑成型機の空運転試験において、成型速度が7.5サイクル/分以上の能力があることを確認した。 ◆ 遠隔保守対応のモジュール機能を有するダイ潤滑成型機のロープボックス実環境における成立性を確認するため、プルトニウム第三開発室のＦＢＲラインに導入するダイ潤滑成型試験機の製作している。	◆小規模MOX試験設備（数kgMOX/バッチ；2009年度末完成予定）で、簡素化ペレット法で得られたMOX原料粉末を用いたダイ潤滑成型試験を実施し、以下を確認する。 ➢良好なグリーンペレットの収率が90%以上であること ➢また、ＭＯＸ粉末成型時の成型速度が7.5サイクル/分以上であること ◆ダイ潤滑成型試験機のプルトニウム第三開発室ＦＢＲラインでの試験運転を通して、量産環境でのダイ潤滑成型機の安定性を確認する。 ◆これらの成果により簡素化ペレット法におけるダイ潤滑成型技術の工学規模成立性見通しを評価する。 ◆ダイ潤滑成型については、上記成果以外に、コールドモックアップ試験機による模擬粉末の成型試験において5400個のダイ潤滑成型中空ペレットを製造した実績があり、目標達成は可能と考える。

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果(3) 焼結・O／M調整

◆ 技術の概要

- 高燃焼度化に対応する燃料ペレットの低O/M化(酸素／金属比)を達成するために、小規模MOX試験により焼結・O/M調整試験を実施し、品質を評価する。
- 保守性及び量産性に適したO/M調整・焼結炉の熱処理方式(バッチ処理式、連続処理式)などの調査を行い、選定した方式に基づき量産型の炉の開発を行う。

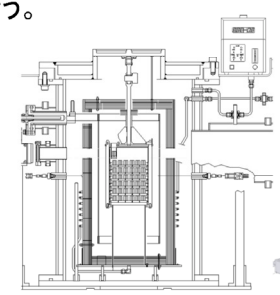


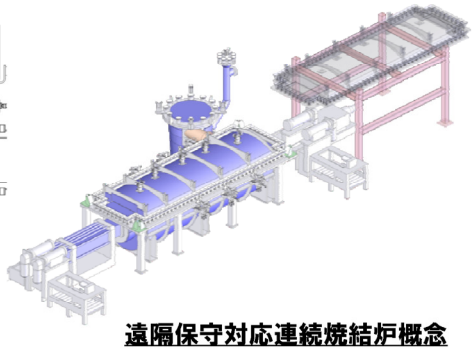
熱処理パターン例

「常陽」照射試験用MOXペレット

実用化にあたっての技術的課題

- 燃料ペレットの低O/M化を達成する熱処理条件の確立
- 設備のモジュール化による遠隔保守可能な量産対応の焼結・O/M調整炉の開発

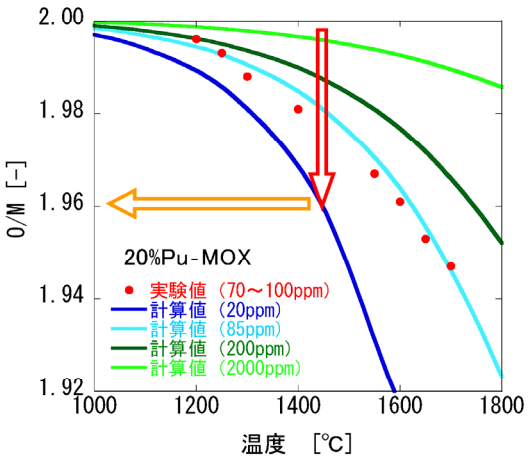

バッチ炉概念


遠隔保守対応連続焼結炉概念

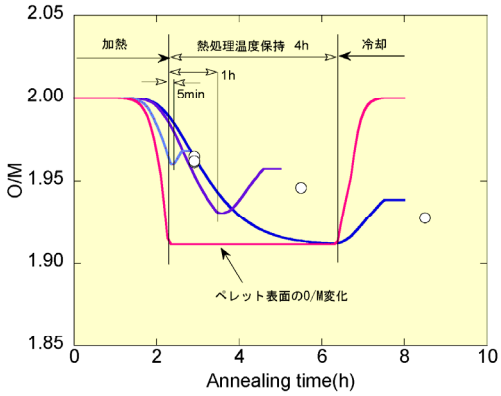
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果(3) 焼結・O／M調整

□従来よりも短い時間でO/M調整する技術の実現に向け、熱処理時の降温の際に生じるO/Mの上昇を抑制するため、従来の焼結炉より急冷が可能な機能を付加した焼結・O/M調整炉の詳細設計を実施した。



熱処理雰囲気の温度，水分とO/Mの関係



熱処理中のO/M比変化シミュレーション

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果(3) 焼結・O／M調整

開発課題 焼結、O/M調整技術の工学規模における成立性の提示

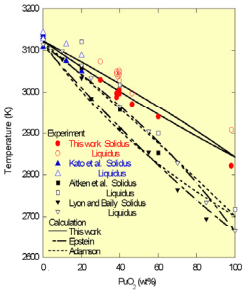
2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 簡素化ペレット法により得られたグリーンペレットの小規模MOX試験から焼結、O/M調整プロセスの工学規模における成立性見通しを評価する。	◆ 基礎物性研究から酸素ポテンシャルや温度等熱処理条件とO/Mの関係を明らかにし、低O/M製品収率向上の工夫をしたバッチ式の焼結・O/M調整共用炉を小規模MOX試験設備（数kgMOX/バッチ）として整備中である。 ◆ 手作業でダイ潤滑を摸擬して得たグリーンペレットを焼結・O/M調整することにより、焼結密度が95%以上、O/Mが1.97以下の良好なMOX中空ペレット焼結体を得ることができ、プロセスの原理的成立性に係るデータを得ることができた。	◆小規模MOX試験設備を2009年度末に完成させ、簡素化ペレット法で製造したグリーンペレットを用いて、数kgMOX/バッチの焼結・O/M調整試験を行う。 ◆得られた焼結ペレットの品質、収率および熱処理時間等から、簡素化ペレット法における焼結・O/M調整プロセスの工学規模成立性見通しを評価する。
(2) 量産設備開発	◆ 現行の連続焼結炉（O/M調整共用）をベースにし、モジュール分割・モジュール交換による遠隔保守に対応した遠隔保守設備の概念検討を実施し、連続焼結炉の遠隔保守化が可能であることを確認した。 ◆ 臨界管理方式を考慮した焼結・O/M調整設備の方式（バッチ処理式、連続処理式）の違いによる建設費・操業費へのコストインパクトを概略評価した。	◆小規模MOX試験データから実用規模のバッチ式炉によるO／M調整に関する成立性を評価する。 ◆連続焼結炉によるO／M調整試験を実施し、量産性に関するデータを取得する。 ◆上記のデータ及び設計評価を合わせ、焼結工程およびO/M調整工程の設備方式の最適な組み合わせの選定及び量産性見通しを提示する。

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

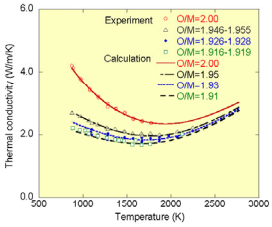
革新技術R&Dの進捗と成果(4) 燃料物性基礎研究

◆ 研究の概要

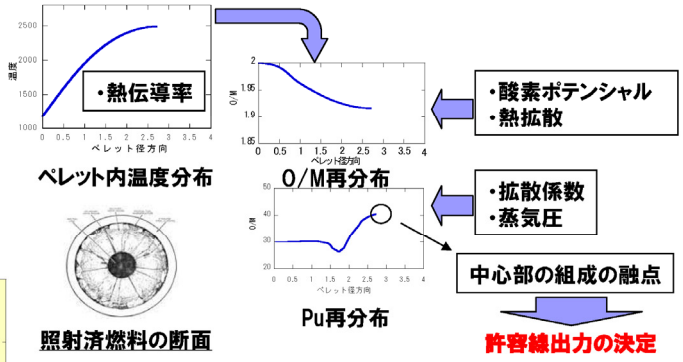
燃料製造や燃料設計に必要とする基礎物性データについて実験及び理論的に整備し、モデル化を行う。得られた物性モデルを用いて挙動解析コードを2015年に向け整備していく。

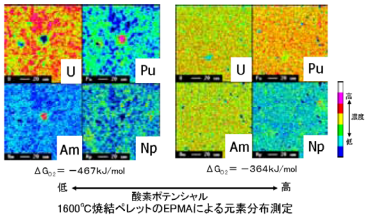


UO_2– PuO_2の融点



(U,Pu,Am)O_{2-x}の熱伝導率





熱処理条件によって均質性が大きく異なる

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

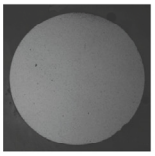
革新技術R&Dの進捗と成果(4) 燃料物性基礎研究

開発課題 燃料製造や燃料設計に必要とする基礎物性データの拡充

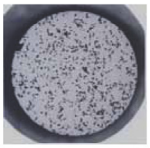
2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 燃料製造技術および燃料設計技術を支える基盤的な燃料基礎物性研究を実施し、基礎物性データを拡充する。	◆ 融点、熱伝導率、酸素ポテンシャル、格子定数等を測定し、モデル化を進め、MA含有MOX燃料の燃料設計が可能となった。これまでに実施した物性測定の結果から、数%のMA含有による燃料物性への大きな影響は無いことがわかった。 ◆ MOX燃料ペレットのO/M調整条件を把握し、「常陽」照射試験用に低O/MのMOXペレットを製造することができた。	◆燃料製造に必要な燃料基礎物性及び照射挙動のメカニズム解明等に必要な燃料基礎物性の測定を進め、データベースを作成することができる。

調製したペレットの外観と微細組織

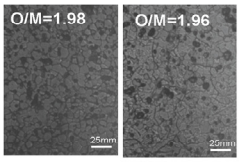
$(Np_{0.018}Am_{0.018}Pu_{0.3}U_{0.664})O_{1.98}$



$(a)(Pu_{0.3}U_{0.7})O_{1.96}$



$(b)(Am_{0.024}Pu_{0.32}U_{0.656})O_{1.96}$



$(Np_{0.018}Am_{0.018}Pu_{0.3}U_{0.664})O_{1.98}$

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果(5) セル内遠隔設備開発

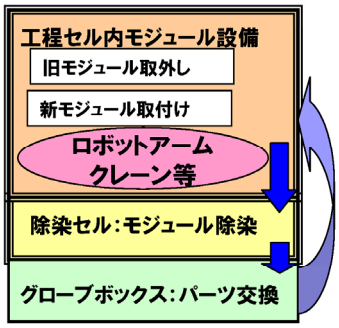
◆ 技術の概要

FaCT燃料製造設備の保守概念は、3つのステップで構成

- 工程セル内保守
- 除染セル内保守
- グローブボックス保守。

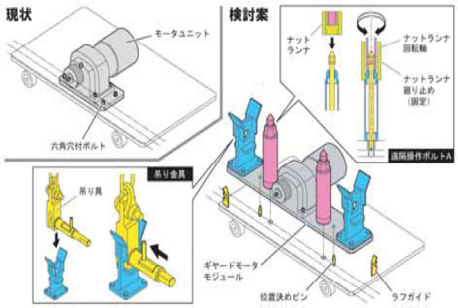
キーとなる技術

モジュール化設備技術の開発（成型設備を開発設備を代表）



実用化にあたっての技術的課題

- 共通的セル内保守技術（モジュール化設備＋ハンドリング設備）の開発
- その他セル内設備への適用性評価
  - ✓ ペレット検査設備
  - ✓ 粉末分析設備
  - ✓ その他設備



モジュールの基本構造概念

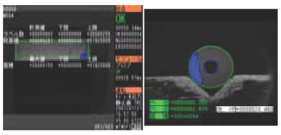
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果 (5) セル内遠隔設備開発

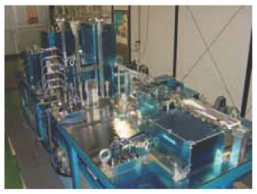
開発課題 セル内設備の遠隔保守技術（モジュール化設備＋ハンドリング設備）の成立性の提示

2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 工程設備側の遠隔保守補修機能付加（モジュール構造化）とロボットアーム遠隔ハンドリング設備開発を組合わせた共通的な遠隔保守補修システムの開発	◆ セル内遠隔操作に対応したモジュール着脱機構（ガイドピンによる位置決め、遠隔ボルトによる着脱機構等）の基本仕様を決定。 ◆ 37のモジュールで構成するペレット成型設備の概念を構築。 ◆ モジュール試験機とハンドリング設備との取り合い試験を実施中。	◆モジュール試験機と、ハンドリング設備（マン・マシン・インターフェースを含む）を組み合わせたモックアップ試験を実施し、６時間以内でモジュール交換時間が達成できることを確認する。 ◆小型ロボットアームによるペレット取扱い試験を実施し、目標の１０分以内で転倒ペレットの修復ができることを確認する。 ◆上記成果から、セル内遠隔設備の共通的な遠隔保守補修技術を構築することができる見通し。
(2) 共通的保守補修技術のその他のセル内設備への適用	◆ セル内遠隔対応の迅速ペレット検査設備の開発を行ない、試験機を製作した。 ◆ セル内遠隔対応の粉末分析設備の開発を行ない、試験機を製作した。 ◆ モジュール設備によるセル内遠隔保守設備概念を連続焼結炉に適用し、適用可能なことを確認した。	◆プルトニウム第三開発室にモジュール化設備を一部導入し、実環境での段階的な実証を行う。 ◆その他設備の特殊性を考慮し、共通システム概念の適用範囲、あるいは追加補強すべきシステムを摘出、評価することにより、共通的遠隔保守補修技術の適用性を提示する。

ロボットアーム制御技術開発



ペレット検査迅速化技術開発



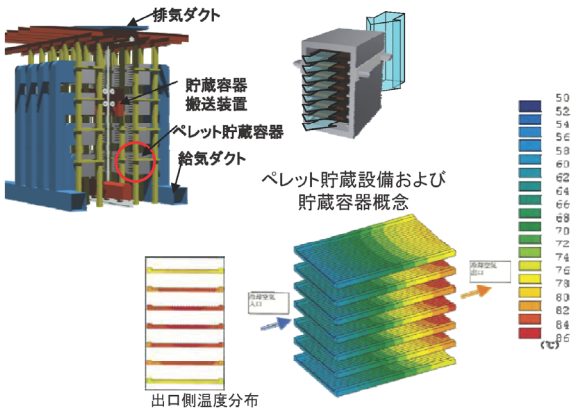
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

革新技術R&Dの進捗と成果(6) TRU取扱時術～除熱

◆ 技術の概要

- 燃料製造施設の発熱影響対策は、施設・設備の工学的設計上の対応事項であり、以下の項目の適用/組合により、影響緩和が可能
  - ✓ 発熱源である燃料取扱を少量分散する
  - ✓ 自然放熱機能を強化する
  - ✓ 強制空冷で除熱して温度を制御する
  - ✓ 不活性雰囲気化により酸化反応を抑制する（経済性の観点から限定適用）
  - ✓ 耐熱性材料を選定する
- ただし、燃料集合体においては燃料取扱の少量分散は事実上不可能であることから、除熱方法の技術開発見通しを早期に確認する必要がある。

その他燃料集中設備の除熱解析例



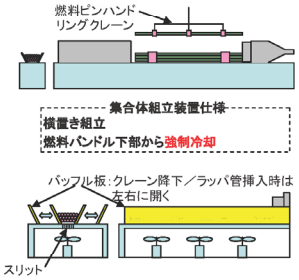
ペレット貯蔵容器温度分布評価結果

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

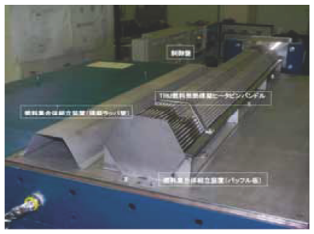
革新技術R&Dの進捗と成果 (6)TRU取扱技術～除熱

開発課題 燃料集合体組立時除熱システムの成立性の提示

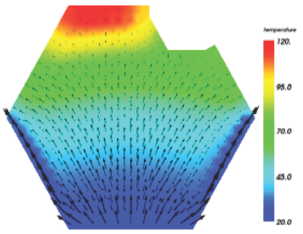
2010年の主な成果目標	2008年度末の実施状況	今後の展開と達成の見通し
(1) 熱流動シミュレーションによる集合体強制空冷モデルの開発	◆ ピン、ラッピングワイヤ周りの流量や温度変化を微少領域で評価するモデル開発を行い、実験による計測と良く一致する結果が得られた。これらの成果をシミュレーションコードの開発に反映した.	◆計算評価条件の追加修正を実施し、ＦＢＲ実用仕様の255本ピン集合体を組立てる際の燃料ピン表面の温度を±５℃精度で予測可能なシミュレーションコードを整備し、目標を達成できる見込み
(2) 集合体組立設備の冷却システム概念の構築	◆ 裸のピン束の下方から強制冷却風を流す試験で、ピン温度を200℃以下に冷却できることを確認した。	◆ラッパ管挿入前の裸のピン束を200℃以下に冷却できる目標を達成できる見込み。 ◆ラッパ管付きの状態での、冷却試験を実施し、目標を満足する冷却システム概念を構築する。



集合体組立装置除熱システム概念



バンドル除熱システムモックアップ試験装置



シミュレーションコードによる集合体内温度分布評価例

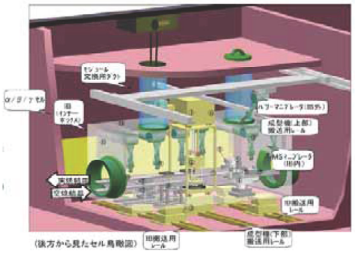
Fast Reactor Cycle Technology Development Project

実用施設概念の設計研究

	2006年度	2007年度	2008年度	2009年度	2010年度	備　考
			中間とりまとめ		革新技術採否判断	
実用施設／実証施設の設計研究	プラント概念の設計検討（周辺設備、遮へい方式等）		合理的なプラント概念の反映	実用施設／実証施設の概念検討		経済性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性等の開発目標に照らし合わせた評価
要素技術開発	革新技術に関する課題（脱硝・転換・造粒、焼結・O/M調整比調整、セル内遠隔等）		実証炉燃料供給へ反映する技術の整備等			革新技術採否判断 ・プロセスの工学規模成立性判断のための技術的根拠を提示 ・実用施設へ導入可能な機器・設備の成立性、量産能力達成見通し

2010年目標	200年までの成果	達成見通し
◆200tHM/y規模の実用燃料サイクル施設の設計研究を実施し、革新技術の具体化による施設概念への影響評価（設計要求への適合性評価）を行う。	◆施設概念の選択肢検討として、従来の大型セル方式に比べ開発課題が基本的に少なく比較的近未来に実現できる施設概念（小型セル方式の遮へいとインナーボックスによる閉じ込め構造、かつ、質量管理による臨界設計を組合わせたシステム概念）を検討した。小型セル方式施設の場合、建設費は増大する。	◆セル内遠隔保守設備の開発成果及び小型セル構造を一部取り入れ、施設構造の最適概念を構築する。 ◆プロセスおよび量産化技術開発の成果を取り入れた設備および施設概念設計を行い、革新技術採否判断のためのシステム評価データを提示する。

燃料製造施設（小型セル構造）のイメージ



Japan Atomic Energy Agency　18

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

今後の燃料製造技術開発展開の留意点

◆ 技術開発連携の強化

・ もんじゅ燃料高度化による実証炉燃料仕様（太径・中空・高密度ペレット、ODS被覆管等）の製造技術の確証、照射データの取得等、現行の燃料開発課題とFaCTの枢要技術開発を相互に連携して進める。

・ FaCT枢要技術の開発において、プルトニウム第三開発室を利用し取扱いが容易な高除染燃料を用いた工学規模の実証を行い、段階的スケールアップの実現性を高める。

◆ 実証炉燃料供給技術の準備

・ 2020年頃の実証炉用燃料製造に向け、早期に技術基盤を整備する必要があることから、現行法を含む製造技術を集大成し、実証炉燃料製造技術の工学時実証を早期に進める

Japan Atomic Energy Agency　19

Fast Reactor Cycle Technology Development Project

中間取りまとめ時点での状況と見通し　― 燃料製造システム ―

革新技術	現在の状況	2010年までの見通し
脱硝・転換・造粒一元処理技術	流動性の良い造粒粉末を得るプロセスの工学規模での成立性の見通しを得るため、小規模のMOX試験設備の準備を進めている。脱硝の量産開発として浅皿容器を選定し量産設備開発を進めている。また、コールド試験による造粒量産設備開発を進めている。	・小規模MOX試験で得られるMOX粉末の物性値の目標達成を確認することで粉末調整プロセスの工学規模での成立性を評価する。 ・量産脱硝技術は、容器製作性検討、電磁場解析、オーブンの設計検討等を総合し量産性見通しの技術根拠を提示する。また、造粒技術に関しては、量産規模の造粒機を製作し、その収率をコールド試験等で確認し、量産性見通しの技術根拠を提示する。
ダイ潤滑成型技術	本技術の工学規模での成立性評価に向け、小規模MOX試験設備の整備及びプルトニウム第三開発室設備の整備を進めている。	小規模MOX試験設備の整備及びプルトニウム第三開発室設備の試験により成立性を確認する。 ・上記成果以外に、コールドモックアップ試験機による模擬粉末の成型試験の実績が十分あり、目標達成は可能と考える。
焼結・O/M調整技術	プロセス技術開発については、小規模のMOX試験設備を整備中である。 なお、熱処理によるO/M調整法についてはMA添加高発熱燃料の工程内O/Mドリフト抑制方法に不確実さがあるため、代替として酸素ゲッター材による方法を検討している。	・プロセス技術開発については、共用バッチ炉での試験データと、これまでの基礎データ等と合わせて総合的に評価することで、目標の評価に必要な技術根拠を提示する。 ・遠隔量産化技術開発としては、小規模工学試験の設計情報、連続焼結炉の試験等の成果を総合的に勘案し、量産化に適した方式選定及び量産化への見通しを提示する。
燃料基礎物性研究	MAやFPを含むMOX燃料の基礎物性（融点、熱伝導率、酸素ポテンシャル、状態図など）を測定、評価し、データ整備を進めている。	基盤的な技術であるため成果目標は設定していないが、MAを含むMOX燃料の物性データが拡充できる。
セル内遠隔設備開発	モジュール分割可能な成形設備の概念を構築し、ハンドリング設備の開発と合わせて、共通的な遠隔保守システムをモックアップ試験によりの確認している。 また、ペレット検査、粉末分析設備を開発している。	コールドモックアップ試験等により、目標とするセル内遠隔保守設備の共通的システム概念を提示できる見込みである。
TRU燃料取扱技術	燃料集合体の組立時の除熱システムの成立性確認について、冷却システムを開発し、コールドモックアップによる開発を進めている。	コールドモックアップ試験およびシミュレーションコード開発により、目標とする除熱システムの技術根拠を提示できる見込みである。

Japan Atomic Energy Agency　20

This is a blank page.

6. おわりに

FaCT プロジェクトの 2008 年度（平成 20 年度）までの進捗状況を整理した「中間取りまとめ」に関する技術的内容を中心に関係者の皆様に御報告するとともに、頂いた御意見を今後の研究開発活動に反映するため、「FaCT プロジェクト中間報告会」を開催した。

分野、業種多岐にわたる 200 名超の参加を頂き、「中間取りまとめ」について一定のご理解を得ることができたと考える。

付録に示したアンケートには、この様な成果報告会を定期的に行ってほしいとのご意見もあり、テーマやプログラム構成へのご意見等も踏まえ、今後ともこのような機会を設けることといたしたい。

This is a blank page.

謝　辞

本報告会の開催に際し、原子力機構内外の関係各署の方々に多大なるご協力を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

本報告の内容は、電力会社９社、電源開発株式会社及び日本原子力発電株式会社による電力共通研究の成果の一部を含みます。

本報告の内容は、特別会計に関する法律（エネルギー対策特別会計）に基づく経済産業省からの受託研究として、独立行政法人 日本原子力研究開発機構が実施した平成 19 年度及び平成 20 年度の「発電用新型炉等技術開発」の成果を含みます。

本報告の内容は、旧電源開発促進対策特別会計法及び特別会計に関する法律（エネルギー対策特別会計）に基づく文部科学省からの受託事業として実施した平成 18 年度及び平成 19 年度の下記の成果を含みます。

(1) 「原子炉容器の高温構造設計評価技術及び破損燃料位置検出器の開発」（独立行政法人 日本原子力研究開発機構が実施）
(2) 「過渡時の自然循環による除熱特性解析評価手法の開発」（三菱 FBR システムズ株式会社が実施）
(3) 「抽出クロマトグラフィ法による MA 回収技術の開発」（独立行政法人 日本原子力研究開発機構が実施）
(4) 「セル内遠隔設備の開発」（独立行政法人 日本原子力研究開発機構が実施）

特別会計に関する法律（エネルギー対策特別会計）に基づく文部科学省からの受託事業として実施した平成 19 年度の下記の成果を含みます。

(1) 「燃料取扱い系システムの開発」（日本原子力発電株式会社が実施）
(2) 「燃料集合体解体及び燃料ピンせん断技術の開発」（日本原子力発電株式会社が実施）

This is a blank page.

付録 1 開催案内（ポスター）

This is a blank page.

付録 2 プログラム

「ＦａＣＴプロジェクト中間報告会」プログラム

１３：１５　開会挨拶・基調報告

「FaCT プロジェクトの概況」

永田　敬（原子力機構　次世代原子力システム研究開発部門　部門長）

１３：３０　技術報告（１）高速増殖炉システム

座長：佐賀山　豊（原子力機構　次世代原子力システム研究開発部門
副部門長）

① 高速増殖炉システムに係る研究開発の概要

青砥　紀身（原子力機構　次世代原子力システム研究開発部門
設計・統括ユニット長）

② 高速増殖炉システムに係る設計研究の進捗

戸田　幹雄（三菱 FBR システムズ株式会社
企画・プロジェクト部　主監

③ 高速増殖炉システムに係る革新技術の研究開発の進捗

森下　正樹（原子力機構　次世代原子力システム研究開発部門
FBR 要素技術ユニット長）

１５：１５　質疑応答

１５：３０　休憩

１５：４５　技術報告（２）燃料サイクルシステム

座長：船坂　英之（原子力機構　次世代原子力システム研究開発部門
副部門長）

① 再処理システムの研究開発の進捗

小山　智造（原子力機構　次世代原子力システム研究開発部門
次世代再処理システムユニット長）

② 燃料製造システムの研究開発の進捗

滑川　卓志（原子力機構　次世代原子力システム研究開発部門
次世代燃料製造システムユニット長）

１６：４５　質疑応答

１７：００　総合意見交換

１７：１０　総括・閉会挨拶

岡田　敬三（三菱 FBR システムズ株式会社　取締役社長）

永田　敬（原子力機構　次世代原子力システム研究開発部門　部門長）

１７：２０　閉会

This is a blank page.

付録 3 アンケート集計結果

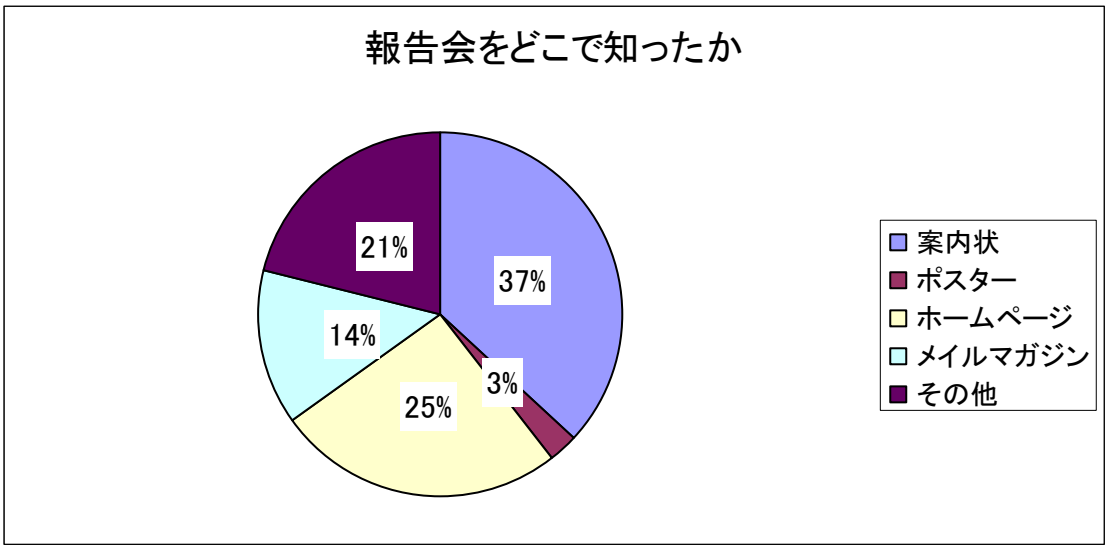
FaCT プロジェクト中間報告会にて、報告会の内容、運営・全体についてアンケートを実施した。207 名の参加に対し 116 名より回答があった。

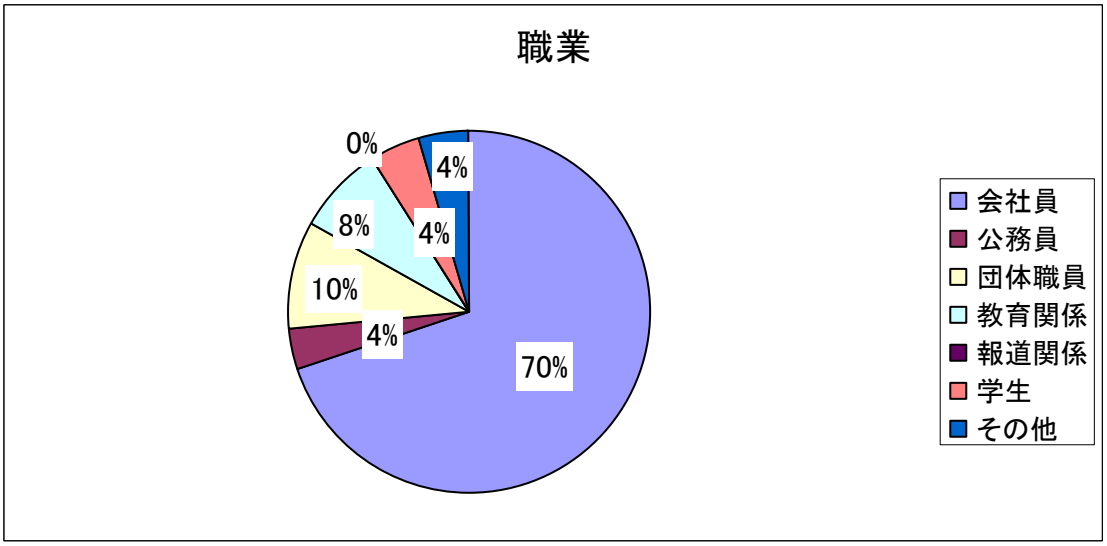
回答者内訳

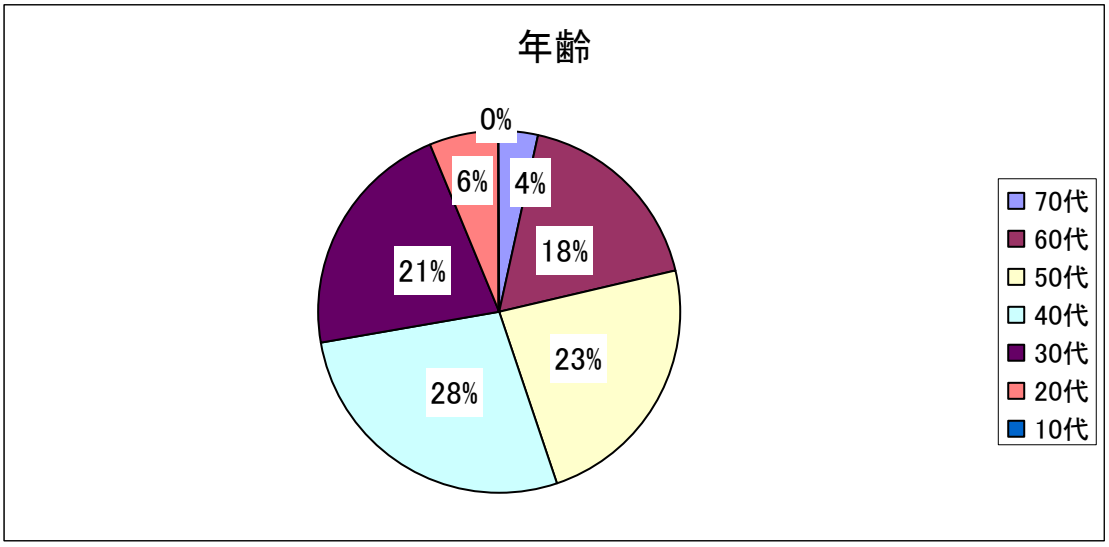
37%がセミナーの案内状により参加しており、ホームページ、その他、メールマガジン、ポスターで開催情報を知り、参加している。

職業の 70%は会社員と回答している。団体職員は 10%、教育関係者は 8%、公務員は 4%、学生は 4%である。

年代は分散しており、40 代（28%）、50 代（23%）、30 代（21%）、60 代（18%）、20 代（6%）、70 代（4%）の順となっている。





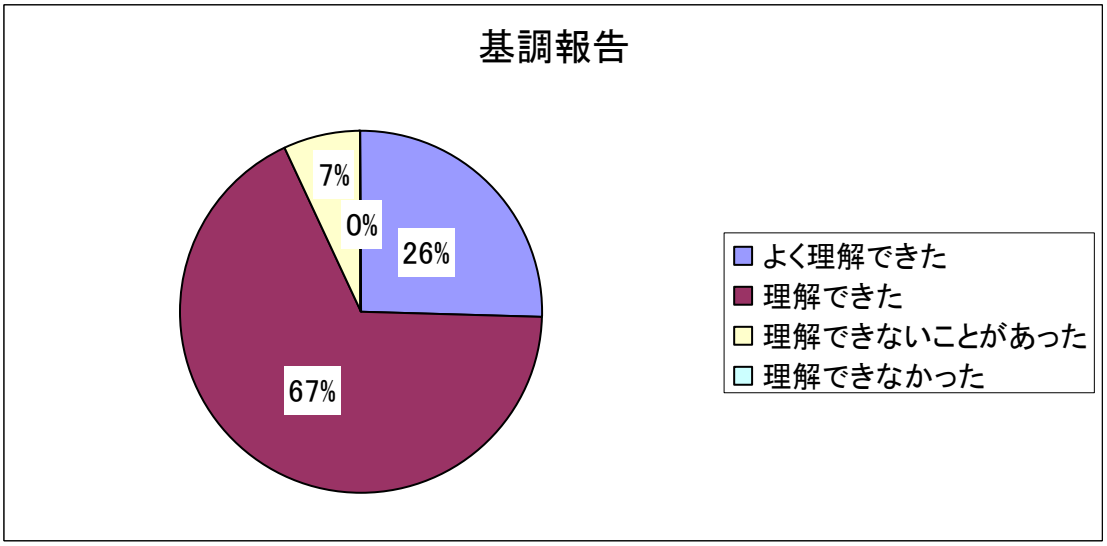


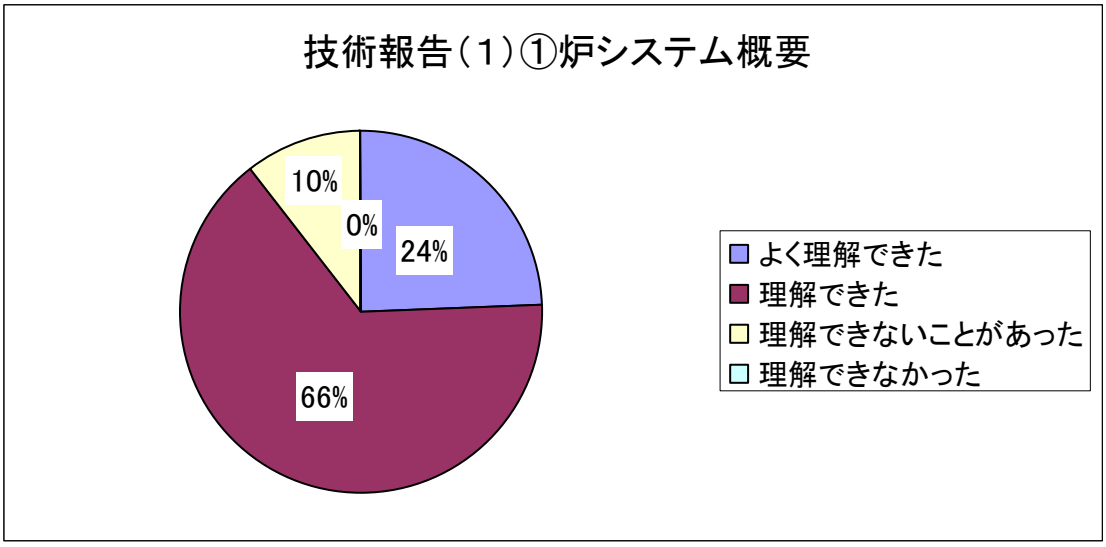
分析と今後の対応について：

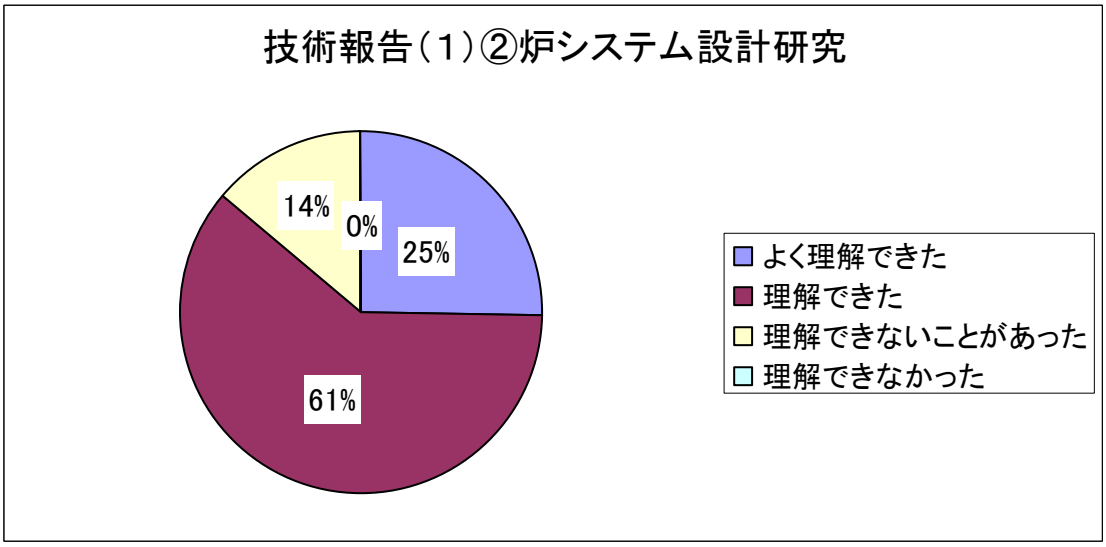
金曜日、午後半日での東京開催という面があり、第一線の研究者・技術者が集中する 30～50 代の参加を得ることができた。一方、若年層の参加はきわめて少数であった。今後、学生を含む 20 代を含めた参加増を狙い、一層の工夫が必要と考える（日程・場所、学会等との併催、テーマ・講師の選定など）

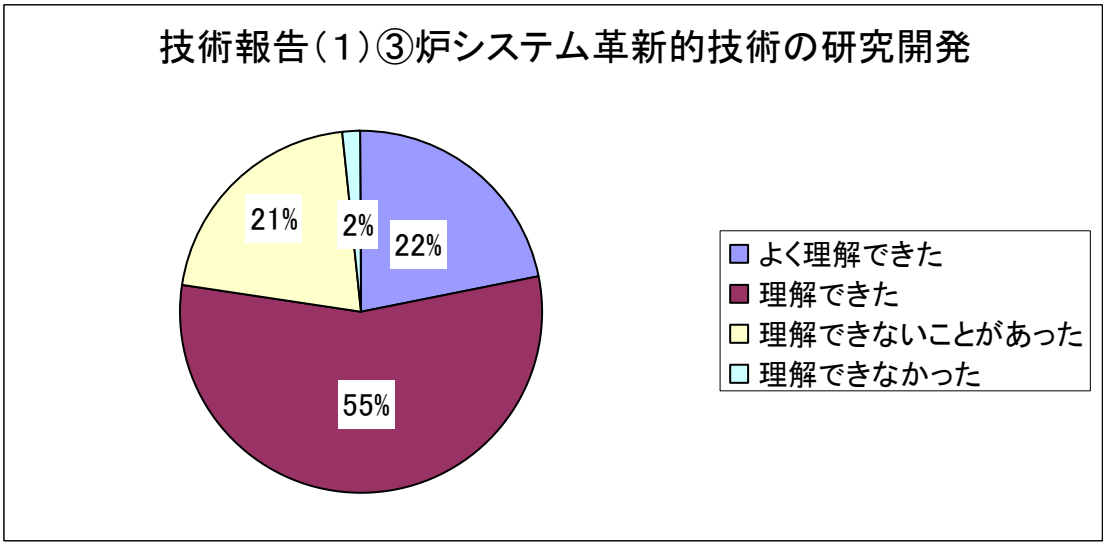
報告会の内容について

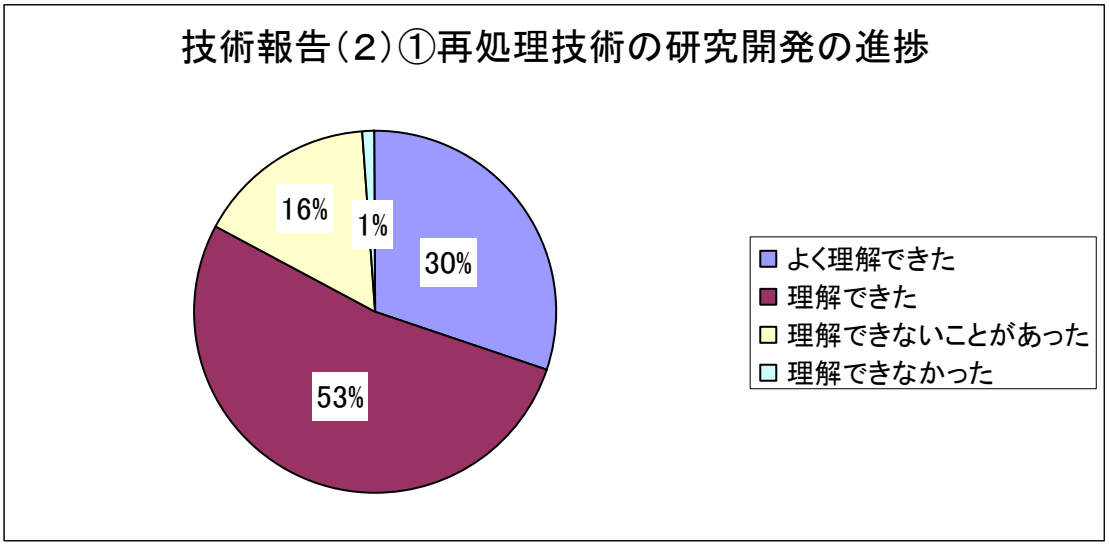
本報告会の対象を基本的に関係者としていたこともあり、全体的に、「よく理解できた」と「理解できた」の合計は、おおむね 80%程度あり比較的理解度は高い。但し、技術報告（1）炉システムの革新的技術の研究開発及び技術報告（2）燃料サイクルシステムの燃料製造技術の研究開発の進捗については、報告が詳細にわたったこともあり理解度は相対的に低い。

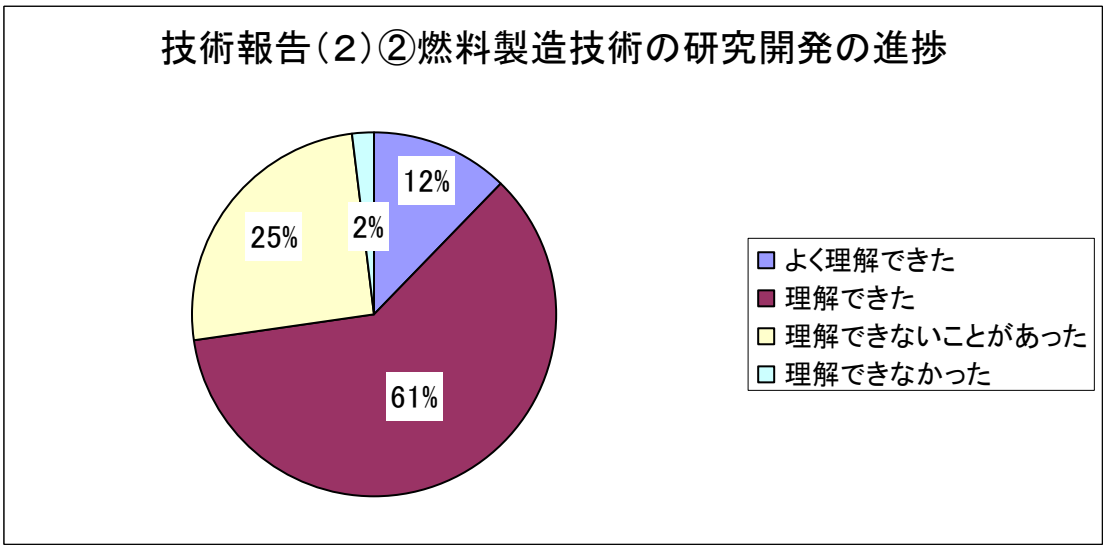



技術報告（1）①炉システム概要
10%
0%
24%
66%
よく理解できた
理解できた
理解できないことがあった
理解できなかった


技術報告（1）②炉システム設計研究
14%
0%
25%
61%
よく理解できた
理解できた
理解できないことがあった
理解できなかった


技術報告（1）③炉システム革新的技術の研究開発
21%
2%
22%
55%
よく理解できた
理解できた
理解できないことがあった
理解できなかった





「理解できないことがあった」、「理解できなかった」理由：

- 専門外のため。
- 略語、専門的用語が多いため。
- 報告が短時間、報告量が多いため。
- 順調に進捗できているのかどうか明確に分からなかった。
- 具体的、定量的なクライテリア及びターゲットが明確に示されていない。
- （その他個別）

など

今後取上げて欲しいテーマ、興味あるテーマ等：

- 設計研究、各研究開発の各テーマの進捗状況
- 革新技術の採否判断の結果、今後の技術開発のポイント
- 既存プラントの成果の反映について
- 国際協力の取組みについて
- 原子力機構とメーカ以外の取組状況
- 原子炉構造及び配管の高温構造設計、各機器に対する耐震設計等
- 再臨界回避方策の検討と EAGLE 試験計画の現状
- 保全システム（技術と仕組み）
- LF 移行期への取組み
- より具体的な第二再処理工場の想定・計画
- 燃料製造性と核拡散抵抗性との関係
- 今回報告されなかった研究開発（代替技術、副概念）
- 社会の理解を得るための取組、検討

など

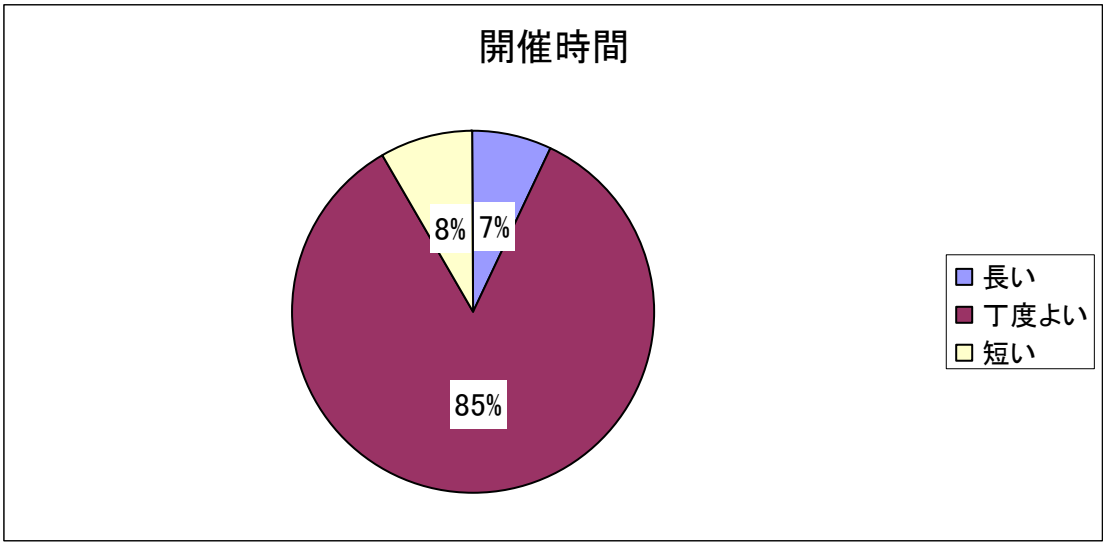
分析と今後の対応について：

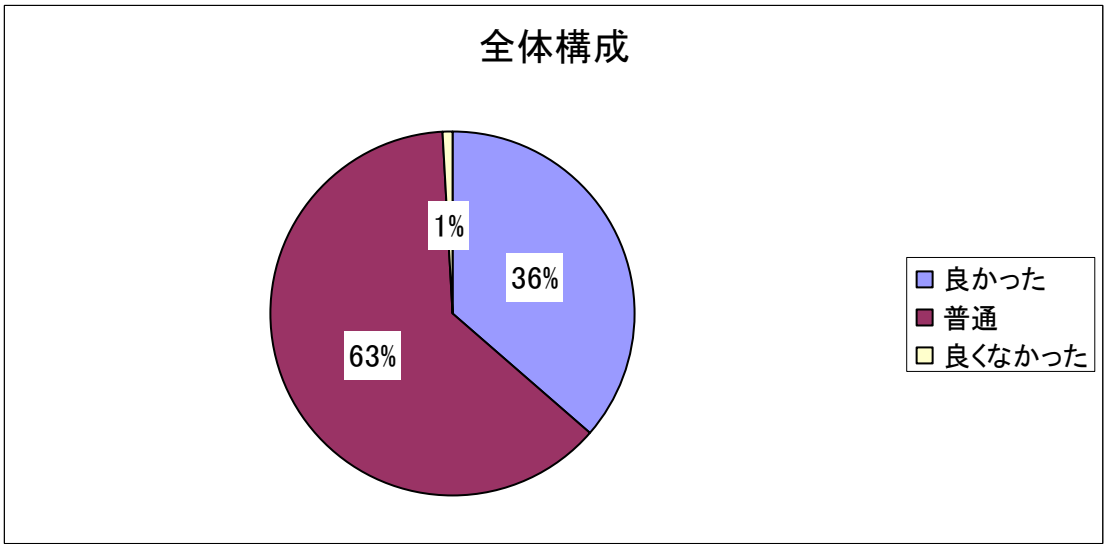
聴講者の殆どは会社員等であり FBR サイクル研究開発に関っている方が多いものの、個別課題については、理解度に差が生じることは致し方ないと考える。　次世代研究者・技術者にも理解でき、魅力ある技術と捉えられるよう、継続的に発表資料の改善・改良を行っていく必要がある。

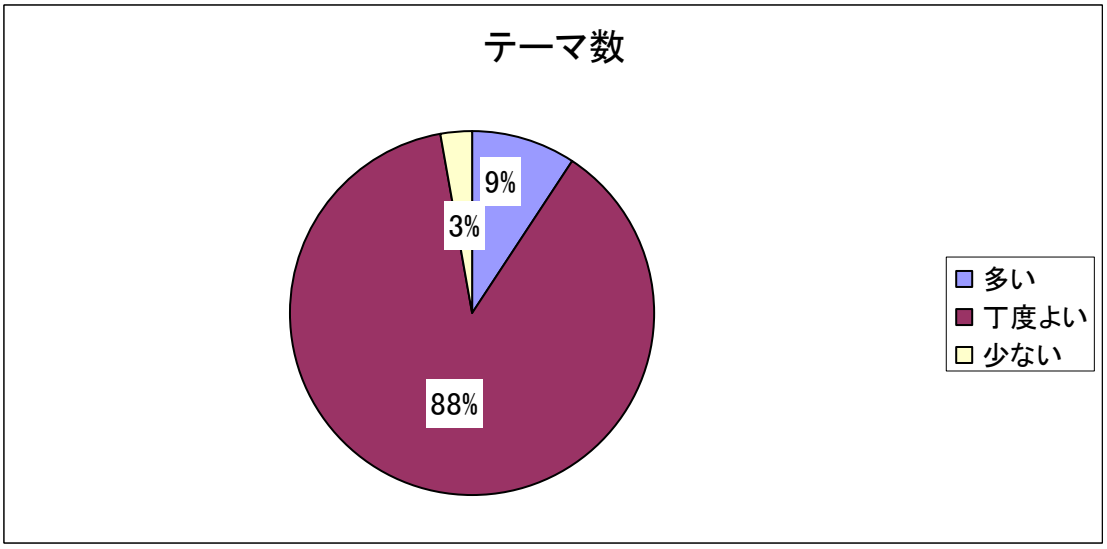
報告会の運営について

午後半日の開催という時間について、85%が「丁度良い」と回答し、7%は「長い」と回答している。全体の構成について、63%が「普通」とされ、36%は「良かった」と回答している。テーマ数については、88%が「丁度良い」と回答し、9%は「多い」と回答している。

時間は丁度良いとしつつも、質疑応答の時間が少ない、報告時間は十分でない、報告内容の量については配慮が必要といった意見があった。また、報告の仕方に工夫して欲しいとの意見があった。


開催時間
8%
7%
85%
長い
丁度よい
短い


全体構成
1%
36%
63%
良かった
普通
良くなかった


テーマ数
9%
3%
88%
多い
丁度よい
少ない

運営、全体についての意見・要望：

- 質疑応答の時間が少ない。
- 報告時間が全般に十分でなかった。報告内容の量については配慮が必要。
- テーマ、ポイントを絞って詳細に聞きたい。問題点、課題を明らかにして欲しい。
- 報告の仕方に工夫が欲しい。自分自身は一般的な専門知識を持つ専門家であるが、社内、内輪以外にはわからないだろうと思われる内容が散見された。
- 概念と採用する新技術の内容は理解できた。
- 進捗のみでなく、問題点、困っている課題についても紹介があれば、総合意見交換も意味があるかと思います。
- 高速増殖炉を実現することは、資源有効利用の点等から重要なので、今後も十分な成果を出して欲しい。
- 研究のための研究にならないよう、期限管理、資金管理をお願いしたい。
- 国際標準化という目標に関して、どうするのか。国外との意見交換をどうするのか。
- 詳細についてつっこみにくい雰囲気。
- パネルディスカッションがあれば良いのでは。
- 参加者をどう想定した報告内容にしたのか。報告内容は技術的なので専門家を対象にしている様だがそれにしては散漫な内容であった。
- FaCT プロジェクトの全体像がわかって良かったです。
- プロジェクターが見えにくかった。
- 会場の空調が非常に寒かった。
- 机のある会場が良かった。
- 音声が反響して話が聞き取りづらかったです。

など

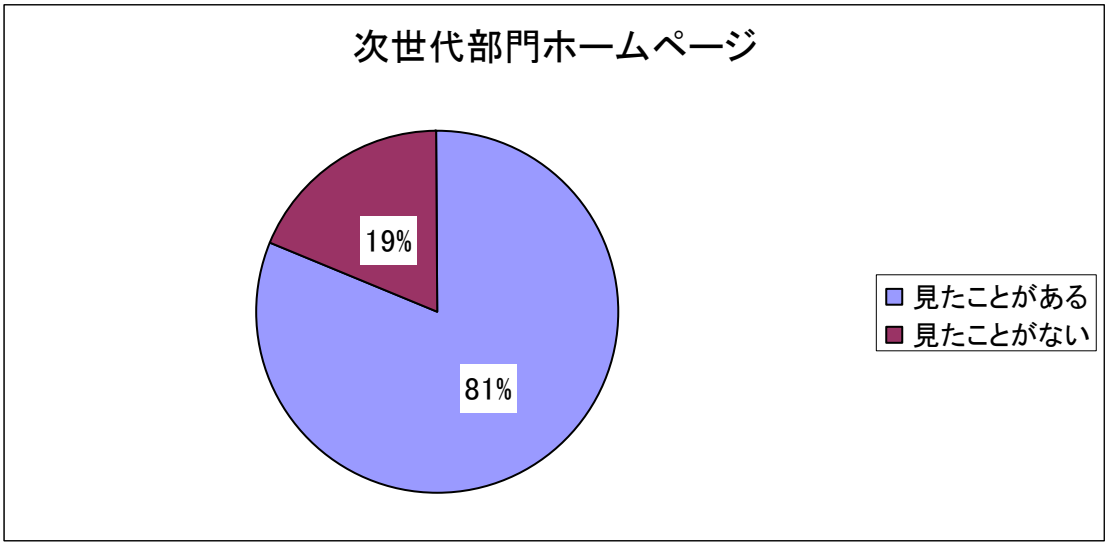
分析と今後の対応：

FaCT プロジェクトの全体像と個別研究開発の状況報告というスタイルでは、情報量がどうしても多くなる。今後、報告時間、質疑応答及び意見交換の時間配分への配慮、分科会形式とすること等を検討する必要がある。

その他

次世代原子力システム研究開発部門の公開ホームページを見たことがある方は 81%、見たことのない方は 19%であったが、「ホームページの利用拡大を考えて欲しい。」、「FaCT 専門のホームページを作成してほしいと思います。」等の意見が見受けられた。

その他、「業界向けはこれで良いだろうが、並行して一般社会向けに努力が不足。」「一般の人にもわかりやすく成果を紹介してはどうか。」、「検討状況、進捗状況についての積極的な情報公開が望まれる。」、「この様な成果報告会を定期的に行ってほしい。」等の意見が複数あった。



分析と今後の対応：

ホームページを活用した情報発信方法の改善・改良とあわせて、情報発信をより強力に進めていきたい。

以　　上

付録 4 写真

基調報告

技術報告

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の） 1	1
比透磁率[b]	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=1l=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています