特集 原子力

高速増殖炉大型高性能炉心の開発 Development of High Performance Core for Large Fast Breeder Reactors

高速増殖原型炉「もんじゅ」に続いて、電気出力1,000MW級の実証炉の建設が計 画されている。本研究は、実証炉及び商用炉のために、燃料の増殖性及び安全性に 優れた大型炉心の概念を確立することを目的としている。そのために、大型炉心と して最適な燃料設計の仕様を明らかにするとともに、炉心内の軸方向中心付近に、 端部の薄い円板状ブランケットを導入した新しい炉心構成について検討した。その 結果、高速増殖原型炉「もんじゅ」の燃料をほぼそのまま使って、炉心を大型化す る場合に比べ、燃料倍増時間は約号、最悪の仮想事故と考えられている炉心崩壊事 故で発生するエネルギーは約号にできる見通しを得た。

井上孝太郎*		Kotarô Inoue		
川島	克 之**	Katsuyuki Kawashima		
渡	孔 男***	Yoshio Watari		

1 緒 言

商用炉の技術的可能性,増殖性及び経済性を実証するため に,電気出力1,000MW級の実証炉の建設が計画されている。 実証炉は,高速増殖原型炉「もんじゅ」の設計概念を踏襲し, 大型化するという考え方もあるが,「もんじゅ」は電気出力280 MWの原型炉として設計されたものであり,これをそのまま 大型化した場合には以下のような課題が発生する。 (1) 炉心は一般に大型化するほど増殖率が下がる性質があり, 電気出力1,000MWクラスの炉では増殖率が1.2以下と低くな り,燃料倍増時間(以下,倍増時間と略す。)が70年以上にも達 し,将来の増殖型商用炉の実証という点からは必ずしも十分 な性能とは言えない。

表 | 炉心設計条件

実証炉を対象としたものである。

項目	条件
電気出力	約1,000MW
熱 出 力	2,480MW
原子炉入口温度	385 °C
原子炉出口温度	530°C
炉 心 燃 料	PuO ₂ -UO ₂
ブランケット燃料	減損UO2
燃料組成比(W/O)	
Pu ²³⁹ : Pu ²⁴⁰ : Pu ²⁴¹ : Pu ²⁴²	58:24:14:4
U^{235} : U^{238}	0.3:99.7
平均取出燃焼度	約80,000MWd/t
ノミナル最大線出力密度	≦ 430 ₩/cm
被覆管肉厚中心最高温度	
炉 心	≦675°C
ブランケット	≤700°C
燃料交換間隔	年
燃料炉内滞在期間	3年
設備利用率	80%

(2) 安全性の目安として,最悪の炉心崩壊事故が仮に起こったとして現有の手法で炉心の挙動を解析してみると,事故の 規模が大きくなるおそれがある。

これらの課題を解決する手段として、実証炉及び商用炉に 適した燃料設計と非均質炉心について検討した。

非均質炉心は、増殖性及び安全性の向上を目的として炉心 内にブランケット領域(これを内部ブランケットと呼ぶ。)を設 けたものである。

日立製作所は、昭和52年度以来、動力炉・核燃料開発事業 団の委託研究として、米国で設計されているClinch River Breeder Reactorと同様の径方向非均質炉心の研究に着手し、 更に昭和54年度から開始された実証炉概念設計の炉心設計を 担当し、そのなかで増殖性と安全性の向上について総合的に 検討を進める一方、独自のアイディアに基づく軸方向非均質 炉心の概念を開発し提案してきた。これらの研究のうち、特 に増殖性の向上を中心とした研究結果の一部については既に 紹介済みである¹⁾が、ここでは、安全性を含めた研究結果に ついて報告する。

2 新型高性能炉心の設計研究

2.1 大型炉心のための燃料設計の検討

増殖率を向上させるための最も有効な方法は, 炉心内の冷

炉及び商用炉のために以下に述べるように設計することを考 えた。なお,前提となる設計条件を表1に示す。

(1) 燃料単位長さ当たりの出力を, できるだけ高め(最大430 W/cm), 燃料ピン数を必要最小限にした。

(2) 構造材の燃料に対する割合(原子数比)を減少させ、構造 材による中性子の吸収を少なくした。具体的には、燃料ピン を太く(外径7.4mm)かつ高密度(スミア密度90%)にし、更にガ スプレナム(気体状核分裂生成物質を収納)を冷却材温度の低 い燃料ピン下部に設置し、ガス圧を下げることにより、燃料 被覆管を薄く(厚さ0.40mm)した。

これら燃料設計の変更が燃料倍増時間に与える効果を図1 に示す。また、このようにして得た炉心及び燃料の設計案を 図2に示す。

このように燃料を設計した案(図1のEに相当)では、増殖 率は1.26と高くなり、倍増時間は36年に短縮することが期待 できる。また、増殖率が高くなるために、1年間の運転期間 中の反応度(核反応の起こりやすさ)の減少(燃焼反応度と呼

61

却材(液体金属ナトリウム)や構造材(ステンレス鋼)による中 性子の吸収を少なくすることである。また,倍増時間*¹⁾を短 縮するためには,増殖率を高めるとともに,炉心に装荷する プルトニウムを少なくすることが有効である。そこで,実証 *1)倍増時間=炉1基分のPu量/年間Pu増加量

* 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 ** 日立製作所エネルギー研究所 *** 日立製作所日立工場

608 日立評論 VOL. 64 No. 8(1982-8)



図 | 燃料ピンの仕様と燃料倍増時間 燃料倍増時間には、炉外イン ベントリー(炉内インベントリーの50%)及び炉外での再処理過程でのロス(再 処理量の2%)を含む。 リウムの流量が低下する。

(2) 複数系統になっている制御棒による原子炉停止系が,一切作動しないとする。

(3) 過熱したナトリウムが沸騰し、ナトリウムが減り(これ をナトリウムボイドと呼ぶ。),その結果、中性子を吸収した り減速させたりする割合が減って、反応度が増し出力が上昇 する。

(4) 更に,燃料溶融が進展し、その溶融した燃料が重力などにより、出力密度及び温度の高い位置に向かって炉心内を軸方向に移動するとする。こうしていっそう出力が上昇する。
 (5) 溶融した燃料がナトリウムと接触し、ナトリウムの沸騰が加速される。

(6) これらの結果,核暴走現象が発生し,燃料の蒸気圧など により,炉心が膨脹崩壊するとともに,炉容器に対して急激 な圧力がかかる。このエネルギーを機械エネルギーと呼ぶ。 電気出力1,000MWクラスの実証炉の場合,機械エネルギーは 約1,000MJにも達すると計算されるが,これは主に(3)~(5)の 過程で,ナトリウムの沸騰及び燃料の移動により急激に反応 度が増すためである。

そこで, 増殖性を高めながら炉心崩壊事故の規模を小さく するための手段として, 非均質炉心を検討した。

2.2 非均質炉心の検討

国内外で検討されてきた径方向非均質炉心は, 炉心内に径

ただし、増殖性を向上させるための燃料設計の変更だけでは 炉心崩壊事故の規模は小さくならない。

最大の仮想事故である炉心崩壊事故は,以下に述べるよう な過程で起こると考える。この過程で,現在考えられる設計 誤差,不確かさのある物性値,挙動などはすべて保守側に仮 定する。

(1) 一次冷却系のポンプの電源が切れ、炉心を冷却するナト

国内外で検討されてきた住力向外均負か心は、か心内に住 方向ブランケット集合体(主成分は減損ウラン)から成る内部 ブランケット領域を設け、これによって炉心を径方向に部分 的に仕切った形にし、小型炉心を集めたと同じような特性を 得ようというものである^{2),3)}。一般に、炉心は小型のほうが 増殖率は高く、炉心崩壊事故時の機械エネルギーは小さくな る傾向がある。しかし、径方向非均質炉心は、制御棒の挿入・ 引抜きによる出力分布の変動が大きく、また内部ブランケッ トと炉心燃料集合体から流出する冷却材温度に150℃近いばら つきが生じ、炉上部機構に大きな繰返し熱応力が発生すると いう新たな課題が生じる。



62



図3 軸方向非均質炉心の構成概念図 炉心燃料ペレットの間にブラ ンケット燃料ペレットをはさむ。内部ブランケットは炉心の中央で径方向に広 がっている。

図5 径方向出力分布(軸方向積分出力) 分布の変動は、 均質炉心と同程度に小さい。



63



図4 軸方向出力分布 最大出力密度をもつ燃料集 合体の軸方向出力分布であ る。軸方向非均質炉心は, 出力ピーキング係数が1.54 と均質炉心に比べ5%小さ い。

径方向非均質炉心のもつこれらの問題を解決し,かつ炉心 崩壊事故の規模を小さくする一つの対策として, 独自の軸方 表2 炉心核熱特性の比較 軸方向非均質炉心は,増殖性に優れている。 他の核熱特性は、「燃料設計変更」の均質炉心とほぼ同じである。

向非均質炉心を考えた4)~6)。この構成を図3に示す。炉心の		炉 心	軸方向非均質	均	質
中央に径方向に広がる円盤状の内部ブランケット(材質は軸方 向ブランケットと同じ)を設けたことが特徴であるの部プラ	特	性	燃料設計変更	「もんじゅ」 型 燃 料	燃料設計変更
ンケットは、径方向ブランケットに隣接する炉心周辺部の2 ~3層の燃料集合体を除くすべての炉心燃料集合体に設置され、「「「」」ので薄くしてある、「「」」、「」」、「」」、「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「	ー. 寸 法	 (1)炉心径(mm) (2)炉心高(mm) (3)径方向/軸方向 ブランケット厚(mm) 	3,250 950 400/400	3,350 980 420/350	3,250 1,000 400/350
こすることにより、増殖率が高くなり、燃料倍増時間が短 される。 戸心燃料のプルトニウム富化度は、均質炉心では2種類必 であるが、この設計では1種類でよい。燃料集合体及び燃 ピンの外形は、均質炉心と同じである。内部ブランケット	2.燃料(炉心/径方	 (1)配列ピッチ(mm) (2)燃料ピン径(mm) (3)被覆肉厚(mm) (4)燃料ピン全長(mm) (5)燃料スミア密度(%TD) (6)ガスプレナム位置 (7)燃料ピン数/集合体 	8.8/13.5 7.4/12.2 0.4/0.41 3,000/3,000 90/91 下部 217/91	7.9/13.6 6.5/11.1 0.47/0.5 3,200/3,200 80/90 上部 271/91	8.8/13.5 7.4/12.2 0.4/0.41 3,000/3,000 90/91 下部 217/91
領域の径及び厚さは,燃料倍増時間を最短にするように決めた。 燃焼初期と末期での軸方向及び径方向の出力分布を,均質 炉心と比較して図4,5に示す。	3.	 (1)燃料濃縮度 (内側/外側炉心)〔W/0〕 (2)増殖率 (2)位始時間(年) 	14.6	13.8/17.1 1.16 74	11.2/14.2 1.26 26
図5では炉心の平均出力密度が1になるように規格化してある。本炉心の最大値は1.54で均質炉心の1.61よりも約5%	核 熱	 (3)倍増時间(年) (4)燃料単位長出力 (ノミナル最大)[W/cm] (5)燃料インベントリー(+) 	430	360	430
低い。したがって、均質炉心と同じ最大出力密度をとると、 炉心体積を5%程度小さくできる。この設計では炉心高さを 5%(5cm)短くして95cmとした。更に、燃料ピン最大燃焼度	特性	 (6)平均取出し燃焼度(MWd/t) (7)燃焼反応度(%Δk) (8)被覆管肉厚中心最高温度 	76,000 2.0 662	90,000 4.1 675	74,000 2.2 665
が均質炉心よりも約4%低くなるので、燃料ピンの健全性を		(°C)		E'.m	

610 日立評論 VOL. 64 No. 8 (1982-8)



ナトリウムボイド反応度係数の軸方向分布 × 6 炉心中心付近の 燃料集合体についての分布を示した。軸方向非均質炉心は特に, 軸方向中心付 近でボイド係数が小さい。

図8 核暴走時の反応度及び出力の時間変化 軸方向非均質炉心は, 出力上昇が緩やかであり,最大出力も小さい。



際に発生すると考えられるナトリウムボイドと、溶融した燃 料の軸方向の移動による反応度の増加量によって左右される。 図6,7にナトリウムボイド係数と燃料反応度価値の軸方 向分布を示す。軸方向非均質炉心は均質炉心に比べ、ナトリ

燃料反応度価値の軸方向分布 |※| 7 炉心中心付近の燃料集合体につ いての分布を示すもので, 軸方向非均質炉心は, 軸方向中心付近で平坦になっ ている。

損なわずガスプレナム長を短縮して,代わりに増殖性向上に 有効な軸方向ブランケットを厚くする(14%増大)ことができ る。この結果、増殖率は更に0.8%増大する。

表2に、核熱特性を2種類の均質炉心と比較して示す。増 殖率は1.29と高く倍増時間は31年と短い。燃焼反応度は2.0% △kと小さく、制御棒のワースも小さくてよい。

以上のように、ここに示した軸方向非均質炉心は、構造が 簡単であり, 増殖性に優れている。また, 出力分布が平坦で 運転中の変動が小さいので,制御棒操作は均質炉心と同じで よく, 径方向非均質炉心のような問題がない。

3 軸方向非均質炉心の炉心崩壊事故の挙動

64

ここで提案した軸方向非均質炉心の特長のひとつは,最 大の仮想事故である炉心崩壊事故が万が一発生したとして も,その規模が均質炉心に比べてはるかに小さくなる点であ る。以下に、一次冷却系のポンプの電源が切れ、冷却材流量 が時定数5秒で半減するとした仮想事故についての解析結果 を示す。解析には、米国で開発されたプログラムSAS 3Dと VENUSを用いた。 最大の炉心崩壊事故の規模は,先に述べたように,事故の

ウムボイド係数,燃料反応度価値の軸方向分布は共に平坦化 されており、ナトリウムボイド及び燃料の移動による反応度 の増加が緩やかになり、出力の上昇割合も小さくなる。事故 時の反応度及び出力の変化を図8に示す。

事故時に発生する全エネルギー(出力の時間積分)から、炉 心内物質の温度上昇,溶融などに消費されるエネルギーを差 し引いた機械エネルギーは約200MJと均質炉心の約1,000MJ に比べ約号となり, 炉容器の設計条件が大幅に緩和される。

4 結 言

以上に述べたように,大型炉心用としての燃料設計の変更 及び軸方向非均質炉心の採用によって, 増殖性及び安全性に より優れた大型炉心の概念を確立した。今後,実証炉及び商 用炉の早期実現を目指し,詳細設計を行なうとともに,関連 する研究開発を進めたいと考える。

参考文献

- 1) 井上,外:高速増殖炉大型非均質炉心の研究開発,日立評論, 62, 10, $719 \sim 724$ (BZ55 - 10)
- J. C. Mougniot, et al. : Gains de Regeneration des Rescuteurs Rapides a Combustible Oxyde et a Refrigenerant Sodium, European Nuclear Energy Conf., Paris (1975-4)
- 大竹:大型高速炉の炉心設計における最近の進展、日本原子 3) 力学会誌, 23, 877~885(1981-12) 4) K. Inoue, et al.: A Fast Breeder Core with Internal Blanket, ANS Trans., 33, 862(1979-11) K. Kawashima, et al. : A Fast Reactor Core Concept 5) Using an Internal Blanket, Nucl. Tech., 55, 713~719 (1981 - 12)川島,外:軸方向非均質概念による大型高速炉の増殖性向上, 6) 日本原子力学会年会, B13(1981-3)