

## ■ 展 望 ■

## 新型転換炉開発の現状と展望

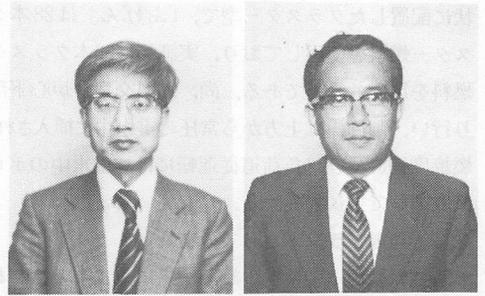
FUGEN-HWR Development Program Present  
Status and Future Outlook

澤 井 定\*

Sadamu Sawai

小 堀 哲 雄\*\*

Tetsuo Kobori



## 1 はじめに

昭和42年10月以来、関係各界の協力の下に動力炉・核燃料開発事業団（動燃）が開発を進めてきた新型転換炉原型炉「ふげん」は、昭和54年3月20日に本格運転を開始した。以後、順調に稼働を続け、昭和55年11月17日に計画停止する迄約17億kwhを発電したが、同計画停止期間中に冷却系のステンレス鋼配管の一部に応力腐食割れが発見された。現在、その対策を第2回定期検査とともに実施しており、昭和56年10月に再起動の予定である。

昭和48年度より新型転換炉評価研究として開始された実証炉の開発は、「ふげん」の経験と実績及び開発の成果を反映しながら実証炉の設計を進めるとともに、炉心特性、安全性、燃料集合体等に関する実証試験等を行っている。

原子力委員会は新型転換炉実証炉の開発に関する今後の施策の確立に資するため、昭和55年1月29日に“新型転換炉実証炉評価検討専門部会”を設置することに決定し、同専門部会は昭和55年3月25日第1回の審議を行った。同専門部会の下に“総括分科会”及び“技術分科会”が組織され、前者は、新型転換炉実用化の意義、経済性等について検討・評価し、後者は、実証炉の設計を中心に新型転換炉に関する技術評価を行った。そして、同専門部会は、昭和56年8月始め、

\* 動力炉・核燃料開発事業団新型転換炉開発本部副本部長  
〒107 東京都港区赤坂1-9-13

\*\* 動力炉・核燃料開発事業団新型転換炉開発本部主任研究員

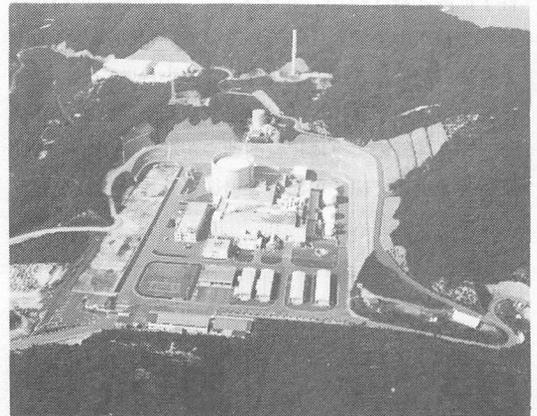


図-1 新型転換炉ふげん発電所

報告書を原子力委員会に提出した。

一方、電気事業者と動燃は、“ATR合同委員会”を設置して、昭和54年2月以来、実証炉の設計と「ふげん」の実績について審議・検討し、動燃はその結果を実証炉の設計に反映している。

## 2 新型転換炉の特徴

新型転換炉は、圧力管型重水減速沸騰軽水冷却炉で、沸騰軽水炉（BWR）と同様に原子炉で発生した蒸気をそのままタービンに導いて発電機を回すので、発電所の全体構成は、原子炉本体、重水炉特有の設備を除けばBWRに類似している。

## 2.1 原子炉本体の構造（図-2）

原子炉の炉心を収容する容器はカランドリアと呼ばれ、練炭状の形をした円筒容器で、その中に減速材の重水が満たされている。練炭状のカランドリアの孔には Zry-2 合金製のカランドリア管が上下の管板に拡管法により接合されている。各カランドリア管内には、Zr-Nb 合金製の圧力管が挿入され、圧力管には燃料集合体が装荷される。燃料集合体は、燃料棒を同心円状に配置したクラスター型で、「ふげん」は28本クラスター燃料を使用しており、実証炉は36本クラスター燃料を用いる設計である。尚、燃料交換は炉心下部より行い、制御棒は上方から常圧の重水中に挿入される。燃焼度補償及び日負荷追従運転には、重水中のボロン濃度調整で主に対処する。

2.2 発電プラントとしての特性

新型転換炉は中性子の減速が主に重水中で行われ、且つ、冷却材ボイド係数を略0に設計されるので、外乱に対する原子炉出力の動揺が小さい。また、重水の中性子拡散距離は約100 cmと大きく、制御棒は燃料から離れて重水中に挿入されているので、制御棒の移動により燃料が受ける出力変化は比較的小さい。

従って、新型転換炉は自動周波数調整運転及びガバナリーフリ運転のように比較的速やかな負荷変動に対し、制御棒を用いて原子炉出力を追従させ易い特長をもっている。

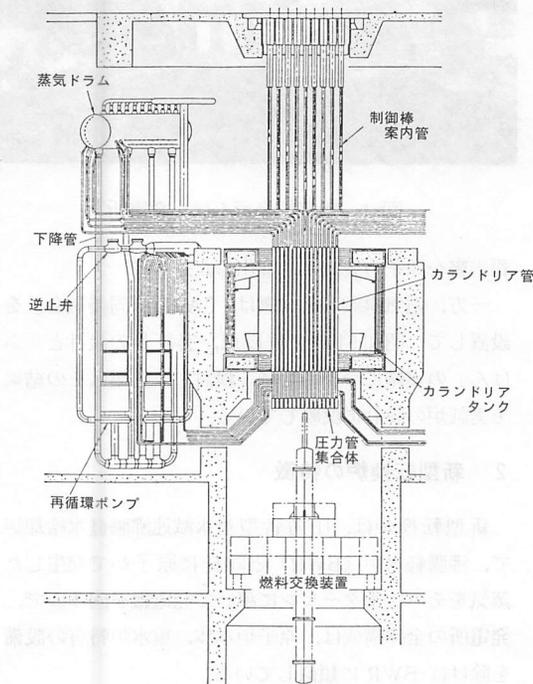


図-2 「ふげん」断面図

2.3 核燃料利用上の特徴 \* -4, 5

新型転換炉は核燃料利用において、次の特徴をもっている。

- (1) Puは冷却材ボイド反応度を負側に下げ、炉の安定性と安全性の向上に寄与する。
- (2) Pu 富化U燃料 (Pu 燃料) を利用する場合も濃縮U燃料を利用する場合も制御棒効果は余り変わらない。
- (3) Pu を利用する場合、核分裂性Pu<sub>f</sub>と<sup>235</sup>Uの和を一定にすればよい。また、高次Puを利用しても、それにより必要となるPu<sub>f</sub>富化度の増加は比較的小さい(図-3)。
- (4) 燃料集合体は燃料棒が同心リング状に配列されており、熱中性子は周囲の重水中から燃料集合体に入ってくるので、外層リングの燃料棒とそれ以外の燃料棒のPu 富化度またはU濃縮度を調整するだけで、燃料集合体の出力分布を平坦化できる。

3 新型転換炉の役割 \* -4, 5

わが国の原子力発電は、軽水炉—高速増殖炉を基本にしており、当面軽水炉が主流を占めている。一方、エネルギー源の大部分を外国に頼らなければならないわが国にとってエネルギー資源の安定供給と自立性の向上は非常に重要である。

このような観点と、上述の新型転換炉の特徴を考え、わが国における新型転換炉の役割は次のように位置づけられている。

“軽水炉の使用済燃料を再処理して抽出されるPuと減損U(状況に応じて濃縮U)を利用して天然U所要量とU濃縮量を節減するとともにPu蓄積量を調整し、

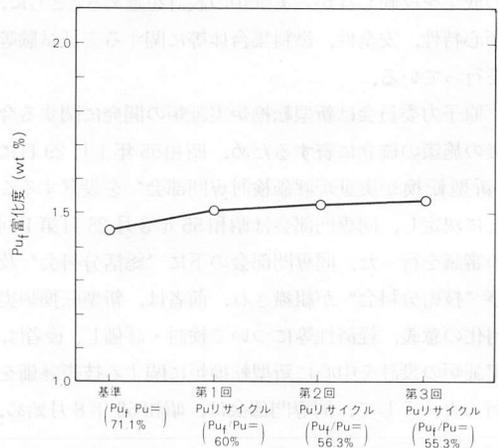


図-3 同一燃焼度 (28,700 MWD/T) を得るための Pu<sub>f</sub> 富化度

わが国のエネルギーセキュリティに寄与する。”尚, 高速増殖炉が実用化された場合は、濃縮Uを使用し、使用済燃料から抽出されたPuを高速増殖炉に供給する。

この考えに立った新型転換炉と軽水炉の組合せ方及び新型転換炉に使用する燃料の流れは図-4に示す通りである。このように新型転換炉を利用して天然U所要量とU濃縮所要量を節減する効果は、高速増殖炉の実用化が遅れる程、また、その実用化初期における投入速度が低い程、大きい。一例として

高速増殖炉の実用化が2010年、新型転換炉の導入上限を新設の25%とした場合、軽水炉—高速増殖炉の場合と比較して、2025年迄の天然U所要量とU濃縮所要量は各々約8%及び約11%節減でき、Pu蓄積量は約150t節減できると見込まれている。

また、新型転換炉にPuを利用することは、高速増殖炉実用化の本格的Pu利用時代に備え、Pu利用技術の確立に資すると評価されている。

#### 4 「ふげん」の実績と経験 \* -1~4

##### 4.1 開発の概要

「ふげん」の開発は、設計・製作・建設・運転を軸に各分野で研究開発を進め、相互に反映し合ってきた。

大洗工学センターに重水臨界実験装置、14 MW熱ループ、コンポーネントテストループ及び安全性試験装置を昭和44年度に設置し、炉心特性、燃料集合体と圧力管集合体の耐久性、安全性等について実規模試験を行い、それらの性能実証、改良等を進めた。一方、原子炉本体、燃料集合体、圧力管集合体、燃料交換機等、新型転換炉特有の重要機器については、主にメーカーが設計・試作・試験を行い、改良を加えて実機を製作してきた。

「ふげん」の開発は、現在、運転コード、供用期間中検査機器等、運転保守に関する事項と燃料に重点をおいて進めている。

##### 4.2 「ふげん」の建設 \* -1, 3

「ふげん」は昭和45年12月に着工し、昭和54年3月20日に運開を達成した。建設に当っては、日本原子力発電(株)から軽水炉の経験に基いた提言を受け、電源開発(株)は「ふげん」の施工管理を行った。メーカーは日立製作所が主務会社となり、5グループが分担して製作・建設した。この間、Pu燃料を初期炉心に96体装荷して原子炉冷却系を4ループから2ループに削減する、燃料集合体のスペーサの配置を図-5に示すように中心部を密にしてバーニアアウト限界を上げる等の対策

を施してきた。

総合機能試験に先立ち、メーカーと動燃は取合条件の相互確認、設計内容の確認、及び現地点検を柱に総点検を行い、必要な対策を施し円滑な起動試験の遂行と良好な定格運転の達成に備えた。

#### 4.3 起動試験と定格運転の実績

##### (1) 稼働実績

「ふげん」は図-6にみるように、昭和55年11月17日に計画停止を行うまで、順調に稼動し、昭和54年度の稼働率は72.4%であった。この計画停止中

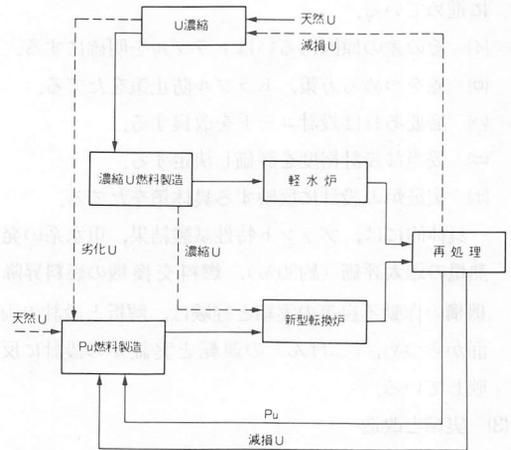


図-4 新型転換炉に使用する燃料の流れ

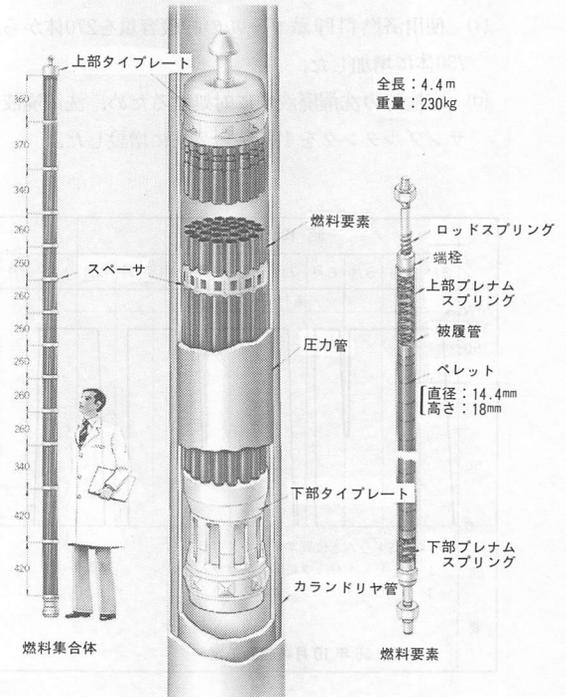


図-5 「ふげん」燃料

に冷却系のステンレス鋼 (SUS-304) 管に応力腐食割れ (SCC) が発見された。このため軽水炉の SCC 対策技術を基に、(イ) 配管材料を耐 SCC に優れた SUS-316L に変更する (ロ) 既存配管の残留応力改善処置をとる等の対策をとることとし、初年度は今回異常の認められた余熱除去系等の配管を取替えた。現在、昭和 56 年 10 月に再起動を予定しているが、昭和 55 年度の稼働率は 40.2% であった。

(2) 実績の評価法 \* -4

「ふげん」の実績は設計値等と比較して次のように進めている。

- (イ) その差の原因あるいはトラブルを明確にする。
- (ロ) 差をつめる方策、トラブル防止策をたてる。
- (ハ) 必要あれば設計コードを改良する。
- (ニ) 妥当な設計裕度を評価し決定する。
- (ホ) 実証炉の設計に反映する具体策をたてる。

具体的には、プラント特性試験結果、重水系の発熱量の過大評価 (約 30%)、燃料交換機の燃料昇降機構の作動不良等の実績と経験は、解析と設計の両面からつめ、「ふげん」の運転と実証炉の設計に反映している。

(3) 実績と改造

「ふげん」の運転の実績と経験等に基づいて若干の改造を行った。その主な事項は次のようである。

- (イ) 使用済燃料貯蔵プールの貯蔵容量を 270 体から 730 体に増加した。
- (ロ) 定検時の洗濯廃液増に対処するため、洗濯廃液サンプルタンクを 1 基から 2 基に増設した。

- (ハ) 起動時に冷却材の脱気が行えるようにした。
- (ニ) 給水系から原子炉冷却系にクラッドの持込量を低減するため、復水脱塩器 4 基に通水している。
- (ホ) 保安作業と被曝を低減するためオイルスナバーをメカニカルスナバーに交換した。(図-7) 尚、新型転換炉は熱中性子束が軽水炉より高いので、中性子検出物質として <sup>234</sup>U と <sup>235</sup>U の比を 3 : 1 にした長寿命型中性子検出器を開発し、「ふげん」の使用実績 (図-8) から普通型の 4 倍の寿命があることを確めた。

(4) 今後の留意事項

「ふげん」を今後さらに良好な稼働率で運転して新型転換炉の信頼性を実証し、その実績を実証炉に反映させるため、次の点に留意して開発と運転を進める。

- (イ) 適確な SCC 対策
- (ロ) クラッドの低減化
- (ハ) 重水の水質管理と劣化重水処理
- (ニ) 供用期間中検査機器を開発し、定検期間の短縮と被曝低減を図る。
- (ホ) 「ふげん」の使用済燃料及び特殊燃料に収めた圧力管材料監視試験片 \* -5 の照射後試験と評価

5 Pu 燃料の開発

新型転換炉は当面 Pu 利用を主体にしているの、Pu 燃料の開発に力を入れている。「ふげん」には昭和 55 年 11 月迄に Pu 燃料集合体が合計 124 体装荷され、最高燃焼度は 9700 MWd/t に達しているが、破損の徴

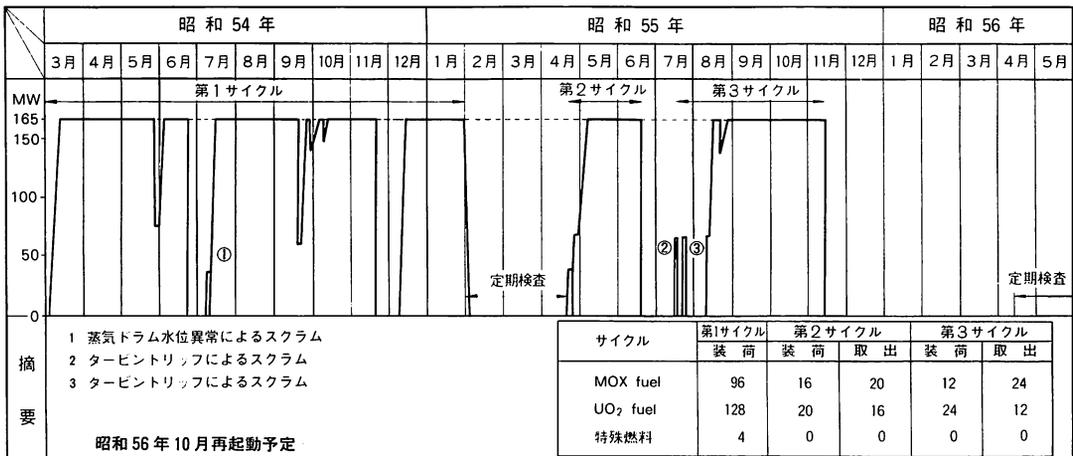


図-6 「ふげん」運転実績

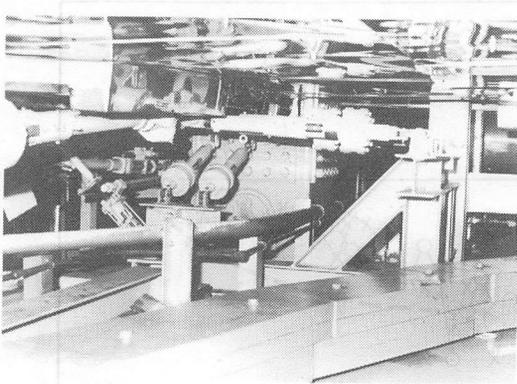


図-7 メカニカルスナツバーの取付

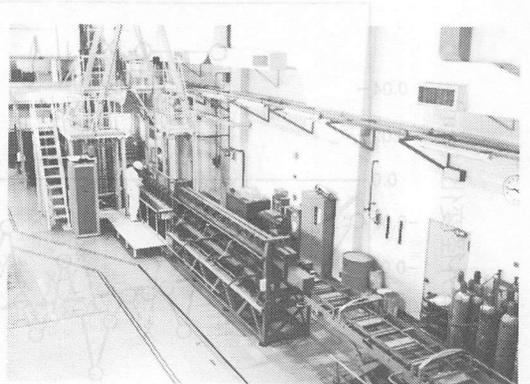


図-9 Pu 燃料集合体自動組立装置

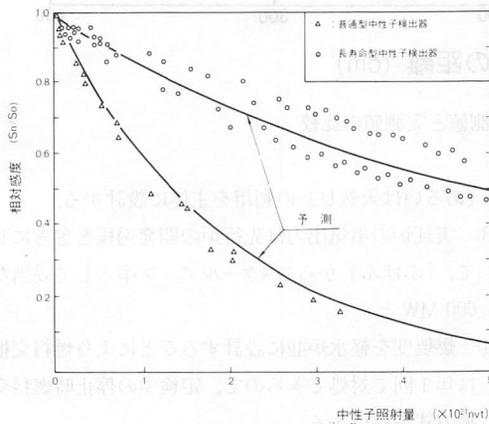


図-8 中性子検出器の特性

候は認められていない。

(1) 製造法の開発と実績

Pu 燃料の製造は、昭和 40 年に開始され、照射試験等の製造実績を基に重水臨界実験用として約 3000 本の燃料棒を製造した。次いで東海事業所の ATR ライン (10 t/y) で「ふげん」の燃料集合体を製造しており、昭和 56 年春迄に 168 体製造した。

「ふげん」の燃料製造のため、工程の簡素化、高品質燃料の製造及び自動化を図って (イ) 乾式無造粒法によるペレット製造、(ロ) ペレットスタックの自動調整装置、燃料集合体自動組立装置 (図-9) 等を開発し設置した。また、品質管理に関する検査法もその自動化を含め開発に意を注いだ。

「ふげん」の Pu 燃料集合体の製造実績及びこれらの開発を基に、実証炉の Pu 燃料製造工場の設計を進めている。

(2) Pu 燃料の照射実績

Pu 燃料の照射試験は Halden, GETR, Saxton 等で行ったが、破損の経験はなく、ペレット最高燃

焼度 38000 MWd/t の実績がある。「ふげん」の Pu 燃料集合体は SGHWR で照射試験を行い、照射後試験結果は、図-10 に示すように設計コードによる解析と比較し、設計コードの実証と改良及び燃料の健全性評価の基にしている。<sup>\*-6</sup>

Pu 燃料の照射実績は、U 燃料の照射実績と比較して評価している。「ふげん」の使用済燃料を外観検査及び寸法検査した結果によると、Pu 燃料集合体と U 燃料集合体の変形量及びクラッド付着については、有意の差は認められていない。今後、Pu 燃料集合体について各種の照射後試験を 12,000 MWd/t、17,000 MWd/t、20,000 MWd/t と段階毎に行い、高燃焼度 Pu 燃料集合体の設計コードの改良と実証及び燃料健全性の実証を進める計画である。

6 実証炉の開発

6.1 開発の現状と実証炉の評価検討

昭和 48 年度に新型転換炉評価研究が認可され、実証炉の開発が実質的に開始された。「ふげん」の設計・製作・建設・運転の実績と経験、諸開発の成果を基に、軽水炉の経験を反映しつつ実証炉の設計を進め、昭和 55 年秋に調整設計 (プラント基本設計) を完了した。これと平行して、炉心性能、燃料集合体、安全性、炉本体等に関する実証試験が大洗工学センターとメーカーで進められている。

原子力委員会が設置した「新型転換炉実証炉評価検討専門部会」は、新型転換炉に関する評価検討を次の事項について行った。

- (イ) 新型転換炉実用化の意義
- (ロ) 新型転換炉の技術評価
- (ハ) 新型転換炉の経済性評価

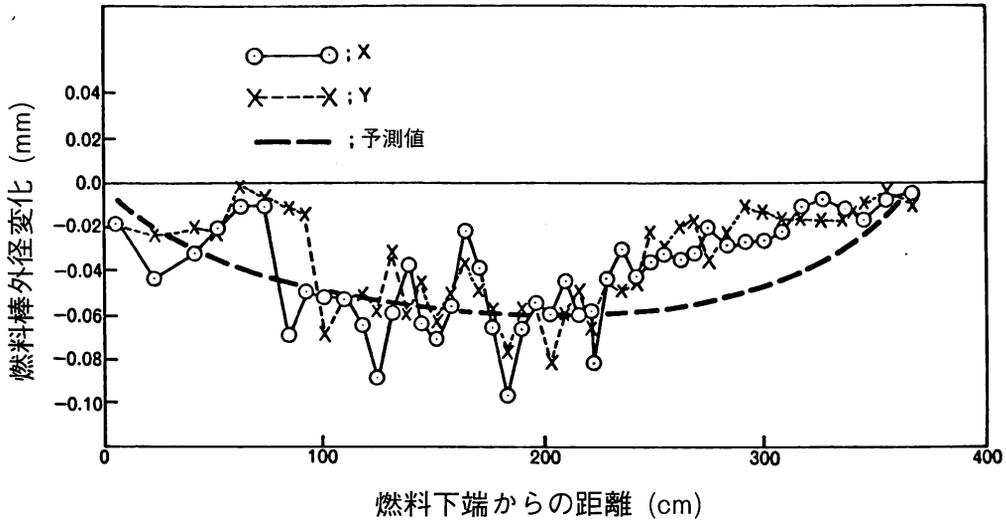


図-10 照射済外層燃料棒外径変化の予測値と実測値の比較

#### (二) その他必要事項

評価検討に当っては、同専門部会の下に技術分科会と総括分科会が組織され、前者は(向)を、後者はそれ以外を審議することとした。技術分科会は昭和56年3月10日に、総括分科会は3月20日に報告書をまとめた。専門部会はこれらの報告書を総合評価して、報告書を同年7月20日にとりまとめ、8月始め原子力委員会に提出した。

一方、電気事業者と動燃が設置した「ATR合同委員会」は、「ふげん」の実績、実証炉の設計について昭和54年2月以来検討・審議を行ってきた。実証炉の設計については「安全性」「運転信頼性」「運転保守性」及び「経済性」の観点から検討・審議し、動燃はその結果を実証炉の設計に反映している。

動燃は、「新型転換炉実証炉評価検討専門部会」の報告書、ATR合同委員会における審議、実証試験の成果等を反映して、実証炉設計をとりまとめるため合理化設計を昭和56年秋に着手する。

#### 6.2 実証炉設計の基本的考え方

実証炉の設計は、「ふげん」の設計・建設・運転及び開発の実績を基に軽水炉の経験を取り入れ、技術的リスクの解決、設計の合理化などを行い併せて経済性の向上を図ることを基本的な考え方とした。設計上の主要事項についての考え方は次のようである。

- (1) 圧力管集合体、非常用炉心冷却系等重要なシステムについては「ふげん」の設計を踏襲する。
- (2) 軽水炉の使用済燃料から抽出されるPuと減損U

(あるいは天然U)の利用を主体に設計する。

- (3) 実証炉の電気出力は先行炉の開発過程を参考にして、「ふげん」からのスケールアップ率として妥当な600 MWとする。
- (4) 燃焼度を軽水炉並に設計することにより燃料交換は年1回で対処できるので、定検中の停止時燃料交換方式を採用する。
- (5) 将来の原子力発電の割合の増大に伴って必要となる負荷追従運転を考慮して設計する。

#### 6.3 実証炉の設計 (図-11)

「ふげん」と実証炉の主要な設計仕様の比較を表1に示すが、実証炉の設計は大型化に伴う改良、「ふげん」の実績と軽水炉の経験の反映及び設計の合理化を行っている。その主な事項は次のようである。

##### (1) 燃焼度の向上

燃料費と燃料集合体の年間取替数を低減するため核分裂性Puと<sup>235</sup>Uの和を2.7%として、平衡炉心で軽水炉と同程度の燃焼度27,000 MWd/tが得られる設計とした。

##### (2) チャンネル平均出力の増大

圧力管の本数を削減し炉心を小型化するため、燃料の富化度分布を調整して炉心の出力分布を平坦化し、チャンネル平均出力を「ふげん」より20%増大した。

燃料棒直径を「ふげん」の16.5 mmから14.5 mmへと細径化して、燃料集合体当りの燃料棒本数を28本から36本に変更して最大線出力密度を492 W/cm

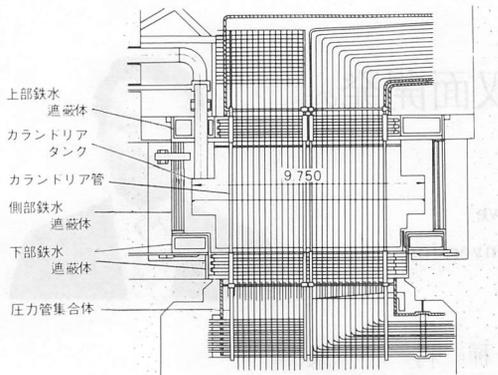


図-11 「実証炉」の原子炉本体

に低減した。

(3) 重水ダンプスペースの削除

「ふげん」では後備停止系として、カランドリアタンク内の重水をダンプする設計となっていたが、実証炉ではポイズン急速注入系を設置してダンプスペースを削除し、カランドリアタンクを小型化した。

(4) 鉄水遮蔽体の形状変更

水平方向入口管本数の増加に伴い、圧力管延長部が長くなるので、短尺化を図るため、下部鉄水遮蔽体の形状を変更した。(図-11)

(5) SCC 対策

原子炉冷却系の配管等は、SUS-304L及びSUS-316L相当の耐SCC材を使用するとともに、炉心滞留部および溶接箇所の低減、溶接施工法の改良を図った。

(6) 燃料交換機の合理化

燃料交換機内で燃料と遮蔽プラグを切離せる構造として短尺化を図るとともに、内部構造物が点検容易な構造にし、クラッド洗浄装置を設けた。また1回当たりの燃料取扱本数を倍増し昇降速度も増し、交換時間を短縮した。

7 おわりに

新型転換炉は軽水炉の使用済燃料を再処理して抽出されるPuと破損Uを利用して、わが国のエネルギーセキュリティの向上に寄与し、Pu利用技術の確立に資すると期待されている。

原子力委員会は、「新型転換炉実証炉評価検討専門部会」の報告書を受けて、今後、十分に検討・審議の上、実証炉の開発について重大な決定を下すことと思われる。

表1 「ふげん」と実証炉の設計主要目

		「ふげん」	実証炉
電気出力	MWe	165	600
熱出力	MWe	557	1,930
原子炉			
炉心直径	mm	4,053	6,951
炉心高さ	mm	3,700	3,700
チャンネル数		224	648
カランドリア径	mm	7,950	9,750
圧力管			
材質		Zr-Nb	Zr-Nb
内径	mm	117.8	117.8
燃料			
燃料棒本数/集合体		28	36
ペレット直径	mm	14.4	12.4
富化度 (PUF+ <sup>235</sup> U)		2.0	2.7
燃焼度 (平均)		17,000	27,000
被覆管肉厚	mm	0.88	0.90
被覆管材料		Zry-2	Zry-2
最高線出力密度	w/cm	574	492
制御棒			
B <sub>4</sub> C		49	76
ステンレス鋼		0	17
原子炉冷却系			
ループ数		2	2
再循環流量	t/h	7,600	22,600
蒸気流量	t/h	910	3,300
蒸気圧力	kg/cm <sup>2</sup> g	68	69

今後展開される新型転換炉の開発に対し、関係各界の暖い御援助と御協力をお願い申し上げる次第である。

参考文献

- \*-1 “動燃10年史”(昭53-12) P233~294
- \*-2 「ふげん」の開発実績と「実証炉」の設計, 動燃新型転換炉開発報告会(昭54~11)
- \*-3 澤井 定 “新型転換炉の開発” 日本機械学会誌, 81-712 (昭53-3) P230~235
- \*-4 澤井 定 “新型転換炉の開発” 電気学会誌100-5 (昭55-5) P360~365
- \*-5 “FUGEN-HWR” Nuclear Engineering Int. 24-289 (1979-8) P33~49
- \*-6 Y. Yokouchi, et al; “Irradiation Experiments of FUGEN PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> Fuel Assembly in WSGHWR” P-NCT 831-80-01, (1980-3)