


主な変更点

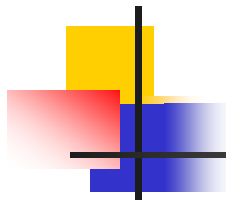
・「高速増殖炉」「高速炉」等に関わる用語の整理



# 我が国における高速増殖炉サイクル に関する研究開発の現状(改訂版)

---

平成17年2月10日



# 目次

---

## 1. これまでに得られている成果

- 1.1 高速増殖炉の特徴と主な研究開発項目
- 1.2 高速増殖炉の研究開発成果  
(補足)「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故後の改善
- 1.3 燃料サイクルの特徴と主な研究開発項目
- 1.4 燃料サイクルの研究開発成果

## 2. 実用化に向けた見通し

- 2.1 実用化戦略調査研究の経緯と目的
- 2.2 実用化戦略調査研究の進め方と目指すべき成果
- 2.3 フェーズ の成果
- 2.4 フェーズ の進め方
- 2.5 フェーズ 中間取りまとめ
- 2.6 高速増殖炉サイクルの研究開発投資効果
- 2.7 実用化戦略調査研究のまとめ

## 3. もんじゅの役割

## 4. 研究開発の現状のまとめ

## 添付資料



## 1. これまでに得られている成果

---



## 1.1 高速増殖炉の特徴と主な研究開発項目

### 特徴1: エネルギーの高い中性子(高速中性子)による核反応

- 燃料を増殖するための炉心設計
- 高速中性子照射に強い被覆管材料の開発
- 炉心安全性の確保

### 特徴2: 伝熱特性の良い冷却材<sup>注1)</sup>

- 高温条件の構造設計と材料の開発
- ナトリウム冷却材用機器の開発<sup>注2)</sup>
- 伝熱特性の良さを考慮した熱流動設計

### 特徴3: 化学的に活性な冷却材<sup>注2)</sup>

- ナトリウム漏えいに対する安全対策
- 蒸気発生器の開発と伝熱管破損に対する安全対策
- 不透明な冷却材<sup>注3)</sup>を不活性雰囲気<sup>注3)</sup>で扱う保守補修技術の開発

注1: 燃料ピンを密に配置しているため高い除熱性能が必要

注2: ナトリウム冷却高速増殖炉の場合

注3: 冷却材が不透明なため、冷却材中の機器の目視ができない

## 1.2 高速増殖炉の研究開発成果(1/5)

### 進め方:

高速増殖炉の開発は、実用化に向け実験炉から原型炉へとステップを踏み進めてきた。その成果を踏まえ、経済性があり、信頼性の向上した実用炉に向けた研究開発を柔軟性を持たせつつ進めている。

### 実用炉



高い経済性と信頼性を備えた発電プラントシステム

### 実用化戦略調査研究:

経済性・信頼性を向上させる革新技术の開発

原型炉「もんじゅ」・発電プラントとしての信頼性の実証  
・ナトリウム取り扱い技術の確立



出力 : 714MWt / 280MWe  
温度 : 529

### 実験炉「常陽」



・高速増殖炉の原理の確認  
・安全かつ安定的な運転の実証

出力 : 50MWt	100MWt	140MWt
温度 : 435	500	500

発電システム技術開発、  
スケールアップ、高性能化



## 1.2 高速増殖炉の研究開発成果(2/5)

### 特徴1: エネルギーの高い中性子による核反応

#### ■ 燃料を増殖するため炉心設計

- 「常陽」と「もんじゅ」で燃料を増殖できることを確認した。  
(増殖比: 「常陽」1.03、 「もんじゅ」1.18 ) 炉物理試験に基づく評価結果

#### ■ 高速中性子照射に強い被覆管材料の開発

- 「常陽」を始め国内外の照射炉を活用して被覆管材料を開発し、燃焼度を段階的に向上させてきた。  
「常陽」2.1万MWd/t → 4万MWd/t → 7万MWd/t、 「もんじゅ」8万MWd/t
- 燃料コスト削減に向けて、さらなる高燃焼度化(15万MWd/t)を目指し新たな被覆管材料を開発している。

#### ■ 炉心安全性の確保

- 日欧米共同で安全性試験研究や安全解析コードの開発・改良を進め、「常陽」から「もんじゅ」へと炉心の大型化に対応して、適切な安全裕度を確保した安全評価が可能になった。
- 実用化に向けた炉心大型化に備え、炉心損傷を防止する受動的な安全機能の強化や、炉心損傷時の影響を大幅に緩和する方策を開発している。



## 1.2 高速増殖炉の研究開発成果 (3/5)

### 特徴2：伝熱特性の良い冷却材

#### ■ 高温条件の構造設計・材料の開発

- 構造設計において、「常陽」では米国の構造設計基準の準用による保守的な設計がなされた。「もんじゅ」ではJIS規格材料用の高温構造設計基準を整備することにより、合理的な設計が可能になった。
- 実用化に向けて、高温強度に優れた新材料の開発とそれに適合する高温構造設計基準の改良を進めている。

#### ■ ナトリウム冷却材用機器の開発

- 中間熱交換器、ポンプ等のナトリウム冷却材用機器の開発を進め、「常陽」、「もんじゅ」と段階的に大容量化を達成してきた。
- さらなる経済性向上を目指し、大容量かつコンパクトな新型機器を開発している。

#### ■ 伝熱特性の良さを考慮した熱流動設計

- プラント全体や各機器内部の熱流動現象を模擬した試験、解析コードの開発を、国際協力も活用して実施し、「常陽」、「もんじゅ」と段階的に詳細な設計が可能になった。



## 1.2 高速増殖炉の研究開発成果(4/5)

---

### 特徴3: 化学的に活性な冷却材

- ナトリウム漏えいに対する安全対策
  - ナトリウム漏えい・燃焼試験等により、ナトリウム燃焼挙動解析コードを開発し、これを用いてナトリウム漏えい事故時の影響緩和対策を確立した。
- 蒸気発生器の開発と伝熱管破損に対する安全対策
  - 伝熱特性に優れコンパクトなヘリカルコイル型伝熱管を用いた蒸気発生器を開発した。
  - 伝熱管破損事故時のナトリウム-水反応解析コードを国際協力も活用して開発し、これを用いて同事故時の影響緩和対策を確立した。
- 不透明な冷却材を不活性雰囲気で扱う保守補修技術の開発
  - 「常陽」では、中間熱交換器やポンプ等の機器の改良・交換・補修経験を蓄積し、ナトリウム機器の補修技術を習得した。
  - 「もんじゅ」では、ナトリウム配管、蒸気発生器伝熱管等の健全性を確認できる検査装置を開発した。





## (補足) 「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故後の改善 (1/2)

---

### ◆事故の内容:

- ・ 1995年12月8日に、2次主冷却系の温度計さやの設計ミス等により、当該さやが破損。推定約0.7トンのナトリウムが漏えい。
- ・ さらに、当時の動力炉・核燃料開発事業団(動燃)が事故現場を撮影したビデオを隠すなどの不適切な対応があったことから、地元や国民に不安感、不信感を与えることとなった。

### ◆改善策:

- ・ 当時の科学技術庁、原子力安全委員会において、事故の原因究明と再発防止策について検討。さらに、科学技術庁、動燃は、安全性総点検(ナトリウム漏えい関係設備や運転手順書の点検等)を実施。その結果、2次系温度計の改良、ナトリウム漏えい対策等の事故の改善策を取りまとめ、改造工事を実施することとした。(現在、改造工事の地元了解待ち)
- ・ 動燃の抜本的改革を通じて国民の信頼回復を図るべく、意識改革、事故時対応のための体制整備、情報公開、地元との連携等という基本的方向性の下、1998年10月、動燃を核燃料サイクル開発機構に改組。

# (補足)「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故後の改善策(2/2)

## ナトリウム漏えい未然防止対策

### 2次冷却系温度計の交換・撤去工事

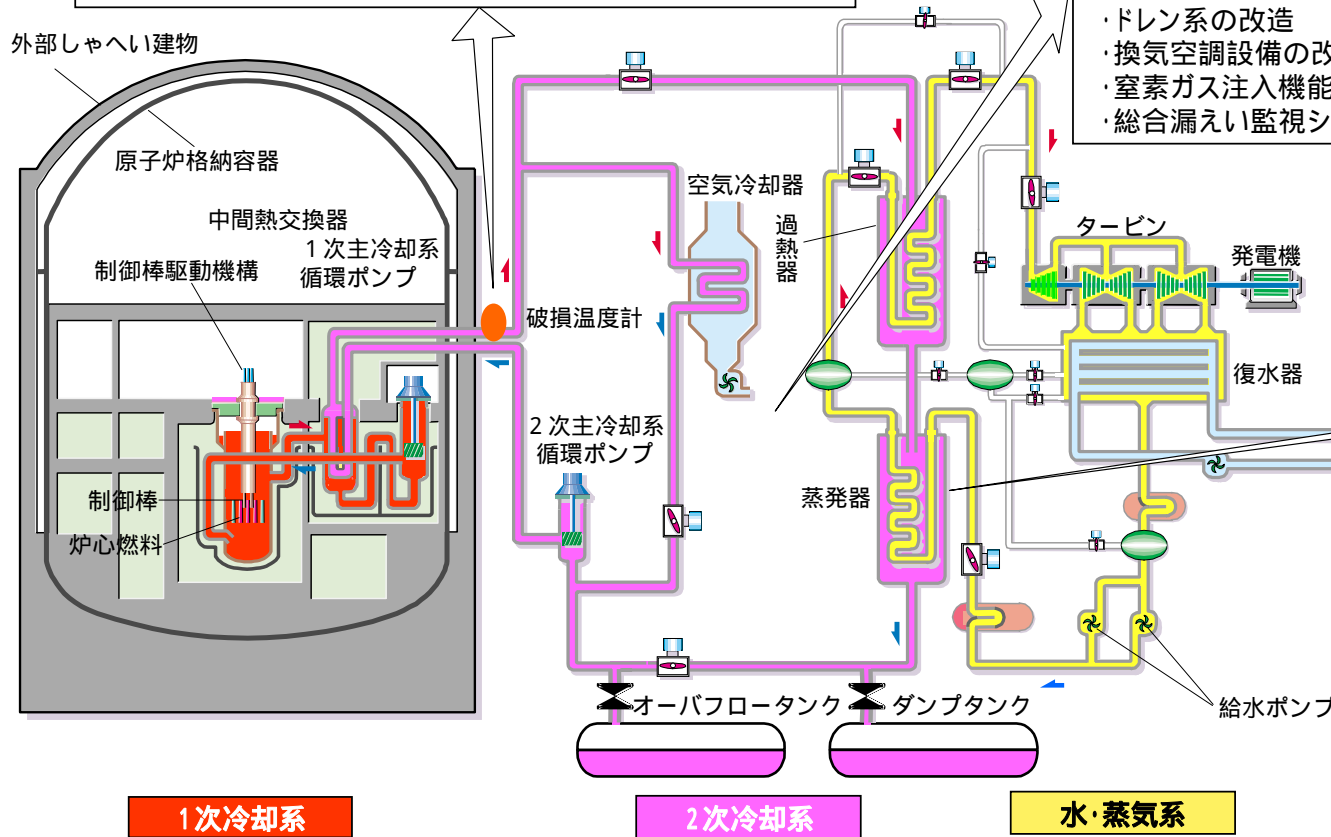
ナトリウムの流れによる振動を防止するため、42本について温度計さやを短く、テーパ形状にした改良型温度計に交換し、6本を撤去

## ナトリウム漏えい影響緩和対策

### ナトリウム漏えいに対する改善工事

漏えいを早期に終息させ、ナトリウム燃焼などによる建物・構築物への影響をより一層抑制するため、

- ・セルモニタの設置
- ・ドレン系の改造
- ・換気空調設備の改造
- ・窒素ガス注入機能の追加及び区画化
- ・総合漏えい監視システムの設置 を実施



## ナトリウム-水反応影響緩和対策

### 蒸発器ブローダウン性能の改善工事

- ・伝熱管からの水漏えいを確実に検出するため、カバーガス圧力計を追加設置
- ・また、水・蒸気系のブローダウンをより早期に完了させるため、放出弁を追加設置



## 1.2 高速増殖炉の研究開発成果(5/5)

---

### [まとめ]

- ナトリウム冷却高速増殖炉については、「常陽」、「もんじゅ」の設計、建設、運転等により、その技術的な成立性は確認できている。

なお、「もんじゅ」の事故後の対応を通して得た、ナトリウム漏えいの未然防止対策や影響緩和対策等に関する多くの知見は、改造工事計画に反映した。これらの知見は今後の高速増殖炉開発にも有効に活用していくこととする。



## 1.3 燃料サイクルの特徴と主な研究開発項目

### 特徴1：プルトニウム濃度が高い燃料

- ウラン/プルトニウム回収プロセスの開発
- 厳しい臨界管理対策
- 核不拡散対策

### 特徴2：放射線量及び発熱量が高い燃料

- 放射線による抽出剤の劣化対策
- 遠隔自動製造システムの開発

### 特徴3：マイナーアクチニド(MA) のリサイクル

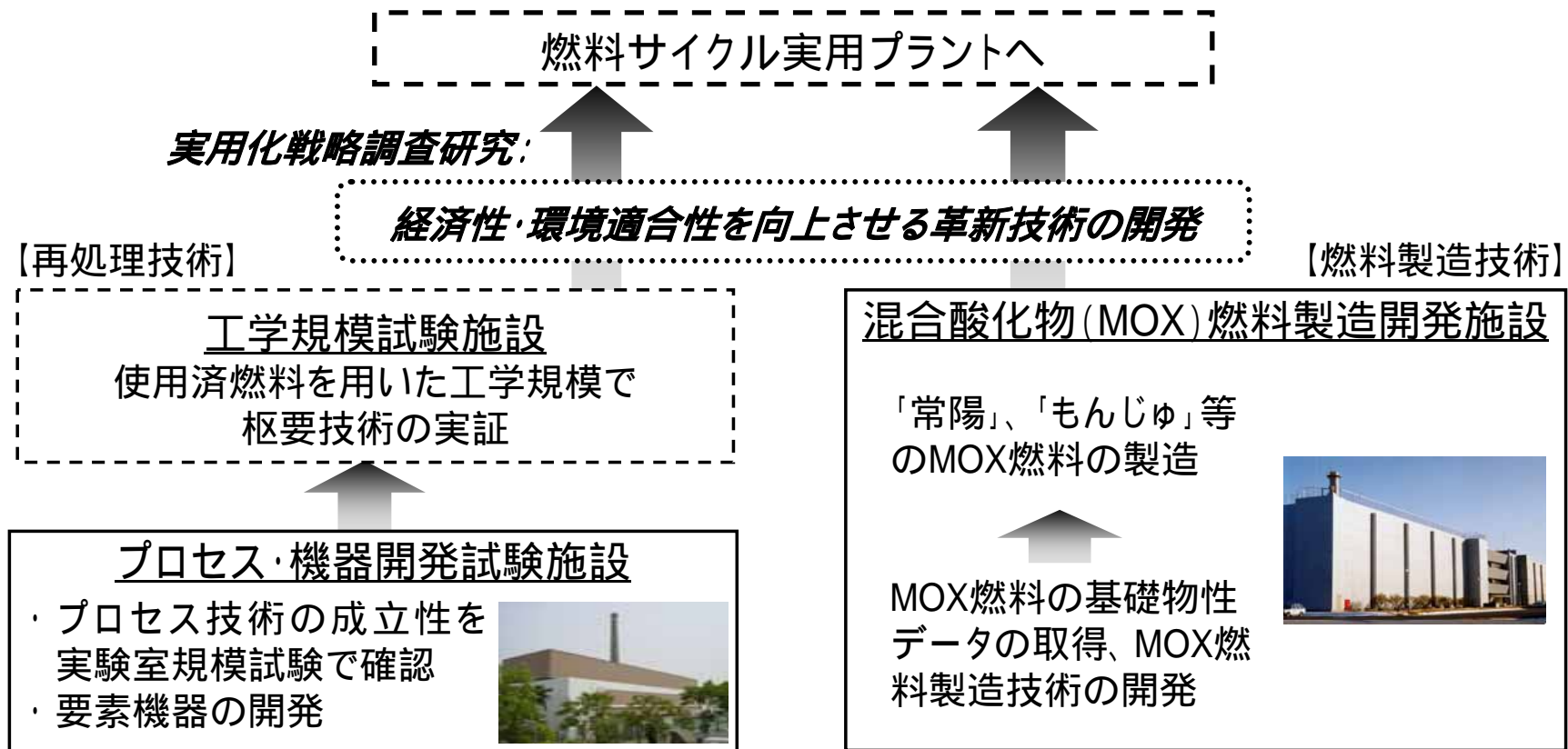
- マイナーアクチニド回収プロセスの開発
- マイナーアクチニドを含む燃料の開発

：原子番号が89のアクチニウムから103のローレンシウムまでのアクチノイド元素のうち、アクチニウムを除いた元素はアクチニドと呼ばれている。使用済燃料中に生成するアクチニド元素のうち生成量の比較的少ない放射性核種である元素(ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム)の総称をマイナーアクチニドという。

## 1.4 燃料サイクルの研究開発成果(1/5)

### 進め方:

燃料サイクルについては、プロセス開発と機器開発により技術的成立性を確認してきた。それらを踏まえて、経済性と環境適合性に優れた実用プラントの研究開発を進めている。





## 1.4 燃料サイクルの研究開発成果(2/5)

### [再処理]

#### 特徴1: プルトニウム濃度が高い燃料

##### ■ ウラン/プルトニウム回収プロセスの開発

- 通算で59本の「常陽」等の照射済燃料ピンを用いた試験を行い、湿式法による回収プロセスの技術的成立性を確認した。
- ウラン/プルトニウムを用いた実験室規模の乾式再処理試験を開始し、技術的成立性を確認している。

##### ■ 厳しい臨界管理対策

- 日米協力により臨界安全に係るデータを取得し、臨界安全設計手法を確立した。これを用いて、どのような濃度のプルトニウムを扱っても臨界とならない形状の遠心抽出器等の機器を開発した。

##### ■ 核不拡散対策

- プルトニウムを単体で取り出せないように、ウランとプルトニウムを混合して酸化物に転換する技術を確立した。
- さらに、全てのプロセスにおいてプルトニウムを単体で扱わないように、ウラン/プルトニウムを同時に回収する技術を開発している。



## 1.4 燃料サイクルの研究開発成果(3/5)

---

### [再処理]

#### 特徴2：放射線量及び発熱量が高い燃料

##### ■ 放射線による抽出剤の劣化対策

- 処理速度を上げて放射線にさらされる時間を短縮することにより、抽出剤の劣化を軽減できる遠心抽出器を、日米協力も活用して開発した。

#### 特徴3：マイナーアクチニドのリサイクル

##### ■ マイナーアクチニド回収プロセスの開発

- 実験室規模でマイナーアクチニドの回収率99%を達成した。
- さらに、回収率を向上させて廃棄物発生量を低減する技術を開発している。



## 1.4 燃料サイクルの研究開発成果(4/5)

### [燃料製造]

#### 特徴1：プルトニウム濃度が高い燃料

##### ■ 厳しい臨界管理対策

- 量産技術における臨界管理対策を確立した。
- 臨界安全を担保しながら多量の燃料を取り扱える計量管理システムを開発した。

##### ■ 核不拡散対策

- 量産技術における保障措置システムを確立した。
- さらに、査察業務量の削減による稼働率向上を可能とする保障措置システム(査察官非立会い検認システム及び査察データ遠隔監視システム)を開発している。

#### 特徴2：放射線量及び発熱量が高い燃料

##### ■ 遠隔自動製造システムの開発

- 「常陽」用燃料636体、「もんじゅ」用燃料285体、その他「ふげん」用燃料などを合わせ、合計約1700体のMOX燃料製造を通じ、遠隔自動化による量産技術を確立した。
- 製造した燃料は炉内での燃料破損の発生は無く、品質を保証する一貫した生産技術を確立した。
- MOX燃料ペレット製造の工程数を大幅に削減する新たなプロセスを開発している。

#### 特徴3：マイナーアクチニドのリサイクル

##### ■ マイナーアクチニドを含む燃料の開発

- ネプツニウムとアメリカウムを含んだMOX燃料ペレットを試作し、基本的な製造技術を確認した。現在、「常陽」での照射試験用燃料を製造している。





## 1.4 燃料サイクルの研究開発成果(5/5)

---

### [まとめ]

- 再処理技術については、高速増殖炉の使用済燃料からウラン・プルトニウムを分離回収する技術を開発し、工学規模の試験を実施する段階である。
- MOX燃料製造技術については、「常陽」及び「もんじゅ」のMOX燃料製造を通じて遠隔自動化による量産技術を確立した。



## 2. 実用化に向けた見通し

---



## 2.1 実用化戦略調査研究の背景と目的

---

### [背景]

- これまでの研究開発成果により、高速増殖炉サイクルの技術的見通しを得ているが、実用化に向けては、安全確保を前提としつつ経済性にも優れた競争力のある技術に仕上げていく必要がある。
- 放射性廃棄物の低減といった循環型社会における環境適合性の要請にも応えていく必要がある。

### [目的]

- 実用化戦略調査研究 においては、最新の知見に基づき幅広い選択肢を検討し、高速増殖炉サイクルについて適切な実用化像と、実用化に至るまでの研究開発計画の提示を目的とする。



## 2.2 実用化戦略調査研究の進め方と目指すべき成果

### [進め方]

- 海外の関係機関とも連携をとりつつ、サイクル機構、電気事業者、電中研、原研等が一体となり、1999年からオールジャパン体制で実施している。
- 実用化像を構築するための設計研究を行うとともに、実用化に必要な革新技术について研究開発を進める。
- 成果について随時チェックアンドレビューを行い、計画の見直しを行いながら、柔軟に研究開発を進める。

### [目指すべき成果]

- 「もんじゅ」等の成果を踏まえ、2015年頃に高速増殖炉サイクルの技術体系を明らかにする。
  - 安全審査を受けることが可能な設計 とそれを裏付ける主要なデータ
  - 実用化に至るまでの開発計画(経済性と信頼性の実証)



## 2.3 フェーズ の成果

### フェーズ (1999～2000年度)

- 高速増殖炉サイクルの実用化に向けた5つの開発目標を設定した。
  - 安全性 : 社会にすでに存在するリスク に比べて十分に小さいこと
  - 経済性 : 将来の軽水炉の発電単価に比肩すること
  - 環境負荷低減性 : 地層処分への負荷を低減すること
  - 資源有効利用性 : 持続的に核燃料を生産すること
  - 核拡散抵抗性 : プルトニウムが単体の状態で存在しないこと
- 原子炉冷却材、燃料形態、再処理技術、燃料製造技術、について、多様な選択肢を対象に比較・評価を行い、フェーズ において引続き検討対象とすべき有望な概念を抽出した。
  - 原子炉冷却材: ナトリウム、重金属、ガス、水
  - 燃料形態: 酸化物、金属、窒化物
  - 再処理技術: 先進湿式法、酸化物電解法、金属電解法
  - 燃料製造技術: ペレット法、振動充填法、鑄造法、被覆粒子法

: 不慮の事故やがんによる死亡などの日常生活に伴うリスク



## 2.4 フェーズ の進め方

### フェーズ (2001～2005年度)

フェーズ で抽出された高速増殖炉サイクル概念について、設計研究と技術的成立性を確認するための機器・材料等の試験を行い、以下の成果を提示する。

なお、2003年度末に中間取りまとめを行う。

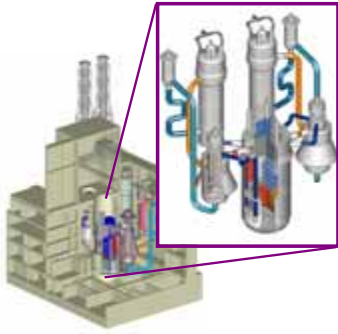
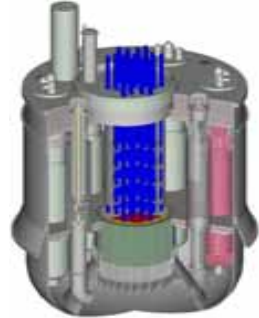
- 重点的に開発を進めるべき実用化プラント概念を明確にする。
- 実用化に至るまでの研究開発の進め方を提示する。
  - 2015年までの研究開発計画
  - その後の実用化に向けた開発の進め方

研究開発の進め方を検討するに当たっては以下の点に配慮する。

- 高燃焼度化を目指した被覆管材料、高温強度に優れた材料等の革新技術が要求性能を満たさない場合に備え、それらに替わり得る技術の検討も並行して進める。
- GEN-IV、日米及び日仏の技術協定等の枠組みを活用し、国際協力・共同開発を積極的に進め、世界のエネルギー問題の解決に向けて国際的にも貢献する。
- 高速増殖炉サイクルの導入時期、軽水炉サイクルとの共存期間、プルトニウム需給等に留意した軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行方策に配慮する。

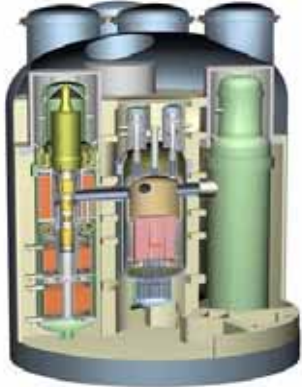
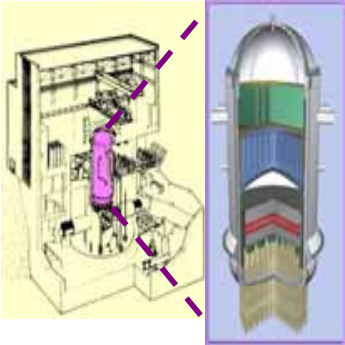
## 2.5 フェーズ 中間取りまとめ[高速増殖炉](1/4)

各冷却材ごとに、程度に差はあるものの開発目標を満たすプラントを設計した。また、必要な開発課題を明確にし、技術的実現性を確認するための要素試験を実施している。

	ナトリウム冷却炉	鉛ビスマス冷却炉
概念図		
実現性と課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 「常陽」、「もんじゅ」の設計・建設・運転経験、実証炉の設計研究および要素技術開発の成果により、<u>開発目標を満たす概念の技術的実現性を見通すことができる。</u></li> <li>■ 経済性向上のための機器・構造・材料に関する技術課題があるが、明確な解決方策がある。</li> <li>■ 主要な技術課題としては、原子炉容器のコンパクト化、高温強度・高燃焼度を達成する被覆管材料の開発等が挙げられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 流動環境下での基礎的な腐食試験を実施した結果、既存材料では、原子炉出口温度が460 程度に制限される。<u>技術的実現性を見通すためには、実機環境条件での材料腐食問題を解決する必要がある。</u></li> <li>■ この問題を解決した上で、窒化物燃料、鉛ビスマス用機器(主循環ポンプ、蒸気発生器)等の開発と安全性試験研究を進め、その後、実験炉による技術実証を行う必要がある。</li> </ul>

## 2.5 フェーズ 中間取りまとめ [高速増殖炉] (2/4)

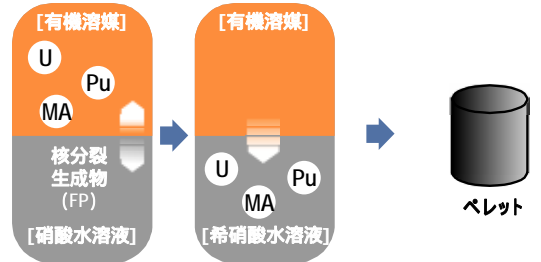
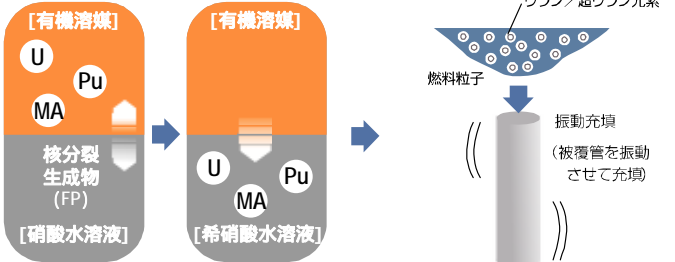
各冷却材ごとに、程度に差はあるものの開発目標を満たすプラントを設計した。また、必要な開発課題を明確にし、技術的実現性を確認するための要素試験を実施している。

	ヘリウムガス冷却炉	水冷却炉
概念図		
実現性と課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 冷却系統に関してはHTTR等の他の高温ガス炉の開発成果が活用できるが、<u>高温耐性に優れた革新的な窒化物被覆粒子燃料および燃料集合体等の研究開発と安全性試験研究が必要である。</u></li> <li>■ これらの問題を解決した上で、受動的炉停止機構および炉心損傷時の影響緩和対策等の研究開発を進め、その後、実験炉による技術実証を行う必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 冷却系統に関しては、軽水炉の知見を活用できるが、<u>炉心燃料に係わる研究開発が必要である。</u></li> <li>■ 稠密燃料格子での除熱能力を実験により確認中であるが、開発経験に乏しい高速中性子および水冷却環境下の燃料被覆管材料の開発、炉心損傷時の影響緩和方策の具体化が必要である。</li> </ul>



## 2.5 フェーズ 中間取りまとめ [燃料サイクル] (3/4)

各方式ごとに、程度に差はあるものの開発目標を満たすプラントを設計した。また、必要な開発課題を明確にし、技術的実現性を確認するための要素試験を実施している。

	先進湿式法 + 簡素化ペレット法	先進湿式法 + 振動充填法
概念図		
実現性と課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>再処理については、<u>晶析などの主要プロセスの成立性は使用済燃料を用いた試験で確認されており、主な課題としては晶析法などの機器開発やプロセス最適化が挙げられる。</u></li> <li>燃料製造については、<u>MOX試験により簡素化プロセスの成立性は確認されている。</u>また、セル内でのMA含有ペレット製造実績も有している。主な課題としては、セル内遠隔自動化技術の開発や、経済性向上の観点からのプロセス最適化が挙げられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>再処理技術については左記と同様。</li> <li>燃料製造についてはMA含有燃料粒子製造試験により<u>プロセスの成立性は確認されている。</u>主な課題としては、粒子製造工程で発生する廃液量の低減対策や燃料ピンの品質検査技術開発、セル内遠隔自動化技術の開発などが挙げられる。</li> </ul>

## 2.5 フェーズ 中間取りまとめ [燃料サイクル] (4/4)

各方式ごとに、程度に差はあるものの開発目標を満たすプラントを設計した。また、必要な開発課題を明確にし、技術的実現性を確認するための要素試験を実施している。

	金属電解法 + 射出鋳造法	酸化物電解法 + 振動充填法
概念図		
実現性と課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>再処理については、国内外での小規模～工学規模試験により電解精製、Cd蒸留など<u>主要なプロセスの成立性はほぼ確認されている</u>。主な課題としては、使用済燃料を用いた小規模試験によるプロセスの確認、遠隔操作性を考慮した機器開発、計量管理手法の検討などが挙げられる。</li> <li>燃料製造については米国の実績などから、その<u>プロセスの成立性は確認されている</u>。主な課題としては、合金燃料の均質性確認や燃料製造時に発生する酸化物(ドロス)の回収技術などが挙げられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>再処理のMOX共析など主要工程については、使用済燃料を用いた試験により<u>原理的な成立性が確認されている</u>。主な課題としては、MOX共析の性能向上やプロセス最適化、MA回収プロセスの開発、塩素ガス使用による材料腐食対策、計量管理手法の検討、塩廃棄物処理技術の構築などが挙げられる。</li> <li>燃料製造については、ロシアにMOX燃料集合体のセル内製造実績があり、<u>プロセスの成立性は確認されている</u>。主な課題としては、燃料ピンのPu分布の均一性など品質検査技術の開発、金属U(酸素ゲッター)の製造技術開発などが挙げられる。</li> </ul>

## 2.6 高速増殖炉サイクルの研究開発投資効果(1/2)

### - 評価方法 -

- 高速増殖炉サイクルの導入によりもたらされる効果を経済的価値に換算し、研究開発費と比較する。
- 高速増殖炉を導入した場合と高速増殖炉を導入しない場合(軽水炉)の経済的価値の差を求める。

### 研究開発効果

- ・直接効果がある
- ・金銭価値換算手法がある
- ・評価に必要なデータがある

#### ●経済性向上効果

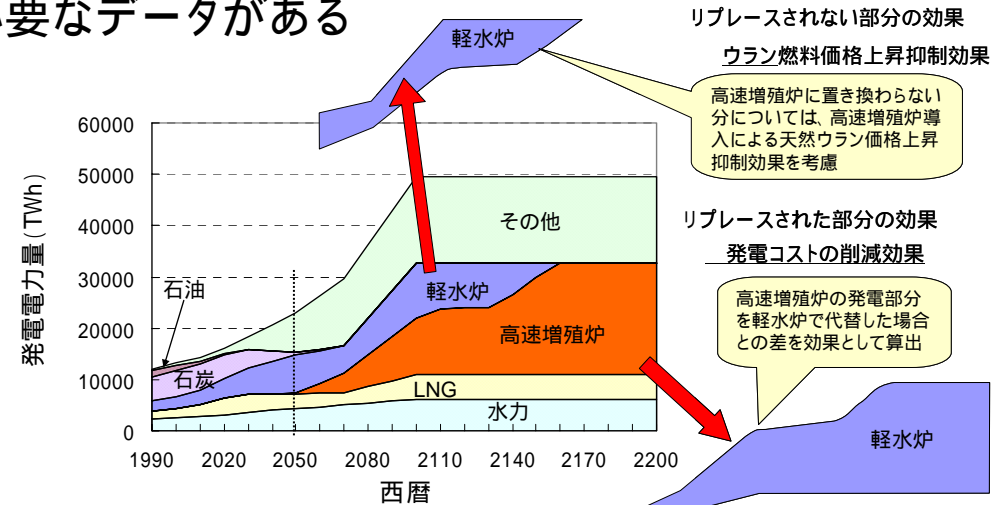
##### ●発電コスト削減効果

ウラン燃料価格上昇\*を考慮した軽水炉と高速増殖炉の発電コストの差

\*エネルギー危機による燃料価格上昇分を含む

##### ●ウラン燃料価格上昇抑制効果

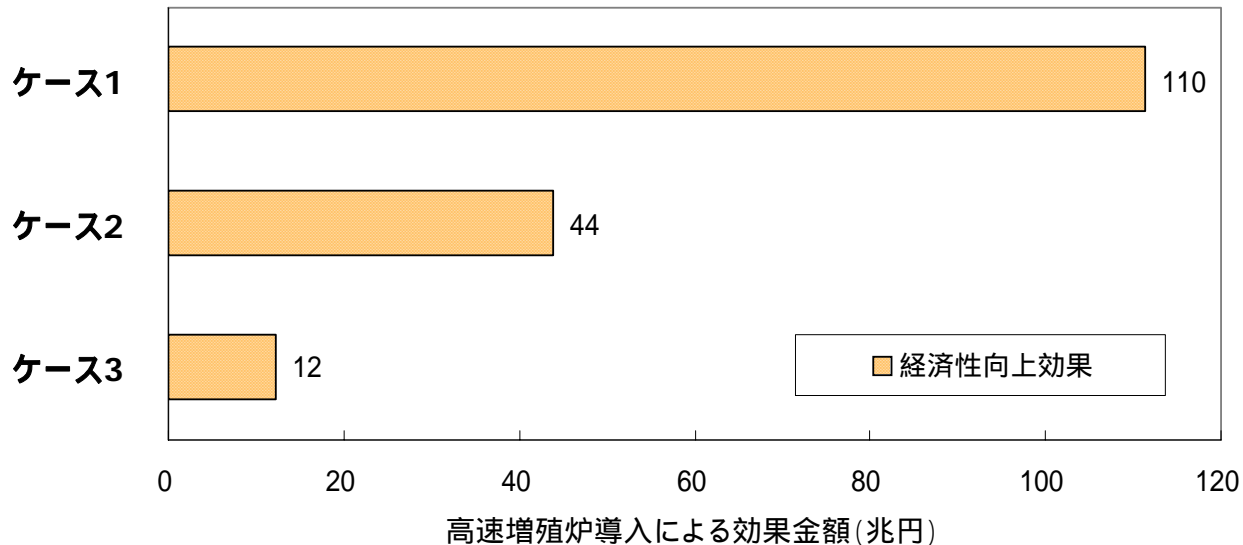
天然ウラン需要削減に伴いウラン燃料価格上昇が抑制される効果(軽水炉発電コストの上昇抑制効果を計算)



## 2.6 高速増殖炉サイクルの研究開発投資効果(2/2)

### - 世界規模での高速増殖炉サイクル導入効果の試算 -

- ケース1: 実用化戦略調査研究での設計に基づく高速増殖炉の発電コストを想定した場合  
ウラン燃料価格上昇に伴う発電コスト上昇を回避できることと軽水炉より発電コストの低い高速増殖炉の導入により、**約110兆円**の効果が期待できる。
- ケース2: 高速増殖炉の導入時点(2050年)で軽水炉と同等の発電コストを想定した場合  
ウラン燃料価格上昇に伴う発電コスト上昇を回避できることにより、**約44兆円**の効果が期待できる。
- ケース3: ケース1の試算において、高速増殖炉の建設費を50%増とした場合  
高速増殖炉の導入時点(2050年)での発電コストは軽水炉を上回るが、ウラン燃料価格上昇に伴う発電コスト上昇を回避できること等により、**約12兆円**の効果が期待できる。
- 全世界の高速増殖炉サイクル研究開発費は、今後の国際共同開発による費用分担の程度に依存するが、**数兆円**と見込まれる。
- **高速増殖炉サイクルを実現することにより、研究投資を上回る経済効果が期待できる。**



世界の評価ケースの  
評価条件

- ・高速増殖炉導入開始  
2050年
- ・割引率2%



## 2.7 実用化戦略調査研究のまとめ

---

- 2003年度末にフェーズ Ⅱ の中間取りまとめを実施した。
  - 検討対象とした各高速増殖炉サイクル概念について、経済性等の開発目標を満たすプラントを設計した。
  - 各プラントの開発課題を抽出し、技術的実現性を確認するための要素試験等を行い、それらの解決方策を明確にしつつある。
- 引き続き実用化戦略調査研究を進め、2005年度末に重点的に開発を進める実用化プラント概念を明確にし、実用化に至るまでの研究開発の進め方を提示する予定である。



### 3. 「もんじゅ」の役割

---



### 3. 「もんじゅ」の役割(1/4)

高速増殖炉サイクルを実用化するには、「もんじゅ」を早期に運転再開し、10年程度以内を目途に、以下に示す「発電プラントとしての信頼性実証」及び「ナトリウム取扱技術の確立」という所期の目的を達成することが必要不可欠である。

#### ■「発電プラントとしての信頼性実証」

「もんじゅ」を運転し、大型高速増殖炉の設計手法の妥当性を確認するとともに、発電プラントとしてその運転・保守・補修性が現行軽水炉に比して遜色ないことを示すことが重要である。

- 性能試験等により大型高速増殖炉の設計手法が妥当であることを確認すること
  - 炉心：増殖比、燃焼度、遮蔽等
  - プラント：熱流動、構造設計、安全解析等
- 発電プラントとして安全・安定な運転ができることを運転実績で示すこと
  - 運転保守方法の改善等
  - 蒸気発生器伝熱管、原子炉容器の検査等のプラント保全技術の実証
- 更に発電プラントとして経済性を向上させるための技術を開発すること
  - 炉心：燃焼度向上による運転サイクルの長期化等
  - 運転・保守：運転・保守方法の合理化によるコスト削減等



### 3. 「もんじゅ」の役割(2/4)

---

#### ■「ナトリウム取扱技術の確立」

「もんじゅ」はナトリウム冷却炉であることから、設計で期待したナトリウム冷却材用機器の性能を確認するとともに、発電プラントでのナトリウムの取扱経験を積み重ね、技術として確立することが重要である。

- 性能試験等において大容量ナトリウム冷却材用機器の性能を確認すること
  - 中間熱交換器、冷却材ポンプ、蒸気発生器等
- 目視できないナトリウム中での燃料交換が確実に出来ること
  - 新燃料の装荷、使用済燃料の取り出し等
- ナトリウムの使用に伴うプラント保全技術の高度化を図ること
  - 異常診断技術、革新的な検査技術等

これらの「もんじゅ」の成果を踏まえ、実用化戦略調査研究において 2015年頃に高速増殖炉サイクルの技術体系を明らかにすることとしている。





### 3. 「もんじゅ」の役割(3/4)

「もんじゅ」は、高速増殖炉の研究開発にとって貴重な施設であり、国際協力の拠点としても整備し、国内外に開かれた体制のもとで研究開発に活用していくことが国際的に期待されている。

#### ■ 国際共同利用(計画検討中)

- 日米仏によるマイナーアクチニド含有燃料の照射試験
- IAEA(国際原子力機関)の枠組み等によるナトリウム技術データベースの構築
- Gen-IVにおける利用
  - 燃料材料の照射試験
  - 国際標準のプラント維持基準の整備

また、高速増殖炉の実用化を目指した様々な先端的な研究成果を実証する場として活用していく。

#### ■ 実用化に向けた技術開発の例

- 実用化を目指した高燃焼度炉心の実証
- マイナーアクチニド含有燃料炉心の実証
- 運転期間の長期化のための長寿命制御棒の実証



### 3. 「もんじゅ」の役割(4/4)

---

#### [まとめ]

- 高速増殖炉サイクルを実用化するには、「発電プラントとしての信頼性の実証」と「ナトリウム取扱技術の確立」という所期の目的を達成することが必要不可欠である。
- 国際協力の拠点として整備し、開かれた体制のもとで研究開発に活用していくことが国際的に期待されている。
- したがって、改造工事を早期に開始し、運転再開を行う必要がある。



## 4 . 研究開発の現状のまとめ

---



## 4. 研究開発の現状のまとめ(1/2)

---

### [これまでに得られている成果]

- ナトリウム冷却高速増殖炉については、「常陽」・「もんじゅ」の設計、建設、運転等により、その技術的な成立性は確認できている。
- 燃料サイクル(再処理、燃料製造)についても、湿式再処理技術に関する枢要プロセスの原理の確認、「常陽」・「もんじゅ」のMOX燃料の製造等により、それらの技術的な成立性は確認できている。

### [実用化に向けた見通し]

- 実用化戦略調査研究フェーズ で検討対象とした各高速増殖炉サイクル概念について、経済性を始めとする開発目標を満たすプラントを設計した。
- 各プラントの開発課題を抽出し、技術的実現性を確認するための要素試験等を行い、それらの解決方策を明確にしつつある。
- 以上より、各プラント概念の実用化への道筋が明らかになってきたことから、引き続き実用化戦略調査研究を進め、2005年度末に今後重点的に開発を進めるべきプラント概念を明確にし、実用化に向けた研究開発の進め方を取りまとめる予定である。



## 4. 研究開発の現状のまとめ(2/2)

---

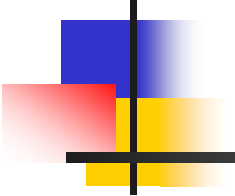
### [もんじゅ]

- 高速増殖炉サイクルを実用化するには、実用化戦略調査研究を進めるとともに、「もんじゅ」において、「発電プラントとしての信頼性の実証」と「ナトリウム取扱技術の確立」という所期の目的を達成することが必要不可欠である。
- 「もんじゅ」は、高速増殖炉の研究開発にとって貴重な施設であり、国際協力の拠点として整備し、開かれた体制のもとで研究開発に活用していくことが国際的に期待されている。
- これらを踏まえると、「もんじゅ」については改造工事を早期に開始し、運転再開を行う必要がある。

### [実用化に向けた技術体系の明確化]

- 「もんじゅ」等の成果を踏まえ、実用化戦略調査研究において 2015年頃に高速増殖炉サイクルの技術体系を明らかにする。

# 添付資料

- 
- ・ナトリウムが高速増殖炉の冷却材に用いられる理由
  - ・大洗工学センター
  - ・高速実験炉「常陽」
  - ・高速実験炉「常陽」のMK- (能力増強)計画
  - ・東海事業所
  - ・「もんじゅ」のこれまでの成果
  - ・「もんじゅ」に期待される成果の例
  - ・「もんじゅ」の状況
  - ・各事業における平成16年度までの所要経費



# ナトリウムが高速増殖炉の冷却材に用いられる理由

(金属)ナトリウムは、高速増殖炉の冷却材として使用する場合、以下の特長と留意すべき事項を有する。

## 特長：

- 燃料の増殖を図るために必要な、中性子の速度を落とさない性質や中性子を無駄に吸収しない性質において優れる。
- ナトリウムは100 ~ 880 の温度範囲で液体状態であり、高速増殖炉での使用温度域が約350 ~ 550 であることから、凝固や沸騰などの相変化に対する温度余裕が大きく、軽水炉のように加圧する必要がない。
- 配管・機器の構造材料であるステンレス鋼や低合金鋼との共存性に優れる(腐食を起こしにくい)。
- 除熱性能が高く、発熱密度の大きい高速増殖炉の冷却材として優れる。

## 留意すべき事項：

- 化学的に活性であり、空気や水と隔離する必要がある。
- 熱容量が小さく、熱伝達が良いことから、温度変化に際して構造材に熱応力・熱衝撃を与えやすい。
- 漏えいした場合の燃焼反応、ナトリウム-水反応に対処する必要がある。

高速増殖炉の開発初期には冷却材としてナトリウム、ナトリウムとカリウムの合金、水銀、鉛、ヘリウム(ガス)などが検討され、水銀等は海外の実際のプラントで試みられた。しかしながら、上記の理由からナトリウムが冷却材として総合的に優れているという判断が世界的に定着した。

近年においては、実用化戦略調査研究において、幅広い技術的選択肢の検討を評価を行う観点から、複数の冷却材を候補として研究を進めている。また、GIF(第4世代原子力システムに関する国際的プログラム)においても同様に複数の冷却材が候補に挙がっているが、そのような検討においても、現時点においてナトリウムは有力な候補の1つとして評価されている。

# 大洗工学センター

## 目的:

高速増殖炉の炉心・燃料、機器・構造・材料・熱流動、安全性に関する技術開発を実施し、実験炉「常陽」、原型炉「もんじゅ」の設計・建設・運転に反映。今後は、高速増殖炉の実用化に向けた革新技术を開発

## 実績:

### 炉心・燃料に関する研究開発

- ・ 照射試験により性能を確認しながら、高い燃焼度を実現する被覆管材料等を開発
- ・ 国際協力で実施した臨界実験データ等に基づき、炉心設計手法を開発

### 機器・構造・材料・熱流動に関する研究開発

- ・ 制御棒駆動機構、ナトリウムポンプ、蒸気発生器等の大型機器を開発し、実規模や縮尺模型の試験により、信頼性を確認
- ・ ナトリウムの熱流動現象、ナトリウムの材料への影響、構造物の強度等に関する試験を実施し、熱流動設計手法、構造設計手法等を開発するとともに、ナトリウム取扱技術を蓄積
- ・ 材料データを蓄積し、材料強度基準を策定
- ・ ナトリウム配管及び蒸気発生器伝熱管などの供用期間中検査装置を開発

### 安全性に関する技術開発

- ・ 燃料ピンの破損限界の試験等を実施し、燃料の安全評価手法を開発
- ・ 蒸気発生器の伝熱管破損やナトリウム配管破損等の試験を実施し、プラントの安全設計手法を開発



高速増殖炉燃料の照射後試験



蒸気発生器モデル(50MW)による信頼性試験





## 高速実験炉「常陽」

---

### [経緯と実績]

- 茨城県大洗町に立地、熱出力5万kWt炉心(MK-I)で1977年に初臨界。1983年に熱出力を10万kWtに増大(MK-II)。
- 高速増殖炉の原理(燃料の増殖)を確認し、27年間に亘る安定的な原子炉システムの安全かつ安定的な運転を実証してきた。
- 高速中性子に対応した燃料・材料やナトリウム関連機器の開発、炉心・プラント設計などによって、高速増殖炉が技術的に成立することを確認した。

### [照射能力の増強]

- 2003年に熱出力を100MWtから140MWtに増大し、照射能力を約4倍に高める改造(MK-III)を行った。この改造工事をはじめとする長年の運転経験により、中間熱交換器やポンプなどの大型ナトリウム関連機器の改良・交換・補修技術を確立した。
- 現在は高速増殖炉の実用化に向けた燃料・材料の高速中性子照射の役割を担いつつ順調に運転している。

# 高速実験炉「常陽」のMK- (能力増強)計画

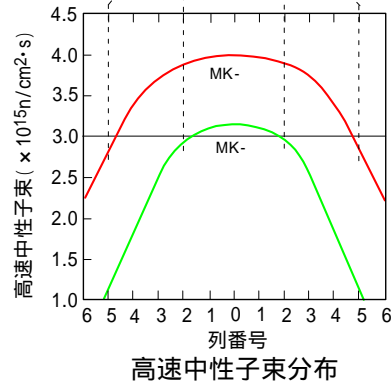
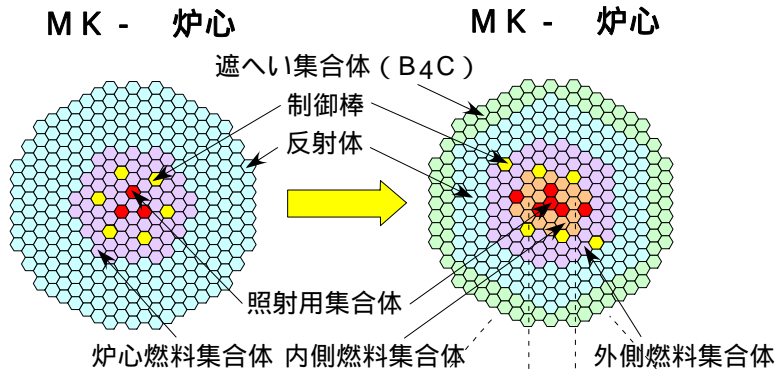
## <目的>

- ・高性能(高燃焼度)燃料・材料の開発
- ・新型燃料の開発(金属燃料、等)
- ・MA燃料・消滅処理技術の開発

→ 照射能力の拡大

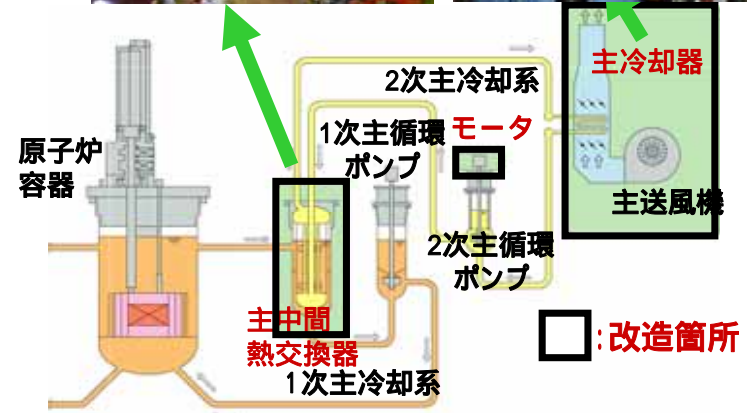
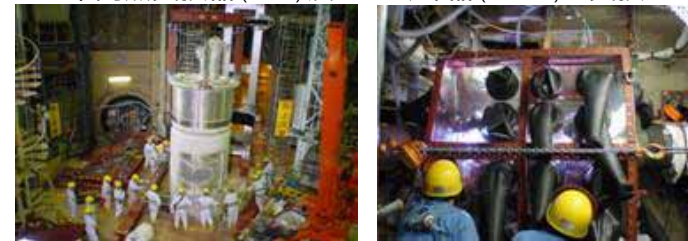
## <改造内容>

高速中性子束をMK- の約1.3倍  
照射燃料集合体最大装荷体数を約2倍  
稼働率を約1.5倍(燃料交換時間の短縮)



全体で約4倍の能力アップ

主中間熱交換器(IHX)及び主冷却器(DHX)を交換



# 東海事業所

## 高速増殖炉再処理技術開発 (機器開発試験施設(EDF))

目的:

- ・再処理システムの要素機器開発
- ・再処理システムの遠隔技術開発

- 湿式再処理の主要プロセス機器であるせん断機、溶解槽、清澄機、遠心抽出器などを工学レベルで開発
- セル内での再処理機器に対する遠隔保守技術を開発



## 高速増殖炉再処理技術開発 (高レベル放射性物質研究施設(CPF))

目的:

- ・湿式再処理技術の高速増殖炉燃料への適用性確認
- ・経済性向上や環境負荷低減のための革新的技術の原理確認
- ・乾式再処理技術(金属電解法)の開発

- 「常陽」等の使用済燃料試験により湿式法プロセスの枢要技術の成立性を確認
- 使用済燃料試験により湿式法の工程簡素化プロセス、MA回収プロセス等の原理を確認
- ウラン・プルトニウムを用いた乾式再処理試験を開始し、実験室規模試験による技術的成立性を確認中



## MOX燃料製造技術開発 (プルトニウム第三開発室)

目的:

- ・高速増殖炉用MOX燃料量産技術の開発
- ・MOX燃料製造に関する経済性の向上

- 「常陽」や「もんじゅ」用のMOX燃料製造を通じての遠隔自動化による量産技術の確立
- ペレット製造システムの工程数を大幅に削減する革新技術を開発中
- 自動化MOX燃料施設全体の核物質の移動情報及び在庫情報を一元的に管理するオンライン計量管理システムを開発
- 査察業務量の削減による施設稼働率向上を可能とする保障措置システムを開発中



# 「もんじゅ」のこれまでの成果

目的: 発電プラントとしての性能を確認し、大型化の可能性を技術的に評価



原型炉「もんじゅ」28万kWe

1985年 着工  
1994年 初臨界  
1995年 初送電

## 「常陽」から「もんじゅ」へのステップアップ

### 高速増殖炉の発電

- 蒸気発生器等の水蒸気系を有する発電システム

### 大型化、高性能化

- 出力(約7倍)
- 炉心体積(約10倍)
- 燃料長さ(約1.4倍)
- ナトリウム量(約8倍)



大洗工学センター



「常陽」

## 実績: 高速増殖炉の発電能力を実証

### 設計、建設、総合機能試験

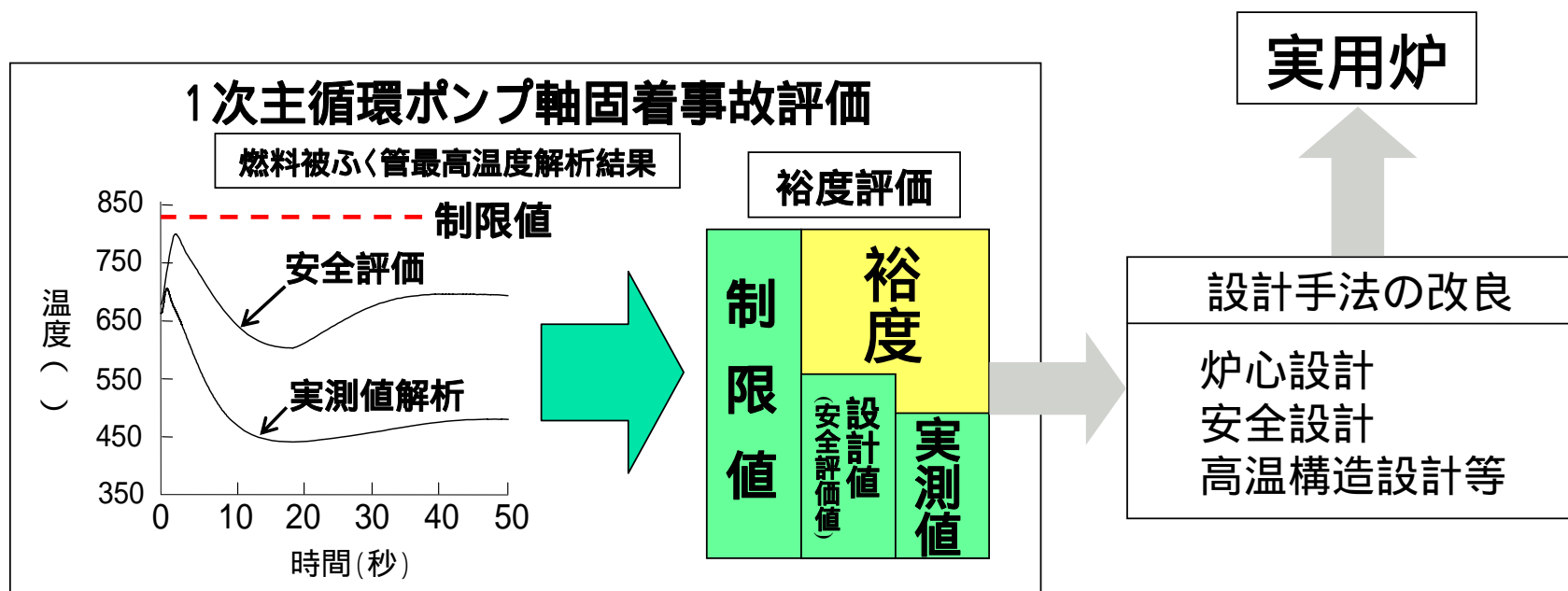
- 高い燃焼度を実現できる被覆管材料の開発
- 臨界実験データ等に基づいた炉心設計手法の整備
- 燃料安全性試験に基づいた合理的な安全評価手法の整備
- 国産材データに基づく高温構造設計方針を整備
- 大型機器・構造物(ポンプ、中間熱交換器等)を開発
- 伝熱特性に優れコンパクトなヘリカルコイル型蒸気発生器を開発
- ナトリウム-水反応評価手法を開発し、影響緩和対策を確立
- ナトリウム配管及び蒸気発生器伝熱管などの検査装置を開発

### 性能試験(40%電気出力まで)

- 炉物理試験により増殖比等の炉心特性を確認
- 水・蒸気系を含めた核加熱運転を実証し、初送電を達成
- プラント制御性、運転特性を確認
- ナトリウム漏えい事故以降**
- 流力振動防止の評価法を策定
- 漏えいナトリウムによる炭素鋼板腐食機構を解明
- ナトリウム漏洩・燃焼試験等によるプラント安全設計手法を開発
- 安全総点検により「もんじゅ」の安全性を再確認
- 炉容器、1次系、SG伝熱管検査技術の高性能化

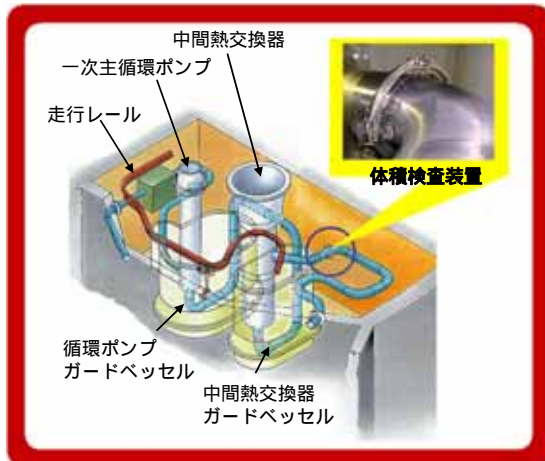
## 「もんじゅ」で期待される成果の例(1/2)

「もんじゅ」の実測データを用いて設計手法の改良を行い  
実用炉の設計に反映する。

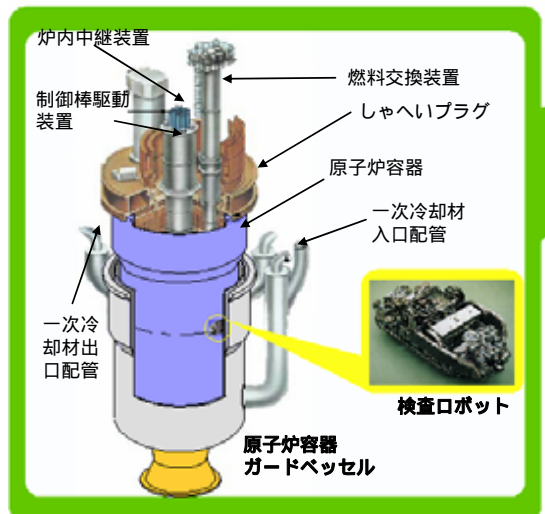
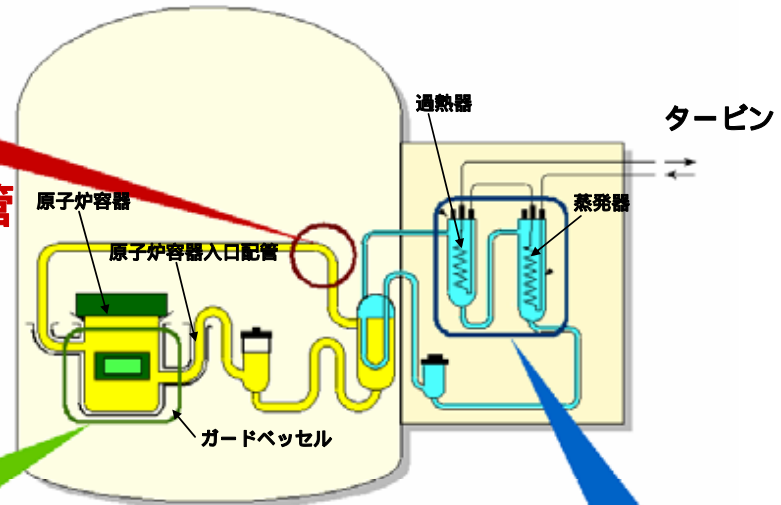


# 「もんじゅ」で期待される成果の例(2/2)

プラント保全技術の実践と開発 { 検査装置の高性能化  
・ 構造健全性評価に基づく保全計画の最適化等

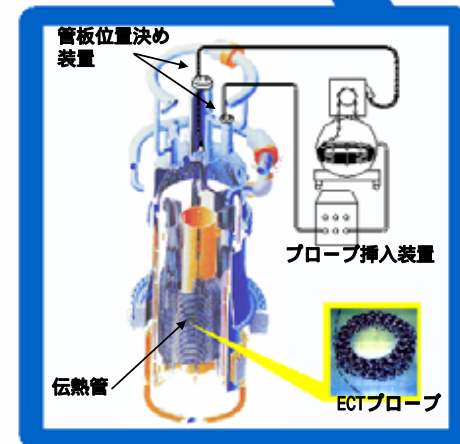


1次主冷却配管  
検査装置



原子炉容器廻り  
検査装置

蒸気発生器伝熱管  
検査装置



# 「もんじゅ」の状況

H8～H10

安全性  
総点検

**国による安全性確認**

- ・Na漏えい対策
- ・蒸発器安全性能の改善
- ・改良温度計
- ・Na漏えい対策等
- ・安全性総点検改善事項

**安全審査**  
H14.12.26:許可

**設工認**  
H14.6.28:認可  
H16.1.30:認可

**対処及び報告**  
H14.11.29:確認

地元  
了解

改  
造  
工  
事

性  
能  
試  
験

本  
格  
運  
転

H13.8～ H15.11.14(報告書提出)

福井県「もんじゅ専門委員会」

地元理解活動

説明会(44回)、シンポジウム(14回)、「もんじゅ」見学会(約80,000人)  
対話型集会(さいくるミーティング:446回、約13,300人)  
情報発信(マスメディア、インターネット)  
以上の活動を通して、約120万人の方々との対話

## 各事業における平成16年度までの所要経費

(単位:億円)

事業項目	政府支出	民間支出	収入	合計
高速増殖炉サイクル技術開発				
「もんじゅ」(昭和55年度～)	6,729	1,382	-	8,111
ナトリウム機器開発(昭和45年度～)	6,494	-	-	6,494
「常陽」(昭和43年度～)	1,581	-	0.8	1,581
MOX燃料製造(昭和42年度～)	1,489	-	-	1,489
小計	16,293	1,382	0.8	17,675
関連研究開発費				
「ふげん」(昭和42年度～)	1,326	342	2,049	3,718
再処理施設(昭和45年度～)	977	-	6,302	7,279
合計	18,596	1,724	8,352	28,672