

# 高速炉サイクル実用化に向けた 機構の取組

—研究開発インフラの再稼働に向けた準備—

平成28年11月8日

高速炉研究開発部門長・理事 吉田 信之

## 報告内容

1. 高速炉サイクル研究開発の取組みの概要
2. もんじゅの研究開発
3. 高速炉サイクル技術開発
  - 「常陽」の再稼働に向けた取組み
  - プルトニウム燃料第三開発室の再稼働に向けた取組み
  - AtheNa施設等を活用した安全性向上に向けた試験
4. 放射性廃棄物の減容化・有害度低減の研究開発
5. 高速炉研究開発部門における人材育成
6. 今後の取組み

# 1. エネルギー基本計画、もんじゅ研究計画

## 「エネルギー基本計画」（平成26年4月）

資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から、長期的かつ計画的に講ずべき施策として核燃料サイクル政策の推進を基本の方針とする

- 再処理やプルサーマル等を推進
- 米国や仏国等と国際協力を進めつつ、高速炉等の研究開発に取り組む
- もんじゅ研究計画に示された研究成果の取りまとめを目指し、国の責任の下、十分な対応を進める。

## 「もんじゅ研究計画」（平成25年9月）

「もんじゅ」をはじめとする高速炉サイクル開発における研究開発分野と重要な取組として以下を3本柱とし、研究開発を実施

- ① **高速増殖炉の成果の取りまとめを目指した研究開発**  
⇒発電システム成立性の確認
- ② **廃棄物の減容及び有害度の低減を目指した研究開発**  
⇒廃棄物減容・有害度低減の成立見通し
- ③ **高速増殖炉／高速炉の安全性強化を目指した研究開発**  
⇒安全性を強化したプラント概念の構築・提示

# 1. 高速炉サイクル研究開発の取組みの概要

## 高速炉研究開発の「原子力機構 第3期中長期計画」

### I. 「もんじゅ」における研究開発

- 保安措置命令解除に向けた取り組みを着実に実施
- 新規制基準の対策工事を実施した上で、**運転を再開**
- 再開後はもんじゅ研究計画に従い、**研究開発等を推進**

### II. 高速炉サイクル技術の研究開発

- ASTRID協力等、国際プロジェクトへの参画を通じ、**高速炉の研究開発を推進**
- 高速炉研究開発の**国際戦略を立案し、国際協力を進め、高速炉研究開発の成果の最大化につなげる**
- 高速炉の安全性向上に向け、**高速炉の安全設計基準の国際標準化を推進**

### III. 放射性廃棄物の減容化・有害度低減の研究開発

- **MAの分離変換のための共通基盤技術**の研究開発
- **高速炉を用いた核変換技術**の研究開発

## 高速炉研究開発部門のMVS

### M 組織のミッション（使命）

- 持続的なエネルギー供給と放射性廃棄物の減容、有害度低減を可能とする**高速炉サイクルの実現**

### V 組織のビジョン（将来像）

- 高速炉サイクル実用化につなげる**研究開発の国際的な拠点**とする
- 不断の努力で高い技術力を維持し、**研究開発成果を生み出し続ける組織**
- 高速炉サイクルの研究開発成果を集約、体系化して発信することで**社会への貢献を果たす組織**

### S 組織の戦略（戦略）

- 組織毎の年度目標を明確化し、部門内で共有
- 高速炉サイクルの研究開発の進め方を明確にし、地元・自治体/政財界/マスメディアへ明示
- 業務のプライオリティー付け・合理化・IT化推進

# 1. 高速炉研究開発部門の研究開発拠点

## 高速増殖原型炉もんじゅ もんじゅ運営計画・研究開発センター



高速増殖原型炉もんじゅを用いたナトリウム冷却発電プラント技術の検証・確立

バックエンド研究開発部門（再処理施設、プルトニウム燃料施設、高レベル放射性物質研究施設）  
原子力科学研究部門（燃料サイクル関連研究施設）



高速増殖炉/高速炉で用いるプルトニウム燃料に係る技術体系の整備、常陽・もんじゅへの燃料供給 等



東京事務所 官庁対応、企画調整

## 次世代高速炉サイクル研究開発センター



廃棄物減容・有害度低減、安全性強化を実現する次世代の高速増殖炉/高速炉に係る研究開発

## 大洗研究開発センター



照射燃料試験施設 (AGF)



照射燃料集合体試験施設 (FMF)

高速増殖炉/高速炉用機器の試験等、高速実験炉「常陽」による燃料・材料の中性子照射試験及び照射後試験



高速炉研究開発部門 要員数：738人

## 2. 「もんじゅ」の状況

H24年12月  
H25年5月

**規制委員会による保安措置命令**



**H26年12月 保安措置命令への対応結果報告**



**H25年10月～平成27年3月 もんじゅ改革**

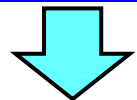


保安検査にて保安規定違反の指摘  
(H27年3月,6月,9月)

**H27年12月～H28年5月  
電力会社とメーカーの協力を得たオールジャパン体制  
にて、保安措置命令への対応を抜本的に見直して  
活動を加速**



**H28年8月  
保安措置命令に対する報告書を規制委員会に提出**



**H28年9月～ 新保全計画に基づく点検の実施**

**<保安措置命令※>**

1. 未点検機器の点検
2. 保全計画の見直し
3. 保守管理体制・品質保証体制の再構築

※ 規制委員会の確認が完了するまで運転再開準備禁止



**H27年11月 規制委員会から文部科学大臣宛に「もんじゅ」運転主体に関する「勧告」**



**H27年12月～H28年5月 (文部科学省)  
「もんじゅの在り方に関する検討会」での議論**



**H28年9月 原子力関係閣僚会議**  
□ 核燃料サイクルと高速炉開発は堅持する  
□ 「もんじゅ」については、廃炉も含めて抜本的に見直す

**「高速炉開発会議」にて、今後の高速炉開発方針を検討 (第1回 10/7、第2回 10/27)**



## 2. 再稼働に向けた取組み 新規制基準、敷地内破砕帯調査への対応

- 「もんじゅ安全確保の考え方」は、**新規制基準の見直しの方向性**を示すとともに、**高速炉の国際的な安全基準の検討**にも反映された。
- 新たに要求された炉心損傷に至る様な重大事故への対応について、**原子炉容器内で事象終息、もしくは炉心損傷を未然に防止できる見通し**を得た。

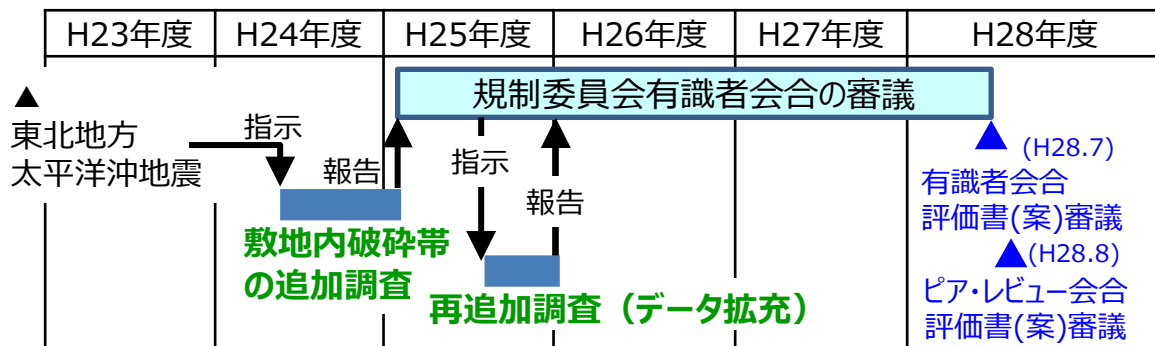
東電福島原発事故の教訓やナトリウム冷却高速炉の特徴を考慮して、**安全への要求事項**（安全への取り組み方針）を定めた。→ 報告書「**もんじゅ安全確保の考え方**」

外国及び国内の高速炉安全の専門家によるレビューを受け、妥当性を確認した。



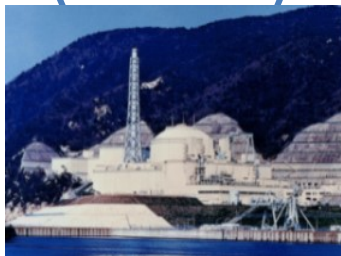
- 炉心溶融が発生しても、**溶融燃料は原子炉容器の中で安定的に冷却・保持**。
- 原子炉停止後、電源が無くても**自然循環冷却による崩壊熱除去が可能**。

- 原子力機構の調査結果に基づき、規制委員会の有識者会合は**敷地内の破砕帯は活断層ではないとする評価書（案）**をまとめた。今後、規制委員会に正式に報告される。



有識者による現地調査

# 2. 「もんじゅ」各段階での主な成果



もんじゅ

Key: 取得した成果  
 今後取得する成果  
 当初以降の付加役割

## A: 設計・製作・建設から取得する成果

- |         |                       |
|---------|-----------------------|
| 炉心燃料    | ①高速炉炉心設計手法(含むコード)の確立  |
|         | ②高燃焼度燃料・材料の設計・製作手法の開発 |
| 機器・システム | ③高温構造設計手法確立           |
|         | ④原子炉容器等の薄型高温構造物製作技術   |
|         | ⑤大型機器の製作・据付技術         |
|         | ⑥蒸気発生器の開発             |
|         | ⑦燃料取扱機等ナトリウム機器の開発     |
|         | ⑧供用期間中遠隔検査装置開発        |
| 安全      | ⑨高速炉の安全設計手法           |

## B: 試運転・運転を通じて検証・取得する成果

- |         |  |
|---------|--|
| 炉心燃料    | ①増殖比の設計値達成   |
|         | ②40%時の高速炉炉心核特性の把握                                  |
|         | ③燃焼に係る高速炉炉心核特性の把握                                  |
|         | ④Am含有高速炉炉心核特性の把握                                   |
|         | ⑤高燃焼度での燃料健全性確認                                     |
|         | ⑥新型燃料等照射試験   |
|         | ⑦Am等含有MOX燃料の照射挙動(含むGACID)                          |
|         | ⑧将来炉設計に必要な炉心評価手法の開発・検証                             |
| 機器・システム | ⑨40%出力運転の実施<br>(原子炉起動:5300時間、発電:883時間)             |
|         | ⑩将来炉設計に必要な熱流動解析手法の開発・検証                            |
|         | ⑪将来炉設計に必要な規格・基準類研究への貢献<br>(構造規格・材料基準、核データ、FBR維持基準) |
|         | ⑫40%出力の過渡特性把握                                      |
|         | ⑬100%出力の運転データ・過渡特性把握                               |
|         | ⑭高速炉発電システムの安定稼働・信頼性実証                              |
|         | ⑮伝熱性能等の経年特性の把握、ISI・サーベランス材による健全性確認、解体時の経年データ       |
|         | ⑯燃料取扱機等の取扱実績                                       |
|         | ⑰供用期間中検査装置の実機での検証                                  |
| 安全      | ⑱自然循環による崩壊熱除熱能力の実証                                 |

## E: 新規制基準への適合性対応等から得られる成果

- |         |  |
|---------|--|
| 機器・システム | ①耐震設計関連の安全性向上対策  |
| 運転保守    | ②劣化メカニズムに基づく高速炉プラントの保全計画構築                                   |
| 安全      | ③将来炉設計に必要な高速炉安全評価手法の開発・検証                                    |
|         | ④シビアアクシデント対応<br>(SA対策の有効性評価手法、設備改造・機能確認、シビアアクシデントマネジメント策の確立) |

## D: ナトリウム漏洩事故等 トラブル対策を通じて取得する成果

- |      |                       |
|------|-----------------------|
| 運転保守 | ①ナトリウム漏えい対策技術         |
|      | ②ナトリウム機器の補修技術         |
|      | ③運転時のトラブル経験から得られる知見蓄積 |

## C: 高速炉の運転・保守を通じて取得する成果

- |      |                       |                         |
|------|-----------------------|-------------------------|
| Na取扱 | ①ナトリウム管理技術(純度管理、移行挙動) | ③運転経験に基づく運転手順書類/保安規定の整備 |
| 運転保守 | ②点検経験蓄積による高速炉保守管理技術   |                         |



# 3. 高速炉サイクル技術開発の概要

## 再稼働に向けた取り組み

### 「常陽」の再稼働、照射試験等での利用



再稼働後は、放射性廃棄物減容化・有害度低減、ASTRID開発協力に関する照射試験等を予定  
平成28年度に新規規制基準適合性に関する設置変更許可を申請予定

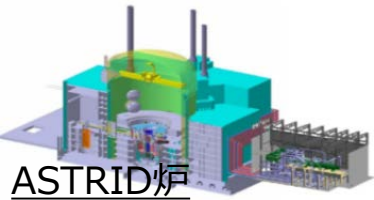
### Pu燃料第3開発室の加工事業化



「常陽」、「もんじゅ」用の燃料製造に向けて、加工事業化のための取組を実施中  
平成28年度に加工事業の補正申請を実施予定

協力

### ASTRID開発における設計協力



熱出力：150万kWth  
電気出力：60万kWe  
炉型：プール型  
燃料：MOX  
目的：放射性廃棄物量・毒性低減の実証

我が国の技術でASTRID※の系統・機器を分担して開発、実証技術の確立を図る

概念設計を着実に進め、高い評価を得て基本設計に移行し、2016年度より設計協力項目を拡大した

我が国発の技術の国際標準化を狙う（特にシビアアクシデント対策を中心とした安全性向上のための系統・システム設計）

※ *Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*

協力

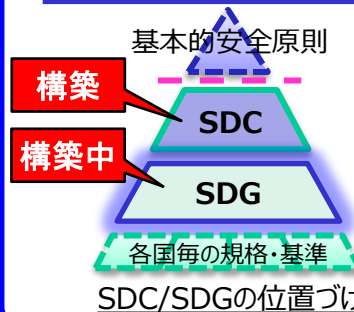
### AtheNa施設等を活用した安全性向上に向けた研究



(*Advanced Technology Experiment Sodium (Na) Facility*)

平成24年1月に完成、実規模のNa試験装置により、シビアアクシデント時に炉心冷却する手段の確実性をさらに高める研究を実施  
ASTRIDに関する協力項目として、系統・機器の実証試験の可能性を検討

### 安全設計要件の国際標準化に向けた取組



世界の高速炉の安全性向上に向け、我が国主導で安全設計要件（SDC）を構築した  
次のステップとして必要になる具体的な安全設計がドライン（SDG）の構築を進めている  
高速炉開発国が安全規制や安全設計へ反映の意向を示し事実上の世界標準を目指していく

# 3. 高速実験炉「常陽」の役割とこれまでの成果

## 「常陽」の使命

- 高速増殖炉の基礎・基盤技術の実証
- 燃料、材料の照射試験
- 将来炉の開発のための革新技术の検証



## これまでの主な成果

- 増殖性能の確認  
消費した以上の燃料が生成されることを確認
- FBR核燃料サイクルの輪を完成  
使用済燃料から取り出したPuを再び燃料として「常陽」に装荷
- ナトリウムの自然循環による崩壊熱除去の実証  
⇒後続炉の安全設計に反映
- 酸化物燃料の性能確認  
燃料ペレット中心近傍を溶融させ、溶融限界線出力密度を確認
- 高速中性子照射場としての利用  
利用実績（～2008年）：約4万試料、研究120件
- 自己作動型炉停止機構の開発  
模擬制御棒を用いた機能確認試験を実施



1977年 初臨界  
積算運転時間 約71,000時間  
試験用集合体の照射実績 約100体

## 再稼働後に期待される研究開発分野

放射性廃棄物減容化・  
有害度低減

高速炉開発

基礎基盤・多目的利用

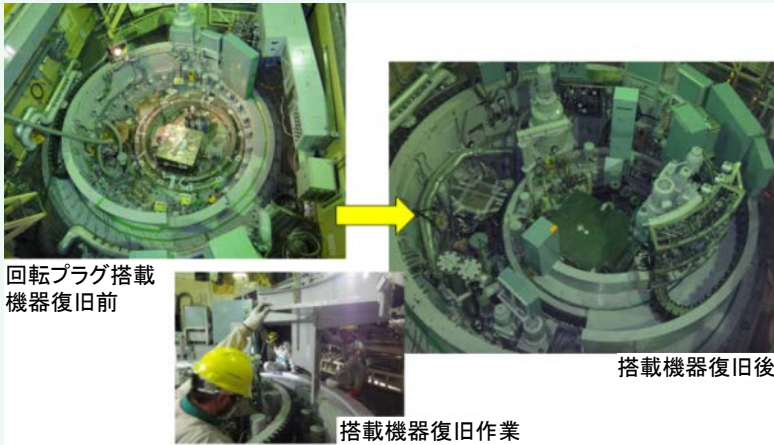
原子力人材育成

# 3. 「常陽」の再稼働に向けた取組み

- **平成28年度に新規制基準に係る設置変更許可を申請予定**
- 再稼働後は、**放射性廃棄物減容化・有害度低減、仏国の実証炉（ASTRID）の開発協力に関する照射試験**等を予定

## 燃料交換機能復旧作業を完了 (平成27年6月)

⇒ 供用期間中検査技術及び遠隔補修技術開発に資する貴重な技術的知見を蓄積した**再稼働**



## 新規制基準への適合

- 耐震対策 : 配管支持装置の補強
- 津波対策 : 海拔38mに設置のため補強不要
- 竜巻対策 : 飛来物対策
- その他対策 : 内部火災、溢水対策設備の補強

## 高速炉システムによる放射性廃棄物減容化・有害度低減の有効性の確認

- MA含有MOX燃料の長期照射試験
- Pu含有量を高めたMA含有MOX燃料の照射試験
- 燃料を溶融させる試験



実規模燃料の照射試験

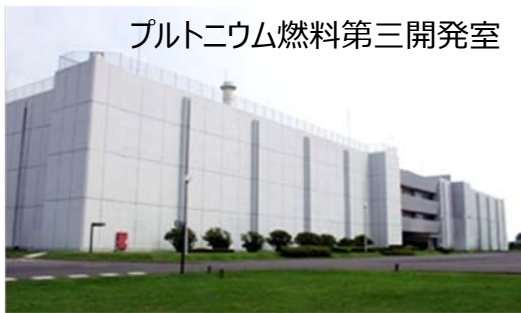
Am等のふるまい、MA含有MOX燃料の設計の妥当性等の照射試験データ

反映

	2015	(第3期中長期計画)	2021
設置変更許可申請	申請準備	適合性審査、対策工事等	再稼働 照射試験実施
照射試験準備	照射試験計画検討、設工認、集合体製作等		

# 3. プルトニウム燃料第三開発室の再稼働に向けた取り組み

- **「常陽」、「もんじゅ」用の燃料製造**に向けて、プルトニウム燃料第三開発室（Pu-3）の加工事業化のための補正申請に向けた取り組みを実施中。
- 耐震補強方法の検討等を行い、**平成28年度に加工事業の補正申請を行う計画。**



プルトニウム燃料第三開発室

世界に先駆けて**遠隔自動化による工学規模での高速炉用MOX燃料製造技術を実証**

これまでに「常陽」、「もんじゅ」へ燃料を供給

昭和63年「常陽」燃料製造開始  
平成元年「もんじゅ」燃料製造開始

**【燃料製造実績】**  
「常陽」 301体  
「もんじゅ」 366体

## 加工事業化への取組

平成16年 加工事業許可申請

\* 燃料製造行為の反復継続性等の観点から、使用から加工としての規制に変更することが妥当と規制当局判断

平成23年 東北地方太平洋沖地震が発生

⇒ 震災により審査中断

平成25年 **新規制基準施行**

平成27年 原子力規制委員会からPu-3の運用に係る指示

「新規制基準に適合するための取組を速やかに行い、新規制基準への適合を確認するための使用前検査に合格するまでの間、燃料製造及びこれに関する試験を行わないこと」

平成28年度 **加工事業の補正申請予定**

## 新規制基準適合に向けた取組

- 耐震補強工事の検討
- 内部溢水の影響検討
- 外部事象（竜巻、森林火災等）に対する対応策検討
- 設計基準事故の選定
- 重大事故対応策検討

再稼働

**「常陽」「もんじゅ」へ燃料を供給**



# 3. AtheNa施設等を活用した安全性向上に向けた試験

- 炉内熱流動に関する **PHEASANT (水)** の性能を確認し、**試験計画を立案**した。
- **AtheNa施設**を活用した炉心冷却性能試験の試験概要及び試験ケースを整理し、**試験計画を具体化**した。
- **ASTRID**協力項目として、損傷炉心などシビアアクシデントに対応する冷却システムの有効性を示す根拠データを得るための **系統・機器の実証試験の可能性を検討**する。

## 炉心損傷時の多様な崩壊熱除去システムに対する冷却特性を評価



Na試験装置

H28年度  
完成予定

**(PLANDTL)**

燃料集合体内の  
熱流動挙動の解明



水試験装置

H27年度  
完成、試験  
を実施中

**(PHEASANT)**

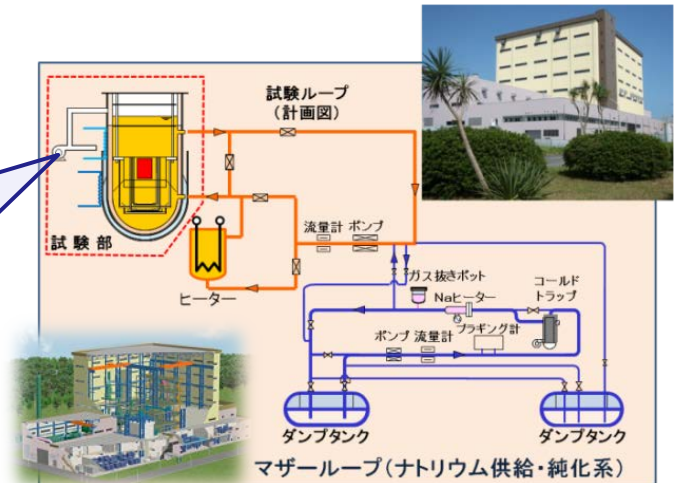
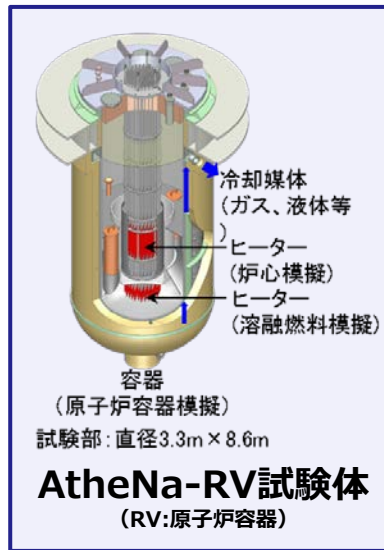
炉内の自然循環  
熱流動の可視化

## AtheNa-RV試験に反映

炉心が著しく損傷するような事故が生じて炉心を安定に冷却できることを試験で実証



## 実規模のNa試験装置により、シビアアクシデント時に対応する炉心冷却システムの有効性データ取得試験



冷却系機器開発試験施設 (AtheNa)  
Advanced Technology Experiment Sodium (Na) Facility

## AtheNa-RV試験



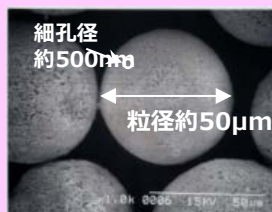
# 4. 放射性廃棄物の減容化・有害度低減の研究開発

- **CPFにて「常陽」使用済燃料のプロセス廃液を対象に、99.9%以上のMA吸着性能確認に成功。**  
 ➤ 現在照射試験用MA含有MOXペレット製造に向けて、**1g以上のMA回収**を目指した吸着分離試験を実施中。
- 並行して、AGFにて、遠隔燃料製造設備により**MA含有MOXペレットを試作**し、照射試験用燃料製造の見通しを得た。
- **国際協力（米国、仏国等）を活用**し、MAサイクルに係る研究開発を引き続き推進。

## SmARTサイクル研究（小規模MAサイクル試験）

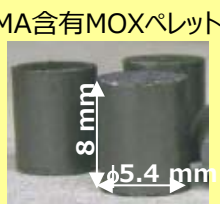
### 廃棄物となる廃液からMAを分離

- 抽出クロマトグラフィ法により、ビーカースケールレベルで99.9%以上のMA吸着に成功
- 使用済燃料から1g以上のMA回収（実施中）



### MA含有MOXペレット及び燃料ピン製造

- MA含有MOXペレットを試作
- MA含有MOXペレットを用いて、照射試験用MA含有MOX燃料ピン製造（今後）



### MA含有MOX燃料ピン製造



### 分離・回収



軽水炉  
高速炉

既存施設を用いて、**分離・回収、燃料製造、照射、照射後試験**までの一連の試験に着手

### 照射後試験



### 照射



国際シンポジウム「放射性廃棄物低減に向けた現状と将来の展望」を開催

平成26年度「ゼロリリースを目指して」 約400名が参加（2日間）

平成27年度「次世代の安心に向けた挑戦」 約220名が参加

# 5. 高速炉研究開発部門における人材育成

○新規制基準対応や研究開発という実践を通じて、次世代の高速炉技術者を育成

## <新規制基準対応再稼働への取組>

- 新規制基準に係る適合性審査等の実践を通じて、設計技術に精通した技術者を育成
- 再稼働への取組を通じて、経験豊富な職員の技能や知識を若手技術者へ技術を継承



「もんじゅ」



「常陽」



「Pu-3」

## <試験施設等を利用した研究開発>

- 試験施設の自ら運転・試験を実施し、研究開発を通じて、ナトリウムを適切に扱える技術者を育成・維持



AtheNa施設



ナトリウム工学研究施設



試験設備の機能試験

## <国内外の高速炉技術者の人材育成>

- 「もんじゅ」プロジェクトに係るナトリウム取扱研修やシミュレータ実習等を通じた人材育成  
⇒国内から約740名、海外から約230名の研修生を受入（平成17年度～平成27年度実績）
- 「常陽」におけるシミュレータを用いた炉物理実習、ナトリウム分析等の技術実習を通じた人材育成  
⇒国内外の1,000名以上の研究者、技術者が「常陽」の運転・保守等に従事
- GIFでの活動や日仏ASTRID協力実施等を通じて、多国間協力における技術的な国際交渉力のある人材を確保・育成  
⇒多国間協力における検討会合の議長等に6名就任。日本が主催する国際会合を10件開催。

## 6. 今後の取組み

- 原子力関係閣僚会議において、核燃料サイクルの推進と高速炉の研究開発に取り組む方針を堅持することが示された。
- 原子力機構は、研究開発機関として、
  - 「もんじゅ研究計画」に定められたミッションを確実に果たして、成果を実用化への開発に資していく。
  - 高速炉サイクルの実用化に向けて、国際協力を図りつつ、将来の高速炉開発に反映可能な成果を得ていく。
  - 高速炉による廃棄物減容・有害度低減の効果と実現性を明らかにし、我が国の核燃料サイクル推進及び使用済燃料問題の解決に貢献する。
- そのためにも、研究開発インフラを早期に整備し、研究開発を着実に推進することで、政策の具体化など国家プロジェクトに貢献していく。