

(2) 技術開発課題

「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告書」では、これまでの概念検討や技術開発成果に基づき、主概念となる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する今後の技術開発課題が抽出されている。その内容は概ね適切であると考えられるが、今後の研究開発にあたり、以下の事項を考慮すべきである。

① 革新技术

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。導入すべき新たな技術は、これまでの研究開発の結果を踏まえ、今後の研究開発による技術的実現性が見通される可能性が高いものが数多く含まれている。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、技術的難易度が高い技術については、革新技术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。

高速増殖炉の実用化戦略調査研究は、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2015年頃に提示することを目的に行われてきている。これを踏まえ、革新技术については、2010年に予定される評価において、2015年頃には研究開発が終了し、実証段階へ移行が可能との見通しが得られることを目標として、今後5年間、研究開発を行うこととする。

ア. ナトリウム冷却高速増殖炉

主概念として選定したナトリウム冷却高速増殖炉（MOX燃料）に関する革新技术は、以下の13課題である。

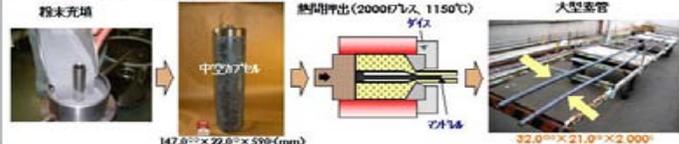
○配管短縮のための高クロム鋼の開発

冷却系構造材料に従来の材料に比較して高強度・低熱膨張が特徴の高クロム鋼を適用し、熱膨張を低くすることにより熱応力緩和を

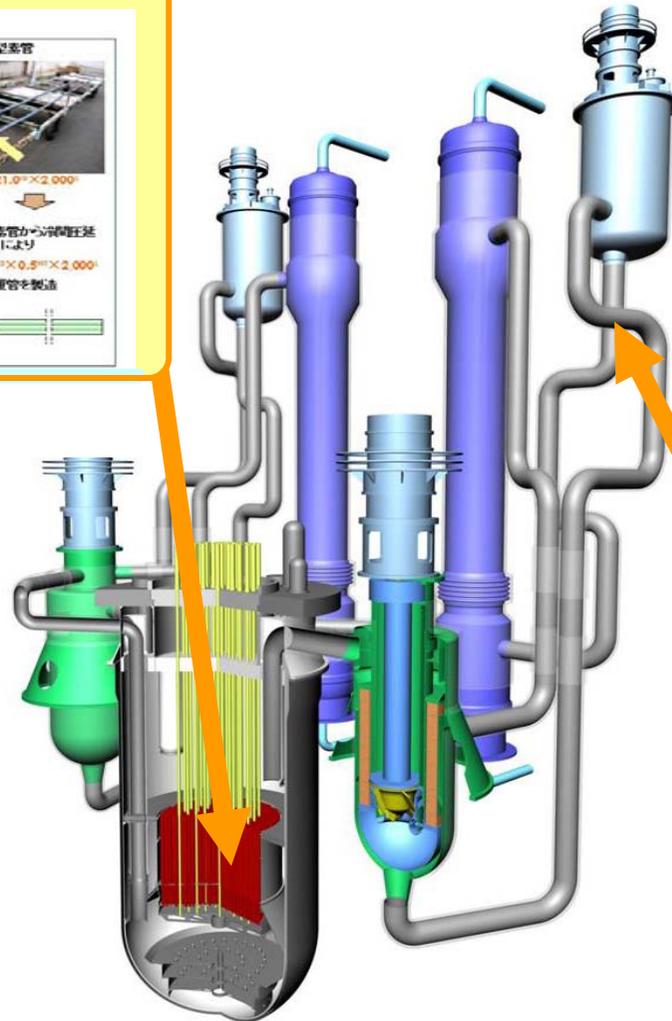
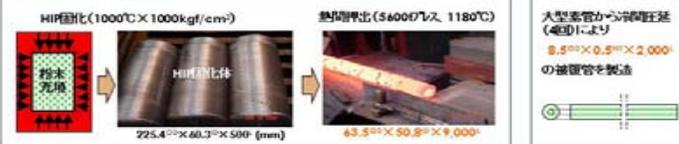
ナトリウム冷却炉における技術開発課題の詳細(2/5)

⑦ 高燃焼度化と長サイクル運転 → ODS鋼被覆管

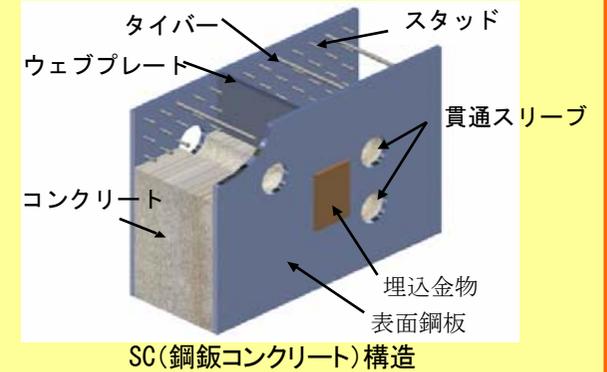
(1) 大型中空カプセル・押出素管 ⇒ 長尺被覆管



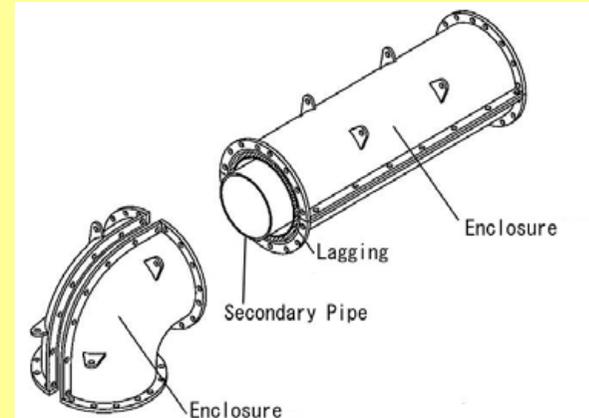
(2) 大型HIP - 押出素管



⑥ 物量削減と工期短縮のための格納容器のSC造化



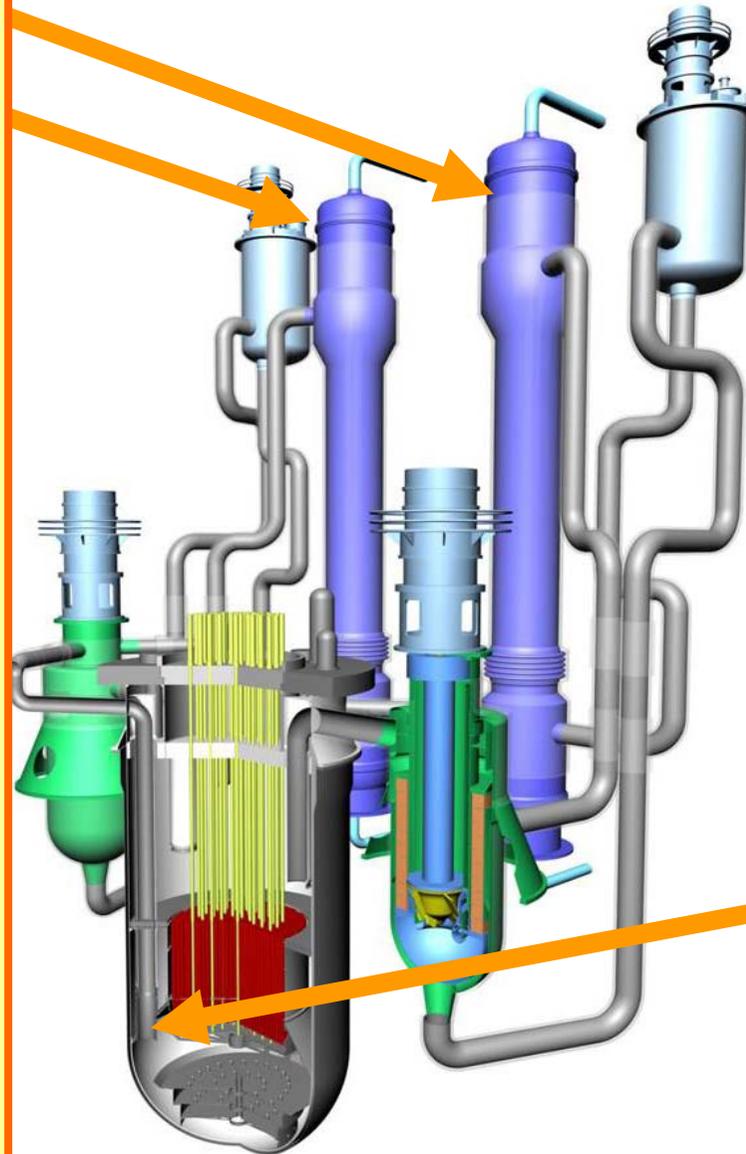
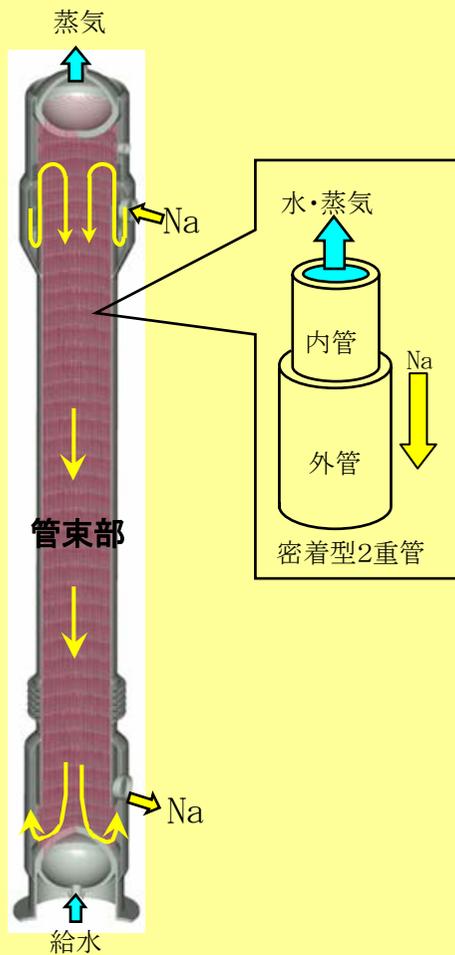
⑧ ナトリウム漏えい対策 → バウンダリの二重化



ナトリウム冷却炉における技術開発課題の詳細(3/5)

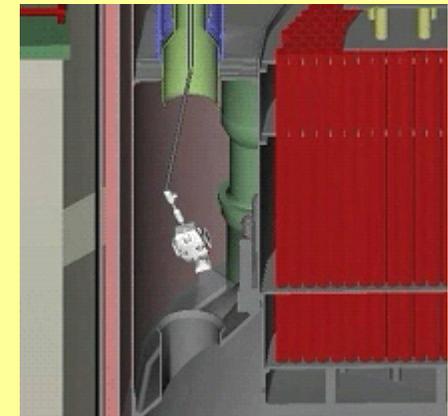
⑨ ナトリウム-水反応対策

→ 高信頼性2重管蒸気発生器



⑩ 保守・補修性の向上

→ 遠隔操作とナトリウム中目視装置等の開発



狙い、機器のコンパクト化、配管短縮を行い、建設コストの低減を図ることとしている。このため、高速炉の冷却系構造物のための高クロム鋼の開発が重要である。

○システム簡素化のための冷却系２ループ化

150 万 kWe の炉でも冷却系を２ループとする概念を成立させるために、大口徑・高流速配管の流動安定性を確認することが必要である。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することにより、建設コスト低減を図ることとしている。

○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

１次系主循環ポンプを中間熱交換器中心部のスペースに組込み、機器数削減、ミドルレグ配管削除、及び配置スペース縮小により建設コスト低減を狙った概念を成立させるために、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が必要である。

○原子炉容器のコンパクト化

スリット付き炉上部構造、サーマルライナ削除、炉心コンパクト化、等により原子炉容器を小径化する概念を成立させるために、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が必要である。

○システム簡素化のための燃料取扱系の開発

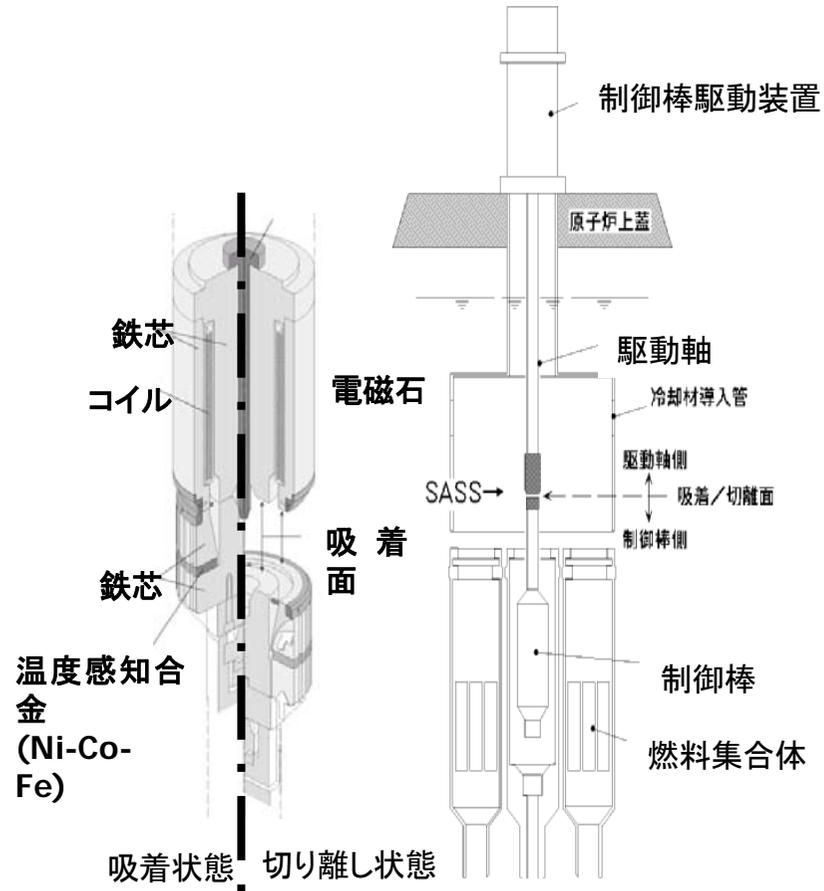
物量削減、廃棄物低減、稼働率向上のための高効率の燃料交換を実現する燃料取り扱いシステムの開発が重要である。

○物量削減と工期短縮のための格納容器のＳＣ造化

建設コスト低減と建設工期短縮を実現する鋼板・コンクリート造

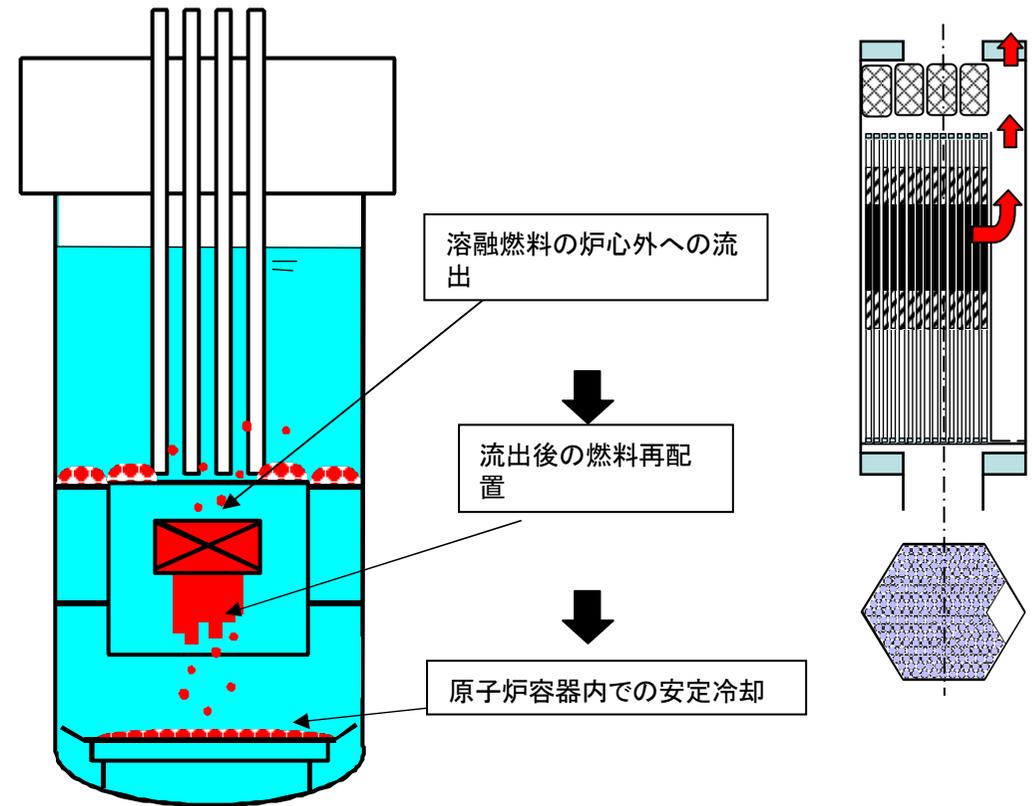
ナトリウム冷却炉における技術開発課題の詳細(4/5)

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

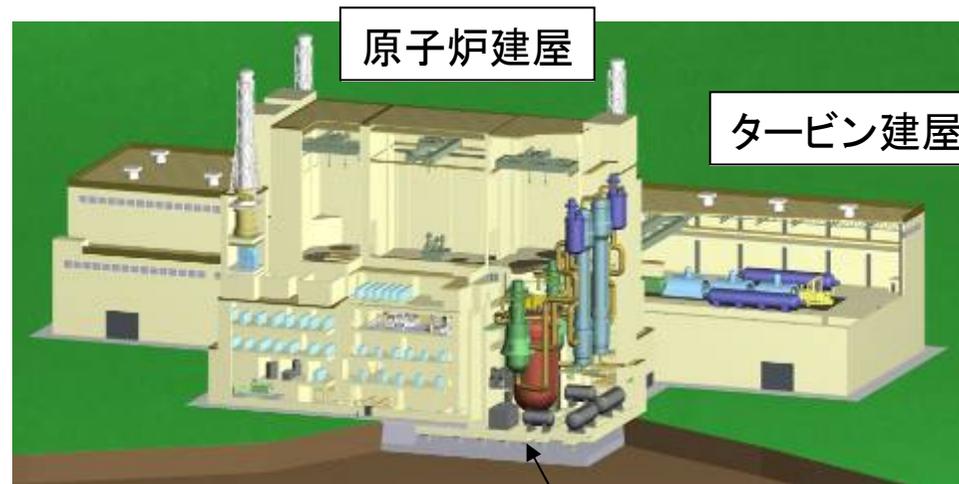


改良内部ダクト型燃料集合体 (S-FAIDUS型)

ナトリウム冷却炉における技術開発課題の詳細(5/5)

⑬耐震性向上技術の開発

実用炉プラント鳥瞰図



建屋免震技術を採用

の格納容器の開発が重要である。

○高燃焼度化に対応した炉心燃料の開発

高燃焼度・高炉心出口温度を達成可能な被覆管材料である ODS 鋼の照射試験を、露国 BOR-60 炉、「常陽」、「もんじゅ」を用いて実施する必要がある。また、TRU 燃料ピン及び簡素化ペレット法で製造した中空燃料ピンや再臨界回避集合体の照射試験を行う必要がある。

○配管 2 重化によるナトリウム漏洩対策強化

ナトリウム漏洩対策強化のため、主配管からのウェル・枝管削除、配管 2 重化・区画化、漏洩検出の高感度化を図った概念を成立させるために、レーザ式漏洩検出器を開発するとともに、破断前漏洩（LBB）評価手法を確立し LBB 概念の成立性見通しを得る必要がある。

○直管 2 重伝熱管蒸気発生器の開発

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が期待できる直管 2 重伝熱管蒸気発生器を開発することとしている。直管 2 重伝熱管蒸気発生器の製作性、構造健全性、ナトリウム-水反応特性を確認することが必要である。

○保守、補修性を考慮したプラント設計

不透明、活性なナトリウム冷却材中での供用中検査（ISI）技術、2 重伝熱管蒸気発生器の伝熱管検査技術、ナトリウム中補修技術の確立が必要である。

○受動的炉停止と自然循環による炉心冷却

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する受動的炉停止機構（SASS）の技術実証、及び自然循環に

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)

先進湿式法再処理

簡素化ペレット法燃料製造

①機械式解体・短尺せん断技術の開発

②高効率溶解技術の開発

③晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発

④U,Pu,Npを一括回収する高効率抽出システムの開発

⑤抽出クロマト法によるMA回収技術の開発

⑥廃棄物低減化(廃液2極化)技術の開発

⑦脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発

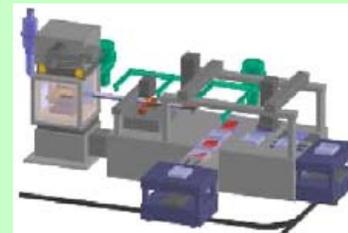
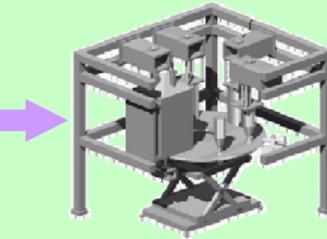
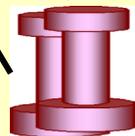
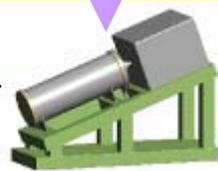
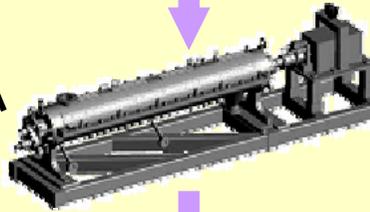
⑧ダイ潤滑成型技術の開発

⑨焼結・O/M調整技術の開発

⑩燃料基礎物性研究

⑪システム開発:セル内遠隔設備開発

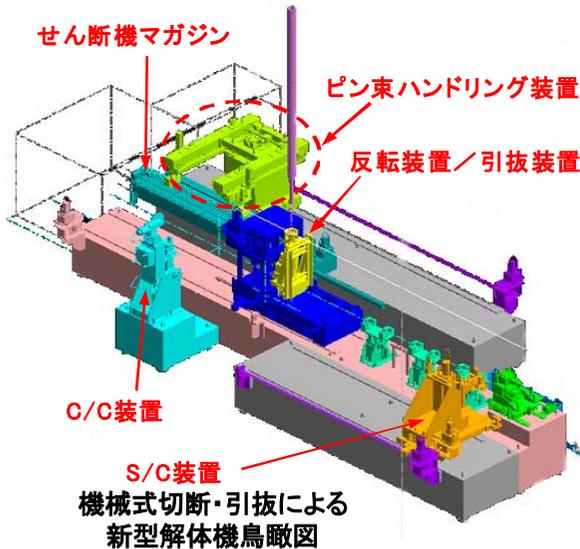
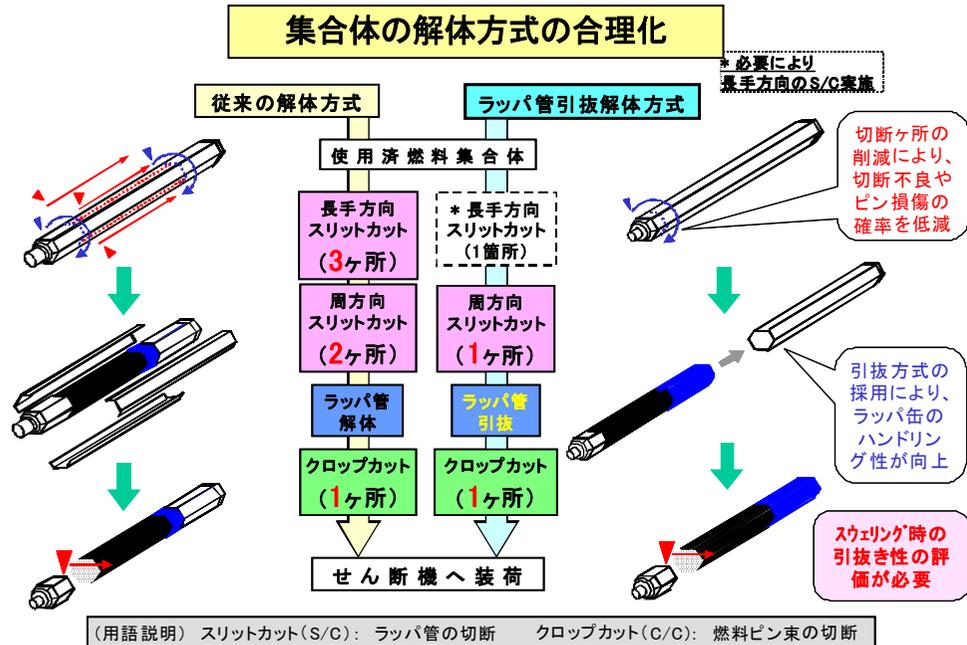
⑫TRU燃料取扱い技術



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)

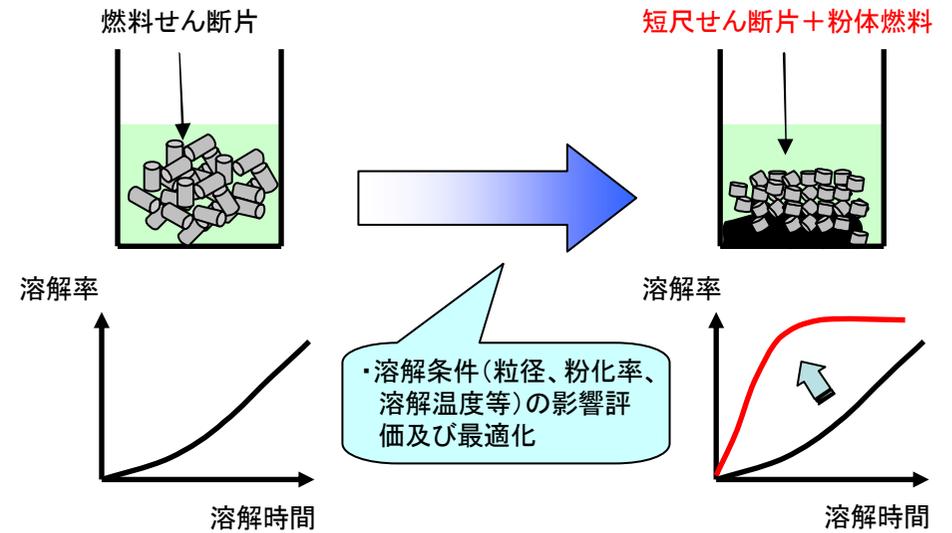
(先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造)

① 機械式解体・短尺せん断技術の開発

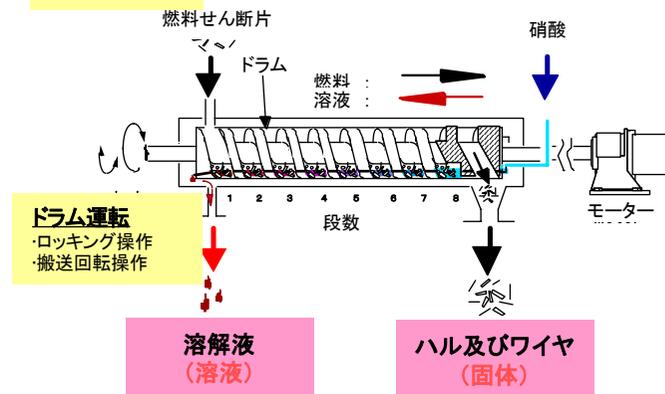


機械式切断治具による切断状況 (キュービトロン砥石)

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



連続溶解槽の改良点

- ・粉体化燃料対応: ドラム内における溶液攪拌性の向上
- ・処理能力の向上: ドラム径, ドラム長さの拡大

よる崩壊熱除去性能の確認及び評価手法の確立が必要である。

○炉心損傷時の再臨界回避技術

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により、溶融燃料の再臨界を回避しつつ、冷却するシステムを確立することが重要である。

○建屋の3次元免震技術

サイト毎の地震条件を均一化し、標準化による建設コスト低減効果が期待できる3次元免震技術を開発することとしている。3次元免震技術を確立するため、免震要素の開発と設計基準整備が必要である。

イ．先進湿式法再処理＋簡素化ペレット法燃料製造

主概念として選定した、先進湿式法再処理及び簡素化ペレット法燃料製造に関する革新技術は、以下の12課題（再処理：6課題、燃料製造：6課題）である。

(再処理)

○解体・短尺せん断技術の開発

解体システムについて、要素試験機及びシステム試験機により実証する必要があり、同様に所定の高粉化率のせん断片が得られるせん断システムを実証する必要がある。実使用済燃料のピン束形状やせん断時のピン性状の把握が重要である。

○高効率溶解技術の開発

高粉化燃料の装荷に対応し、高金属濃度溶解液が得られる溶解プロセスについて、燃料粉化率や粒径等をパラメータとしたプロセス試験を実施し、溶解条件を最適化する必要がある。高粉化燃料のハンドリング性に優れ、処理容量の増大が図れる連続溶解槽の基本構

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)

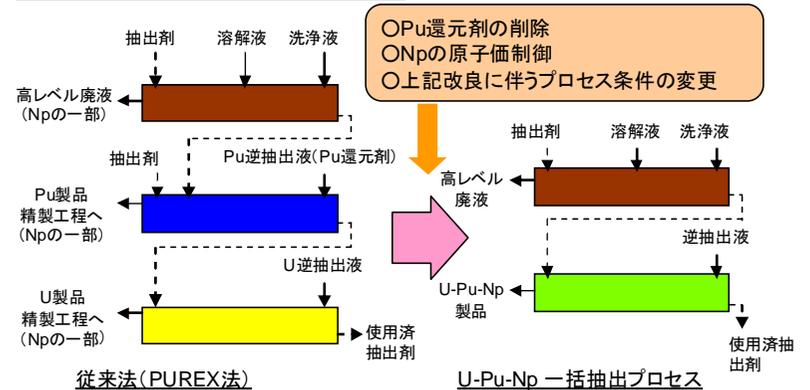
Pu(IV) のみの場合には母液に付着する
Pu(VI) の場合には結晶に取り込まれる

結晶中Uに対するPu、FPの除染係数 (DF)

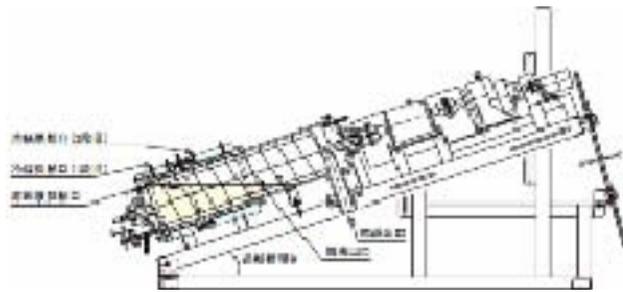
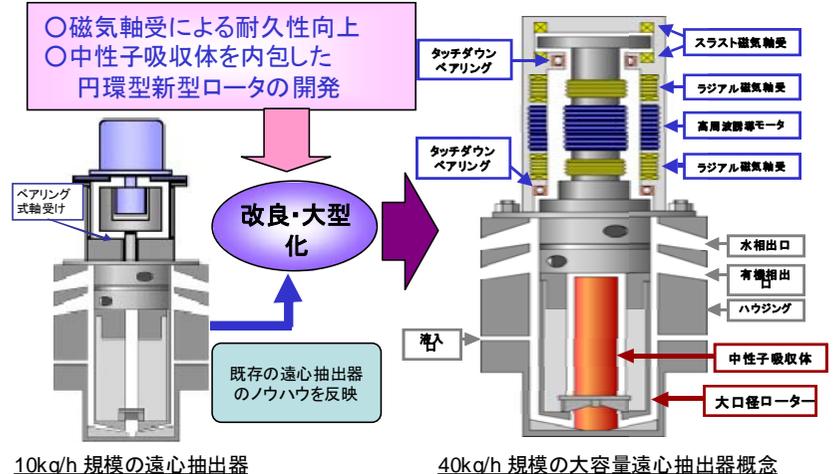
		Pu	¹³⁷ Cs	¹⁵⁵ Eu
Run1 (急冷)	洗浄前	5.6	1.2	4.2
	洗浄後	25	0.8	27
Run2 (緩冷)	洗浄前	4.6	0.9	3.5
	洗浄後	19	0.9	19

④ U,Pu,Npを一括回収する高効率抽出システムの開発

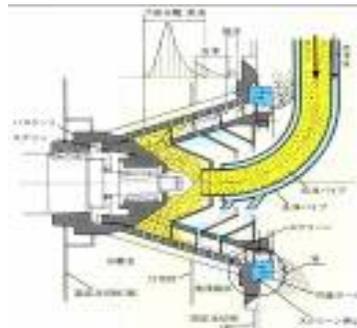
U,Pu,Npの一括回収プロセスの開発



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

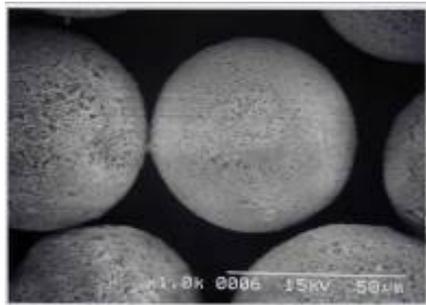
燃料サイクルシステムにおける技術開発課題の詳細(3/6)

(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MA回収技術の開発

⑥ 廃棄物低減化(廃液2極化)技術の開発

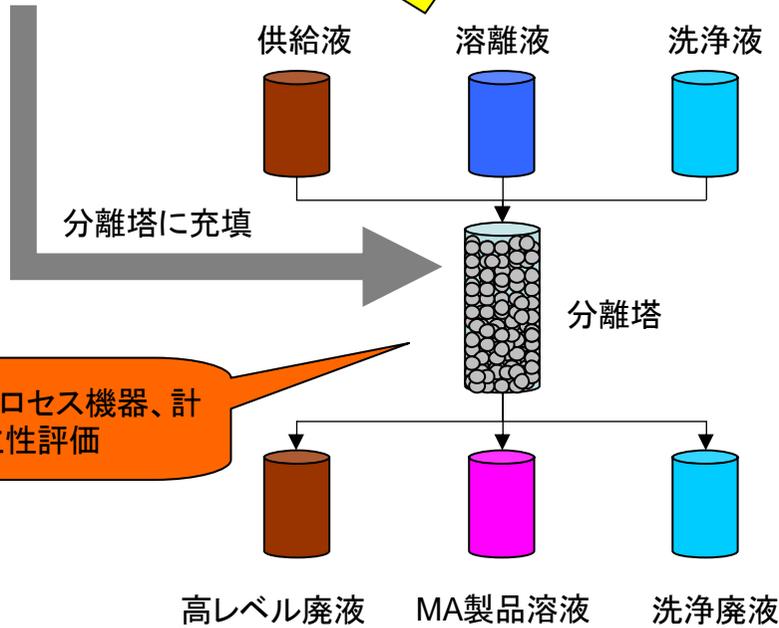
- 多孔質SiO₂ 粒子の表面にポリマー(スチレンジベニルベンゼン)を被覆(SiO₂-P)
- SiO₂-Pの表面に抽出剤(CMPO、TODGA、BTP等)を固定化



CMPO/SiO₂-P吸着材外観

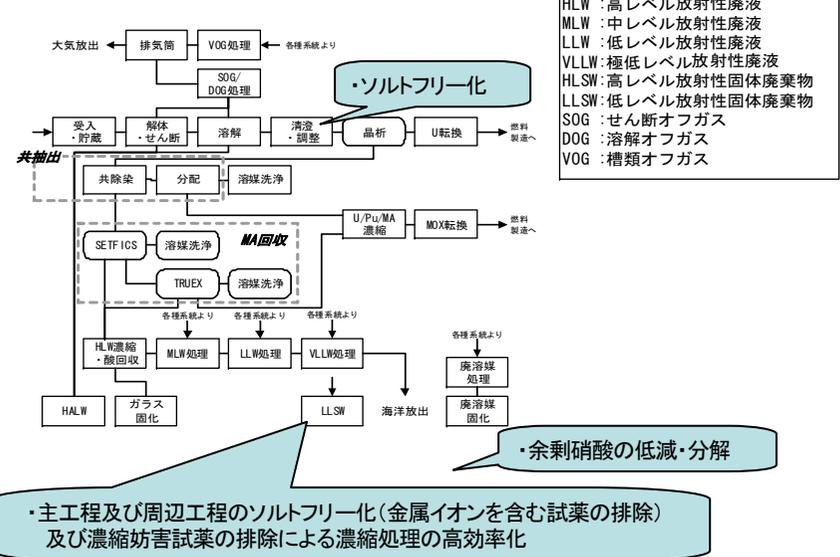
抽出剤の比較・評価・選定

・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

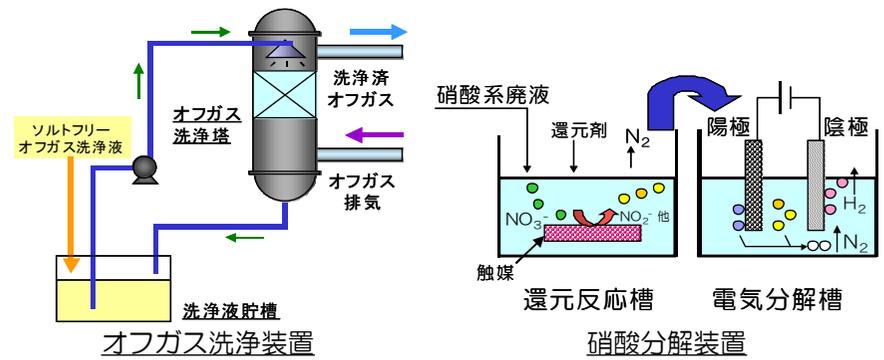
先進湿式リファレンスシステム



- HLW : 高レベル放射性廃液
- MLW : 中レベル放射性廃液
- LLW : 低レベル放射性廃液
- VLLW : 極低レベル放射性廃液
- HLSW : 高レベル放射性固体廃棄物
- LLSW : 低レベル放射性固体廃棄物
- SGG : せん断オフガス
- DOG : 溶解オフガス
- VOG : 槽類オフガス

・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高効率化

ソルトフリー機器の開発



造を構築し、部分モックアップ機にて性能を実証する必要がある。
また、ホット試験による溶解プロセスデータの拡充、解析コードの改良、機器の大型化と運転安定性の確保、攪拌性が両立する溶解槽内部構造の確立が重要である。

○晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発

FP 等のウラン結晶への同伴核種の挙動を明らかにし、これを踏まえて晶析及び結晶洗浄精製手法やそれらの操作条件を最適化する必要がある、工学規模試験機を用いて処理能力、安定性、操作性について連続晶析装置を実証する必要がある、併せて、高濃度溶液・ウラン結晶の取り扱い技術等を実証する必要がある。また、セシウム等の除染係数の向上、晶析装置の運転制御（計装制御技術等）、溶液及び結晶の安定的移送に関する方策等の確立が重要である。大型化を想定した内部構造や安全性の検討（臨界安全等）が重要である。

○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

プロセス試験によりウラン、プルトニウム、ネプツニウム一括回収フローシートを最適化する必要がある。（ネプツニウム抽出挙動への亜硝酸濃度等の影響評価、各元素の低濃度領域におけるプロファイルデータ取得等が重要である）また、大処理量遠心抽出器（40kg/h）の基本性能、新型駆動機構の高耐久性の実証、工学規模ウラン試験によりシステムの成立性を確認する必要がある（遠隔保守性、インライン計装技術等が重要である）。

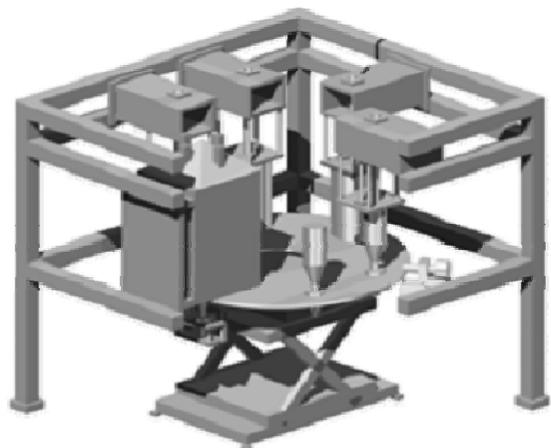
○抽出クロマト法による MA 回収技術の開発

プロセス試験により、各種吸着材（抽出剤）を比較・評価（分離性能及び安全性）し最適なものを選定、フローシートを確立、MA 及び FP 元素の挙動を確認する必要がある。また、工学規模（10kg/h）試験により、プロセス機器（分離塔、回収塔等）の遠隔運転性・計装機器等の成立性を確認する必要がある。

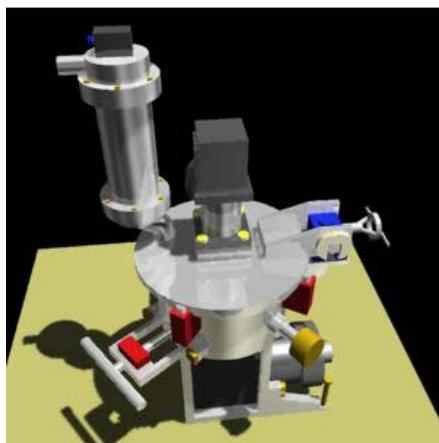
燃料サイクルシステムにおける技術開発課題の詳細(4/6)

(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

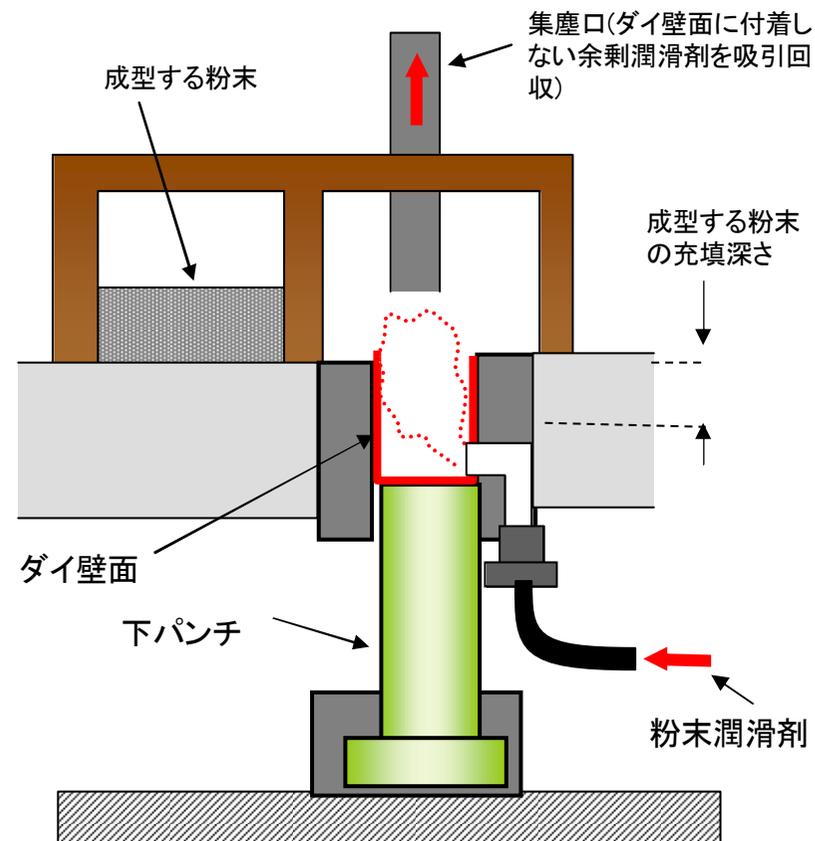


円筒型脱硝容器採用脱硝転換焙焼還元装置



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

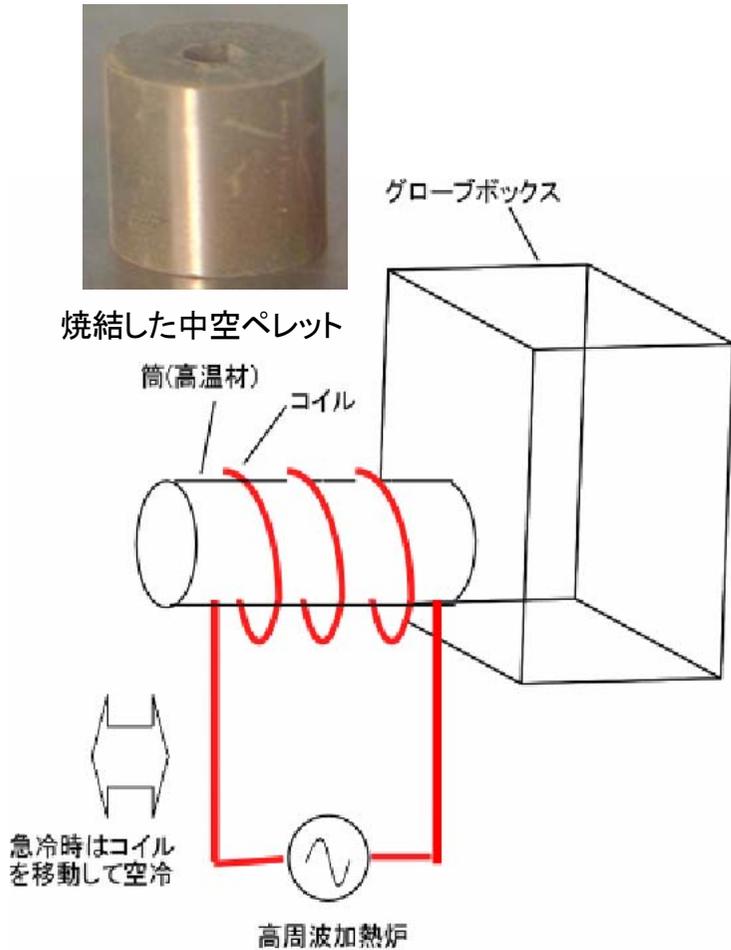
ダイ潤滑機構の概念

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)

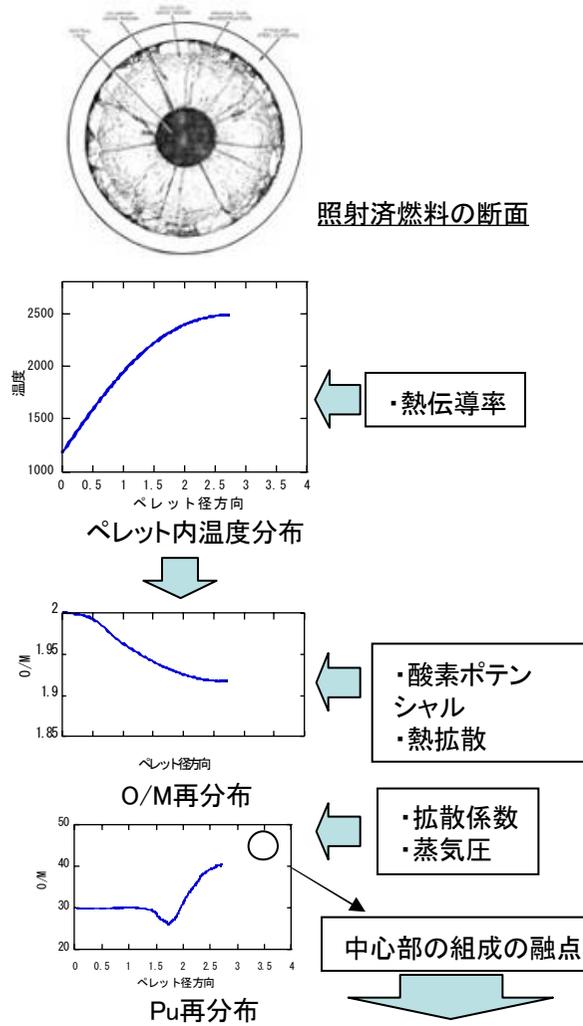
(先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造)

⑨ 焼結・O/M調整技術の開発

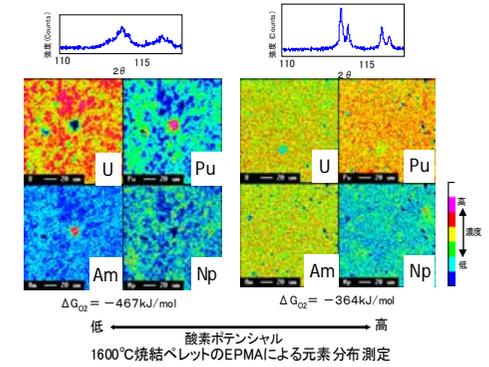
⑩ 燃料基礎物性研究(基礎物性と燃料設計コードの開発、基礎物性と燃料製造)



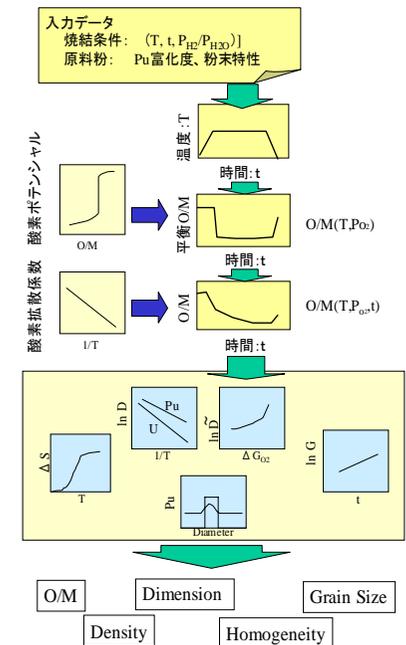
O/M 調整・焼結炉の概念



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

○廃棄物低減化（廃液 2 極化）技術の開発

オフガス処理工程等におけるソルトフリー化（濃縮妨害試薬の排除を含む）を、種々の試薬を対象にプロセス試験にて実証する必要がある。また、触媒等を利用した硝酸の分解技術について、その適用性を確認するとともに、ソルトフリープロセス条件に対応した工学規模装置を実証する必要がある。

(燃料製造)

○脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発

脱硝加熱器などの転換装置に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必要がある。また、プロセスの工学規模成立性の評価、遠隔保守型脱硝転換造粒装置（量産型）の開発が重要である。

○ダイ潤滑成型技術の開発

小規模の MOX 用ダイ潤滑成型機（レシプロプレス）を設計・製作し、MOX 粉末、MA 含有 MOX 粉末でのダイ潤滑成型の最適運転条件の把握と安定運転できることを確認する必要がある。プロセスの工学規模成立性の評価、遠隔保守対応型ダイ潤滑成型装置（量産型）の開発が重要である。

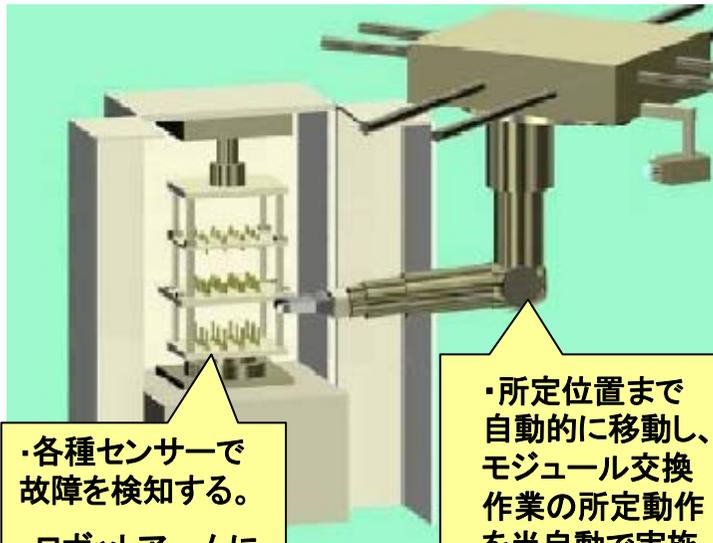
○焼結・O/M 調整技術の開発

MOX ペレット、MA 及び FP 含有 MOX ペレットの小規模焼結試験を実施し、品質を評価する必要がある。また、保守性を配慮した O/M 調整・焼結炉の熱処理方式などの調査を行い、選定した方式に基づき設計・製作し、ペレットの製造試験及び量産型の炉を開発する必要がある。熱処理条件の最適化、遠隔保守型 O/M 調整・焼結炉（量産型）の開発が重要である。

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 システム開発: セル内遠隔設備開発

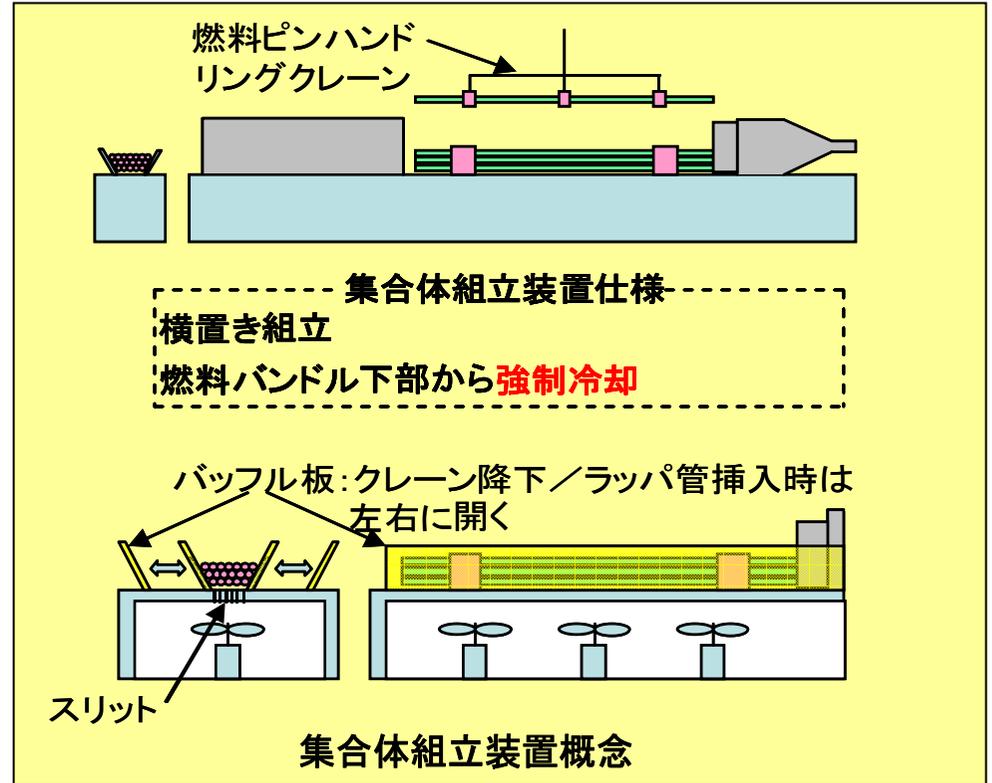


・各種センサーで故障を検知する。
・ロボットアームにより故障したモジュールを交換する。

・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:原料発熱影響評価



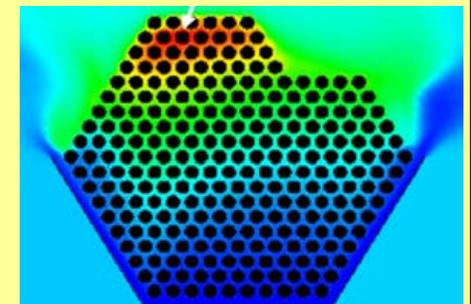
集合体組立時温度解析例

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



○燃料基礎物性研究

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必要がある。照射実績が無い広範囲の燃料組成、照射条件でも評価可能となるよう、理論的に裏づけのある挙動解析コードとすることが重要である。また、熱処理中のペレット内の様々な変化を温度、時間、雰囲気関数として速度論的評価を可能とするため、基礎物性データを幅広く取得する必要がある。グリーンペレットから焼結が進む過程と焼結が進んだ過程の挙動を分けてデータ取得及びモデル化を行い、基礎物性データと合わせて体系化することが重要である。

○セル内遠隔設備開発

コールド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必要がある。また、インライン粉末分析、ペレット検査迅速化技術を開発する必要がある。遠隔ハンドリング機器の開発、ホット試験による実証が重要である。

○ TRU 燃料取扱い技術

燃料集合体内流路の典型的な形状に対し詳細な流速分布や温度分布を計測できる試験機を製作し、試験結果から詳細なモデルを構築する必要がある。このために、集合体組立装置および燃料バンドルを模したコールドモックアップ試験装置を作成し、除熱効果を確認する必要がある。また、燃料サイクルシナリオに応じて多様な発熱の燃料に対する、改良モデルによる温度分布の評価、高発熱燃料に対応した集合体組立装置の設計への反映が重要である。

② 代替技術

主概念に設定した革新技术は、今後の研究開発により技術的実現性が高いと判断したが、技術的難易度が高く現時点では技術的実現性に

代替技術と設計への影響

	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。

課題を有していることも考慮する必要がある。今後集中的な研究開発を行うことなく革新技術の代替が可能と見込まれる既存技術に基づく技術を、革新技術に対する代替技術として選定している。革新技術は、2010年に予定される評価において一定の見通しが得られることを目標として研究開発が行われるが、万一、革新技術の技術的実現性が見通せないとの結果になった場合、選定した高速増殖炉システム概念を全体として変更するのではなく、代替技術の導入により性能や経済性の低下が予想されるが、その影響等を評価した上で、一部の革新技術を置き換えるべき代替技術として開発に値する概念かどうかを判断することになる。

③ 新たな革新技術の芽

今後の研究開発の進展により、将来、現時点で設定した革新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が考えられる。「高速増殖炉の実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告書」においても、先進湿式法に対して超臨界直接抽出法の可能性が検討され、現時点における技術的実現性の観点から先進湿式法が選択されているが、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されている。研究開発に当たっては、このように革新技術に替わりうる可能性を有する新たな革新技術の芽とも呼ぶべき技術についても留意すべきである。なお、新たな革新技術の芽として、発熱性 FP 等の分離技術、造粒が不要で焼結温度が低い焼結技術などが挙げられる。

(高速増殖炉の研究開発における留意点)

① 蒸気発生器

ア. 二重伝熱管の採用

原子炉からの熱はナトリウムに伝えられ、蒸気発生器の中の伝熱管を介して、発電機を回す蒸気に伝えられる。この伝熱管の内側に水が外側にナトリウムが流れるが、水とナトリウムが直接接触することは安全性及び信頼性の確保の観点から重要な問題となる。「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告書」においては、

2重伝熱管蒸気発生器の製作性

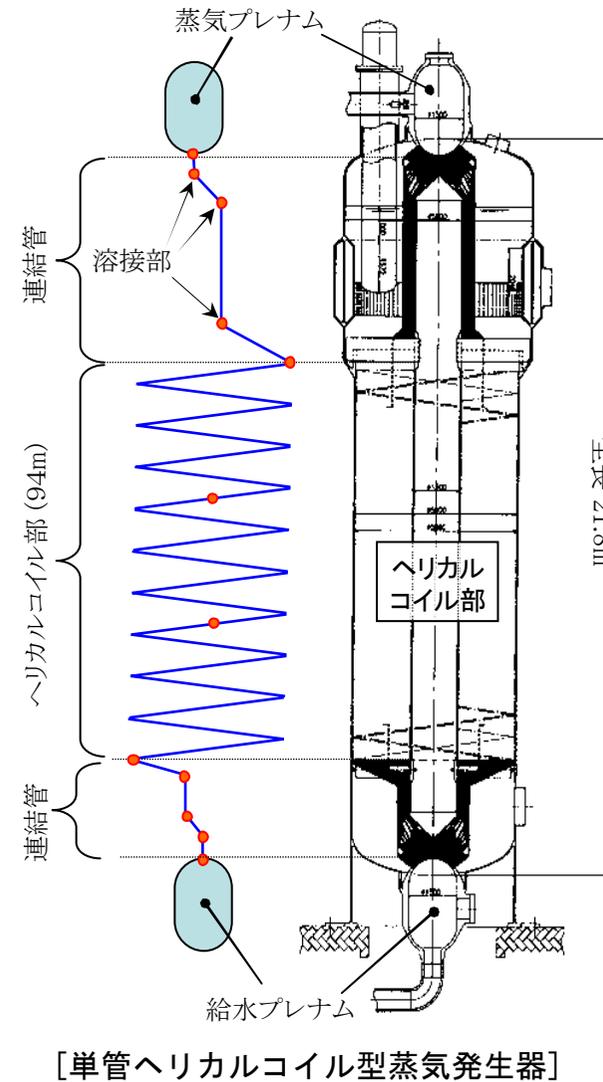
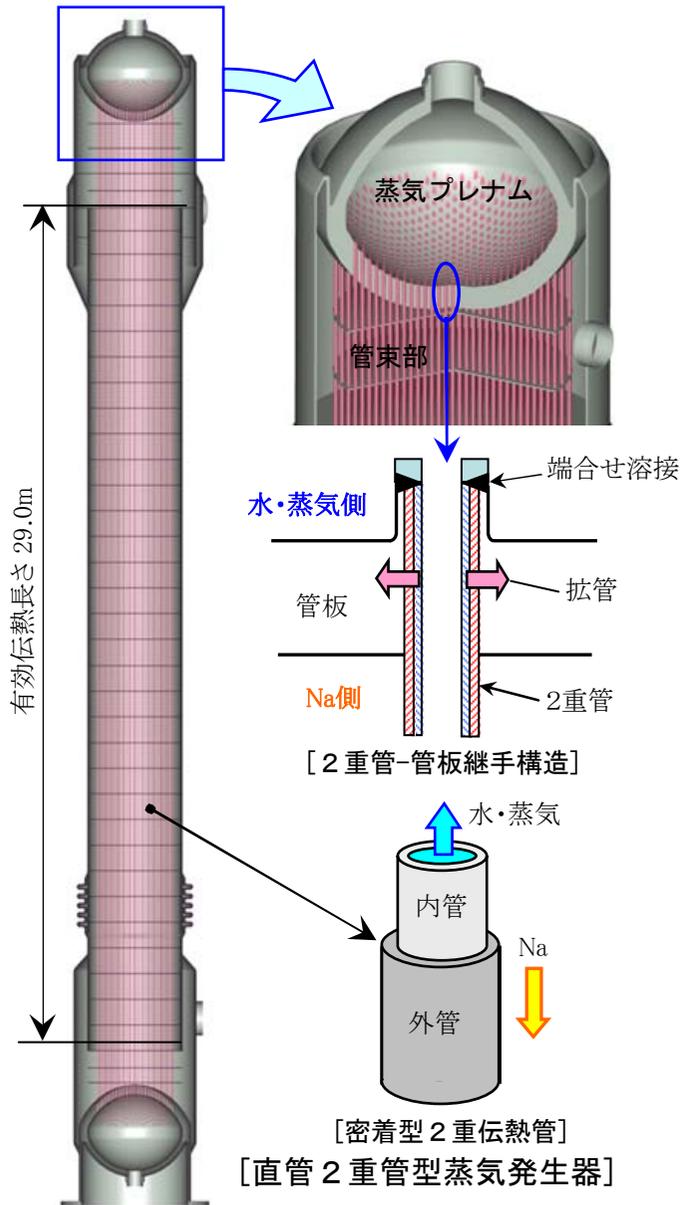
[実績]

- ・ 約2mの長さの12Cr鋼密着2重管を試作
- ・ 旧動燃における1MWt2重管SG小型試験体等の製作時に全長20m程度の9Cr鋼2重伝熱管を製作した実績がある。
- ・ 伝熱管本数7,100本/基については、APWRの5,830本/基という実績があり、AP-1000では10,000本/基としていることから実現可能と考える。

[課題]

- ・ 製作性については、以下の課題が残されており、フェーズ3において、製作手順を含めた検討を開始した。
 - 2重伝熱管: 所定の面圧及びギャップ幅を有する35m級管の製作
 - 球形管板: 高クロム鋼厚肉構造材の熱処理、及び3次元リガメント加工性（管台の削りだしと管板孔開け加工）
 - 胴ベローズ: 高クロム鋼による削り出し製作性
 - 管・管板溶接継手: 管台と2重管端部の溶接技術、及び高クロム鋼2重管の拡管技術

ヘリカルコイル単管型との信頼性比較



安全性及び信頼性を確保する観点から伝熱管を二重化した蒸気発生器の開発、導入が提案されている。

国内外を含めこれまで運転されている、あるいは、現在海外で計画が進められている、ナトリウム冷却高速増殖炉の蒸気発生器のほとんどは、単管の伝熱管となっている。また、単管の蒸気発生器に比較して二重管蒸気発生器はコスト高となる。

安全性及び信頼性の向上の観点から、二重伝熱管蒸気発生器を主要な革新技術として開発を進めるものとする。既に、二重伝熱管を試作し製作可能性が示されているが、伝熱管は数多く必要となることから、製作にあたってのバラツキに留意する必要がある。

イ. 蒸気発生器の大型化と代替技術

「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告書」においては、2ループ化（原子炉から熱を取り出す流れを2系統とすること）が提案されている。このため、1ループに1つ設置される蒸気発生器に要求される熱交換量が多くなり、蒸気発生器伝熱管の表面積を大きくする必要がある。これに対応して、伝熱管を直管方式として蒸気発生器の全長は約 38 mとなる。

高速増殖原型炉「もんじゅ」で用いられている伝熱管は、熱交換に必要な表面積を確保するために、直管ではなくヘリカル（らせん状）の単管となっている。革新技術である二重伝熱管の開発に対し、代替技術として、「もんじゅ」で利用実績があるヘリカル型単管蒸気発生器が提案されているが、大型化に伴い伝熱管破損時の水リークの検知時間が長くなる。そのため、破損伝播の可能性が高くなるなど、単管蒸気発生器の大型化は容易でない。このため、水リーク検知手段の高度化や二重伝熱管蒸気発生器の代替技術として、小型の蒸気発生器を用い1ループあたりの蒸気発生器を複数とする方法（デメリットとして、経済性の低下に留意）なども念頭におくべきである。

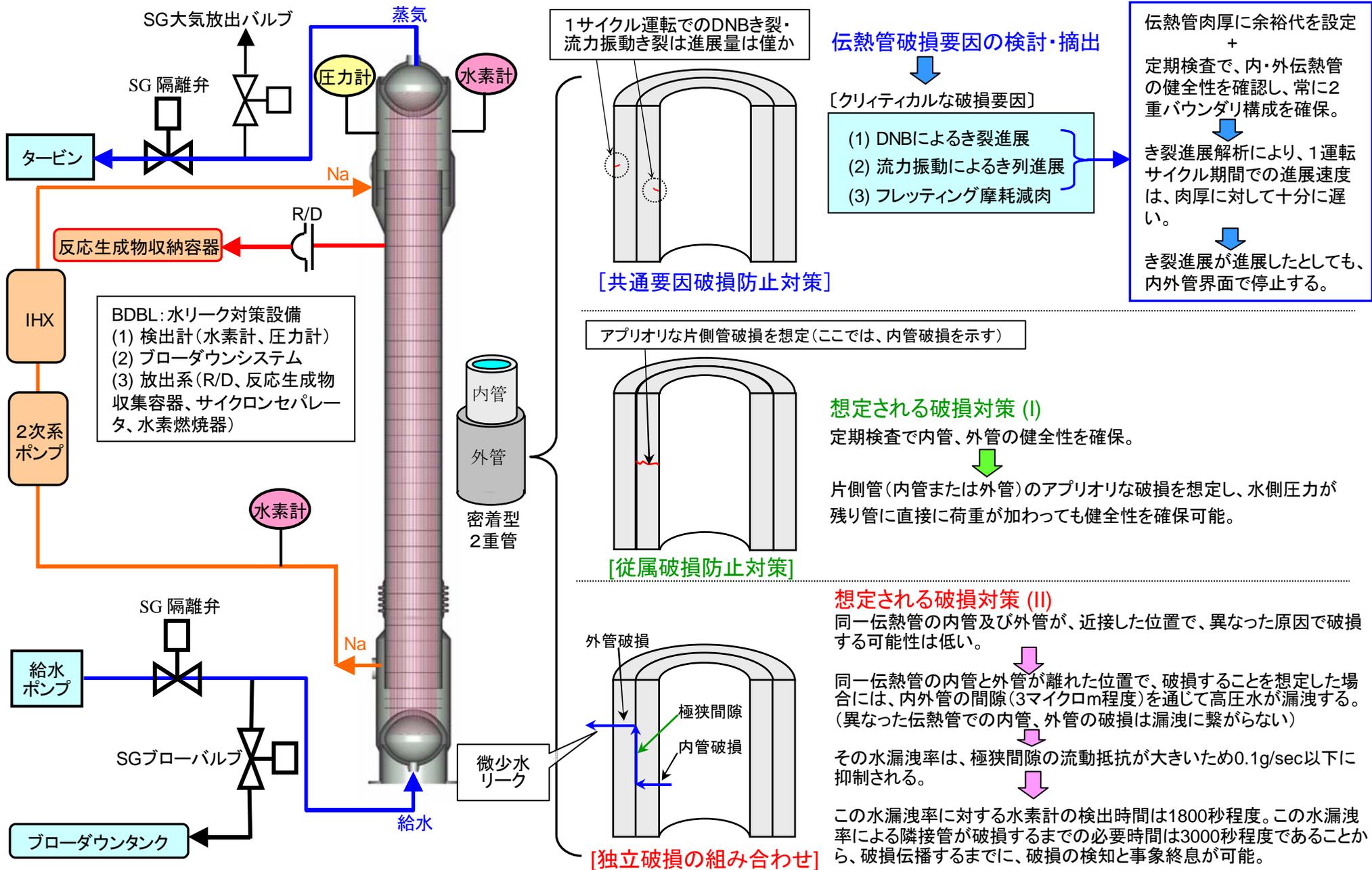
ウ. 伝熱管二重化と安全設計思想

ヘリカルコイル単管型との信頼性比較

直管2重伝熱管SGは、今後の研究開発が必要であるものの、伝熱管の検査精度を高めることによって、単管ヘリカル型SGよりも高い信頼性を確保可能。

		直管2重管SG	単管ヘリカルコイルSG
伝熱管	本数/伝熱長	7230本 / 29m	910本 / 94m
	外径 肉厚	19.0mmφ / 外管1.5、内管1.1mmt (暫定値)	31.8mmφ / 3.3mmt
溶接数	管-管板溶接	7230力所/管板×2(上下管板)=14460力所	910力所/管板×2(上下管板)=1820力所
	管-管溶接	0 力所	コイル部 : 2力所/本×910本 = 1820力所 連結管 : 8力所/本×910本 = 7280力所
破損原因		溶接箇所数は、ヘリカルコイル型が約2/3	
伝熱管検査精度		(1) 内管の検査精度 (UT, ECT)は、直管方式のため良好。 (2) 外管の検査精度は、界面の存在により、低下する。(ただし、基礎試験では、超音波UTによる外管き裂は検知できる可能性がある) (3) 管-管板継ぎ手の検査性は、アクセス性の観点から良好。	(1) コイル形状や連結管の曲部構造、及び長尺管(約120m)のため、検査プローブの挿入性が低下する。さらに、プローブのガス圧送による振動等により、検査精度は直管方式に比べ低下するが、単管故に問題は少ない。 (2) 管-管溶接部に生じた欠陥の検出性は、伝熱管母材部に比べ低下。
き裂進展阻止機能		内管と外管の構造分離により、界面でのき裂進展を阻止することが期待でき、片側が破損しても残された側でナトリウム-水反応の発生を防止できる。(今後、時効影響を考慮した試験を実施予定)	単管のため、発生したき裂の進展を、管壁肉厚途中で阻止することは困難。ただし、2重管よりも肉厚が厚いため、貫通き裂に至るまでの時間余裕が長く、またウェステージ型破損に対して耐性が高くなる可能性はある。

直管2重管蒸気発生器のNa・水反応防止の考え方と水リーク時の影響緩和



二重管伝熱管を単管伝熱管と比較した場合、熱伝達性能が若干劣ることから機器の大型化や製造コストの上昇につながるが、伝熱管に何らかの原因でき裂が生じた場合でも内外管の境界でき裂が停止する効果が期待できるとされている。

一方、伝熱管の健全性を担保する方策として、定期検査時に内外管全数検査を計画し、大規模な伝熱管からのナトリウム中へのリークを設計基準外事象とできる設計を指向している。二重管は検査性能面で単管に比べて課題が多く、水リークの検出性能、二重管の密着性の誤差も考慮した伝熱管設計の経済性、等を検討した上、安全性の裕度をどの程度確保することが合理的であるか、二重管と単管との総合的な比較を行い、二重管の採用の可否を判断すべきである。

エ. 変形大型管板の成立性

伝熱管がオフセンタで球形管板を貫通する変形大型管板については、製作性の検討のみならず、設計手法の確立と許認可性を見通しを得ることも必要である。

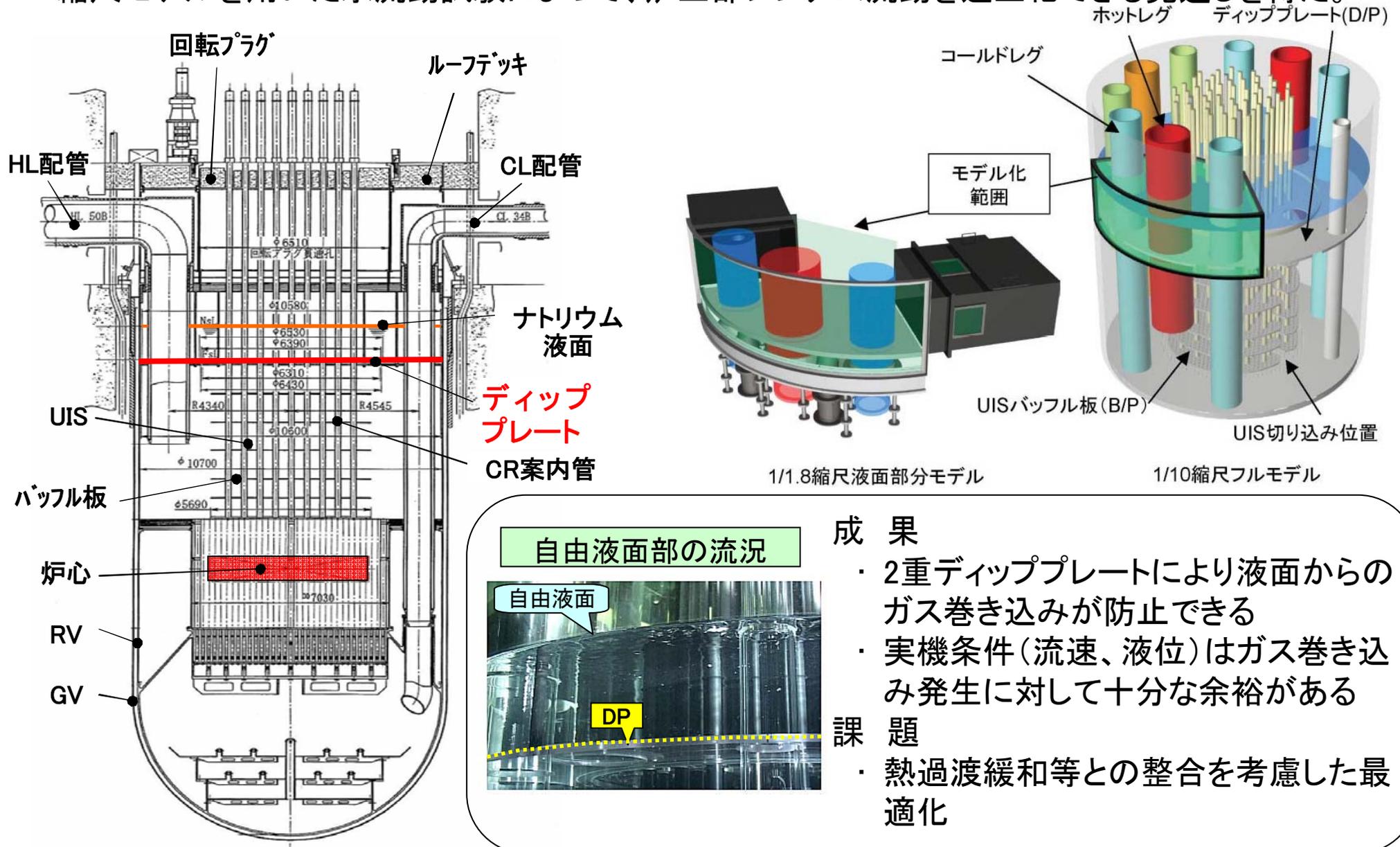
② 2ループ化

ア. ガス巻き込みの影響

軽水炉は冷却材である水を加圧状態で利用しており、万一の配管破断などの際には減圧に伴い冷却材に大量のボイドが発生することが想定されるため、「ボイド反応度係数を負」（出力の上昇などによりボイドが発生した場合、核分裂反応が抑制され、その結果出力が低下する）となるよう設計される。一方、ナトリウム冷却高速増殖炉では、中性子の減速を必要としないため冷却材密度の減少により反応度は増加し、炉心の大型化によって「ボイド反応度係数は正」となる。しかし、ナトリウム冷却高速増殖炉は、冷却材が低圧系であるため、配管破断等を想定してもガードベッセル等によって炉心冷却材が炉心から流出してボイド化することはなく、また想定される種々の異常に対しても炉心冷却材が沸騰せず、ボイドが発生しない設計としている。たとえこのようにボイドが発生しない設計であるとしても、冷却材ナト

原子炉容器上部プレナム流動適正化(ガス巻き込み防止)

縮尺モデルを用いた水流動試験によって、炉上部プレナム流動を適正化できる見通しを得た。



成果

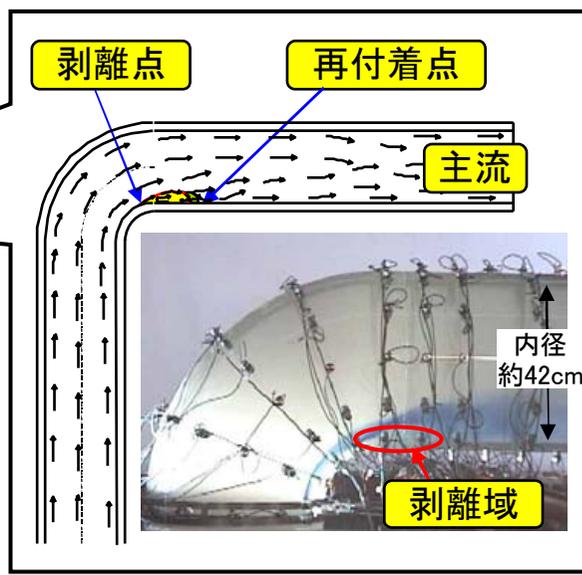
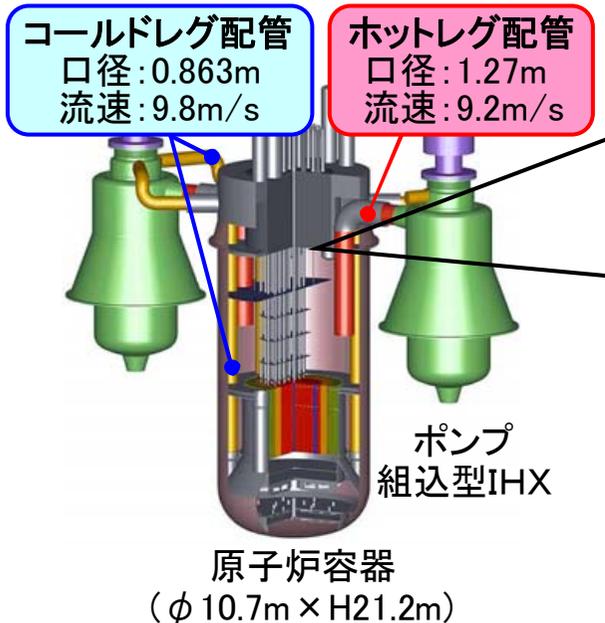
- ・ 2重ディッププレートにより液面からのガス巻き込みが防止できる
- ・ 実機条件(流速、液位)はガス巻き込み発生に対して十分な余裕がある

課題

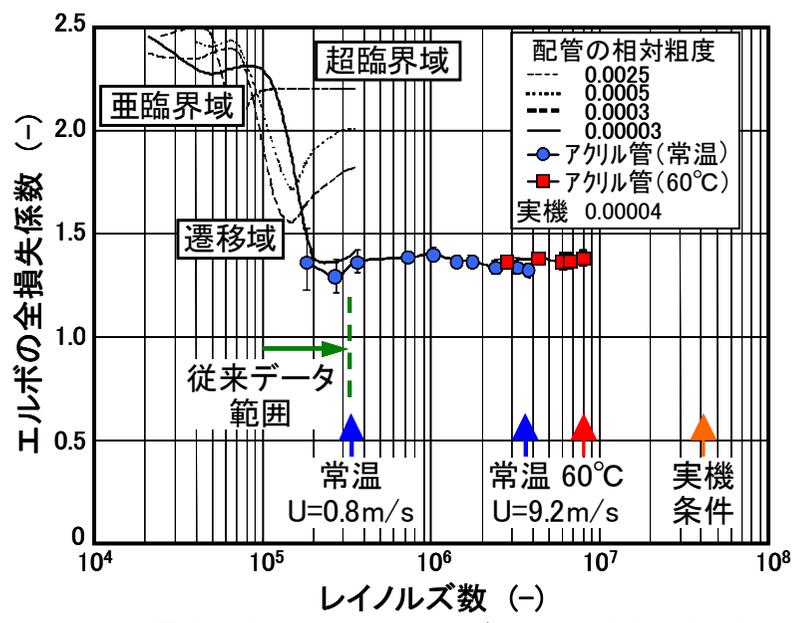
- ・ 熱過渡緩和等との整合を考慮した最適化

高流速・大口徑配管内流動

課題: 冷却系ループ数の削減に伴い大口徑配管を採用 ⇒ Na流速増加による流動励起振動
 目的: エルボを含む配管系の流動・振動特性の把握 (実機ホットレグ配管の1/3縮尺水試験)



実機流速 (9.2m/s) での流動状況



圧損係数のレイノルズ(Re)数依存性



- エルボ圧損係数は、高Re数条件においてもほぼ一定。
 ⇒ 剥離域の大きさ等、流況はRe数に依存しないことを確認。
- 振動の要因となる管壁での圧力変動特性は、管内流速に依存。
- 実機配管で発生する最大応力は、配管材の設計疲労限度以下。

→ 詳細は11~19ページの添付「大口徑配管の流動試験」を参照

リウムになんらかの原因で気泡が混入し、炉心を通過することが想定しうる。その原因には、冷却材中に溶存しているガスの低温部での析出、制御棒から放出されるヘリウムガス、冷却材界面でのガス巻き込みなどが考えられる。

「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告書」においては、2ループ化（原子炉から熱を取り出す冷却系統を2系統にすること）し、機器・配管の物量や原子炉建屋全体の体積などを抑える設計が提案されている。この際、1系統から取り出すことが必要な熱量が大きくなることから、配管を大口径化（もんじゅの約1.5倍以上）するとともに、配管内を流れるナトリウムの流速をこれまでより速くする（もんじゅの約1.5倍～3倍近く）ことが提案されている。

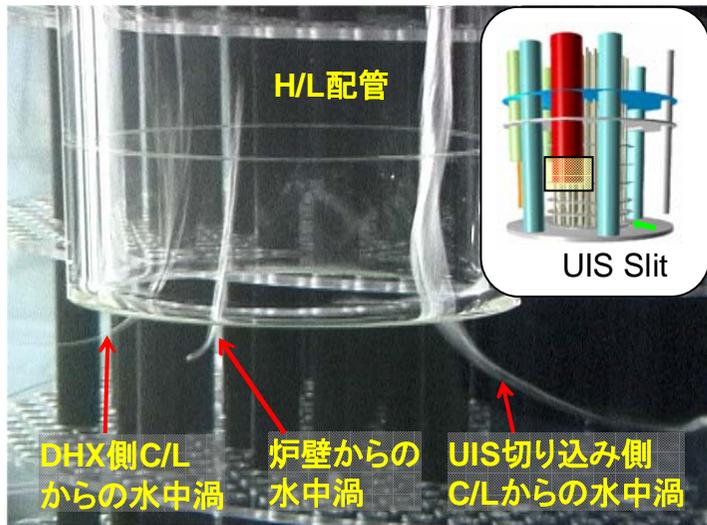
これに加え、原子炉出力に比較して相対的に原子炉容器の系統をコンパクトにしていることから、原子炉容器上部プレナム内のナトリウムの流速が速くなり、原子炉容器内のナトリウム表面から渦となってカバーガスを巻き込む（カバーガス巻き込み）可能性が想定される。界面で巻き込んだガスが、炉心冷却材の主流に入り、炉心燃料内を通過すれば、正の反応度効果や燃料ピンの冷却効果の阻害が懸念される。このため、原子炉容器内でガス巻き込みを防止するために、二重ディッププレートという整流効果を持つ構造物を上部プレナム部に設置し、ガス巻き込みを抑制する方策を提案している。しかし、反応度の上昇は原子炉に重大な影響を与える可能性があることから、ガス巻き込みが工学的に十分抑制できるものとなり、安全性に関し、十分な検討が必要である。

イ. 大口径配管の課題

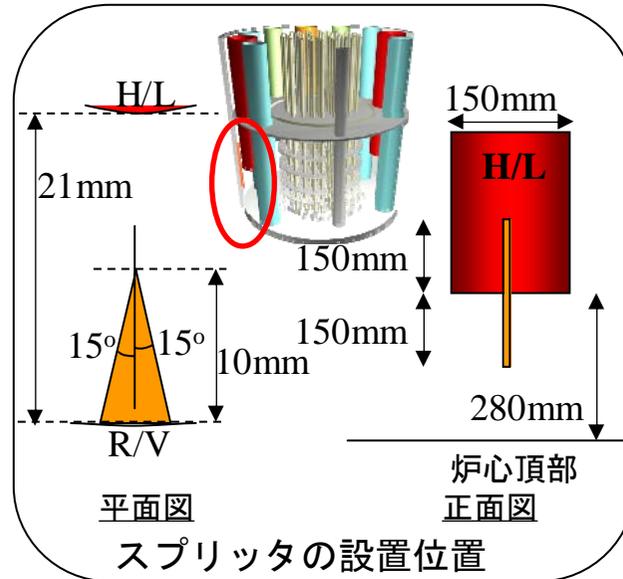
ナトリウム冷却高速増殖炉では、運転時の原子炉のナトリウムの温度が高く、停止時の温度との差が大きい。このため、ループ型炉では温度差に伴う配管や容器の膨張が力として配管に加わることになり、これを分散するために配管に多数のエルボ（配管を曲げた部分）を設けて応力を分散させる工夫が取られている。

「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告書」

原子炉容器上部プレナム流動適正化(キャビテーション防止)



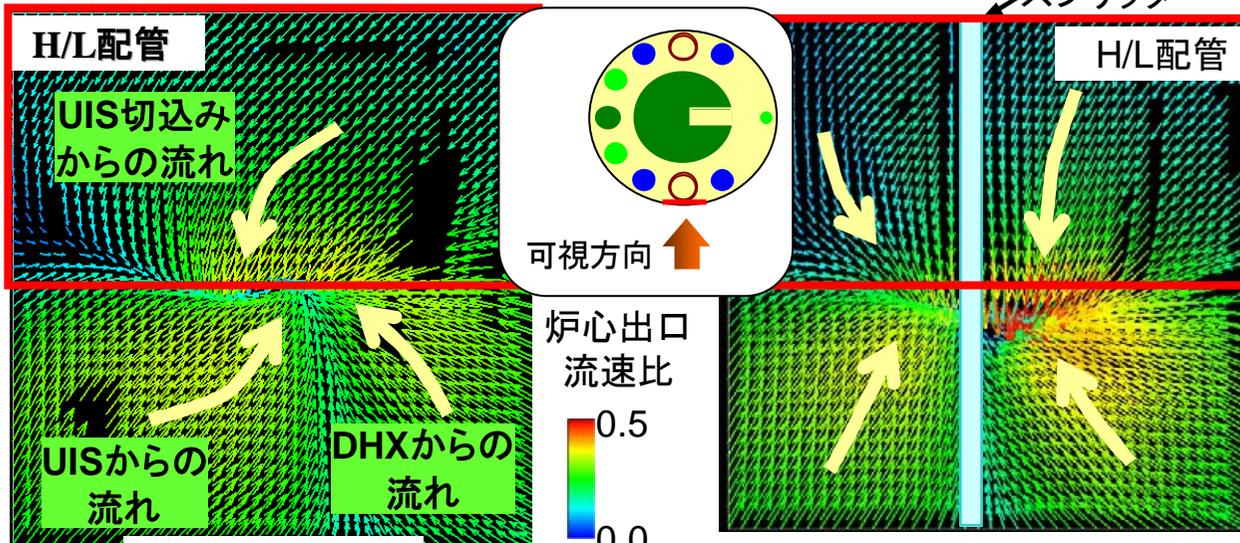
水中渦の発生状況



スプリッタの設置位置

成果

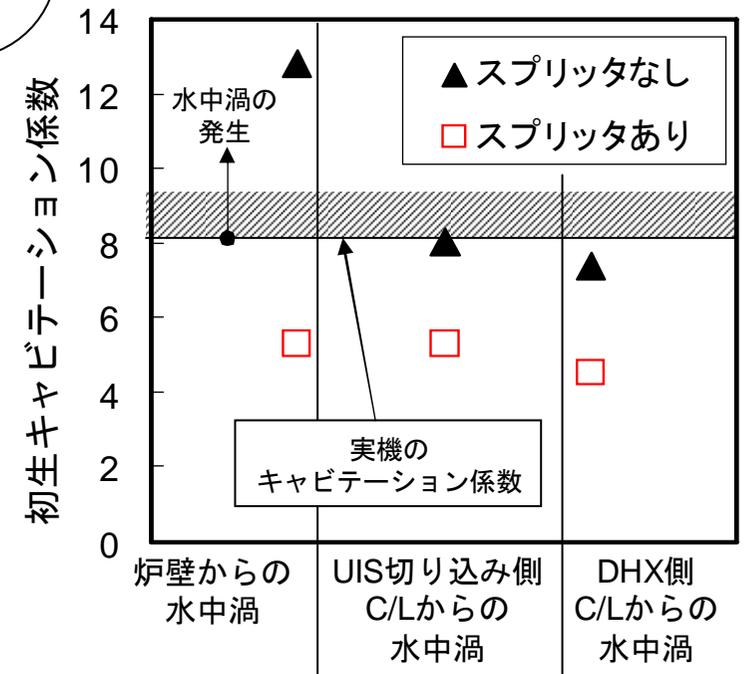
- 液中渦発生防止対策(フローズプリッタ等)を具体化し設計に反映



スプリッタなし

スプリッタあり

スプリッタの有無による流速ベクトルの比較



流動最適化による水中渦の抑制効果

で提案されている設計の場合、原子炉の出口温度約 550 度、入口温度約 395 度となっている。これを「もんじゅ」に使われている配管材料と同じ配管材料を用いるとした場合、応力分散に必要な配管の長さを十分に確保するためには原子炉建屋を大きくする必要がある。経済性を向上させる観点からは、この配管の長さを短くすることは効果的である。このため、熱膨張が小さく強度が高い新しい配管材料として高クロム鋼を用いることが提案され、材料開発が実施されている。

また、150 万 kWe の出力で冷却系は 2 ループ構成とするため、配管の口径と冷却材流速は従来設計にはない大きなものとなる。この大口径・高流速配管では、流れの乱れとそれに伴う振動が課題となる。そこで、実機の 1/3 縮尺試験装置を用いて水流動試験を行い、エルボ部を含む配管内の流動と振動特性を確認している。

しかしながら、振動特性について実機に近い条件での確認が必要であること、キャビテーション（発泡現象）やエロージョン（流れによる配管材料の減肉現象）などの流動特性について確認が必要であること、が指摘される。また、大口径のわりに管厚が薄い配管であり、製作性や配管支持のあり方について検討を要する。研究開発にあたっては、これらの点に配慮することが求められる。

ウ．安全設計で想定している条件の成立性

冷却系 2 ループ化に適合するための安全設計（短期の炉心冷却）に関する研究開発課題は重要であり、反応度係数の不確かさ低減のためには、高速増殖炉実機データと MA 核データの拡充が必要である。

③ 主循環ポンプ組み込み型中間熱交換器の課題

ア．設計の際の判断基準

「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告書」においては、システムのコンパクト化を図るため、炉心からの熱を運び出すナトリウムを循環させるための主循環ポンプと炉心からの熱（一次系の熱）をその外側の系統（二次系）へ伝えるための中間熱交換器（IHX）を一体化した主循環ポンプ組み込み型中間熱交換器の採

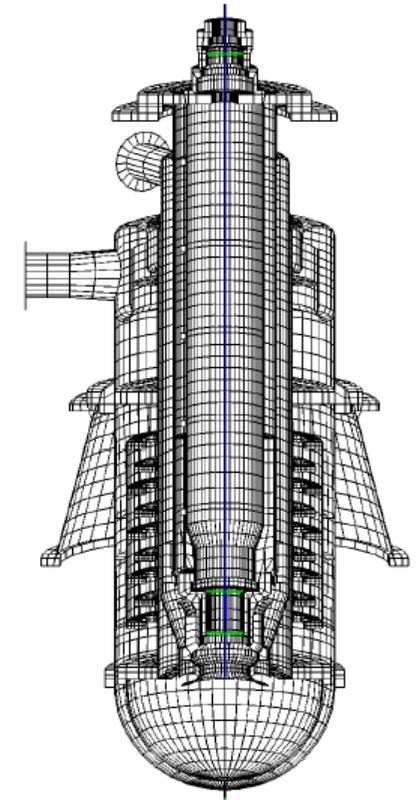
IHX伝熱管摩耗防止

(1/4スケール振動伝達試験・解析による設計手法開発)

- 振動伝達試験
1/4スケール水試験により機器内振動伝達データを取得
 - － 解析モデルの検証データを得る
- 解析モデル開発
3次元シェルモデルに流体要素も考慮したモデルを開発



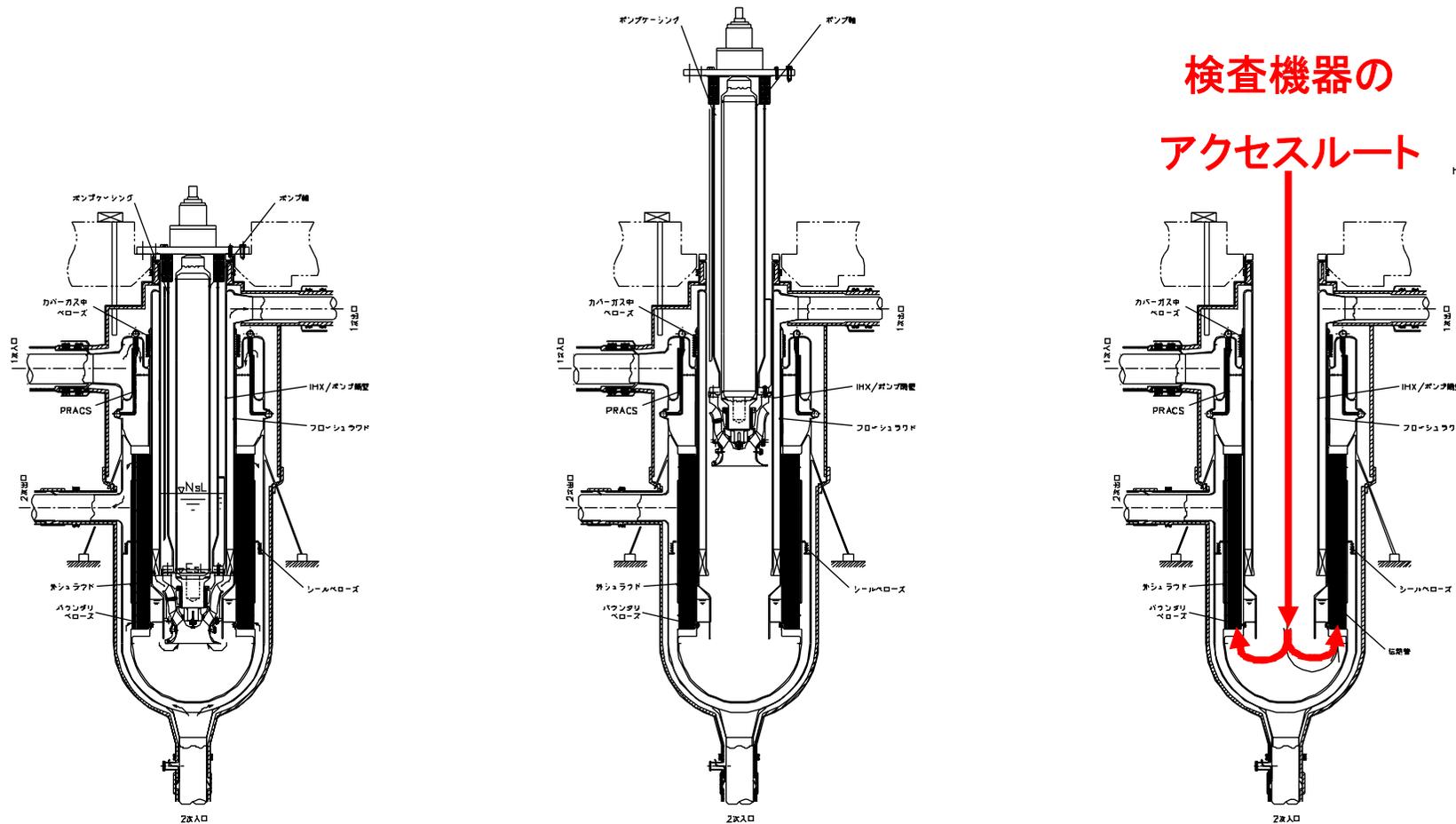
1/4スケール試験体



試験体解析モデル

ポンプ組込IHXの検査性について

万一、容器内部の下部にある構造（バウンダリベローズ、下部管板、伝熱管）の検査の必要が生じた場合、ポンプを引抜くことによってアクセスルートを確認することが可能



通常時

主循環ポンプの引抜

IHXへのアクセスルート確保

用を提案している。

実機の 1/4 規模の試験体を製作し、試験を行い、技術的な見通しが得られたとしている。具体的には、ポンプと IHX の間の熱伝達防止及び流体を介した振動伝達減少のためにポンプと IHX 構造間にガス層を配置する、IHX 中心部の狭い空間にポンプを収めるためにポンプは従来のポンプのような剛構造ではなく、ケーシングをコンパクト化可能な柔軟な構造とする、などの工夫を行っている。また、振動特性を確認するとともに、静圧軸受部の安定性解析、振動伝達解析モデルによる評価などを行っている。これらにより、技術的な見通しが得られたとしている。

しかしながら、従来、高速回転機器である主循環ポンプについては振動を防止するために剛な構造設計がなされ、また、熱交換器については伝熱管部分が薄肉の材料を使用し振動に弱いため振動の発生源から分離した設計としている。主循環ポンプ組み込み型中間熱交換器の設計においては、この相矛盾する設計の要求を一体の機器に持ち込むという点でこれまでにない革新的なものである。このため、両機器の合体に伴い要求される構造健全性判断条件、運転時の制限条件、等の新たな設計制限条件を把握したうえで、十分な試験や解析評価を行う必要がある。

イ. 検査性への配慮

機器を実用化する際には、検査性も重要な要素である。特に、主循環ポンプ組み込み型中間熱交換器はこれまでにない革新的な技術であり、また、原子炉の一次系を構成する重要な機器であることから、検査性に関しても十分な配慮をした開発を行う必要がある。

(再処理の研究開発に関する留意点)

① 晶析工程

ア. 基礎データの充実

連続晶析装置の研究開発

技術の現状

晶析方法の化学的成立性及び連続晶析装置の基本的成立性を確認

- ・実溶解液を用いた小規模ホット試験により、プルトニウムを4価に調整することで、ウランを粗分離できることを確認。
- ・U-模擬FP溶液、U-Pu-模擬FP溶液及び照射済燃料の溶解液を用いた試験により、除染係数100程度が達成可能であることを確認。FP元素によっては、条件により、異なる挙動を示すことを確認。
- ・臨界管理を形状管理とした円環型キルン式晶析装置を試作し、ウラン試験で性能に問題がないことを確認。

照射燃料などを用いた試験により晶析条件の基本的成立性の見通しが得られつつある



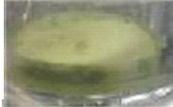
晶析操作条件の最適化、工学規模装置の開発が必要

結晶中のUに対するPuとFPの除染係数 (DF)

	核種	洗浄回数			
		0	1	2	3
ii-3	Am-241	12	100	250	3,000
	Cs-137	13	100	170	740
	Eu-155	11	100	240	860
ii-4	Am-241	6	58	550	1,700
	Cs-137	6	57	420	1,300
	Eu-155	6	56	530	1,400

		Pu	¹²⁵ Sb	¹³⁷ Cs	¹⁵⁵ Eu
Run1 (急冷)	洗浄前	5.6	1.6	1.2	4.2
	洗浄後	25	0.7	0.8	27
Run2 (緩冷)	洗浄前	4.6	0.8	0.9	3.5
	洗浄後	19	0.5	0.9	19

U結晶中におけるPuの存在比

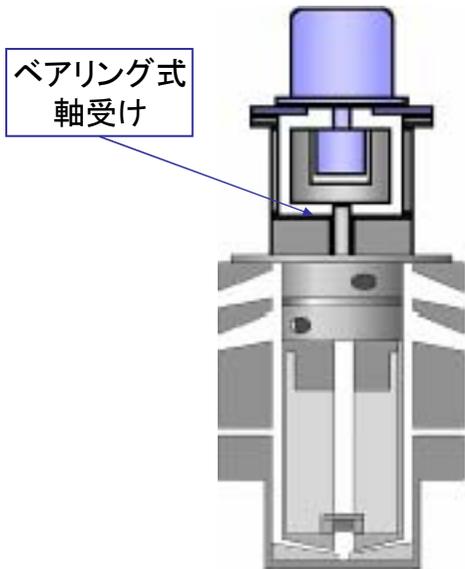
	U結晶の外観	Pu比
Run1		100 : 0.3 (U) (Pu)
Run2		100 : 5 (U) (Pu)
Run3		100 : 1.5 (U) (Pu)

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



連続晶析装置概念 (基礎試験装置)

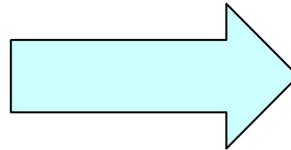
遠心抽出器の研究開発



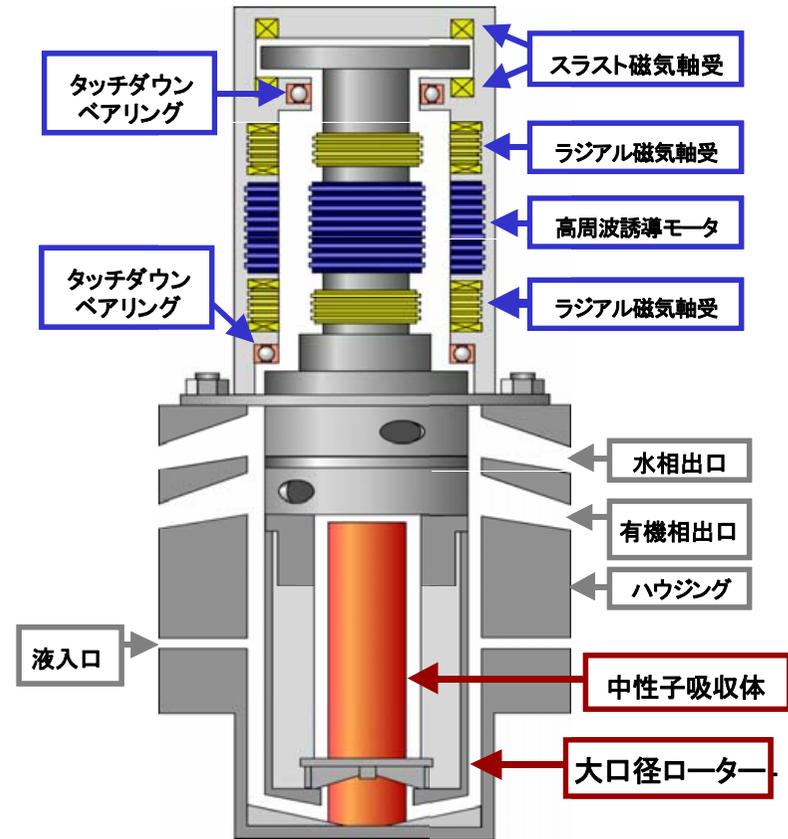
ベアリング式
軸受け

10kg/h 規模の遠心抽出器

改良・大型化



○ 中性子吸収体を内包した
円環型新型ロータの開発



40kg/h 規模の大容量遠心抽出器概念

「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告書」においては、再処理工程を「解体・せん断→溶解→ウランの粗取り→共抽出→MA回収」とし、この「ウランの粗取り」の工程に晶析法を採用することが提案されている。晶析法は、物質によって溶解度に差があること及び温度によって溶解度が変化するという性質を利用する方法であり、これまでの溶媒抽出法と比較して制御が容易、廃棄物発生量が少ないことが期待される。

これまでに、小規模ではあるがホット試験を行い、プルトニウムの挙動、FPの挙動の確認が行われている。しかし、革新的な技術であり、今後、基礎的なデータの充実が必要である。

イ. 機器の大型化に配慮した研究開発の実施

晶析法は固相と液相が共存するプロセスであるが、固相と液相が共存する場合には機器の規模が大きくなるとプロセス内で不均一性の問題が顕在化する可能性が高い。このため、大型機器を用いて基礎的なデータの拡充を図るなど、機器の大型化に配慮した研究開発が必要である。また、ヨウ化パラジウム、モリブデン酸ジルコニウムのように溶液条件の変化により固相を生成する化学種の影響に対する考慮、ウラン濃度の上昇に伴う配管閉塞の懸念等も考慮した機器開発も必要であるが、その有効性を確認するためには、実際の使用済燃料を用いたプロセスと機器を組み合わせた工学規模での試験の実施が必要である。

② 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課題

ア. 遠心抽出器に中性子吸収体を配置した場合の吸い込み性能

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡにおいては、ロータ部の直径が8cm相当の遠心抽出器による試験を行っている。一方、さらに遠心抽出器を大型化する場合を想定し、安全性の観点からロータ部の内側に中性子吸収体を挿入することが提案されており、ロータ部の内側に中性子吸収体を挿入した場合の吸い込み部分への影

抽出クロマトグラフィ装置の研究開発

技術の現状

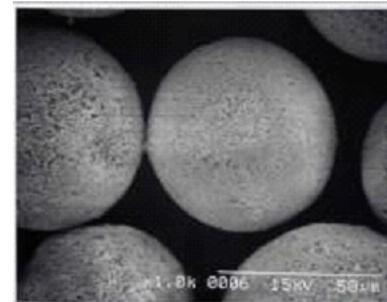
抽出クロマト法のMA回収工程への適用に関し、その基本性能を確認

- ・CMPO/SiO₂-P及びTODGA/SiO₂-Pについて、希土類元素の吸着容量、耐熱性、対放射線性等の基礎データを収集し、高温、高硝酸濃度条件下における耐久性についてはCMPO含浸吸着材の方が良好であることを確認。
- ・吸着材からのCMPO浸出を最小化する方法を考案し、分離試験によりAm-Cm回収工程への適用に向けて基本性能に問題がないことを確認。

実験室規模での試験で分離特性を確認、CMPOとBTPの組み合わせを将来の候補技術として抽出した

分離操作条件、分離塔など主要な機器の開発が必要

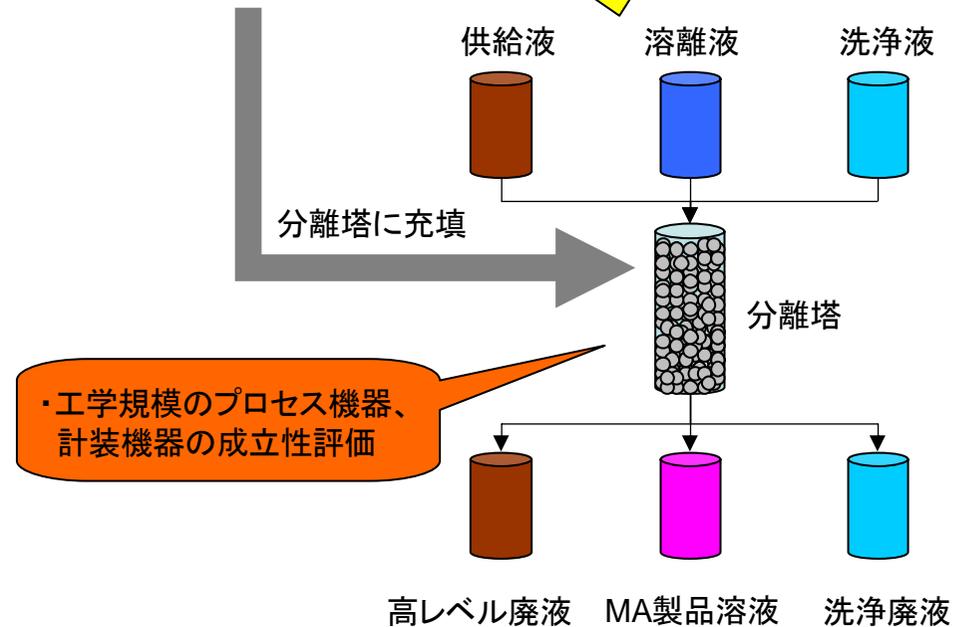
- 多孔質SiO₂ 粒子の表面にポリマー(スチレンジベニルベンゼン)を被覆(SiO₂-P)
- SiO₂-Pの表面に抽出剤(CMPO、TODGA、BTP等)を固定化



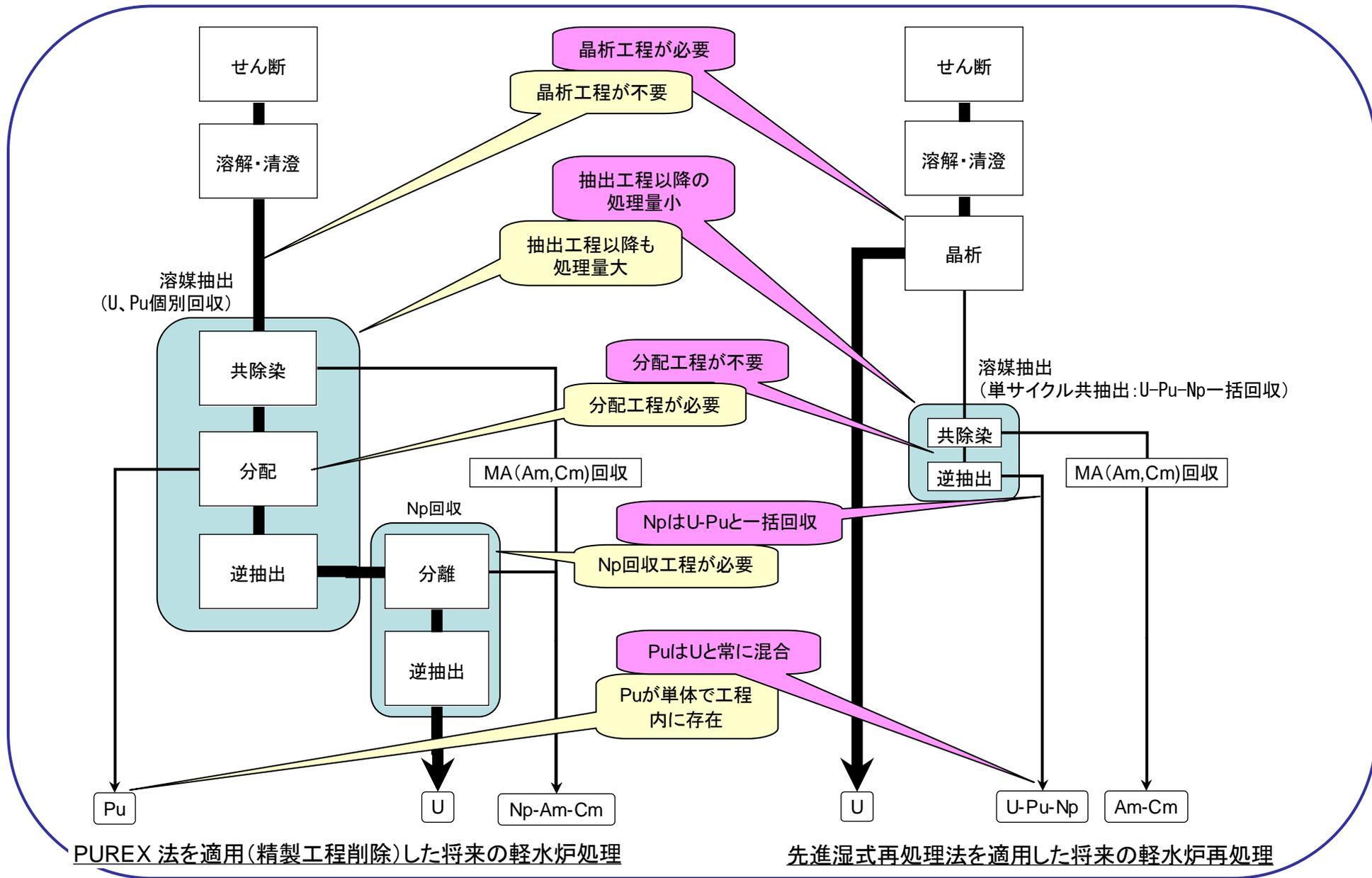
CMPO/SiO₂-P吸着材外観

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



将来の軽水炉使用済燃料の再処理への従来型 PUREX 法の適用と 先進湿式法の適用の比較



響については、慎重に検討する必要がある。

イ. 不溶解性スラッジの影響

工学的には、遠心抽出器の前段の工程から溶解が十分になされていない残渣（不溶解性スラッジ）が混じって流れ込んでくることが想定される。この不溶解性スラッジへの対応に関し、今後十分に検討することが必要である。

③ 抽出クロマトグラフィ法による MA 回収技術の開発

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡにおいては、溶媒抽出法に対し、廃液の大幅な低減及び経済性の向上が期待できる抽出クロマトグラフィ法による高レベル放射性廃液からのアメリシウムとキュリウムの回収技術が提案されている。また、抽出剤に関しては、溶媒抽出法による TRU 回収技術として研究開発が行われてきた SETFICS 法では CMPO 抽出剤が利用されているが、抽出クロマトグラフィ法における抽出剤としても CMPO 抽出剤を用い、これを吸着材に担持する方式を提案している。しかしながら、抽出剤に関しては CMPO 抽出剤以外も考えられ、より安全性や経済性などに優れた抽出剤の研究開発を行い、比較検討を行うことが必要である。

また、クロマトグラフィ装置は分析設備としては実績のあるものの、分離のための大型工業施設としての実績はなく、大型工業施設として必要とされる要件を満足できるハード設計については、今後とも検討が必要である。

④ 先進湿式法の軽水炉燃料再処理への適用

現在の軽水炉燃料再処理施設においては使用済燃料の中からプルトニウムとウランを選択的に回収している。このウラン（回収ウラン）は、回収される工程において他の核種と十分に分離されている（「高除染」と呼ばれている）ことから、放出される放射線量が少なく、発熱量も少ないなど、その取り扱いと比較的容易であり、改めて核燃料に加工されて利用することも容易である。

遠隔保守補修技術の研究開発

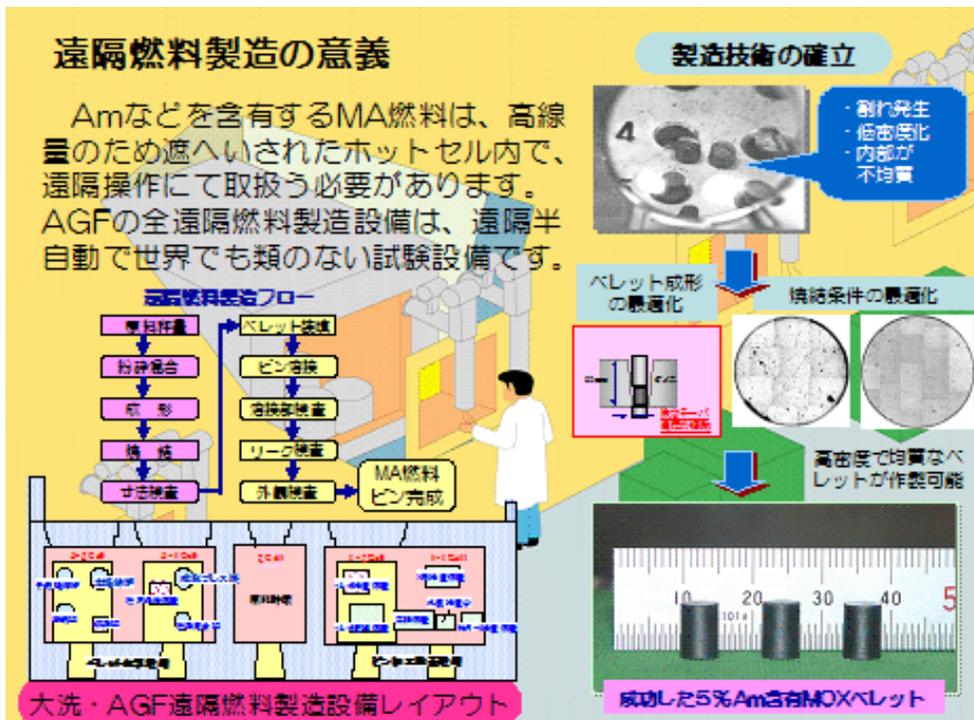
技術の現状

(1) Am-MOXペレット製造試験

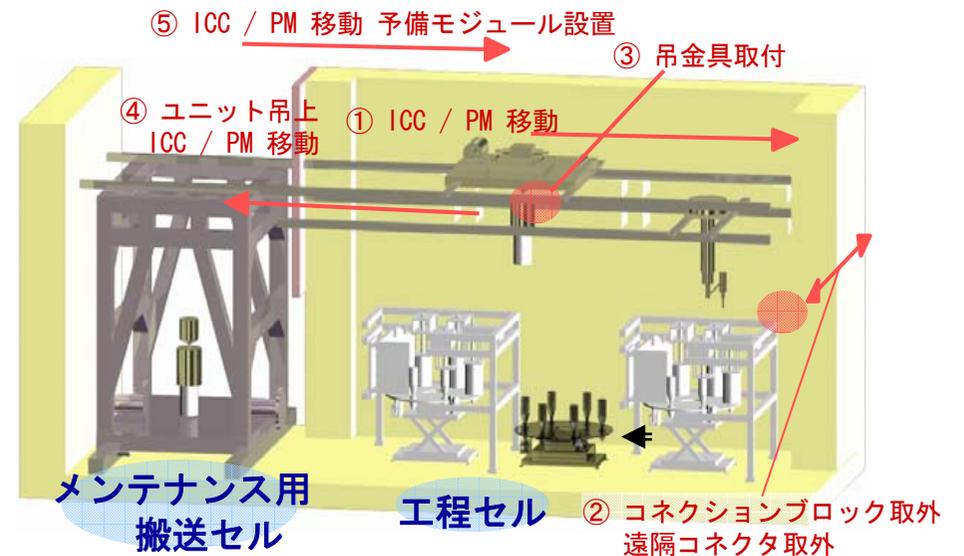
- セル内に設置した実験室規模の遠隔ペレット製造設備を用い、焼結雰囲気制御、昇温・降温の速度制御条件を最適化するなどし、高密度で均質な組織を有するAm含有MOXペレット（Am含有量：3%及び5%）の試作に成功した。酸素分圧を制御することで任意のO/M比（1.92～1.98）を得る条件を把握した。

(2) セル内遠隔機器の保守作業シミュレーション（ターンテーブル脱硝転換装置の例）

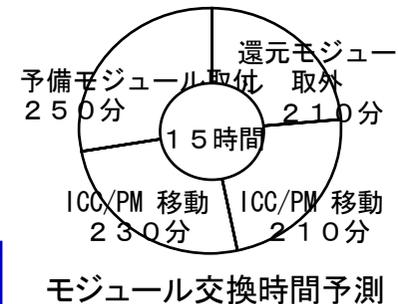
- 脱硝転換装置の保守部品の分解再組み立て方法を検討し、保守方法の見通しを得た。



遠隔保守検討例（脱硝転換設備）



ICC:インセルクレーン
PM:パワーマニプレータ



量産対応のための分析、検査技術開発が必要

遠隔ハンドリング機器開発の実施、ホット試験施設による実証

晶析法で回収されたウランには、FP や TRU の一部が多く含まれる可能性があり（「低除染」と呼ばれている）、放出される放射線量や発熱量が多いことから取り扱いがこれまでよりも困難となり、回収ウランの貯蔵にも配慮が必要となる。このため、晶析法を将来の軽水炉燃料再処理に採用する場合には、軽水炉燃料再処理からの大量の回収ウランについてその除染係数をどの程度とすべきかなど、設計要求の妥当性が問題となる。この設計要求の設定に当たっては、軽水炉サイクルを含む燃料サイクル全体を視野に入れて評価することが必要である。

なお、米国が将来の再処理工程として採用を検討している UREX 法（溶媒抽出法の一つ）では、晶析法と比べ回収ウランの除染係数を高くすることが容易であり、回収ウランの処分をも見据え、低レベル放射性廃棄物と同等の処分が可能な放射能レベルに設定することが検討されている。設計上要求する除染係数の妥当性については、我が国と米国ではウラン資源に対する考え方が異なり、技術的側面からのみでは判断できない。軽水炉燃料からの回収ウランの活用方法などに関する議論が必要であり、これに基づき設計要求の見直しが要請される可能性があることに留意すべきである。

（燃料製造の研究開発に関する留意点）

① MA の取り扱い

高速増殖炉の平衡サイクルでは、MA 組成はネプツニウム／アメリシウム／キュリウム＝0.1 %／0.7 %／0.2 %となるが、軽水炉から高速増殖炉への移行期においては、長期に中間貯蔵した軽水炉燃料やプルサーマル燃料から回収される MA を最大5 %程度まで添加して燃料を製造することから、この比率が変化すると考えられる。特にキュリウムは発熱源となることから、その比率が大きくなると燃料製造にあたりハンドリングが困難となる。研究開発に当たっては、このような MA の組成割合に対応して燃料製造を可能とするために必要な検討を優先的に行うべきである。

② ダイ潤滑成型

従来のペレット製造法では、成型における MOX 粉末の潤滑性を高めるために粉末段階で潤滑材を混合しているが、簡素化ペレット法では、ペレット成型の際に潤滑剤を噴霧する方式としている。高速増殖炉の実用化戦略調査研究フェーズⅡにおいては、実験規模での有効性を確認しているが、量産技術として成立するか今後さらに検討が必要である。

(共通事項)

① 保障措置技術分野

我が国は、今後も、原子力の研究、開発及び利用は、厳に平和の目的に限って推進し、国際的な核不拡散制度に積極的に参加し、IAEA 保障措置及び国内保障措置の厳格な適用を確保して行くこととしている。新たな高速増殖炉サイクルシステムを実用化するにあたっては、この考え方を踏まえて推進することが必要である。

このため、新たな高速増殖炉サイクルシステムを実用化するためには、核不拡散性が高く、十分な計量管理がなされ合理的な保障措置の適用が可能となるような設計及び運転管理とする必要がある。「高速増殖炉の実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告書」では保障措置関連技術に関する検討が十分なされていないが、保障措置関連技術は施設の設計に深く係わるものであり、今後、実証段階の施設の設計や実用段階の概念を具体化していく際には徐々にその重要性が増してくる。今後の研究開発に当たっては、保障措置関連技術に関する検討を十分に行うべきである。