

JAERI - M
88-051

改良船用炉の試設計の評価(3)

— 炉心特性 —

1988年3月

安保 則明・横村 武宣

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

改良船用炉の試設計の評価(3)

- 炉心特性 -

日本原子力研究所原子力船研究開発室

安保 則明・横村 武宣

(1988年2月16日受理)

本報告書は、昭和58～61年度に実施した改良船用炉の試設計によって得た3炉型式4炉心（半一体型炉2炉心、一体型炉、自己加圧一体型炉）について、炉心構成、主要目及び炉心特性を比較検討したものである。炉心特性として、炉心寿命、出力密度、燃焼度の他、反応度制御方式、反応度停止余裕及び余剰反応度などについて比較検討を行ない、各炉心の特徴を明らかにした。

その結果、一体型炉及び半一体型炉（評価炉心）が、長寿命（4年）、高出力密度（50～61 kW/ℓ）、高燃焼度（30,000～32,000 MWD/t）を満足した設計結果となっており、現状技術における最も高性能な船用炉炉心であることが明らかになった。

Evaluation of the Trial Design Studies for
an Advanced Marine Reactor (3)

— CORE SPECIFIC CHARACTERISTICS —

Noriaki AMBO and Takeyoshi YOKOMURA

Office of Nuclear Ship Research and Development
Japan Atomic Energy Research Institute
Toranomon, Minato-ku, Tokyo

(Received February 16, 1988)

JAERI have carried out four core designs for three different type reactors (Semi-Integrated, Integrated and Integrated (self-pressured) type reactors), as the trial designs of an Advanced Marine Reactor for three years (1983 ~ 1985). This report describes the result of comparison and studies of the core specific characteristics of these four cores, which include core concept, specifications, core life, specific power density, burn-up, reactivity control and etc.

In conclusion, it was found that the Integrated type reactor core and the Semi-Integrated type reactor core designs satisfy the conditions of long core life (four years), high specific power density (50 ~ 61 kw/l) and high burn-up (30,000 ~ 32,000 MWD/t), so these two cores will be optimum designs based on the present technologies.

Keywords: Core, Power Density, Burn-up, Reactivity Control, Marine Reactor, Design

目 次

1. 序 言	1
2. 炉心構成・主要目比較評価	1
2.1 概 要	1
2.2 半一体型炉（試設計）の炉心構成	3
2.3 半一体型炉（評価炉心）の炉心構成	4
2.4 一体型炉の炉心構成	5
2.5 自己加圧一体型炉の炉心構成	6
3. 炉心特性比較評価	18
3.1 反応度制御方式	18
3.2 燃 料	21
3.3 出力分布及びピーキングファクタ	21
3.4 燃 焼 度	24
3.5 反応度停止余裕（ワンロードスタック基準の適合性）	25
3.6 余剰反応度（制御棒炉心内固着時の運転可能性）	25
3.7 キセノンオーバーライド（炉緊急停止時の再起動可能性）	26
3.8 可燃性毒物	28
3.9 制御棒及び制御棒駆動装置	29
4. 研究開発項目及び課題	61
4.1 炉心の研究開発項目及び課題	61
4.2 今後の炉心開発目標	61
5. 結 言	64

Contents

1. Introduction	1
2. Comparison and Evaluation of Core Concepts and Specifications	1
2.1 Conception	1
2.2 Core Concept of Semi-Integrated Type Reactor (Trial Design Core)	3
2.3 Core Concept of Semi-Integrated Type Reactor (Optimum Design Core)	4
2.4 Core Concept of Integrated Type Reactor	5
2.5 Core Concept of Integrated (Self-Pressured) Type Reactor	6
3. Comparison and Evaluation of Core Specific Characteristics ...	18
3.1 Reactivity Control	18
3.2 Fuel	21
3.3 Power Distribution and Peaking Factor	21
3.4 Burn-Up	24
3.5 Shut-Down Margin	25
3.6 Excess Reactivity	25
3.7 Xenon Override	26
3.8 Burnable Poison	28
3.9 Control Rod and Control Rod Driving Mechanism	29
4. Research and Development Items	61
4.1 Research and Development Items of Core	61
4.2 Target for Research and Development in Future	61
5. Conclusions	64

1. 序 言

原子力船研究開発室は、昭和 58 年度から 60 年度にわたり、改良船用炉に関する試設計研究を実施した。これは小型・軽量で安全性、信頼性、経済性の優れた船用炉（改良船用炉）としての適性を有する炉型式を明らかにすることを目的として、現状技術で実現可能な複数の船用炉型式について、同一仕様のもとでの設計研究を行ない、それらの特徴、性能等を明らかにしたものである。

設計の対象とした炉型式は、半一体型（加圧水）炉、一体型（加圧水）炉及び自己加圧一体型（加圧水）炉の 3 炉型で、それぞれわが国固有の技術及びフランス、西ドイツとの提携技術を基盤としている。

昭和 61 年度には、試設計研究の成果を踏まえて、改良船用炉の研究開発を進めるに当たり、将来の船用炉として最も優れた炉型を選択し、合わせて必要な研究開発課題を明らかにすることを目的として、3 つの試設計炉につき、以下の項目からなる比較、検討、評価を行なった。

- (1) 試設計炉
- (2) 燃料特性 (I) 丸棒燃料
" (II) キャラメル燃料
- (3) 炉心特性
- (4) 蒸気発生器特性
- (5) 格納特性
- (6) 動特性
- (7) 遮蔽性能 (I) 遮蔽設計の妥当性
" (II) 遮蔽の最適化に関する調査
- (8) 経済性

さらに、船用炉用途に関する調査を実施し、船用炉用途を踏まえた試設計の総合評価を実施し、用途に適合する炉型を明らかにするとともに次のステップで実施する設計研究等の目標性能、研究開発の進め方等を明らかにする。

本研究は、これら一連の設計評価研究のうち、炉心特性に関するものである。

2. 炉心構成・主要目比較評価

2.1 概 要

本研究は、試設計 3 炉型式 4 炉心について、次に示す各炉心特性の比較・検討を実施したものである。各炉型式の炉プラント全体配置図及び原子炉本体組立図を、図 2.1 から図 2.6 に示す。

1. 序 言

原子力船研究開発室は、昭和 58 年度から 60 年度にわたり、改良船用炉に関する試設計研究を実施した。これは小型・軽量で安全性、信頼性、経済性の優れた船用炉（改良船用炉）としての適性を有する炉型式を明らかにすることを目的として、現状技術で実現可能な複数の船用炉型式について、同一仕様のもとでの設計研究を行ない、それらの特徴、性能等を明らかにしたものである。

設計の対象とした炉型式は、半一体型（加圧水）炉、一体型（加圧水）炉及び自己加圧一体型（加圧水）炉の 3 炉型で、それぞれわが国固有の技術及びフランス、西ドイツとの提携技術を基盤としている。

昭和 61 年度には、試設計研究の成果を踏まえて、改良船用炉の研究開発を進めるに当たり、将来の船用炉として最も優れた炉型を選択し、合わせて必要な研究開発課題を明らかにすることを目的として、3 つの試設計炉につき、以下の項目からなる比較、検討、評価を行なった。

- (1) 試設計炉
- (2) 燃料特性 (I) 丸棒燃料
" (II) キャラメル燃料
- (3) 炉心特性
- (4) 蒸気発生器特性
- (5) 格納特性
- (6) 動特性
- (7) 遮蔽性能 (I) 遮蔽設計の妥当性
" (II) 遮蔽の最適化に関する調査
- (8) 経済性

さらに、船用炉用途に関する調査を実施し、船用炉用途を踏まえた試設計の総合評価を実施し、用途に適合する炉型を明らかにするとともに次のステップで実施する設計研究等の目標性能、研究開発の進め方等を明らかにする。

本研究は、これら一連の設計評価研究のうち、炉心特性に関するものである。

2. 炉心構成・主要目比較評価

2.1 概 要

本研究は、試設計 3 炉型式 4 炉心について、次に示す各炉心特性の比較・検討を実施したものである。各炉型式の炉プラント全体配置図及び原子炉本体組立図を、図 2.1 から図 2.6 に示す。

- 炉心構成及び主要目
- 炉心特性
 - ① 反応度制御方式
 - ② ピーキングファクタ（出力分布）
 - ③ 燃焼度
 - ④ 炉停止余裕（ワンロードスタック時の炉停止余裕）
 - ⑤ 余剰反応度（制御棒炉心内固着時の運転可能性）
 - ⑥ Xe オーバライド（炉緊急停止時の再起動可能性）
 - ⑦ 可燃性毒物
 - ⑧ 制御棒及び制御棒駆動装置
- 研究開発項目及び課題

なお、3炉型式のうち、半一体型炉については以下に示すように出力密度、燃焼度について、炉心を評価するためのベースとなる出力密度、燃焼度の数値レベルを一体型炉と同程度とするために行なった「炉心及び炉プラントの最適化設計」の結果の炉心（以下、半一体型炉（評価炉心）という）についても比較、検討を行なう。

（半一体型炉（評価炉心）について）

試設計では、次の試設計比較に示すように各炉心の性能は異なった設計思想に基づいて設計されたため、炉心を評価するためのベースとなる出力密度、燃焼度の数値レベルが揃っていなかった。

そのため、炉心設計の設計思想及び具体的条件を合わせる必要が生じ、試設計の調整として、半一体型炉について「炉心の最適化設計」を61年度に実施し、出力密度及び燃料度の設計ベースを合わせた「半一体型炉（評価炉心）」の炉心設計を行なった。

（試設計3炉型の炉心設計結果比較：設計思想の相違）

- 燃料交換期間

炉型式	半一体型炉	一体型炉	自己加圧一体型炉
燃料交換期間	4年	4年	3年
	（シャフリング無し）	（同左）	（同左）

燃料交換期間（炉心寿命）は、自己加圧一体型炉のみが他の2炉型と異なり3年と短く、原子力船の定検間隔である4年とマッチングしていない。

- 出力密度及び燃焼度

炉型式	半一体型炉	一体型炉	自己加圧一体型炉
平均出力密度（KW / ℓ）	33.8	50.4	55
平均燃焼度（MWD / tU）	18,000	30,400	19,000

出力密度は半一体型炉のみが他の2炉型に比べて非常に低く、燃焼度は一体型炉のみが非常に高い値となっている。

・燃料形状

炉型式	半一体型炉	一体型炉	自己加圧一体型炉
燃料形状	丸棒	板状 (キャラメル)	丸棒

各炉心（4炉心）の主要目を表2.1に炉心構成を図2.7～2.10に示す。

表2.1より次のような各炉心の違いを知ることができる。

各炉心の燃料集合体数は、半一体型炉は試設計が37体、評価炉心が37体、一体型炉が32体、自己加圧一体型炉が16体と異なる。また、制御棒駆動装置（CRDM）は、それぞれ21、21、12（制御棒数は24本）、16基であり、制御棒型式は、一体型炉が十字型であり、その他は全てクラスタ型である。

燃料集合体数は、制御棒バンク分け、制御棒型式、CRDM寸法及び反応度の制限と余裕によって同出力条件であっても変わってくる。

一般に、燃料集合体数が少ないと、制御棒も少なく、従って、制御棒1本当りの反応度価値も大きくなり、ワンロッドスタック時の反応度が大きくなり、また逆に1本が炉内に固着時の余剰反応度が小さくなる。一方、集合体数や制御棒（CRDM）を増すことは経済性上から好ましくない。従って、制御棒のみではなく可燃性毒物（BP）をいかに使うかが重要である。なお、自己加圧一体型炉は炉心寿命が3年と短く少ない燃料集合体数となっている。

可燃性毒物（BP）については、全ての炉型式とも採用しており、その材質は長期反応度特性に優れているガドリニア（ Gd_2O_3 ）を使用している。BP型式は、半一体型炉が燃料中に混合しているのに対し、両一体型炉はアルミナとの混合BP棒タイプであり、別置きとしている。また、半一体型炉（評価炉心）は、両タイプの可燃性毒物を採用している。また、その濃度及び軸方向の配置にも工夫がなされ、出力分布の歪を少なくしている。なお、ケミカルシム（一次冷却中のポロン）は自己加圧一体型炉のみ使用している。

以下に、各炉心について炉心構成を記述する。

2.2 半一体型炉（試設計）の炉心構成

炉心は図2.1の配置に示すように37体の燃料集合体から構成される。各燃料集合体は19×19の配列をした297本の燃料棒と16本のRCC案内シンプルから成っている。

燃料棒は低濃縮された二酸化ウランのペレットから成り、冷間加工されたジルカロイ管で被覆され、ヘリウムガスが加圧封入してある。RCC案内シンプルの材質はジルカロイである。

炉心の構成及び特性については表2.1にまとめてある。

(1) 燃料濃縮度及び装荷方式

本炉心では2種類の濃縮度の燃料による2領域燃料装荷を行なう。濃縮度の低い燃料（第1領域）で中央部領域を構成し、高い濃縮度の燃料（第2領域）はその外側に同心円状に配列される。領域1、2の濃縮度はそれぞれ3.7wt%、4.7wt%である。燃料装荷方式を図2.7に示す。

(2) 可燃性毒物（BP）

本炉心では過剰反応度を制御するBPとしてガドリニアを用いる。ガドリニアはサイクル末期の反応度損失が少なく、燃料中に混入されるために従来型BPのように使用後固体廃棄物とならない等の長所を有する。

燃料集合体中のガドリニア入り燃料棒は、図 2.11 に示した配置であり、燃料集合体内の出力分布がなるべく平坦になるように決められた。

ガドリニア入り燃料の炉心内配置は図 2.7 の通りであり、総本数は 900 本である。

(3) 制御棒

炉心内には 21 体の制御棒クラスタが配置される。制御棒吸収材の材質は B_4C であり、ほう素は $B-10$ の同位体存在比 19.8 at % の天然ほう素を用いた。吸収材の被覆管の材質はステンレスである。制御棒の炉心内配置を図 2.7 に示す。

2.3 半一体型炉（評価炉心）の炉心構成

炉心は 37 体の燃料集合体から構成される。各燃料集合体は 19×19 の配列をした 313 本の燃料棒と 12 本の RCC 案内シンプルから成っている。

燃料棒は低濃縮された二酸化ウランのペレットから成り、冷間加工されたジルカロイ管で被覆され、ヘリウムガスが加圧封入してある。RCC 案内シンプルの材質はジルカロイである。

炉心の構成及び特性については表 2.1 にまとめてある。

(1) 燃料濃縮度及び装荷方式

本炉心では 2 種類の濃縮度の燃料による 2 領域燃料装荷を行なう。濃縮度の低い燃料（第 1 領域）で中央部領域を構成し、高い濃縮度の燃料（第 2 領域）はその外側に同心円状に配列される。領域 1, 2 の濃縮度はそれぞれ 5.7 wt %, 6.7 wt % である。燃料装荷方式を図 2.8 に示す。

(2) 可燃性毒物（BP）

本炉心では過剰反応度を制御するBPとしてガドリニアを用いる。

本炉心でのガドリニアの使い方としては、燃料の中に混入して用いるタイプと燃料の中に混入せず、ガドリニアのみでBP棒を形成し（アルミナとの混合物）、RCC案内シンプルの中に挿入して用いるタイプ（ガドリニアBP棒）との2種類のタイプを採用している。

ガドリニア混入タイプの燃料棒は、本来、サイクル末期での反応度損失が少なく、従来型のBPのように使用後固体廃棄物とならない等の長所を有しており、このような特性をベースにガドリニア混入燃料棒について評価したが、そこでは、燃料集合体当たり一律 21 本必要との結果になっている。しかしながら、多量にガドリニアを使用した為に炉心での出力分布の偏りにより、炉心周辺、炉心上端及び下端での燃え残りの影響が大きくなり所定の燃焼度を得られないことがわかり、結局、ガドリニア混入棒とガドリニアBP棒の本数及び配置を燃焼度と出力分布の平坦化の観点より図 2.8 に示す通りとした。燃料集合体内での配置を図 2.12 に示す。又、軸方向においてもガドリニア混入燃料棒、ガドリニアBP棒共に、上端及び下端のそれぞれ 11 % をガドリニアを含まないものとした。即ち、燃料有効長 121 cm の中央部 94.1 cm のみにガドリニアを含むものとしている。

(3) 制御棒

制御棒クラスタは、第1章で記述したように21体、炉心内に挿入するが、この内、制御用制御棒クラスタとしては、燃焼に伴う反応度変化、出力変化による反応度補償ができるように体数を決定し、出力分布の平坦化を考慮してバンク分けと配置を決定した。残りの制御棒クラスタは、停止用としている。これらの炉心内配置を図2.8に示す。

尚、制御棒吸収材の材料は、 B_4C であるが、上に記したようにガドリニアを上、下端部減らしたことにより、天然のほう素では停止余裕が厳しくなる為、ほう素内の B^{10} を80at%濃縮したものを使用することとした。

被覆管の材料はステンレスである。

2.4 一体型炉の炉心構成

本炉心は表2.1、図2.9に示すように32体の燃料集合体、24本のハフニウム製十字型制御棒及び8本のL型可燃性毒物棒により構成され、炉心有効高さ1,432mm等価直径1,329mmであり、炉心平均出力密度は約50 kW/lである。

炉心平均出力密度は、本炉心により1,108日の実効全出力日数(EFPD)が得られる事、炉心内の UO_2 体積割合及び燃料燃焼度に対する制限を考慮して選定し、その場合の比出力が許容し得る範囲内である事を確認して決定した。

燃料集合体は3乃至4体の燃料束により構成され、各集合体への流量配分を確実にし、かつ、剛性を高める為、周囲をジルカロイ側板で囲った閉構造とした。また、各集合体中央部には制御棒挿入の為の十字型通路がジルカロイ板により構成されている(図2.13参照)。

各燃料束は13枚の燃料板を含み、燃料束自体も周囲をジルカロイ板で囲った閉構造とした。

各燃料板は、 $21.1 \times 21.1 \times 2.5$ mmの UO_2 キャラメルを巾方向に4個、高さ方向に62個、計248個含み、燃料板厚さはジルカロイ被覆材を含め3.3mmである。但し、各燃料束中の13枚の燃料板の内2枚は、巾方向両端の UO_2 キャラメルの一部を($Al_2O_3 + Gd_2O_3$)焼結体の固体可燃性毒物で置き換えている(炉心上下両端の一部は可燃性毒物を入れず、 UO_2 キャラメルのままである)。

燃料束は、燃料濃縮度及び可燃性毒物濃度の組合せに応じて、(5.81%, 2,100mg Gd_2O_3/cc)、(6.91%, 2,100mg Gd_2O_3/cc)及び(6.91%, 900mg Gd_2O_3/cc)の3種類とし3領域炉心とした。

(1) 燃料

本炉心に使用する燃料はキャラメル燃料である。即ち、縦 $21.1 \times$ 横 $21.1 \times$ 厚さ 2.5 mmの直方体の UO_2 焼結体をタイル状に並べ、ジルカロイで被覆した板状燃料である。各々の UO_2 焼結体はジルカロイ格子により互いに気密に仕切られている。

キャラメル燃料は、船用炉用燃料という観点から棒状燃料と比較した場合、以下の様な長所を有している。

- (a) 被覆破損の可能性が少いため、一次冷却水の放射能レベルを低く抑えることができる。
- (b) 負荷変動特性が優れている。

(c) 剛性が高く、船用炉の特徴である、振動、動揺、衝撃等に強い。

(2) 可燃性毒物

本炉心に使用する可燃性毒物は、長寿命炉心の反応度抑制に適した Gd_2O_3 であり、 Al_2O_3 との混合焼結体の形で用いる。

本炉心は、EFPDが1,108日と長く、所要可燃性毒物濃度が高くなり、 UO_2 中に混入させるものとする棒状燃料用 UO_2 ペレットの場合も含め従来の燃料照射実積を超えるため、 Al_2O_3 との混合焼結体の形で用いている。

($Gd_2O_3 + Al_2O_3$)単体の寸法を、 $21.1 \times 18.5 \times 2.5$ tとし、燃料板中の UO_2 キャラメルの一部を置き換える形で燃料板中に配置する他、一部はL型可燃性毒物棒として炉心周辺の8体の燃料集合体中に配置する。(図2.9参照)

(3) 燃料集合体

13枚のキャラメル燃料板の4周をジルカロイ側板により閉囲し、1体の燃料束を構成する。このジルカロイ側板は燃料板スペーサを兼ね燃料板端部に溶接されており、また、4周のジルカロイ側板も互いに溶接構造で組立てられている。

4体または3体の燃料束により1体の燃料集合体を構成する。それら燃料束を、ジルカロイ角材を介して溶接により組立て、集合体中央部に制御棒挿入の為の十字形通路を形成する。この燃料集合体は次の様な特徴を持っている。

(a) 剛性が高く船用炉心に適している。

燃料板は棒状燃料に比べて剛性が高く、燃料集合体も燃料板の溶接により組立てているので剛性が高い。この為、振動、動揺の条件の厳しい船用炉心に適した構造であると共に、燃料交換等の燃料取扱い時の燃料損傷の危険を少なくすることが出来る。

(b) 燃料集合体毎の一次冷却水の流量配分が確実に行なえる。

燃料集合体は、前述の如く周囲をジルカロイ側板で囲った閉構造としている為、下部ノズルのダイヤフラムを調節する事により、各燃料集合体毎の流量を、炉心熱水力設計の見地から最適な値に配分する事ができる。

(4) 制御棒

制御棒はハフニウム製の十字形制御棒であり、4枚のハフニウム板を、ジルカロイ製の十字形ピースを介して溶接して作られる。

本炉心に採用した十字型制御棒は以下の特徴を有する。

(a) 局所出力ピーキング因子を低く抑える為の可燃性毒物の配置等、炉心核設計上の考慮によりフォロアを無くした。

(b) 剛性が高く、船用炉の特徴である振動、動揺、衝撃等に強い。

(c) B, Ag-In-Cd等の制御棒材に比べインシナルコストは高いが、高温高圧水中での耐食性に優れ、中性子吸収特性の面からも炉プラント寿命中交換の必要がない。

2.5 自己加圧一体型炉の炉心構成

本炉心の炉心構成は、以下の設計基準、設計値をもとに決められた。

- (a) 熱出力が100 MWで、FDRの38 MWとEFDRの220 MWの間であることから、炉心の平均出力密度は、FDRの第2炉心の53.1 MW/m³とEFDR 57.8 MW/m³との中間の値を採用することができる。さらに限界熱流束比を大きくすることによる安全性の向上を考慮し、55 MW/m³とする。
- (b) 原子炉压力容器の高さを可能な限り低くするためL/D=炉心有効高さ/炉心直径を1より小さくする。炉心内の燃料要素配列は4×4の16体配列とする。これにより炉心等価直径は1.36m、炉心有効高さは1.25mとなる。
- (c) 原子炉の運転圧力及び温度は、EFDRと同じ97.4 kg/cm²g及び308°Cとする。
- (d) 炉心の入口・出口温度及び出入口エンタルピー差はEFDRと同じ16°C及び24.4 kcal/kgとする。これにより炉心の最小流量は100 MWthにて980 kg/sとなる。
- (e) 炉心の出力条件は、仕様書に定められている全出力100%、常用出力90%の他、過出力として116%を暫定値とする。過出力は広範囲な安全解析及び動特性解析により定められねばならない。
- (f) 小型炉心で、出力分布をできるだけ平坦にし、また燃料交換作業を容易にするよう、2領域バッチ炉心とする。最大出力ピーキングは3.0以下を目標とする。
- (g) 稼働率を向上させるため、燃料交換は3年毎に行なうことを目標とする。実効全出力日数を約770日(稼働中平均負荷率80%)として稼働日数965日より燃料の平均燃焼度は19,000 MWd/tUを目標とする。概略サーベイにより燃料の濃縮度は3.8%及び5.4%とした。各濃縮度の燃料要素の炉心内への配置を図2.10に示す。
- (h) 軸方向の出力ピーキングを押さえるため、固体可燃性ポイズンの有効長は、炉心の有効長より短くした。固体可燃性ポイズンの有効長の軸方向分布は図2.10に示す。固体可燃性ポイズンの濃度は、燃料濃縮度に応じて各々2種類とした。

(1) 燃料

- (a) 陸上発電用軽水炉で長年にわたって用いられてきた実績があり、特性が十分に分っているUO₂ペレットを用いた棒状燃料、及び中性子経済が優れ、FDRの第2炉心で用いられたジルカロイ-4製の被覆管を採用する。
- (b) 燃料棒の直径及び格子間隔は、陸上発電用加圧水炉の15×15格子配列の燃料要素に同じ10.8mm及び14.3mmとする。これにより陸上炉の燃料製造工場及び再処理工場の設備、技術を広範囲に利用することができ燃料サイクルコストを低減することができる。
- (c) 燃料要素は、ワンロードスタック条件を考慮し、制御棒駆動装置の数を減らすこと及び燃料交換に要する期間を短縮するため陸上炉に比べ断面積の大きい21×21の格子配列とする。

燃料要素内には、図2.14に示すように365本の燃料棒、28本の固体可燃性ポイズン棒、44本の吸収棒及び4本の構造棒を配列する。

(2) 制御棒

吸収棒は中性子吸収材である炭化硼素(B₄C)粉末をステンレス製被覆管に充填したものである。制御棒クラスターは吸収棒44本をスパイダー継手で対称位置に配置したもので、燃料要素の制御棒案内管によって案内され、制御棒駆動装置(CRDM)で駆動されること

により、原子炉の起動、停止及び負荷変動に伴なう反応度の制御に用いられる。

制御棒クラスターは燃料要素 16 体の全部に設けられている。

(3) ポイズン棒

ポイズン棒は、ポイズン材として酸化アルミニウム (Al_2O_3) とガドリニア (Gd_2O_3) の混合焼結ペレットをジルカロイ-4 製被覆管に入れ密封したものである。ポイズン棒は燃料要素当りポイズン棒案内管に 28 本挿入され、上部に固定される。ポイズン棒は、炉心の燃焼に伴なう反応度変化を制御するのに用いられる。

表 2.1 炉心主要目

半一体型炉 (試設計)	半一体型炉 (評価炉心)	一体型炉	自己加圧一体型炉
炉心平均出力密度 33.8 kW/ℓ	61.2 kW/ℓ	50.4 kW/ℓ	55 kW/ℓ
炉心寿命 4年	4年	4年	3年
燃焼度(炉心平均) 18000 MWD/tU	32000 MWD/tU	30400 MWD/tU	19000 MWD/tU
燃焼度(局所最高) 44000 "	62000 "	55200 "	41000 "
燃料形式 丸棒燃料	丸棒燃料	板状(キャラメル) 燃料	丸棒燃料
燃料被覆材 ジルカロイ-4 (ライナ付)	ジルカロイ-4 (ライナ付)	ジルカロイ	ジルカロイ-4 (ライナなし)
燃料集合体数 37体	37体	32体	16体
制御棒型式 クラスタ型	クラスタ型	十字型	クラスタ型
制御棒材質 B ₄ C	B ₄ C(濃縮)	ハフニウム	B ₄ C
制御棒本数 21本	21本	24本	16本
制御棒駆動装置基数 21基	21基	12基(2本を駆動)	16基
燃料濃縮度 第1領域 3.7wt % 第2領域 4.7wt %	第1領域 5.7wt % 第2領域 6.7wt %	第1領域 5.8wt % 第2領域 6.9wt %	第1領域 3.8wt % 第2領域 5.4wt %
制御方式 ①制御棒 ②可燃性毒物 ・材質ガドリニア ・燃料内混入タイプ	①制御棒 ②可燃性毒物 ・材質ガドリニア ・燃料内混入タイプ ・GdBP棒	①制御棒 ②可燃性毒物 ・材質ガドリニア ・GdBP棒	①制御棒 ②可燃性毒物 ・材質ガドリニア ・GdBP棒 ③ケミカルシム (冷却材中ボロン)
炉心等価直径 158 cm	131 cm	132.9 cm	136 cm
炉心有効高さ 150 cm	121 cm	143.2 cm	125 cm
熱流束熱水路係数 3.36	3.96	4.39	2.1
平均線出力密度 6.1 kW/m	7.1 kW/m	…	13.4 kW/m
最大線出力密度 20.5 kW/m	28.1 kW/m (PCI解析上は 34 kW/m)	…	40.2 kW/m

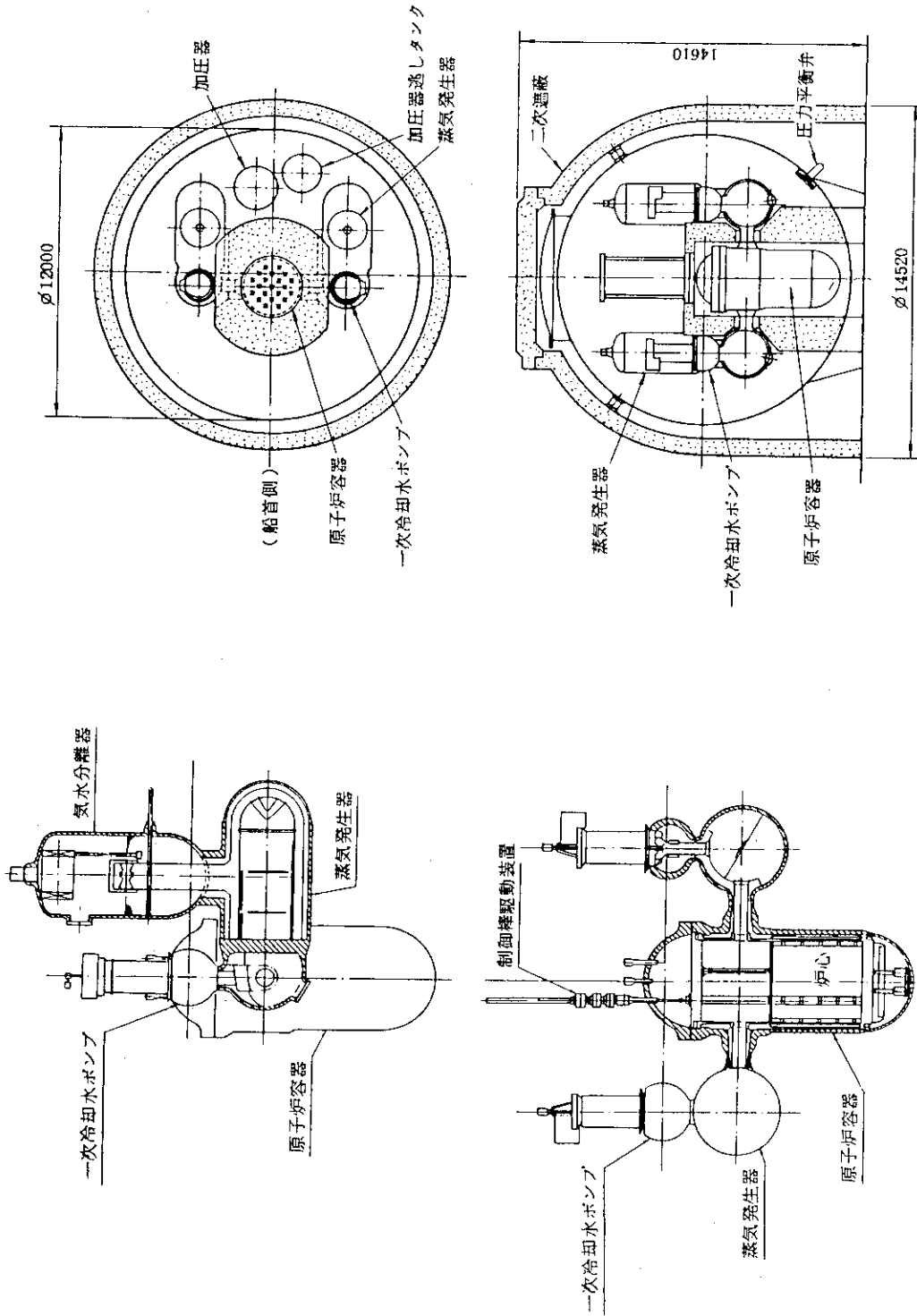


図 2.1 半一体型炉原子炉本体組立図

図 2.2 半一体型炉プラント全体配置図

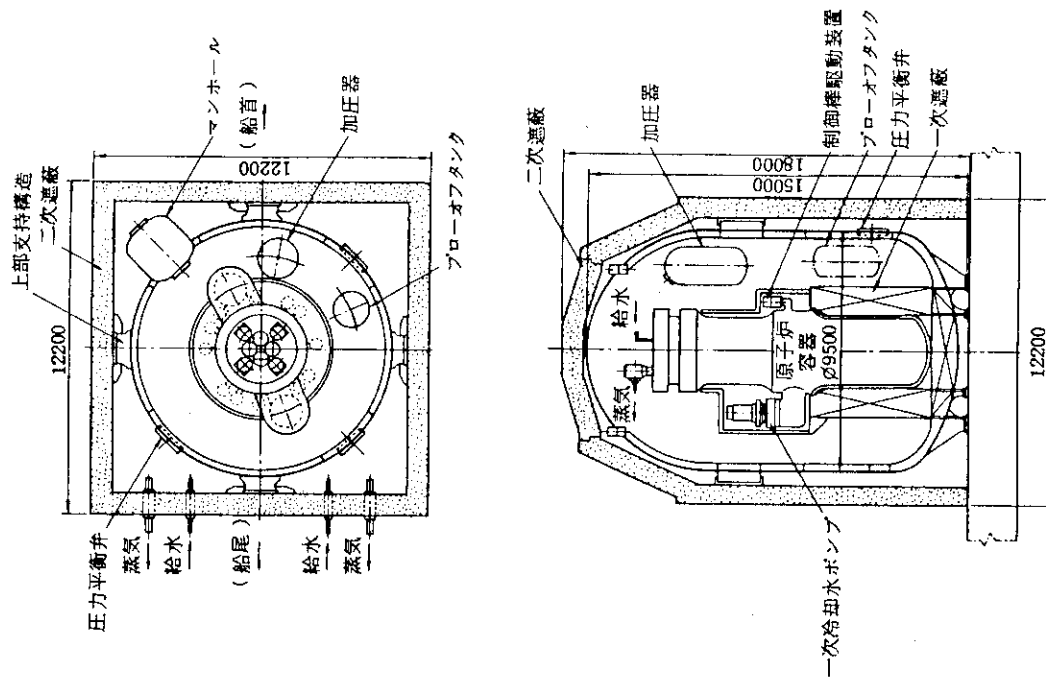


図 2.4 一体型炉プラント全体配置図

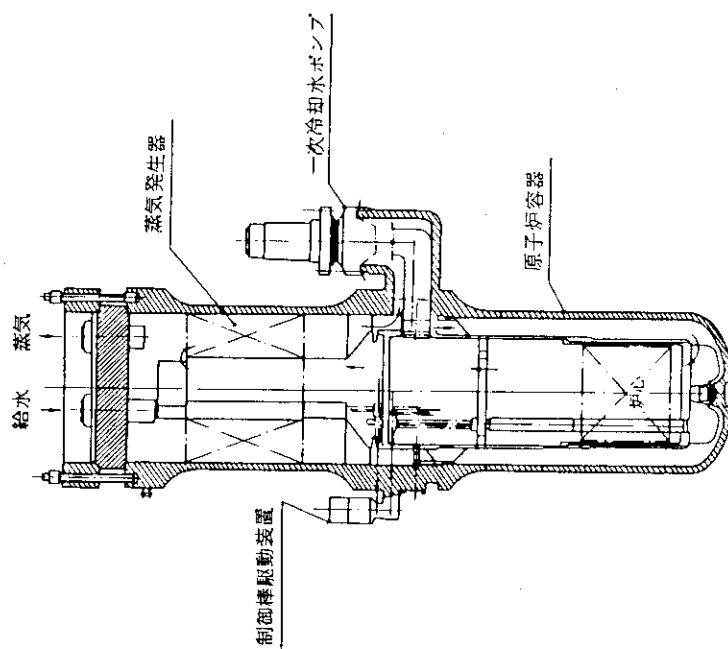


図 2.3 一体型炉原子炉本体組立図

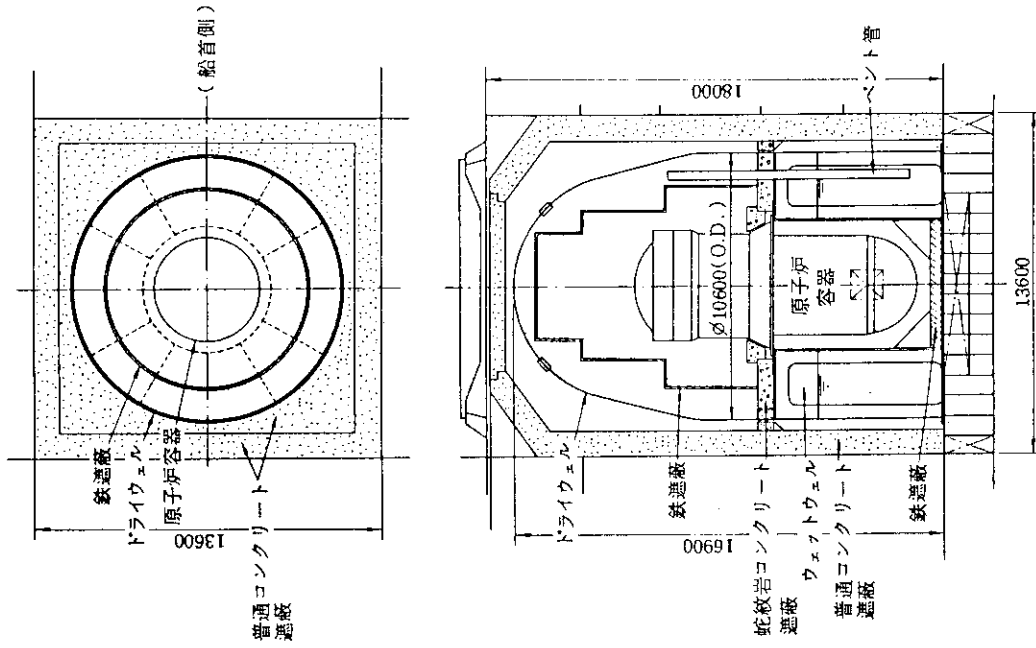


図 2.6 自己加圧一体型炉プラント全体配置図

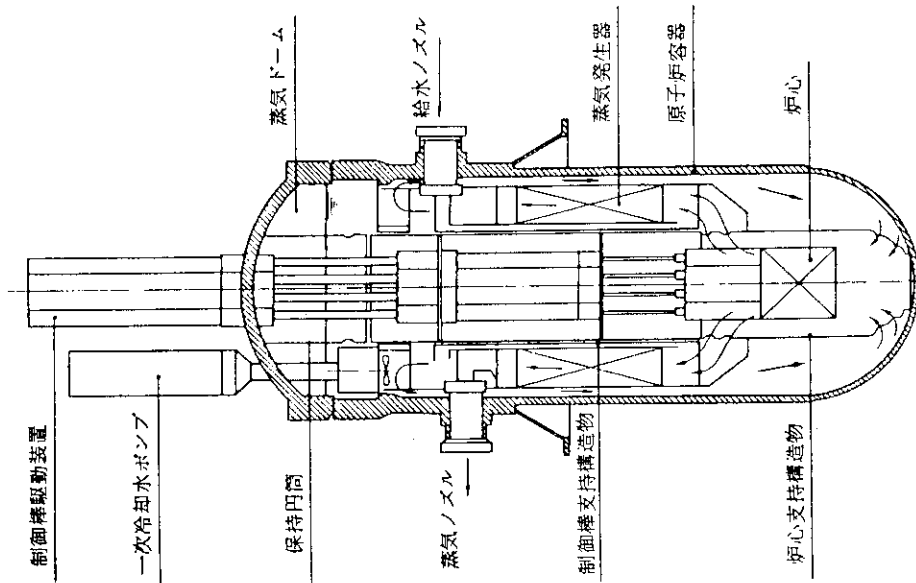


図 2.5 自己加圧一体型炉原子炉本体組立図

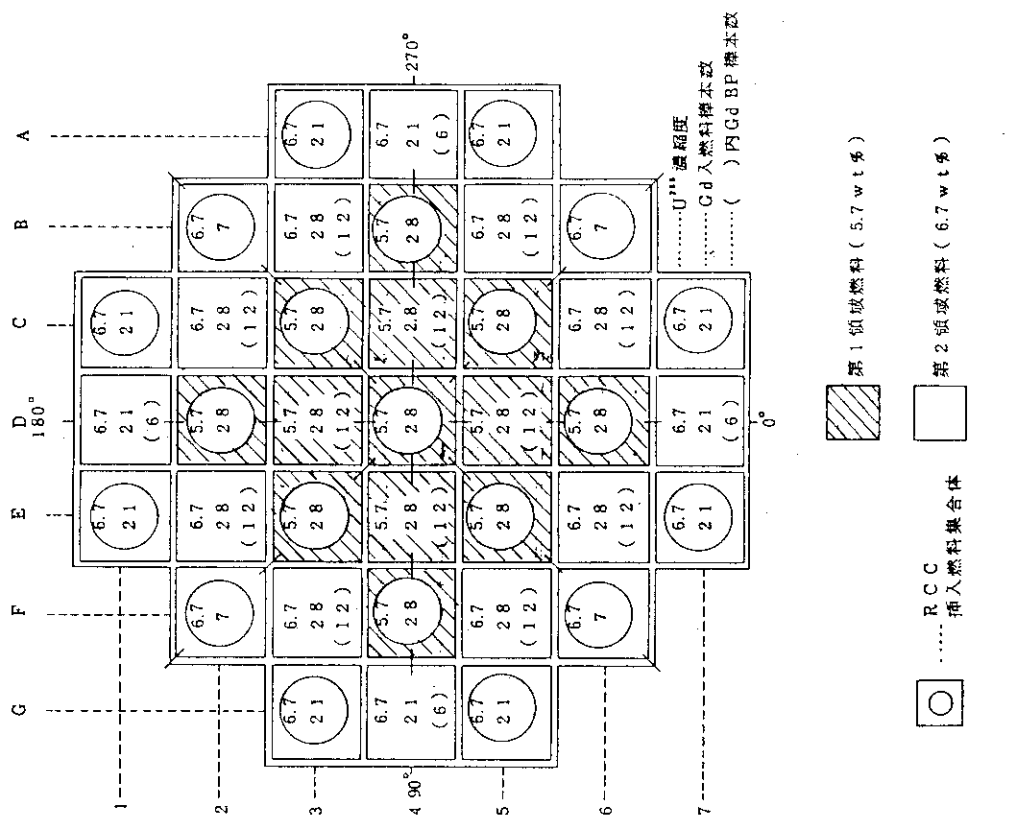


図 2.7 半一体型炉 (試設計) の炉心構成

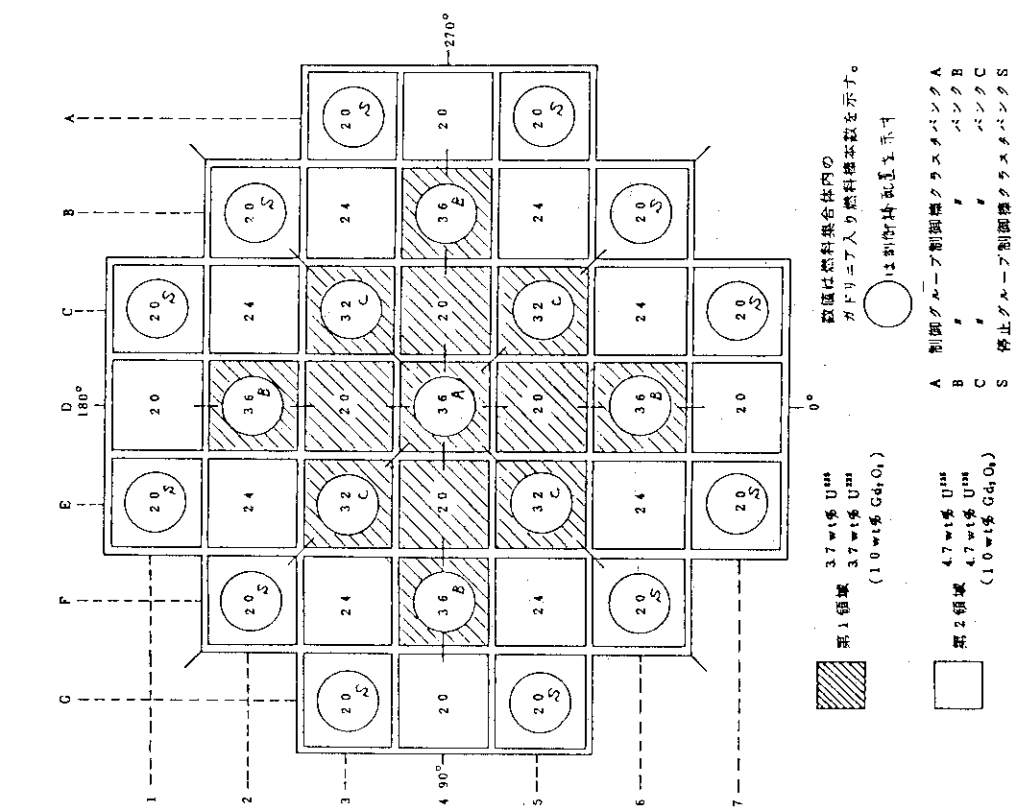


図 2.8 半一体型炉 (評価炉心) の炉心構成

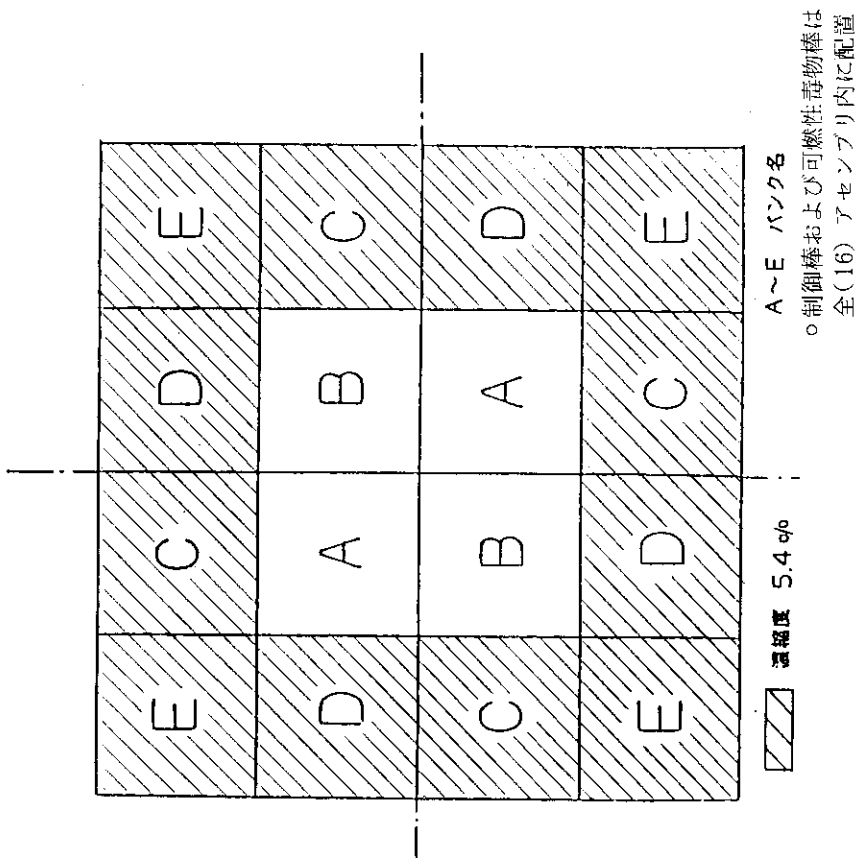


図 2.10 自己加圧一体型炉の炉心構成

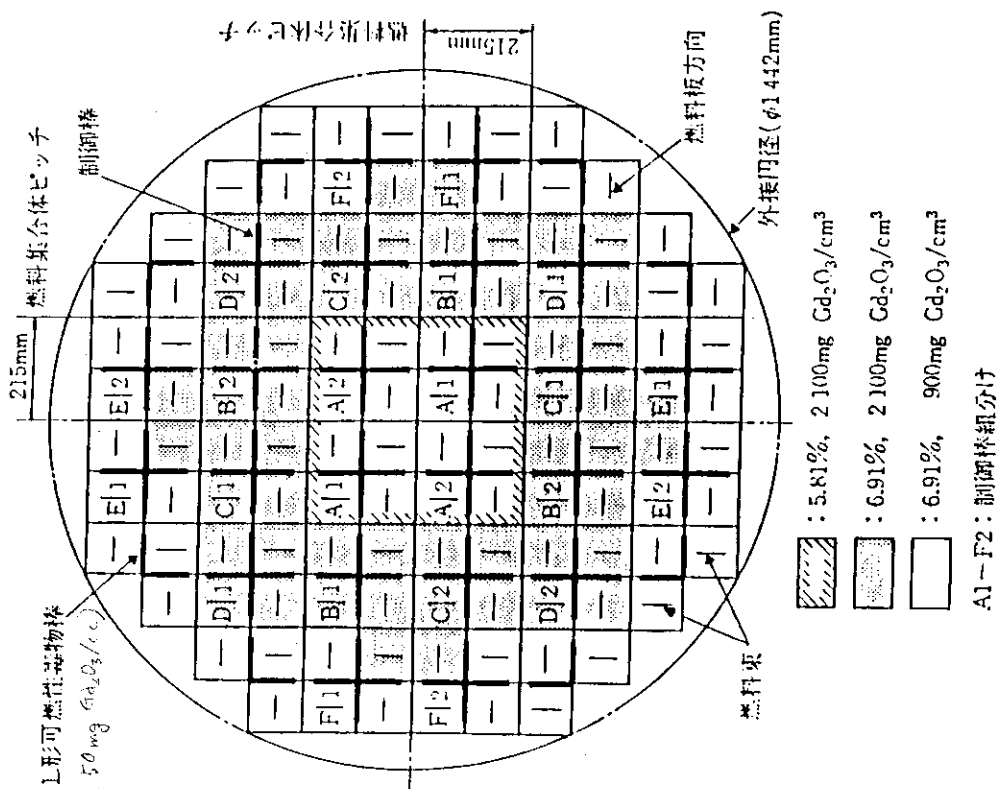


図 2.9 一体型炉の炉心構成

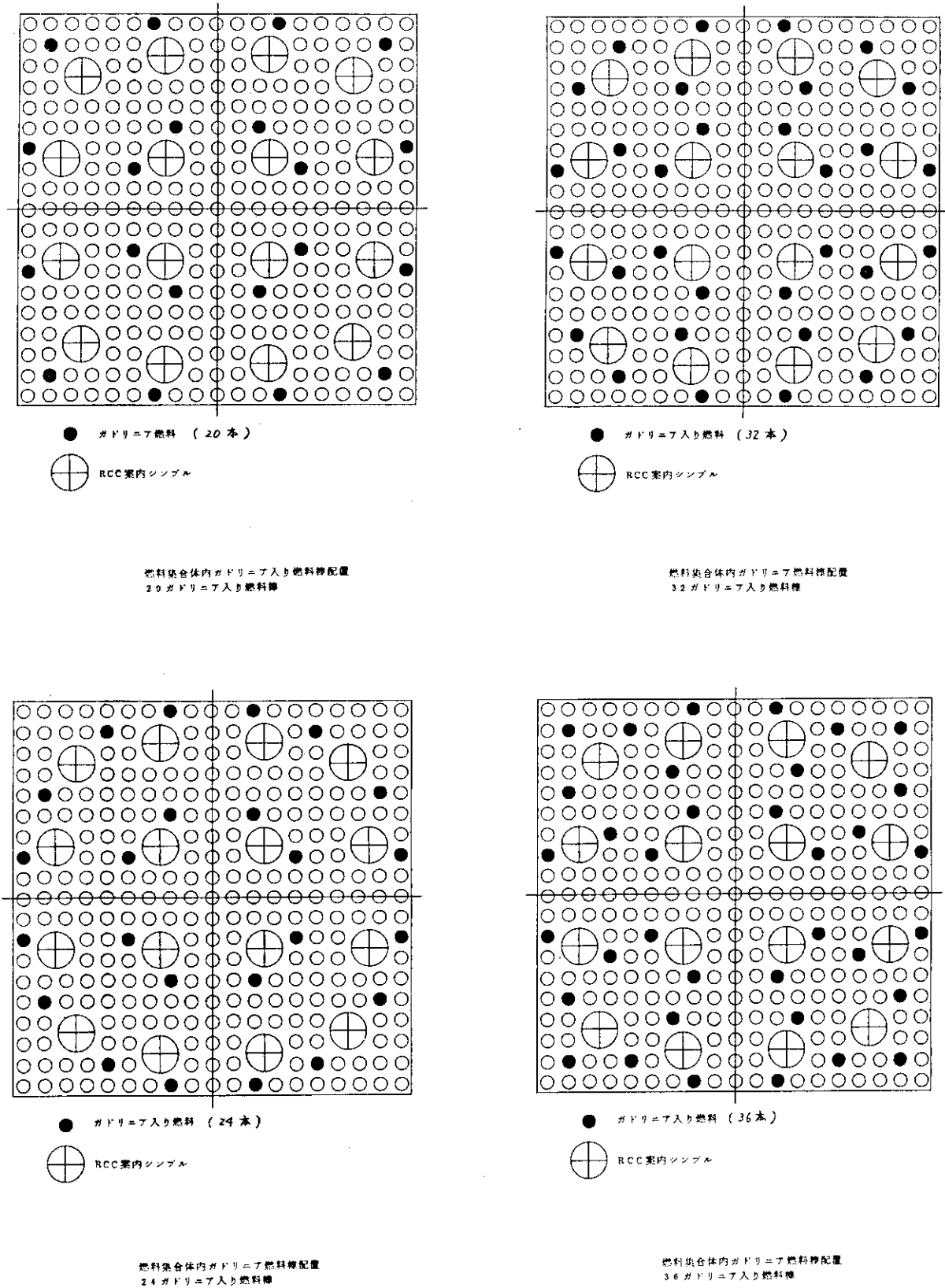
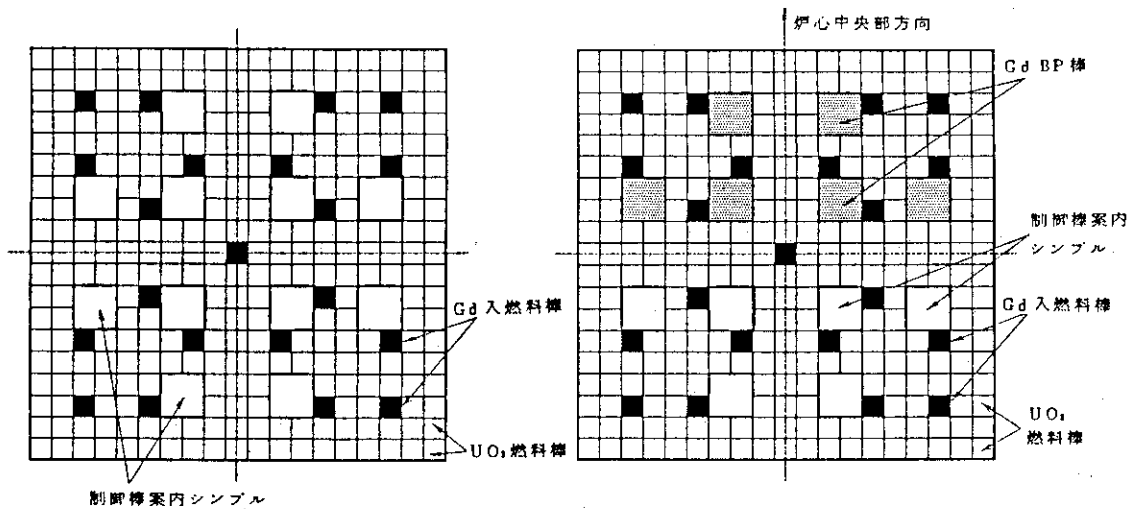


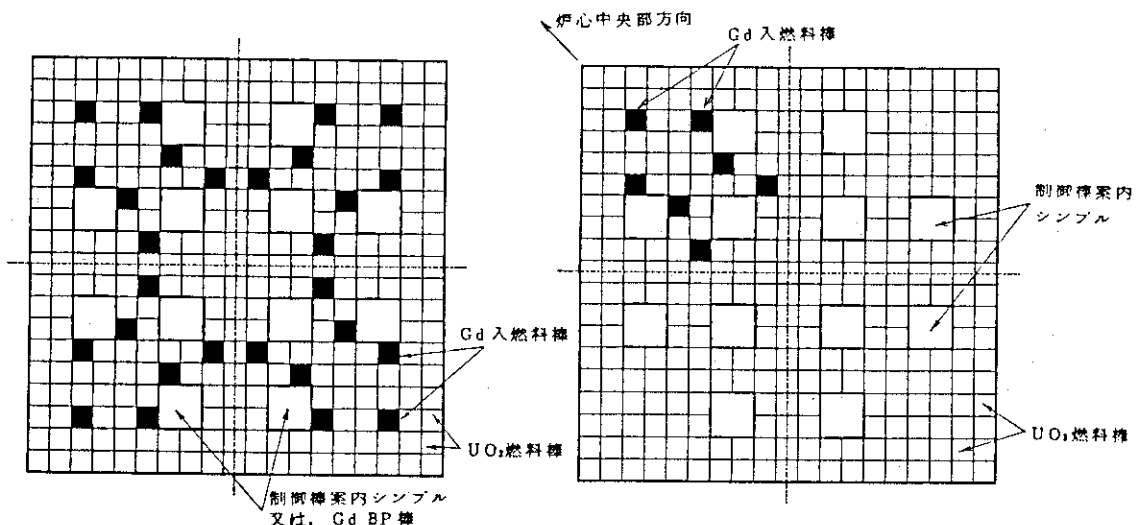
図 2.11 半一体型炉（試設計）の燃料集合体内配置



制御棒案内シンプル

ガドリニア燃料棒 (21本) 燃料集合体内配置

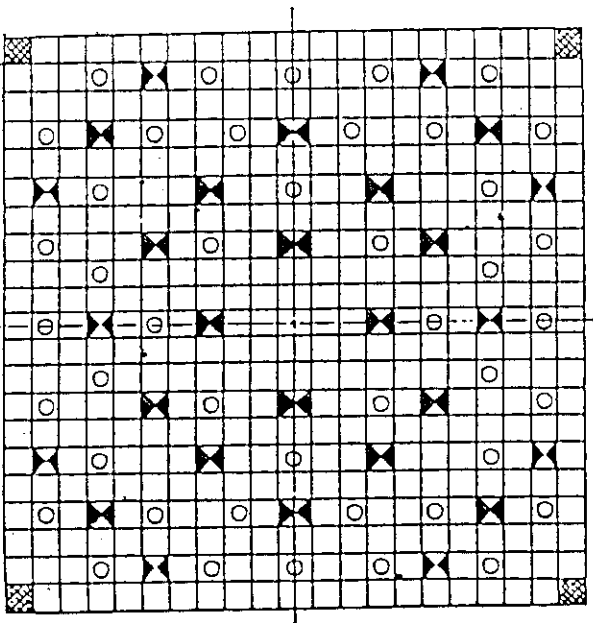
ガドリニア燃料棒 (21本), ガドリニアバーナブル
ポイズン棒 (6本) 燃料集合体内配置



ガドリニア燃料棒 (28本) 燃料集合体内配置

ガドリニア燃料棒 (7本) 燃料集合体内配置

図 2.12 半一体型炉 (評価炉心) の燃料集合体内配置



燃料名	材	数	位置
燃料	UO ₂	363	
制御棒	B ₁ C	44	
反射層	OD ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	28	
燃料	Zry-4	4	

図 2.14 自己加圧一体型炉の燃料集合体内配置

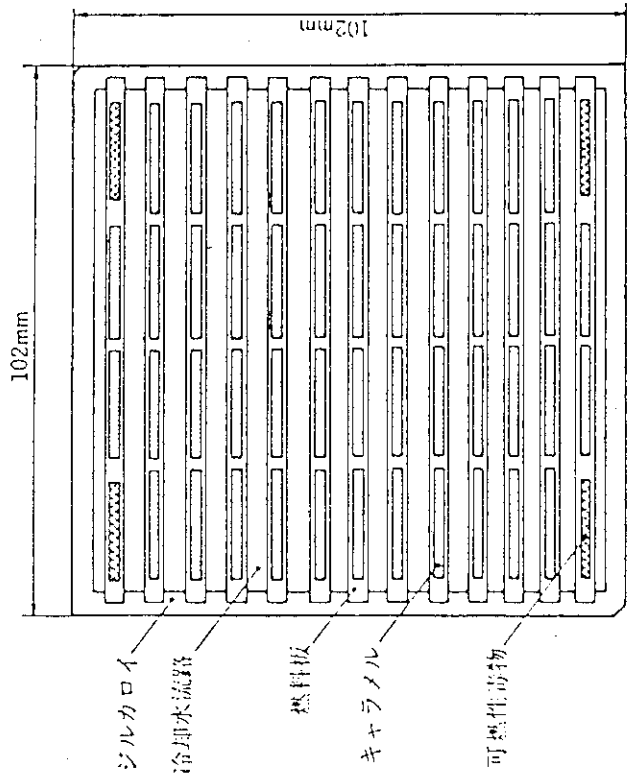


図 2.13 一体型炉の燃料束断面図

3. 炉心特性比較評価

各炉心の設計結果を基に、主要な炉心特性について比較を行ない、それぞれの炉心の特徴を明らかにする。

3.1 反応度制御方式

各炉心の反応度制御方式の比較を表 3.1 に示す。

共通点としては、制御棒と可燃性毒物（材質ガドリニア）を使用していること、及び負荷変動時などの急激な反応度制御を制御棒によって行ない、燃焼に伴う長期反応度変化（減損）分の余剰反応度の制御を可燃性毒物によって行なっていることである。

一方、相違点又は各炉の特徴としては、自己加圧一体型炉のみがケミカルシム（一次冷却材中のボロン）を使用していること又、可燃性毒物の型式がそれぞれ異なり、半一体型炉（試設計）が燃料 UO_2 中に混合するタイプ、一体型炉及び自己加圧一体型炉がガドリニア BP 棒でアルミナと混合するタイプ、又半一体型炉（評価炉心）が両タイプの可燃性毒物を併用していることがあげられる。

高出力密度、高燃焼度炉心とする場合、燃焼による長期反応度変化（減損）分を補償するために、寿命初期にその分の余剰反応度を燃焼に持たせる必要があるが、これを制御棒のみで制御することは、制御棒 1 本当りの反応度評価が過大となるかあるいは燃料集合体が小型となり CRDM が収まらない点などから実際的ではない。

そこで、このような大きな長期反応度変化を制御するためには可燃性毒物の使用が必須となる。また、その型式として、燃料（ UO_2 ）中に混合している場合、混合可能な濃度に限界があるためほとんどの可燃性毒物が寿命中期（MOL）で燃え尽きてしまうため、その時（MOL）における余剰反応度を抑えきれない。従って、高出力密度（50 kW/l 以上）、高燃焼度（30,000 MWD/tU 以上）の場合、燃料中に混合しない可燃性毒物（BP）棒（アルミナとの混合物）を単独又は併用で使用し、寿命末期（EOL）まで燃え尽きないようにすることが必要となる。BP 棒を使用する場合でも、細すぎるとやはり早く燃え尽きてしまうため、ある程度太くすること及び BP 濃度を変え炉心内に適切に配置することが中性子束を平坦化しピーキング係数を小さくする上で重要である。

また、今後より高性能な炉心とするためには、炉心軸方向についても BP の濃度を変えることにより一層の出力分布の平坦化を図ることや別方式の反応度制御方式（例えば陸上 A PWR で検討中の水排除棒によるスペクトルシフト）の検討が必要である。

以下に各炉心の反応度制御方式について説明する。

(1) 半一体型炉（試設計）の反応度制御

反応度制御は B₄C 制御棒と燃料中に混入した BP であるガドリニアで行なう。ガドリニアは直接には毒物としての効きを制御できないので、静的な反応度制御として用いられる。こ

れに対し制御棒は動的な制御能力を持ち、下記の反応度制御に用いられる。

- 1) 高温零出力状態と常温との間の冷却材温度変化に伴う反応度変化
- 2) 燃焼による反応度変化—これには燃料組成の変化、キセノン以外の核分裂生成物の蓄積及びB Pの燃焼の影響が含まれる。
- 3) 出力変動の後生じるキセノン濃度変化
- 4) 零出力から全出力までの燃料温度上昇に伴う反応度変化
- 5) 原子炉停止

次に二つの制御方式について説明する。

(a) ガドリニア入り燃料

中性子吸収断面積の大きいガドリニアを燃料中に混入することにより、効果的なB Pとすることができる。本炉心では船体事故を考慮して反応度制御にケミカルシムを用いないため、制御棒の反応度制御の負担分が大きくなる。制御棒だけでは反応度が不足するので、燃焼に伴う反応度変化の一部を制御するためB Pを大量に用いる必要がある。しかし従来型B Pではサイクル末期における反応度損失が大きいため、大量に用いる場合には燃え残りの少ないガドリニアを使用するのが適当である。

ガドリニアの濃度 (Gd_2O_3 の濃度) は低くなるに従って自己遮蔽効果が小さくなり、燃焼に伴って反応度が急激に上って安定した出力分布を得ることができない。ガドリニアの濃度を高くするほど燃焼速度が遅くなり、安定した出力分布を得ることができるので、本炉心では 10 wt % のガドリニアを使用する。

第1領域のガドリニア入り燃料は 3.7 wt % の濃縮度の UO_2 に Gd_2O_3 を 10% の割合で混ぜたもの、第2領域のガドリニア入り燃料は 4.7 wt % の濃縮度の UO_2 に Gd_2O_3 を 10% の割合で混ぜたものである。

(b) 制御棒

制御棒はR C C型を採用し、制御棒駆動装置の大きさの制限により燃料集合体1体おきに配置してある。炉心全体では制御棒クラスタは21体であり1体のクラスタは16本の制御棒から成っている。制御棒クラスタはすべて同一構造であるが、使用目的に応じて制御グループと停止グループに分けられる。制御グループ制御棒クラスタは出力運転で使用され、温度や出力のような運転状態の変化に伴う反応度変化及び燃焼による反応度変化の制御を行なう。停止グループ制御棒は停止用反応度を供するために使用される。

制御用バンクを単一とした場合には反応度効果が高いために軸方向のピーキングが悪化する。従って、制御用バンクを3つに分ける方式を採用した。各バンクの配置は、出力分布を考慮して決定され、図3.1に示されている。

(2) 半一体型炉 (評価炉心) の反応度制御

上記半一体型炉 (試設計) との違いは、可燃性毒物として、燃料 UO_2 中に混入させたガドリニアの他にアルミナとガドリニアを混合した非均質型B P棒を使用していることにある。

これは、燃料中に混入されるガドリニアは、サイクル中期になると燃え尽きてサイクル中期における余剰反応度が大きくなり、制御棒だけでは停止余裕条件を満たすことができないため、本ガドリニアB P棒を設けることにより、サイクル中期からの余剰反応度を抑制し高

燃焼度炉心を可能としたものである。

また、このガドリニアBP棒は、細径にすると、燃料混入のガドリニアと同程度の速度で燃焼するので、サイクル中期でもワースを残すように太径としている。また、サイクル末期において反応度損失をなるべく小さくなるように、ガドリニアの濃度は20wt%としている(アルミナ80wt%)。

このような反応度制御方法により得られた炉心実効増倍率の燃焼変化を図3.25に示すが、半一体型炉(試設計)(図3.24)と比べると、サイクル中期の余剰反応度を低く抑えており、かつサイクル末期の残存する余剰反応度も低い結果となっている。

以上のように、余剰反応度の凹凸幅が半一体型炉(試設計)よりも小さいので、制御棒運棒パターンも後述するようにより複雑ではなくなる。

また、制御棒は半一体型炉(試設計)と同じRCC型(クラスタ型)を採用しているが、炉心平均出力密度を高くしたことなどにより、より小型化している。制御用バンクは3つに分ける方式としている。(図3.2参照)

(3) 一体型炉の反応度制御

炉心反応度制御は、24本のハフニウム製十字型制御棒及び固体可燃性毒物のみで行なう事とし、船用炉という点に考慮を払い、追加の複雑な補助装置を必要とする可溶性ボロンによる反応度制御は用いない事とした。

24本の制御棒は、夫々2本ずつに組分けし計12基のCRDMで駆動される。制御棒の組分けにあたっては、運転時の出力分布を平坦化し、スタック時の各組の制御棒ワースを小さくする様、炉心中央に対し対称位置の2本ずつの組分けとした。制御棒組分け及び運棒パターンを図3.3に示す。更に、局所出力ピーキングが高くない様以下に述べる可燃性毒物配置等の炉心設計上の考慮を払う事により、十字型制御棒であるにも拘らずフォロアを設けない事とした。

固体可燃性毒物としては、長寿命炉心の反応度抑制に適した Gd_2O_3 を Al_2O_3 との混合焼結体の形で用いることとした。各 $(Gd_2O_3 + Al_2O_3)$ 焼結体の寸法は、 $21.1 \times 18.5 \times 2.5^{\frac{1}{2}}$ mmであり、その濃度は半径方向出力分布の平坦化及び炉心燃焼に伴う実効増倍率の変化を平坦化する事を目的として決定した。また、燃料束内可燃性毒物位置は、局所出力ピーキング因子及び制御棒の反応度効果を配慮して決定した。更に、軸方向出力分布平坦化への配慮から、炉心上下両端の一部には可燃性毒物は入れていない。

(4) 自己加圧一体型炉の反応度制御

炉心の反応度制御は以下の3種類の手段により行なう。

- 1) クラスタ型制御棒
 - 2) 固体可燃性ボイゾン棒
 - 3) 冷却水中のボロン
- (a) クラスタ型制御棒は、ワンロッドスタック条件を満たすよう、16本の燃料要素のすべてに挿入する。これらの制御棒は原子炉の起動・停止及び負荷変動に伴なう短時間の反応度制御に用いる。これらの制御棒は図2.4に示すようにA-Eの5種類の制御バンクにまとめる。原子炉運転中はC-Eのバンクを引き抜き、AまたはBバンクにより出力反応

度及び全Xe反応度を制御する。さらに制御バンクの制御棒の反応度効果はボロン濃度変更時のステップ幅の補償及び安全余裕も含むよう計画する。また16本の制御棒クラスタによりボロンのない状態においても炉心を冷態未臨界に保つ。

- (b) 固体可燃性ポイズン棒は燃料の燃焼に伴う長期反応度変化の制御に用いる。

ポイズンは、核特性がよく、ERG-2研究炉の照射試験で実証済みのガドリニウムを用いる。

ガドリニウムはガドリニア (Gd_2O_3) として、酸化アルミニウムペレット中に混合しジルカロイ被覆管内に封入し、ポイズン棒として燃料要素格子内に配置する。

- (c) ボロンは各炉心サイクル初期の反応度の微調整及び燃焼に伴う長期反応度変化の補償に用いる。また単独で炉心を未臨界に維持する。

クラスター型制御棒は16体のすべての燃料要素に挿入し、原子炉の起動・停止及び負荷変動に伴う短時間の反応度制御に用いる。また原子炉運転中の全出力反応度と全Xe反応度はクラスター型制御棒と冷却水中のボロンにより制御する。

燃料の燃焼に伴う長期反応度変化の大部分は固体可燃性ポイズン棒で、残りは冷却水中のボロンにより制御する。また冷却水中のボロンは各サイクル初期の反応度の微調整にも用いる。

3.2 燃 料

(1) 燃料型式

一体型炉が板状(キャラメル)燃料を採用しているが、他の3炉心は全て丸棒燃料としている。

(2) 燃料健全性

急激な負荷変動時及び異常な過渡変化時に燃料(被覆管)の健全性が維持できるか否かを確認したが、いずれの炉心の燃料も被覆管の健全性を維持できることが明らかとなった。確認の方法は、丸棒燃料についてはPCI(ペレット-被覆管相互作用)解析により、板状燃料については技術限界温度以下であることを異常な過渡変化時に対して求めた最高燃料温度で確認することにより行なった。

(3) 仕 様

炉心主要目(表2.2~2.5)に示す通りであるが、特徴としては、半一体型炉の丸棒燃料がジルコニウムライナ付被覆管を使用していること、燃料棒径が従来より細径であることがあげられる。

なお、燃料の詳細については、別レポート(試設計燃料編(I)丸棒燃料、(II)板状燃料)を参照されたい。

3.3 出力分布及びピーキングファクタ

高出力密度・高燃焼度炉心を設計する場合、重要な留意点の一つとして、いかに出力分布を平坦化してピーキングファクタを下げるかという課題がある。そのためには、燃料集合体の構成

(濃縮度, B P 濃度配置など) のほか制御棒のグループ分けと運棒計画を適切に行なうことが主要となる。

また, ケミカルシムの採用は, ピーキングを低く抑えることに有効であるが, 船体事故時の海水との置換など船用炉への適用性について検討する必要がある。

各炉心のピーキングファクタを表 3.2 に示す。

以下に各炉心について, 制御棒の運棒計画を含めた出力分布 (ピーキングファクタ) について述べる。

(1) 半一体型炉 (試設計) の出力分布及びピーキングファクタ

(a) 燃焼による制御棒挿入度の変化

高温全出力での制御棒挿入度の燃焼による変化を図 3.4 に示す。バンク A は出力微調整用に常に少し挿入させた。この図は炉心の 3 次元燃焼計算から得られたものであり, これに対応する横方向出力分布を求めた。図 3.4 に示されているように 18,000 MWd/t の燃焼度即ち 4 年のサイクル長さ (80% 負荷率, 定検期間 3 カ月) は十分得られる。

$$\frac{100 \text{ MW}}{6.1 \text{ Ton}} \times 365 \text{ 日} \times 4 \text{ 年} \times \frac{48 \text{ ヶ月} - 3 \text{ ヶ月}}{48 \text{ ヶ月}} \times 0.8 = 18,000 \text{ MWd/t}$$

(b) 燃焼による出力分布の変化

高温全出力制御棒挿入状態 (臨界となる位置) での横方向出力分布及び燃焼度分布を, サイクル初期から末期について計算した。また, サイクル初期, 中期, 末期での軸方向平均出力分布を図 3.5 ~ 図 3.7 にそれぞれ示す。

(c) F_Q (熱流束熱水路係数) の計算

F_Q は次式によって計算を行なった。

$$F_Q = F_Q^N \times F_Q^E, \quad F_Q^N = F_Q^{cal} \times F_Q^U$$

F_Q^N : 核的熱流束熱水路係数

F_Q^E : 工学的熱流束係数

F_Q^{cal} : 3 次元計算によるピーキング係数

F_Q^U : F_Q^N の不確実性を考慮する因子 1.10

この計算によって求めた F_Q を図 3.8 に示す。制御棒価値が大きく, また減速材の平均温度一定運転であるため, 出力変動に伴う反応度変化による制御棒移動が少なく, F_z (軸方向ピーキング係数) はあまり変化しないので, $F_Q \times \text{Power}$ は図 3.8 の全出力のケースが最も厳しい値となる。

F_Q は最大で 3.36 でこれに対応した燃料棒線出力は高々 20.5 kW/m であり, その健全性は確保される。

(2) 半一体型炉 (評価炉心) の出力分布及びピーキングファクタ

(a) 燃焼による制御棒挿入度の燃焼による変化を図 3.9 に示す。制御用バンクは A, B, C の順で抜くようにしているが, 定格出力運転中は, バンク C のみの操作で運転可能となっており, 半一体型炉 (試設計) より複雑でなくなっている。これは, ガドリニア B P 棒の

採用などにより、余剰反応度の制御が改良されサイクル中期の余剰反応度のピーク値が低く抑えられたことなどのためである。

この図は炉心の3次元燃焼計算から得られたものであり、これに対応する横方向出力分布を求めた。

図3.9に示されているように32000 MWd/tの燃焼度即ち4年のサイクル長さ(80%負荷率、定検期間3カ月)が得られていることがわかる。

$$\frac{100 \text{ MW}}{3.4 \text{ Ton}} \times 365 \text{ 日} \times 4 \text{ 年} \times \frac{48 \text{ ヶ月} - 3 \text{ ヶ月}}{48 \text{ ヶ月}} \times 0.8 = 32000 \text{ MWd/t}$$

(b) 燃焼による出力分布の変化

高温全出力制御棒挿入状態(臨界となる位置)での横方向出力分布及び燃焼度分布を、サイクル初期から末期について計算した。また、サイクル初期、中期、末期での軸方向平均出力分布を図3.10から図3.12にそれぞれ示す。

(c) F_Q の計算

F_Q は最大で3.96でこれに対応した燃料棒線出力は高々28.1 kw/mであり、その健全性は確保される。

計算によって求めた F_Q の燃焼による変化を図3.13に示す。

(3) 一体型炉の出力分布及びピーキングファクタ

制御棒運棒計画は、制御棒を挿入した炉心の3次元燃焼計算を行ない、炉心寿命中の出力分布を平坦化し、かつ、炉心寿命末期に於ける燃焼度分布を少なくするような運棒順序を決定した。また、運転状態に於いて十分なスクラムワースを確保し得ることを確認した。

また、出力分布の燃焼変化に基づき、エンタルピ上昇係数及びピーキング係数の最大値を求める。

燃料束平均、及びキャラメル単位セルのエンタルピ上昇係数最大値の燃焼変化を図3.14に示す。

炉心平均燃焼度10,000 MWd/tU前後の一部を除いて、エンタルピ上昇係数が最大の燃料束でキャラメル単位セルの最大値が生ずる結果となっている。

炉心寿命中最大値はそれぞれ次の通りである。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{燃料束エンタルピ上昇係数} \\ \quad = 1.416 \text{ (炉心寿命初期, クリーン)} \\ \text{キャラメル単位セルエンタルピ上昇係数} \\ \quad = 1.873 \text{ (22,000 MWd/tU)} \end{array} \right.$$

図3.15に、合成された3次元出力分布によるキャラメル単位出力ピーキング係数、及びSCOPERS-2の計算によるノードの出力ピーキング係数の燃焼変化を示す。

キャラメル単位出力ピーキングの生ずるノードと出力が最大となるノードは10,000 MWd/tU前後の一部を除いて一致する結果となっている。

キャラメル単位での核的熱流束熱水路係数は

$$F_0 = 2.750 \quad (19,000 \text{ MWD/tU})$$

となった。

また、図 3.16 に、軸方向ピーキング係数の燃焼変化を示す。炉心寿命中の軸方向ピーキング係数の最大値は

$$1.51 \quad (18,000 \text{ MWD/tU})$$

である。

個々の UO_2 キャラメル毎に、燃焼度毎のピーキング係数から比出力を求め、それらを包絡したキャラメル燃焼履歴の包絡線を求めた。(図 3.17)

それらの燃焼度、比出力の値からキャラメル燃料の健全性を評価した結果、技術限界に対し十分な余裕を持っていることを確認した。

(4) 自己加圧一体型炉の出力分布及びピーキングファクタ

初期濃縮度と固体可燃性ポイズンを適当に分布させることにより、燃料要素の断面積が大きいにもかかわらず比較的平坦な出力分布が制御棒が引抜かれた炉心寿命初期に得られた。出力分布は、出力運転中の制御棒の位置の影響を受ける。したがって運転中の制御用バンクの各挿入深さについて、3次元計算により減速材密度分布を考慮した出力分布を求めた。出力ピーキング係数が最大となるのは制御棒挿入深さ 1125mm の場合であり、その値は 2.04 である。図 3.18 に炉心寿命初期の軸方向出力分布を制御棒の位置とともに示す。

半径方向の出力分布は、以上の 1/4 要素ごとの巨視的な出力分布の他に燃料要素内の非均一性にもとづく微視的な出力分布を考慮する必要がある。

軸方向と巨視的及び微視的半径方向の出力分布を合成した最大負荷燃料棒の軸方向出力分布を図 3.19 に示す。この場合制御棒挿入深さは 1125mm で、炉心上端より約 800mm のところに出力のピークが生じ、軸方向の最大出力ピーキング係数は約 1.4 となる。燃焼による軸方向出力分布の変化を図 3.20 に示す。

一方半径方向の最大出力ピーキング係数は約 1.5 であり、炉心全体での最大出力ピーキング係数は約 2.1 となる。これに微視的な出力分布係数 1.11 及び熱流束に関する工学的熱水路係数 1.03 を考慮すると、約 2.4 となり、計算上の安全係数 1.1 を見込んでも十分に目標値の 3.0 を下まわる。

3.4 燃 焼 度

各炉心の燃焼度の比較を表 3.3 に示す。

炉心平均燃焼度は、半一体型炉と一体型炉が約 30,000 MWD/tU、自己加圧一体型炉(炉心寿命 3 年 1 バッチ)が約 19,000 MWD/tU、最大燃焼度はそれぞれ約 62,000、約 55,200 及び約 41,000 MWD/tU である。

燃料装荷量を少なくし経済性を向上させるためには燃焼度を高くする必要があるが、現状技術における実績(実験等による検証)ベースにおける最大クラスの燃焼度は、陸上 PWR で炉心平

均で約 38,000 MWd/tU となっているが、陸上炉は毎年の燃料交換、シャフリングを行なうのに対し、本試設計炉心では 4 年 1 バッチ炉心の燃焼度でも最大可能な燃焼度が達成可能であるといえる。

また、炉心平均燃焼度が 40,000 MWd/tU 以上の場合は実験データがなく、特にライナ付燃料のデータがないので、実験による検証などが必要となる。

寿命末期における燃焼度分布を、半一体型炉 2 炉心及び一体型炉について、図 3.21～3.23 に示す。

3.5 反応度停止余裕（ワンロードスタック基準の適合性）

「高温状態及び低温状態において、反応度効果の最も大きい制御棒が完全に炉心の外に引抜かれ固着して挿入できない時でも、炉心を臨界未満にできる設計であること。」といういわゆるワンロードスタック基準に対する適合性について検討した。炉心寿命中でこの基準を満たすのが最も厳しいのは、余剰反応度が最も大きい炉心寿命初期（BOL）であり、各炉心とも BOL で評価して、1,000 pcm の余裕をもって未臨界にできることを確認している。

また、その場合の反応度停止余裕は、半一体型炉（試設計）が -1,000 pcm、半一体型炉（評価炉心）が -1,200 pcm、自己加圧一体型炉が -2,300 pcm、一体型炉は炉外スタックした 2 本の制御棒以外の残りの制御棒により得られる反応度（ワース）を更に陸上 PWR なみの安全側評価として 10% 減じた評価として -2,200 pcm という計算結果となっている。

各炉心の反応度停止余裕をまとめて表 3.4 に示す。

また、各炉心のサイクル各時点における反応度停止余裕について、表 3.5 から表 3.8 に示す。

3.6 余剰反応度（制御棒炉心内固着時の運転可能性）

本炉心は船用炉炉心であり、IMO 原子力商船安全基準にも規定されているように、最も反応度効果の大きい中性子吸収要素が炉心内に全挿入され引抜かれない場合に、適切な余裕を持って、設計炉心全寿命中、通常運転時において、舵効進行速度を維持するに十分な出力レベルで運転できなければならない。

舵効進行速度を維持するに十分な出力レベルとしては約 30% 炉出力（30 MWt）とする。

炉心寿命中最も厳しいのは、燃焼により余剰反応度が最も小さくなる炉心寿命末期（EOL）である。各炉心とも EOL で評価して、再起動に必要な十分な余剰反応度が得られている。

なお、一体型炉は発生頻度の低さ及び経済性を考慮して 2 次側蒸気圧力を 16 kg/cm² まで下げ、この圧力で炉出力 30 MWt を発生し得る 222.5°C まで一次冷却水温度を下げて運転することとして評価した。

各炉心の余剰反応度について、表 3.9 に比較すると共に以下に記述する。

(1) 半一体型炉（試設計）の余剰反応度

サイクル初期、中期（燃焼度 9,000 MWd/t として計算する）、末期における常温、高温零出力、高温全出力のそれぞれの状態での制御棒反応度効果及び炉心増倍率を表 3.5～3.6

及び表 3.10 に示す。また、3次元燃焼計算により得られた各燃焼度時点での制御棒全引抜状態での炉心実効増倍率を図 3.24 に示す。ガドリニアの燃焼のためサイクル中期において実効増倍率が最も高くなっている。1000 MW D/t で実効増倍率は 1.023 まで下がるが、最大落下制御棒値は $1.3\% \Delta \rho$ (D-4 落下) であり、出力運転状態を維持することができる。

(2) 半一体型炉 (評価炉心) の余剰反応度

サイクル初期, 中期 (燃焼度 15000 MW D/t とする), 末期における常温, 高温零出力, 高温全出力のそれぞれの状態での制御棒反応度効果及び炉心増倍率を表 3.7 及び表 3.11 から表 3.12 に示す。また、3次元燃焼計算により得られた各燃焼度時点での制御棒全引抜状態での炉心実効増倍率を図 3.25 に示す。炉心実効増倍率は 32000 MW D/t で最小となっているが、この時点での最大落下制御棒値は、 $1.17\% \Delta \rho$ (D-4 落下) であり 32000 MW D/t での余剰反応度は $1.9\% \Delta \rho$ であるため出力運転状態を維持することができる。

(3) 一体型炉の余剰反応度

制御棒が炉心内に固着した状態, あるいはスクラム後のゼノン等による過渡的な毒物効果の存在する状態において炉を運転する事は本船寿命中希な事象である。その様な希な事象においても、舵効進行速度を得る為に必要な炉出力 30 MWt で炉を運転する場合を考えて、定格蒸気を発生し得るよう炉プラントを設計しておく事はそれだけ炉心反応度を高くしておかねばならず、経済的とは言い難い。従って、本設計においては、上記の様な事態に対しては、二次側蒸気圧力を主機関が舵効進行出力を発揮し得る $16 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$ まで下げ、この圧力で炉出力 30 MWt を発生し得る 222.5°C まで一次冷却水平均温度を下げて運転することとした。これによる反応度利得は 3,910 pcm である。

このような条件の下で、図 3.26 に示すように余剰反応度が小さい為原子炉起動上最も不利となる炉心寿命末期において、最も反応度効果の高い組の制御棒 2 本が炉心内に全挿入された状態の実効増倍率を求めた。その結果、これらの状態で十分炉を運転し得ることを確認した。EOL における余剰反応度は 1,580 pcm である。

(4) 自己加圧一体型炉の余剰反応度

最も反応度効果の大きい A (または B) バンク制御棒 1 本が挿入された状態では、余剰反応度は 5.8% あり、Xe/Sm 平衡値による反応度制御分 2.2% と燃焼による反応度低下分 3.2% を加えた反応度 5.4% より大きいので、最大価値の制御棒 1 本が挿入された状態でも低出力 (30% 出力) での原子炉の運転は可能である。反応度の計算結果を表 3.13 から 3.14 に、各燃焼度時点での炉心実効増倍率を図 3.27 に示す。

3.7 キセノンオーバーライド (炉緊急停止時の再起動可能性)

原子炉が緊急停止した後に、キセノン (Xe), サマリウム (Sm) などの毒物作用による負の反応度が蓄積しピークとなる停止直後において、原子炉を再起動できるかどうかを検討した。

余剰反応度が最も小さくなる EOL が最も厳しい。半一体型炉 (試設計及び評価炉心) と一体型炉ともに EOL で評価し、高温全出力から炉停止した後の Xe, Sm による過渡的な最大毒物作用 (ピーク毒物反応度) に対して、その反応度を上回る余剰反応度があるという計算結果が得

られ、炉停止後の再起動が炉心寿命全期間にわたって可能であることを確認した。

ただし、一体型炉については制御棒炉内固着時の運転可能性の検討と同様に2次側蒸気圧力を 16 kg/cm^2 に、一次冷却水温度を 222.5°C に下げて炉出力 30 MWt （30%出力）で運転するものとする。

各炉心のキセノンオーバーライド（炉停止後の再起動可能性）について表3.15に比較するとともに以下に説明する。

(1) 半一体型炉（試設計）のキセノンオーバーライド

炉心寿命中のどの燃焼度においてもキセノンが存在する状態から停止した場合には、それぞれの状態に対応するキセノン蓄積及び減衰が見られる。図3.28に高温全出力、平衡キセノン状態から炉停止した後の反応度欠損の時間変化を示す。炉停止後のキセノンの最大有害作用は 440 pcm であり、図3.28から炉心寿命全期間にわたって炉停止後のキセノン毒物作用がある場合でも原子炉を再起動できるといえる。

(2) 半一体型炉（評価炉心）のキセノンオーバーライド

炉心寿命中のどの燃焼度においてもキセノンが存在する状態から停止した場合には、それぞれの状態に対応するキセノン蓄積及び減衰が見られる。サイクル初期と末期における高温全出力、平衡キセノン状態から炉停止した後の反応度欠損の時間変化をそれぞれ図3.29、図3.30に示す。

炉停止後のキセノンの最大有害作用はサイクル末期で最も大きく、 $1.69\%\Delta\rho$ となっているが、図3.25に示すようにサイクル末期の余剰反応度はこれ以上*であり、炉停止後のキセノン毒物作用がある場合でも原子炉を再起動できるといえる。 (* $1.9\%\Delta\rho$)

(3) 一体型炉のキセノンオーバーライド

図3.31に、寿命末期において炉心出力を100%及び155%とした場合の、スクラム後時間経過に対する毒物効果の変化の様子を示す。計算体系の出力が100%という条件の下では、毒物効果はスクラム後約6時間で最大値 600 pcm となる。また出力を軸方向ピーキングの最大値に対応する155%とすると、スクラム後約8時間でピーク値 $1,450\text{ pcm}$ となる。従って、ゼノン毒物効果のピーク値は、 $1,450\text{ pcm}$ 以下である。即ち、制御棒2本の炉心内スタックワースの最大値 $2,140\text{ pcm}$ より十分低い。

同図中に一次冷却水平均温度を 287°C から 222.5°C まで下げることによる反応度利得を $2,980\text{ pcm}$ （ゼノン無しの計算結果より）とし、スクラム後の一次冷却水温度降下速度を 30°C/hr とした時の、反応度利得のスクラム後時間変化も併せて示した。その反応度利得の時間変化とゼノンの過渡的毒物効果の時間変化とからわかる様に、反応度利得は常に毒物効果以上となる。

以上より、炉心寿命末期においてゼノンの過渡的毒物効果の存在する下でも、一次冷却水平均温度を 222.5°C に下げることにより、舵効進行速度維持に必要な炉出力 30 MWt を発生することは十分可能と判断される。

尚、参考の為寿命初期において出力を100%とした時の毒物効果の時間的変化も示した。これからわかる様に、ゼノンによる過渡的毒物効果は、寿命末期の方が大きいことが確認される。

(4) 自己加圧一体型炉のキセノンオーバーライド

表 3.13 の反応度バランスに示すように余剰反応度の最も小さい寿命末期において、約 2% $\Delta\rho$ の Xe オーバライドなどの補償分の余剰反応度を含んでいる。従って、寿命中いかなる燃焼度の時点でも再起動が可能である。

3.8 可燃性毒物

各炉心ともに長期反応度変化の制御が必要であり、その手段としていずれも可燃性毒物を使用している。可燃性毒物 (BP) の材質は、陸上 BWR などの実績及び核特性上の有利性からガドリニア (Gd_2O_3) を採用する。

BP の型式としては、燃料 UO_2 中に混合するものと燃料中には混合せずに BP 棒としてアルミナ (Al_2O_3) と混合して使用するものの 2 つの型式がある。このうち、燃料中に混合する BP は、燃焼度を 30,000 MWD/tU とすると、炉心寿命中期 (MOL) で燃え尽きてしまう。また、混入する BP の濃度も製造及び照射特性から 10 ~ 12 wt % が上限だろうといわれており、10 wt % は上限値に近いものであり、実用化には若干の年月を要す。(25 wt % まで UO_2 原料粉末と固溶するといわれているが、ガドリニアの添加量に応じたペレットの物性値を把握しておく必要があるが、現在の実績として、BWR で 1 ~ 6 wt % ガドリニア入燃料が実用化されているが、PWR では試験燃料として最大 6 wt % のガドリニア入燃料数本が装荷されたにすぎない。なお、10 wt % については現在海外炉 (BR-3) で照射試験中である。)

一方、燃料と混合しない (非均質型) BP 棒は、MOL で燃え尽きることなく、炉心寿命末期 (EOL) まで残って長期的に反応度を制御することが可能である。また、形態としてアルミナ (Al_2O_3) との混合物とするがガドリニアの濃度を 20 wt % と大きくできる。なお、(非均質型) BP 棒の実績としては、ほう素 (B_4C) とアルミナの BP 棒が現行の陸上 PWR (アメリカ) で実用化されており BP (B^{10}) 濃度は約 18 wt % である。しかしながら、ガドリニアを使用した (非均質型) BP 棒については、現在のところ実績はない。ガドリニアは、ほう素に比べて、燃え残りが少なく EOL における反応度ペナルティが小さいなどの利点がある。

BP 棒の本数、濃度、配置は、停止余裕 (ワンロードスタック基準) 及び余剰反応度 (1 ロード炉内固着時の運転可能性) を考慮して半径方向出力ピーキング係数が小さくなるように調整することが重要であるが、各炉心とも、それぞれ工夫されており、高性能炉心を設計する場合にいかんにか可燃性毒物の使い方が重要であるかがわかる。

各炉心の可燃性毒物について、表 3.16 にまとめて示すとともに、以下にそれぞれの特徴を記述する。また、炉心、燃料集合体内の BP 濃度及び配置を図 2.1 から図 2.8 に示してある。

(1) 半一体型炉 (試設計) の可燃性毒物

燃料ペレット UO_2 内に混入した BP のみを使用している。材質は大量に使用する場合燃え残りの少ないガドリニア (Gd_2O_3) とし、BP 濃度は 10 wt % 均一である。燃料集合体内の BP 入り燃料棒本数 (配置) を数種類として、出力分布の平坦化を図っている。しかしながら、 UO_2 混焼型 BP のみだと、比較的短かい燃焼度で燃え尽きてしまうため、高燃焼度とするためには燃え尽きる時点での余剰反応度を他の方法で抑えることが必要となる。

(2) 半一体型炉（評価炉心）の可燃性毒物

上記(1)の燃焼度を高くするために、 UO_2 中に混入したBPの他に、燃料中に混入しない（非均質型）BP棒としてアルミナ（ Al_2O_3 ）と混合焼結したガドリニアBP棒を採用し、燃料中に混合したBPが燃え尽きた時点において余剰反応度を抑えている。BP棒のBP濃度は20wt%均一、燃焼速度を遅くするためあえて太径としてあり、制御棒がない16アセンブリに、制御棒案内シムプルを利用して、6本あるいは12本のBP棒を挿入している。また、軸方向ピーキングを抑えるため上下端11%をガドリニアなしとしている。

(3) 一体型炉の可燃性毒物

燃料中に混合するBPは使用せず、アルミナとの混合焼結体としてのガドリニア（非均質型）BPのみを採用し、BP濃度は、2,100, 900, 50mg Gd_2O_3/cm^3 の3種類とし、それぞれ炉心内側の燃料束、外側の燃料束、外側角度アセンブリの制御棒位置（燃料束外）に配置する。2,100, 900mg Gd_2O_3/cm^3 のBP棒は、燃料束内の13枚の燃料板の両端の各1枚（1枚は4列の燃料キャラメル（ UO_2 ）で構成される）のうち、外側の各1列の UO_2 をBPに置き換えたものである。また、50mg Gd_2O_3/cm^3 のBPは、外側角部の8アセンブリ内の制御棒案内内部に、L型可燃性毒物棒として配置している。また、軸方向ピーキングを抑えるため、軸方向上端から5個、下端から3個はガドリニアなしとしている。燃料と混合しないで用いていることとBP濃度を3種類としていることなどにより、出力密度や燃焼度を高くすることを可能としている。

(4) 自己加圧一体型炉の可燃性毒物

本炉型も、燃料中に混合するBPは使用せず、アルミナとガドリニアの混合焼結ペレットをジルカロイ-4製の被覆管に密封入したBP棒を採用している。BP棒のBP濃度は、4種類としており、炉心内側の第1領域（濃縮度3.8wt%）に高目の2種類の濃度のBP棒を、炉心外側の第2領域（濃縮度5.4wt%）に低目の2種類の濃度のBP棒を配置する。また、軸方向の配置として図3.32に示すように上下両端部をBPなしとするとともに、各領域の有効長を変えている。

3.9 制御棒及び制御棒駆動装置

制御棒型式は一体型炉が十字型である他は全てクラスタ型である。

十字型は剛性が高く又非均質性も高いなどの特徴を有する。一方、クラスタ型は燃料集合体内に吸収棒を分散可能であることや集合体間のスペースが不要であるなどの特徴を有す。

材料としては B_4C が一般的であるが、一体型炉はハフニウムを採用した。ハフニウムはイニシヤルコストがB（ボロン）などに比べると高いが、高温高圧水中での耐食性に優れ、中性子吸収特性の面から炉プラント寿命中交換を必要としないなどのメリットがある。

制御棒駆動装置（CRDM）は、一体型炉が原子炉容器側部から駆動する方式を採用し原子炉プラントの高さを低くするとともに制御棒の飛び出しの可能性を排除している。また、CRDM基数を減らすために、1基あたり2本の制御棒を駆動する（一体型炉）。

出力分布の平坦化のため、制御棒の組分けをいずれの炉心も行なう。

各炉心についてまとめて表 3.17 に示すとともに、以下に各炉心の概要を示す。

(1) 半一体型炉（試設計）の制御棒及び制御棒駆動装置

1) 制御棒クラスタ（RCC）

① 概 要

RCC はスパイダと 16 本の制御棒より構成される。

RCC の主な機能は反応度変化を制御し、磁気ジャック式駆動装置により駆動され、原子炉トリップ時には自重及びスクラムスプリングの作動により炉心内に全数挿入される。

② 構 造

RCC は図 3.33 に示すようにスパイダ継手に 16 本の制御棒が対称に接続された構造となっている。

スパイダ継手にはスクラム時の衝撃力を緩和するためのスプリングが内挿されている。

制御棒はステンレス鋼製の被覆管に制御材として中性子吸収断面積の大きいボロンカーバイド（ B_4C ）ペレットを封入し、両端に端栓を溶接したもので、上端をスパイダ継手により固定されている。

各制御棒は燃料集合体内の制御棒案内シンプル内を上下に移動する。

RCC の主要仕様

(a) 吸 収 材

材 質	B_4C ペレット
スタック長	1470mm

(b) 被 覆 管

外 径	22.6mm
材 質	SUS 304

(c) RCC 組立体

吸収棒本数	16 本
全 長	2370mm
重 量	約 70 kg

2) 制御棒駆動装置

磁気ジャック式を採用し、船用炉用としてスクラムスプリングを装備している。CRDM の構造概略図を図 3.34 に示す。

(2) 半一体型炉（評価炉心）の制御棒及び制御棒駆動装置

燃料集合体配列ピッチ 191mm で、燃料集合体 37 体のうち 21 体に制御棒が必要な設計となり、現有磁気ジャック式 CRDM（L 106 A 型 + スクラムスプリング & 引抜防止ラッチ：外寸法 \square 273mm）は、配列的に適用できなくなった。

そこで、正方形ピッチ 191mm 程度に収まる小型の CRDM で、船用炉用として、非常に速い負荷変動に対応可能な高性能 CRDM の適用を考慮することが適切である。

従って、このような小型高性能 CRDM の開発が必要となる。開発目標とする CRDM の概略仕様を表 3.18 に、また構造概略図を図 3.35 に示す。この仕様の特徴は以下のようにまとめられる。

1) 外 径

21 体に制御棒を挿入する必要性から、制御棒駆動装置外径は、燃料集合体配列ピッチ（191mm）よりも小さいことが要求され、外径は、 $\phi 190$ mm程度（円筒形を仮定）のものが必要となる。

2) 引上げ力

L106A型磁気ジャック式制御棒駆動装置の引上げ力仕様は、360LB（約160kg）であるが、改良船用炉用としては、スクラム機能より挿入加速装置の設置が必要であるため、制御棒クラスタ重量そのものは、軽量になるものの、引上げ力仕様としては、200kg程度を目標としたい。

3) 駆動ストローク

燃料集合体の燃料棒有効長及び炉心核設計の要求から、制御棒駆動ストロークは、1200mm程度が設計仕様となる。しかし、挿入加速装置設置の観点から、あまり長いストローク仕様は、船用炉として現実的ではない。

4) 駆動速度

制御棒の駆動速度は、船用炉として非常に速い負荷変動条件（例えば、基底負荷から常用負荷までの80%の出力上昇を、30秒程度で行なう）に対応するため、出力調整用制御棒は、現有制御棒駆動装置並み（1143mm/分：全引抜に1分強）の駆動速度が必要であろう。

5) スクラム機能

改良船用炉の制御棒駆動装置には、船体の動揺・傾斜時においても、規定時間内に確実に制御棒を挿入することが要求されるため、重力落下によるスクラムに加え、加速ばね等による強制挿入機能が必要となる。

(3) 一体型炉の制御棒及び制御棒駆動装置

制御棒はハフニウム製の十字形制御棒であり、4枚のハフニウム板をジルカロイ製の十字形ピースを介して溶接して作られる（図3.36参照）。

本炉心に採用した十字形制御棒は以下の特徴を有する。

- (a) 局所出力ピーキング因子を低く抑える為の可燃性毒物の配置等、炉心核設計上の考慮によりフォロアを無くした。
- (b) 剛性が高く、船用炉の特徴である振動、動揺、衝撃等に強い。
- (c) B, Ag-In-Cd等の制御棒材に比べインシヤルコストは高いが、炉プラント寿命中交換の必要がない。

また、制御棒駆動装置は、蒸気発生器と炉心との間の原子炉容器中間部に配置し、原子炉容器横部に配置した電磁駆動装置の回転運動をラックアンドピニオンにより炉心の高さ方向の運動に変換し、制御棒を駆動する。駆動装置の基数を減らすため、駆動装置1基で2本の制御棒を駆動する。

CRDMの仕様は以下の通りである。

型	式	電磁駆動ラックアンドピニオン式
基	数	12

行程	1432 mm
最高使用圧力	135 kg/cm ² G
最高使用温度	320 °C

(4) 自己加圧一体型炉の制御棒及び制御棒駆動装置

吸収棒は中性子吸収材である炭化硼素 (B_4C) 粉末をステンレス製被覆管に充填したものである。制御棒クラスタは吸収棒 44 本をスパイダー継手で対称位置に配置したもので、燃料要素の制御棒案内管によって案内され、磁気ジャック方式の制御棒駆動装置 (CRDM) で駆動されることにより、原子炉の起動、停止及び負荷変動に伴う反応度の制御に用いられる。

制御棒クラスタは燃料要素 16 体の全部に設けられている。

吸収棒は図 3.38 に示すように、中性子吸収材である炭化硼素 (B_4C) 粉末を振動充填法によってステンレス製被覆管に充填したもので、両端にステンレス製の端栓を溶接した密封構造のものである。吸収材スタックの上部には支持管を介して押えばねが設けられ、充填物を上から密封しており、上部のプレナム部及び炭化硼素充填物中の残された空洞が、 B^{10} の中性子捕獲の際 (n, α) 反応で生成されるヘリウムガスを収集する役目をしている。

制御棒クラスタは図 3.38 に示すように、吸収棒 44 本をスパイダー継手で対称位置に配置したものでスパイダー継手とねじによって固定されている。スパイダー継手と制御棒駆動装置の駆動軸はカップリングで連結されている。

表 3.1 反応度制御方式

半一体型炉 (試設計)	半一体型炉 (評価炉心)	一体型炉	自己加圧一体型炉
1. クラスタ型制御棒 (B ₄ C)	1. クラスタ型制御棒 (B ₄ C)	1. 十字型制御棒 (ハフニウム)	1. クラスタ型制御棒 (B ₄ C)
2. 可燃性毒物 (ガドリニアを燃料中に混入)	2. 可燃性毒物 (ガドリニアを用い以下の2種類のタイプを採用) ① 燃料中に混入して用いるタイプ ② ガドリニアのみでBP棒を形成しRCC案内シンプルの中に挿入して用いるタイプ(アルミナと混合)	2. 可燃性毒物 (ガドリニアを用いアルミナとの混合焼結体で使用) (配置) ① 燃料板中のキャラメル燃料の一部に置き換える ② L型BP棒として炉心外周の8体の燃料集合体に配置 また、軸方向出力分布を考慮し上下端の数は置き換えない	2. 可燃性毒物 (ガドリニアを用いアルミナと混合焼結したBP棒) 3. ケミカルシム (冷却材中のボロンの濃度を変えて反応度の微調整などを行なう)
3. ケミカルシムは使用しない	3. ケミカルシムは使用しない	3. ケミカルシムは使用しない	(各制御役割) ① 制御棒： 炉の起動停止及び負荷変動に伴う短時間の反応度制御に用いる ② 制御棒+ケミカルシム： 炉運転中の全出力反応度と全Xe反応度の制御 ③ BP-ケミカルシム： 燃料の燃焼に伴う長期反応度変化の大部分はBP棒で残りはケミカルシムで行なう ④ ケミカルシム： 各サイクル初期の反応度の微調整

表 3.2 ピーキングファクタ

半一体型炉 (試設計)	半一体型炉 (評価炉心)	一体型炉	自己加圧一体型炉
熱流束熱水路係数 $F_Q = 3.36$ $= F_N \times F_E$	同 左 $F_Q = 3.96$	同 左 F_Q (熱水力設計使用 値) = 4.68 F_Q (核設計結果に基 づく値) = 4.39	炉心全体の最大出力ピ ーキング係数 = 約 2.1
核的熱流束熱水路係数 $F_N = 3.26$	同 左 $F_N = 3.78$		軸方向の最大出力ピー キング係数 = 約 1.4
工学的熱流束熱水路係 数 $F_E = 1.03$	同 左 $F_E = 1.03$	同 左 F_N (キャラメル中最 高点) = 3.84 F_N (キャラメル単位) = 3.34	半径方向の最大出力ピ ーキング係数 = 約 1.5
※対応した燃料棒線出 力は 20.5 kw/m で あり目標値 25 以下で ある	※ 7.1×3.96 = 28.1 kw/m		微視的出力分布係数 = 1.1 工学的熱流束熱水路係 数 = 1.03

F_Q = 局所最大燃料表面熱流束 / 平均燃料表面熱流束
 F_N = 局所最大燃料(線)出力密度 / 平均燃料(線)出力密度
 F_E = 製作公差による熱流束への影響分

表 3.3 燃 焼 度

半一体型炉 (試設計)	半一体型炉 (評価炉心)	一体型炉	自己加圧一体型炉
炉心平均燃焼度 約 18000 MWD/tU	同 左 約 32000 MWD/tU	同 左 約 30400 MWD/tU	同 左 約 19000 MWD/tU
軸方向平均最大燃焼度 約 27000			最大燃料要素平均燃焼 度 約 24000
ペレット単位最大燃焼 度 約 44000	同 左 約 62000	キャラメル単位最大燃 焼度 約 55200	最大燃料棒平均燃焼度 約 28000 ペレット単位最高燃焼 度 約 41000

表 3.4 反応度停止余裕 (ワンロードスタック基準)

半一体型炉 (試設計)	半一体型炉 (評価炉心)	一体型炉	自己加圧一体型炉
常温における最大反応度制御棒クラスタ 1 本固着状態での実効増倍率はサイクル初期が最も厳しいが $1\% \Delta \rho$ の余裕をもって炉を停止することができる。 停止余裕反応度 -1000 pcm	同 左 停止余裕反応度 -1200 pcm	最も厳しい BOL の冷態クリーン炉心において、最も反応度効果の高い 2 本の制御棒 1 組が炉外にスタックした場合、挿入された制御棒の反応度効果を 10% 少なく見積っても、2200 pcm の停止余裕をもって冷態未臨界を達成し得る。	BOL で冷却水中にボロンのない冷態において、反応度価値のもっとも高い制御棒が 1 本引き抜かれたまま挿入できず、残り 15 本の制御棒が全挿入されたとき (ワンロードスタック時) 反応度は、-2.3% であり未臨界の状態に維持できる。

表 3.5 半一体型炉(試設計)の実効増倍率及び制御棒反応度効果(サイクル初期)

	実効増倍率	制御棒価値($\% \Delta \rho$)
1) 高温全出力 キセノン無し		
制御棒パターン		
全制御棒引抜	1.047	
バンク C 全挿入	0.991	5.50
バンク C + B 全挿入	0.938	5.50
バンク C + B + A 全挿入	0.934	0.43
バンク C + B + A + S 全挿入	0.803	15.11
2) 高温零出力 キセノン無し		
全制御棒引抜	1.050	
バンク C 全挿入	0.994	5.48
バンク C + B 全挿入	0.944	5.16
バンク C + B + A 全挿入	0.941	0.32
バンク C + B + A + S 全挿入	0.814	14.50
3) 常温停止 キセノン無し		
全制御棒引抜	1.133	
バンク C 全挿入	1.094	3.50
バンク C + B 全挿入	1.054	3.72
バンク C + B + A 全挿入	1.053	0.09
バンク C + B + A + S 全挿入	0.929	12.53
C - 5 固着(他, 全挿入)	0.990	
(停止余裕 - 1000 pcm)		

表 3.6 半一体型炉(試設計)の実効増倍率及び制御棒反応度効果(サイクル中期)

制御棒パターン	実効増倍率	制御棒価値($\% \Delta \rho$)
1) 高温全出力 キセノンは定格運転時の平衡状態に固定		
全制御棒引抜	1.081	
バンクC全挿入	1.009	6.89
バンクC+B全挿入	0.939	7.19
バンクC+B+A全挿入	0.930	0.96
バンクC+B+A+S全挿入	0.807	14.19
2) 高温零出力 キセノン無し		
全制御棒引抜	1.109	
バンクC全挿入	1.036	6.81
バンクC+B全挿入	0.962	7.41
バンクC+B+A全挿入	0.955	0.73
バンクC+B+A+S全挿入	0.830	14.03
3) 常温停止 キセノン無し		
全制御棒引抜	1.161	
全制御棒挿入	0.927	22.51
D-4固着(他, 全挿入)	0.989	
(停止余裕 - 1100 pcm)		

表 3.7 半一体型炉(評価炉心)の実効増倍率及び制御棒反応度効果(サイクル初期)

制御棒パターン	実効増倍率	制御棒価値($\% \Delta \rho$)
1) 高温全出力 キセノン無し		
全制御棒引抜	1.076	
バンクC全挿入	1.024	4.71
バンクC+B全挿入	0.980	4.36
バンクC+B+A全挿入	0.978	0.19
バンクC+B+A+S全挿入	0.812	20.89
2) 高温零出力 キセノン無し		
全制御棒引抜	1.080	
バンクC全挿入	1.028	4.71
バンクC+B全挿入	0.984	4.36
バンクC+B+A全挿入	0.982	0.19
バンクC+B+A+S全挿入	0.816	20.76
3) 常温停止 キセノン無し		
全制御棒引抜	1.187	
バンクC全挿入	1.144	3.18
バンクC+B全挿入	1.105	3.11
バンクC+B+A全挿入	1.102	0.18
バンクC+B+A+S全挿入	0.944	15.19
D-6固着(他, 全挿入)	0.988	
(停止余裕 - 1200 pcm)		

表 3.8 自己加圧一体型炉の制御棒反応度効果(寿命初期)

	炉 心 状 態	余剰反応度： ρ
1	全制御棒 16 本挿入	- 28.3 %
2	制御バンク E 1 本のみ引抜き	- 4.1 %
3	制御バンク D (または C) 1 本のみ引抜き	- 2.3 %
4	制御バンク A (または B) 1 本のみ引抜き	- 7.7 %

(ボロンのない炉心)

表 3.9 余剰反応度(制御棒が炉心内固着時の運転可能性)

半一体型炉 (試設計)	半一体型炉 (評価炉心)	一体型炉	自己加圧一体型炉
<p>1000 MWD/t で実効増倍率は、1.023 まで下がるが最大落下制御棒値は 1.3%$\Delta\rho$ (D-4 落下) であり、出力運転状態を維持することができる。</p> <p>上記より余剰反応度はワンロード炉内スタックの場合でも 1000 pcm ある。</p>	<p>炉心実効増倍率は、EOL 時に 32000 MWD/t で最小となるが、この時点での最大落下制御棒値は 1.17%$\Delta\rho$ (D-4 落下) であり、32000 MWD/t の余剰反応度は 1.9%$\Delta\rho$ であり、出力運転状態を維持することができる。</p> <p>(+ 730 pcm)</p>	<p>余剰反応度が小さいため原子炉起動上最も不利となる EOL において、最も反応度効果の高い組の制御棒 2 本が炉心内に全挿入された状態で実効増倍率を求めた結果、十分炉を 30 MWt (30 % 出力) で運転し得ることを確認した。</p> <p>ただし、経済性及び発生頻度の低さを考慮して 2 次側蒸気圧力を 16 kg/cm² まで下げ、この圧力で炉出力 30 MWt を発生し得る 222.5℃ まで一次冷却水温度を下げた運転することとした。</p> <p>(+1,580 pcm)</p> <p>・反応度利得 +3,910 pcm 3,910 - 2,330 = +1,580 pcm</p>	<p>最も反応度の大きい制御棒 1 本が挿入された状態では余剰反応度は 5.8% あり、Xe 平衡による反応度制御分は 2.2% と燃焼による反応度低下分 3.2% の合計 5.4% より大きいので、最大値の制御棒 1 本が挿入された状態でも低出力 (30% 出力) での原子炉の運転は可能である。</p> <p>(+400 pcm)</p>

表 3.10 半一体型炉(試設計)の実効増倍率及び制御棒反応度効果(サイクル末期)

制御棒パターン	実効増倍率	制御棒価値($\% \Delta \rho$)
1) 高温全出力 キセノン状態は定格運転の平衡状態に固定		
全制御棒引抜	1.047	
バンク C 全挿入	0.977	6.92
バンク C + B 全挿入	0.913	6.78
バンク C + B + A 全挿入	0.905	0.88
バンク C + B + A + S 全挿入	0.778	15.12
2) 高温零出力 キセノン無し		
全制御棒引抜	1.075	
バンク C 全挿入	1.004	6.83
バンク C + B 全挿入	0.939	6.69
バンク C + B + A 全挿入	0.933	0.64
バンク C + B + A + S 全挿入	0.805	14.76
3) 常温停止 キセノン無し		
全制御棒引抜	1.128	
全制御棒挿入	0.905	22.03

表 3.11 半一体型炉(評価炉心)の実効増倍率及び制御棒反応度効果(サイクル中期)

制御棒パターン	実効増倍率	制御棒価値($\% \Delta \rho$)
1) 高温全出力 キセノン状態は定格運転の平衡状態に固定		
全制御棒引抜	1.040	
バンク C 全挿入	0.985	5.42
バンク C + B 全挿入	0.936	5.29
バンク C + B + A 全挿入	0.934	0.21
バンク C + B + A + S 全挿入	0.769	23.03
2) 高温零出力 キセノン無し		
全制御棒挿入	1.044	
バンク C 全挿入	0.988	5.40
バンク C + B 全挿入	0.938	5.45
バンク C + B + A 全挿入	0.936	0.22
バンク C + B + A + S 全挿入	0.772	22.68

表 3.12 半一体型炉(評価炉心)の実効増倍率及び制御棒反応度効果(サイクル末期)

(1) 高温全出力 キセノン状態は定格運転の平衡状態に固定

制御棒パターン	実効増倍率	制御棒価値(% $\Delta\rho$)
全制御棒引抜	1.019	
バンクC全挿入	0.955	6.55
バンクC+B全挿入	0.900	6.39
バンクC+B+A全挿入	0.899	0.15
バンクC+B+A+S全挿入	0.736	24.70

(2) 高温零出力 キセノン無し

全制御棒引抜	1.024	
バンクC全挿入	0.960	6.54
バンクC+B全挿入	0.903	6.55
バンクC+B+A全挿入	0.902	0.16
バンクC+B+A+S全挿入	0.741	24.08

表 3.13 自己加圧一体型炉の反応度バランス(制御棒全引抜, ボロンのない炉心)

	炉 心 状 態	余剰反応度： ρ
1	寿命初期, 冷態 (20°C), 固体可燃性ポイズンなし	25.4 %
2	寿命初期, 冷態 (20°C), 固体可燃性ポイズンあり	17.5 %
3	寿命初期, 温態零出力 (308°C), 固体可燃性ポイズンなし	19.3 %
4	寿命初期, 温態零出力 (308°C), 固体可燃性ポイズンあり	8.8 %
5	寿命初期, 温態, 全出力, 固体可燃性ポイズンあり	7.4 %
6	Xe/Sm平衡状態, 温態, 全出力, 固体可燃性ポイズンあり	5.2 %
7	燃焼 (平均燃焼度 19,000 MWd/tU), 温態, 全出力, 固体可燃性ポイズンあり (燃焼による反応度低下： $5.2 - 2.0 = 3.2\% \Delta\rho$)	2.0 %

表 3.14 自己加圧一体型炉の温態零出力時の制御バンクの反応度効果

寿命初期, 固体可燃性ポイズン有, 308°C (ボロンのない炉心)

	炉 心 状 態	反 応 度
1	全制御棒 16 体挿入 $\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}}$	-56.2 %
2	制御バンク E 引抜き $\rho = \frac{K_1 - K_2}{K_1 \cdot K_2}$	36.1 %
3	制御バンク E 及び D 引抜き	47.9 %
4	制御バンク E, D 及び C 引抜き	55.7 %
5	制御バンク E, D, C 及び B 引抜き	59.9 %
6	制御バンク A (または B) 1 本のみ挿入 $\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}}$	5.8 %

表 3.15 Xe オーバライド(炉緊急停止時の再起動可能性)

半一体型炉 (試設計)	半一体型炉 (評価炉心)	一体型炉	自己加圧一体型炉
<p>高温全出力平衡Xe状態から炉停止した後のXeの最大毒物作用は440 pcmであり、炉心寿命全期間にわたって炉停止後のキセノン毒作用がある場合でも原子炉を再起動できる。</p> <p>(原子炉運転中のXe/Sm平衡は考慮)</p>	<p>炉停止後の最大有害作用はEOLで最も大きく、$1.69\% \Delta \rho$ (1690 pcm) だが、EOLの余剰反応度は$1.9\% \Delta \rho$ (1900 pcm) であり、炉停止後のXe毒作用がある場合でも原子炉を再起動できる。</p> <p>(原子炉運転中のXe/Sm平衡は考慮)</p> <p>(+210 pcm)</p>	<p>制御棒炉内固着時の運転可能性の検討と同様に、二次側蒸気圧力を16 kg まで下げ、この圧力で炉出力 30 MWt を発生し得る 222.5°C まで一次冷却水温度を下げた。これによる反応度利得は、約 3000 pcm。</p> <p>このような条件のもとで、ゼノンによる過渡的な最大毒物効果を求めた結果、</p> <p>100%出力からのスクラム： 6時間後に 600 pcm</p> <p>155%出力からのスクラム： 8時間後に 1450 pcm</p> <p>であり、これらの状態で十分炉を運転し得ることを確認した。</p> <p>(原子炉運転中のXe/Sm平衡は考慮)</p>	<p>Xe平衡時のEOLにおいてXeオーバライドなどの補償分として約$2\% \Delta \rho$の余剰反応度を含んでいる。</p> <p>(原子炉運転中のXe/Sm平衡は考慮)</p>

表 3.16 可燃性毒物

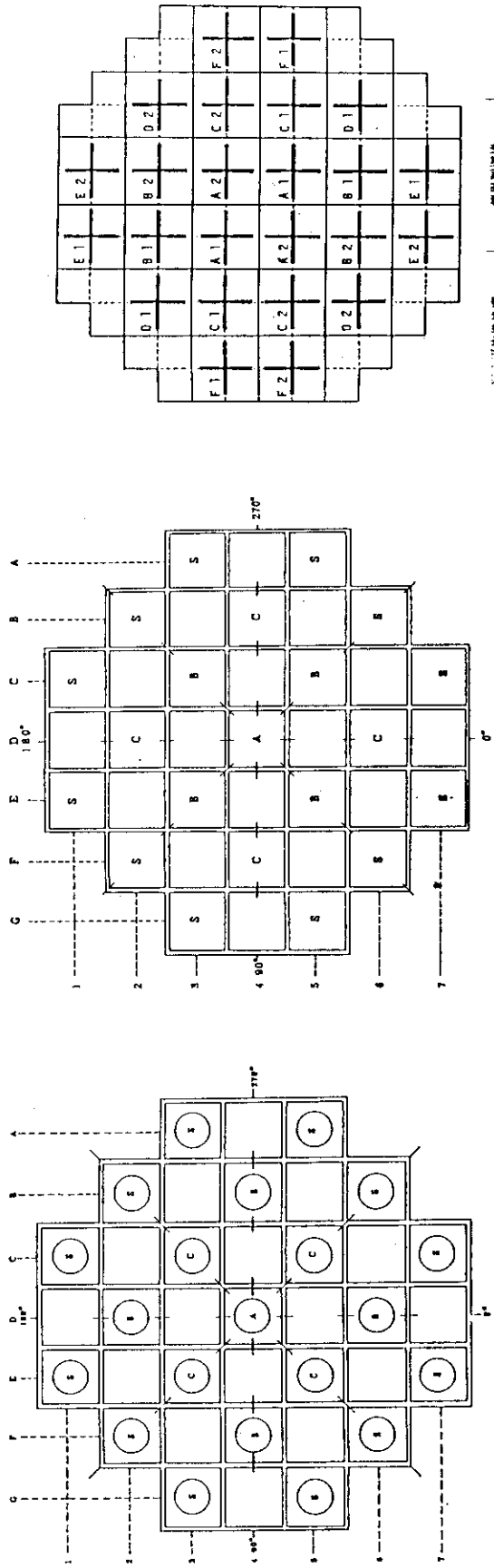
半一体型炉 (試設計)	半一体型炉 (評価炉心)	一体型炉	自己加圧一体型炉
<p>・毒物としてガドリニア (Gd_2O_3) を使用</p> <p>・10 wt % のガドリニアを燃料 (UO_2) 中に混入した可燃性毒物棒 (BP)</p> <p>(大量に使用する場合燃え残りの少ないガドリニアを使用するのが適当である)</p> <p>1 アセンブリ (燃料棒総数 297 本) 中の BP 入り燃料棒の本数・濃度は次の 5 種類:</p> <p>第 1 領域 (3.7 wt % U^{235})</p> <p>① 20 本 ② 32 本 ③ 36 本</p> <p>第 2 領域 (4.7 wt % U^{235})</p> <p>④ 20 本 ⑤ 24 本</p>	<p>・毒物: ガドリニア</p> <p>① ガドリニア混入燃料棒: 燃料の中に 10 wt % のガドリニアを混入して用いる。 (また、軸方向上下端とも各 11% をガドリニアなしとしている。)</p> <p>② ガドリニア BP 棒アルミナ (Al_2O_3) と混合し、燃料とは分離。ガドリニアの濃度は 20 wt % (アルミナ 80 wt %)。</p> <p>燃料中に混入したガドリニアのみでは MOL で燃え尽きてしまい余剰反応度が大きくなりすぎるため BP 棒を設けている。 太径にして燃焼速度をあえて遅くして、EOL の反応度損失をなるべく小さくしている。</p> <p>(軸方向上下とも各 11% をガドリニアなしとしている。)</p>	<p>・毒物: ガドリニア</p> <p>・ガドリニアをアルミナとの混合焼結体の形で採用。 (長寿命炉心の反応度抑制に適している。)</p> <p>1) アセンブリ中の UO_2 キャラメルと置き換える (13 枚の燃料板のうち 2 枚の両端) ガドリニアの濃度は以下:</p> <p>第 1 領域 (5.8%) 2100 mg/cc</p> <p>第 2 領域 (6.9%) 2100 mg/cc</p> <p>第 3 領域 (6.9%) 900 mg/cc</p> <p>2) L 形可燃性毒物棒を炉心周辺のアセンブリ間部に 8 本。 ガドリニアの濃度: 50 mg/cc</p> <p>1), 2) ともに軸方向上端から 5 個, 下端から 3 個はガドリニア無しとしている。</p>	<p>・毒物: ガドリニア</p> <p>・アルミナペレット中に混合してジルカロイ被覆管内に封入し、ポイズン棒として燃料要素格子内に配置する。</p>

表 3.17 制御棒及び制御棒駆動装置

半一体型炉 (試設計)	半一体型炉 (評価炉心)	一体型炉	自己加圧一体型炉
<ul style="list-style-type: none"> ・クラスタ型制御棒 (RCC) ・材質: B₄C ・アセンブリ 37 体中 21 体に配置 ・1本のクラスタは 16 本の制御棒から成る ・制御グループと停止グループに分けている ・制御用バンクを 3 つに分ける方式を採用 (軸方向のピーキングを悪化させないために) ・制御棒駆動装置 型式: 磁気ジャック式 傾斜を考慮してスクラムスプリングあり CRDM 外寸法: □ 273mm (現有の CRDM で可) 	<ul style="list-style-type: none"> ・クラスタ型制御棒 (RCC) ・材質: B₄C ・アセンブリ 37 体中 21 体に配置 ・1本のクラスタは 12 本の制御棒から成る ・制御グループと停止グループに分けている ・制御用バンクを 3 つに分けている ・制御棒駆動装置 型式: 磁気ジャック式 傾斜を考慮してスクラムスプリングあり CRDM 外径寸法: φ 190mm (円筒形とし, 現有 CRDM をさらに小型化する必要がある) 	<ul style="list-style-type: none"> ・十字型制御棒 ・材質: ハフニウム (ハフニウムとした理由は以下) ・B (ボロン) などに比ベニシャルコストは高いが ・高温高圧水中での耐食性に優れ ・中性子吸収特性の面から炉プラント寿命中交換を要しない ・十字形は剛性が高く, 船用炉の特徴である振動, 動揺, 衝撃などに強い ・制御棒駆動装置 型式: 横から駆動のラックアンドピニオン方式 ・1 CRDM は 2 本の制御棒を駆動する ・制御棒数 : 24 本 制御棒駆動装置数 : 12 基 ・制御棒の組分けは炉心中央に対し対称位置の 2 本ずつの組分けとした (A から F の 6 バンク) ・フォロアは設けていない 	<ul style="list-style-type: none"> ・クラスタ型制御棒 (RCC) ・材質: B₄C ・B₄C (炭化ホウ素) 粉末を SUS の被覆管に充填した吸収棒 44 本をスパイダー継ぎ手で対称位置に配置したもの ・アセンブリ 16 体中 16 体に配置 (全アセンブリ) ・A から E の 5 種類の制御バンクにまとめる ・制御棒駆動装置 型式: 磁気ジャック式

表 3.18 改良船用炉用制御棒駆動装置概略仕様（暫定値）

設 計 項 目	仕 様
外 径 (mm)	φ 190 程度
引 上 力 (kg)	200 程度目標
駆動ストローク (mm)	1200 程度
駆 動 速 度 (mm/分)	~ 1143 (L106A型並 45 inch/min.)
設 計 温 度 (°C)	330
設 計 圧 力 (kg/cm ²)	130
スクラム機能	重力落下+加速ばね
設 計 寿 命 (年)	20
Refueling	制御棒全挿入

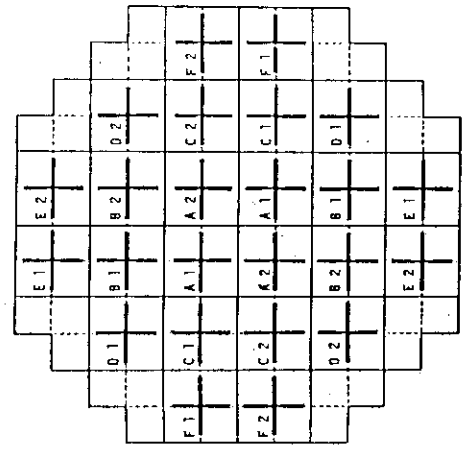


A : 制御グループ制御棒クラスパンクA
 B : 制御グループ制御棒クラスパンクB
 C : 制御グループ制御棒クラスパンクC
 S : 停止用制御棒クラスパンクS

A : 制御用制御棒クラスパンクA 1 体
 B : 制御用制御棒クラスパンクB 4 体
 C : 制御用制御棒クラスパンクC 4 体
 S : 停止用制御棒クラスパンクS 12 体

図 3.1 半一体型炉 (試設計) の制御棒配置

図 3.2 半一体型炉 (評価炉心) の制御棒配置



炉心平均燃焼度 (MWd/tU)	制御用制御棒グループ	棒入位置
0 (予備キセノン) ~ 8 000	A1, A2	全棒入
	D1, D2	同レベル部分棒入
	D1, D2	全棒入
8 000 ~ 16 000	A1, A2	同レベル部分棒入
	B1, B2	全棒入
16 000 ~ 18 000	B1, B2	同レベル部分棒入
	C1, C2	同レベル部分棒入
18 000 ~ 24 000	200MWd/tU ごとに (B1, B2) と (C1, C2) の機能交換による操作	
	B1, B2	同レベル部分棒入
24 000 ~ 26 000	C1, C2	同レベル部分棒入
	B1, B2	同レベル部分棒入
26 000 ~ 28 000	C1, C2	同レベル部分棒入
	B1, B2	同レベル部分棒入
28 000 ~ 30 000	B1, B2	同レベル部分棒入
	C1, C2	同レベル部分棒入
30 000 ~ 30 400	C1, C2	同レベル部分棒入

図 3.3 一体型炉の制御棒配置

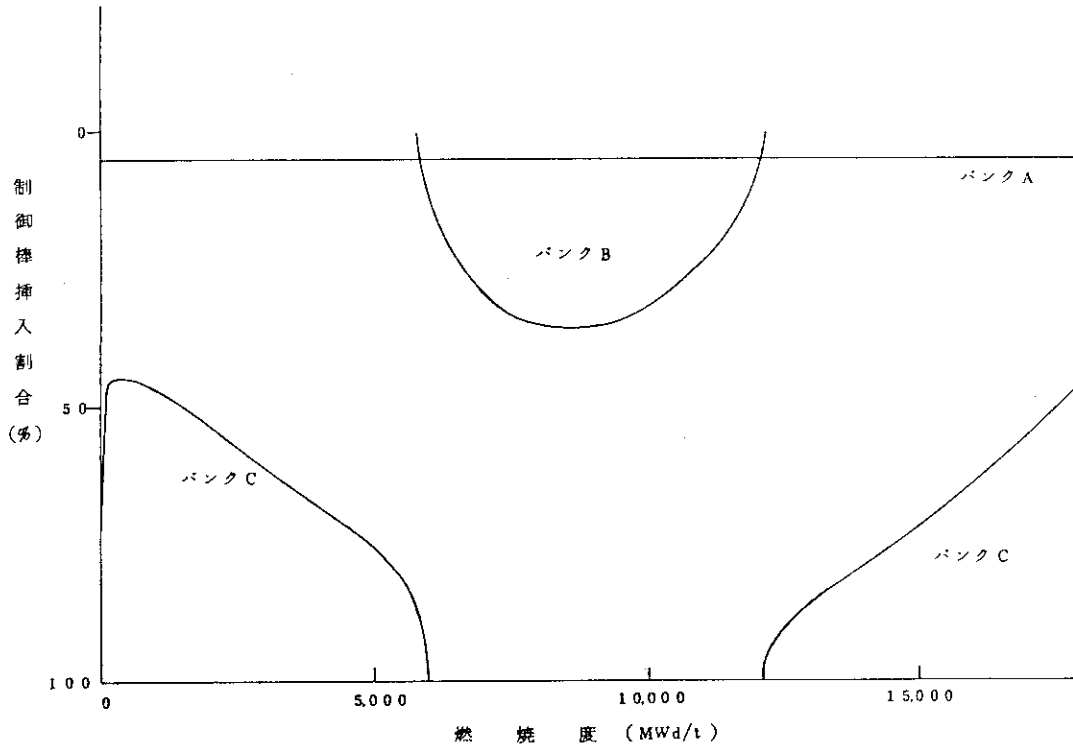


図 3.4 半一体型炉（試設計）の定格運転時の制御棒挿入度対燃焼度

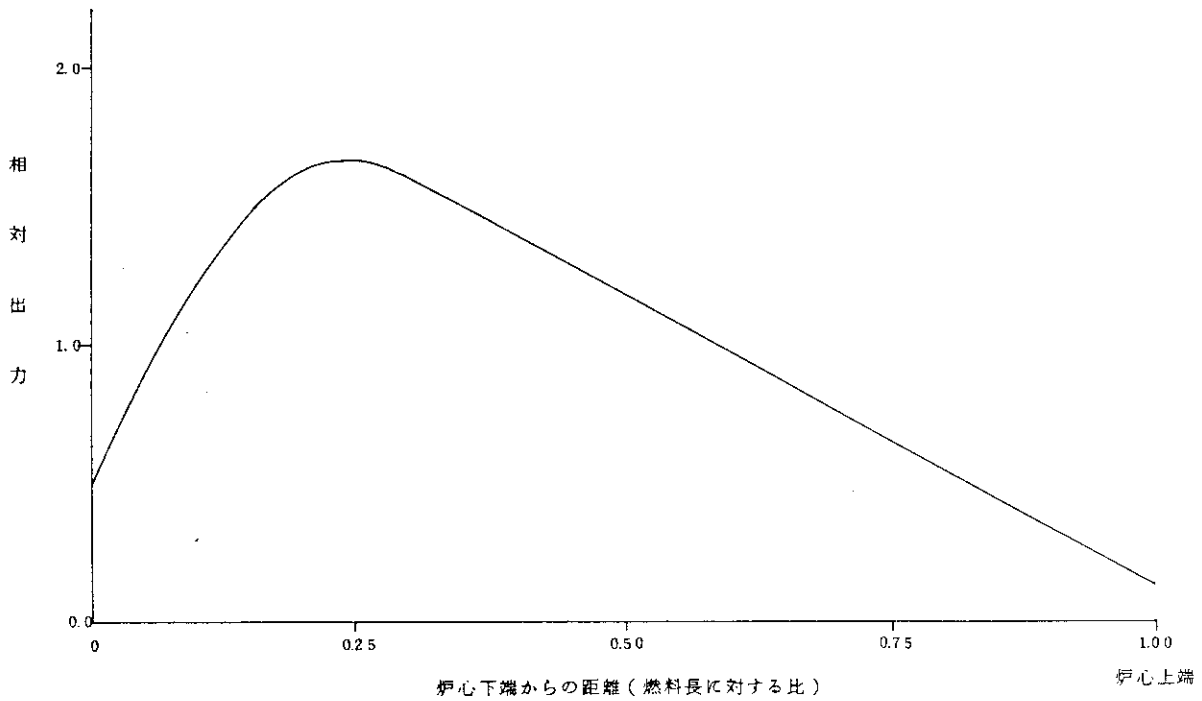


図 3.5 半一体型炉（試設計）の軸方向平均出力分布
 サイクル初期 高温全出力 バンク C 62%挿入, バンク A 5%挿入

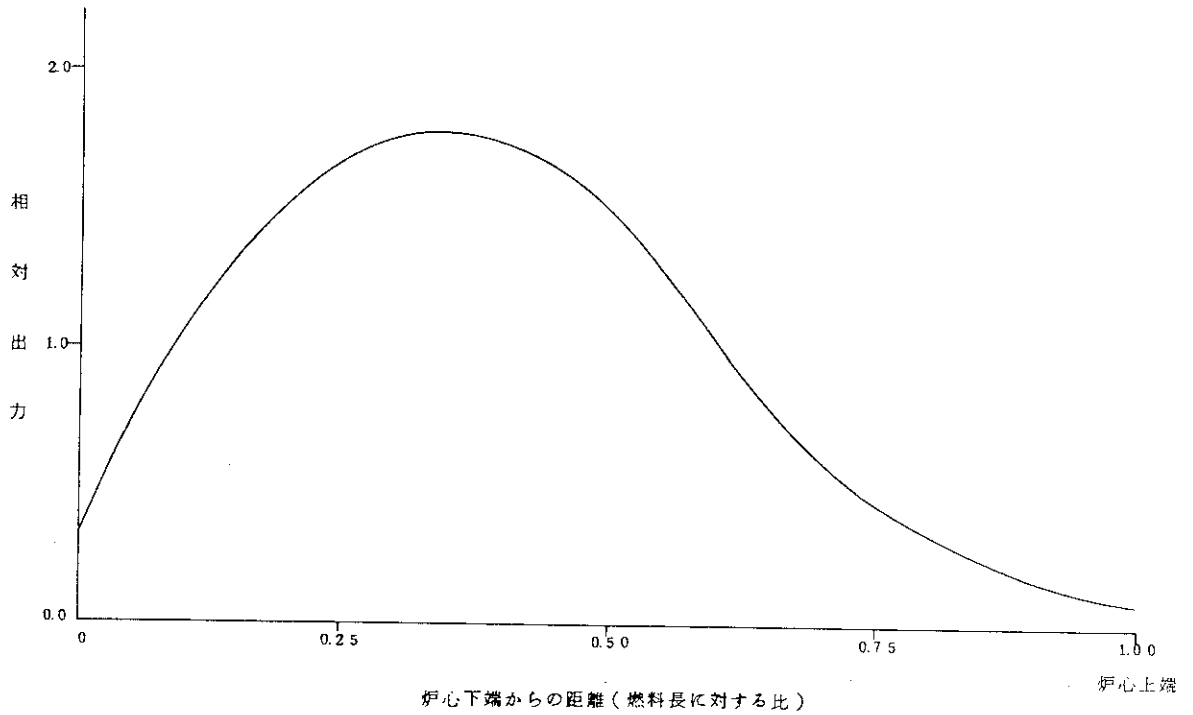


図 3.6 半一体型炉（試設計）の軸方向平均出力分布
 サイクル中期 高温全出力 バンク C 100%，バンク B 35%，バンク A 5%挿入

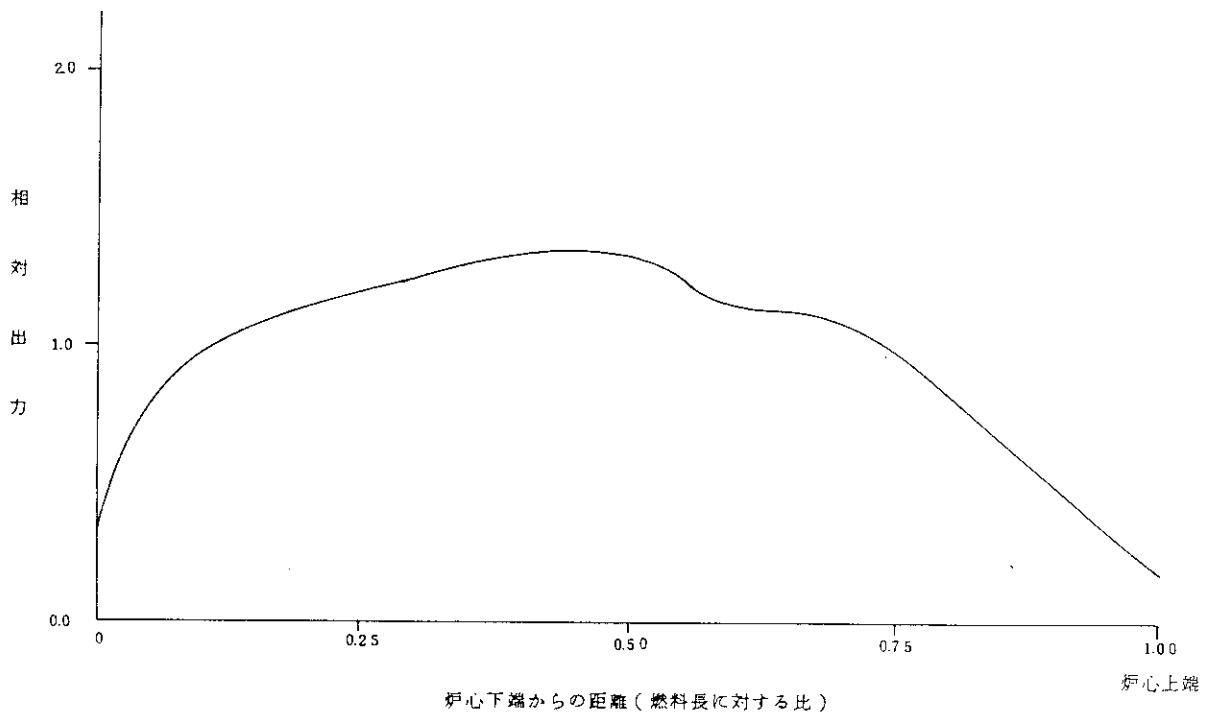


図 3.7 半一体型炉（試設計）の軸方向平均出力分布
 サイクル末期 高温全出力 バンク C 46%，バンク A 5%挿入

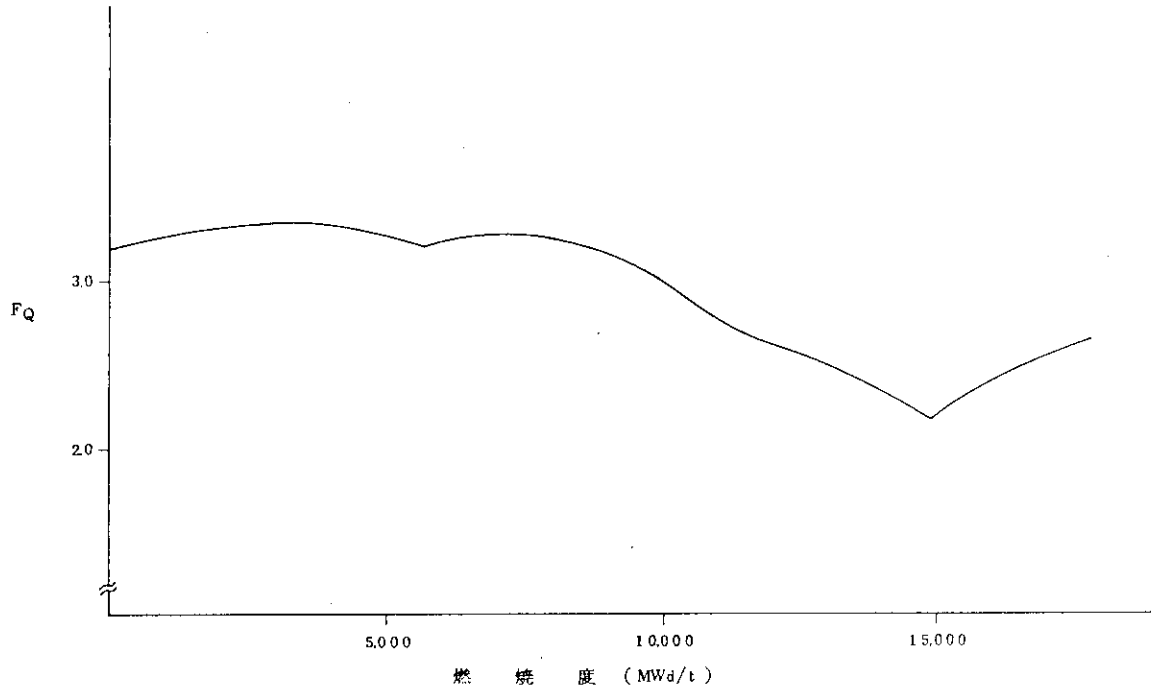


図 3. 8 半一体型炉（試設計）の F_Q の燃焼による変化

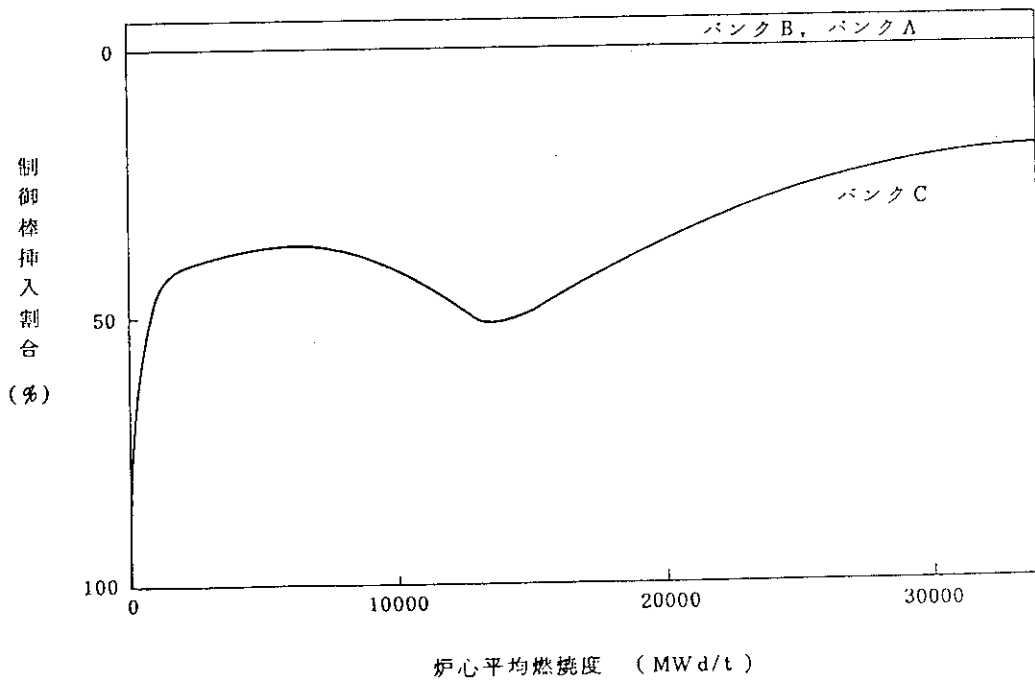


図 3. 9 半一体型炉（評価炉心）の定格運転時の制御棒挿入度対燃焼度

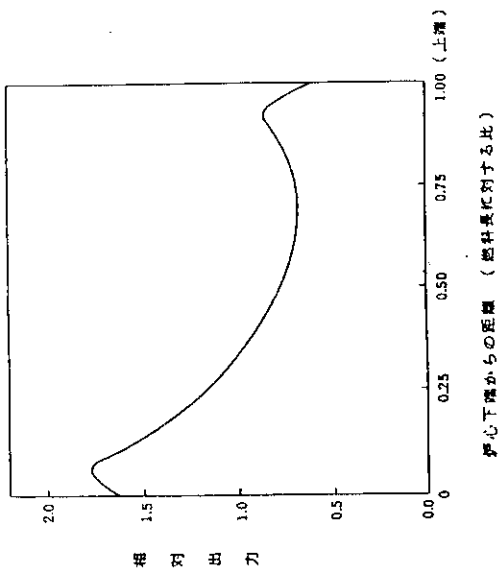


図 3.10 半一体型炉 (評価炉心) の
軸方向炉心平均出力分布
(サイクル初期, 高温全出力,
キセノン無し, バンク C 100%挿入)

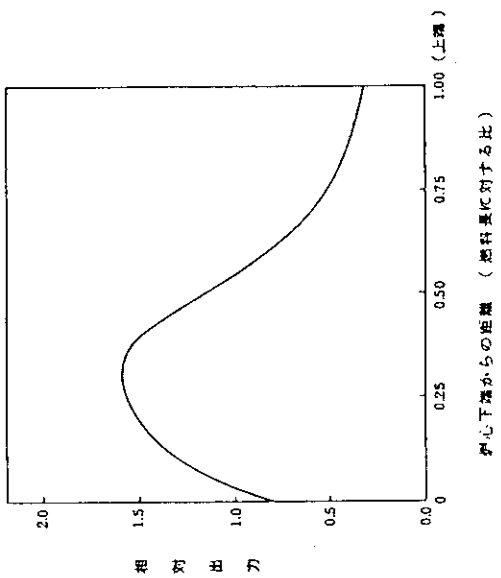


図 3.11 半一体型炉 (評価炉心) の
軸方向炉心平均出力分布
(サイクル中期, 高温全出力,
平衡キセノン, バンク C 50%挿入)

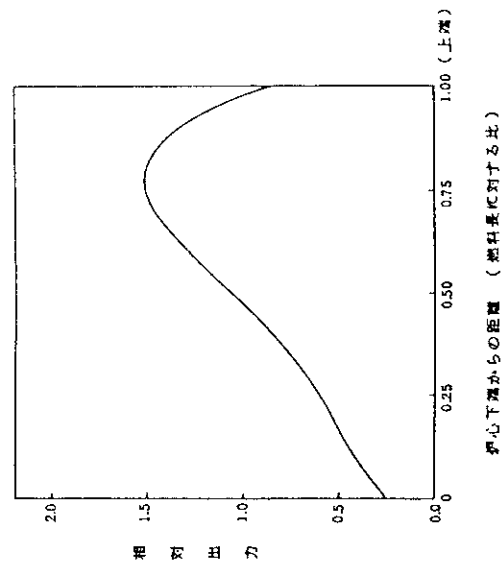


図 3.12 半一体型炉 (評価炉心) の
軸方向炉心平均出力分布
(サイクル末期, 高温全出力,
平衡キセノン, バンク C 20%挿入)

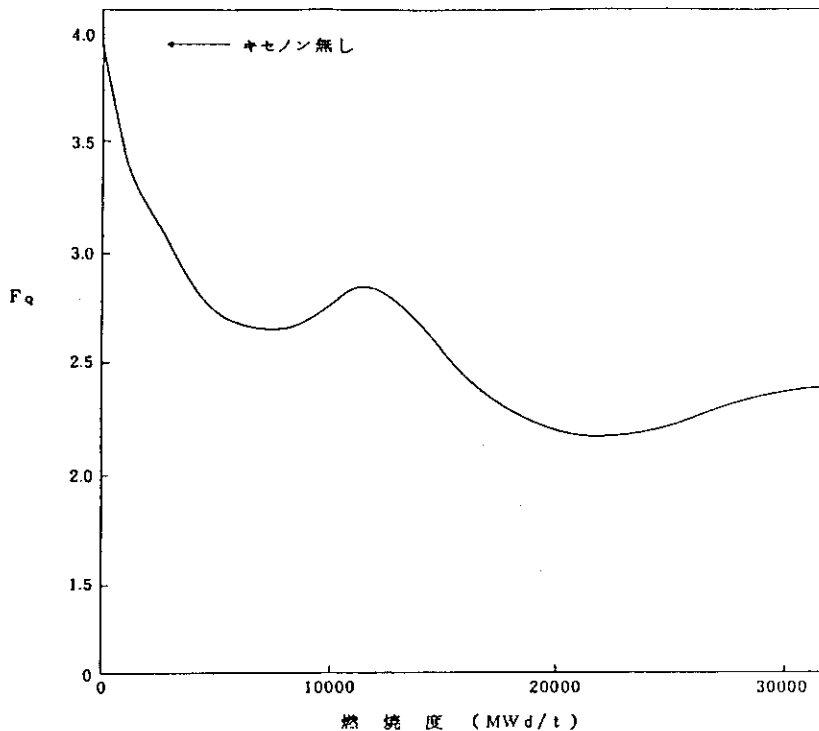


図 3.13 半一体型炉（評価炉心）の F_q の燃焼による変化
（全出力，平衡キセノン状態）

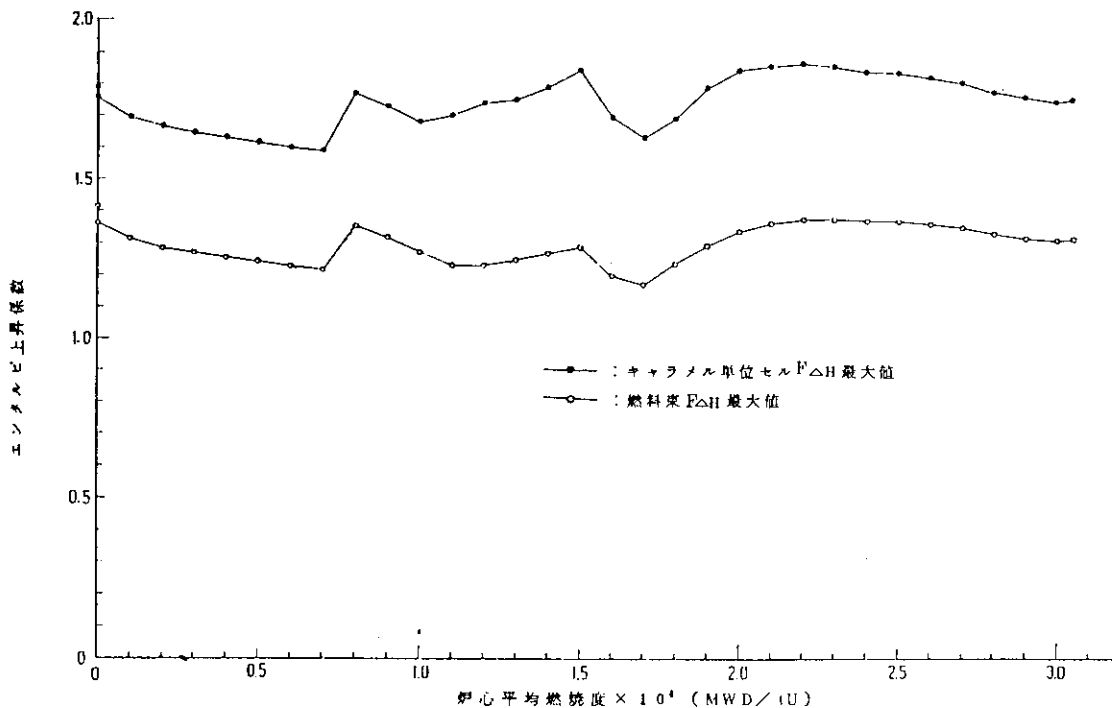


図 3.14 一体型炉のエンタルピー上昇係数 $F_{\Delta H}$ 最大値の燃焼変化

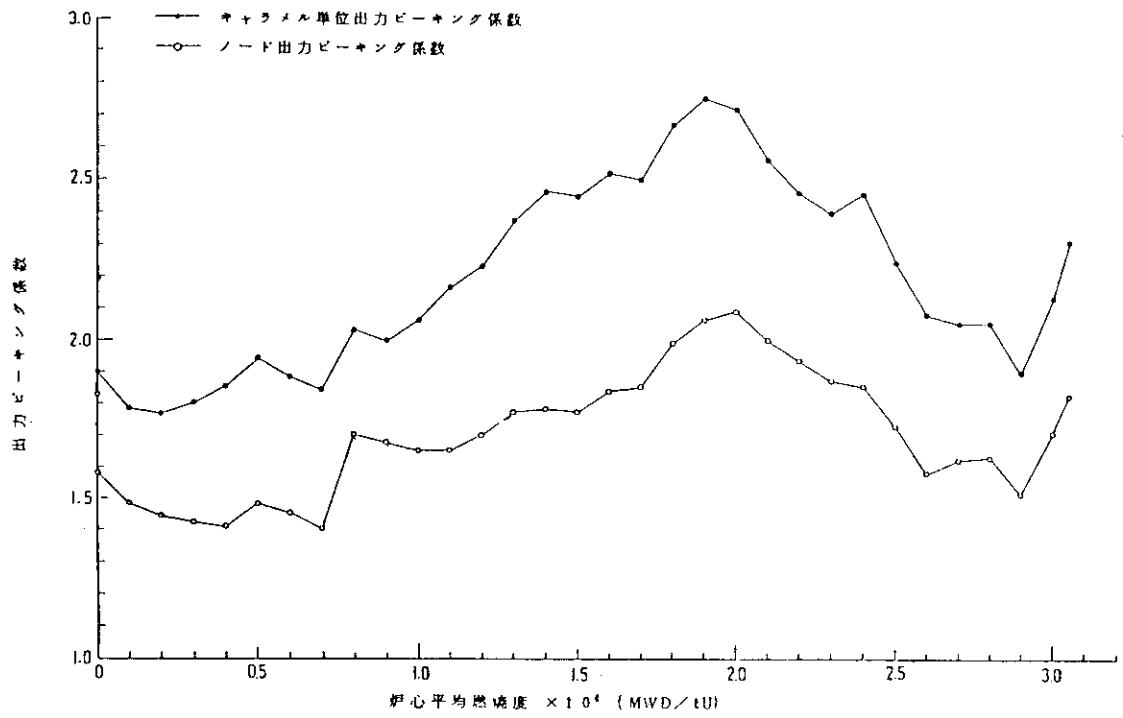


図 3.15 一体型炉の出力ピーキング係数の燃焼変化

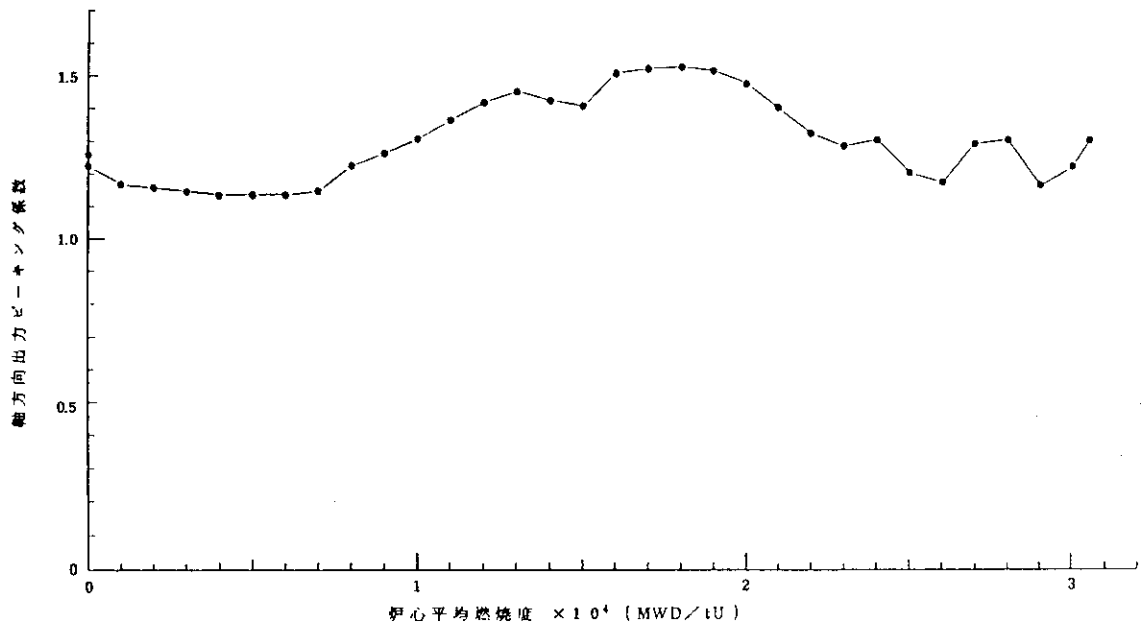


図 3.16 一体型炉の軸方向ピーキング係数燃焼変化

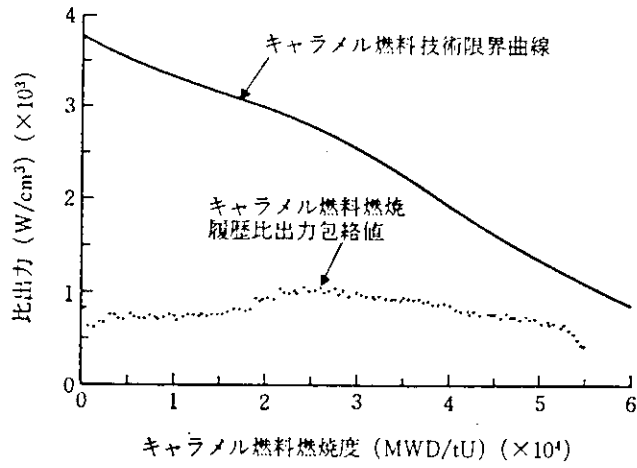


図 3.17 キャラメル燃料燃焼履歴包絡線

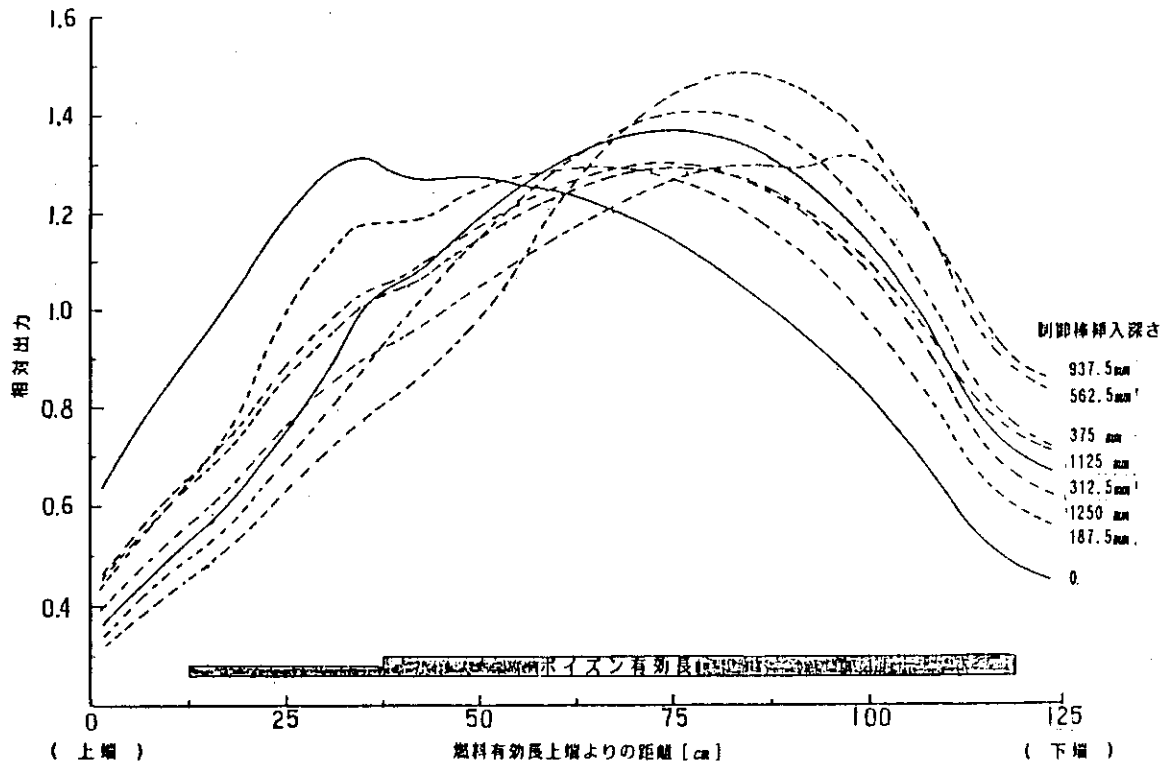


図 3.18 自己加圧一体型炉の軸方向出力分布の比較

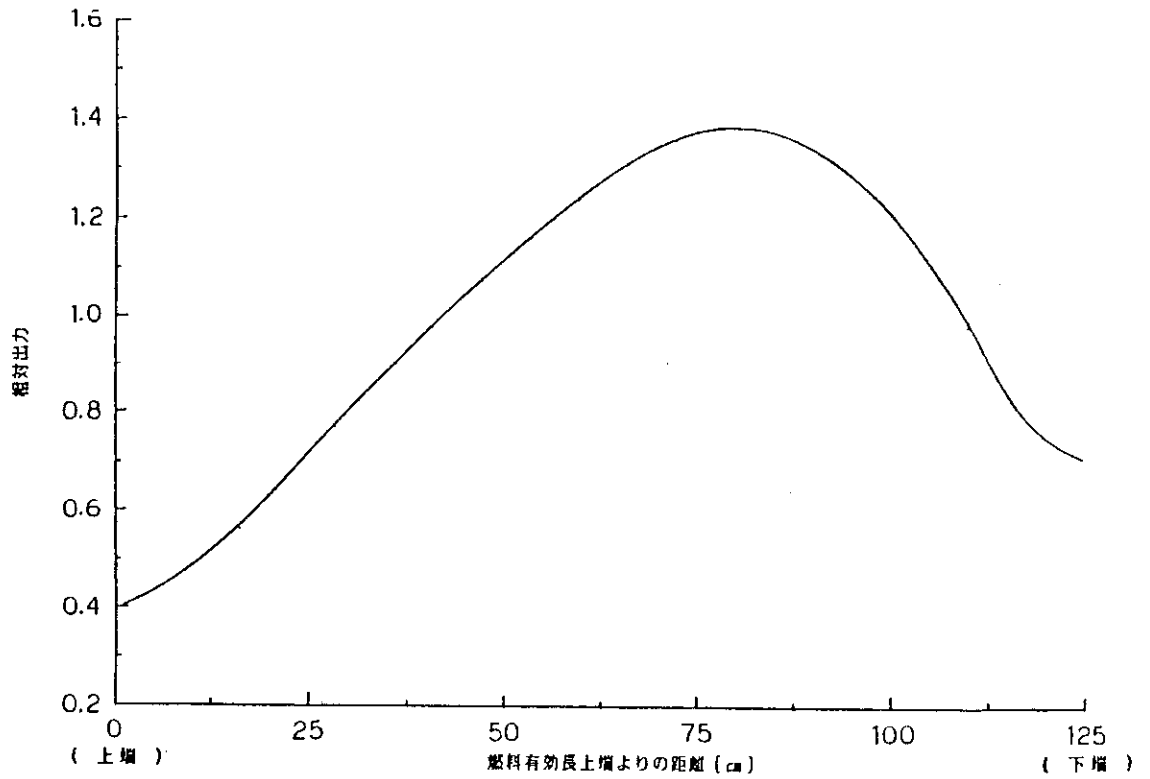


図 3.19 自己加圧一体型炉の最大負荷燃料棒の軸方向出力分布

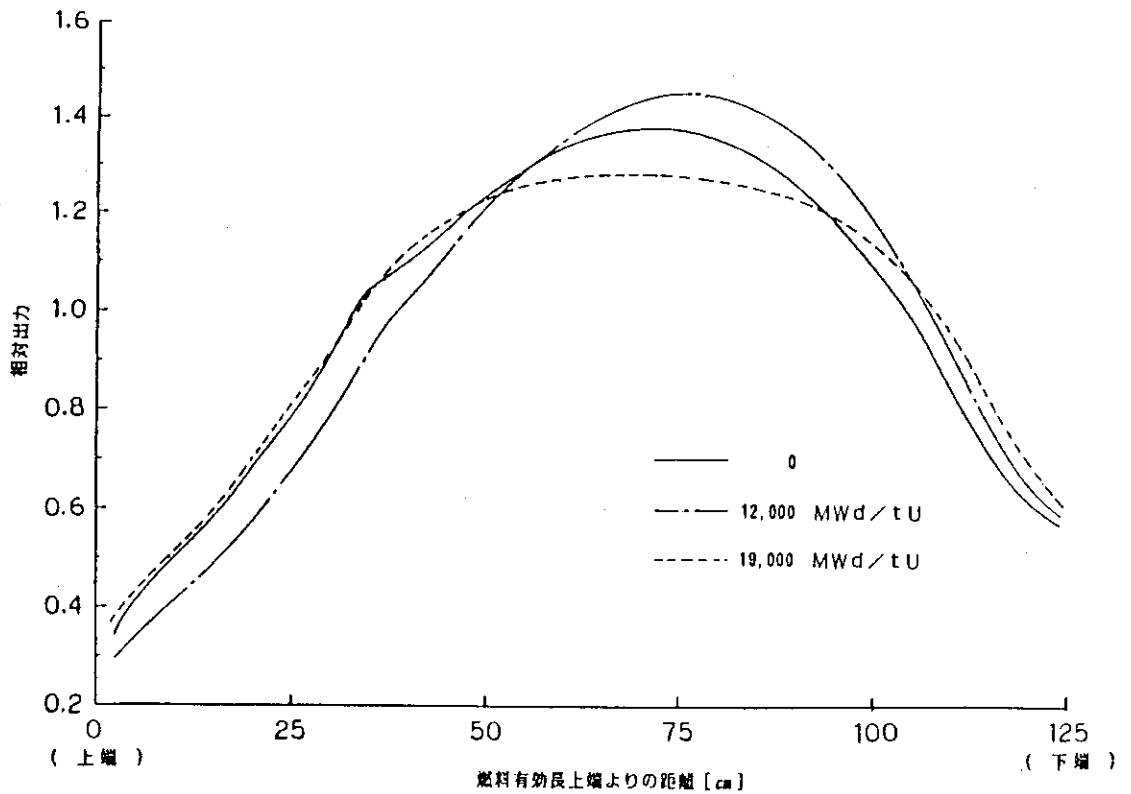


図 3.20 自己加圧一体型炉の燃焼による軸方向出力分布の変化

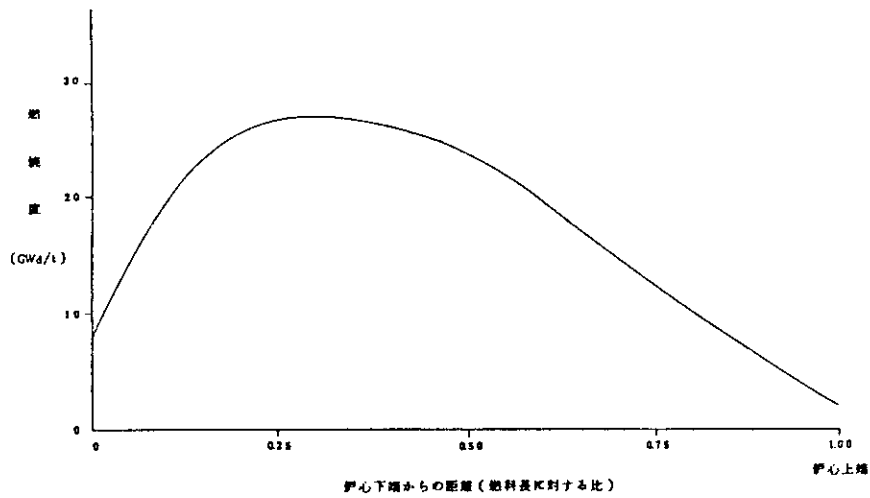


図 3.21 半一体型炉（試設計）の軸方向平均燃焼度分布
（サイクル末期）

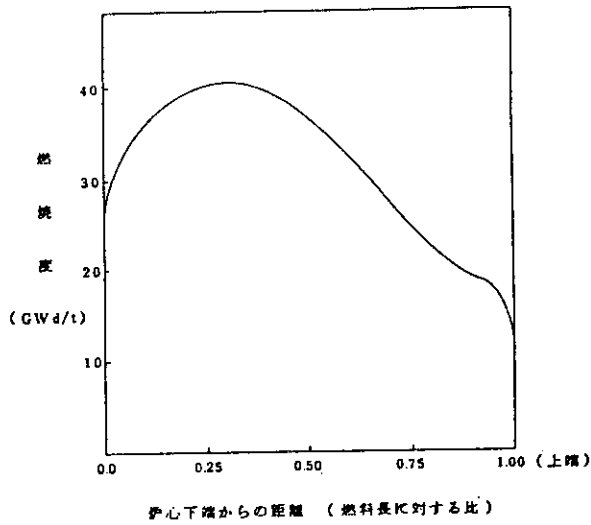


図 3.22 半一体型炉（評価炉心）の軸方向炉心
平均燃焼度分布（サイクル末期）

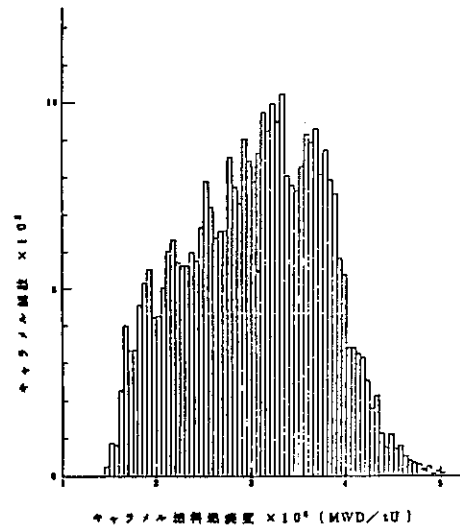


図 3.23 一体型炉の寿命末期におけるキャラメル
燃料燃焼度ヒストグラム

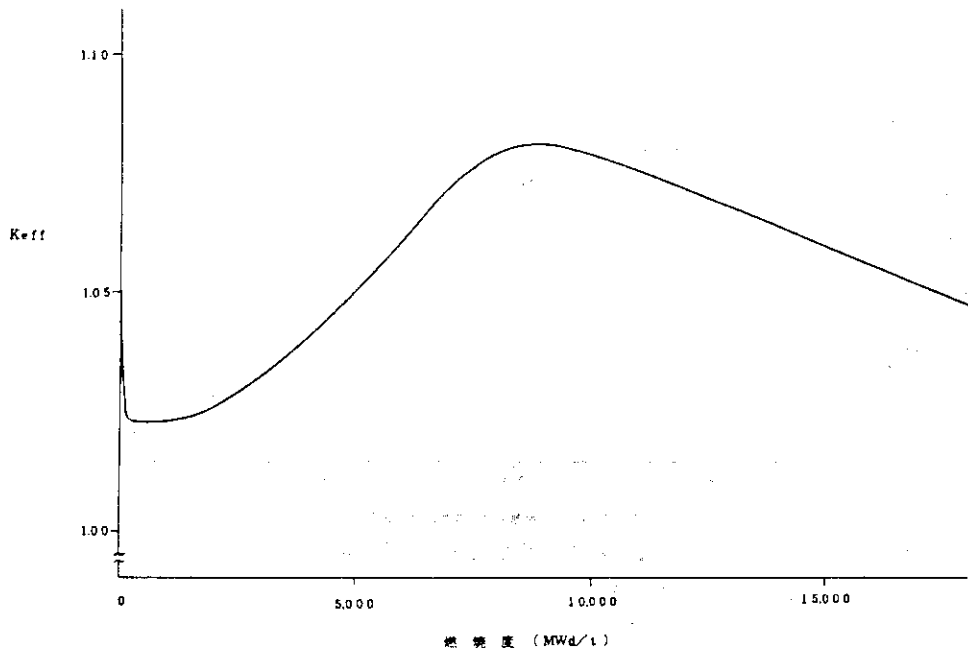


図 3.24 半一体型炉（試設計）の制御棒全引抜時の実効増倍率の燃焼による変化
 （キセノンは臨界時の制御棒位置における分布に固定）

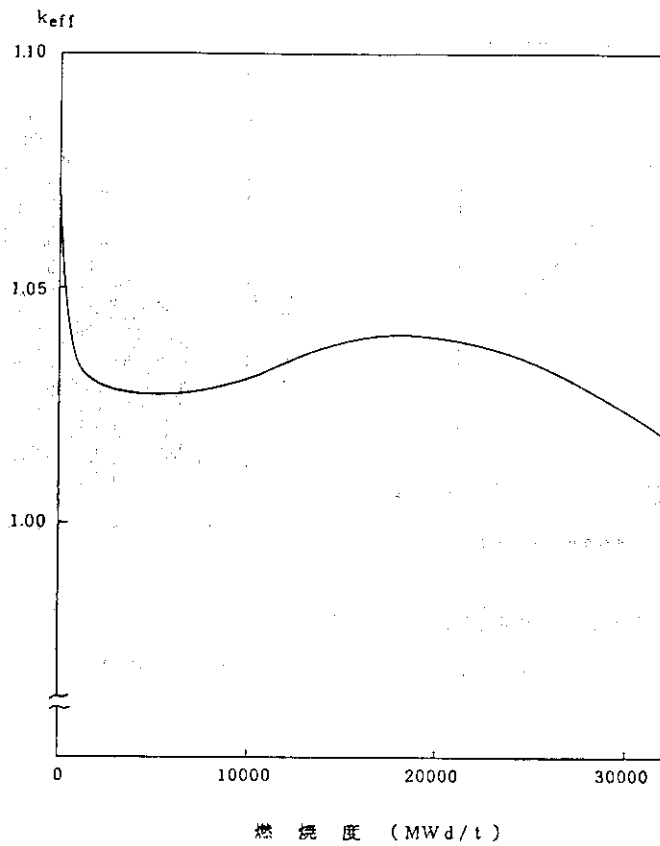


図 3.25 半一体型炉（評価炉心）の制御棒全引抜時の実効増倍率の燃焼による変化
 （キセノンは、臨界時の制御棒位置におけるキセノン分布に固定）

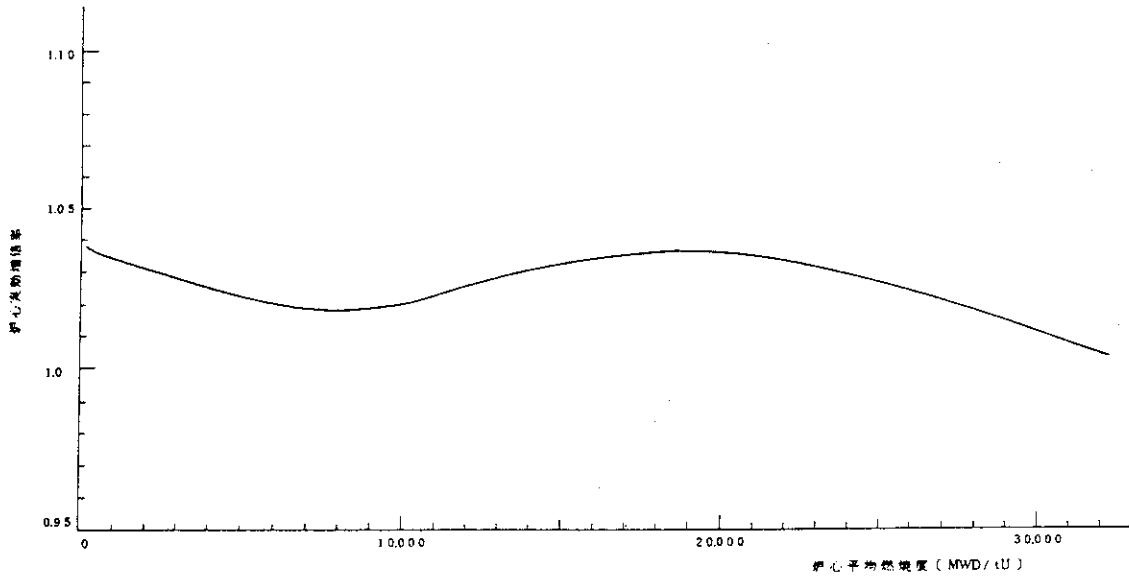


図 3.26 一体型炉の炉心実効増倍率の燃焼変化

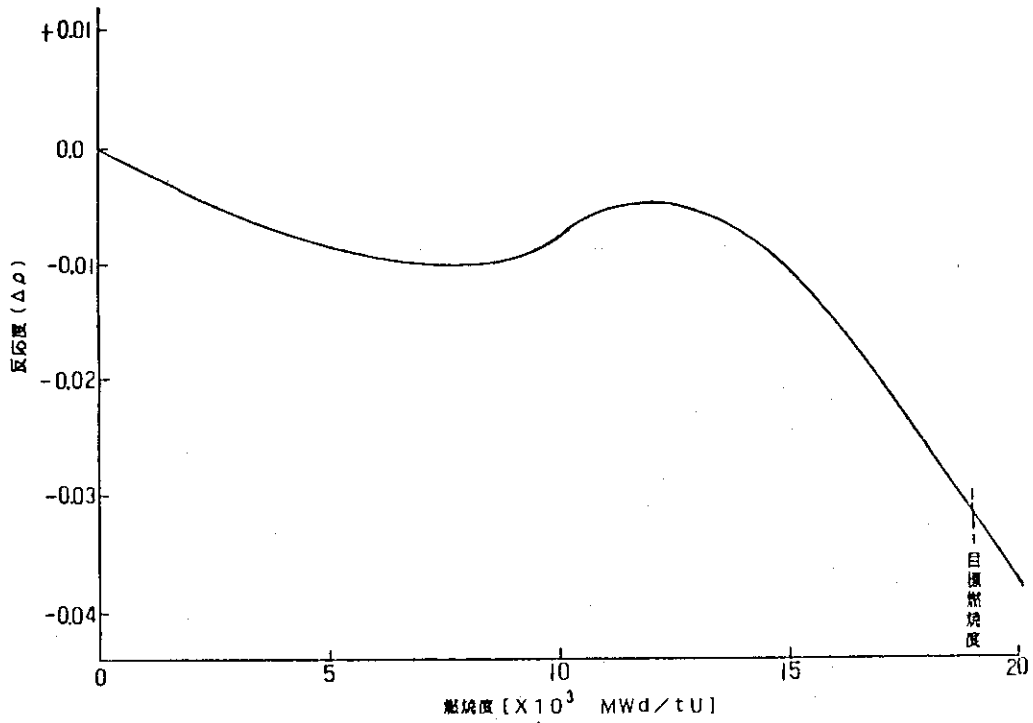


図 3.27 自己加圧一体型炉の燃焼による余剰反応度の変化

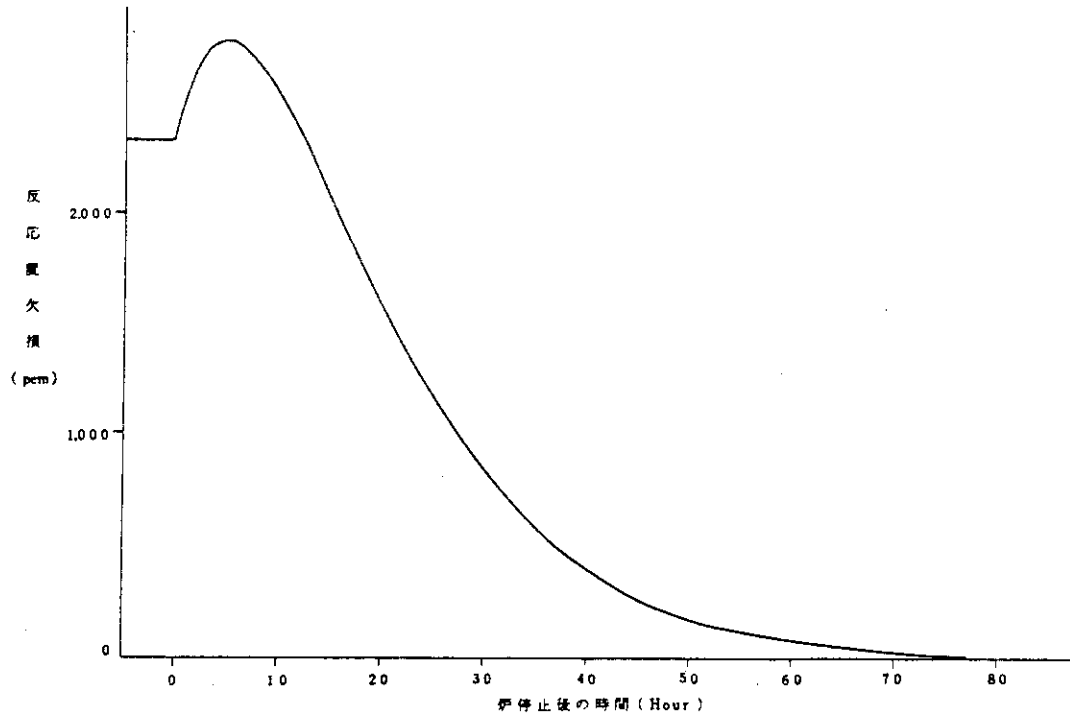


図 3.28 半一体型炉（試設計）の炉停止後のキセノンによる反応度欠損の時間変化

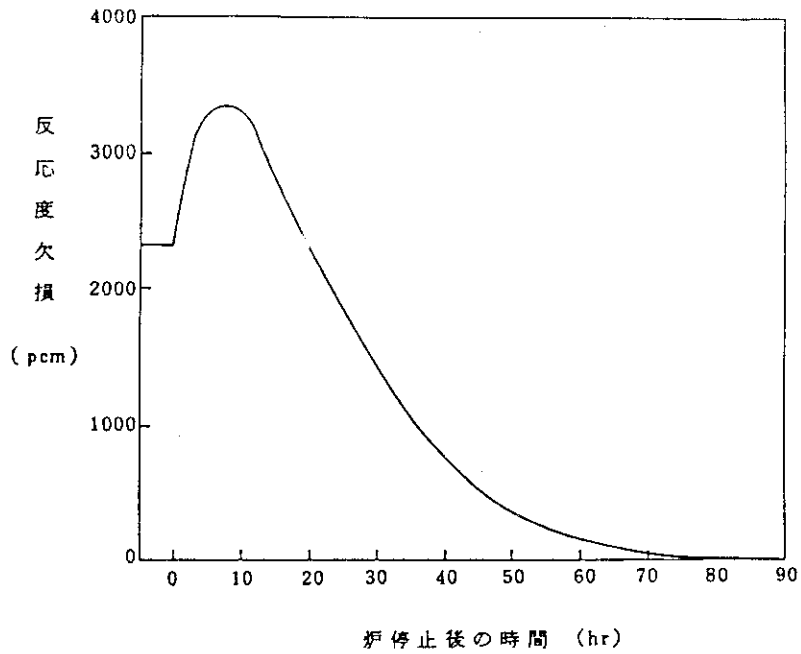


図 3.29 半一体型炉（評価炉心）の炉停止後のキセノンによる反応度欠損の時間変化（サイクル初期）

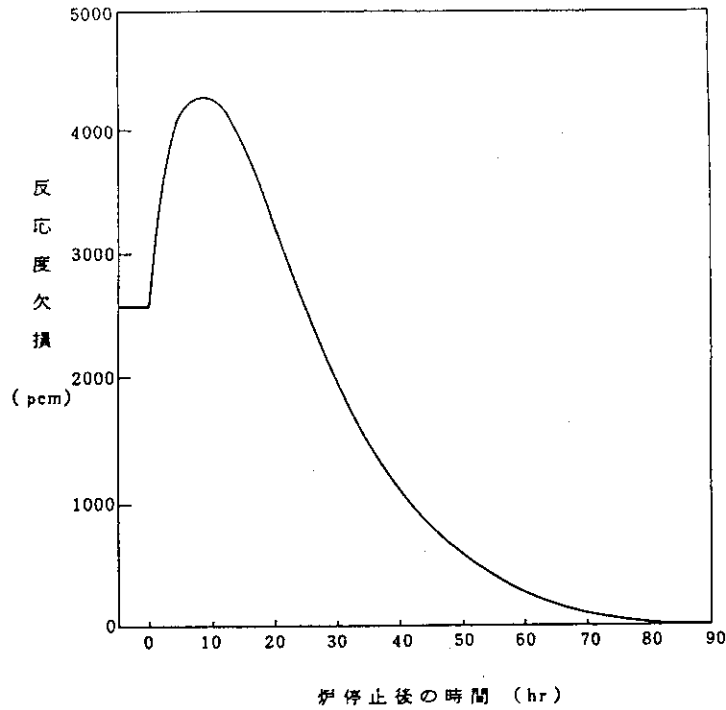


図 3.30 半一体型炉（評価炉心）の炉停止後のキセノンによる反応度欠損の時間変化（サイクル末期）

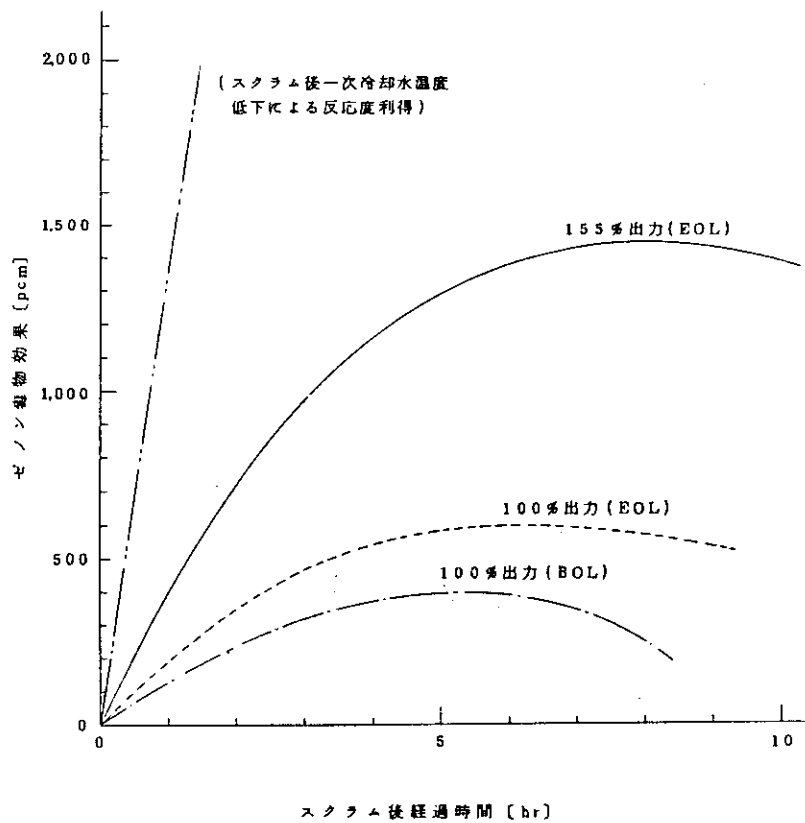


図 3.31 一体型炉のゼノン毒物効果

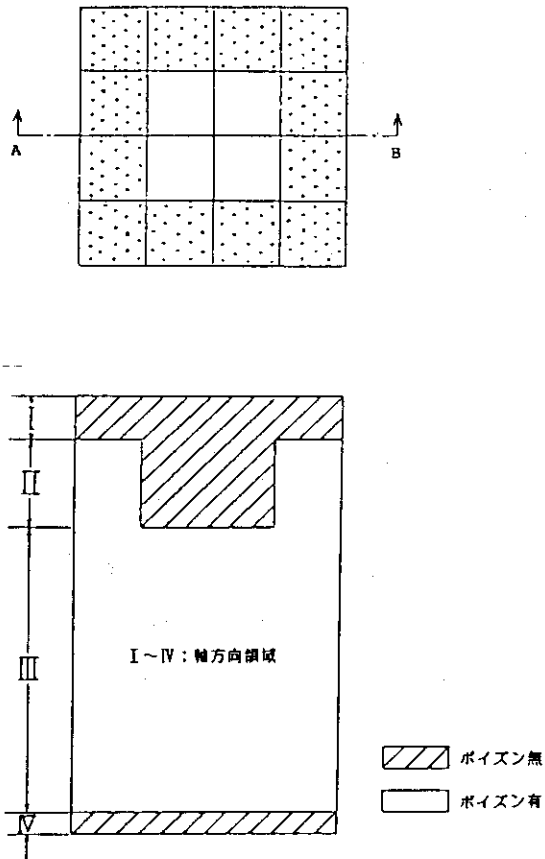


図 3.32 自己加圧一体型炉の炉心内ポイズン分布

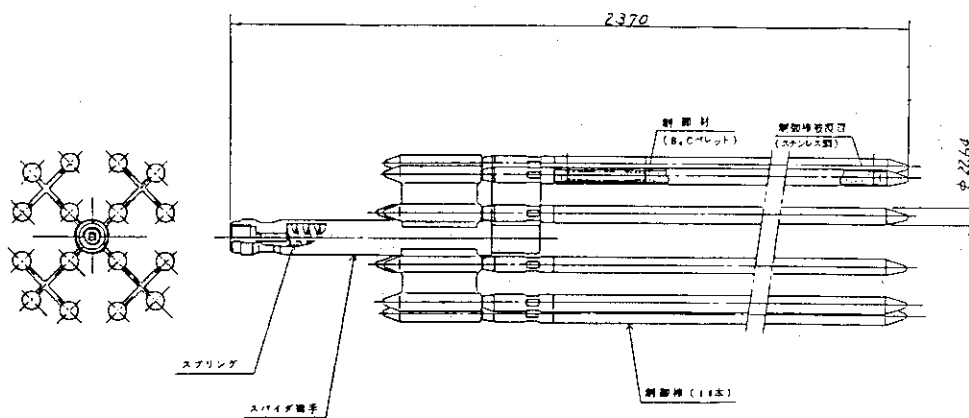
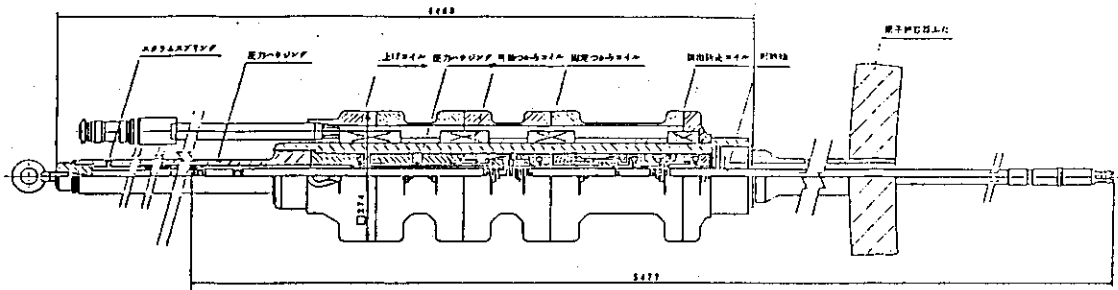


図 3.33 半一体型炉（試設計）の制御棒クラスター構造図



電 気 特 性	
型 式	磁石駆動シフト式
高 速	27秒
最高使用電力	1.39W/gd
最高使用温度	330℃
全長	3100mm

炉心駆動機構駆動電圧 24VDC
圧力ハウジング材質 ステンレス鋼

図 3.34 半一体型炉（試設計）の制御棒駆動装置構造概略図

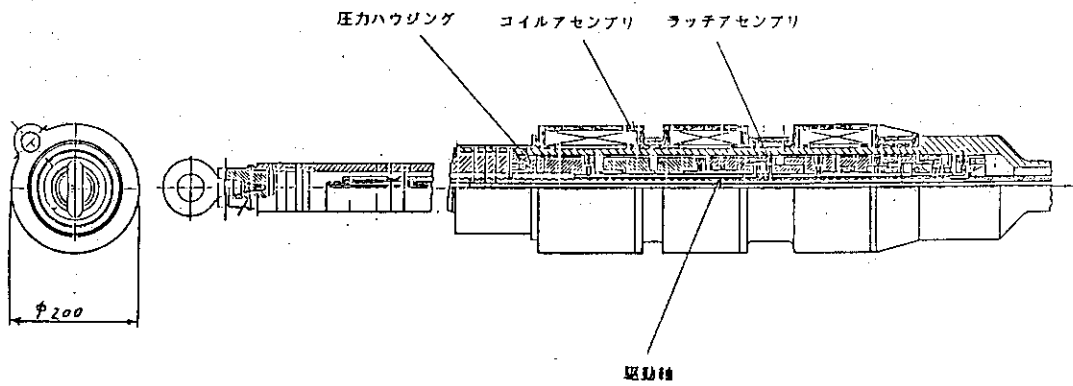


図 3.35 半一体型炉（評価炉心）の制御棒駆動装置構造概略図

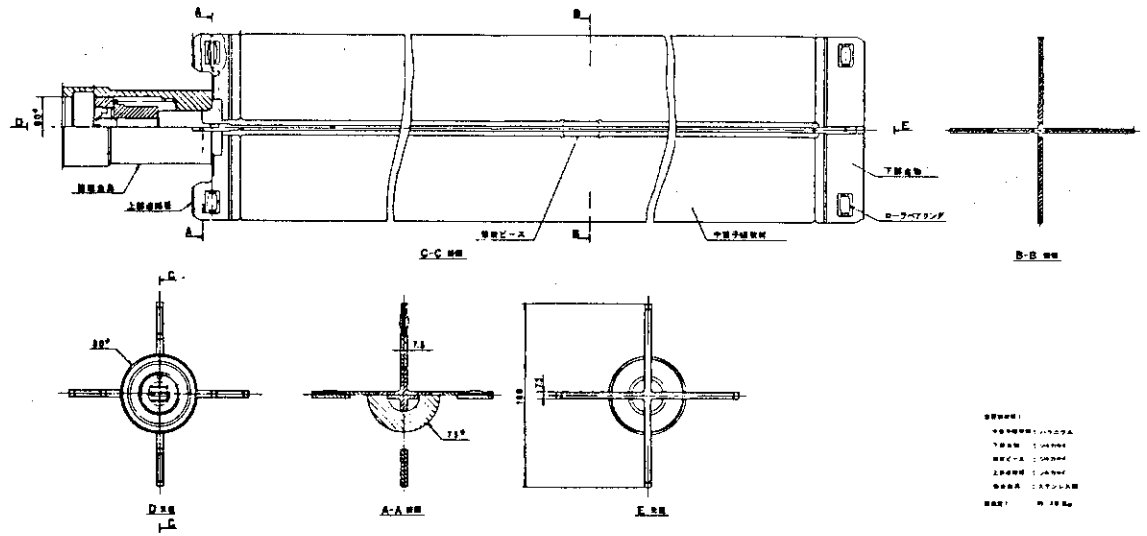
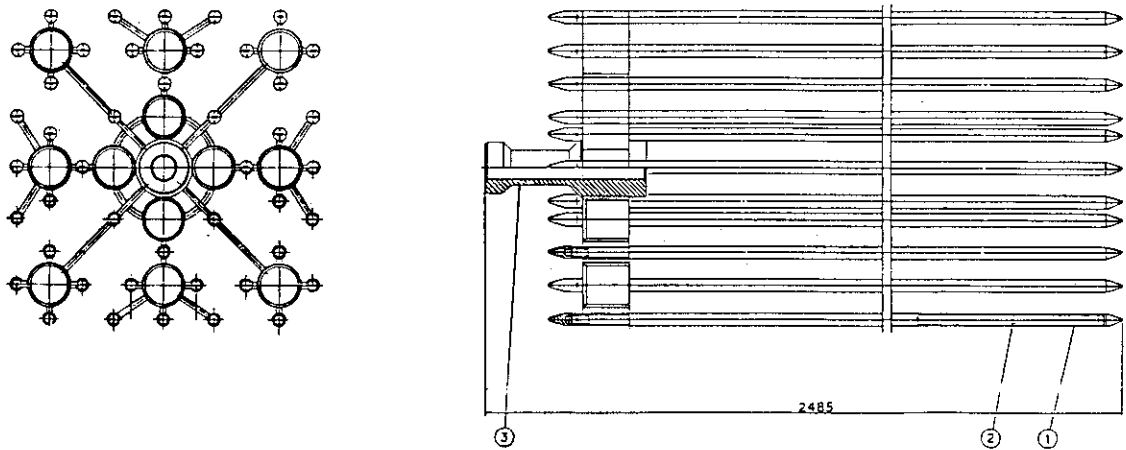


図 3.36 一体型炉十字形制御棒組立断面図



No.	数量	名称	材料
1	44	制御棒	
2	1	スライダ	
3	1	スライダ	

図 3.37 自己加圧一体型炉制御棒クラスター概略構造図

4. 研究開発項目及び課題

各炉心とも、試設計の前提条件が現状技術で可能な設計であることから、各研究開発項目は主にその実証及び検証のための実験となっている。一方、課題は次ステップの将来技術に基づく、設計研究（概念確立設計研究）への可能性を示すものであり、次ステップにおける開発目標となり得るものである。

4.1 炉心の研究開発項目及び課題

共通事項としては、燃料の耐負荷変動性能試験（健全性実証試験）、燃料集合体のDNB試験及び制御棒駆動装置の小型化や性能試験があげられる。また、高濃度可燃性毒物の開発及び照射実績が必要であり、特に、燃料中に混合しないガドリニアBP棒は実績がなく、実証（燃焼）試験などの研究開発が必要である。

課題としては、可燃性毒物設計の最適化があげられる。径方向のみならず軸方向の濃度変化・配置の工夫などの検討の余地がある。

各炉型式の炉心に関する研究開発項目・課題をまとめて、表4.1に示す。

4.2 今後の炉心開発目標

以上述べたように、今回は現状技術ベースにおける最も高性能な炉心を設計することを目標としたが、さらに性能を向上させるためには、実証試験などの相当の研究開発を必要とする。より高性能な炉心の設計は、次ステップの概念確立設計において行なう予定である。その場合の炉心の開発目標を以下の様に設定し、また、その実現のための方策及び可能性の見通しについて丸棒燃料について検討する。

炉心開発目標	(現 状)
炉心平均出力密度：80～100 kw/ℓ	(61 kw/ℓ)
炉心平均燃焼度：40,000～50,000 MWD/t	(32,000 MWD/t)
炉 心 寿 命：4年以上(8年)	(4 年)

(1) 出力密度を上げる方策

図4.1に示すように次の3方策が考えられ、それぞれ下記の課題を有する。

- ① 線出力密度の最大値(制限)を現行のままとし、かつ燃料棒径も細くしないで、出力分布の平坦化を図り、 F_0 を小さくする方法で、 F_0 を小さくするために、ケミカルシム(ほう素)を使用するか制御棒の配置、軸方向への吸収体の濃度差、燃料濃縮度の方向の濃度差などの最適化を図る。
- ② 線出力密度の最大値制限を現行より大きくして、これに耐え得る燃料を開発するもので、出力密度を上げることにより燃料挙動として、熱流束増加、燃料温度上昇及びFP放出の

増大となるが、それぞれ、被覆管の改良、ライナ付燃料の採用及びプレナム長の拡大等を計る。

③ 線出力密度を下げずに燃料棒径を細くする方策があるが、燃料製造性の問題がある。

(2) 燃焼度を増加する方策

装荷ウラン量を減らすことにより燃焼度を大きくすることが可能となる。そのためには、炉心体積を小さくする方法（この場合出力密度が大きくなる）と炉心体積は同じとして、ローディング（g/cc）を小さくする方法があるが、いずれにしても濃縮度は高くする必要がある。

また、燃焼度を伸ばすためには、その分余剰反応度を必要とし反応度制御が課題となるが、その方策として、スペクトルソフトの採用あるいはWet Annular 型のガドリニアBP棒の採用などが考えられる。

燃料設計上からは、燃焼度を伸ばすことにより、FP放出増大による内圧増及び被覆管の腐食による劣化の問題が生じるが、その方策として、それぞれ、ペレットの改良、被覆管の改良がある。これは現行陸上PWR燃料が制限燃焼度を61,000 MWD/t（燃料棒最大）に引き上げることを計画しており、その課題と同様であろう。

表 4.1 炉心に関する研究発項目及び課題

半一体型炉 (試設計)	半一体型炉 (評価炉心)	一体型炉	自己加圧一体型炉
燃料： ・急速負荷変動運転時の燃料の健全性評価（ライナ付燃料の実証）	・燃料照射試験（ライナ付燃料の耐PCI性能の実証） ・燃料集合体機械試験（細径燃料棒） ・高濃度ガドリニア可燃性毒物棒の開発及び実証試験 ・ガドリニア分離型炉心の核的検討及び評価	・高燃焼度板状燃料（キャラメル燃料）の耐負荷変動性能試験 ・技術限界（設計基準）の実証試験	・燃料要素の健全性実証試験（船体振動、動揺条件下及び急激な負荷変動に対する健全性の実証）
炉心伝熱流動： ・船体動揺条件下でのDNB試験	・船体動揺条件下でのDNB試験	・動揺、定傾斜時の板状燃料のDNB試験	・船体動揺条件下でのDNB試験
制御棒駆動装置： ・制御棒駆動装置耐久試験	・小型高性能制御棒駆動装置の開発及び実証試験 ・制御棒案内管機械試験（機械的特性の確認及び構造解析データの取得）	・制御棒駆動装置確証試験	・制御棒駆動装置の実証試験（船体動揺条件下）

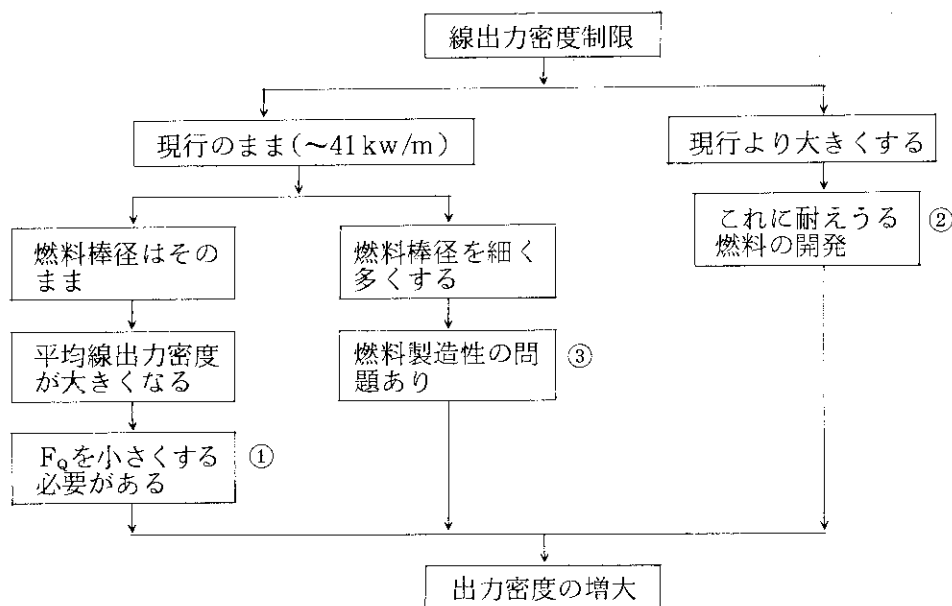


図 4.1 出力密度を上げる方策と問題点

5. 結 言

以上、試設計3炉型式についてそれぞれの炉心特性を比較、検討した結果、次のようにまとめることができる。

- 1) 丸棒燃料炉心と板状（キャラメル）燃料炉心とは、ほぼ同等の炉心性能を有する。
- 2) 炉心寿命は、炉・船体の定期点検周期と合わせるため、4年とすべきであり、それは実現可能である。ただし、将来技術を含めるとそれ以上の検討の余地はある。
- 3) 炉心平均出力密度は、最大50～60 kw/ℓである。ただし、将来技術を含めるとそれ以上の検討の余地はある。
- 4) 炉心平均燃焼度は、最大約30,000～32,000 MWD/tUである。ただし、将来技術を含めるとそれ以上の検討の余地はある。
- 5) 長期間の反応度制御には可燃性毒物の使用が必須である。可燃性毒物としては、ガドリニアが炉心特性に優れ、燃え残りも少ない。

可燃性毒物を使用する場合、燃料に混入させるよりも可燃性毒物としてアルミナと混合させる方がより長期間の反応度制御に適する。また、ガドリニアの濃度、配置に工夫をすることにより、さらに炉心寿命、出力密度及び燃焼度が向上する余地がある。

以上をもとに、今後より高性能な炉心設計研究を進めるポイントとして次の項目が考えられる。

- 炉心寿命は4年とするが、8年についても検討してみる必要がある。
- 出力密度は、現状の60以上とし、80～100 kw/ℓを目標に検討する。
- 燃焼度は、炉心平均で30,000以上とし、40,000～50,000 MWD/tUを目標にして検討する。
- 可燃性毒物は、ガドリニアとし径方向のガドリニアの濃度、配置のほか、軸方向の濃度、配置にも配慮する。
- ただし、その際FCCなどの経済性も考慮して検討する。