



# 技術的実現性について — 高速増殖炉システム —

(独)日本原子力研究開発機構

2006年4月



# 1. 高速増殖炉システム:有望なシステム概念の抽出 (1/2)

## ● 有望なシステム概念抽出の考え方

- 設計要求への適合可能性を評価し、代替技術の有無および国際協力の可能性を含めた技術的実現性の評価を加味した上で、有望なシステム概念を抽出する

設計要求への適合可能性

- 安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性に関する設計要求に対し、各概念の適合可能性を評価する



技術的実現性  
(国際的視点)

- 実用化するために克服すべき課題の多さとそれぞれの課題の難易度および代替技術の有無と国際協力の可能性から、各概念の技術的成立性を評価する

Gen-IV 等の国際協力の活用により、開発分担による効率的な研究開発が期待できるとともに、共同開発により開発リスクの高い革新技術をブレークスルーし技術的実現性をより確かなものとする事ができる。更には、国際協力の実施により、システム概念を国際標準にできる可能性がある。以上の観点より、各概念の国際協力の可能性を評価する



有望なシステム概念の抽出



# 1. 高速増殖炉システム: 有望なシステム概念の抽出 (2/2)

## ● 有望なシステム概念

- ナトリウム冷却炉が最も有望な概念である
- ヘリウムガス冷却炉は多様なニーズに対応可能な概念である

	ナトリウム冷却炉	ヘリウムガス冷却炉	鉛ビスマス冷却炉	水冷却炉
設計要求への適合可能性	全ての設計要求に対して、高いレベルで適合する可能性がある。金属燃料を採用した場合にはさらなる炉心性能の向上が見込める。	全ての設計要求に対して適合する可能性があり、高温熱源としての魅力を有する。	全ての設計要求に対して適合する可能性がある。	資源有効利用性および環境負荷低減性に制約がある。上記以外の設計要求に対しては、適合する可能性がある。
技術的実現性	開発課題が明確であり、また代替技術を準備することができることから、高い確度で実現性を見通すことが可能	実現性を見通すためには、概念成立性に係わる課題を解決することが必要		実現性を見通すための課題が炉心燃料関連に限定
(国際的視点)	国際協力を期待することが可能 <small>GIFでの活動が活発で、国際標準の概念へ発展していく可能性がある。また、共同開発による革新技术のブレークスルー、開発分担による効率的開発が期待できる。</small>	国際協力を期待することが可能 <small>GIFでの活動により、国際標準の概念へ発展していく可能性がある。また、概念成立性に係わる課題が解決されれば、技術的実現性をより向上させることができる。</small>	国際協力を期待することが困難 <small>GIFでの活動において開発を主導する国が無く、概念成立性に係わる課題をブレークスルーできる可能性が低い。</small>	国際協力を期待することが困難 <small>GIFでの候補概念に取り上げられていないため、現状では基盤的な研究協力内容に限定される。</small>

は優れた部分



## 2. 各高速増殖炉システムの技術的実現性

実現可能性(難易度:ハードルの高さ)の分類

低:「開発見通しがあり、不確かさが少ない革新技術」

中:「現状知見に乏しく、開発に不確かさがある革新技術」

高:「基礎知見に乏しい燃料・材料関連の革新技術であり、不確かさが最も大きく、かつ研究開発に時間がかかる技術」

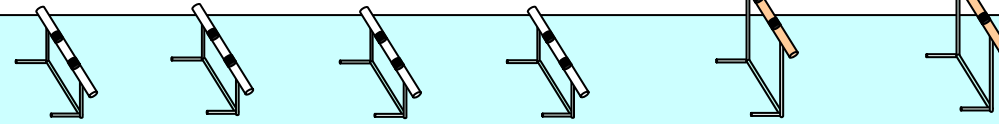
でマークした課題:国際協力が期待される項目

●:代替概念がある技術

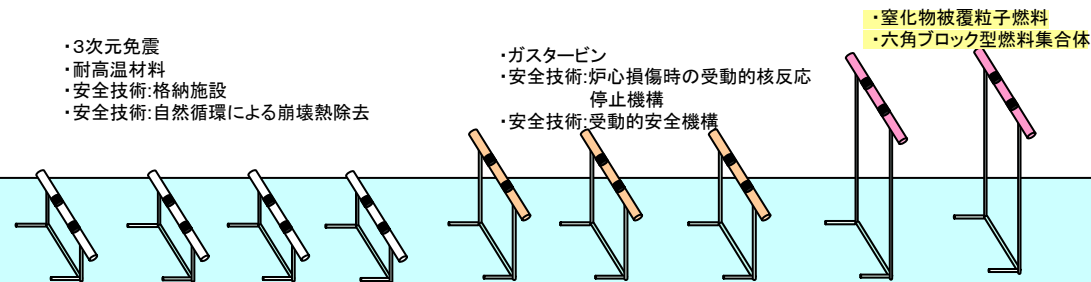
- 高クロム鋼採用による配管短縮
- ポンプ組込型中間熱交換器
- 保守・補修技術
- 安全技術:炉心損傷時の受動的核反応停止機構

- ODS鋼被覆管
- 高信頼性蒸気発生器

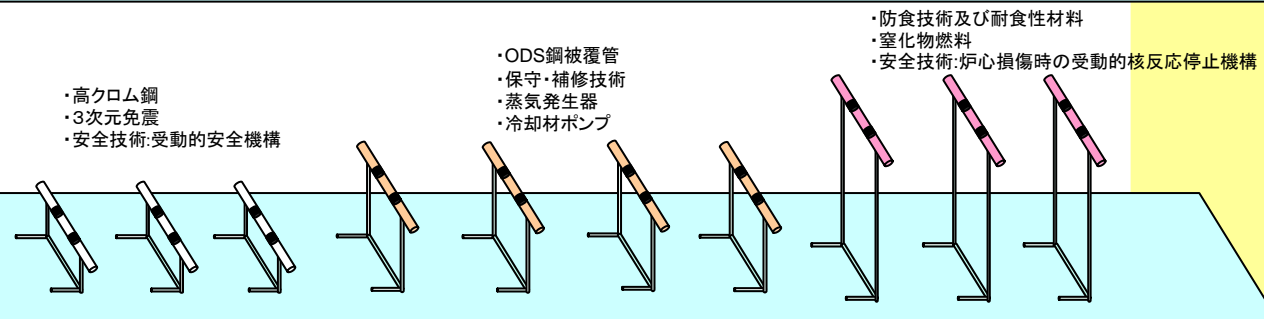
ナトリウム冷却炉



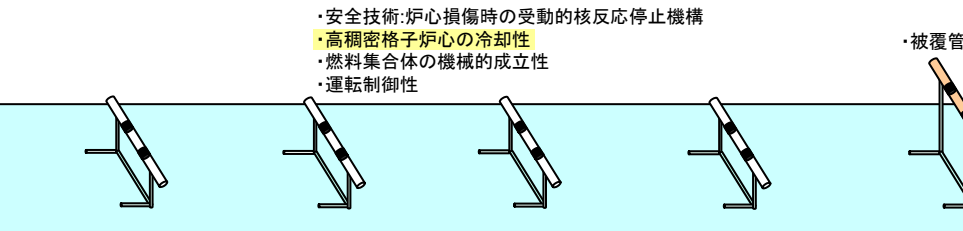
ヘリウムガス冷却炉



鉛ビスマス冷却炉



水冷却炉



実用化戦略調査研究  
フェーズⅡ終了

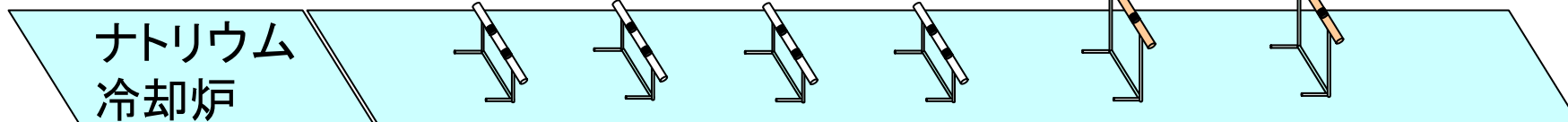
10年後



## 2(1) (a) ナトリウム冷却炉: 概念と技術的課題

- ①高クロム鋼採用による配管短縮
- ②ポンプ組込型中間熱交換器
- ③保守・補修技術
- ④安全技術: 炉心損傷時の受動的核反応停止機構

- ⑤ODS鋼被覆管
- ⑥高信頼性蒸気発生器

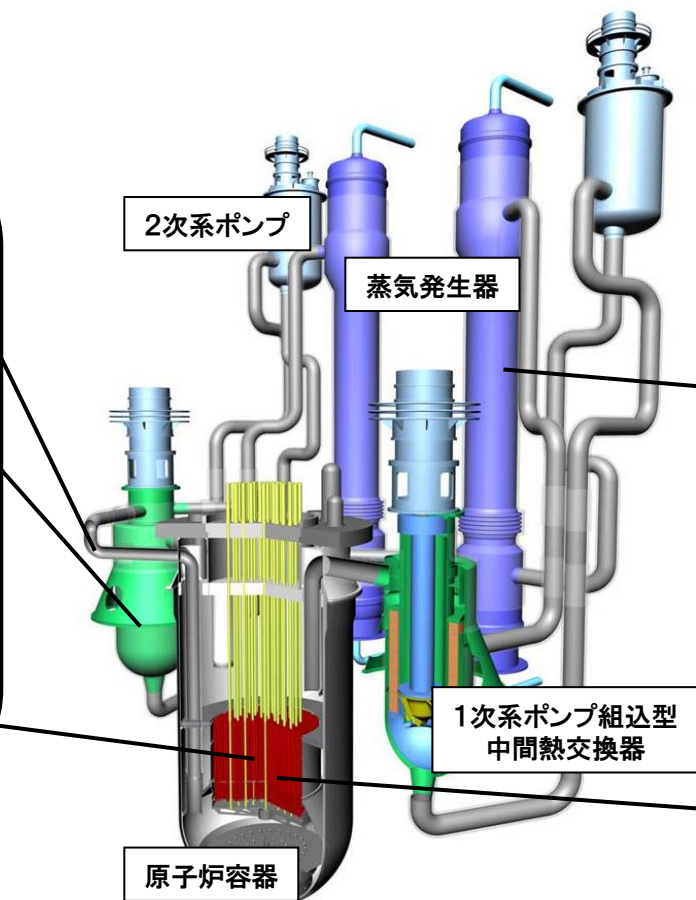


○建屋容積・物量の削減

- ①高クロム鋼採用による配管短縮
- ②1次冷却系統簡素化のためのポンプ組込型中間熱交換器

○高燃焼度化と長期運転サイクルの実現

- ⑤ODS鋼被覆管



○ナトリウムの取扱技術

- ③保守・補修技術
- ⑥高信頼性蒸気発生器

○炉心安全性の向上

- ④炉心損傷時の受動的核反応停止機構(再臨界回避技術)



## 2(1) (b) ナトリウム冷却炉: 主要な技術課題とR&Dの現状等(1/2)

項目	技術課題	研究開発の現状	代替技術
ODS鋼被覆管材料	○高燃焼度化(炉心平均燃焼度150GWd/t、ピーク燃焼度 250 GWd/t、被覆管最高温度700°C)に向けた照射試験データの整備	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高Ni鋼及びフェライト鋼で、照射温度600°C程度、燃焼度230GWd/tの照射実績あり</li> <li>・国産材料としては、オーステナイト鋼(PNC1520)で、照射温度650°C、燃焼度160GWd/tの照射実績あり</li> </ul> <p>○ロシアの実験炉BOR-60を用いてODS鋼の燃料ピンを照射中で、現在の到達燃焼度は50GWd/t、温度720°Cである</p> <p>○常陽でのピン照射試験を準備中である</p>	<p>○ PNC/FMS鋼</p> <p>→高温強度はODS鋼に劣るが、燃焼度はODS鋼と同等の見込み</p> <p>→原子炉出口温度は520°C程度(ODS鋼では550°C)となり、ODS鋼と比較してプラント熱効率が低下する</p>
高信頼性蒸気発生器	○製作性、構造成立性、伝熱流動特性、検査性等の確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>・米国アイダホ研究所のEBR-II炉の蒸発器、加熱器として、直管2重管SGが30年間運用された実績がある</li> </ul> <p>○高クロム鋼を用いた短尺の二重管を試作し、2重管の製作性に見通しを得た</p>	<p>○単管ヘリカルコイル型SG</p> <p>→もんじゅでの関連実績はあるが、大型化に際してより検出時間の短い水リーク検出技術開発が必要である</p>
高Cr鋼採用による配管短縮等	○高速炉構造材料に採用するために必要な材料特性向上、及び基準類整備等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・火力ボイラー伝熱管材料、タービンロータ材、等での使用実績がある</li> </ul> <p>○配管材料、冷却系機器の構造材料、SG伝熱管及び管板の材料とするための、材料組成を開発し候補材料を開発中である</p> <p>○候補材料について強度試験を実施し、材料強度基準案を策定し、設計に反映できる段階にある</p>	<p>○Mod.9Cr-1Mo鋼の採用</p> <p>→材料特性(高温強度、熱伝達率等)の相違により、IHX、SG物量は増加するものの適用可能である</p>
ポンプ組込型中間熱交換器	○ポンプ振動に起因する伝熱管摩耗を防止及び緩和する設計手法の開発	<p>○1/4スケール試験体を用いた振動伝達試験を実施し、機器の設計成立性を見通しを得た</p> <p>○試験結果を用いて振動解析モデルを開発し、振動伝達を制御する設計手法が成立する見通しを得た</p>	<p>○中間熱交換器と一次ポンプの分離配置</p> <p>→容器が2つになること、ミドルゲ配管が必要になる等、物量・建屋容積が増加する</p>



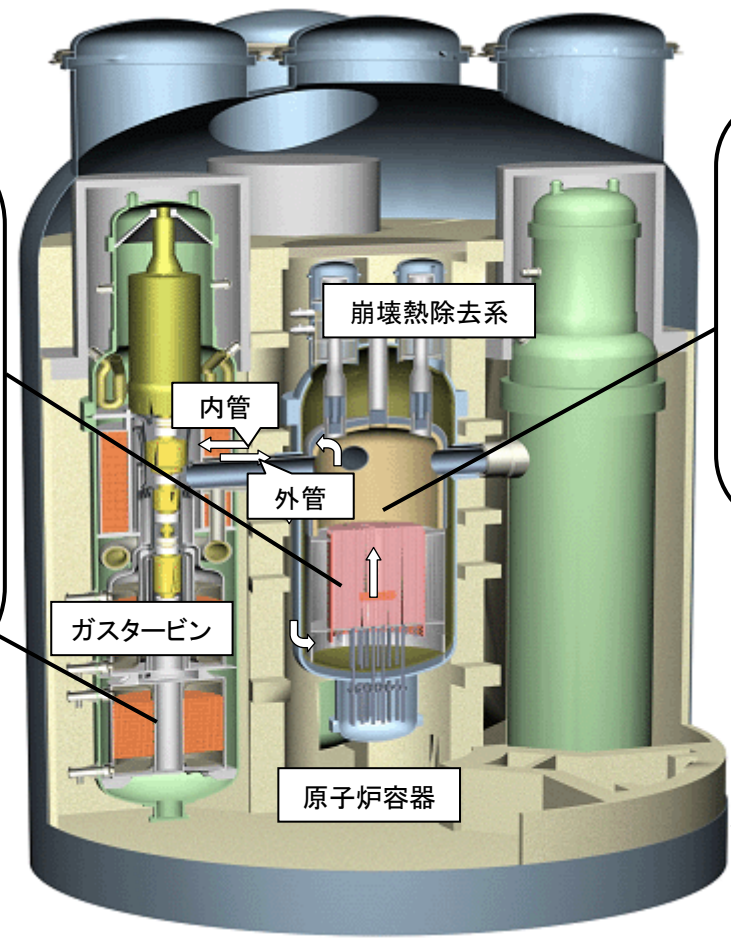
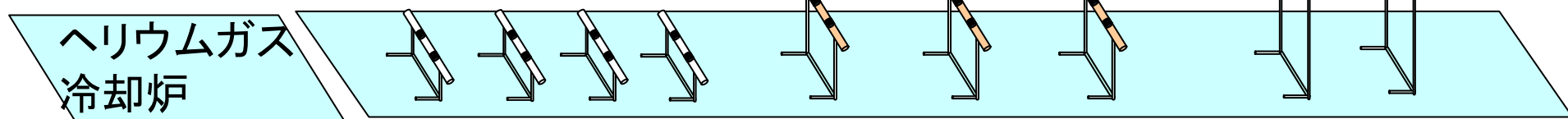
## 2(1) (b) ナトリウム冷却炉: 主要な技術課題とR&Dの現状等(2/2)

項目	技術課題	研究開発の現状	代替技術
保守・補修技術 ・Na中可視化技術  ・二重管SG検査技術	○Na中可視化技術・検査・補修技術の開発  ○外管検査技術、補修技術の開発	・PFR、「もんじゅ」で超音波を用いたNa中画像化試験に成功した ・更に鮮明な画像化が可能となる開口合成法を用いた画像化技術は実証炉から開発に着手し、Na中試験に成功している ○実機適用を考慮し装置の小型軽量化、高解像度化を目的とした研究開発、及び可視化装置をNa中で搬送する装置の開発を現在進めている  ・EBR-2で密着2重管で外管のき裂検知の実績がある(1970年代) ・PNC-JAPC共同研究(1987-1989年)で溝付き密着2重管の検査技術開発実績がある ○超音波探傷装置(UT)を用いた2重伝熱管検査装置を開発中	
安全技術: 炉心損傷時の受動的核反応停止機構	○内部ダクト付き燃料集合体の早期燃料排出能力の実証  ○炉心下部での溶融燃料の安定冷却機能の確保	○炉心損傷時の溶融燃料の炉心外への流出促進機能について、内部ダクト付き燃料集合体を用いた炉内・炉外試験と実機解析により、有効性を見通しを得た  ○炉心損傷事故後の全燃料の原子炉容器内での保持・冷却性を解析・評価し、その成立見通しを得た	



## 2(2) (a)ヘリウムガス冷却炉:概念と技術的課題

- ①3次元免震
- ②耐高温材料
- ③安全技術:格納施設
- ④安全技術:自然循環による崩壊熱除去
- ⑤直接ガスタービン発電
- ⑥安全技術:炉心損傷時の受動的核反応停止機構
- ⑦安全技術:受動的な安全機構
- ⑧窒化物被覆粒子燃料
- ⑨六角ブロック型燃料集合体



○耐熱性に優れた炉心概念

②耐高温材料  
⑧窒化物被覆粒子燃料  
⑨六角ブロック型燃料集合体

○高効率化

⑤直接ガスタービン発電

○安全技術

③格納施設  
④自然循環による崩壊熱除去  
⑥炉心損傷時の受動的核反応停止機構 (再臨界回避技術)  
⑦受動的な安全機構

○耐震性確保

①3次元免震装置





## 2(2) (b)ヘリウムガス冷却炉: 主要な技術課題とR&Dの現状等(1/2)

項目	技術課題	研究開発の現状	代替技術
窒化物被覆粒子燃料	○高温耐性を有する被覆材料の選定、厚膜被覆製造技術、窒化物燃料の開発	○被覆候補材であるTiNについて厚膜蒸着特性や曲げ強度試験を実施し、製造性と強度の面での適合可能性を明らかにした ○燃料核についてはプロセス成立性の確認試験、被覆に関しては被覆粒子燃料の成立性に必要な技術(高温耐性、耐照射性を有する被覆材の開発、新材料の照射特性の把握等)の開発が必要 ○今後、照射試験、過渡試験、破損限界試験等を実施する必要がある	
六角ブロック型燃料集合体	○粒子燃料をSiCのマトリックス中に埋め込んだ六角ブロック型燃料集合体の構造具体化、伝熱流動特性、照射特性評価	○革新的な燃料集合体概念を構築した段階 ○SiC等、高温耐性・照射耐性を持つ新材料の開発が必要 ○今後、新材料の製造法開発、照射試験等を実施する必要がある	
ガスタービン	○タービンとコンプレッサを同軸とした縦置き大型ガスタービンの開発(300MWe以上)	○南アフリカ(PBMR)、ロシア(GT-MHR)、日本(GTHTR300)等と同様の閉サイクルヘリウムガスタービン概念設計が進行中であり、これらの成果が活用できる可能性がある	
安全技術: 炉心損傷時の受動的核反応停止機構	○炉心損傷時の燃料集中による再臨界を回避して格納容器内で事故の終息を図る技術の開発	○定性的な事象推移予測に基づいて、格納容器内コアキャッチャーによって事故終息を図る方策を提示した ○今後、窒化物被覆粒子燃料の溶融破損挙動データを取得するとともに、炉心損傷事象推移を評価するツールを整備し、評価を定量化していく必要がある	



## 2(2) (b)ヘリウムガス冷却炉: 主要な技術課題とR&Dの現状等(2/2)

項目	技術課題	研究開発の現状	代替技術
安全技術: 受動的 安全機構	○炉心出口温度850℃のヘリウム ガス冷却材に対応した受動的炉停 止機構の開発	○候補概念として高温キュリー点電磁石方式を選定して、設 計概念を提示した ○今後、温度感知合金の選定等材料開発から着手して、構 造設計を具体化し、過渡応答特性や通常時の保持力安定性 等の性能を評価する必要がある	
3次元免震	○3次元免震装置の開発	○免震要素として幾つかの方式が提案されており、要素レベ ルでの開発を進めている ○今後、本概念に適合する免震方式の選定、機能確認、シ ステム設計、免震設計基準の策定等が必要である	
耐高温材料	○圧力容器等の1次系機器への 軽水炉材料等の適用を可能とする 断熱構造の開発	○候補概念として、カオウールをSiCプレートで固定する構造 を提示した。なお、カオウールはHTTRで使用実績がある ○今後、1メートル四方程度以上の比較的大面積のSiC板材 の製造技術を確立と、耐熱性、耐照射製等を評価するととも に、断熱構造の性能を評価する必要がある	
安全技術: 格納 施設	○高張力鋼を採用した耐圧大型 格納容器の開発	○減圧事故時の気密性と炉心冷却性を確保するため、 0.65MPaの耐圧性(軽水炉は0.4MPa)を有する鋼製格納容器 を開発する必要がある	
安全技術: 自然 循環による崩 壊熱除去	○ヘリウムガス冷却炉に適合した 自然循環機能を有する崩壊熱除 去系の開発	○加圧水を中間媒体とし、大気をヒートシンクとする崩壊熱除 去システム概念を構築した ○崩壊熱除去システムを構成するグラビティダンパ等の主要機 器の高温での機能確認と系統及び炉心での伝熱流動を評価 する手法を整備するための研究を実施するとともに、機能を 検証するための試験研究が必要である	



## 2(2) (c)ヘリウムガス冷却炉

### 難易度の高い課題に関する成果の現状と今後の課題(1/2)

#### 窒化物被覆粒子燃料

##### 研究開発の現状

- 窒化物燃料は、放射化生成物C-14の生成を抑制するため、N-14を含まない窒素を用いる。想定する窒化物燃料は、N-15(自然界では0.37%)を100%まで濃縮する。現在、N-15の濃縮コストは10万円/g程度であるが、新濃縮技術(気相吸着法)の実用化に期待し、濃縮コスト1000円/gとして経済性を評価した。気相吸着法は、要素技術の開発と工学的成立性の確認のため、濃縮メカニズムの解明、濃縮プロセスの開発、等を実施しているが研究段階にある。
- 窒化物燃料粒子については、酸化物ゲル球生成時に炭素粉末を一様に分散させ、これを炭素熱還元法で窒化物とする方法等があるが、実験室規模の段階である。

##### 今後の開発課題

- N-15濃縮コストの低減  
本課題は、窒化物燃料を利用するために必須の開発課題である。圧カスイング法による気相吸着法が有望であるが、今後、小規模試験による同位体濃縮メカニズムの解明、分離効率の確認、工学試験にて工業化データの取得、経済性の確認が必要である。
- 被覆燃料粒子の開発  
粒子燃料については、プロセス成立性の確認試験を行う必要がある。一方、被覆に関しては、高温耐性、耐照射性を有する被覆材の開発、被覆層生成技術の開発、新材料の照射特性の把握等の被覆粒子燃料の成立性に必須な技術を開発する必要がある。



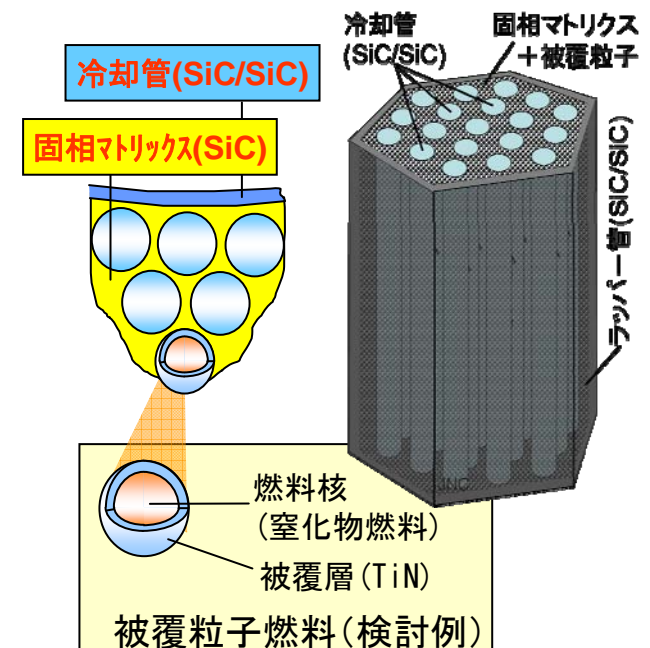
## 六角ブロック型燃料集合体

### 研究開発の現状

- 六角ブロックの製造プロセスについて検討し、製造技術実現性を検討した。燃料被覆層、SiCブロックとラッパー管および冷却管によるFPの閉じ込め機能に関する製造技術は開発の端緒にある。

### 今後の開発課題

- 燃料集合体の開発  
SiC等、高温耐性・照射耐性を持つ新材料及び製造法の開発(FP閉じ込めを満足する気密性かつ強度を有するラッパー管および冷却管の開発、SiCブロック焼結時の収縮・変形による製造公差と熱伝導性、照射特性の把握、等)
- 再処理時の被覆粒子燃料取出に関する研究開発



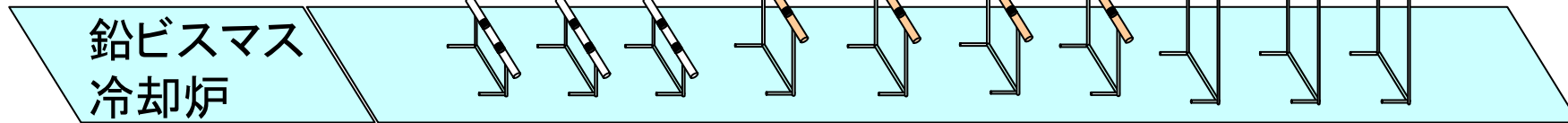


## 2(3) (a) 鉛ビスマス冷却炉: 概念と技術的課題

- ①高クロム鋼
- ②3次元免震
- ③安全技術:受動的的安全機構

- ④ODS鋼被覆管
- ⑤保守・補修技術
- ⑥蒸気発生器
- ⑦冷却材ポンプ

- ⑧防食技術及び耐食性材料
- ⑨窒化物燃料
- ⑩安全技術:炉心損傷時の受動的核反応停止機構



### ○建設容積・物量の削減

- ①高クロム鋼
- ⑦鉛ビスマス中浸漬型冷却材ポンプ
- ⑥鉛ビスマス中浸漬型蒸気発生器

### ○高燃焼度化と長期運転サイクルの実現

- ④ODS鋼被覆管
- ⑨窒化物燃料

### ○材料腐食対策

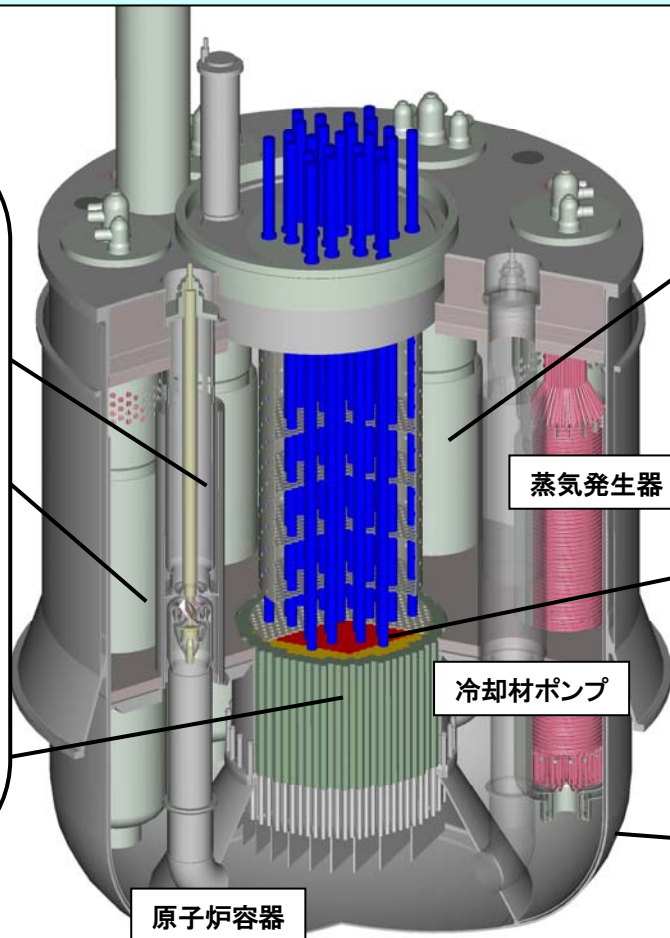
- ⑤保守・補修技術
- ⑧防食技術及び耐食性材料

### ○炉心安全性の向上

- ③受動的的安全機構
- ⑩炉心損傷時の受動的核反応停止機構(再臨界回避技術)

### ○耐震性確保

- ②3次元免震装置





## 2(3) (b) 鉛ビスマス冷却炉: 主要な技術課題とR&Dの現状等(1/3)

項目	技術課題	研究開発の現状	代替技術
防食技術及び耐食性材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>○腐食メカニズム解明及び腐食制御技術開発</li> <li>○鉛ビスマスに対する耐食性の高い構造材料・被覆管材料の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉛ビスマスに対する鋼材の防食技術は基礎的な段階であり、多くの技術課題がある。</li> <li>○FZKと共同で既存材料(12Cr鋼及びPNC-ODS鋼)を対象とした停留鉛ビスマス中腐食試験を実施し、耐食性を確保可能な温度条件が明かとした。また、流動鉛ビスマス中腐食試験を実施中</li> <li>○酸素濃度制御を中心とする腐食制御技術については未着手</li> </ul>	
窒化物燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>○窒化物燃料の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・窒化物燃料開発は基礎的な段階であり、実用化までには、N15濃縮を含め多くの技術課題がある</li> <li>○窒化物燃料の研究開発(照射試験、破損限界試験等)が必要である。</li> </ul>	
安全技術: 炉心損傷時の受動的核反応停止機構	<ul style="list-style-type: none"> <li>○溶融炉心の挙動解明</li> <li>○事故後炉心冷却技術の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○冷却材密度が大きいため、解析研究により炉心損傷時の挙動がNa炉と大きく異なるとが予測され、燃料破損後挙動等に関する、試験研究が必要不可欠である</li> <li>○設計では、集合体の上部遮蔽体を削除した集合体概念が考えられるが、溶融燃料の排出能力について試験による確認が必要</li> <li>○液面近傍まで浮上した溶融炉心の冷却方法が未検討</li> </ul>	
ODS鋼被覆管	<ul style="list-style-type: none"> <li>○高燃焼度化(炉心平均燃焼度150GWd/t、ピーク燃焼度250GWd/t、)に向けた照射試験データの整備</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高Ni鋼及びフェライト鋼で、照射温度600℃程度、燃焼度230GWd/tの照射実績あり</li> <li>・国産材料としては、オーステナイト鋼(PNC1520)で、照射温度650℃、燃焼度160GWd/tの照射実績あり</li> <li>○ロシアの実験炉BOR-60においてODS鋼の燃料ピンを照射中で、現在の到達燃焼度は50GWd/t、温度720℃である</li> <li>○常陽でのピン照射試験を準備中である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ PNC/FMS鋼</li> <li>・適用可能な温度はODS鋼に劣るが、燃焼度はODS鋼と同等の見込み</li> </ul>



## 2(3) (b) 鉛ビスマス冷却炉: 主要な技術課題とR&Dの現状等(2/3)

項目	技術課題	研究開発の現状	代替技術
保守・補修技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>○腐食環境下の構造材料検査技術</li> <li>○<math>\alpha</math>線源であるポロニウム210を含む冷却材を内包した機器の保守性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○検査技術に関しては、ナトリウム炉でのISI技術が適用可能と推定されるが、鉛ビスマス環境では構造材料表面に酸化物の堆積等があり条件は異なる。腐食及び酸化皮膜を考慮した検査技術開発が必要となる</li> <li>○ポロニウム210については、基礎的な検討によりプラント低温停止時には冷却材中に保持され、保守作業は可能と考えられる</li> </ul>	
蒸気発生器	<ul style="list-style-type: none"> <li>○伝熱管破損時の気泡の大規模炉心流入防止対策</li> <li>○伝熱特性の把握</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○簡易評価により、SG出口部に邪魔板を設けることにより大規模な気泡流入を防止できる見通しを得た</li> <li>○気泡流入を減少させる設計対策、安全システム等の実証、試験データの取得が必要となる</li> <li>○長期にわたる伝熱特性データの取得が必要</li> </ul>	
冷却材ポンプ	<ul style="list-style-type: none"> <li>○インペラのエロージョン対策</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ポンプインペラ表面では、周速度が10~20m/secとなりエロージョンが発生する可能性がある。文献調査等から健全性を確保可能と考える周速度を設定しているが、今後、試験研究が必要となる</li> </ul>	
高クロム鋼	<ul style="list-style-type: none"> <li>○原子炉構造への高クロム鋼適用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○鉛ビスマス冷却材環境では、ニッケルを含有する316FR鋼は使用できないため、原子炉構造材料としては高クロム鋼を想定した</li> <li>○ナトリウム炉と異なり原子炉構造にも適用するため、炉心支持構造等の高照射環境での材料特性等の試験データの取得が必要となる</li> </ul>	



## 2(3) (b)鉛ビスマス冷却炉: 主要な技術課題とR&Dの現状等(3/3)

項目	技術課題	研究開発の現状	代替技術
3次元免震	○高耐荷重3次元免震装置の開発	○鉛ビスマス冷却炉では冷却材重量が大きく、地震応答低減のために3次元免震が必須となるが、ナトリウム冷却炉にむけて開発中の免震装置では耐荷重が不足している ○耐荷重の大きな免震装置の開発が必要となる	
安全技術: 受動的 安全機構	○高密度冷却材中での制御棒挿入機構の開発	○高密度冷却材中で重力を利用して挿入可能な、錘をつけた自己作動型炉停止機構を開発するために、炉内・炉外試験研究が必要となる	





## 2(3) (b) 鉛ビスマス冷却炉

### 難易度の高い課題に関する成果の現状と今後の課題(1/3)

#### 防食技術及び耐食性材料開発

##### ○研究開発の現状

- FZKとの共同研究により、候補材料(PNC-ODS鋼、12Cr鋼)について停留及び流動鉛ビスマス中浸漬試験(図1に結果を例示)を実施
- 酸化皮膜による鋼材の防食技術の原理を確認するとともに、腐食速度等、設計に必要な基礎的なデータを取得
- 設計に関わる主要な成果は以下のとおり、
  - 燃料集合体のエロージョン防止のため、燃料集合体内冷却材流速を2m/s程度に制限(Na炉では6m/s程度)
  - 燃料被覆管の腐食防止のため、炉心最高温度は570°Cに制限され(Na炉では700°C)、その結果、原子炉出口温度は445°C程度になる
  - これらの制限によりMOX燃料では十分な炉心性能を得られず、開発課題が大きい窒化物燃料が必要となる

##### ○今後の開発課題

1. 腐食メカニズムの解明と腐食データ取得  
酸化膜による防食メカニズムについて、その詳細な挙動を明らかにするとともに、腐食データの拡充が必要  
→本課題は、鉛ビスマス冷却材を利用するための基礎的な開発課題であり、原子炉で利用するためには必須の技術。
2. 腐食制御技術の開発  
冷却材中酸素濃度を材料腐食が発生しない範囲内に、全ての冷却材バウンダリ内で、安定的に保つ技術の開発  
→原子炉冷却システム内は種々の温度・流速条件があり、全ての部位で腐食を制御する技術は大きな開発課題となる
3. 質量移行特性の解明  
腐食生成物(鉄酸化物)は温度の高い部位から低い部位に移行する特性を持つ。質量移行に対応した技術・設計の開発が必要  
→本課題は、鉛ビスマス冷却材を利用するための基礎的な開発課題であり、原子炉で利用するためには必須の技術。
4. 高耐食性材料の開発  
炉心性能、プラント性能向上のためには耐食性の高い新材料の開発が必要である。

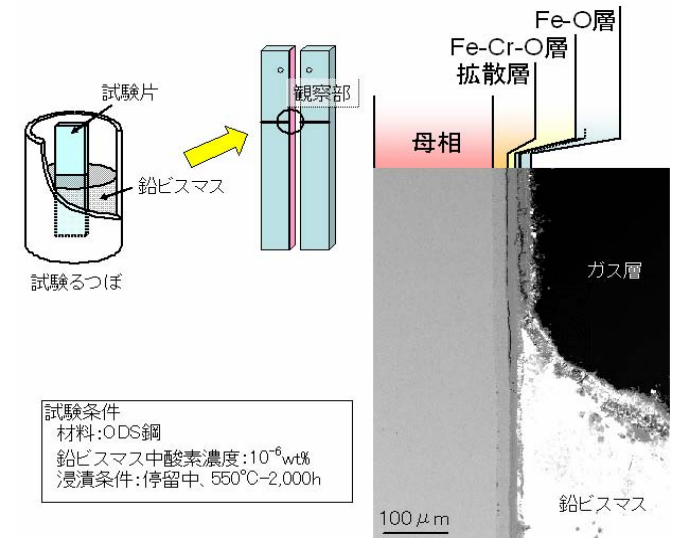


図1 鉛ビスマス浸漬材の断面観察結果

全ての課題は基礎知見に乏しく、かつ代替技術が見あたらない。

↓  
開発に高いハードル



## 2(3) (b)鉛ビスマス冷却炉

### 難易度の高い課題に関する成果の現状と今後の課題(2/3)

#### 窒化物燃料

##### 研究開発の現状

- 窒化物燃料は、放射化生成物C-14の生成を抑制するため、N-14を含まない窒素を用いる。想定する窒化物燃料は、N-15(自然界では0.37%)を100%まで濃縮する。現在、N-15の濃縮コストは10万円/g程度であるが、新濃縮技術(気相吸着法)の実用化に期待し、濃縮コスト1000円/gとして経済性を評価した。気相吸着法は、要素技術の開発と工学的成立性の確認のため、濃縮メカニズムの解明、濃縮プロセスの開発、等を実施しているが研究段階にある。
- 窒化物燃料開発は基礎的な段階にあり、MOX燃料や金属燃料と比較して、照射実績が圧倒的に少ない。わが国における高速炉での窒化物燃料ペレットの照射実績は、実験炉「常陽」における2本の燃料ピン(燃焼度約40GWd/t)のみである。

##### 今後の開発課題

- N-15濃縮コストの低減  
本課題は、窒化物燃料を利用するために必須の開発課題である。圧カスイング法による気相吸着法が有望であるが、今後、小規模試験による同位体濃縮メカニズムの解明、分離効率の確認、工学試験にて工業化データの取得、経済性の確認が必要である。
- 照射特性の把握  
実験炉等での照射データの拡充が必要。



## 2(3) (b)鉛ビスマス冷却炉

### 難易度の高い課題に関する成果の現状と今後の課題(3/3)

#### 安全技術:炉心損傷時の受動的核反応停止機構

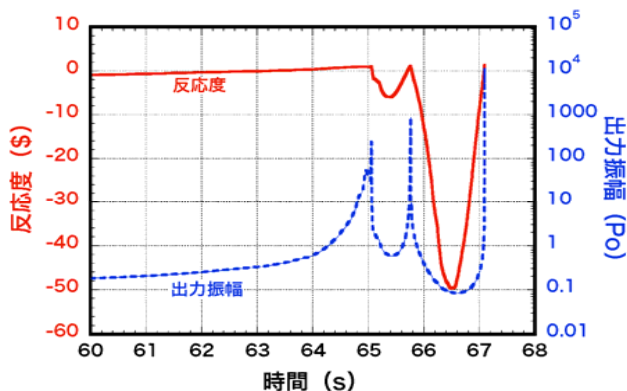
##### 成果の現状

- 鉛ビスマス冷却窒化物燃料炉の炉心崩壊事故の事象推移をSIMMER-IIIコードで解析し、高い密度と沸点を持つ鉛ビスマス冷却炉特有の事象推移を明らかにした。照射済み窒化物燃料の加熱試験結果を参考に設定した過渡時スウェリング特性を用いたところ、燃料のスウェリングによる密度低下で燃料が冷却材中を浮上することで厳しい再臨界を回避できる可能性のあることが示された。
- 炉心崩壊後の崩壊熱除去過程の事象推移を検討し、冷却材液面に浮上した燃料からの崩壊熱を除去するため、遮蔽プラグ及び液面上の炉容器壁を冷却するシステムが必要となるとの結論を得た。

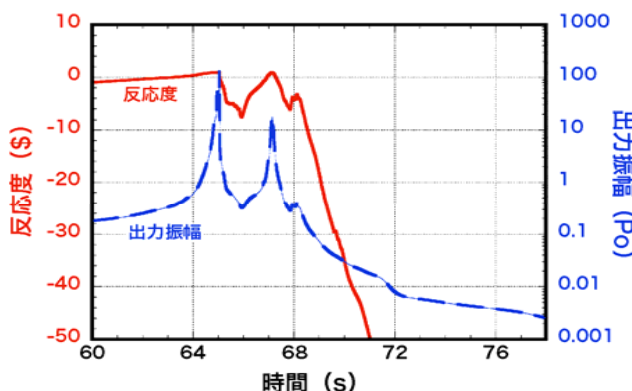
##### 今後の課題

- 鉛ビスマス冷却下での窒化物燃料の破損および急速加熱条件下での過渡スウェリング挙動等の破損後挙動に関するデータ取得
- 損傷窒化物燃料の原子炉上部プレナムでの移行挙動の定量的評価とそれに基づく冷却設備の具体化

#### 窒化物燃料のスウェリング挙動把握と原子炉容器液面での冷却確保が必要

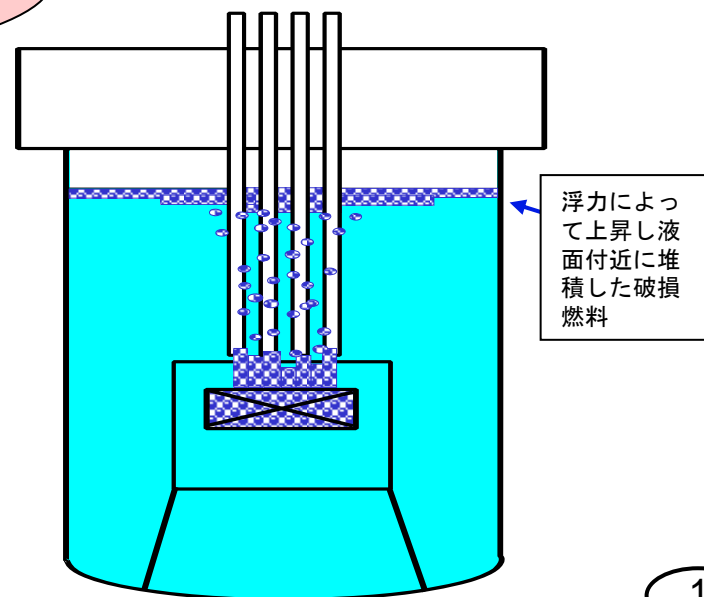


(a) 燃料スウェリングなし



(b) 燃料スウェリングあり

鉛ビスマス冷却窒化物燃料炉の炉心崩壊事故における出力・反応度履歴

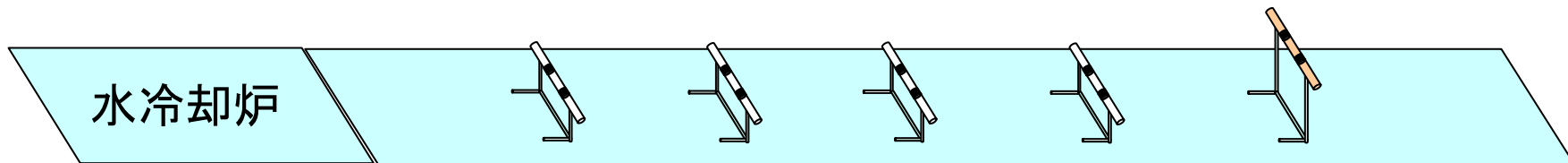




## 2(4) (a) 水冷却炉: 概念と技術的課題

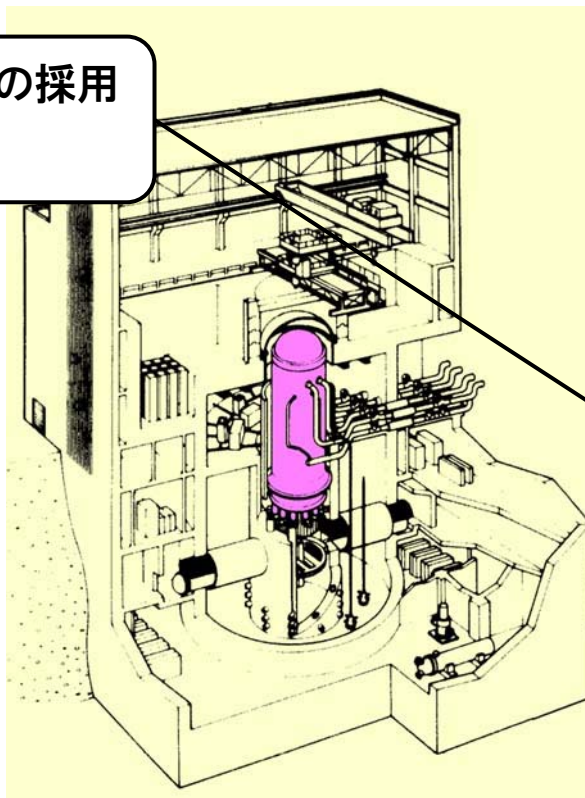
- ①安全技術: 炉心損傷時の受動的核反応停止機構
- ②高稠密格子炉心の冷却性
- ③燃料集合体の機械的成立性
- ④運転制御性

⑤被覆管材料



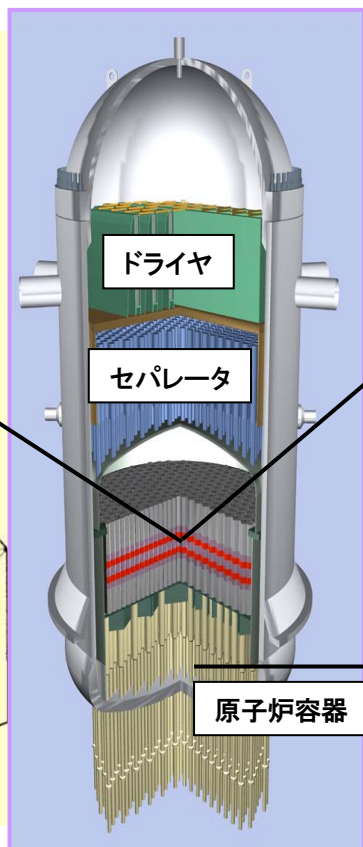
○自然循環冷却の採用

④運転制御性



○増殖性を確保するための炉心設計

- ②高稠密格子炉心の冷却性
- ③燃料集合体の機械的成立性
- ⑤被覆管材料



○炉心安全性の向上

- ①炉心損傷時の受動的核反応停止機構(再臨界回避技術)



## 2(4) (b) 水冷却炉: 主要な技術課題とR&Dの現状等

項目	技術課題	研究開発の現状	代替技術
燃料被覆管材料	○沸騰水環境・高速中性子場で 燃焼度100GWd/t程度まで使用 可能な燃料被覆管材料の開発	○水冷却炉の被覆管候補材料として、ジルカロイ-2等のZr系合金と、25Cr-35Ni-0.2Ti系オーステナイト系ステンレス鋼(改良SUS)の2種を選定した。 ○Zr系合金については、現行軽水炉の高燃焼度燃料用材料として、現行のジルカロイ-2よりも耐食性や耐水素吸収性に優れた改良Zr合金の開発が産業界で進められている。 ○改良SUS材について、材料評価試験等により耐IASCC改良の有効性を確認しており、今後中性子照射試験をおこない、照射実績データを蓄積していく予定である。	
炉心損傷時の 影響緩和対策	○炉心損傷時の再臨界回避方策 の具体化と有効性の確認	○炉心損傷事故時の事象推移における再臨界の可能性の有無を評価し、再臨界回避のための対策を検討している。 ○下部プレナムへの中性子吸収材設置により、熔融蓄積物の再熔融に起因する再臨界の発生を防止できる可能性がある。	
高稠密格子炉心の 冷却性	○燃料棒間隔1mm程度の稠密 格子体系での除熱性能の確認	○37本バンドルを用いた実機条件での大型熱特性試験を実施し、燃料棒間隔幅1mm程度までの高稠密格子体系での熱特性データを取得し、除熱限界並びに燃料間隔幅効果を明らかにし、高稠密格子炉心の熱工学的成立性を見通しを得た。	
燃料集合体の 機械的成立性	○燃料集合体・炉内構造の健全性 の確認	○現行軽水炉の設計をベースに集合体・炉心部構造の概念検討を実施し、構造の基本的成立性についての見通しを得た。詳細設計の段階で健全性の確認試験を行う予定である。	
運転制御性	○自然循環冷却方式を採用した 場合の運転・制御性の確認	○冷温停止状態から全出力状態にいたる起動時を含む運転特性を3次元核熱解析により評価し、成立する見通しである。 ○オランダのDode-warrd炉等で、自然循環BWRの運転経験・知見が豊富に蓄積されてきており、次世代軽水炉として米国で提案されているESBWRでは、自然循環冷却方式が採用されている。このような状況から、沸騰水型炉では自然循環炉の運転制御性は克服可能と考えられる。	



### 3. 技術的実現性 — 国際的視点

	ナトリウム冷却炉	ヘリウムガス冷却炉	鉛ビスマス冷却炉	水冷却炉
国際的視点	国際協力を期待することが可能	国際協力を期待することが可能	国際協力を期待することが困難	国際協力を期待することが困難
	GIF での活動が活発で、国際標準の概念へ発展していく可能性がある。また、共同開発による革新技術のブレークスルー、開発分担による効率的開発が期待できる。	GIF での活動により、国際標準の概念へ発展していく可能性がある。また、概念成立性に係わる課題が解決されれば、技術的実現性をより向上させることができる。	GIF での活動において開発を主導する国が無く、概念成立性に係わる課題をブレークスルーできる可能性が低い。	GIF での候補概念に取り上げられていないため、現状では基盤的な研究協力内容に限定される。
国際協力の現状	GIF の枠組みにおいて、日本、米国、仏国、英国、韓国を参加国とするシステム運営委員会が設置されるとともに、このシステム運営委員会の下部組織として、4つのプロジェクト管理会議（設計・安全、先進燃料、機器設計・BOP、国際アクチノイド燃料サイクル）が組織されている。 2006年2月にシステム・プロジェクト協定が締結され、有望候補概念についてのシステム研究計画が取りまとめられるなど、4つのプロジェクト管理会議が活発に運営されている。	GIF の枠組みにおいて、米国、仏国、日本、英国、韓国、スイス、南アフリカ、EUを参加国とするシステム運営委員会が設置されるとともに、このシステム運営委員会の下部組織として、3つのプロジェクト管理会議（燃料・材料・燃料サイクル、設計・安全、材料・機器）が組織されている。 2006年2月にシステム・プロジェクト協定が締結され、有望候補概念についてのシステム研究計画が取りまとめられる等、活発な活動が継続している。	GIF の枠組みにおいて、日本、米国、EUを参加国とするシステム運営委員会が設置されるとともに、この下部組織として5つのプロジェクト管理会議（システム設計、腐食・材料、燃料・材料、エネルギー変換技術、BOP・経済性）が組織されている。 しかしながら、システム研究計画の取りまとめは、諸に付いたばかりである	2004年12月に米国DOEとの間で研究開発協力取決めを締結し、低減速軽水炉の炉心核設計手法および熱設計手法に関する共同研究を進めている。 また、仏国CEAより、高転換軽水炉(HCLWR)についての情報交換、評価に関する研究協力の提案を受けている。

# 高速増殖炉システムに係る 国際的な研究開発状況





# 1. 主要国の高速炉導入機運の高まり

- フランス(2006年1月5日、シラク大統領)
  - 第4世代原子炉のプロトタイプを2020年に運転開始するとの目標明示
- アメリカ(2006年1月一般教書演説、ブッシュ大統領)
  - グローバル原子力パートナーシップ(GNEP)計画を提唱。ここでは、2014年頃にNa冷却高速炉の先進燃焼試験炉、2023年頃に商用1号炉を運転開始
  - また、2011年に分離技術の工学規模実証施設、2016年に先進的分離技術と燃料製造技術の試験施設AFCFを運転開始
- ロシア
  - 停滞していたBN-800炉の建設を再開するため連邦予算を計上
- 中国
  - 実験炉を建設中。2030年に商用炉の運転開始
  - 2050年頃に200GWe程度のFBRの設備容量を計画
- インド
  - 2010年に原型炉50万kWe(建設中)。2020年までに4基のFBRを建設。
  - 2050年頃に270GWe程度の原子力の設備容量(FBRの割合は不明)

(参考)

日本の発電設備容量  
(平成16年度末推定実績)  
・総発電設備容量: 238GWe  
・原子力: 47GWe





## 2. 主要国の高速炉導入シナリオの概要(1/2)

- フランスでは2020年頃から次期軽水炉(EPR)で既存のLWRを置き換え(設備容量の50%程度)、2035年頃からのFBRの商用導入を基本シナリオとしている。放射性廃棄物による環境負荷低減及びエネルギー回収の観点から、全アクチノイドを回収し、FBRの燃料として利用するGAM(グローバルアクチノイドマネジメント)計画を進めている。
  - 2006年初頭、シラク大統領が発表したエネルギー政策の中で、第4世代原子炉のプロトタイプの運転を2020年に開始するとの目標を設定した。これは野心的な目標であり、上記の計画(2035年頃からの商業運転開始)を早めるものである。
- アメリカでは、2000年からGEN-IV(第4世代原子力システム計画)を開始した。共和党ブッシュ政権になり、2001年には原子力を重要な国家戦略とするNEP(国家エネルギー政策)を発表した。2003年からは「処分する高レベル廃棄物(使用済燃料)を減容すること」、「毒性の高い元素の分離」及び「貴重なエネルギー源を再利用をすること」を目的として、燃料サイクルの研究開発を行うAFCEI(先進的核燃料サイクルイニシアチブ)を開始した。また、第4世代の商用1号炉を2030年頃に導入することを目指していた。
  - しかし2006年2月、DOEが発表した2007会計年度の予算要求では、AFCEIの一環としてグローバル原子力パートナーシップ(GNEP)を立ち上げるために2億5千万ドルを要求するとした。分離技術(UREX+)の工学規模実証施設を2011年に運開、先進的分離技術と燃料製造技術の試験施設AFCEIを2016年に運開、またナトリウム冷却高速炉の先進燃焼炉試験炉を2014年頃に運開、同商用1号炉を2023年頃に運開としている。核拡散抵抗性のあるリサイクル技術の開発のために先進諸国と協力するとともに、その先進諸国パートナーも又、途上国が濃縮・再処理を行わないとの約束と引き替えに、核燃料を供給するとの構想。



## 2. 主要国の高速炉導入シナリオの概要 (2/2)

- **ロシア**では、2004年にロシア議会在が、BN-800の建設再開も含めFBR建設と核燃料サイクル開発計画の達成を基本とする持続的な経済発展のためのエネルギー戦略(2005~2010年)を承認した。2030年頃の既存炉を含めた原子力発電の設備容量は約60GWeとしている。
- **中国**では、原型炉「CPFR: 60万kWe」、実証炉「CDFR: 100~150万kWe」、商用炉「CCFR: 100~150万kWe」の計画がある。商用炉の運転開始目標は2030年としている。2050年頃のFBRの設備容量は200GWe程度と予測しており、増殖比を高め倍增時間を短くすることを重視し、金属燃料を用いたFBRサイクルを基本としている。
- **インド**では、原型炉「PFBR: 50万kWe」の2010年完成を目指して建設中であり、将来的には2020年までに4基のFBRプラントを建設する計画としている。2050年頃の原子力の設備容量は270GWe程度と予測している(FBRの割合は不明)。



### 3. 高速炉システム開発に係る主要な国際協力プロジェクト(1/3)

#### ー第4世代原子炉システムに関する国際的プログラム(GIF)ー

- 日仏米が中心となり、10カ国＋1機関が参画した国際共同研究開発
- 2030年頃に初号機の導入を目標
- 2015～2020年頃までで研究開発を終了し、その後は実証試験を行う予定(現在は研究開発課題とその協力体制について議論中)
- 検討対象6概念の内、3概念が高速炉

#### 開発目標

##### (1) 持続可能性

- ① 資源有効利用性
- ② 環境負荷低減性  
(廃棄物の最小化と管理)
- ③ 核拡散抵抗性

##### (2) 経済性

- ① コスト(資本費、運転費、燃料費)
- ② 投資リスク

##### (3) 安全性と信頼性

- ① 通常運転時の安全性と信頼性
- ② 炉心損傷防止
- ③ 敷地外緊急時退避不要

#### 検討対象の6概念

- ・ナトリウム冷却高速炉(SFR)  
: 日、仏、米等5カ国
- ・ガス冷却高速炉(GFR)  
: 仏、米、日等7カ国＋1機関
- ・鉛冷却高速炉(LFR)  
: 2カ国＋1機関
- ・超高温炉(VHTR)
- ・超臨界水冷却炉(SCWR)
- ・熔融塩炉(MSR)

参加国: 10カ国＋1機関

アルゼンチン、ブラジル、カナダ、フランス、日本、韓国、南アフリカ、スイス、イギリス、アメリカとEU



### 3. 高速炉システム開発に係る主要な国際協カプロジェクト(2/3)

## —革新的原子炉・核燃料サイクルに関する国際プロジェクト (INPRO)—

### INPROの評価指標

経済性	エネルギーの価格が手頃で、利用可能（エネルギーコスト、投資額、投資リスクなど）
安全性	深層防護とその各層の独立性の強化 固有の安全特性と受動的安全性の充実、など
環境	環境への悪影響が現状の原子力システムの範囲内 資源の効率的利用による21世紀のエネルギー需要に対応可能
廃棄物管理	放射性廃棄物が実行可能なレベルで最小化、など
核拡散抵抗性	核拡散抵抗性の特性と手段が核兵器計画のための核分裂物質を獲得できないようになされていること、など
インフラストラクチャー	インフラにおいて過度の投資を行うことなく導入できるオプションが提供できる(国際的な体制など)

### INPROの当面の展開

フェーズ 1A	2001年M～2003年M	評価手法を策定
フェーズ 1B part1	2003年M～2004年	評価手法を用いたケーススタディにより、評価手法を検証、改定
フェーズ 1B part2	2005年～	革新的原子炉システム(INS)に対する評価
フェーズ 2	2006年M～	各国がINSを開発、実証、導入するための支援活動



### 3. 高速炉システム開発に係る主要な国際協カプロジェクト(3/3)

## ーグローバル原子カパートナーシップ(GNEP)ー

2006年2月6日 米国エネルギー省(DOE)発表

ブッシュ大統領の先進エネルギー・イニシアティブの一環として、サミュエルW. ボドマンDOE長官は本日、グローバル原子カパートナーシップ(GNEP)を立ち上げるため、2007会計年度に2億5千万ドルの予算要求を行う旨発表した。この新たなイニシアティブは、核燃料のリサイクルや廃棄物最小化のための新技術を実証・整備し、原子カ技術がテロリスト集団の手に渡るのを防ぐ能力を高めることで、ガス放出のない原子カを全世界に拡大しようとする包括的な戦略である。

ボドマン長官は、「GNEPは、核拡散の脅威を低減させつつ、地球上の開発途上経済に対し、環境に優しい方法で事実上無限のエネルギーを供給する明るい見通しをもたらす。もしGNEPが実現できれば、我々は世界を今よりも望ましくクリーンで且つ安全な住処にすることができる」と述べた。

米国及び世界の経済が成長を続ける中、豊富なエネルギー資源に対する需要も同様に増加していくと思われる。原子カは、安全で環境上クリーンで、信頼性があり、且つ安価である。米国は、より多くのエネルギーを生産し、廃棄物を減らし、核拡散上の懸念を最小限にとどめることを目的として、核拡散抵抗性のある新たなリサイクル技術を開発するため、GNEPを通じ、先進原子カ技術を持つ他の諸国と協力していく。更にこれらのパートナーとなる諸国もまた、開発途上国が濃縮や再処理を行わず核拡散上の懸念を緩和するとの約束と引換えに、コストがかからずクリーンで安全な原子エネルギー源の恩恵を豊富に享受できるよう、これら途上国に核燃料を供給する計画を策定する。

GNEPは4つの主要目標を持っている。第1の目標は、外国の化石燃料への米国の依存度を減らし、経済成長を促進することである。第2は、より多くのエネルギーを再生し且つ廃棄物を減らす新たな核拡散抵抗性ある技術を用いて、核燃料の再生利用を図ることである。第3は、世界の繁栄とクリーンな開発を助長することである、第4は、世界の核拡散のリスクを減らすため最新の技術を利用することである。

GNEPの戦略は本日ボドマン長官が説明した通り、以下の7つの要素を含んでいる。

1. 米国内に新世代の原子カ発電所を建設すること
2. 新たな核燃料リサイクル技術を開発し、整備すること
3. 米国内の使用済み核燃料を効率的に管理し、最終的には国内にて貯蔵するよう努めること
4. 再生された核燃料からエネルギーを生産する先進燃焼炉(ABR)を設計すること
5. 核拡散のリスクを最小化しつつ、開発途上国が経済的に原子カを獲得・利用できるような燃料供給サービス計画を確立すること
6. 開発途上国のニーズに応えるような小規模な原子炉を開発・建設すること
7. 拡大された原子カ発電所の核拡散抵抗性及び安全性を強化するための保障措置を改良すること

GNEPの推進にあたり、DOEは米国務省と協力しつつ、国際的なパートナーに対し、この新たなイニシアティブに参加するよう働きかけていく。