

本資料は 年 月 日付で登録区分、
変更する。 2001. 7. 31 [技術情報室]

開 示 制 限

分 置

常陽中性子源モックアップ実験

(囑託) 中 井 優

昭和47年11月

動力炉・核燃料開発事業団

この資料は、動燃事業団内における検討と利用のため作成された

資料であり、複製、転載、改訂、転送、再配布、貸与、譲渡、複製、転載、改訂、転送、再配布、貸与、譲渡等の行為は、本資料の複製権、転載権、改訂権、転送権、再配布権、貸与権、譲渡権等の権利を侵害するおそれがあります。なお、複製、転載、改訂、転送、再配布、貸与、譲渡等の行為は、本資料の複製権、転載権、改訂権、転送権、再配布権、貸与権、譲渡権等の権利を侵害するおそれがあります。

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

は じ め に

本報告は、「常陽」の原子炉起動時における中性子源の仕様を決定するために、未知な要素の多いその設計計算法を東京大学の原子炉「弥生」を利用して実験した結果をまとめたものである。

実験の実施に当っては、日本原子力事業株式会社 中井 優 氏 に、昭和47年4月1日から同年10月31日まで動燃囑託を委嘱し、実験実施責任者として、実験装置の製作、実験の準備および実施、データ整理などを行ってもらった。

短期間であったが、所期の目的は達成し、設計上有益な情報が得られたことについて中井氏の御努力に感謝の意を表したい。

高速増殖炉開発本部

井 上 晃 次

常陽中性子源モックアップ実験

<要旨>

高速実験炉「常陽」の原子炉起動時に用いる中性子源の設計は以下に述べる理由から非常に難しい問題である。すなわち

1. 起動系検出器と中性子源の距離が大きくて、その間の構造が複雑であって、その設計計算法に確認されたものがないこと。
2. 使用する検出器の感度が明確でないこと。

などの理由により、モックアップ実験を行なって、設計計算に使用された中性子源設計法の精度を確認し、検出器の感度を求めることを目的とした。

モックアップ実験は東京大学原子炉「弥生」の上部コラム実験孔において、「常陽」の可動反射体より外側を模擬した平板供試体を用いて行なわれた。この供試体は SUS27、アルミニウム及び黒鉛より成り、アルミニウムはナトリウムを模擬するものである。測定は金箔を用いた放射化法によるものを標準にして、Cd フィルター法により熱中性子及び熱外中性子を求め、その中性子束をもとにして中性子検出器の検出効率を求めた。

実験値と計算値とは比較され、中性子源の設計に用いられた計算法は十分な精度を有していることがわかった。

目 次

まえがき	1
1. 実験の計画	2
2. 供試体の製作	4
3. 実 験	16
4. 設計への反映	38
5. 結 論	48
謝 辞	48

常陽中性子源モックアップ実験

まえがき

高速実験炉「常陽」の原子炉起動時における中性子源の仕様と起動系中性子計測器との関係は

1. 設計計算法が不明であること
2. 使用を予定されている検出器の感度が明確でないことなど

などの理由によりその設計法は非常に困難である。そこで炉心から起動系検出器位置までのモックアップを構成し、東大・原子炉「弥生」を利用してモックアップ実験を実施した。実験は金箔及び核分裂計数管を用いて、モックアップ供試体内の任意の点の中性子束を求めた。実験値は「常陽」中性子源の設計に用いられた方法により解析され、設計法はかなり良い精度を有することが確認された。

本実験を遂行するにあたり、実験班が構成された。中井*を実験実施責任者とし野口文夫（日本原子力事業株式会社）；白山新平、木下純一、三浦巖（東京芝浦電気株式会社電気機械研究所）の各氏が参加し、後者3氏は核分裂計数管関係の作業を担当した。又、実験値の解析及び設計への反映に関しては、主として清水彰直、小松一郎、川島正俊（日本原子力事業株式会社）の3氏が担当した。

* 動力炉核燃料開発事業団囑託、現在日本原子力事業株式会社

1. 実験の計画

「常陽」の原子炉起動時における中性子源の仕様と起動系中性子計測器との関係は、以下に述べる理由からその設計法に困難な点が多い。

- (i) 起動系検出器と中性子源の距離が約3 mも離れており、その間にある構造材の配列が複雑である。従来の軽水炉ではこのような例はなく、又海外の高速炉では例はあってもその設計計算法が不明である。
- (ii) 起動系検出器として用いる予定のP7Aはその感度が0.1 cps/nvの仕様であるが、この値が得られるかどうか疑わしい。

などの理由から、現状では起動系感度0.1 cps/nvとして、中性子源強度は約3倍の余裕をもたせて、JMTR 照射直後約6,200 キュリーの強度をもたせることになっている。ただし、低出力運転期間が6ヶ月とするとこの中性子源強度は起動時に必要な最低値1500 キュリーより小さくなり、もう一体の中性子源が必要となる。

以上の理由から、中性子源設計法をモックアップ実験によって確認し、仕様の明確化を図るために、東大炉「弥生」において、モックアップ実験を行うことが計画された。

実験の計画から終了、設計面への反映等のタイムスケジュールをFig. 1-1に示す。

Fig. 1 - 1 Time schedule of Experiment

	供 試 体 製 作	実 験 実 施
46/12	28 : 仕様書案作成	4 : モックアップ実験実施の是非の検討 22 : 実験内容の一般的討議
47/ 1	11, 21 : 業者に仕様書案を説明 27 : 業者より見積提出	
2	26 : 業者より承認函提出, 検討	7 : 技術仕様案作成
3	1 : 業者より強度, 耐震計算書等入手 14 : 立合検査 24 : 立合検査, 30 : 大洗事務所に納入	1 : 実験消耗品の手配
4		
5	24 : 検収 (於 : 大洗)	15 : 実験実施体制の確認 25 : 実験タイムスケジュールのあらまし決定
6		8 : 実験内容・手順の詳細を東大に説明 21 : 実験内容のつめ, 実施案の作成 26 : 実験実施案の改訂
7	4 : 東大炉搬入 14 : 供試体組立, 解体テスト	22 : 8月実施予定の各グループの調整, 実験内容の説明
8		10 ~ 12 : 予備実験 20 { 2 本番実験
9		実験結果の整理
10		, 設計への feed back 実験結果の提出
11		9 : 実験結果の説明

2. 供試体の製作

(1) 見積用仕様の作成

(i) 常陽半径方向の遮蔽体配列

常陽半径方向の遮蔽体配列及び起動系検出器位置付近の詳細を Fig. 2 - 1 に示す。

(ii) 弥生原子炉上部コラム実験孔の概略

モックアップ実験は「弥生」原子炉の上部コラム実験孔において、同炉の鉛 B 反射体に接してモックアップ供試体を設置して行なわれる。供試体の挿入される実験孔の概略を Fig. 2 - 2 に示す。

(iii) 供試体仕様の作成

実験装置は a . 供試体 b . 供試体支持装置 c . 鉛プラグ及び d . 漏洩防止用コンクリートブロックから構成される。

供試体は Fig. 2 - 1 に示された遮蔽体配列を Fig. 2 - 2 に示された実験孔の大きさに合せて、平板で近似して Table 2 - 1 のように配置したものである。供試体支持装置は供試体を実験孔内において支持する鋼製枠であり、鉛プラグは弥生 B 反射体を貫通する孔を塞いで中性子の空間分布のひずみをなくすためのものである。また、漏洩防止用コンクリートブロックは Table 2 - 1 のように供試体を設置した場合、黒鉛遮蔽体の部分が原子炉のコンクリート遮蔽体より上にとびだしその結果、黒鉛遮蔽体において実験方向と垂直な方向への中性子の漏洩が生じるものと思われる (Fig. 2 - 3 参照) この漏洩を防止するために供試体の外に出た部分を取り囲む為のものである。供試体には、Table 2 - 1 に示した平板供試体の他に起動系計測孔を模擬する同心円環状の SUS パイプが含まれる。

平板供試体は JIS 規格を満足する程度の厚さの SUS 27 平板及び Al 平板より製作し、面のうねり等を考慮して、所定の大きさに切り揃えた平板を積み重ねた後に支持装置の方の高さを調整することとした。供試体支持装置は直接実験孔の SUS 内張と接触するので、内張を損傷しないように 10 mm づつのクリアランスをとって製作するようにした。

(2) 業者引合と仕様書の提出及び契約

当方で作成した仕様書をもとに業者を呼び寄せて実験側の意図を伝え、製作者側の意見を聴取した。本実験装置は原子炉の真上の実験孔で使用するという特殊事情下にあるため、東大原子炉に出入りしてその知識をかなり有しているという点、技術が確かであるという点を参考にして、日特金属工業 KK に特命という形をとることとした。日特金属の設計担当者と打合せの結果、仕様書の中で、最初の案と平板供試体の構成の点で若干異なる点が生じた以外は殆んど当方で作成した形で製作に入ることになった。平板供試体の構成で、最初の案では支持容器の底板に Al 平板がくることになったので、強度上の面から、SUS 平板といれかえてモックアップ実験の点からやや不満が残るが SUS 平板を支持装置の底板とすることにした。(Table 2 - 2 参照)

(3) 製作及び立合検査

契約に基づき、製作完了、納入前に立合検査を実施した。検査の結果はおおむね良好であったが、次のような点に改良を加えるように要求した。

1. 平板供試体の SUS 平板の中に、支持装置の中に入らないものが数枚あったので、切削加工して入るようにすること。
2. 支持装置の内側に熔接の肉盛りの厚すぎる部分があり、これが平板遮蔽体の円滑の出し入れを困難にしているので、はつって出し入れが円滑に行えるようにすること。
3. 起動系検出器案内管のうちの小管を大管に入れると噛み合って動かなくなるので、小管の三脚を削ること。
4. 漏洩防止用コンクリートブロックの出来具合が良くない。ワイヤブラシでみがいて浮いている砂、礫、セメントなどを掻き取ること。

(4) 大洗事業所への納入及び東大炉への搬入

製作が終り、検査に合格した供試体等は、大洗事業所に納入された。その後暫時、保管された後、実験が実施される東大炉 弥生 原子炉に移された。保管中に塗装がはがれたので、東大炉搬入の際に業者に再度塗装を行なわせた。

また、コンクリートブロックが脆くて欠けやすそうで、原子炉で直接用いるのに不安があったので、ビニールシートで包んで使用することにした。

東大炉へ搬入の際、業者の責任において実験孔への吊込みテストが実施される手筈になっていたが、支持装置吊り上げ用アイボルトに不備があったために実施するに至らず日をあらためて行うことにした。この吊り込みテストは予備実験の時に実施され、合格した。

(5) 実験供試体等の概要

供試体等の寸法及び材質を以下に示す。

平板供試体の寸法及び配列を Table 2-2 に示す。使用した材料は JIS 規格品の SUS27 及び Al (A2P1) である。

平板供試体以外の供試体の形状及び寸法を Fig. 2-4 に示す。また、黒鉛供試体の組成は Table 2-3 に与えられる。

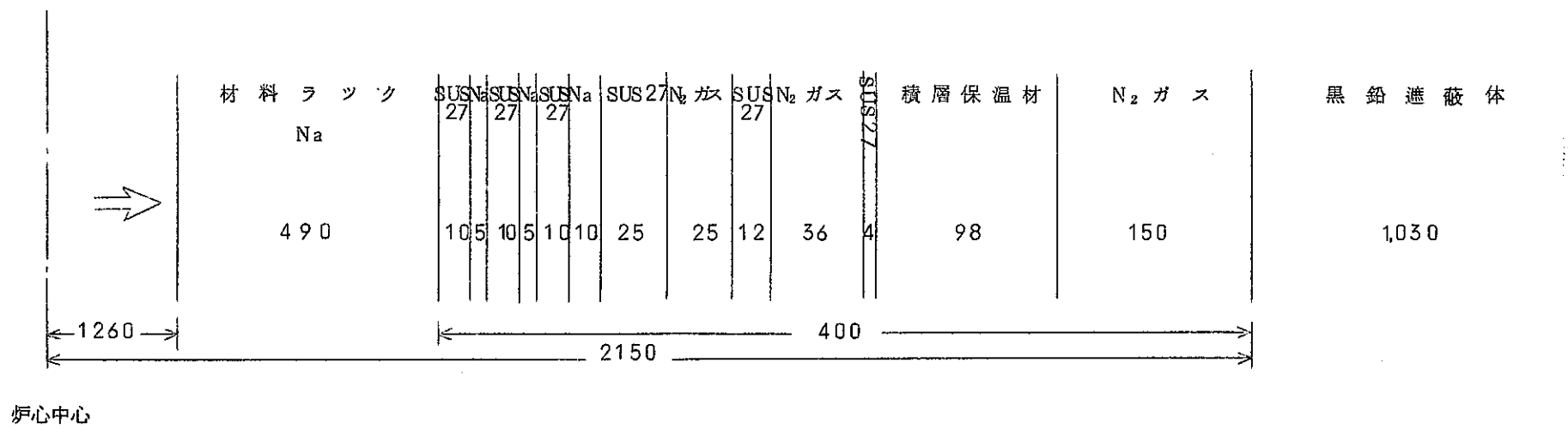
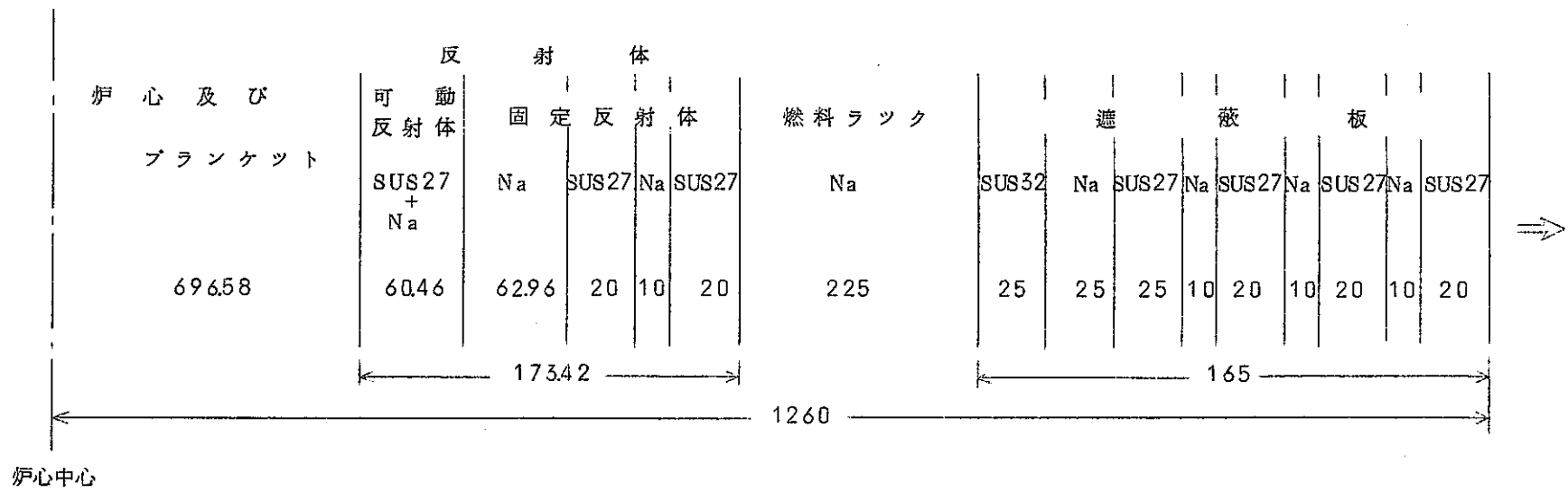


Fig 2-1(1) 常陽半径方向遮蔽構成

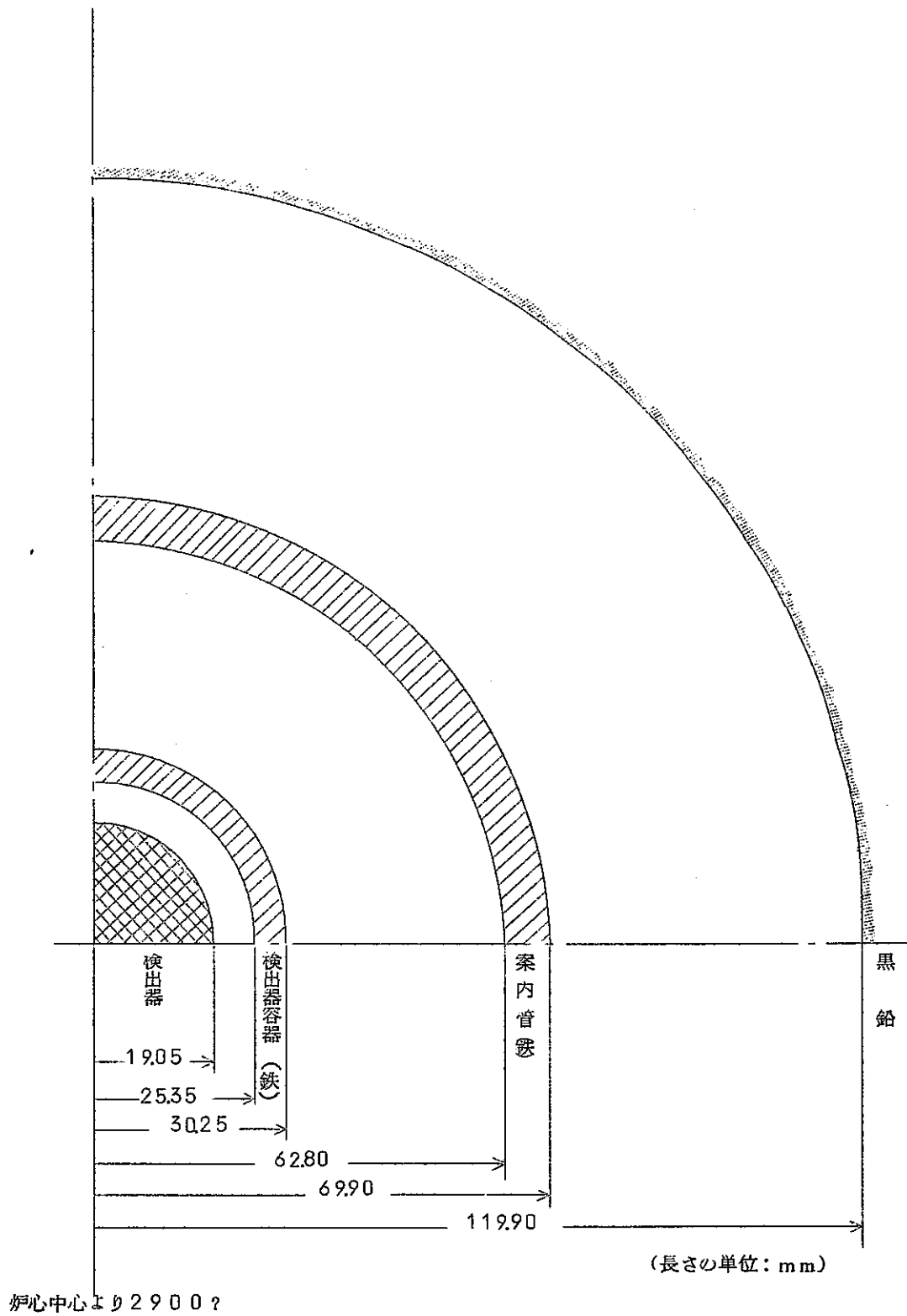


Fig 2-1(2) 常陽黒鉛遮蔽体・中性子検出器付近

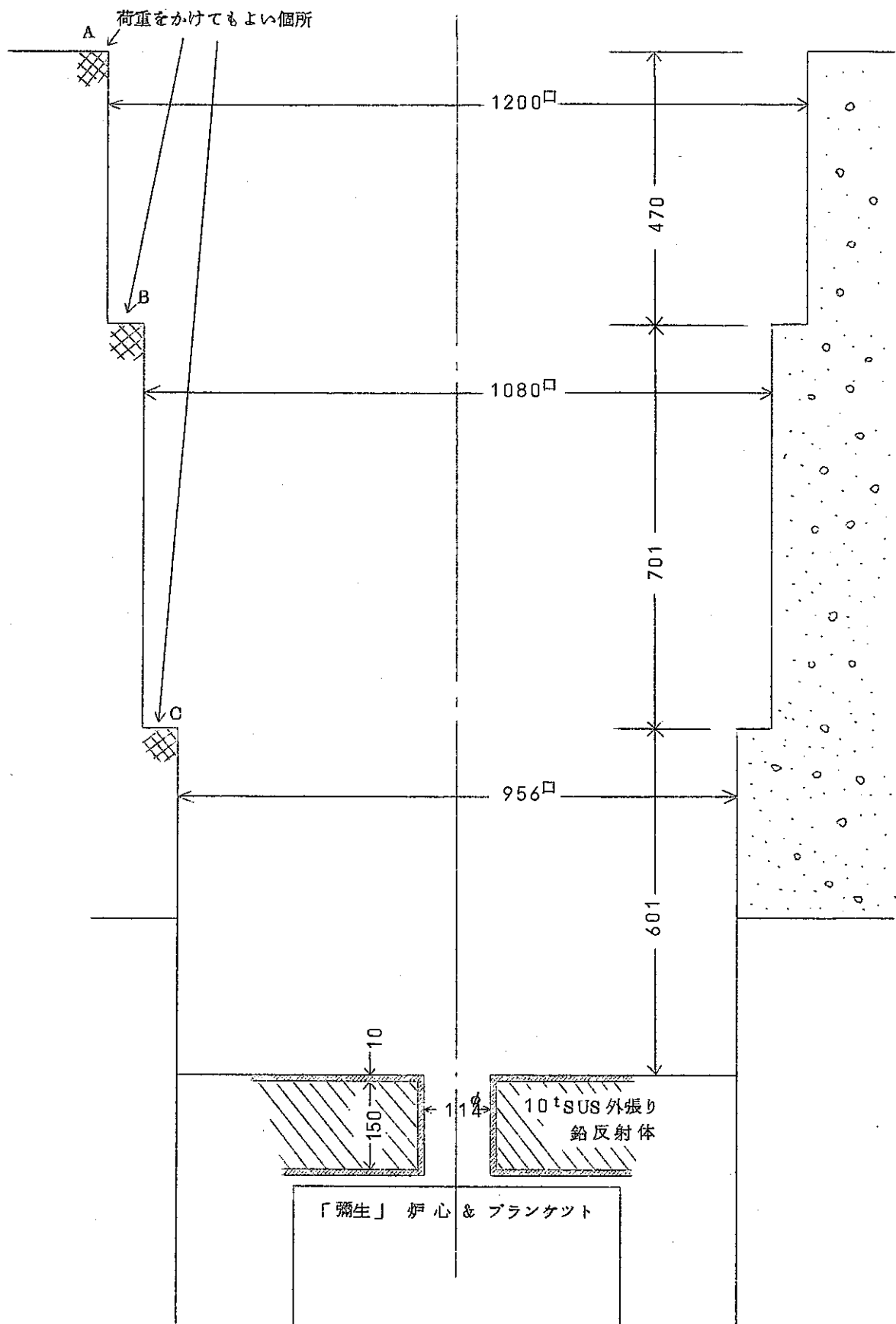


Fig. 2-2 「彌生」 実験孔

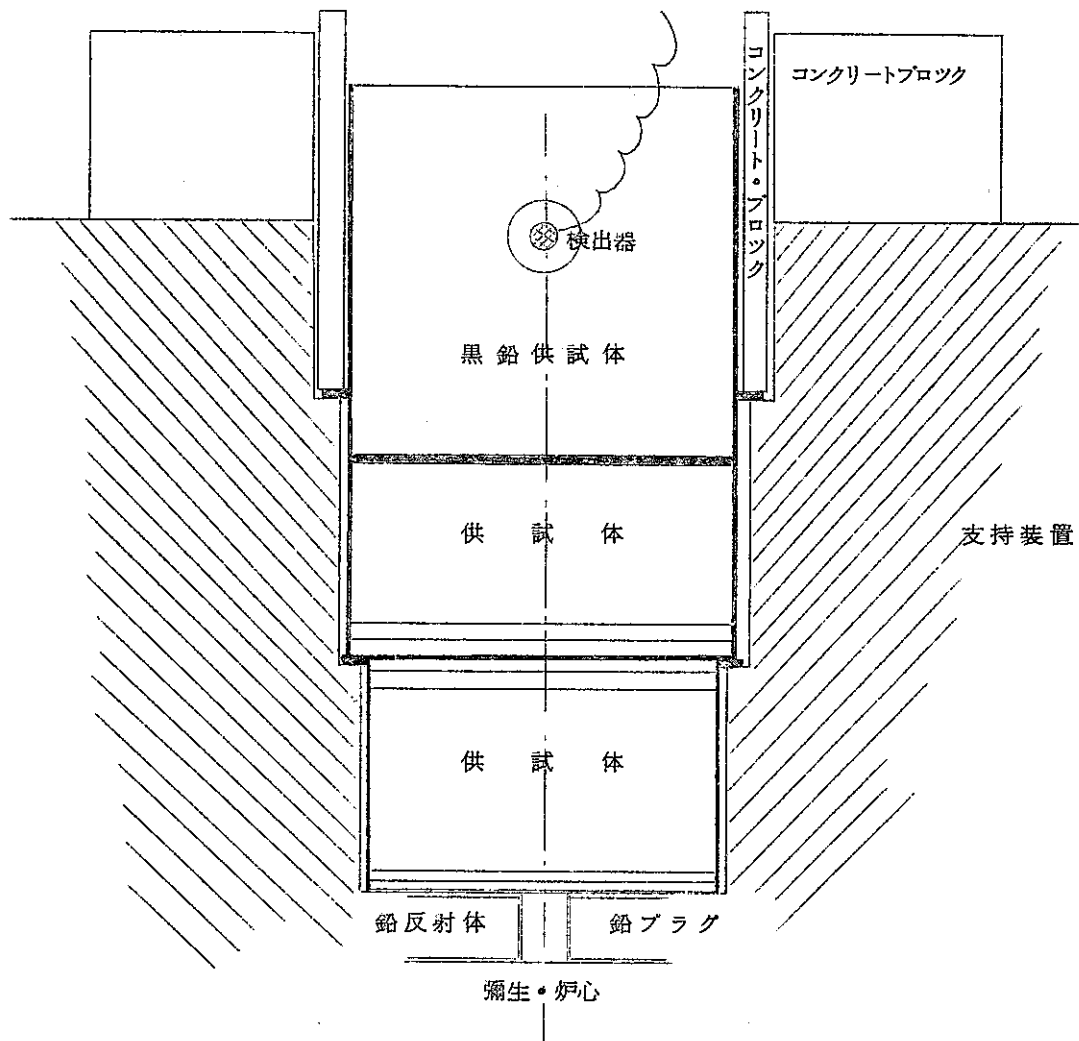
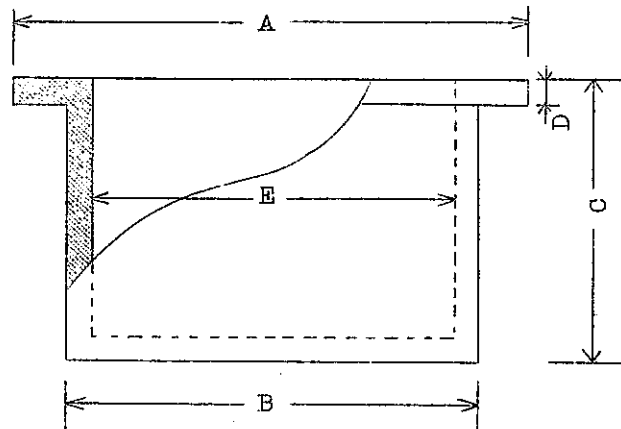


Fig.2-3 実験装置

Fig. 2-4 実験供試体(1)

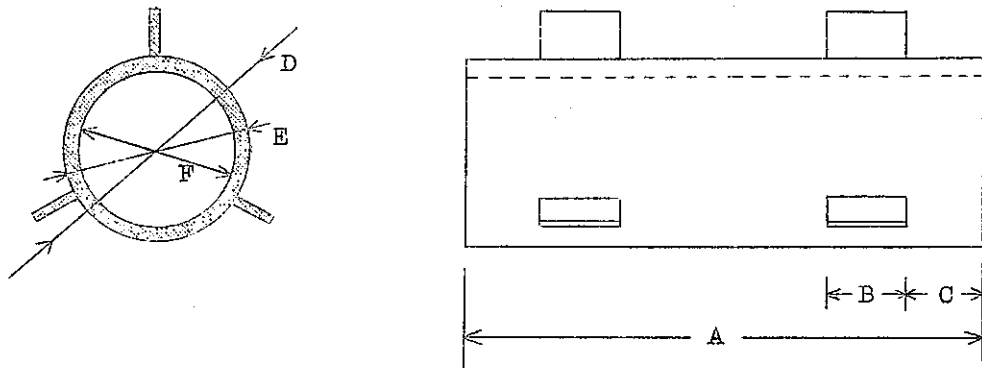
支持容器 (材質は底板のみ SUS27, 側板及びフランジは SS41)



	A	B	C	D	E	重量	重量*
支持容器(a)	1074□	937□	635	40	883□	681. Kg2	2,646. Kg6
支持容器(b)	1193□	1063□	705	49	1010□	814. 1	2,452. 9

注 : 重量*は各支持容器に平板供試体をセットした場合の重量

検出器案内管及び容器 (材質 SUS27)



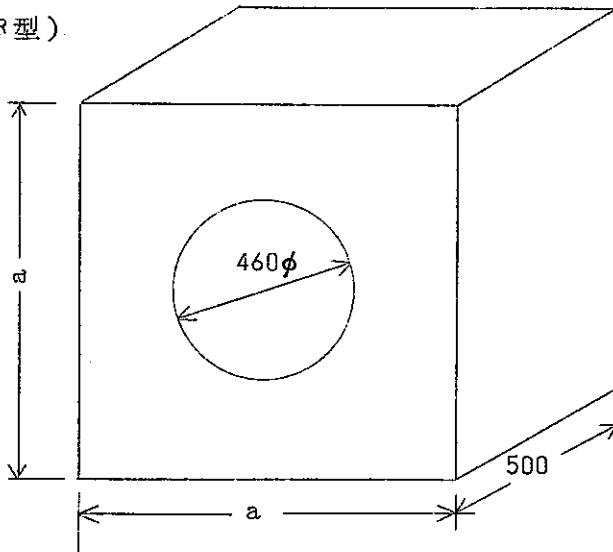
	A	B	C	D	E	F	重量	個数
検出器案内管	1000	79.5	119.0	199.3	140.0	120.5	22. Kg6	1
検出器容器	1000	-	-	-	60.5	49.5	7. 8	1

注 : 検出器容器には三脚を用いなかった。

Fig. 2-4 実験供試体(2)

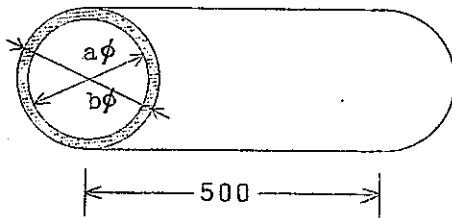
黒鉛供試体

(BR型)



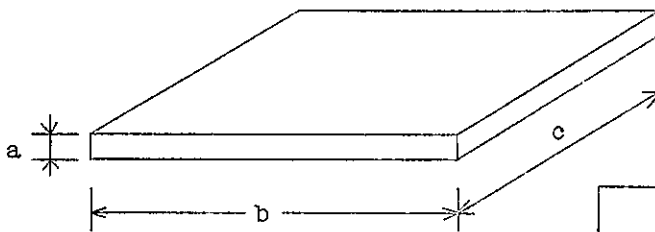
	a	重量	個数
BR-1	1000	658.4 ^{Kg}	1
BR-2	900	508.8	1

(R型)



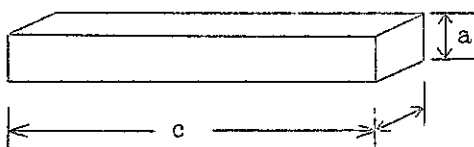
	a	b	重量	個数
R-1	300	460	75.4 ^{Kg}	2
R-2	200	300	31.0	2

(PL型)



	a	b	c	重量	個数
PL	50	500	450	17.8 ^{Kg}	2

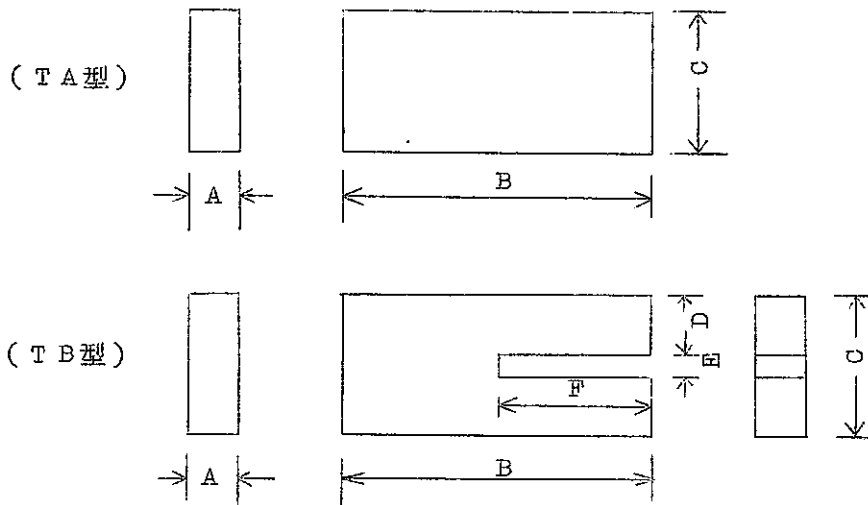
(G型)



	a	b	c	重量	個数
G-1	50	100	900	7.1 ^{Kg}	5
G-2	50	100	1000	7.9	10

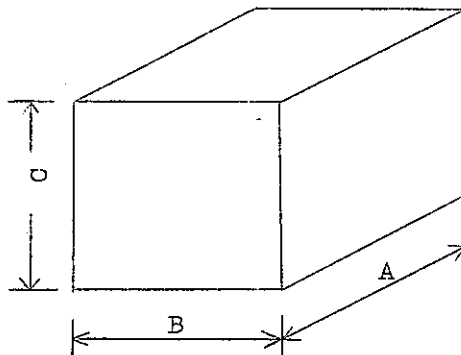
Fig. 2-4 実験供試体(3)

漏洩防止用コンクリートブロック



	A	B	C	D	E	F	重量	個数
TA	90.0	1001.0	332.0	-	-	-	65.3 ^{Kg}	11
TB	91.5	1001.5	332.0	151.5	31.0	500.0	62.4	1

(BC型)



	A	B	C	重量	個数
BC	605	505	505	330 ^{Kg}	12

	厚さ	モックアップ 厚さ	延距離	モックアップ構成
黒鉛	1030	1030	217.4	
⑳	SUS27	4	4	1144 } SUS27 16mm×1枚+25mm×1枚
	SUS27	12	12	
	SUS27	25	25	
㉒	Na	10	10	1103 Al 10mm×1枚
㉑	SUS27	10	10	1093 SUS27 10mm×1枚
㉐	Na	5	5	1083 Al 5mm×1枚
㉏	SUS27	10	10	1078 SUS27 10mm×1枚
㉍	Na	5	5	1068 Al 5mm×1枚
㉌	SUS27	10	10	1063 SUS27 10mm×1枚
㉋	材料ラック (Na)	490	490	1053 Al 25mm×16枚+20mm×2枚
㉉				Al 25mm×2枚
㉈	SUS27	20	20	563 SUS27 20mm×1枚
㉇	Na	10	10	543 Al 10mm×1枚
㉆	SUS27	20	20	533 SUS27 20mm×1枚
㉅	Na	10	10	513 Al 10mm×1枚
㉄	SUS27	20	20	503 SUS27 20mm×1枚
㉃	Na	10	10	483 Al 10mm×1枚
㉂	SUS27	25	25	473 SUS27 25mm×1枚
㉁	Na	25	25	448 Al 25mm×1枚
㉀	SUS32	25	25	423 SUS27 25mm×1枚
㉀	燃料ラック (Na)	225	225	390 Al 25mm×9枚
㉀	SUS27	20	20	173 SUS27 20mm×1枚
㉀	Na	10	10	153 Al 10mm×1枚
㉀	SUS27	20	20	143 SUS27 20mm×1枚
㉀	Na	62.96	63	123 Al 12mm×4枚+15mm×1枚
㉀	可動反射体	60.46	60	60 SUS27 16mm×3枚+Al6mm×2枚

0

Table 2-1 モックアップ供試体

Table 2-2 モックアップ平板供試体

	番号	材質	板厚	寸法	枚数	重量/枚	総重量	備 考
pt.P→	1	SUS27	20 ^{mm}	937 ^{mm} □	1	140.7 ^{Kg}	140.7 ^{Kg}	支持容器(a)の底板
	2の1	SUS27	16	880□	2	99.0	198.1	支持容器(a)に入る
	2の2	Al	6	880□	2	12.5	25.0	＃
	3の1	Al	12	880□	4	25.0	100.0	＃
	3の2	Al	15	880□	1	31.2	31.2	＃
	2の1'	SUS27	16	880□	1	99.0	99.0	＃
	4	Al	10	880□	1	20.8	20.8	＃
	5	SUS27	20	880□	1	123.8	123.8	＃
	6	Al	25	880□	9	52.0	468.1	＃
	7	SUS27	25	880□	1	154.8	154.8	＃
	8	Al	25	880□	1	52.0	52.0	＃
	9	SUS27	25	880□	1	154.8	154.8	＃
	10	Al	10	880□	1	20.8	20.8	＃
	11	SUS27	20	880□	1	123.8	123.8	＃
	12	Al	10	880□	1	20.8	20.8	＃
	13	SUS27	20	880□	1	123.8	123.8	＃
	14	Al	10	880□	1	20.8	20.8	＃
	15	SUS27	20	880□	1	123.8	123.8	＃
	16	Al	25	880□	2	52.0	104.0	＃, 1~16の合計 実測値~630 ^{mm}
pt.R→	17	SUS27	20	1063□	1	180.5	180.5	支持容器(b)の底板
	18	Al	20	1001□	1	41.6	41.6	支持容器(b)に入る
	19の1	Al	25	1002□	16	67.5	1079.6	＃
	19の2	Al	20	1003□	1	54.0	54.0	＃
	20	Al	5	1001□	1	13.5	13.5	＃
	21	Al	5	1001□	1	13.5	13.5	＃
	22	SUS27	10	1002□	1	80.3	80.3	＃
	23	Al	10	1001□	1	27.0	27.0	＃
	24の1	SUS27	16	1002□	1	128.5	128.5	＃
	24の2	SUS27	25	1001□	1	200.8	200.8	＃, 17~24の合計 実測値~530 ^{mm}
pt.S→	合計				58		3925.4	

注：この表の上から順に弥生実験孔の炉心側（下側）へ挿入されていく

Table 2-3 黒鉛供試体の組成

材 質 日本カーボン EG-1
 比 重 1.58

灰分	Fe	V	S	Ca	Ti	Al	B	C
0.114	0.033	0.010	0.115	0.0012	0.009	0.031	0.00013	残り

(単位 %)

3. 実 験

東京大学・原子力工学研究施設「弥生」原子炉の上部コラムにおいて、重コンプラグを除去した後、「弥生」の鉛反射体（通称B反射体）に接して、「常陽」モックアップ供試体（可動反射体より外側を模擬する）を設置し、その境界、モックアップ供試体内の2点及び黒鉛遮蔽体内の起動系検出器位置に相当する位置における中性子束の値を実験的に求める。

(1) 実験実施体制

本実験は各グループからの奇合世帯が東大原子炉を利用して行う実験であるために、実験をスムーズに進め、対東大との連絡を円滑にするために、実験の実施体制を確立しておく必要があつた。そこで、日本原子力事業株式会社の中井優を動燃囑託という形で実験の準備及び実施の責任者として実験グループをまとめさせることとし、対東大及び対他の実験グループとの連絡の窓口として交渉にあたらせた。

(2) 実験装置

(i) 「弥生」原子炉の概要及び特徴

「弥生」の燃料は直径約124mm、高さ約125mmの235U約93W/O濃縮ウラン直円柱形で、燃料の周囲は235U約0.4W/O金属劣化ウランより成る厚さ約100mmのブランケットで囲まれている。燃料およびブランケットは鉛のA反射体(550mm×550mm×529mm)の中に納められている。

以上の炉心部と制御棒駆動装置および中性子源駆動装置が入つた直方体(約0.6×0.6×7.0m)の鋼製箱が一体になり炉心集合体と呼ばれ、この炉心集合体は炉心集合体駆動装置により同集合体移動用通路に沿つて水平方向に移動し、規定位置に炉心を停止し、機械的に固定される。その際、炉心位置の違いによる反応度の補償はシム棒1により行なわれる。原子炉重コン遮蔽体内運転位置A、BにはA反射体の外周に厚さ約150mmの鉛のB反射体があり、その外側に重コン遮蔽体がある。

制御設備として劣化ウランの安全棒2本、シム棒2本及び調整棒1本がブランケット内に装着され、さらに燃料に接して安全ブロックがある。それら炉心の冷却は空気によつて行ない、フィルターを経て屋外に排出される。

全体の概要および炉心部をFig 3-1～-3に、また、主要特性をTable 3-1に示す。

(ii) 供試体の組立て

- ① 鉛プラグをB反射体貫通部(グローリー、グレージング各ホール相当部)に挿入する。
- ② 支持容器(a)の中に平板供試体(#2～#16)を順次重ねていく。

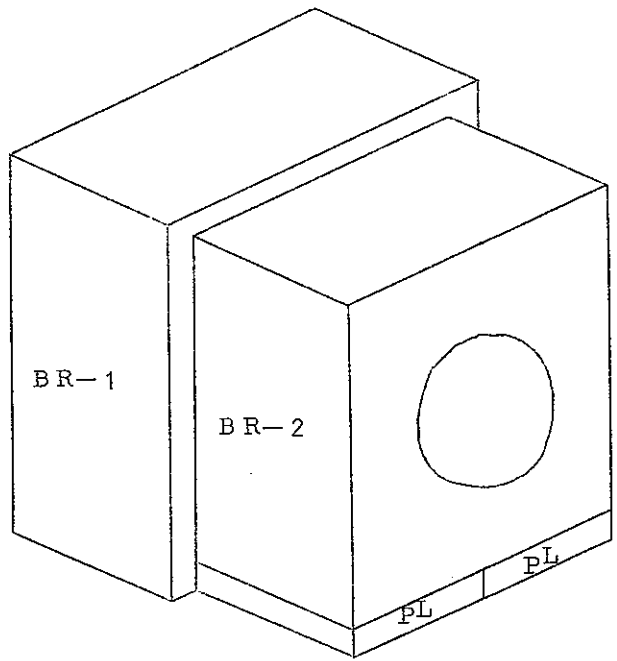
支持容器(a)に平板供試体(#2～#16)を積み重ねたものを、以下供試体Aと称する。

(注) micro fission chamber(abb.MFC)を使用する時は、平板供試体を積み重ねる前に予め、支持容器(a)に設けた検出器ケーブル引出し用溝及び貫通孔を通し、容器(a)の内面の所定位置にセットしておくこと。

- ③ 金箔を用いる場合は、供試体 A の底面及び上面に金箔をはりつける。
- ④ 供試体 A を実験孔下段にセットする。
- ⑤ 支持容器(b)の中に平板供試体 (# 18~# 24 合計 24 枚) を順次積み重ねる。
この状態を供試体 B と呼ぶ。金箔を用いる時は供試体 B の最上面にはりつける。
- ⑥ 供試体 B の上 (# 24-2 sus 平板の上) に、黒鉛供試体 BR-1 を片側の隅に寄せて置く。

- ⑦ 黒鉛供試体 PL 型を 2 枚、 $900 \times 500 \times 50$ の大きさになるように BR-1 に接して設置する。

- ⑧ 2 枚の PL 型黒鉛の上
に BR-2 供試体をのせ、
BR-1 の貫通孔と BR-2
の貫通孔とが落差なく
つながるようにセットす
る。(上図参照)



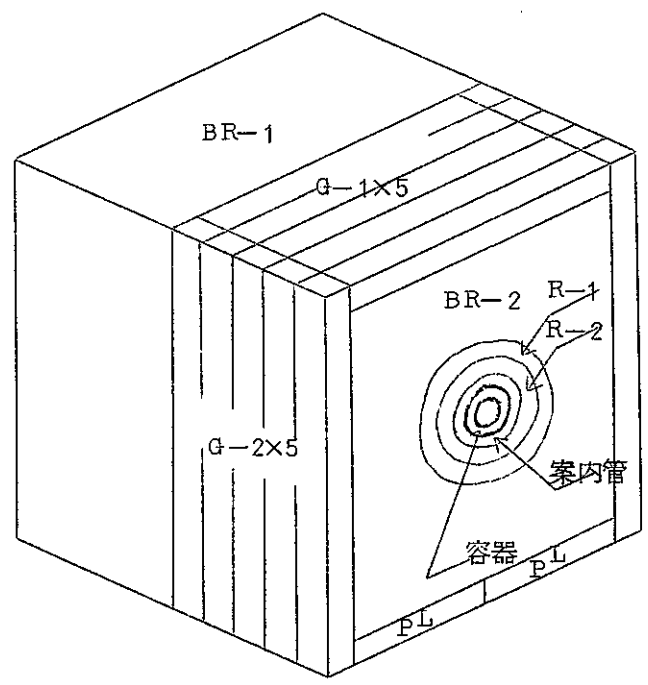
- ⑨ 黒鉛供試体 BR-1、
BR-2 により構成される
貫通孔 ($460 \phi \times 1000$)
に R-1 型供試体を 2 個挿
入し、その内側に R-2 型供試体を挿入する。

- ⑩ R-2 型供試体の内側に検出器案内管を挿入し、更にその内側に検出器容器を挿入する。

- ⑪ BR-2 の両側面及び上面
に黒鉛供試体 G-1 及び G-
2 を並べる。(右図参照)

- ⑫ 黒鉛供試体の内部にセット
された検出器容器の中に P7A
検出器もしくは金箔をセット
する。

- ⑬ 黒鉛供試体をその上に載せ
た供試体 B を実験孔中段にセ
ットする。MFC を使用する
場合はケーブルを支持容器(b)



のフランジ切欠部を通して外に出しておくこと。

⑭ 実験孔壁と黒鉛供試体との間に漏洩防止用コンクリートブロックTA型及びTB型を各周に3枚宛挿入する。TB型はP7Aのケーブル引出用である。

⑮ 原子炉上部のプラットフォームにTA型及びTB型コンクリートブロックを取り囲むように漏洩防止用コンクリートブロックBC型12個を配置する。

以上により、供試体の組立てを完了する。供試体を実験孔に吊り込んだ状態をFig.3-4に示す。

(Ⅲ) 供試体の解体

解体は上に述べた組立ての手順を逆にたどればよい。

① 漏洩防止用コンクリートブロックBC型、及びTA型、TB型の除去。

② 黒鉛供試体を載せたまま供試体Bを実験孔より取り出す。

③ 黒鉛供試体G-1, G-2を除去する。

④ 検出器容器、案内管を貫通孔より取り出す。

⑤ 黒鉛供試体R-1, R-2の取り出し。

⑥ 黒鉛供試体BR-2, PL及びBR-1の除去。

⑦ 供試体Aを実験孔より吊り出す。

⑧ 「弥生」原子炉B反射体貫通孔より鉛プラグ2個を取り出す。

⑨ 支持容器(a)(b)より平板供試体を取り出す。

以上により、供試体の解体は完了するが、供試体Aの炉心に近い側は相当強く放射化されるので、解体作業に当たっては十分注意する必要がある。

(3) 検出器

(i) 金箔による中性子束の測定

$^{197}\text{Au}(n, r)^{198}\text{Au}$ 反応によつて生成する ^{198}Au の崩壊に伴ない放出される β 線と r 線とを同時計数することにより、崩壊率の絶対値を求め、さらに反応率を求める。また、裸の金箔とカドミカバー金箔との反応率の差よりカドミカットオフエネルギー以下のエネルギーを有する熱中性子束の値を求める。

ここで β 線測定用検出器としてはスチルベンシンチレーション検出器を用い、 r 線測定用としてはNaI(Tl)シンチレーション検出器を各の用いた。測定系のブロックダイアグラムをFig.3-5に示す。

また、金箔及びカドミカバーの大きさはそれぞれ次のような値をとる。

金 箔：厚さ 20μ ，大きさ $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ ，重さ約 40mg

カドミカバー：厚さ約 0.5mm

(ii) マイクロフィツションチェンバー(MFC)による中性子束の測定

MFC：大きさ headの部分 $5.8\phi\times 87\text{mm}$

核分裂物質 約90%濃縮 UO_2 約2mg

測定系のブロックダイアグラムをFig.3-6に示す。

(iii) P7A フイツジョンチェンバ(P7A)による中性子束の測定

P7A: 大きさ 38.1 ϕ ×547.1mm (内有感部224mm)

核分裂物質 93%濃縮 U_3O_8 , 約160mgU

測定系のブロックダイアグラムはFig.3-6に同じ。

(4) 実験内容

実験の目的により、以下の5種に分類する。

(i) EXP-1

Fig.3-4に示すP, Q, R及びSの4点に、金箔を裸及びカドミカバーの状態にセット、照射し、 βr 同時計数法により反応率及び中性子束の絶対値を求める。以下の実験の標準となるものである。

(ii) EXP-2

P点(P点より上方に2cm程入った点)にMFCをセットし、R点及びS点にセット、照射した金箔により、EXP-1の結果を用いてMFCの感度較正を行う。すなわち、R点及びS点の結果をEXP-1に規格化することにより、P'点の中性子束の絶対値が外挿されるから、MFCの計数との比より感度が求められる。

(iii) EXP-3

P'点にMFC, Q点にP7Aを各の用い、P, Q, R及びSの各点に金箔を用いる。P'点におけるMFCの計数及びP, R, Sの各点における金箔によるデータを基準にして、P7Aを挿入したことによるQ点の中性子束の低下(flux depression)を求めると共にその時のP7A検出効率を求める。

(iv) EXP-4

P'点にMFC, Q点にP7Aを用い、炉出力を1, 2, 及び5のステップ状に変化させて両者の出力の変化に対する直線性をチェックするとともに、両者の計数の相関を求める。

(v) EXP-5

黒鉛供試体内の起動系検出器用の貫通孔を黒鉛プラグで塞ぎ、ボイドのない状態でのP, Q, R, Sの各点の中性子束を金箔により求める。ボイドのない体系で実験することにより、計算値との比較が容易になる。

以上の実験の他に、金箔の放射化量を適当な値に定めるための予備実験が実施された。

(5) 実験結果

(i) 金箔を用いた実験

実験の結果をTable 3-2のようにまとめることができる。このTable 3-2は裸の金箔に対する結果を実施順に個々にまとめたTable 3-3及びカドミカバーの金箔に対する同様の結

果を与える Table 3-4 をまとめたものである。各実験値は裸の金箔に対しては S 点における値を 2.00×10^6 reaction/s.W に規格化し、カドミカバーの金箔に対しては 1.61×10^6 reaction/s.W になるように規格化した。これは最も計数しやすい強度に金箔が放射化される位置であること。また、P' 点に置いた MFC 及び Q 点にセットされた P7A の影響を殆んど受けない点であることなどの理由により選択された。 2.00×10^6 という値と 1.61×10^6 という値との相対関係は EXP-1(1) の結果より求めたものである。裸の金箔のデータとカドミカバーのそれとは同じ番号の実験にあつては適当な距離を隔てて同時に照射して得たものである。

Table 3-2 の最下欄に熱中性子束（カドミカットオフエネルギー以下のエネルギーの中性子束）の値を、金の熱中性子に対する平均の放射化断面積を 96 バーンとして計算して示す。カドミ比による熱中性子束測定法はカドミ比が 1 に近いような場所においては非常に精度の悪いものとなる。表からも明らかのように P 点、R 点の精度は非常に悪い。したがって計算値との比較の対象として用いる場合には反応率の形で用いるのが妥当である。

実験誤差

a) 計数の誤差

金箔の放射能の測定は、 β - γ 同時計数法により行なつたので、ガンマ計数率、ベータ計数率個々の絶対的な計数効率、崩壊率の絶対値を求める上で問題にならない。しかし、一般的に同時計数の計数率が小さいので、この計数の精度を上げることが重要となつてくる。そこで、同時計数の統計変動ができるだけ小さくなるように測定を行ない、原則として計数値が 1000 を越えるように測定したが、計数率が小さすぎて 1000 カウントするのに時間がかかりすぎる場合は 1200 秒をかぎつて計数した。個々の計数値の統計的な変動は、したがって一般的には 3% 以下であり、ほとんどの場合 1% 以下である。ただし、Q 点における同時計数については、裸の金箔に対して 4%、Ca カバー金箔については 15% 程度の誤差が存在する。

Q 点に関しては、Ca カバー金箔に対する同時計数値の非常に小さいことから生じる誤差を除くために、同じ計数ジオメトリにより測定されたガンマ計数率の比から裸の金箔の値をもとに Ca カバー金箔の値が求められた。

以上の結果より、P、R、S の三点に対する崩壊率の統計変動による誤差は 3% 以下であるが、Q 点に関しては 5% 程度の誤差が含まれることになるだろう。

b) 実験値の分散

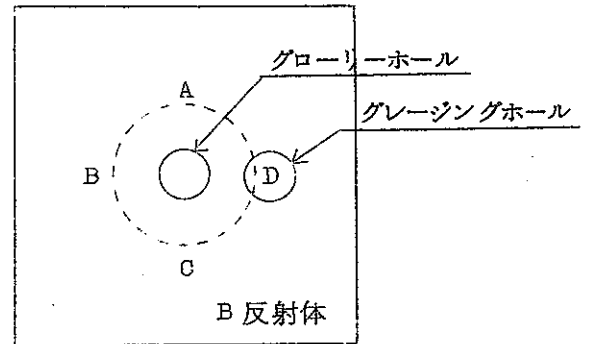
各測定点に対するデータのうち、同一の点に対するものの精度は近似的に等しいと考えられるので、各実験シリーズのそれぞれの測定点に対する結果の算術平均を最確値とし、その平均二乗誤差を求めて誤差とし、Table 3-2 の誤差の欄に示した。

c) 測定点の位置の誤差

本実験に使用した弥生原子炉の上部コラムにはグローリーホール、及びグレージングホール用に炉心まで貫通する円筒形のポイドが存在する。

このポイドのB反射体の部分には鉛プラグを挿入して補正したが、このポイドによるしずみは大きくP点の測定に関してはかなり影響したものと想像される。しかし、炉心から遠い部分ではかなりその効果は弱まるであろう。

そこで、P点の測定に関しては右図に示すような \widehat{ABC} の半円周上に金箔をセットし、グレージングホールが存在する \widehat{CDA} の半周には金箔を用いなくした。



中性子の透過方向に沿った位置の誤差はせいぜい1mm程度であり、しかもP、R、S及びQの4点の相対的

な位置関係は常に保たれている。したがって、炉心とP点との間が1mmずれたとしても空気の層に1mmの増減があるだけで、P点への入射エネルギースペクトルに変化はないから、P~Qの4点の実験値の相対的な強度関係に変化をもたらさない。

(ii) fission chamber による実験

Fig.3-7にP'点にセットされたMFCの炉出力500W時におけるパルス波高分布(積分曲線)を示す。この図には検出器バイアス0の時のパルス波高分布も与えられている。後者の曲線は検出器バイアスを印加して、線源を除去した時の分布、すなわちノイズ分布と殆んど同じである。Fig.3-8はQ点にセットされたP7A検出器の500W出力時のパルス波高分布とノイズのそれとを示す。

Fig.3-9はFig.3-7の結果より、ノイズ除去のためのディスクリレベルを0.9にして、P'点に置かれたMFCにより測定した炉出力と計数率との関係を示す。炉出力100Wまでは比例関係が保たれている。検出器バイアス100voltに対して計数率は2.5cps/Wであり、バイアス200voltに対しては14cps/Wである。Fig.3-10はP7A検出器によるQ点における測定結果である。Fig.3-8を参考にしてディスクリレベルは0.7にとつてある。計数率は検出器バイアス200Voltに対して10cps/Wである。

(6) 考 察

設計法の確認及び設計への反映等について後述することにし、本節では触れない。

(i) 黒鉛遮蔽体中の貫通孔の効果及び検出器による中性子束の低下

Exp-1とExp-5とについてQ点における熱中性子束を比較することにより、遮蔽体内に貫通孔を設け、検出器案内管及び支持容器用パイプを挿入したことによる熱中性子束の減少を求めることができる。すなわち、 $4.2 \times 10^3 (n/cm^2 \cdot s)/W$ が $8.1 \times 10^2 (n/cm^2 \cdot s)$

／Wに減少する。約1/2に減少する。

次にEXP-1とEXP-3とを比較すると、P7Aによる熱中性子束のdepressionが求まる。すなわち、 $8.1 \times 10^2 (n/cm^2 \cdot s) / W$ が $5.8 \times 10^2 (n/cm^2 \cdot s) / W$ に低下する。約30%減少する。

前者の熱中性子束の減少は実機のような大きな体系にあつては多少は改善されるものと考えられる。何故なら、本モックアップ構成では長さ100cmに対して半径23cmの貫通孔があることになり、貫通孔の軸方向の中性子束の漏れが非常に大きいと想像される。それに対して実機の場合には、長さが十分あるので、漏れは少くなる方向になると予想されるからである。しかし、後者の中性子束の減少はモックアップ、実機を問わず生じる問題である。

(ii) 供試体支持容器(a)(b)と原子炉壁との間隙からのストリーミングの効果

支持器(a)(b)は上方から実験孔内に吊り込む構造になつており、しかもその中に平板供試体を収納した場合に各の2.6トン、2.5トンという重量を持つため、原子炉壁を傷つけることを懸念して、炉壁間公称距離956mm及び1080mmに対して、容器の外側距離をそれぞれ937mm、1063mmと余裕をもつて製作した。その結果、この平均10mmの間隙をストリーミングする中性子について検討する必要性が生じた。すなわち、この間隙を通つた後、拡散又は散乱によつて各測定点へ到達する中性子について考察しなければならない。

検出器として金箔を使用した際、その反応率を計算する場合、その放射化断面積において大きな部分を占めるのは8群近似^{*}を行う時、第5～第8の4群である。ところで第8群熱中性子はストリーミングの後、供試体内部に拡散する前に支持容器の側板、厚さ約25mmの鋼板により吸収されるものと考えられる。したがつて測定点に寄与するのは、より高エネルギーの中性子であつて、供試体において減速、拡散したものが主であると予想される。

* 8群エネルギー群

第1群	10.5 MeV	～	2.5 MeV
第2群	2.5 MeV	～	0.8 MeV
第3群	0.8 MeV	～	0.1 MeV
第4群	100 keV	～	4.65 keV
第5群	4.65 keV	～	0.215 keV
第6群	215 eV	～	10 eV
第7群	10 eV	～	0.465 eV
第8群	0.465 eV以下		

高速中性子に対するスロットからのストリーミング量の評価は Reactor Handbook に
よると、line of sight 法による近似計算で上記スロット（巾 10mm ，長さ 635mm ）透
過後は入口の値の約 $1/50$ になる。一方、2次元拡散計算によると第7群中性子の $P \rightarrow R$
の減衰は 0.08 で、ストリーミングによるものよりも大きく示されている。これは line-
of-sight 法の適用がふさわしくないことを示しているものと想像されるが、スロット
を構成するのが炉壁側が $\text{sus}27$ であり、支持容器側が $\text{s} \text{ s} 41$ であることを考えれば、正
しい計算がなされたとしてもそう大きな値にはならないであろう。したがって、弥生原子
炉の炉心が小さく、中性子の方向性がこの場合透過方向に強いということなどを併せ考え
れば、bulk を透過に比べてストリーミングは第一近似として考慮せずともよいと考えら
れる。

(iii) 核分裂計数管の効率

a) P7A 核分裂計数管

Fig. 3-10 より検出器バイアス 200V 時の P7A の Q 点における計数率は 10cps/W である。
一方、Q 点の熱中性子束は P7A がなくて空気の場合には $8.1 \times 10^2 (\text{n/cm}^2 \cdot \text{S})/\text{W}$ であり、P7A が
存在する場合には $5.8 \times 10^2 (\text{n/cm}^2 \cdot \text{S})/\text{W}$ である。したがって検出効率はそれぞれに対して 1.2×10^2 ，
及び 1.7×10^2 である。Q 点の熱中性子束はまわりを取り巻く黒鉛体系によつて十分豊富になつて
おり、測定値は十分に正確な値を示していると考えることができる。また、P7A 検出器も分裂
物質の組成からみて、十分良い熱中性子検出器である。ここで問題となるのは、検出器
の有感部分が 224mm と実験体系の大きさに比べて長すぎることである。その結果、均一
な場において照射したことにならず、検出器の軸と平行な方向に分布を有する場に置か
れたことになることである。さらに、Fig. 3-8 から明らかなようにディスクリのレ
ベルによつて計数率が大きく変化することである。たとえば、ディスクリレベルを 0.4
にすると 0.7 の時の計数率の 3.5 倍の計数率を得、効率は各の 4.2×10^2 及び 5.8×10^2
となる。しかしながら、検出器のケーブル自体がノイズを拾いやすい構造を有し、実際
に常陽で用いる場合にもつて条件の悪い状態で測定する可能性のあることなどを考え合
せれば、ディスクリレベルを低くすることは危険である。したがって、検出効率として
は、ディスクリレベル 0.7 の時の値を得たこととする。この値は仕様値より約 1 桁低い。

b) MFC 核分裂計数管

MFC は約 90% 濃縮 UO_2 を分裂物質としているから、通常の場合には熱中性子検出
器と考えてよいが、この実験の場合のように中性子のエネルギースペクトルが高い方に
かたよつていて、普通の意味での熱中性子は非常に少ないと想像される場合には熱中性
子のみを検出器とみなしてよいがどうか疑問である。Table 3-2 によれば、MFC を
セットした点 P' の熱中性子束は近似的に点 P のそれに等しいと仮定すれば 1.2×10^4
 $(\text{n/cm}^2 \cdot \text{S})/\text{W}$ である。P' と P とは $\text{SUS}10\text{mm}$ を隔てているが、8群拡散計算による

と低エネルギー中性子の SUS10 mm 透過による減衰はせいぜい10%であるので、上の仮定を用いることができる。ところで Fig. 3-9 の結果によると、MFC の計数率は検出器バイアス100 Volt に対して2.5 cps/W, 200 Volt に対して14 cps/W であるから、検出効率はそれぞれのバイアス電圧に対して 2×10^{-4} , 及び 1×10^{-3} を得る。しかし、ここに求めた効率は熱中性子束の値自体が大きな誤差を含んでいること、MFC が前述のように単純な熱中性子検出器とは考えにくいこと、さらにMFC の計数率が Fig. 3-7 から明らかなようにディスクリのレベルによつて大きく左右されることなどを考えれば、あまり信用できる値ではない。一応の目安とする値である。

(V) 弥生原子炉の核計装への疑問

Fig. 3-9 及び Fig. 3-10 を見ると、異つた特性の計数管を用いて、異つた計数率の点で測定されたデータについて、いずれも炉出力100W 以上で、低出力から100W まで続いてきた直線性がくずれ、測定値はその直線より下にきている。この事実は核計装に問題があることを予想させる。それぞれの測定の炉出力200W に対する計数率と500W に対するものとを結ぶと従来直線と同じ勾配をもっている。したがつて炉出力とその表示との間には一次の比例関係が存在するであろう。

Table 3-1 東大高速中性子源炉「弥生」主要特性一覧表（注：下線は計算値を示す。）

1. 熱出力(最大)	2 kW
2. 中性子束(最大)	$0.8 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec.}$
3. 燃料 材濃縮 形概略寸 被装荷	質式覆量 金属ウラン ^{235}U 約93W/ 軸方向水平, 円柱形, 三段構造 $124 \phi \times 151 \text{ mm}$ 0.7 mm厚ステンレス鋼 28.1 kg
4. ブランケット 材形被寸装荷	質式複法量 劣化ウラン(^{235}U 約0.4W/。 中空円柱形 0.7 mm厚ステンレス鋼(内側), 5 mm厚(外側) 100 mm厚 約500 kg
5. 反射体 材形被寸	質式覆法 鉛 中空立方形 約10 mm厚ステンレス鋼 約550 mm × 550 mm × 530 mm
6. 冷却 方冷却溝 冷却溝	式溝幅量 強制吸出通風冷却 環円筒状 約3 mm 3.6 Nm ³ /min
7. 制御装置 材形位本寸法 安全ブロック 安全棒 シム棒 調整棒	質状置数 劣化ウラン(^{235}U 約0.4W/。 円柱形 ブランケット内 安全ブロック1, 安全棒2, シム棒2, 調整棒1 約 $124 \phi \times 100 \text{ mm L}$ 約 $55 \phi \times 233 \text{ mm L}$ 約 $60 \phi \times 233 \text{ mm L}$, 約 $45 \phi \times 233 \text{ mm L}$ 約 $40 \phi \times 233 \text{ mm L}$ } 0.7 mm SUS 被覆
8. 制御棒反応度 過剰反応度 安全ブロック 安全棒(2本) シム棒(2本) 調整棒	1.7% $\Delta K/K$ (鉛中速中性子内) 2% $\Delta K/K$ 0.83% $\Delta K/K$, 0.85% $\Delta K/K$ 0.97% $\Delta K/K$, 0.67% $\Delta K/K$ 0.63% $\Delta K/K$
9. 動特性パラメタ 炉心熱膨脹係数 トツプラー係数 即発中性子寿命 遅発中性子割合	$-1.6 \times 10^{-5} \Delta K/K^\circ\text{C}$ $-2.0 \times 10^{-8} \Delta K/K^\circ\text{C}$ $2.1 \times 10^{-8} \text{ sec}$ 0.725%

Table 3-2 Reaction rates and thermal neutron flux

	P	R	S	Q	note
bare-Au, reactions/s.W (error)	8.25×10^7 ($\pm 7.0\%$)	7.73×10^6 ($\pm 3.2\%$)	2.00×10^6	8.92×10^4 6.39×10^4 4.05×10^5	Exp. 1 & 2 Exp. 3 Exp. 5
Cd-covered Au, reactions/s.W (error)	8.13×10^7 ($\pm 3.9\%$)	7.26×10^6 ($\pm 5.0\%$)	1.61×10^6	1.17×10^4 6.39×10^3 4.05×10^5	Exp. 1 & 2 Exp. 3 Exp. 5
Cd-ratio (error)	1.014 ($\pm 10.9\%$)	1.063 ($\pm 8.2\%$)	1.242	7.63 7.36 98.5	Exp. 1&2 Exp. 3 Exp. 5
thermal flux, (n/cm ² .s)/W (error)	1.2×10^4 ($\pm 600\%$)	4.8×10^3 ($\pm 130\%$)	4.1×10^3	8.1×10^2 5.8×10^2 4.2×10^3	Exp. 1&2 Exp. 3 Exp. 5

Note: The data of reaction rates are multiplied by 10^{24} .

Table 3-3 Reaction rates of bare-Au detector

(multiplied by 10^{24})

EXP. NO.	P	R	S	Q
EXP-1 (1) 500W × 1H	8.13×10^7	8.00×10^6	2.00×10^6	9.37×10^4
EXP-1 (2) 500W × 1H	7.46×10^7	7.45×10^6	1.90×10^6	8.05×10^4
EXP-2 (1) 100W × 2H	-	7.03×10^6	1.84×10^6	-
EXP-2 (2) 500W × 1H	-	7.33×10^6	2.00×10^6	-
EXP-3 500W × 3H	7.21×10^7	6.89×10^6	1.79×10^6	5.72×10^4
EXP-5 500W × 1H	7.87×10^7	6.89×10^6	1.73×10^6	3.50×10^5
PRE-EXP 100W × 1H	8.09×10^7	6.64×10^6	2.19×10^6	5.29×10^4

Table 3-4 Reaction rates of Cd-covered Au detector

(multiplied by 10^{24})

EXP. No.	P	R	S	Q
EXP-1(1) 500W × 1H	8.32×10^7	7.73×10^6	1.61×10^6	1.37×10^4
EXP-1(2) 500W × 1H	7.93×10^7	7.19×10^6	1.59×10^6	1.06×10^4
EXP-2(1) 100W × 2H	-	6.85×10^6	1.62×10^6	-
EXP-2(2) 500W × 1H	-	7.42×10^6	1.74×10^6	-
EXP-3 500W × 3H	6.95×10^7	6.69×10^6	1.45×10^6	7.81×10^3
EXP-5 500W × 1H	7.77×10^7	6.83×10^6	1.48×10^6	3.78×10^3
PRE-EXP 100W × 1H	7.77×10^7	6.62×10^6	1.59×10^6	6.80×10^3

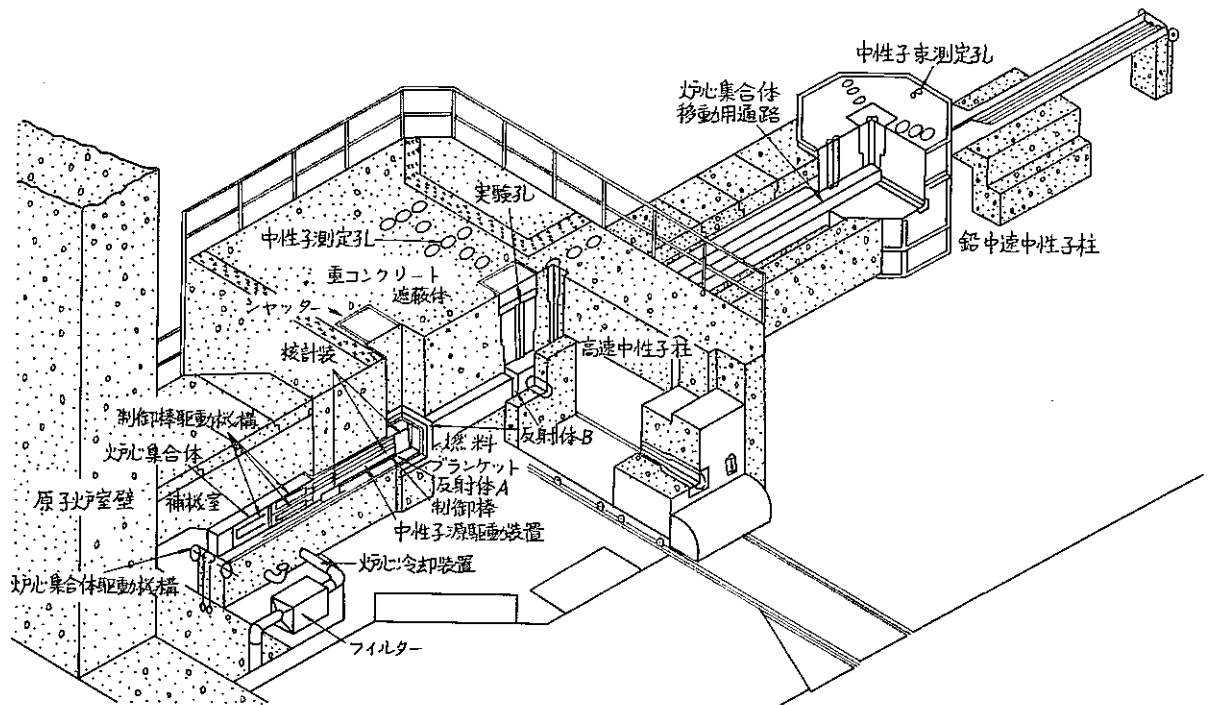


Fig 3-1 弥生原子炉

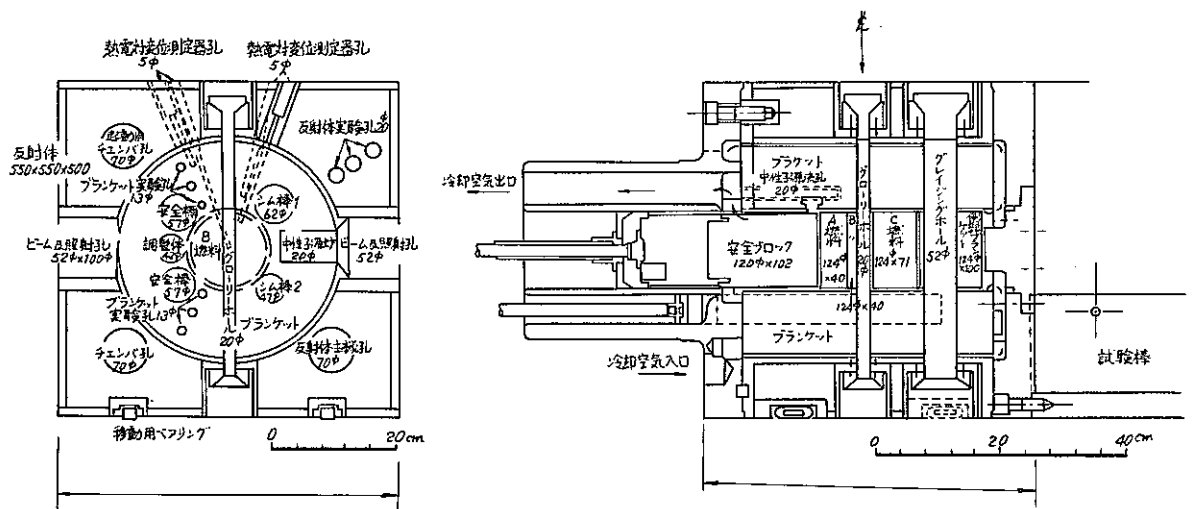


Fig 3-2 炉心部概要

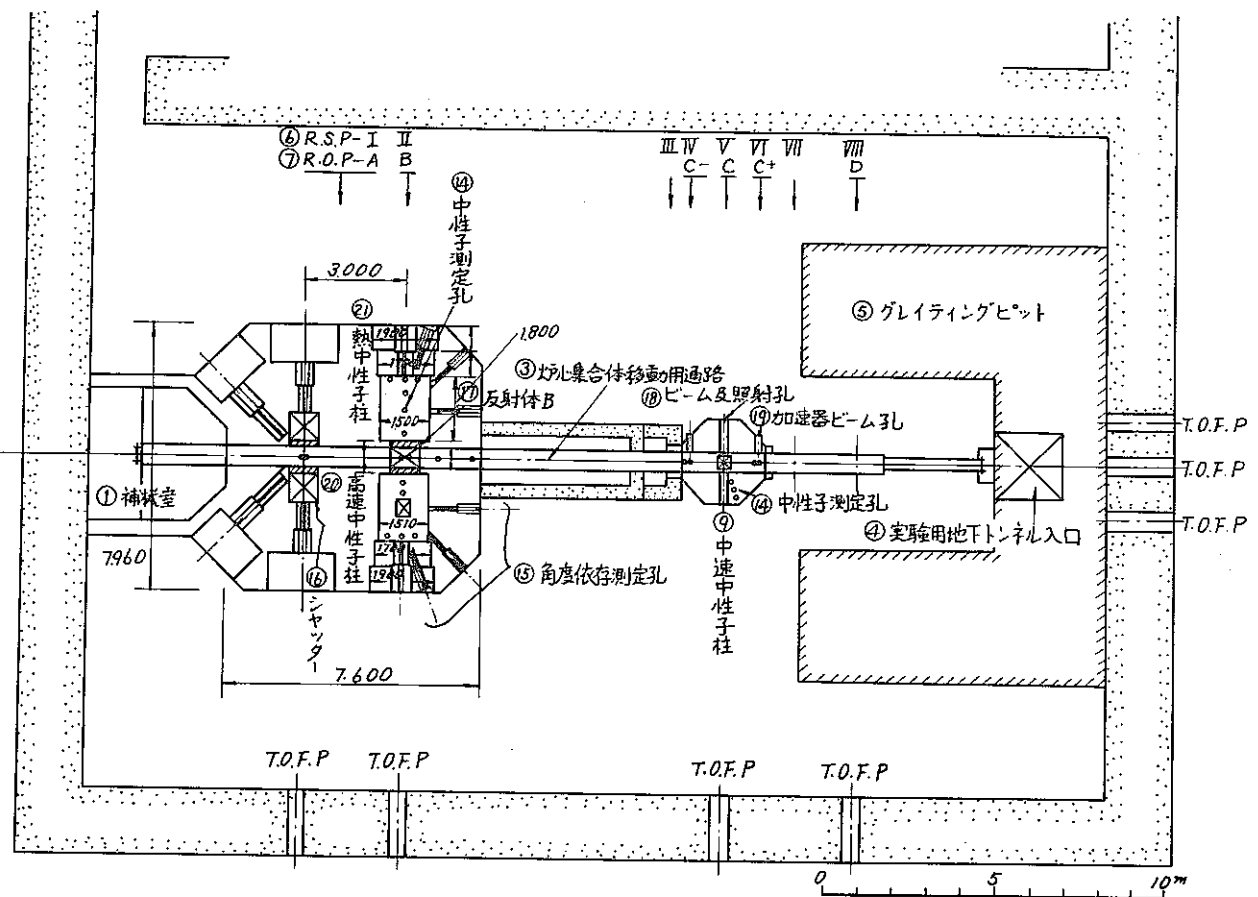
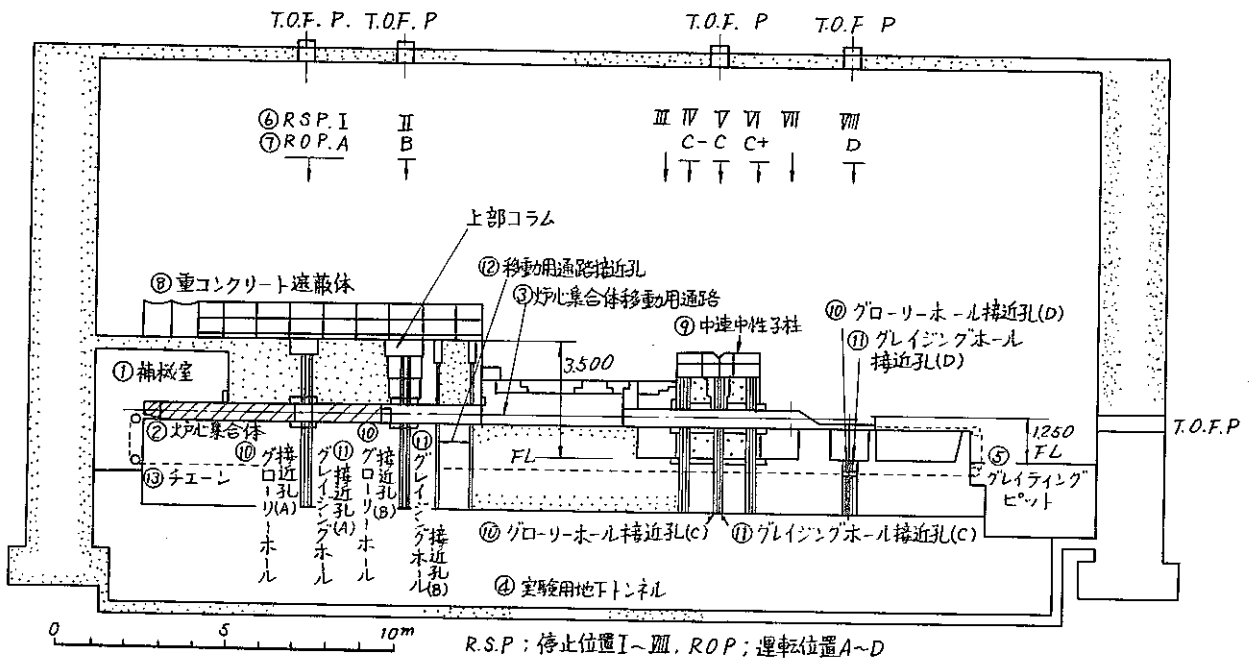


Fig 3-3 東大高速中性子源炉「弥生」概要

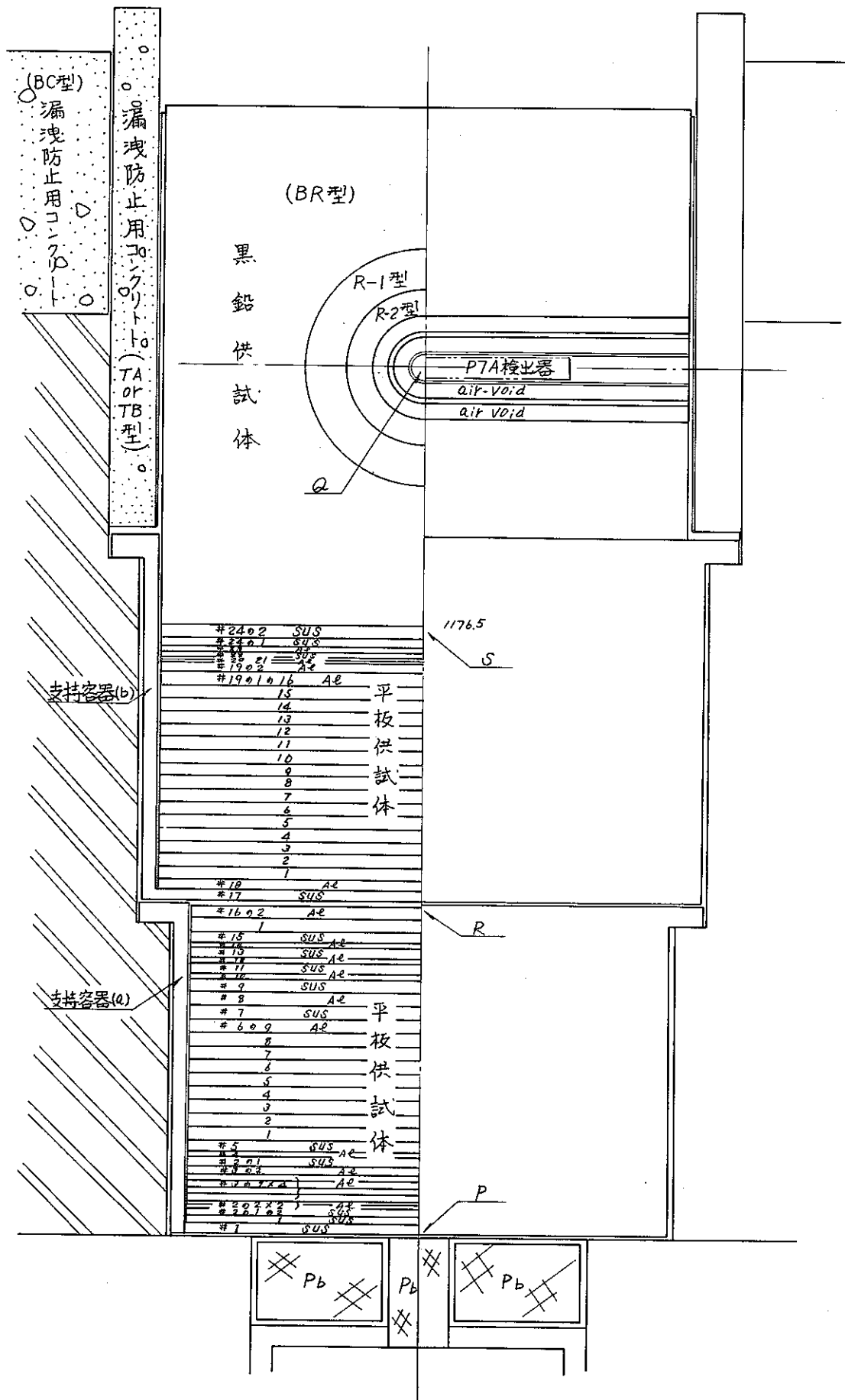


Fig 3-4 モックアップ供試体吊込図

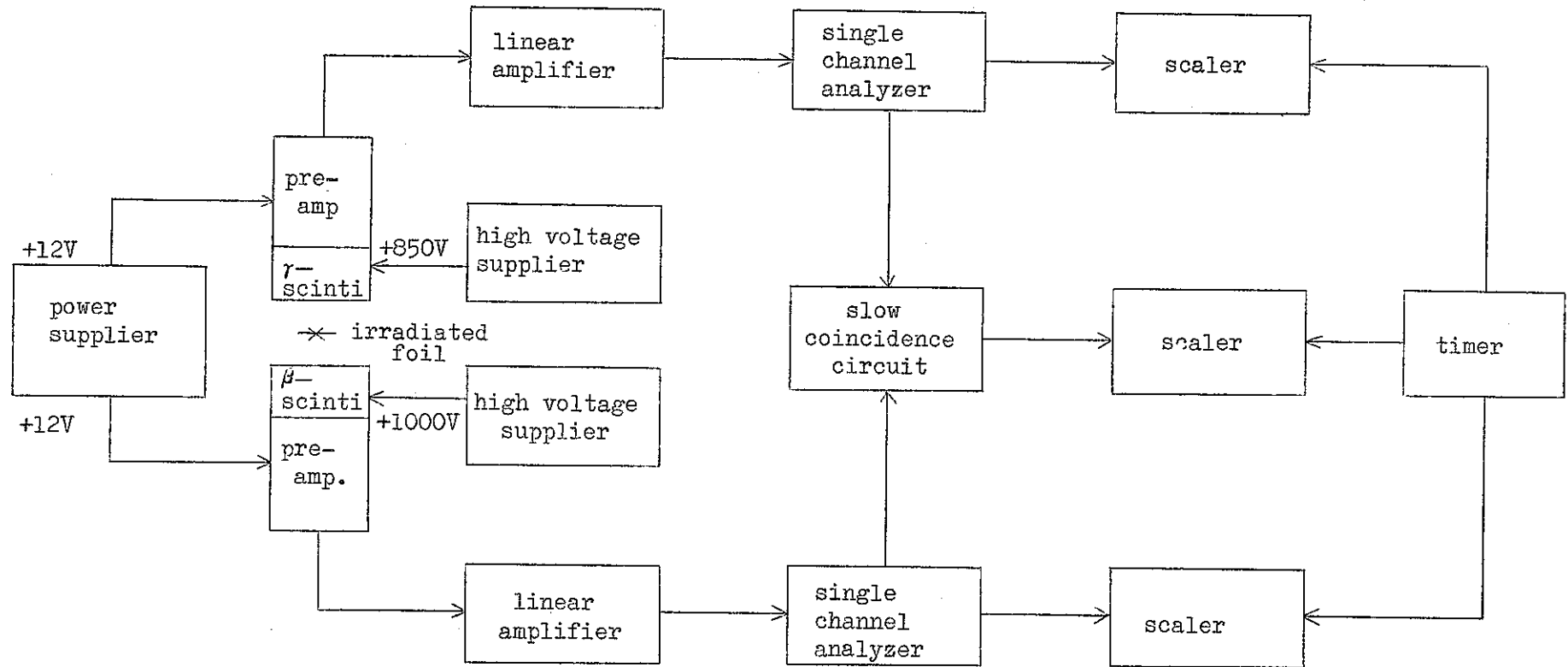


Fig. 3-5 Block-diagram of measuring circuits

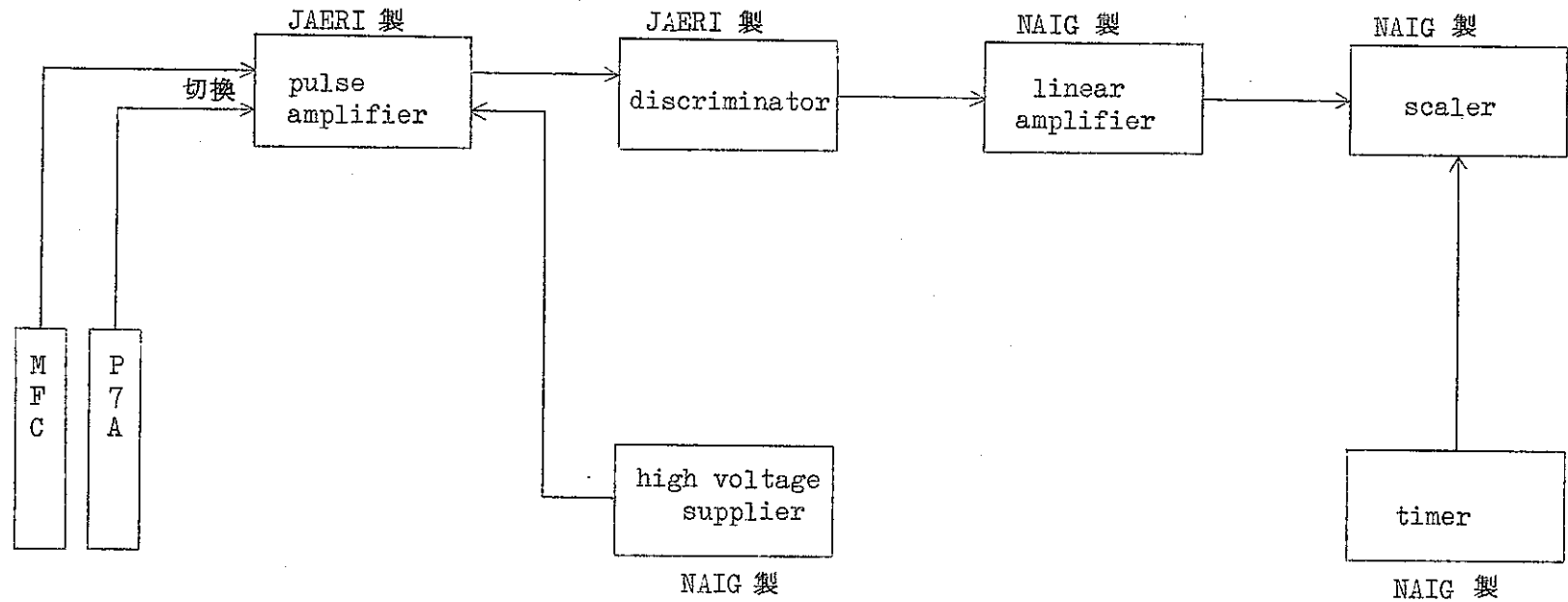


Fig. 3-6 Block-diagram of measuring circuits (2)

Fig. 3-7 波高分布 (MFC)

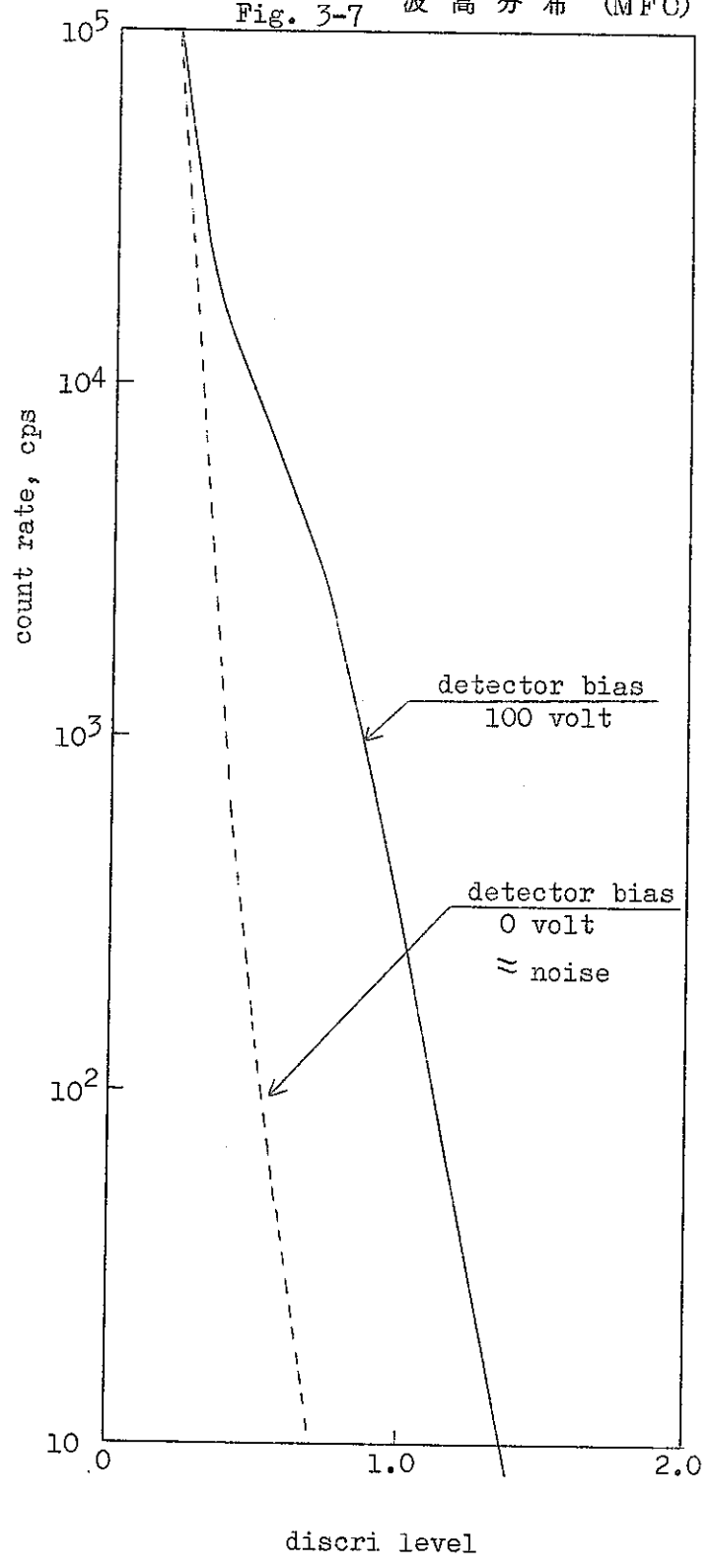


Fig. 3-8 波高分布 (P7A)

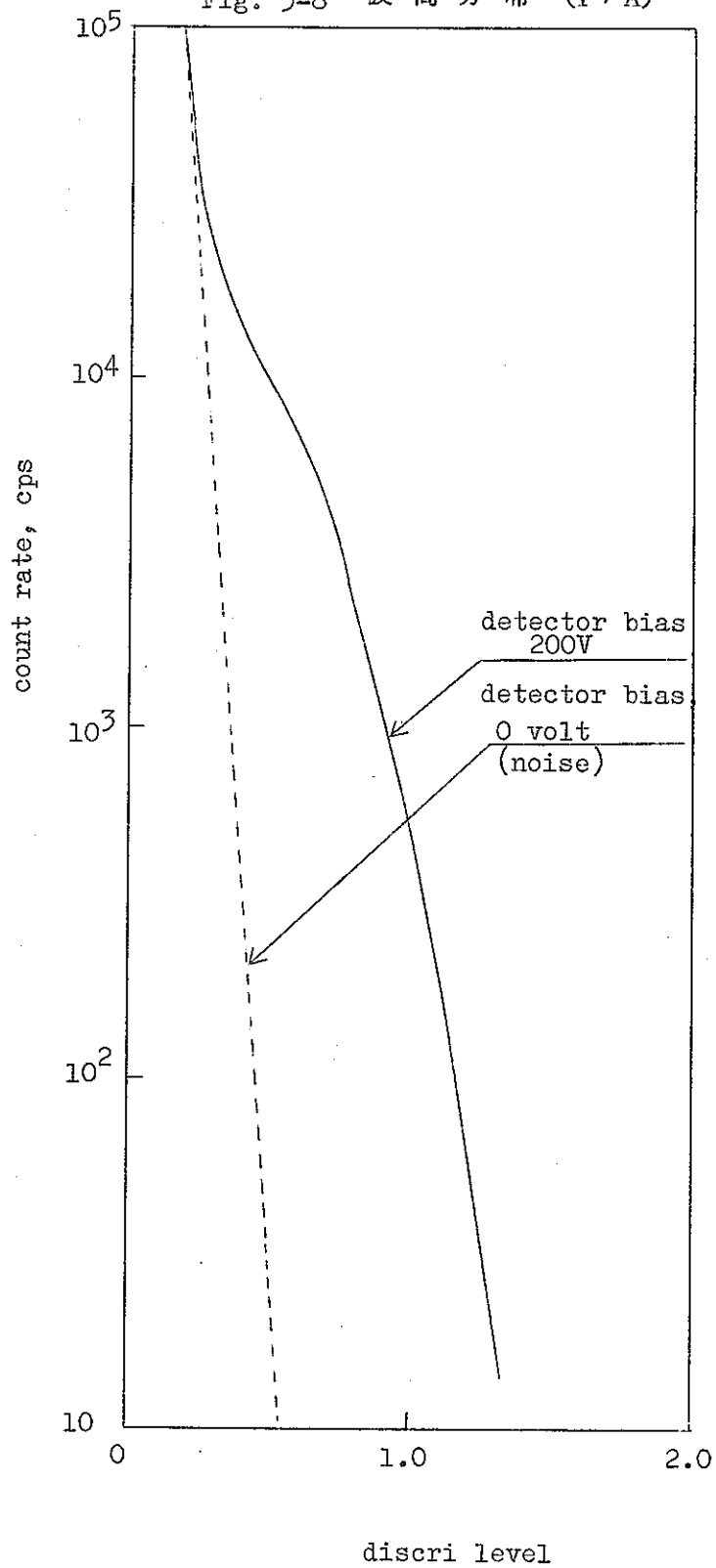


Fig. 3-9 炉出力・計数率相関 (MFC)

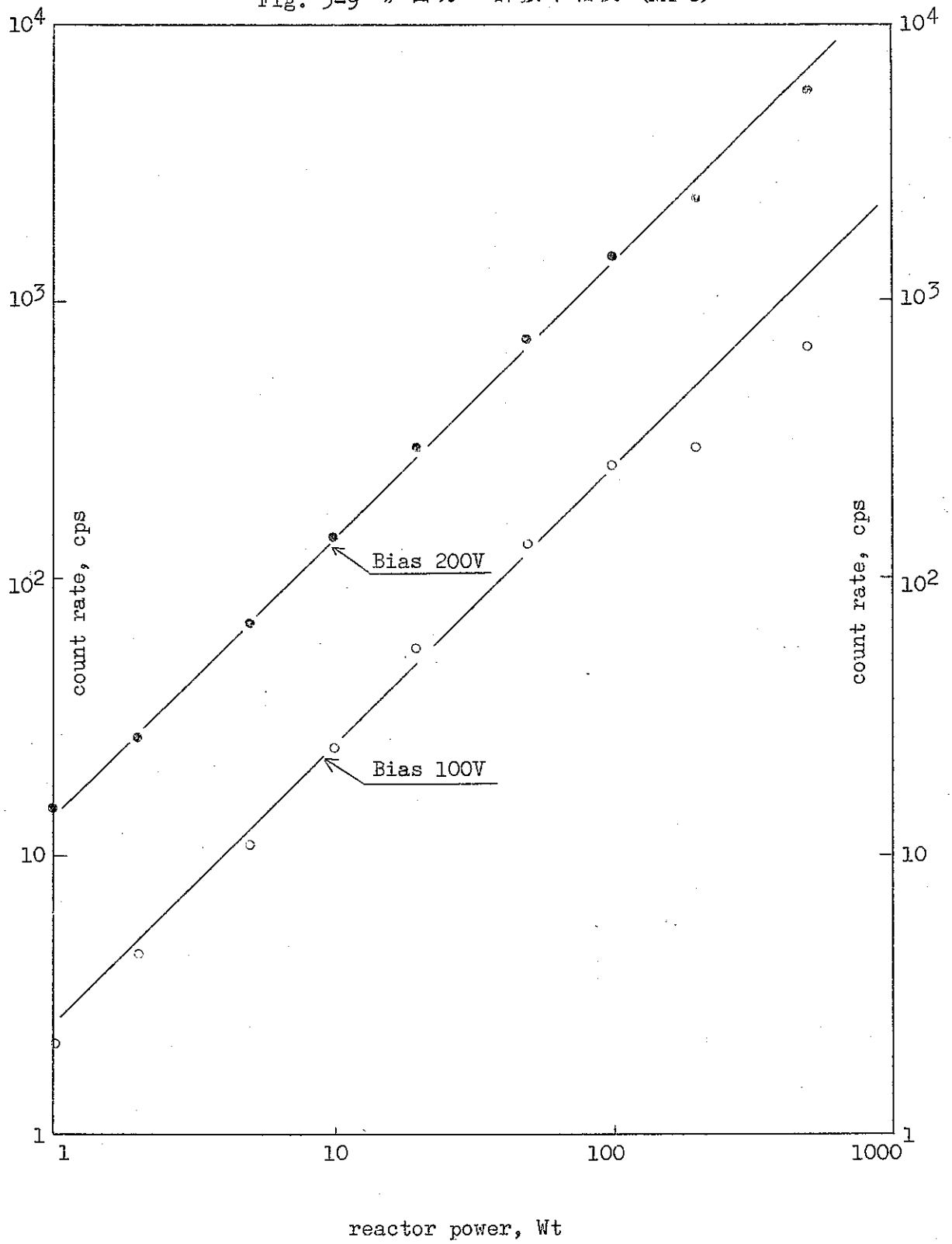
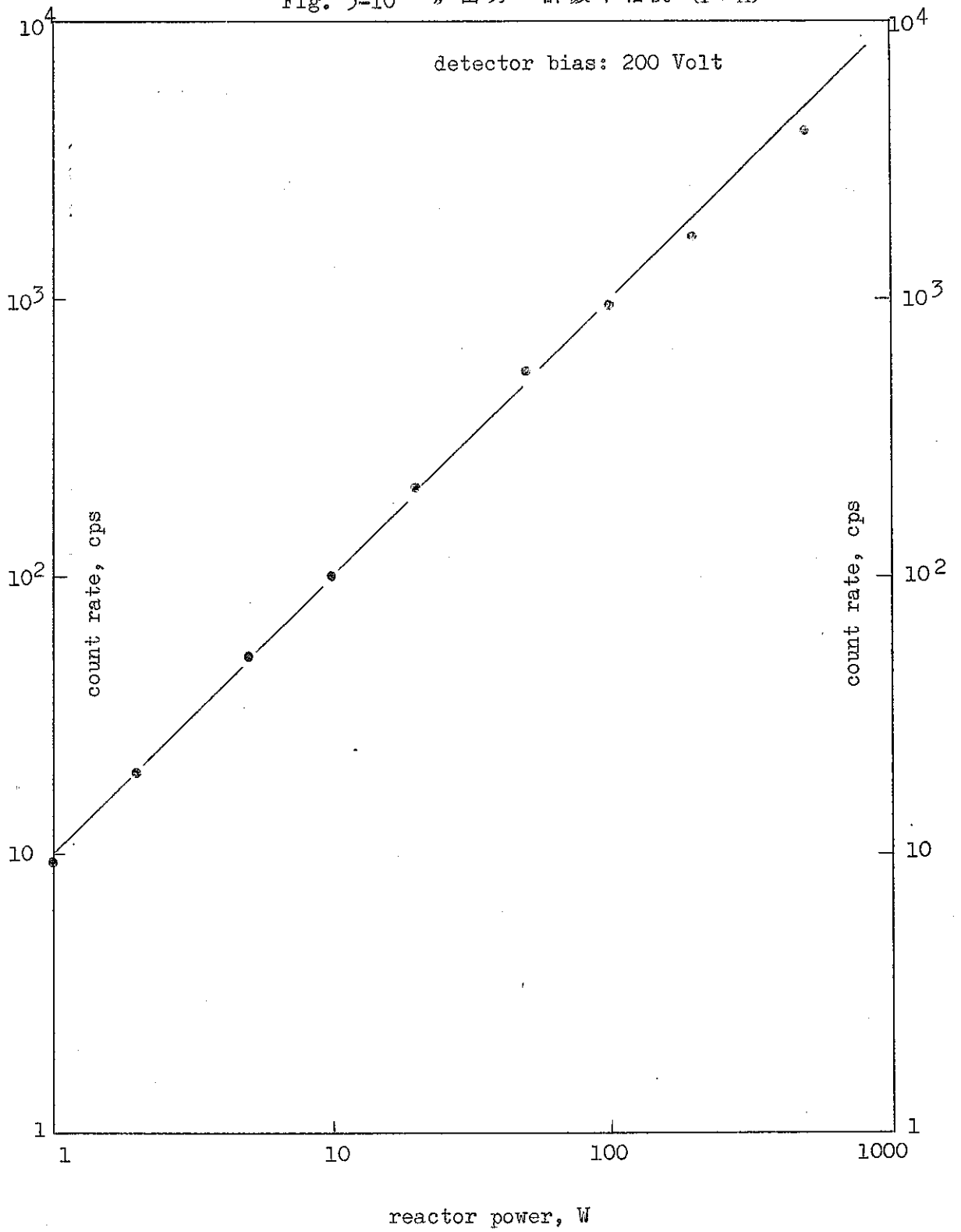


Fig. 3-10 炉出力・計数率相関 (P7A)



4. 設計への反映

(1) 解析の方法

(i) モデル化

計算体系のための炉心のモデル化は、炉心燃料に関しては体積を保存して、円柱化、球形化した。その他については各体系での厚さを保存するようにモデル化し、基本計算体系は炉心中心面で上下対称とした。「弥生」体系での縮約は球で行なつた。計算体系を Fig. 4-1 に示す。実際の供試体体系は各平板供試体間に僅かではあるがギャップがあるために、それぞれの板厚の和と、組み込んだ時の全厚とが異なる。ここでは全厚を保存し、各領域の実効密度が減少するとした。

輸送理論効果は「弥生」体系では平板形状に対してSn計算をした。この時のバックリングは二次元R-Z計算を行ない、R方向の漏れから求めたものを用いた。

(ii) 組成

「弥生」体系での各領域の物質、成分をTable 4-1~4-3 に示す。「弥生」の炉心では、各種の実験孔があるが、ここではそれらを無視した。

(iii) 定数

計算での熱中性子束のエネルギー領域は0.465 eV以下とした。すなわち、ABBN型25群構造の第25群を熱中性子に対する断面積とした。使用した $v_0 = 2200 \text{ m/s}$ の中性子に対してのミクロの断面積をTable 4-4 に示す。各核種の捕獲断面積は軽、中重核の熱領域で $1/v$ 法則に従い、熱中性子束はマクスウェル分布と仮定し、 v_0 に対する値の1.128倍とした。金の断面積はENDF/B, BNL-325, Poenitz等のデータより成されたものを使用した。他の核種については群定数セットNNS-5を使用した。

(iv) 計算の方法

「常陽」における計算方法に合わせて、二次元R-Z, 8群計算を基準にとる。8群分割はABBN型構造の下限で示すと、

$$3 / 5 / 8 / 12 / 16 / 20 / 24 / 25^* \quad \text{である。}$$

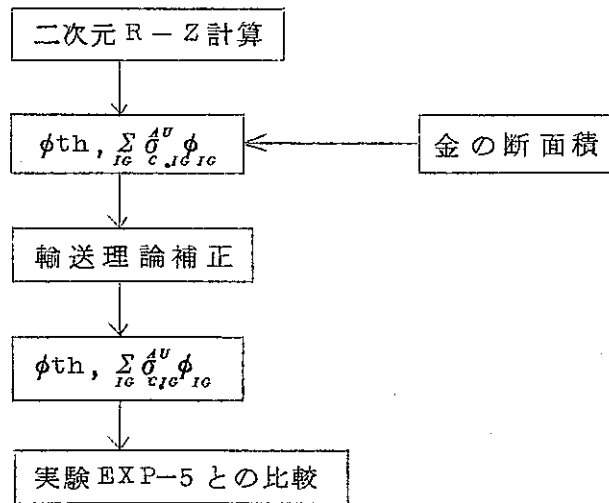
* 少数群の組分け

1群	1.05 MeV ~ 2.5 MeV
2	2.5 MeV ~ 0.8 MeV
3	0.8 MeV ~ 0.1 MeV
4	0.1 MeV ~ 4.65 keV
5	4.65 keV ~ 215 eV
6	215 eV ~ 10 eV
7	10 eV ~ 0.465 eV
8	0.465 eV ~

輸送理論計算は「弥生」体系に対して、上記の8群、一次元 S_4 -Diagonal transport 近似で行なった(平板体系)。輸送理論補正は拡散計算値と S_4 計算値との比とする。すなわち
 熱中性子束に対する輸送理論補正 = $\phi_{th}(S_4) / \phi_{th}(diff)$

$$\text{金の捕獲率に対する輸送理論補正} = \frac{\sum_{IG} \sigma_c^{Au} \phi_{IG}(S_4)}{\sum_{IG} \sigma_c^{Au} \phi_{IG}(diff)}$$

金の捕獲断面積は一次元25群計算のスペクトルにより、無限希釈値の縮約を行なった。上記の手順を図示すると、次のようになる。



以上は、大距離の中性子の透過計算に対する基本計算値を求める手順である。

黒鉛供試体中の案内管、検出器容器の吸収効果は、一次元の円柱セル計算によつて実施した。0.78 eV以下を22群に分割し、スペクトル計算を行ない実験と比較した。

(2) 実験結果との比較

(i) 実験結果の解釈

- a) 熱中性子束：熱中性子束の分布については、計算条件に最も近い EXP-5 の結果を反映させる。ただし、P、R点については全中性子束中の熱中性子束の比率が小さく、測定誤差の範囲に入ってしまうのでここでの絶対値は使用しないこととする。Q点に関してはカドミ比の値から明らかなように大部分が熱中性子であることから、この値を用いる。
- b) 金箔の捕獲率：金箔の捕獲率については熱中性子束だけではなくさらに広い範囲の中性子束に関する情報が含まれるので、P点を基準とする分布形を比較するために用いる。Q点での金の捕獲率の絶対値は参考とする。金の捕獲断面積は4.9 eVに非常に鋭い共鳴吸収を持つこと。また100 eV ~ 1 keVの領域に比較的大きい吸収をもつことから考えて、金箔の捕獲率の分布は、8群計算値のうち5群以下の中性子束の分布、特に7群

(1.0 eV ~ 0.465 eV) と 8 群 (0.465 eV 以下) との中性子束分布に関する比較が可能と考える。

- c) カドミウム被覆で測定した金箔の中性子捕獲率の分布は熱外中性子束の分布に関する参考とする。
- d) EXP. 1 & 2 と EXP-5 との比は、黒鉛中の案内管等による吸収効果の実験的検証とする。
- e) EXP. 1 & 2 と EXP. 3 との比より起動系検出器の自己吸収効果を求める。

(ii) 実験結果と計算値との比較

実験結果と計算値との比較を前記の各項目について行なつた結果を Table 4-5 に示す。

今回の解析では高エネルギー中性子束の減衰に関するデータが金の捕獲率を通してしか推定できないが、分布から推定して計算によつて得られたものの方が高速中性子に関して減衰が早い。熱中性子束に関しては黒鉛起動系検出器位置では、計算値の方が小さな値を示している。黒鉛中の SUS による吸収は計算値の方が少な目に評価している。原因の一つとして計算では無限に長い体系としている点が考えられるが、実験ではダクトの両端を漏洩防止用コンクリートでふさいでいることもあつて、評価が困難である。

(3) 「常陽」体系への外挿

「弥生」のモックアップ体系と「常陽」の体系との主な相違点は、

- a) 形状的な面としては、「常陽」体系では炉容器周辺部に N_2 のガス層があり、等価的に実効密度が減少したとして計算している。一方、「弥生」の体系では周辺がコンクリートであること、遮蔽体層が平板であることなどの相違がある。
- b) 組成的には「常陽」のナトリウム部分は「弥生」ではアルミニウムに近似されている。
- c) 黒鉛中の構成と全体の寸法に対するダクトの大きさの比率が異なる。

などである。以上のような点を考慮して「常陽」体系に適用する。

Table 4-5 の結果をみると、熱中性子束の値では $C/E = 0.72$ 、金の捕獲率の値で $C/E = 0.99$ である。これらの値は、出力較正、モデル化の差によるものと金の断面積の不確かさを含むものである。また、金の捕獲率の分布、熱外中性子束の分布形では P 点と Q 点では中性子スペクトルが相当に変化しているので金の断面積の変動に大きく依存した結果がでてくるので、捕獲率の変化がそのまま中性子束の変化を示すものとはならない。したがつて、今回の実験と解析からは、

$$C/E = 0.50 \sim 0.99$$

の範囲にあると思われる。

また、FOAI-1 炉心における大距離透過中性子束の解析では熱中性子束 (中性子源より約 125 cm) に対して、

$$C/E = 0.7 \sim 0.8$$

であることが示されている。

以上のような事実と、金の実効捕獲断面積で20%の差があることを考慮し、「常陽」の体系の補正係数は、

$$\text{補正係数} = 1.0$$

とする。中性子源の評価であるので、この近似は安全側である。

案内管等の吸収効果は形状的に相違があるが、ストリーミング等の推定が困難であることなどにより、「常陽」体系でも全く同じ計算法にしたがうことにし、

$$C/E = 1.68$$

とする。

Table 4-1 「彌生」体系 領域平均原子数密度(1)

単位: $\times 10^{22}$ atoms/cm³

核種	炉心燃料	ブランケット燃料	鉛反射体 A	鉛反射体 B	固定反射体 (供試体)
U-235	4.2987	0.01793			
U-238	0.3194	4.4083			
Al					2.8672
Cr	0.05447	0.1255	0.3369	0.5471	0.8631
Fe	0.1894	0.4365	1.1716	1.9025	3.0013
Ni	0.02536	0.05845	0.1569	0.2548	0.4019
Pb			2.5032	2.2629	
C					
B-10					
B-11					
Ga					

Table 4-2 「彌生」体系 領域平均原子数密度(2)

単位: $\times 10^{22}$ atoms/cm³

核 種	燃料ラック	熱遮蔽体	材料ラック	外側遮蔽体	黒鉛
U-235					
U-238					
Al	5.8484	2.5628	6.0043	0.9843	0.00109
Cr		0.9225		1.4595	
Fe		3.2080		5.0754	0.00056
Ni		0.4296		0.6796	
Pb					
C					7.9048
B-10					2.326×10^{-6}
B-11					9.13×10^{-6}
Ca					

Table 4-3 「彌生」体系 領域平均原子数密度(3)

単位： $\times 10^{22}$ atoms/cm³

核 種	重コンクリート	普通コンクリート	支持容器(a)側面	支持容器(b)側面
H	1.777	0.6926	1.3607	1.125
O	4.735	4.248	3.6418	2.997
C		0.01154		
Al	0.2686	0.185	0.2066	0.170
Si	0.3648	1.667	0.2806	0.231
Ca	0.3629	0.1957	0.2791	0.230
Cr	0.0249		0.10675	0.0926
Fe	1.984		3.365	4.991
Ni		0.0332	0.0408	0.03577

Table 4-4 熱組の断面積

(単位：バース)

核種	σ_a	σ_f	ν
Pu-239	1013	742	2.88
Pu-240	273	0.053	2.87
Pu-241	1375	1007	2.93
U -235	679	580	2.42
U -238	2.73		
C	0.0034		
O	0.2 mb		
Na	0.534		
Cr	3.1		
Fe	2.55		
Ni	4.6		
Mo	2.7		
B -10	3837		
B -11	5 mb		
Al	0.235		

Table 4-5 実験と計算の比較

項 目	実 験 値	計 算 値	C/E
(1) 熱中性子束 (Q点) ($n/cm^2 \cdot s$)/Watt	4.2×10^3	3.04×10^3	0.72
(2) 金の捕獲率の分布形			
P 点	1.0	1.0	—
R 点	0.094	0.070	0.74
S 点	0.024	0.017	0.71
Q 点	0.0049	0.0022	0.50
Q点での捕獲率 (reaction/s)/Watt	4.05×10^5	3.60×10^5	0.88
(3) 熱外中性子束分布 (Cd-covered-Auの reaction rate \downarrow)			
P 点	1.0	1.0	—
R 点	0.089	0.069	0.78
S 点	0.020	0.016	0.80
Q 点	—	—	—
(4) 黒鉛中の案内管等による 熱中性子吸収効果	0.19	0.32	1.68
(5) 起動系検出器の吸収効果	0.72	—	—

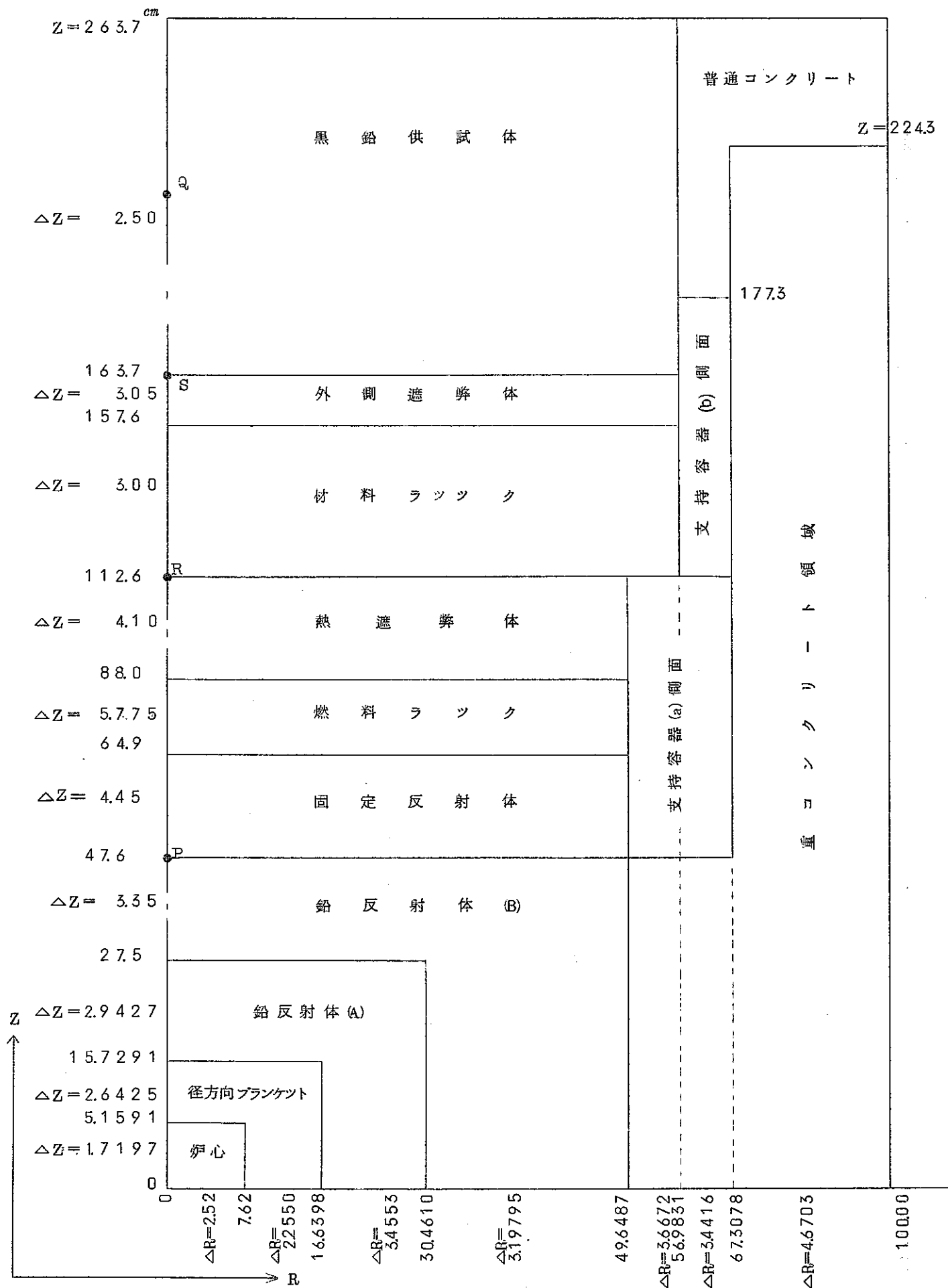


Fig.4-1 彌生二次元計算体系 (長さの単位: cm)

5. 結 論

「常陽」中性子源の設計に関してモックアップ実験を行ない、次の結論を得た。

1. 中性子源の設計に用いられた計算法が大距離の透過計算に対しても十分な精度を持つことが確認され、この計算法により行なわれた設計は安全側であり、しかもその誤差はせいぜい50%であろう。
2. 黒鉛体系内における起動系検出器用の案内管および容器による中性子の吸収効果は黒鉛のみからなる体系における中性子束の約半に減少させる。計算値と実験値を比較すると、前者の方が約70%中性子束を大きく評価する。
3. 起動系検出器P7Aの自己吸収は約30%である。
4. 起動系検出器P7Aの検出効率 は仕様値より約一桁低く、 1.0×10^2 cps/nv である。
5. 以上の結果より常陽中性子源の仕様を確定することができた。

謝 辞

本実験を遂行するに当り、絶えざる励ましと惜しみない援助を与えられた野本課長、井上、松野の各氏に感諸致します。また弥生原子炉の利用について種々の無理に心良く応じていただいた東大関係者各位に感謝致します。