ATR実証炉の炉心設計

Core Design for the Demonstration Advanced Thermal Reactor

若林利男*	Toshio Wakabayashi	笹川 勝***	Masaru Sasagawa
藤本幸生**	Kousei Fujimoto	金沢信博****	Nobuhiro Kanazawa
金戸邦和***	Kunikazu Kaneto	茂木俊彦****	Toshihiko Motegi



ATR実証炉炉心構成 ATR実証炉高性能炉心では,ガドリニア入り軸方向富化度多領域燃料の採用によって出力分布の平たん化を達成し,圧 力管集合体数(燃料集合体数)を32体低減した。

ATR (Advanced Thermal Reactor:新型転換 炉)では、ウラン資源を有効に利用する上で優れた炉 心特性を有している。この特性を踏まえ、安全性、 経済性をいっそう向上させた高性能炉心を開発し た。

この炉心では,改良燃料としてガドリニア入り軸 方向富化度多領域燃料を採用し,これにより,出力

616体と改良燃料採用前に比べ32体削減した。

また,軽水炉などの使用済燃料再処理によって取 り出される回収ウランにプルトニウムを富化した燃 料を用いる炉心の検討も行い,その成立の見通しを 得た。

一方,核設計手法は原型炉「ふげん」およびDCA (重水臨界実験装置)の実験データによって検証し,

11

分布を平たん化し, 圧力管本数(燃料集合体本数)を その妥当性を確認している。

* 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 工学博士 ** 電源開発株式会社 原子力部 *** 日立製作所 日立工場 **** 日立エンジニアリング株式会社

1 はじめに

ATR (Advanced Thermal Reactor:新型転換炉)実 証炉の炉心設計では,動力炉・核燃料開発事業団などが 進めている各種の研究開発成果を踏まえて,高性能化を 進めてきた。

このねらいは,ガドリニア入り軸方向富化度多領域燃料を採用することによって出力分布の平たん化を図り, 燃料集合体数を低減するとともに反応度フィードバック 特性などを改善し,いっそうの安全性向上を図ることで ある。

ここでは、ATR炉心の特徴、実証炉高性能炉心とその 特性、および実証炉設計手法の検証結果について述べる。

2 ATR炉心の一般的特徴

ATRは,前ページの図に示すように重水減速沸騰軽水



冷却圧力管型炉であり,ほぼ大気圧の重水減速材を満た したカランドリアタンク内を貫通する圧力管内に, MOX燃料(ウランとプルトニウムの混合酸化物燃料)を 装荷した炉心構成となっている。冷却材である軽水は, 圧力管内を炉心下部から上部に向かって流れる。燃料集 合体の概略構造をATR実証炉を例にとって図1に示す。 同図に示すように,ATRの燃料集合体は,同心円上に内 層,中間層および外層の3層に配列された36本の燃料要 素から構成される。

ATRの炉心特性は,重水減速炉としての特徴から燃料 経済性に優れるとともに,燃料選択の自由度が高いとい った次のような特徴を持っている。

(1) 優れた燃料経済性

12

(a) 重水は軽水に比べ熱中性子吸収が約<u>600</u>であり,重 水減速材を用いることによって軽水減速材を用いる炉 心と比べて比較的低いプルトニウム富化度,ウラン濃 縮度で所定の燃焼度を達成できる。

(b) 上記(a)に示した特性は,ウラン濃縮作業量を低減,あるいは国内の使用済燃料の再処理によって得られる回収ウラン,およびプルトニウムの単位重量当たりの発電量を増大させる。

(c) ATRの使用済MOX燃料中のウランに残存する
 ²³⁵Uの割合は,濃縮プラントで濃縮後に排出される劣

燃料集合体

図 | 燃料集合体構造図 燃料集合体はクラスタ構造であり, 36本の燃料要素,上下のタイプレートおよび12個のスペーサによっ て構成され,圧力管内に装荷される。

(2) 燃料選択上の高い自由度

(a) 炉心特性は燃料種類によらず安定していることから, 天然ウランMOX燃料, 回収ウランMOX燃料, 濃縮ウラン燃料などの種々の燃料が利用できる。また,

化ウランと同程度(0.2 wt%)であり,²³⁵Uをむだなく 燃焼できる。また,MOX燃料中の核分裂性プルトニウ ムについても,²³⁵Uと同様に軽水炉と比較して低濃度 まで燃焼させることができる。

炉心内のすべての燃料をMOX燃料とすることができる。 (b) 図2に示すように,熱中性子のエネルギーを十分 低減するため,再処理の繰り返しによってしだいに蓄

ATR実証炉の炉心設計 459



注:略語説明 LWR (Light Water Cooled Reactor)

図2 ATRにおける中性子エネルギースペクトル ATRでは 中性子減速材として重水を用いていることから,熱中性子スペクト ルがBWRに比べ軟らかくなり、この結果、高次プルトニウムおよ び²³⁶Uの共鳴吸収による影響が少ない。

1.2

注: **は, 日本原子力学会「S63秋の年会」予稿集, F27から引用した。

図 3 ATRにおける²³⁶U等価係数 ATRはLWRに比べ中性子ス ペクトルが軟かくなることから,²³⁶U等価係数は同じ濃縮ウラン燃 料で比べた場合,軽水炉よりも60%小さくなる。

積される高次プルトニウムの影響が少ない¹⁾。また,新 型転換炉利用システム開発調査(通商産業省委託事業) によると、図3に示すように回収ウランに含まれる ²³⁶Uによる影響も少ない²⁾。したがって、燃料組成の自 由度が高い。

(3) 炉心特性が安定,また,制御性大 重水減速材と冷却材が分離されているため、冷却材の 中のほう酸で制御するので,過剰反応度を制御するため の制御棒による出力分布のひずみがない。

(4) 運転期間の長期化が容易,負荷変更特性が良好

運転期間を長期化するには燃料装荷量の増加が必 (a) 要であるが,それに伴う 炉心過剰反応度の増大を重水 減速材中のほう酸濃度調整によって比較的容易に抑制 できる。

ボイド率が変化しても中性子は重水によって減速される ので、冷却材ボイド反応度係数はゼロ近傍となる。した がって, 軸方向の冷却材ボイド率分布による出力分布の ひずみが少ない。さらに、 炉心過剰反応度は重水減速材

(b) 日負荷調整運転などを行う場合、必要な反応度補 償を重水減速材中のほう酸濃度調整によって行うこと ができるので出力分布への影響が少ない。

13

実証炉炉心の高性能化 3

前章で述べたようなATRの炉心特性上の特徴を生か し、実証炉の炉心では、天然ウランなどにプルトニウム を富化した燃料を装荷し、プルトニウムの効率的な燃焼 を実現することを設計の基本方針としている。

この基本方針を踏まえ,高性能化として,いっそうの 出力分布の平たん化によって平均出力密度を向上させ, 燃料集合体数を削減するとともに、軽水炉などの使用済 燃料再処理によって取り出される回収ウランに、プルト ニウムを富化した燃料を使用することも可能としてい る。以上の改良を実施した炉心を、ATR実証炉高性能炉 心と称している。以下に、高性能炉心の実現のためのく ふうとその炉心特性について述べる。

高性能炉心 3.1

14

出力分布の平たん化 (1)



ATR実証炉高性能炉心用燃料の断面図 高性能炉心で 义 4 は、燃料集合体の中間層に3本(内側燃料)もしくは4本(外側燃料) のガドリニア入り燃料を採用し、また、軸方向にプルトニウム富化 度およびガドリニア濃度を変えた多領域燃料を採用している。

径方向出力分布 (a)

径方向のグローバルな出力分布は,径方向を2領域 に分割し、内側炉心領域のプルトニウム富化度を外側 炉心領域よりも小さくすることにより、平たん化して いる。また、新旧燃料の反応度差に基づく出力差の低 減には、図4に示すような新燃料の出力を抑制するガ ドリニア入り燃料を採用している。この燃料では、サ イクル末期にはガドリニアが燃え尽きること、ガドリ ニアによる出力抑制効果が大きいことなどを考慮し,

比較的低濃度(0.7~1.4 wt%)のガドリニアを燃料集 合体の中間層燃料要素12本中の3本(内側炉心領域燃 料),もしくは4本(外側炉心領域燃料)に添加してい る。外側炉心領域燃料では、内側炉心領域燃料よりも プルトニウム富化度が高いことに対応してガドリニア 燃料本数は、内側炉心領域燃料の3本に対し4本とし ている。

ガドリニア入り燃料を採用したことによる径方向出力



図 5 ATR実証炉取替炉心の径方向出力分布の例 ガドリニア入り軸方向富化度多領域 燃料採用取替炉心の出力分布例であり,ガドリニア未添加の従来炉心に比べ径方向出力ピーキン グ係数が約10%低減している。

ピーキング係数(径方向平均出力に対する径方向最大出力の比)の低減は、図5に示すように約10%である。

なお、中間層の燃料要素にガドリニアを添加したこと により、外層燃料要素で生じる局所出力ピーキング係数 (燃料集合体の各燃料要素の平均出力に対する燃料要素 最大出力の比)は約5%増加する。

(b) 軸方向出力分布

軸方向出力分布の平たん化のために燃料軸方向を3 領域に分割し、中央部よりも上下部のプルトニウム富 化度を高く(プルトニウム富化度比で約1.2倍)、また、 ガドリニア濃度は上下部を低く、中央部を高くしてい る。なお、上部、中央部、下部の領域割合は、軸方向 出力分布が最適になるように、1対3対1としている。 この軸方向富化度多領域燃料の採用により、軸方向 出力ピーキング係数(軸方向平均出力に対する軸方向 最大出力の比)は、図6に示すように約7%低減する。 での中性子束は低くなり,外層燃料要素の出力が高くなる。このため,内層および中間層燃料要素のプルトニウム富化度を外層燃料要素よりも高くして,各層燃料要素間の出力平たん化を図る設計としている。

一方,冷却材ボイド率変化時の炉心反応度変化量,す なわち冷却材ボイド反応度係数は,内層および中間層燃 料要素のプルトニウム富化度が高いほうが相対的に正側 の特性を持つ傾向がある。これは,ボイド増加時には中 性子の冷却材による吸収量が減少するため,燃料集合体 の外側から入ってくる中性子が,燃料集合体のより内側 まで入りやすくなる結果,内層および中間層燃料要素部 での中性子束が相対的に増大する分布となることによる。

高性能炉心では,上記の特性を踏まえ,(1)で得られた 出力ピーキング係数低減効果を利用して,内層,中間層 燃料要素のプルトニウム富化度を相対的に低減させ,全 体の出力ピーキング係数を制限値内に抑制するとともに

(2) 反応度フィードバック特性の改善

ATRでは、重水減速材中で減速された中性子が燃料集 合体の外側から燃料中に入る。MOX燃料を用いる場合、 プルトニウムの強い中性子吸収特性とあいまって外層燃 料要素で中性子が多く吸収され、内層、中間層燃料要素



冷却材ボイド反応度係数を改善している。

(3) 出力密度向上

上記(1),(2)の検討結果から,炉心平均出力密度を向上 させ,原子炉熱出力1,930 MWを変えずに燃料集合体数 を648体から616体と約5%削減した。この炉心の燃料配 置図は11ページの図に示したとおりである。

これら改良を実施した高性能炉心では,最大線出力密 度の制限値およびMCPR(Minimum Critical Power Ratio:最小限界出力比)の運転限界値に対し,必要な裕 度を確保している。

3.2 回収ウランMOX燃料装荷炉心

ATRは、図3に示したように、²³⁶Uによる燃焼度低下 の影響が少ないことから、回収ウランの利用に適してい る。また、熱中性子の平均エネルギーが低いことから、 核分裂性プルトニウムを²³⁵Uとほぼ同等に利用でき る³⁾。

このような特徴を踏まえ,高性能炉心では軽水炉など の使用済燃料から,再処理によって取り出される回収ウ ランにプルトニウムを富化した回収ウランMOX燃料を 装荷する検討を実施した。回収ウラン中の²³⁵Uの濃度と して下限は天然ウランである0.71 wt%,上限は軽水炉使 用済燃料での現実的な残存量を考慮し1.2 wt%の範囲を 想定した。また,²³⁶Uの含有量は同様な考え方で0~0.4 wt%とした。 回収ウランを使用する場合,²³⁵Uとプルトニウムの中 性子吸収効果の相違から,各燃料要素ごとに核分裂性物 質量(²³⁵Uと核分裂性プルトニウムの和)を同一とする

15

図 6 ATR実証炉取替炉心の軸方向出力分布の例 ガドリ ニア入り軸方向富化度多領域燃料採用取替炉心の出力分布例であ り,中央部のプルトニウム富化度を上下部よりも低くし,また,中央 部のガドリニア濃度を上下部よりも高くすることにより,軸方向一 領域炉心である従来炉心に比べ,出力分布を平たん化し,軸方向出 カピーキング係数を約7%低減している。 表 | 回収ウランMOX炉心と天然ウランMOX炉心の核分裂物 質量 回収ウランMOX炉心の核分裂物質量設定結果の一例であ る。このように、ATR実証炉では、²³⁵U量に応じて核分裂物質量を若 干調整することで、天然ウランMOX炉心とほぼ同等の炉心特性が得 られることを確認している。

燃料種類	²³⁵ U量 (wt%)	炉心平均 核分裂物質量 (wt%)	核分裂性 プルトニウム装荷量* (t)	²³⁵ U 装荷量* (t)
天然ウランMOX	0.71	約3.3	0.52	0.22
回収ウランMOX	1.2	約3.1	0.39	0.31

注:* | 回の燃料交換当たりの装荷量

と,集合体内の局所出力分布が²³⁵U濃度によって変動す る。そこで,²³⁵Uの濃度の違いに応じて,内,中間層と外 層との燃料要素間の核分裂物質量の割合を変更すること により集合体内の局所出力分布の変動を抑制している。

4 核設計手法の検証

4.1 核設計手法の概要⁴⁾

実証炉の炉心設計コードシステムの全体概要を図7に 示す。同図に示すように炉心設計コードシステムは,出 力分布計算,燃焼計算,反応度計算を行う核特性計算部 と,流量配分計算などを行う熱水力特性計算部で構成さ れる。熱水力特性計算部のうち,MCPR計算部はこの号 の別論文⁵⁾で述べる。

核特性計算部は、単位燃料集合体格子の特性を計算す る格子核計算部分と、格子核計算結果に基づく核定数を 入力して、炉心全体の出力分布特性および反応度特性を 計算する炉心特性計算部分に大別できる。

4.1.1 格子核計算手法

実証炉の格子核計算には、WIMS-ATRコードを使用 している。このコードは、英国で開発されたWIMS-Dコ

残存²³⁵Uが1.2 wt%のときのこの方式によるプルトニ ウム富化度の設定例を,天然ウランMOX炉心の場合と 比較して**表1**に示す。同表から全炉心平均の核分裂物質 量は天然ウランMOX炉心の場合に比べ,若干小さめの 値となっている。また,出力分布,反応度フィードバッ ク特性は,ほぼ天然ウランMOX炉心と同程度であるこ とを確認している。 ードに動力炉・核燃料開発事業団が温度依存性を考慮し た重水散乱核データを追加するなどの改良・整備を行っ たものであり,動力炉・核燃料開発事業団大洗工学セン ターDCA(重水臨界実験装置)の実験解析および「ふげ ん」の炉心管理にも使用されている。このコードは格子 内を多領域に分割した体系で二次元のエネルギー多群中 性子輸送計算を実施し,格子平均の核定数を作成する。 ガドリニア入りMOX燃料の格子核計算にあたって は,ガドリニアの大きな熱中性子吸収を精度よく計算す



注:略語説明 MCPR (Minimum Critical Power Ratio)

16

図7 ATR実証炉の炉心設計コードシステムの概要 炉心設計コードシステムは,核特性計算部と熱水力特性計算部から構成され,核特性計算部はさらに | 個の燃料集合体の特性を計算する格子計算コード,炉心全体の出力分布などを計算する三次元核熱結合コードおよび反応度 特性を計算する拡散計算コードから構成される。

るため、中性子輸送計算時、(1)エネルギー群数をガドリ ニア未添加燃料解析時よりも増加し、(2) ガドリニア入り 燃料要素内を径方向複数領域に分けるなどのくふうを行 っている。

WIMS-ATRのガドリニア入りMOX燃料への適用性 は,新型転換炉技術確証試験(通商産業省委託事業。以下, ATR技術確証試験と言う。)においてDCA(臨界実験装 置)の実験データなどに基づく精度評価を通じて確認し ている。

そのうち,局所出力分布についての解析結果と実験結 果の比較例を図8に示す。燃料は、実証炉と同様、ガド リニアを添加したウラン・プルトニウム混合酸化物36本 クラスタ燃料である。この燃料集合体の局所出力分布の 計算値は,出力ピークが発生している燃料要素,ガドリ ニア入り燃料要素とも実験値に比べよく一致している。 4.1.2 炉心核特性計算手法")

CITATION⁹⁾を使用している。LAYMON-2Aコードは、 原型炉「ふげん」用に開発されたLAYMONコードをベー スにして,実証炉用に種々の改良を加えたものであり, 三次元修正粗メッシュ10,11)中性子エネルギー一群モデル に基づく拡散計算8)によって出力分布を計算する。

このモデルでは,計算メッシュは1集合体1メッシュ, また、軸方向は燃料有効部を15メッシュに分割するが、 メッシュ補正により、1メッシュ当たり3倍のメッシュ を考慮したのと同程度の精度が得られる。

また、核熱水力結合計算に必要な炉心内各圧力管の冷 却材ボイド率分布は、圧力管内の冷却材流量および圧力 管入口から着目ノードまでの積分出力から求めたノード 平均クオリティによって計算する。この計算で、圧力管 内の冷却材流量は動力炉・核燃料開発事業団大洗工学セ ンターCTL(部品機器試験ループ)の実験から得られた クオリティ依存の圧力損失係数、および実証炉の配管形 状に基づく出力-流量相関式から計算している。また、ク オリティーボイド相関式は動力炉・核燃料開発事業団大 洗工学センターのHTL(大型熱ループ)の実験に基づく 相関式を使用している。

実証炉の炉心核特性計算には、三次元核熱水力結合コ ードLAYMON-2A⁸⁾および汎用中性子拡散コード



一方,反応度フィードバック計算は,WIMS-ATRで求 めた格子定数を用いてCITATIONコードで行い、1集 合体あたり4メッシュ,中性子エネルギー群数は3群で 計算している。

LAYMON-2AおよびCITATIONは、ATR実証炉の 核特性評価の中心となるコードであり、「ふげん」の運転 実績評価やDCAの実験データとの比較による広範な精



図8 ガドリニア添加36本燃料の局所出力分布の試験値と計 算値の比較 DCA(臨界実験装置)での試験値との比較結果, WIMS-ATRの局所出力分布の計算値は、出力ピークが発生している 燃料要素,ガドリニア入り燃料要素とも実験値に比べよく一致して いる。

図9 「ふげん」代表サイクルにおける径方向出力分布実績値と 計算値の比較 LAYMON-2Aによる径方向出力分布計算値と「ふ、 げん」実績値はよく一致している。

17



度評価を通じて,その妥当性を確認している。その一例を 図9および図10に示す。これらは、「ふげん」の代表サイ クルでの径方向出力分布と、軸方向出力分布の実績値お よび計算値とを比較したものであり、両者ともよく一致 している。

また、「ふげん」データに基づく冷却材ボイド反応度係 数、出力係数についても精度評価を行い、設計コードの 妥当性を確認している。

5 おわりに

ATR実証炉高性能炉心を開発した。この炉心では,改 良燃料としてガドリニア入り軸方向富化度多領域燃料を 採用することにより,出力分布を平たん化し,平均出力 密度を向上させ,その結果燃料集合体数を改良燃料採用 前の648体から616体に低減(32体削減)した。

また,出力分布平たん化効果を利用して,冷却材ボイ ド反応度特性を改善し,安全性をいっそう向上させてい る。



図10 「ふげん」代表サイクルにおける軸方向出力分布実績値 と計算値の比較 LAYMON-2Aによる軸方向出力分布計算値と 「ふげん」実績値はよく一致している。 一方,軽水炉などの使用済燃料再処理によって取り出 される回収ウランに,プルトニウムを富化した燃料を用 いた炉心の検討を行い,その成立の見通しを得ている。

実証炉の核設計手法は,原型炉「ふげん」およびDCA 実験データを用いて,その妥当性を確認している。

参考文献

18

- 山下,外:高転換型沸騰水炉概念の開発,日立評論,70, 4,429~432(昭63-4)
- 市田,外:回収ウラン燃料中²³⁶Uによる反応度低下補償 量評価,原子力学会秋の大会予稿集F27(昭和63年)
- S. Sawai, et al. : Characteristics of plutonium utilization in the Heavy-Water-Moderated Boiling-Light-Water-Cooled Reactor ATR, Nucl. Eng. & Design 125(1991) 251-257
- 4) 浅野,外:新型転換炉実証炉の炉心特性と大型炉心設計
 評価手法の開発,日立評論,67,11,899~904(昭60-11)
- 5) 若林,外:ATR実証炉の燃料設計,日立評論,74,6,465~ 470(平4-6)
- 6) 清野,外:新型転換炉実証炉の炉心核特性設計手法の検

学会年会予稿集 K7(平成4年)

- 7) 山舘,外:新型転換炉実証炉の炉心出力分布解析手法,原子力学会年会予稿集 K8(平成4年)
- 8) 山本,外:1群修正粗メッシュモデルに基づく新型転換 炉3次元核熱水力結合コードと出力分布精度評価,原子 力学会年会予稿集B66(昭和58年)
- ORNL Nuclear Reactor Core Analysis Code CITA-TION Revision 2, July 1971
- 10) J. R. Askew, et al. A General Description of Lattice Code WIMS, ENEA COMPUTER PROGRAM LIBRARY
- 11) J. R. Askew, et al. : Methods for Three-Dimensional Fuel Management Studies on High Tempera-

証(ガドリニア添加燃料集合体内出力分布特性),原子力

ture Reactors, CONF-720901, Book 1(1972)