U.D.C. 621.039.526.034.6:621.039.521.047

高速増殖炉実証炉軸方向非均質炉心の開発と実証

Development and Verification of an Axially Heterogeneous Core for Large Fast Breeder Reactors

稲垣達敏*　*Tatsutoshi Inagaki*
三田敏男**　*Toshio Sanda*
川島克之**　*Katsuyuki Kawashima*
渡　孔男***　*Yoshio Watari*

電気出力1,000MWの高速増殖炉実証炉，特にタンク型炉を対象に，経済性の向上，安全性の向上，運転期間の長期化などを目標とした軸方向非均質炉心の概念設計を行なった。この炉心はプルトニウムを燃料とする炉心内の軸方向中心付近に，減損ウランを主成分とする内部ブランケットを設けたものである。この内部ブランケット配置を最適化することにより，高速増殖炉原型炉「もんじゅ」と同型の均質2領域炉心に比べて，炉心体積が約5％削減でき，燃料寿命が約20％長期化できる設計が可能である。また，軸方向非均質炉心の核特性を模擬する臨界実験を動力炉・核燃料開発事業団の委託研究により，日本原子力研究所に協力してFCAを用いて行ない，出力分布の平たん化などの基本的な核特性を検証するとともに，現行の設計手法の軸方向非均質炉心設計への適用の妥当性を確認した。

1　緒　　言

高速増殖炉の経済性及び安全性を実証するため，高速増殖炉原型炉「もんじゅ」(電気出力280MW)に続く炉として，電気出力1,000MWの実証炉の建設が計画され，その研究開発が進められている。将来の商用炉では高速増殖炉の発電コストは軽水炉と匹敵できることが不可欠であり，実証炉についても最近の設計研究では，コスト低減に重点が置かれている。この発電コストは原子炉本体の建設費と燃料サイクル費の占める割合が大きいので，炉構造のコンパクト化と燃料の長寿命化が大きな課題となっている。

日立製作所は，経済性と安全性の面で高いポテンシャルをもつ軸方向非均質炉心[1)~5)]を提案し，昭和53年度から研究開発を進めてきた。特に，昭和59年度からは3年計画の予定で，電気事業連合会とメーカーの共同研究として実証炉の設計研究が進められており，その中で軸方向非均質炉心はタンク型炉の標準炉心として採用されている。

一方，軸方向非均質炉心の炉心設計精度を評価するため，日本原子力研究所に協力してFCA(高速臨界実験装置)を用いた模擬実験を昭和58年度から3年間の予定で開始し，現在，比較評価用の均質炉心の模擬実験を含め，その主要実験がほぼ終了した段階である。

軸方向非均質炉心の研究成果の一部については既に紹介済みであるが[1),2)]，ここではタンク型実証炉を対象とした最近の設計研究と，FCAによる模擬実験の状況について報告する。

2　軸方向非均質炉心の設計研究

本研究では，タンク型炉を対象として，**表1**に示す設計条件のもとで，軸方向非均質炉心の構成を最適化した。この炉心の特性を，同一条件で設計した均質炉心と比較評価し，タンク型炉の炉心としての長所を明確にした。

2.1　炉心構成の最適化

軸方向非均質炉心では，炉心特性の評価指標としてどの特性パラメータを選ぶかによって，内部ブランケットの構成が影響を受ける。すなわち，炉心特性は内部ブランケットの直径，厚さ及び位置に依存する。タンク型炉では，原子炉構造

表1　炉心設計条件　設計条件は，実証炉を対象としたものである。

項目	条件
電気出力	1,000MW
熱出力	2,500MW
原子炉入口温度	385℃
原子炉出口温度	530℃
炉心燃料	PuO_2–UO_2
ブランケット燃料	減損UO_2
ノミナル最大線出力密度	≦430W/cm
燃料炉内滞在期間	3年
集合体ピッチ	164mm
燃料ピン外径	7.5mm
被覆管肉厚中心最高温度	
炉心	≦675℃
ブランケット	≦700℃

のコンパクト化と地震時の制御棒上下動による投入反応度の緩和及び燃料の長寿命化が重点課題である。そこで，(1) 出力分布の平たん化，(2) 燃焼に伴う出力分布変動の低減，(3) 地震時の制御棒上下動による反応度投入量の低減，(4) 燃焼反応度の低減，(5) 高速中性子束分布の平たん化，を設計目標として最適な内部ブランケットの構成を検討した。上記のうち，(1)~(4)は主に原子炉構造のコンパクト化及び物量低減に，また，(5) は主に燃料長寿命化にそれぞれ寄与するのものである。なお，(3) は特にタンク型炉で，ルーフスラブからつり下げられている制御棒と，炉容器に支持されている炉心の間の相対変動が大きくなりやすく，地震時の出力変動による燃料破損を防止するために，この相対変動による反応度投入量を小さくする必要がある。

上記設計目標を満足する軸方向非均質炉心として，種々の炉心構成を検討した。その代表例を**図1**に示す。これらの炉心は，単純なD炉心をベースにして日立製作所が提案したもので，(1) 炉心燃料の富化度の種類，(2) 内部ブランケットの層の数，(3) 内部ブランケットの形状と配置でそれぞれ特徴がある。この中で，G炉心は，出力分布平たん化の観点から提案したも

* 電気事業連合会高速増殖炉準備室　** 日立製作所エネルギー研究所　*** 日立製作所日立工場

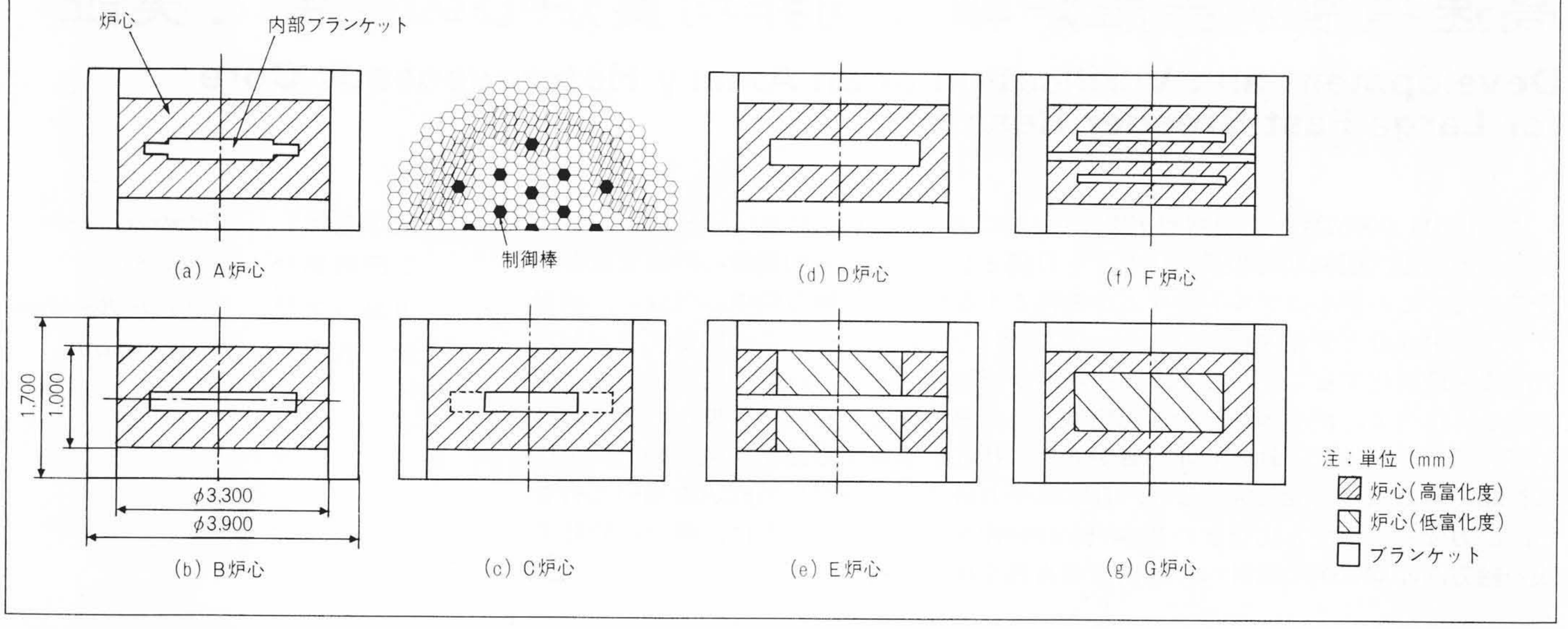


図1　軸方向非均質炉心の構成　軸方向非均質炉心は，炉心内の軸方向中心付近に減損ウランを主成分とする内部ブランケットを設けたものである。(a)に2段型内部ブランケットのA炉心を，(b)に内部ブランケット軸方向非対称配置のB炉心を，(c)に内部ブランケットを星状型にしたC炉心を，(d)に単段内部ブランケットのD炉心を，(e)に炉心燃料富化度2種類のE炉心を，(f)に内部ブランケット3層のF炉心を，(g)に内部ブランケット領域に低富化度燃料を装荷したG炉心の構成をそれぞれ示す。

ので，内部ブランケットの代わりに低富化度の燃料を装荷した領域をやや広く設けてある。本論文では，内部ブランケットを設けた軸方向非均質炉心についてまとめることにし，この炉心はここでは取り上げない。炉心構成については種々検討し，現在は，A炉心を中心に，B炉心とC炉心などと比較評価しながら詳細な検討を進めている。

A炉心[2),3)]は，内部ブランケットを，径方向ブランケット燃料集合体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し，径方向にみて炉心中央部で厚く，周辺部で薄くしてある。この炉心で，内部ブランケットの径及び厚さを変えたときの出力ピーキング係数(最大出力密度と炉心平均出力密度の比)と，燃焼による燃料集合体の出力変動幅を**図2**に示す。これから次のことが分かる。

(1)　出力分布は内部ブランケットの相対的な厚さに依存するが，厚さを増すと出力ピーキング係数を最小とする内部ブランケットの径は大きくなる。

(2)　燃焼による燃料集合体出力の変動は，内部ブランケットの径が大きいほど小さい。

図2から出力ピーキング係数及び燃焼による出力分布変動を同時に小さくするには，内部ブランケット径と炉心径の比を0.8程度，内部ブランケット厚さ(厚肉部)を20～25cmとするのがよいことが分かる。燃焼反応度〔設計目標(4)〕については内部ブランケットの体積割合に依存し，8～11%の範囲で最小となる。上記のほかの設計目標(3)，(5)については，(1)に関連するもので出力ピーキング係数の最小点が最適点に近い。以上のサーベイ結果に基づいて選定した炉心構成を**図3**(a)に示す。この内部ブランケットの寸法は出力ピーキング係数の観点で最適化されている。

B炉心は内部ブランケットを炉心中央面よりもやや下部に配置してある。これは，燃焼サイクルの初期で，余剰反応度を抑えるための制御棒が炉心の上部に集中的に挿入されるように設計したとき，炉心の下部に出力ピーキングが発生するのを防ぐことをねらったものである。すなわち，制御棒の部分挿入時の軸方向の出力ひずみを下部配置の内部ブランケットにより相殺しようとしたものである。しかし，この設計では最大高速中性子束や燃料ピン最大燃焼度及び燃料の最高温度点が，冷却材温度が高い炉心上部で発生するおそれがあり，燃料設計の面で健全性を更に確認する必要がある。

C炉心は一定厚さの内部ブランケットの一部を径方向に広げて星型とし，その広げた内部ブランケットの間に余剰反応度を抑えるための制御棒を配置している。径方向出力分布は，この広げた内部ブランケットと少数の制御棒により十分平たん化できる。また本炉心は，燃焼サイクルの初期で上記制御棒がほぼ全挿入となるので，軸方向の出力分布ひずみも小さい。このように，使用する制御棒の数を減らして原子炉運転

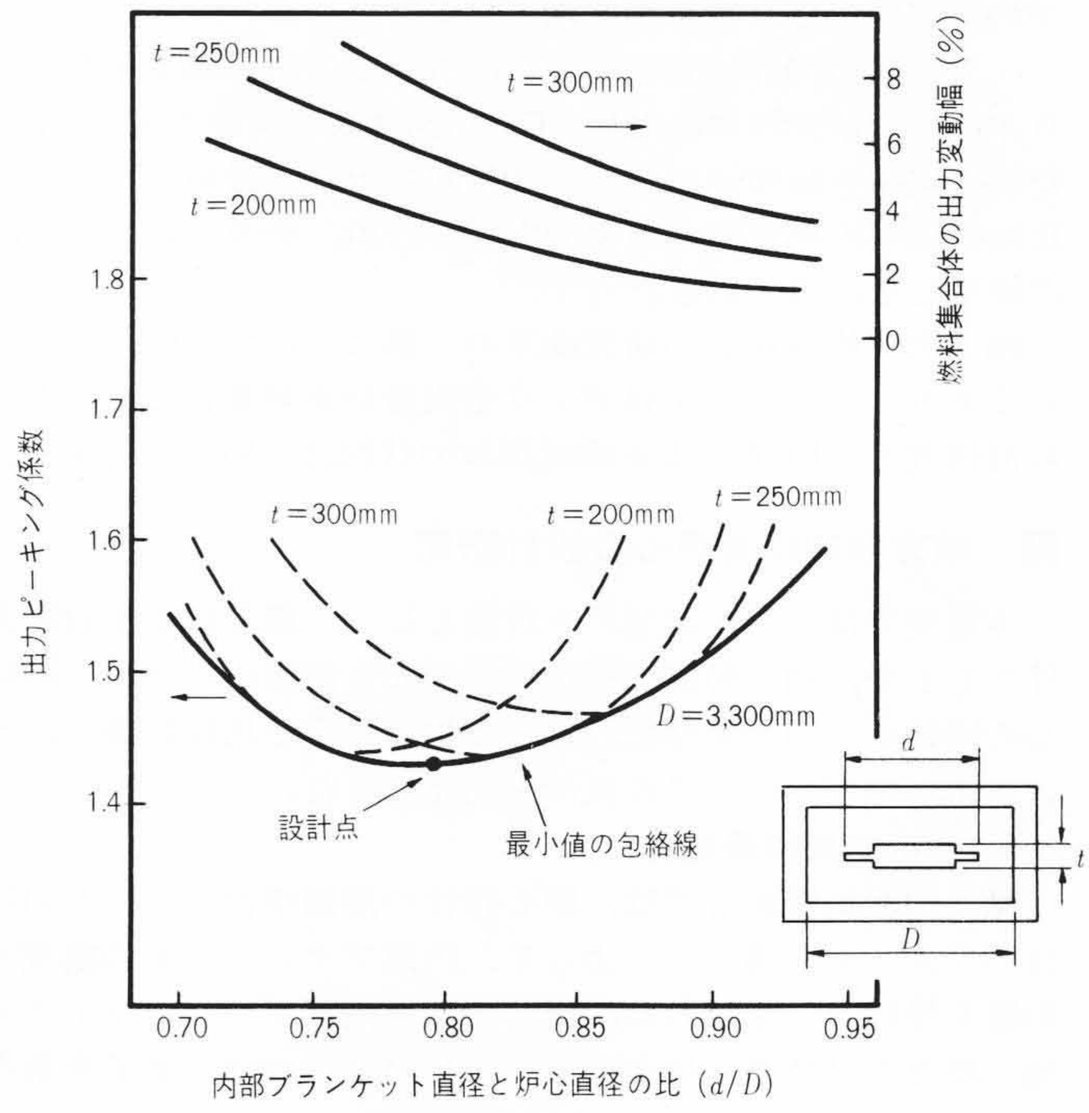
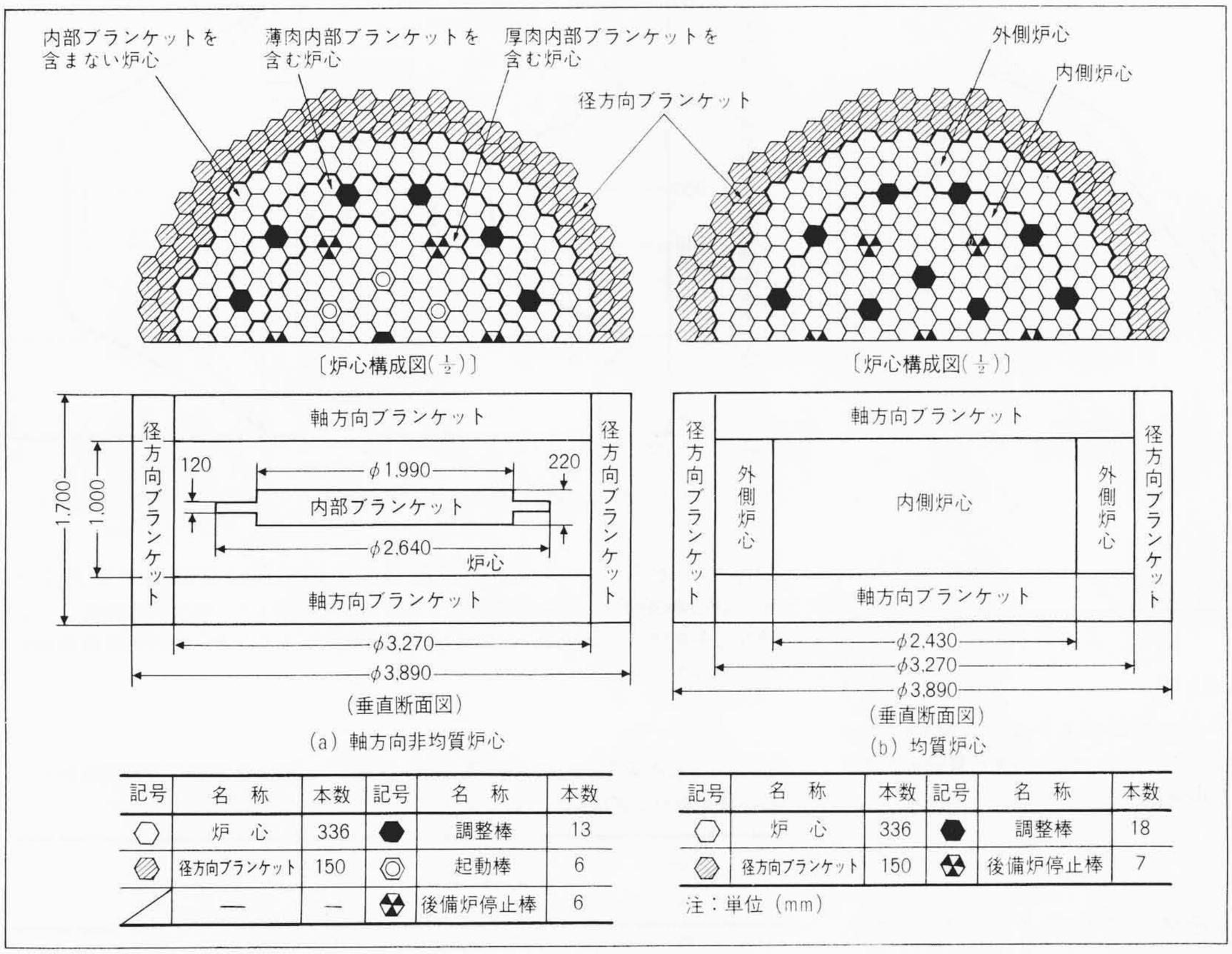


図2　出力ピーキング係数と燃料集合体の出力変動に対するブランケット厚の効果　出力ピーキング係数と燃料集合体の出力変動幅を，内部ブランケット直径と炉心直径の比の関数として表わした(A炉心)。



記号	名　称	本数	記号	名　称	本数
⬡	炉　心	336	⬢	調整棒	13
▨	径方向ブランケット	150	◎	起動棒	6
◢	—	—	☢	後備炉停止棒	6

記号	名　称	本数	記号	名　称	本数
⬡	炉　心	336	⬢	調整棒	18
▨	径方向ブランケット	150	☢	後備炉停止棒	7

注：単位（mm）

図3　軸方向非均質炉心及び均質炉心の構成図　出力分布平たん化などの面から，最適化した炉心構成要素の配置を示す。

が可能であり，地震時の制御棒上下動による反応度投入量が減少できるが，周方向の出力分布の平たん化，制御棒ワースなどの計算精度がどの程度であるか更に明確にする必要がある。

上記のようにB炉心とC炉心はそれぞれ特有のメリットがあり，A炉心とともに今後も検討を進めてゆく計画である。

2.2　炉心特性とその特長

前節で述べた軸方向非均質炉心〔**図3**(a)〕の炉心特性を均質炉心〔同図(b)〕と比較して**表2**に示す。両炉心の設計条件（**表1**）は同一である。また，両炉心の炉心燃料集合体及び制御棒の本数は同一であるが，制御棒25本の内訳は，軸方向非均質炉心で調整棒13本，起動棒6本，後備炉停止棒6本に対して，均質炉心では調整棒18本，後備炉停止棒7本である。

表2から本設計の軸方向非均質炉心は，特に均質炉心に比べて下記の利点をもっていることが分かる。

(1)　出力分布平たん化による炉心のコンパクト化

出力分布が平たんになり，最大線出力密度に余裕がある。この余裕を活用することにより，均質炉心より燃料集合体本数を約5％削減することが可能である。調整棒は径方向出力分布を平たん化するためと，燃焼による反応度劣化(燃焼反応度)を補償するために用いる。この炉心では出力分布が平たん化されているとともに，内部ブランケット内でのプルトニウム蓄積効果のために燃焼反応度が小さく，調整棒の数は均質炉心の18本から13本に削減できている。この削減できた5本の調整棒は，本設計では起動棒として使用しているが，炉停止余裕が確保できれば削減することも可能である。調整棒は，起動棒や後備炉停止棒に比べて交換頻度が高く，この交換本数を減らせるという観点からも大きなメリットである。

(2)　最大高速中性子束低減などによる燃料の長寿命化

最大中性子束密度の減少と最大燃料ピン燃焼度の減少により，燃料集合体の炉内滞在期間が約20％長期化できる可能性がある。

(3)　地震時の投入反応度の抑制による炉構造の軽量化

中性子束の軸方向分布の平たん化により，制御棒微分反応度価値〔制御棒ストローク曲線(**図4**)のこう配〕の最大値が減少する。更に調整棒本数も削減できるので，地震時の制御棒の相対変位により，原子炉に印加される反応度が減少する。その結果，タンク型炉のルーフスラブや炉心支持構造などの設計条件が緩和でき，炉構造の軽量化ができる。一つの設計例では，ルーフスラブの厚さが3 mから2 mに，原子炉容器の肉厚が75mmから50mmに減少できるとの検討例を得ている。

(4)　炉心崩壊事故時の有効破壊エネルギーの低減

高速炉の最大仮想事故と想定されている炉心崩壊事故は，一次冷却系の電源が切れてポンプが停止し，かつ制御棒によるスクラム(核反応停止)が失敗した場合に起こる可能性が考えられる極めて確率の低い事故である。この場合，非常に保守的な仮定を用いると炉心のナトリウムのボイド化と溶融燃料の移動によって正の反応度が加わり，核暴走に至るとの解

表2　炉心特性の比較　同一設計条件のもので設計した軸方向非均質炉心の特性を，均質炉心と比較したものである。

項目＼炉心	軸方向非均質	均質
燃料集合体本数	336	336
制御棒本数	25	25
炉心燃料濃縮度の種類	1	2
ノミナル最大線出力密度(W/cm)	410	428
燃焼反応度(%ΔK)	2.3	2.6
被覆管肉厚中心最高温度(℃)	668	666
最大高速中性子束(10^{15}n/cm^2·s)	2.5	3.1
制御棒上下動許容相対変位(mm)	50	20
最大Naボイド反応度($10^{-8}\Delta K/K$·cc)	1.0	1.5

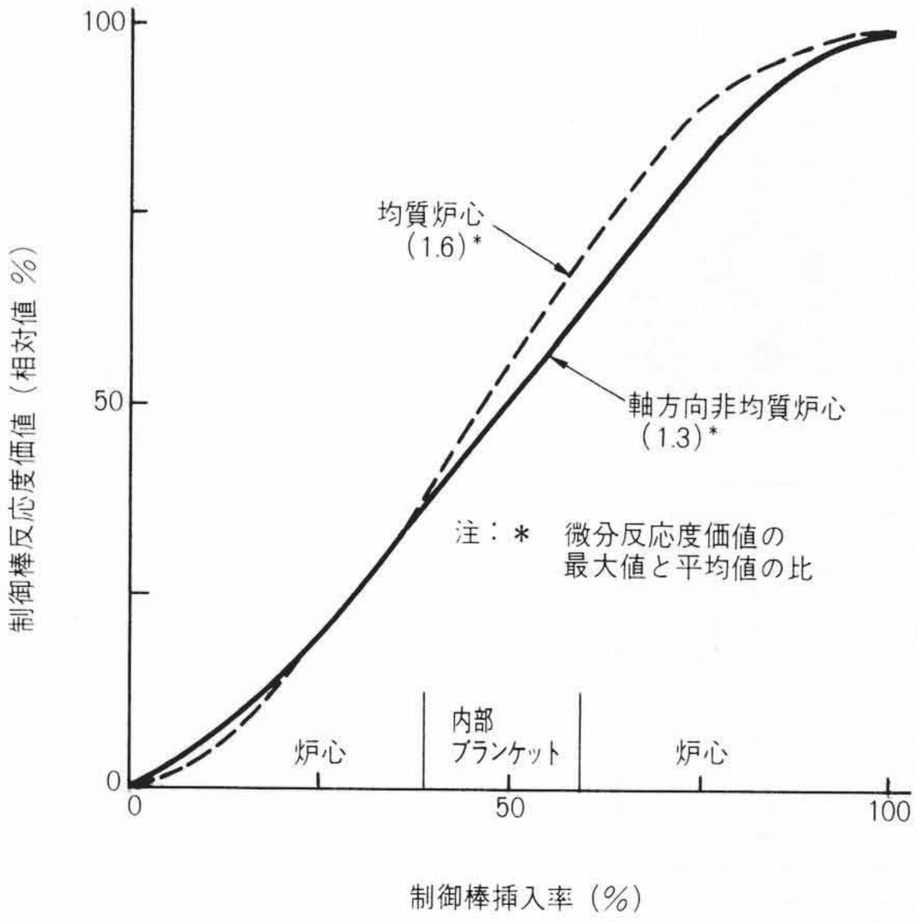


図4 軸方向非均質炉心と均質炉心の制御棒ストローク曲線 両炉心の制御棒挿入率に対する制御棒反応度価値を示す。軸方向非均質炉心のほうが，微分反応度価値の最大値と平均値の比は小さい。

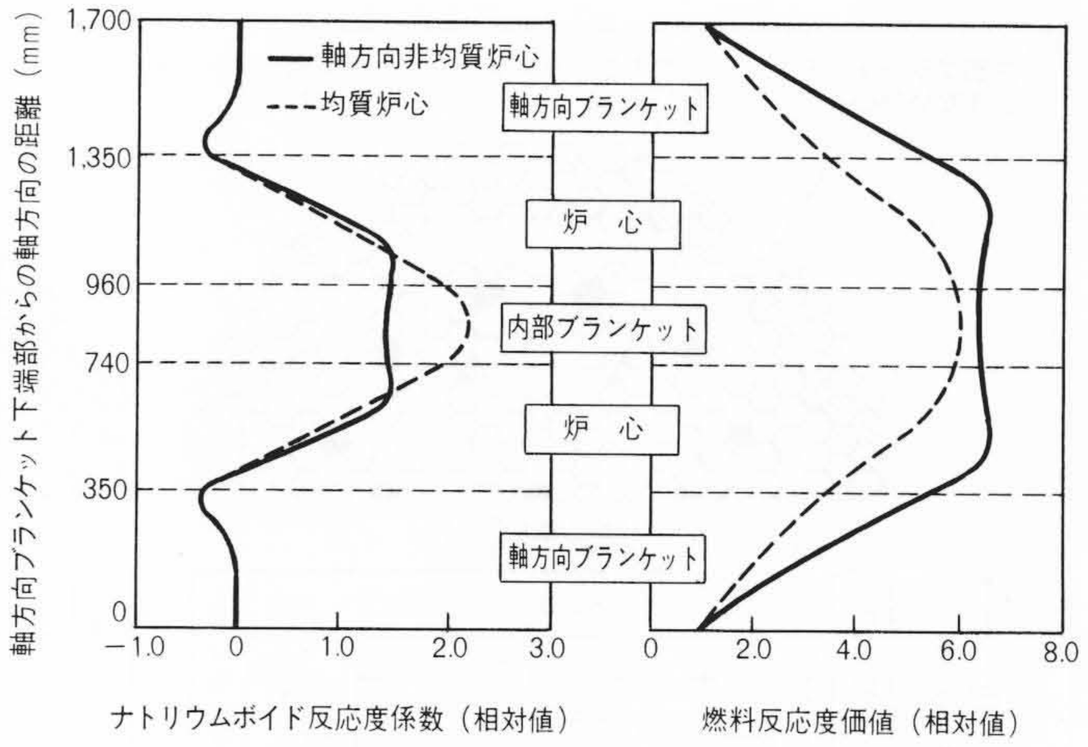


図5 ナトリウムボイド反応度係数と燃料反応度価値の軸方向分布 炉心中央付近の燃料集合体についての分布を示した。軸方向非均質炉心は，軸方向中央付近で正のナトリウムボイド係数は小さくなり，燃料反応度価値分布は平たんとなる。

表3 FCA実験とZPPR実験の比較 FCAは部分炉心模擬実験で，ZPPRは全炉心模擬実験である。

項目＼装置	FCA（日本）	ZPPR（米国）
規模	部分炉心模擬（実証炉の約$\frac{1}{10}$）	全炉心模擬（実証炉相当）
実験	●中心軸・径方向特性 ●単一制御棒効果	●3次元空間特性 ●複数本制御棒効果
解析	●核データと設計手法の妥当性評価	●設計補正値算出 ●設計精度の向上

注：略語説明 ZPPR(Zero Power Plutonium Reactor)

析結果が得られることがある。そのとき放出される機械エネルギー(有効破壊エネルギー)は炉容器を破壊する程度になりうる。

図5にナトリウムボイド反応度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，均質炉心に比べ軸方向中央付近で正のナトリウムボイド反応度が減少し，また燃料反応度価値分布が平たん化されている。その結果，事故時に炉心上部から下部へのナトリウムボイド領域の拡大及び溶融した燃料の移動による反応度増加が小さく，保守的な仮定での解析[2]でも有効破壊エネルギーは均質炉心の$\frac{1}{5}$～$\frac{1}{4}$と非常に小さい。なお，現実に近いモデルによる解析では，核暴走に至らず，たとえ炉心溶融による炉心コンパクション事故を想定した場合でも，その有効破壊エネルギーはほぼ0であるという結果を得ている。

3 臨界実験による検証

軸方向非均質炉心の研究開発の一環として，動力炉・核燃料開発事業団の委託研究により日本原子力研究所のFCAと米国大型臨界実験装置ZPPR(Zero Power Plutonium Reactor)による臨界実験を計画した。**表3**に両実験の比較を示す。FCAでは軸方向非均質炉心の基本特性を実験的に確認するとともに，設計手法の妥当性を評価することを目的とするのに対して，ZPPRでは全炉心模擬実験により3次元出力分布や制御棒干渉効果などの全炉心特性を実験的に確認するとともに，設計補正値を算出し炉心設計精度を向上することを目的とする。FCA実験は昭和58年度から3年計画で実施中であり[6]，ZPPR実験は現在，動力炉・核燃料開発事業団が，米国エネルギー省と交渉中である。

3.1 FCAによる実験

日本原子力研究所のFCAは，水平2分割型の臨界集合体であり，実験時には分割された集合体を密着させて臨界に保持する。**図6**に集合体分離時のFCA装置本体の外観を示す。各集合体は51×51の格子管(格子寸法は55.2mm×55.2mm)から構成されており，その中に炉心組成を模擬した燃料及び物質の模擬板を装てんした燃料ドロワー(**図7**)を装荷して炉心を構成する。FCA保有のプルトニウム燃料は実証炉炉心の装荷量の約$\frac{1}{10}$と少ないため，実証炉の模擬体系をそのまま組むことはできない。そこで，炉心の軸方向と径方向の特性を別々に模擬する2種類の体系を組むことにした。これをそれぞれFCA XII体系，FCA XIII体系と名付けた。この両体系はいずれも実証炉の炉心特性を模擬したテスト領域と，体系の臨界を維持するためのドライバー領域から成る。実験体系の選定では，テスト領域内でその炉心特性(中性子エネルギースペクル，中性子束分布など)が実証炉をよく模擬するように，テスト領域及びドライバー領域の組成と形状を最適化した。**図8**にFCA XII体系の選定の概要を示す。

FCA XII実験は，比較評価用の均質炉心模擬実験FCA XIとともに昭和60年5月に終了し，引き続き同年度末までFCA XIII実験を実施する計画である。以下では，FCA XII実験(非均質炉心)とFCA XI実験(均質炉心)の結果を比較して述べる。

FCA XII体系の概略図を**図9**に示す。これは炉心中央部にテスト領域(半径約300mm)を設け，その周囲を高濃縮燃料のドライバー領域で囲んだ構成である。FCA XI体系も同じ構成であるが，FCA XII体系には厚さ約200mmの内部ブランケット領域を設けている。

両体系のテスト領域の中心軸上で，軸方向核特性を主体に測定した。主な測定項目を下記に示す。

(1) ^{239}Pu，^{235}U，^{238}Uの核分裂率と^{238}Uの中性子捕獲率

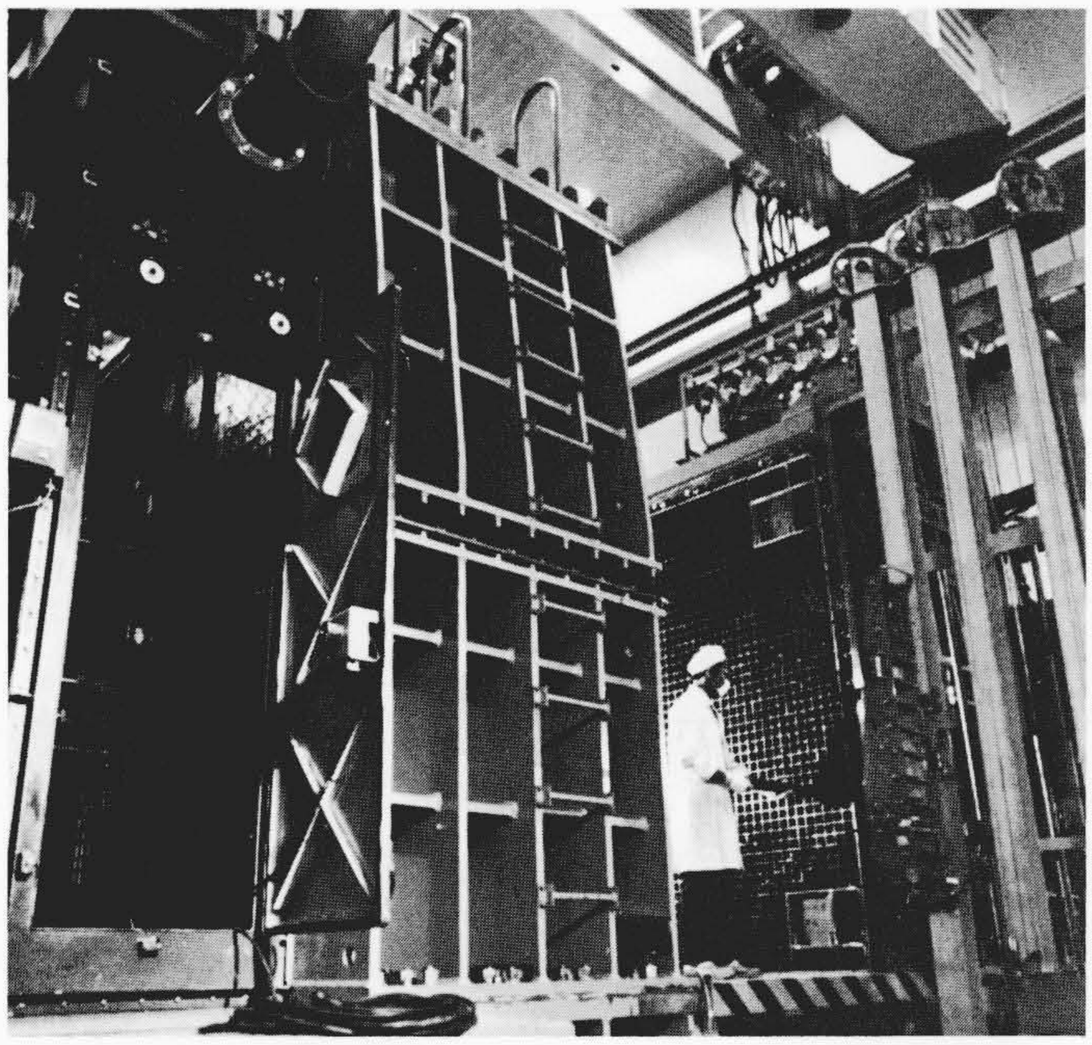


図6　高速臨界実験装置FCAの外観　FCAは水平2分割型の臨界集合体であり，実験時には分割された集合体を密着させる。

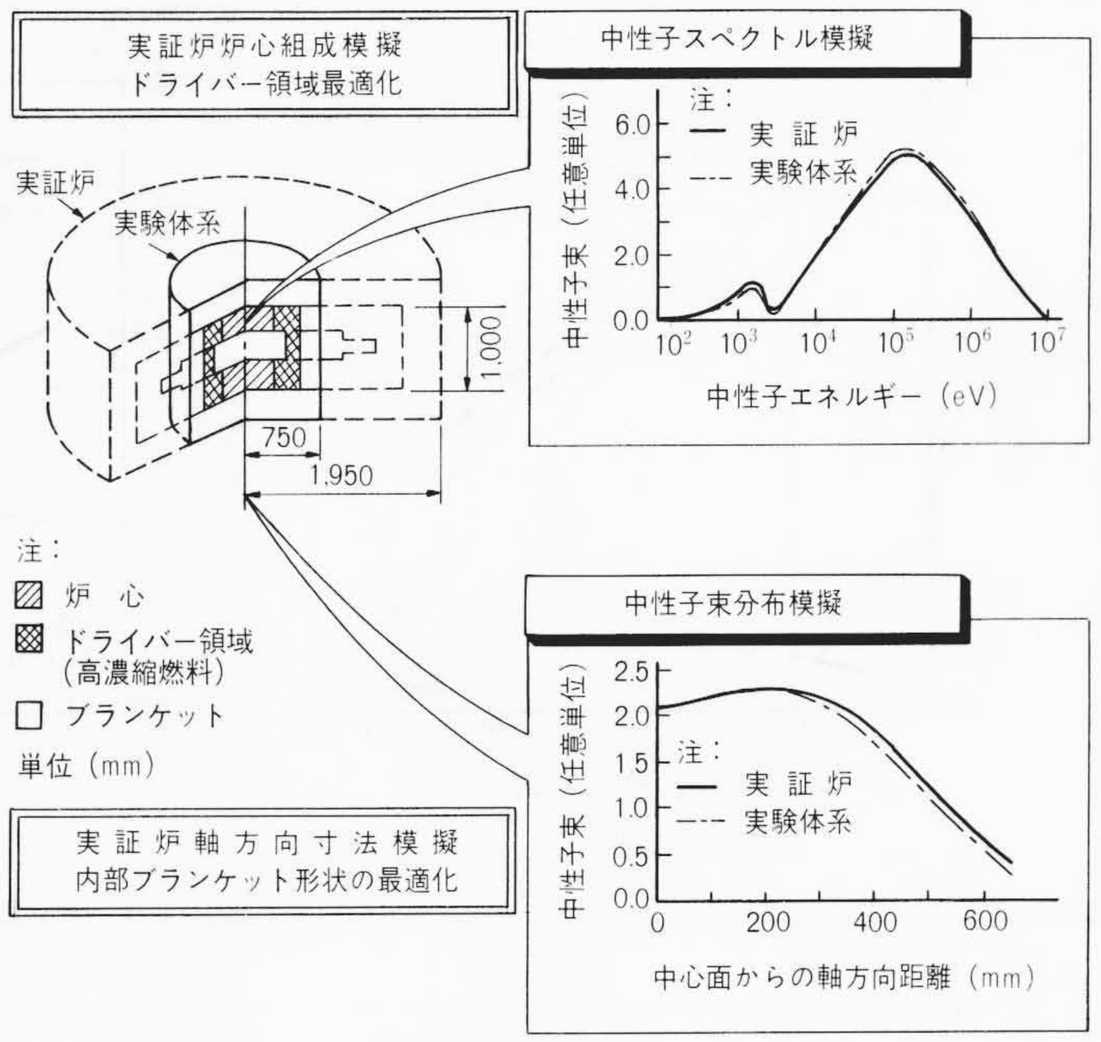


図8　実験体系の選定の概要　実験体系は，中性子エネルギースペクトルと中性子束分布などが実証炉特性を模擬するように，その組成，形状を最適化して選定した。

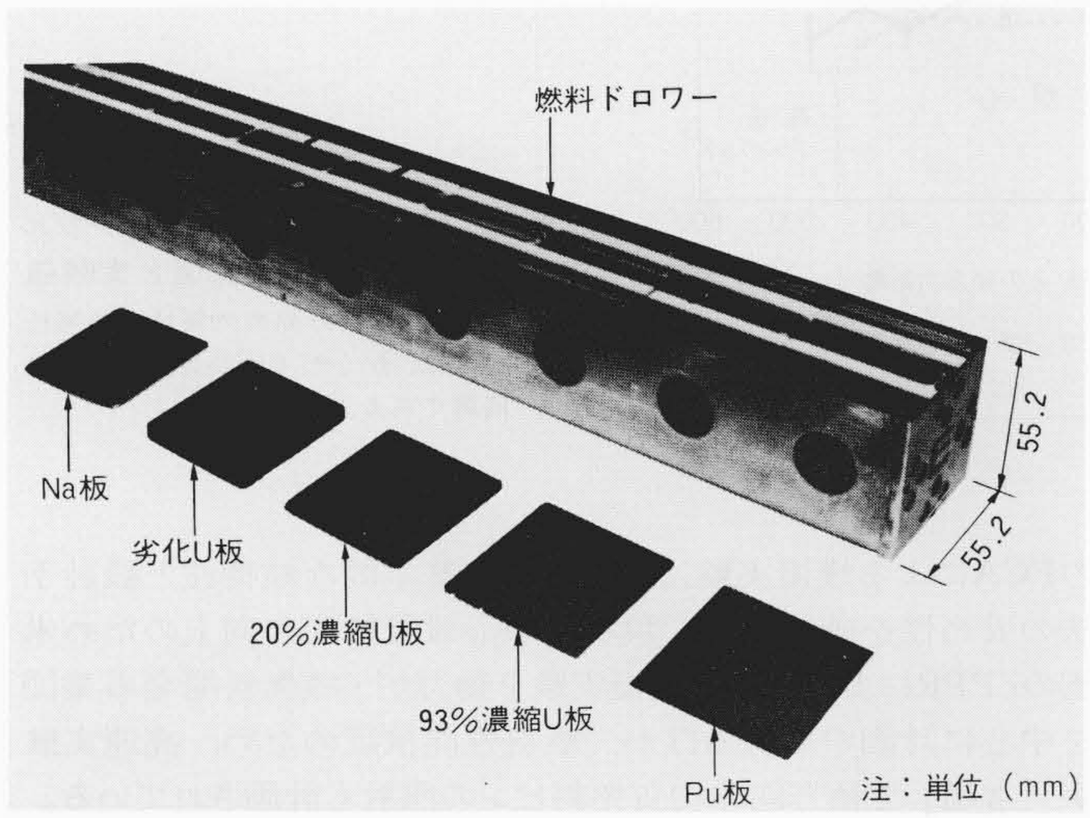


図7　燃料ドロワーと模擬板の外観　燃料ドロワーは約55mm角であり，これを図5の集合体内に装荷して炉心を構成する。この中には，炉心組成を模擬した燃料，冷却材などの模擬板が装てんされている。

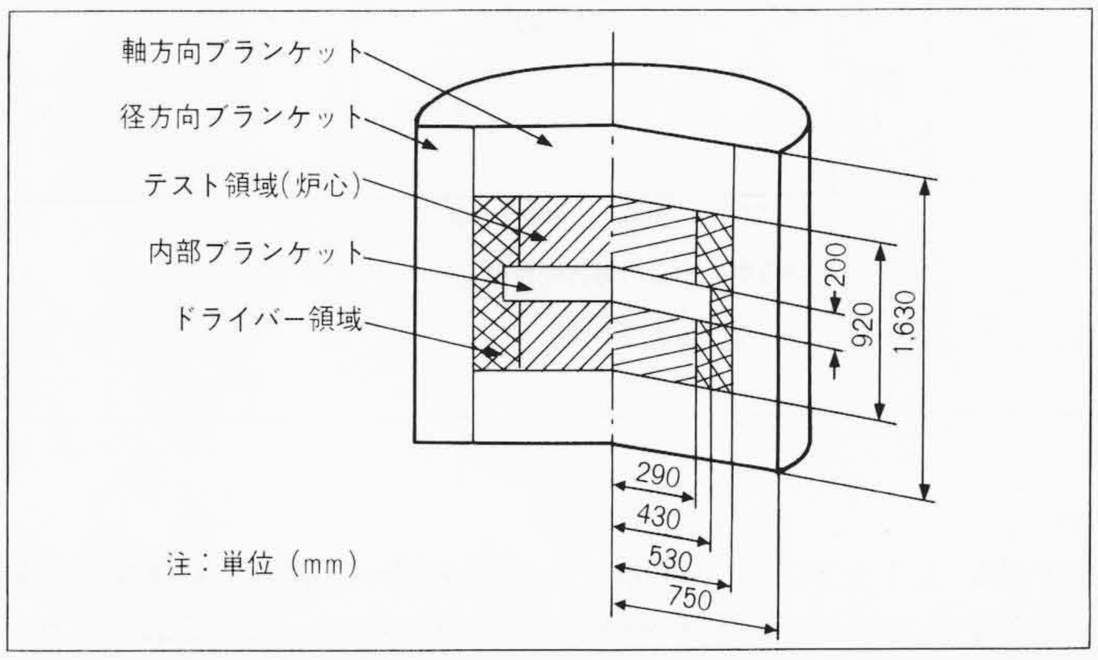


図9　FCA XII体系(軸方向非均質炉心模擬)の構成図　実験体系は，内部ブランケットを含むテスト領域を径方向にドライバー領域で囲んだ構成である。

(2)　^{239}Pu，劣化UO_2，B_4C，ステンレス鋼などのサンプル反応度価値

(3)　ナトリウムボイド反応度価値

上記の実験結果から，非均質炉心では内部ブランケトの効果により各分布共に平たん化が実験的に確認できた。このうち，主要な炉心特性である(a)出力分布と(b)制御棒微分反応度価値について以下に説明する。

(1)　出力分布

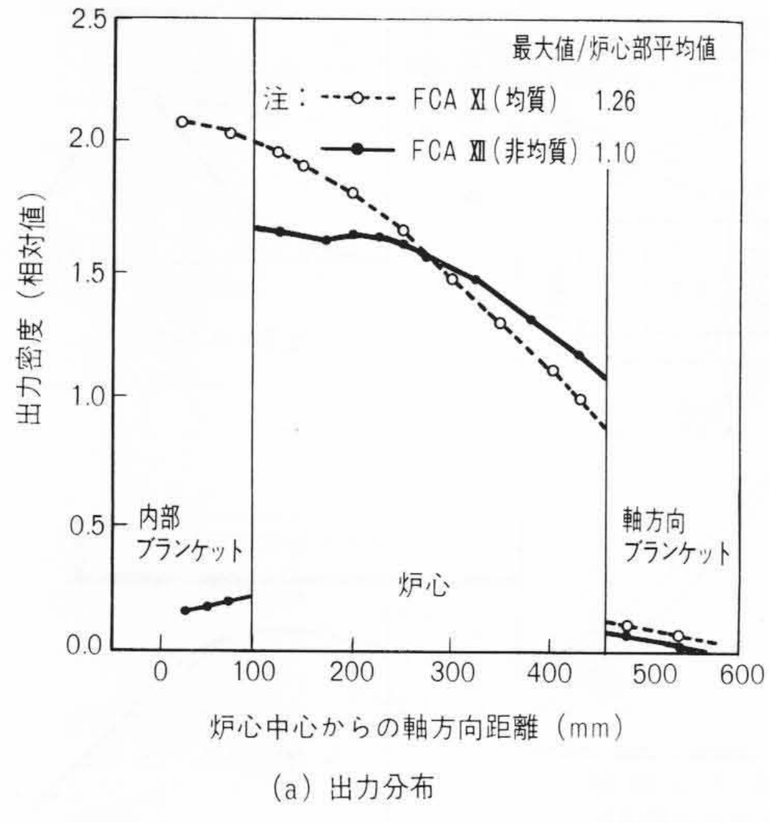
^{239}Pu，^{235}Uと^{238}Uの反応率分布から求めた炉心中央での軸方向出力分布を**図10**(a)に示す。炉心部での各核種の出力への寄与は，^{239}Puが85～90%，^{238}Uが10～15%，^{235}Uが１～２%である。なお，同図(a)の両分布の軸方向積算出力は，先に**図3**に示した均質炉心と軸方向非均質炉心の中心隣接燃料の集合体出力を用いてそれぞれ規格化した。前述の出力ピーキング係数の目安となる(最大出力)/(炉心部平均出力)を比較すると，均質炉心と非均質炉心でそれぞれ1.26と1.10であり，非均質炉心は約15%低減される。これは，軸方向非均質炉心では^{239}Puの核分裂率の分布が平たん化するとともに，^{238}Uの，核分裂率が内部ブランケット近傍で低減したことが大きな要因である。

(2)　制御棒微分反応度価値

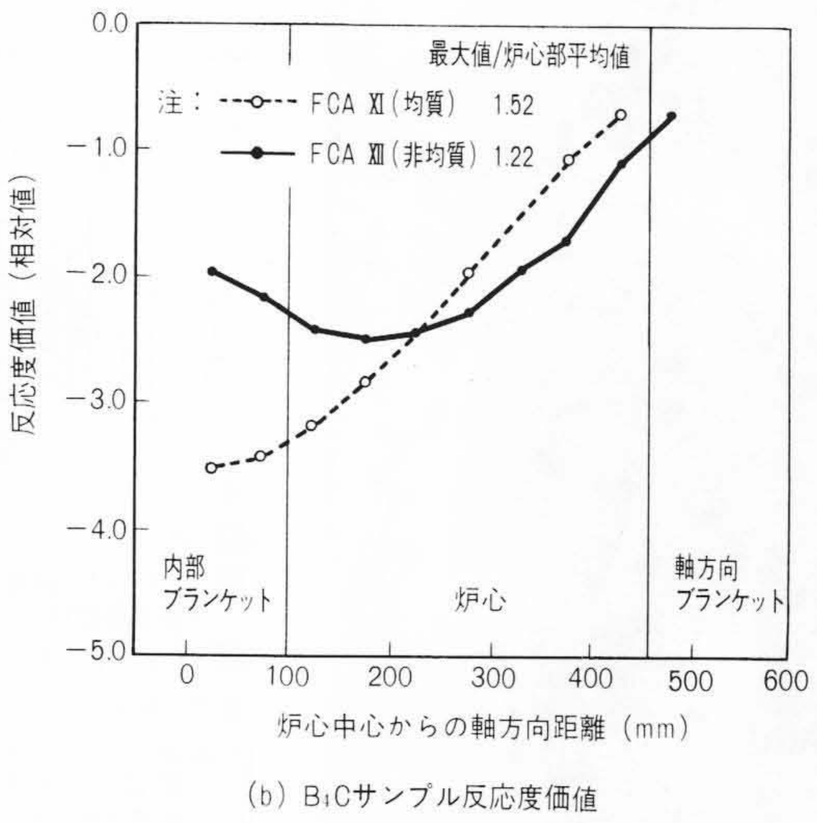
B_4Cサンプル反応度価値の分布は，制御棒の微分反応度価値分布に相当する。**図10**(b)にこの分布を示す。これは，地震時の制御棒と炉心間の相対変位による炉心投入反応度の指標となるもので，(最大値)/(炉心部平均値)を比較すると，均質炉心と非均質炉心でそれぞれ1.52と1.22であり，約25%減少している。

3.2　実験解析

解析では設計計算と同様に中性子拡散計算を基準計算とした。なお，臨界実験特有の模擬物質板による非均質効果や，実験体系の中性子輸送効果も考慮した。

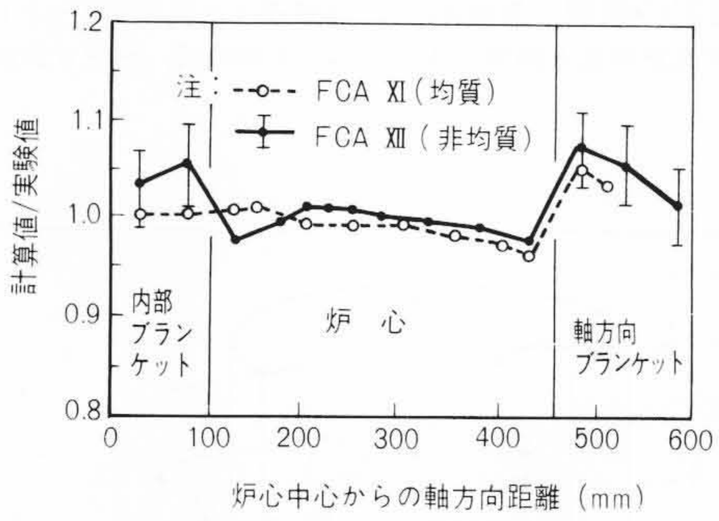


(a) 出力分布

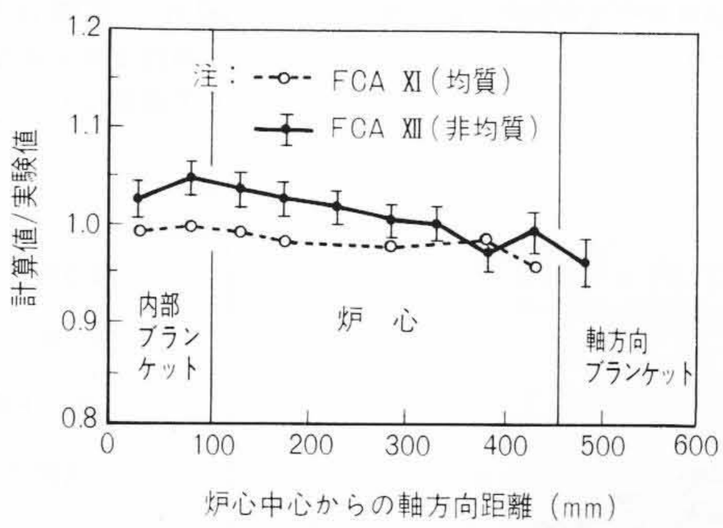


(b) B_4Cサンプル反応度価値

図10 出力分布とB_4Cサンプル反応度価値の実験値 軸方向非均質炉心は，均質炉心に比べて軸方向分布が平たん化している。



(a) 出力分布



(b) B_4Cサンプル反応度価値

図11 出力分布とB_4Cサンプル反応度価値の計算値と実験値の比較 軸方向非均質炉心の解析精度は，炉心部では均質炉心とほぼ同等である。

FCA XIとFCA XII体系の実験解析の結果，実効増倍率(臨界量に相当)の両体系の差は0.1%以内であり，反応率，サンプル反応度価値，ナトリウムボイド反応度価値の軸方向分布の解析精度は両体系でほぼ同等であることが確認できた。**図11**(a)に反応率分布から換算した出力分布の計算値と実験値の比(C/E値)を示す。炉出力への寄与の大きい炉心部では両体系共±3%以内の精度であり，設計の要求精度(5%)を満足している。なお，両体系共に内部及び軸方向ブランケット部でやや過大評価しているが，この領域の出力は絶対値として小さく設計上問題はない。同図(b)にB_4Cサンプル反応度価値のC/E値を示す。両体系共にやや過大評価(C/E値：1.0～1.05)の傾向があるが，ほぼ同等の精度である。

以上の結果，均質炉心と非均質炉心の軸方向核特性の解析精度はほぼ同等であり，均質炉心を対象に開発されてきた現行の設計手法の非均質炉心設計への適用の妥当性が確認できた。今後は，ZPPR実験により3次元特性についてもその解析精度を確認し，設計に直接反映させて設計精度を向上してゆく計画である。

4 結　言

タンク型実証炉を対象として，経済性向上に重点を置いた軸方向非均質炉心の構成の最適化を実施した。同一条件で検討した均質炉心と比較して，この炉心が経済性と安全性に優れた炉心概念であることを示した。また，日本原子力研究所のFCAによる模擬実験により，その基本的な核特性と設計手法の妥当性を確認した。現在，炉心設計精度の向上のため米国のZPPRによる全炉心模擬実験を動力炉・核燃料開発事業団を中心に計画中であるほか，燃料性能検証のため，高速実験炉「常陽」で軸方向非均質燃料ピンの照射も計画されている。このような実証試験を通して実績を積むことにより，実証炉の早期実現を目指したい。

終わりに，FCA実験の実施に当たり，御指導と御協力をいただいた動力炉・核燃料開発事業団及び日本原子力研究所の関係各位に対し，深謝の意を表わす次第である。

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**，10，719～724(昭55-10)
2) 井上，外：高速増殖炉大型高性能炉心の開発，日立評論，**64**，8，607～610(昭57-8)
3) K. Inoue, et al.：A Fast Breeder Core with Internal Blanket, Trans. Am. Nucl. Soc., 33, 862(1979)
4) K. Kawashima, et al.：A Fast Reactor Core Concept Using an Internal Blanket, Nucl. Tech., 55, 713(1981)
5) T. Inagaki, et al.：Control Rod Worth and Related Nuclear Characteristics of an Axially Heterogeneous LMFBR Core, Tras. Am. Nucl. Soc., Vol. 45, 764(1983)
6) 飯島，外：FCAによる大型軸方向非均質炉心の炉物理研究(III)，JAERI-M 85-045(1985)