

図1-2-8 ナトリウム冷却炉における技術開発課題

経済性に係る課題

○建屋容積・物量の削減

- ①配管短縮のための高クロム鋼の開発
- ②システム簡素化のための冷却系2ループ化
- ③1次冷却系簡素化のためのポンプ組込型中間熱交換器開発
- ④原子炉容器のコンパクト化
- ⑤システム簡素化のための燃料取扱系の開発
- ⑥物量削減と工期短縮のための格納容器のSC造化

○高燃焼度化による長期運転サイクルの実現

- ⑦高燃焼度化に対応した炉心燃料の開発

信頼性向上に係る課題

○ナトリウムの取扱技術

- ⑧配管二重化によるナトリウム漏洩対策強化
- ⑨直管二重伝熱管蒸気発生器の開発
- ⑩保守、補修性を考慮したプラント設計

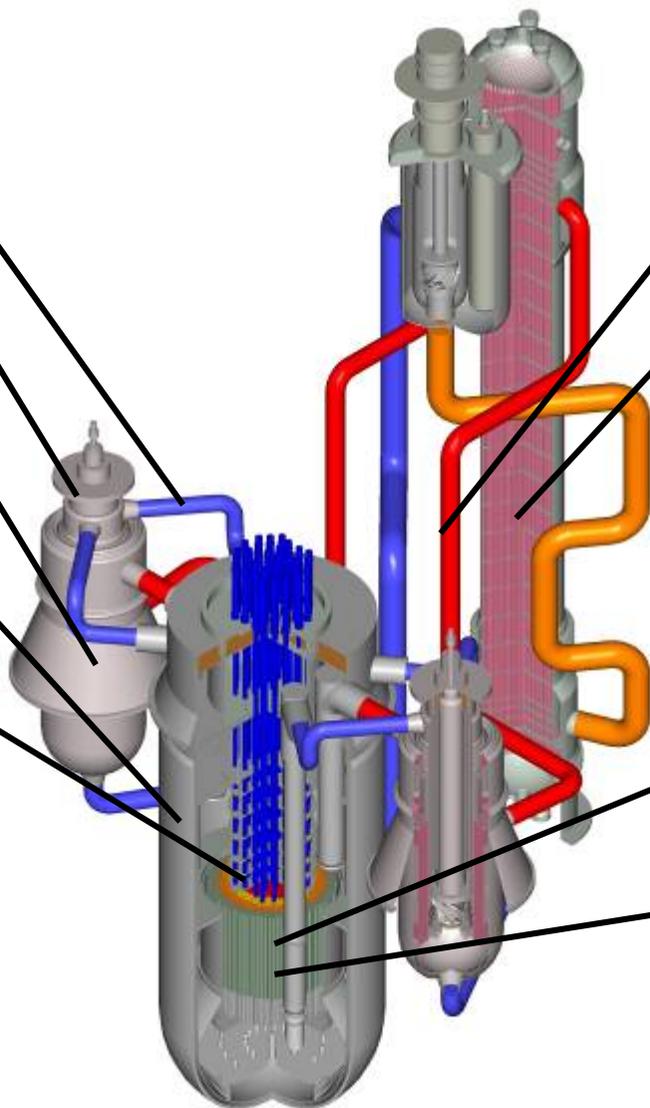
安全性向上に係る課題

○炉心安全性の向上

- ⑪受動的炉停止と自然循環による炉心冷却
- ⑫炉心損傷時の再臨界回避技術

○建屋の免震技術

- ⑬建屋の3次元免震技術



(2) 技術開発課題への全般的コメント

「FS フェーズⅡ報告書」では、これまでの概念検討や技術開発成果に基づき、技術開発課題を抽出している。当委員会は、今後の研究開発は戦略的重点化をさらに強力に進めるべきとの考えに立ち、主概念として選定したナトリウム冷却高速増殖炉、先進湿式法再処理、簡素化ペレット法燃料製造に関して集中的に検討を行った。その結果、「FS フェーズⅡ報告書」に示された主概念に関する技術開発課題の内容は概ね妥当であると考え、今後の研究開発にあたって、以下の事項をさらに検討すべきである。

① 革新的な技術

開発目標及び設計要求を満足する高速増殖炉を実現するためには、既存の技術だけでは達成が困難であり、新たな技術を導入する必要がある。新たな技術の中でも、特に、設計上重要な要素となっており、また、技術的難度が高い技術については、革新的な技術として今後の研究開発において優先的に取り組む必要があると考える。

一方、2015年頃には、高速増殖炉サイクルの適切な実用化像とそこに至るまでの研究開発計画を提示することが求められている。

このため、革新的な技術については、2010年に予定されている評価において、2015年頃に研究開発を終えて実証段階へ移行が可能との見通しを高い確度で得ることを目標として、今後5年間研究開発を行うべきであると考え。

i. ナトリウム冷却高速増殖炉

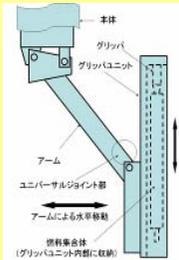
ナトリウム冷却高速増殖炉（MOX燃料）に関する革新的な技術は、以下の13課題とする（図1-2-8参照）。

○配管短縮のための高クロム鋼の開発（図1-2-9参照）

ループ型では特に問題となる冷却系構造材料の熱膨張を抑制する

図1-2-9 ナトリウム冷却炉における技術開発課題の詳細(1/5)

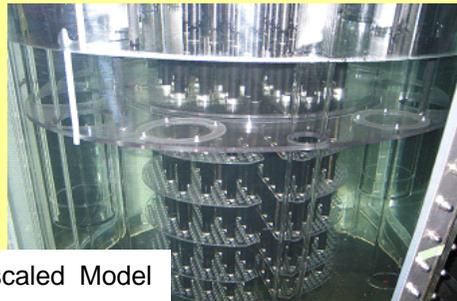
⑤システム簡素化のための燃料取扱系の開発



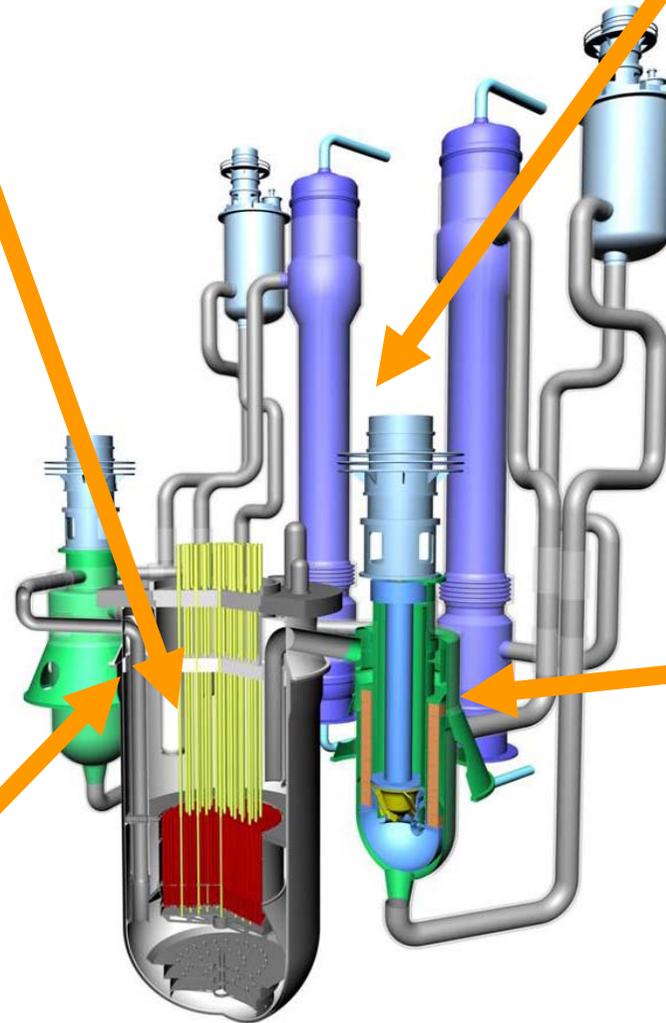
スリム型マニプレータ式燃料交換機

④原子炉容器のコンパクト化

- ナトリウム流速の増加
- ホットベッセル化(炉壁冷却削除)
- 単回転プラグの採用



1/10th scaled Model



①配管短縮のための高クロム鋼の開発

- 高クロム鋼の採用(高強度、低熱膨張)

②システム簡素化のための冷却系2ループ化

- 配管内流速の増加と熱交換能力の拡大

③1次冷却系簡素化のためのポンプ組込型中間熱交換器開発

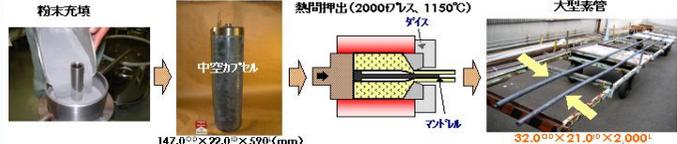


1/4th scaled Model

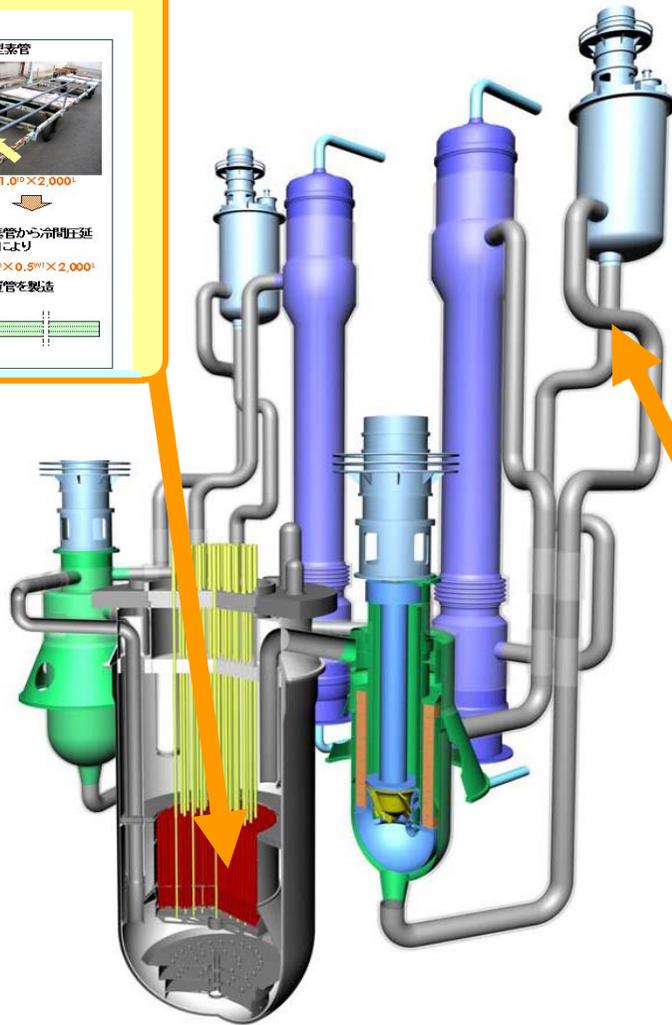
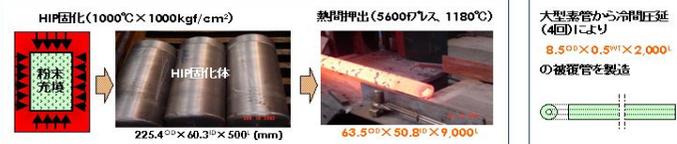
図1-2-10 ナトリウム冷却炉における技術開発課題の詳細(2/5)

⑦ 高燃焼度化に対応した炉心燃料の開発
→ ODS鋼被覆管

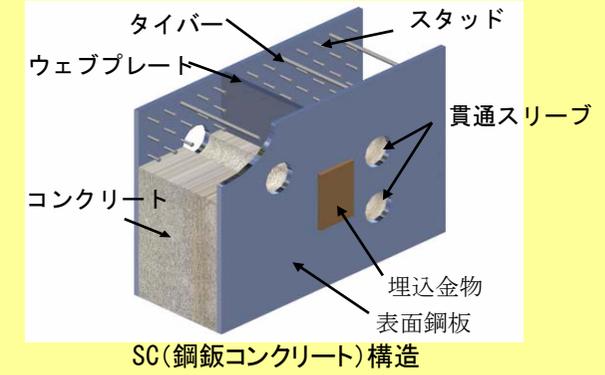
(1) 大型中空カプセル・押出素管 ⇒ 長尺被覆管



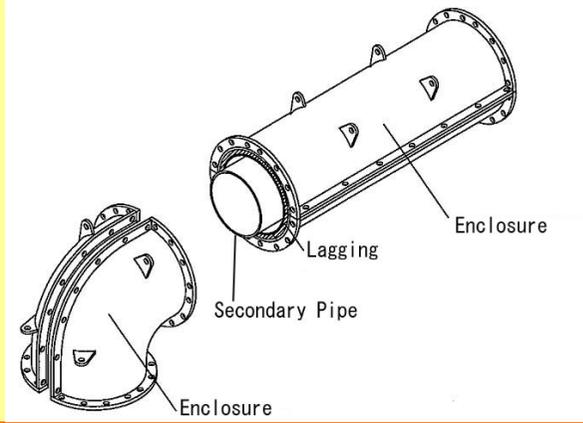
(2) 大型HIP・押出素管



⑥ 物量削減と工期短縮のための格納容器のSC造化



⑧ 配管二重化によるナトリウム漏洩対策強化



ことにより熱応力が緩和されることを狙い、機器のコンパクト化、配管の短縮を達成し、建設コスト低減を図ることとする。このため、従来の材料に比べ高強度・低熱膨張を特長としている高クロム鋼を開発するものである。

○システム簡素化のための冷却系 2 ループ化 (図 1 - 2 - 9 参照)

150 万 kWe の炉において冷却系を 2 ループとする概念を成立させ、これにより、冷却系機器の数を減らし、物量、補機類、及びその配置スペースを削減し、建設コスト低減を図ることとする。このため、大口径・高流速配管の流動安定性を確認するものである。

○1 次冷却系簡素化のためのポンプ組込型中間熱交換器開発 (図 1 - 2 - 9 参照)

1 次系主循環ポンプを中間熱交換器中心部に組込み、機器数削減、ミドルレグ配管削除、及び配置スペースを縮小し、建設コスト低減を図ることとする。このため、長軸ポンプの開発、ポンプから中間熱交換器への振動伝達防止に関する研究開発を行うものである。

○原子炉容器のコンパクト化 (図 1 - 2 - 9 参照)

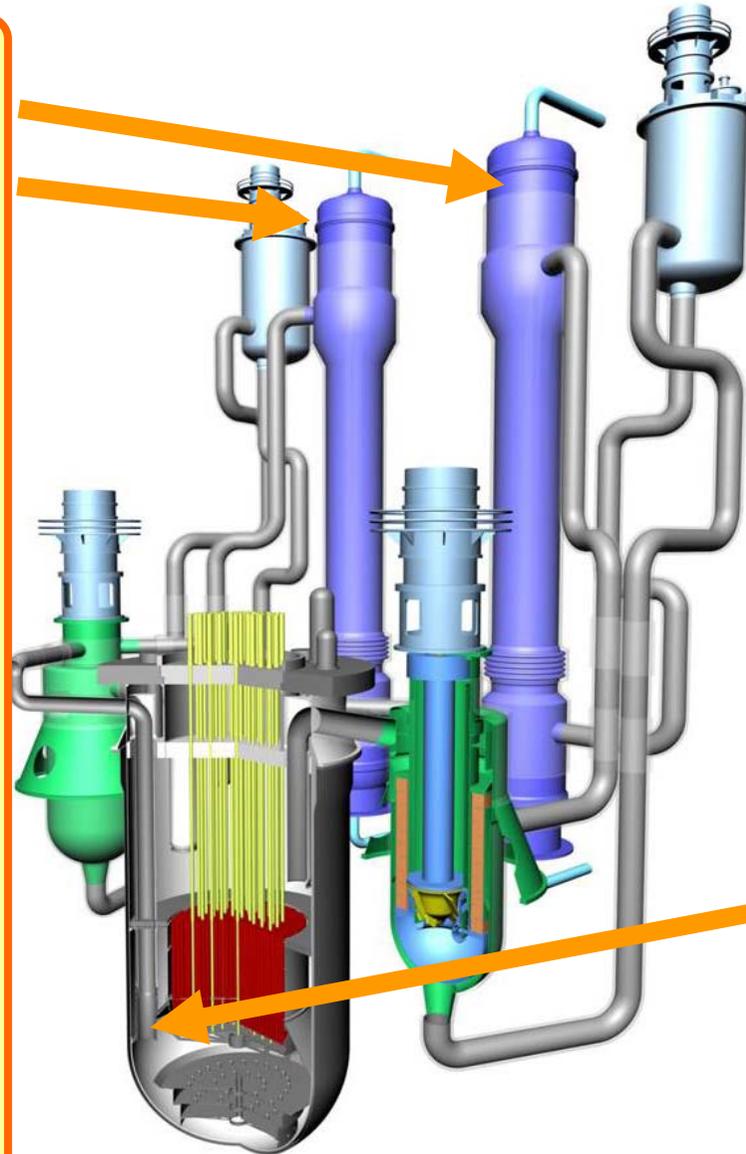
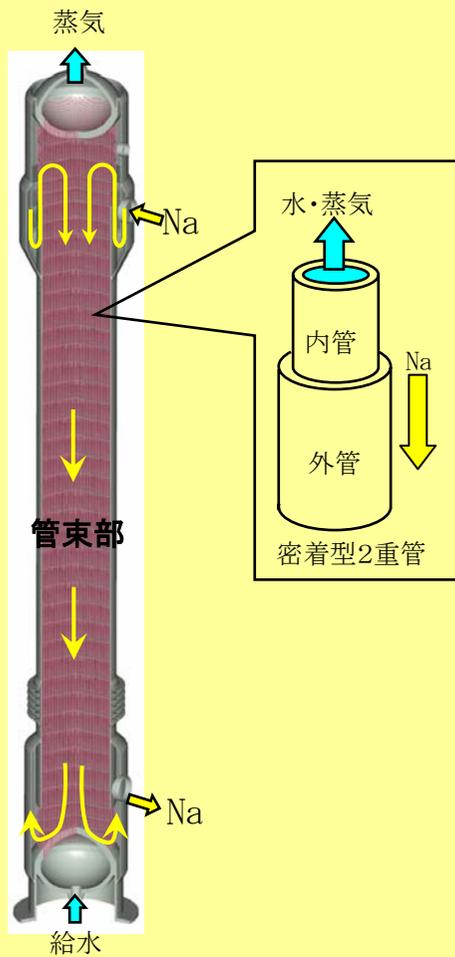
スリット付き炉上部構造の採用、サーマルライナの削除、炉心のコンパクト化などにより、原子炉容器を小径化し、建設コスト低減を図ることとする。このため、上部プレナム内流動の安定化、及び高温構造の健全性確保技術の確立を行うものである。

○システム簡素化のための燃料取扱系の開発 (図 1 - 2 - 9 参照)

物量削減、廃棄物低減、稼働率向上のために高効率の燃料交換の実現を図ることとする。このため、燃料取り扱いシステムを開発するものである。

図1-2-11 ナトリウム冷却炉における技術開発課題の詳細(3/5)

⑨直管二重伝熱管蒸気発生器の開発



⑩保守、補修性を考慮したプラント設計
→遠隔操作とナトリウム中目視装置等の開発

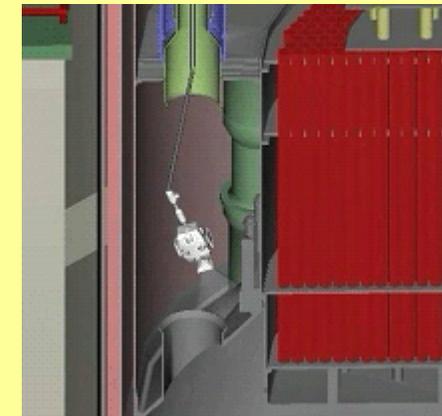
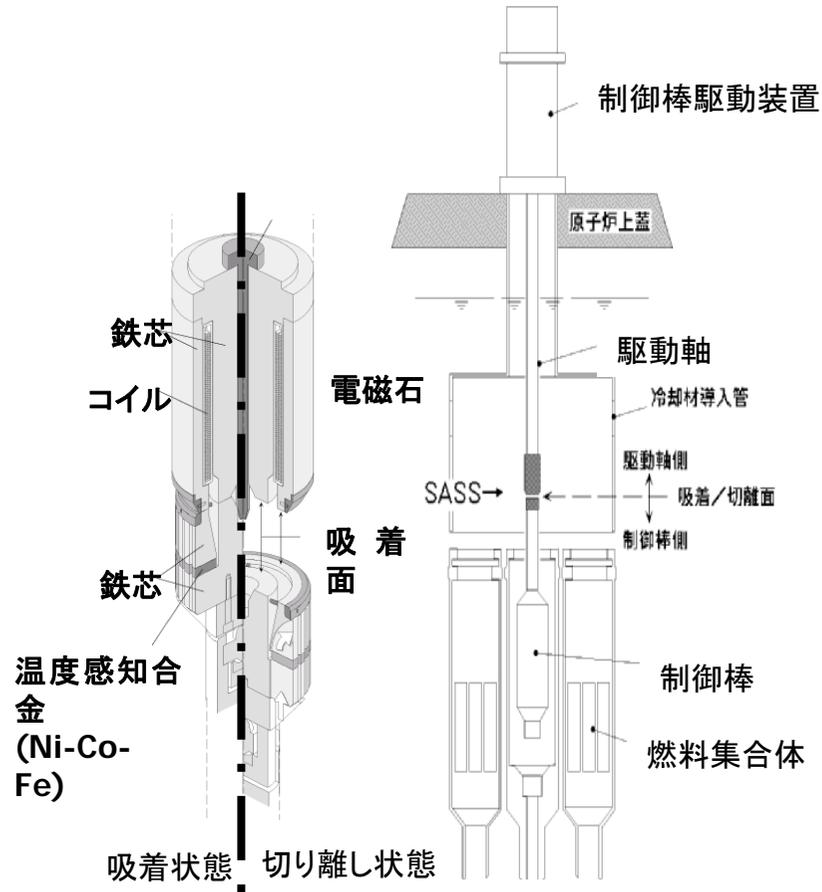


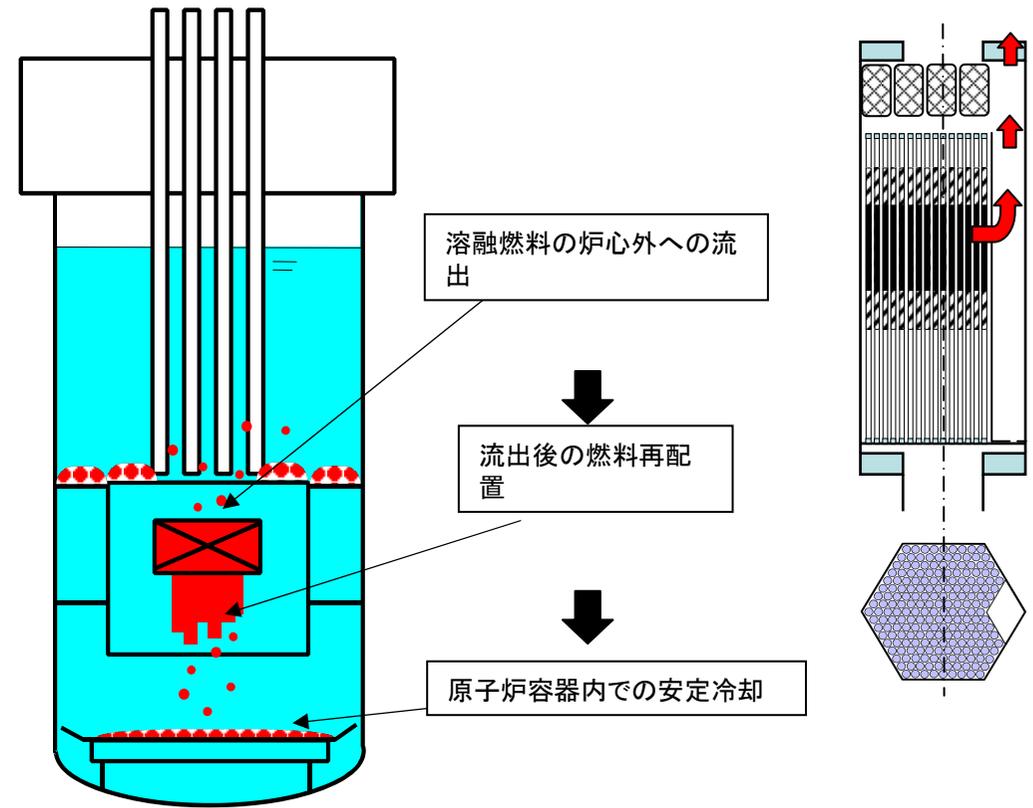
図1-2-12 ナトリウム冷却炉における技術開発課題の詳細(4/5)

⑪受動的炉停止と自然循環による炉心冷却



受動的炉停止システム

⑫炉心損傷時の再臨界回避技術



改良内部ダクト型燃料集合体 (S-FAIDUS型)

○物量削減と工期短縮のための格納容器のSC造化（図1-2-10参照）

建設コスト低減と建設工期短縮の実現を図ることとする。このため、鋼板・コンクリート（SC）造の格納容器を開発するものである。

○高燃焼度化に対応した炉心燃料の開発（図1-2-10参照）

燃料の高燃焼度化により燃料の利用効率を向上させ、運転コスト低減を図ることとする。このため、高燃焼度・高炉心出口温度の達成を可能にすると見込まれる被覆管材料である ODS 鋼の照射試験を、ロシアの「BOR-60」炉、「常陽」、「もんじゅ」を用いて実施するものである。また、TRU 燃料ピン、簡素化ペレット法で製造した中空燃料ピン、及び再臨界回避集合体の照射試験を行うものである。

○配管二重化によるナトリウム漏洩対策強化（図1-2-10参照）

ナトリウム漏洩対策強化のため、主配管からのウェル・枝管の削除、配管の二重化・区画化、及び漏洩検出の高感度化を行い、信頼性向上を図ることとする。このため、レーザ式漏洩検出器の開発、破断前漏洩（LBB）評価手法の確立を併せて行うものである。

○直管二重伝熱管蒸気発生器の開発（図1-2-11参照）

蒸気発生器でのナトリウム-水反応を防止するため、伝熱管の信頼性向上、伝熱管の破損拡大防止を図ることとする。このため、直管二重伝熱管蒸気発生器を開発し、その製作性、構造健全性、ナトリウム-水反応特性を確認するものである。

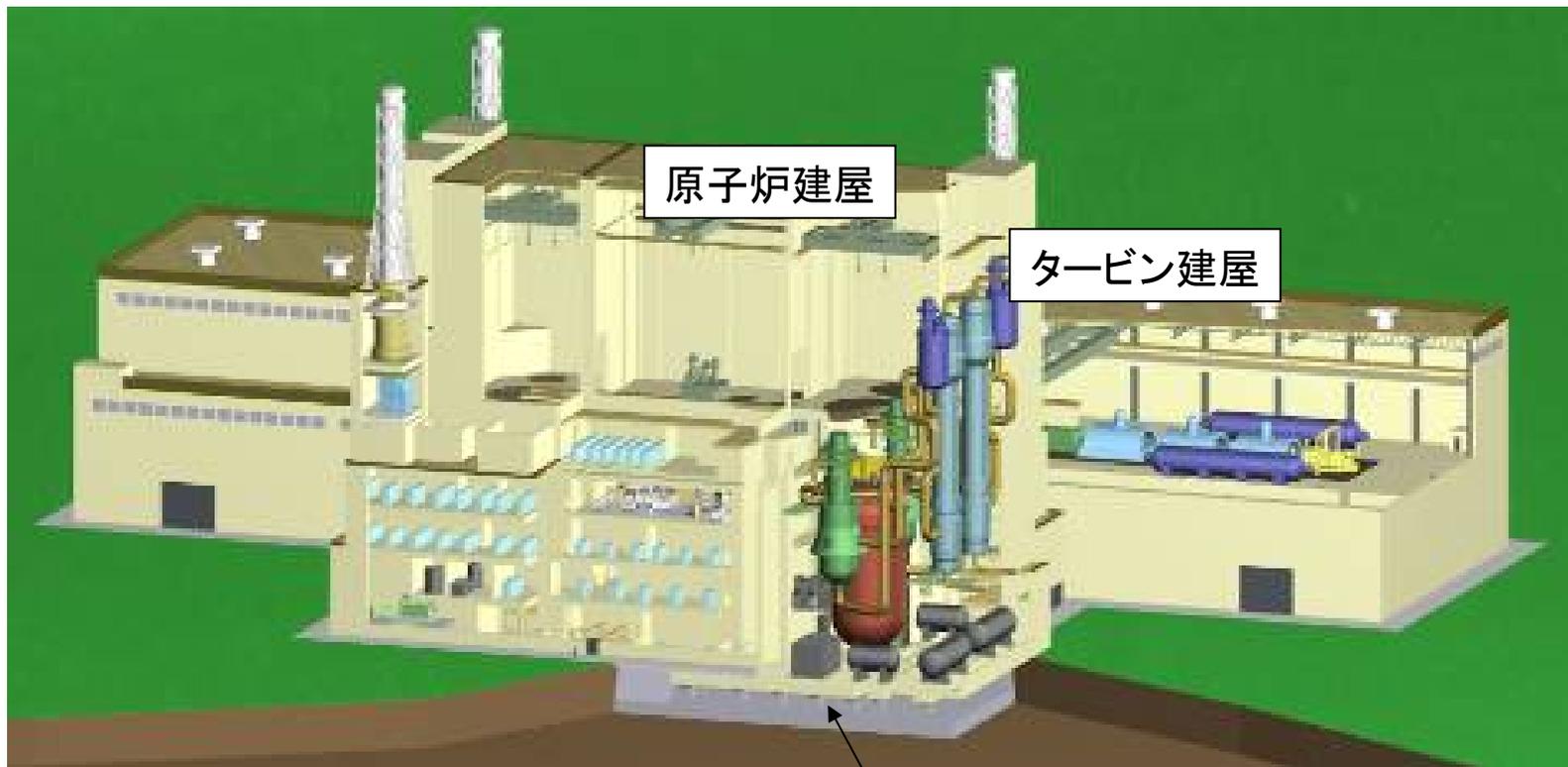
○保守、補修性を考慮したプラント設計（図1-2-11参照）

保守、補修性の向上を図ることとする。このため、不透明で化学的に活性なナトリウム冷却材中での供用期間中検査（ISI）技術、直管二重伝熱管蒸気発生器の伝熱管検査技術、及びナトリウム中補修技術の確立を行うものである。

図1-2-13 ナトリウム冷却炉における技術開発課題の詳細(5/5)

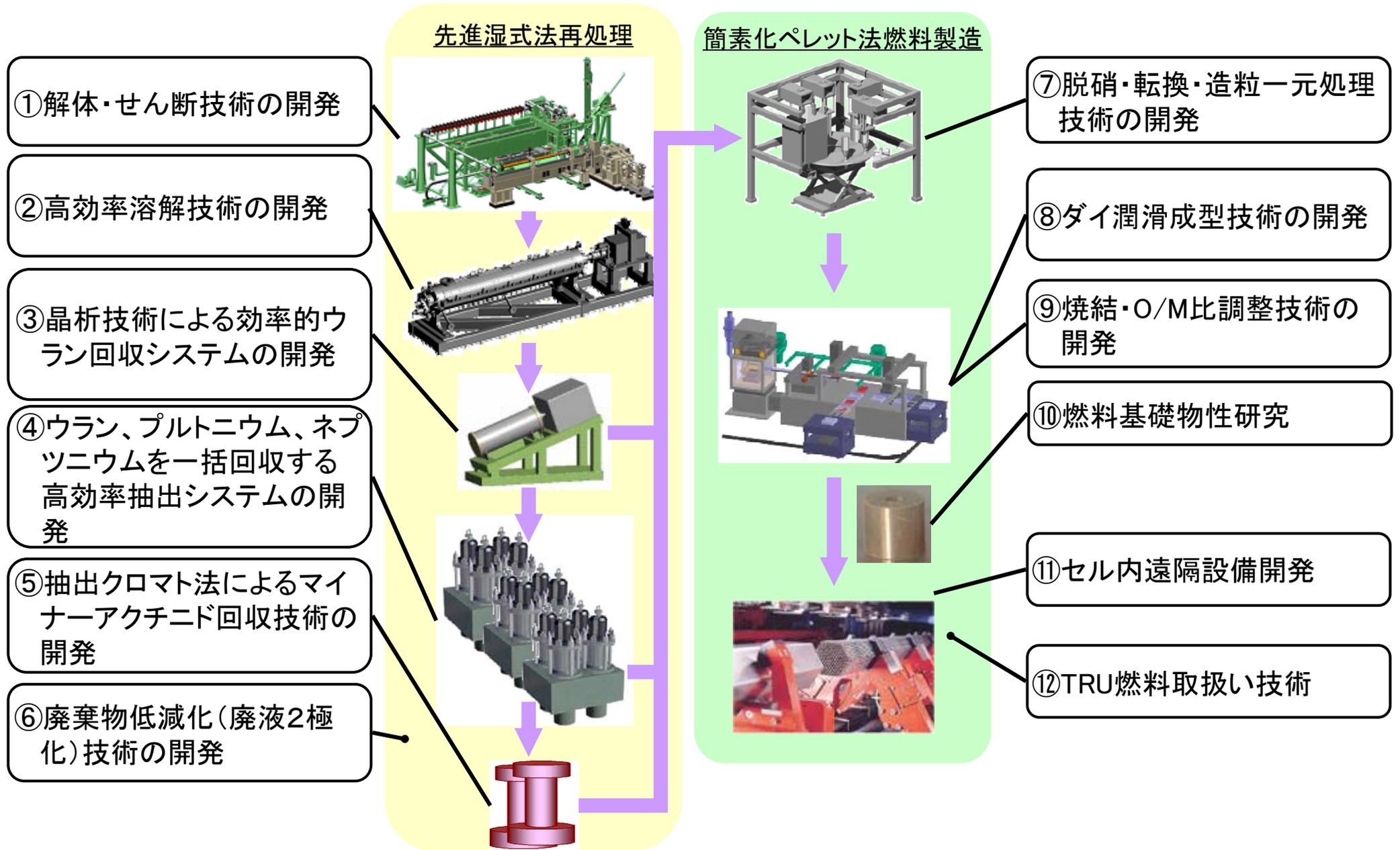
⑬建屋3次元免震技術

実用炉プラント鳥瞰図



建屋免震技術を採用

図1-2-14 燃料サイクルシステムにおける技術開発課題
 (先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造)



○受動的炉停止と自然循環による炉心冷却（図1-2-12参照）

炉心安全性の向上を図ることとする。このため、磁石が一定以上の温度（キュリー点）に達すると磁力を失う性質を利用して機械的なメカニズムによらずに制御棒が炉心に挿入される受動的炉停止機構（SASS）の技術実証、自然循環による崩壊熱除去性能の確認、及び評価手法の確立を行うものである。

○炉心損傷時の再臨界回避技術（図1-2-12参照）

万一の炉心損傷事故時においても溶融燃料の再臨界を回避しつつ、燃料を冷却するシステムを確立することとする。このため、炉心損傷事故時に溶融燃料を炉心外に排出する経路を取り付けた集合体を開発するものである。

○建屋の3次元免震技術（図1-2-13参照）

耐震性能の向上と同時に、サイト毎の地震条件を均一化して標準化することにより建設コスト低減を図ることとする。このため、3次元免震技術を開発するとともに、設計基準の整備を行うものである。

ii. 先進湿式法再処理及び簡素化ペレット法燃料製造

先進湿式法再処理と簡素化ペレット法燃料製造の組み合わせに関する革新的な技術は、以下の12課題（再処理：6課題、燃料製造：6課題）とする（図1-2-14参照）。

（再処理）

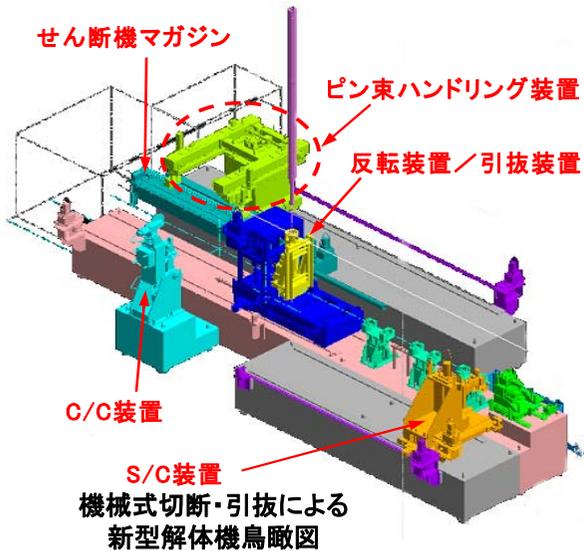
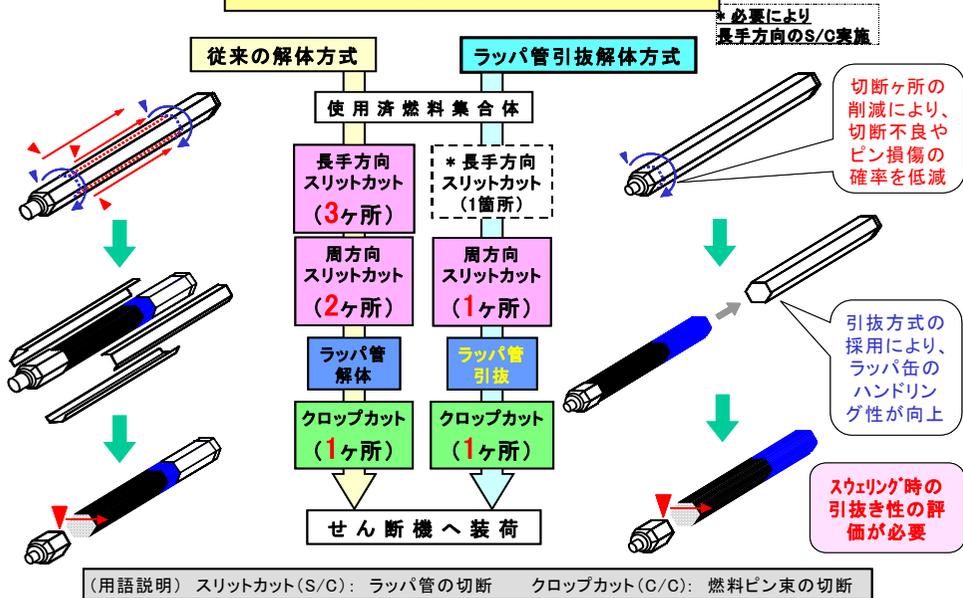
○解体・せん断技術の開発（図1-2-15参照）

燃料ピンが損傷することなく燃料集合体を解体し、高粉化率でせん断を行うことにより、高濃度溶解に対応した解体せん断工程とすることとする。このため、従来よりも制御性等に優れた機械式解体

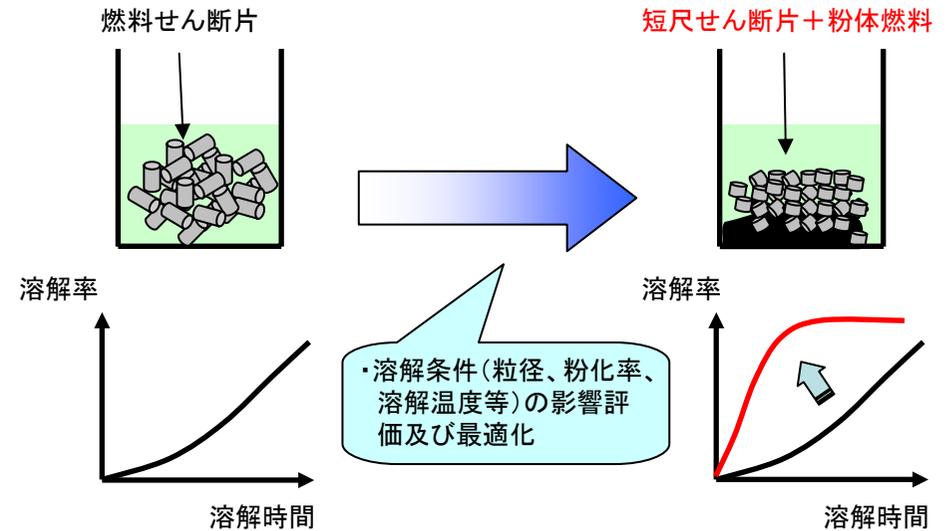
図1-2-15 燃料サイクルシステムにおける技術開発課題の詳細(1/6) (先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造)

① 解体・せん断技術の開発

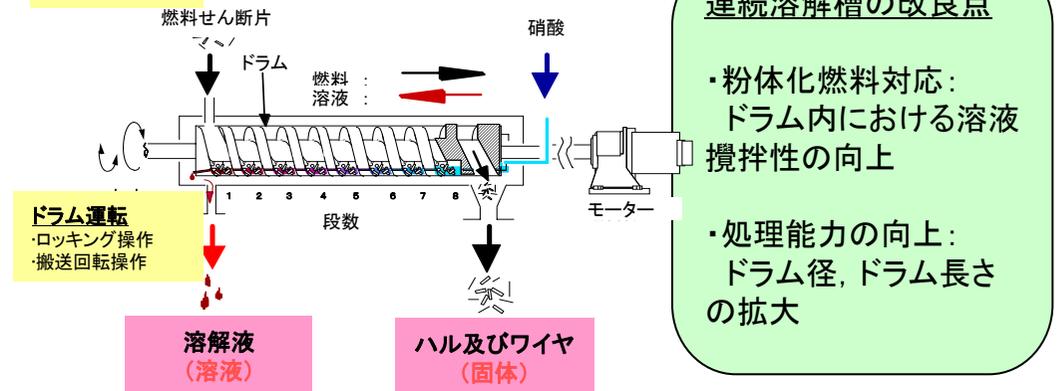
集合体の解体方式の合理化



② 高効率溶解技術の開発



- 燃料せん断片:
- ・ハル
 - ・ワイヤ
 - ・燃料要素
 - ・せん断粉



連続溶解槽構造図

図1-2-16 燃料サイクルシステムにおける技術開発課題の詳細(2/6)

(先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造)

③ 晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発

U 結晶中における Pu の存在比

U結晶の外観	Pu 比
Run1	100 : 0.3 (U) (Pu)
Run2	100 : 5 (U) (Pu)
Run3	100 : 1.5 (U) (Pu)

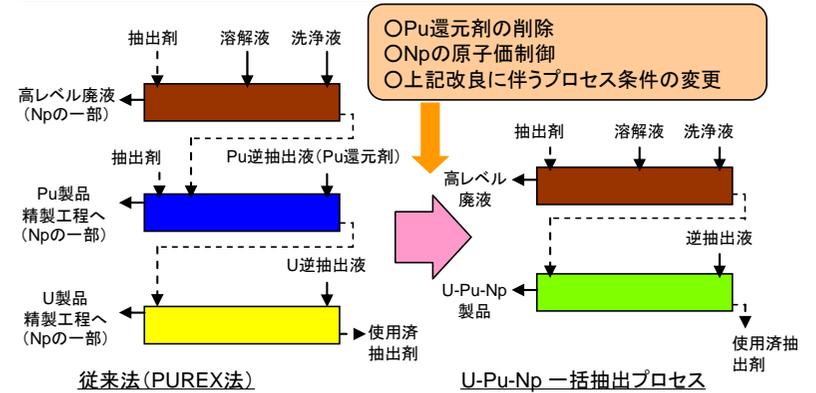
Pu(IV) のみの場合には母液に付着する
Pu(VI) の場合には結晶に取り込まれる

結晶中Uに対するPu、FPの除染係数 (DF)

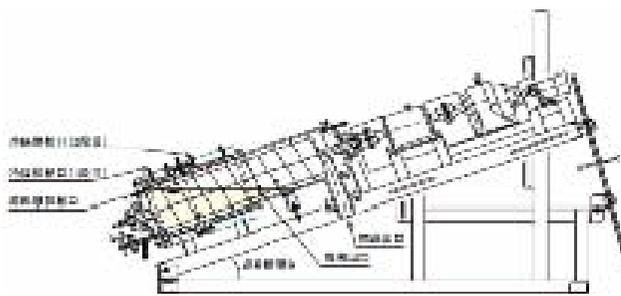
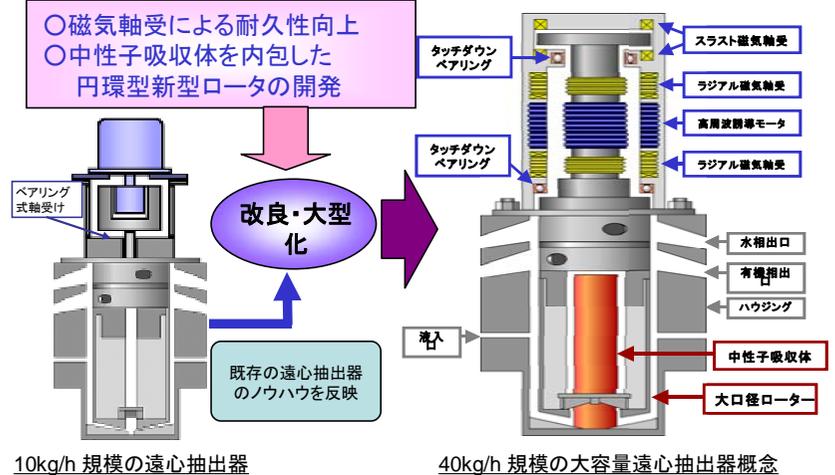
		Pu	¹³⁷ Cs	¹⁵⁵ Eu
Run1	洗浄前	5.6	1.2	4.2
	洗浄後	25	0.8	27
Run2	洗浄前	4.6	0.9	3.5
	洗浄後	19	0.9	19

④ ウラン、プルトニウム、ネプツニウムを一括回収する高効率抽出システムの開発

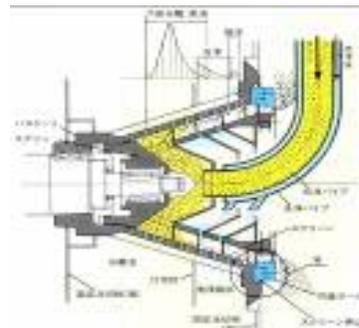
U,Pu,Npの一括回収プロセスの開発



大型プラント向け遠心抽出器の開発



連続晶析装置外観図



結晶分離機概念構造図

技術及び高粉化率のせん断片が得られる短尺せん断技術を開発するものである。

○高効率溶解技術の開発（図1-2-15参照）

晶析により効率的にウランを回収するために、高濃度溶解液が得られる溶解プロセス及び溶解槽とすることとする。このため、溶解条件を最適化するとともに高粉化燃料のハンドリング性や攪拌性に優れた構造を持つ溶解槽を開発するものである。

○晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発（図1-2-16参照）

溶解液中のウランの大部分を抽出工程前に効率的に回収することにより、抽出工程の規模の縮小を図ることとする。このため、晶析技術によるウラン回収システムについてウランに同伴する可能性のあるFP元素の晶析挙動等を解明するとともに連続晶析装置などを開発するものである。

○ウラン、プルトニウム、ネプツニウムを一括回収する高効率抽出システムの開発（図1-2-16参照）

抽出工程の効率化とプルトニウムを単体分離することなく回収することにより経済性ととも核不拡散性の向上を図ることとする。このため、ウラン・プルトニウム・ネプツニウムの一括回収フローシートを最適化するとともに大処理能力を有する遠心抽出器を開発するものである。

○抽出クロマト法によるマイナーアクチニド回収技術の開発（図1-2-17参照）

抽出工程からの廃液よりマイナーアクチニドを回収することにより環境負荷低減等を図ることとする。このため、小型の装置で効率的に回収できる抽出クロマト法について最適な吸着剤を選定するとともにプロセス機器の遠隔運転技術等を開発するものである。

図1-2-17 燃料サイクルシステムにおける技術開発課題の詳細(3/6) (先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造)

⑤ 抽出クロマト法によるマイナーアクチノイド回収技術の開発

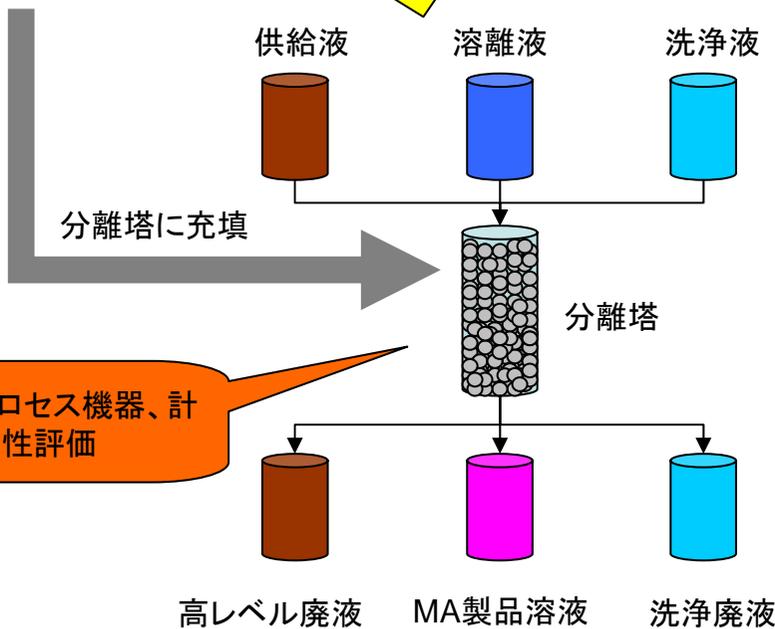
- 多孔質SiO₂ 粒子の表面にポリマー(スチレンジベニルベンゼン)を被覆(SiO₂-P)
- SiO₂-Pの表面に抽出剤(CMPO, TODGA, BTP等)を固定化



CMPO/SiO₂-P吸着材外観

抽出剤の比較・評価・選定

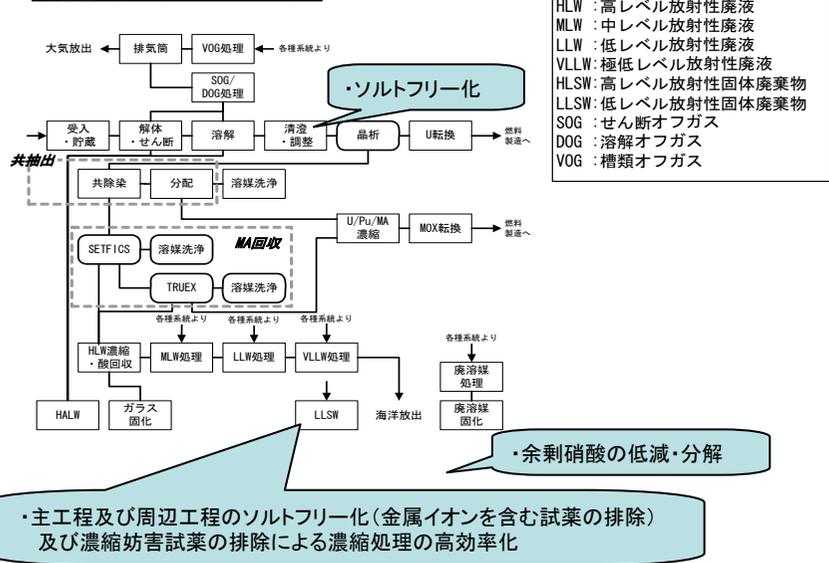
・フローシートの作成
・MA及びFP元素の挙動確認



・工学規模のプロセス機器、計装機器の成立性評価

⑥ 廃棄物低減化(廃液2極化)技術の開発

先進湿式リファレンスシステム



・主工程及び周辺工程のソルトフリー化(金属イオンを含む試薬の排除)及び濃縮妨害試薬の排除による濃縮処理の効率化

・余剰硝酸の低減・分解

ソルトフリー機器の開発

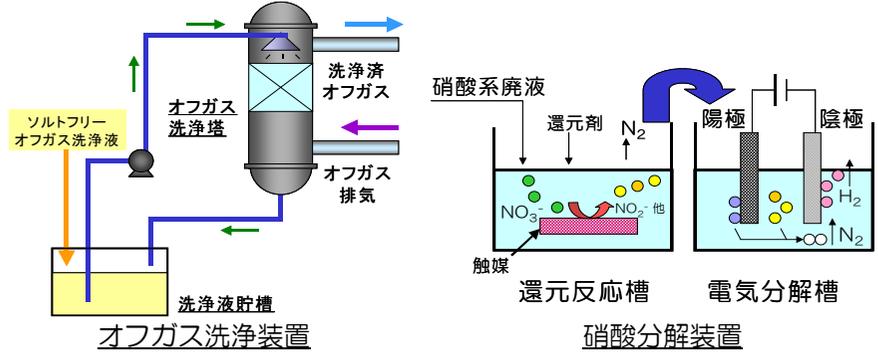
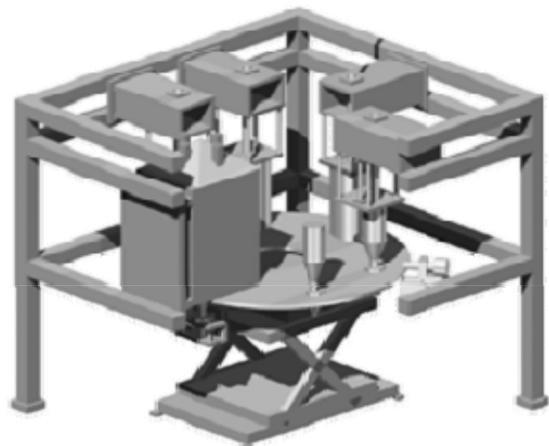
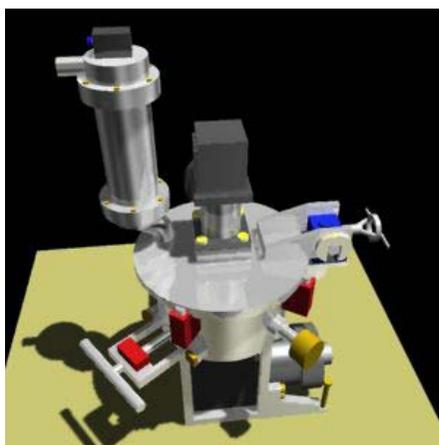


図1-2-18 燃料サイクルシステムにおける技術開発課題の詳細(4/6)
 (先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造)

⑦ 脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発

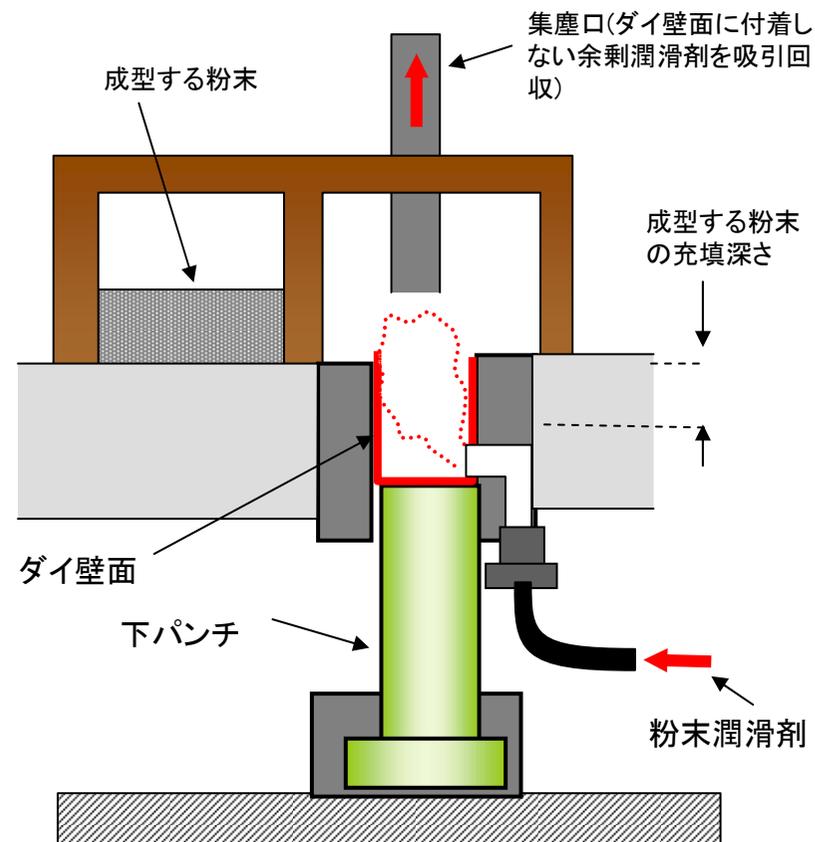


円筒型脱硝容器採用脱硝転換焙焼還元装置



転動造粒一体型脱硝転換装置(小規模試験機)

⑧ ダイ潤滑成型技術の開発



粉末潤滑剤(エアゾル状)をダイ下方から噴霧してダイ壁面に塗布する

ダイ潤滑機構の概念

○廃棄物低減化（廃液 2 極化）技術の開発（図 1 - 2 - 1 7 参照）

再処理工程全体から発生する廃棄物の分類を簡素化し、その処理工程を効率的に行うこととする。このため、発生廃液を高レベルと極低レベルの 2 極化する技術を開発するものである。

（燃料製造）

○脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発（図 1 - 2 - 1 8 参照）

転換工程で得られる原料粉末の流動性を向上することによりペレット成型用金型への粉末の充填性を改善することを図ることとする。このため、脱硝加熱器などの転換装置に造粒機能を組み込み、流動性の良い粉末を直接得られる技術を開発するとともに、遠隔保守対応型脱硝転換造粒装置を開発するものである。

○ダイ潤滑成型技術の開発（図 1 - 2 - 1 8 参照）

従来の原料粉末に潤滑剤を混合する工程を削除することを図ることとする。このため、ペレット成型用金型へ潤滑剤を塗布する機構の成型機（ダイ潤滑成型機）を開発するとともに、遠隔保守対応型ダイ潤滑成型装置を開発するものである。

○焼結・O/M 比調整技術の開発（図 1 - 2 - 1 9 参照）

燃料仕様を満足するペレットを製造するための熱処理条件を検討するとともに、遠隔保守対応型焼結・O/M 比調整炉を開発するものである。

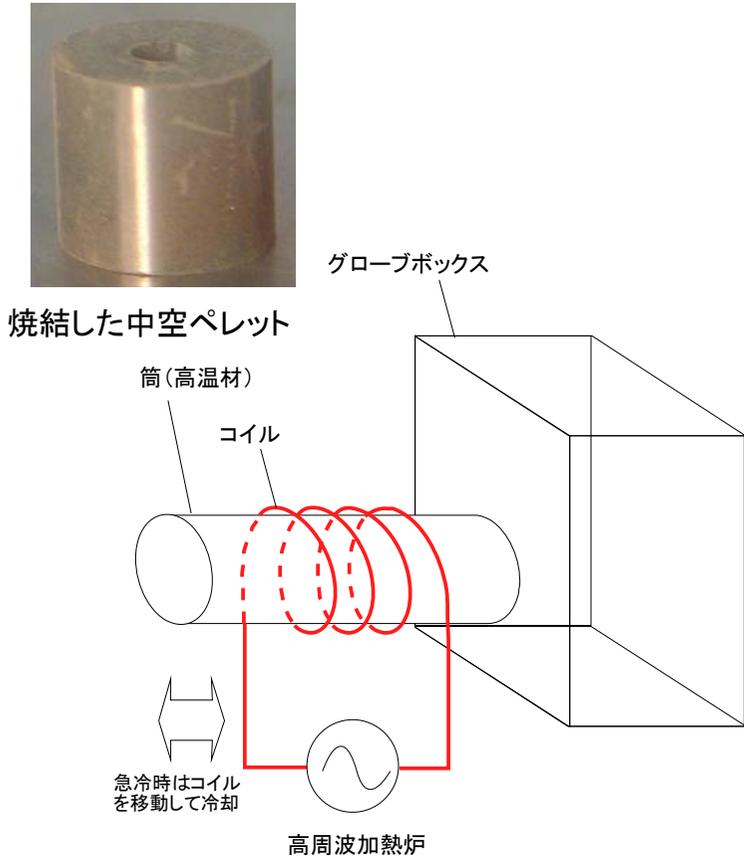
○燃料基礎物性研究（図 1 - 2 - 1 9 参照）

燃料設計や燃料製造に必要となる基礎物性データについて、実験及び理論的に整備し、モデル化するとともに、得られた物性モデルを用いて挙動解析コードを開発するものである。

図1-2-19 燃料サイクルシステムにおける技術開発課題の詳細(5/6) (先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造)

⑨ 焼結・O/M比調整技術の開発

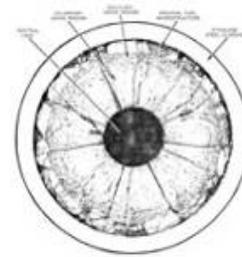
⑩ 燃料基礎物性研究



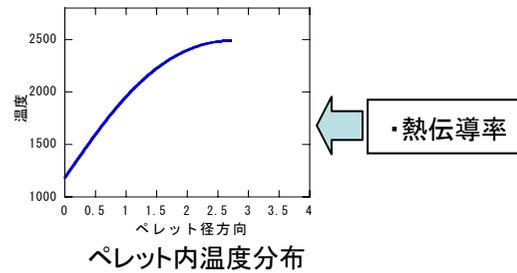
焼結した中空ペレット

急冷時はコイルを移動して冷却

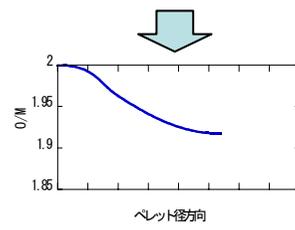
O/M 調整・焼結炉の概念



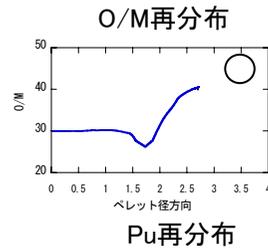
照射済燃料の断面



・熱伝導率



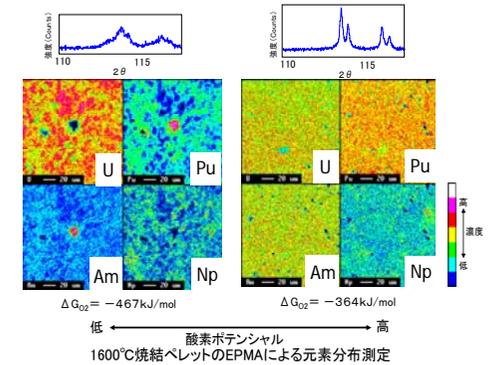
・酸素ポテンシャル
・熱拡散



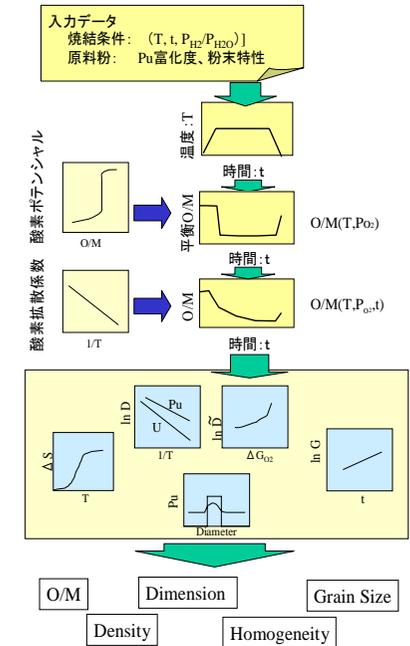
中心部の組成の融点

許容線出力の決定

照射挙動解析手法の概念図



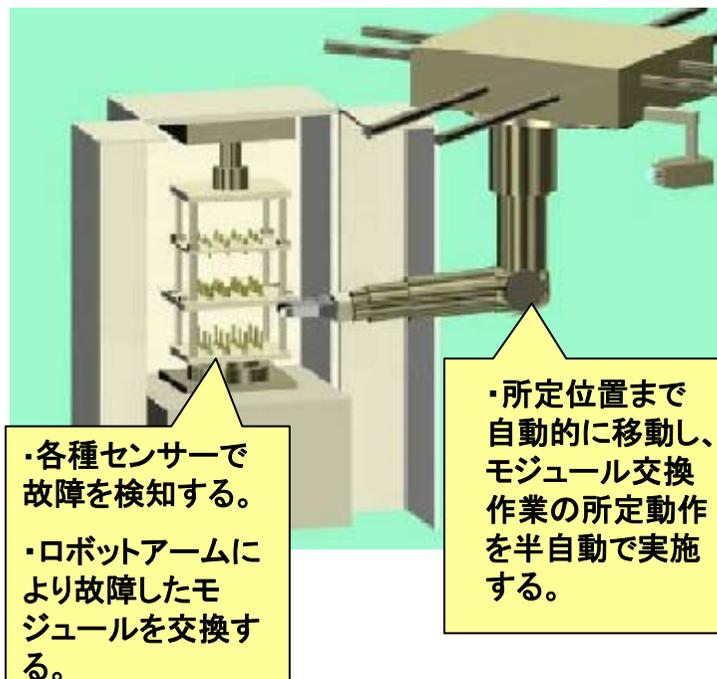
熱処理条件によって均質性が大きく異なる



焼結挙動解析手法の概念図

図1-2-20 燃料サイクルシステムにおける技術開発課題の詳細(6/6) (先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造)

⑪ セル内遠隔設備開発

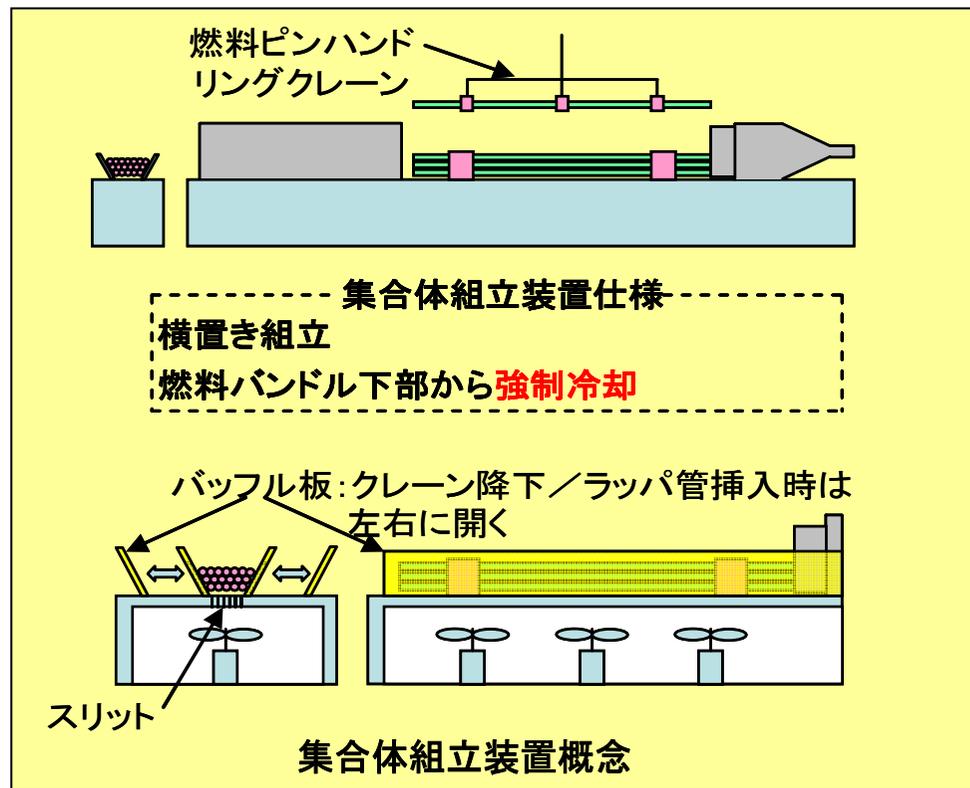


・各種センサーで故障を検知する。
・ロボットアームにより故障したモジュールを交換する。

・所定位置まで自動的に移動し、モジュール交換作業の所定動作を半自動で実施する。

遠隔保守概念(ペレット成型装置の例)

⑫ TRU燃料取扱い技術



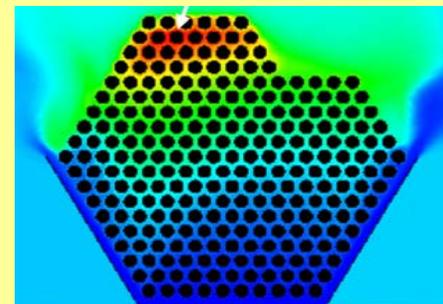
集合体組立時温度解析例

強制冷却、セル内気温:25°C

集合体設計:フェーズ2最終設計

HM重量:127.9kgHM(軸ブラ除く)

三次元熱流動解析コード
AQUA および Fluent 使用



○セル内遠隔設備開発（図1-2-20参照）

燃料製造設備のモジュール構造化により、セル内での遠隔保守を可能とし放射線量の高い低除染 TRU 燃料の量産を実現することを図ることとする。このため、モックアップ試験を中心に、製造設備のモジュール開発、モジュール開発に連動した遠隔ハンドリング機器を開発するとともに、インライン粉末分析、ペレット検査迅速化技術について開発するものである。

○ TRU 燃料取扱い技術（図1-2-20参照）

原料の発熱影響を緩和する適切な除熱対策を組み込んだ集合体組立装置の設計へ資することを図ることとする。このため、集合体組立装置および燃料バンドルを模したモックアップ試験を中心に、燃料集合体組立て時の除熱効果を詳細に解析評価できるコードを開発するものである。

② 代替技術

主概念に導入するとした革新的な技術は、今後の研究開発により技術的実現性が高いと判断したものである。しかし、研究開発の結果、技術的実現性が見通せないと結論される可能性がないとは言えない。このような開発リスクを考慮し、今後集中的な研究開発を行うことなく革新的な技術を代替することが可能と見込まれる既存技術を、革新的な技術に対する代替技術として選定しておくことは、リスクマネジメントの観点から必要であると考ええる。（後述の図2-1-4、図2-1-8、図2-1-9の代替技術の欄を参照）

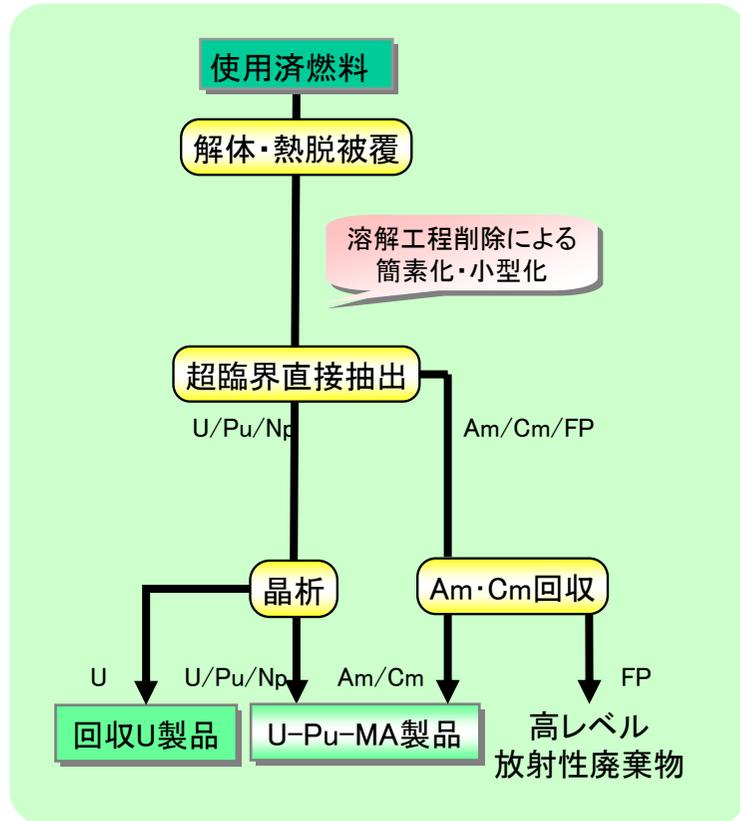
万一、ある革新的な技術について、その技術的実現性が見通せないとの結論になった場合には、当該高速増殖炉システム概念を全体として放棄するのではなく、その革新的な技術だけを代替技術に置き換え、開発目標に対する適合性の低下の程度など、その影響度合いを評価すべきである（表1-2-4参照）。

表1-2-4 代替技術と設計への影響の例

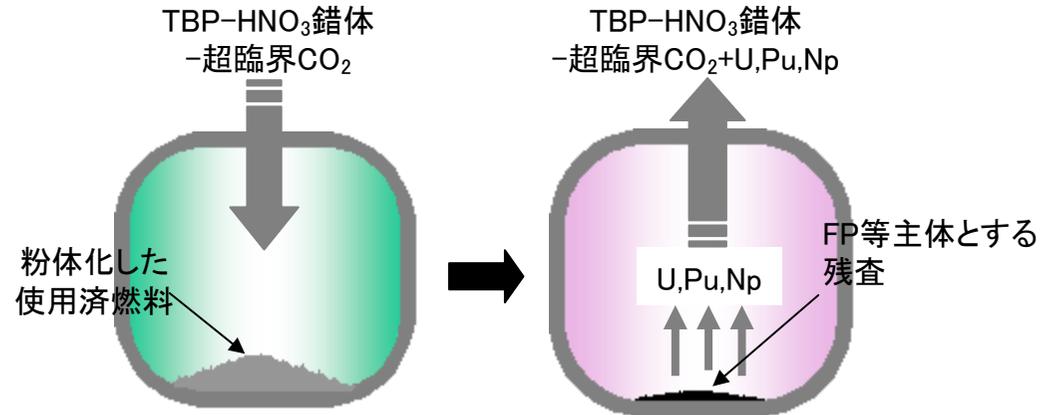
	革新技術	内 容	代替技術案	代替技術採用の影響
①	ODSフェライト鋼被覆管	ODS鋼を用いることにより高燃焼度化と冷却材出口温度の高温化の両立を図る。	PNC/FMS鋼を用いた炉心設計	原子炉出口温度が550→520℃と低下、燃焼度維持のため燃料ピン長増加(原子炉容器大型化による物量増13%)、原子炉電気出力確保のための熱交換器大型化(原子炉建屋体積8%増)、建設コストが増加する。
②	高クロム鋼採用による配管短縮	熱膨張が少なく高温強度に優れる高クロム鋼材料の採用により配管短縮と機器物量削減を図る。	9クロム鋼を用いた冷却系設計	強度確保のための伝熱管肉厚増加と、熱伝導度低下を補うための伝熱面積増加により、IHX及びSG(物量13%増)が大型化し、建設コストが増加する。
③	ポンプ組込型中間熱交換器	1次循環ポンプを熱交換器内に組込むことにより1次冷却系配管の簡素化を図る。	ポンプ、中間熱交換器の分離配置	1次冷却系機器数が3→5と増加することにより、容器、ガードベッセルの物量増加(原子炉、1次冷却系物量7%増)、建屋の配置スペースが増加する。
④	2ループシステム	熱交換器の大型化と配管の大口径化によるシステムの簡素化を図る。	4ループ化	原子炉容器の大型化、冷却系機器及び配管物量が増加し(原子炉と冷却系の物量10%増)、建設コストが増加する。
⑤	高信頼性蒸気発生器	2重伝熱管蒸気発生器の採用により伝熱管破損時の影響を局限化し、信頼性向上を図る。	単管ヘリカルコイル型蒸気発生器	単管ヘリカルSGではプラント寿命期間中に伝熱管破損が発生する可能性が無視できない。このため、伝熱管補修のための炉停止、及びSGの交換経費を含めると2重管SGの場合よりも、経済性は低下する可能性がある。

図1-2-21 新たな革新的な技術の芽の例

超臨界直接抽出法を用いた先進湿式法



超臨界直接抽出法の原理



- 粉体化した使用済燃料から、
- 溶解工程を経ずに、
- TBP-硝酸を含む超臨界炭酸ガスに
- 直接、U・Pu・Npを抽出

⇒工程の簡素化による経済性向上の可能性

技術開発の現状

- 使用済燃料を用いたビーカースケールの試験によってU、Puを直接抽出できることを確認。
- コーヒー豆からのカフェインの抽出など、一般産業界では実用化されている。

③ 新たな革新的な技術の芽

今後の研究開発の進展を考慮すると、将来、現時点で導入することとした革新的な技術よりも優れた新たな革新的な技術が出現する可能性を研究開発計画に織り込んでおくことが必要であると考え。この際、国内外における研究開発の進展に留意し、常に革新的な技術の芽を発見し、育てようとする態度が重要であると考え。

「FS フェーズⅡ報告書」では、先進湿式法に対応するものとして超臨界直接抽出法の適用可能性が検討されている(図1-2-21参照)。現時点の知見に基づき技術的実現性の観点から先進湿式法を選択しているが、超臨界抽出法には、工程がより簡略化され、経済性が向上する可能性があると考えられている。この他、新たな革新的な技術の芽として、発熱性 FP 等の分離技術、造粒が不要あるいは焼結温度が低い焼結技術なども考えられる。