

# 新型転換炉「ふげん」について

平成28年3月4日  
日本原子力研究開発機構

1. 「ふげん」開発の目的
2. 「ふげん」開発の概要
3. 「ふげん」開発の経緯
4. 「ふげん」の運転実績
5. 「ふげん」の主な開発成果
6. 「ふげん」と軽水炉の基本仕様等 比較
7. 「ふげん」と「もんじゅ」の比較
  7. 1 「もんじゅ」との比較: 開発体制
  7. 2 「もんじゅ」との比較: 職員の構成
  7. 3 「もんじゅ」との比較: 組織体制の推移
  7. 4 「もんじゅ」との比較: 要員の経験年数構成
  7. 5 「もんじゅ」との比較: 運転を取り巻く環境条件
  7. 6 「ふげん」と「もんじゅ」の比較(まとめ)
8. まとめ

- 濃縮ウランに頼らない(天然ウラン供給で稼働できる)  
**「新型転換炉(ATR)<sup>※1</sup>」を開発し、実用化に繋げる**

⇒ 開発する新型転換炉は、プルトニウムを利用しやすいこと、  
軽水炉の技術を活かせることを考慮し、  
重水減速・沸騰軽水冷却圧力管型とした

※1: 1950年代、ウラン濃縮技術を保有していたのは米国のみ  
そのため、英国、カナダ、イタリア、日本は、  
天然ウランの供給で稼働できる原子炉の開発を進めた

- それまで輸入に頼っていた**「主要機器<sup>※2</sup>」を国産化し、  
国内技術水準を向上させることに貢献**

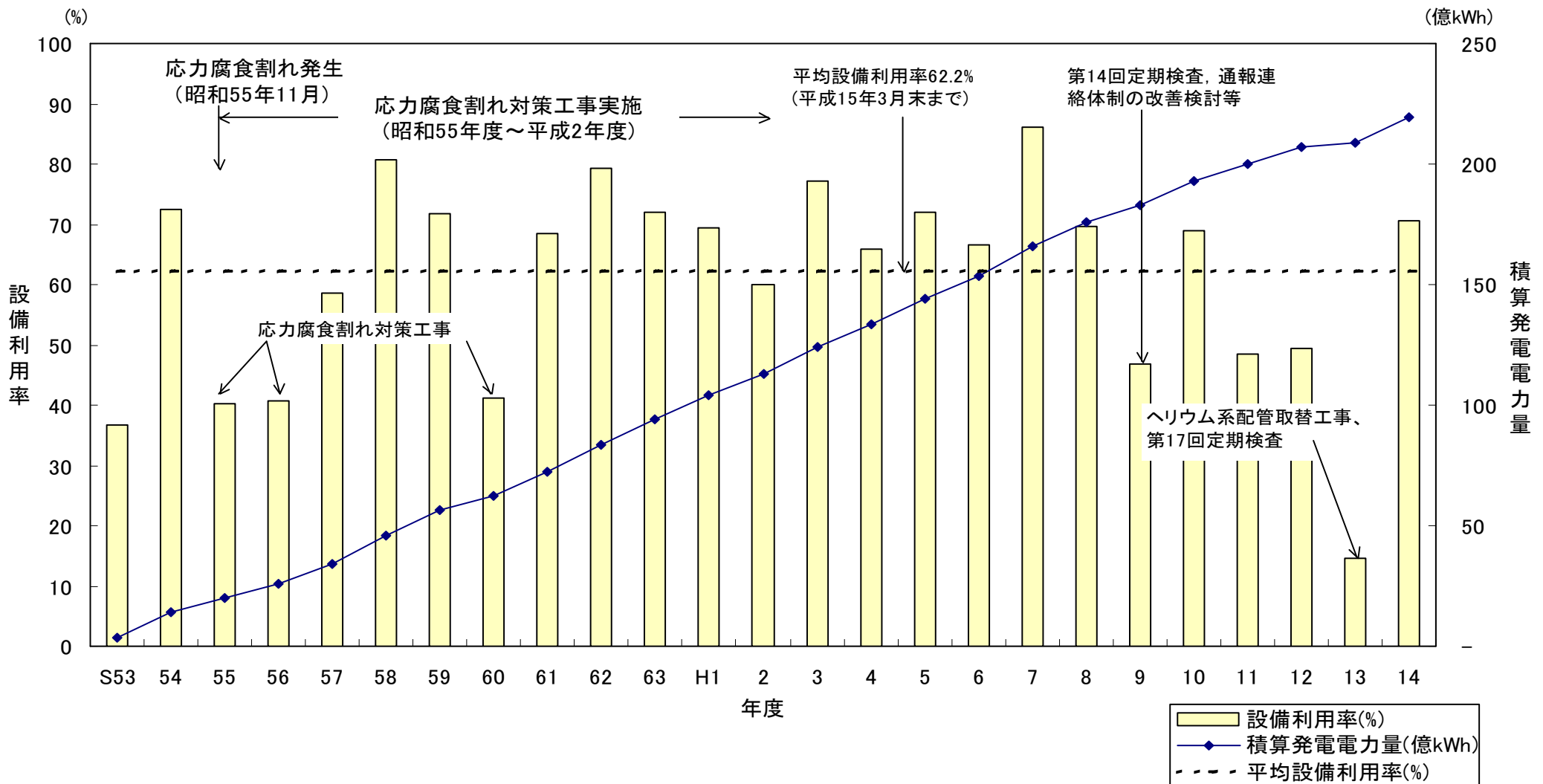
※2: 原子炉再循環ポンプ、逃がし安全弁、主蒸気隔離弁、など

- 開発・運転主体：  
動力炉・核燃料開発事業団（動燃：1967年10月設立）
- 設計・建設：  
原子力産業5社（日立\*、東芝、三菱、富士、住友）に委託  
\*：主務会社
- 燃料供給：  
MOX燃料：動燃東海プルトニウム燃料製造施設（累計772体）  
ウラン燃料：原子燃料工業株式会社（累計687体）
- 使用済み燃料再処理：  
動燃東海再処理施設（「ふげん」燃料約111トン再処理済み）
- 電力供給先：  
関西電力（33%）、中部電力（33%）、北陸電力（34%）

- ① 軽水炉初号機導入時期に建設開始、試運転で大きなトラブルなく滑り出すことができた
- ② QMSの保安規定への取り込み義務化の前に運転を終了

西暦	1955	1965	1975	1985	1995	2005	2015	
ふげん			技術的諸性能の確認 プルトニウム利用の実証 運転管理技術の高度化		廃止措置研究			
			建設	運転		廃止措置		
		▲設置許可	▲臨界 ▲本格運転開始	▲実証炉技術資料 電源開発に引き渡し		▲ATR開発計画中止	▲運転終了(2003年3月)	
常陽			建設	運転				
		▲設置許可	▲臨界					
もんじゅ			建設	建設				
		▲設置許可	▲臨界	▲設置許可	▲初送電	▲Na漏えい事故	▲性能試験再開 炉内中継装置落下 非常用D/Gトラブル	
原子力界の出来事	▲原子力委員会設置 「原子力長計」策定 ・重水型原子炉の建設 ・動力炉数基の輸入 ・増殖実験炉の建設		日本原電敦賀1号(BWR) 建設	建設		運転		廃止措置
			▲設置許可 関電美浜1号(PWR) 建設	建設		運転		廃止措置
	▲原子力委員会 ATR、FBRの開発決定 ⇒エネルギーセキュリティの観点 から国内で核燃料サイクルを確立 自主技術で新型転換炉と高速増殖炉の開 発を並行して進める		▲米国 TMI事故	▲ソ連 チェルノブイリ事故		▲サイクル機構 発足		▲原子力機構 発足
▲動燃設立 ・「ふげん」「常陽」「もんじゅ」開発本格化 ・軽水炉・重水炉・高速炉とも国内には実績で 実証された技術が乏しい状況のなか国産技 術による開発に挑む					▲東海 再処理施設 火災爆発事故 ▲JCO事故	▲QMS 取り込み 義務化 (2004年6月)	▲保全 プログラム 導入義務化	▲原子力規制 委員会設置 ▲新規制 基準施行
					▲阪神淡路大震災	▲新耐震指針 ▲新潟県 中越沖地震	▲東北地方 太平洋沖地震 東電福島第一 事故	

- 総発電電力量： 219億2,400万kWh
- 総発電時間： 13万7,000時間
- 燃料装荷量： 1,459体、そのうちMOX燃料772体  
(MOX燃料集合体装荷数世界一、約1,850kgのプルトニウムを使用)

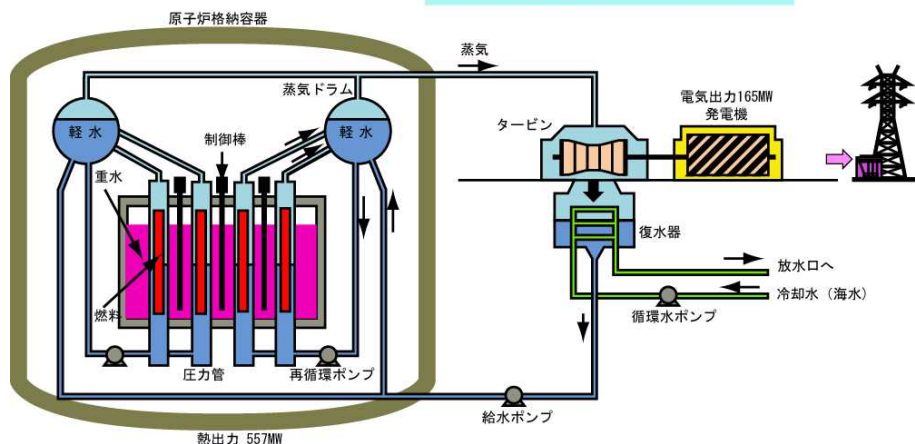


	成果	目的・意義	反映
ATR原型炉として実証炉に向けた研究開発成果	実証炉用MOX燃料、高性能MOX燃料、高燃焼度MOX燃料の照射試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・世界最多(当時)のMOX燃料利用実績を基にプルトニウム利用技術を確立</li> <li>・核燃料サイクルの実証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大間A-BWR安全審査</li> <li>・カナダCANDU炉解体核燃焼計画等</li> </ul>
	ATR炉心設計コードの開発		
	重水精製装置、重水・トリチウム管理技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ATR実証炉(圧力管型重水炉)につなぐ主要技術の確立と実証</li> <li>・ 圧力管の健全性評価と実証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リトアニアイグナリナ発電所技術供与</li> <li>・ロシアレニングラード発電所技術供与</li> </ul>
	圧力管検査技術		
	マイクロホン冷却材漏えい検出技術		
運転保守に関連・付随する研究開発成果	国産初号機(原子炉再循環ポンプ、逃がし安全弁、主蒸気隔離弁等)や初採用機器(希ガスホールドアップ装置、長寿命型中性子検出器等)の性能実証	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 輸入に頼っていた主要機器の国産化</li> <li>・ 実用軽水炉に適用前のチャレンジ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 軽水炉に反映(リスクがあるため、実用軽水炉ではできないチャレンジ)</li> </ul>
	応力腐食割れ(SCC)対策のための原子炉冷却水への水素注入技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ SCC対策として軽水炉にも応用可能な水素注入技術の確立と実証</li> </ul>	
	被ばく低減のための系統化学除染技術・亜鉛注入技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉冷却系の線量率低減と再汚染防止技術の確立と実証</li> </ul>	
	給水制御系ファジィ制御技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 運転初期に苦労した蒸気ドラム水位制御の改善のための新技術開発</li> </ul>	
人材育成	<b>実証炉・フルMOX-ABWRの技術者育成</b> ・「ふげん」運転期間における後半の約16年間に、電源開発の若手社員約140名(約4年/人)を受け入れ、OJT研修を実施	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 将来のATR実証炉の運転保守要員の育成(MOX燃料利用技術、運転・保守技術、重水・トリチウム管理技術等の修得)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大間A-BWRの技術者育成</li> </ul>
	文部科学省の原子力研究交流制度による <b>アジア諸国の原子力技術者の養成</b> (1989年以降現在までに、7か国より94名)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ アジアの原子力新興国の技術者養成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 中国、韓国、インドネシア等の技術者養成</li> </ul>

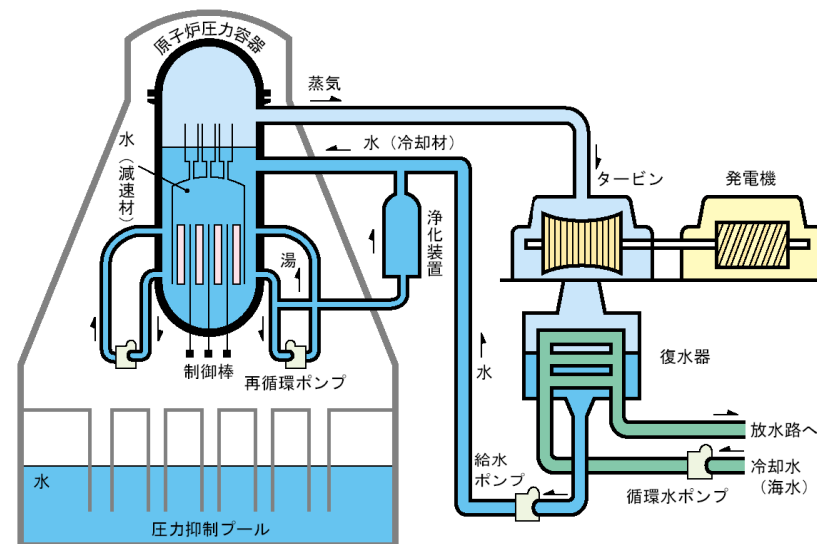
- ・ 成果の公開: 国内学会発表(384件)、国際学会発表(186件)、論文投稿(189件)、工業所有権(国内379件、国外88件)
- ・ 表彰等: 日本原子力学会賞(MOX燃料利用、水素注入、制御技術 など多数)、触媒学会賞(重水精製技術に関する開発)
- 米国原子力学会 ランドマーク賞 など

項目	「ふげん」	軽水炉(BWR) (同時期の原電敦賀1号炉H/Pより)	「もんじゅ」 (参考)
炉型	新型転換炉 重水減速沸騰軽水冷却圧力管型	沸騰水型軽水炉	高速増殖炉 ナトリウム冷却ループ型
出力(電気/熱)	165MWe / 557MWth	357MWe / 1,064MWth	280MWe / 714MWth
減速材	重水	沸騰軽水	なし
冷却材	沸騰軽水	沸騰軽水	ナトリウム
燃料組成(Pu富化度又はU濃縮度)	MOX燃料 (初装荷用1.4wt%/取替用2.0wt%) ウラン燃料 (初装荷用1.5wt%/取替用1.9wt%)	ウラン燃料(約3.7wt%)	MOX燃料 (内側炉心用:約16wt% 外側炉心用:約20wt%)
初臨界	1978年3月	1969年10月	1994年4月
初送電	1978年7月	1969年11月	1995年8月
平均設備利用率	約62.2%	約60.1%	—

炉容器の型	減速材	冷却材
ふげん 軽水炉	圧力管型 重水	圧力管型 軽水
軽水炉	圧力管型 軽水	圧力管型 軽水



新型転換炉(ATR)「ふげん」



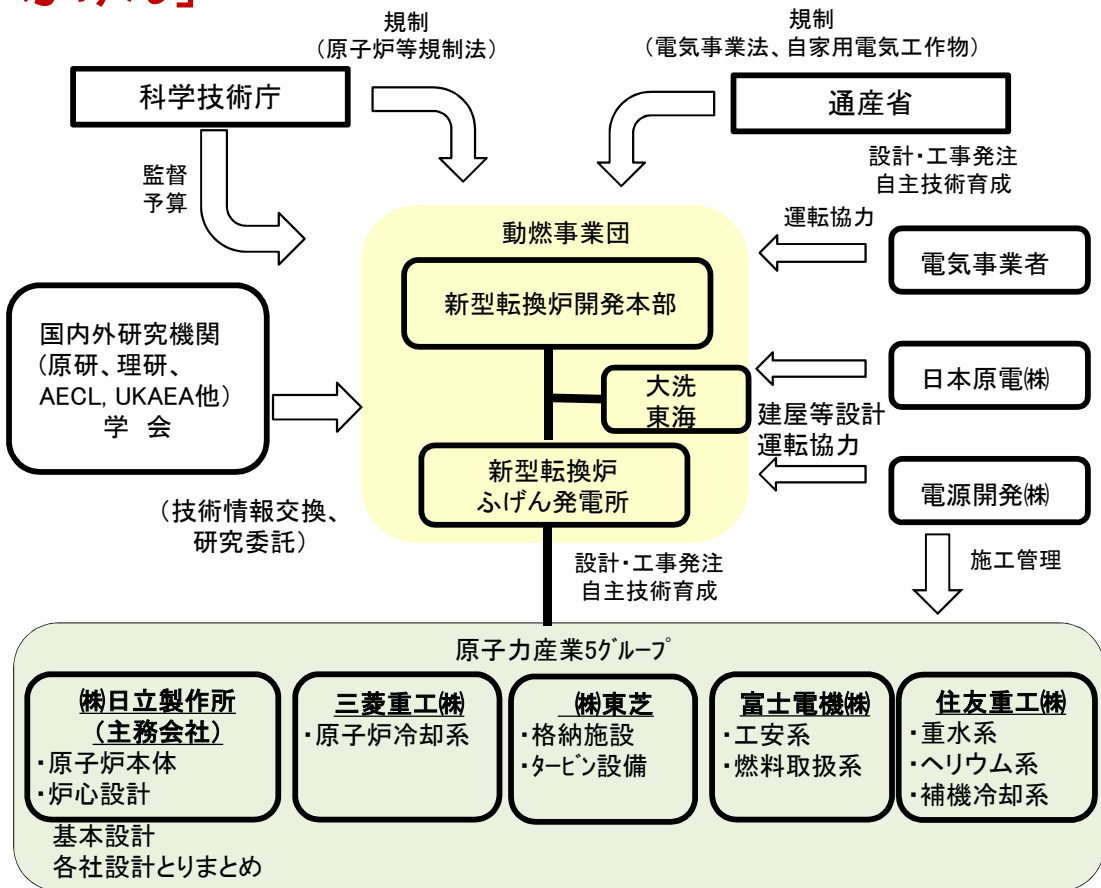
沸騰水型軽水炉(BWR)



- 「ふげん」「もんじゅ」ともに 産学官の協力体制により開発
- 「ふげん」は設計に一貫性を持たせるため主務会社を置いた
- 「もんじゅ」は主要4社の合同出資による「高速炉エンジニアリング(株)」(FBEC)により各社間調整を実施

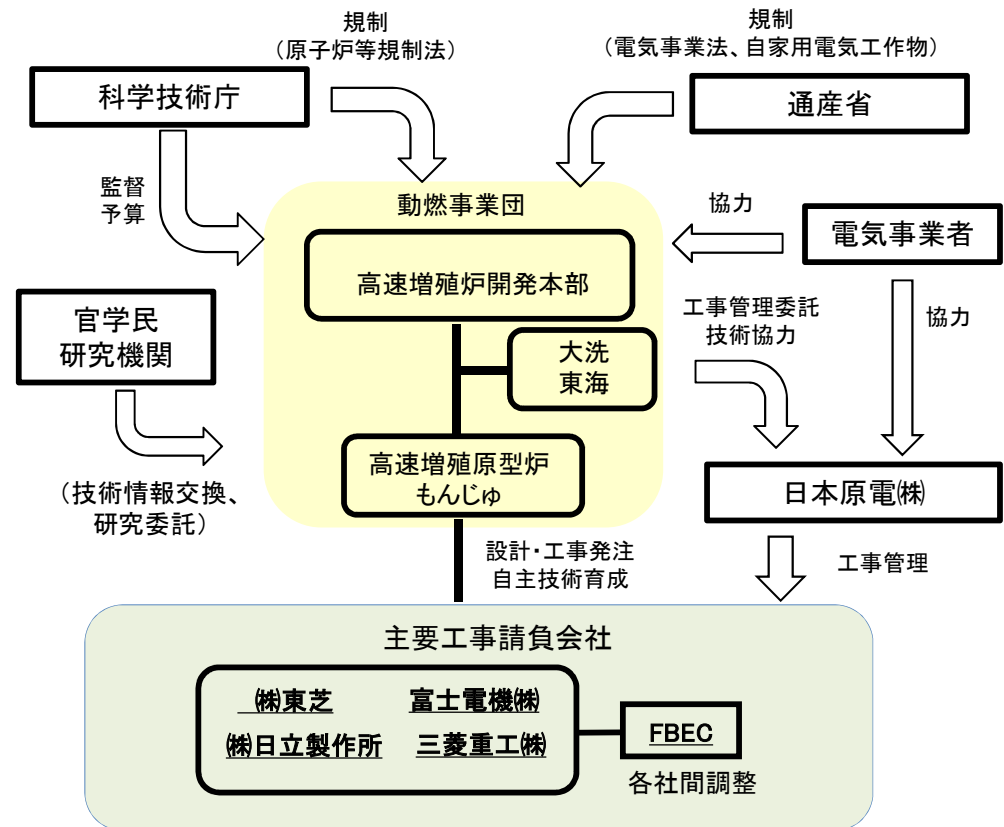
開発体制は  
ほぼ同等と評価

## 「ふげん」



設計・建設、運転当初の開発体制

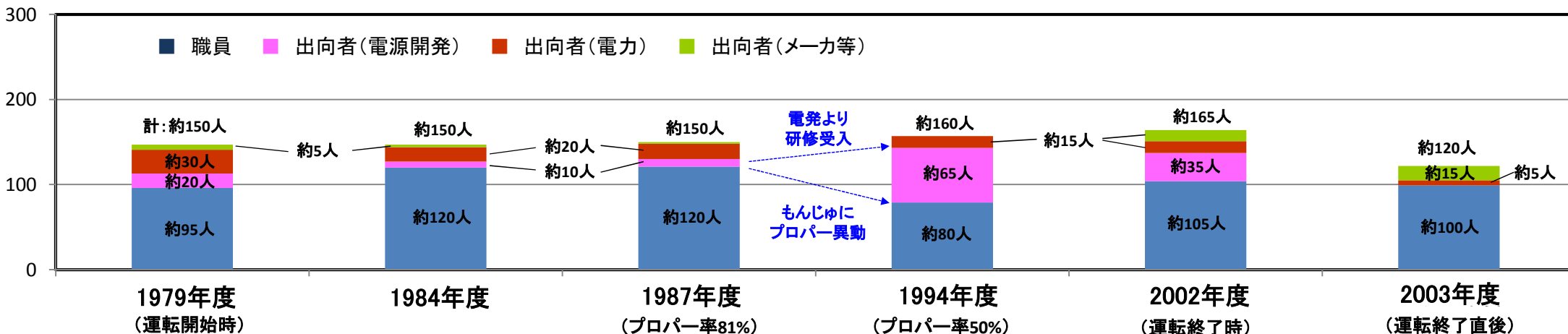
## 「もんじゅ」



設計・建設、運転当初の開発体制

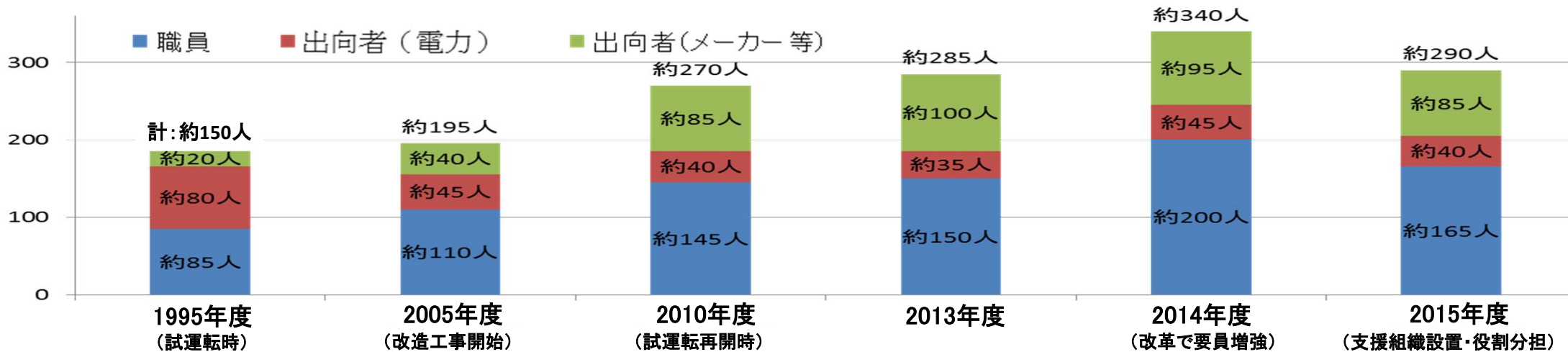
## 「ふげん」

- 総人員は150名程度で推移
- 運転開始初期は、電発・電力からの出向者と若年プロパーで構成（プロパー率は比較的高い）
- 1987年以降は、もんじゅにプロパーを異動、その減少分は電発より受け入れ補充



## 「もんじゅ」

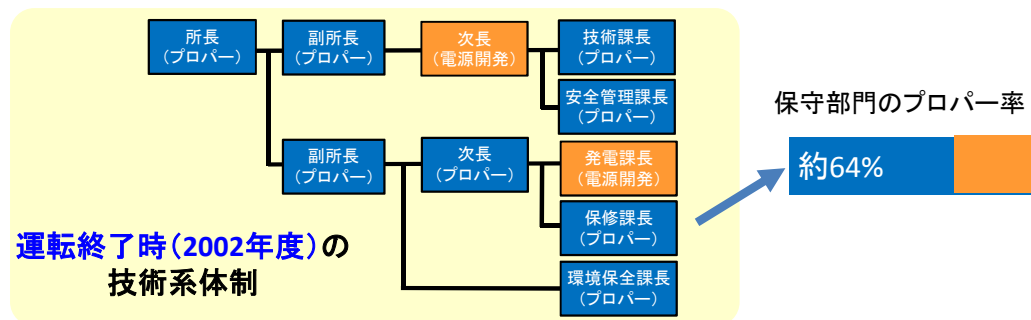
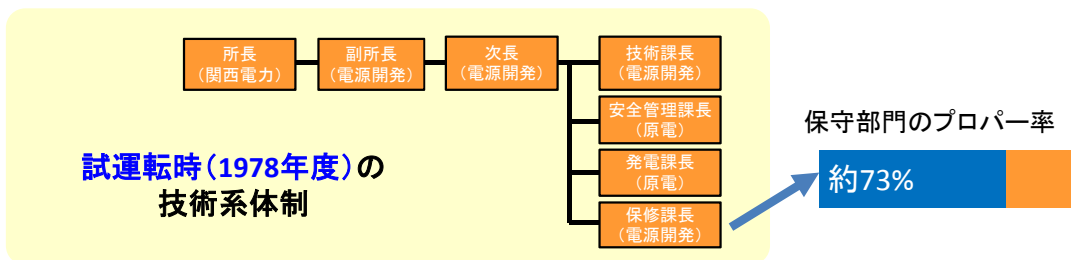
- 総人員は、2009年度頃から大幅に増員（保守管理対応等）
- 試運転開始当初は、協定に基づき電力と半数ずつの要員構成。プロパーはふげん、大洗等から集約
- ナトリウム漏えい事故後、運転員中心にプロパー増員
- 3部2室体制移行に伴い更に増員、プロパー不足分はメーカ・協力会社出向者で充足 ⇒ プロパー率4～5割強



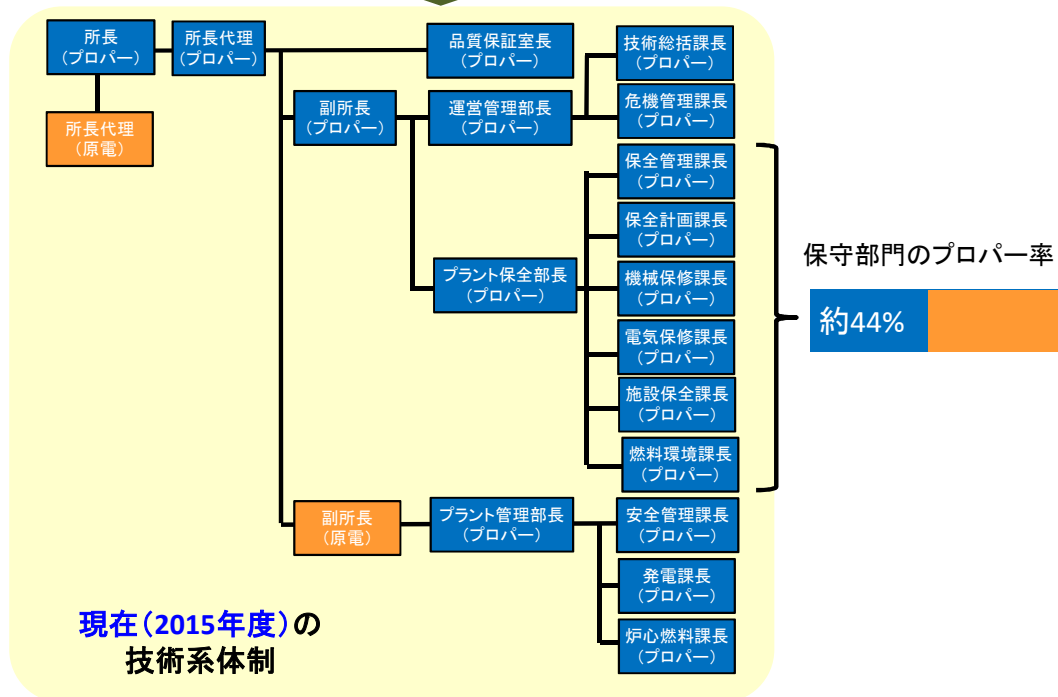
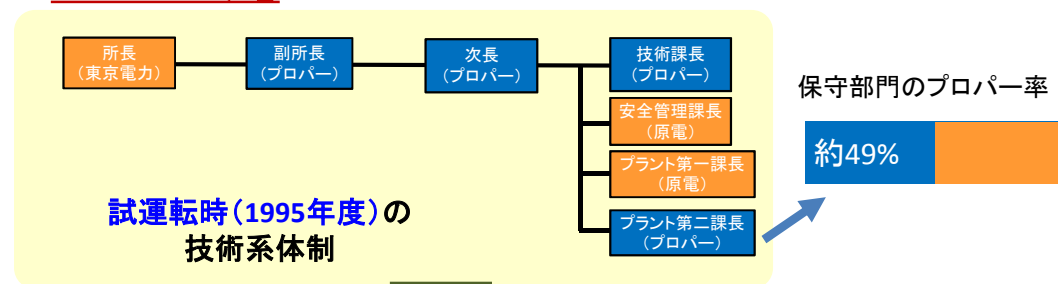
# 7.3 「もんじゅ」との比較：組織体制の推移

- 「ふげん」は、試運転時には電力の経験者が現場のライン職制に就き、その下でプロパー職員が技術を習得  
運転終了時には、経験を積んだプロパーがライン職制に就く体制
- 「もんじゅ」は、試運転開始時には電力とプロパーが半々のライン職制の体制  
現在では、ほぼプロパー職員がライン職制に就く体制（職員層では、保守部門のプロパー率が比較的低い）

## 「ふげん」



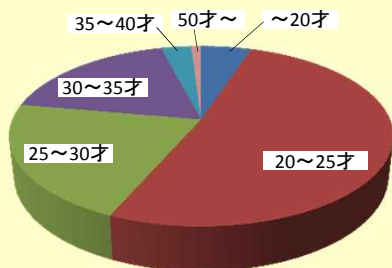
## 「もんじゅ」



- 「ふげん」は、試運転時には若手プロパー職員が大半  
 ⇒ 経験年数の少なかった職員がそのまま運転終了まで従事し、  
 結果として運転終了時は、ふげんの現場経験豊富なプロパーが大半を占める
- 「もんじゅ」は、試運転開始時に「ふげん」や「常陽」から職員を集約(幅広い年齢層)  
 ⇒ 停止期間が長引く間に多くが定年退職/異動となる  
 更に要員を大幅に増員したため、もんじゅの現場経験豊富なプロパーの割合が低い

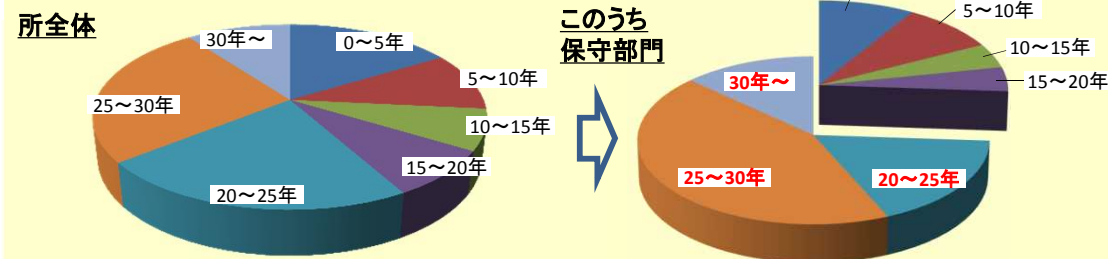
## 「ふげん」

ほとんどのプロパーが若い職員



試運転時(1978年度)の技術系プロパーの年齢構成

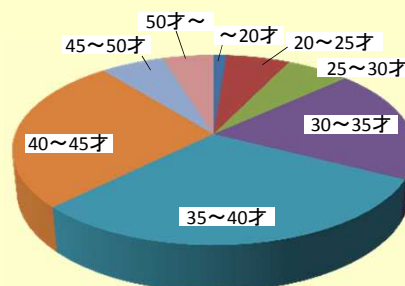
試運転時のプロパーがそのまま運転保守に最後まで従事  
 <保守部門では20年以上の経験者が約75%>



運転終了時(2002年度)の技術系プロパーのふげん経験年数

## 「もんじゅ」

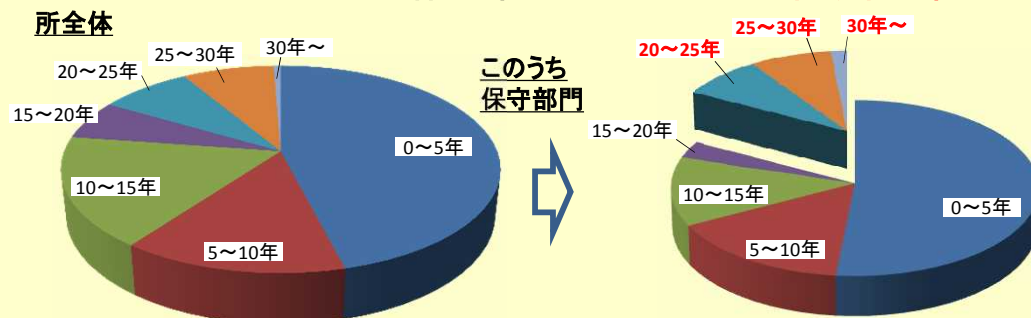
「ふげん」や「常陽」から幅広い年齢層の職員を集めた



試運転時(1995年度)の技術系プロパーの年齢構成

経験豊富なプロパーは順次定年退職

<保守部門では20年以上の経験者は約20%>



現在(2015年度)の技術系プロパーのもんじゅ経験年数

## 「ふげん」

○ふげんは大きなトラブルなく本格運転に入り、結果として順調に稼働した

○同時代の商用軽水炉並みの設備利用率を達成したことから、品質管理は十分なレベルで行われていたと言えるが、運転を取り巻く環境条件が「もんじゅ」とは大きく異なると評価

特に

- ・原子力発電所に頻発した検査・点検の不正問題の再発防止として品質保証活動(QMS)の保安規定への取り込み等、規制の変化が運転終了後だったこと など

## 「もんじゅ」

○もんじゅは、ナトリウム漏えい事故とその際の不適切な情報の扱いから大きな社会問題となり、結果として試運転途中で長期間の停止となった

○長期停止により運転・保守の経験が積めない中、品質保証活動(QMS)の保安規定への取り込み等の規制の変化に十分適合できていなかった

項目	「ふげん」	「もんじゅ」
技術的事項	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 水冷却炉であり、並行して建設された軽水炉と類似技術有</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 大型のナトリウム冷却炉は国内になく開発課題が多い</li> </ul>
設計・建設の体制	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 設計・建設はメーカー5社に発注</li> <li>○ 主務会社にて設計のとりまとめ実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 設計・建設はメーカー4社に発注</li> <li>○ 総合エンジニアリング会社FBECを設立し、各社間の調整を実施</li> </ul>
所の運営体制	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 運転開始時以降、所の総職員数は約150～160名で推移し、大きな変動なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 保守管理等に係る体制強化により、総職員数は当初の約185名から約340名に倍増</li> </ul>
要員	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 試運転当時は、若い職員がプロパーのほとんどを占めていた</li> <li>○ 最初に配属したプロパー職員の大半が運転終了まで継続して従事したため、ふげんの現場経験豊富なプロパーが多く存在 (保守部門では20年以上経験者が全体の75%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 試運転開始時は、動燃全体からプロパーを集めたため、プロパー職員は幅広い年齢層</li> <li>○ プロパー職員が順次定年退職／交替 加えて、要員総数を倍増したため、もんじゅの現場経験の浅い者が多く存在 (保守部門では20年以上経験者が全体の約20%)</li> </ul>
規制の状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 品質保証の保安規定取り込みが法令化されたが、<b>施行されたのは運転終了後</b></li> <li>○ 2009年に<b>保全プログラムの導入が法令化される以前に運転が終了</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 品質保証の保安規定取り込みが法令化</li> <li>○ 建設段階炉であったが、法令化され、急遽、供用中軽水炉並みの保全プログラムを2009年1月に導入</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ ふげんは大きなトラブルなく本格運転に入ったことから、結果として順調に稼働</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ もんじゅは、ナトリウム漏えい事故とその際の不適切な情報の扱いにより大きな社会問題となり、結果として試運転途中で長期間の停止となった</li> </ul>

「ふげん」は、  
電力・メーカとの協力体制、原子力産業メーカ数社に発注、  
などの状況は「もんじゅ」と同様であったが、敢えて相違点をあげると以下のことが考えられる

- 試運転開始前に採用したプロパーの多くがそのまま運転終了まで従事し、現場経験豊富な職員が多く存在したこと
- 同上の理由から比較的プロパー率も高かったこと
- 試運転から成功裏に運転に移行し、QMSの保安規定への取り込みの義務化などの前に運転を終了したこと

# 参 考



## 「ふげん」における核燃料サイクルの輪の完成 (1988年5月)

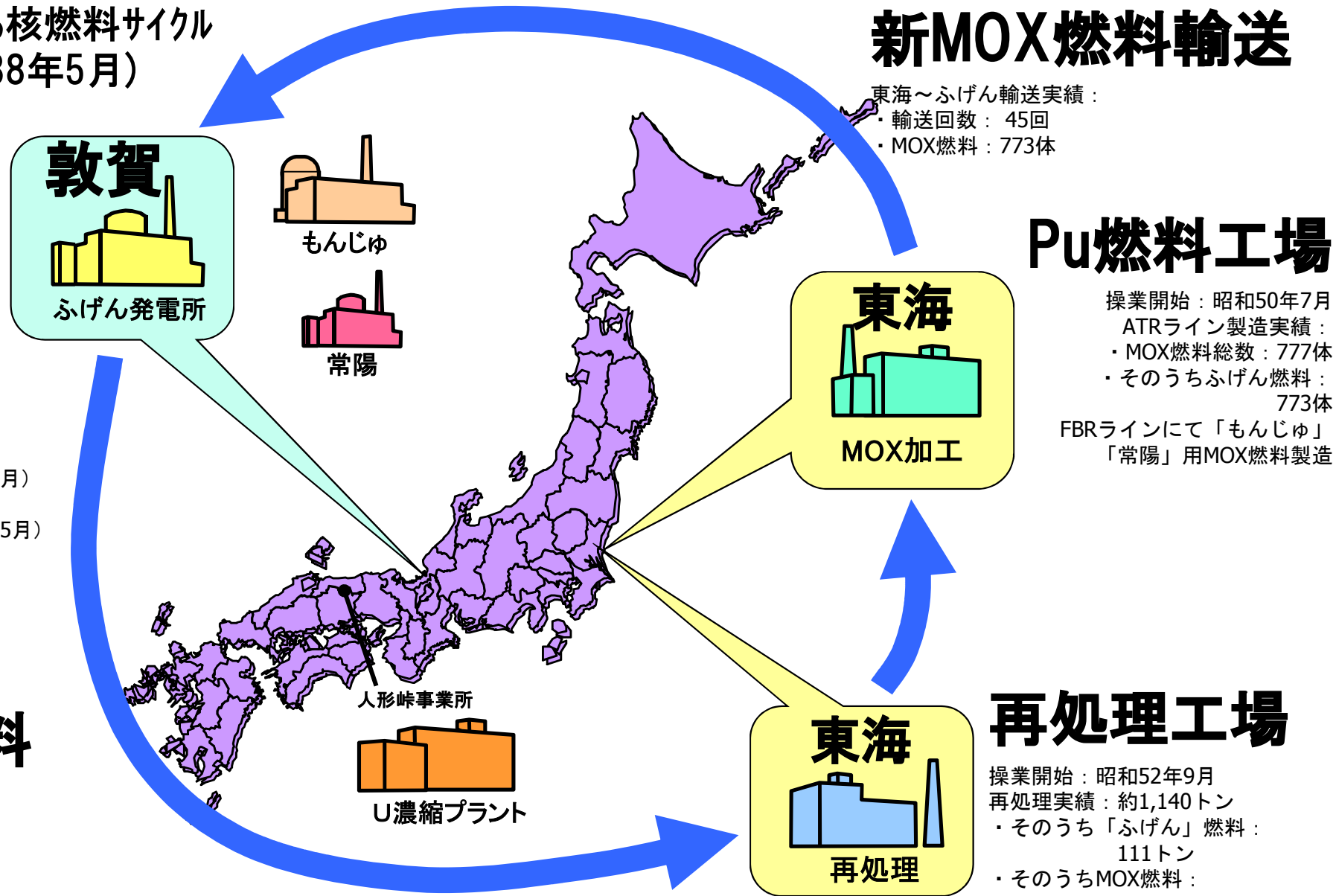
### ふげん

本格運転開始：昭和54年3月  
 MOX燃料装荷総数：772体  
 炉心内MOX装荷割合：  
 34%～72%  
 最高燃焼度：38GWd/t

- ・国産Pu利用 (昭和56年9月)
- ・人形峠濃縮ウラン (昭和57年12月)
- ・国産回収ウラン (昭和59年5月)
- ・ふげんPuのリサイクル (昭和63年5月)

### 使用済燃料輸送

ふげん～東海輸送実績  
 ・輸送回数：29回  
 ・使用済燃料：986体



### 新MOX燃料輸送

東海～ふげん輸送実績：  
 ・輸送回数：45回  
 ・MOX燃料：773体

### Pu燃料工場

操業開始：昭和50年7月  
 ATRライン製造実績：  
 ・MOX燃料総数：777体  
 ・そのうちふげん燃料：773体  
 FBRラインにて「もんじゅ」「常陽」用MOX燃料製造

### 再処理工場

操業開始：昭和52年9月  
 再処理実績：約1,140トン  
 ・そのうち「ふげん」燃料：111トン  
 ・そのうちMOX燃料：29トン

## 運転履歴

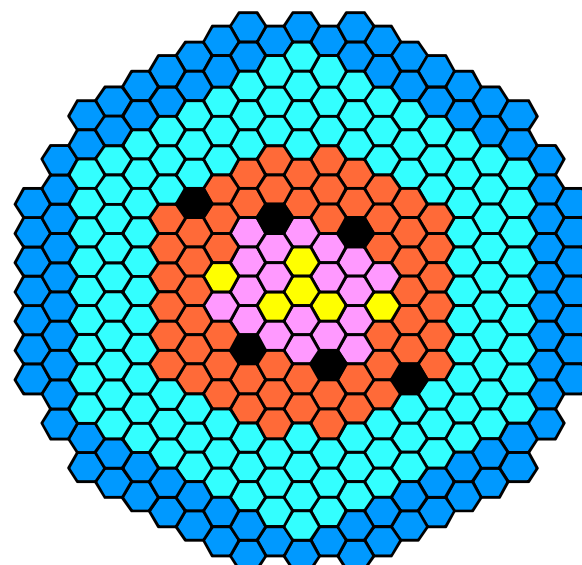
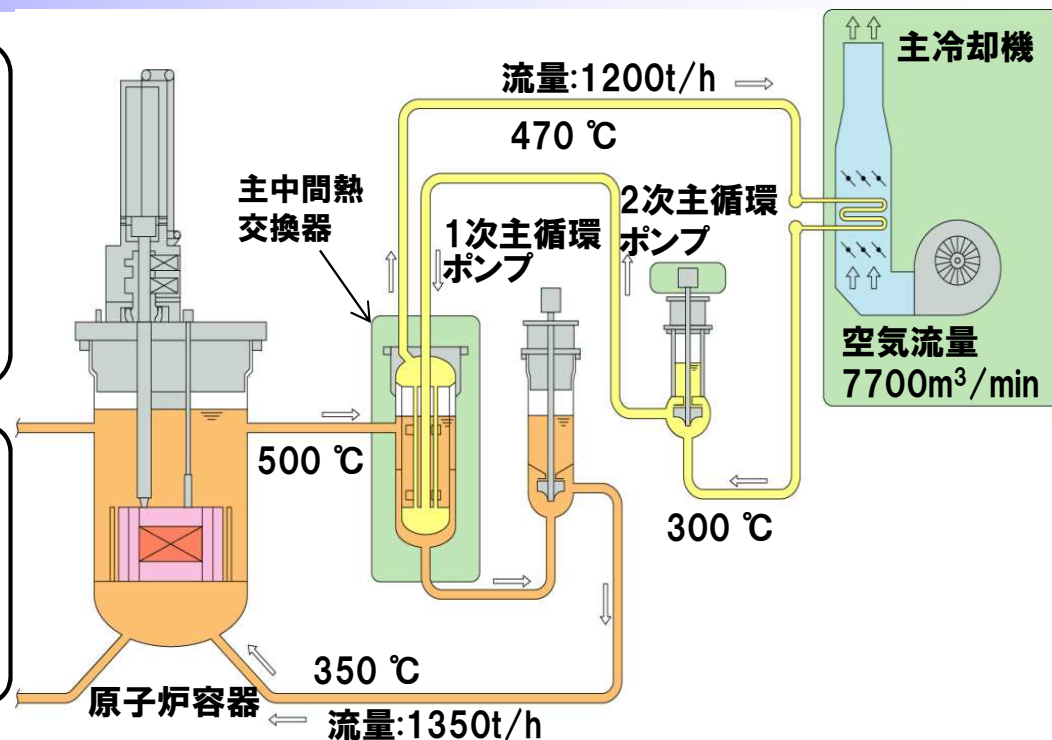
初臨界	: 1977年
運転開始 (MK-I, 増殖炉心)	: 1978年
〃 (MK-II, 照射炉心)	: 1983年
〃 (MK-III, 高度化炉心)	: 2004年

## 役割

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

## 主要仕様

定格出力	: 140 MWt
冷却材	: 液体ナトリウム (2 ループ)
燃料	: 混合酸化物燃料 (MOX)
炉心直径	: 80 cm
炉心高さ	: 50 cm
最大高速中性子束	: $4 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> ・s



- 内側炉心燃料集合体
- 外側炉心燃料集合体
- 制御棒
- 照射用集合体
- 反射体
- 遮へい集合体

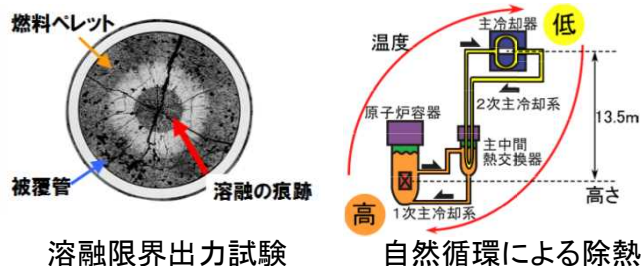
炉心構成 (MK-III)

## 高速炉技術の確立

- 増殖性能の確認
- 炉心・プラント特性データの取得 (MK-I、MK-II、MK-III炉心)
- 核燃料サイクルの輪の実証

## 高速炉の安全性の実証

- 自然循環による崩壊熱除去の実証
- MOX燃料の性能確認 (燃料溶融試験、高燃焼度試験の実施)

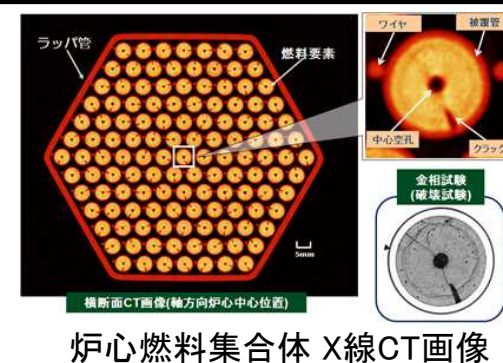


## 「もんじゅ」、実証炉 (FaCT) への貢献

- もんじゅ・実証炉開発のための照射試験
- 高燃焼度を目指した被覆管材料 (ODS鋼) 等の照射試験
- 自己作動型炉停止機構の照射試験

## 照射試験・照射後試験

- 世界最高レベルの高速中性子束
- 多様なニーズに対応可能な照射試験用集合体の開発 (キャプセル型)
- 最先端の照射後試験技術 (X線CT)
- 約100体の照射試験用集合体を装荷



炉心燃料集合体 X線CT画像

## 運転保守経験の蓄積、データベース化

- プラントの運転・保守、定検、改造工事等を通じた高速炉プラントの運転保守技術の蓄積
- 高速炉用機器信頼性データベースへの反映
- 保守体系データベース、マニュアルの作成、技術者教育への反映



## 国際協力

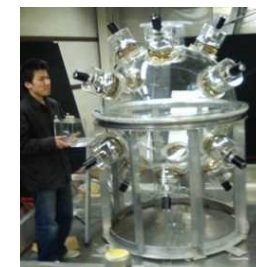
- 米国・仏国との連携・協力 (交換照射の実施、プラント運転・保守経験等の情報交換、駐在員の相互派遣)
- WANO (世界原子力発電事業者協会)、IAEA等を通じた世界各国との情報共有
- OECD/NEAコードベンチマークへの貢献

## 基礎・基盤研究、外部利用

- 核融合炉材料開発
- 照射損傷研究
- 基礎物理研究



核融合炉材料照射試料



ニュートリノ検出器の性能実験