

JAERI-M

5633

高温ガス冷却実験炉炉心体系設計資料
(炉心体系・燃料設計)

1974年3月

幾島 毅

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、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

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.

高温ガス冷却実験炉・炉心体系設計資料

(炉心体系・燃料設計)の設計資料
(Core Design)

日本原子力研究所・動力炉開発管理室

幾 島 毅

(1974年2月9日受理)

多目的高温ガス冷却実験炉の予備設計が1971年に終了し、1973年から基本概念設計が開始された。これに従って炉心設計が見直されることになり、このための作業が1972年から開始された。この作業は燃料単位格子の核特性、熱、強度特性、実験炉の炉心体系の選定および実験炉炉心の特性解析を含むものである。

本報告はこの作業のうち、燃料単位格子の熱、強度特性、炉心体系および燃料設計に関するもので、内容はつぎのとおりである。

- (1) 燃料単位格子の熱、強度特性
- (2) 炉心体系計画
- (3) 実験炉炉心体系設計例
- (4) 実験炉燃料要素設計例

これらの資料はブロック状燃料要素から構成された高温ガス炉の炉心体系および燃料設計に有用なものとなる。

The Data for design of the experimental HTGR core
(Core system and Fuel element)

Takeshi IKUSHIMA

Office of Power Reactor Projects, Tokai, JAERI

(Received February 9, 1974)

Preliminary design of the experimental multi-purpose HTGR was completed in 1971, and its conceptual design was started in 1973. In this connection, the core design has been studied in detail from 1972. It includes nuclear, thermal and stress characteristics of the unit lattice, choosing the core system for experimental HTGR, and analysis of the core characteristics.

The following are described.

- (1) thermal and stress analysis of the unit fuel lattice,
- (2) design of the core system,
- (3) design examples of the experimental HTGR core,
- (4) design examples of the fuel element for experimental HTGR.

The data given should be useful in the design of core and fuel element of any HTGR consisting of the block-type fuel elements.

目 次

1. 緒 言	1
2. 燃料単位格子の熱・強度特性	1
2.1 燃料単位格子の熱・強度特性サーベイの目的	1
2.2 サーベイの方法と範囲	1
2.3 設計条件	3
2.4 結 果	3
2.5 ま と め	4
3. 炉心体系計画	16
3.1 炉心体系決定の要因	16
3.2 炉容器直径	16
3.3 燃料取扱い計画	16
3.4 燃料交換スタンド・パイプの配置	16
3.5 制御棒組数	18
3.6 燃料ピンの寸法と個数	18
3.7 実験炉の炉心体系	18
4. 炉心体系設計例	24
4.1 設定条件	24
4.2 実験炉炉心体系設計例	24
4.3 実験炉燃料要素設計例	24
4.4 炉心大きさの決定	24
4.5 ま と め	25
5. 結 言	35
6. 謝 辞	35
7. 参考文献	35

1. 緒 言

多目的高温ガス冷却実験炉の予備設計が^{(1),(2),(3)}1971年に終了し、1972年から、この炉の概念設計のための炉心サーベイが開始された。この作業は実験炉として最も適当な炉心を検討することであつた。そして、燃料単位格子の核特性および熱・強度特性の検討から始められ、さらに進んで、実験炉の炉心体系および燃料要素の選択が、ほとんど終了し、実験炉炉心の核特性および熱・強度特性の解析が進行中であり、これらの結果は1973年から開始された概念設計に有効に生かされようとしている。

これらの作業においてなされた種々の検討は、ブロック状燃料要素から構成される高温ガス炉の炉心設計に有用であろうと考えられるので、ここにまとめることにした。本報告は、これらの作業のうち熱および強度特性に関するもので、内容は、(1)燃料単位格子の熱および強度特性、(2)高温ガス実験炉の炉心体系計画、(3)高温ガス実験炉の炉心体系設計例および(4)高温ガス実験炉の燃料要素設計例である。

2. 燃料単位格子の熱・強度特性

2.1 燃料単位格子の熱・強度特性サーベイの目的

燃料単位格子の熱・強度特性のサーベイを行つて、実験炉の燃料として望ましい形状寸法を大枠を調べることであつた。調査対象の燃料形態は六角柱黒鉛ブロックの中に複数個の燃料ピンを配列した、いわゆるTNP G形燃料要素とし、燃料ピンは中空形または円環形とする。このサーベイによつて燃料設計の問題点の抽出をも目的とした。

2.2 サーベイの方法とその範囲

燃料単位格子の熱・強度特性のサーベイの方法は、炉心体系としては第2次予備設計炉心を参考にし、仮想的な単位格子について計算を行うことにした。よつて計算体系は以下のようにならざるを得ない。

- | | |
|-----------|---------------------------|
| (1) 炉心高さ | 250 cm |
| (2) 冷却材圧力 | 40 kg/cm ² |
| (3) 冷却材温度 | { 入口 400 °C
出口 1000 °C |
| (4) 出力密度 | |
| (5) 出力分布 | 軸方向一様 |

サーベイの範囲はコンパクトの厚さとして、6から12mm、燃料ピンの大きさは最大60mm、燃料ピンのピッチはリガメント基準（リガメントとは燃料ピンが挿入される燃料ブロックの冷却孔間の最も狭い寸法を意味する）で7から16mmとして燃料ピンの配列は三角配置とする。以上をまとめるとつぎのようにまとめることができる。

- (1) 燃料コンパクトの厚さ 6, 8, 10, 12 mm

1. 緒 言

多目的高温ガス冷却実験炉の予備設計が^{(1),(2),(3)}1971年に終了し、1972年から、この炉の概念設計のための炉心サーベイが開始された。この作業は実験炉として最も適当な炉心を検討することであつた。そして、燃料単位格子の核特性および熱・強度特性の検討から始められ、さらに進んで、実験炉の炉心体系および燃料要素の選択が、ほとんど終了し、実験炉炉心の核特性および熱・強度特性の解析が進行中であり、これらの結果は1973年から開始された概念設計に有効に生かされようとしている。

これらの作業においてなされた種々の検討は、ブロック状燃料要素から構成される高温ガス炉の炉心設計に有用であろうと考えられるので、ここにまとめることにした。本報告は、これらの作業のうち熱および強度特性に関するもので、内容は、(1)燃料単位格子の熱および強度特性、(2)高温ガス実験炉の炉心体系計画、(3)高温ガス実験炉の炉心体系設計例および(4)高温ガス実験炉の燃料要素設計例である。

2. 燃料単位格子の熱・強度特性

2.1 燃料単位格子の熱・強度特性サーベイの目的

燃料単位格子の熱・強度特性のサーベイを行つて、実験炉の燃料として望ましい形状寸法を大枠を調べることであつた。調査対象の燃料形態は六角柱黒鉛ブロックの中に複数個の燃料ピンを配列した、いわゆるTNP G形燃料要素とし、燃料ピンは中空形または円環形とする。このサーベイによつて燃料設計の問題点の抽出をも目的とした。

2.2 サーベイの方法とその範囲

燃料単位格子の熱・強度特性のサーベイの方法は、炉心体系としては第2次予備設計炉心を参考にし、仮想的な単位格子について計算を行うことにした。よつて計算体系は以下のようによつてまとめることができる。

- | | |
|-----------|---------------------------|
| (1) 炉心高さ | 250 cm |
| (2) 冷却材圧力 | 40 kg/cm ² |
| (3) 冷却材温度 | { 入 口 400 C
出 口 1000 C |
| (4) 出力密度 | |
| (5) 出力分布 | 軸方向一様 |

サーベイの範囲はコンパクトの厚さとして、6から12mm、燃料ピンの大きさは最大60mm、燃料ピンのピッチはリガメント基準（リガメントとは燃料ピンが挿入される燃料ブロックの冷却孔間の最も狭い寸法を意味する）で7から16mmとして燃料ピンの配列は三角配置とする。以上をまとめるとつぎのようにまとめることができる。

- (1) 燃料コンパクトの厚さ 6, 8, 10, 12 mm

- (2) 燃料スリーブの厚さ 5 mm
- (3) 燃料ピンの配列 三角配置
- (4) 燃料ピンのピッチ (リガメント基準) 7, 10, 13, 16 mm
- (5) 燃料ピンの寸法による種類
- | | |
|-----|------|
| 中空形 | 20種類 |
| 円環形 | 13種類 |

この計算に使用した燃料単位格子の諸元は、中空形燃料ピンでは Table 2.1 に、円環形では Table 2.2 にそれぞれ示している。Table 2.1 の中でコンパクトの内径が零のものは表の備考欄に solid rod と書いてあるように中空形の燃料ピンである。サーベイの対象になつた単位格子は中空形では 80 個、円環形では 52 個である。

燃料コンパクトとスリーブとのギャップは、つぎの計算式によることにした。

コンパクトと内側スリーブ間ギャップ： δ_i

$$\delta_i = \frac{d_{oi}}{2} \times 0.015 \quad (\text{mm}) \quad (2.1)$$

コンパクトと外側スリーブ間ギャップ： δ_o

$$\delta_o = \frac{d_{oo}}{2} \times 0.001 + 0.1 \quad (\text{mm}) \quad (2.2)$$

ここで、 d_{oi} : コンパクト内径 (mm)

d_{oo} : コンパクト外径 (mm)

である。これらの値はつぎの理由によつて決めた。コンパクトと内側スリーブ間のギャップについては、円環形燃料ピンについてだけ適応されるものである。円環形燃料ピンでは、燃料の寿命中に、コンパクトと内側スリーブが接触することがあり、interacting type と接触しない non-interacting type がある。熱特性は interacting type のものが優れているが、強度特性は non-interacting type のものがよい。このサーベイでは、熱的に余裕のあるサーベイをするために non-interacting type を採用した。そのため、コンパクトと内側スリーブ間のギャップは、初期には大きく、燃料の寿命中（ここでは最大高速中性子照射量を $3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ とした）にコンパクトと内側スリーブが接触しない寸法を選ぶ必要があり、このギャップは (2.1) 式のように決められた。

コンパクトと外側スリーブ間のギャップは燃料の寿命中に増加する傾向があるから、初期においてわずかにすきまがあるだけでよいから (2.2) 式のように決めた。冷却材流路断面積については、中空形では最小の流路幅を 1.5 mm に、円環形では内側と外側の流路の寸法の最適化を行つて決めた。すなわち、内側および外側冷却材流路の炉心出口側の冷却材温度が等しくなるように、二つの流路の寸法を決める。この二つの流路出口の冷却材温度は中性子照射によるコンパクトとスリーブの収縮によつて変化するので、出口温度を等しくする照射量を決めなければならなかつた。ここでは、この量が $1.5 \sim 2.0 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ とした。

これらの燃料単位格子について、照射量 $3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ にわたつて、燃料ピンの最高温度と最大応力、冷却材の最大流速、最小レイノルズ数および圧力損失を計算した。

いものが燃料の温度および応力を低くするので望ましいことが明らかになった。

(2) 円環形燃料ピンの熱・強度特性

燃料コンパクトの最高温度および最大応力、スリーブの最大応力は、初期燃料におけるものは Fig. 2.5 に、照射量が $3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ までの間の最大値は Fig. 2.6 に示している。燃料最高温度と燃料ピンの大きさとの関係は Fig. 2.7 に示している。流動特性に関するデータ、最大冷却材速度、最小レイノルズ数および圧力損失は Fig. 2.8 に示している。これから、中空形燃料ピンと同じ傾向が明らかである。さらに、円環形燃料ピンでは内側のスリーブの応力値が高いこと、外側冷却流路の流速およびレイノルズ数が低いことが特徴的である。

2.5 ま と め

(1) 中空形と円環形燃料ピンの比較

中空形および円環形燃料ピンの熱特性を比較するため Fig. 2.3 と 2.7 から、リガメント 13 mm のものについてまとめて Fig. 2.9 を図示した。これから、円環形燃料ピンでは、中空形に比較して、ある設定温度に対して大きな寸法の燃料ピンを使用できる。しかしながら、円環形燃料ピンでしかも non-interacting type のものは照射にともなうコンパクトとスリーブ間のギャップ幅の変化が燃料温度および、内側および外側冷却材流路出口温度に対して影響を与えることが中空形よりも大きい。

Fig. 2.10 は円環燃料ピンの照射量による内側および外側冷却材流路出口温度を示したものである。この燃料ピンは Table 2.2 に示している外径 46 mm のものであり、このピンの外径をわずかに 1.1% 大きくまたは小さくしただけで、冷却材の出口温度が大きく変化することが明らかである。これを燃料コンパクトの最高温度について、中空形と円環形燃料ピンについて比較したのを Fig. 2.11 に示す。これから、円環形は中空形に比較して、燃料ピンの形状変化に対して敏感であると言える。これらのことから、円環形燃料ピンを使用する場合は、中空形に比べて、さらに十分な実験の裏付けが必要であろう。

(2) 燃料ピン設計

以上の結果から燃料ピンの設計に当つて、つぎのことが言えよう。

- (i) 円環形燃料ピンは中空形よりも燃料温度および応力を低下させることができる。
- (ii) コンパクトおよびスリーブとも構造的に許される限度に小さくすることが、燃料温度および応力を低下させるために有効である。
- (iii) (ii)と同じことが、燃料ピンピッチに対しても言える。
- (iv) 実験炉用の燃料ピンの外径寸法は中空形では 42 mm 以下、円環形では 50 mm 以下とすべきである。

なお、円環形燃料ピンの寸法最適化について、外側冷却材流路直径、燃料ピン外径および内側冷却材流路直径の関係を Fig. 2.12 に示し、参考に供する。

Table 2.1 Dimension of hollow and solid fuel rod

Compact thickness (mm)	Dimension (mm)					Notes
	Compact		Sleeve		Cooling channel diameter	
	Inner diameter	Outer diameter	Inner diameter	Outer diameter		
6	0	12	12.22	22	25	solid rod
	6	18	18.24	28	31	
	10	22	22.24	32	35	
	16	28	28.26	38	41	
	20	32	32.27	42	45	
	25	37	37.27	47	51	
8	0	16	16.23	26	29	solid rod
	6	22	22.24	32	35	
	10	26	26.25	36	39	
	16	32	32.26	42	46	
	20	36	36.27	46	49	
	25	41	41.28	51	55	
10	0	20	20.24	30	33	solid rod
	10	30	30.26	40	43	
	16	36	36.27	46	49	
	20	40	40.28	50	54	
12	0	24	24.25	34	37	solid rod
	10	34	34.27	44	47	
	16	40	40.28	50	53	
	20	44	44.29	54	58	

Table 2.2 Dimension of annular fuel rod

Compact thickness (mm)	Dimension (mm)						Cooling channel diameter
	Inner Sleeve		Compact		Outer sleeve		
	Inner diameter	Outer diameter	Inner diameter	Outer diameter	Inner diameter	Outer diameter	
6	8	15.76	16	28	28.26	38	40.8
	10	19.70	20	32	32.26	42	45.7
	15	24.62	25	37	37.27	47	53.0
	22	31.52	32	44	44.29	54	63.2
8	8	15.76	16	32	32.26	42	44.8
	10	19.70	20	36	36.27	46	49.6
	15	24.62	25	41	41.28	51	56.9
	22	31.52	32	48	48.30	58	67.1
10	10	19.7	20	40	40.28	50	53.6
	15	24.62	25	45	45.29	55	60.8
	22	31.52	32	52	52.30	62	71.2
12	15	24.62	25	49	49.30	59	64.8
	22	31.52	32	56	56.31	66	75.0

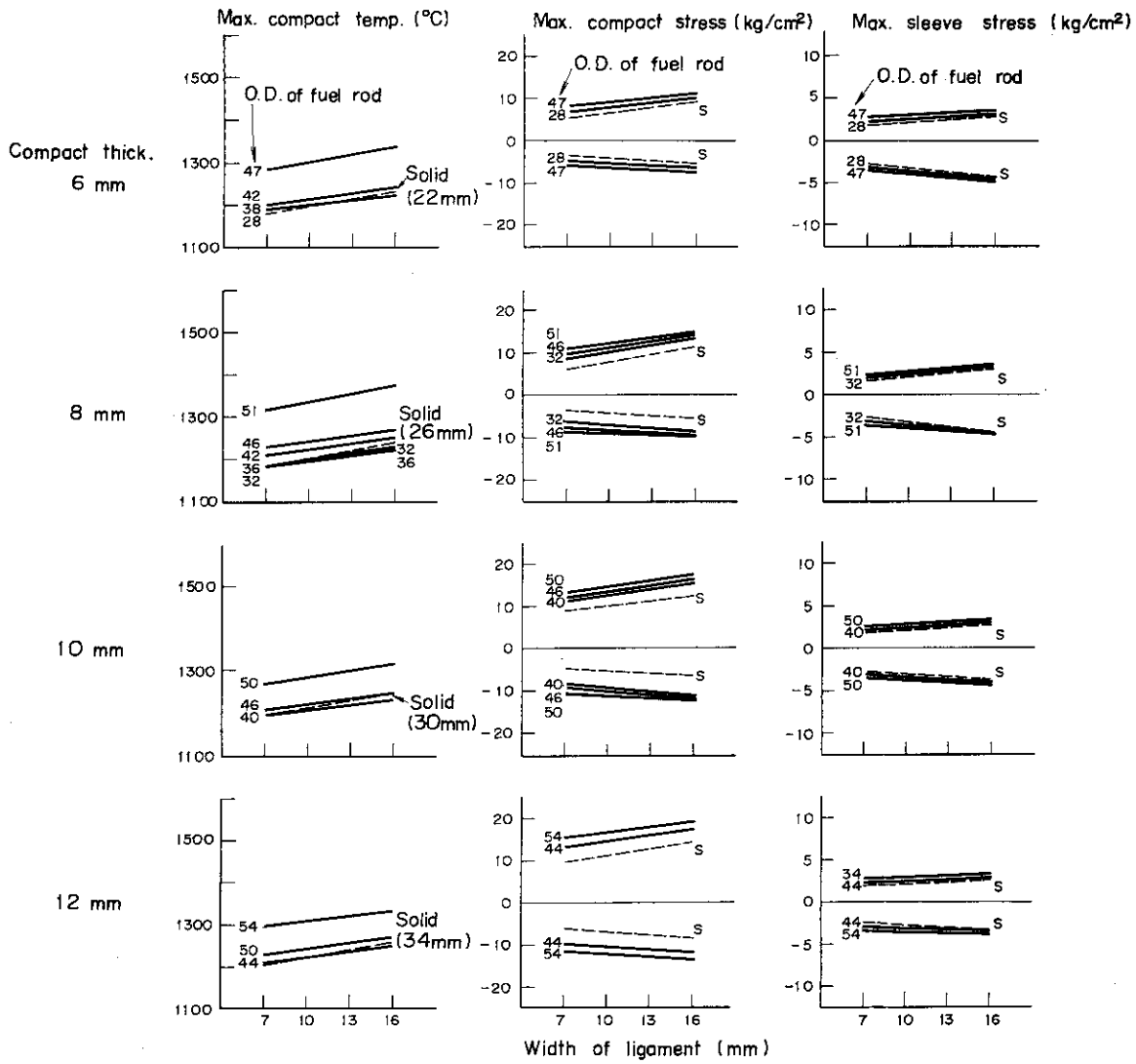


Fig.2.1 Fuel max. temperature and stress as function of fuel size and pitch at initial condition (hollow and solid rod)

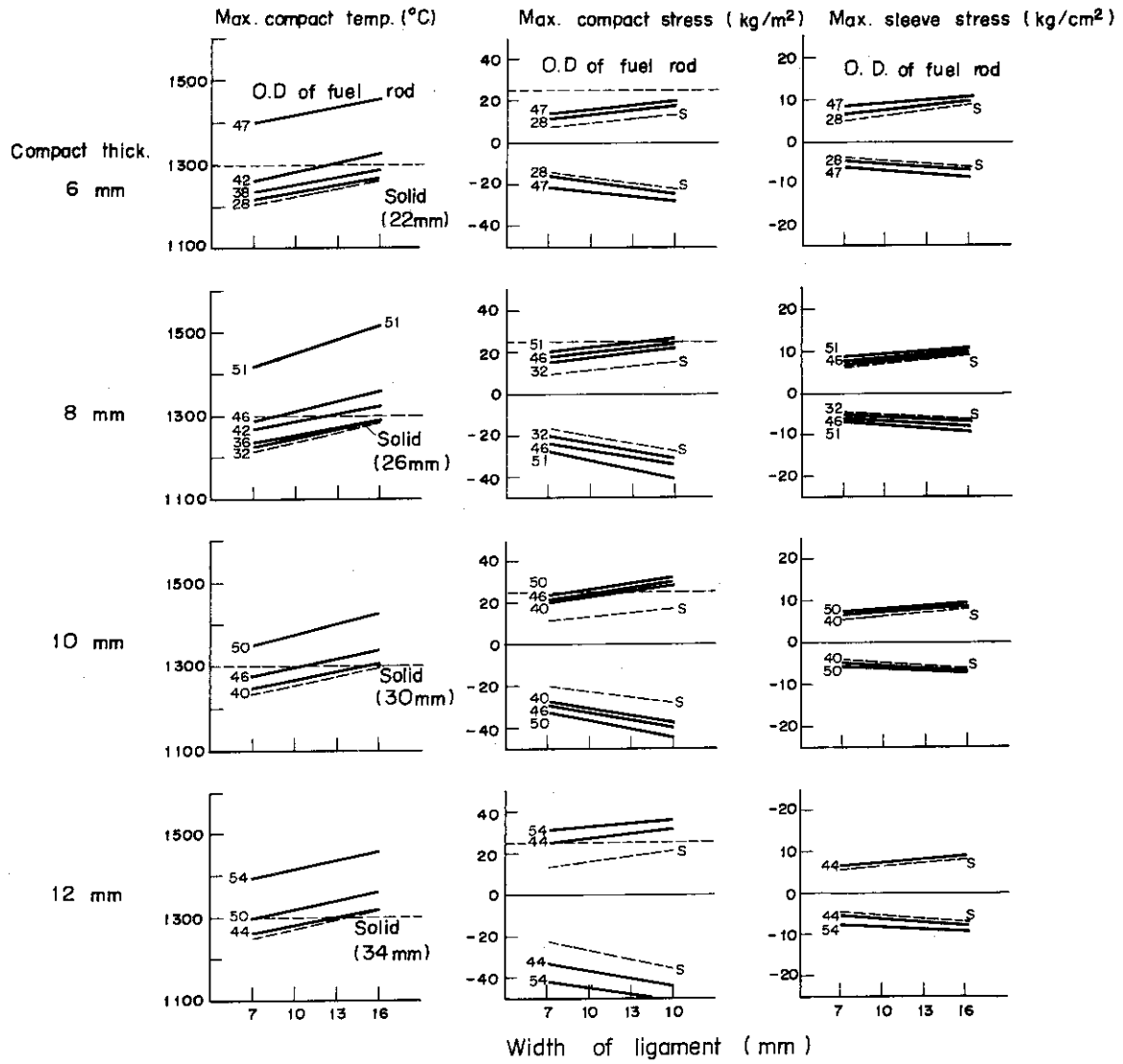


Fig.2.2 Fuel max. temperature and stress as function of fuel size and pitch over irradiation dose 3×10^{21} (n/cm^2) (hollow and solid rod)

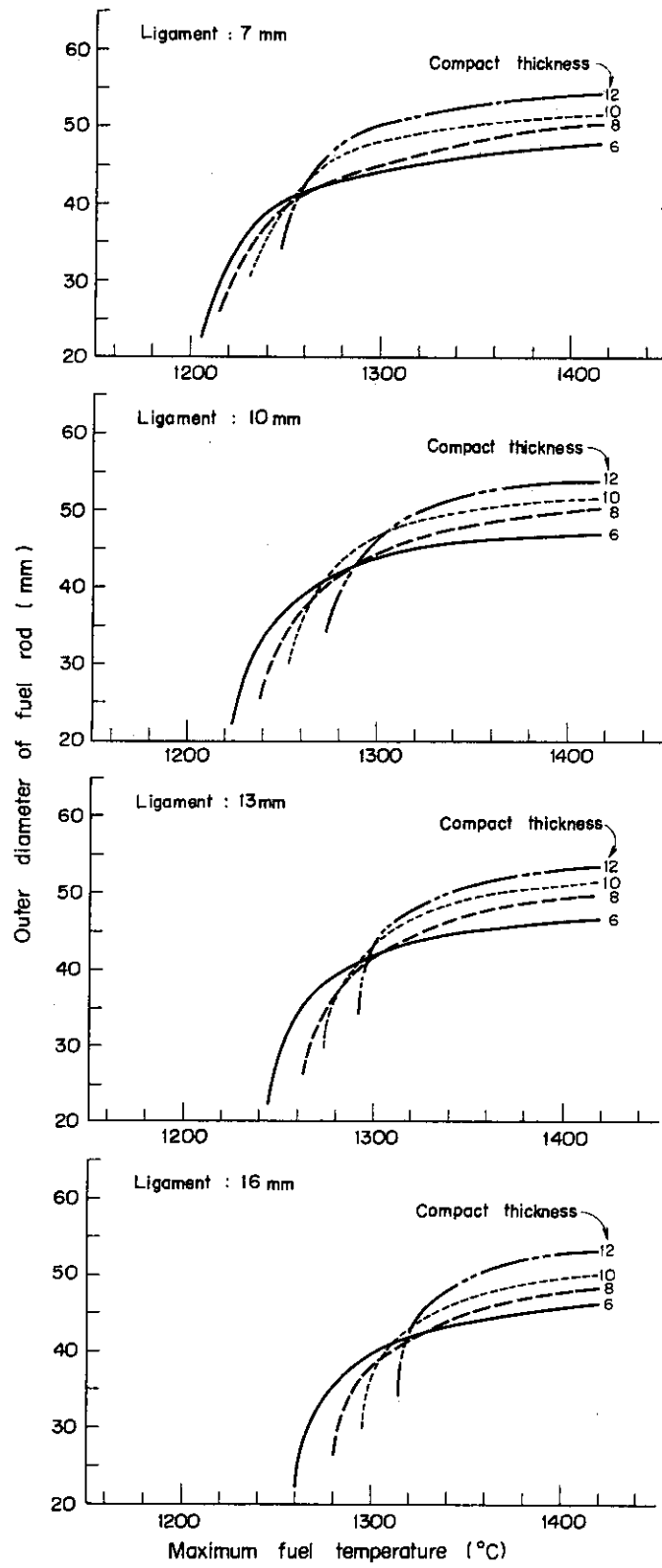


Fig.2.3 Maximum fuel temperature vs. fuel size
(hollow rod, 3×10^{21} n/cm²)

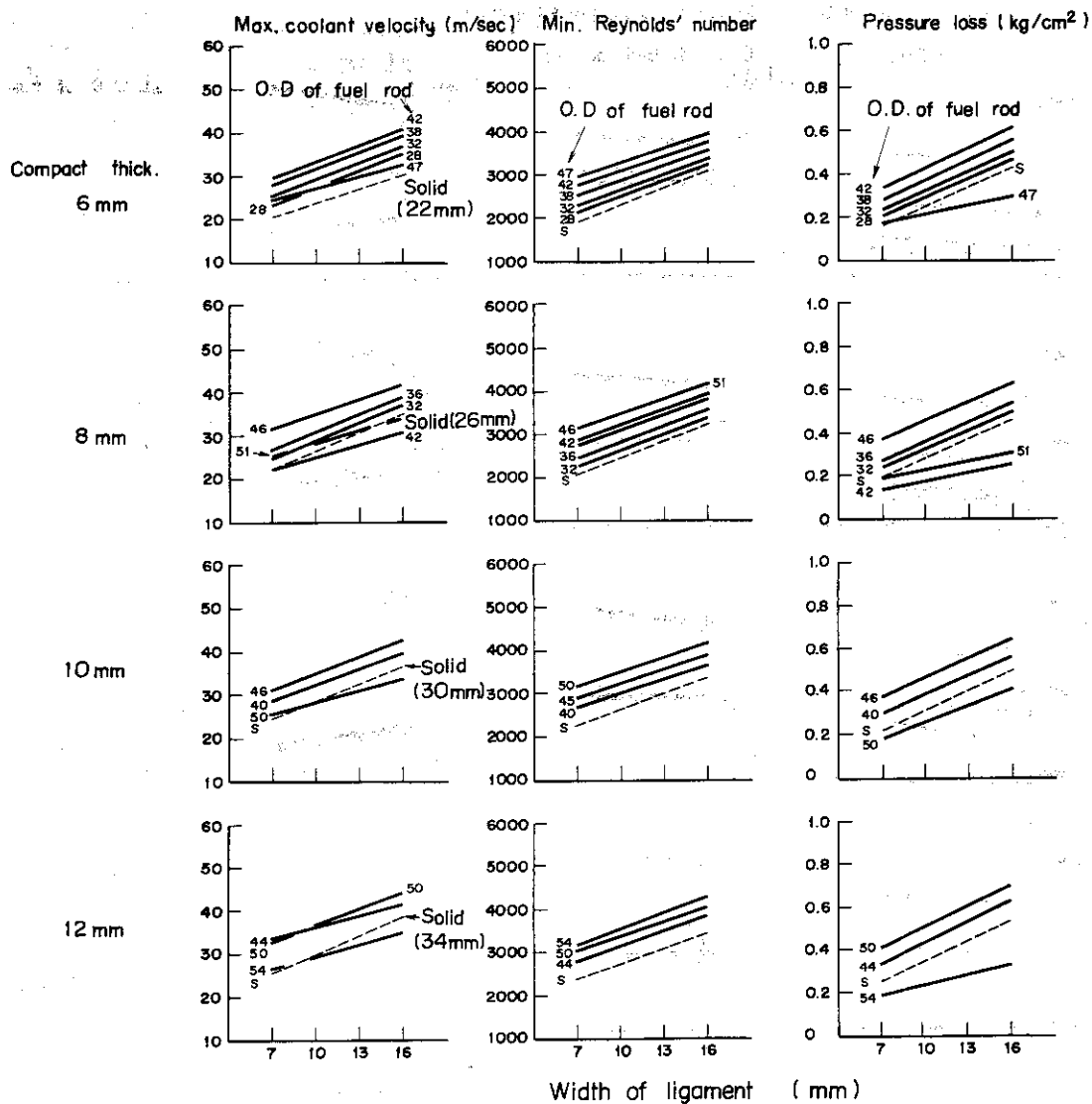


Fig.2.4 Coolant velocity, Reynolds' number and pressure loss as function of fuel size and pitch at initial condition (hollow and solid rod)

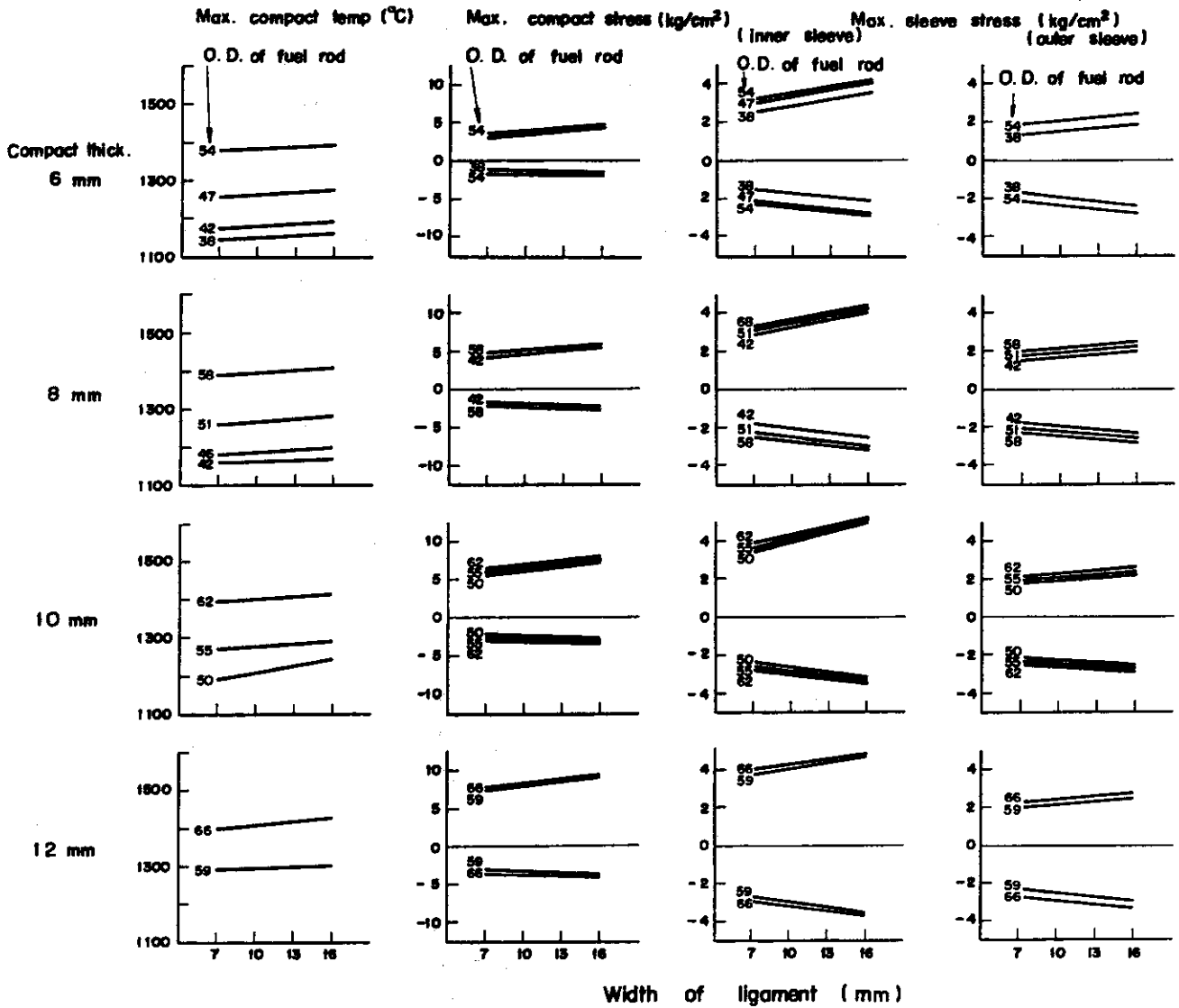


Fig.2.5 Fuel max. temperature and stress as function of fuel size and pitch at initial condition (annular rod, optimized)

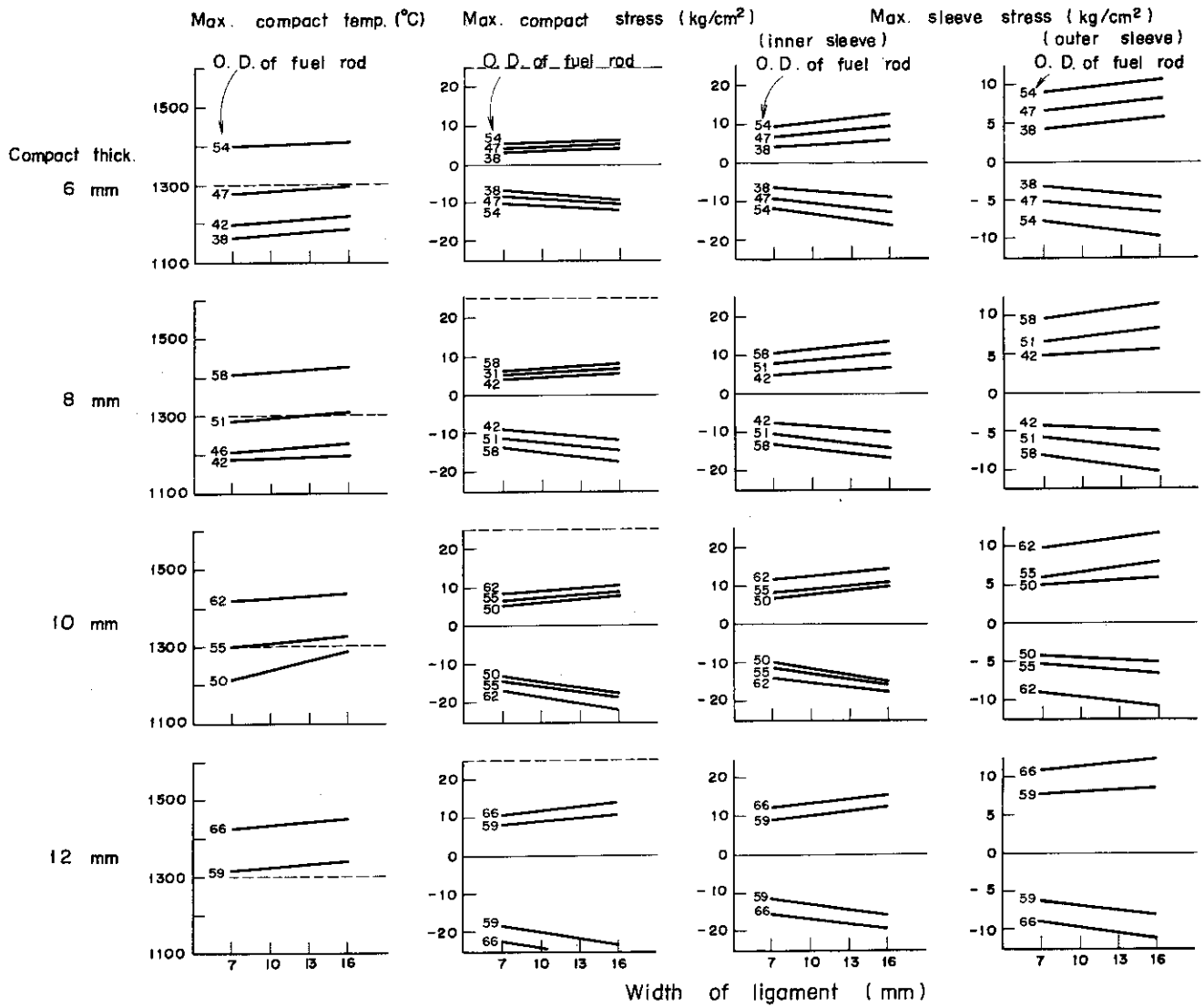


Fig.2.6 Fuel max. temperature and stress as function of fuel size and pitch over irradiation dose 3×10^{21} (n/cm²) (annular rod, optimized)

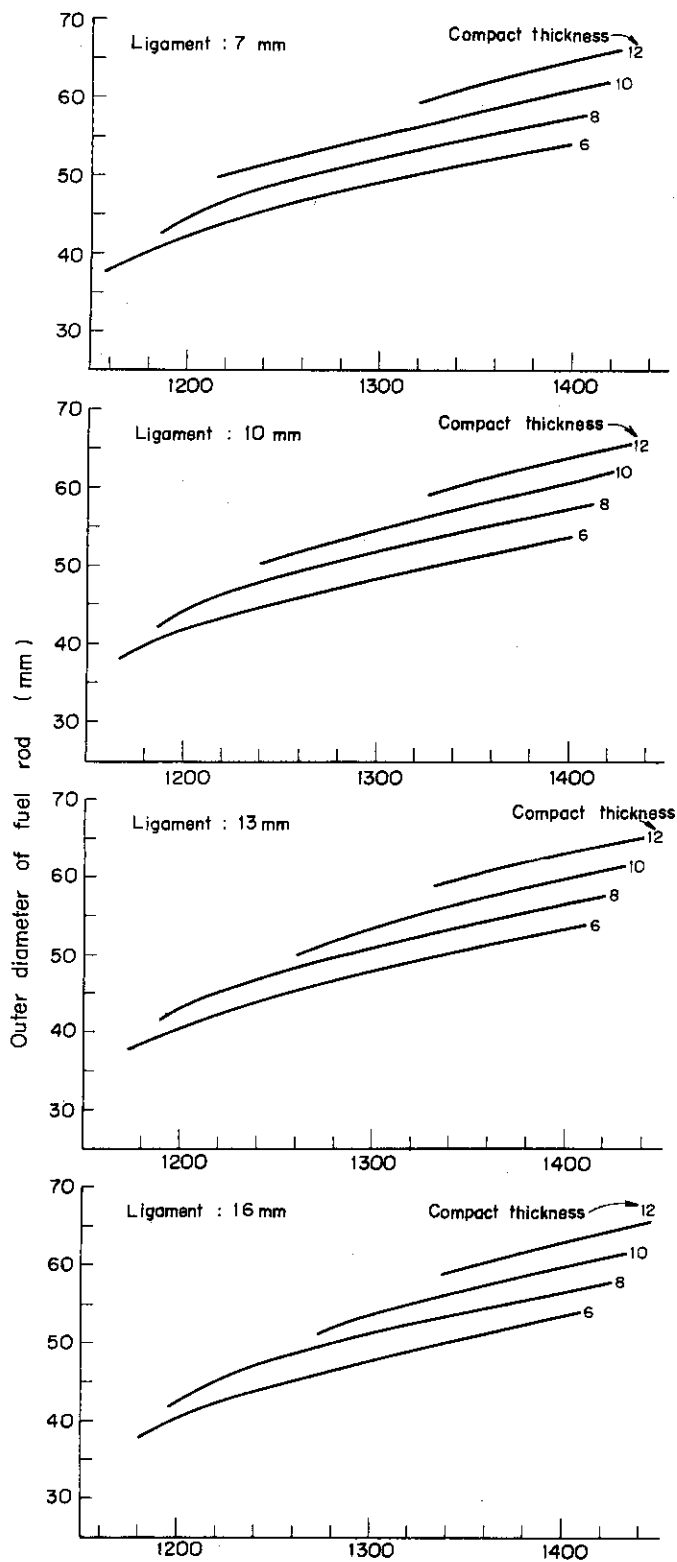


Fig.2.7 Maximum fuel temperature vs. fuel rod size (annular rod, optimized 3×10^{21} n/cm²)

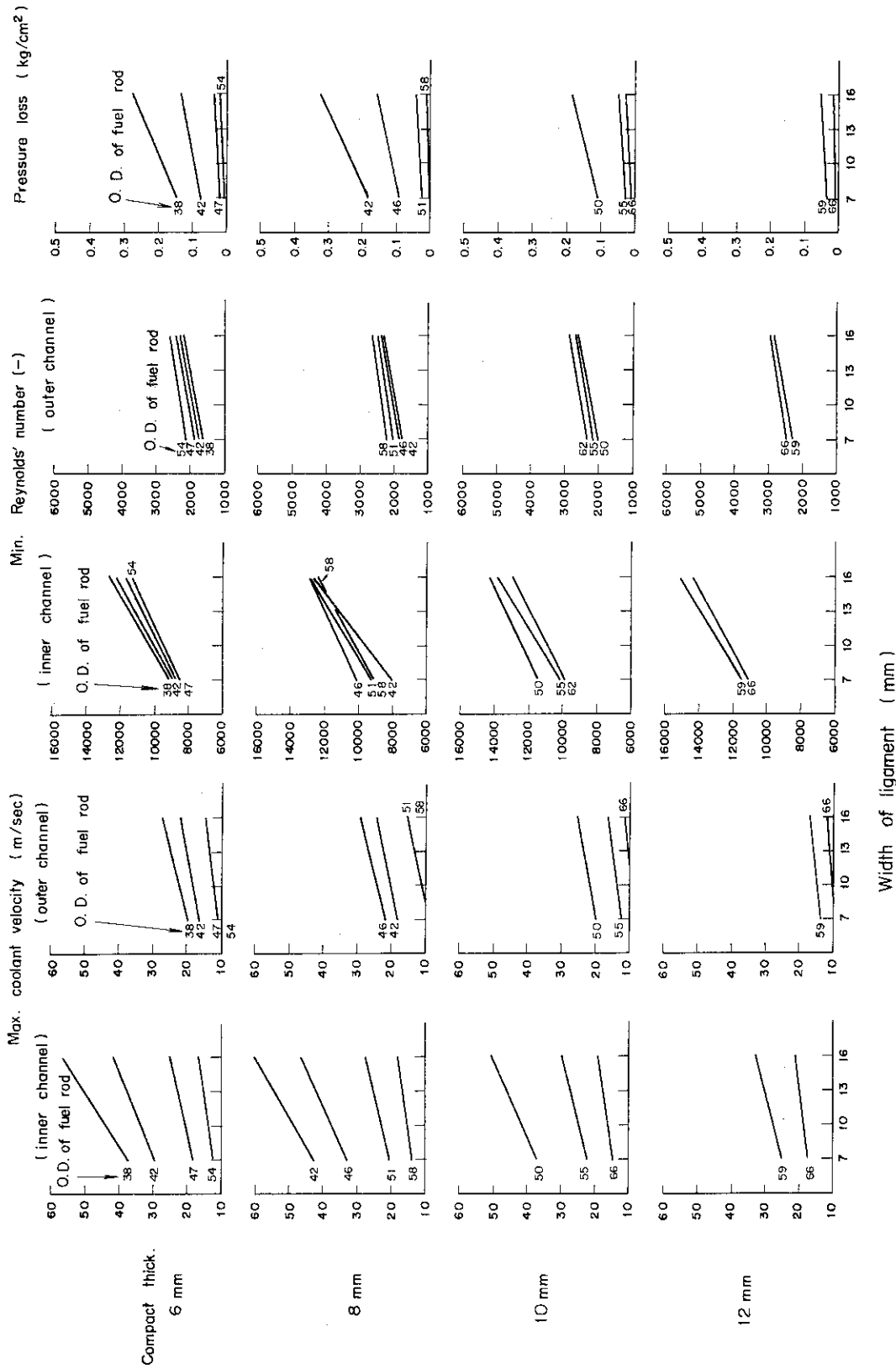


Fig.2.8 Coolant velocity, Reynolds' number and pressure loss as function of fuel size and pitch of initial condition (annular rod, optimized)

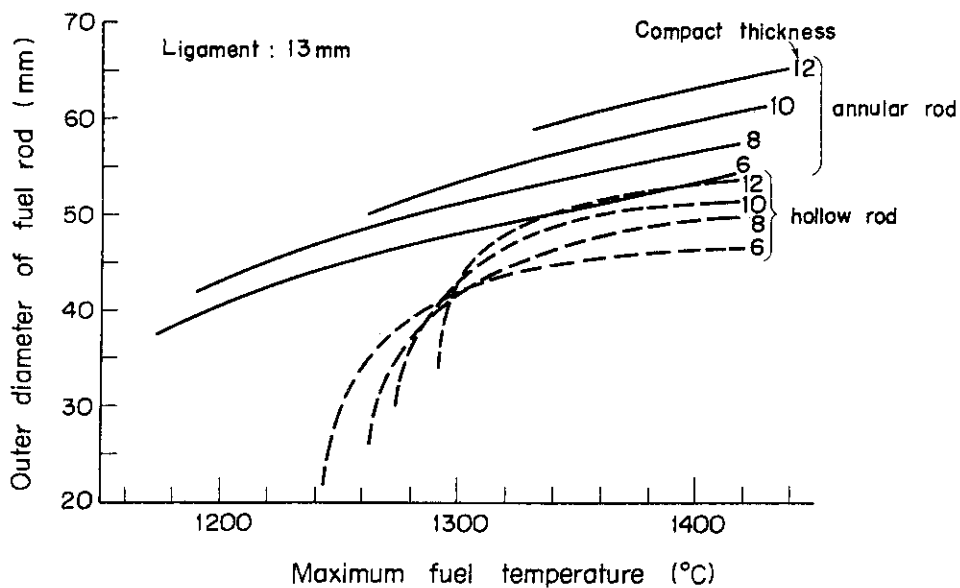


Fig.2.9 Comparison of hollow rod and annular rod on fuel maximum temperature (3×10^{21} n/cm²)

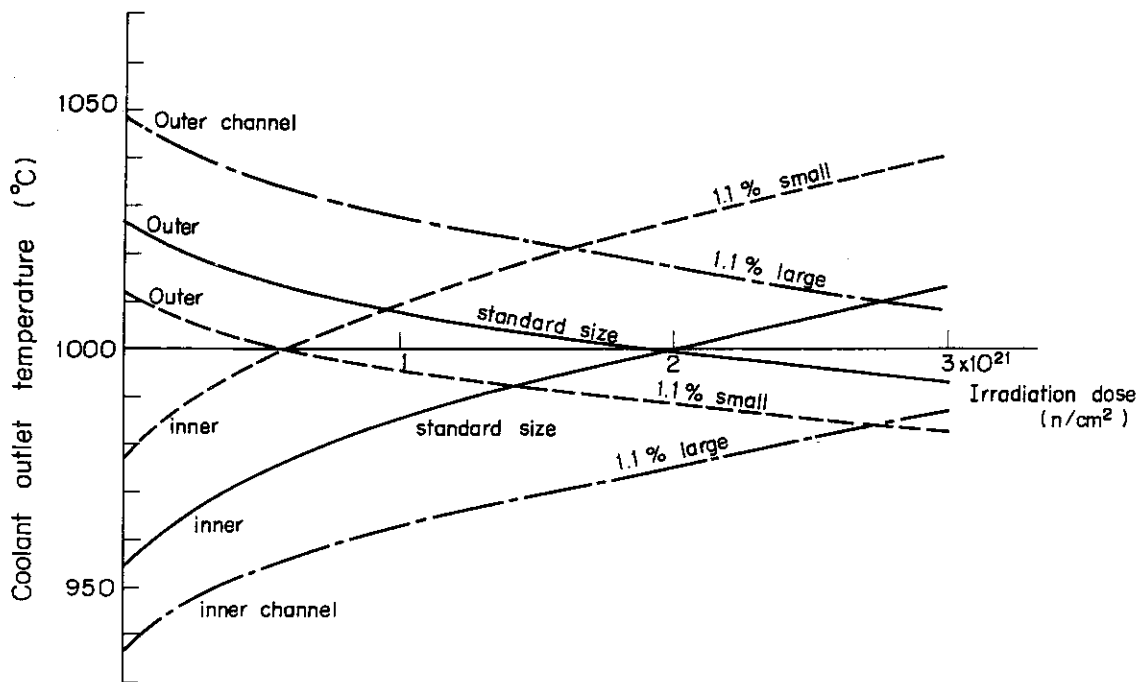


Fig.2.10 Effect of fuel outer diameter difference of annular fuel rod on coolant outlet temperature (fuel rod diameter 46mm)

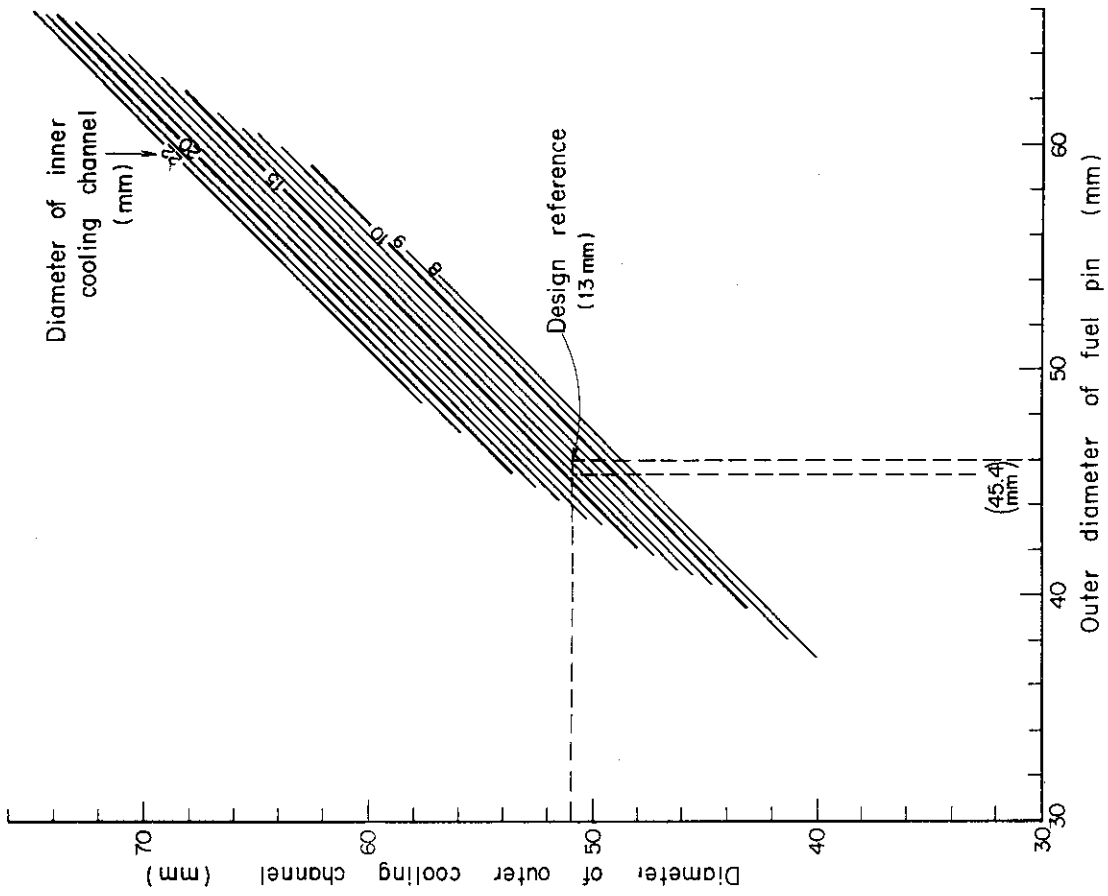


Fig. 2.12 Relation of optimum dimension of fuel pin for annular non-interacting fuel

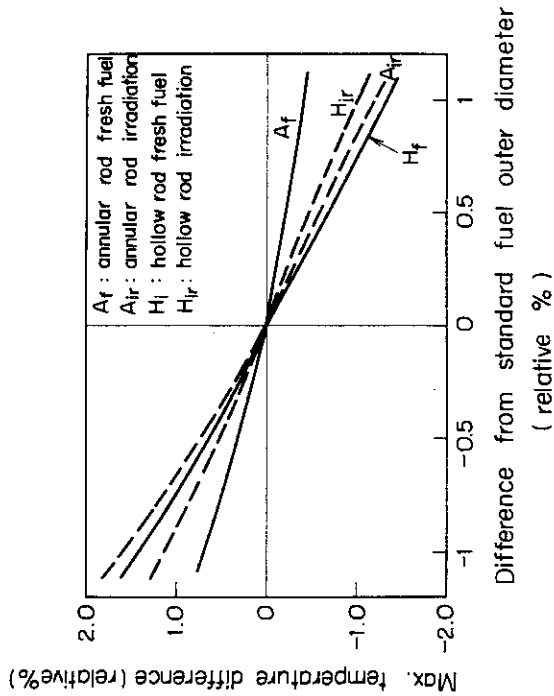


Fig. 2.11 Effect of fuel outer diameter difference on fuel maximum temperature (fuel rod diameter 4.6 mm)

3. 炉心体系計画

3.1 炉心体系決定の要因

炉心体系計画において、考慮しなければならない項目を一覧して示せば Fig. 3.1 になる。これらの項目を決めれば炉心体系の大枠が決定できる。以下、これらの項目について検討する。

3.2 炉容器直径

最大炉容器直径を設定するには、鋼製炉容器の製作可能限界から決定される。このためには、製作実績および製作に必要な設備が完備されていることを調査すればよいであろう。Fig. 3.2 はすでに製作されたものおよび製作が予定されている、高温ガス炉および軽水炉の炉容器内径を図示した。さらに、参考のためこれらの容器の肉厚を合せて図示した。これから明らかなように、鋼製炉容器の直径は最大のもので約 6.3 m まで製作可能である。

しかしながら、高温ガス炉の炉容器は使用温度が軽水炉に比較して高いことおよび事故時には、さらに炉容器温度が上昇するため炉容器の使用条件が厳しいものとなる。さらに、比較的大口徑の冷却材出入口ノズルおよび、多数大口徑の燃料交換のためのスタンドが設けられている。そしてこの部分には大きな応力が発生することが予想される。よって、これらを考慮して、製作可能な炉容器直径を決めるべきであろう。現地点で、おおよその検討を与えるならば、炉容器直径は最大 6 m まで製作可能といえるであろう。

3.3 燃料取扱い計画

炉心体系を計画するに当って、燃料取扱い計画を決定せねばならない。すなわち、一つの燃料交換孔によって幾つの燃料ブロック・カラムを取扱いようにするか、および制御棒・後備停止系の配置と燃料交換孔とを共用させるかどうかなどである。炉容器の制御棒貫通孔と燃料交換用貫通孔は、配置空間を考慮して共用することを考えた。

一つの燃料交換孔によつて取扱いブロック・カラム数として Fig. 3.3 のように、1, 3, 4, 7 個がそれぞれ考えられる。このうち、どれが採用できるかは、燃料交換用スタンド・パイプの配置空間から決定しなければならない。

3.4 燃料交換用スタンド・パイプの配置

燃料交換用スタンド・パイプの配置空間は、このパイプが一つの燃料交換ブロック・カラムから決まるスタンド・パイプ配置ピッチとパイプの大きさから決められる。パイプの大きさは、この中を燃料交換時に燃料が通過することができ、しかも炉容器内圧力に耐えることができなければならない。この要求を満足させて、このスタンド・パイプを配置した場合、スタンド・パイプのリガメント幅からスタンド・パイプの配置を考えてみる。

スタンド・パイプのピッチは一つの燃料交換のブロック組数に対して Table 3.1 のようになる。つぎに、スタンド・パイプ間のリガメント幅は、上に述べたことから、つぎの式によつて求めることができる。

Table 3.1 ブロック組数とスタンド・パイプ・ピッチ

ブロック組数	スタンド・パイプ・ピッチ
1 ブロック組	1 D_B
3 ブロック組	1.5277 D_B
4 ブロック組	2 D_B
7 ブロック組	3 D_B

注 D_B : 六角ブロックの平径寸法

$$\ell = P_s - \left(\alpha D_B + \frac{\alpha D_B p_D}{\sigma_t} + \beta + \gamma \right) \quad (3.1)$$

ここで、 ℓ : スタンド・パイプ間の最大リガメント幅

P_s : スタンド・パイプ・ピッチ

α : ブロック最大径とブロック平径の比

$$\alpha = 1.155$$

D_B : ブロック平径寸法

p_D : 炉容器内圧力 = 45 kg/cm²

σ_t : 許容応力 = 863 kg/cm²

β : ブロック交換のためのすきま

γ : スタンド・パイプ製作のためのすきま

である。いま、 β と γ を零とすれば、最大リガメント幅 ℓ_m はつぎのようになる。

$$\ell_m = P_s - 1.2152 D_B \quad (3.2)$$

この関係を図示すれば Fig. 3.4 のように示すことができる。実際のスタンド・パイプでは、 β と γ とにある寸法が要求される。第2次予備設計では、 β と γ の和が0.7167 D_B となつている。いま、ブロックの大きさに関係なく、この値をとれば、スタンド・パイプのリガメント幅はつぎのようになる。

$$\ell = P_s - 1.9319 D_B \quad (3.3)$$

この関係を前の図上に示してみた。これから明らかなように、一燃料交換のブロック組数として、4ブロック組または7ブロック組のいずれかだけが採用されうるものとなる。さらに、この図から明らかなように、4ブロック組では、隣り合うスタンド・パイプがほとんど接するようになり、このため、製作不可能と思われる。

この検討では、燃料交換スタンド・パイプが取付けられている炉容器鏡板のノズル部の応力解析が行われていない。この部分には、一般に応力が集中する傾向があり、応力値を低くするためには、このスタンド・パイプのピッチを大きくする必要がある。これから、一燃料交換のブロック組数は7ブロック組としなければならないであろう。

3.5 制御棒組数

原子炉の制御棒本数は安全性の思想に基づく要求がある。すなわち、一本の制御棒のスタック・ロッド・マージンをいくら以下にするかである。例えば、余剰反応度を30%，スタック・ロッド・マージンを0.5% $\Delta k/k$ とすれば、独立に作動する制御棒が60本必要になる。一制御棒領域には二個の制御棒と後備停止系が配置され、この制御棒はそれぞれ別個に作動する駆動装置を設けるとすれば、30組の制御棒組数となる。

さて、ブロックの直径と炉心の大きさによって制御棒の数が決まる。これを図示すれば、Fig. 3.5 のようになる。これから、炉心直径と必要な制御棒組数を決めれば自動的にブロックの直径が決定される。

3.6 燃料ピン寸法と個数

ブロックの寸法を決定したならば、このブロック内に収納することができる燃料ピンの寸法と個数を決定しなければならない。これまで行 った設計経験から、Fig. 3.6 のようになる。この図の面は最大値を示すもので、これ以下の値が採用可能であることを表示している。

3.7 実験炉の炉心体系例

以上の結果を使用して、実験炉の炉心体系としてどのようなものが考えられるかを表にまとめてみた。考えられる設計点は無数であるが、実現性のある体系に限って、すなわち、想定圧力容器内径は5, 5.5, 6 m として、制御棒組数は19, 25, 31, 37組とした。これに従ってTable 3.2のように12組の炉心体系を抽出してみた。この表の値は、実際に炉心を描いて求めたものでないから、実際の炉心とは多少異なるが、炉心体系のアウト・ラインを知ることができる。

さて、これらのうちから、どれを選択するかが問題となる。種々の選択方法が考えられるが、つぎのような三つの考え方があろう。

(1) 第2次予備設計の炉心体系において、不都合なところが考えられなければ、第2次予備設計炉心と同じにする。

ブロック平径寸法	約 300 mm
制御棒組数	19組
燃料ピン	中空形 外径 34 mm - 36本
	円環形 外径 49 mm - 18本
想定炉容器内径	5 m

(2) 第2次予備設計の炉心体系から、少し余裕を持たせる。すなわち、炉心体系を大きくし、制御棒本数を増やす。

ブロック平径寸法	約 295 mm
制御棒組数	25組
燃料ピン	中空形 外径 34 mm - 36本
	円環形 外径 49 mm - 18本
想定炉容器内径	5.5 m

(3) 実用高温ガス炉の燃料と同じ程度の大きさの燃料寸法として、実験炉を高温ガス炉燃料の照射ベットのすることを最重点にする考え方である。制御棒本数は第2次予備設計炉心と同じとする。

ブロック半径寸法	約	370 mm
制御棒組数		19組
燃料ピン	中空形	外径 32 mm - 60本
		円環形 外径 41 mm - 36本
想定炉容器内径		6 m

さらに、これらのうちからの選択において、最優先する項目から決定することもできる。末尾になったが、燃料寸法は耐震上の要求も考慮しなければならない。このためには、燃料要素の直径を大きくする必要がある。

Table 3.2 設計範囲にあるブロック・ピン寸法

可動反射体領域 直径 (m)	ブロック・ピン寸法 (mm)												備考
	19本組制御棒			25本組制御棒			31本組制御棒			37本組制御棒			
	ブロック 平径	ピン 外径	ピン 本数	ブロック 平径	ピン 外径	ピン 本数	ブロック 平径	ピン 外径	ピン 本数	ブロック 平径	ピン 外径	ピン 本数	
3.5 (圧力容器内径 5 m)	300 ^D	34 ^φ 49 ^φ	18本 (本) 36本	260 ^D	22 ^φ 38 ^φ	36本 18本	235 ^D	32 ^φ (52 ^φ - 6本)	18本	210 ^D	28 ^φ 47 ^φ	18本 6本	
4.0 (圧力容器内径 5.5 m)	335 ^D	35 ^φ (51 ^φ - 18本)	36本	295 ^D	34 ^φ 49 ^φ	36本 18本	260 ^D	22 ^φ 38 ^φ	36本 18本	235 ^D	32 ^φ (52 ^φ - 6本)	18本	
4.5 (圧力容器内径 6 m)	370 ^D	22 ^φ 32 ^φ (41 ^φ - 36本)	90本 60本 36本	325 ^D	34 ^φ 50 ^φ	36本 18本	290 ^D	33 ^φ 48 ^φ	36本 18本	265 ^D	22 ^φ 38 ^φ	36本 18本	

注：これらの値は計算値であるから、実際のものでは多少異なる寸法となろう。

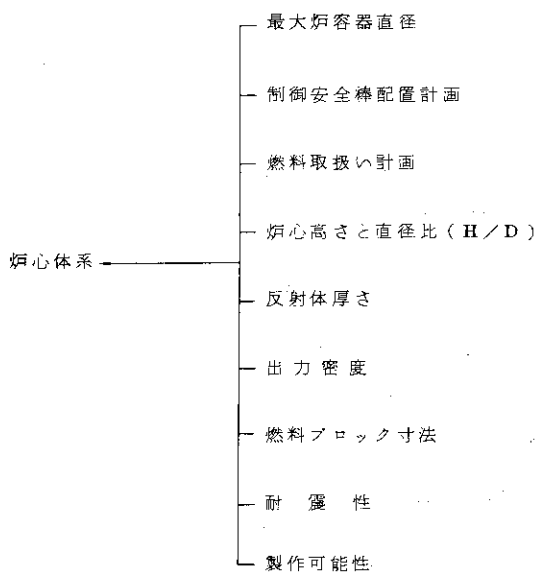


Fig. 3.1 炉心体系決定の要因図

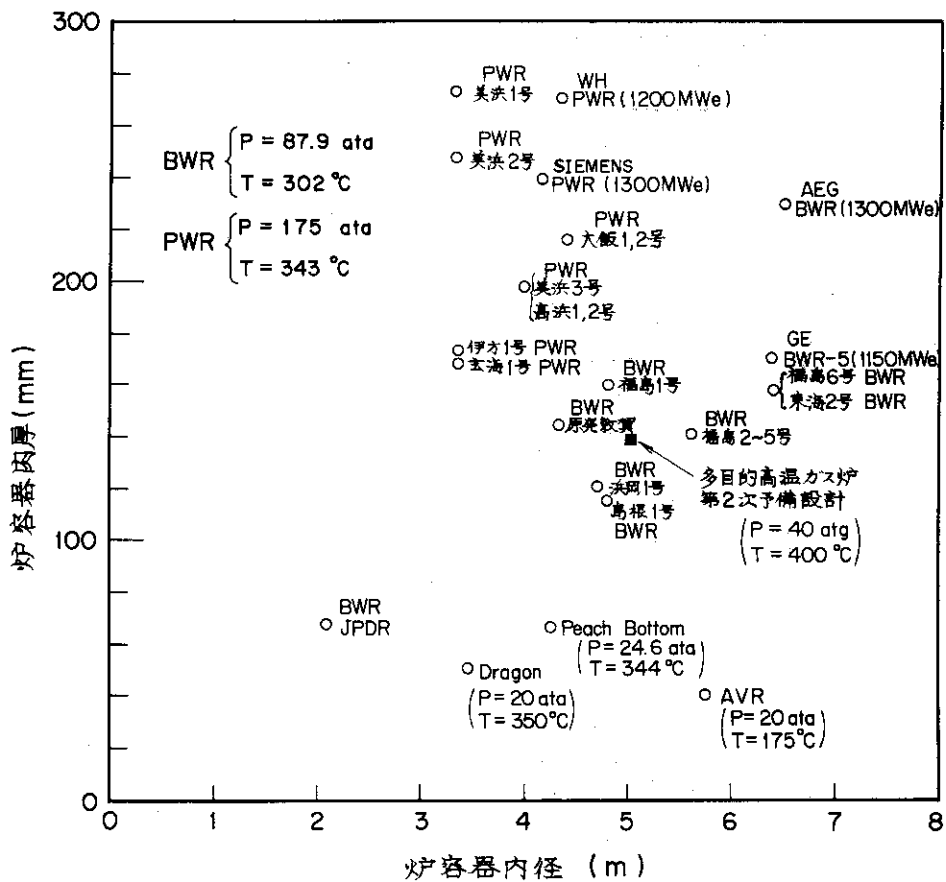
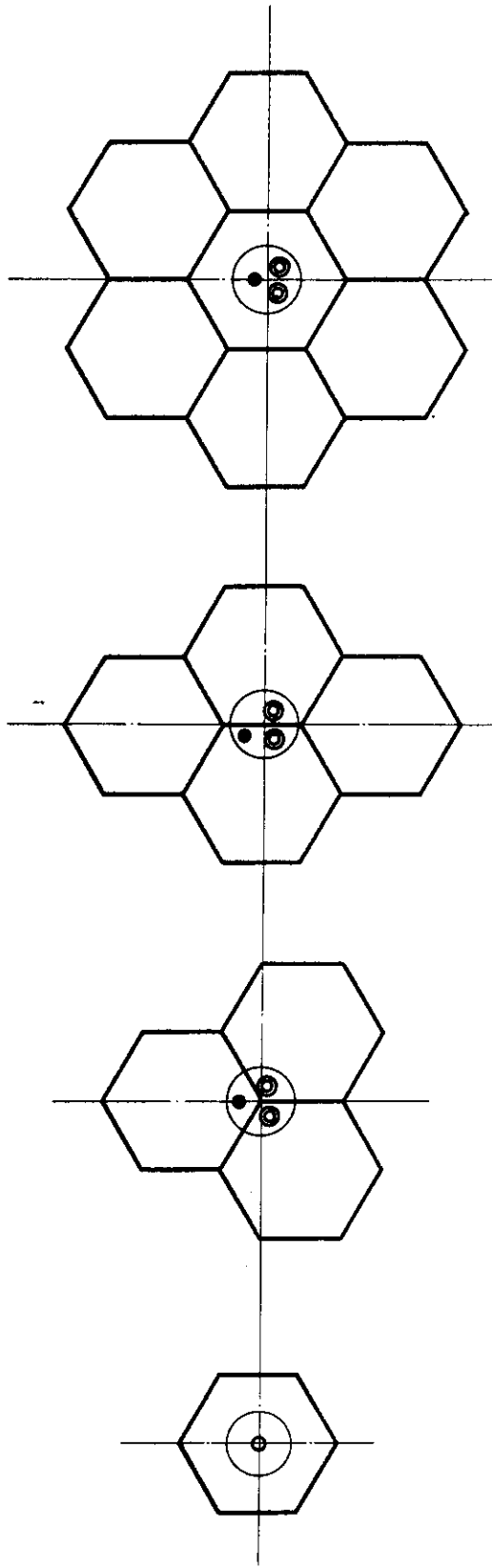


Fig. 3.2 原子炉容器内径と使用容器内厚

○ 制御棒または後備停止系
 ● 後備停止系
 ◎ 制御棒



(a) 1ブロック組 (b) 3ブロック組 (c) 4ブロック組 (d) 7ブロック組

Fig. 3.3 制御棒領域のブロック組合せ

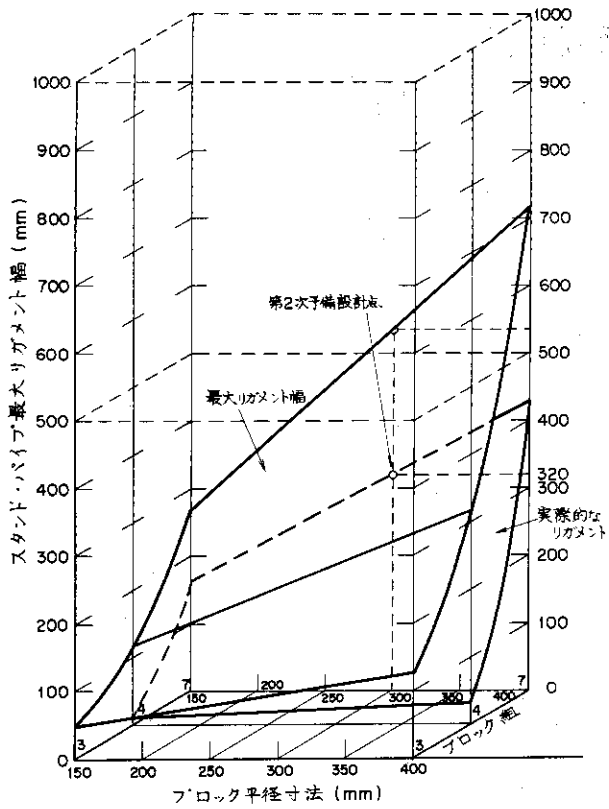


Fig. 3.4 ブロック寸法によるスタンドパイプ最大リガメント幅

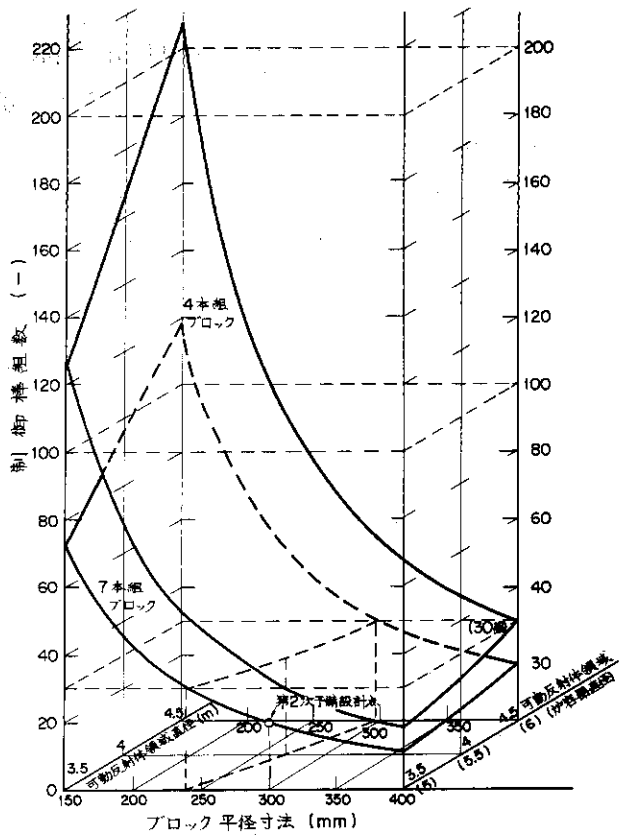


Fig. 3.5 可動反射体領域直径とブロック寸法による収納制御棒組数

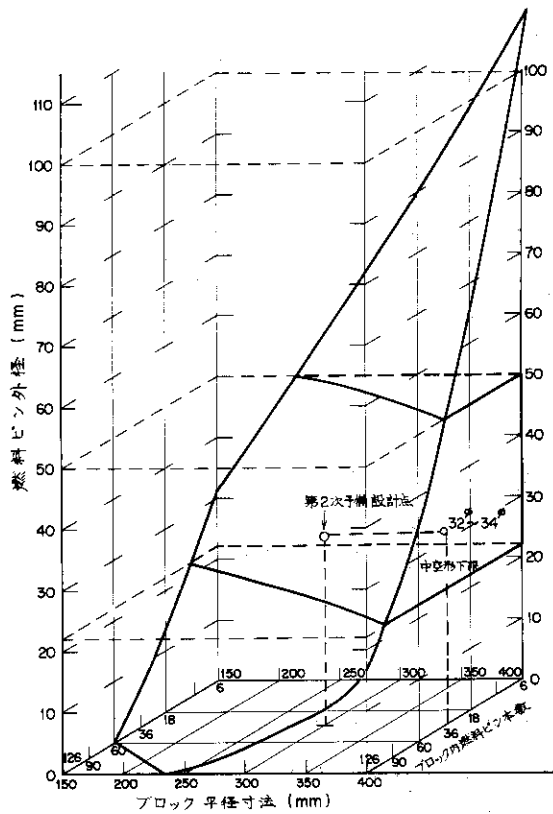


Fig. 3.6 ブロック寸法による収納ピン数と寸法

4. 炉心体系設計例

4.1 設定条件

これまで、サーベイしたことから、実験炉の炉心体系および燃料要素の設計のための設定条件をつぎのように要約することができる。

最大炉容器直径	6 m				
一燃料交換領域ブロック組数	7 ブロック組				
燃料ブロック直径 (平径寸法)	230 ~ 400 mm				
燃料ピン外径	<table> <tbody> <tr> <td>中空形</td> <td>22 ~ 40 mm</td> </tr> <tr> <td>円環形</td> <td>36 ~ 50 mm</td> </tr> </tbody> </table>	中空形	22 ~ 40 mm	円環形	36 ~ 50 mm
中空形	22 ~ 40 mm				
円環形	36 ~ 50 mm				
燃料ブロック最小リガメント幅	7 mm				
燃料スリーブ最小厚さ	5 mm				
(円環形燃料ピンの内側スリーブは 4 mm とする)					
燃料コンパクト最小厚さ	7 mm				
冷却材流路最小幅	2 mm				
燃料コンパクトとスリーブ間ギャップ	0.05 ~ 0.1 mm				

(円環形燃料ピンは *interacting-type* となるが、燃料温度および応力から後日修正を加える)

反射体厚さは半径方向 120 cm とし、可動反射体ブロックは有効炉心から 2 層配置する。

4.2 実験炉炉心体系設計例

4.1 の設定条件によつて、ブロックの配列はブロック・ピッチ換算で、270, 300, 330, 380, 400 mm の 6 種類とした。さらに、このうちブロック・ピッチ 300 mm には 2 種類の炉心を考慮することにした。炉心体系はそれぞれ Fig. 4.1 から 4.7 まで、および Table 4.1 に示されている。

4.3 実験炉燃料要素設計例

ブロック大きさに対する燃料要素の詳細図は Fig. 4.8 から 4.13 までにそれぞれ示されている。それぞれのブロックに適する中空形および円環形の燃料ピンの配置および寸法図が、前図の中に示されている。これらは一つの設計例であり、これ以外にも種々の設計が考えられる。

4.4 炉心大きさの決定

さて、これまでの資料から、炉心の平面的な構成が明らかになつた。つきには、有効炉心の高さを決めて、炉心の大きさを決定しなければならない。そのためには、ある炉心体系と燃料要素を採用した場合、平均出力密度がいくらまで可能かを調べる必要がある。このためには、許される燃料コンパクトおよびスリーブ温度と炉心出力を決め、そして炉心体系について計算を行い、その後炉心体系が決定される。こゝでは、炉心大きさの検討をつけるため、炉心出

力と炉心高さによる平均出力密度を計算して Table 4.1 に示している。

4.5 ま と め

以上の結果から高温ガス実験炉心体系の設計についてのめやすが得られた。これらの資料をもとに trial and error 方式によって、高温ガス実験炉の炉心体系が決定されるであろう。

Table 4.1 炉心および燃料寸法表

ブロック径 ピン径(mm)	有効炉心 直径 (cm)	可動反射体 領域直径 (cm)	固定反射体 領域直径 (cm)	想定圧力 容器内径 (cm)	制御棒本数		ブロックカラム数		ブロック内 制御棒用 穴直径 (mm)	燃料ビン			炉心高さ (cm)	平均出力密度W ₀ (cm)		燃料ビン寸法 (mm)					
					有効炉心 内	全数	有効炉心 内	全数		燃料 ビン 径 (mm)	燃料 ビン 高 (mm)	冷却回路 直径 (mm)		炉心出力		外側スリーブ		コンタクト		内側スリーブ	
														50MW	60MW	外径	内径	外径	内径	外径	内径
270 (平均 268)	264.5	381.4	475	535	組 13	組 31	85	181	65 (3個)	36	15 (中空形)	31	200	4,447	5,336	27	17.1	17	0	-	-
													250	3,557	4,270						
													300	2,964	3,557						
													350	2,541	3,049						
													400	2,224	2,668						
450	1,977	2,372																			
									18	6 (円環形)	46	200	4,447	5,336	42	32.2	32	18	17.8	11	
												250	3,557	4,270							
												300	2,964	3,557							
												350	2,541	3,049							
												400	2,224	2,668							
450	1,977	2,372																			
300 (平均 298)	269.2	416.7	505	565	組 7	組 25	73	175	85 (3個)	36	15 (中空形)	37	200	4,394	5,273	33	23.2	23	7	-	-
													250	3,515	4,218						
													300	2,929	3,515						
													350	2,511	3,013						
													400	2,197	2,536						
450	1,953	2,344																			
									18	6 (円環形)	51	200	4,394	5,273	46	36.2	36	22	21.8	13	
												250	3,515	4,218							
												300	2,929	3,515							
												350	2,511	3,013							
												400	2,197	2,636							
450	1,953	2,344																			
	290.4				組 13	組 25	85	175	85 (3個)	36	15 (中空形)	37	200	3,774	4,529	33	23.2	23	7	-	-
													250	3,019	3,623						
													300	2,516	3,019						
													350	2,156	2,587						
													400	2,887	2,264						
450	1,677	2,012																			
									18	6 (円環形)	51	200	3,774	4,529	46	36.2	36	22	21.8	13	
												250	3,019	3,623							
												300	2,516	3,019							
												350	2,156	2,587							
												400	2,887	2,264							
450	1,677	2,012																			
330 (平均 327)	257.0	381.2	470	530	組 7	組 19	55	121	90 (3個)	36	15 (中空形)	40	200	4,734	5,681	36	26.2	26	12	-	-
													250	3,787	4,544						
													300	3,156	3,787						
													350	2,705	3,246						
													400	2,367	2,840						
450	2,104	2,525																			
									18	6 (円環形)	55	200	4,734	5,681	49	39.2	39	25	24.8	15	
												250	3,787	4,544							
												300	3,156	3,787							
												350	2,705	3,246							
												400	2,367	2,840							
450	2,104	2,525																			
370 (平均 366)	288.1	427.4	520	580	組 7	組 19	55	121	100 (3個)	60	39 (中空形)	36	200	3,837	4,604	32	22.2	22	6	-	-
													250	3,070	3,684						
													300	2,558	3,070						
													350	2,193	2,632						
													400	1,919	2,303						
450	1,705	2,046																			
									36	15 (円環形)	46	200	3,837	4,604	42	32.2	32	18	17.8	11	
												250	3,070	3,684							
												300	2,558	3,070							
												350	2,193	2,632							
												400	1,919	2,303							
450	1,705	2,046																			
380 (平均 376)	295.9	438.9	530	590	組 7	組 19	55	121	100 (3個)	60	39 (中空形)	35	200	3,637	4,364	31	21.2	21	5	-	-
													250	2,910	3,492						
													300	2,425	2,910						
													350	2,079	2,495						
													400	1,819	2,183						
450	1,616	1,939																			
									36	15 (円環形)	47	200	3,637	4,364	43	33.2	32	19	18.8	11	
												250	2,910	3,492							
												300	2,425	2,910							
												350	2,079	2,495							
												400	1,819	2,183							
450	1,616	1,939																			
400 (平均 396)	275.4	438.5	530	590	組 7	組 19	43	109	110 (3個)	60	39 (中空形)	38	200	4,199	5,039	34	24.2	24	10	-	-
													250	3,359	4,031						
													300	2,799	3,359						
													350	2,399	2,879						
													400	2,099	2,519						
450	1,866	2,239																			
									36	15 (円環形)	50	200	4,199	5,039	45	35.2	35	21	20.8	13	
												250	3,359	4,031							
												300	2,799	3,359							
												350	2,399	2,879							
												400	2,099	2,519							
450	1,866	2,239																			

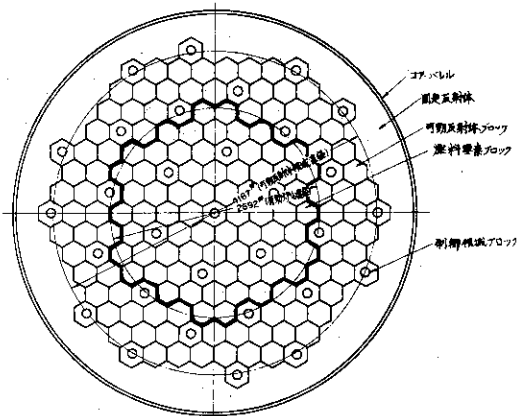
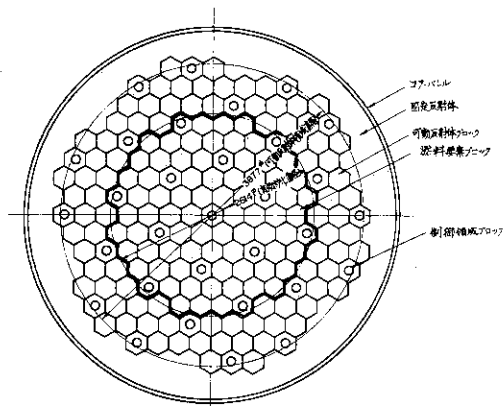


Fig. 4.1 ブロック・ピッチ 270mm, 有効炉心
 ブロック・カラム 85 個
 炉心平面図

Fig. 4.2 ブロック・ピッチ 300mm, 有効炉心
 ブロック・カラム 73 個
 炉心平面図

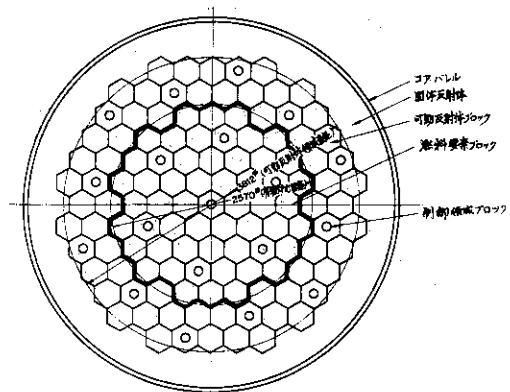
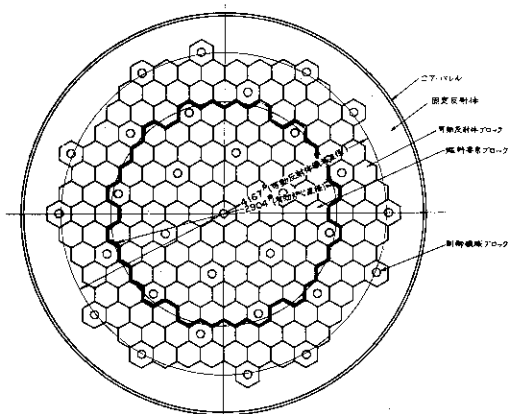


Fig. 4.3 ブロック・ピッチ 300mm, 有効炉心
 ブロック・カラム 85 個
 炉心平面図

Fig. 4.4 ブロック・ピッチ 330mm, 有効炉心
 ブロック・カラム 55 個
 炉心平面図

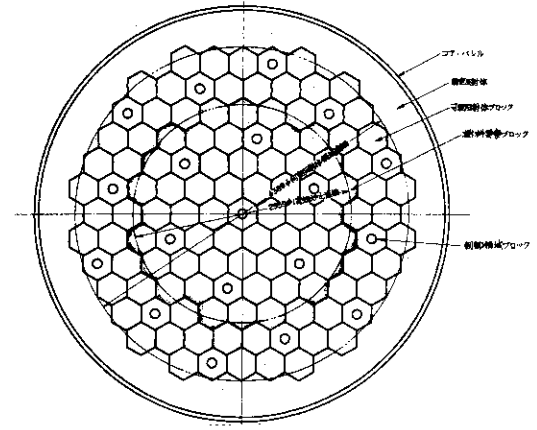
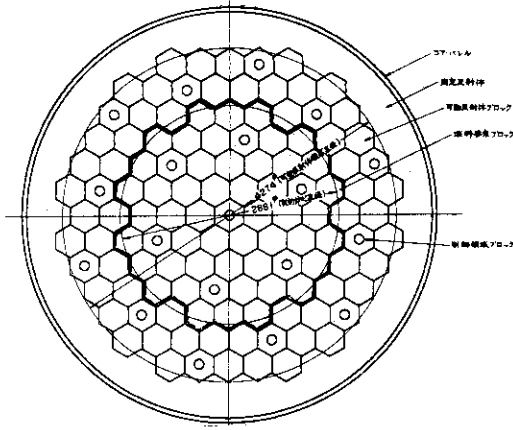


Fig.4.5 ブロック・ピッチ370mm, 有効炉心
 ブロック・カラム55個
 炉心平面図

Fig.4.6 ブロック・ピッチ380mm, 有効炉心
 ブロック・カラム55個
 炉心平面図

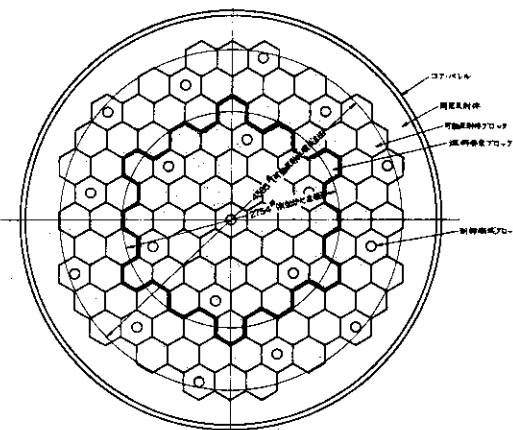
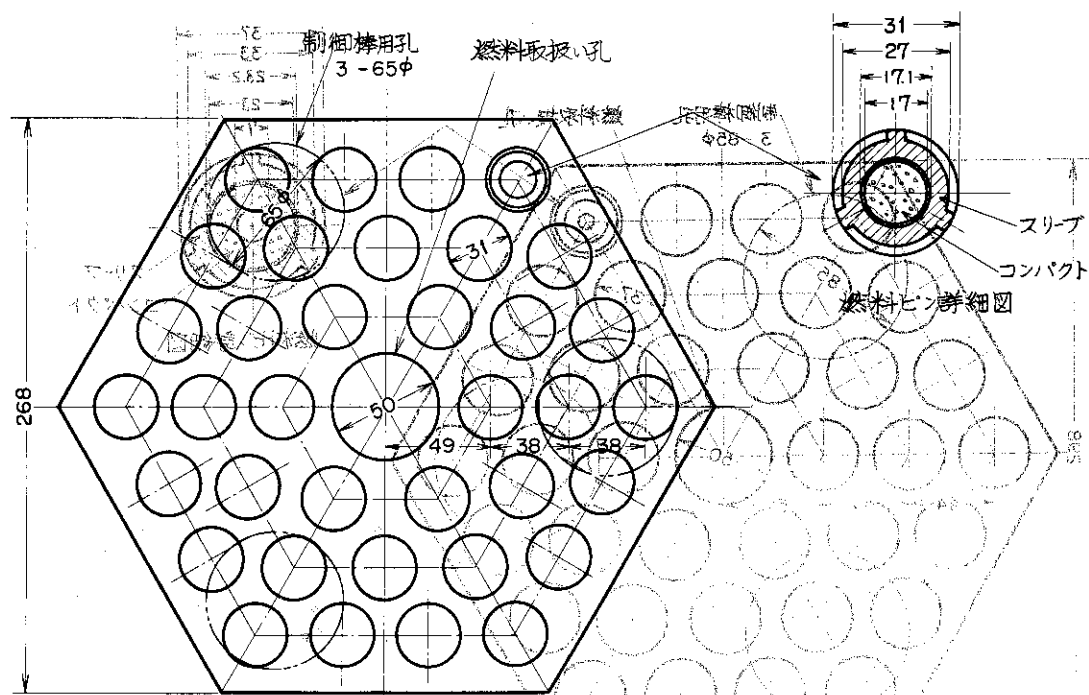
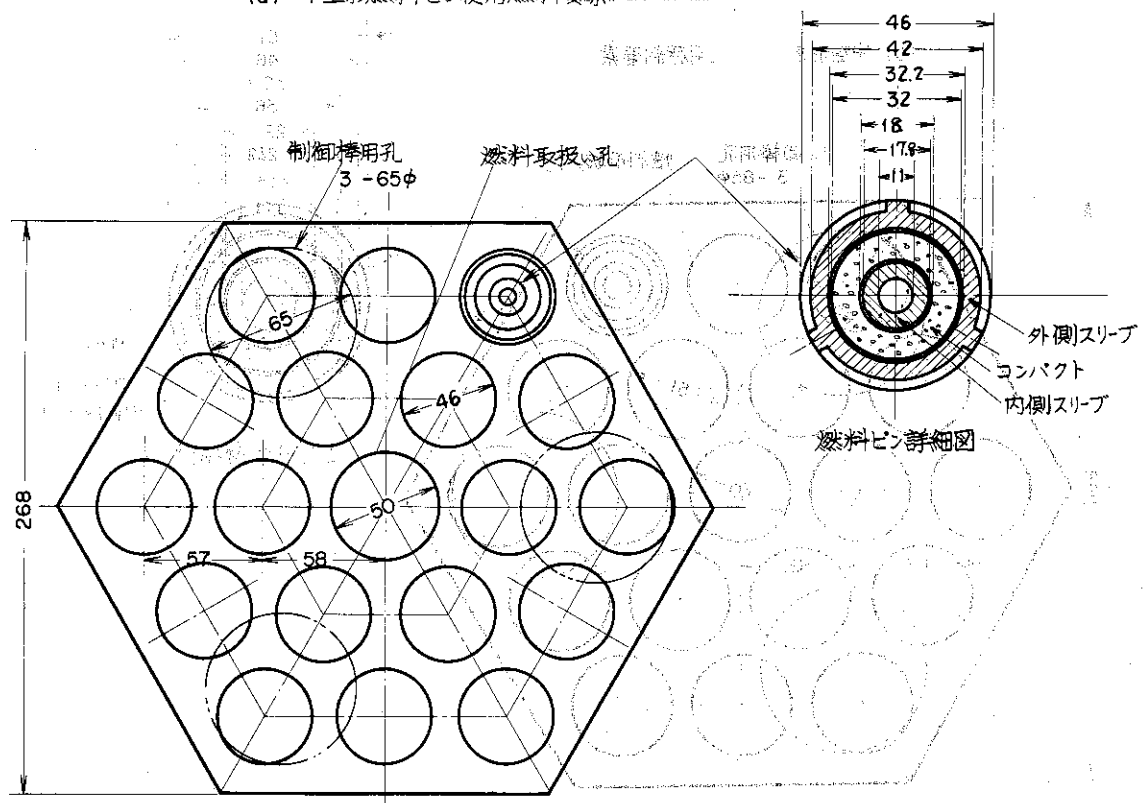


Fig.4.7 ブロック・ピッチ400mm, 有効炉心
 ブロック・カラム43個
 炉心平面図



(a) 中空形燃料ピン使用燃料要素



(b) 円環形燃料ピン使用燃料要素

Fig. 4.8 ブロック・ピッチ 270mm 燃料要素

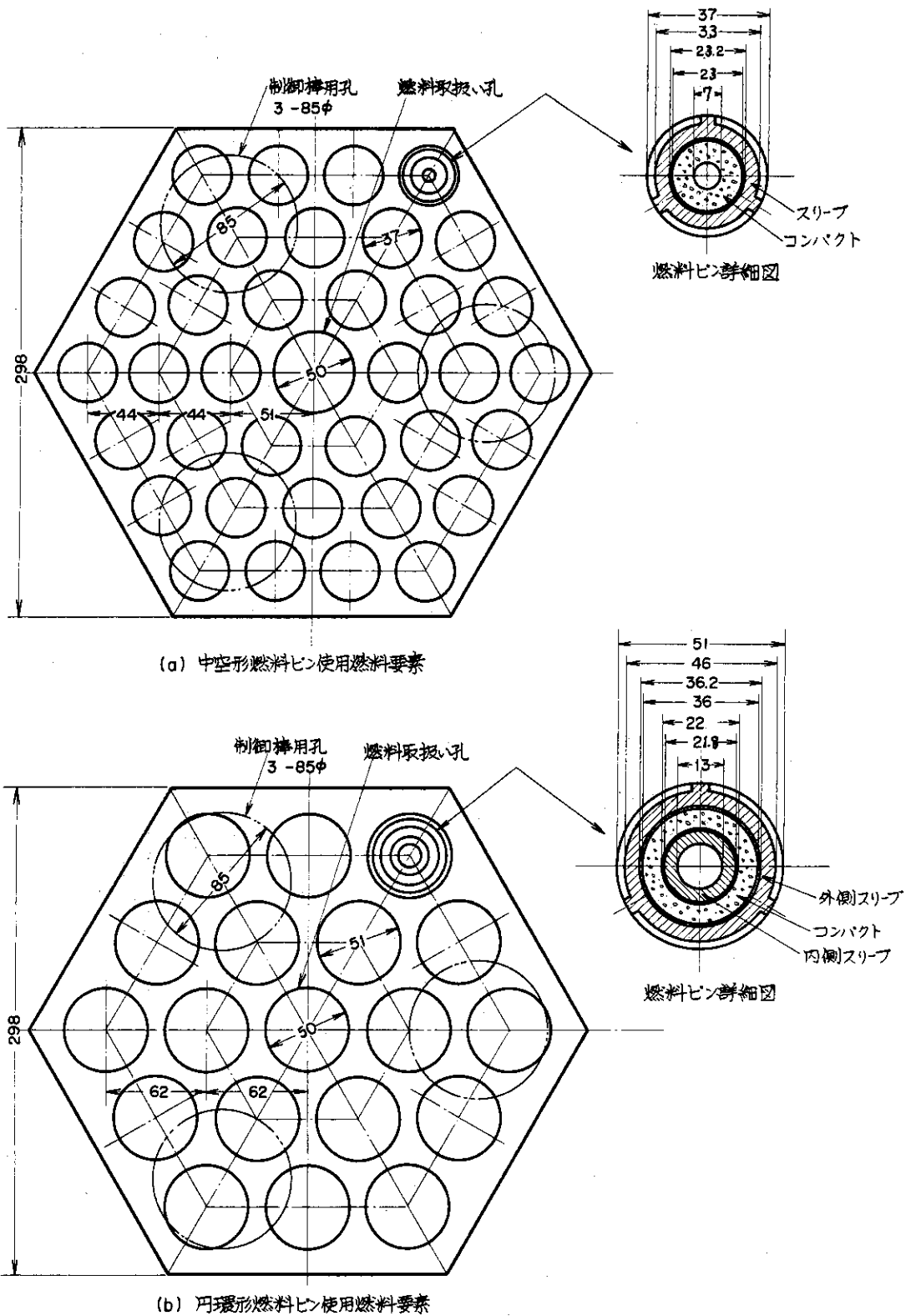
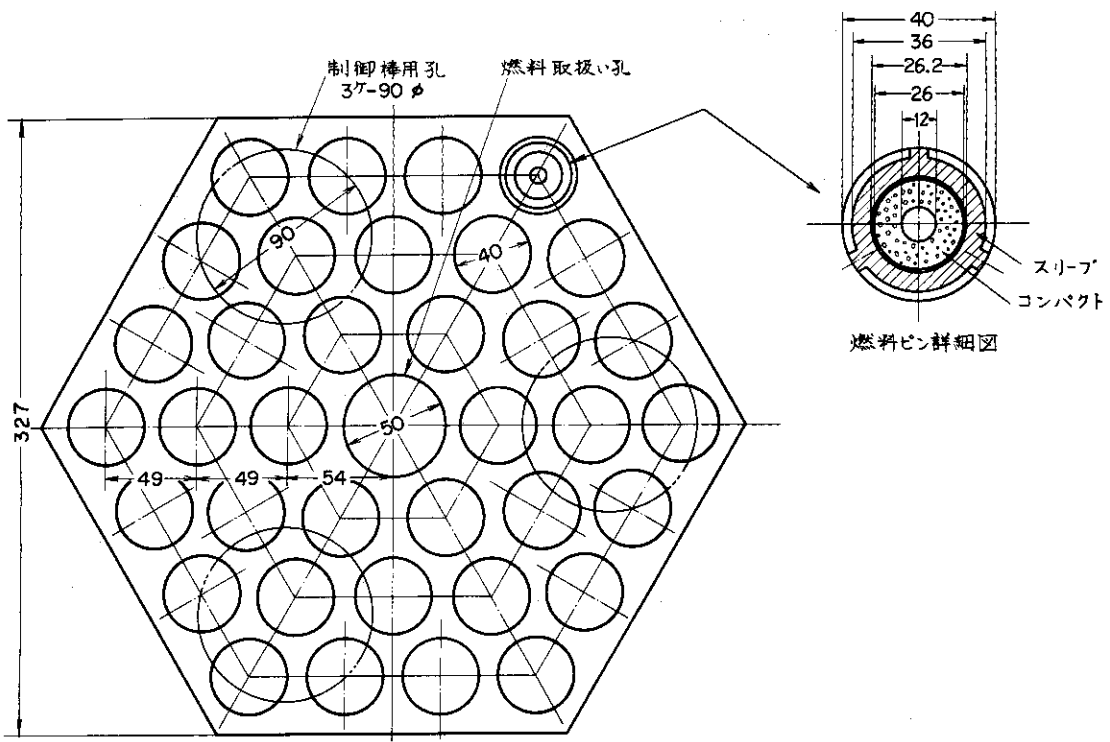
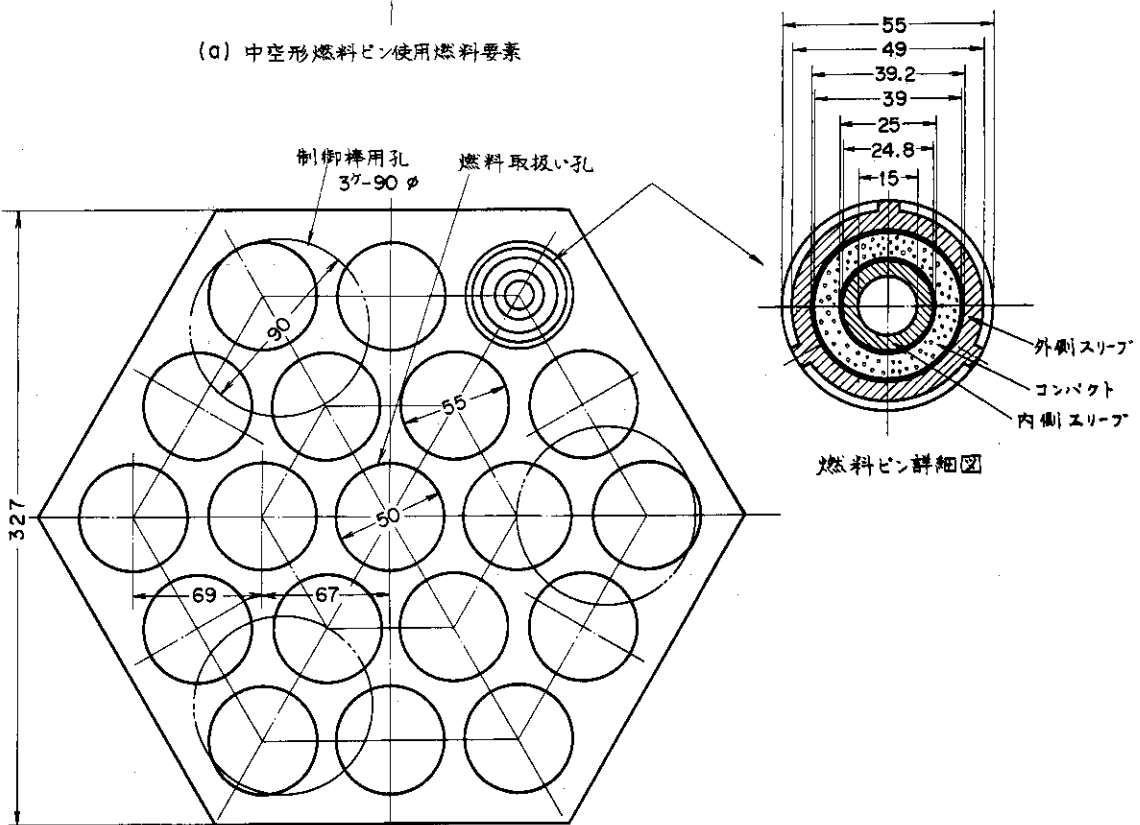


Fig.4.9 ブロック・ピッチ 300mm燃料要素

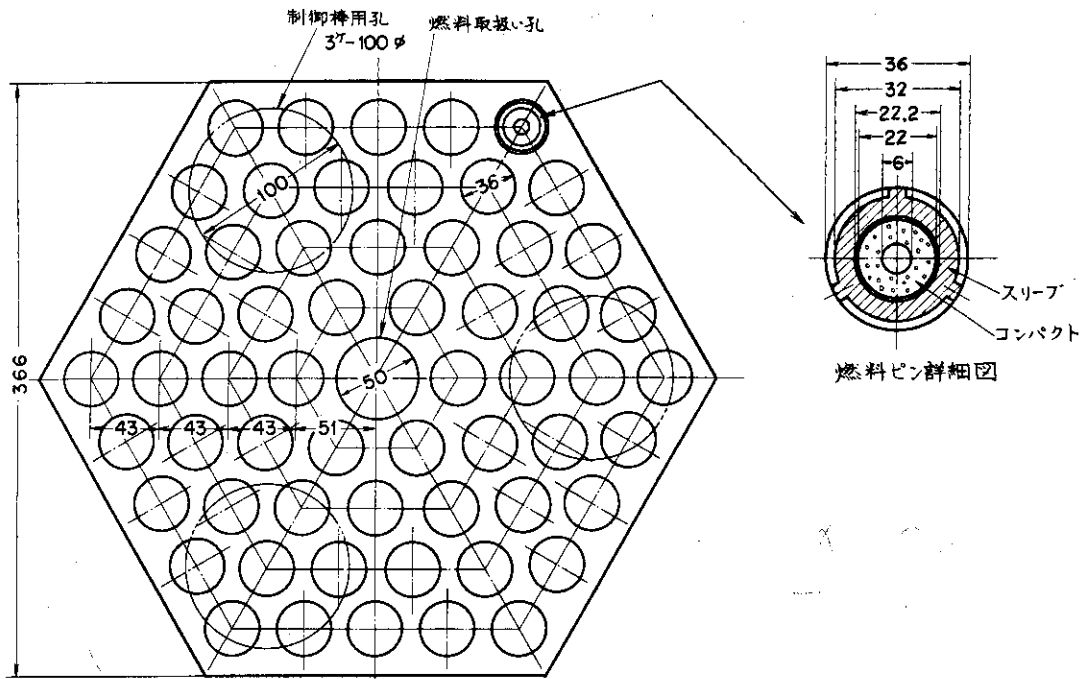


(a) 中空形燃料ピン使用燃料要素

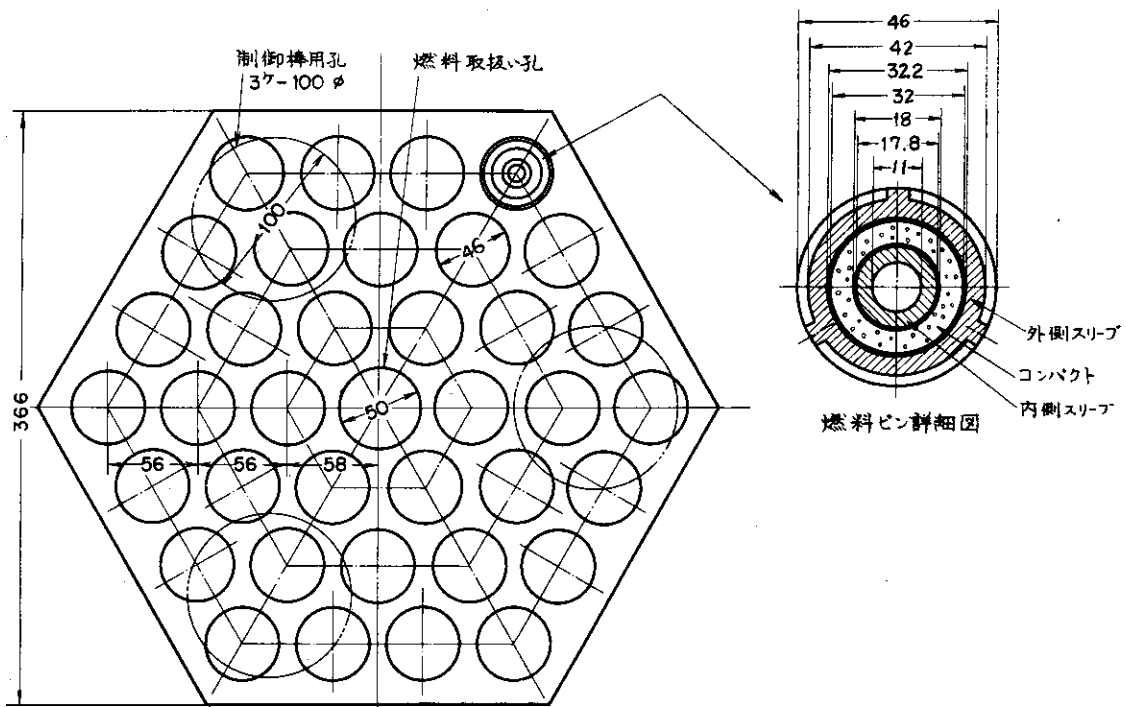


(b) 円環形燃料ピン使用燃料要素

Fig. 4.10 ブロック・ピッチ 330mm 燃料要素

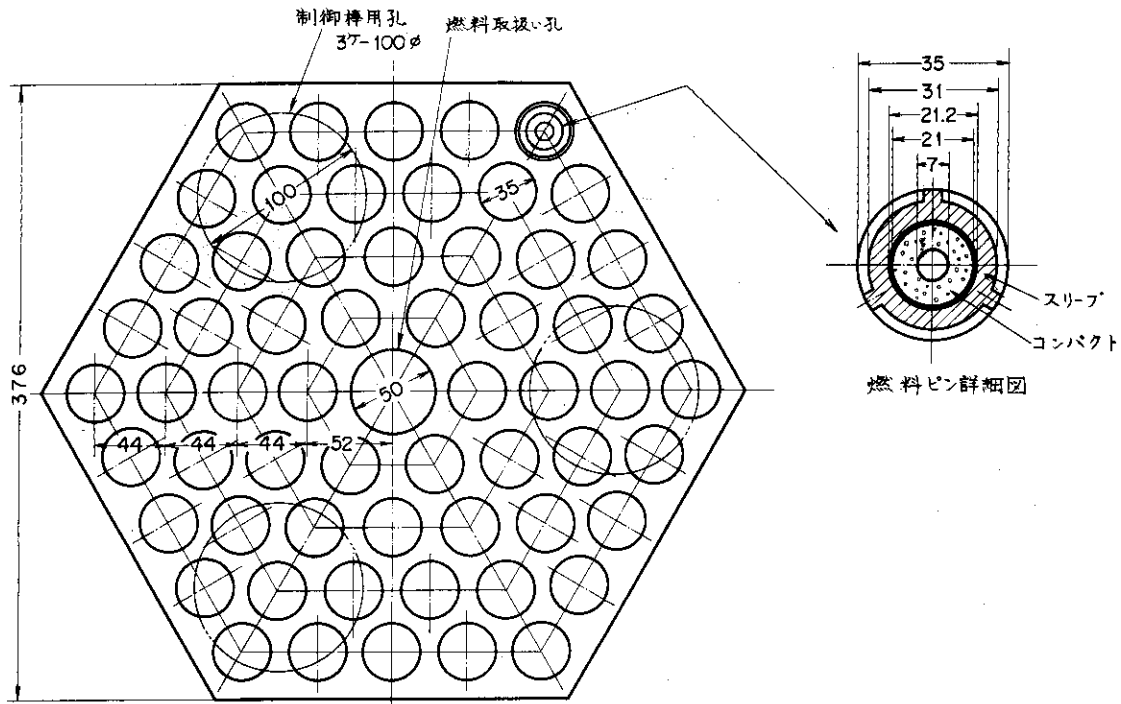


(a) 中空形燃料ピン使用燃料要素

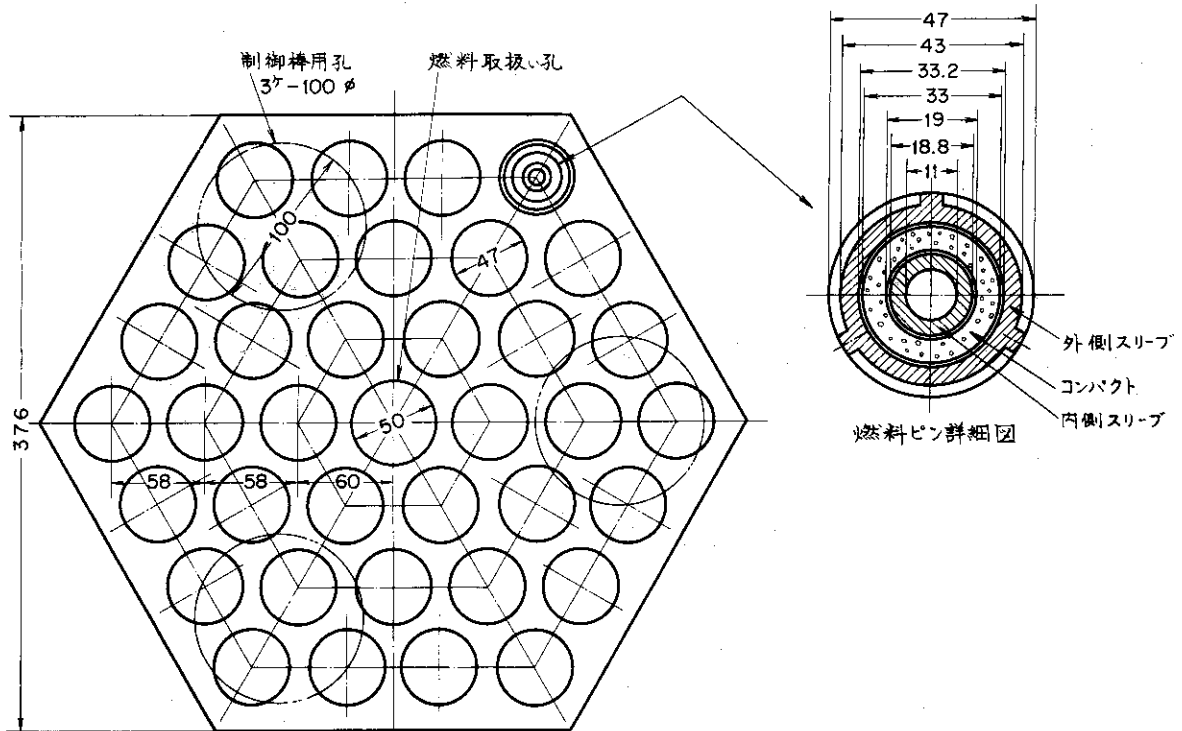


(b) 円環形燃料ピン使用燃料要素

Fig. 4.11 ブロック・ピッチ 370mm燃料要素

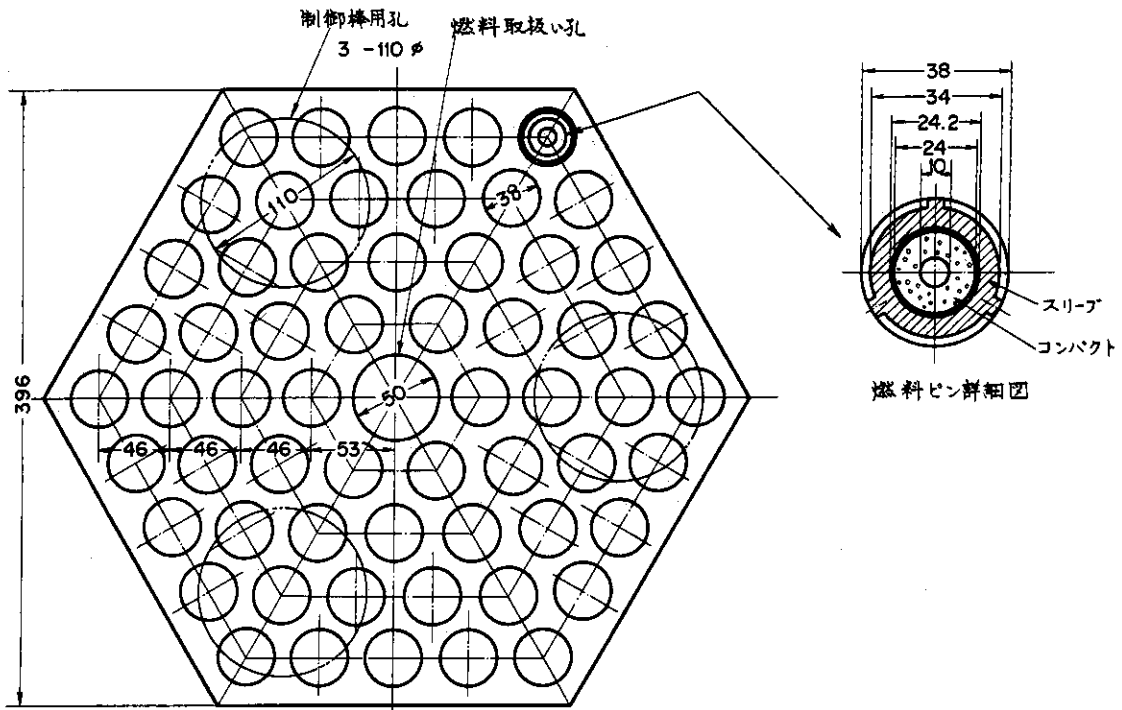


(a) 中空形燃料ピン使用燃料要素

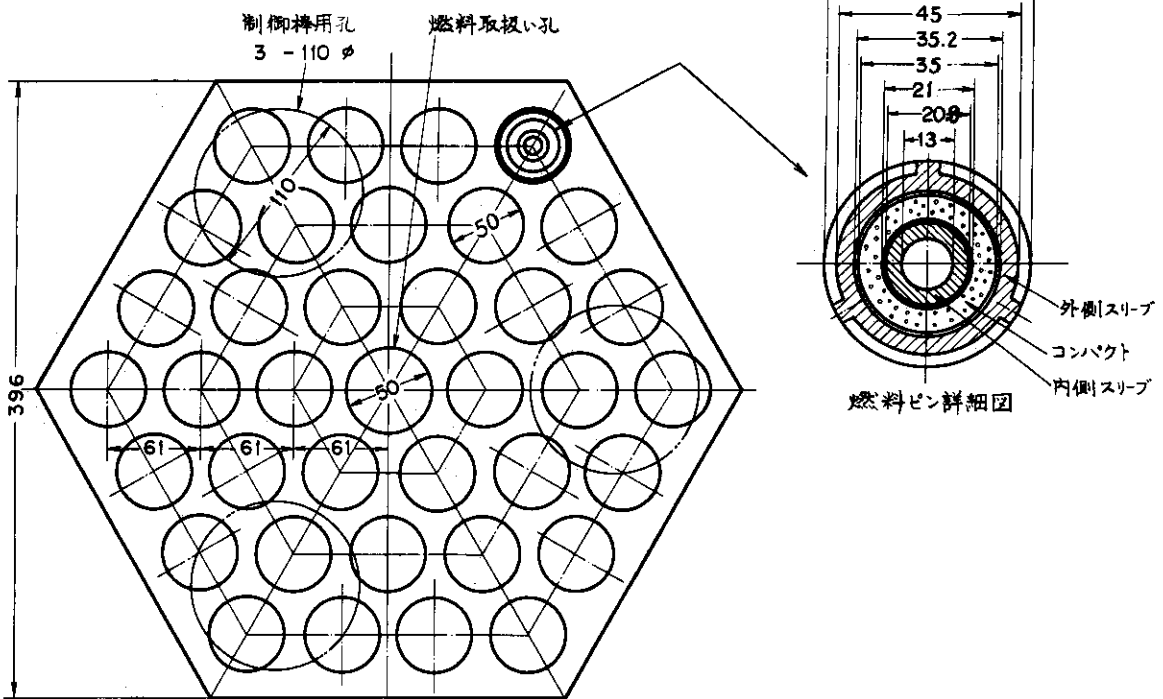


(b) 円環形燃料ピン使用燃料要素

Fig. 4.12 ブロック・ピッチ 380mm 燃料要素



(a) 中空形燃料ピン使用燃料要素



(b) 円環形燃料ピン使用燃料要素

Fig. 4.13 ブロック・ピッチ 400mm 燃料要素

5. 結 言

多目的高温ガス冷却実験炉の炉心体系および燃料要素の設計のため作成された資料をまとめて、資料集を作成した。これらの内容から、炉の設計範囲は、広範囲な面を形成していることが明らかにされたと思う。これらの設計面 (design surface) から実験炉の設計点 (design point) を決定しなければならない。しかしながら、最適化手法を使用したとしても、この点を一義的に決定することは困難であり、現在最適化手法も確立されていない。そこで、現地点で設計点を決定する方法の一つは、設計思想による方法であろう。それは、設計思想を確立して全体構成の矛盾がないような設計点を選ぶことであろう。

最後に、本文中の図表の文章が英文のものと日本語のものがあるが、時間の制約で統一できなかったことをお詫びする。

6. 謝 辞

本研究を行うに際して種々の援助をいただいた、動力炉開発管理室、熱中性子炉設計組の下川純一博士および燃料温度計算のため計算コード DEGA-3 の便宜を計つていただいた鈴木邦彦氏に深く感謝します。

7. 参 考 文 献

- (1) 野沢他 21 名：多目的高温ガス実験炉予備設計，JAERI-M4419 (1971年5月)
- (2) 野沢他 21 名：多目的高温ガス実験炉第2次予備設計，JAERI-memo 4852 (1972年6月)
- (3) 宮本，幾島他 3 名：多目的高温ガス実験炉予備設計燃料の検討，JAERI-memo 4475 (1971年6月)
- (4) 鈴木 邦彦：ガス冷却炉用チャンネル熱計算コード DEGA-3，JAERI-memo 4454 (1971年5月)
- (5) 幾島 毅，鈴木邦彦：高温ガス炉黒鉛燃料の粘弾性応力解析，JAERI-memo 4995 (1972年9月)
- (6) 幾島 毅：ブロック状炉心の地震応答解析，JAERI-memo 5165 (1973年2月)

5. 結 言

多目的高温ガス冷却実験炉の炉心体系および燃料要素の設計のため作成された資料をまとめて、資料集を作成した。これらの内容から、炉の設計範囲は、広範囲な面を形成していることが明らかにされたと思う。これらの設計面 (design surface) から実験炉の設計点 (design point) を決定しなければならない。しかしながら、最適化手法を使用したとしても、この点を一義的に決定することは困難であり、現在最適化手法も確立されていない。そこで、現地点で設計点を決定する方法の一つは、設計思想による方法であろう。それは、設計思想を確立して全体構成の矛盾がないような設計点を選ぶことであろう。

最後に、本文中の図表の文章が英文のものと日本文のものがあるが、時間の制約で統一できなかったことをおわびする。

6. 謝 辞

本研究を行うに際して種々の援助をいただいた、動力炉開発管理室、熱中性子炉設計組の下川純一博士および燃料温度計算のため計算コードDEGA-3の便宜を計つていただいた鈴木邦彦氏に深く感謝します。

7. 参 考 文 献

- (1) 野沢他 21名：多目的高温ガス実験炉予備設計，JAERI-M4419（1971年5月）
- (2) 野沢他 21名：多目的高温ガス実験炉第2次予備設計，JAERI-memo 4852
（1972年6月）
- (3) 宮本，幾島他 3名：多目的高温ガス実験炉予備設計燃料の検討，JAERI-memo 4475
（1971年6月）
- (4) 鈴木 邦彦：ガス冷却炉用チャンネル熱計算コード DEGA-3，JAERI-memo
4454（1971年5月）
- (5) 幾島 毅，鈴木邦彦：高温ガス炉黒鉛燃料の粘弾性応力解析，JAERI-memo 4995
（1972年9月）
- (6) 幾島 毅：ブロック状炉心の地震応答解析，JAERI-memo 5165（1973年2月）

5. 結 言

多目的高温ガス冷却実験炉の炉心体系および燃料要素の設計のため作成された資料をまとめて、資料集を作成した。これらの内容から、炉の設計範囲は、広範囲な面を形成していることが明らかにされたと思う。これらの設計面 (design surface) から実験炉の設計点 (design point) を決定しなければならない。しかしながら、最適化手法を使用したとしても、この点を一義的に決定することは困難であり、現在最適化手法も確立されていない。そこで、現地点で設計点を決定する方法の一つは、設計思想による方法であろう。それは、設計思想を確立して全体構成の矛盾がないような設計点を選ぶことであろう。

最後に、本文中の図表の文章が英文のものと日本語のものがあるが、時間の制約で統一できなかったことをおわびする。

6. 謝 辞

本研究を行うに際して種々の援助をいただいた、動力炉開発管理室、熱中性子炉設計組の下川純一博士および燃料温度計算のため計算コードDEGA-3の便宜を計つていただいた鈴木邦彦氏に深く感謝します。

7. 参 考 文 献

- (1) 野沢他21名：多目的高温ガス実験炉予備設計，JAERI-M4419（1971年5月）
- (2) 野沢他21名：多目的高温ガス実験炉第2次予備設計，JAERI-memo 4852
（1972年6月）
- (3) 宮本，幾島他3名：多目的高温ガス実験炉予備設計燃料の検討，JAERI-memo 4475
（1971年6月）
- (4) 鈴木 邦彦：ガス冷却炉用チャンネル熱計算コード DEGA-3，JAERI-memo
4454（1971年5月）
- (5) 幾島 毅，鈴木邦彦：高温ガス炉黒鉛燃料の粘弾性応力解析，JAERI-memo 4995
（1972年9月）
- (6) 幾島 毅：ブロック状炉心の地震応答解析，JAERI-memo 5165（1973年2月）