

高速増殖炉における炉心燃料とブランケット燃料の配置最適化手法の研究開発

(受託者) 国立大学法人東北大学

(研究代表者) 若林利男 大学院工学研究科

(研究開発期間) 平成21年度～23年度

1. 研究開発の背景とねらい

高速増殖炉の炉心構成は、均質炉心の場合、出力分布の平坦化のために内側炉心と外側炉心の二領域として、外側炉心燃料のプルトニウム富化度を内側炉心燃料のプルトニウム富化度より高めている。それでも、特に外側炉心燃料の最外層燃料の出力が低く、それに伴い燃焼度が低くなっている。外側炉心の燃料集合体数が多いため、内側炉心及び外側炉心の各取出燃料の平均燃焼度も低くなっていた。「もんじゅ」の低燃焼度炉心を例にとると、炉心取出平均燃焼度に比べて、外側炉心最外層燃料の燃焼度は、25%程度低くなっている。

そのため、経済性向上のために炉心取出平均燃焼度を増大させるには、外側炉心の炉心燃料の燃焼度を上げることが有効と考えられる。その方策の1つとして、高速増殖炉のブランケット領域の中性子の減速及び反射効果を増大させて、外側燃料の出力の増大とそれに伴い燃焼度を向上させることが考えられる。

ブランケット燃料集合体の構成としては、従来、劣化ウランを収めたブランケット燃料要素のみで構成されていた。ブランケットの減速及び反射効果を増大させるには、ブランケット燃料集合体内に劣化ウラン要素だけでなく、減速及び反射効果が優れている物質(水素化ジルコニウム、重水素ジルコニウム等)を含む要素を適用することが有効であると考えられる。

本研究では、「もんじゅ」を例として、減速材を導入したブランケット燃料要素の材質・構造・配置並びに炉心燃料集合体及びブランケット燃料集合体の配置・交換手法の最適化により、炉心取出平均燃焼度を向上させる手法を開発し、実用炉への適用の観点から検討することを目的としている。

2. 研究開発成果

3年間の計画の中で実施した、(1)ブランケット燃料要素の材質、構造、配置の検討、(2)炉心燃料集合体、ブランケット燃料集合体の配置・燃料交換法の検討、(3)炉心特性、熱特性、安全性の検討、(4)ブランケット集合体の構造設計、の成果を以下に示す。

(1) ブランケット燃料要素の材質、構造、配置の検討

「もんじゅ」低燃焼度炉心を対象として(図1参照)、ブランケット燃料集合体内の減速及び反射物質の種類(ZrH, ZrD等)と密度、燃料要素の本数及び配置、燃料交換バッチ数、運転サ

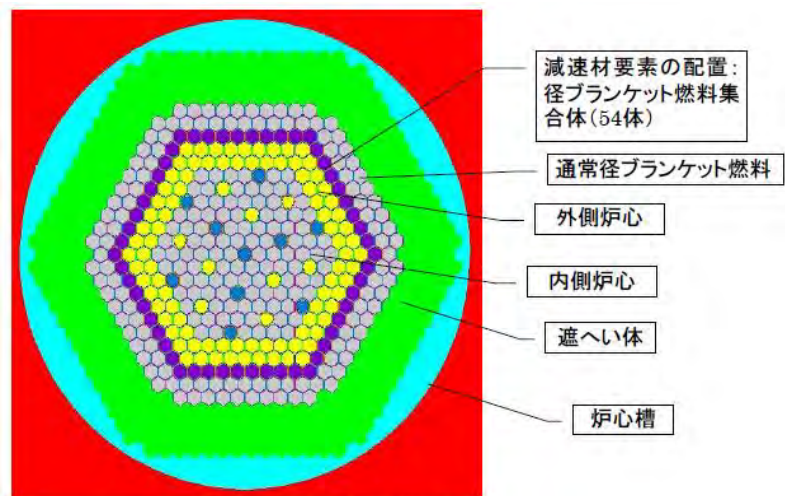


図1「もんじゅ」炉心内配置図例

イクル長、炉心燃料集合体とブランケット燃料集合体の集合体配置及び集合体の軸方向構造をパラメータにしたパラメータサーベイをモンテカルロコード MVP を用いて実施した。これらのパラメータが、炉心燃料及びブランケット燃料の燃焼度、増殖比、出力ピーキング係数等の主要炉心特性に与える影響を明らかにするとともに燃焼度向上の観点から最適と考えられるブランケット燃料要素の材質、配置を決定した。

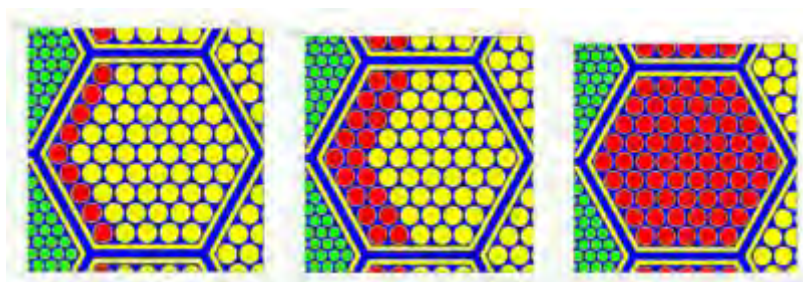


図2 減速材ピンの集合体内配置例

(赤：減速材ピン、黄色：ブランケット燃料、緑：炉心燃料)

一方、増殖比は、 $ZrD_{1.6}$ 減速材ピンの本数の増加とともに低下するが増殖性は確保できることが分かった。

表1 燃焼度向上効果の $ZrD_{1.6}$ 減速材ピン本数依存性

減速材ピン本数	炉心出力ピーキング係数	外側炉心最外層燃料の出力ピーキング係数	ブランケット集合体の出力ピーキング係数	炉心平均燃焼度の増加 (%)	増殖比
-	1.233	1.173	1.420	-	1.121
9	1.253	1.130	1.703	0.9	1.107
18	1.231	1.095	1.251	2.9	1.092
61	1.202	1.312	-	7.0	1.011

また、 $ZrH_{1.6}$ 減速材ピンの場合、減速材に近接する燃料ピンの出力ピークは大きくなり、線出力制限のため外側炉心最外層燃料の集合体全体の出力は増大できず、 $ZrD_{1.6}$ 減速材ピンのほうが燃焼度向上効果の観点から有利であることが分かった。

出力ピーキング係数の低減を図り、炉心平均燃焼度を向上させるには、 $ZrD_{1.6}$ 減速材ピンを最内側ブランケット燃料集合体内に全数配置することが望ましいことが分かった。

これらの成果に基づき、燃焼度向上の観点から最適と考えられるブランケット燃料要素に配置する材質として重水素減速材を選定し、その構造、配置を決定するとともに、炉心平均燃焼度を約7%向上できる見通しを得た⁽¹⁾。

(2) 炉心燃料集合体、ブランケット燃料集合体の配置・燃料交換法の検討

3次元拡散燃焼解析コードを用いて、(1)の検討で最適化したブランケット燃料要素の材質、構造、配置を基にしたブランケット燃料集合体と炉心燃料集合体の炉心配置、燃料交換に関するパラメータサーベイを実施し、炉心燃料及びブランケット燃料の燃焼度、出力分布等に与える影響を明らかにするとともに炉心平均燃焼度を向上させる最適な配置・燃料交換方法を明らかにした。

炉心燃料集合体の交換バッチ数4、ブランケット燃料集合体の交換バッチ数5を

基本とし、燃料交換パターンを変更するパラメータサーベイの結果、出力ピーキングは2%程度の変化となることが分かった。ブランケット燃料集合体に61本のZrD_{1.6}減速材ピンを配置した場合は、減速材ピンをブランケット燃料集合体に配置しない場合に比べて、出力ピーキングは低減することが分かった。

これらの検討より、61本のZrD_{1.6}減速材ピンを配置したブランケット集合体を第1列ブランケット燃料集合体位置に配置し、炉心燃料集合体の燃料交換バッチ数を4とすることにより、減速材ピンをブランケット集合体に配置しない場合に比べて、炉心平均燃焼度は約7%向上できる見通しを得た。

(3) 炉心特性、熱特性、安全性の検討

61本のZrD_{1.6}減速材ピンを配置したブランケット集合体を第1列ブランケット燃料集合体位置に配置した炉心における反応度係数(ボイド反応度、燃料温度係数等)、制御棒反応度(主炉停止系、後備炉停止系)等の解析・評価を実施し、炉心特性に与える影響を明らかにした。ブランケット燃料集合体の最大線出力の抑制、炉心燃料集合体の局所出力ピーキングの抑制についても検討した。また、上記炉心の流量配分を検討し、被覆管最高温度を評価した。重水素化合物等の減速材の導入による炉心の安全性については、重水素等の解離・漏洩による炉心特性への影響を評価し、安全性を確認した。

ブランケット燃料集合体に61本のZrD_{1.6}減速材ピンを配置した炉心については、減速材ピンをブランケット燃料集合体に配置しない炉心と比べて、ドップラ反応度係数が約50%大きくなり(表2参照)、一方、ボイド反応度、燃料温度係数、制御棒価値は大きく変わらないことが分かった(表3参照)。

表2 減速材付炉心のドップラー係数

炉心	ドップラー係数 ($\Delta k/kk' /dT/T$)
61ピン減速材付炉心	-9.86E-3
減速材無炉心	-6.70E-3

表3 減速材付炉心のNaボイド反応度

炉心	Naボイド反応度 (% $\Delta k/kk'$)
61ピン減速材付炉心	1.05
減速材無炉心	1.14

ZrD_{1.6}減速材ピンをブランケット集合体に配置した炉心の出力分布は、減速材ピンをブランケット集合体に配置しない炉心に比べ、外側炉心第2層で約20%増大し、内側炉心では数%減少した。このため、外側炉心の流量を増大できるように流量配分計画をおこない、最高被覆管温度を675℃以下とできる見通しを得た。また、重水素の炉心からの解離・漏洩による投入反応度を評価した結果、仮に全重水素が瞬時に解離・漏洩した場合でも0.3% $\Delta\rho$ 以下であり、反応度投入による出力の急昇は避けられる見通しであることが分かった(表4参照)。

表4 重水素の解離による反応度投入

減速材ピン中の重水素の割合	反応度 (% $\Delta k/kk'$)
1.0	-
0.9	0.029
0.7	0.103
0	0.255

(4) ブランケット集合体の構造設計

61本のZrD_{1.6}減速材ピンを配置したブランケット集合体を第1列ブランケット燃料集合体

位置に配置した炉心及び軸方向しゃへい構成を基にして、ブランケット集合体の構造を設定した。ブランケット集合体の流量配分結果に対して圧力損失を評価し、流量調節機構を設計した。これらにより、減速材を装荷したブランケット集合体の構造設計をまとめ、実用炉に適用できる概念を提示した。

モンテカルロ計算により炉心周りの遮へい解析を行ない、 $ZrD_{1.6}$ 減速材ピンを配置したブランケット集合体の減速材部の上部及び下部に SUS ペレットを配置することで、減速材ピンを配置しないブランケット集合体の場合と同等の炉心周り高速中性子束となることを確認し、炉心周りの炉内構造物の照射量制限は満足できる見通しであることが分かった。また、ブランケット集合体のオリフィスを工夫することにより流量配分ができ、実用炉に適用できる流量調整機構を示すことができた。

以上より、ブランケット燃料要素の材質として重水素減速材を選定し、61本の $ZrD_{1.6}$ 減速材ピンを配置した集合体を第1列ブランケット燃料集合体位置に配置することで、炉心平均燃焼度が約7%向上できることが分かった。今回の研究により、本減速材ピンを配置したブランケット集合体は実用炉にも適用でき、同等の燃焼度向上が図れると考える。減速材ピンをブランケット集合体に配置した炉心の炉心特性、熱特性、安全性は、減速材ピンをブランケット集合体に配置しない炉心と大きな相違はなく、本研究で提案した燃焼度向上手法は、炉心全体の特性の観点からも十分に適用できることが分かった。

また、ブランケット集合体構造については、減速材ピンを配置したブランケット集合体のオリフィスを工夫することにより実用炉に適用できることが分かった。

重水素価格を含めた減速材ピンを配置したブランケット集合体の製造費については、約7%の燃焼度向上に伴う運転期間延長による売電価格増のほうが大幅に上回っており、経済的には十分に採算が取れると考える。

3. 今後の展望

燃焼度向上は、資源の有効利用、環境負荷の低減に大きく寄与する。燃料・材料の開発とともに本手法を発展させて、更なる燃焼向上が図れるようにすることが重要と考える。

安全性の観点からは、水素を減速材として使用するよりは、重水素の方が安全性上有利と考えられ、今後、長半減期核分裂生成物の核変換や制御棒の性能向上に、減速材を使用する場合は、重水素を用いることが望ましいと考える。

ブランケット領域に減速材を含む集合体を用いることにより、U-238 ブランケット燃料集合体における中性子スペクトルが軟化することになる。プルトニウムの高次化が見込まれ、核不拡散性の向上が図られると考えら検討を引き続き行う必要がある。

4. 参考文献

- (1) Toshio Wakabayashi, “ Enhancement of Fuel Burn-up by Introduction of Moderators in a Blanket Region of Fast Reactor ,” The 10th International Conference GLOBAL 2011, Makuhari Messe, Chiba, Japan December 11-16, 2011.