

JAERI-M

6714

多目的高温ガス実験炉・ブロック一ピン形  
燃料の設計検討

1976年9月

幾島 肇, 平野 光将, 鈴木 邦彦, 倉重 哲雄\*

黒木 修二, 西条 泰博, 田村 宣弘\*\*\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

多目的高温ガス実験炉・ブロックーピン形燃料の設計検討

日本原子力研究所 動力炉開発・安全性研究管理部

幾島 肇・平野光将・鈴木邦彦・倉重哲男\*・  
黒木修二\*\*・西条泰博\*\*\*・田村宜弘\*\*\*

(1976年8月23日受理)

多目的高温ガス実験炉基本概念設計のMARK-IとMARK-II炉心の最低レイノルズ数は約2,600であり、満足な熱特性でなかった。このため、種々の炉心と燃料形態の検討がされ、次の結果が得られた。

- (1) 中空形燃料では、制御棒価値を高くしてもよいならば、レイノルズ数を5,000まで増加できる。
- (2) 円環形燃料では、外側冷却材流路が層流となってもよいならば、レイノルズ数は、15,000まで増加できる。
- (3) セミピン形燃料では、燃料ブロックが高温になってもよいならば、レイノルズ数は10,000まで増加できる。

このように、高いレイノルズ数を得るには何らかの犠牲が生じる。よって、第1次概念設計のMARK-III設計では、基本概念設計に引き続いて、低い制御棒価値で、冷却材流路で層流が生じない、しかも低いブロック温度となるような調和のとれた設計が保持された。しかし、炉心内の燃料棒数をMARK-IIよりも少くすることで、最低レイノルズ数を3,580まで増加させることができた。

\* 外来研究員：石川島播磨重工業株式会社

\*\* 外来研究員：三菱重工業株式会社

\*\*\* 外来研究員：富士電機製造株式会社

Design Study of Block-pin Type Fuel for Experimental VHTR (EVHTR) Core

Takeshi IKUSHIMA, Mitsumasa HIRANO, Kunihiro SUZUKI\*, Tetsuo KURASHIGE,  
Shuji KUROI\*\*, Yasuhiro SAIJO\*\*\*, Nobuhiro TAMURA\*\*\*

VHTR Designing Laboratory, Division of Power Reactor Projects,  
Japan Atomic Energy Research Institute  
(Received August 23, 1976)

In MARK-II core designs of EVHTR, the minimum Reynolds number in the core is about 2600 not satisfactory for the thermal performance. Different cores and fuels have been investigated to improve the thermal characteristics. The following were revealed:

(1) Reynolds number rises to 5,000 with hollow fuel rods, if high control-rod reactivity worth in the core is allowed.

(2) Reynolds number rises to 15,000 with annular fuel rods, if laminar flow in the outer cooling channel is allowed.

(3) Reynolds number rises to 10,000 with semi-pin fuel, if higher temperature of the fuel block is allowed.

Higher Reynolds number of the EVHTR core can thus be attained under some undesirable conditions.

In the MARK-III core design, therefore the compromise of low control-rod worth, non-laminar flow and lower block temperature, following MARK-I and MARK-II is retained, but the minimum Reynolds number is increased to 3,580 because of the reduction in number of fuel rods (from 1,251 in MARK-II to 813 in MARK-III).

---

\*) Ishikawajima-Harima Heavy Industries, Co. Ltd.

\*\*) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

\*\*\*) Fuji Electric Co. Ltd.

## 目 次

|                            |   |
|----------------------------|---|
| 1 まえがき .....               | 1 |
| 2 実験炉の炉心 .....             | 1 |
| 3 炉心一燃料の概要 .....           | 2 |
| 3.1 予備設計 .....             | 2 |
| 3.2 MARK-I .....           | 2 |
| 3.3 MARK-II .....          | 2 |
| 3.4 Reference - III .....  | 2 |
| 3.5 Reference - IV .....   | 2 |
| 3.6 Reference - V .....    | 3 |
| 3.7 Reference - VI .....   | 3 |
| 3.8 Reference - VII .....  | 3 |
| 3.9 Reference - VIII ..... | 4 |
| 4 設計評価 .....               | 4 |
| 4.1 設計評価 .....             | 4 |
| 4.2 結論 .....               | 4 |
| 5 今後の設計展開 .....            | 5 |
| 5.1 MARKシリーズ燃料の採用 .....    | 5 |
| 5.2 炉心構造の変更 .....          | 5 |
| 5.3 燃料形態の変更 .....          | 5 |
| 6 謝辞 .....                 | 6 |
| 7 参考文献 .....               | 6 |

## 1 まえがき

多目的高温ガス実験炉の基本概念設計が1974年8月末に完了した。この基本概念設計では、予備設計の燃料に検討を加えて3種類の新しい設計(MARK-Ia, Ib, MARK-II)がなされた。予備設計では制御棒価値が高いと考えられ、基本概念設計では炉心の直径を大きくして一本の制御棒価値を下げ安全余裕を高めた。さらに冷却材流路幅を大きくして、流路閉止の危険性を少くした。これらについて、基本概念設計において改良されたが、低レイノルズ数の問題は十分な解決をみなかった。

そこで、第一次概念設計の開始に際して、上の問題を解決するため種々の試めを行い、それらは室内および熱設計グループ内のメモとなっている。これらの燃料設計は、第1はセミピン形と名づけられている、円環形燃料ピンの外側スリーブを取り、内側スリーブとコンパクトを黒鉛ブロックの燃料孔中へ入れ、内側スリーブ内だけを冷却材が流れるように考えられたものであり(Reference-III)，第2は、円環形燃料の外側冷却材流路を小さくし、内側冷却材流路には冷却材を多く流して、ここでは流れは完全に乱流域にあることにし、外側冷却材流路では完全に層流域にあることとする(Reference-IV)，第3は、炉心直径をMARK-IIよりさらに小さく、ブロック当たりの燃料ピンも18本から12本にして、レイノルズ数の向上を計った(Reference-V)，ものである。

これらによって、レイノルズを高めることはできたけれども、別の種類の問題が持ち上がった。それは、Reference-IIIではブロックの温度の上昇と再処理問題であり、Reference-IVでは流動の安全性の問題であり、Reference-Vでは炉心の高さが直径に比較して大きくなることである。

このように、実験炉の炉心は、いずれの炉心を取っても困難な問題を持っているように思われた。そこで、現在のブロックーピン形燃料を採用する限り、他に良い設計がなく、燃料形態の変更を考えるべきかという問題が浮び上って来ている。事実、そうなのかどうかを考えるために、これまでの設計およびサーベイ結果をレビューし検討することになった。これによって、ブロックーピン形燃料の実験炉への適用の限界と今後の設計展開の資料とすることを試みた。

本報告は多目的高温ガス実験炉の炉心燃料設計のMARK-III以前になされた検討をまとめたもので、その後、この資料を参考にしてMARK-IIIの検討が進められ、実験炉第1次概念設計へと進展した。

## 2 実験炉の炉心

実験炉の炉心はFig. 1に示すように、被覆燃料粒子を黒鉛マトリックス中に分散させた燃料コンパクトを、六角状の黒鉛ブロック中に燃料スリーブとともに燃料ピンとして取付けた燃料要素を炉心とする原子炉である。この炉心は、 $40 \text{ kg/cm}^2$  の圧力のヘリウムが炉心を上方から下方へ流れることによって冷却される。入口を出口のヘリウムの混合平均温度はそれぞれ400°Cと1000°Cである。

炉心の平面図はFig. 2aから2iまでに示すように、六角形の燃料要素炉心とこれをとりまく六角形の可動反射体と、さらに、この外側にある固定反射体および、コア・バレルから構成される。

## 1 まえがき

多目的高温ガス実験炉の基本概念設計が1974年8月末に完了した。この基本概念設計では、予備設計の燃料に検討を加えて3種類の新しい設計(MARK-Ia, Ib, MARK-II)がなされた。予備設計では制御棒価値が高いと考えられ、基本概念設計では炉心の直径を大きくして一本の制御棒価値を下げ安全余裕を高めた。さらに冷却材流路幅を大きくして、流路閉止の危険性を少くした。これらについて、基本概念設計において改良されたが、低レイノルズ数の問題は十分な解決をみなかった。

そこで、第一次概念設計の開始に際して、上の問題を解決するため種々の試めを行い、それらは室内および熱設計グループ内のメモとなっている。これらの燃料設計は、第1はセミピン形と名づけられている、円環形燃料ピンの外側スリーブを取り、内側スリーブとコンパクトを黒鉛ブロックの燃料孔中へ入れ、内側スリーブ内だけを冷却材が流れるように考えられたものであり(Reference-III)，第2は、円環形燃料の外側冷却材流路を小さくし、内側冷却材流路には冷却材を多く流して、ここでは流れは完全に乱流域にあることにし、外側冷却材流路では完全に層流域にあることとする(Reference-IV)，第3は、炉心直径をMARK-IIよりさらに小さく、ブロック当たりの燃料ピンも18本から12本にして、レイノルズ数の向上を計った(Reference-V)，ものである。

これらによって、レイノルズを高めることはできたけれども、別の種類の問題が持ち上がった。それは、Reference-IIIではブロックの温度の上昇と再処理問題であり、Reference-IVでは流動の安全性の問題であり、Reference-Vでは炉心の高さが直径に比較して大きくなることである。

このように、実験炉の炉心は、いずれの炉心を取っても困難な問題を持っているように思われた。そこで、現在のブロック-ピン形燃料を採用する限り、他に良い設計がなく、燃料形態の変更を考えるべきかという問題が浮び上って来ている。事実、そうなのかどうかを考えるために、これまでの設計およびサーベイ結果をレビューし検討することになった。これによって、ブロック-ピン形燃料の実験炉への適用の限界と今後の設計展開の資料とすることを試みた。

本報告は多目的高温ガス実験炉の炉心燃料設計のMARK-III以前になされた検討をまとめたもので、その後、この資料を参考にしてMARK-IIIの検討が進められ、実験炉第1次概念設計へと進展した。

## 2 実験炉の炉心

実験炉の炉心はFig. 1に示すように、被覆燃料粒子を黒鉛マトリックス中に分散させた燃料コンパクトを、六角状の黒鉛ブロック中に燃料スリーブとともに燃料ピンとして取付けた燃料要素を炉心とする原子炉である。この炉心は、 $40 \text{ kg/cm}^2$  の圧力のヘリウムが炉心を上方から下方へ流れることによって冷却される。入口を出口のヘリウムの混合平均温度はそれぞれ400°Cと1000°Cである。

炉心の平面図はFig. 2aから2iまでに示すように、六角形の燃料要素炉心とこれをとりまく六角形の可動反射体と、さらに、この外側にある固定反射体および、コア・バレルから構成される。

### 3. 炉心一燃料の概要

#### 3. 1 予備設計

予備設計燃料は高温化と出力密度の向上を目標とし、特に平均出力密度を  $5 \text{W/cm}^3$  を目標に設計を開始し、その主目標をほぼ到達すべく  $4.8 \text{W/cm}^3$  とした。このため炉心をコンパクトにした。その結果、有効制御棒本数は 14 本となった。燃料は外径 3.4 mm の中空形燃料ピンをブロック内に 36 個入れ、冷却材流路幅は 1.5 mm とした。これらの概要と熱特性は Fig. 3 にまとめている。

#### 3. 2 MARK-I

予備設計では制御棒価値が高いこと、および冷却材流路幅が小さいと考られ、炉心直径を大きくすることおよび冷却材流路幅を大きくすることにした。炉心内の有効制御棒本数を 38 本とし、最小冷却材流路幅を 2.5 mm とした。その結果、燃料ピン外径は中空形では 3.2 mm、円環形では 4.6 mm、平均出力密度は  $2.5 \text{W/cm}^3$  となった。これらの概要と熱特性は、中空形燃料ピン、および円環形燃料ピンについてそれぞれ Fig. 4 および 5 にまとめられている。

#### 3. 3 MARK-II

MARK-Iにおいてレイノルズ数が低いことを改善するため炉心直径を 8.5 カラムから 7.3 カラムと小さくし、ブロック当たりの燃料ピン本数も 36 から 18 個へ少くした中空形燃料ピン燃料要素とした。炉心直径を小さくした分を炉心高さを 3.0 m から 3.5 m とした。その結果レイノルズ数は幾分改善された。これらの概要と熱特性は Fig. 6 a と 6 b に、MARK-II 炉心と燃料の熱特性サーベは Fig. 12 にまとめられている。

#### 3. 4 Reference - III

MARK-IIの燃料要素でも、レイノルズ数は高々 2,600 にしか至らなかった。このため、レイノルズ数を高めるために、セミピンと仮呼される設計が多目的炉設計研究室の宮本喜慶氏によって提案された。この燃料の検討については多目的炉設計研究室インフォメーション・シート T-109 に詳しく報告されている。ここでは要約だけを述べる。燃料ピンは Fig. 7 に示すように円環ピンのうち外側スリーブを取り除き内側スリーブとコンパクトから構成され、冷却材は内側スリーブ内だけを流れるように考えられたものである。炉心は MARK-I および MARK-II をそれぞれ対象にして設計され、いずれの場合もレイノルズ数は 1 万を少し越えるまでに改善された。しかしながら、コンパクトと燃料ブロックが接するため、燃料ブロックの温度が燃料コンパクトの最高温度程度になる、いわゆる Hot block となること、および燃料再処理の場合、燃料コンパクトと燃料ブロックの分離の困難さが持ち上がって来た。なお Reference-III 炉心と燃料の概要と熱特性は Fig. 7 にまとめられている。なお、MARK-II の熱特性のサーベイ結果は Fig. 15 にまとめられている。

#### 3. 5 Reference - IV

Reference-IVにおいて低レイノルズ数の問題の解決が見られたが、燃料ブロックが高温になるこ

と、および燃料再処理が困難になるなど、別の問題が持ち上がって来た。この問題をさけるために、円環形燃料ピンを使用して、レイノルズ数を上げることが考えられた。それは、遷移レイノルズ数領域をさけるために、円環形燃料ピンを使用して、内側冷却材流路では、完全乱流とし、外側冷却材流路では、燃料ブロックを高温にしないだけの冷却材を流して、ここでは完全層流とする設計が考えられた。

これによって、内側流路のレイノルズ数は 15,000 にもなった。一方外側流路では完全層流域のレイノルズ 400~700 になった。しかしながら、内外流路における流動様式に大きな差があることが問題視された。また円環形燃料は燃焼によって特性が変化することによって内側流路の流動不安定性が問題となろう。なお、Reference-V 炉心と燃料の概要と熱特性は Fig. 8 にまとめられている。また熱的特性サーベイは Fig. 16 に示されている。

### 3. 6 Reference - V

レイノルズ数を上昇させるためには、ブロック数および燃料ピン数を減少させる必要があり、このため、1 本当りの制御棒価値を許容される程度に低くし、すなわちブロック数を少くし、61 ブロックとしさらにブロック当たりのピン本数を 18 本から 12 本にした Reference-V を考えてみた。これを Fig. 9 に、また熱特性サーベ結果を Fig. 17 に示す。

レイノルズ数は約 5,000 程度と改善されたが、炉心が直径に比較して高いこと、 $N_c/N_u$  比が上昇すること、1 本当りの制御棒価値が高いことなど問題となって来た。

### 3. 7 Reference - VI

Reference-V の欠点である、炉心が高すぎることと、1 本当りの制御棒価値が高すぎることを補うため、制御棒価値を MARK-II 並とした。このため、炉心のブロック数は 69 とした。さらにレイノルズ数を上昇させるため 1 ブロック当たりの燃料ピンを 12 本とした。その結果レイノルズ数は 4,300 程度になった。しかし、MARK-II に比較して炉心が高いこと、および  $N_c/N_u$  の問題は残る。なお、Reference-VI の炉心と燃料の概要と熱特性は Fig. 10 に示されている。

### 3. 8 Reference - VII

レイノルズ数を上昇させるために、ブロック数を減少させる。ブロックの減少による制御棒本数の減少はブロック境界へ制御棒を挿入することで補う設計 Reference-VII を考えた。ブロック境界へ制御棒を挿入するため、ブロックの大きさを、これまでより大きくし、ブロック平径寸法を 340, 370, 400 についてそれぞれ設計した。これらの炉心と燃料の概要と熱特性を Fig. 11a, 11b, 11c にそれぞれ示す。

これらの結果から明らかなように、いずれも制御棒本数を増加することができるが、レイノルズ数は 5,000 までである。しかし、この設計では、ブロック境界の制御棒の冷却の確保と、圧力容器への制御棒貫通孔部の設計と製作が困難になることが持ち上がって来る。それ故、この設計に際しては、これらの問題を十分に検討する必要がある。

### 3. 9 Reference - VIII

Reference - VIII は Reference - V, VI をさらに、制御棒を増加させるために、ブロックの直径を小さくし、ブロック数を増加させたものである。これによって制御棒本数は MARK - I と同じになつたが、レイノルズ数は 3,400 程度までしか上昇することができなかつた。Reference - VIII の炉心と燃料の概要と熱特性は Fig. 12 に示されている。

## 4. 設計評価

### 4. 1 設計評価

これまで記述したように、予備設計、MARK - I, MARK - II, Reference III ~ VIII の主要特性、主要諸元およびその問題点が明らかにされた。これを Table 1 ~ 3 までにまとめてみた。Table 1 a および 1 b では、燃料の設計諸元を、Table 2 では燃料の特徴と問題点を、Table 3 では燃料の主要な問題点を示した。

得られた結果をまとめるとつきのようになる。

- (1) 1 ブロック当りのピン本数を 12 本にして可能なレイノルズ数は 5,000 までである。しかし、この設計では carbon rich となる。
- (2) レイノルズ数を 10,000 以上にするには、セミピンまたは円環形の内側流路に注目した設計としなければならない。しかし、この設計では hot block となる。
- (3) ブロックの境界へ制御棒を挿入する設計では、レイノルズ数は 5,000 までであるが、制御棒価値を十分に下げることができる。しかし、ブロック境界の制御棒の冷却および、このための圧力容器の貫通部の設計が困難になる。

### 4. 2 結論

これまで記述したことから、制御棒 1 本当りの価値を高くしないで、高いレイノルズ数を確保するために、つぎのことが考えられよう。

- (1) 炉心のブロック総数を減少させないで、ブロック当りのピン本数を少くする。すなわち 1 ブロック当りのピン本数を 12 本程度にする。
- (2) ブロックの径を大きくして、炉心内のブロック数を少くし、全ピン本数を少くする。ブロックが大きくなつたことによる炉心内の有効制御棒本数の減少分は、ブロックの境界へ制御棒を挿入することによって補償し、1 本当りの制御棒価値を低くする。
- (3) 円環形燃料を使用して、内側流路は乱流（レイノルズ数 10,000 以上）、外側流路は層流（レイノルズ数 400 ~ 700）として遷移域を逃げる。

### 3. 9 Reference - VIII

Reference - VIII は Reference - V, VI をさらに、制御棒を増加させるために、ブロックの直径を小さくし、ブロック数を増加させたものである。これによって制御棒本数は MARK - I と同じになつたが、レイノルズ数は 3,400 程度までしか上昇することができなかつた。Reference - VIII の炉心と燃料の概要と熱特性は Fig. 12 に示されている。

## 4. 設計評価

### 4. 1 設計評価

これまで記述したように、予備設計、MARK - I, MARK - II, Reference III~VIII の主要特性、主要諸元およびその問題点が明らかにされた。これを Table 1 ~ 3 までにまとめてみた。Table 1 a および 1 b では、燃料の設計諸元を、Table 2 では燃料の特徴と問題点を、Table 3 では燃料の主要な問題点を示した。

得られた結果をまとめるとつきのようになる。

- (1) 1 ブロック当りのピン本数を 12 本にして可能なレイノルズ数は 5,000 までである。しかし、この設計では carbon rich となる。
- (2) レイノルズ数を 10,000 以上にするには、セミピンまたは円環形の内側流路に注目した設計としなければならない。しかし、この設計では hot block となる。
- (3) ブロックの境界へ制御棒を挿入する設計では、レイノルズ数は 5,000 までであるが、制御棒価値を十分に下げることができる。しかし、ブロック境界の制御棒の冷却および、このための圧力容器の貫通部の設計が困難になる。

### 4. 2 結論

これまで記述したことから、制御棒 1 本当りの価値を高くしないで、高いレイノルズ数を確保するために、つぎのことが考えられよう。

- (1) 炉心のブロック総数を減少させないで、ブロック当りのピン本数を少くする。すなわち 1 ブロック当りのピン本数を 12 本程度にする。
- (2) ブロックの径を大きくして、炉心内のブロック数を少くし、全ピン本数を少くする。ブロックが大きくなつたことによる炉心内の有効制御棒本数の減少分は、ブロックの境界へ制御棒を挿入することによって補償し、1 本当りの制御棒価値を低くする。
- (3) 円環形燃料を使用して、内側流路は乱流（レイノルズ数 10,000 以上）、外側流路は層流（レイノルズ数 400~700）として遷移域を逃げる。

## 5. 今後の設計展開

### 5. 1 MARK シリーズ燃料の採用

これまでに評価したことから、今後の設計の展開を考えるために、設計のカスケード図をまとめ、これを Fig. 13 および 14 に一覧表にしている。この図から、それぞれの設計が、どのような選定段階を経て到ったかが明らかになり、他の選定によって、どのような展開になるかが明らかである。

これらのことから、設計の前提条件（炉入口温度：400°C, 炉出口温度：1,000°C, 热出力：50 MW, 燃料最高温度：1,300°C）を守る限り、これまでの予備設計、MARK-I, MARK-II, Ref.-III～Ref.-VIII のいずれかを採用せざるを得ないであろう（一部分の変更はある）。そして、これらのうちの選定は、何が major な問題で、何が minor な問題であるかという measure を用意して行うことが考えられよう。

MARK-II 燃料から MARK-III 燃料への進展に対して Fig. 18 のように、いずれの道を取るにしても、ハードルがあり、どのハードルを倒してもよいかを考え、選択すればよいものと考える。

### 5. 2 炉心構造の変更

制御棒価値を安全限界内に保って、レイノルズ数を上昇させる、もう一つの方法は、冷却材を炉心内でリターンさせて、複数回、流す方法である。しかし、冷却材のバイパス流とシール構造の問題があり、構造的な検討が望まれる。

### 5. 3 燃料形態の変更

ブロック・ピン形燃料以外の F・S・V 型燃料、ボール型燃料、棒状燃料の採用が考えられようが、この場合は明確な設計思想の確立の上になされねばならない。

## 6. 謝 辞

本検討は第1次概念設計のMARK-III炉心燃料の検討を進める以前になされた作業をまとめたものであり、本検討のため種々の助言をいただいた、多目的炉設計研究室の安川茂氏、宮本喜晟氏、および研究室一同に深く感謝します。なお、セミピン形燃料の検討は同室の宮本喜晟氏および佐藤貞夫氏によってなされたものである。

## 7. 参考文献

- (1) 野沢俊弥他：多目的高温ガス実験炉第2次予備設計，
- (2) 幾島 賀：高温ガス実験炉炉心体系設計資料（炉心体系・燃料設計），J A E R I - M 5633  
(1974)

## 6. 謝 辞

本検討は第1次概念設計のMARK-III炉心燃料の検討を進める以前になされた作業をまとめたものであり、本検討のため種々の助言をいただいた、多目的炉設計研究室の安川茂氏、宮本喜晟氏、および研究室一同に深く感謝します。なお、セミピン形燃料の検討は同室の宮本喜晟氏および佐藤貞夫氏によってなされたものである。

## 7. 参考文献

- (1) 野沢俊弥他：多目的高温ガス実験炉第2次予備設計，
- (2) 幾島 賀：高温ガス実験炉炉心体系設計資料（炉心体系・燃料設計），J A E R I - M 5633  
(1974)

Table 1a 多目的高温ガス実験炉・ブロック・ピン形炉心燃料の設計諸元 (1)

| シリーズ        | 設計目標               | 燃料形式   | 炉心       |            |           | 有効制御<br>棒本数 | 最小レイ<br>ノルズ数 | 燃料最高温度<br>(°C)       | 出力密度<br>(W/cm³) | 問題点                                  |
|-------------|--------------------|--|----------|------------|-----------|-------------|--------------|----------------------|-----------------|--------------------------------------|
|             |                    |  | カラム<br>数 | 直 径<br>(m) | 高さ<br>(m) |             |              |                      |                 |                                      |
| 予備設計        | 出力密度 5W/cm³ を目標とする | 中空形  | 55       | 234        | 2.5       | 14          | 1539         | 1293                 | 48              | レイノルズ数<br>制御棒価値                      |
| MARK-I      | Ia                 | 制御棒価値を最大 1.0△k/k 番を目標とする   | 中空形      | 85         | 2.9       | 3.0         | 38           | 1890                 | 1256            | 25                                   |
|             | Ib                 |  | 円環形      |            |           |             |              | 1530                 | 1257            |                                      |
| MARK-II     | II                 | 制御棒価値を 1.0△k/k 番程度とし、レイノルズ数を上昇させる                                    | 中空形      | 73         | 269       | 3.5         | 26           | 2600                 | 1282            | 25                                   |
| Ref. - III  | IIIa               | レイノルズ数を 10000 以上にするため円環形ピンの内側チャンネルにだけ冷却材を流し、外側スリーブは廃止する              | セミ・ピン形   | 73         | 269       | 3.5         | 26           | 10200                | 1293            | ブロックの温度上昇<br>再処理の場合<br>問題            |
|             | IIIb               |  |          | 85         | 2.9       | 3.0         | 38           | 10630                | 1259            |                                      |
| Ref. - IV   | IVa                | レイノルズ数の問題を解決するため、内側チャンネルは完全流れ域外側チャンネルは完全層流域になるよう設計する                 | 円環形      | 73         | 269       | 4.0         | 26           | 15200 <sup>(1)</sup> | 1313            | 内側と外側の<br>チャンネルの<br>流動状態が異<br>ってもよいか |
|             | IVb                |  |          | 85         | 2.9       | 3.5         | 38           | 13000 <sup>(1)</sup> | 1290            |                                      |
| Ref. - V    | Va                 | 安全性を害しない程度に制御棒本数を少くし、炉心カラム数を少くし、さらにブロック当たりのピン数を少くし、レイノルズ数を上昇させる      | 中空形      | 61         | 246       | 4.0         | 20           | 4820                 | 1307            | レイノルズ数<br>制御棒価値<br>炉心高さ、高い           |
|             | Vb                 |  |          |            |           | 4.5         |              |                      | 1284            |                                      |
| Ref. - VI   | VIa                | MARK-II 程度の制御棒価値を保ちながら、レイノルズ数の改善を計るため、ブロック当たりのピン本数を少なくし、レイノルズ数を増加させる | 中空形      | 69         | 263       | 4.0         | 24           | 4320                 | 1318            | レイノルズ数<br>炉心高さ、高い                    |
|             | VIb                |  |          |            |           | 4.5         |              |                      | 1300            |                                      |
| Ref. - VII  | VIIa1              | 炉心中の制御棒を増加するため、ブロックの境界にも制御棒を設ける                                      | 中空形      | 55         | 288       | 3.5         | 50           | 3960                 | 1306            | 制御棒価値<br>制御棒冷却                       |
|             | VIIa2              |  |          |            |           | 4.0         |              |                      | 1276            |                                      |
|             | VIIb1              |  | 中空形      | 43         | 275       | 4.0         | 32           | 4990                 | 1312            |                                      |
|             | VIIb2              |  |          |            |           | 4.5         |              |                      | 1288            |                                      |
|             | VIIc1              |  | 中空形      | 61         | 279       | 3.5         | 50           | 3760                 | 1312            |                                      |
|             | VIIc2              |  |          |            |           | 4.0         |              |                      | 1282            |                                      |
| Ref. - VIII | VIIIa              | MARK-I の制御棒価値<br>レイノルズ数の改善を計る<br>12本ピン/ブロック                          | 中空形      | 85         | 265       | 3.5         | 38           | 3360                 | 1330            | レイノルズ数<br>炉心高さ、高い                    |
|             | VIIIb              |  |          |            |           | 4.0         |              |                      | 1297            |                                      |

Table 1b 多目的高温ガス実験炉・ブロック-ピン形炉心燃料の設計諸元(2)

| シリーズ         | 圧力容器内径<br>(m) | 燃料ピン           |               |             | ブロック平径<br>(mm) | 備考  |
|--------------|---------------|----------------|---------------|-------------|----------------|-----|
|              |               | 燃料ピン<br>外径(mm) | ブロック当り<br>ピン数 | 炉心内<br>全ピン数 |                |     |
| 予備設計         | 5.0           | 34             | 36            | 1896        | 300            |     |
| MARK-I       | Ia            | 5.85           | 32            | 36          | 2904           | 300 |
|              | Ib            | 5.85           | 46            | 18          | 1413           | 300 |
| M A R K - II | 5.85          | 45             | 18            | 1251        | 300            |     |
| Ref.-III     | IIIa          | 5.85           | 33            | 36          | 2472           | 300 |
|              | IIIb          | 5.85           | 33            | 36          | 2904           | 300 |
| Ref.-IV      | IVa           | 5.85           | 45            | 18          | 1251           | 300 |
|              | IVb           | 5.85           | 45            | 18          | 1413           | 300 |
| Ref.-V       | 5.3 *         | 45             | 12            | 711         | 300            |     |
| Ref.-VI      | 5.6 *         | 47             | 12            | 732         | 300            |     |
| Ref.-VII     | VIIa          | 6.0 *          | 54            | 17          | 709            | 370 |
|              | VIIb          | 6.1 *          | 60            | 17          | 505            | 400 |
|              | VIIc          | 5.6 *          | 49            | 17          | 811            | 340 |
| Ref.-VIII    | 5.6 *         | 43             | 12            | 1029        | 270            |     |

\* 推定値

Table 2 多目的高温ガス実験炉・炉心一燃料の特徴と問題点

| 検討項目<br>シリーズ                      | 予備設計                       | MARK-I             | MARK-II                 | Reference III       | Reference IV        | Reference V                  | Reference VI                 | Reference VII                | Reference VIII             |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 直<br>高<br>核<br>炉<br>心             | コンパクト<br>コンパクト             | 大きい<br>中程度         | 大きい<br>少し高い             | 大きい<br>中程度          | 大きい<br>高い           | 中程度<br>高い                    | 大きい<br>高い                    | 大きい<br>中程度                   | 中程度<br>少し高い                |
| 制御棒<br>最大値                        | 大き過ぎる                      | 十分                 | 中程度                     | 中程度                 | 中程度                 | 大きい                          | 中程度                          | 十分                           | 中程度                        |
| 熱<br>特性<br>燃<br>料<br>出<br>力<br>密度 | 1300°C以下<br>レイノルズ数<br>低過ぎる | 1300°C以下<br>低<br>中 | 1300°C以下<br>小さ過ぎる<br>十分 | 1300°C以下<br>低い<br>中 | 1300°C以下<br>十分<br>中 | 1313°C<br>1290°C<br>十分<br>十分 | 1310°C<br>1293°C<br>中程度<br>中 | 1312°C<br>1276°C<br>中程度<br>中 | 1330°C<br>1297°C<br>低<br>中 |
| 再処理<br>燃料<br>プロック温度<br>应力         | 少<br>中<br>高                | 少<br>中<br>低        | 少<br>中<br>低             | 少<br>中<br>高         | 少<br>中<br>高         | 少<br>中<br>低                  | 少<br>中<br>低                  | 少<br>中<br>低                  | 少<br>中<br>低                |

Table 3 多目的高温ガス実験炉・炉心燃料の主要な問題点

| シリーズ           | 最も主要な問題点                        | 引き起こる問題                       |
|----------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 予備設計           | ◦制御棒価値が高い(1本当り)<br>◦冷却材流路幅が小さい  | ◦安全余裕が低い<br>◦流路閉止             |
| MARK-I         | ◦レイノルズ数が低い                      | ◦流動の安定性                       |
| MARK-II        | ◦レイノルズ数が低い                      | ◦流動の安定性                       |
| Reference-III  | ◦ブロックが高温になる<br>◦ブロック-ピン一体形      | ◦ブロックの応力、収縮が大きくなる。彎曲大<br>◦再処理 |
| Reference-IV   | ◦二つの流路の状態が異なる                   | ◦設計が困難<br>◦照射特性推定困難           |
| Reference-V    | ◦制御棒価値が高い(1本当り)<br>◦炉心が高い(H/D大) | ◦安全余裕が低い<br>◦核特性が良くない         |
| Reference-VI   | ◦炉心が高い                          | ◦核特性が良くない                     |
| Reference-VII  | ◦スタンドパイプの配列<br>◦制御棒の冷却困難        | ◦応力が高くなる<br>◦制御棒冷却の信頼性        |
| Reference-VIII | ◦レイノルズ数が低い                      | ◦流動の安定性                       |

Table 4 最低レイノルズ数と炉心形態

| 最低レイノルズ                                |   |   |                     |
|--|---|---|---------------------|
| 4,000~5,000                            |   | 10,000  |                     |
| 3,000                                  | ブロック境界へ制御棒<br>挿入不可                      | ブロック境界へ制御棒<br>挿入可能  |                     |
| ◦1ブロック当りの燃料<br>ピン数の減少させて、<br>全燃料ピン数の減少 | ◦1ブロック当りの燃料ビ<br>ン数の減少をさせて、全<br>燃料ピン数の減少 | ◦炉心内のブロック数を減<br>少させて、全燃料ピン数<br>の減少                                      | ◦燃料ピン形式<br>変更       |
| Ref.-VIII                              | Ref.-VI<br>Ref.-V                       | Ref.-VII <sub>a</sub><br>Ref.-VII <sub>b</sub><br>Ref.-VII <sub>c</sub> | Ref.-III<br>Ref.-IV |

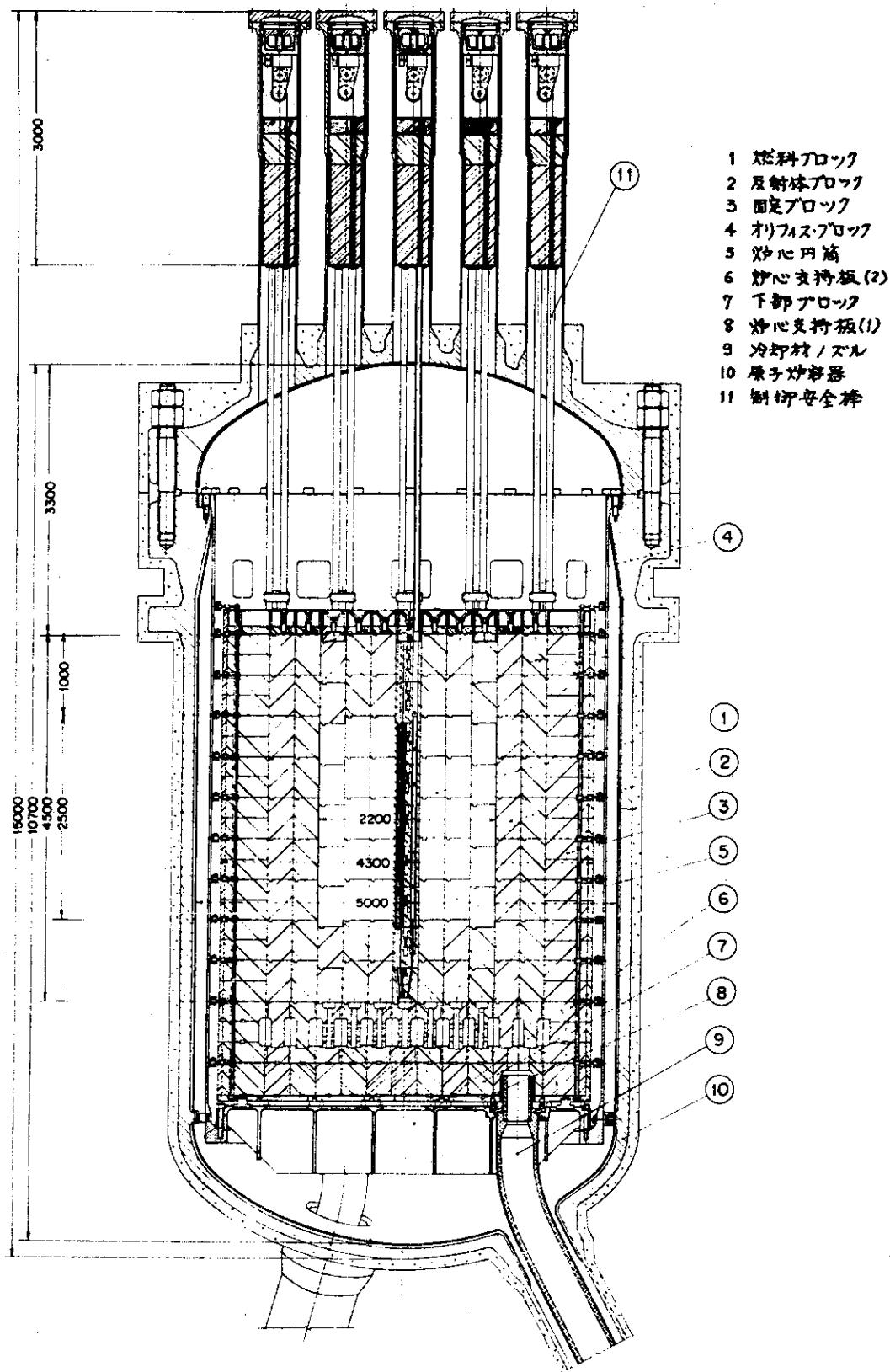


Fig. 1 多目的高温ガス実験炉  
(予備設計炉心)

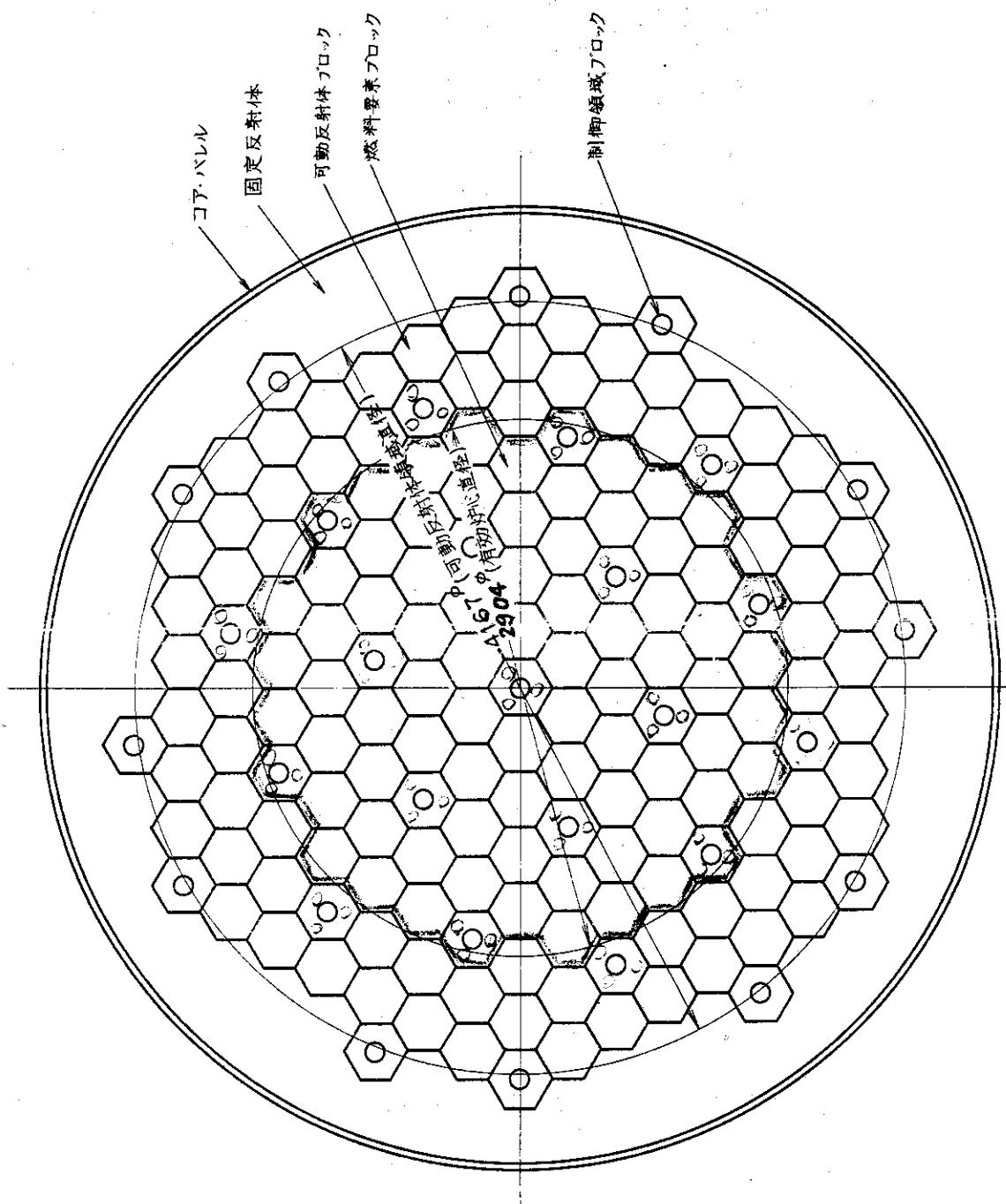


Fig. 2 a ブロック・ピッチ 300 mm, 有効炉心ブロック・カラム 55 個  
予備設計炉心平面図

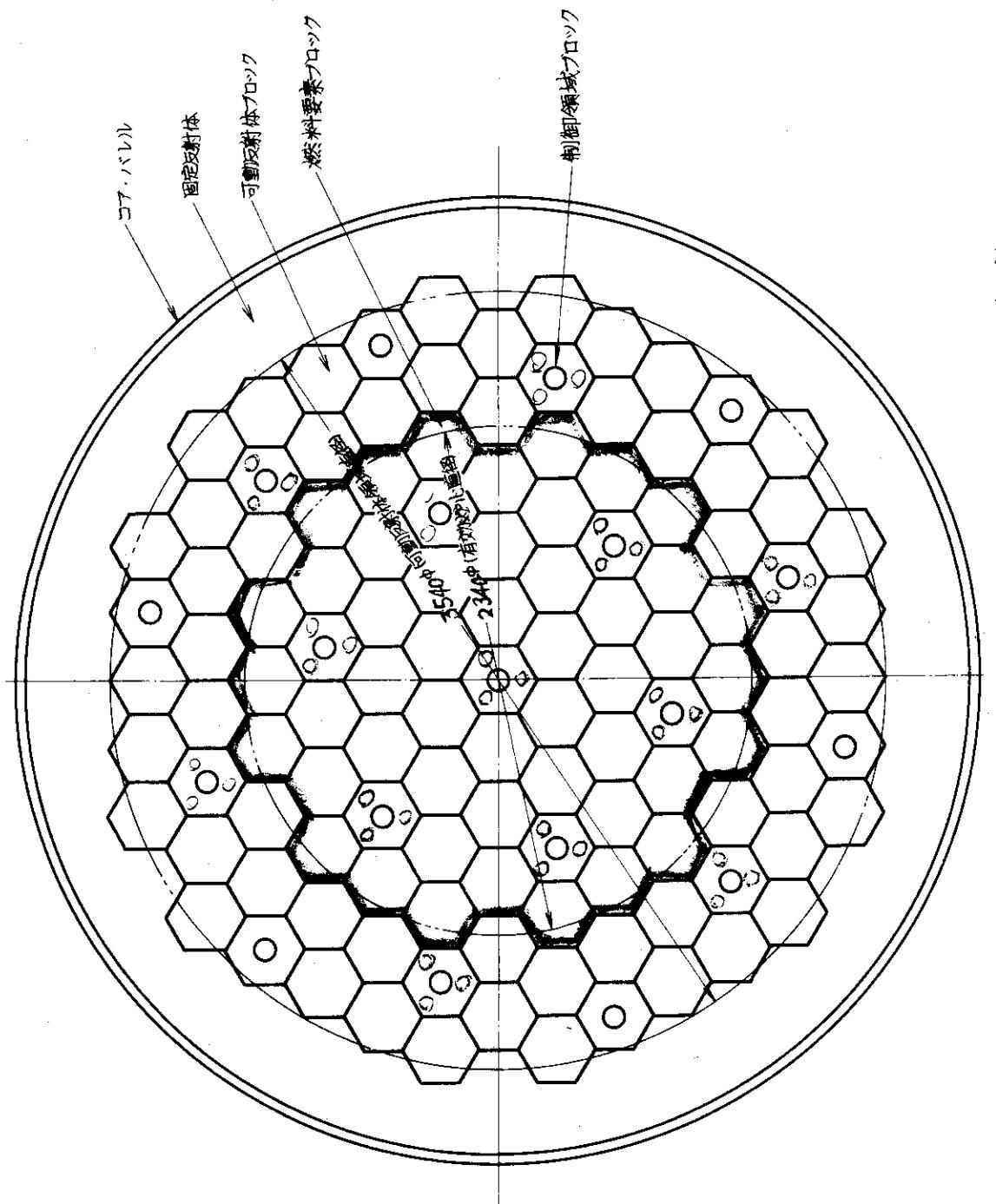


Fig. 2 b ブロック・ピッチ 300mm, 有効炉心ブロック・カラン 85 個  
MARK-I 炉心平面図

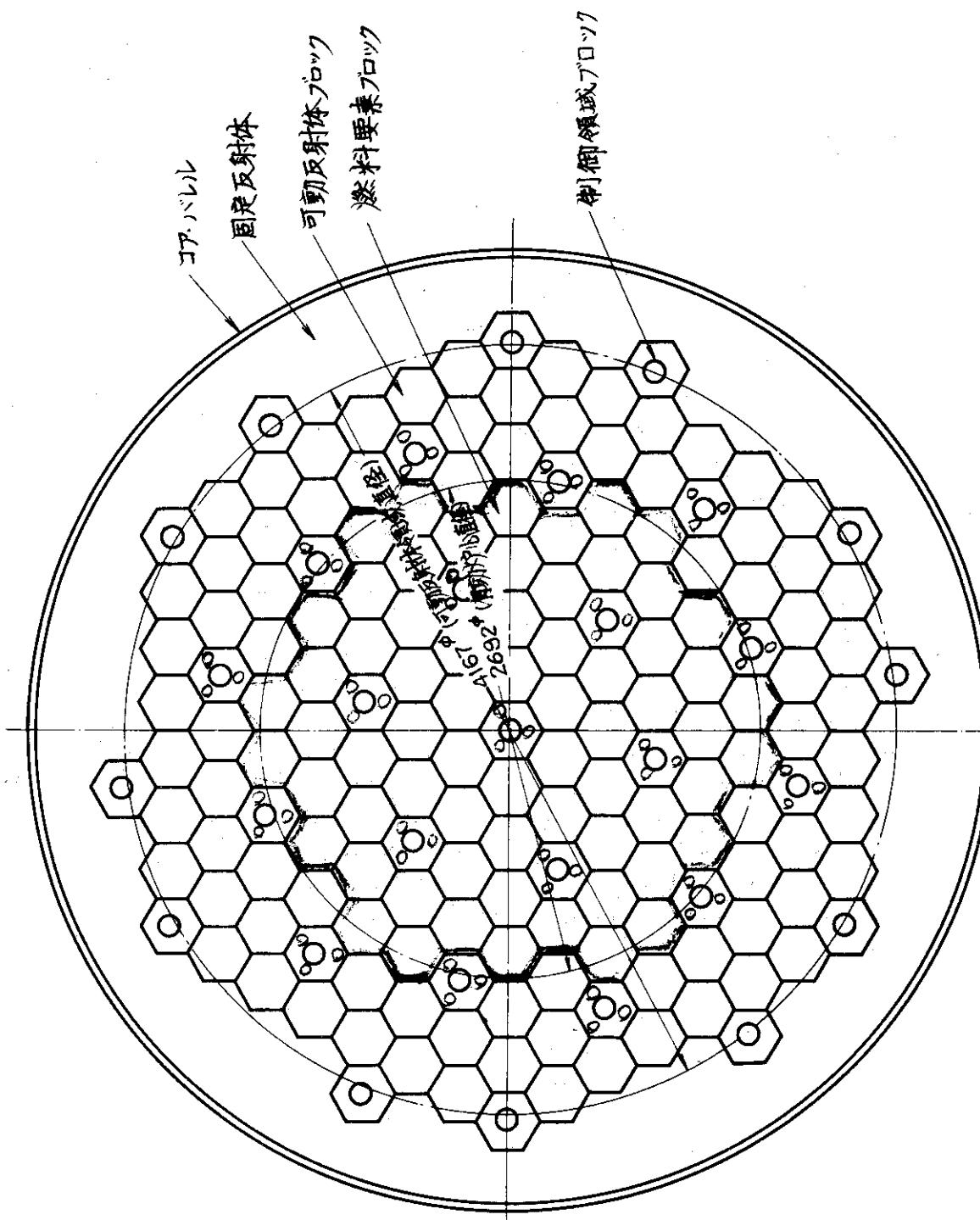


Fig. 2c ブロック・ピッチ 300 mm, 有効炉心ブロック・カラン 73 個  
MARK-II 炉心平面図

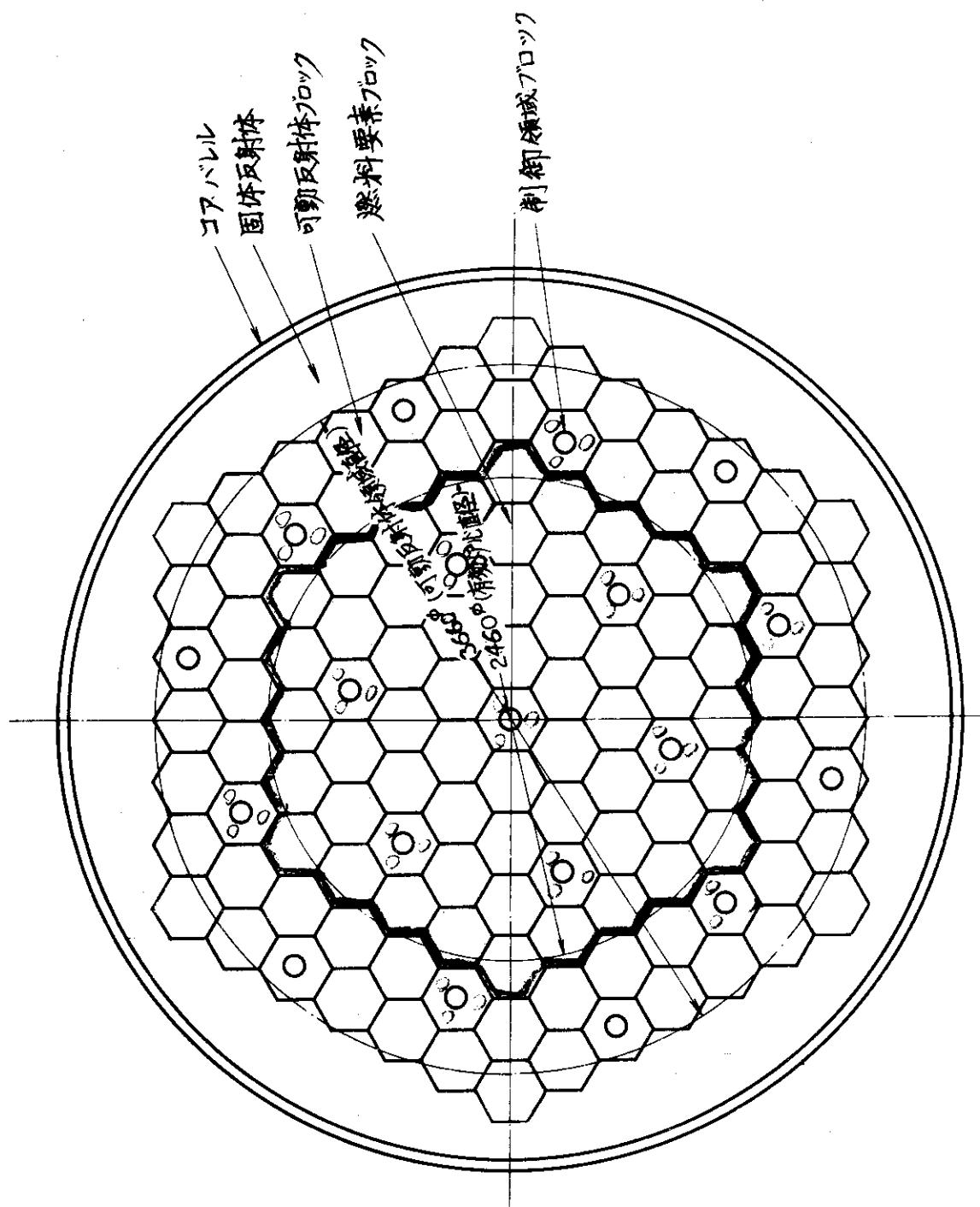


Fig. 2d ブロック・ビッチ 300mm, 行数炉心ブロック・カラム 61 個  
Reference-V炉心平面図

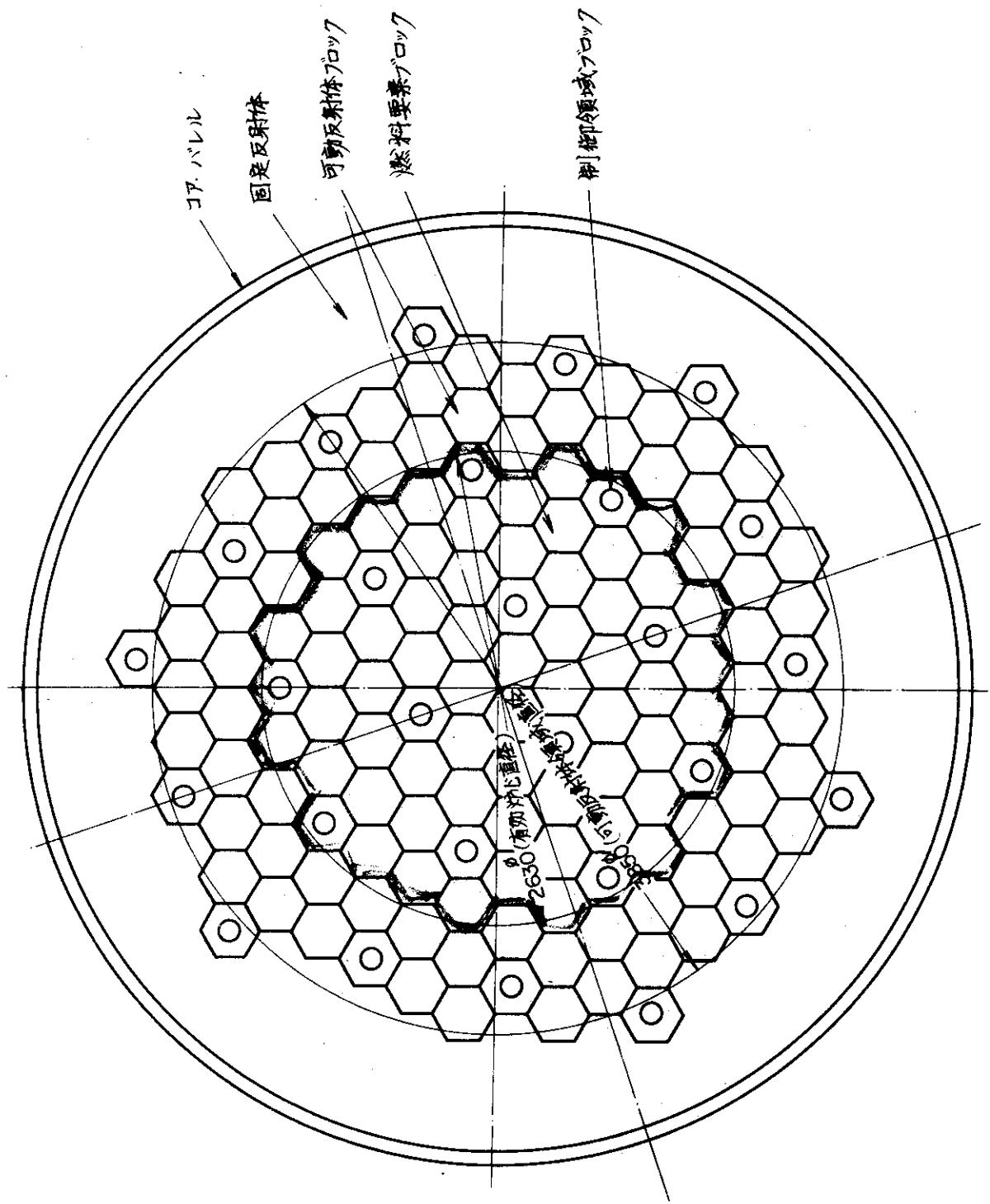


Fig. 2e ブロック・ピッチ 300 mm, 有効燃心ブロックカラム 69 個  
Reference-VI 炉心平面図

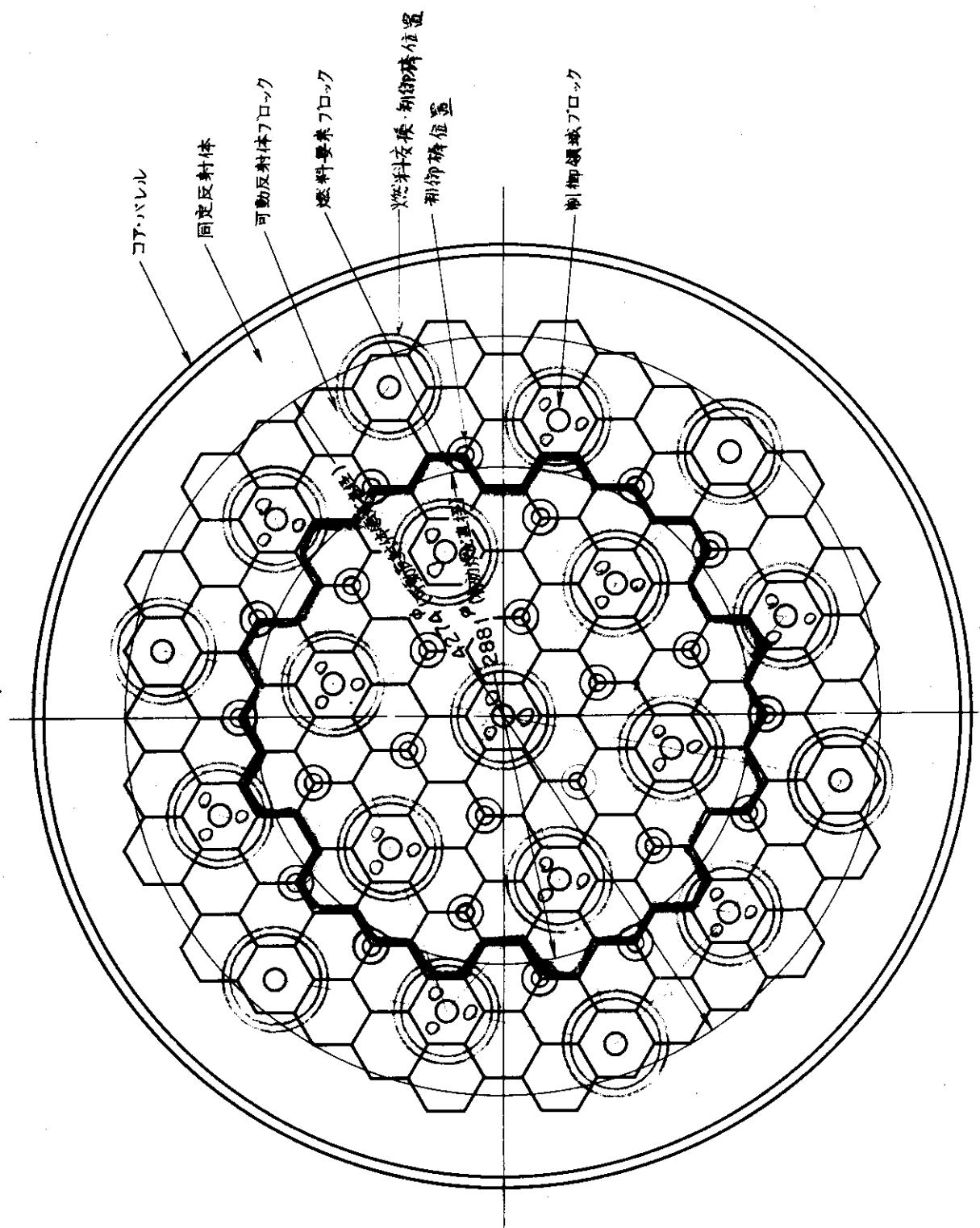


Fig. 2 f ブロック・ピッチ370mm, 有効炉心ブロック・カラム5個

Reference-VIIa 炉心平面図

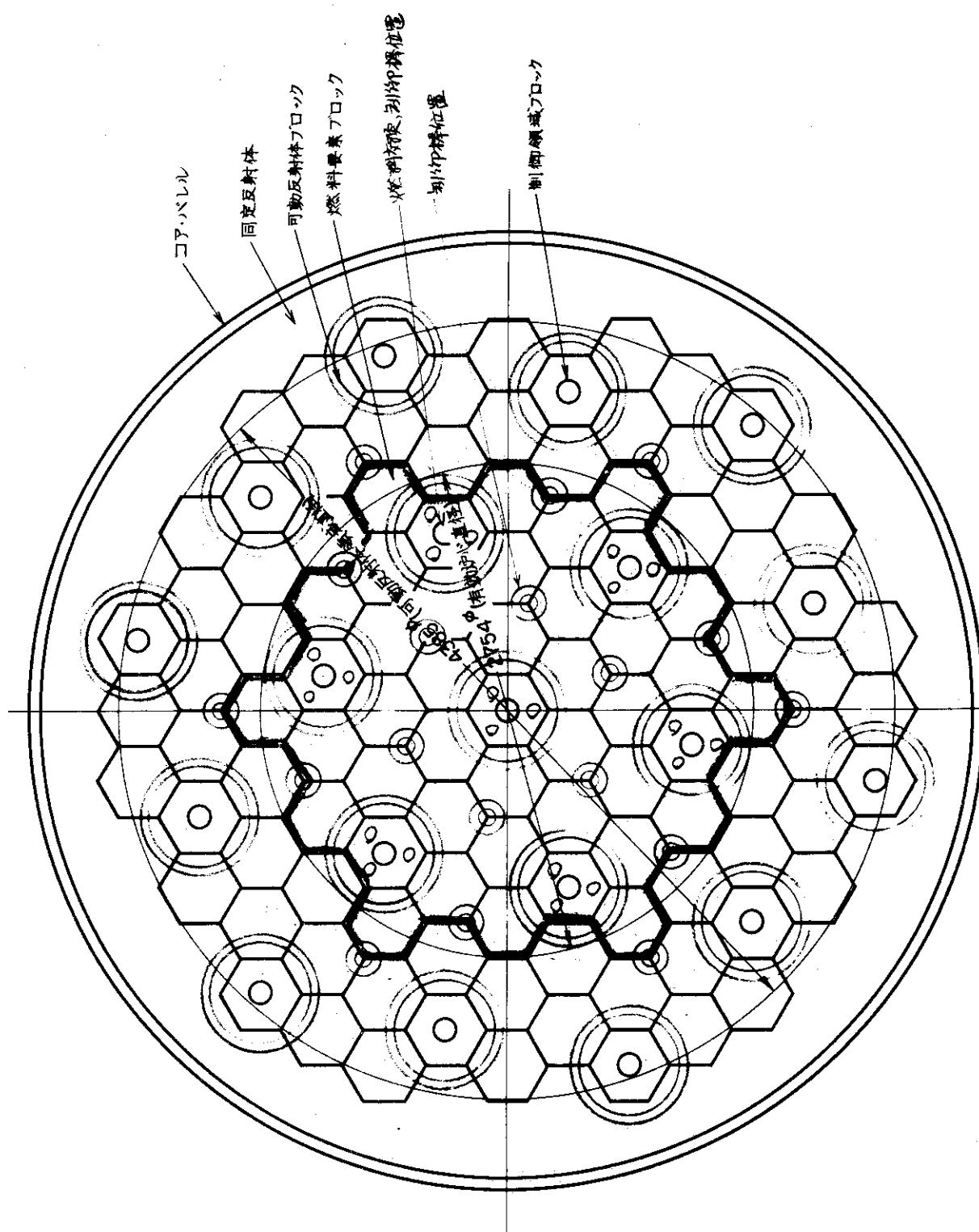


Fig. 2 g ブロック・ビッチ 400 mm, 有効炉心ブロック・カラム 43 個  
Reference-VIIb 炉心平面図

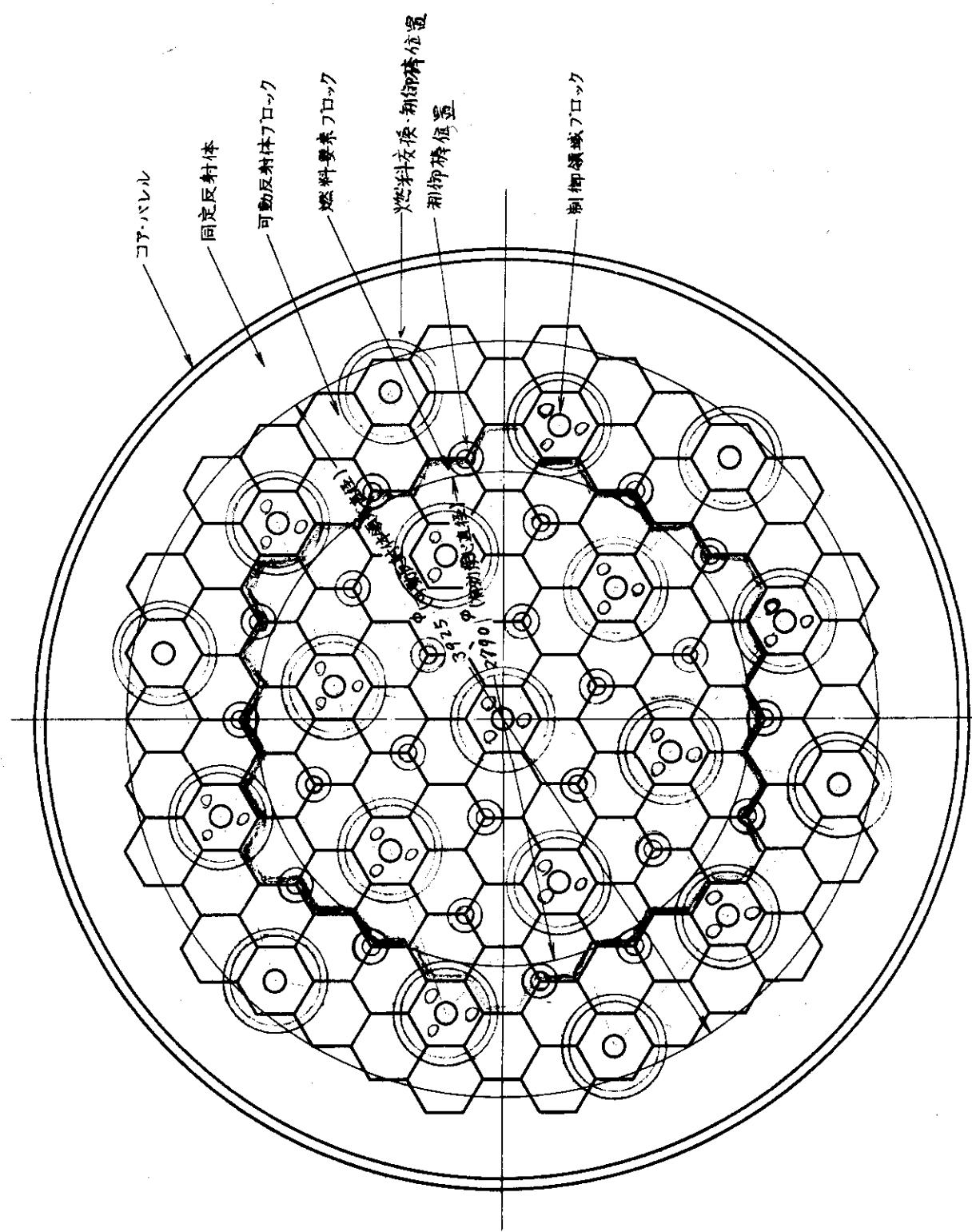


Fig. 2 h ブロック・ピッチ 340 mm, 有効炉心直径・カラム 6 1 個  
Reference -VIIc 炉心平面図

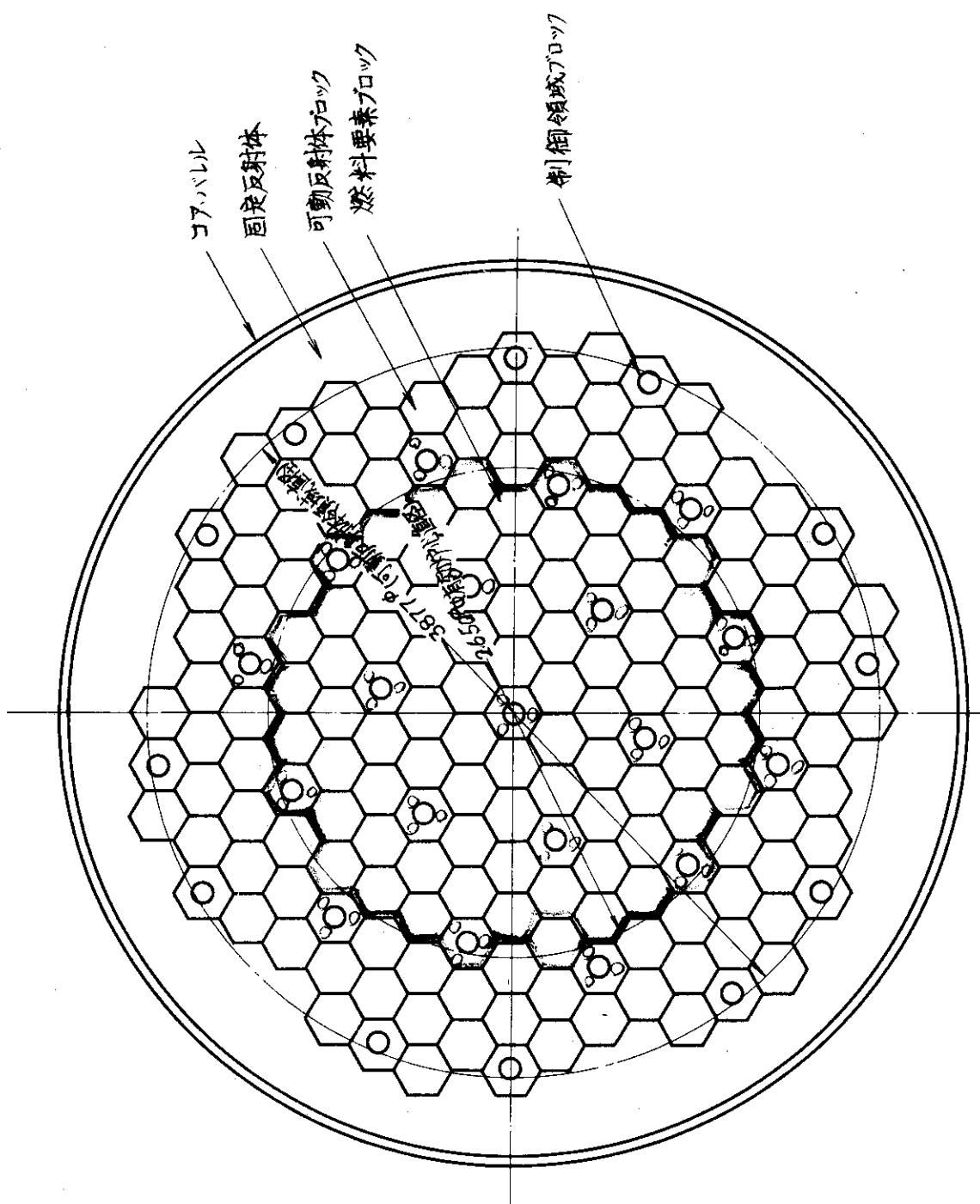
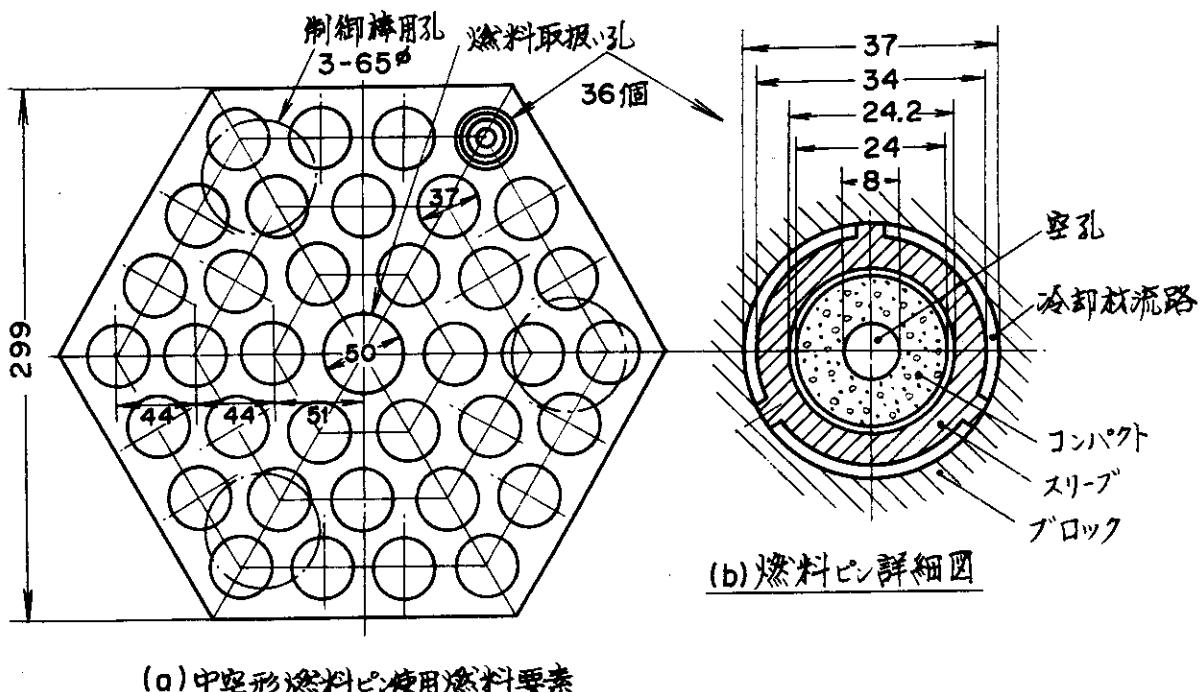


Fig. 2 i ブロック・ピッチ 270mm, 有効炉心ブロック・カラム 85 個  
Reference -VIII 炉心平面図

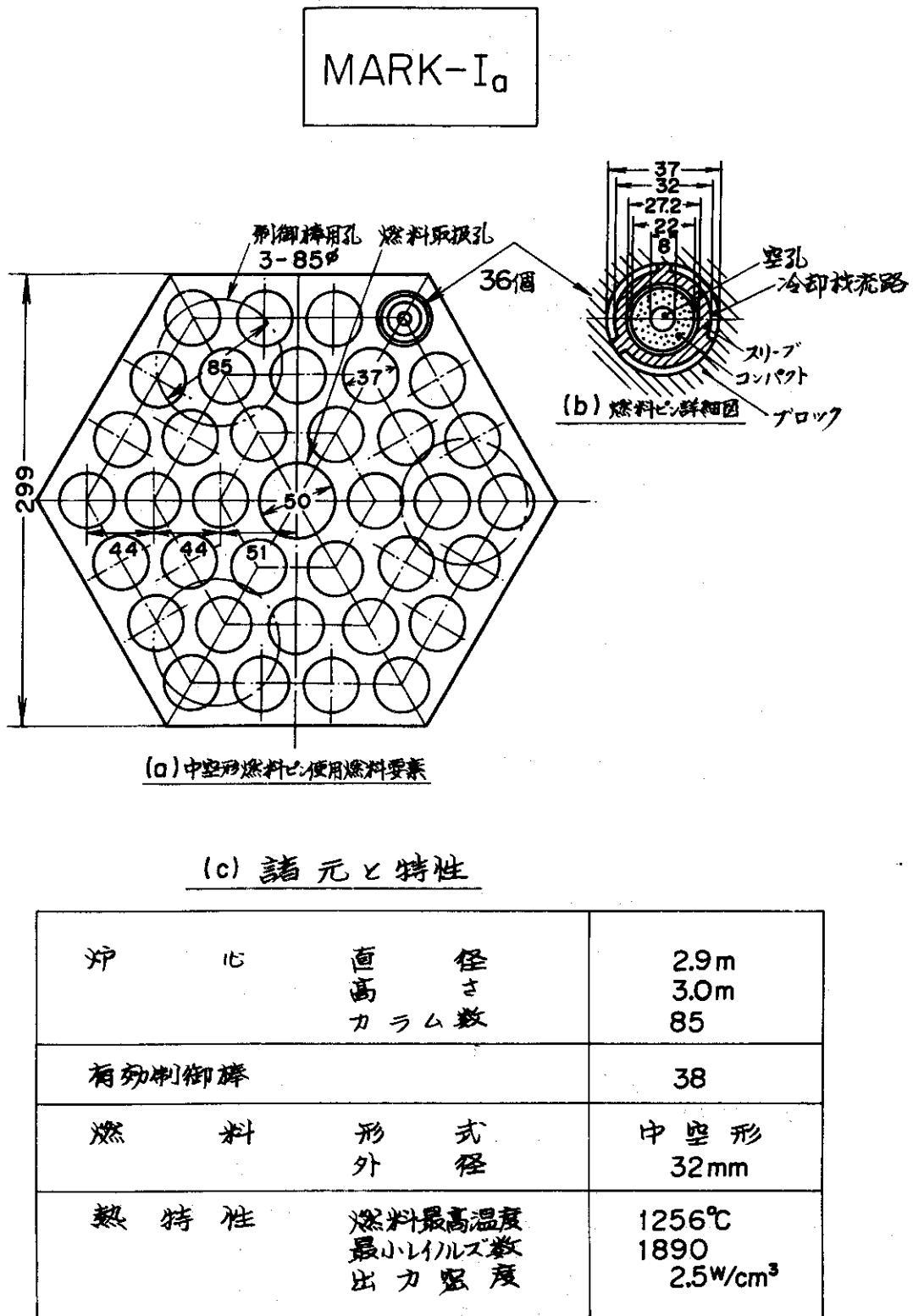
## 予備設計

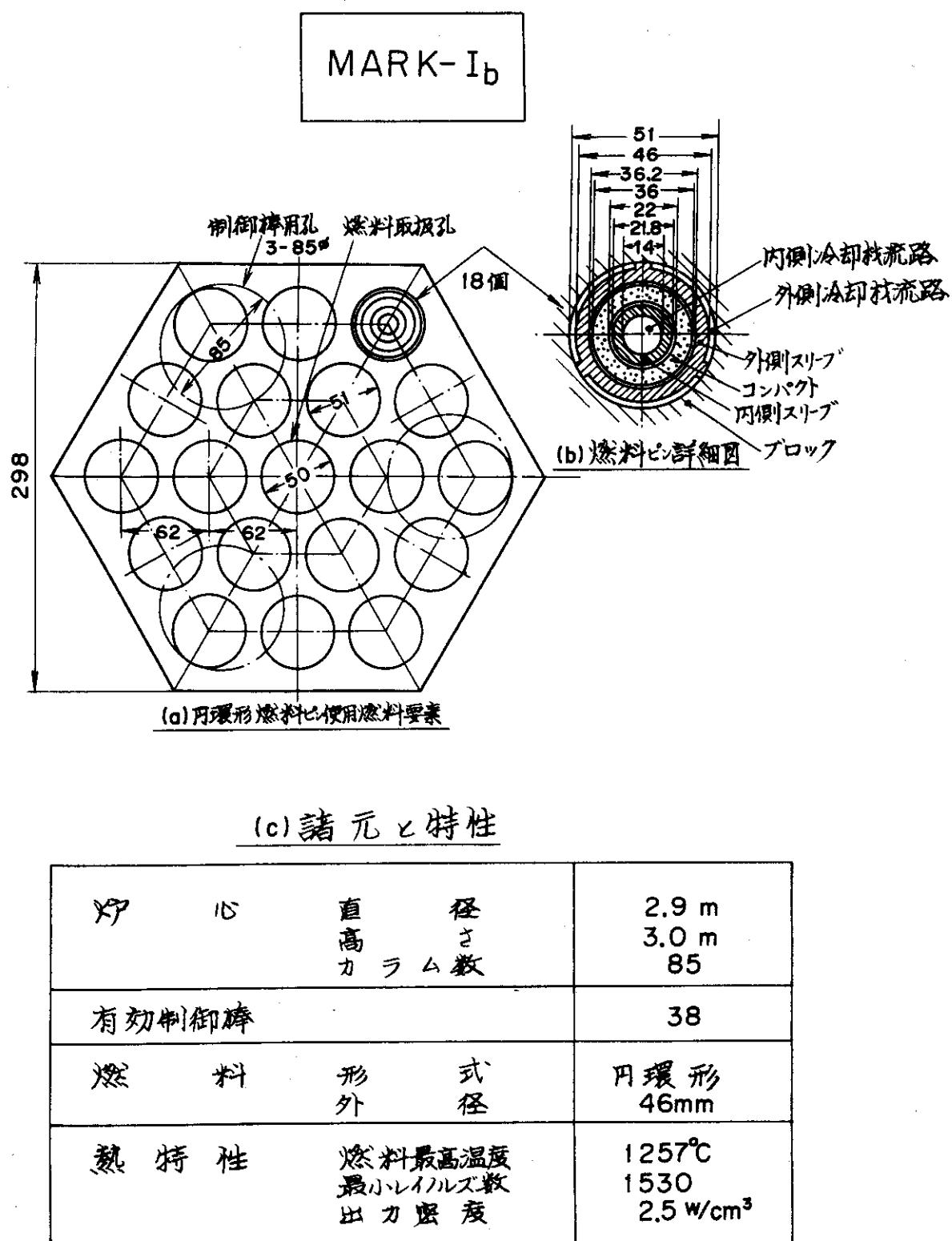


## (c) 諸元と特性

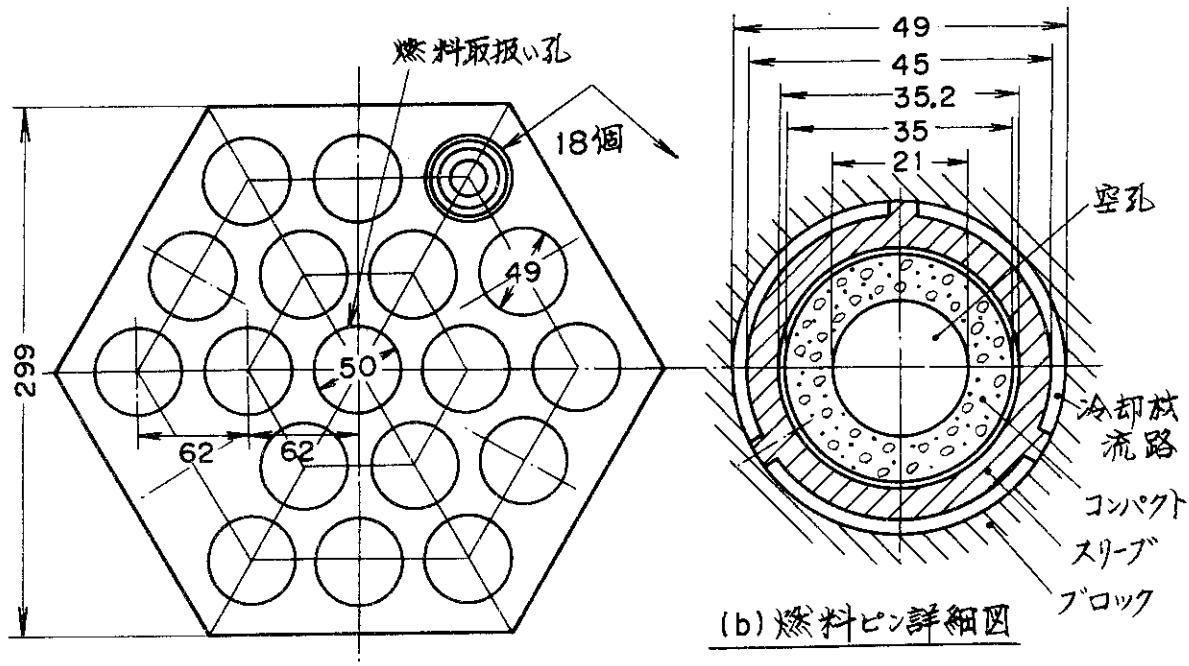
|               |                           |
|---------------|---------------------------|
| 炉心直高さ<br>カラム数 | 2.34 m<br>2.5 m<br>55     |
| 有効制御棒         | 14                        |
| 燃料外形径         | 中空形<br>34 mm              |
| 熱特性           | 燃料最高温度<br>最小レイルズ数<br>出力密度 |

Fig. 3 予備設計炉心・燃料の概要

Fig. 4 MARK-I<sub>a</sub> 炉心・燃料の概要

Fig. 5 MARK-I<sub>b</sub> 炉心・燃料の概要

## MARK-II



## (c) 諸元と特性

|                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| 炉心<br>直<br>高<br>カラム<br>数 | 2.69 m<br>3.5 m<br>73     |
| 有効制御棒                    | 26                        |
| 燃<br>料<br>形<br>外<br>径    | 中空形<br>45 mm              |
| 熱<br>特<br>性              | 燃料最高温度<br>最小レイルズ数<br>出力密度 |

Fig. 6a MARK-II炉心・燃料の概要  
(標準燃料要素)

## MARK-II

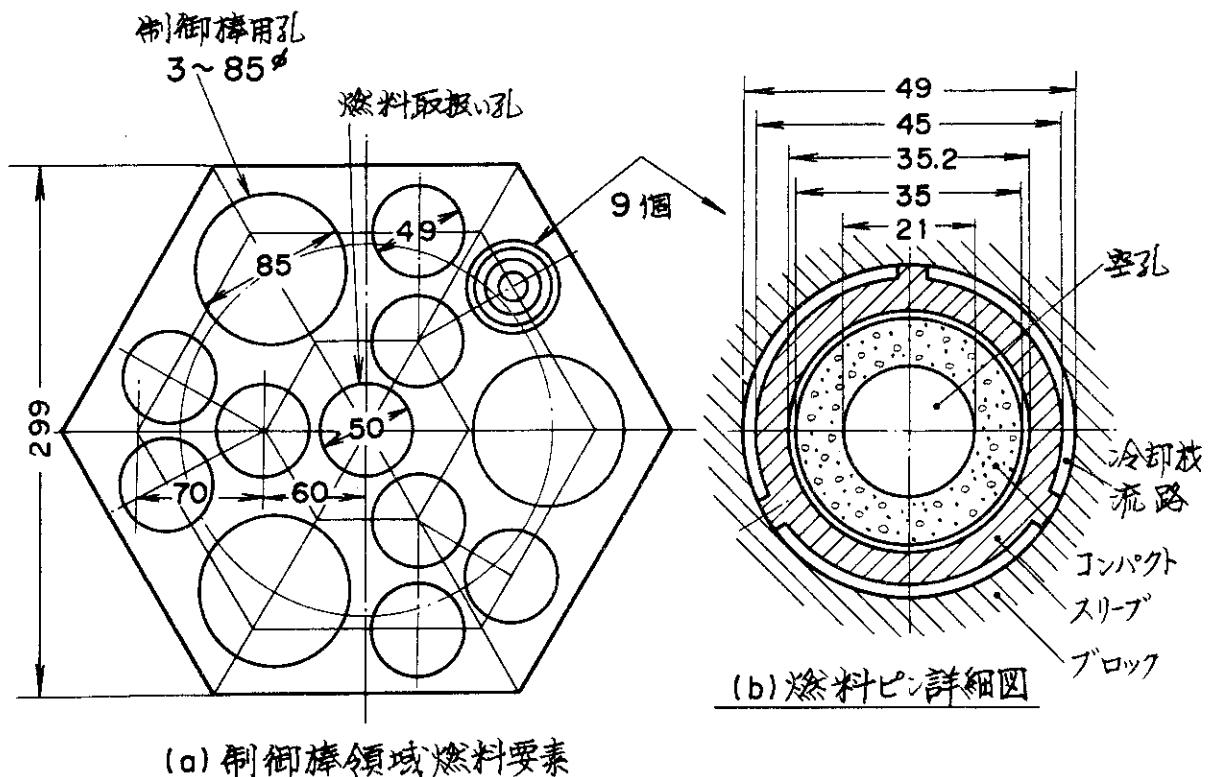
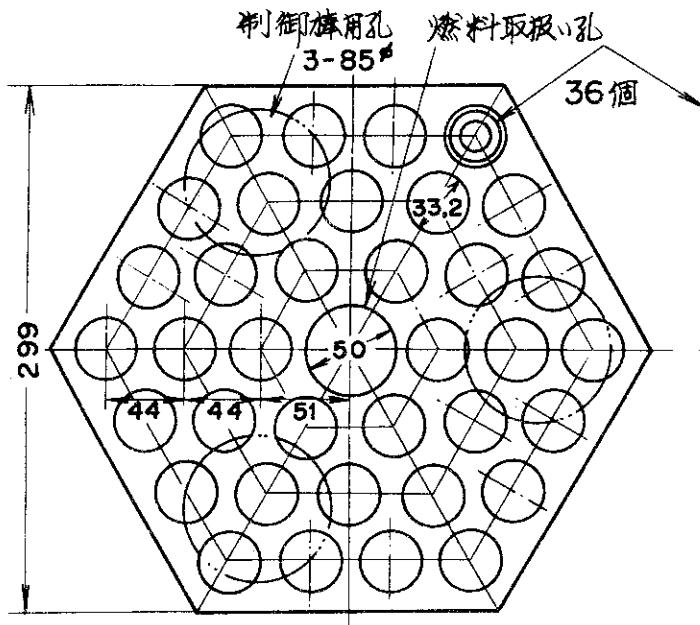
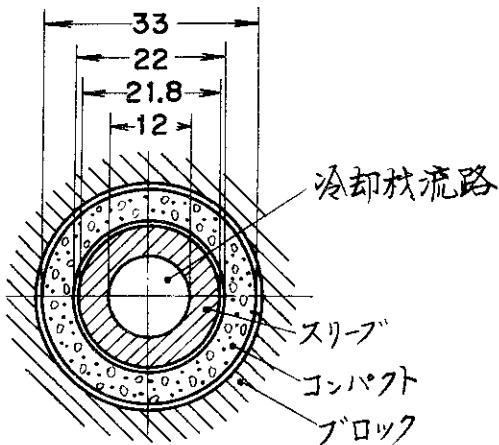


Fig. 6b MARK-II 炉心・燃料の概要  
 (制御領域燃料要素)

## Reference-III



(a) セミピン形 燃料使用燃料要素

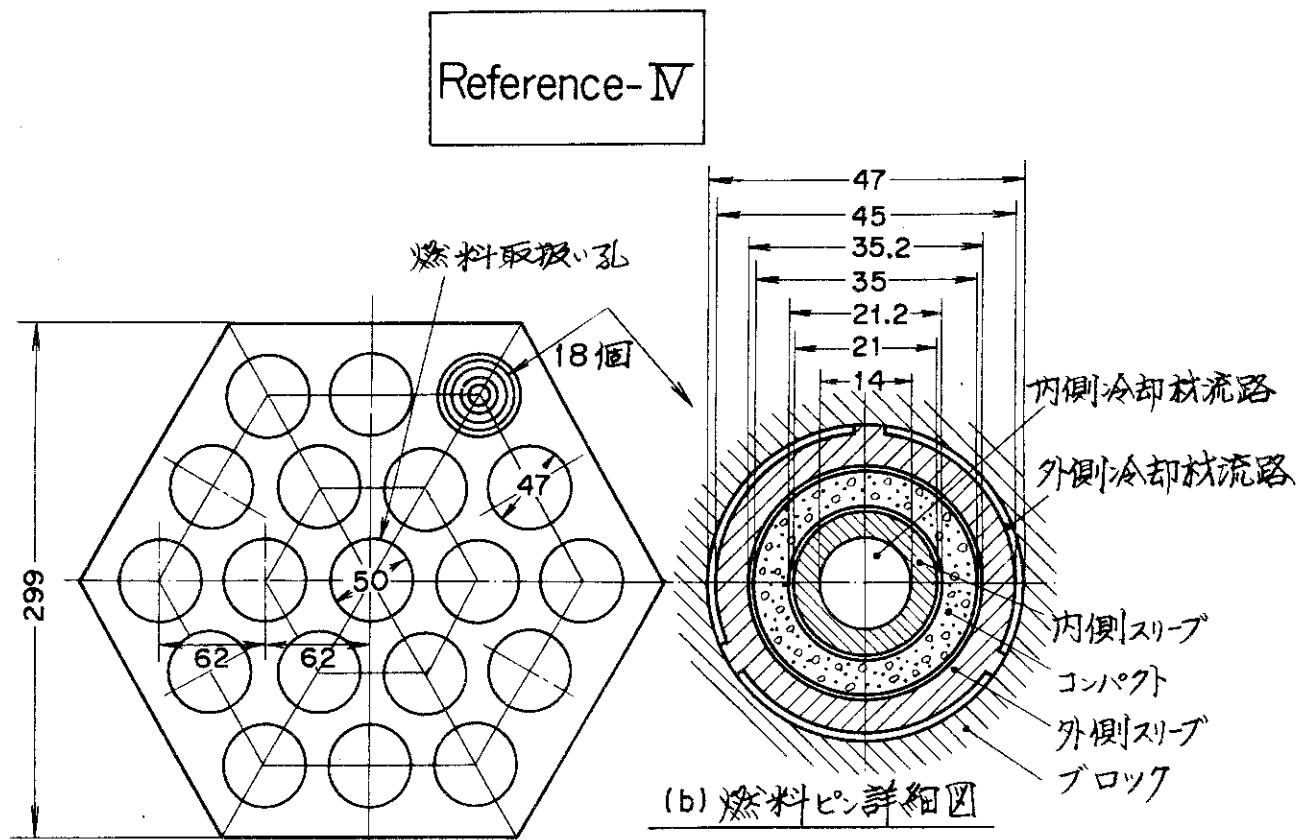


(b) 燃料ピン詳細図

## (c) 諸元と特性

|              | Ref. - III <sub>a</sub>   | Ref. - III <sub>b</sub>                  |
|--------------|---------------------------|--|
| 炉内高さ<br>カラム数 | 2.69 m<br>3.5 m<br>73     | 2.9 m<br>3.0 m<br>85                     |
| 有効制御棒        | 26                        | 38                                       |
| 燃料外形<br>外径   | セミピン形<br>33 mm            |  |
| 熱特性          | 燃料最高温度<br>最小レイルズ数<br>出力密度 | 1293°C<br>10200<br>2.5 W/cm <sup>3</sup> |
|              |                           | 1259°C<br>10630<br>2.5 W/cm <sup>3</sup> |

Fig. 7 Reference-III炉心・燃料の概要

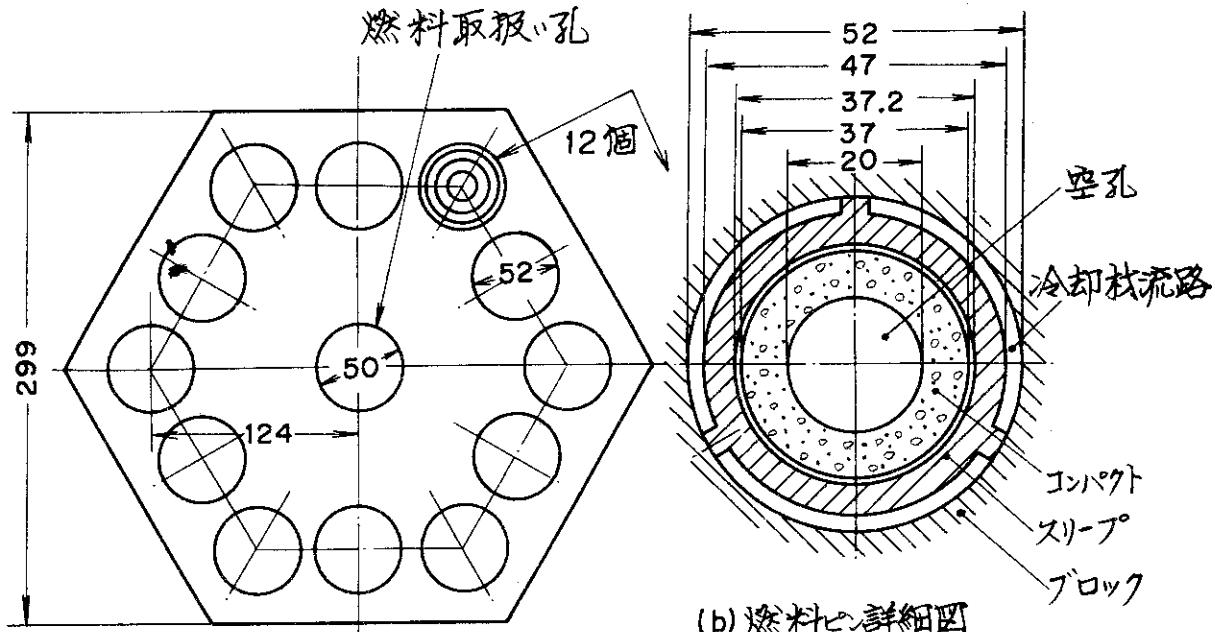


(c) 諸元と特性

|                                  | Ref.-IVa                      | Ref.-IVb                       |
|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 炉心<br>高さ<br>直徑<br>カラム数           | 2.69 m<br>40 m<br>73          | 2.9 m<br>3.5 m<br>85           |
| 有効制御棒                            | 26                            | 38                             |
| 燃料<br>形式<br>外径                   | 円環形<br>45 mm                  |                                |
| 熱特性<br>燃料最高温度<br>最小レインズ数<br>出力密度 | 1313°C<br>15200<br>2.19 W/cm³ | 12.90°C<br>13000<br>2.15 W/cm³ |

Fig. 8 Reference-IV 炉心・燃料の概要

## Reference-V

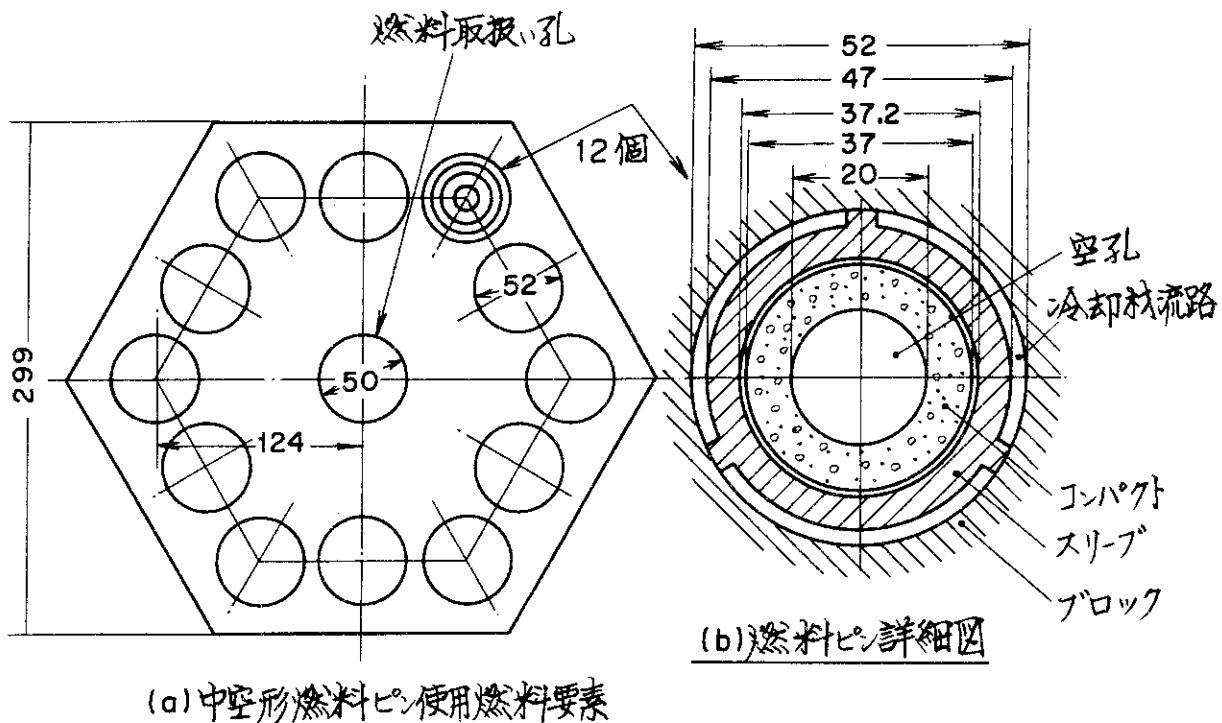


## (c) 諸元と特性

|              | Ref. - V <sub>a</sub>                               | Ref. - V <sub>b</sub>            |
|--------------|---|----------------------------------|
| 炉心直高<br>カラム数 | 2.46 m<br>4.0 m<br>61                               | 4.5 m                            |
| 有効制御棒        | 20  |                                  |
| 燃料形式<br>外径   | 中空形<br>47 mm  |                                  |
| 熱特性<br>出力密度  | 1307°C<br>最小レイルズ数<br>4820<br>2.62 W/cm <sup>3</sup> | 1284°C<br>2.34 W/cm <sup>3</sup> |

Fig. 9 Reference-V炉心・燃料の概要

## Reference-VI

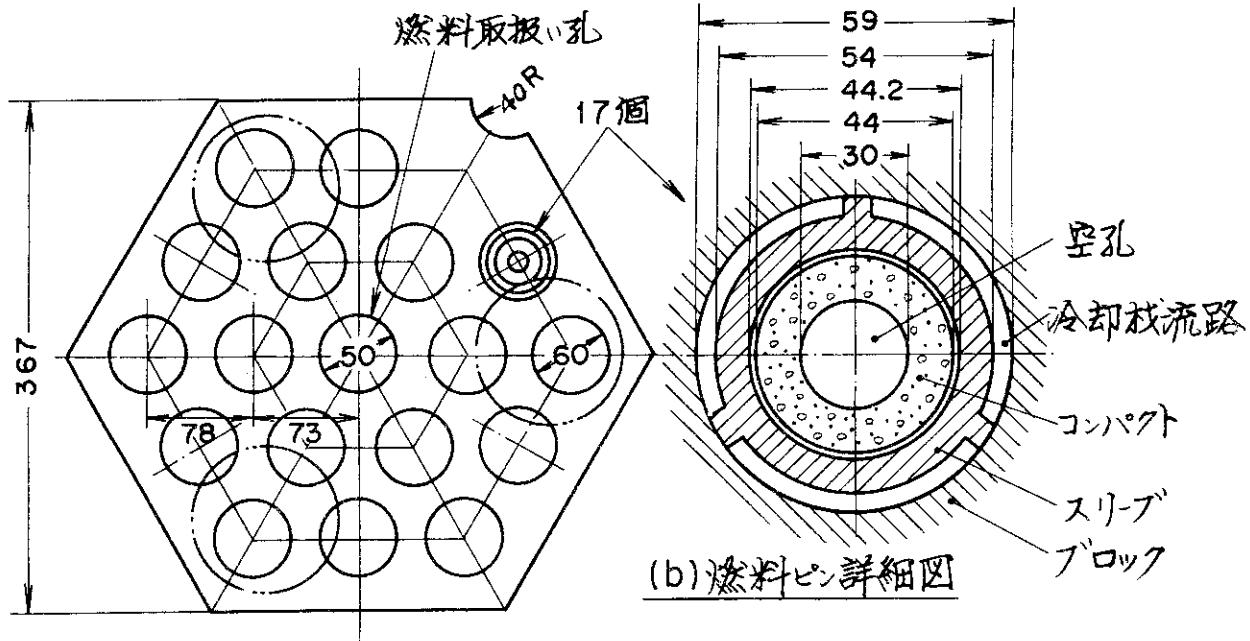


## (c) 諸元と特性

|                                | Ref.-VIa                  | Ref.-VIb                    |
|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 炉心<br>高さ<br>直<br>径<br>カタム<br>数 | 2.63 m<br>40 m<br>69      | 4.5 m                       |
| 有効制御棒                          | 24                        |                             |
| 燃<br>料<br>形<br>式<br>外<br>径     | 中空形<br>47 mm              |                             |
| 熱<br>特<br>性                    | 燃料最高温度<br>最小レイルズ数<br>出力密度 | 1318°C<br>4320<br>2.3 W/cm³ |
|                                |                           | 1300°C<br>2.13 W/cm³        |

Fig. 10 Reference-VI炉心・燃料の概要

## Reference-VIIa

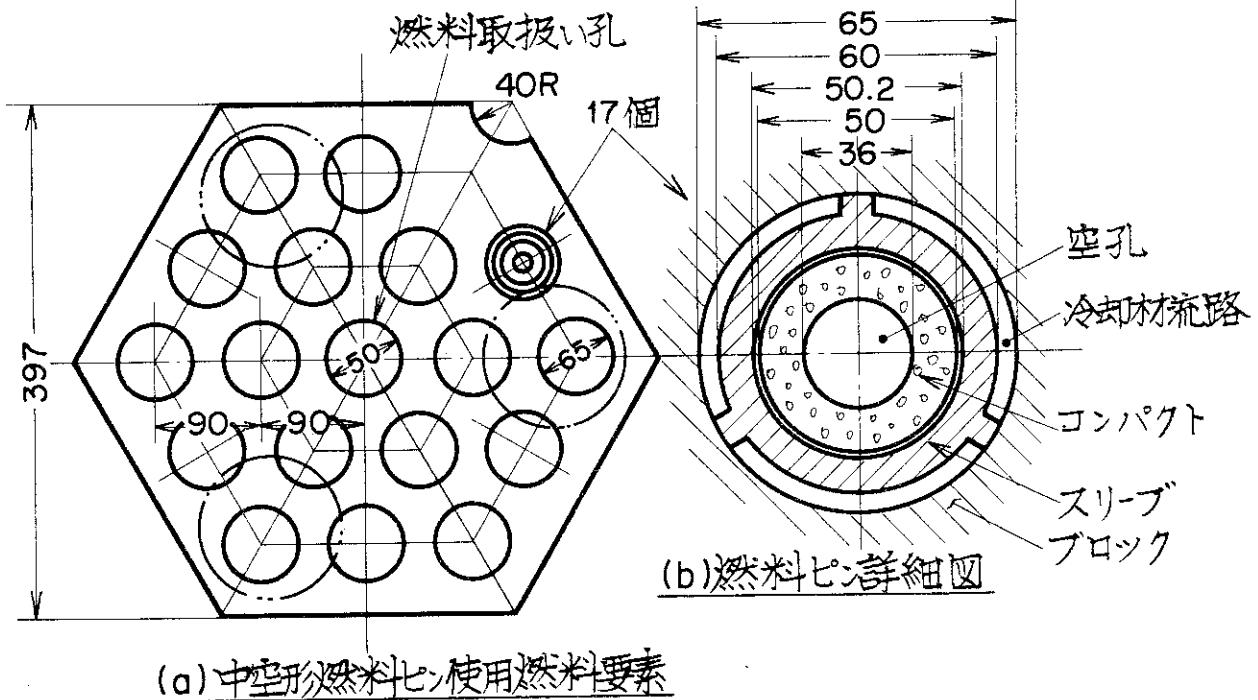


(a) 中空形燃料ビン使用燃料要素

## (c) 諸元と特性

|                                       | Ref.-VIIa <sub>1</sub>    | Ref.-VIIa <sub>2</sub>                    |
|---------------------------------------|---------------------------|---|
| 炉心<br>直<br>高<br>さ<br>カ<br>ラ<br>ム<br>数 | 2.88m<br>3.5 m<br>55      | 4.0m                                      |
| 有効制御棒                                 | 50                        |   |
| 燃<br>料<br>形<br>式                      | 中空形                       |   |
| 外<br>径                                | 54 mm                     |   |
| 熱<br>特<br>性                           | 燃料最高温度<br>最小レイルズ数<br>出力密度 | 1306 °C<br>3960<br>2.18 W/cm <sup>3</sup> |
|                                       |                           | 1276 °C<br>1.91 W/cm <sup>3</sup>         |

Fig. 11a Reference-VIIa 炉心・燃料の概要

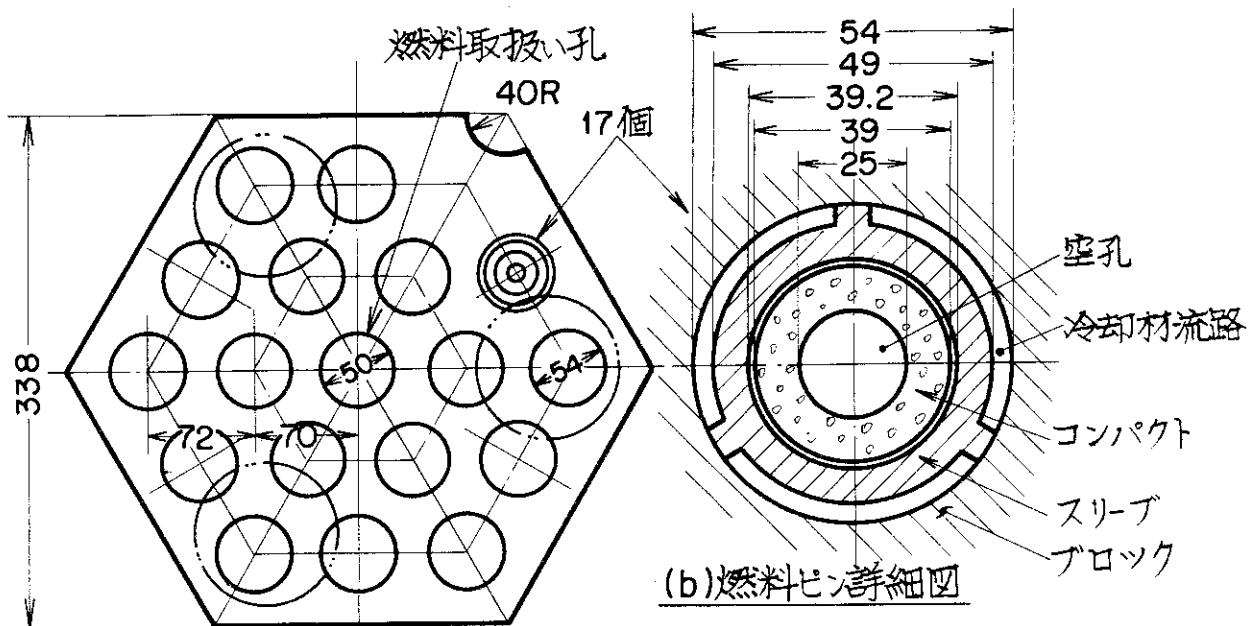
Reference-VII<sub>b</sub>

## (c) 諸元と特性

|                  | Ref.-VII <sub>b1</sub>    | Ref.-VII <sub>b2</sub>                   |
|------------------|---------------------------|--|
| 炉心<br>高さ<br>カラム数 | 2.75 m<br>4.0 m<br>43     | 4.5 m                                    |
| 有効制御棒            | 32                        |  |
| 燃料形式<br>外径       | 中空形<br>60 mm              |  |
| 熱特性              | 燃料最高温度<br>最小レイルズ数<br>出力密度 | 1312 °C<br>3990<br>2.1 W/cm <sup>3</sup> |
|                  |                           | 1288 °C<br>1.87 W/cm <sup>3</sup>        |

Fig. 11 b Reference-VII<sub>b</sub> 炉心・燃料の概要

## Reference-VIIc



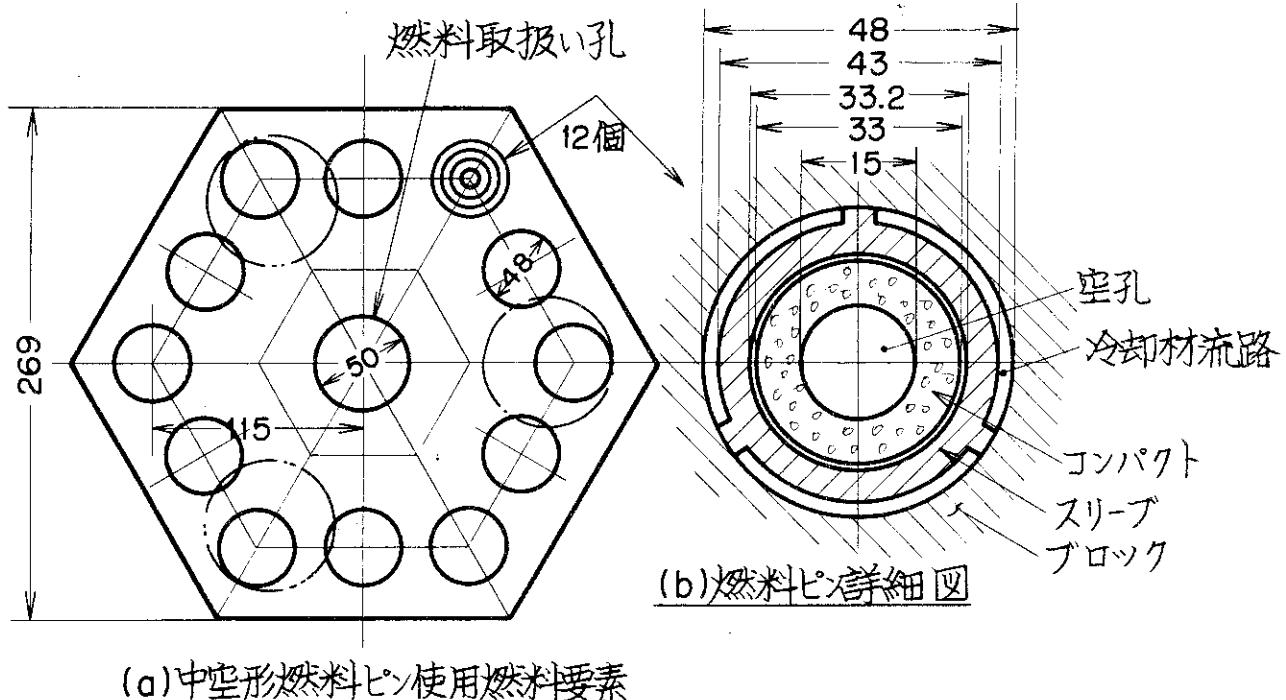
(a) 中空形燃料ピン使用燃料要素

## (c) 諸元と特性

|                                   | Ref. - VIIc <sub>1</sub> | Ref. - VIIc <sub>2</sub>                      |
|-----------------------------------|--------------------------|---|
| 炉心<br>直<br>高<br>さ<br>径<br>タム<br>数 | 2.79 m<br>3.5 m<br>61    | 4.0 m   |
| 有効制御棒                             | 50                       |   |
| 燃<br>料<br>形<br>外<br>式<br>径        | 中空形<br>49 mm             |   |
| 熱<br>特<br>性                       | 燃料最高温度<br>最小レイノルズ数       | 1312 °C<br>3760                               |
|                                   | 出力密度                     | 2.26 W/cm <sup>3</sup> 1.98 W/cm <sup>3</sup> |

Fig. 11c Reference-VIIc 炉心・燃料の概要

## Reference-VIII



(a) 中空形燃料ピン使用燃料要素

## (c) 諸元と特性

|                        | Ref. - VIII <sub>a</sub>                | Ref. - VIII <sub>b</sub>         |
|------------------------|---|----------------------------------|
| 炉心高さ<br>カラム数           | 2.65 m<br>3.5 m<br>85                   | 40 m                             |
| 有効制御棒                  | 38                                      |                                  |
| 燃料形式<br>外径             | 中空形<br>43 mm                            |                                  |
| 熱特性<br>最小レインズ数<br>出力密度 | 燃料最高温度<br>3360<br>$2.54 \text{ W/cm}^3$ | 1297 °C<br>$2.22 \text{ W/cm}^3$ |

Fig. 12 Reference-VIII炉心・燃料の概要

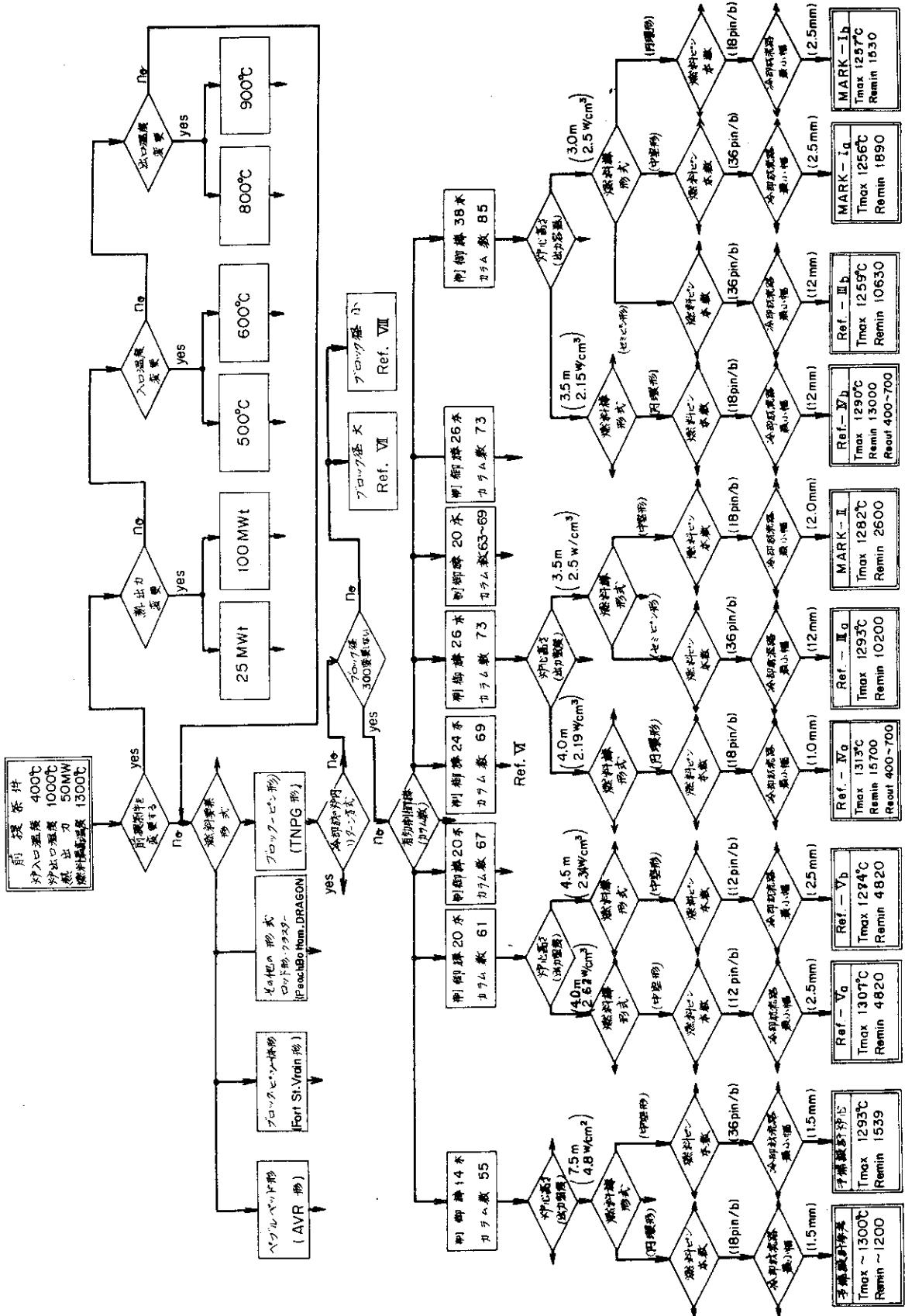


Fig. 13 多目的高溫ガス実験炉・炉心燃料設計力スケード図

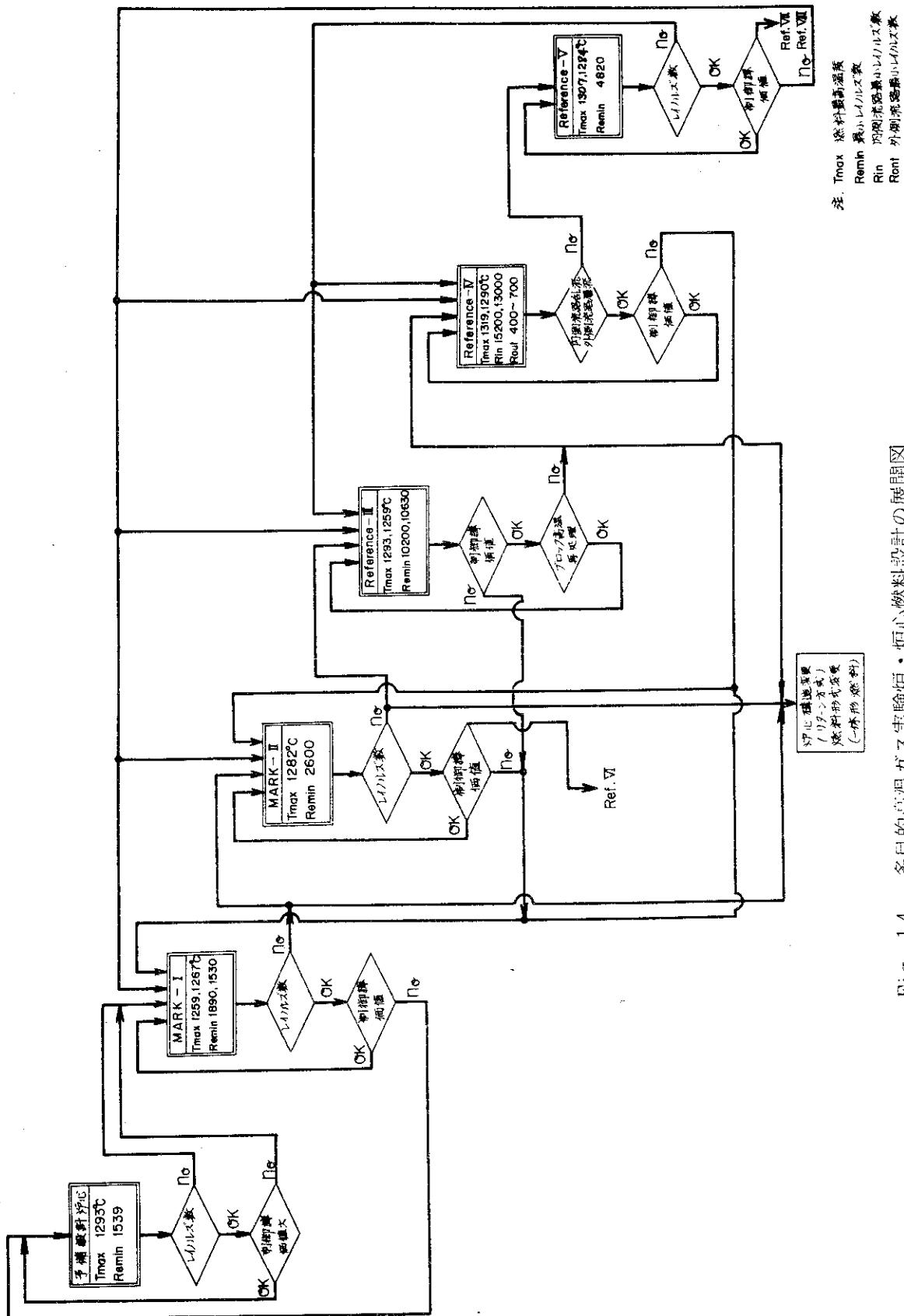
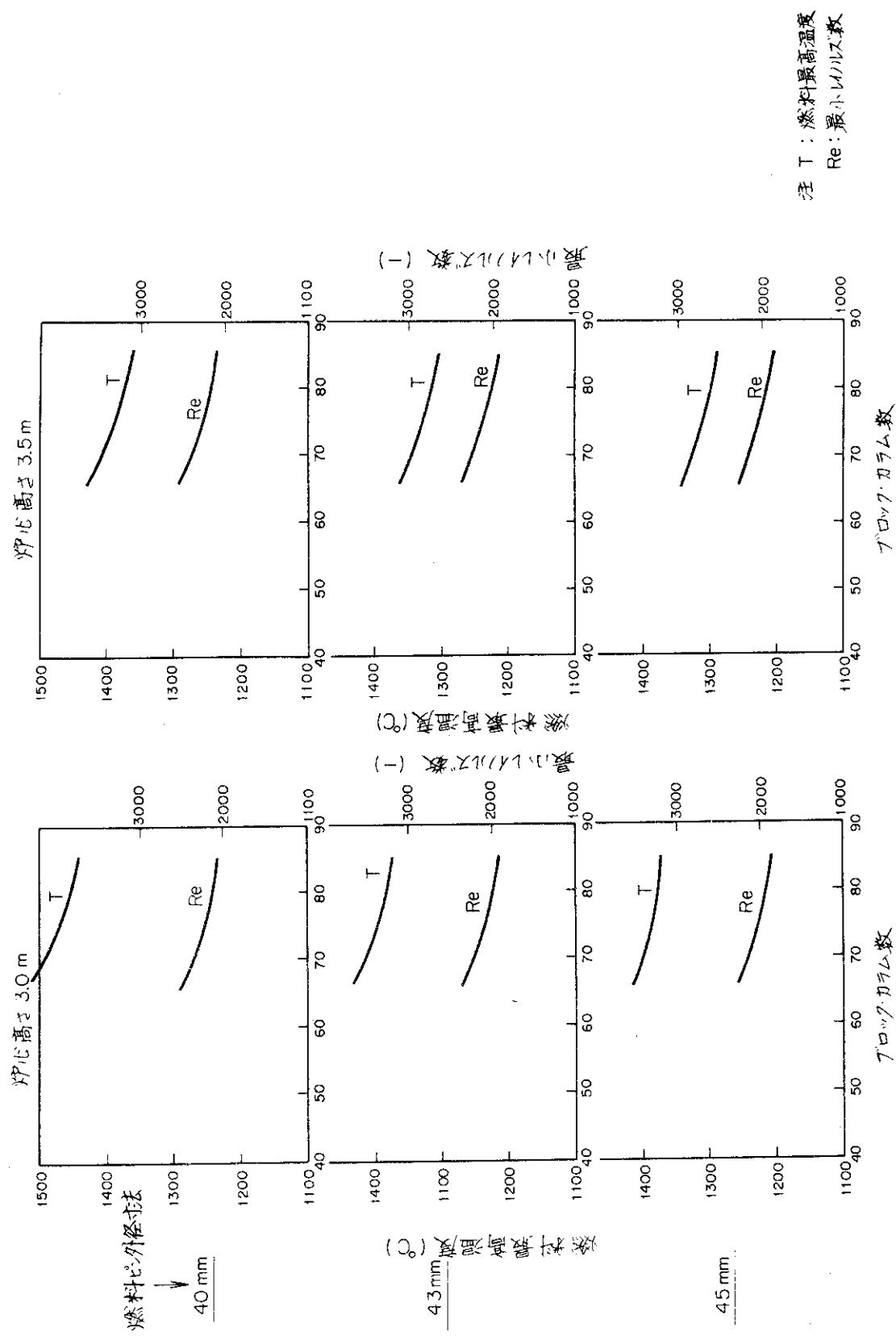


Fig. 14 多目的高温ガス実験炉・炉心燃料設計の展開図



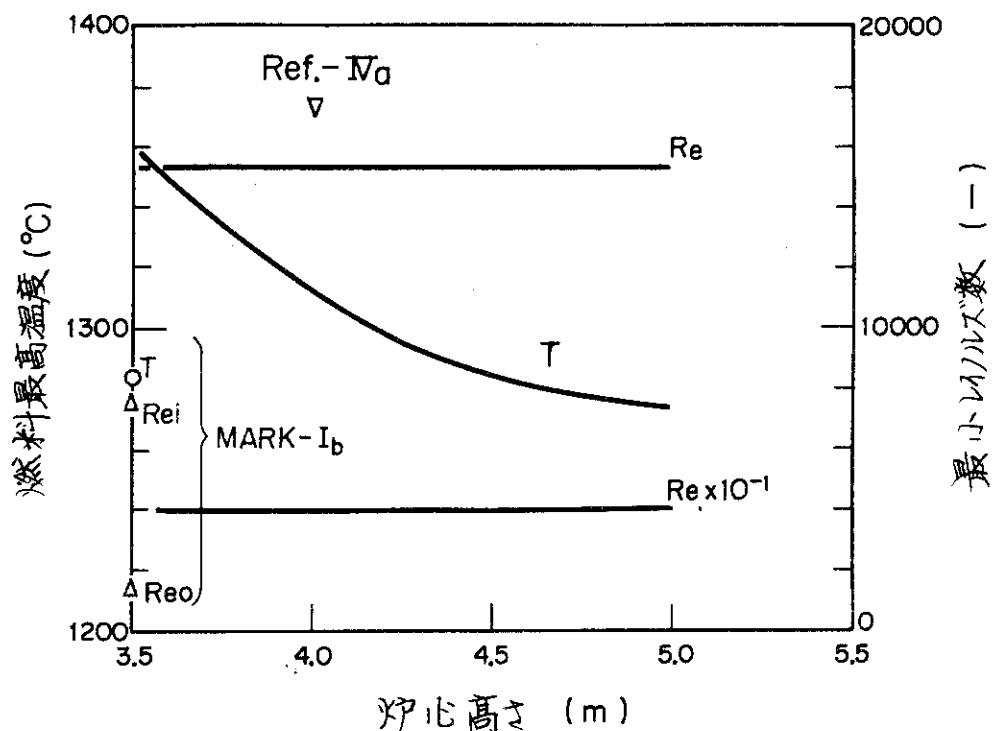


Fig. 16 Reference - IVa 燃料の最高温度および最小レイノルズ数

(注 T: 燃料最高温度  
Re: 最小レイノルズ数)

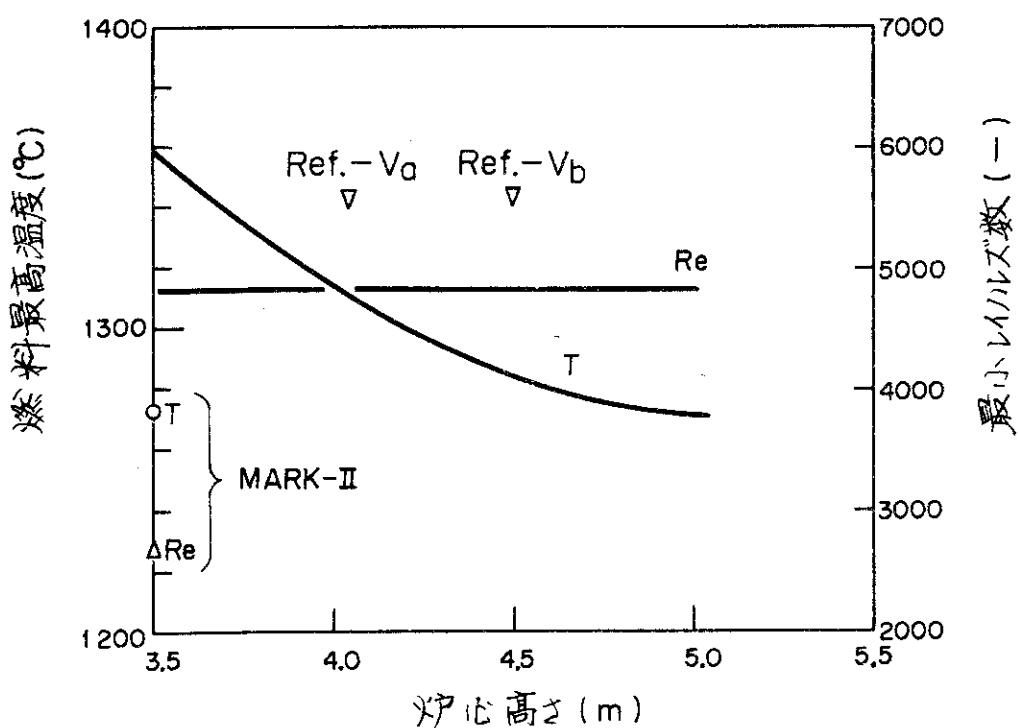


Fig. 17 Reference - V 燃料の最高温度および最小レイノルズ数

(注 T: 燃料最高温度  
Re: 最小レイノルズ数)

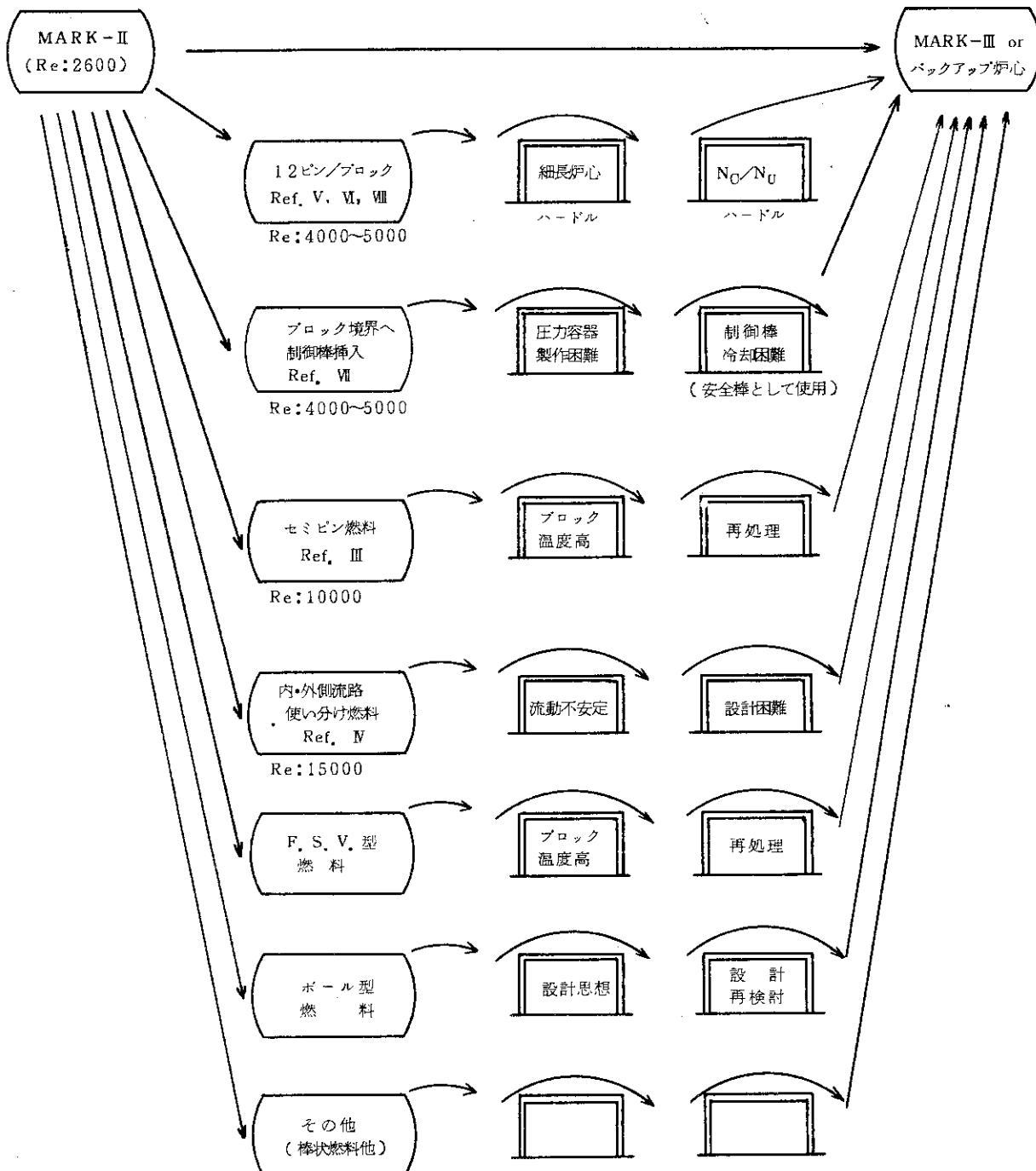


Fig. 18 MARK-II から MARK-III への道筋

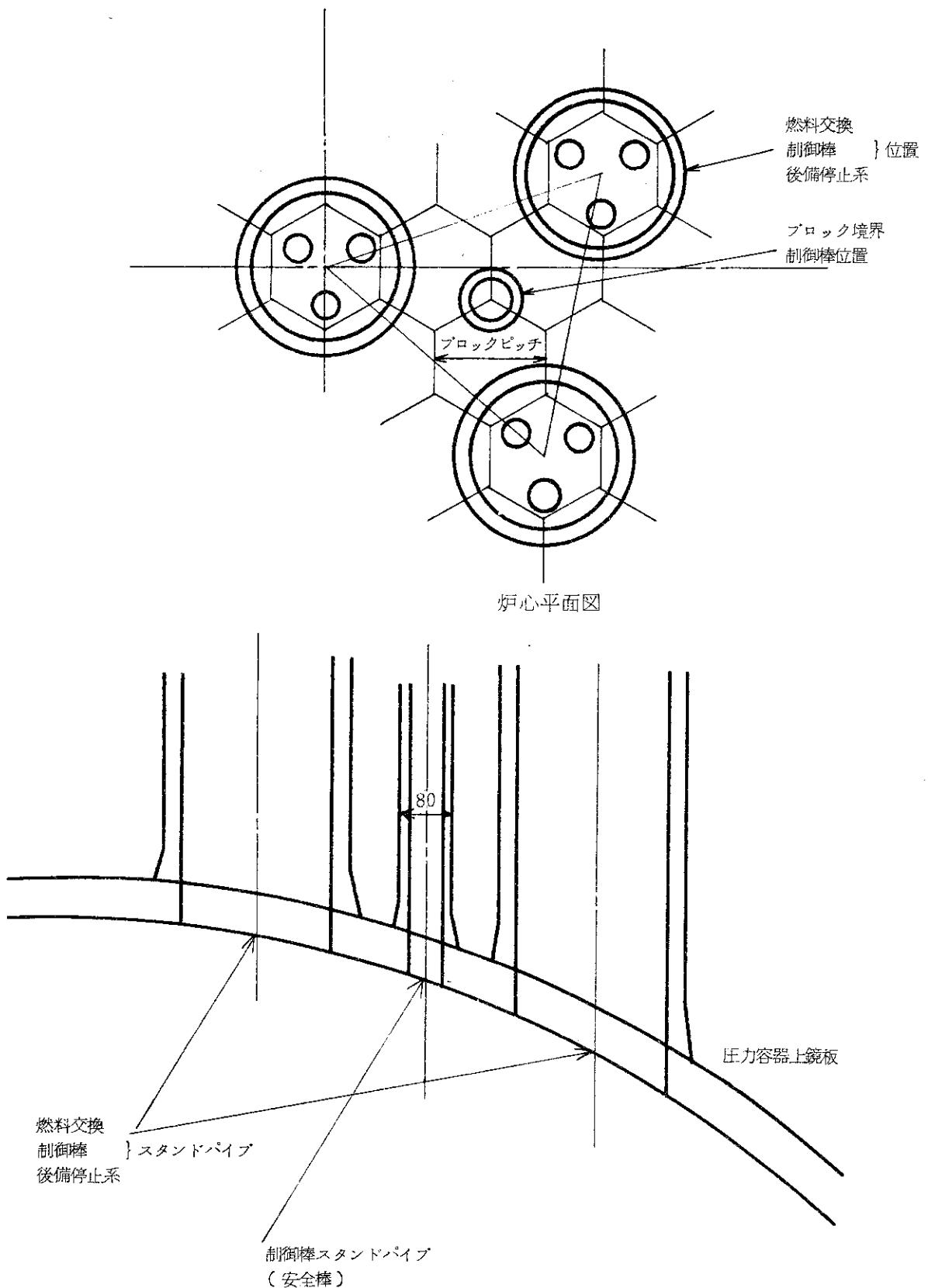


Fig. 19 Reference VII 炉心のスタンドパイプ位置

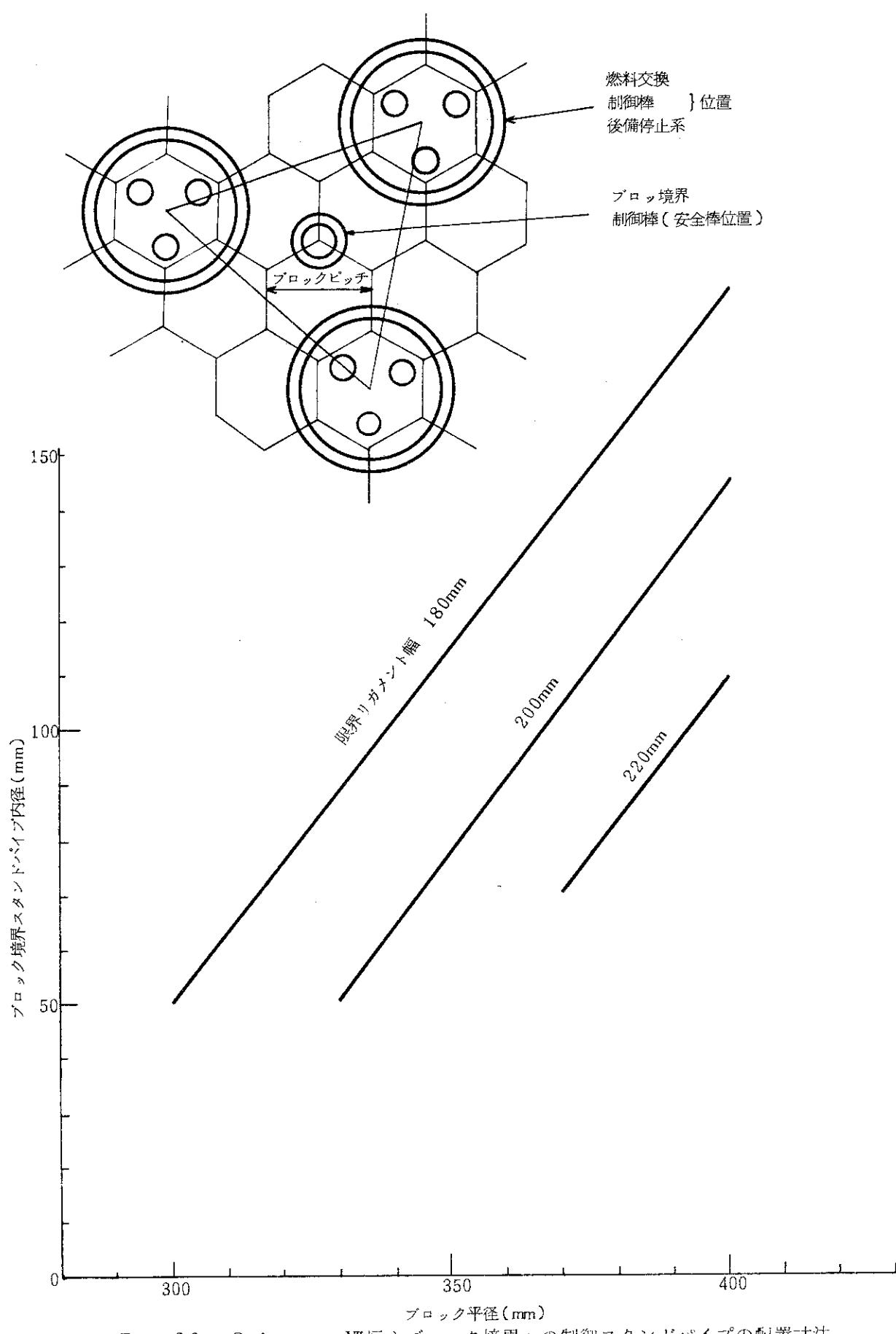


Fig. 20 Reference VII炉心ブロック境界への制御スタンドパイプの配置寸法