PNC TN 3530 97-001

新型転換炉原型炉

ふげん

建設から運転、その実績と技術成果

動力炉・核燃料開発事業団

― 目 次 ―

1.「ふげん」の開発と特徴 …… 1
　1．1　「ふげん」の開発 …… 1
　1．2　ＡＴＲの特徴 …… 2
2.「ふげん」の設備概要 …… 3
3．技術成果 …… 5
　3．1　プルトニウム利用技術 …… 5
　3．2　圧力管の検査技術と健全性評価 …… 7
　3．3　重水リサイクル技術 …… 9
　3．4　水素注入技術 …… 12
　3．5　系統化学除染技術 …… 14
　3．6　計算機利用による運転・保守技術の高度化 …… 15
4.「ふげん」のあゆみと運転実績 …… 18

1.「ふげん」の開発と特徴

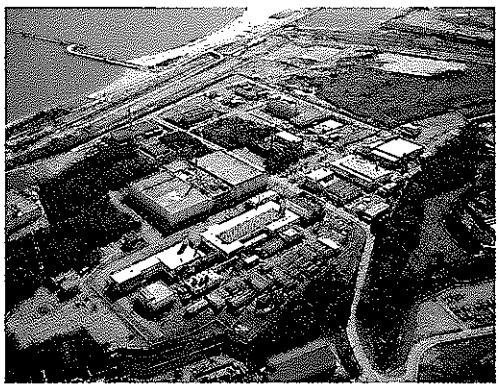
1.1　「ふげん」の開発

(1) 新型転換炉の自主開発

エネルギー資源に恵まれないわが国では、石油に代わるエネルギー源として原子力に大きな期待がかけられています。特に、原子炉で発生するプルトニウムを燃料として利用することは、ウラン資源の節約を図ることができます。

動燃事業団では、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進めており、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）の自主開発を、ナショナルプロジェクトとして進めてきました。

ＡＴＲ開発は、海外から既存の技術を導入して行うのではなく、東海事業所や大洗工学センターなどの研究施設を用いて、自ら、試験研究の成果を積みあげ進めてきました。さらに、その成果を反映して「ふげん」を建設しました。



東海事業所

大洗工学センター

(2)「ふげん」の建設・運転

「ふげん」は、昭和45年３月に原子炉設置許可申請を行い、同年11月30日に原子炉設置許可を得て、同年12月から建設を開始しました。

「ふげん」の建設は初期の工事計画どおり進捗し、昭和53年３月20日午後２時49分最小臨界を達成しました。引き続き炉心特性、プラント特性、機器性能等の確認のための起動試験を実施し、１年後の昭和54年３月20日総合負荷検査に合格、本格運転を開始しました。

以後、「ふげん」は、今日に至るまで安定かつ安全な運転実績を継続し、原子炉及びプラント設計の成立性を実証してきました。

一方、東海事業所では、「ふげん」用ウラン・プルトニウム混合酸化物（ＭＯＸ）燃料の製造、使用済燃料の再処理、さらに燃料の高度化（高燃焼度化，製造コスト低減等）の研究開発を実施しております。

特に、昭和63年５月には、「ふげん」に装荷したＭＯＸ使用済燃料を東海事業所再処理工場で再処理し、ここで得られたプルトニウムを用いてＭＯＸ燃料を製造し、このＭＯＸ燃料を再び「ふげん」に装荷するといった我が国の核燃料サイクルの輪の完結を実証しました。このようにＡＴＲ開発は、我が国の核燃料リサイクル政策を一部先行的に具現化、実証し国内外の理解を深めるために貢献してきました。

(3) 今後の展開

平成７年７月に電気事業連合会から、主として経済性を理由とした実証炉計画の見直し要請が出されました。その後国及び関係諸機関の検討を経て、平成７年８月25日に原子力委員会は実証炉計画の中止を決定しました。

この決定に際して、原子力委員会は、「ふげん」のこれまでの実績を高く評価するとともに、『ＡＴＲ関連の研究開発の今後の取り組みとして、将来の核燃料の需給動向の変化に備え、プルトニウム、回収ウラン等を柔軟かつ効率的に利用できるとのＡＴＲの特長を活かしていくための調査・研究については、核燃料リサイクルの進展に資する研究開発の一環として進めていくことが適当である』こと、「ふげん」については、『地元との信頼関係を確保しながら、「ふげん」の特長を活かし、プルトニウム利用技術開発施設、国際的共同研究施設等として利用していくことが適当であり、その際発生する電力も有効利用していく』ことを示しました。

現在、「ふげん」はＭＯＸ燃料を利用しつつ、安定・安全運転を継続しております。また、地元自治体及び関係諸機関との連携を密にし、核燃料サイクルの着実な進展に向けた「ふげん」の有効活用の在り方について検討を行っています。

１.２　ＡＴＲの特徴

ＡＴＲは重水減速沸騰軽水冷却圧力管型炉であり、軽水炉と比較し以下の特徴を有しています。

〔システム，構造上の特徴〕

① 減速材に重水を使用している。

② 原子炉の構造が圧力管型である。

〔炉心特性上の特徴〕

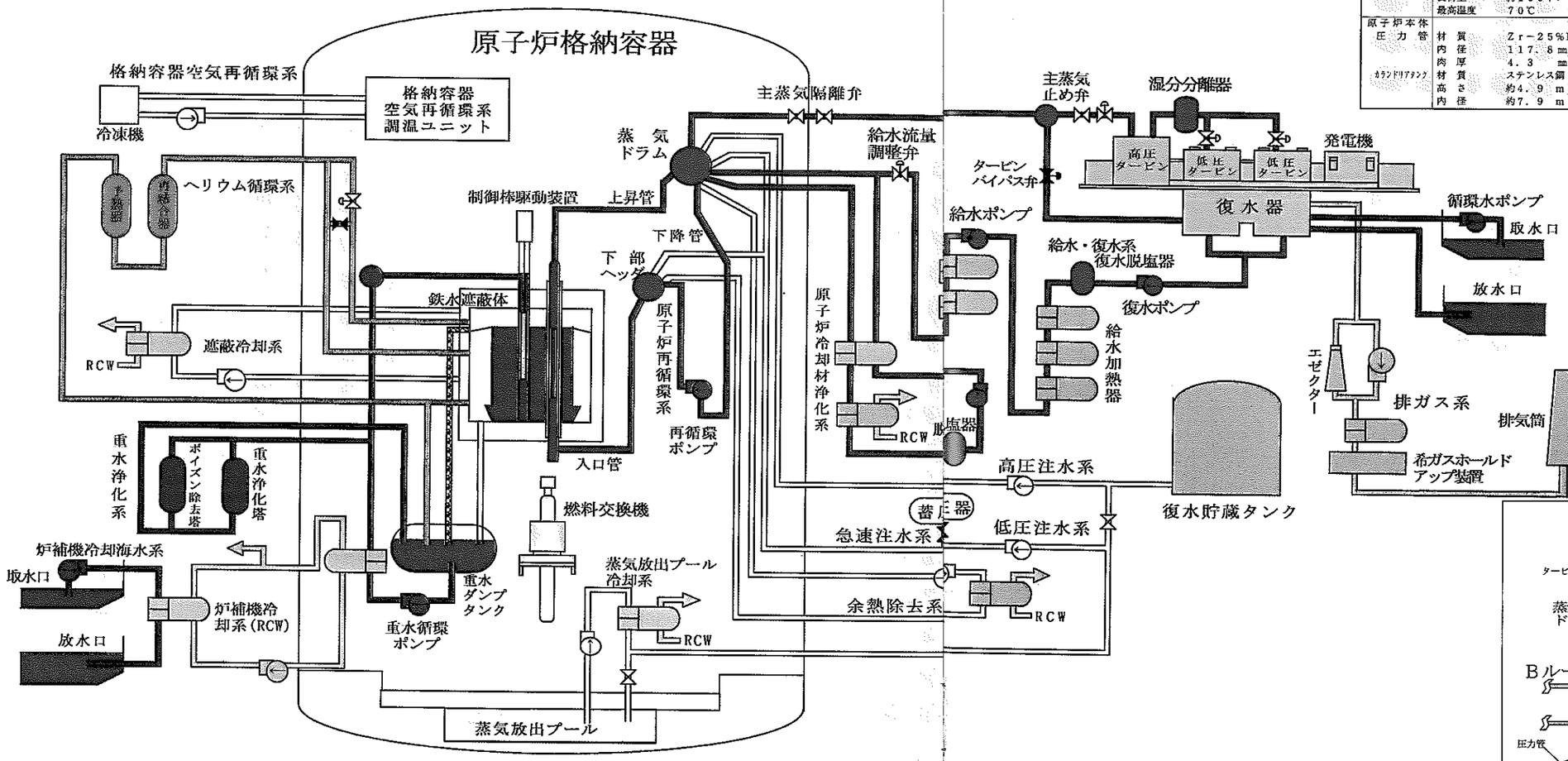
① 核分裂で発生した中性子が主に重水中で熱中性子のエネルギー領域まで十分に減速されるため、プルトニウムの共鳴吸収の影響を比較的受けにくく、核分裂性プルトニウムと核分裂性ウランの核的価値がほぼ等しくなります。このため、使用済燃料から取り出されるプルトニウムの同位体組成が異なっても、核分裂性プルトニウムと核分裂性ウランの和を一定にすればほぼ同一の燃焼度が得られます。

② 冷却材に中性子減速効果を期待せず、冷却材は冷却に必要な最小量に最適化されています。このため、冷却材のボイド率の増加による反応度変化は小さく、冷却材ボイド反応度係数は、零近傍の値を示します。また、出力係数も比較的小さいため、出力変化時の反応度補償が小さくてすみます。

③ 重水中に溶解したほう酸（^{10}Ｂ）濃度調整により炉心の反応度を炉心全体として一様に抑制していること、減速材が重水であるため炉心の中性子移動面積が大きいこと等により、炉心全体の出力分布の歪みが小さく、出力平坦化のための制御棒挿入はほとんど必要ありません。

2．ふげんの設備概要

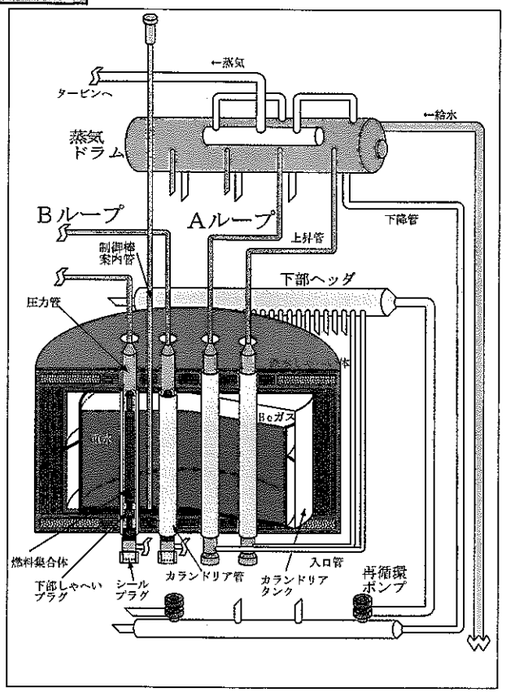
「ふげん」は、我が国が独自に開発した重水減速沸騰軽水冷却型原子炉の原型炉プラント（定格電気出力１６万５千ｋＷ）です。減速材に重水を使用していること及び原子炉の構造が圧力管型であることを除けばＢＷＲと類似しています。



「ふげん」プラントの主要諸元

炉形式	重水減速沸騰軽水冷却型原子炉（圧力管型）	
出力	熱出力	５５万７千ｋＷ
	電気出力	１６万５千ｋＷ
炉心	炉心高さ	３．７ ｍ
	炉心等価直径	４．０５ｍ
	圧力管間隔	２４０ ㎜
	チャンネル数	２２４ 本
燃料	種類	ウラン・プルトニウム混合酸化物（ＭＯＸ）及び二酸化ウラン
燃料集合体	全長	４．３８８ｍ
	外径	１１１．６ ㎜
	燃料要素数	２８ 本
燃料要素	被覆管材質	ジルカロイ－２
	被覆管厚さ	約０．８６ ㎜
	外径	１６．４６ ㎜
	ペレット外径	１４．４ ㎜
	ペレット高さ	１８ ㎜
組成	ＭＯＸ核分裂性物質量	約１４％、２０％
	ＵＯ２ 濃縮度	約１５％、１９％
減速材	種類	重水
	純度	９９．６５モル％以上
	装荷重	約１６０トン
	最高温度	７０℃
原子炉本体		
圧力管	材質	Ｚｒ－２５％Ｎｂ
	内径	１１７．８ ㎜
	肉厚	４．３ ㎜
カランドリア タンク	材質	ステンレス鋼
	高さ	約４．９ ｍ
	内径	約７．９ ｍ

カランドリア管	材質	ジルカロイ－２
	内径	１５６．４ ㎜
	肉厚	１．９ ㎜
制御棒	本数	４９ 本
	材質	Ｂ４Ｃ、ステンレス鋼
	駆動方式	電動機駆動ワイヤドラム方式
燃料取扱設備		
燃料交換機	方式	原子炉下部設置、遠隔操作方式
	台数	１ 台
原子炉冷却系	冷却材	軽水
	再循環ループ	２ループ
	圧力	６８kg／cm（蒸気ドラム）
	温度	２８４℃（蒸気ドラム）
	再循環流量	７，６００ｔ／ｈ
	蒸気流量	９１０ ｔ／ｈ
	給水温度	１８２ ℃
蒸気ドラム	種類	横置円筒形ドラム
	基数	２基（１基／ループ）
再循環ポンプ	種類	竪型うず巻式 電動機駆動
	台数	４台（２台／ループ）
蒸気タービン	形式	くし型４流排気復水式
	出力	１６万５千ｋＷ
	回転数	３，６００ ｒｐｍ
発電機	形式	３相複軸回転界磁型
	定格容量	２００，０００ kVA
	電圧	１６ ｋＶ
	周波数	６０ Ｈｚ
	冷却方式	水素ガス冷却



3．技　術　成　果

「ふげん」は、ＡＴＲの特長を活かし、運転初期より積極的に燃料としてＭＯＸ燃料を使用し、プルトニウム利用技術を実証してきました。また、プラントの運転を通じて、プラント運転手法を確立してきました。さらに、圧力管等の検査技術、重水取扱技術等の確立及び実証を行ってきました。一方、原子炉の冷却系が沸騰軽水冷却型であり設備上ＢＷＲに類似していることから、軽水炉へも反映できる水質管理、被ばく低減、計算機利用等の原子炉基盤技術の開発及び高度化も行っています。

3．1　プルトニウム利用技術

「ふげん」は、世界に先駆けてＭＯＸ燃料利用を本格的に進めてきた熱中性子炉であり、平成９年３月末までに原子炉に装荷したＭＯＸ燃料集合体の総数は 658体（プルトニウム量で約1,500kg、核分裂性プルトニウム量で約1,200kg）です。このＭＯＸ燃料集合体の総数は、これまで全世界で使用されたＭＯＸ燃料体数の約１／３を占めており、世界でも群を抜いた実績を残しています。

一方、使用済燃料は、平成９年３月末までに照射用燃料を含み 1,019体を取り出し、そのうち 510体を東海再処理工場へ輸送しています。この間、特に、昭和63年には「ふげん」の使用済ＭＯＸ燃料34体を東海事業所再処理工場で再処理し、ここで得られたプルトニウムを用いて同事業所プルトニウム燃料工場でＭＯＸ燃料４体を製造し、さらにこのＭＯＸ燃料を再び「ふげん」に装荷するといった我が国の核燃料サイクルの輪の完結を実証しています。

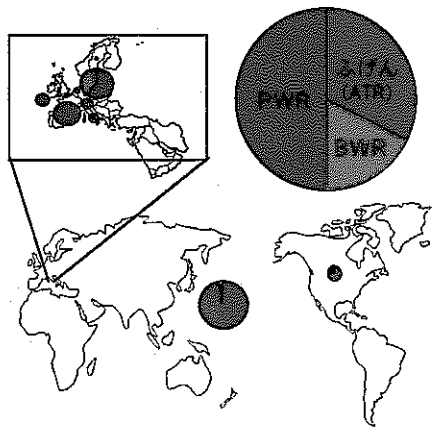
このように「ふげん」は、順調な運転実績をあげつつ、ＭＯＸ燃料及び照射用燃料集合体を装荷することにより、我が国における再処理技術、ＭＯＸ燃料転換・加工技術などのプルトニウム利用技術の確立とその実証に大きく貢献しています。

各国の軽水炉におけるＭＯＸ装荷実績

(1996年12月現在)　(単位:体)

国名	EWR	PWR	ふげん	計
ﾌﾗﾝｽ	---	582	---	582
ﾄﾞｲﾂ	208	366	---	574
ｽｲｽ	---	92	---	92
ﾍﾞﾙｷﾞｰ	---	187	---	187
ｱﾒﾘｶ	73	24	---	97
ｲﾀﾘｱ	62	8	---	70
ｵﾗﾝﾀﾞ	12	---	---	12
ｽｳｪｰﾃﾞﾝ	3	---	---	3
日本	2	4	638	644
合計	360	1263	638	2261

出典:「世界のプルサーマル実績」(平成9年2月:通商産業省の調べ)



世界のＭＯＸ使用実績
（「ふげん」及び軽水炉）

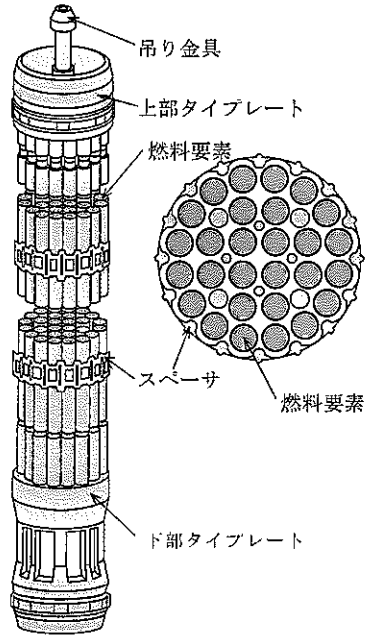
「ふげん」の現状

(1997年１月末現在)

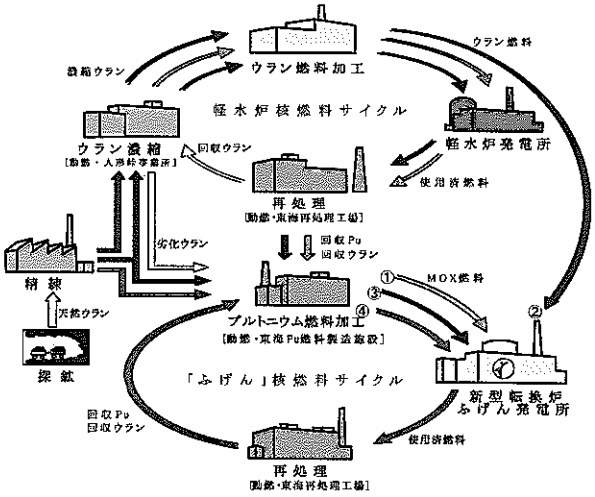
ＭＯＸ装荷実績	６５８体(1.2ﾄﾝPu-f・100ﾄﾝMOX)
使用燃料	タイプＢ燃料　２８本クラスタ型 Ｕ・Ｐｕ混合酸化物焼結ペレット 核分裂性物質量　約２％ 最高燃焼度　約20,000MWd/t

燃料集合体の主要仕様

項目 ＼ 燃料集合体		標準燃料集合体			
		(MOX燃料集合体)		(UO_2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	U・Pu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%	
	核分裂物質量 (wt%)	内層：約1.5 中間：約1.5 外層：約1.3	内層：約2.3 中間：約2.3 外層：約1.8	内層：約1.5 中間：約1.5 外層：約1.3	内層：約1.9 中間：約1.9 外層：約1.9
被覆管	材質	ジルカロイ－2			
	外径	約16.46mm		約16.46mm	
	肉厚	約 0.88mm		約 0.88mm	
燃料棒	燃料有効長	約3,700mm		約3,700mm	
	ヘリウム封入圧	約1kg／cm²a		約1kg／cm²a	
燃料集合体	形状	三層同心円状のクラスタ型		三層同心円状のクラスタ型	
	全長	約4,388mm		約4,388mm	
	外径	約111.6mm		約111.6mm	
	燃料棒数	28本		28本	
設計条件	最高燃焼度	約20,000MWd/T		約20,000MWd/T	
	最大線出力密度	574w/cm (17.5kw/ft)		574w/cm (17.5kw/ft)	

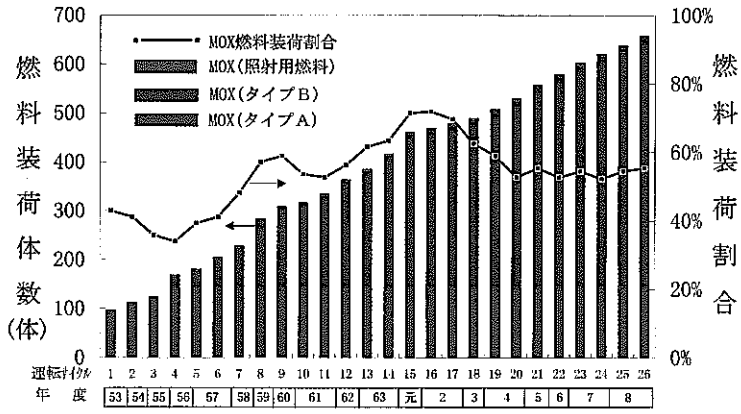


「ふげん」標準燃料集合体鋼挿図



年月	核燃料サイクル実証の経緯	
① 昭和56年9月	軽水炉からの回収プルトニウム(初の国産Pu)を使用	⇦
② 昭和57年12月	国産濃縮ウラン(人形峠事業所で生産)を使用	⇦
③ 昭和59年6月	軽水炉からの回収ウランを初めて使用	⇦
④ 昭和63年6月	ふげん使用済燃料からの回収プルトニウムを使用	⇦

核燃料リサイクルの輪の完結



「ふげん」におけるMOX燃料使用実績

3.2　圧力管の検査技術と健全性評価

(1) 圧力管の検査技術と健全性評価

「ふげん」の主要機器・配管は、運転に入ってからも定期的に検査を行い、健全性の確認を行っています。この検査を供用期間中検査（ＩＳＩ）と言います。

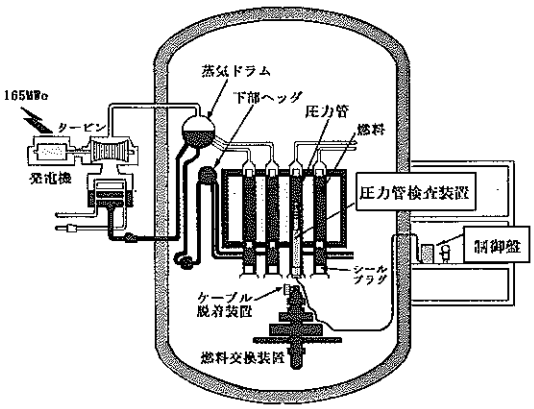
このうち、圧力管材料であるジルコニウム・ニオブ合金（Zr-2.5wt%Nb）は原子炉容器の材料として我が国で初めて採用したため、圧力管内径の寸法計測・超音波探傷及びテレビカメラによる内表面観察を定期的に行い、当初の設計の妥当性を評価し、健全性を確認することとしています。このため、「ふげん」ではＩＳＩ装置として燃料交換機を利用して、圧力管に取り付け、遠隔で自動検査が可能な圧力管検査装置を独自に開発して、圧力管の各種検査に使用しています。

本装置を使用した検査により、圧力管の健全性が確認されているとともに、圧力管クリープ歪み量の測定結果も、設計評価予測値と非常に良く一致していることで圧力管設計の妥当性も確認しています。

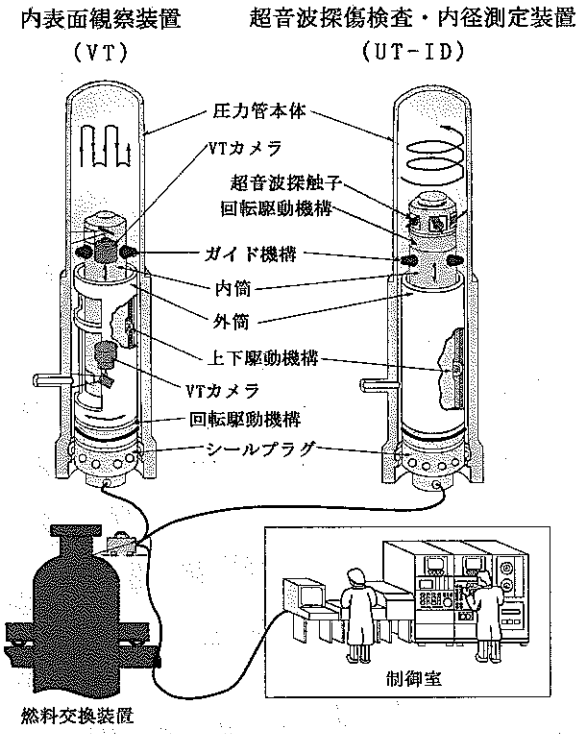
(2) 圧力管材料照射後試験の健全性評価

圧力管材料の健全性評価は、圧力管検査装置による検査の他、原子炉内で照射している監視試験片によっても行っています。

監視試験片は、これまでに第４、８、10及び12回定期検査時に取り出され、動燃大洗工学センターで各種の材料試験を行い、圧力管の引張強さ、破壊靱性値、水素吸収量等の材料特性が設計範囲を十分満足していることを確認しています。



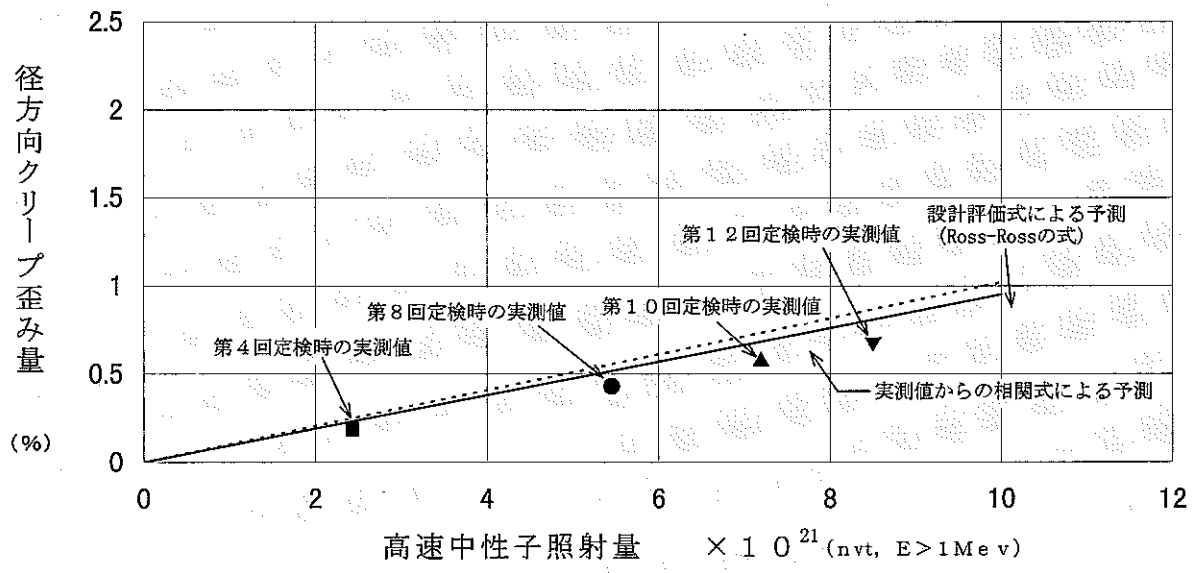
圧力管検査要領概念



圧力管検査装置の概略

圧力管検査装置の主要仕様

内表面観察装置（ＶＴ）	超音波探傷検査・内径測定装置(UT・ID)
検査機能 ① 内表面観察検査（ＶＴ） ・検査方式　：耐放射線白黒工業用テレビカメラ ・識別機能　：深さ0.2㎜×長さ2.0㎜×幅0.1㎜の人工欠陥が識別できる。 ・視野　：縦35㎜×横45㎜	検査機能 ① 圧力管本体超音波探傷検査（ＵＴ） ・探傷方式　：水浸式斜角探傷法 ・入射，探傷角：入射角26°，探傷角45° ・周波数　：10MHz ・探触子数　：軸方向欠陥検出用１チャンネル 周方向欠陥検出用１チャンネル ・欠陥検出能　：深さ0.05㎜×長さ５㎜の人工欠陥をＳＮ比10dB以上で検出できる。 ② 内径測定（ＩＤ） ・測定方式　：超音波式 ・測定精度　：±20μm ・他機能　：圧力管内表面の横断面形状の測定ができる。
使用条件 ・環境　：原子炉冷却水 ・照射線量率　：3×10^5 R/h（γ線）	使用条件 ・環境　：原子炉冷却水 ・照射線量率　：3×10^5 R/h（γ線）



設計評価式(Ross-Rossの式)：$\varepsilon = K\times\phi\times\sigma\times(T-160)\times100$

ε ：クリープ歪み量(%)
K ：定数(3.12×10^{-24}/3600sec)
ϕ ：中性子束(nvt, E>1Mev)
T ：運転温度(280℃)

σ ：周方向応力(kgf/mm^2)
$\sigma = D\times P/2/t$
D：運転前の内径測定値(㎜)
P：運転圧力(0.715kg/mm^2)
t：圧力管厚さ(4.3㎜)

圧力管検査によるクリープ歪み量と中性子照射量の関係

3.3　重水リサイクル技術

「ふげん」の減速材である重水は、天然水中に約0.02wt%しか存在せず、原子炉の減速材として使用できる原子炉級重水（99.7wt%以上）とするためには大規模な重水製造プラントが必要でした。しかし、我が国には重水製造プラントがなく、海外からの輸入に依存せざるを得ないこと、かつ重水が国際規制物質であったことから、プラントの安定運転を確保していくため、重水リサイクル技術の確立が求められていました。

このため、「ふげん」では原子炉運転に伴い発生した劣化重水*1を精製*2して再利用するために２つの重水精製装置を導入し、「ふげん」独自の重水リサイクル技術を確立しました。

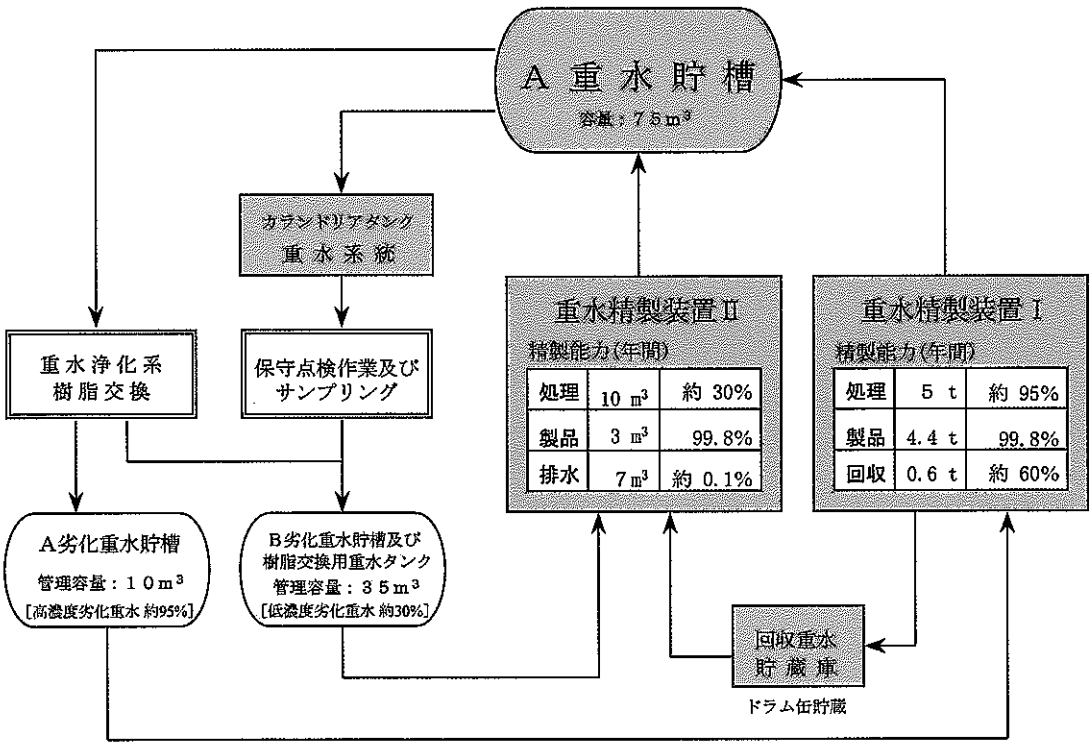
＊１劣化重水：軽水が混入して重水濃度が原子炉級重水より低下した重水を言います。
＊２精製　　：劣化重水を原子炉級重水に再濃縮することを言います。

〔重水精製装置Ⅰ〕

95wt%以上の高濃度劣化重水を原子炉級重水まで精製するため、水電解法による重水精製装置を設置し、昭和54年４月から運用を開始しました。

〔重水精製装置Ⅱ〕

95wt%以下の低濃度劣化重水を原子炉級重水まで精製するため、世界初の疎水性白金触媒を用いた水・水素同位体交換反応法による重水精製装置を設置し、昭和62年10月から運用を開始しました。



「ふげん」の重水運用サイクルの概念

水電解法の原理〔重水精製装置Ⅰ〕

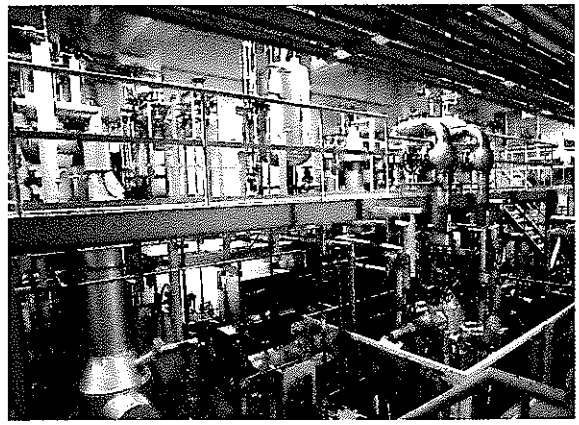
水（重水）を電気分解すると、陰極（水素極）と陽極（酸素極）で、それぞれ次のような反応が起こり、水素（重水素）ガスと酸素ガスが２：１の割合で発生します。

〔陰極〕 $2H_2O(D_2O) + 2e^- \rightarrow 2OH^-(OD^-) + H_2(D_2)\uparrow$

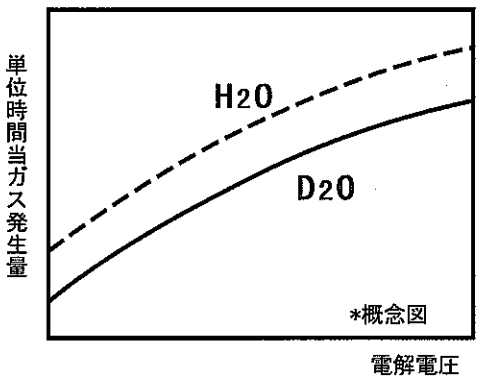
〔陽極〕 $2OH^-(OH^-) \rightarrow H_2O(D_2O) + 2e^- + 1/2\,O_2\uparrow$

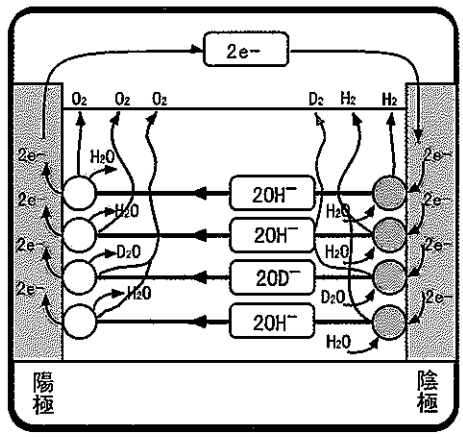
【全体】 $H_2O(D_2O) \rightarrow H_2(D_2)\uparrow + 1/2\,O_2\uparrow$

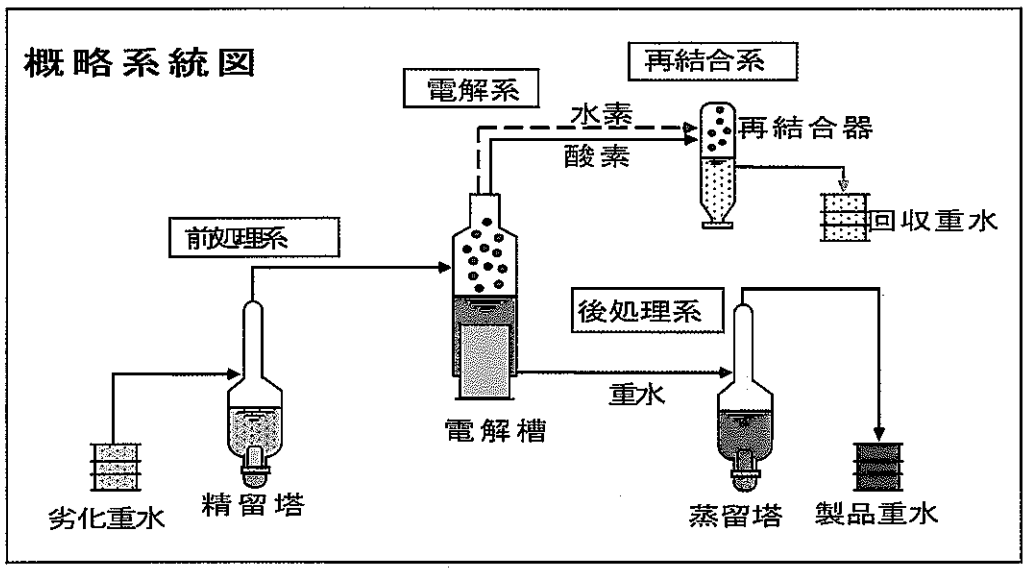
この反応において水素が発生する際に、水素と重水素の電解電圧の差により、重水素のほうが水素よりガスになり難く、水として残り易い性質があります。水電解法は、この性質を利用して、電解ガス中にはより水素に富んだ成分を、電解液中にはより重水素に富んだ成分を濃縮しようとするものです。



重水精製装置Ⅰ







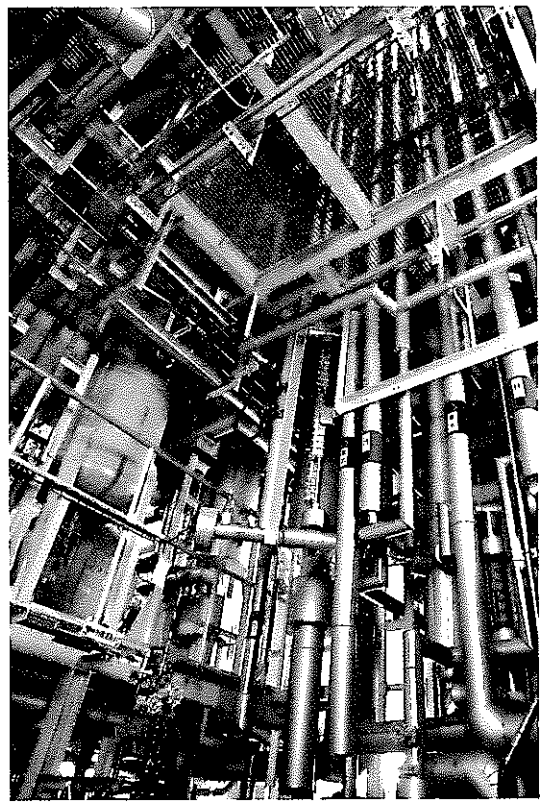
水・水素同位体交換反応法の原理〔重水精製装置Ⅱ〕

水・水素同位体交換反応法は、白金触媒*1の作用により、水と水素の間で水素原子が置き換わる反応を水素同位体の分離に応用する方法です。

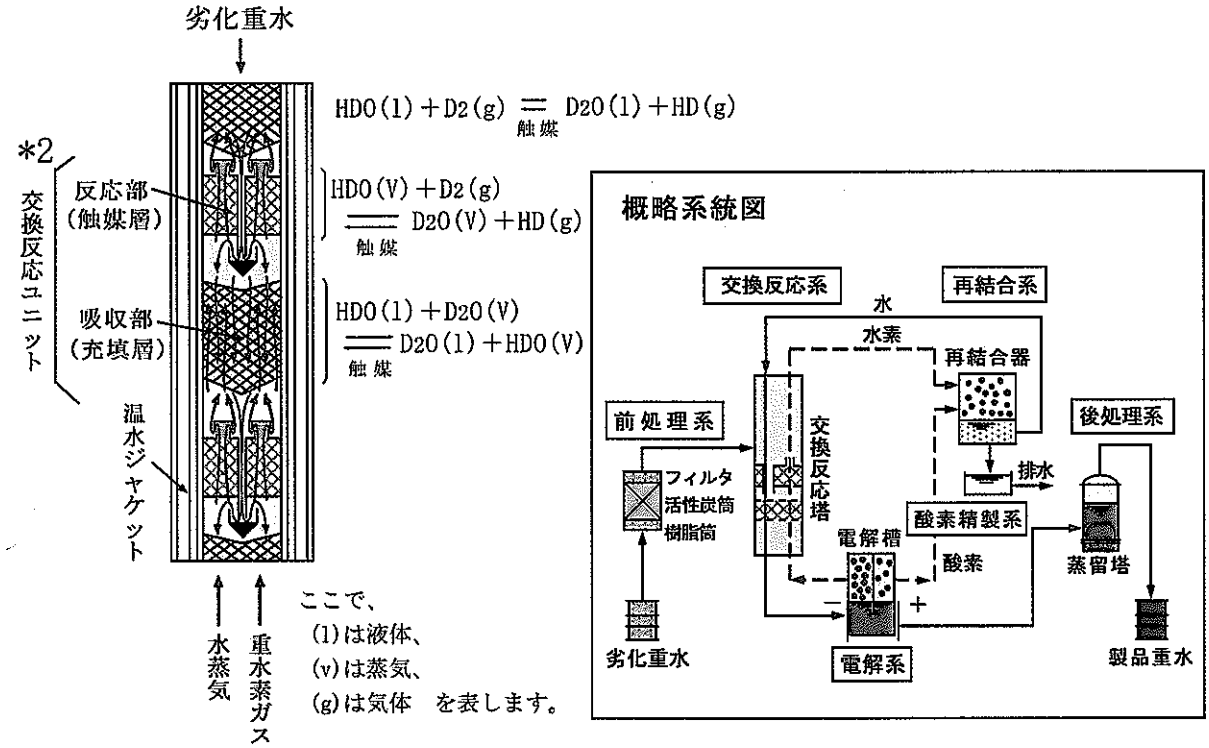
電解槽で発生した重水素ガス（D_2）が交換反応ユニットの反応部を上向きに通過すると、その重水素（D）の一部が劣化重水の水蒸気（HDD）を構成する水素（H）と置き変わり、重水の水蒸気（D_2O）になります。次に、この重水の水蒸気が吸収部を通過すると、その一部が下向きに流れる劣化重水に移行します。

総合的には、重水素ガスの重水素（D）と劣化重水の水素（H）が交換される結果となり、劣化重水が交換反応塔を下向きに流れるにつれて、HDOからD_2Oに濃縮され、最終的に製品重水となります。

＊1：重水精製装置Ⅱに使用している疎水性の白金触媒は、動燃事業団が中心となり、相模中央化学研究所、北海道工業開発試験所及び理化学研究所の協力のもとに開発したものです。



重水精製装置Ⅱ



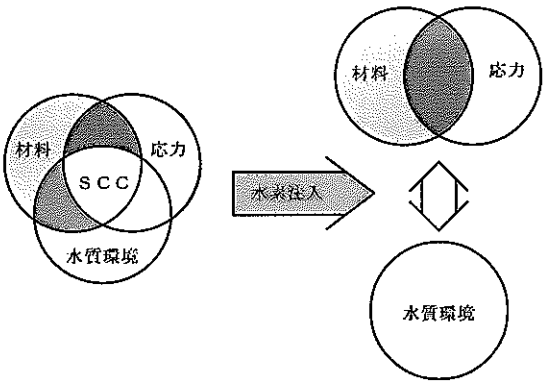
＊2：重水素ガスと劣化重水の水蒸気の間でDとHの交換反応を行わせる反応部と、重水の水蒸気と劣化重水の間で気液平衡を行わせる吸収部から構成されるユニットで、交換反応塔に複数個組み込まれています。

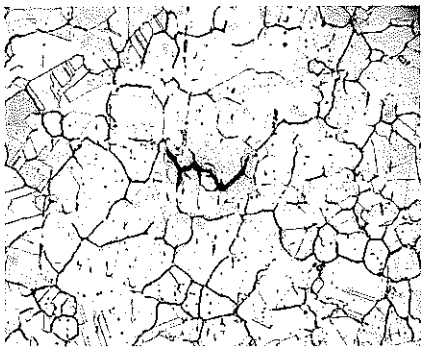
3.4　水素注入技術

「ふげん」では、原子炉冷却材系を構成するＳＵＳ３０４ステンレス鋼配管の応力腐食割れ（ＳＣＣ）発生防止対策の一環として、国内の原子力発電所で初めて水素注入法を採用しました。

ＳＣＣは一般に右の図に示すように「材料」・「応力」・「水質環境」の三条件がそろった時に発生するとされています。したがって、ＳＣＣの発生を防止するためには、配管をＳＣＣに対する感受性の低い材料のものと交換したり（材料）、配管溶接時に溶接部分に発生する応力を取り除いたり（応力）、配管の接する原子炉冷却水の水質を改善したり（水質環境）して、先の三条件のいずれかを取り除く必要があります。

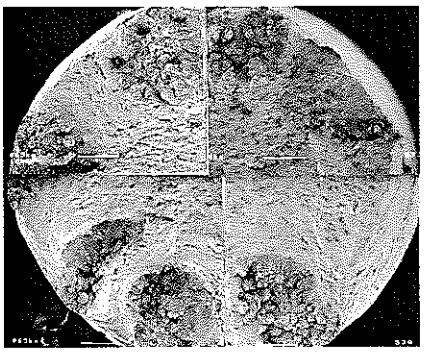
水素注入法は、「水質環境」を改善することによってＳＣＣの発生を防止するもので、「ふげん」での水素注入法による技術成果は、世界的にも利用される貴重なデータとなっています。



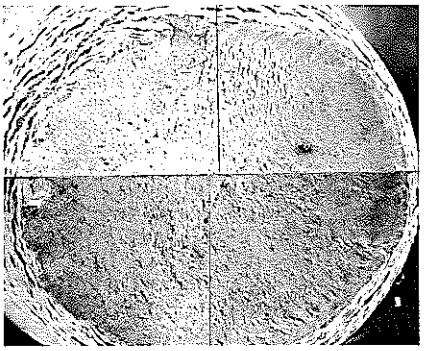


「SUS304ｽﾃﾝﾚｽ鋼に発生した応力腐食割れ」

粒界型応力腐食割れ(IGSCC) は、金属材料の結晶粒界に沿って発生します。この顕微鏡写真は、厳しい試験条件下で強制的に発生させ粒界型応力腐食割れの表面を撮影したものです。



水素注入法の採用

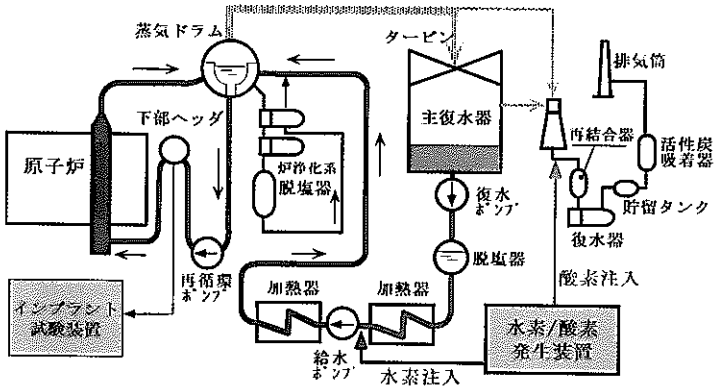


「水素注入による応力腐食割生抑制効果」

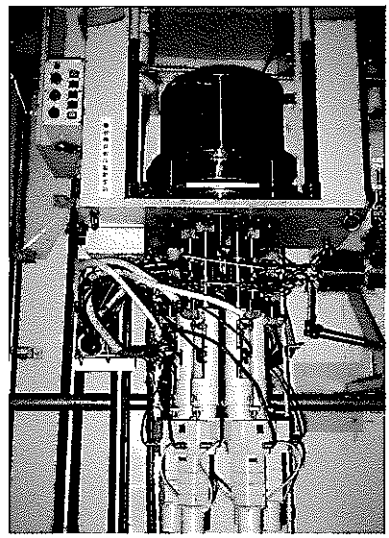
上の電子顕微鏡写真は、鋭敏化*1した試験片を、低歪率引張試験により強制的に破断させた時の破断面を撮影したものです。水素を注入しない場合に相当する水質条件下での試験（左側）では、凹凸のある粒界型応力腐食割れによる破断面が認められ、応力腐食割れ感受性のあることが示されていますが、水素注入して溶存酸素濃度を下げた条件での試験（右側）では、強制破断面のみしかなく、応力腐食割れ感受性が低減されていることがわかります。

＊１鋭敏化：熱処理によって応力腐食割れの感受性を高めることを言います。

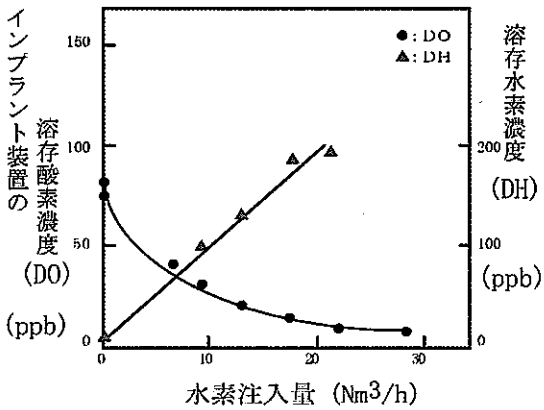
「ふげん」の水素注入は、国内では初めての採用であったため、詳細な調査や材料試験、短期注入試験の後、昭和60年12月から連続注入を行っています。水素注入法の効果確認のため、種々の材料試験を「ふげん」内に設置したインプラント試験装置を用いて評価を行い、得られたデータは国際的にも注目されています。



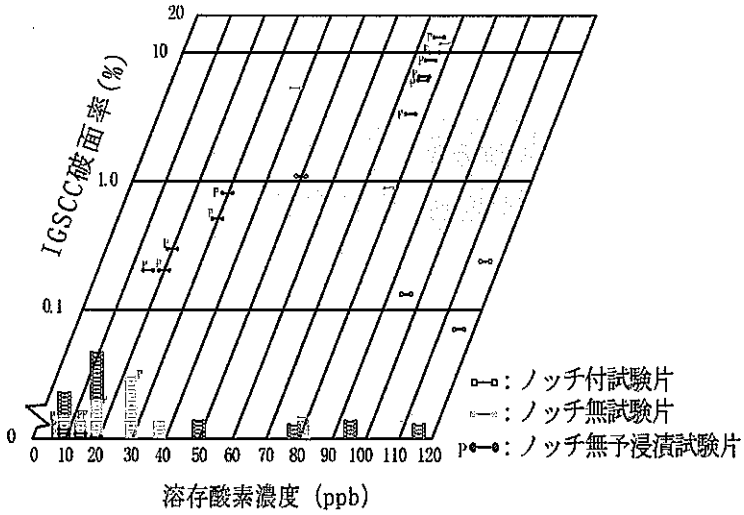
水素は原子炉給水ポンプの上流から注入され、炉心の溶存酸素濃度を低下させステンレス鋼の応力腐食割れを防止します。



「低歪率引張試験(SSRT)試験と試験片」
低歪率引張試験では、原子炉冷却水を満たした試験装置内の試験片を、一定の極めてゆっくりした速度で引張って強制的に破断させ、試験片の破断面を電子顕微鏡によって観察して、応力腐食割れに対する試験片の感受性を評価しました。



「水素注入による原子炉冷却水中
溶存酸素濃度低下効果」
原子炉冷却水中の溶存酸素濃度は、水素注入量を増やすと低下します。

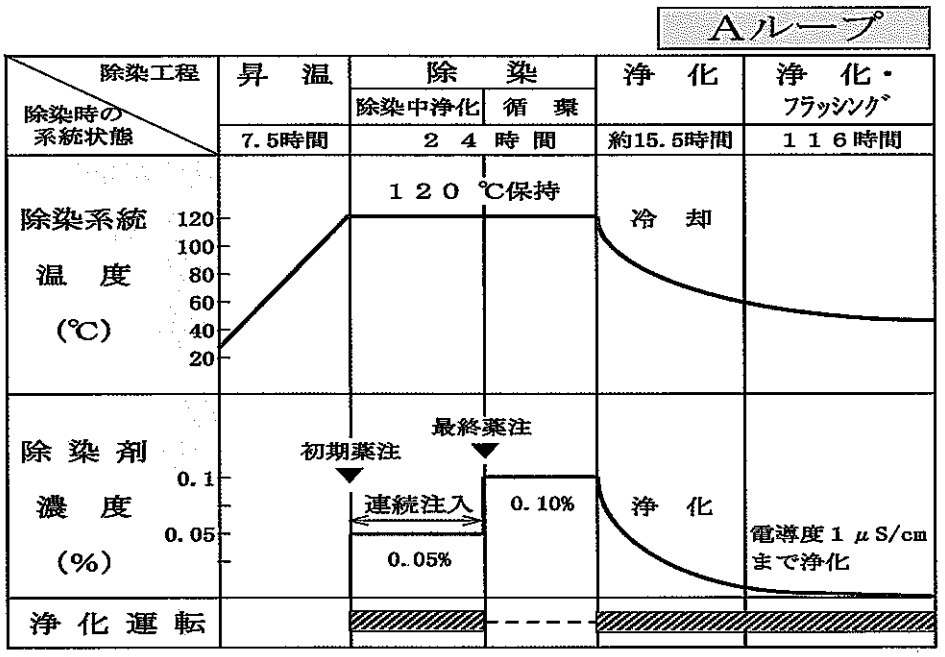


「水素注入による応力腐食割れ感受性低減効果」
上の図は、水素注入によって原子炉冷却水中の溶存酸素濃度を変化させた条件下で行われた低歪率引張試験の結果を示したものです。
図の縦軸は、試験片破断面に発生した応力腐食割れによる破断面積と試験前の試験片破断面積との比を示し応力腐食割れに対する感受性を表します。水素を注入して原子炉冷却水中の溶存酸素濃度を下げることにより応力腐食割れに対する感受性が低減することがわかります。

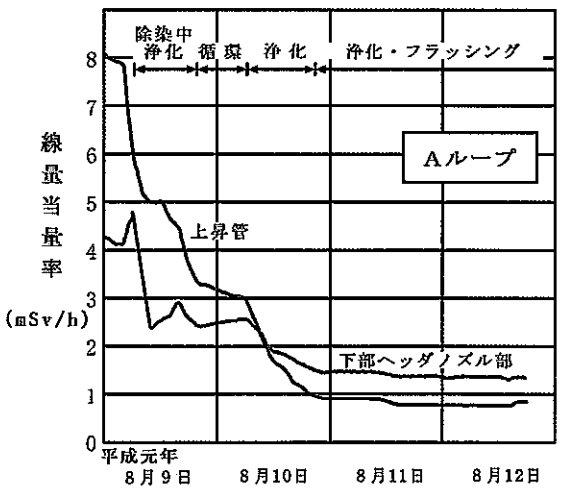
3.5　系統化学除染技術

「ふげん」では、定期点検時の被ばく低減を図るため、作業の自動・遠隔化、遮蔽の設置等の作業管理面及び給水への酸素注入、復水脱塩器の運用方法改善等水質管理面からの対策を推進してきました。さらに、機器・配管に付着している放射性金属酸化物除去が、機器分解点検等の作業での被ばく低減に大きな効果をもたらすことから、原子炉冷却系の系統化学除染技術の開発に取り組み実用化を進めてきました。

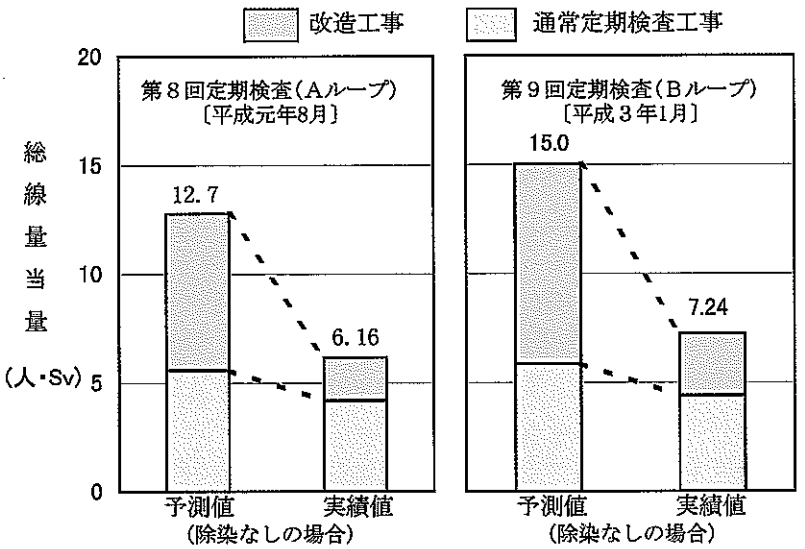
系統化学除染技術の開発については、除染剤の除染性能、材料健全性等に関する基礎試験及び実機熱交換器、燃料交換装置の機器単体による実証試験を経て、供用中の原子力発電所としては我が国で初めて、原子炉冷却系全体の化学除染を（Aループ：平成元年８月、Bループ：平成３年１月）行い、大幅な被ばく低減を図りました。



系統化学除染の実績工程



除染中の線量当量率の推移



系統化学除染による被ばく低減効果

3.6　計算機利用による運転・保守技術の高度化

「ふげん」では、運転開始以来、運転・保守管理の高度化を目的として計算機システムの開発・導入を図ってきており、近年は、最新の計算機ハードウェア（汎用大型計算機、高機能ﾜｰｸｽﾃｰｼｮﾝ、ﾊﾟｰｿﾅﾙｺﾝﾋﾟｭｰﾀ、LAN等）及びソフトウェア〔人工知能（ＡＩ:Artificial-Intelligence）、ＣＡＤ（Computer Aided Design)、ファジィ等〕の組み合わせによりシステム開発を行っています。

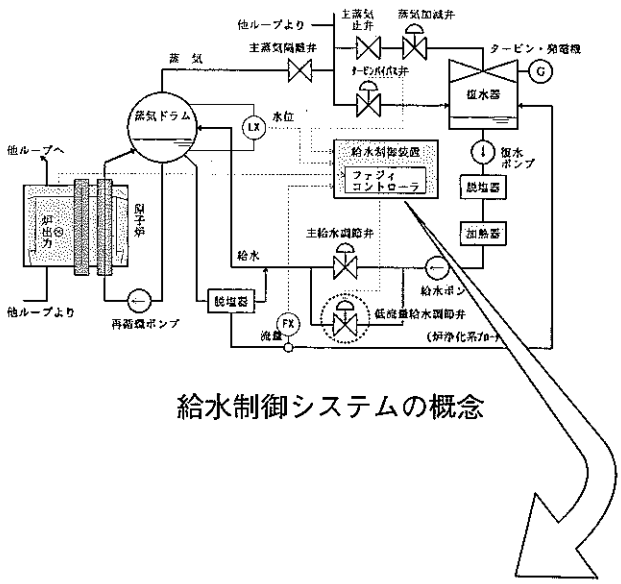
これらの技術は、従来困難とされていた、運転員や保守員のノウハウをシステム化することを可能としており、「ふげん」に蓄積された技術の高度化及び体系化に大きな成果をあげています。

(1) ファジィ理論を応用した制御システム

ファジィ（Fuzzy:あいまい）理論は、従来の制御系における明確な論理体系の限界を認識して発案された理論であり、これを応用した制御システムは、従来のＰＩＤ(比例・積分・微分動作)制御に比較して、よりよい制御特性を発揮できる可能性を持っています。

「ふげん」では、低出力における原子炉給水制御が熟練運転員の知識や経験によってなされ、非常に微妙な運転操作を要していたことから、ファジィ制御の適用が有効と判断し、パイロットシステムでの開発を経て、平成４年に実機への適用を行いました。

原子炉給水制御系は、蒸気ドラム水位を設定レベルに保つように蒸気ドラムへの給水量を制御する系統です。ファジィ制御では、運転員が手動制御する場合と同様に、蒸気ドラム水位の他に原子炉出力、給水流量等のプロセスデータを基に制御量を推論することにより制御を行うため、熟練運転員に近い良好な制御特性が実現できます。

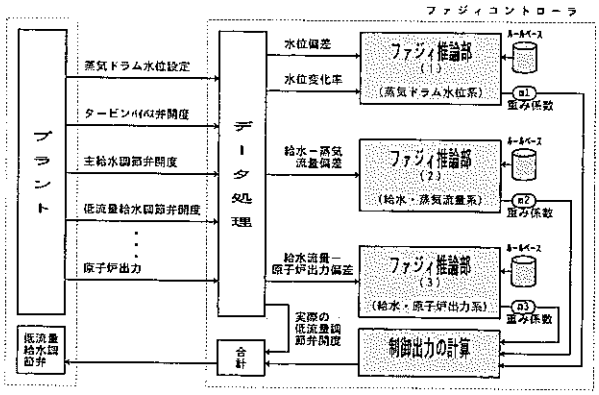


給水制御システムの概念

ファジィ制御について・・・

ファジィ制御は、1965年米国カリフォルニア大学のZadeh教授が提案したファジィ集合論を基にした制御方式です。これは、熟練者や専門家が持っている知識や経験による定性的な判断方法（もう少し、だいぶ、～ならば、～くらい）をファジィ集合論を用いて制御規則化し、それらの規則に基づいて制御量を推論することにより制御を行うものです。

このためファジィ制御は、非線形性が強く特性が複雑で、制御対象のモデルが数式で表現することが困難な系統の制御にも容易に通用が可能であると言われており、各種の工業分野においても実用化が進められています。



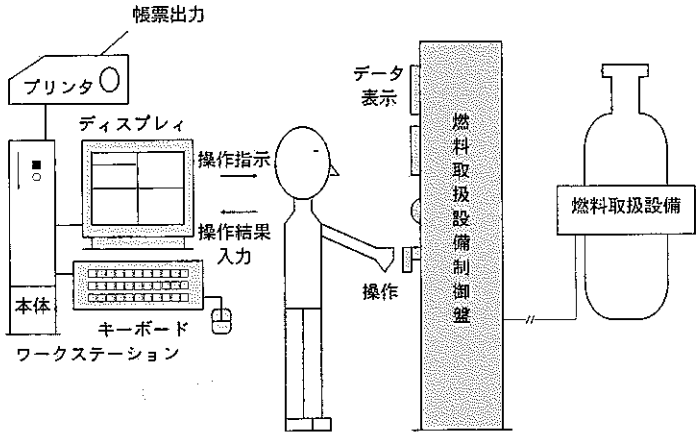
ファジィコントローラブロック線図

(2)　Φネットを利用した燃料取扱作業支援システム

Φネット（Factory Automation Intelligent Network Control System）は、ネットワーク技術とＡＩ技術を結合して、物流における高度な制御システムを目指して作られた汎用物流システムで、物品移動を総合的に管理できる機能を持っています。

「ふげん」での燃料交換作業は、定期検査及び計画停止時の工程の遵守、また取り扱い物品が核燃料であることから非常に重要な作業です。特に「ふげん」は圧力管型炉であることから、軽水炉とは異なるシステムであり、作業計画の立案・設備の効率的な運用については、熟練運転員に蓄積された数多くの経験的知識が必要でした。

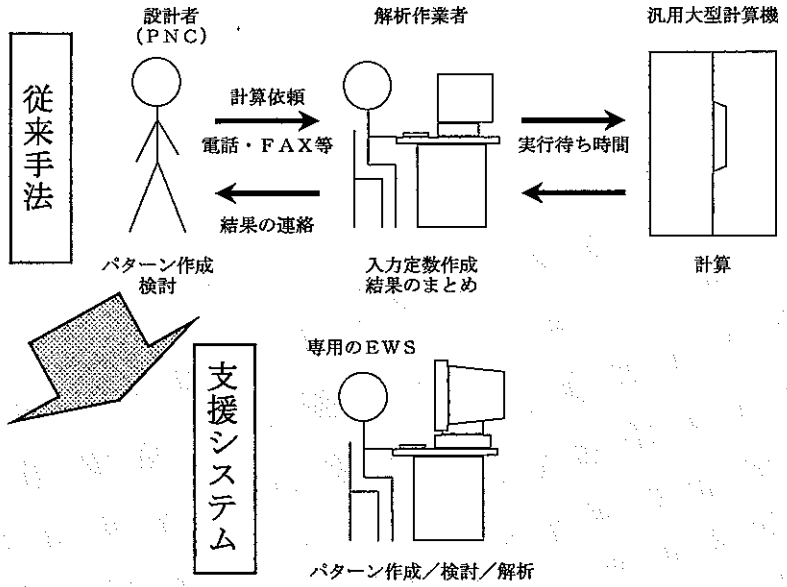
このことから、Φネットを利用しこれまでの燃料交換作業実績と熟練運転員の知識やノウハウを計算機に取り込み効率的な交換作業を行う「燃料取扱作業支援システム」を開発し、平成７年度には実機の燃料交換設備の制御系への適用を行いました。



燃料交換作業支援システム概念

(3)　ＥＷＳを利用した燃料取替計画支援システム

「ふげん」では運転サイクル毎に燃料取替計画を作成していますが、この計画の作成作業には、大型計算機上での炉心特性解析コードにより解析を行うことで、多大な労力と費用がかかっていました。しかし、近年のｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞﾜｰｸｽﾃｰｼｮﾝ（ＥＷＳ）におけるＣＰＵの価格・性能向上により炉心特性解析コードの計算が可能となるＥＷＳの導入が可能となりました。このことから、装荷パターン案の作成から解析結果の表示までの一連の流れを１台のＥＷＳで全て行い、燃料の最適な取替計画を立案する「燃料取替計画支援システム」を開発し運用を開始しました。今後は、より一層の高度化を図る観点から、遺伝的アルゴリズム（ＧＡ）やニューラルネットワークを導入したシステム開発を行う予定にしています。

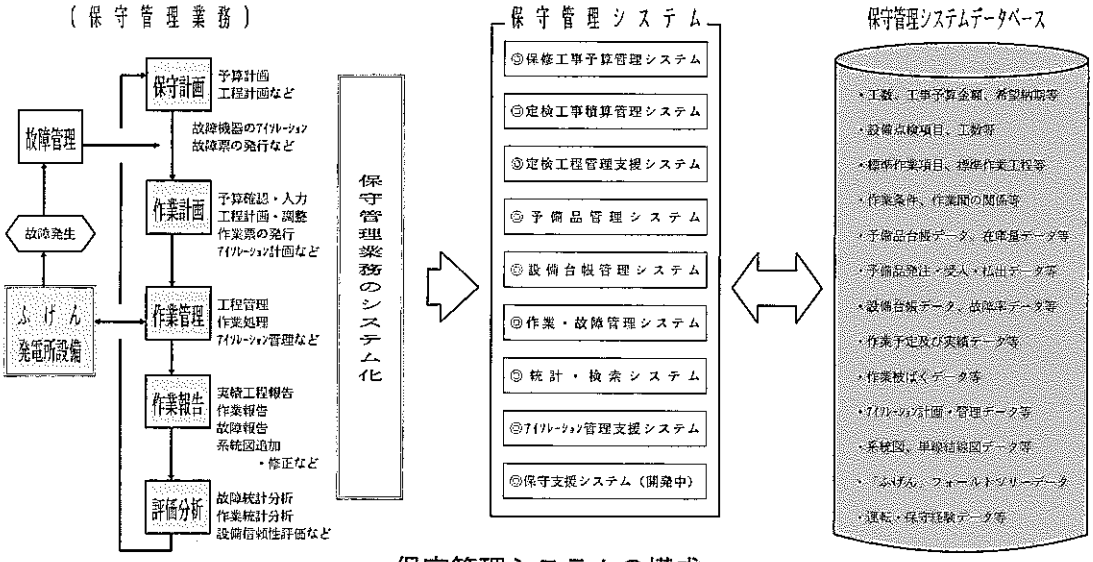


燃料取替計画支援システム概念

(4) 保守管理システム

保守管理システムは、「ふげん」の運転・保守実績をデータベースとして、データの共有化や各種管理システムのネットワーク化を図り、保守管理業務の省力化、信頼性向上及びＡＴＲ開発に有益なデータを蓄積提供するために開発された総合的な計算機システムです。

本システムの開発は、昭和54年に着手し、今日までに各種管理システムの運用を開始した他、現在でも最新の計算機利用技術を取り入れシステムの高度化を行っています。

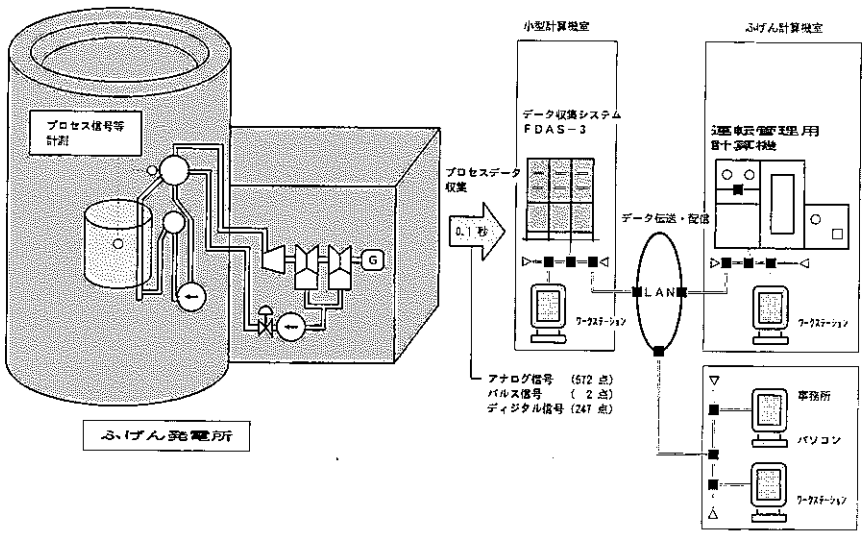


保守管理システムの構成

(5) プラントデータ収集システム

プラントデータ収集システム（ＦＤＡＳ:Fugen Data Acquisition System）は、「ふげん」の起動試験時のプラントプロセスデータを採取する目的で設置され、運転開始以降においても各種試験等のデータ採取に使用していました。その後、プラントの状態をより正確に評価し、データの蓄積と解析処理を充実する目的で、昭和57年よりシステムの改良を行ってきました。

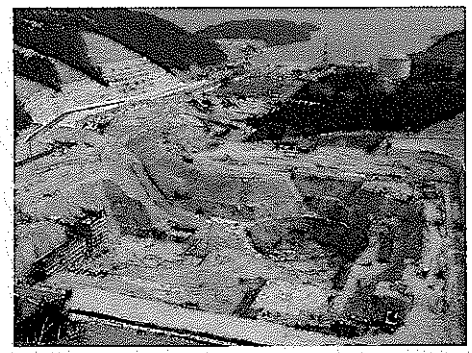
この改良により、定常時のプラント運転データの収集、蓄積、処理、解析を行い、分かり易いデータの提供を行うことが可能となった他、プラント異常の早期発見やプラント過渡変化時の解析に能力を発揮しています。

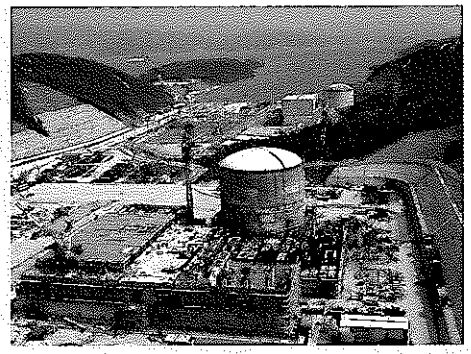


「ふげん」データ収集システム概念

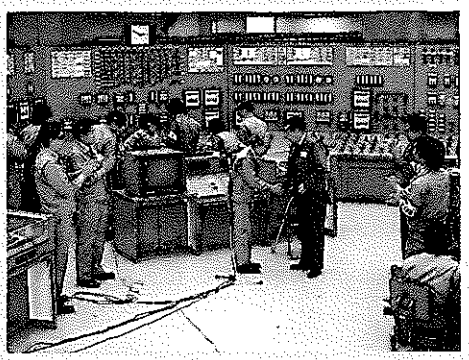
4．「ふげん」のあゆみと運転実績

年　度	記　事
昭和41年5月18日	原子力委員会は「新型転換炉」の開発を決定
昭和42年10月1日	動力炉・核燃料開発事業団発足
昭和44年5月	チェック・アンド・レビューを始める
11月	政府は「ふげん」の建設を決定
昭和45年3月2日	ＡＴＲ原型炉の設置許可を総理大臣に申請
4月8日	ＡＴＲ原型炉の名称を「ふげん」と決定発表
11月30日	政府は原型炉「ふげん」の原子炉設置を許可
12月11日	敦賀建設事務所開所式、建設開始
昭和46年9月	基礎堀削開始
昭和47年7月	原子炉主建屋工事に着工
8月	原子炉格納容器の据付けを開始
昭和50年1月	カランドリアタンクの据付け完了
6月	原子炉主建屋工事の竣工
昭和52年6月	機器据付け完了
7月	総合機能試験を開始
11月28日	重水装荷作業開始
昭和53年2月11日	総合機能試験完了
3月15日	燃料装荷開始〔管理区域設定される〕
3月20日	最小臨界達成、起動試験開始
5月9日	全燃料装荷炉心による初臨界達成
7月29日	発電機初並列、送電開始〔初併入〕
11月13日	定格電気出力(165MW)定格達成
昭和54年3月20日	本格運転を開始（総合負荷検査合格）
昭和55年2月1日	第1回定期検査（～昭和55年5月15日）
11月17日	昭和55年度計画停止、第2回定期検査（～56年11月5日）〔東海再処理工場からの回収Ｕを用いたMOX燃料装荷〕
昭和57年9月24日	第3回定期検査（～昭和58年2月13日）〔人形峠事業所で生産した濃縮Ｕを用いた燃料を装荷〕
昭和58年2月23日	電源開発と「実証炉の相互協力基本協定」を締結
8月9日	ＡＴＲ実証炉合理化設計を完了
12月26日	ＡＴＲ実証炉の合理化設計等を電発に引渡し
昭和59年2月15日	第4回定期検査（～7月19日）〔東海再処理工場からの回収Ｕを用いたMOX燃料装荷〕
10月19日	総発電電力量50億ｋＷｈ達成
昭和60年7月3日	第5回定期検査（～昭和61年1月10日）〔1次系への水素注入開始、照射用36本燃料3体装荷〕
昭和61年12月13日	重水精製装置（Ⅱ）ホット試運転開始
昭和62年1月7日	第6回定期検査（～4月17日）〔照射用セグメント燃料2体装荷〕

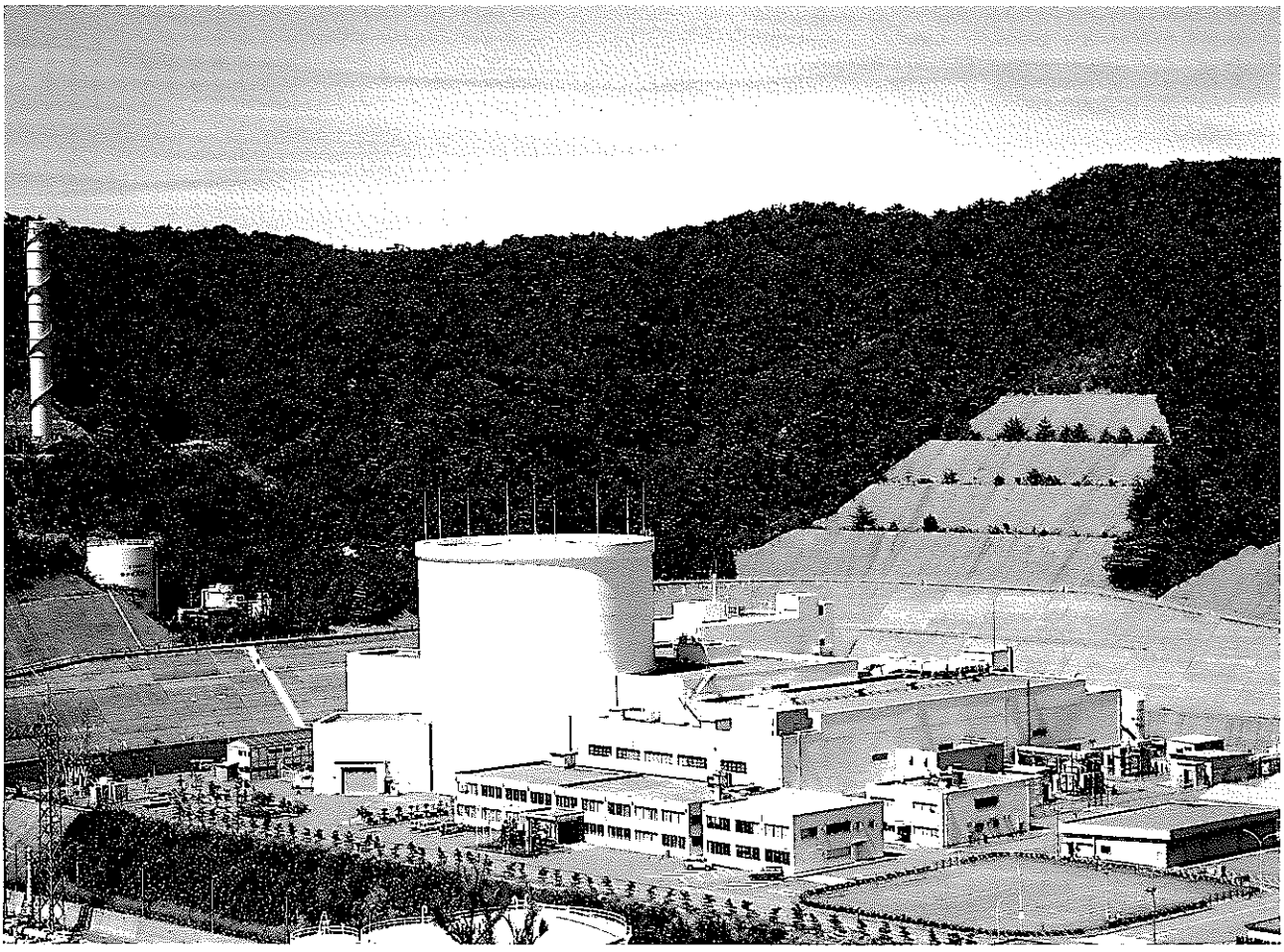

整地工事（昭和47年3月）


格納容器の組立（昭和48年9月）

カランドリアタンクの据付
（昭和50年1月）


最小臨界達成（昭和53年3月20日）

年　度	記　　事
昭和63年４月16日	第７回定期検査（～７月20日）
６月27日	〔ふげんより搬出した使用済燃料を再処理し抽出したＰｕを使用した燃料４体装荷、ＡＴＲ核燃料サイクル完結〕
平成元年３月20日	「ふげん」運開１０周年
７月19日	第８回定期検査（～12月21日）〔原子炉冷却系Ａループを系統化学除染〕
12月18日	総発電電力量１００億ｋＷｈ達成
平成２年12月14日	第９回定期検査（～平成３年５月23日）〔原子炉冷却系Ｂループを系統化学除染・応力腐食割れ予防対策完了〕
平成３年12月22日	総発電電力量１２０億ｋＷｈ達成
平成４年４月26日	第１０回定期検査（～８月20日）
平成５年２月22日	新燃料装荷１０００体達成
８月18日	第１１回定期検査（～平成６年１月７日）〔Ｐｕ装荷量１トン（ＭＯＸ燃料累積装荷体数５５７体）達成〕
平成６年３月20日	「ふげん」運開１５周年
９月26日	総発電電力量１５０億ｋＷｈ達成
平成７年１月６日	第１２回定期検査（～５月18日）〔燃料交換支援システムの運用開始〕
７月11日	電事連ＡＴＲ実証炉計画中止申し入れ
８月25日	原子力委員会がＡＴＲ実証炉計画を中止決定
平成８年２月９日	運転開始後運転時間１０万時間達成
４月22日	第１３回定期検査（～８月８日）
10月５日	総発電電力量１７０億ｋＷｈ達成



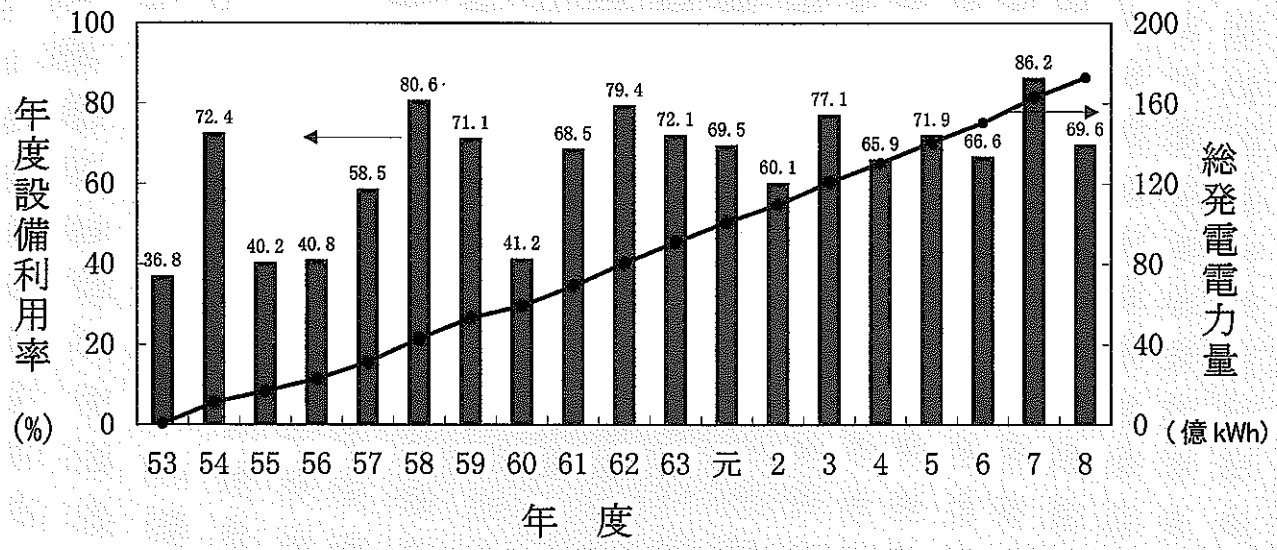
「ふげん」は、昭和54年３月20日に本格運転を開始以降、安定かつ安全な運転実績を積み重ね、平成９年３月末現在、

・総発電電力量：約173億kwh　・平均設備利用率：66.3％

・総原子炉運転時間：約11万時間

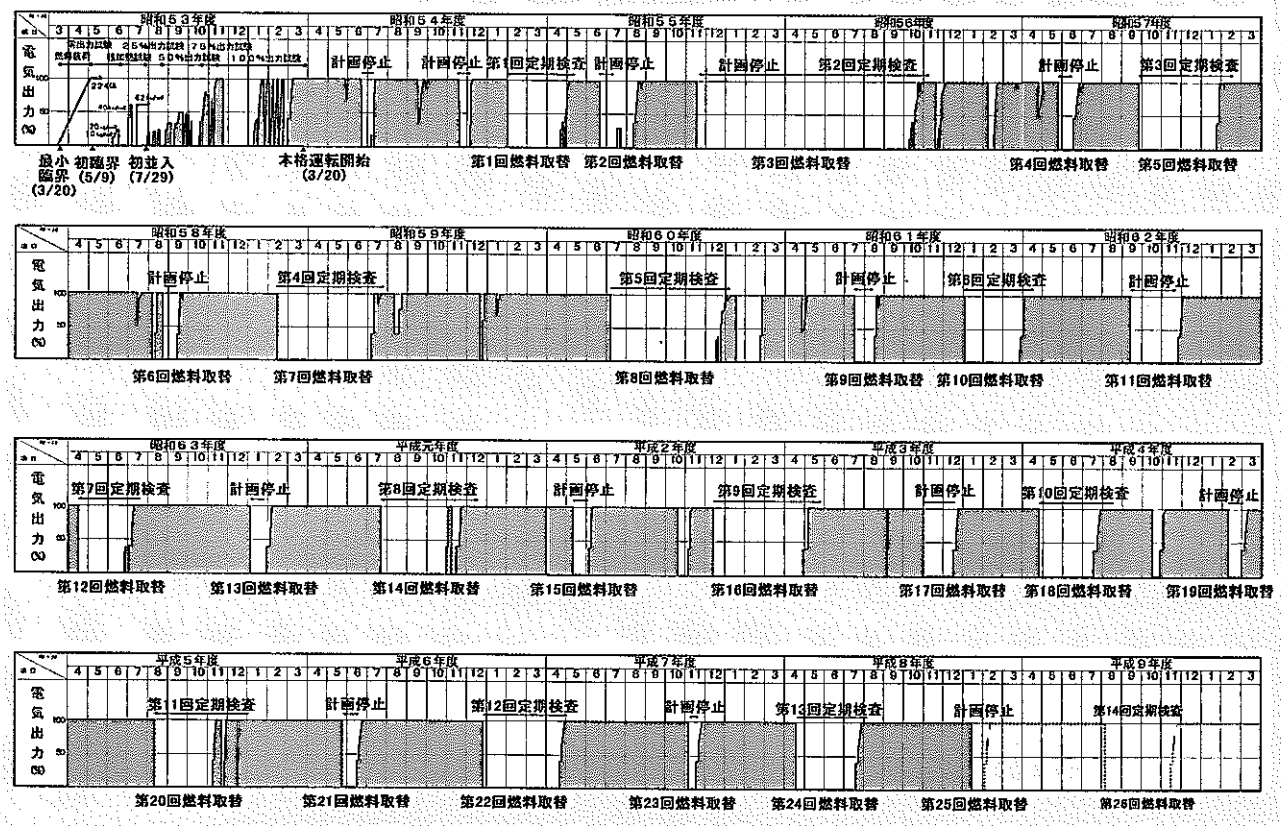
となっています。

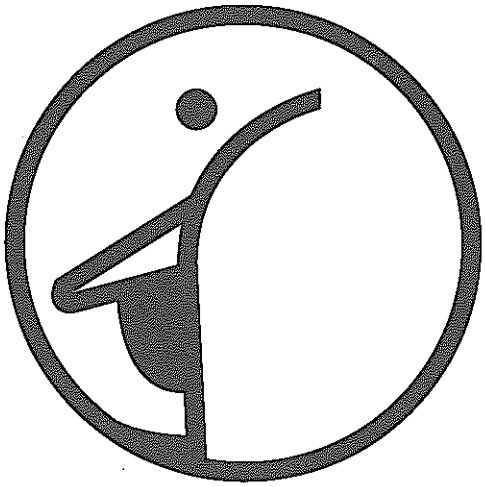
また、平成９年３月には本格運転開始18周年を迎えました。



ふげん発電所の運転実績

新型転換炉ふげん発電所運転履歴





このマークは、新型転換炉「ふげん」のシンボルマークです。命名の由来である普賢菩薩によってコントロールされる象を表しています。

新型転換炉ふげん発電所

〒914 福井県敦賀市明神町3

☎0770−26−1221(代表)

本　社

〒107　東京都港区赤坂1−9−13（三会堂ビル）

☎03−3586−3311(代表)