

新型転換炉実証炉の開発

Development of Demonstration ATR (Advanced Thermal Reactor)

電気出力600MWの新型転換炉実証炉は昭和50年から設計を開始した。炉心部のコンパクト化を図るため、原型炉に比べチャネル平均出力を20%増大させた36本燃料集合体を648体使用し、カランドリアの重水ダンプ機構は廃止した。新型転換炉は制御棒ワースが変化しない点、冷却材ボイド反応度係数が負側にシフトする点、高次プルトニウムの悪影響が小さい点などから、プルトニウム燃焼に適している。ボイド反応度係数がゼロ近傍であり圧力外乱に対しての出力の動揺が少なく、制御棒の操作による燃料の局所的出力変化が少ない構造であることから、負荷追従運転は比較的容易である。冷却材再循環系は炉心2分割の独立ループ構成で、それぞれの蒸気ドラムで気水分離する。現在、動力炉・核燃料開発事業団の指導のもとで、合理化設計を推進中である。

西村 征二*
小口伊佐男*
藤 平 一 重**

Seiji Nishimura
Isao Oguchi
Kazushige Touhei

1 緒 言

重水減速・沸騰軽水冷却型の新型転換炉の開発は、動力炉・核燃料開発事業団を中心に、日立製作所を含む原子力5グループの協力によって進められてきた。原型炉「ふげん」(電気出力：165MW)は、昭和45年建設に着手、昭和53年3月最小臨界に到達し、昭和54年3月から本格運転に入っている。

新型転換炉実証炉(電気出力：600MW)の設計は、昭和50年度の基本構想取りまとめから始まり、概念設計・調整設計を経て、昭和57年3月から合理化設計を開始している。

日立製作所は主契約会社として、各社間の調整、ソフトウェア設計と所掌設備のハードウェア設計を担当している。

2 実証炉の概要

実用規模まで大容量化を行なうときの技術的問題を実証し、実用化段階での経済性を見通しを得ることを目的として建設する実証炉は、「ふげん」及び軽水炉の技術をベースに、(1)安全性の確保、(2)運転信頼性の向上、(3)運転保守の容易化、(4)経済性の向上の4点を設計目標においている。プラント設備容量は先行重水炉及び軽水炉のスケールアップ率を考慮し、「ふげん」の3.64倍である電気出力600MWとし、燃料は軽水炉の使用済み燃料から抽出されるプルトニウムと、減損若しくは天然ウランの利用を主体とする。サイト条件にかかわる事項は、目下「ふげん」と同等と想定して設計を進めている。実証炉の主要目を「ふげん」と比較して、出力比に対しての改善内容を注記したものを表1に示す。

実証炉は原子炉発生蒸気でタービンを駆動する直接サイクル原子力発電プラントである。主要系統の概要を図1に示す。原子炉本体はカランドリア、鉄水遮へい体、圧力管集合体から構成される。カランドリアの上方には電動式制御棒駆動装置を設け、93本の制御棒案内管内の制御棒を駆動する。冷却材再循環系は炉心2分割の完全独立2ループ構成であり、冷却材は再循環ポンプによって圧力管集合体に送られ、燃料によって加熱されて蒸気と水の2相流となり、各ループの蒸気ドラムに入る。ここで気水分離後、蒸気はタービンへ、飽和水は給水と混合し再循環ポンプに戻る。冷却材の一部を抽出浄化する冷却材浄化系は、余熱除去系の設備を共用している。

表1 新型転換炉実証炉の主要目 プラントの基本仕様を原型炉「ふげん」と比較して、出力比3.64倍の大型化に伴う改善内容を示す。

項 目		実証炉仕様	「ふげん」仕様	出力比に対しての改善内容
炉 型		重水減速沸騰軽水冷却縦置圧力管型		
定 格 電 気 出 力		600MW	165MW	(出力比3.64)
定 格 熱 出 力		1,930MW	557MW	総合熱効率5%向上
炉 心	高さ×等価直径	3.7m×6.95m	3.7m×4.05m	炉心体積19%節減
	圧力管格子ピッチ	242mm	240mm	—
	圧力管本数	648本	224本	本数21%節減
	カランドリアタンク(高さ×直径)	4.85m×9.55m	5.04m×7.95m	—
カランドリアタンク内 重 水 量		192m ³	82m ³	—
燃 料 集 合 体	燃 料	UO ₂ +PuO ₂		—
	平均富化度 ²³⁵ U+Pu f	2.2/3.1wt%	1.36/1.36wt%	—
	平均燃焼度	20,000/30,000 MWd/t	8,000/9,000 MWd/t	燃焼度向上による燃料サイクルコスト低減
	燃 料 棒 本 数	36本	28本	—
	燃料全装荷量	95t	34t	—
	制 御 棒 本 数	93本	49本	本数48%節減
制 御 棒 材 質		平坦化・安全停止用B ₄ C 出力調整用SUS	B ₄ C	—
後 備 停 止 系		重水中に急速ボイズン注入	重水ダンプ	ダンプスペース削除によるカランドリアタンク径縮小
冷 却 材 再循環系	ル ー プ 数	2	2	—
	再 循 環 流 量	22,600t/h	7,600t/h	流量19%節減
	運 転 圧 力 (蒸気ドラム)	69atg	68atg	—
	運 転 温 度 (蒸気ドラム)	284.5℃	283.5℃	—
	主 蒸 気 流 量	3,300t/h	910t/h	—
タービン 発 電 機	形 式	くし形3ケーシング4流排気非再熱復水タービン		
	回 転 数	1,500rpm又は1,800rpm	3,600rpm	—
格納容器	種 類	鋼製ハイブリッド型	上下部半楕円鏡円筒形鋼板製	—
	寸 法 (内径×高さ)	45m×67.7m	36m×64m	—

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所原子力事業部

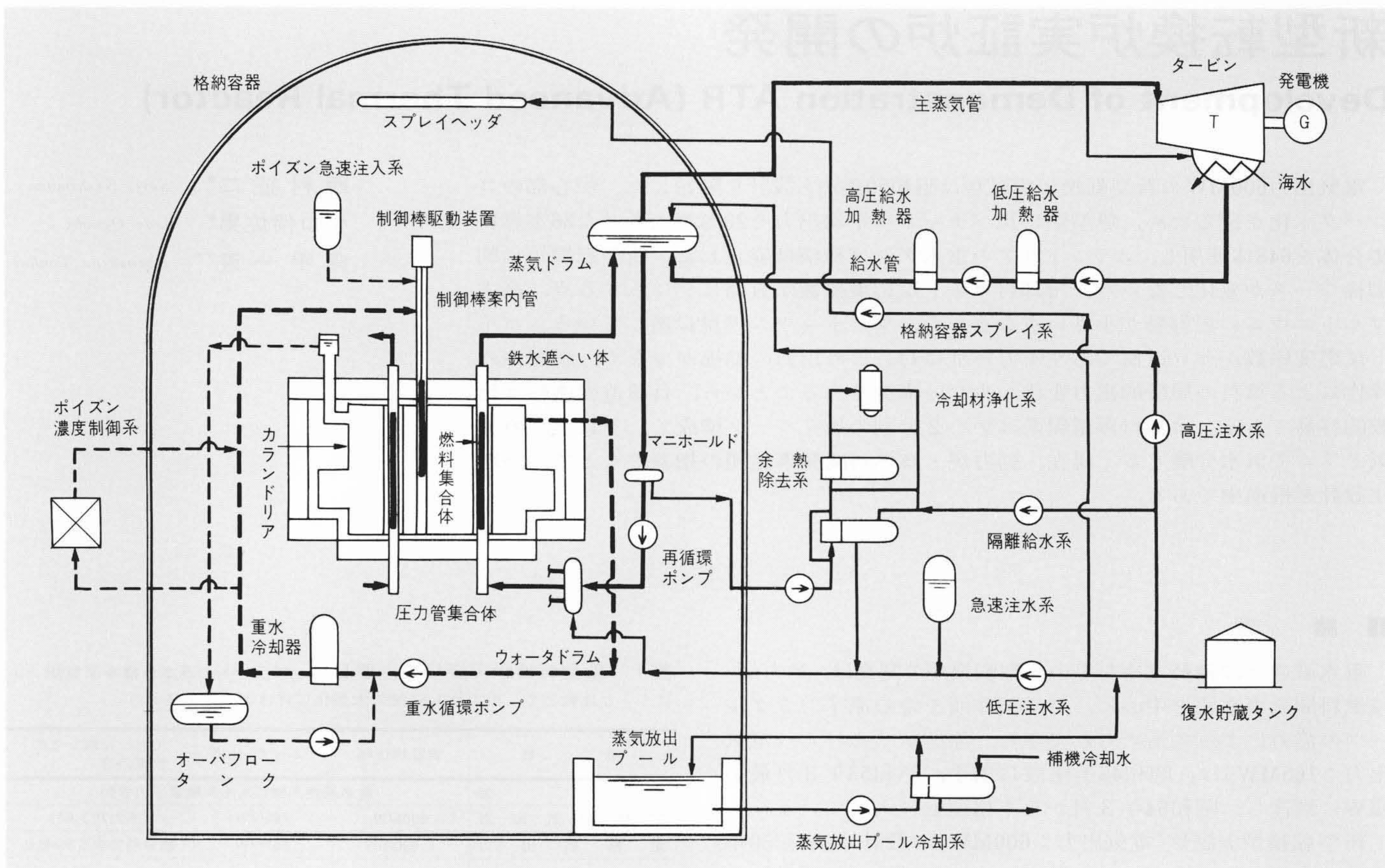


図1 新型転換炉実証炉の系統構成 原子炉本体と一次冷却材系、重水系、工学的安全施設などの系統概要である。図中の破線は重水の系統を示す。

重水温度一定保持のため重水をカランドリアから抜き出し、冷却後制御棒案内管を通してカランドリアに戻す。重水の一部はカランドリアを満水状態に保つため、上部のオーバーフロー部からオーバーフロータンクに流下し、主循環ラインに戻される。制御棒スクラム機能のバックアップとしてボイジン急速注入系を設けており、ボイジンにはほう酸を使用している。非常用炉心冷却系としては、高圧注水系、低圧注水系、急速注水系を設け、そのほか安全系として、隔離給水系、余熱除去系、蒸気放出プール冷却系、格納容器スプレイ系を設ける。これらは独立2系統構成とし、多重性をもたせている。

3 原子炉構造

原子炉本体は、図2に示すように、減速材である重水を保有するカランドリア、その周囲を取り巻いて放射線及び熱を遮へいする鉄水遮へい体、燃料集合体及び原子炉一次冷却材を内部に収納し、カランドリア及び鉄水遮へい体を上下に貫通する圧力管集合体から構成されている。

圧力管集合体は、核特性などの要求上から選定したジルコニウム-ニオブ合金製の炉心部圧力管と、その上下に接続するステンレス鋼製の上部及び下部延長管から成っており、両者はロールドジョイント接合法によって接続されている。各々の延長管には一次冷却材の入口及び出口管が接続される。カランドリアは、減速材を保持する耐圧部となるステンレス鋼製カランドリアタンク、及び前記圧力管の周囲をさや状に取り巻くジルカロイ-2製カランドリア管と、非耐圧部材の炉内制御棒案内管、防振板などから構成される。「ふげん」では原子炉の停止機能としての重水ダンプを行なうダンプスペースをカランドリアタンク内円周部にもっていたが、実証炉

ではこれを廃止し、重水ダンプ機能をボイジン急速注入系の作動に置き換え、原子炉本体の小型化を図っている。鉄水遮へい体は圧力管集合体などを支持する機能をもっており、その下部中央部を支持コンクリート内に落とし込む構造にして、

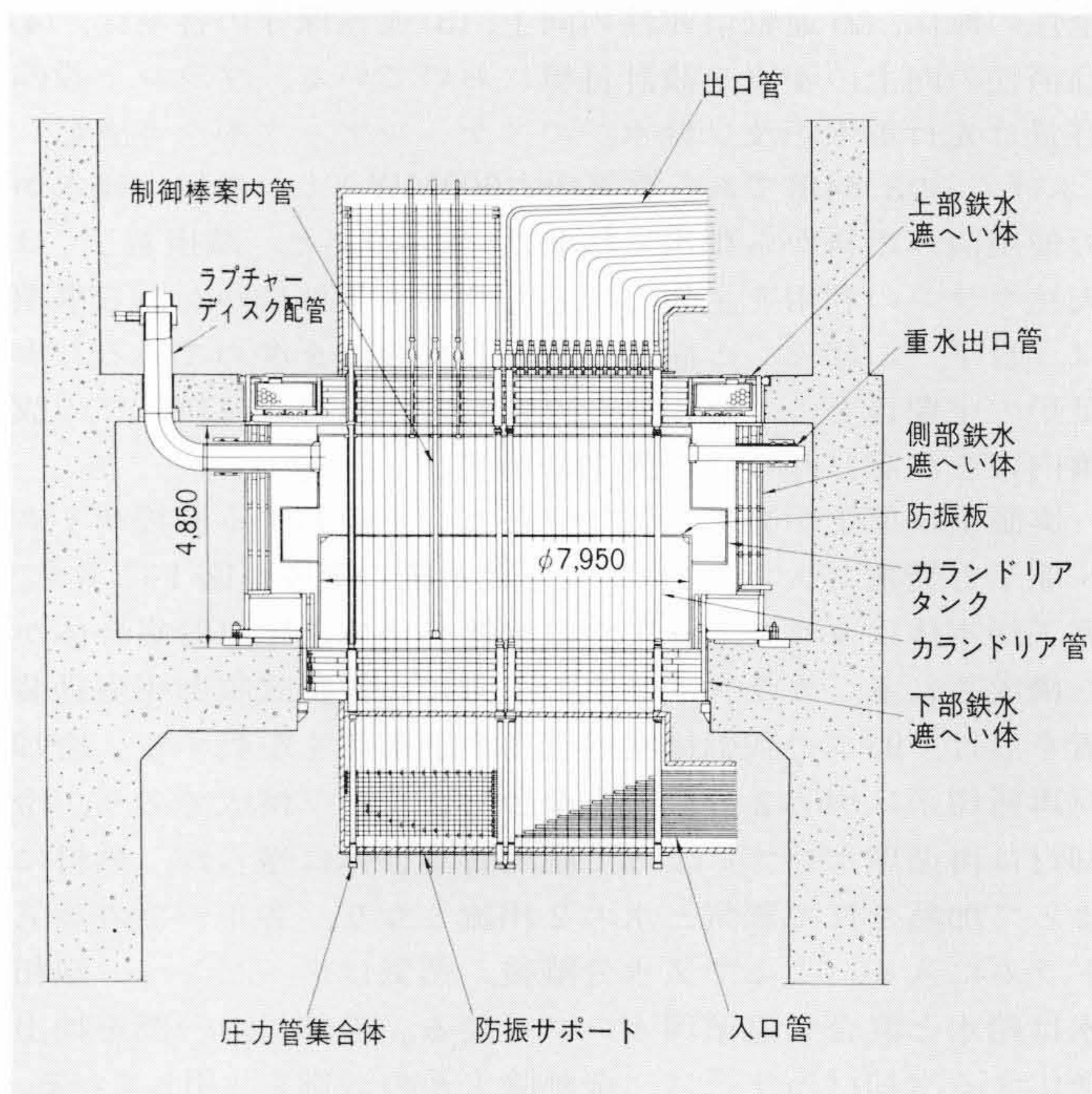


図2 原子炉本体構造図 原子炉本体の縦断面を示す。下部鉄水遮へい体を支持コンクリート内に落とし込むことによって、圧力管集合体下部が長くなることを抑えている。

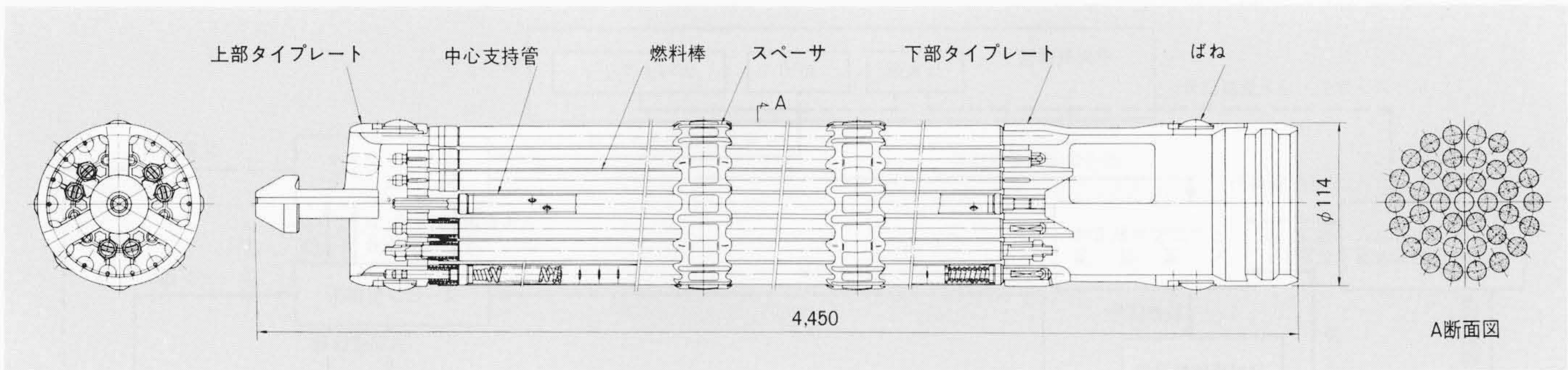


図3 燃料集合体組立図
 燃料集合体は、36本の燃料棒を中心支持管・上下のタイプレート・12個のスペーサが保持することによって構成され、圧力管内に装荷される。

原子炉本体、燃料交換機などの小型化に結びつけている。
 燃料集合体は、図3に示すように、36本の燃料棒と1本の中心支持管、その他から構成され、同心円状の3層に燃料棒が配置されている。各燃料棒は、上下のタイプレート及び12個のスペーサによってその間隔が保持され、上下タイプレート側面円周上には、燃料の振動減衰及び装荷時のスムーズ化を図るためのばねが設けられている。燃料棒は、12.4mm径のプルトニウム・ウラン混合酸化物($\text{PuO}_2\text{-UO}_2$)焼結ペレットがジルカロイ-2製被覆管内に設置されており、上部及び下部にペレットから放出された核分裂生成物を収納するプレナムが設けられている。「ふげん」の28本からペレット径を2mm細くし36本構成とした燃料集合体は、チャンネル平均出力を20%増大した設計としており、圧力管本数の低減を図っている。

4 核熱水力特性

新型転換炉は次の理由によってプルトニウムバーナに適した特性をもっている。すなわち、(1)制御棒を燃料から離れた重水中に挿入して制御する構造上、制御棒挿入の重水領域の中性子スペクトルはほとんど硬化せず、制御棒ワースは減少しないこと、(2)プルトニウム富化により冷却材ボイド反応度係数は負側にシフトし、制御特性は望ましい方向にゆくこと、(3)使用するプルトニウムの同位体組成比がばらついても、その反応度変化は重水中のほう酸濃度によって容易に調整できること、(4)高次プルトニウムを利用しても、中性子スペクト

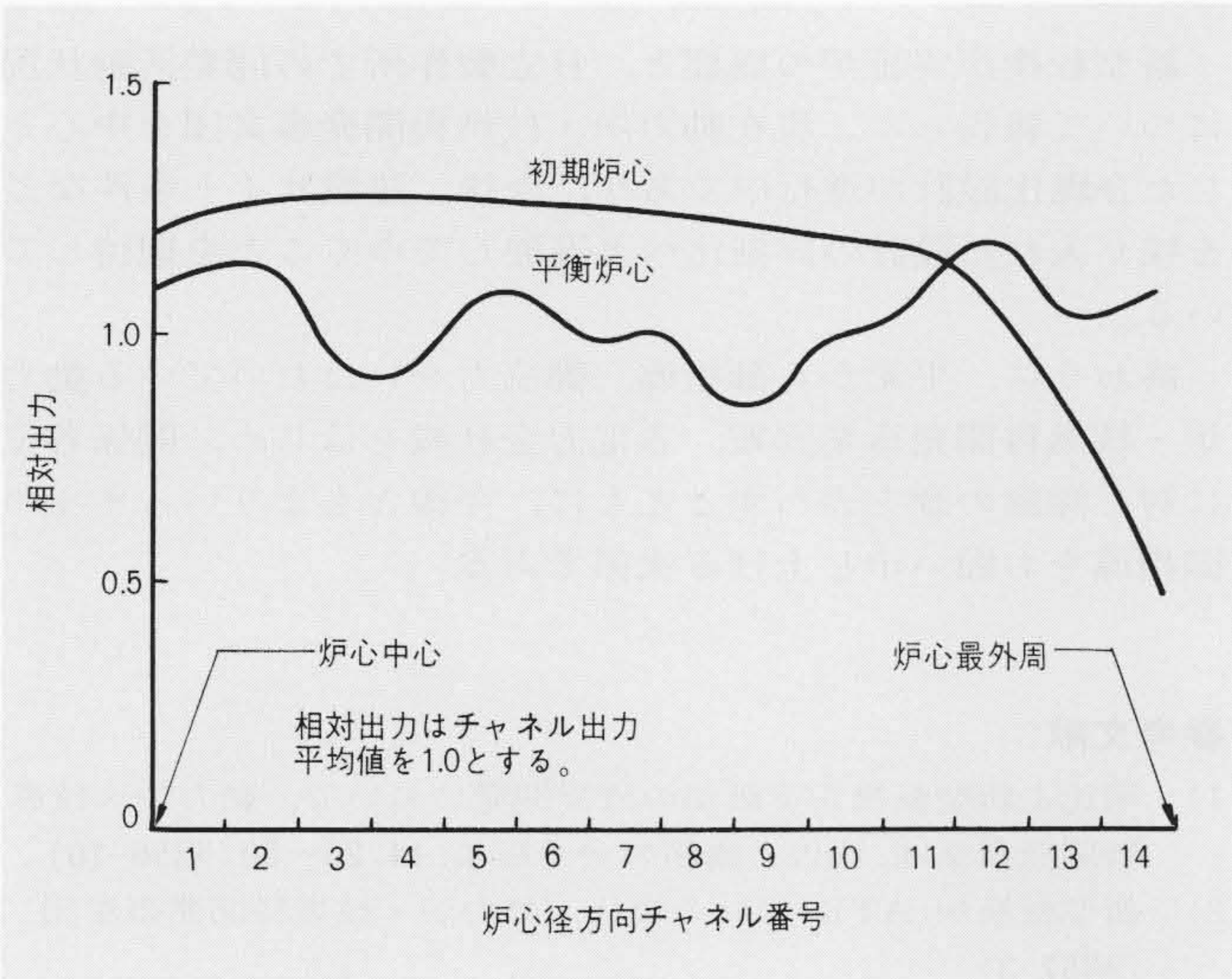


図4 実証炉炉心サイクル初期の径方向出力分布
 初期炉心、平衡炉心とも十分に平坦化されている。初期炉心では重水中のほう酸の濃度が高いため、反射体の効果が小さく、周辺部の出力が低下している。

表2 各反応度制御系の反応度補償分担
 出力運転中に使用する出力調整用制御棒は、中性子吸収の弱いステンレス鋼管を使用している。

反応度補償		反応度制御系	出力平坦化 安全停止用 制御棒	ポイズン 濃度制御系	出力調整用 制御棒
起 動 ・ 停 止	冷 温 停 止→冷 温 臨 界		○	—	—
	冷 温 臨 界→高 温 待 機		○	—	—
	高 温 待 機→約 50 % 出 力		○	○	—
	約 50 % 出 力→定 格 出 力		—	○	○
	出力上昇後キセノン反応度補償		—	○	—
	定 格 出 力→高 温 停 止		○	—	—
	高 温 停 止→冷 温 停 止		—	○	—
出 力 制 御	冷温停止後キセノン消滅反応度補償		—	○	—
	出 力 変 更		—	○	○
	出 力 レ ベ ル 微 調 整		—	—	○
	領 域 出 力 制 御		—	—	○
出 力 分 布 平 坦 化	燃 焼 反 応 度 補 償		—	○	—
			○	—	—

ルが軟らかいため ^{240}Pu などの非核分裂性プルトニウムによる反応度低下の悪影響が小さいことなどの理由による。

また、減速材が冷却材と分離されているため、冷却材ボイド反応度係数は $(-0.5 \sim +0.5) \times 10^{-4} \frac{\Delta K}{K} / \%$ ボイド程度のゼロ近傍の値を示し、冷却材の沸騰伝熱流動が炉の核特性に影響を与えないため運転時の出力動揺が少なく、ボイド分布による出力分布のひずみも無視できるほど小さい。炉心の出力分布の平坦化は、燃料集合体のプルトニウム含有率を炉心内側領域で低、外側領域で高とする径方向2領域炉心とすることによって達成され、出力平坦化用制御棒を挿入する必要性はほとんどない。図4に炉心径方向出力分布を示す。

新型転換炉実証炉では、比較的ゆっくりした大きな反応度変化はポイズン濃度制御系による重水中のほう酸濃度調整で制御可能であるため、出力平坦化安全停止用制御棒による反応度制御は、表2に示すように起動時での冷温停止時から約50%出力までの反応度制御と、停止時での定格出力から高温停止までの反応度制御を分担すればよい。出力平坦化安全停止用制御棒挿入による高温状態での炉停止余裕は、ワンロードスタック時で約3%ΔKである。

実証炉の燃料取替計画は12箇月連続運転サイクルを基本とし、約15箇月ごとに $\frac{1}{4}$ ずつ燃料を取り替える。平衡炉心の取出し燃料の平均燃焼度は約30,000MWd/tである。

熱設計に関する主要な設計基準は、定格運転時で最大線出力密度が49.2kW/m以下であること、及び最小限界出力比が1.24以上であることであり、この基準は出力分布平坦化によって満足される。ここで、CPR(Critical Power Ratio)解析には動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターの14MW熱

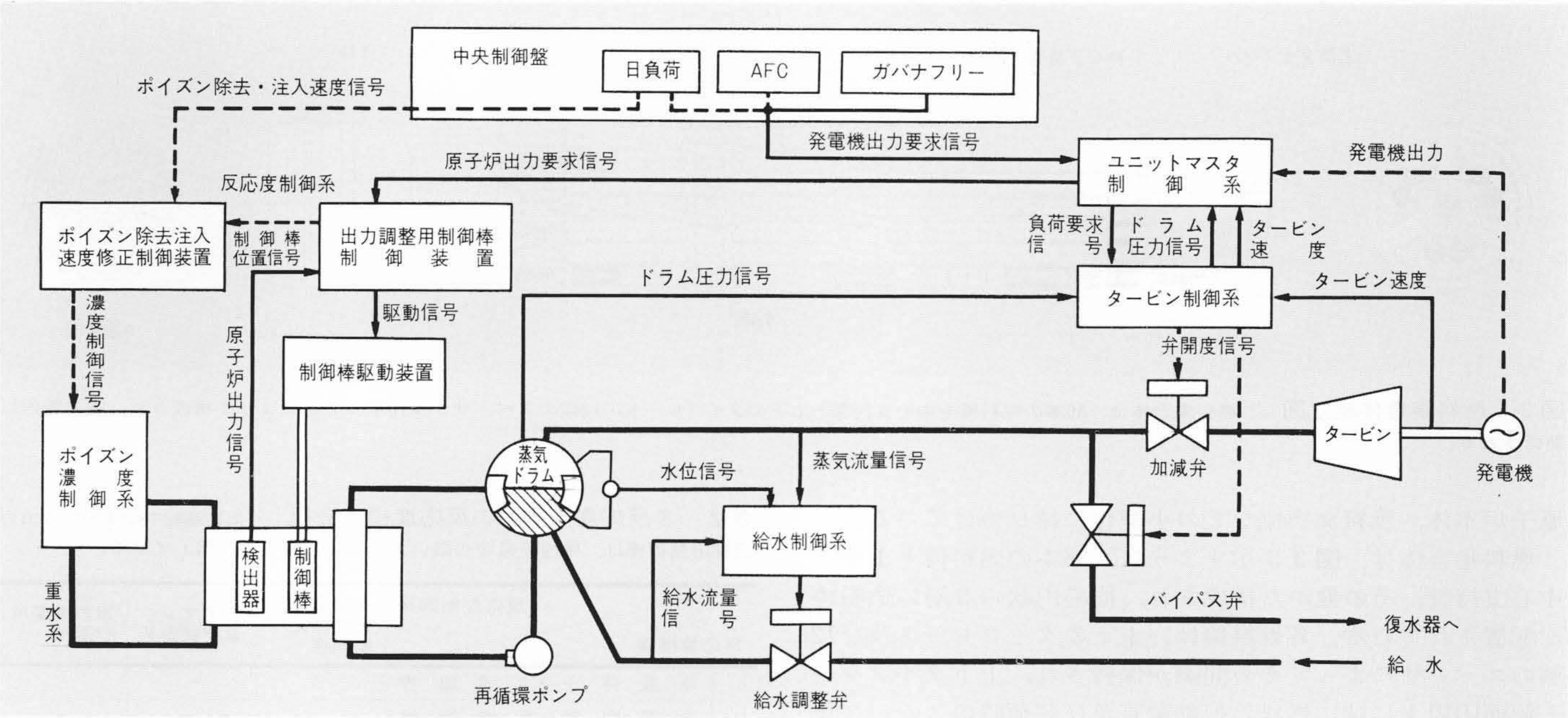


図5 負荷追従運転時の制御方法 ユニットマスタ制御系が各制御系を統括制御し、安定性・即応性を向上させている。実線及び破線は制御信号の流れを示し、実線は特にガバナフリー運転時の制御信号の流れを示している。

ループによって作成したベストフィットCHF(Critical Heat Flux)相関式を使用している。

5 出力制御特性

新型転換炉実証炉では、下記特性を生かして表3に示す負荷追従運転が可能である。

表3 新型転換炉実証炉の負荷追従能力 日負荷追従運転からガバナフリー運転まで行なえるのが特長である。

運転モード	運転出力範囲	負 荷 追 従 パ タ ー ン
日負荷追従	100%⇄50%	
A F C	70~100%	
	50~100%	
ガバナフリー	50~100%	
	50~100%	(負荷急増時)

注：略語説明 AFC(Automatic Frequency Control)

- (1) 冷却材ボイド反応度係数がゼロ近傍であり、圧力外乱に対する原子炉出力の動揺が少ない。
- (2) 制御棒を燃料から離れた重水中で操作するため、その際の燃料の局所的出力変化が小さく、燃料へ与える影響が少ない。
- (3) 蒸気ドラムをもつ構造のため、蒸気流量変動に対する圧力変動・水位変動が小さい。
- (4) 制御棒及びポイズン濃度制御系による出力制御が可能である。

日負荷追従運転は、ポイズン濃度制御を主体とし、出力調整棒制御を補助制御として行なう。AFC(Automatic Frequency Control)運転及びガバナフリー運転は出力調整棒制御によって行なう。AFC運転時には、系統からの負荷要求に応じ原子炉出力を変化させ、ガバナフリー運転時には、蒸気ドラム圧力を一定に保つため原子炉出力制御を行なう。図5に主要な負荷追従運転制御系を示す。

6 結 言

新型転換炉実証炉の概要と、日立製作所での開発活動状況について報告した。現在動力炉・核燃料開発事業団を中心とした合理化設計が進行中であり、今後、建設サイト条件などを採り入れた設計の詳細化へと進展してゆくことを期待している。

終わりに、平素から御指導、御協力をいただいている動力炉・核燃料開発事業団殿、各電力会社殿をはじめ、関係各位に対し深謝の意を表わすとともに、今後ともよりいっそうの御指導をお願い申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 明比：新型転換炉実証炉の研究開発について、動力炉・核燃料開発事業団、報告と講演の会予稿集、14、25~50(昭56-10)
- 2) 新型転換炉(ATR)設計の現状、動力炉・核燃料開発事業団(昭57-3)
- 3) 小林、外：新型転換炉「ふげん」の設計用ソフトウェアの検証と圧力管型本体設備の信頼性・保守性の向上、日立評論、62、10、725~730(昭55-10)