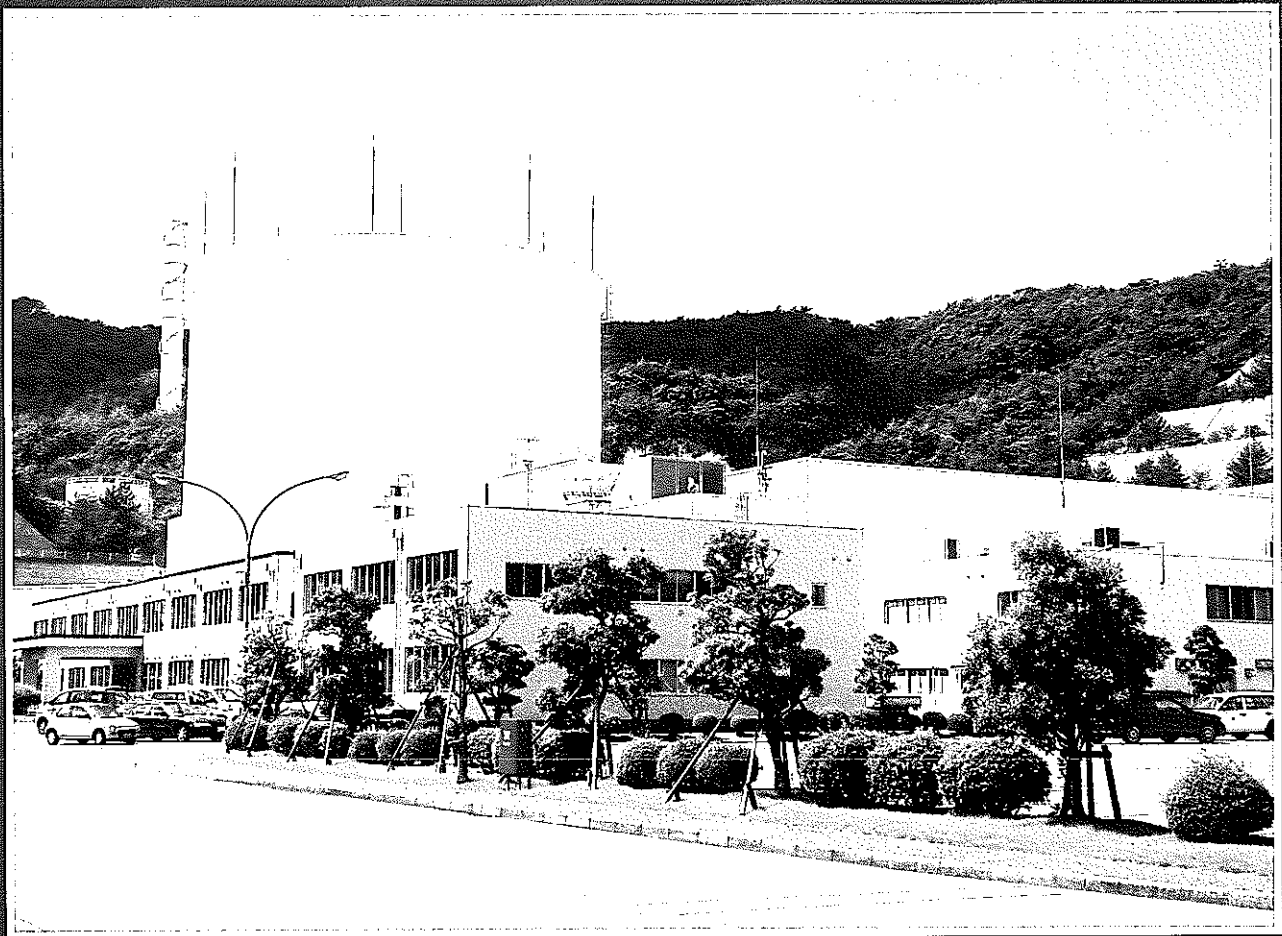


# 「ふげん」における プルトニウム燃料の利用実績



# 世界に先駆けてプルトニウム



## 目次

「ふげん」(ATR) プロジェクトの変遷	4
「ふげん」の設備概要とその特徴	6
設備概要	
燃料集合体	
「ふげん」の特徴	
プルトニウム利用技術の確立と実証	10
「ふげん」のプルトニウム利用実績	
「ふげん」の核燃料サイクル実績	
プルトニウム燃料の開発と製造実績	
再処理実績	
「ふげん」のプルトニウム利用と核燃料サイクル技術の広がり	

# の本格利用を果たした「ふげん」の成果

## 新型転換炉の自主開発

エネルギー資源に恵まれない我が国の原子力利用は、ウラン資源の有効利用を図るため、準国産エネルギーとも言えるプルトニウムを再利用する核燃料サイクルを基本路線として進められています。核燃料サイクル開発機構は、プルトニウムの平和利用に必要な核燃料サイクル確立のための研究開発を行い、その一環として、プルトニウムを燃料として容易に利用できる新型転換炉（ATR：Advanced Thermal Reactor）の国産自主技術による開発をナショナルプロジェクトとして進めてきました。

## 「ふげん」の建設・運転

新型転換炉「ふげん」は、昭和45年12月に着工、昭和53年3月20日にウラン・プルトニウム混合酸化物（MOX）燃料22体により最小臨界を達成、1年間の起動試験を経て昭和54年3月20日より本格運転を開始しました。「ふげん」は、運転開始時よりMOX燃料を利用し、以後、今日に至るまで24年以上に渡ってMOX燃料を利用し続け、安全かつ安定な運転実績を積み重ね、世界に先駆けてプルトニウムの本格的な利用を果たしてきました。

## プルトニウム利用技術の確立と実証

「ふげん」におけるプルトニウム利用の一方で、東海事業所では、「ふげん」用のMOX燃料の製造、使用済燃料の再処理及び燃料高度化等の研究開発を実施してきました。昭和56年9月以降は、東海事業所の再処理工場において我が国の軽水炉の使用済み燃料から回収されたプルトニウムを原料にしたMOX燃料を「ふげん」に装荷、また、昭和63年5月には「ふげん」の使用済MOX燃料の再処理で得られたプルトニウムを用いてMOX燃料を製造し、再び「ふげん」に装荷し、軽水炉および「ふげん」の核燃料サイクルの輪をはじめて完結しました。このように「ふげん」は、核燃料サイクルを先行的に具現化・実証して我が国の核燃料サイクル技術の蓄積・広がりにも貢献するとともに、プルトニウムの平和利用に対する国内外の理解を深めるために貢献してきました。

## これからのプルトニウム利用

昭和57年8月には「ふげん」に続くATR実証炉の建設計画が決定しましたが、その後約10年間に渡って計画は1年づつ延伸が繰り返され、抜本的かつ効果的な合理化設計が十分に行なえず、結果として他の電源と比べて大幅に経済性が悪化しました。また、プルサーマル計画が進展し、ATRでのプルトニウム利用を軽水炉が代替し得る見通しも得られていたことから、平成7年8月には実証炉計画は中止となりました。その後、「もんじゅ」事故等に端を発して動燃事業団も新法人「核燃料サイクル開発機構」へ改組することが決定し、新型転換炉開発については、その役割が終了しつつあることから基本的に撤退し、「ふげん」については平成15年に運転を停止し、廃止措置研究に利用することになりました。「ふげん」は運転を終了いたしますが、核燃料サイクルを確立してプルトニウムを利用するという我が国の原子力利用の基本的な考え方は変わることなく、軽水炉におけるプルサーマルそして高速増殖炉での利用へと引き継がれ、そして「ふげん」の開発成果がこれら次のバッテリーに有効に役立てられます。

# 「ふげん」(ATR) プロジェクトの変遷

## 「ふげん」プロジェクトの誕生

昭和41年5月、原子力委員会は、エネルギーセキュリティの観点から我が国は核燃料サイクルの確立に努めるべきであること、そのための動力炉開発として高速増殖炉と新型転換炉を国のプロジェクトとして自主開発するという動力炉開発の

基本方針を決定します。早期に実用化が見込めかつ天然ウラン燃料等が利用できる観点から、新型転換炉としては、重水減速沸騰軽水冷却型炉を開発することが決定され、新型転換炉「ふげん」プロジェクトが誕生しました。

## 「ふげん」の役割の変遷

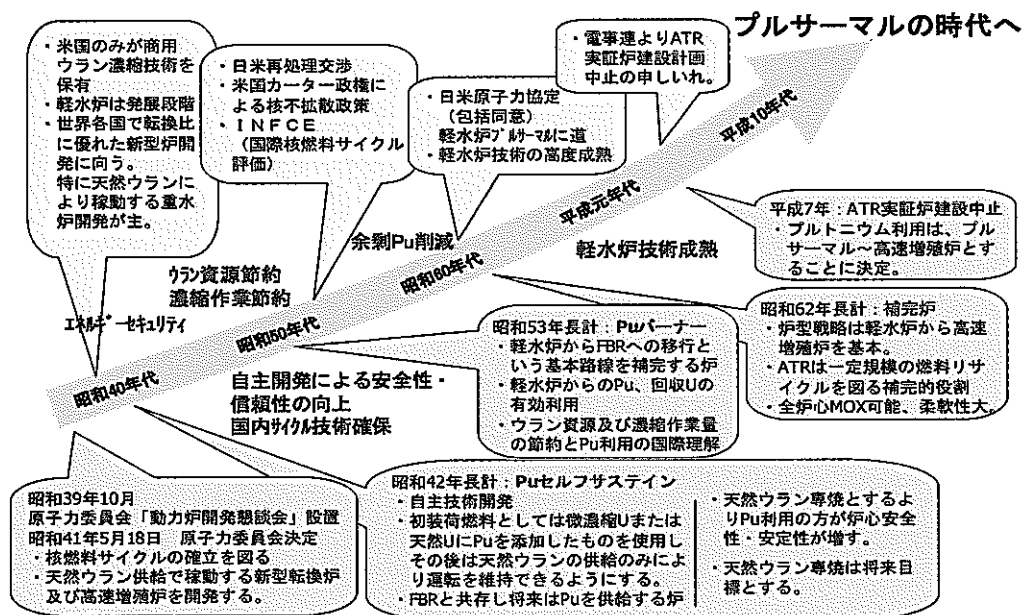
昭和42年の原子力長期計画では、「初装荷燃料として微濃縮または天然ウランにプルトニウムを添加したものを使用し、その後は天然ウランの供給のみで運転を維持できる方式のものとし」という役割が示されました。運転によって生成されるプルトニウムと天然ウランとを混ぜて利用することによって運転を維持する方法で、プルトニウムセルフサステインと呼んでいました。

当初の天然ウランを利用するという新型転換炉開発目標設定の背景には、当時の濃縮ウラン需給の国際情勢等がありました。しかし、その後10年ほどで、我が国の濃縮技術の見通しが立ったこと、天然ウラン燃料を利用する場合再処理費が高くなる見通しが明らかになったこと、インドの核実験(昭和49年)の実施により核不拡散体制が強化

されたことなど外部情勢も大きく変化しました。

そして「ふげん」が運転を開始する昭和53年頃には、軽水炉の使用済み燃料の再処理で回収されるプルトニウムや減損ウランを利用し、天然ウランは回収するプルトニウムと混合して利用するというプルトニウム燃焼炉(プルトニウムバーナー)へとその役割が変遷しました。

役割はこのような変遷をしましたが、「ふげん」はもともと多様な燃料を利用できる炉心特性を有していたことから、炉型は代えることなくそのままこのような役割の変遷に対応ができました。「ふげん」は昭和53年3月に初臨界を達成、その翌年3月より本格運転を開始、以降24年間に渡り順調にプルトニウムの利用実績、核燃料サイクル実績を積み重ね、装荷したMOX燃料体数(748体)では単一炉としては世界最大の実績を達成しています。

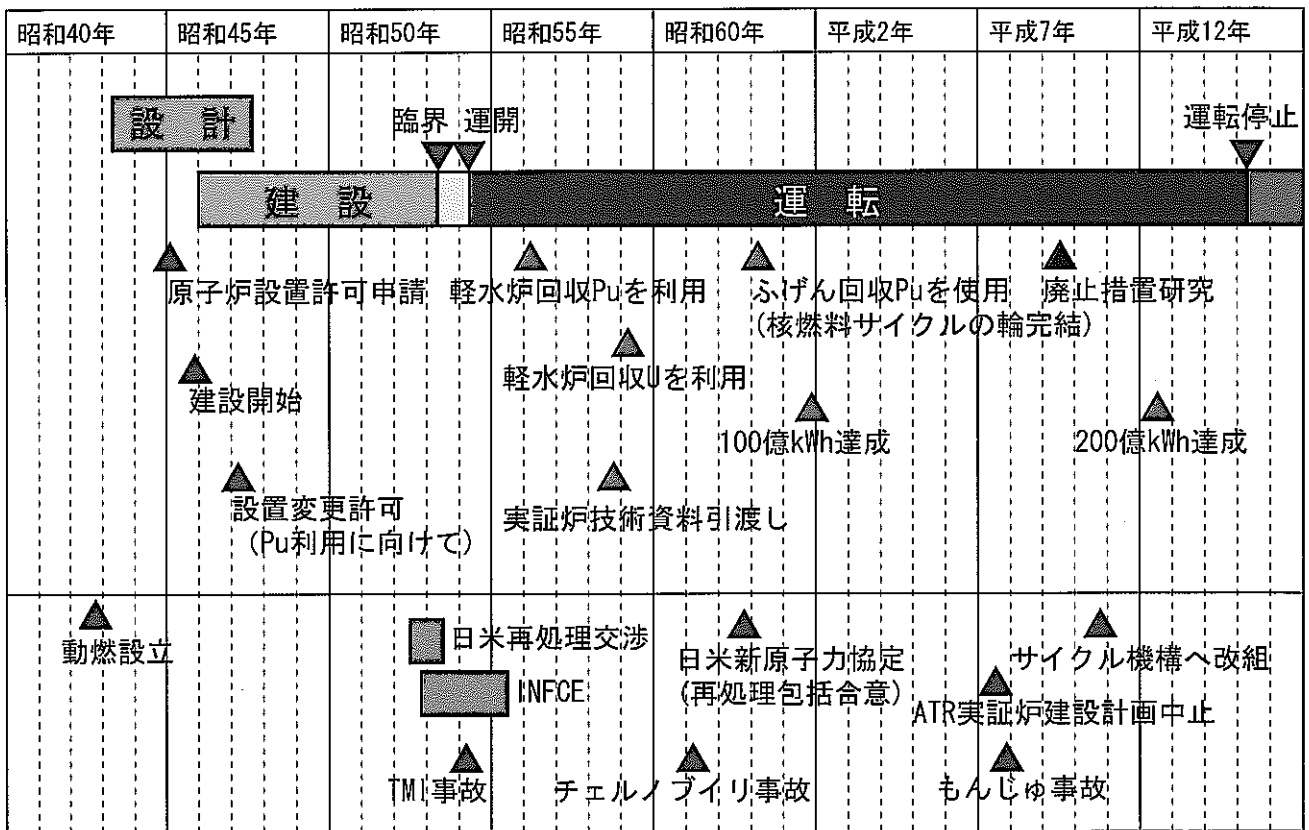


新型転換炉の役割の変遷

### 最小臨界を達成した瞬間の中央制御室



昭和53年3月20日



「ふげん」開発年表

# 「ふげん」の設備概要とその特徴(1)

## 設備概要

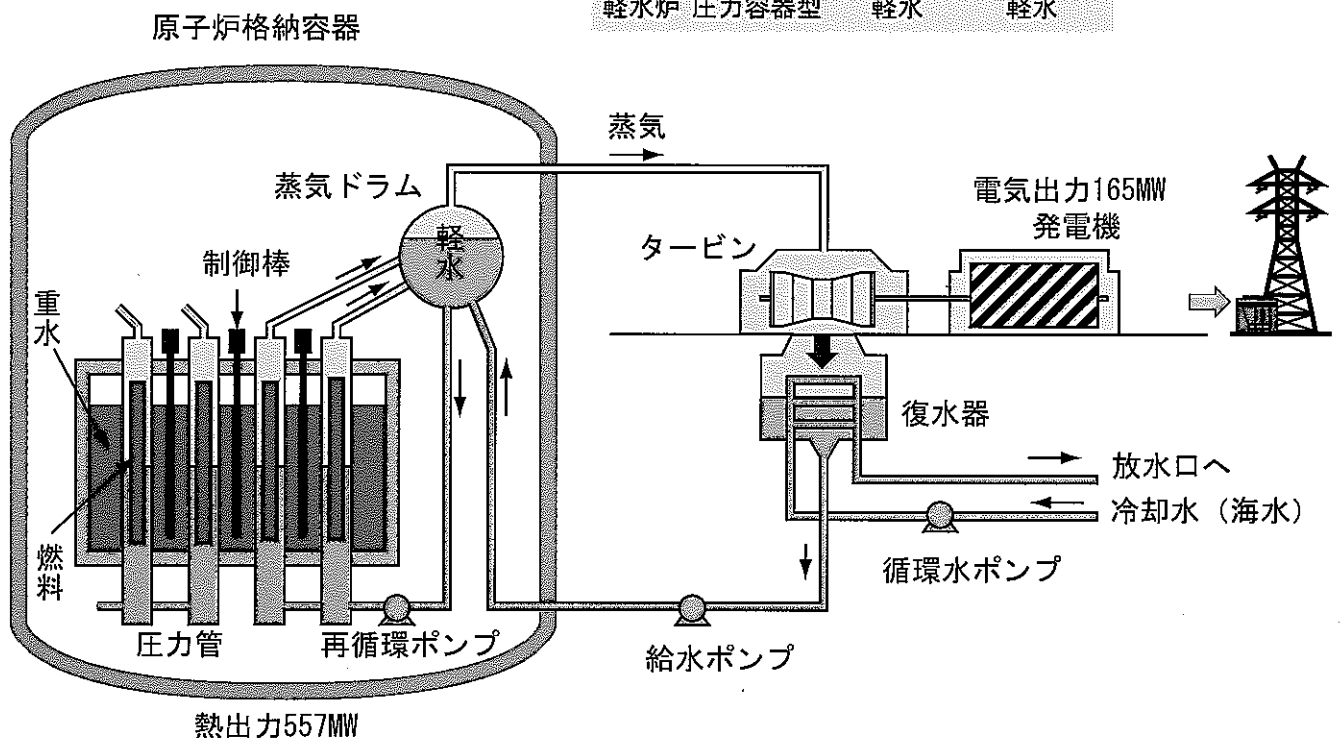
「ふげん」は重水減速沸騰軽水冷却型の原子力発電所で、電気出力は16万5千キロワットです。中性子を減速するのに重水を使うため、炉心の構造は軽水炉と異なりますが、炉心で発生した蒸気で直接タービンを回して発電をするところは沸騰軽水型炉と同じしくみです。

減速材である重水はカランドリアタンクの中に入れており、そのタンクの中に燃料を収納した圧力管が設置されています。圧力管の中を冷却材である軽水が流れます。圧力管の外側にはもう一つカランドリア管という管が配置されて二重管構造になっており減速材である重水と冷却材である軽水は完全に分離されています。圧力管とカランドリア管の空隙には燃料側から重水側に熱が伝わり難くするためと漏えい検知のために炭酸ガスが流されています。

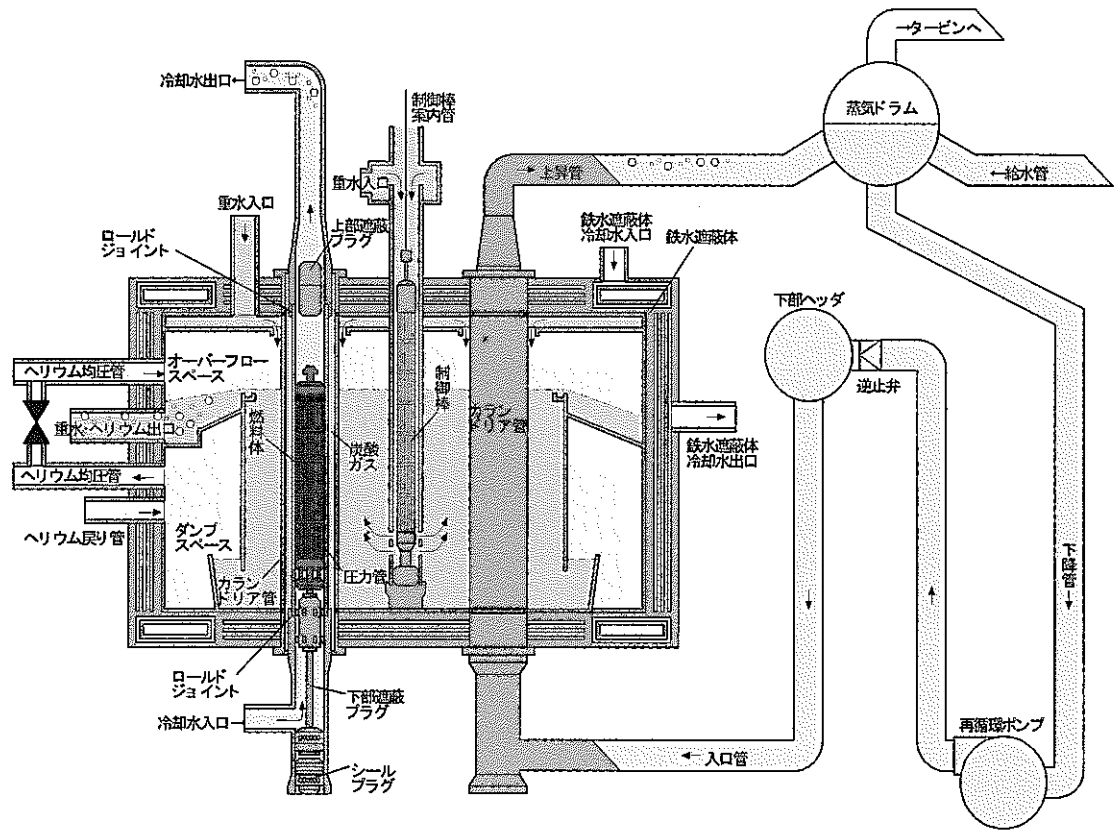
燃料チャンネルは224チャンネルあり、112チャンネルずつを受け持つ二つの独立した原子炉冷却ループによって構成されています。冷却水は各ループの下部ヘッダより各チャンネルに冷却材を分配する入口管を介して炉心に供給されます。炉心で冷却水は熱水と蒸気になって上昇管を経て蒸気ドラムに入ります。蒸気ドラムでは、熱水と蒸気が分離され、蒸気は直接タービンへ、熱水は給水とともに4本の下降管を経て再循環ポンプによって下部ヘッダに戻され循環されます。

重水は、炉心で一定温度(常温)になるように循環して冷却されています。また、重水の中にはほう酸が添加されていて、燃焼に必要な余剰反応度を抑制しています。重水のカバーガスには中性子吸収の少ない不活性のヘリウムガスが使われています。制御棒はカランドリアタンク内に設置された案内管の中を上部から重水中に挿入されます。

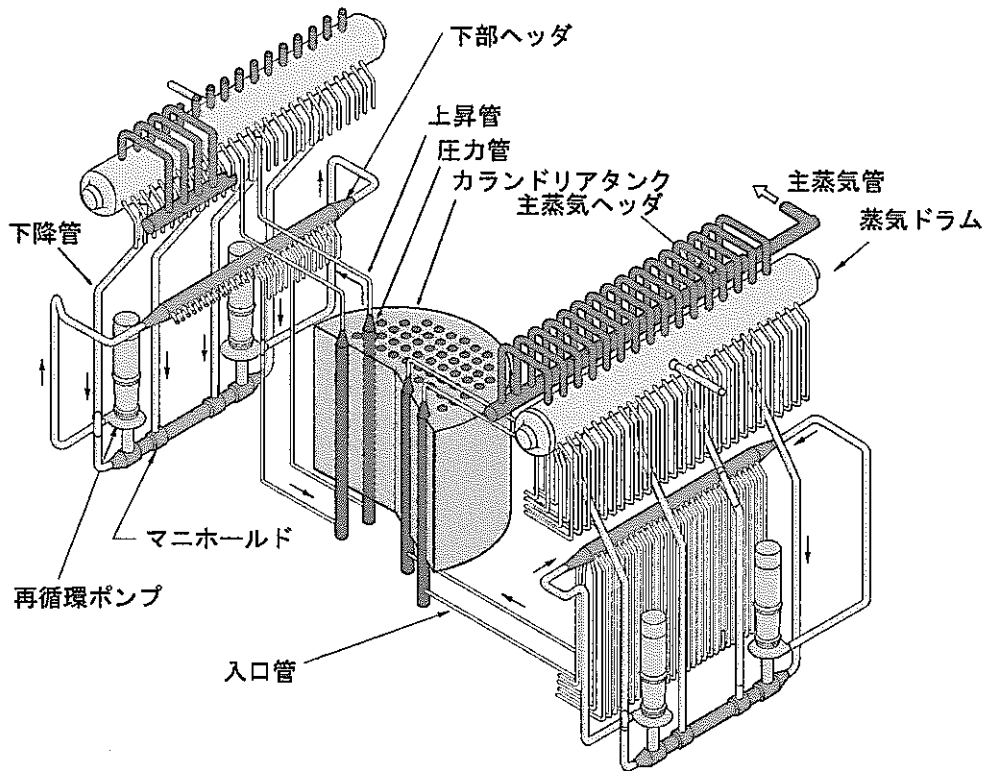
	炉容器の型	減速材	冷却材
ふげん	圧力管型	重水	軽水
軽水炉	圧力容器型	軽水	軽水



「ふげん」のしくみ



本体断面図



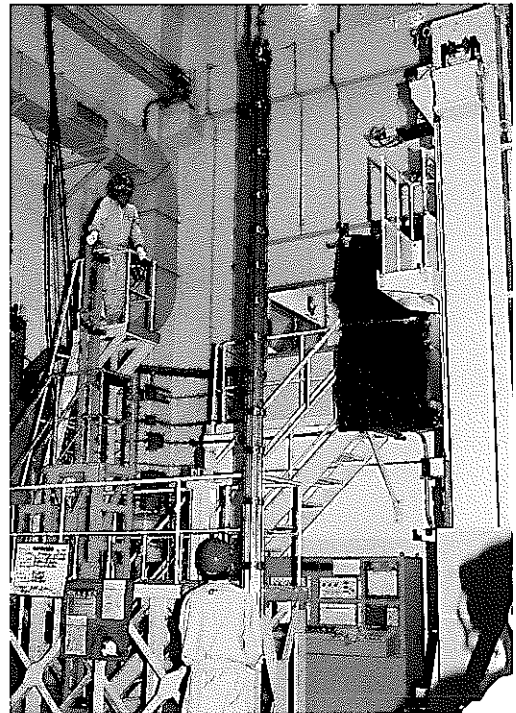
独立2ループの原子炉冷却系鳥瞰図

# 「ふげん」の設備概要とその特徴(2)

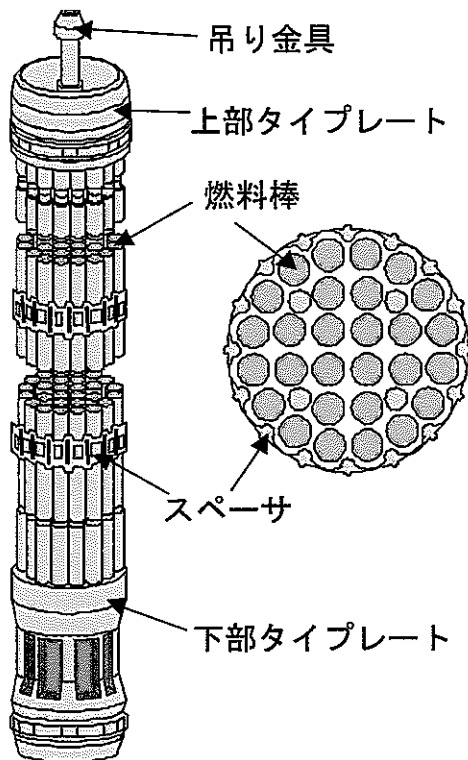
## 燃料集合体

燃料は、圧力管に挿入されるため円筒状の構造で、28本の燃料棒によって構成されています。燃料はMOX燃料の他、微濃縮ウラン燃料も利用しています。燃料集合体の構造はMOX燃料もウラン燃料も同じで、運転開始当初は、核分裂性物質量が比較的少ない1.4~1.5% (燃料集合体平均)の燃料を利用していましたが、核燃料サイクルの経済性の観点からそれ以降は1.9~2.0%のものを用いています。

「ふげん」では、新型転換炉実証炉用の燃料開発として、36本の燃料棒で構成される試験用MOX燃料等の照射も実施してきました。これら試験用MOX燃料では、核分裂性物質量も燃料集合体平均で2.4~3.5%と、「ふげん」の標準燃料に比較するとプルトニウム富化度の高い燃料の照射も行いました。



サイト内受入れ検査中の燃料集合体



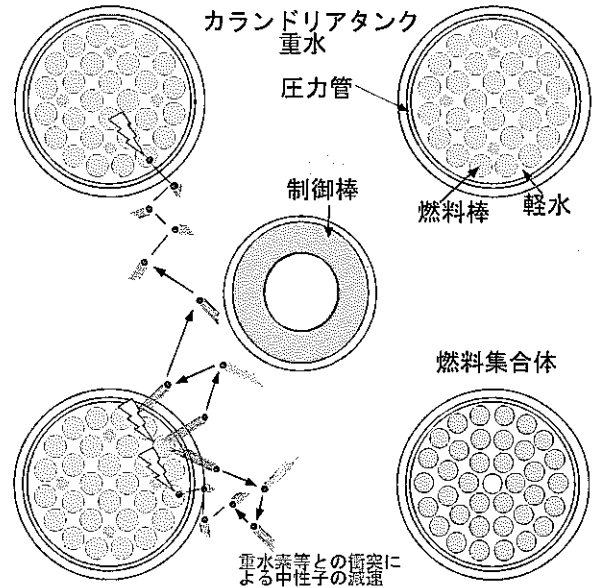
燃料集合体		標準燃料集合体			
		MOX燃料集合体		UO <sub>2</sub> 燃料集合体	
		タイプA	タイプB	タイプA	タイプB
ペレット	材質	ウラン-プルトニウム混合酸化物焼結ペレット		二酸化ウラン焼結ペレット	
	外径	約14.4mm		約14.4mm	
	初期密度	理論密度の約95%		理論密度の約95%	
核分裂物質	核分裂物質量 (wt%)	内層: 約1.5	内層: 約2.3	内層: 約1.5	内層: 約1.9
		中間: 約1.5	中間: 約2.3	中間: 約1.5	中間: 約1.9
		外層: 約1.3	外層: 約1.8	外層: 約1.5	外層: 約1.9
被覆管	材質	ジルカロー2			
	外径 肉厚	約16.5mm 約0.9mm	約16.5mm 約0.9mm		
燃料棒	有効長さ	約3.7m			
	ヘリウム封入圧	約1.0kg/cm <sup>2</sup> ・a		約1.0kg/cm <sup>2</sup> ・a	
燃料集合体	形式	三層同心円状のクラスタ形		三層同心円状のクラスタ形	
	全長	約4.4m			
	外径 燃料棒数	約112mm 28本	約112mm 28本		
設計条件	最高燃焼度	約20,000 MWd/t			
	最大線出力密度	574 W/cm (17.5 kW/ft)		574 W/cm (17.5 kW/ft)	

燃料集合体の仕様と構造

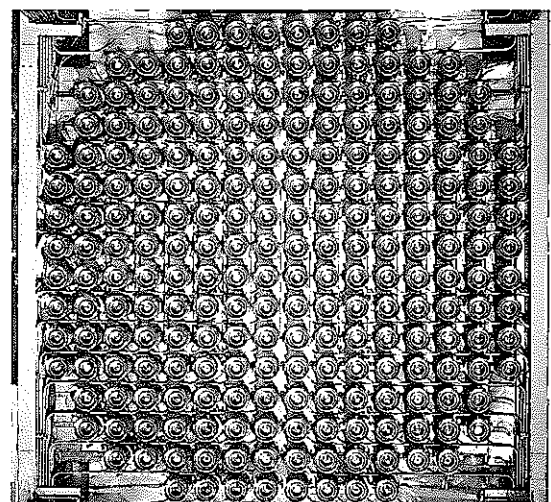
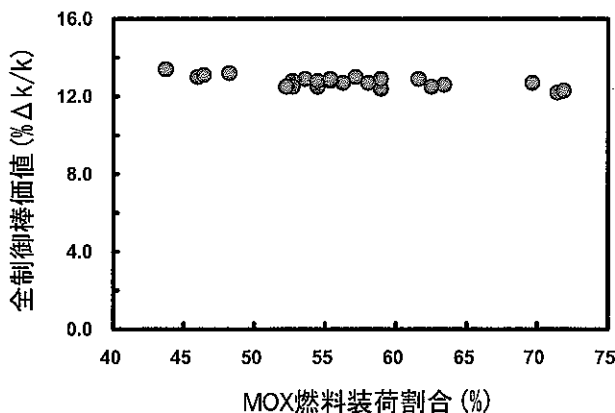
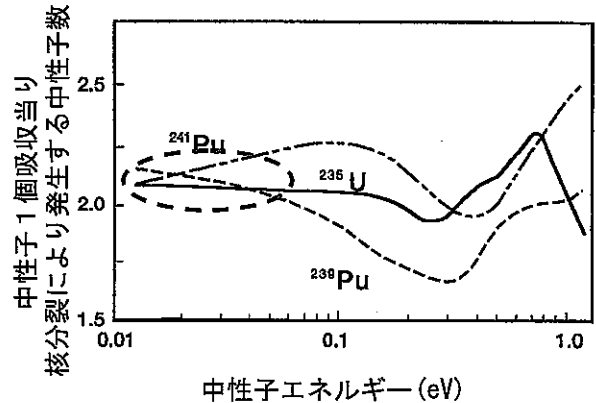
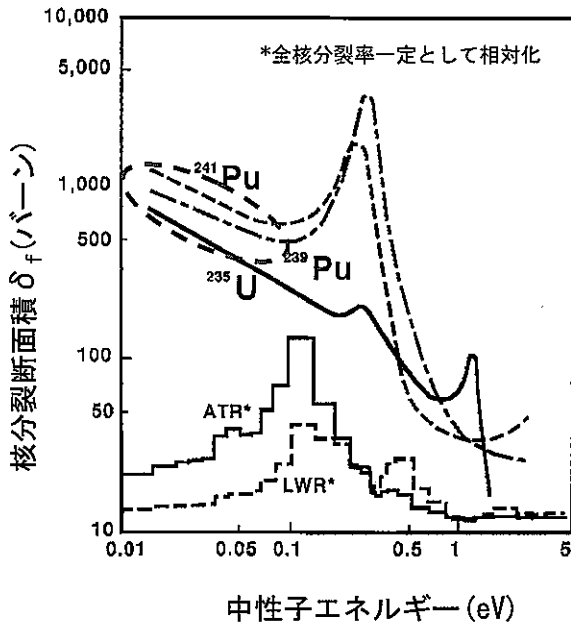


# 「ふげん」の特徴

核分裂で発生した中性子は、主に重水中で熱中性子のエネルギー領域まで十分に減速されるため、プルトニウムの共鳴吸収の影響を相対的に受けにくく、核分裂性プルトニウムと核分裂性ウランの核的価値はほぼ等しくなります。このため、使用済燃料から取り出されるプルトニウムの同位体組成が異なっても、核分裂性プルトニウムと核分裂性ウランの和を一定にすればほぼ同一の燃焼度が得られます。また、燃料集合体間の独立性が高く、ウラン燃料とMOX燃料を混在した場合でも、MOX燃料の熱中性子吸収によるスペクトル硬化等の影響が隣接したウラン燃料に及び難く、更に、制御棒は熱中性子が豊富に存在する重水中に挿入されるため、MOX燃料装荷による制御棒反応度価値への影響が少ないという特徴を持っています。



「ふげん」の特徴 (重水による中性子減速)



炉心下部からみた圧力管群

# プルトニウム利用技術の確立と実証（1）

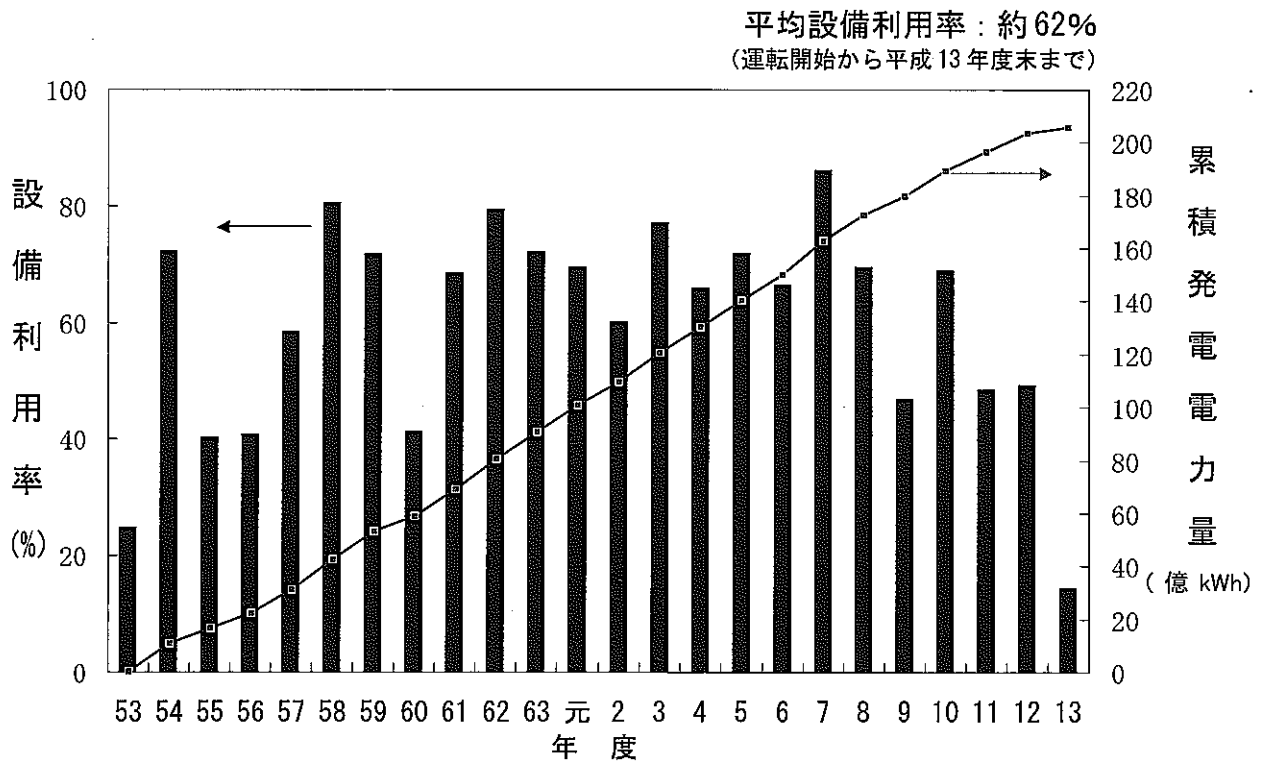
## 「ふげん」のプルトニウム利用実績

「ふげん」の本格運転開始からこれまで約23年間の平均設備利用率は約62%です。「ふげん」の運転サイクルは、約6ヶ月の運転、約1ヶ月の燃料交換のための計画停止、約6ヶ月の運転、約3ヶ月の定期検査を一つの運転サイクルにしていますので、この平均設備利用率は非常に良好なものといえます。同世代の軽水炉と比較しても遜色のない設備利用率を達成しています。

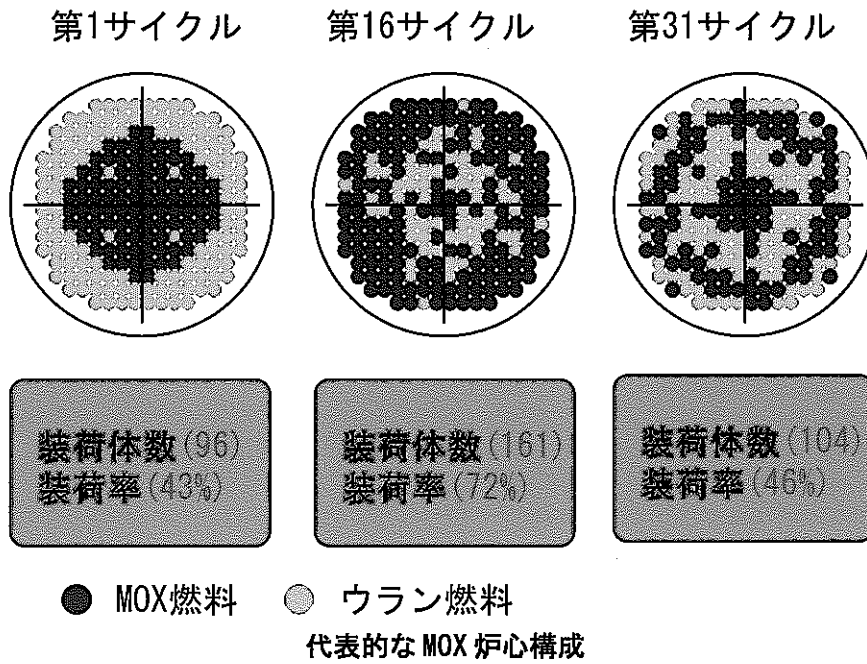
昭和53年3月に22体のMOX燃料で初の臨界を達成し、昭和54年3月20日からの本格運転開始時の初装荷の炉心には、224チャンネルのうち96チャンネルにMOX燃料を装荷しました。それ以降、これまで約24年間に748体のMOX燃料（金属重量にして約1800kgのプルトニウムを含む）及び683体のウラン燃料を装荷して運転を続けてきました。これらのうち、ウラン燃料については1体の燃料漏えい（平成14年4月）を経験しましたが、MOX燃料については1体の燃料漏えいも発生していません。

全炉心に対するMOX燃料の装荷割合は34%から72%まで変化しています。「ふげん」は全炉心にMOX燃料を装荷することができますが、その時々プルトニウム需給状況に応じて柔軟にMOX燃料の装荷比率を変えてきています。そのようなことが容易に行なえる柔軟性のある炉です。MOX燃料の炉心における配置ですが、運転を開始した時にはプルトニウム炉心の特性を確認する目的で炉心中央部に96体のMOX燃料を配置しましたが、MOX燃料とウラン燃料は同様に扱えるので、MOX燃料の装荷位置を特段気にすることなく配置してきています。

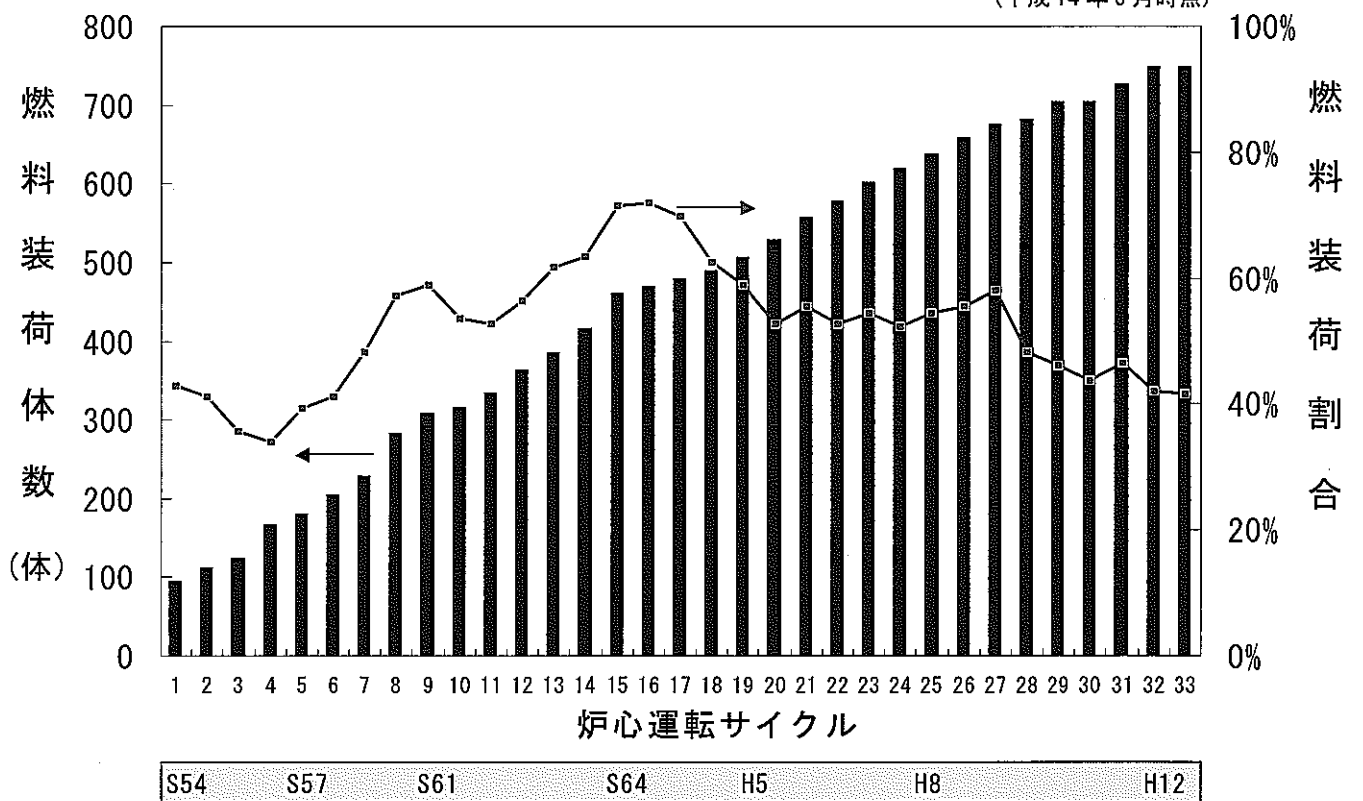
「ふげん」の標準MOX燃料の最高燃焼度は集合体平均で約20,000MWd/tと近年の軽水炉のウラン燃料の燃焼度に比べると半分程度です。一方、新型転換炉実証炉用の燃料開発の一環として「ふげん」で照射した試験用のMOX燃料では約38,000MWd/tの照射実績を有しています。この燃料については現在照射後試験を実施しているところで、その結果はプルサーマルにも活用される予定です。



「ふげん」の運転実績図



MOX 燃料装荷体数累積 : 748 体  
 装荷割合 : 34 ~ 72%  
 (平成 14 年 6 月時点)



MOX 燃料の利用実績

# プルトニウム利用技術の確立と実証 (2)

## 「ふげん」の核燃料サイクル実績

「ふげん」のMOX燃料に利用されたプルトニウムは、運転開始当初は海外からの輸入プルトニウムでしたが、昭和56年9月以降に装荷されたMOX燃料には、東海事業所の再処理工場で国内の軽水炉の使用済み燃料から回収されたプルトニウムを利用してきました。また、昭和57年12月以降に装荷されたウラン燃料には、人形峠事業所で濃縮された国産濃縮ウランを利用し、さらに、昭和59年5月から東海事業所の再処理工場で国内の軽水炉の使用済み燃料から回収されたウランをMOX燃料の母材に使用したMOX燃料4体を「ふげん」に装荷し、

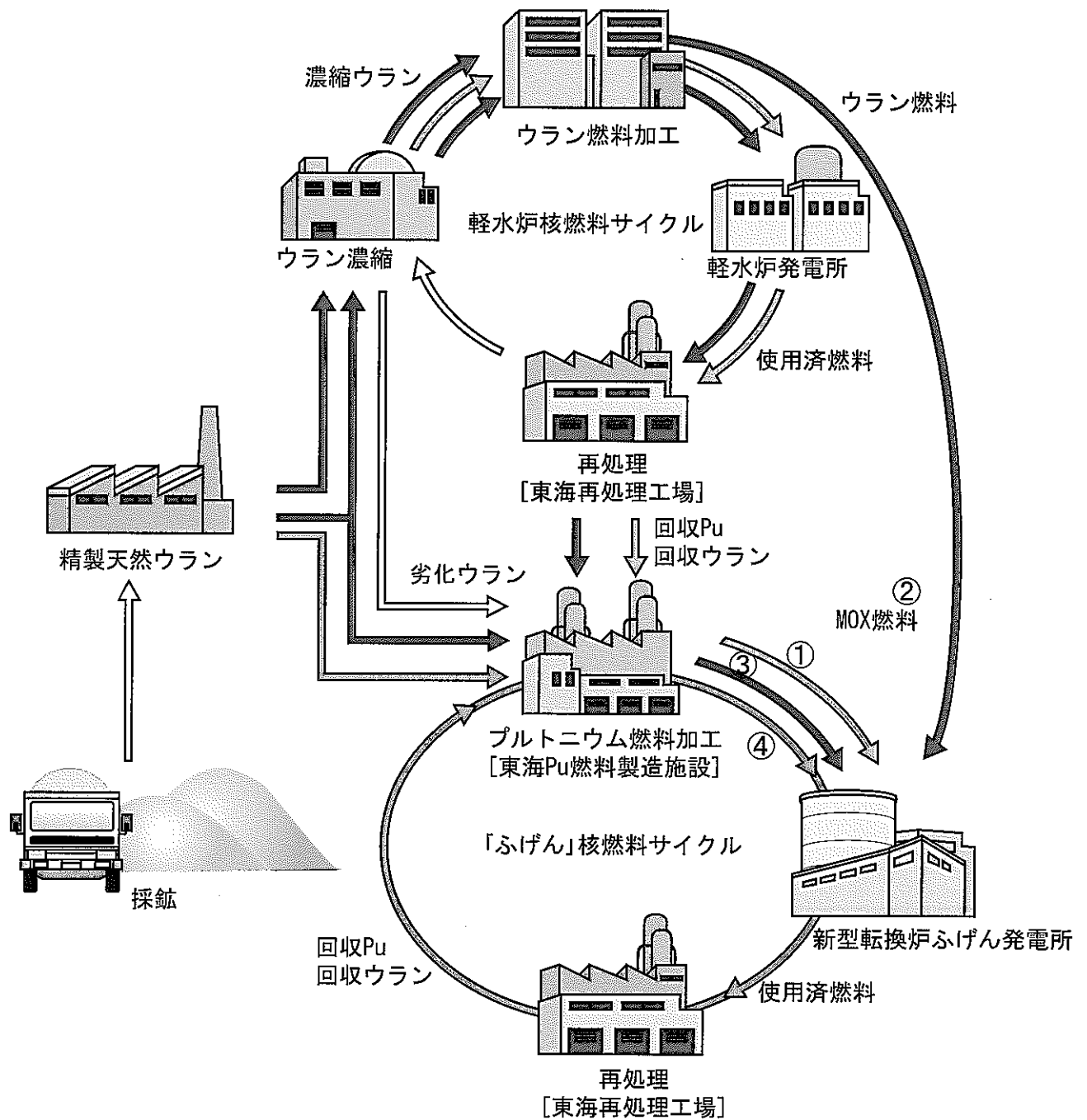
以降回収ウランもMOX燃料製造時に利用してきています。昭和63年6月には「ふげん」の使用済みMOX燃料を東海事業所で再処理して回収されたプルトニウムを4体のMOX燃料に再加工し、再び「ふげん」に装荷して核燃料サイクルの輪を完結しました。このように「ふげん」は、核燃料サイクルを実炉規模で先行的に具現化し、実証してきました。また、MOX燃料及びウラン燃料について、これまでに新燃料及び使用済み燃料の安全な輸送実績も数多く積み重ねてきています。



中央制御操作室にて



再処理工場で抽出した初の国産プルトニウム(左)と回収ウラン(右)



年月	核燃料サイクルの実績	
昭和56年 9月	初の国産回収プルトニウムを使用	← ①
昭和57年12月	国産濃縮ウランを使用	← ②
昭和59年 5月	軽水炉からの回収ウランを使用	← ③
昭和63年 6月	ふげんからの回収プルトニウムを使用	← ④

核燃料サイクル実績

# プルトニウム利用技術の確立と実証 (3)

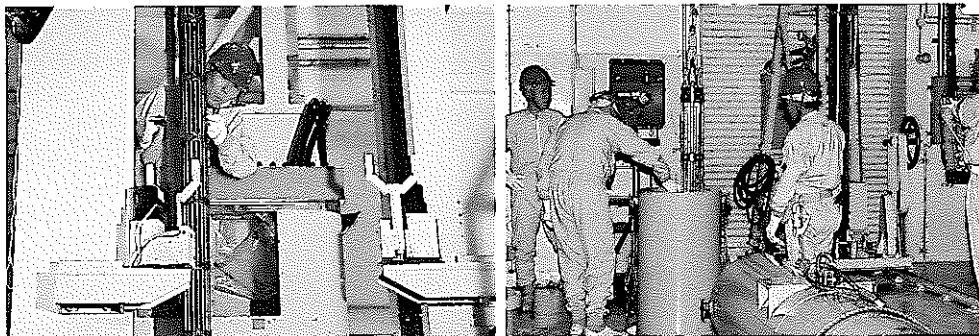
## 新 MOX 燃料輸送



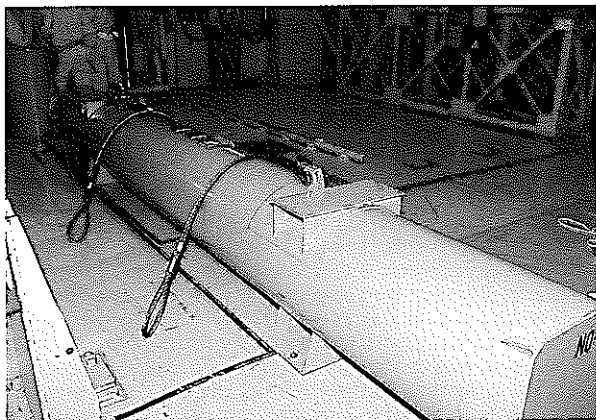
燃料輸送隊(東海事業所 Pu 燃料センター出発)



「ふげん」到着

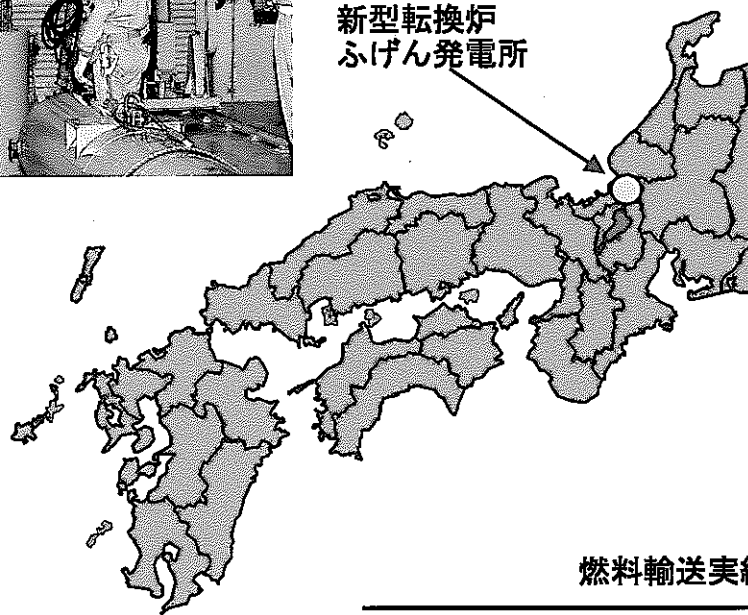


「ふげん」受入



新 MOX 燃料輸送容器

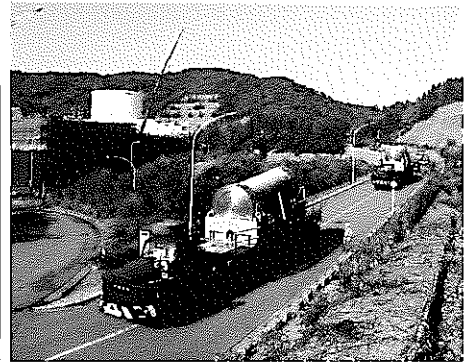
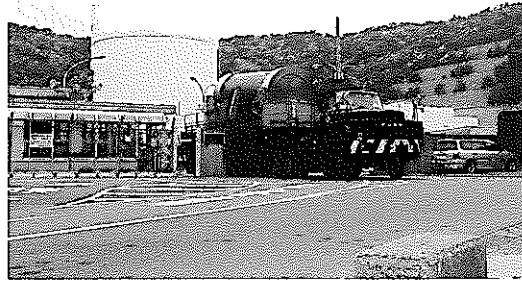
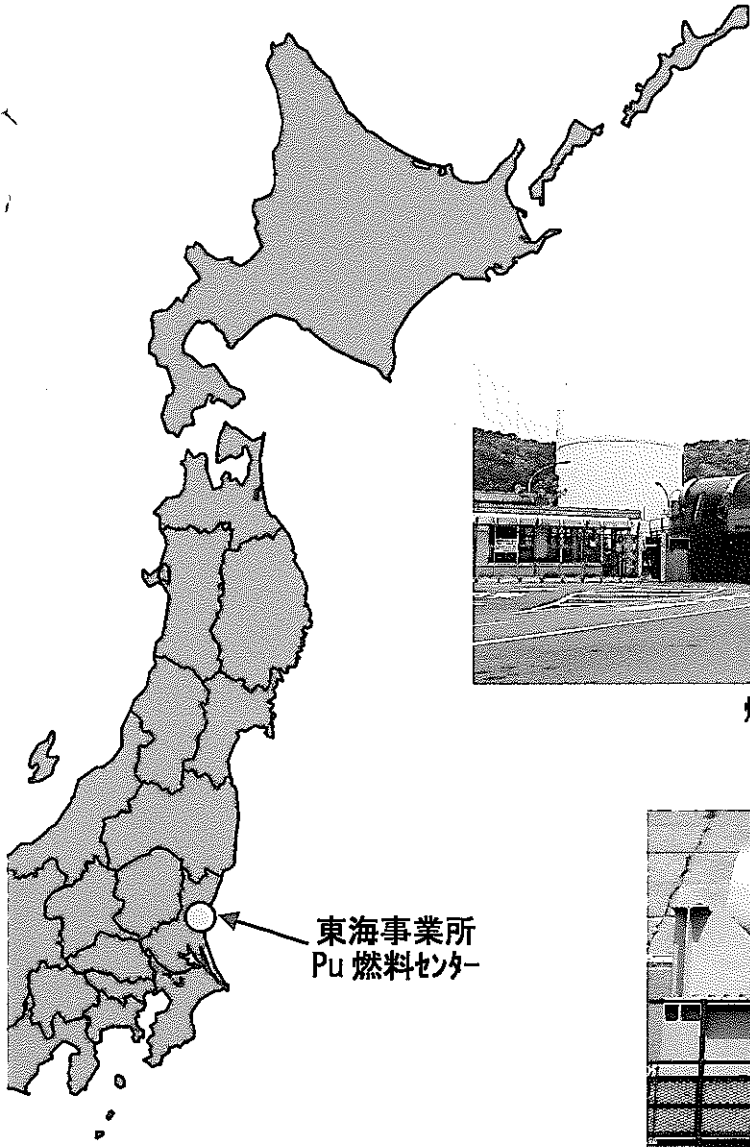
新型転換炉  
ふげん発電所



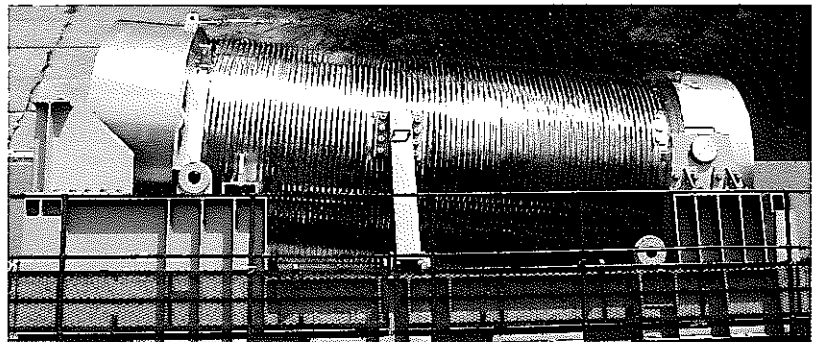
燃料輸送実績

燃料輸送実績
新 MOX 燃料輸送 (東海 → 敦賀 陸送)
使用済燃料輸送 (敦賀 → 東海 海上輸送)

## 使用済燃料輸送



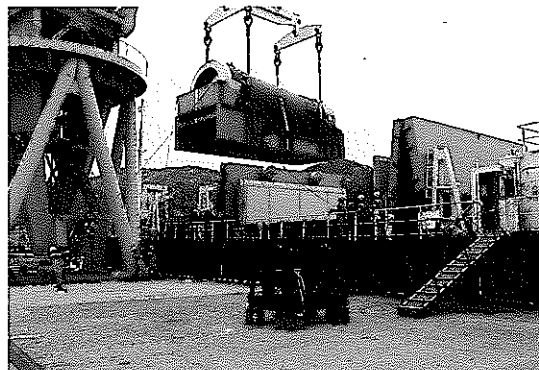
燃料輸送隊(「ふげん」発電所出発)



使用済燃料輸送容器

責表

	回数
)	44回
送)	20回



敦賀港原電岸壁にて

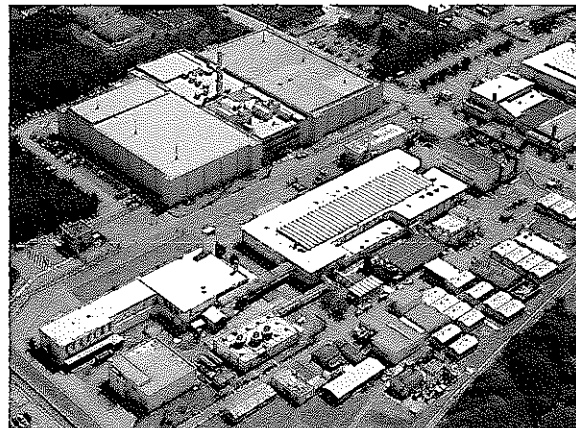


輸送専用船

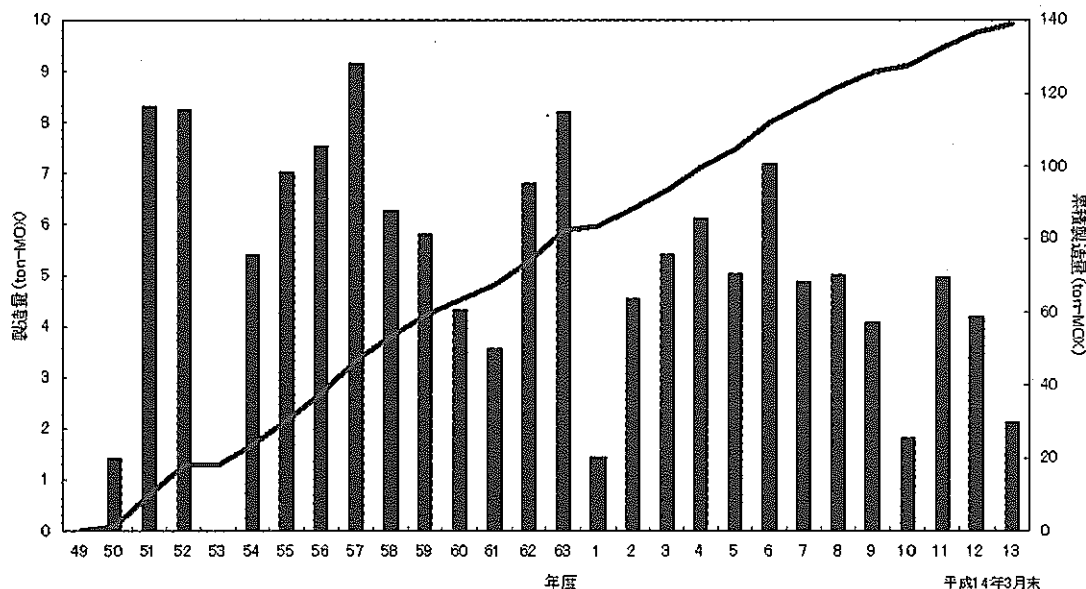
# プルトニウム利用技術の確立と実証 (4)

## プルトニウム燃料の開発と製造実績

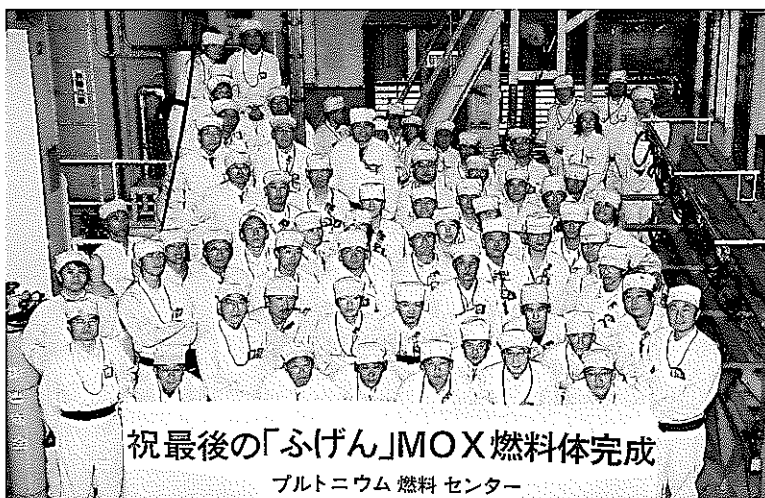
MOX燃料は、サイクル機構の施設を利用して、燃料開発、設計、製造、照射、照射後試験、性能確認の一連の研究・技術開発を実施し、MOX燃料の安全性確認、技術の蓄積を図ってきています。「ふげん」のMOX燃料はすべて東海事業所のプルトニウム燃料製造施設で製造されましたが、すでに、「ふげん」の運転終了までに使用する予定のMOX燃料の製造を終えており、「ふげん」用として合計773体のMOX燃料製造実績を有しています。これらの開発と製造実績の中で蓄積された技術は、軽水炉用のMOX燃料製造に生かされる予定です。



東海Pu燃料センター



プル燃における「ふげん」MOX燃料製造実績



祝最後の「ふげん」MOX燃料体完成

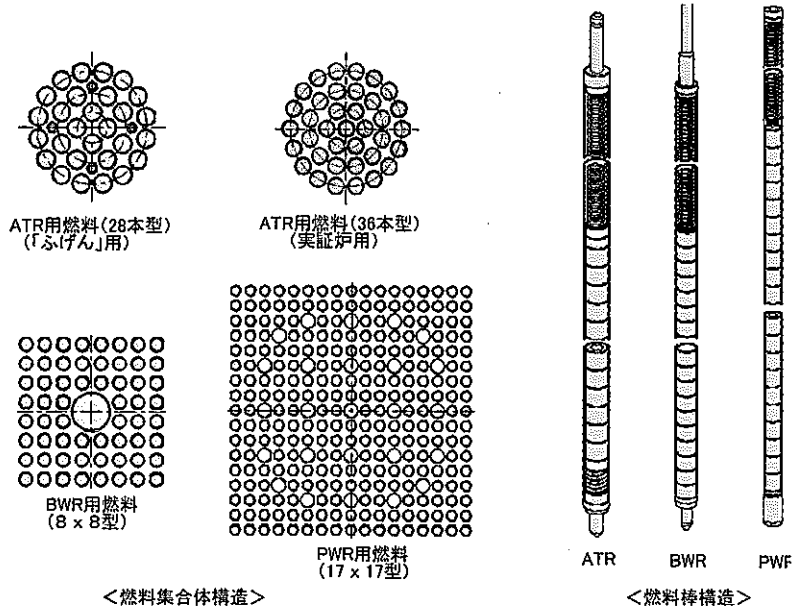
プルトニウム燃料センター

平成13年10月19日(集合体最終組立)

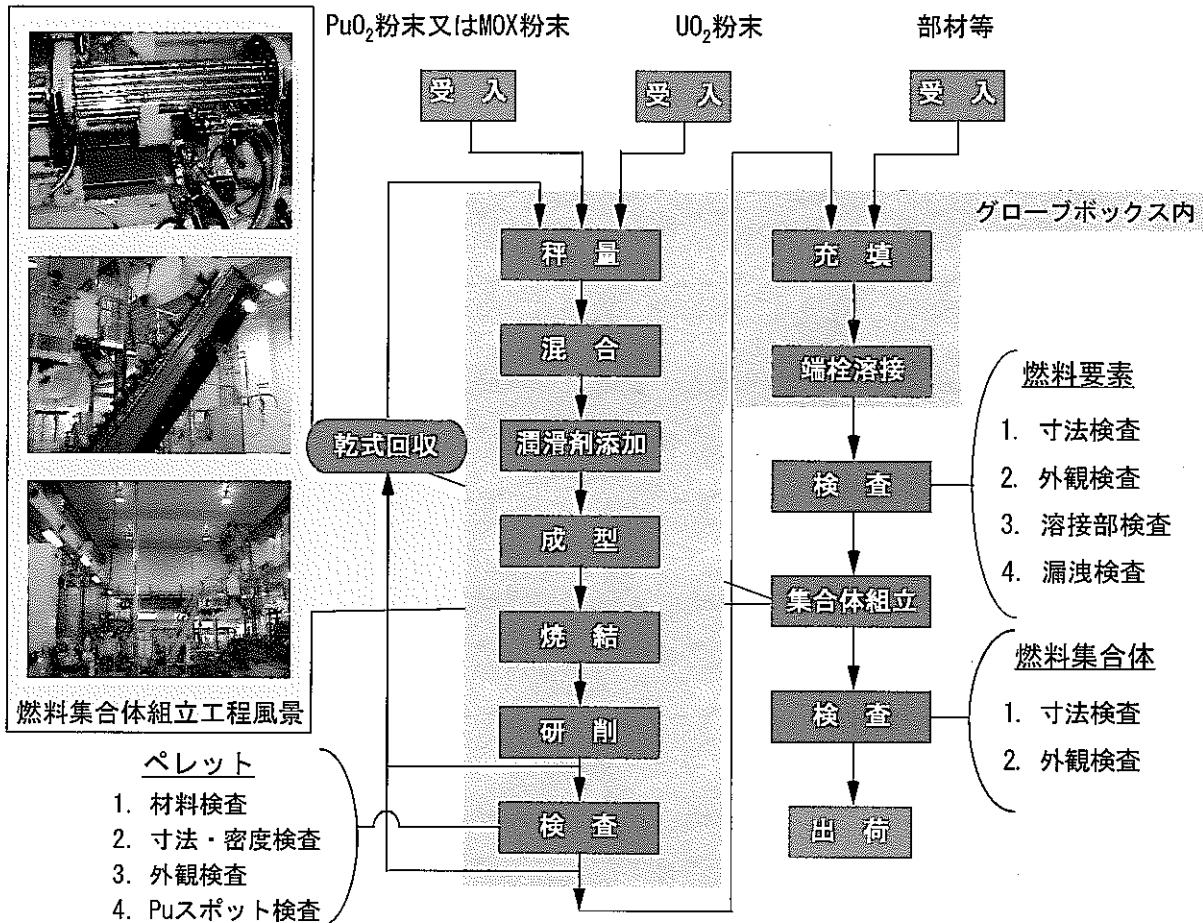


ペレット





「ふげん」と軽水炉燃料の比較



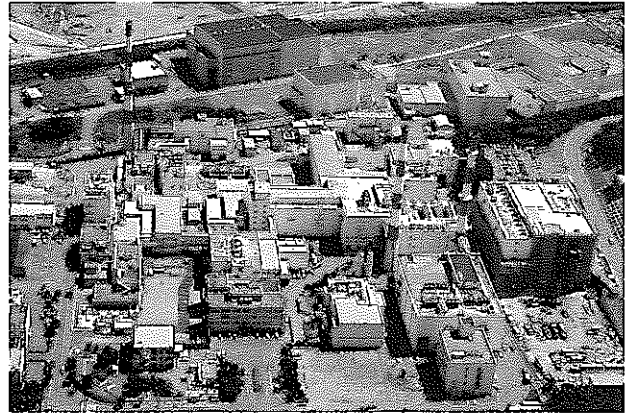
「ふげん」燃料製造工程フロー

# プルトニウム利用技術の確立と実証 (5)

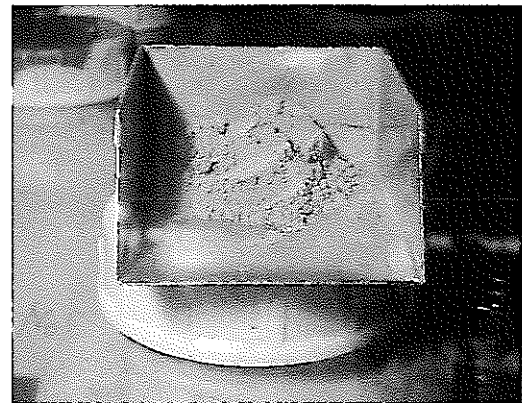
## 再処理実績

昭和56年9月以降に「ふげん」に装荷されたMOX燃料には、東海事業所の再処理施設で回収されたプルトニウムを用いてきました。再処理施設では、昭和52年9月の操業開始以来、平成14年6月12日までに合計1000トンの再処理実績があります。「ふげん」の使用済み燃料の再処理実績は合計で70トンで、そのうち使用済みMOX燃料については約10トン処理し、溶解性など、軽水炉の使用済みウラン燃料と同様に処理できることを実証しました。

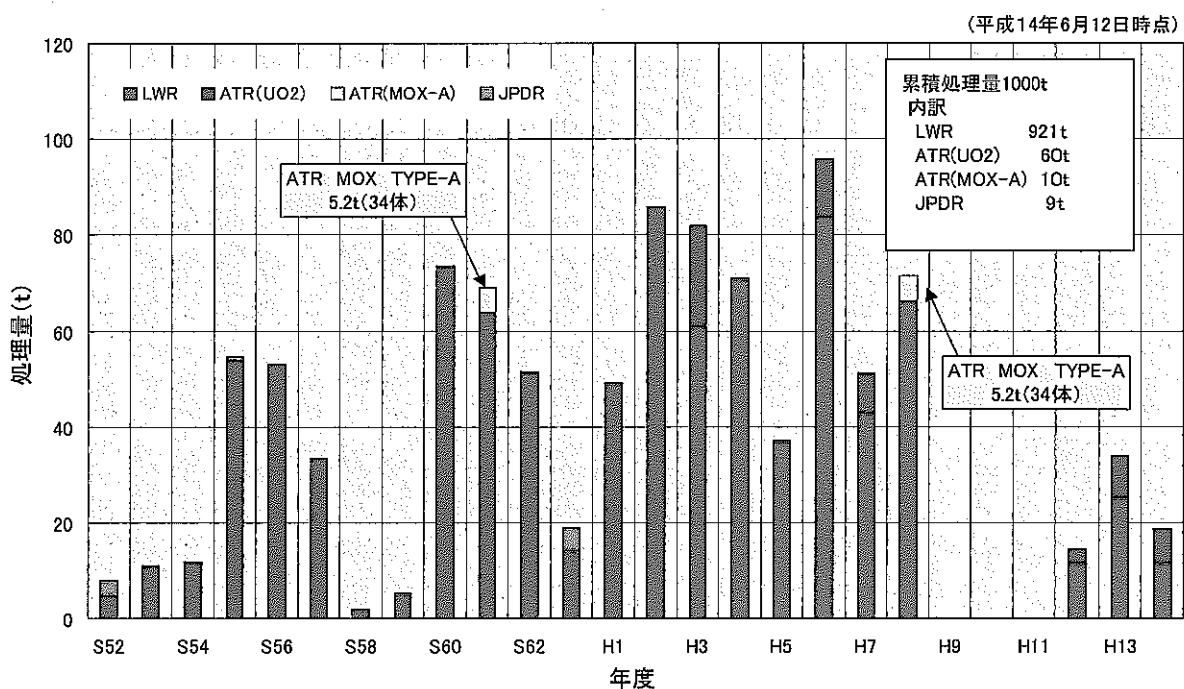
操業以来再処理施設で回収されたプルトニウムは、「常陽」、「もんじゅ」、「ふげん」に利用されていますが、全回収プルトニウムのおよそ4分の1が「ふげん」のMOX燃料として再利用されています。「ふげん」の運転、すなわちプルトニウムの利用にあわせて再処理施設も実績を積み重ね、再処理技術、臨界安全管理技術、保障措置システム技術など関連技術も蓄積されてきました。



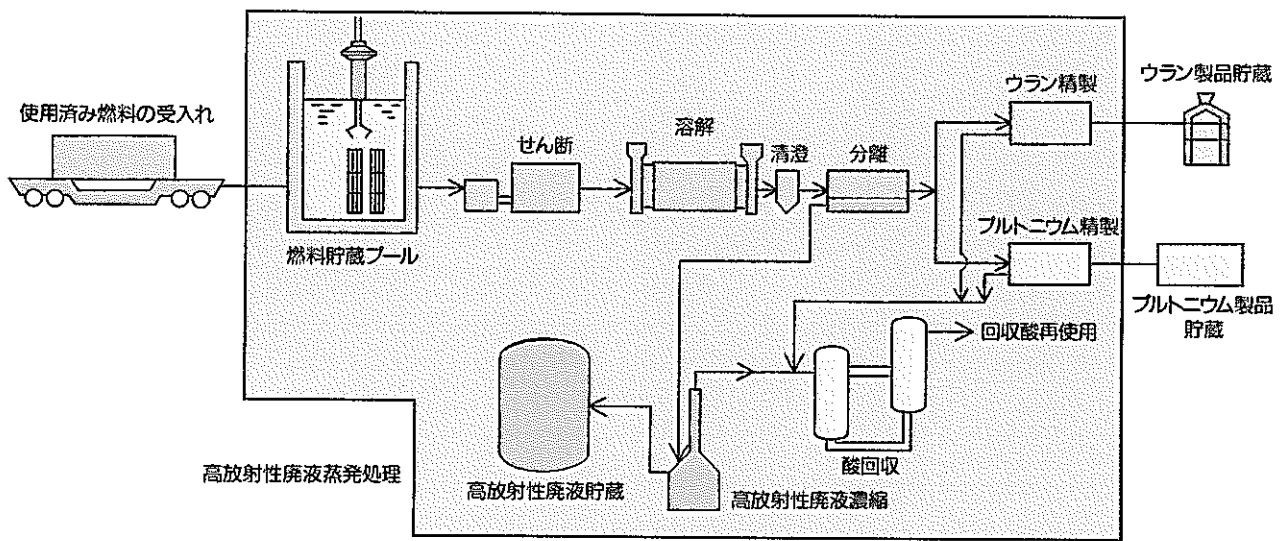
東海再処理施設



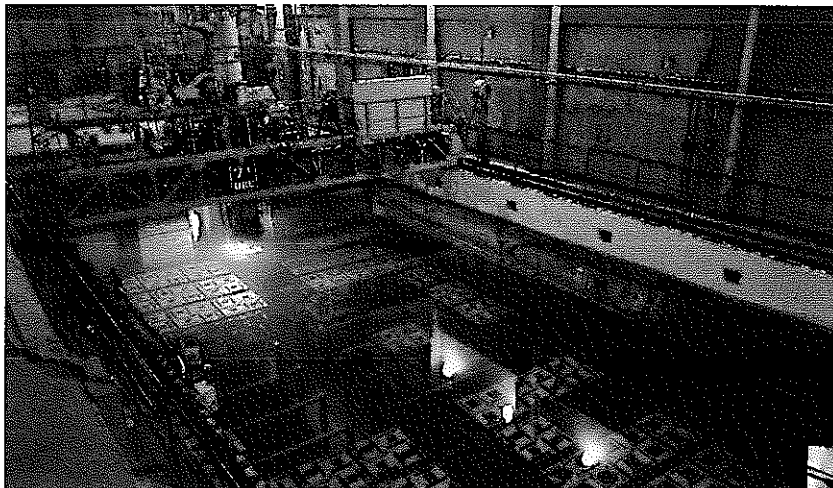
プルトニウム・ウラン混合物



東海再処理施設の再処理実績



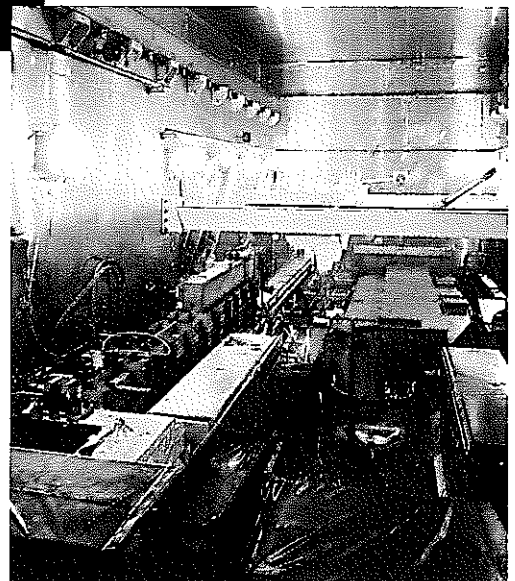
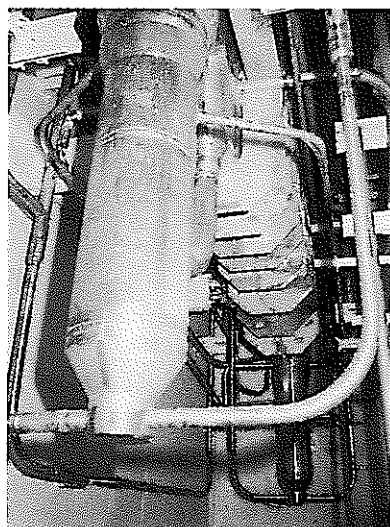
使用済核燃料の再処理フローシート



(上) 燃料貯蔵プール

(左下) 溶解槽

(右下) 燃料せん断装置

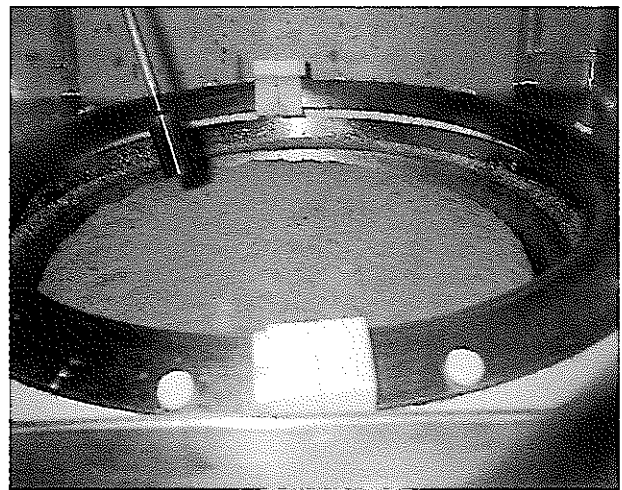


# プルトニウム利用技術の確立と実証 (6)

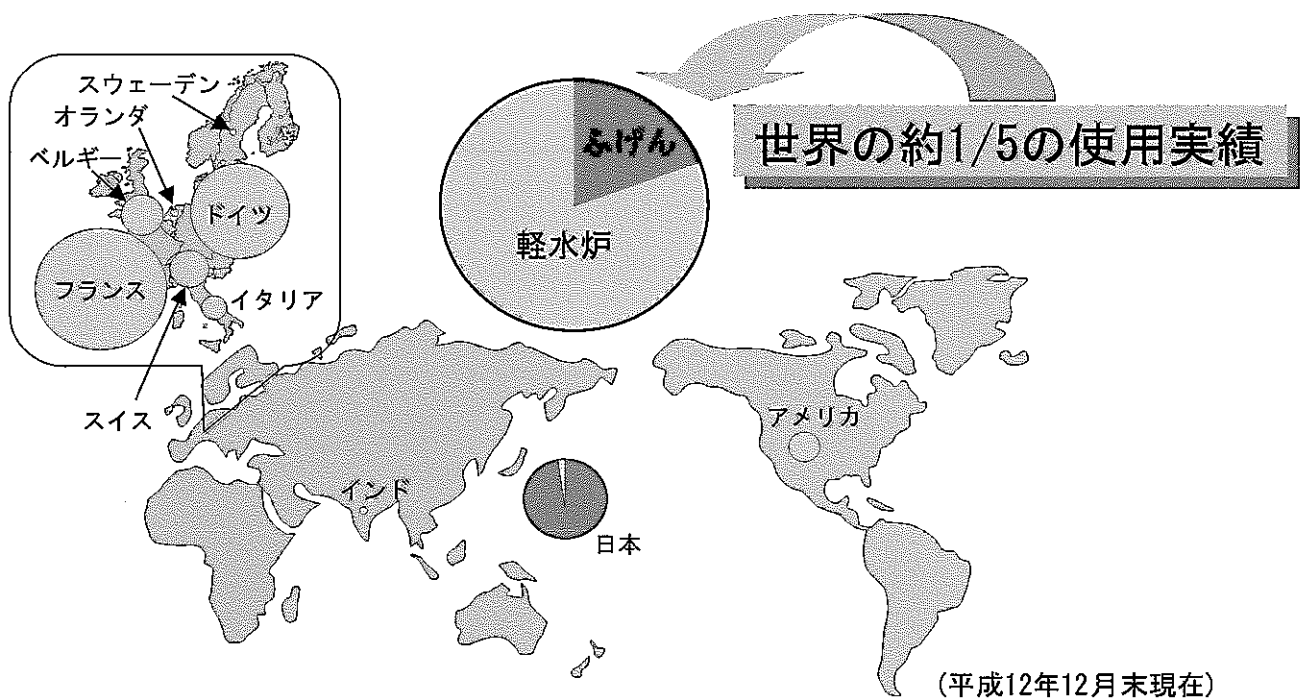
## 「ふげん」のプルトニウム利用と核燃料サイクル技術の広がり

現在、フランスやドイツなどのヨーロッパの国々を中心に軽水炉におけるプルトニウムリサイクル、すなわちプルサーマルが進められています。2000年12月現在、全世界では3173体のMOX燃料の軽水炉への装荷実績があります。フランスが1454体、そしてドイツが1044体、ベルギー247体、スイスで236体を利用しています。「ふげん」はこれまで748体の利用実績を有しており、これを世界の軽水炉で装荷されたMOX燃料に加えて比率をとりますと実に約1/5に相当します。単一の炉としては世界で最大の装荷実績となります。我が国のプルトニウム利用の先駆的役割を「ふげん」は十分に果たしてきました。また、「ふげん」の約24年間に及ぶプルトニウムの本格利用実績は、それを支えるプルトニウム燃料開発・製造技術、再処理技術など、核燃料サイクル基盤技術を我が国に定着させる原動力になりました。我が国に蓄積された

核燃料サイクル技術は世界的に見てもトップランナーに比肩する技術であり、今後これらの技術はプルサーマルそして高速増殖炉へと引き継がれて行きます。



プルトニウム・ウラン混合酸化物(MOX)



世界のMOX利用実績と「ふげん」

## カーター政権の核不拡散政策、INFCE と「ふげん」

昭和52年1月に誕生した米国カーター政権は、核不拡散を強化する政策、すなわち使用済み燃料の再処理によってプルトニウムを取り出して原子力発電で用いて行くことを禁止する政策を掲げました。濃縮ウランを米国から輸入していた我が国は、日米原子力協定の中で、再処理にあたっては米の了解を得ることとなっていたため、ちょうどその頃、運転を開始しようとしていた東海の再処理工場の操業にストップがかけられました。それ以降、包括事前同意式の日米原子力協定が発効する昭和63年7月まで、長い日米間の交渉がスタートすることになりました。

カーター政権の核不拡散政策が発端になって、世界66カ国が参加して核不拡散上どのような核燃料サイクルが良いかなどを国際的に協議するINFCE（国際核燃料サイクル評価）が昭和52年10月から、昭和55年2月まで開催されました。

この時期は、「ふげん」が初装荷炉心からMOX燃料を装荷して運転を開始したときであり、日本の新型転換炉における核燃料サイクルを発表し、国際的な理解を得る上でINFCEは、とても良い機会になりました。

米国エネルギー省は、INFCEに発表された論文を基に評価される各国の原子力政策について委託調査を行なっています。その中で、委託を受けたある米国のシンクタンクは、日本がINFCEで発表した一連の論文から、日本の新型転換炉開発を“「ふげん」は日本の原子力政策を写す鏡”（“FUGEN : A MIRROR OF JAPAN'S NUCLEAR POLICY”）と評価した報告書をまとめて、昭和55年1月にエネルギー省に提出しています。

## Puとは・・・？



- ・1940年、米国カリフォルニア大学のシーボーク博士らの研究グループが発見
- ・1942年、同様に発見されたばかりの冥王星（Pluto）から「プルトニウム」と命名
- ・プルトニウム1g＝石油約2000リットル、石炭約3トンに相当するエネルギーを発生する
- ・現在の世界のプルトニウム保有量：  
民生用：約850トン（天然ウラン約20万トン分の資源）  
軍事用：約250トン（天然ウラン約6万トン分の資源）
- ・世界の天然ウラン使用量：約6万1000～3000トン/年



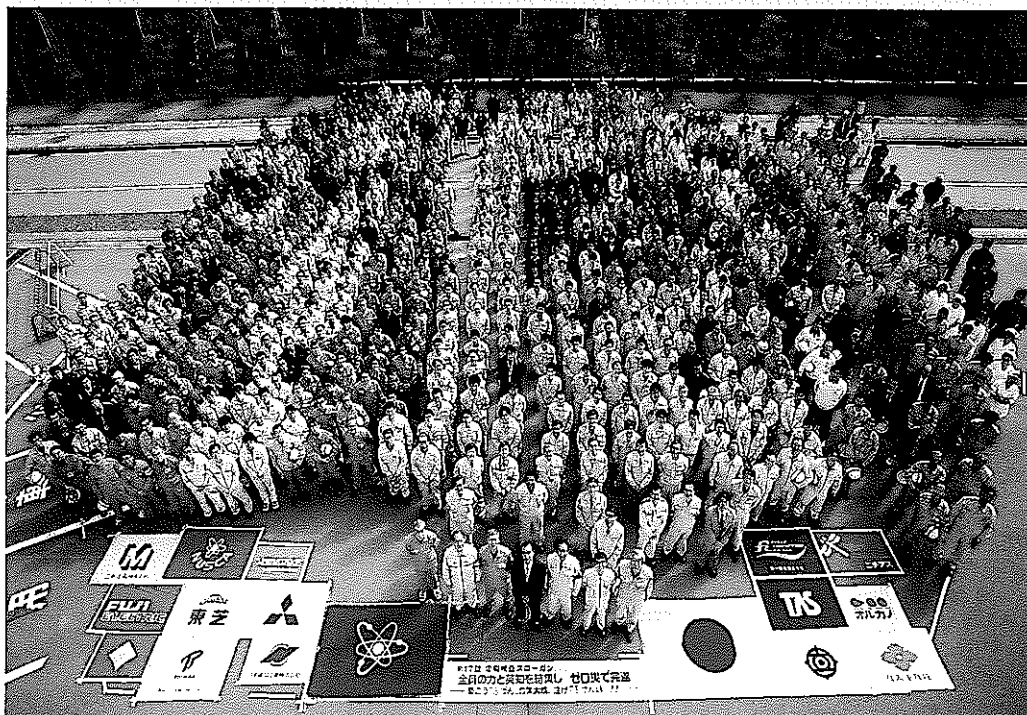
A series of horizontal dashed lines for writing, spanning the width of the page.

### 原子力学会賞の受賞

新型転換炉ふげん発電所における一連の  
プルトニウム利用技術の実証に対し、  
平成6年3月（社）日本原子力学会より  
技術開発賞が授与されました。



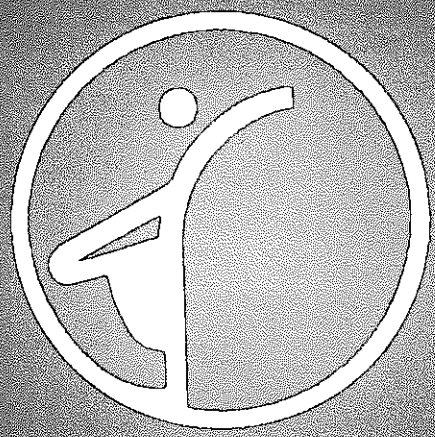
## 第17回定期検査安全大会



平成14年2月21日

運転期間中最後の健康診断、第17回定期検査時の安全大会の様です。「ふげん」の職員、常駐協力会社そして点検を担当するメーカーの方々全員が集い、定期検査における安全作業への誓いを立てました。安全・安定運転を支える地道な活動の積み重ねの上に大きな成果が実っています。

123456789



核燃料サイクル開発機構

敦賀本部 新型転換炉ふげん発電所

〒914-8510 福井県敦賀市明神町3番地

☎0770-26-1221 (代表)