JAERI-M
4706

JMTR資料－157

JMTR運転中の照射中性子束変動の測定

1972年2月

石塚　宏，近藤育朗，瀬崎勝二，野村正之

寺田博海，作田　孝，飯田浩正

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

JAERI－M4706

JMTR運転中の照射中性子束変動の測定

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部
石塚　宏，近藤育朗，瀬崎勝二
野村正之，寺田博海，作田　孝
飯田浩正

（1972年1月31日受理）

JMTRにおいては，照射中性子束のサイクル中変動を把握し，それにもとづいて試料配置や運転条件を考慮することが必要である。このためJMTRの第2サイクルにおいて，インコアモニタにより炉心内代表点7ケ所での中性子束変動測定を行なった。

その結果，大巾な変動はXe飽和までの一日の間に認められ，それ以降の変動は主たる照射の場である反射体領域においては±20％以内であって，かなり小さいことが判明した。

Variation in Neutron Flux in the JMTR

Hiroshi ISHIZUKA, Ikuo KONDO, Katsuji SEZAKI,
Masayuki NOMURA, Hiromi TERADA,
Takashi SAKUTA and Hiromasa IIDA
Division of JMTR Project, Oarai, JAERI

(Received 31 January 1972)

In the JMTR, it is desirable to know the variation in neutron flux during the reactor operation. This information is necessary in arranging irradiation samples in the core and in planning the operation of reactor.

The variation in neutron flux was therefore measured with in-core flux monitors at representative seven points in the reactor core in cycle No.2.

It was shown that the flux varies largely only in the first day after start-up until the saturation in xenon, and little in the subsequent days.

After xenon saturation, the variation in the reflector region, where most irradiations are made, is fairly small, within ±20%.

目　　次

Ⅰ　まえがき …… 1

Ⅱ　測定の概要 …… 2

1.　測定の目的 …… 2

2.　測定の概要 …… 2

1）機器の配置 …… 2

2）シュラウド …… 2

3）インコアモニタ …… 3

4）制御棒配置ならびに引抜順序 …… 3

5）測　　定 …… 4

(1)　低出力での測定 …… 4

a）検出器相互較正 …… 4

b）炉心温度効果の測定 …… 4

c）Xe 蓄積炉心での測定 …… 4

d）シュラウドボイド試験 …… 5

(2)　定格出力での測定 …… 5

a）中性子束の測定 …… 5

b）シュラウドゼロフローテスト …… 5

(3)　測定日程 …… 6

Ⅲ　熱中性子束変動の測定 …… 11

1.　測定装置 …… 11

1）シュラウド（案内管） …… 11

2）シュラウド冷却系 …… 11

3）Self Powered Neutron Detector …… 11

4）Toshiba In-Core Chamber …… 12

5）測定器 …… 12

2.　インコアモニタによる中性子束測定上の問題 …… 23

1）感度の直線性 …… 23

2）応答特性 …… 23

3.　測定結果 …… 29

1）相互較正 …… 29

2）Xe 蓄積炉心での測定 …… 29

3）温度依存性 …… 30

4）定格出力での測定 …… 30

4. サイクル中変動の特性と試料配置への示唆 …… 72
1) 中性子束のサイクル中変動の特性 …… 72
2) 照射試料配置への示唆 …… 73
Ⅳ あとがき …… 77
付 検出器出力の初期値に対する比をとった場合の誤差 …… 78

I まえがき

炉心内の中性子束やガンマ線束は，炉の運転中，燃料の燃焼や，これにともなう制御棒引き抜きの影響をうけて変動する。

ＪＭＴＲの炉心は燃料領域が比較的小さく，周囲の反射体領域が主たる照射の場として利用されており，一般にこのような小さい燃料領域の炉心では，上記の変動はかなり大きい。

照射の立場からはこれらの変動は少ない方が望ましく，ＪＭＴＲの設計時の検討の結果，制御棒引き抜きをギャングで行なうよりはむしろ，対照的な関係位置を保つように，１ないし２本ずつ引き抜く方が変動を少なくする上で有効であるとして，現炉心の制御棒配置ならびに制御棒引き抜き順序が定められた。

しかしながら制御棒引き抜きがある以上，サイクル中の変動はさけられるものではない。したがってこの変動を知り，その動的照射特性より照射試料配置を考慮することは重要な課題の一つである。

したがってこの変動を把握することはＪＭＴＲの建設当初から計画されており，これまでに計算*やＪＭＴＲＣの実験によって検討が行なわれ，サイクル中の中性子束変動についての大要は一応求められている。しかしながら計算においては，炉心モデル，核定数などに対してかなりの近似を行なわねばならないこと，また臨界実験においては燃焼による余剰反応度の減少を，ポイズン板挿入による吸収断面積の増加のみで代用させねばならないことなどで，変動把握に対してはなお問題が残されていた。

この解決のため，ＪＭＴＲの第２サイクルにおいて，炉心内代表点７ケ所にシュラウドと称する案内管を挿入し，インコアモニタによって運転中の中性子束変動を直接測定することとした。このシュラウドにおいてはこの他カロリメータによってガンマ加熱の測定も行なわれた。

本報告は，これらの測定のうち熱中性子束変動の測定に関して記したものである。

＊　田中，大村，福田；ＪＡＥＲＩ－memo4130(公開)運転中の中性子変動解析,1970年8月

II 測定の概要

1. 測定の目的

前章に記した事柄により本測定の目的は次の二点にあるといえる。

(1) 炉の動的照射特性をとらえること。

照射試料の配置にあたって，サイクル中変動を考慮する場合，特にどの個所の変動が少ないか，あるいは変動の範囲はどの程度かを把握しておくことが必要である。

特にＪＭＴＲではサイクル毎に照射試料の出入りがあり，その炉心配置はＪＭＴＲＣでの実験的検討を経て決定されることとなっているが，そこで得られた照射中性子束はコールドクリーンすなわち起動直後の時点に対するものでしかない。このため炉心配置の検討には是非ともサイクル全体を通じての情報が必要であり，特に発熱が問題となる燃料試料の配置に対してはサイクル中の最高値と起動時との値の関連を求めておくことが要求される。

(2) ＪＭＴＲの設計時の考え方の正しさを確認すること。

冒頭に述べた制御棒配置や制御棒引抜順序の考え方の妥当性については，これまでも計算やＪＭＴＲＣの実験で一応の確認がなされているが，これを実際の場において確認する。

2. 測定の概要

1) 機器の配置

炉心内1/4象限相当の６ケ所（０－７は計画当初Ｃ－８であったが，当時Ｃ－８，０－８にキャプセルの配置計画があったため，現位置に変更となった。）およびガンマ線遮蔽板外側の１ケ所計７ケ所を代表点としてシュラウドと称する案内管を設置し，この中にインコアモニタを挿入して，中性子束およびガンマ線束を測定することとした。

インコアモニタはいずれもシュラウド内を垂直方向に移動させ，中性子束およびガンマ線束の垂直方向分布を測定し，サイクル中変動を分布の変動としてとらえることとした。

７本のシュラウドは炉プール壁に沿って立上り，インコアモニタの取扱かいは炉プール架台上において行なわれることとなる。炉プール上にはキャスク台車用のガーダーが二本配列されているため，炉プール架台まわりのシュラウドの配列は，炉プールの西側に４本，北側に３本とガーダーによって二つのグループに分割されることとなった。このためインコアモニタの位置交換などは，その放射化量の関係上，それぞれのグループ内に限られることとなった。（第２－１図，第３－１図，第３－２図参照）

インコアモニタからのリード線は炉プール架台上に設けられた接続箱に接続され，炉プール架台上においては検出器の取扱いのみ行ない，測定は，中性子束についてはループ制御室内，ガンマ加熱については炉プールまわりでそれぞれ行なうこととした。

2) シュラウド

シュラウドは圧力容器上蓋のリグノズルを貫通して炉心に挿入される部分（案内管１）

と，クイックジョイントによって結合される直管部（案内管２）とからなり，案内管２はインコアモニタを挿入したまゝ，取りつけ位置を変更することができる。燃料領域照射孔および反射体領域第一層目に挿入される４本は，この領域のガンマ加熱がきわめて大きいことを考慮し，二重管構造として純水による強制冷却を行ない，インコアモニタの冷却と管内の水のふっとう防止とを行なうこととした。

管内を冷却した純水は，そのまゝ炉プールに吐出されるため，冷却水流量は炉プール水の廃液処理量の制限を受け約１m^3／hである。他の３本については，案内管１の方に炉プール水が出入りできるよう多数の孔を設け，これにより自然循環冷却を行なうようにした。

シュラウドの種類，炉心内挿入位置については第３－２図および第３－３図に示される。

3） インコアモニタ

インコアモニタは，小型電離槽型および自已出力型の二種を用いた。

小型電離槽型は電極にボロンをコーティングしたもので，東芝と原研との共同研究のために開発されたもので通称ＴＩＣと云われる。

自已出力型はベータエミッタとしてロジウムを用いたごく一般的な形状であるが，測定にあたってはRh^{104m}（半減期4.4分）が放射平衡に達するまでの時間が必要であるため，４本の検出器を２００㎜おきに配置し，これを束ねたアセンブリを作り，同時に４点の測定を可能とし，測定時間の短縮を図った。（第３－１表参照）

検出器類は，いずれも10^{14} n／cm^2・sのような高中性子束場における使用実績がないため，使用中の故障を考慮し，予備を多く考えたこと，当初案内管２本の使用本数に限りがあったこと（これは後に使用可能本数を増加することができた）などで常用するものを自已出力型二式，電離槽型三本の計５本とし，予備を自已出力型一式，電離槽型三本を準備した。

使用にあたっては使用の都度これを引上げ，検出器自体の放射化や，中性子束との反応による感度低下を極力少なくするようにつとめた。

使用した結果は，電離槽型検出器の高中性子束に対する出力特性に問題が認められたがいずれの検出器も使用不能となるような故障はなく測定を進めることができた。推定ｎｖｔは反射体第一層で使用したもので2×10^{19} nvt程度と考えられ，一応ここに記したような使い方をした場合の高中性子束下での耐久性には問題はないのではないかと考えられる。

今回の測定においては特に検出器の中性子束の絶対値に対する感度較正は行なわなかった。これは箔やそれをホルダーに固定するためのスコッチテープが，長い曲管部を通過する場合，管壁と接触して脱落した場合の処置が容易でないこと，さらに測定の主目的がサイクル中の相対変動をとらえることであって中性子束絶対値との対応を特に必要としないためである。

4） 制御棒配置ならびに引抜き順序

ＪＭＴＲは７本の制御棒を有しており，それらの配置は第２－２図に示される。吸収体はいずれもハフニウムである。このうちＦ－６およびＬ－１０の２本は安全棒であって，起動に際して最上限である８００㎜まで引抜かれる。これらの安全棒はベリリウムのフォロアを有しており，引抜かれている間は反射体領域の一部を形成する。

I－6およびI－10の2本は微調整安全棒であって，起動時にいずれも650㎜近傍(全ストロークの約80パーセント)に引抜かれる。このあたりでの単位長あたりの等価反応度はかなり小さいため，この附近において微調整棒として用いられる。

G－8，I－8，およびK－8の3本が粗調整棒として用いられる。まず起動時にはG－8とI－8のSH－1とSH－3をギャングで引抜き臨界とする。起動後定格出力となってから蓄積して行くXe，Smの補償をこの2本で行なう。

SH－1およびSH－3の2本が最上限まで引抜かれた後に，I－8のSH－2を引抜く。したがって燃焼による反応減少の補償は，もっぱらSH－2によって行なわれることとなる。第2－3図に模式的にこれらの引抜順序を示した。

5) 測　定

測定は下記のように行なわれた。

(1) 低出力での測定

a) 検出器相互較正

定格出力での測定において，高中性子束によって照射される検出器は，測定が進むにつれて感度が変化して行くことが予想されるので，予備も含めて検出器全数の感度を較正した。予備検出器の感度較正も行なうため，既に述べたガーダーの西側および内側(北側)の両グループで測定を行なう必要があり，検出器は，その感度特性のゆるすかぎり，極力低出力で測定を行ない，その放射化を抑える必要があった。検出器の直線性が良好である範囲を考慮し，測定時の出力は核計装線形出力計で20KW(実出力は32KW)と定められた。測定個所はI－11およびK－4とした。

b) 炉心温度効果の測定

第1サイクルにおいて核計装線形出力計指示一定の条件で運転した時，熱出力が炉心温度によって変化することが見出された。原因としては炉心と核計装検出器との間に存在する減速材の温度効果によるものと考えられている。この温度効果の傾向をとらえるため，インコアモニタを炉心に挿入し，核計装指示一定の条件で炉心水温を上昇させ，検出器出力を測定した。

c) Xe蓄積炉心での測定

粗調整棒の種々の臨界位置に対する微調整棒の効果の測定が，Xeを炉心に蓄積させてポイズニングを行なった炉心において，その減衰を利用して核計装出力20KWで行なわれた。この場合制御棒位置は，丁度引抜順序を逆行して移動することとなるため，これを利用して制御棒位置変動の効果のみによるサイクル中変動の擬似測定を行なった。この測定はサイクル中変動の主要因は制御棒の移動であるという考えにもとづいたもので，もし不幸にしてインコアモニタが今後の定格出力における測定で全部不調となり測定続行不能となった場合においても，この測定結果が，たとえ近似であっても生かすことができるという考えで行なわれた。しかしながら定格出力運転時における相当制御棒位置での測定結果との対応は後に3.2)において記すようにあまり良好でなかった。これは炉心垂直方向のXeの蓄積の状態の差異によると考えられている。

d) シュラウドボイド試験

シュラウド内の冷却水がふっとうを起した場合，炉に与える反応度的影響を求めるために行なわれた。すなわち，あらかじめ圧縮空気により二重管構造のシュラウド中の水をあらかじめ排除しておき，この状態で炉を臨界とした後，通水を行なうことによってボイドの反応度効果を測定した。その結果燃料領域照射孔におけるボイド係数は正であることが判明したが，反応度効果がもっとも大きいと考えられるこの照射孔においてもボイドの反応度効果はたかだか＋１１¢であり，静的なボイド効果としては問題ないことがわかった。

(2) 定格出力での測定

a) 中性子束の測定

定格出力においては，炉の燃焼およびそれにともなう制御棒位置の変化が中性子束におよぼす効果を測定した。

測定は出力上昇後Xe 飽和までの測定とXe 飽和以降の測定とにわけ，Xe 飽和までは２ないし４時間おきに測定を行ない，Xe 飽和以降は連日日中に測定を行なった。

測定は Xe飽和までは，測定の時間間隔の関係上，検出器移動は行なわないこととした。使用する検出器が５本であるため，７ケ所の測定孔のうち２孔が測定されないこととなるが，これらを制御棒の影響の比較的およびにくいＯ－７，Ｉ－１３とした。

Xe飽和以後の測定は原則として１日１回行ない，７孔の中性子束分布を測定した。ＪＭＴＲの燃焼による反応度減少の補償は微調整安全棒の６００㎜より６８０㎜の間で行なわれ，この間粗調整棒の動きはなく，微調整棒が６８０㎜に達した時に微調整棒と粗調整棒の入れかえが行なわれる。測定はこの粗調整棒の動きのない間に行なわれた。

測定は前にも述べたとおり測定個所７孔に対して５個の検出器を用いることとなっており，これは次のような考えで行なわれた。

i) 自己出力検出器は放射化量試算の結果，ＳＵＳ２７にふくまれるMn^{56} による線量率が相当に大きくなるので，相互較正を除いては移動を行なわない。

ii) Ｈ－７はガンマ加熱が大きく，検出器移動の際に冷却水を停止すると冷却水のふっとうがおこると考えられるので，検出器移動は行なわない，またこの箇所は中性子束の値も大きいので，ボロンを用いた電離槽型でなく，比較的断面積の小さい自己出力型を用いることとした。

iii) ガーダー西側においては，４孔のうち強制冷却孔が３孔あるので，これらのうち検出器移動を行なう孔はＨ－７，Ｉ－１１，Ｆ－１１のうちで熱中性子束とガンマ線束が少ないとみられるＦ－１１孔とし，これと自然循環冷却孔Ｉ－１３との間で行なうこととした。

第２－１表に標準の測定における検出器の配置を示す。

b) シュラウドゼロフローテスト

前にも述べたような検出器移動の際には，強制冷却を行なっている案内管においては，一時的に冷却水の送水を停止して検出器を保持した案内管の移動を行なわねばな

らない。この際，炉心のガンマ加熱が大きいため，停留した冷却水がふっとうを生ずる可能性がある。

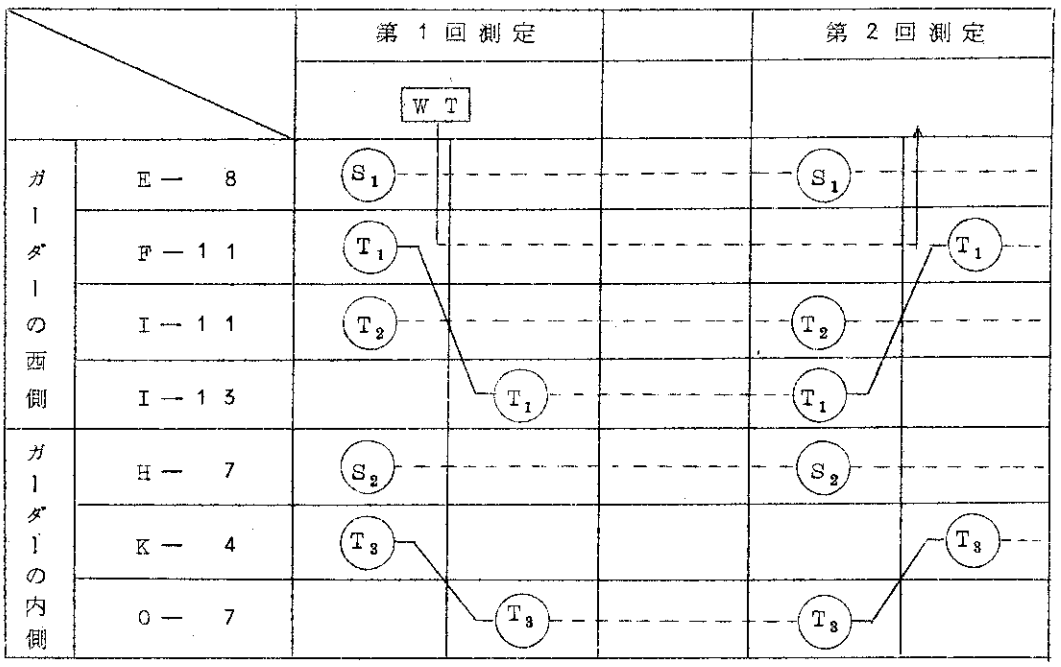
これらをチエックするため，Xe飽和直後定格出力運転中の炉心においてE－8，およびI－11孔において冷却水を停止し，その状況を観察した。その結果いずれの孔においてもふっとうを生ずることが判明した。このふっとうの炉への影響は，反応度的には特に問題ないが，自動制御系の追従機構にはあまり好ましくない影響を与えるため，検出器の相互較正，ガンマ測定素子への交換を除いては検出器移動を行なわないこととした。

H－7孔についても測定が計画されていたが，E－8，I－11両孔の結果より，ふっとうの起ることが明らかであること。またそれらの反応度効果や制御系に与える外乱が，E－8，I－11両孔より大きいことが予想されたため，測定を行なうことを中止した。

(3) 測定日程

測定は昭和45年6月1日より6月25日にいたる間ほゞ連日行なわれた。第2－2表にその概要を示す。

第2－1表　標準の測定における検出器の配置



S_1，S_2　；　自己出力型検出器（SPD）

T_1，T_2，T_3　；　電離槽型　〃　（TIC）

WT　；　水温測定素子（案内管のみ利用）

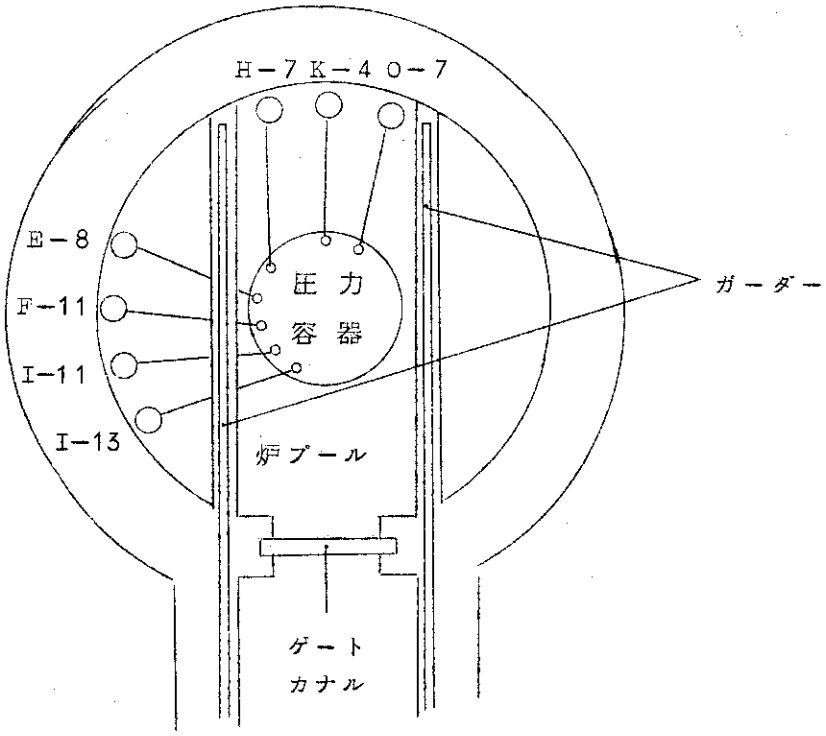
T_1 がI－13を測定している間，F－11に冷却水を補給するために案内管のみを利用する。

◯　；　測定を意味する。

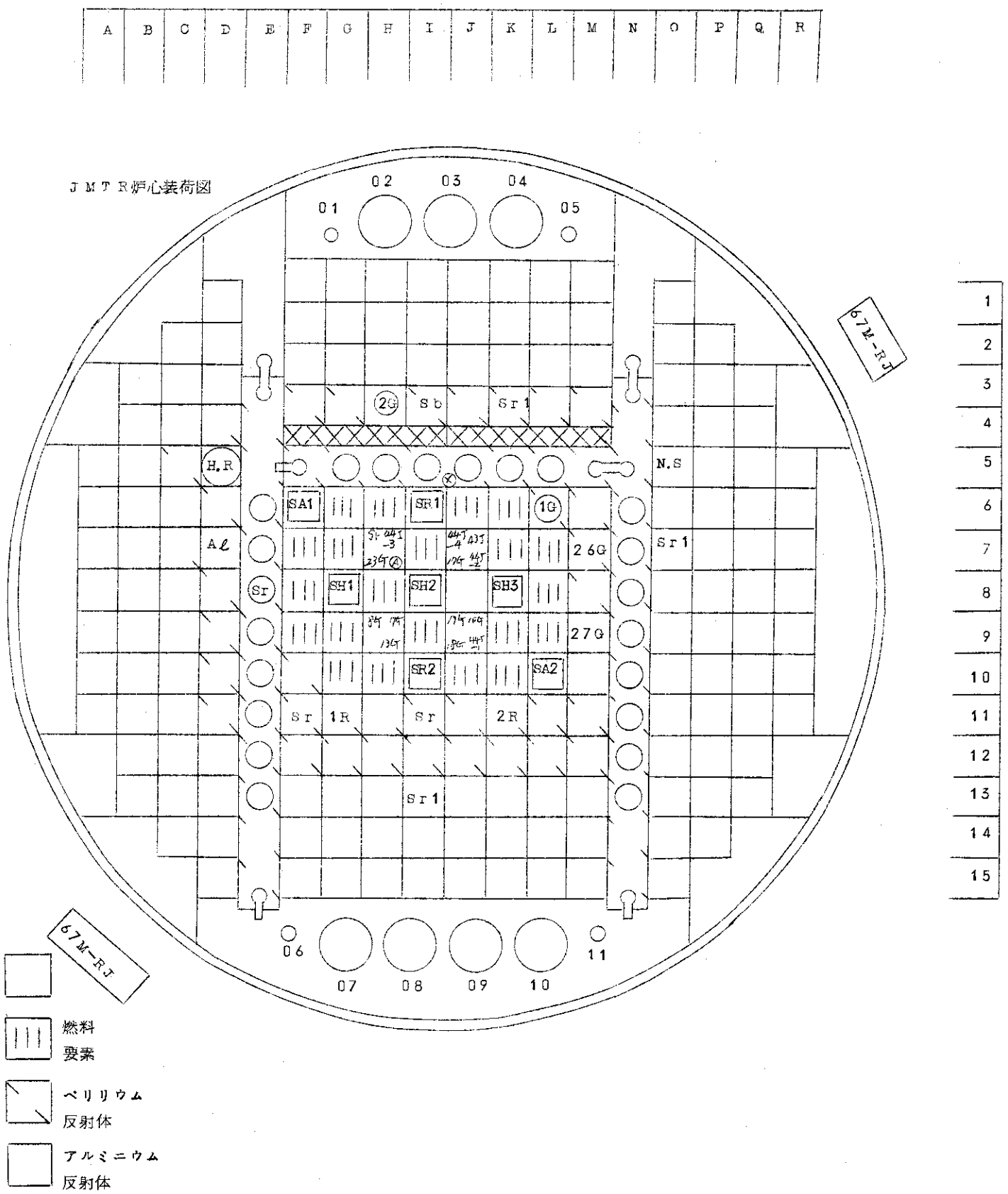
－－－－－　；　検出器が案内管中に引き上げられている状態を示す。

第２－２表　測定日程

月・日	曜	出　力	測　定　事　項	備　　考
6月1日	月	28KW	相互較正	
2	火	28KW	相互較正，温度依存性測定	炉心入口温度50℃まで上昇
3	水	28KW →32MW	温度依存性測定・検出器直線性チエック	
4	木	32MW→ 28KW→0		Xe蓄積により未臨界
5	金	0→ 28KW	Xe蓄積炉心による制御棒位置依存性測定	再臨界
6	土	28KW →32MW	同上。検出器直線性チエック・Xe飽和までの測定	2次系3900M³/hファン2台
7	日	32MW	Xe飽和までの測定	〃
8	月	32MW ↓	同上。検出器直線性チエック，シュラウドボイドテスト	〃　SH－1，3上限
9	火	0 ↓ 32MW	同　上	〃　炉停止
10	水	32MW		〃
11	木	31.9MW	中性子束測定，γ線束測定	〃
12	金	32.2MW	中性子束測定	〃
13	土	32MW	検出器相互較正（中性子束）	〃
14	日	32.5MW	中性子束測定，γ線束測定	20:00まで2次系3900M³/h ファン2台
15	月	32MW	中性子束測定	20:00まで2次系3900M³/h ファン1台
16	火	33.2MW	同　上	20:00まで2次系3900M³/h ファン2台
17	水	32.5MW	中性子束測定，γ線束測定	20:00まで2次系2900M³/h ファン2台
18	木	32MW	検出器相互較正（中性子束）	20:00まで2次系1900M³/h ファン2台
19	金	32.8MW	中性子束測定	20:00まで2次系3900M³/h ファン2台
20	土	34MW	中性子束測定，γ線束測定	20:00まで2次系3900M³/h ファン4台
21	日	33.4MW	中性子束測定	20:00まで2次系3900M³/h ファン3台
22	月	32.5MW	検出器相互較正（中性子束）	2次系3900M³/h　ファン2台
23	火	32.5MW	検出器相互較正（中性子束）	〃
24	水	31.8MW	中性子束測定，γ線束測定	〃　SH－2上限
25	木	31.8MW	検出器相互較正（中性子束）	〃　SH－2上限
26	金	31.5MW		6：00炉停止

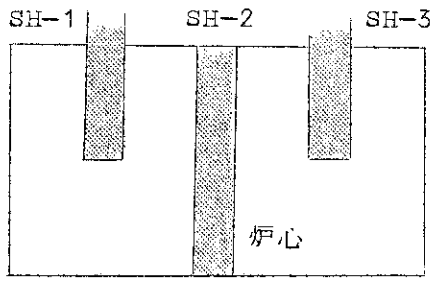


第2−1図　シュラウド配置(1)

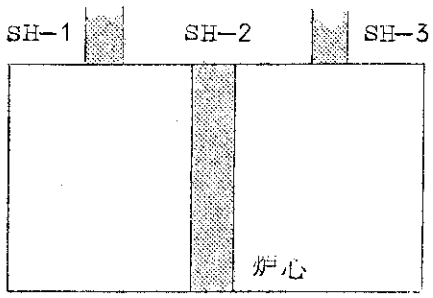


第2－2図　JMTR炉心図

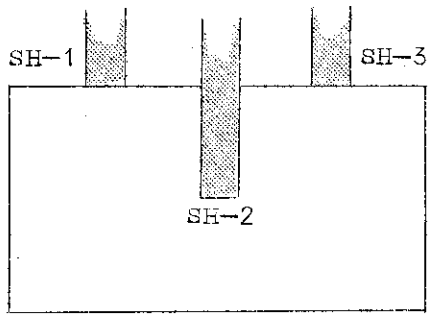
1) 起動時



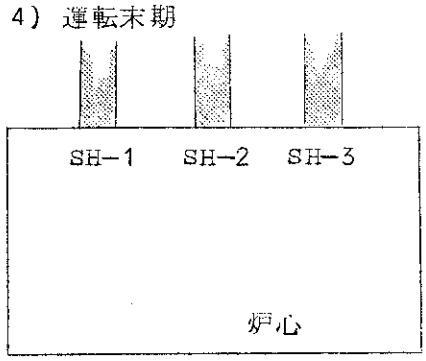
2) Xe 飽和時



3) 運転サイクル途中



4) 運転末期



第2−3図　粗調整棒引抜順序

Ⅲ　熱中性子束変動の測定

1. 測定装置

熱中性子束測定装置は以下に示す各部品により構成される。これらの炉プール，原子炉圧力容器との関係を第３－１図に示す。

1）シュラウド（案内管）

熱中性子束測定用検出器，およびそのケーブル類を炉心内に挿入するための案内管である。案内管は圧力容器内取付部，曲管部（この二つをあわせて案内管１と呼ぶ），検出器交換用の直管部（案内管２）の三つに分割されそれぞれはクイックージョイントにより接続される。

シュラウドの炉心内配置を第３－２図に示す。これらのうち№１（Ｈ－７－４），№２（Ｅ－８），№３（Ｉ－１１），№４（Ｆ－１１）の４本は燃料領域に近く，γ発熱が高いので二重管にして純水強制循環冷却をおこなう。その他の三本は炉プール水の自然循環冷却である。第３－３図に案内管概略図を示す。

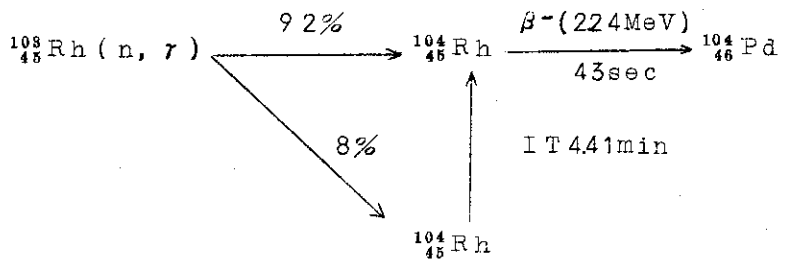
2）シュラウド冷却系

二重管４本の冷却は全体で１m^3／時の純水を各案内管に補給し，曲管部，炉内部を通りながら検出器，シュラウドを冷却し，外側を通って圧力容器上部で炉プールに排出される。一重管三本の冷却は案内管１の曲管部に５φの孔を多数もうけて自然循環するようにした。

第３－４図にシュラウド冷却水フローシートを示す。

3）Self-Powered Neutron Detector

第３－５図にＳＰＤ概略図，第３－６図にＳＰＤ検出部の詳細を示す。検出器の作動原理は，



により放出するβ線を電流として取出すことによる。検出器の感度はエミッター材Ｒｈの原子数，形状により決るが今回使用したものについてはほぼ0.6×10^{-20}A／hv 程度である。Ｒｈの燃焼分による感度の低下は第５－１図に示すが，

10^{18}nvt ―――― 0.015%

10^{19}nvt ―――― 0.15%

10^{20}nvt ―――― 1.49%

10^{21}nvt ―――― 13.93%

10^{22}nvt ―――― 77.69%

10^{23}nvt ―――― 100%

である。

この検出器は時間応答が長く，測定までに十数分待つ必要がある。このため炉心内縦方向分布を短時間に取りうるように4本一組として使用した。これらの位置関係を第3－1表，第3－2表に示す。

この検出器の特長は中空部がないために次に示すＴＩＣよりも熱的に有利であることによりγ発熱の高いＨ－７，Ｅ－８で使用することとした。また，今回の装置では信号ケーブルのγ起電流は補正していない。

4）Toshiba In-Core Chamber

この検出器は小型の電離箱である。仕様および特性を第３－７図，第３－８図に示す。

ＳＰＤに比べ，応答時間が早く炉心内を走査することにより即座に熱中性子束分布が得られる利点がある。しかし，Ｂの中性子吸収断面積が大きいために寿命が短く第３－１３図に示すが，

10^{17}nvt ―――― 0.0076%

10^{18}nvt ―――― 0.076%

10^{19}nvt ―――― 0.756%

10^{20}nvt ―――― 7.33%

10^{21}nvt ―――― 53.19%

10^{22}nvt ―――― 99.95%

である。

また，検出器の構造上，中空部があるので断熱性があり構造材の温度上昇により，相対的な中性子速度が増加するなど温度変動による感度変化への影響が大きい。

これらの点を考慮し今回の測定では反射体領域で使用した。

一方，ＳＰＤとＴＩＣの材料ＲｈとＢの中性子吸処断面積のエネルギー依存の差によりＴＩＣとＳＰＤとで得られる値に差がある。特に，制御棒吸収体の近く炉心上下の付近などで著しい。

5）測定器

電流値の測定には次の計器を用いた。

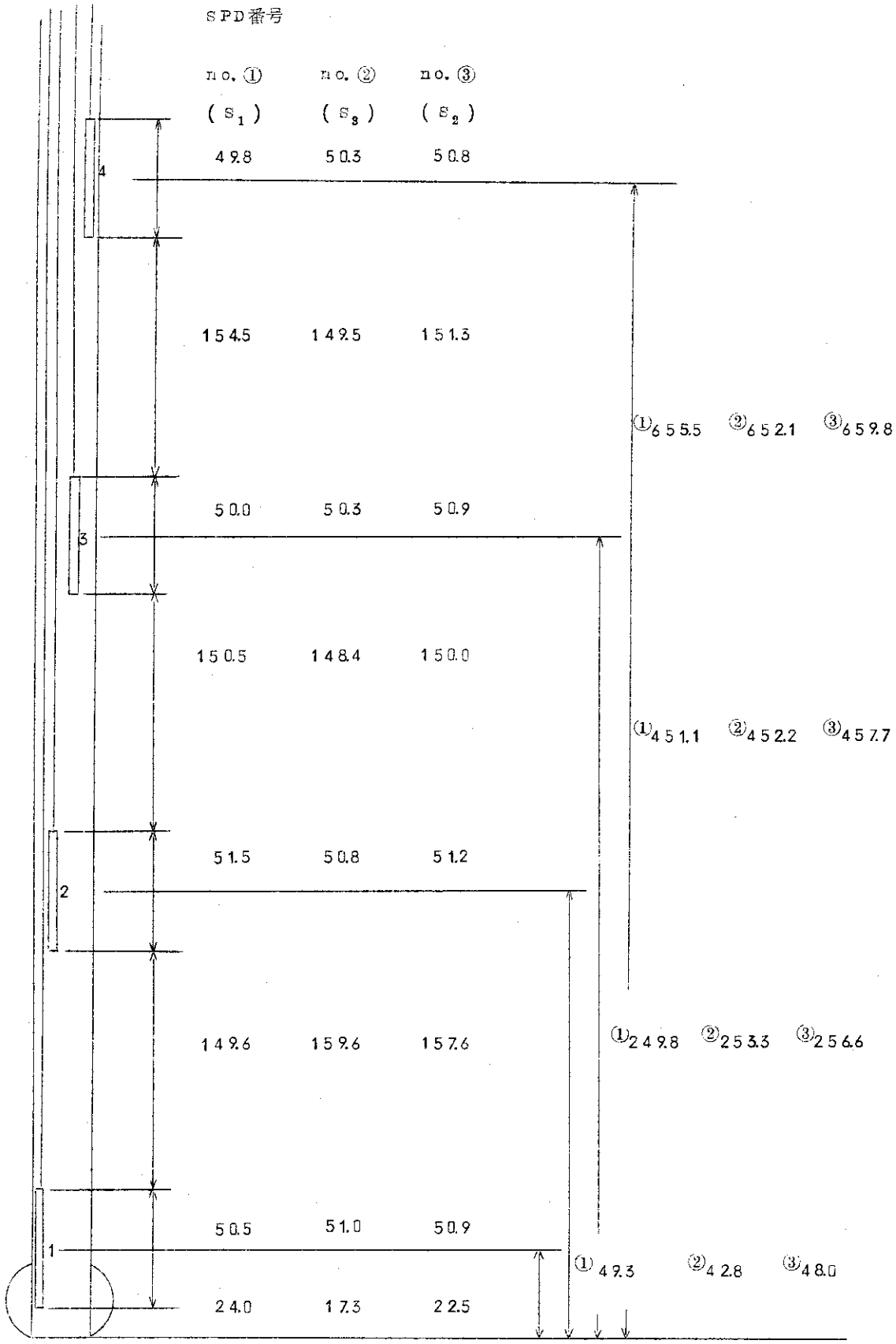
ＴＩＣ： ICM Meter Toshiba

ＳＰＤ： DC micro-volt Ammeter Hp 425A

Higb-Speed Picoammeter KEITHLEY 417

第3－1表　SPD位置関係（X線検査）

単位 mm



第3－2表　SPD測定点

数値は炉中心からの距離　（単位mm）

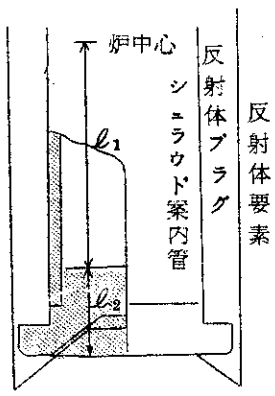
センサー		1		2		3		4	
No.	位置	下端	引上げ	下端	引上げ	下端	引上げ	下端	引上げ
S_1 No. 1	◎ E－8	−311	−196	−110	5	91	206	295	410
	H－7	−342	−246	−141	−45	60	156	265	361
	その他	−393	−298	−192	−97	9	104	213	308
S_2 No. 2	◎ H－7	−343	−247	−134	−38	67	163	269	365
	E－8	−312	−197	−103	12	98	213	300	415
	その他	−394	−299	−185	−90	16	111	218	313
S_3 No. 2	◎ その他	−399	−304	−188	−93	11	106	211	306
	E－8	−317	−202	−106	9	93	208	293	408
	H－7	−348	−252	−137	−41	62	158	262	358

注）1. ◎印は通常使用位置

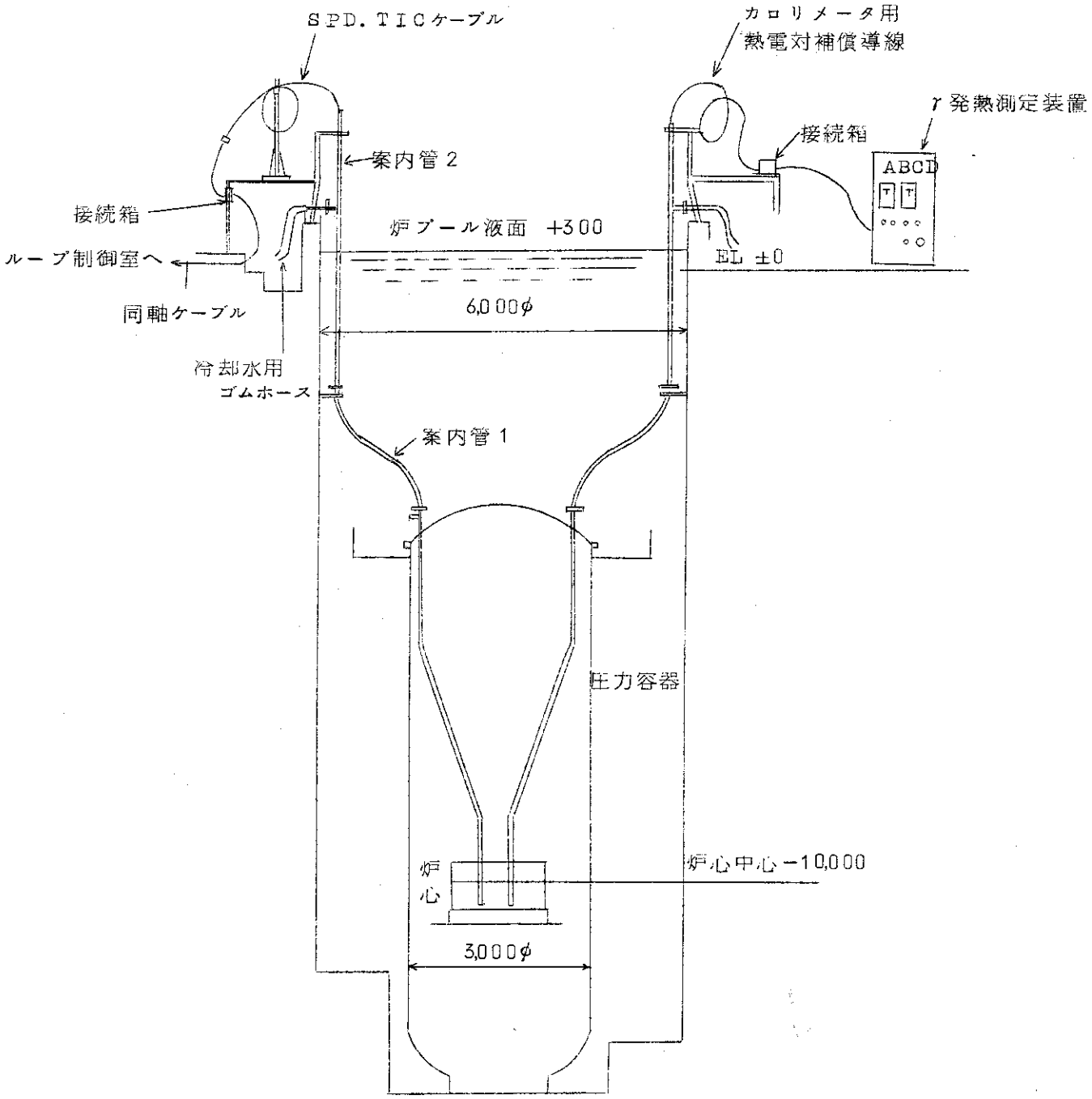
2. 数値はX線検査による位置関係を使用した。

3. 引上げ量
- E－8 ＝ 115mm
- H－7 ＝ 96mm
- その他 ＝ 95mm

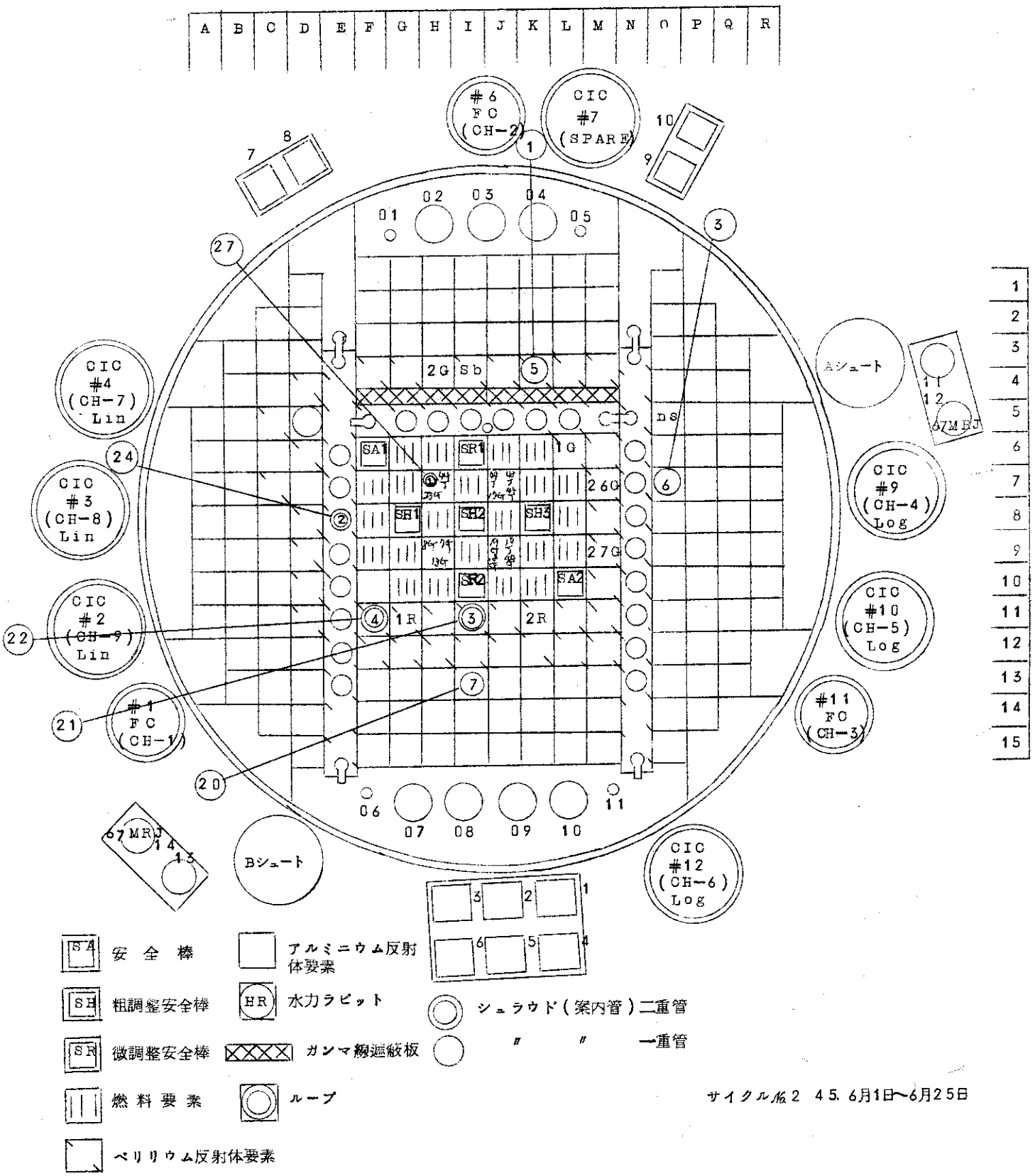
4. シュラウド下端位置



	No.	位置	出口	ℓ_1	ℓ_2
二重管	1	H－7	北	391.5	10
	2	E－8	西	360.0	10
	3	I－11	〃	442.0	28.5
	4	F－11	〃	442.0	28.5
一重管	5	K－4	北	442.0	28.5
	6	O－7	〃	442.0	28.5
	7	I－13	西	442.0	28.5

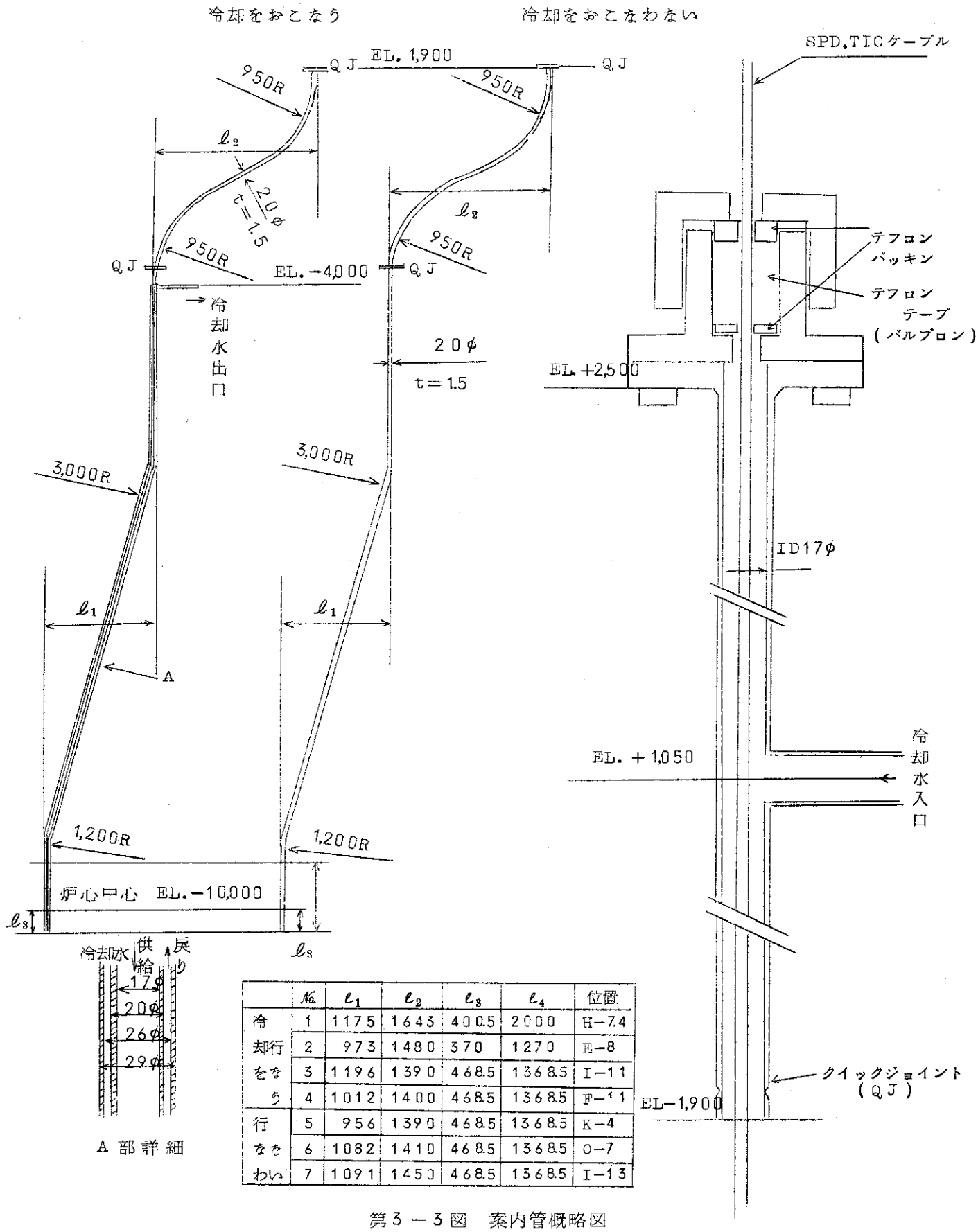


第3−1図 炉プール 圧力容器 案内管 関係図



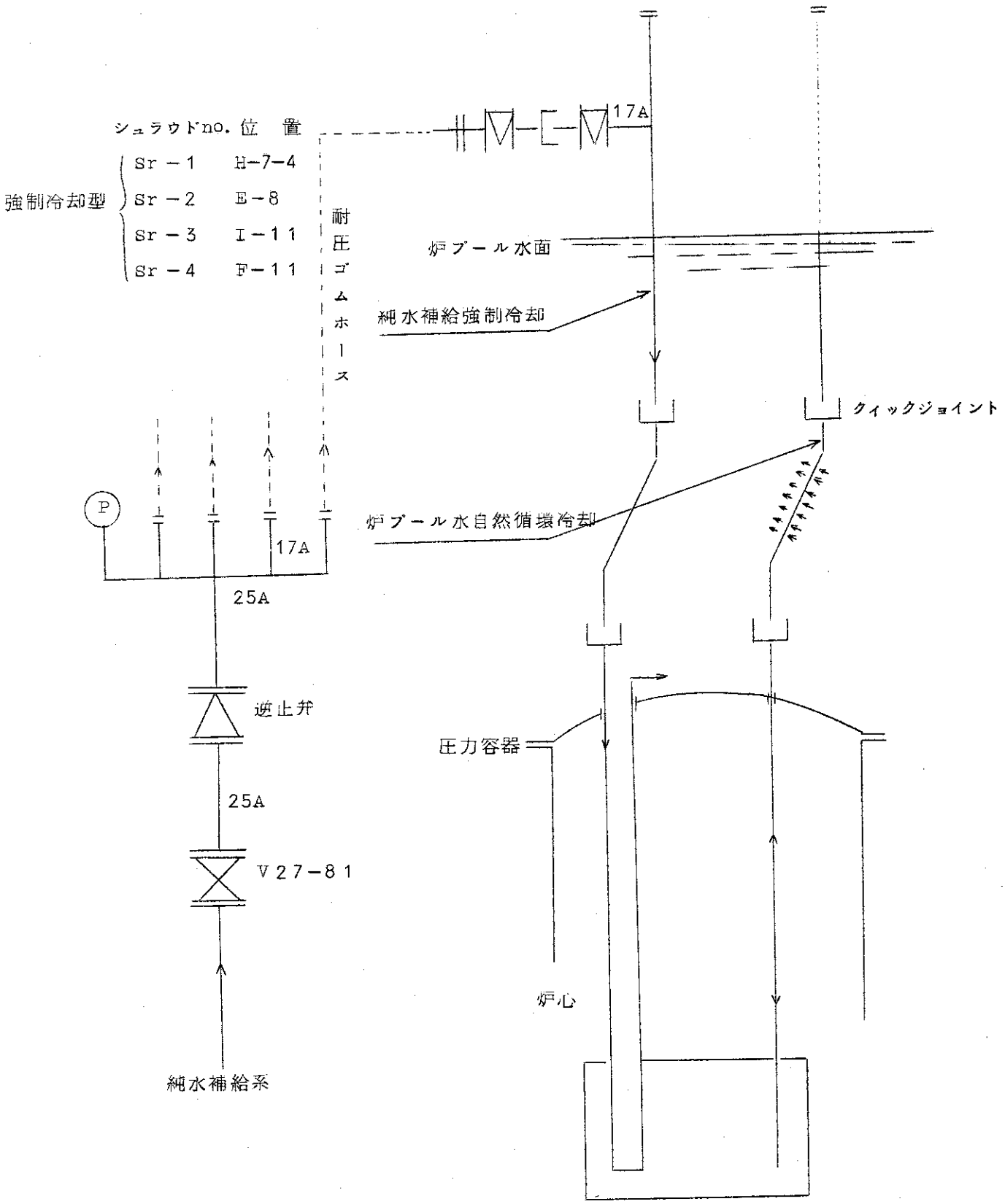
JMTR炉心装荷図

第3－2図 シュラウド配置(2)

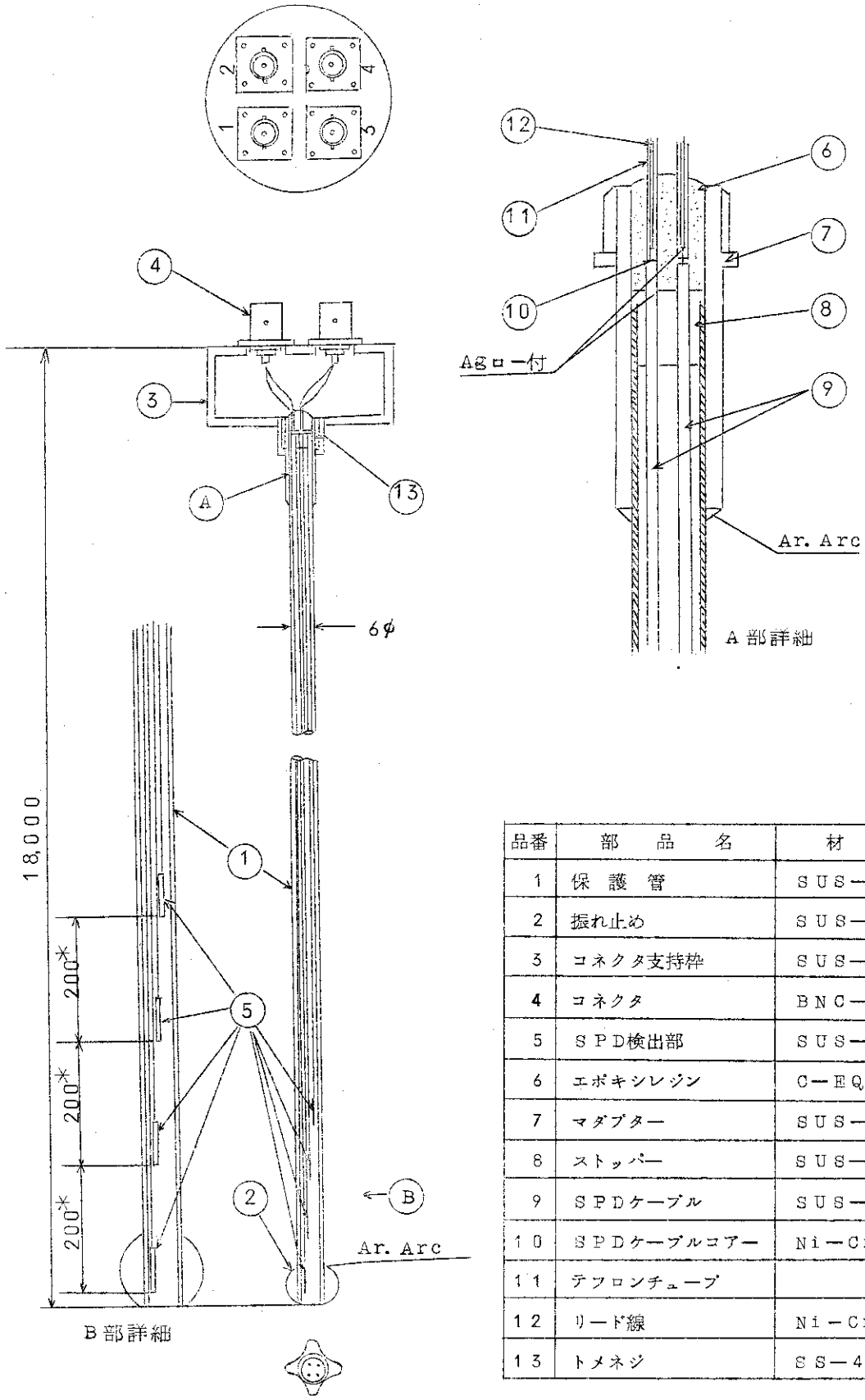


	No.	ℓ_1	ℓ_2	ℓ_3	ℓ_4	位置
冷却行をなう	1	1175	1643	400.5	2000	H−7.4
	2	973	1480	370	1270	E−8
	3	1196	1390	468.5	1368.5	I−11
	4	1012	1400	468.5	1368.5	F−11
行なわない	5	956	1390	468.5	1368.5	K−4
	6	1082	1410	468.5	1368.5	O−7
	7	1091	1450	468.5	1368.5	I−13

第3－3図　案内管概略図



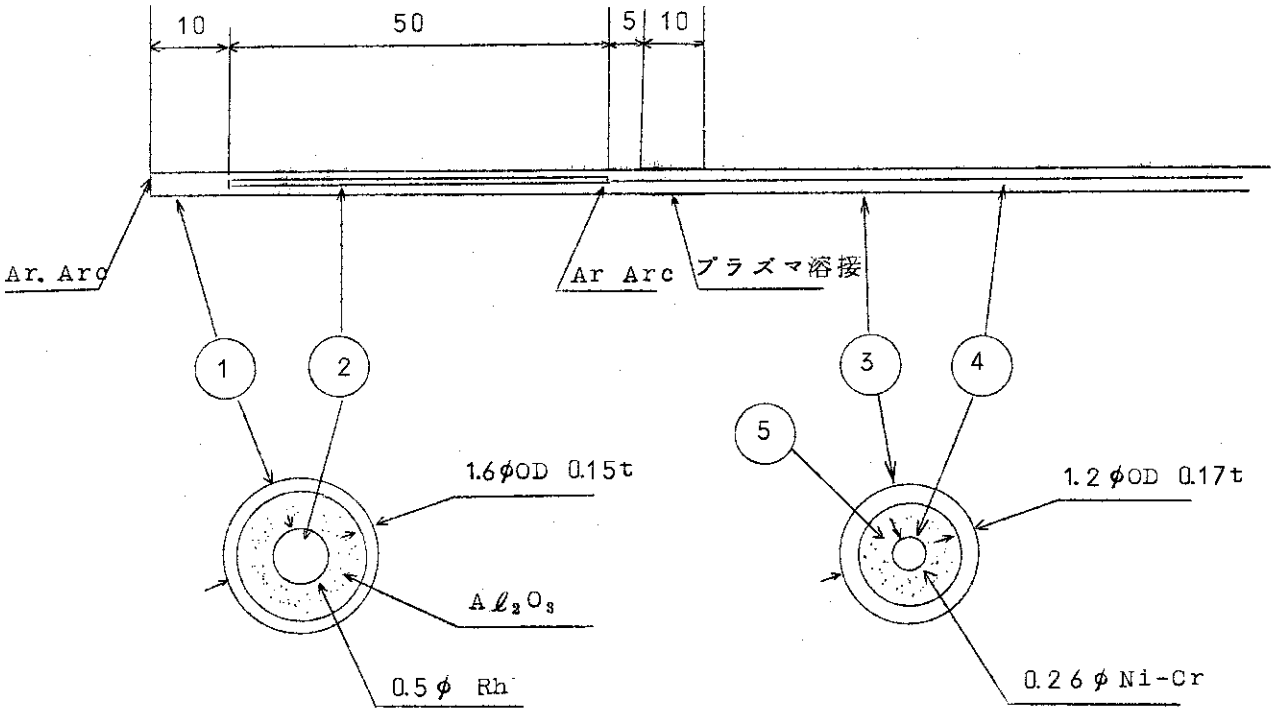
第3－4図 シュラウド冷却水フローシート



品番	部品名	材質
1	保護管	SUS−27
2	振れ止め	SUS−27
3	コネクタ支持枠	SUS−27
4	コネクタ	BNC−R
5	SPD検出部	SUS−43
6	エポキシレジン	C−EQ
7	マダプター	SUS−27
8	ストッパー	SUS−27
9	SPDケーブル	SUS−43
10	SPDケーブルコアー	Ni−Cr（NCH−1）
11	テフロンチューブ	
12	リード線	Ni−Cr
13	トメネジ	SS−41

＊詳細は別表（第3−1表）に示す。

第3−5図　SPD概略図



品　番	部　品　名	材　　質
1	コレクター	SUS−43
2	エミッター	Rh
3	ケーブルシース	SUS−43
4	ケーブルコアー	Ni−Cr(NCH−1)
5	絶　縁　物	MgO

第3−6図　Self-Powered Neutron Detector

ASSEMBLY NUMBER ———— JR-6B--462, 471, 472, 474, 481, 483.
CHAMBER NUMBER ———— ICM-9F-105, 304, 201, 209, 319, 312.
MATERIALS

Anode ———— Nickel
Cathode ———— Fe-Ni alloy
Detector Housing ———— Inconel
Conector Housing ———— Stainless Steel
Electrode Corting ———— Natural Boron
Insulator: Detector ———— Alumina
Cable ———— Alumina
Filling Gas ———— Argon at 760mm of Hg.

CHARACTERISTICS

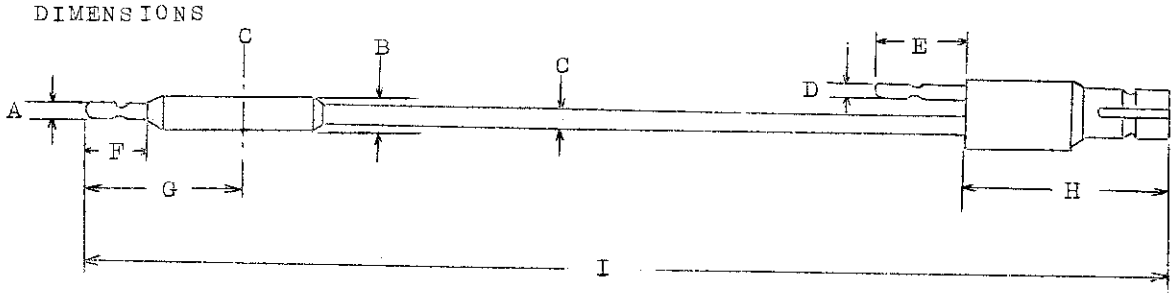
	Sn (A/nv)	Tp (%/V)	Rp (V)	R (Ohm)	El.gap (mm)	Ef.vol (cc)	Vb (V)
JR-6B-462	$1.65 \cdot 10^{-18}$	0.093	100 ~ 400	$>10^{12}$	0.400	0.046	1500
JR-6B-471	$1.79 \cdot 10^{-18}$	0.037	100 ~ 300	$>10^{12}$	0.300	0.036	1200
JR-6B-472	$1.43 \cdot 10^{-18}$	0.026	80 ~ 400	$1.5 \cdot 10^{12}$	0.375	0.043	1300
JR-6B-474	$2.60 \cdot 10^{-18}$	0.240	80 ~ 300	$2 \cdot 10^{12}$	0.290	0.043	550
JR-6B-481	$1.67 \cdot 10^{-18}$	0.055	80 ~ 300	$>10^{12}$	0.290	0.034	990
JR-6B-483	$1.67 \cdot 10^{-18}$	0.059	80 ~ 400	$>10^{12}$	0.290	0.034	1120

1*Exp.Date: 45-2-6(, 70) JRR-4 2.5MW , $3.8 \cdot 10^{13}$ nv.

Sn: Neutron Sensitivity
Tp: Plateau Tangent
Rp: Plateau Range
R : Insulation Resistance at room temperature
El.gap: Electrode gap
Ef.vol: Efective volume of detector
Vb: Break down Voltage

1* Plateau Characteristics.....Fig2-8

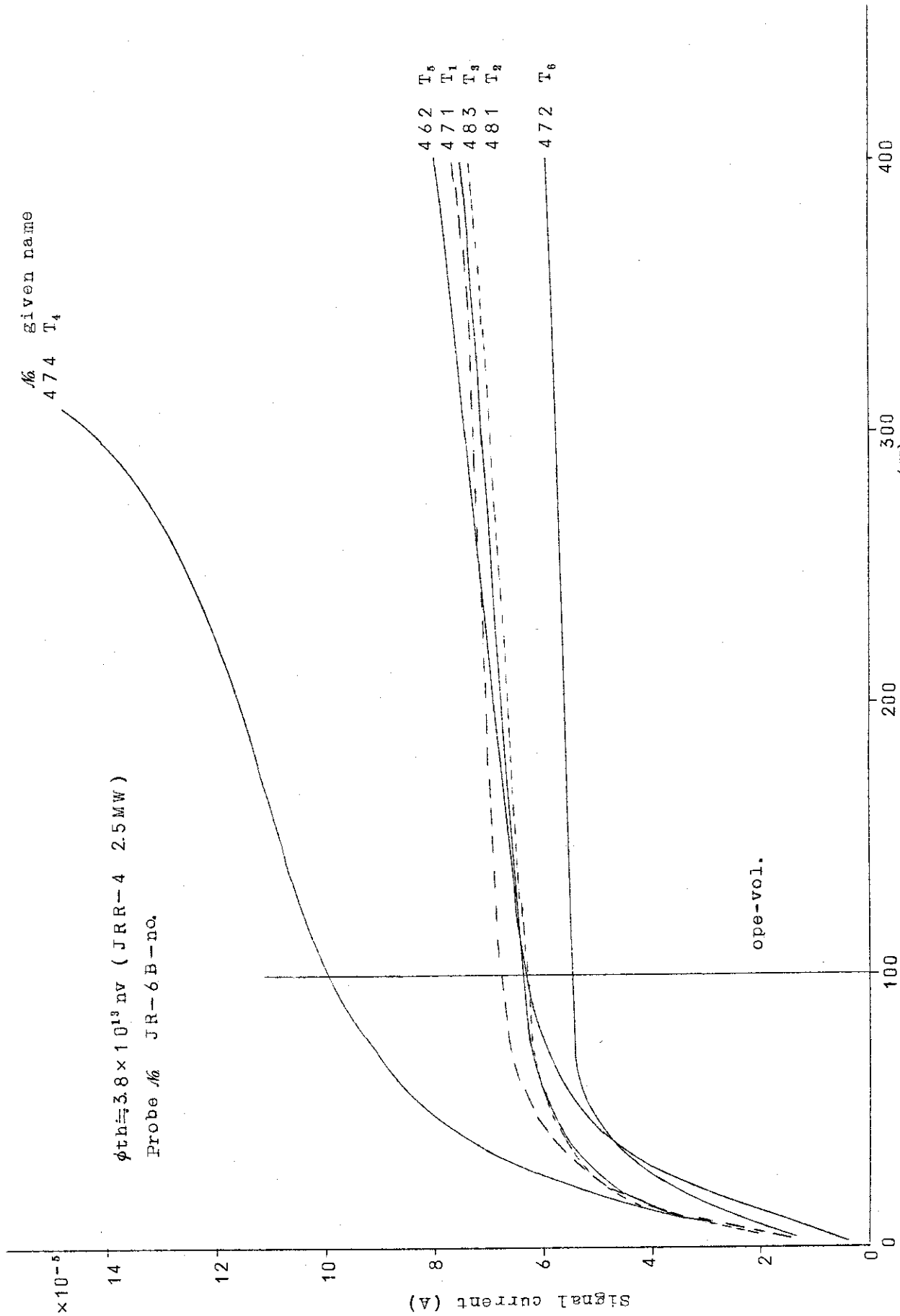
DIMENSIONS



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
JR-6B-462	3.0	6.0	3.2	3.0	20	20	42	48.5	18100
JR-6B-471	3.0	6.0	3.2	3.0	20	20	42	48.5	18000
JR-6B-472	3.0	6.0	3.2	3.0	20	20	42	48.5	18000
JR-6B-474	3.0	6.0	3.2	3.0	20	20	42	48.5	18000
JR-6B-481	3.0	6.0	3.2	3.0	20	20	42	48.5	17560
JR-6B-483	3.0	6.0	3.2	3.0	20	20	42	48.5	18370

Exp.and Mes.: JAERI, TOSHIBA

第3－7図 IN-CORE MONITOR(TIC)



第3－8図 TIC Plateau Characteristics

2. インコアモニタによる中性子束測定上の問題

今回のインコアモニタによる炉内計測は，10^{14} orderの熱中性子束と，10 w/gに達する強ガンマ線場で行なわれた。この様な高中性子束，強ガンマの場が測定に与えた影響を中心に，SPDおよびTICによる中性子束測定上の問題点について以下に述べる。

1) 感度の直線性

第3－9図にTICおよびSPDの各々について炉出力と出力電流との対応を示す。これによればTIC出力電流は，10^{-5} Aの半ばをこえると直線からずれはじめ，3×10^{-4} A程度になると低出力域からの外挿による比例直線から得られる値の60％程度になっている。一方SPDの出力電流は，今回の測定範囲では，炉出力に対し，ほゞ直線関係を保っている。なおTICの中性子感度は約1.4×10^{-18} A/nv，SPDのそれは0.6×10^{-20} A/nvであり，本図に示した両検出器の特性曲線は，ほゞ同じ中性子束範囲を包括しているといえる。

2) 応答特性

第3－10図にSPD出力電流の中性子束応答を示す。低出力では検出器移動後約6分で飽和値に達しているが，30 MWでの測定時には，飽和するまでに少なくとも15分を要している。

一方TICの中性子応答は第3－11図のようである。30 MWの測定では，検出器位置移動にともなう中性子束変化に応じた出力電流の変化に対して，一種の引き戻し現象がおきている。

TICに関する上記1，2の現象を考察するため，低中性子束および高中性子束におけるプラトー特性を第3－12図に示す。高中性子束におけるプラトー曲線が比較的低い電圧で立上りはじめているが，高頻度で生ずる電離現象のために放電を起しやすくなっているためであると説明づけられるとすれば，特に今回の測定条件で，TICの電離箱としての機能が失なわれているとは思われない。

以上のことからTICには，ガンマ加熱による感度低下が起っていると考えられる。*

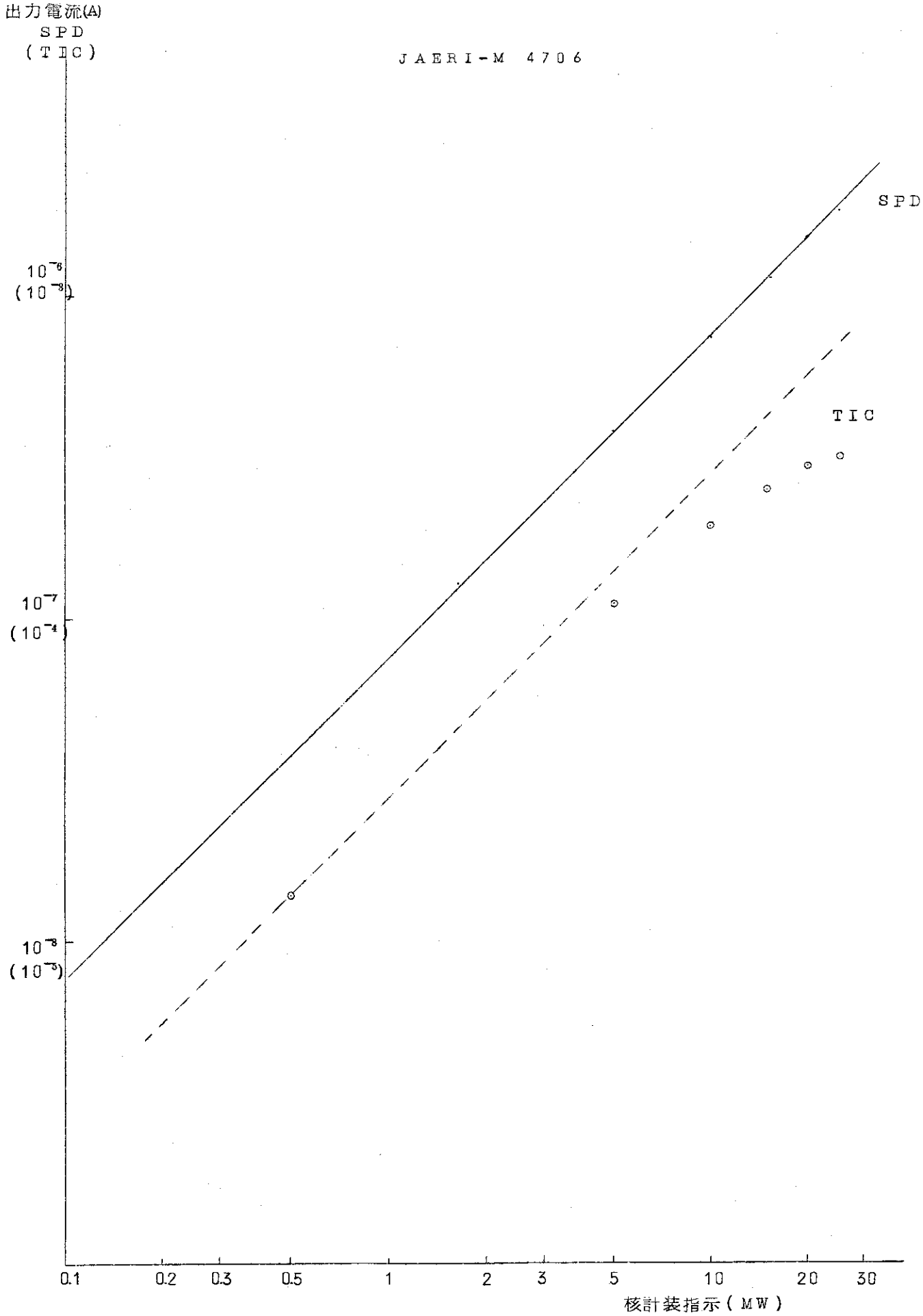
ふたゝびSPDの応答についてしらべると，20 KW程度の低出力では比較的早く飽和値に達しているが，Rh^{104m}の4.4 minという半減期から考えると，30 MWにおける応答は妥当と思われ，むしろ低出力での応答が早いことに疑問が残る。Rh^{104}およびRh^{104m}の生成比は以下のデータから出力（または中性子束）に依存しないこと思われる。

Rh^{103}	σ_c (to Rh^{104}) = 144 barn	
	σ_c (to Rh^{104m}) = 11 barn	
Rh^{104}	$T_{1/2}$ = 44 sec	σ_c = 40 barn
Rh^{104m}	$T_{1/2}$ = 4.4 min	σ_c = 800 barn

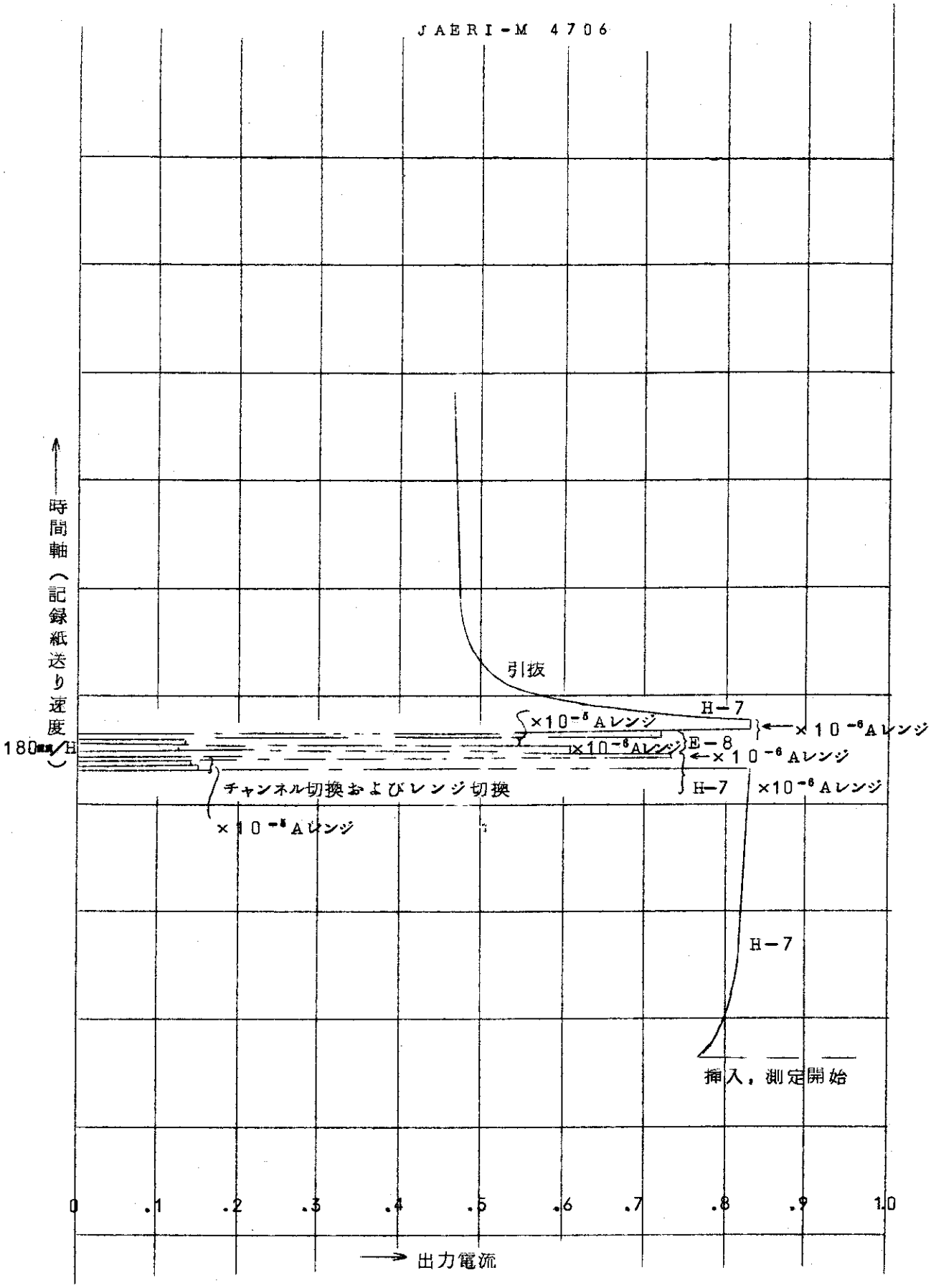
---

* その後の検討の結果，この原因はガンマ加熱に起因する機械的歪みにより封入ガスが漏洩したことによるのではないかとの見方が強くなっている。

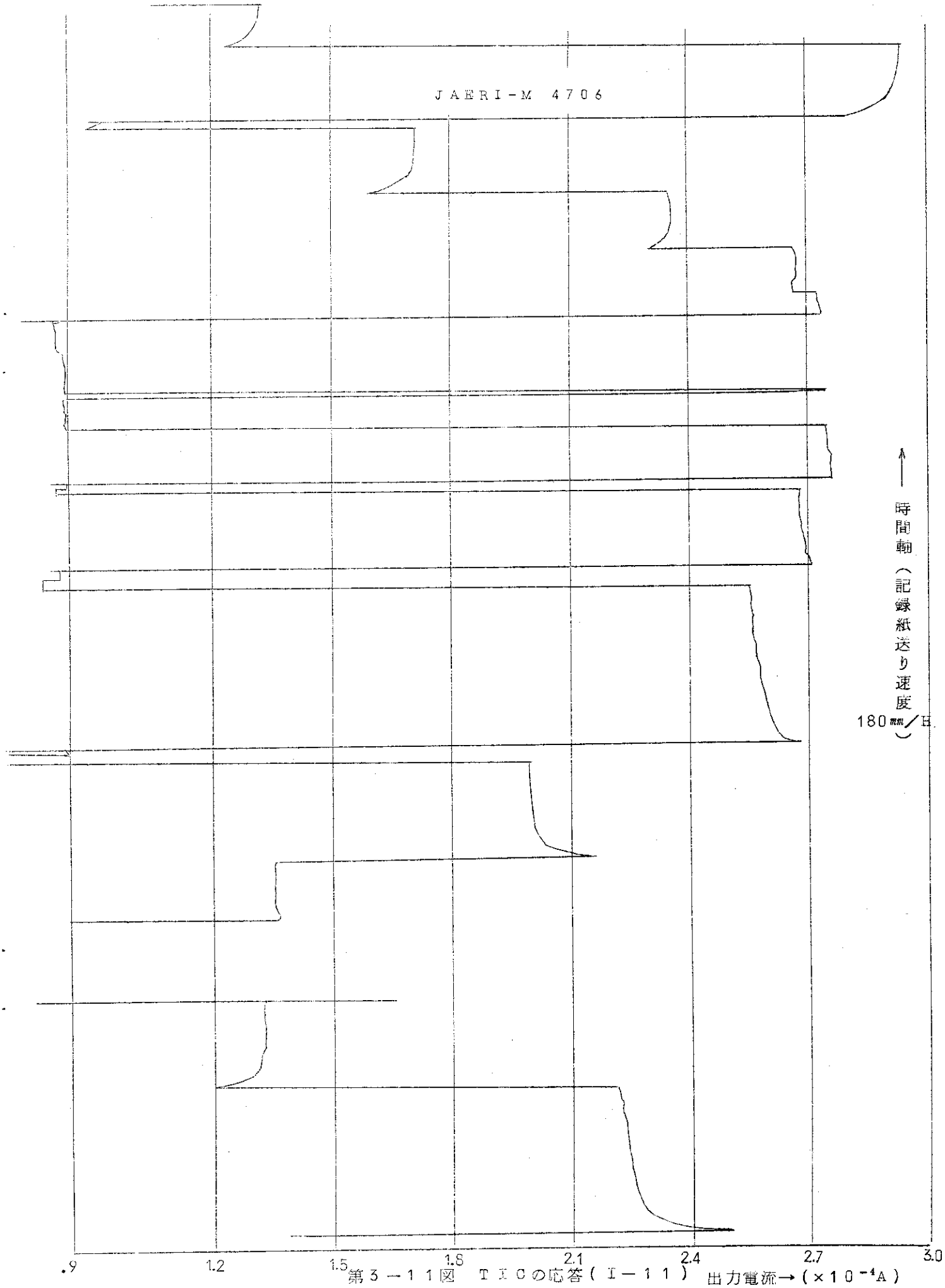
測定技術上の問題点としては，他にセンサの burn up シュラウド内でのセンサの泳ぎがある。burn up については，照射量の算出が繁雑であるために行なっていないが，実際に中性子束の測定を行なうにあたっては，できるだけ burn up を避けるよう測定時以外はセンサを炉心部から外れた位置に置くようにした。またシュラウド内のＴＩＣセンサの泳ぎについては，特に中性子束勾配の大きいＫ－４，０－７，Ｉ－１３での測定値の再現性は±１０％程度である。



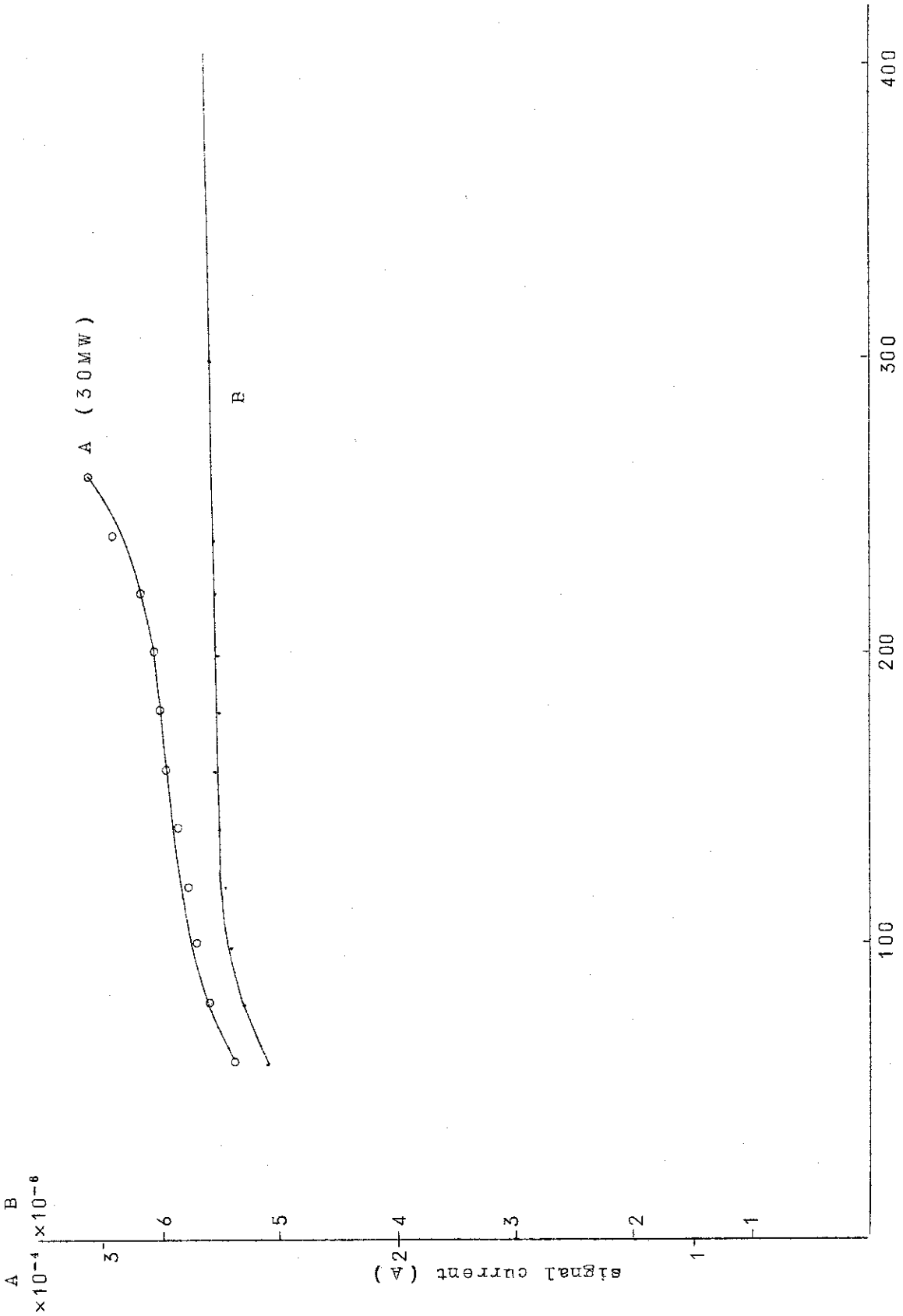
第3－9図　SPDおよびTICの炉出力－出力電流関係曲線



第３－１０図　ＳＰＤの応答



第３－１１図　ＴＩＣの応答（Ｉ－１１）



第3－12図 TIC #2 プラト一特性

3. 測定結果

1) 相互校正

SPD，TICともに検出器により熱中性子感度に相違がある。このため，炉心内の熱中性子束分布を求める上で検出器の相対感度が必要となる。一方，測定中の照射によりRh，Bが燃焼し，その分だけ感度は劣化するので燃焼分をも補正する必要が生ずる。

これらの目的に従い，炉出力20KWにおいて初期の，また定格出力時において数回の相互校正をおこなった。測定方法は炉出力を一定に保持し，炉心内同一位置に各検出器を順次挿入し，その出力電流値を測定することにより求めた。初期校正時の炉出力20KWは高すぎる場合には測定中の制御棒変動と検出器の交換時に放射線強度が，また低すぎる場合には検出器信号ケーブルのγ感度が無視出来なくなり熱中性子束対出力電流値の線型性が保持されなくなることとにより決定された。

第3－3表にSPD相互校正値の推奨値と問題点

第3－4表にTIC相互校正値の推奨値と問題点

第3－5表，第3－6表に低出力でのSPD相互校正測定値

第3－7表に高出力でのSPD相互校正測定値

第3－8表にTIC相互校正測定値

第3－13図にSPD，TICの中性子照射による感度低下

第3－14図にTICの定格出力時のプラトー特性

第3－15図～第3－24図にTIC，SPDの相互校正測定電流値を示す。

2) Xe 蓄積炉心での測定

高出力時には，Xe 分布と燃焼により制御棒が抜け，中性子束が変化する。ここではXe分布のみの影響をみるため，原子炉を熱出力30MWで運転した後，出力を20KWに低下させて保ち，Xe 蓄積後その崩壊によって挿入される制御棒位置に対応して炉心内の縦方向中性子束分布を測定した。これはJMTRCでポイズン板を用いて燃焼を模擬した実験（Cold Clean）と比較するためと，高出力で燃焼だけによる中性子束分布の変化を評価するためである。

第3－9表に測定時の諸条件を記した。実験データは粗調整棒SH－2が，0，200，400，600 mm付近になった時のデータで分布を追うことにした。各炉心位置での測定結果を第3－25図～第3－31図に示す。

I－11の測定結果をもとにして考察してみる。

SH－2が全挿入では中性子束分布のピークは炉中心にある。このピークはSH－2が抜けるにつれて下におさえられ，600 mm付近まで抜けるとピークは再び炉中心にもどりSH－2全挿入での形状に近づく。

この変化を見やすくするため炉心垂直方向各点の制御棒効果をみる図を第3－32図に示した。これによると上に述べた傾向が顕著である。すなわち炉心中心により上部では制御棒が抜けるにつれて中性子束は減少しはじめ，SH－2が300～400 mm抜けたあたりで最小となり，さらに600 mm付近になるとSH－2全挿入での値に近づく。炉心中心より下部では上部とは逆の傾向にある。

I－11，H－7－4，E－8をのぞいて中性子束減衰の勾配が急な位置での測定のため測定データにばらつきを生じたが，傾向としてO－7とI－13は制御棒の影響を受けにくく，その他の位置ではI－11と同じような結果を得た。（第3－33図～第3－35図）

以上により今回の測定の結論をおこなうと次のようになる。

(i) Xe 分布は縦方向は一様でないことを確認し，したがって，一様にポイズン板を燃料板間に入れたJMTRCでの実験とは比較できない。

(ii) 高出力時では低出力時とは異なったXe 分布の問題を生じ，両者のデータを単に比較することはできない。

(iii) この測定から新らしい問題が生じた。すなわちXe 分布がそれ自体中性子束分布の変化と同様な複雑な変化をすることである。

3）温度依存性

核計装出力計の検出器であるCIC出力電流一定運転のために生ずる出力変動の温度による効果を調べるため，一次系運転によるいわゆる pumping power によって一次系冷却水温度を上昇させ，中性子束変動を調べた。

実験はTICは炉中心で一点，SPDは縦方向四点で，各温度で測定した。原子炉入口温度を下げる時にはその前後で垂直方向中性子束分布を測定した。

測定結果については第3－36図～第3－44図および第3－10表がある。

今回の目的のため，第3－40図～第3－44図から温度変化に対する出力変動係数を求めた。その結果－0.33%/℃～－0.54%/℃となった（第3－10表）。一方炉中心一点測定のデータから10℃間隔で求めた場合－0.2%/℃～－6%/℃ の間でばらついている。これはデータが多いので今後のデータ処理方法を考えるべきである。SPDの結果は測定値自体ばらつきが大きく今回整理をおこなっていない。

以上により今回の測定結果について結論すると以下の通りである。

温度変化に対する出力変動係数は，－0.33%/℃から－0.54%/℃となった。この値は熱出力計から求めた値，または計算値である－0.8%/℃とは二倍近く異なっているが，これについては判然としない。この問題については以下の検討が必要である。すなわち，

① TIC自体の温度依存性

② 制御棒効果の除去

である。

4）定格出力での測定

第2サイクルにおいて，JMTRの運転は核出力一定の条件の下で行なわれたため，運転中の熱出力はプラント特性検討のための二次系の状態変更などもあって，かなり変化している。（第2－2表参照）

中性子束の測定は，このような種々異なった条件のもとで行なわれたので，その結果を以降のサイクルで実施される熱出力一定（30MW）の条件にすべて規格化した。この場合，二次系の状態変更にともなう炉心出入口温度の変化は，当初予想した場合よりも，その巾が小かったため，その効果は特に考慮せず，単に中性子束測定時の出力と30MWと

の比を測定結果に考慮することとした。

結果を論ずる場合に問題となるのはII－2で述べたインコアモニタの非直線性の問題である。中性子束の高い反射体第一層のように検出器の出力電流が10^{-4}をこえる場合には，かなり大巾な補正が必要とされる。

しかしながら今回の測定の主な目的は，中性子束の初期値に対するサイクル中の変動の割合を相対的に求めることであり，検出器出力の比の形で処理する場合には，中性子束の変動巾がきわめて大きくないかぎり，誤差を比較的小さい範囲にとゞめることができる。(付参照)

第3－45図より第3－51図までは，この考えにもとづき，たて軸に定格出力運転の初期値に対する割合，横軸に制御棒位置をとって示したものである。炉心垂直方向各位置での様子を示すため，炉心垂直方向中心，±100mm，±200mm，±300mm（SPDについては，組になった4個の検出器位置の相互関係から，ここで示したものに近い位置）について示した。たゞしI－13とO－7については，Xe飽和後の6月11日の値に対するものを示してある。

第3－52図から第3－58図までは，たて軸に検出器出力電流，横軸に運転日数をとって，前と同線炉心垂直方向各位置に対する時間的変動を示したものである。また第3－59図より第3－70図には垂直方向分布を示す。これらにおいては，TICの出力をそのまゝプロットしてある。

O－7，I－13はXe飽和までの測定を行なわなかったが，その他についてみるとXe飽和までの約一日の変動が，それに続く運転期間内での変動にくらべて大きいことがわかる。

第3－3表　SPD相互較正推奨値

1. SPD検出器束の下から2番目を1.00としこれに規格化する。
2. 測定値 ÷ 校正値として使用する。

センサー		校正値
S_1	4	0.93
	3	0.99
	2	1.00
	1	0.97

センサー		校正値
S_2	4	1.02
	3	1.03
	2	1.00
	1	1.01

注1）　S_1 は6／21E－8，6／23I－11，6／25E－8での平均値

S_2 は6／23，6／24，6／25H－7での平均値

注2）　校正値の精度は±1%である。

問題点　①　シュラウド内径方向のズレが大きいため，中性子束勾配のきついI－13，O－7，K－4については位置の再現性は±10%である。

②　①の理由により，20KWでの相互校正値は誤差が大きい。（K－4）

③　SPDの線型性が低出力域で保持されないと思われる。理由はケーブルのγ起電流によると考えられる。

④　上表の校正値をE－8，H－7，I－11，F－11以外に使用することは①の理由により問題である。

第3－4表　TIC相互校正推奨値

1. Bの燃焼分を無視出来るT_5（照射量が少ない）を1.00とし規格化する。
2. 測定値 ÷ 校正値として使用する。

TIC	校正値
T_1	0.90
T_2	0.85
T_3	0.94
T_4	1.55
T_5	1.00
T_6	0.81

注1）　校正値は実験期間中最終日に相当する値である。

2）　Bの燃焼分による感度低下を第5－1図に示す。

問題点　①　JRR－4，JMTR20KW相互校正の差が生じた理由が不明

②　6／13，6／18のI－11における値はγ線の影響と思われ低い値を示す。

③　①，②によりBの燃焼分を実験的に求められない。

第3－5表　20 kW相互校正

I－11

Range×10^{-9}A

		−395	−197	+3	+203	+403	+603	平　均
S_3	測定値	.50	1.3	1.35	.605			
	4 校正値		.96	1.04	1.03			1.00±0.04
	3 〃		1.35	1.3	.585	.0795		
			1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	2 〃			—	—	—		
	1 〃				.50	.073	—	
					.85	.92		.88±0.03
S_1	測定値	.55	1.40	1.45	.619			
	4 校正値		.94	1.00	.92			95±0.04
	3 〃		1.49	1.45	.67	.0855		
			1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	2 〃			1.5	.73	.146	.0555	
				1.63	1.09	1.71		1.06±0.03
	1 〃				.495	.085	.0021	
					.74	.99		
$\frac{S_{1-3}}{S_{3-3}}$			1.10	1.11	1.14	(1.07)		1.12±0.02

S_{3-3} を 1.00 とした場合の校正値

	S_3	S_2	S_1
4	.99	.92 (.99)	1.06 (.94)
3	1.00	.93 (1.00)	1.12 (1.00)
2	—	1.04 (1.11)	1.19 (1.06)
1	.92	1.06 (1.14)	.83 (.74)

第3－6表　20kW相互校正

K－4

Range×10^{-10}A

		−395	−197	+3	+203	+403	+603	平　均
S_3	測定値	1.3	4.0	4.4	2.6_7			
	4 校正値		.95	.97	.99			.97±0.014
	3 〃		4.2	4.5_3	2.7	.70		
			1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	2 〃			—	—	—		—
	1 〃				2.6	0.65	—	
					.96	.93		95±0.014

S_2	測定値	1.1_1	3.9_5	4.2	2.4			
	4 校正値		1.02	1.00	.94			.99±0.4
	3 〃		3.8_7	4.20	2.5_5	.57		
			1.00	1.00	1.00	1.00		1.00
	2 〃			4.7_5	2.8_0	.69	$.014_5$	
				1.13	1.10	1.21		1.12±0.01
	1 〃				2.9_0	7.0_8	.021	
					1.14	1.24		1.14

$\frac{S_{2-3}}{S_{3-3}}$	.92	.93	.94	(.81)		.93±0.00

第３－７表　定格出力での校正（ＳＰＤ）

（測定値 ÷ 校正値として使用する）

	6/21※ ○E－8	6/21 ○I－13	6/23 F－11	6/23 ○I－11	6/25 ○E－8	○印平均
S_1 4	.97	.99	.96	.97	.97	.97
3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.09	1.02	.99	.97	.99
1	.94	1.01	.94	.94	.92	.93

	6/23 ○H－7	6/24 ○H－7	6/25 ○H－7	
S_2 4	1.00	1.02	1.01	1.01
3	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.02	1.03	1.04	1.03
1	.99	1.02	1.05	1.02

	6/22 K－4	6/22 O－7	6/23 K－4	6/23 O－7	6/24 O－7	6/24 K－4	
S_3 4	1.10	1.16	.92	1.23	1.02	.91	
3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
2	1.04	.96	.96	1.19	1.04	.95	
1	.98	1.01	.93	1.01	.90	.93	

※　測定日が６月２１日であることを示す。以下同様

第３－８表　ＴＩＣの相互校正値（Ｂ　Burn-upを含んだ値）

（測定値 ÷ 校正値として使用する）

検出器		ＪＲＲ－４の結果(1)		２０ｋＷでの相互校正		定格出力相互校正(5)6/13		6/18		6/21, 22		
		Bias100V	200V	Bias100V	200V (2)換算	K-4	I-11	K-4	I-11	O-7	I-13	B.Burn-up*
T_1	JR-6B 471	1.09 測定 44. 9. 4	1.04	.88	(JRR-4) .84 (JMTR) .84		(.46) .71		(.44) .68		.90	6/13→6/18 4.2% 13%
T_2	481	1.00 44.10.23	.96	.78	.75 .76		(.43) .67		(.42) .65		.85	6/13→6/18 2.3% 11%
T_3	483	1.01 44.10.24	.98	.94	.88 .90	.95		.96		(1.11) .90		8%
T_4	474	1.56 44. 9. 5	1.65	1.08	1.14 1.13		(1.00) 1.55(3)		(1.00) 1.55(3)		1.55	6%
T_5	462	1.00 44. 6. 6	1.00	1.00	1.00 1.00	1.00		1.00			1.00	0%
T_6	472	.87 44. 9. 6	.82	.63	.58 .62	.82		.80		(1.00) .81(4)		1%

(1) 炉出力2.5ＭＷ（$\phi_{th}=3.8\times10^{13}$ nv）

(2) プラトー特性から算出（以下の換算係数を使用）

I_{100}/I_{200}

	ＪＲＲ－４（2.5MW）	ＪＭＴＲ（3.2MW）
T_1	.96（1.05）	.97（1.05）
T_2	.95（1.04）	.94（1.02）
T_3	.97（1.07）	.96（1.04）
T_4	.86（.95）	.88（.96）
T_5	.91（1.00）	.92（1.00）
T_6	.98（1.08）	.94（1.02）

(3) T_4 は６／７以後相互校正時のみ使用しているのでＢのＢurn-up は少ない。従ってT_5 に対する校正値は６／２２のＩ－１３における値を使用する。

(4) T_6 は６／７以後相互校正時のみ使用しているのでＢの Burn-up は少ない。従ってT_5 に対する校正値は６／１３，１８の平均値を使用する。

(5) 定格出力での相互校正はBias　２００Ｖである。

＊ 非公式，ＪＲＲ－４の値に対する値，公式値は照射履歴を考慮して算出する。

第3－9表　測定時の炉出力と制御棒位置

ステップ番号	熱出力 ＊ (KW)	炉心入口温度 (℃)	SH−1 (mm)	SH−2 (mm)	SH−3 (mm)
1	29.4	15.5	850.0	591.8	850.0
2	〃	16.0	〃	525.2	〃
3	29.0	17.0	〃	407.0	〃
4	28.7	〃	〃	344.0	〃
5	28.4	〃	〃	311.7	〃
6	28.0	〃	〃	280.3	〃
7	26.9	〃	〃	199.5	〃
8	26.0	16.8	〃	128.0	〃
9	25.5	〃	769.5	0	769.5
10	26.3	〃	688.1	0	687.8

＊　熱出力は，炉心入口温度と制御棒位置とを考慮して求めた。

第3－10表　温度変化に対する出力変化係数
（TICのデータより算出）

測定位置	T_H (℃)	$\overline{I}_H$ (A)	T_L (℃)	$\overline{I}_L$ (A)	T_H-T_L (℃)	ξ (%/℃)
H−7−4	49.8	2.29×10^{-7}	20.3	2.59×10^{-7}	29.5	−0.42
E−8	〃	4.12×10^{-7}	20.1	4.59×10^{-7}	29.7	−0.36
I−11	49.7	3.19×10^{-7}	19.7	3.52×10^{-7}	30.0	−0.33
O−7	49.5	4.15×10^{-8}	〃	4.60×10^{-8}	29.8	−0.35
I−13	49.4	$0.95_0\times10^{-7}$	16.0	1.14×10^{-7}	33.4	−0.54

但し　T_H ：　高温時の原子炉入口温度

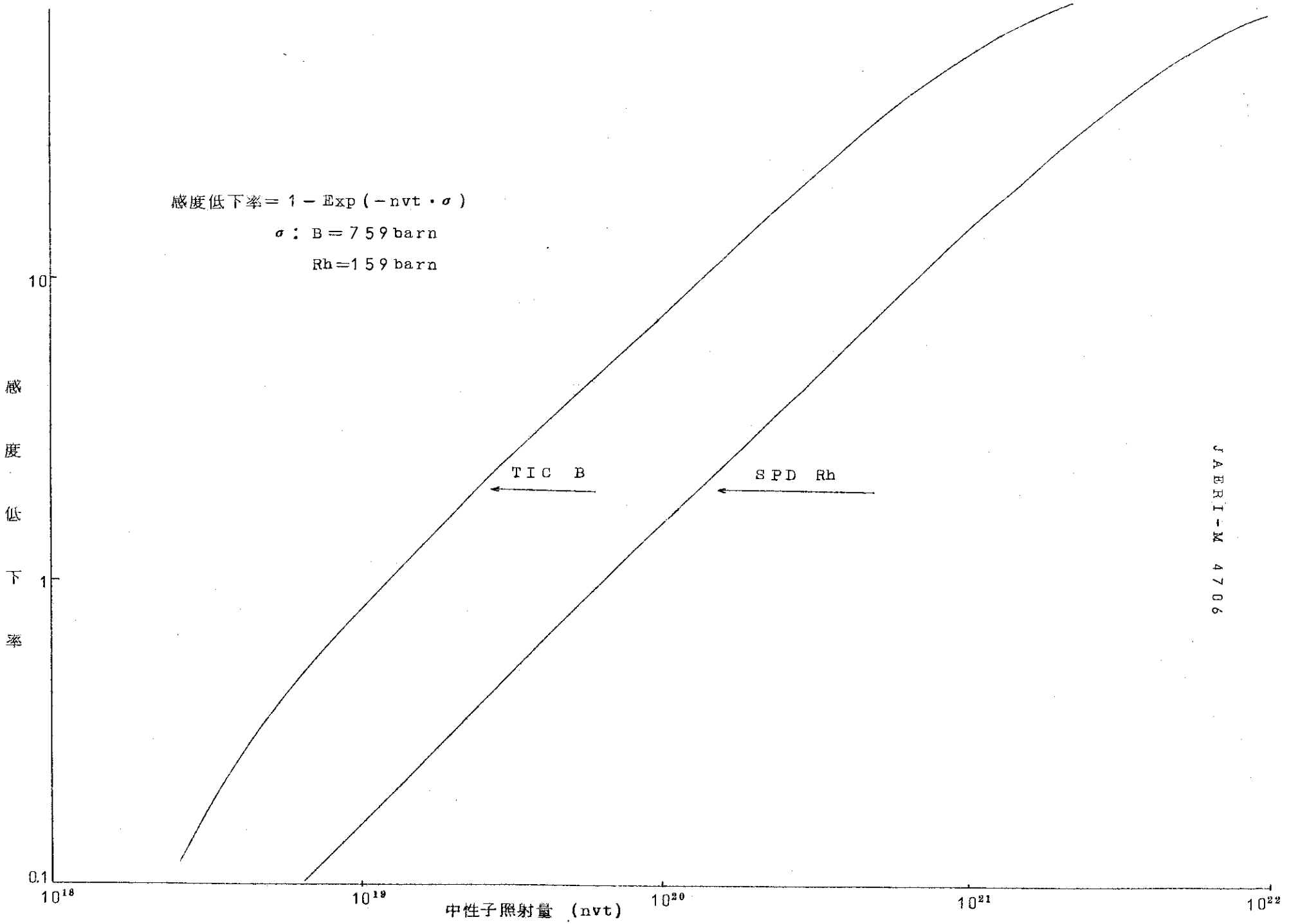
$\overline{I}_H$ ：　高温時の中性子束分布からの平均出力電流値

T_L ：　低温時の原子炉入口温度

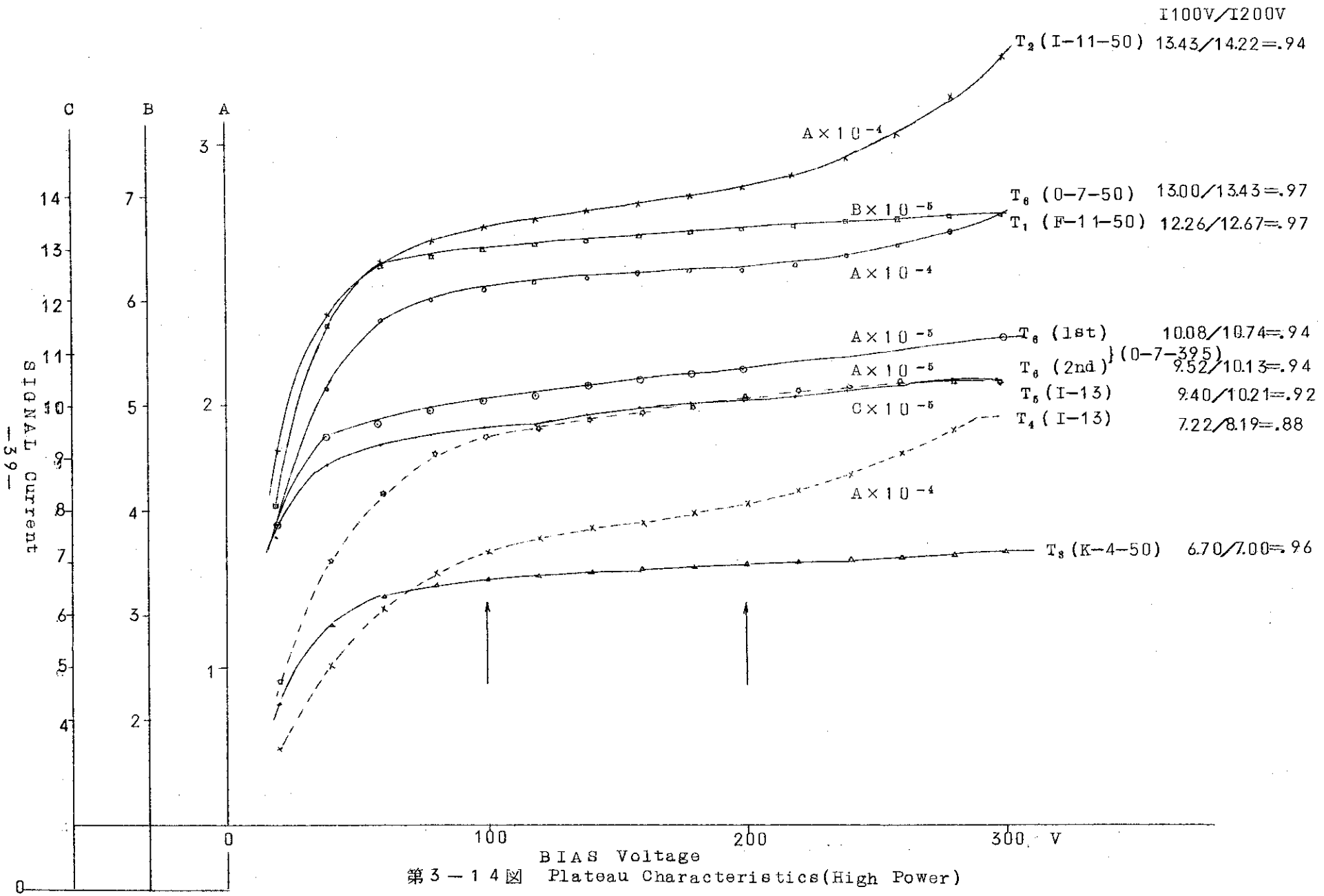
$\overline{I}_L$ ：　低温時の中性子束分布からの平均出力電流値

ξ ：　温度変化による出力変化を示す温度係数

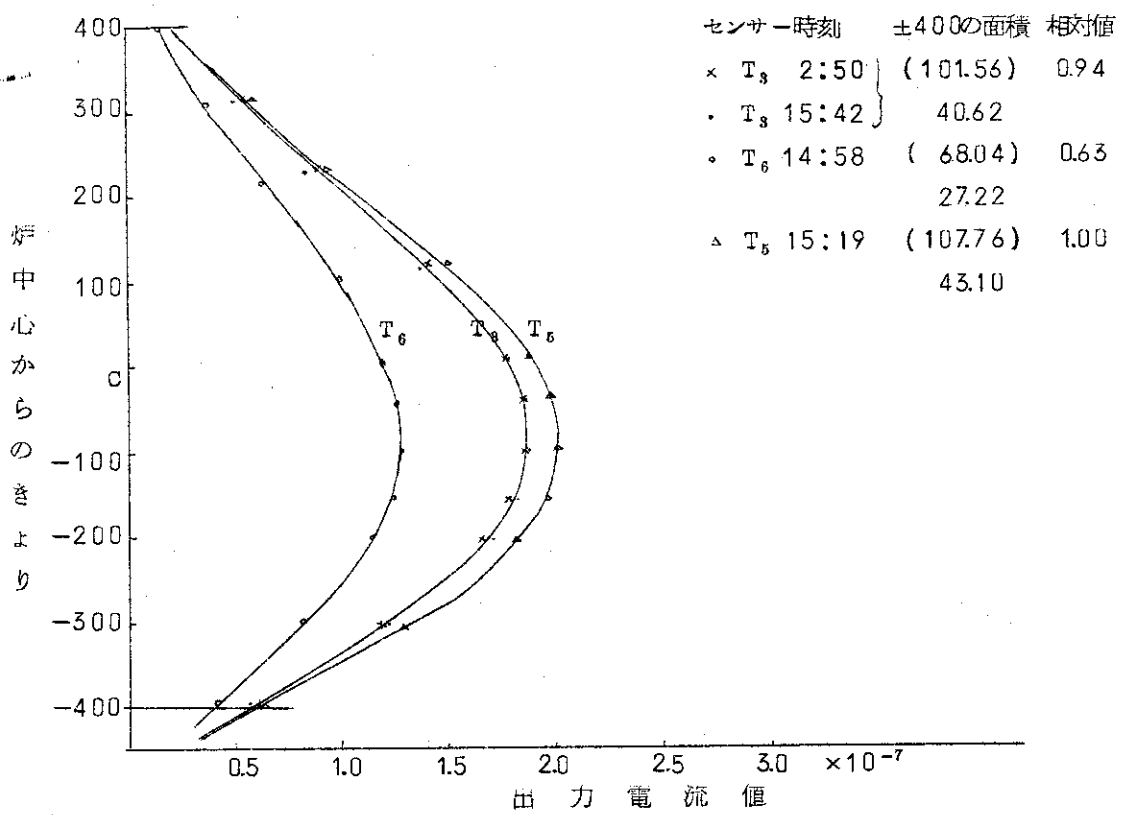
$$\xi = \frac{\overline{I}_H - \overline{I}_L}{T_H - T_L} \cdot \frac{1}{\frac{\overline{I}_H + \overline{I}_L}{2}}$$



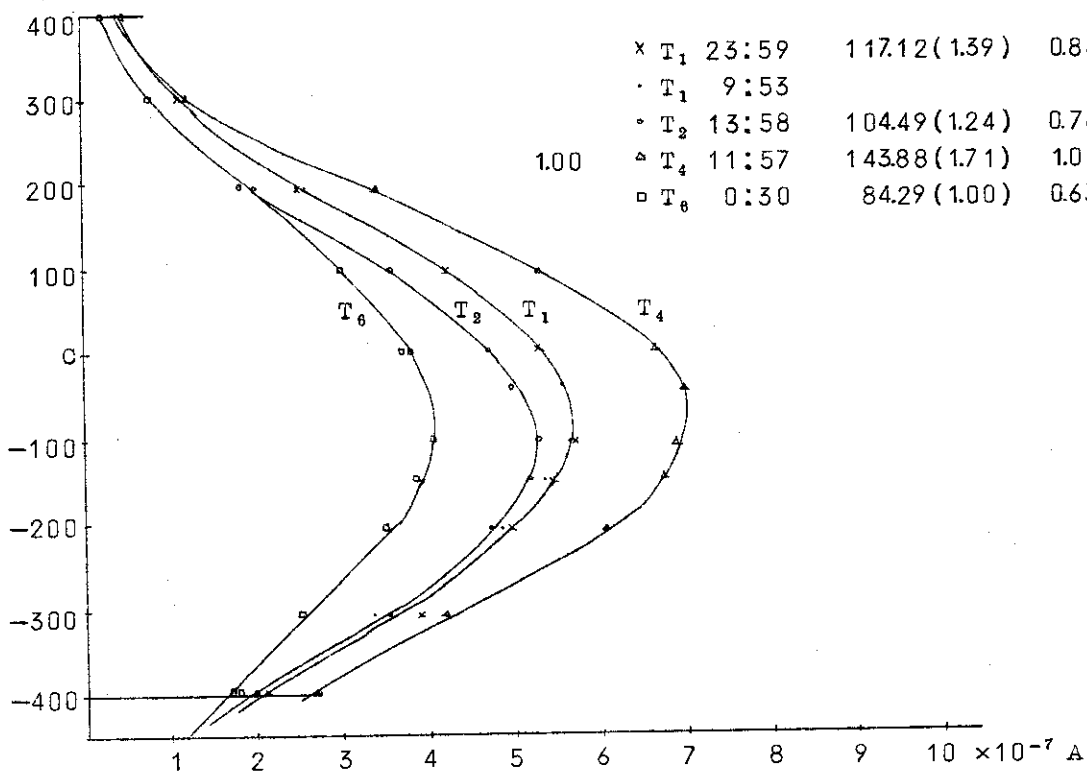
第３－１３図　中性子照射による感度低下率



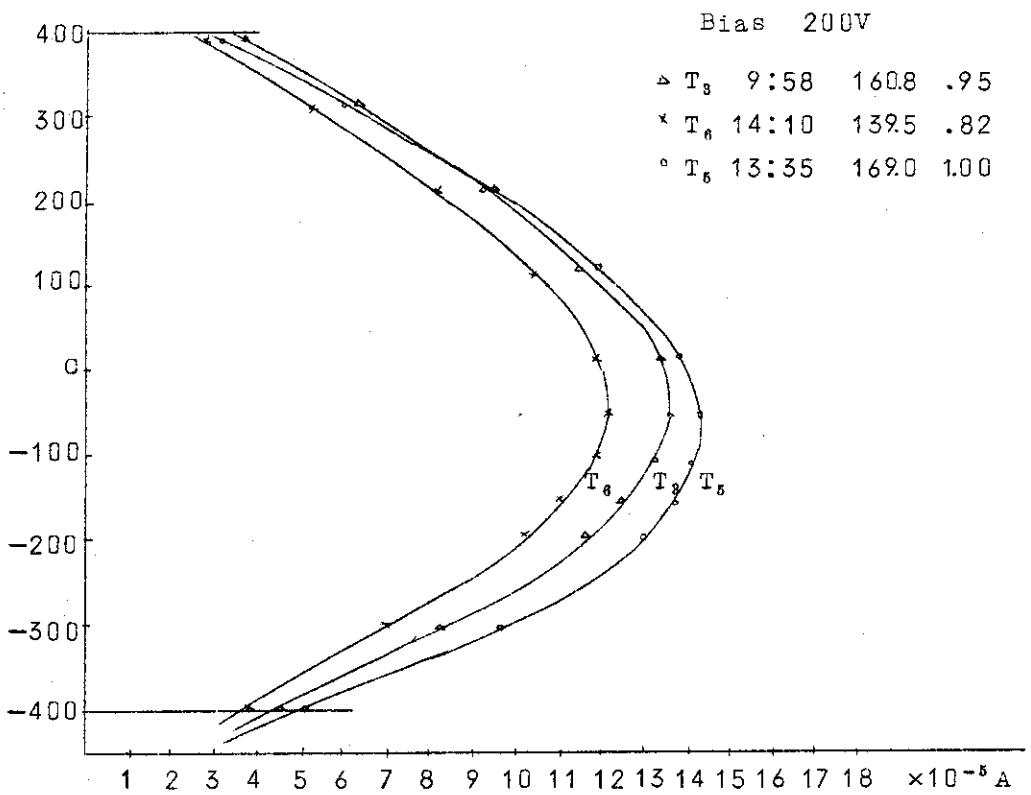
第3－14図 Plateau Characteristics(High Power)



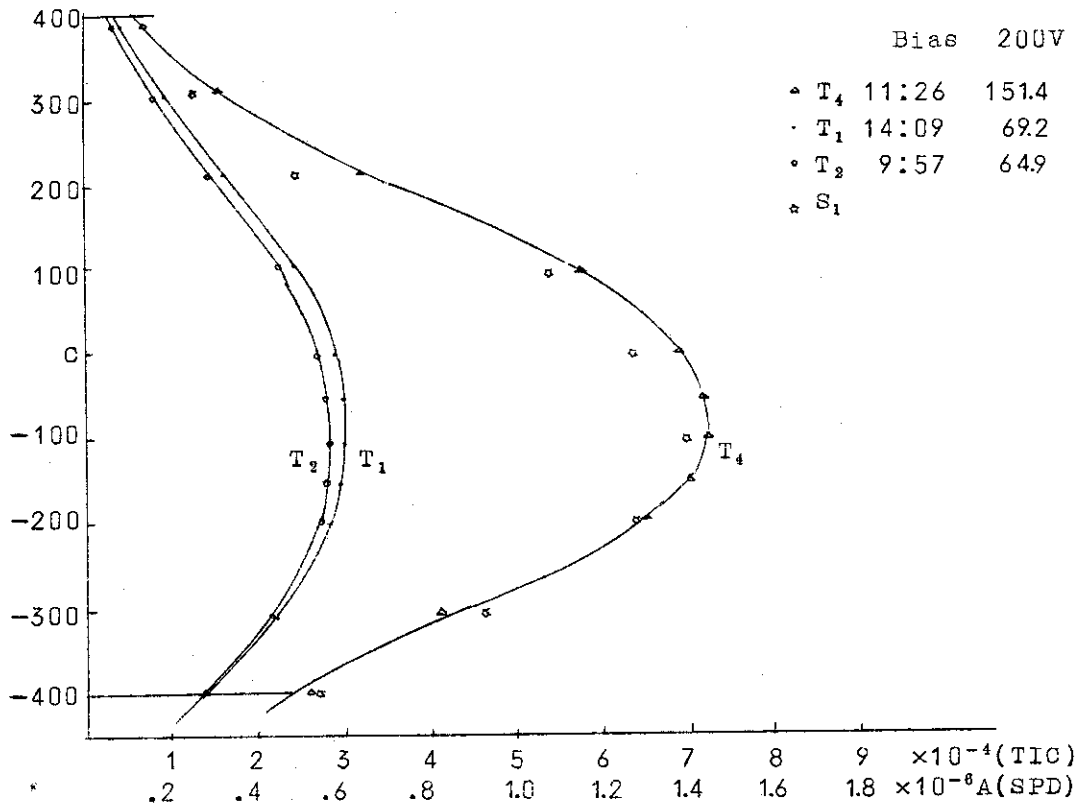
第3－15図 20kW相互校正 K－4
S. 45.6.2



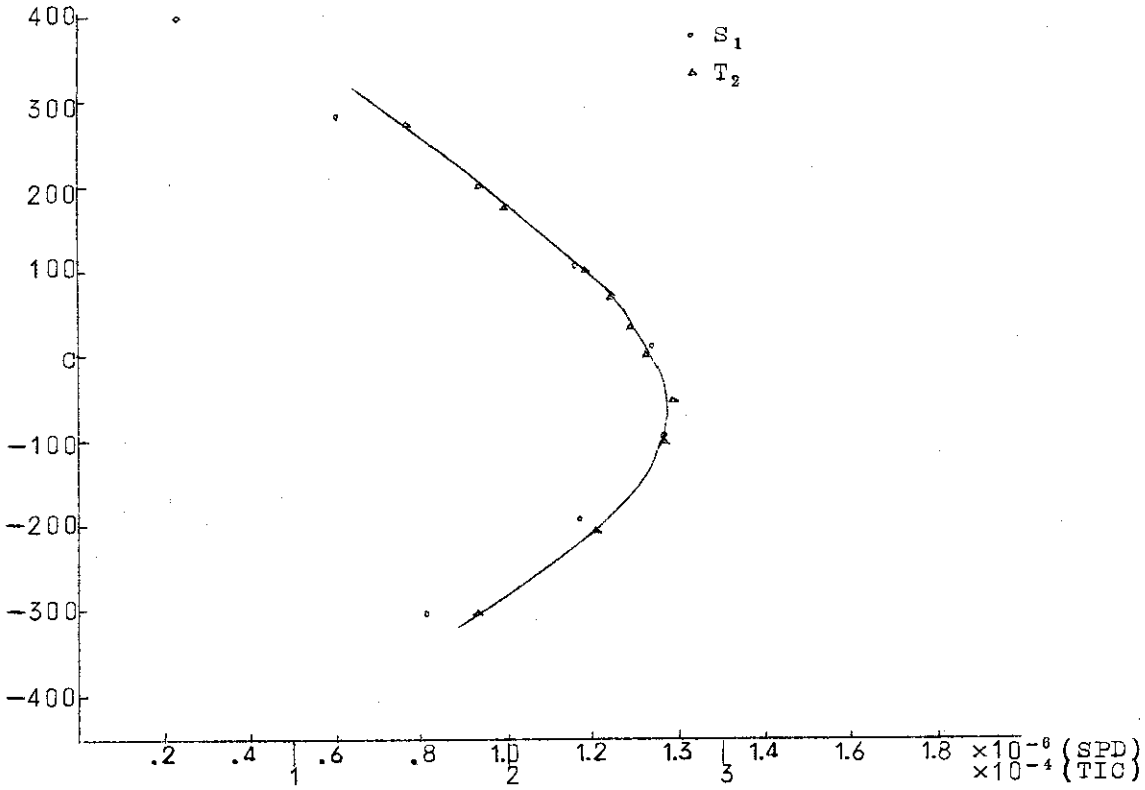
第3－16図 20kW相互校正 I－11
S. 45.6.2



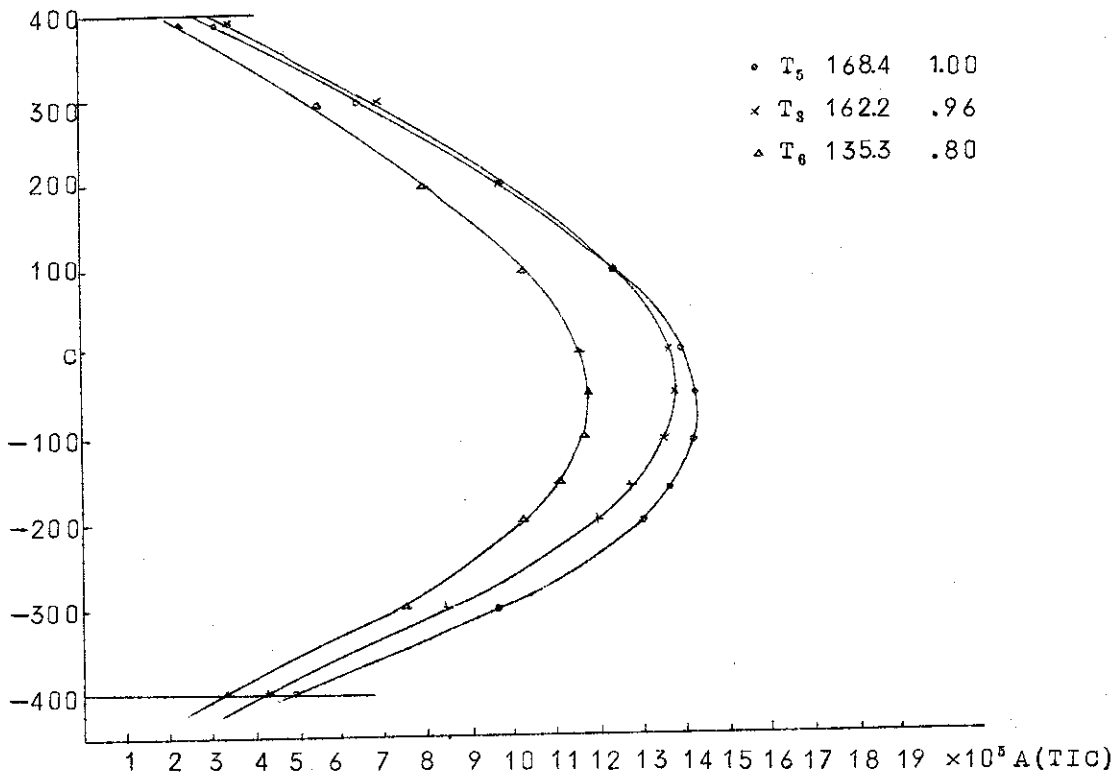
第3－17図　定格出力相互校正Ⅰ　K－4
S45.6.13



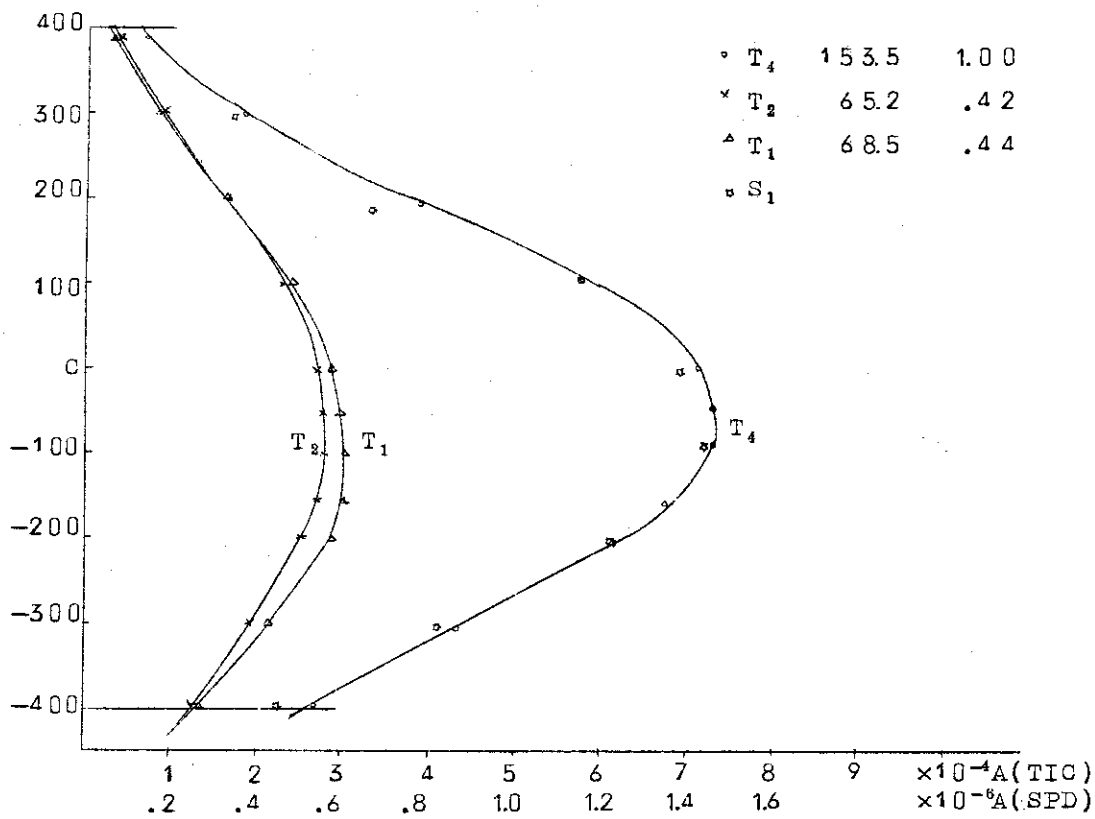
第3－18図　定格出力相互校正Ⅰ　Ⅰ－11
S45.6.13



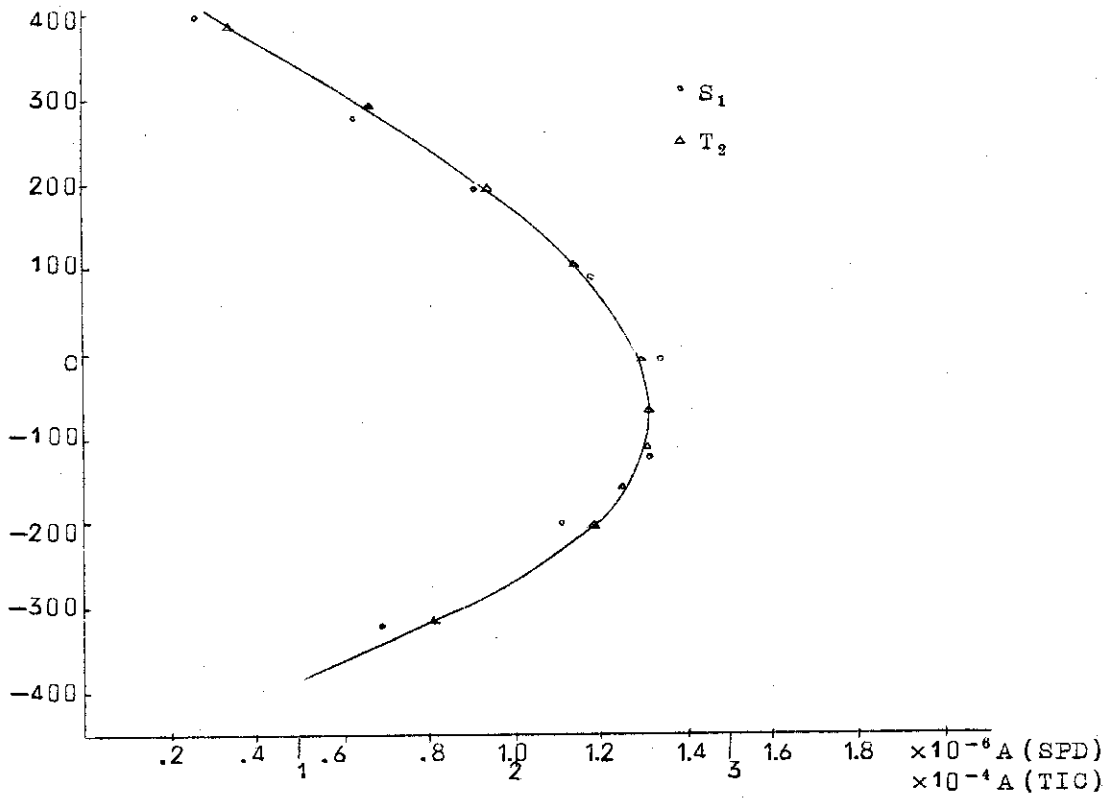
第３－１９図　Ｅ－８
6／13



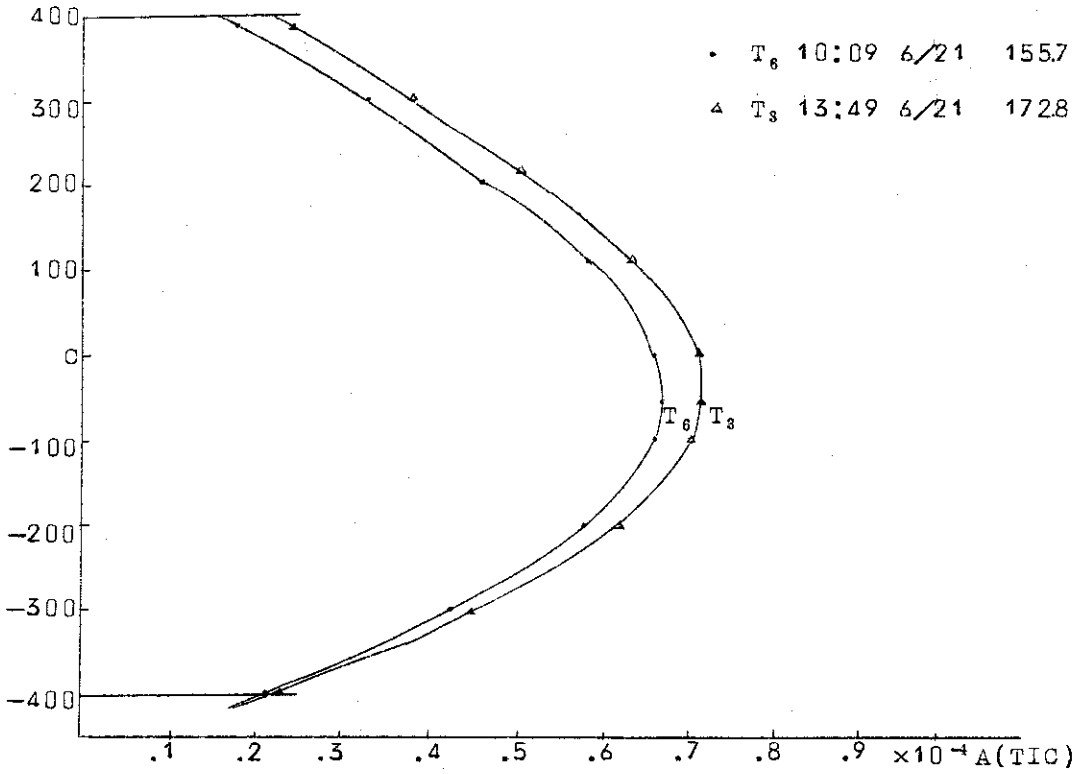
第３－２０図　定格出力相互校正Ⅱ　Ｋ－４
Ｓ４５.６.１８



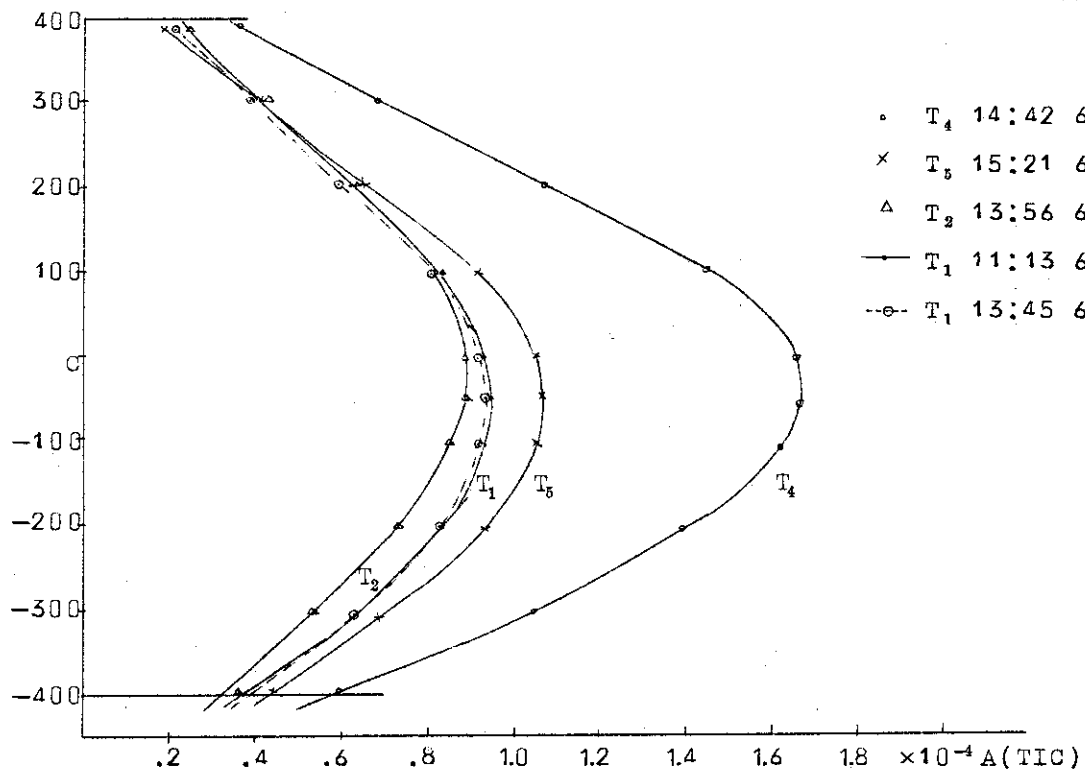
第３－２１図　定格出力相互校正Ⅱ　Ⅰ－１１
S 4 5. 6. 1 8



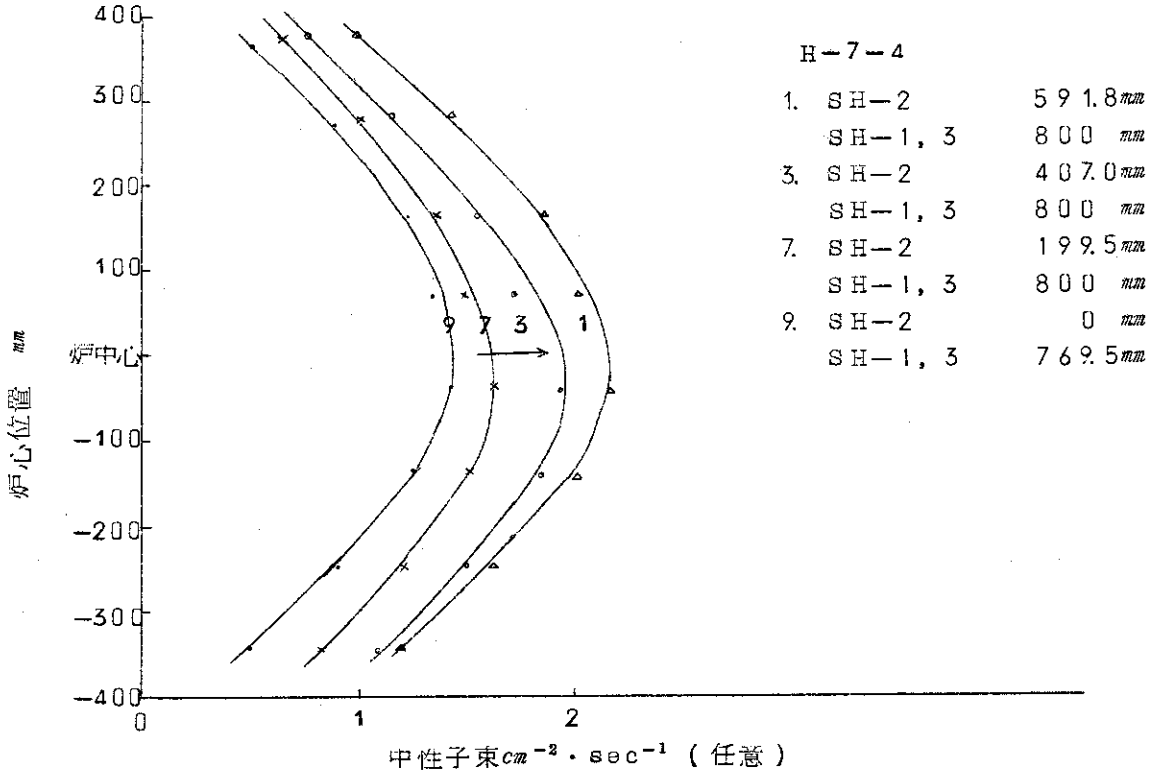
第３－２２図　6／18　E－8



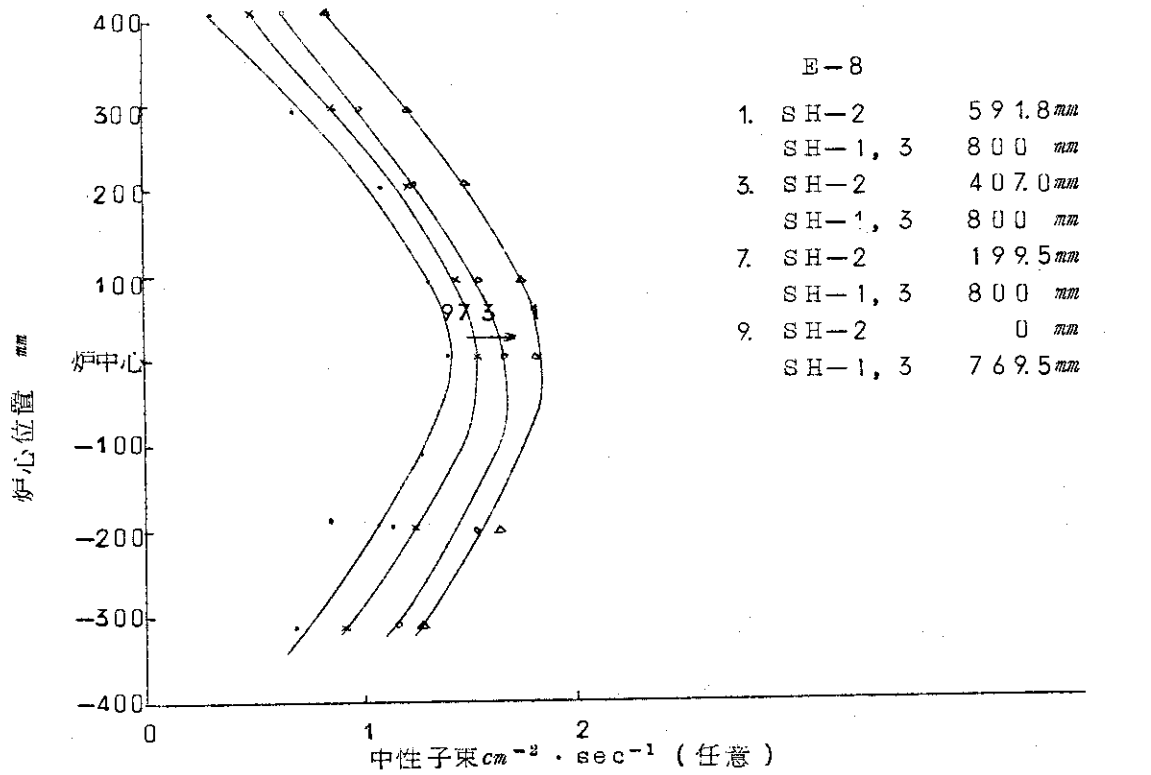
第３－２３図　定格出力相互校正　０－７
S 4 5. 6. 2 1



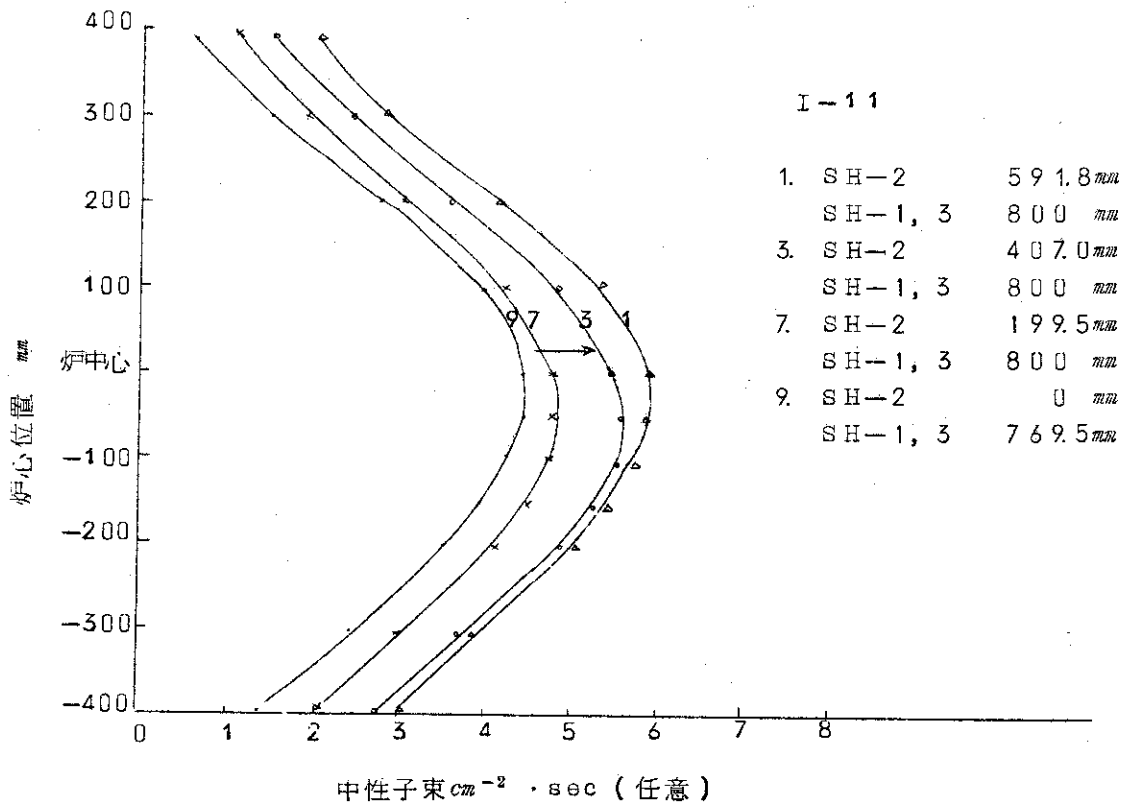
第３－２４図　定格出力相互校正　Ｉ－１３
S 4 5. 6. 2 2 (21)



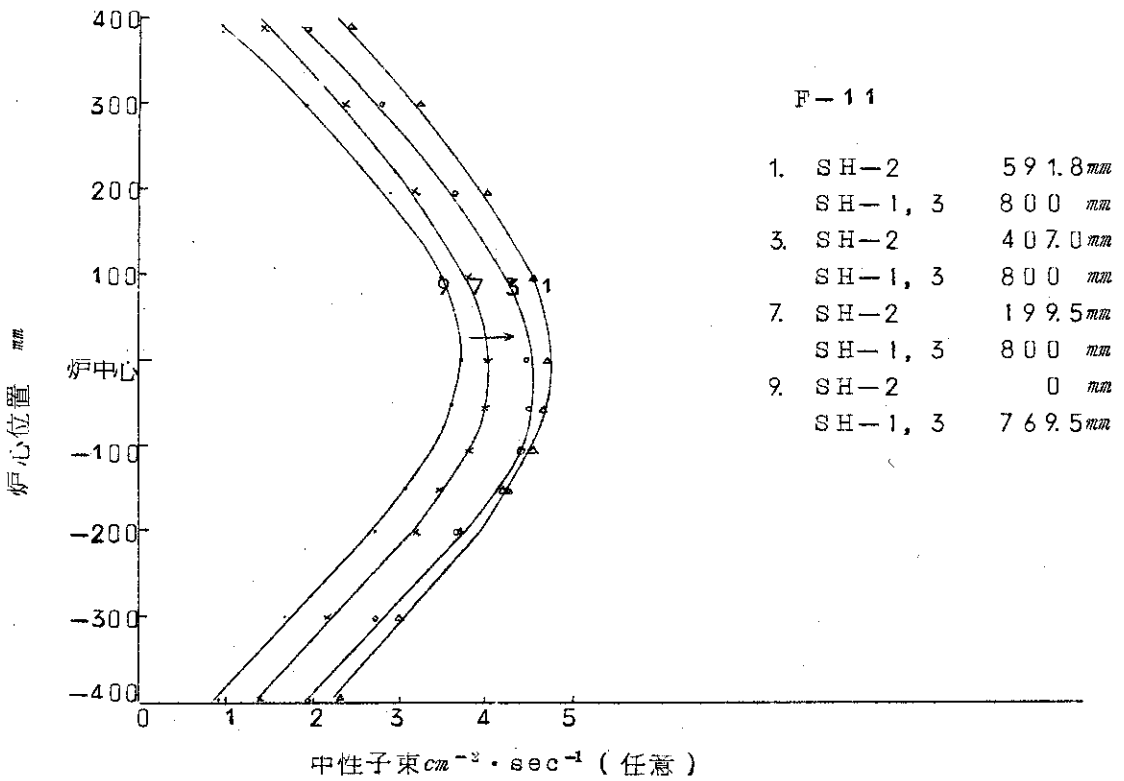
第３－２５図　Xe 崩壊時における中性子束分布（２０kW）



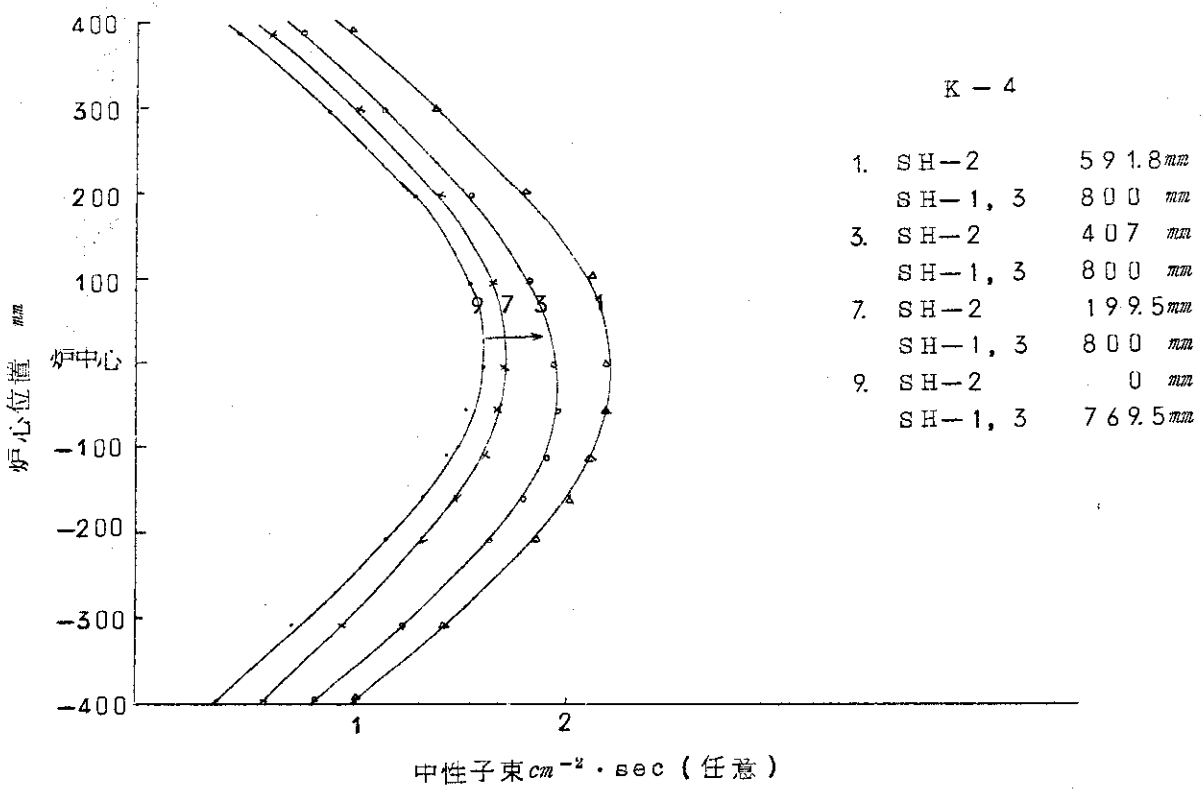
第３－２６図　Xe 崩壊時における中性子束分布（２０kW）



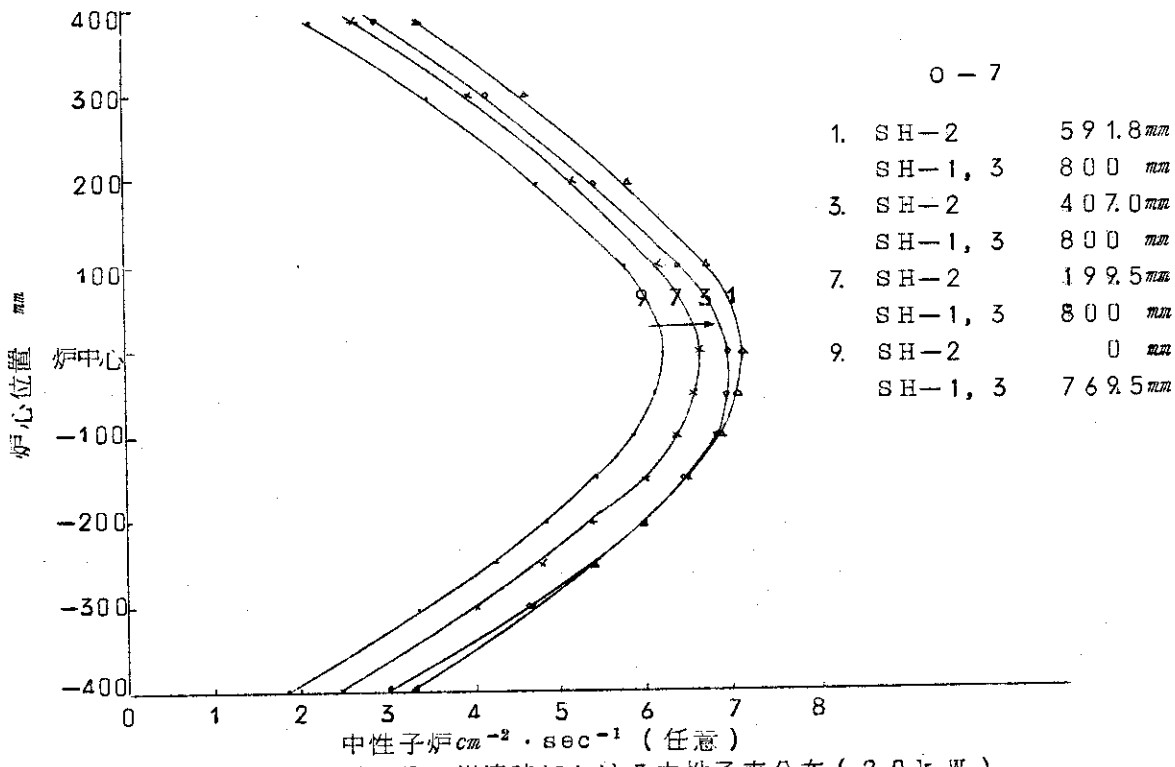
第３－２７図　Ｘｅ崩壊時における中性子束分布（２０ｋＷ）



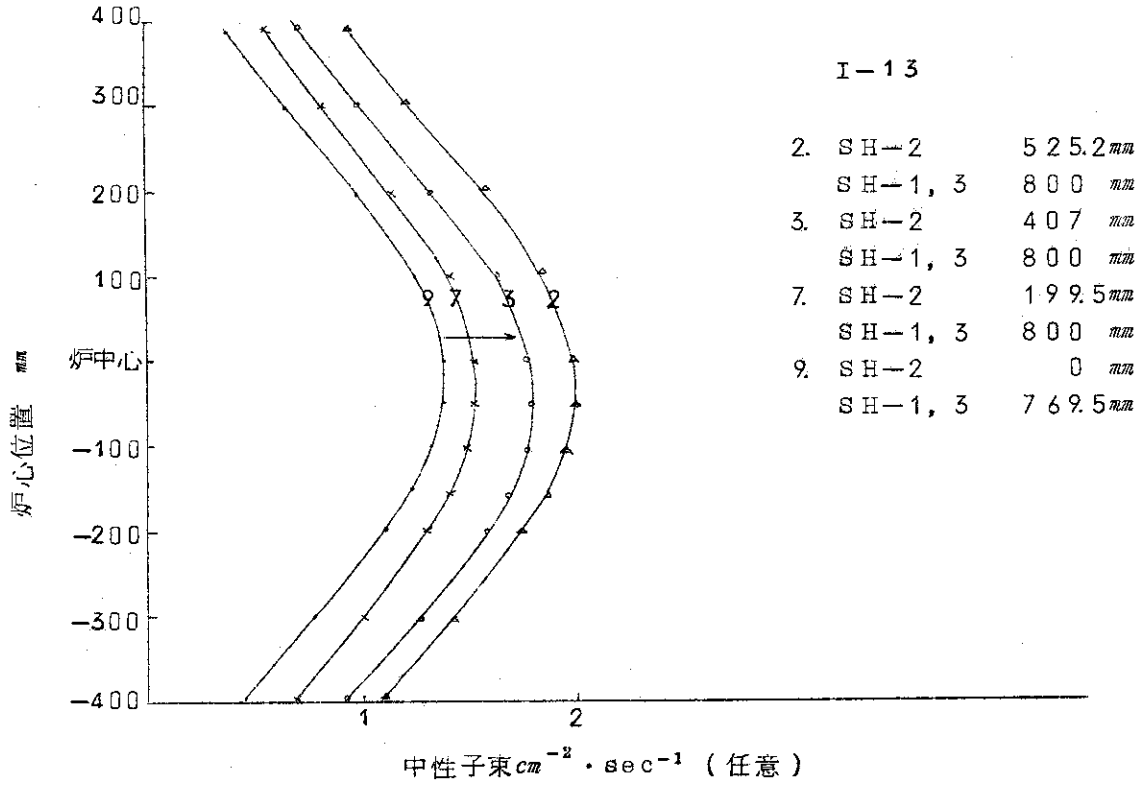
第３－２８図　Ｘｅ崩壊時における中性子束分布（２０ｋＷ）



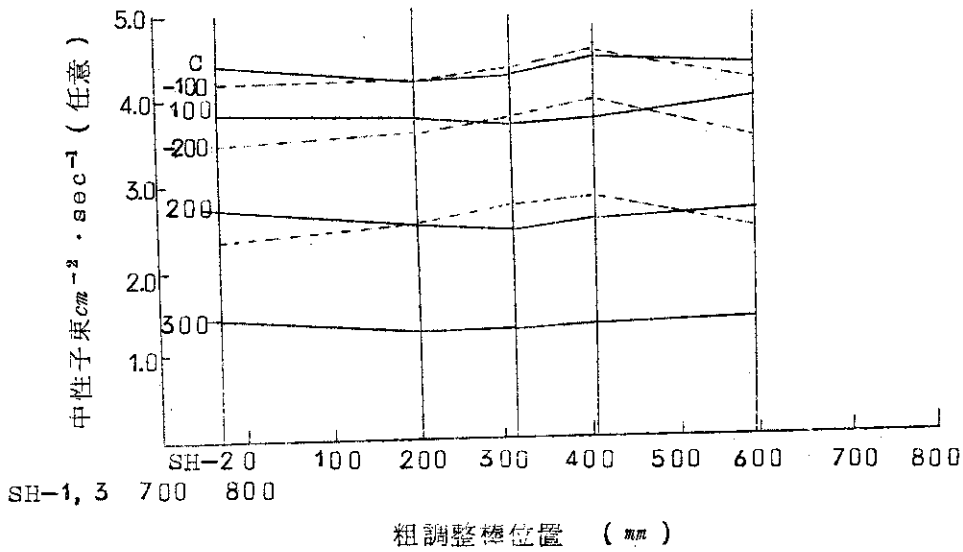
第３－２９図　Ｘｅ崩壊時における中性子束分布（２０ｋＷ）



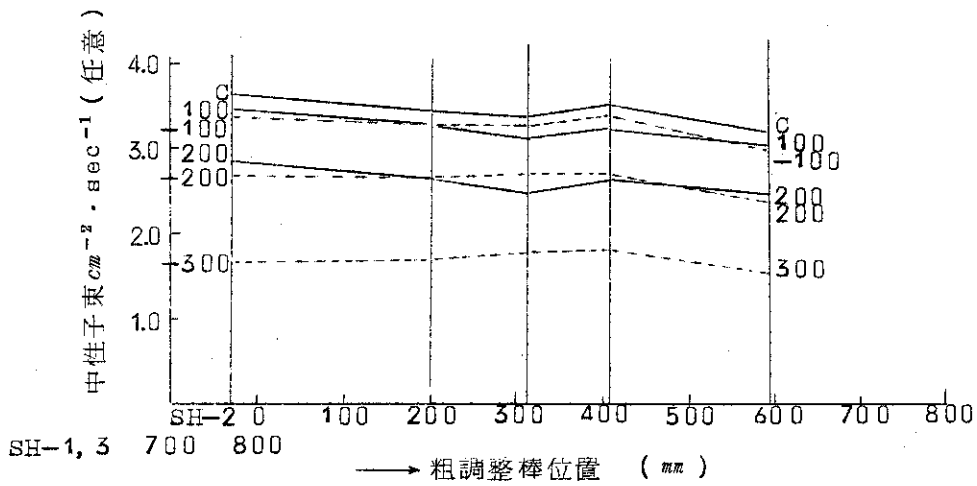
第３－３０図　Ｘｅ崩壊時における中性子束分布（２０ｋＷ）



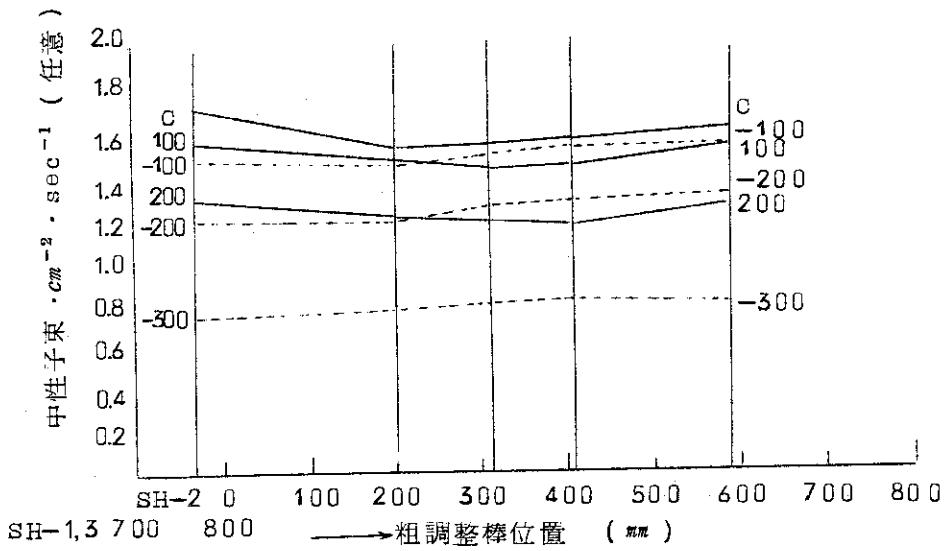
第３－３１図　Ｘｅ崩壊時における中性子束分布（２０ｋＷ）



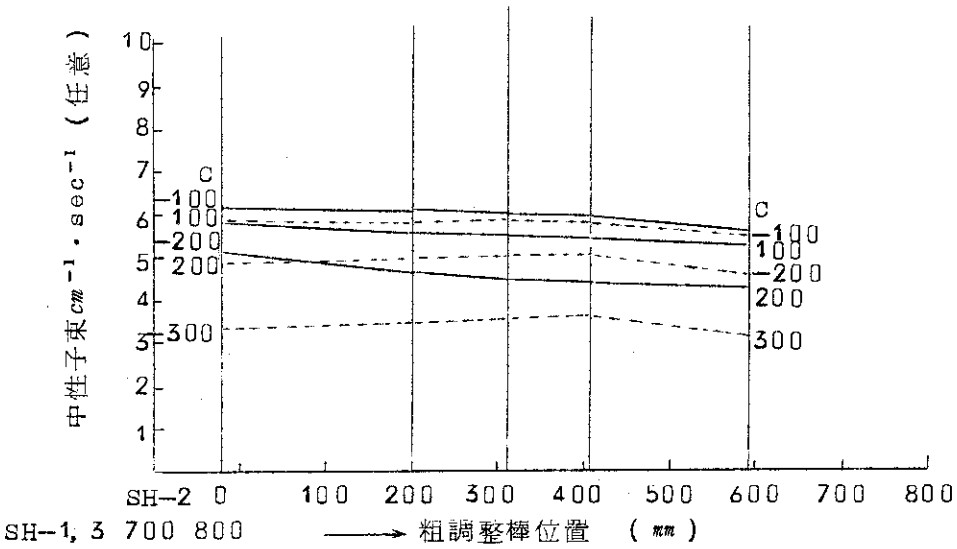
第３－３２図　制御棒位置変化に対する中性子束分布の変化（Ｉ−１１）



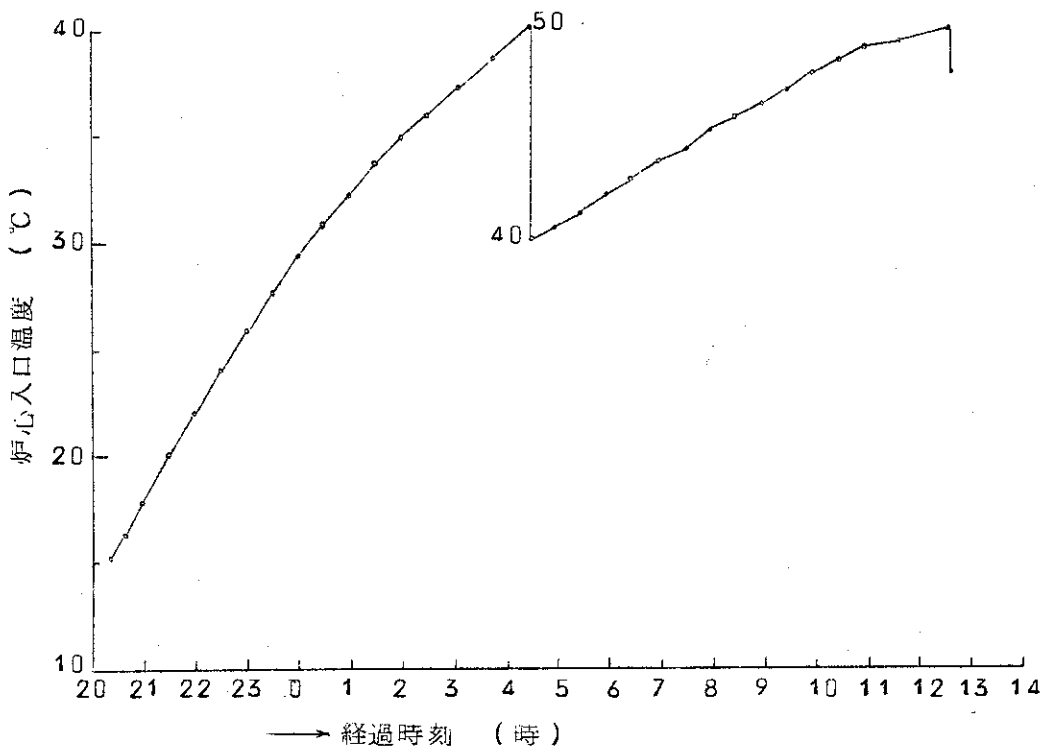
第３－３３図　制御棒位置変化に対する中性子束分布の変化（Ｆ－１１）



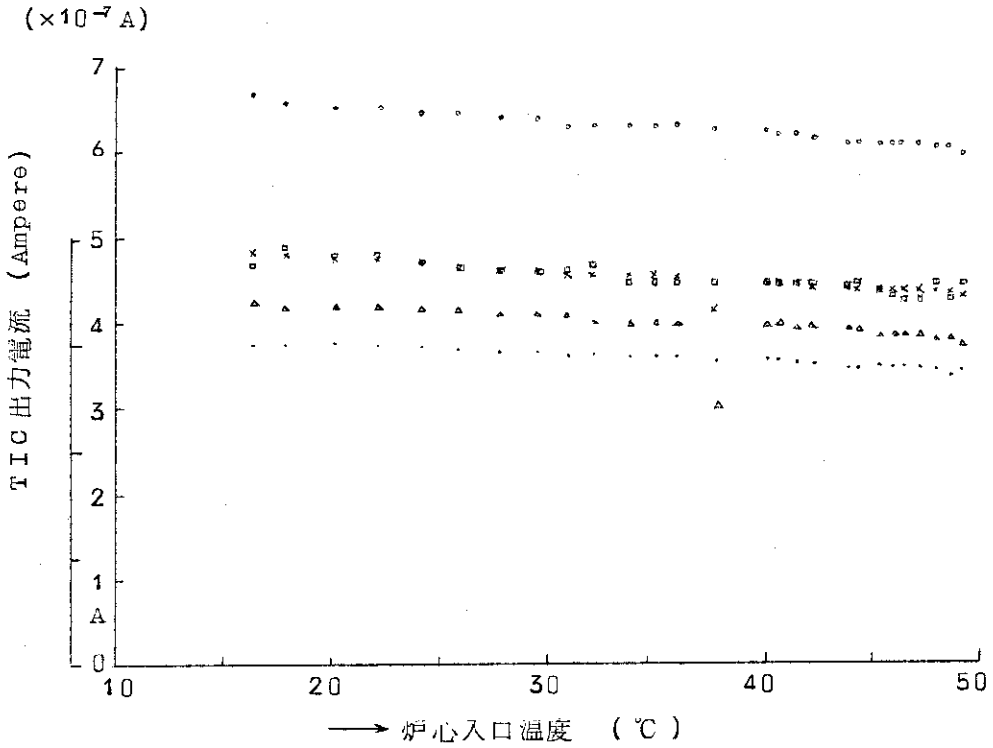
第３－３４図　制御棒位置変化に対する中性子束分布の変化（Ｋ－４）



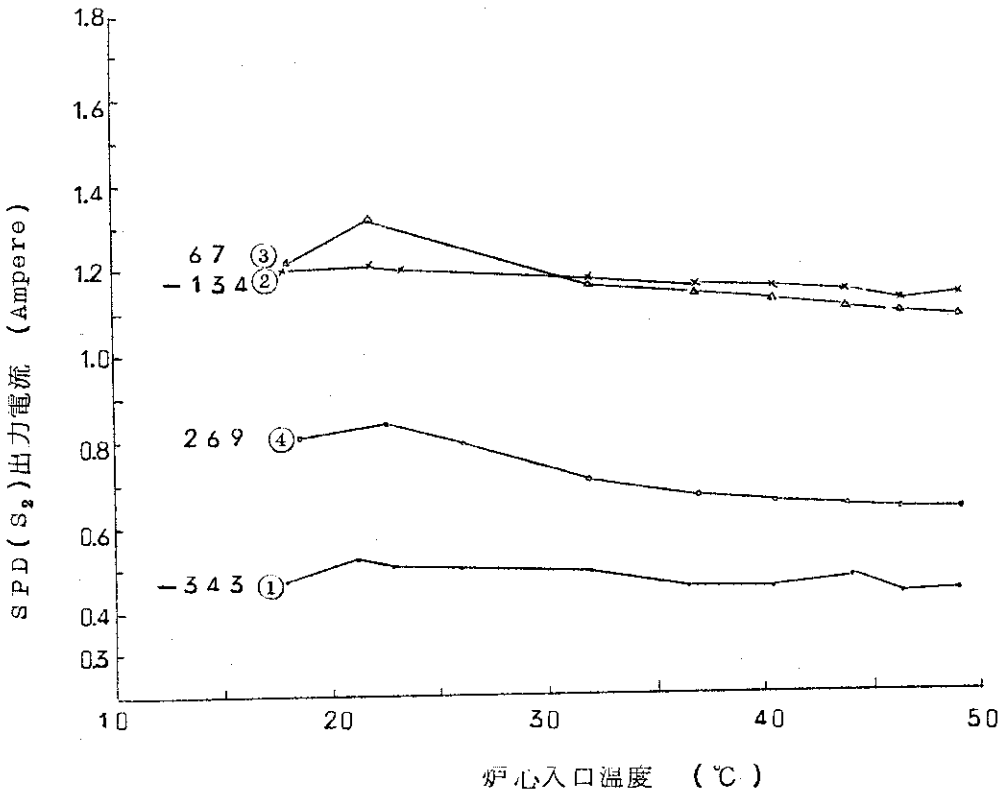
第３－３５図　制御棒位置変化に対する中性子束分布の変化（０－７）



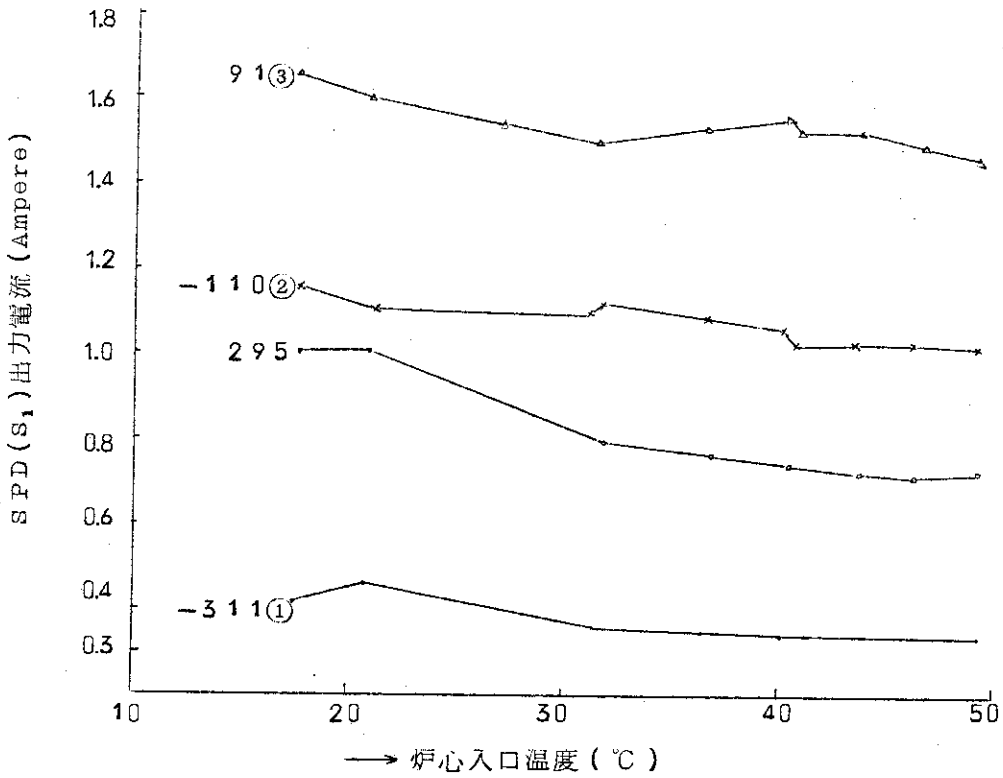
第３－３６図　炉心入口温度の上昇図



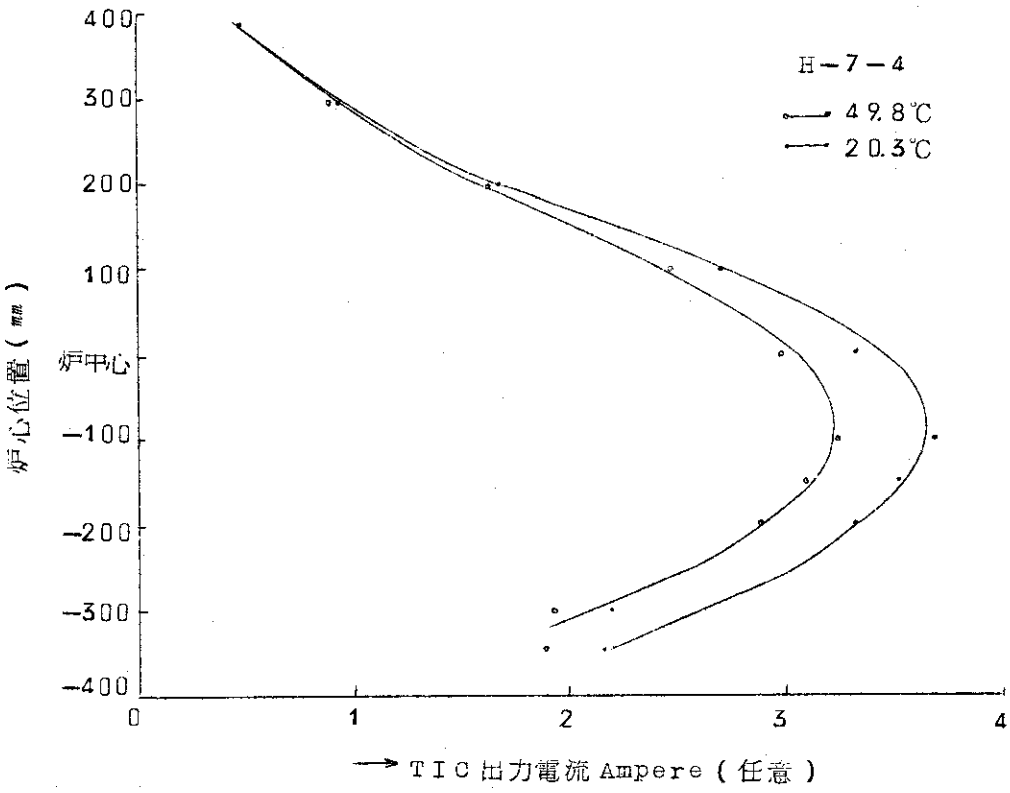
第3－37図　TICの温度依存性



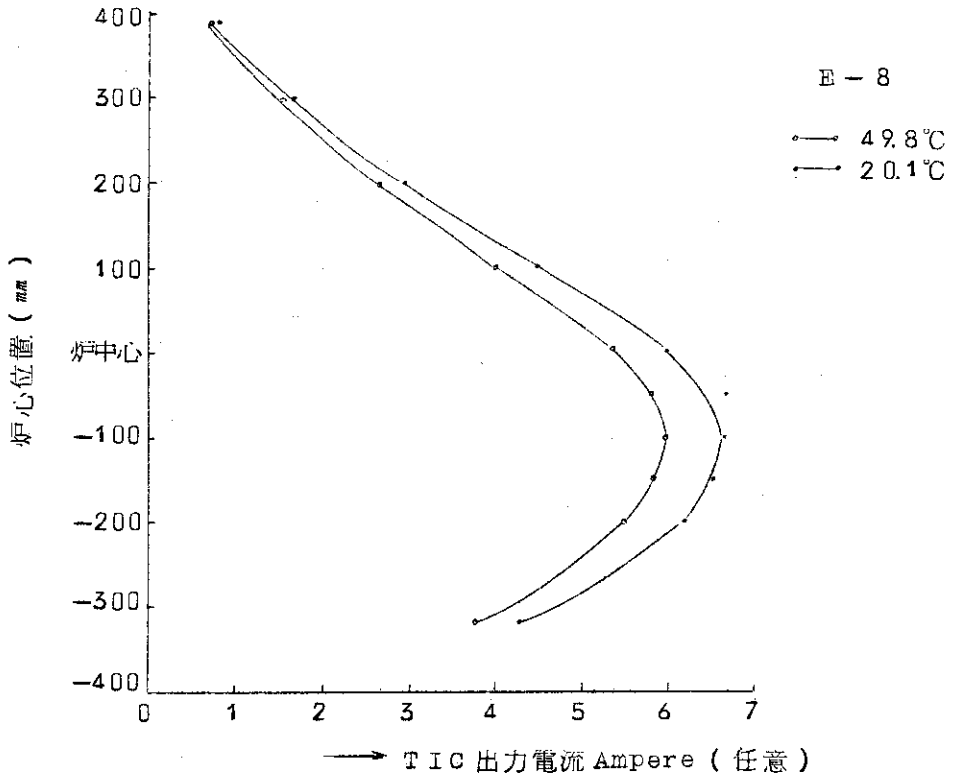
第3－38図　SPD(S_2)の温度依存性



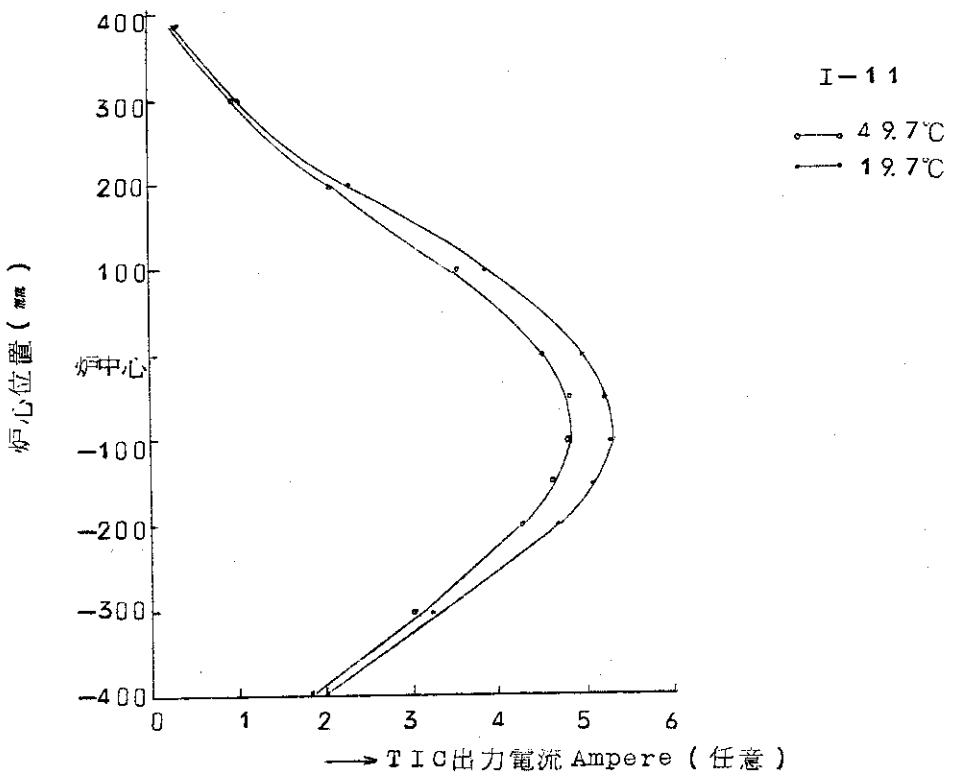
第3−39図　SPD(S3)の温度依存性



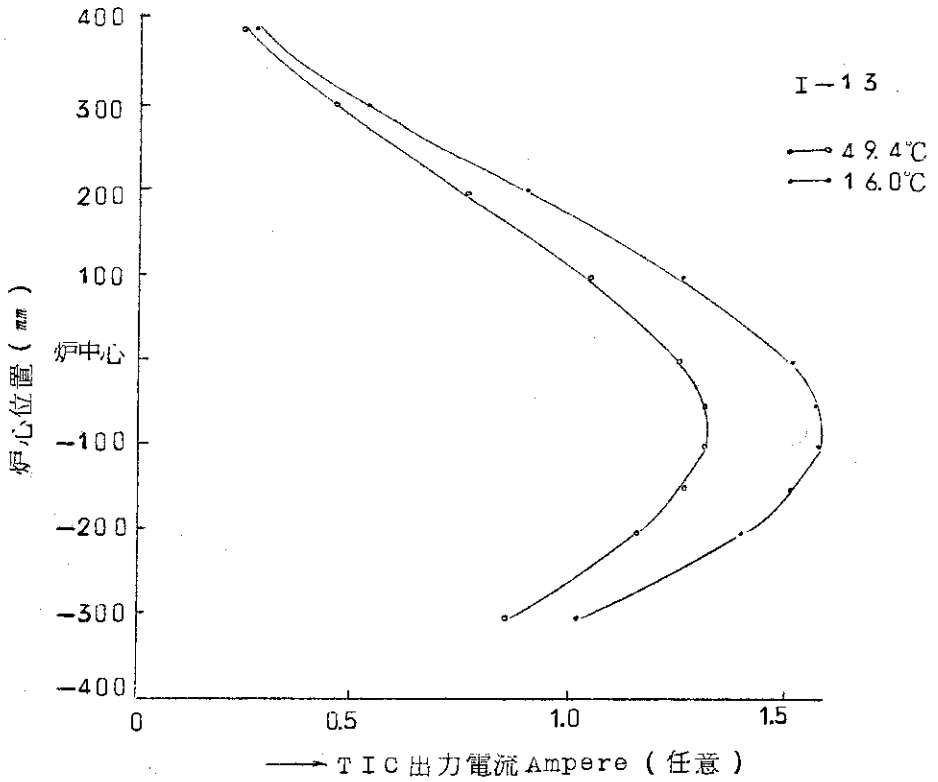
第3−40図　高温時と低温時における中性子束分布の変化



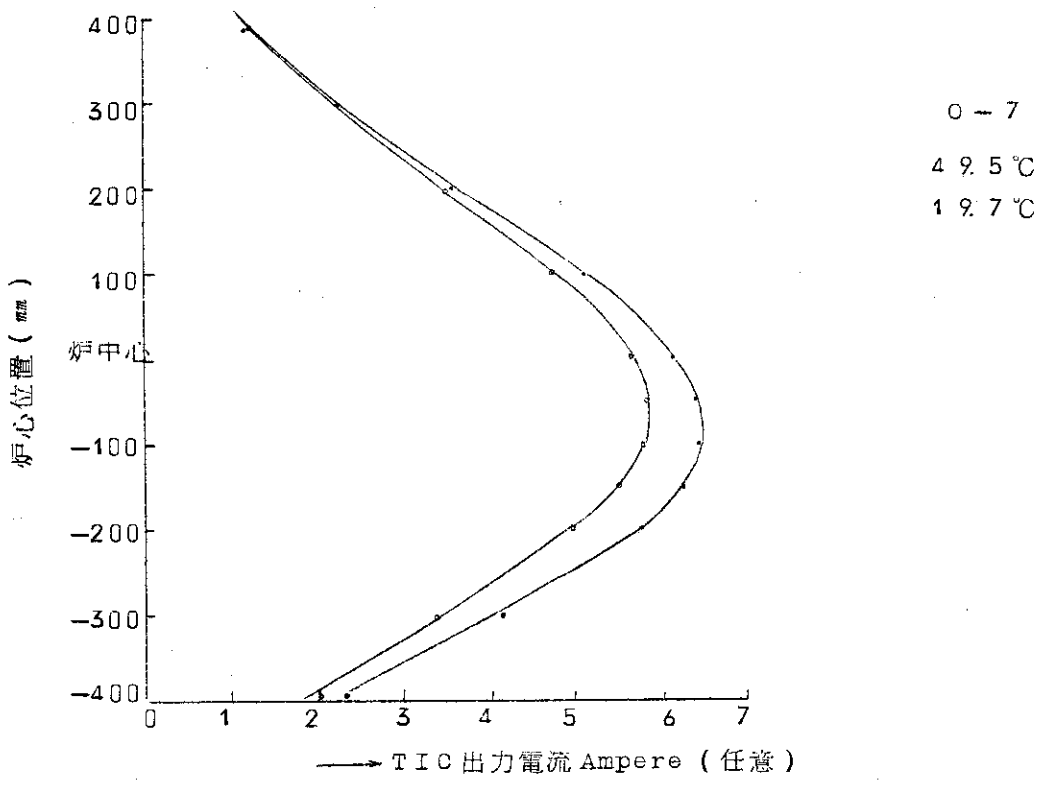
第3－41図　高温時と低温時における中性子束分布の変化



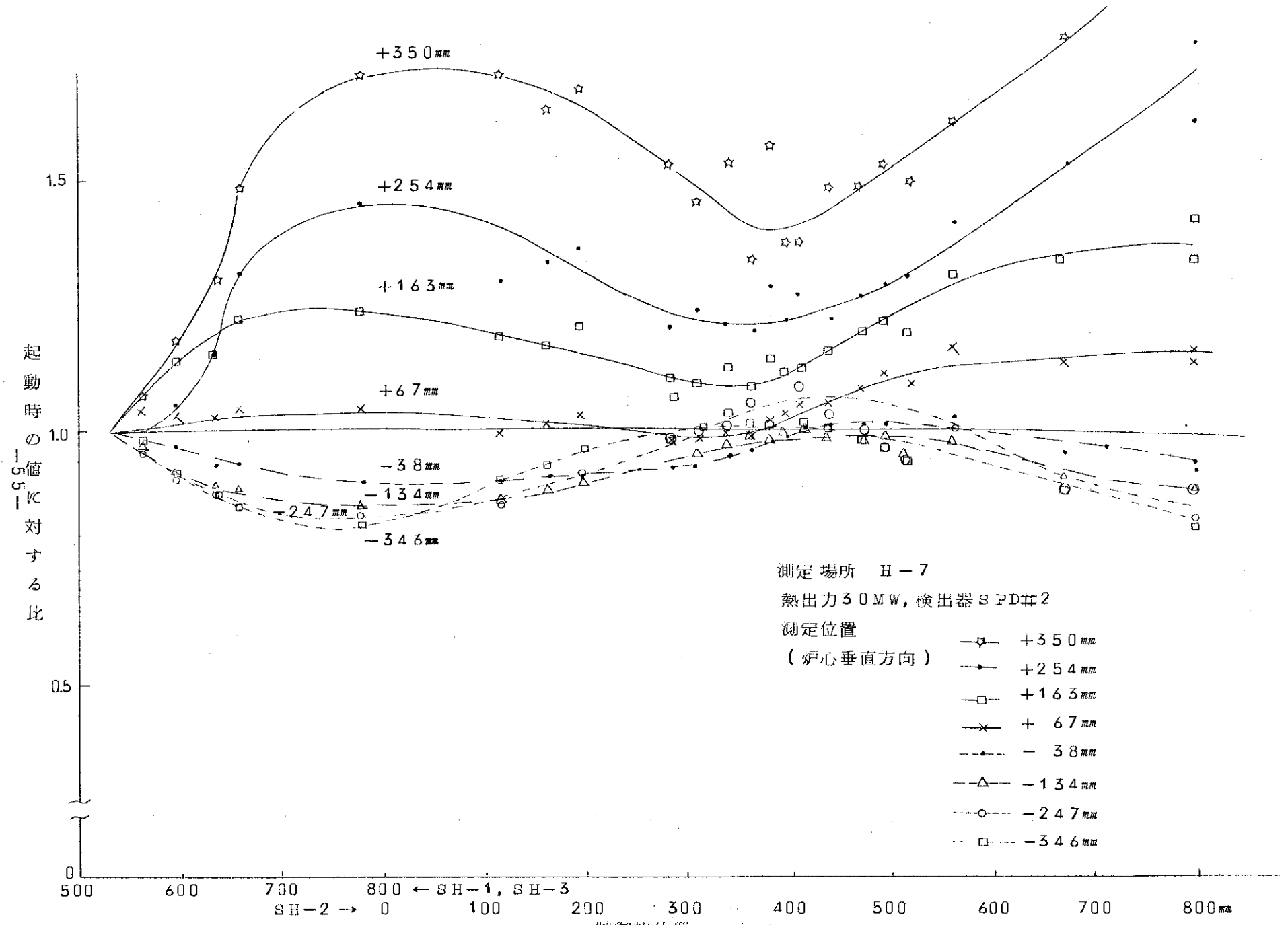
第3－42図　高温時と低温時における中性子束分布の変化



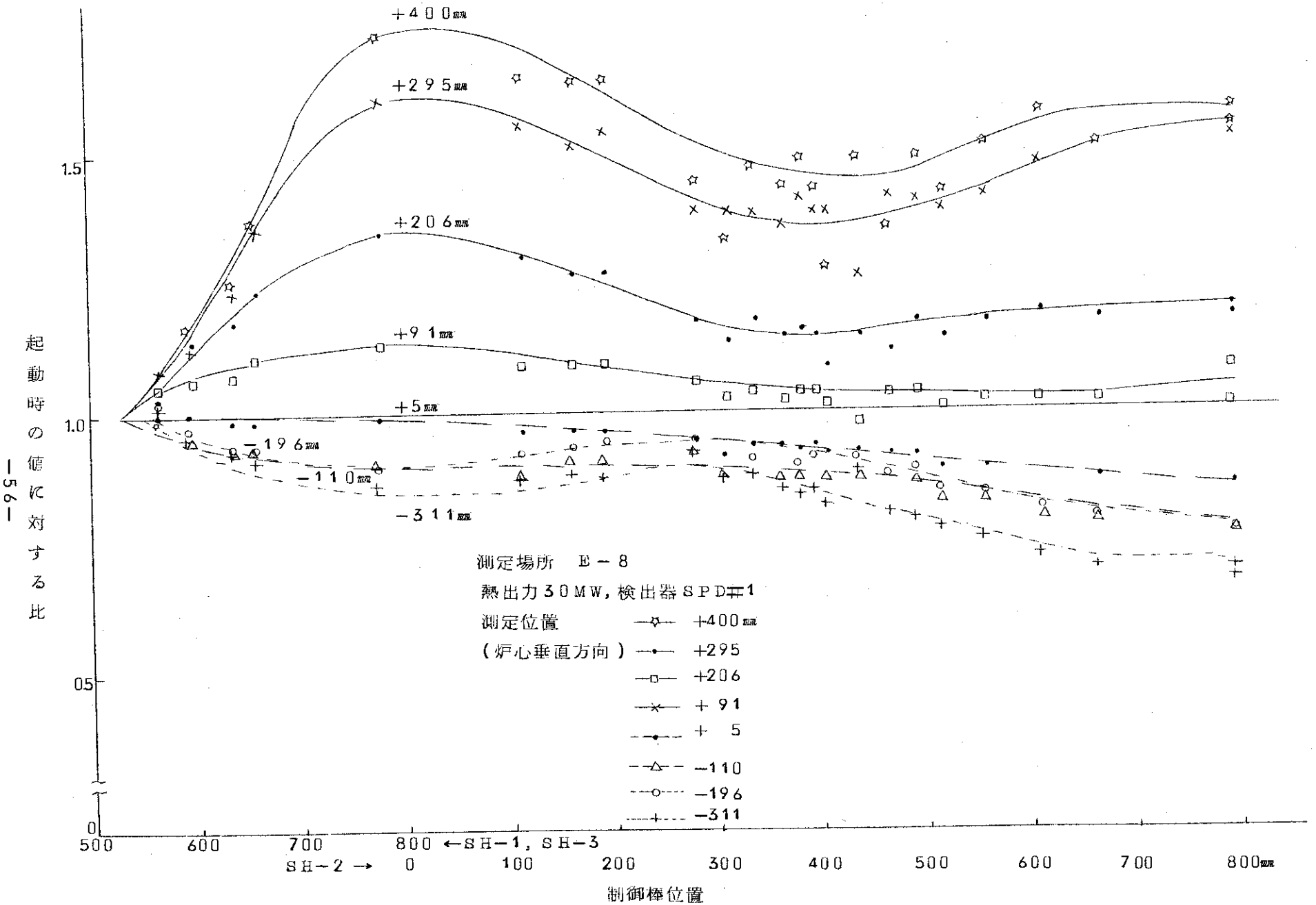
第3−43図　高温時と低温時における中性子束分布の変化



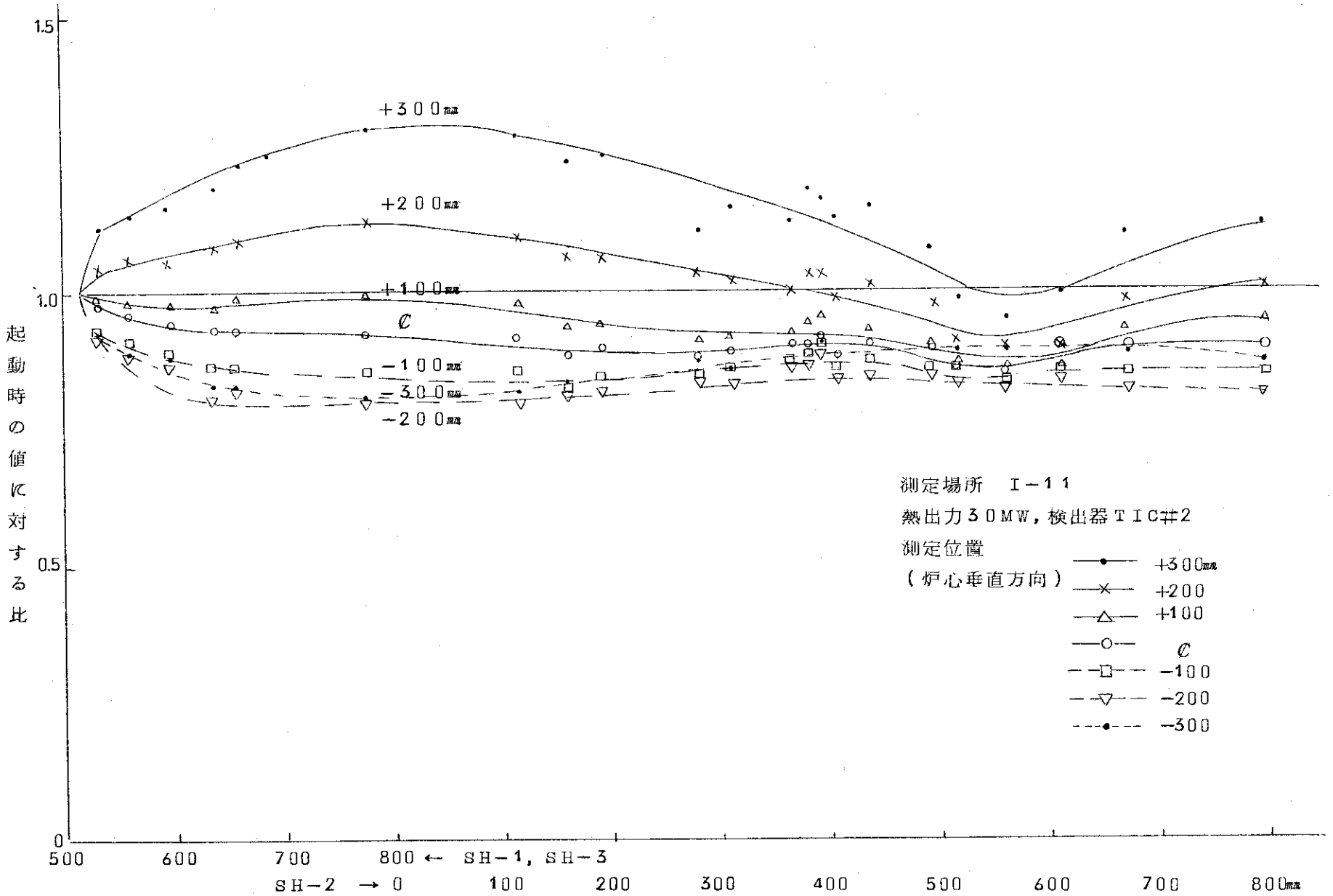
第3−44図　高温時と低温時における中性子束分布の変化



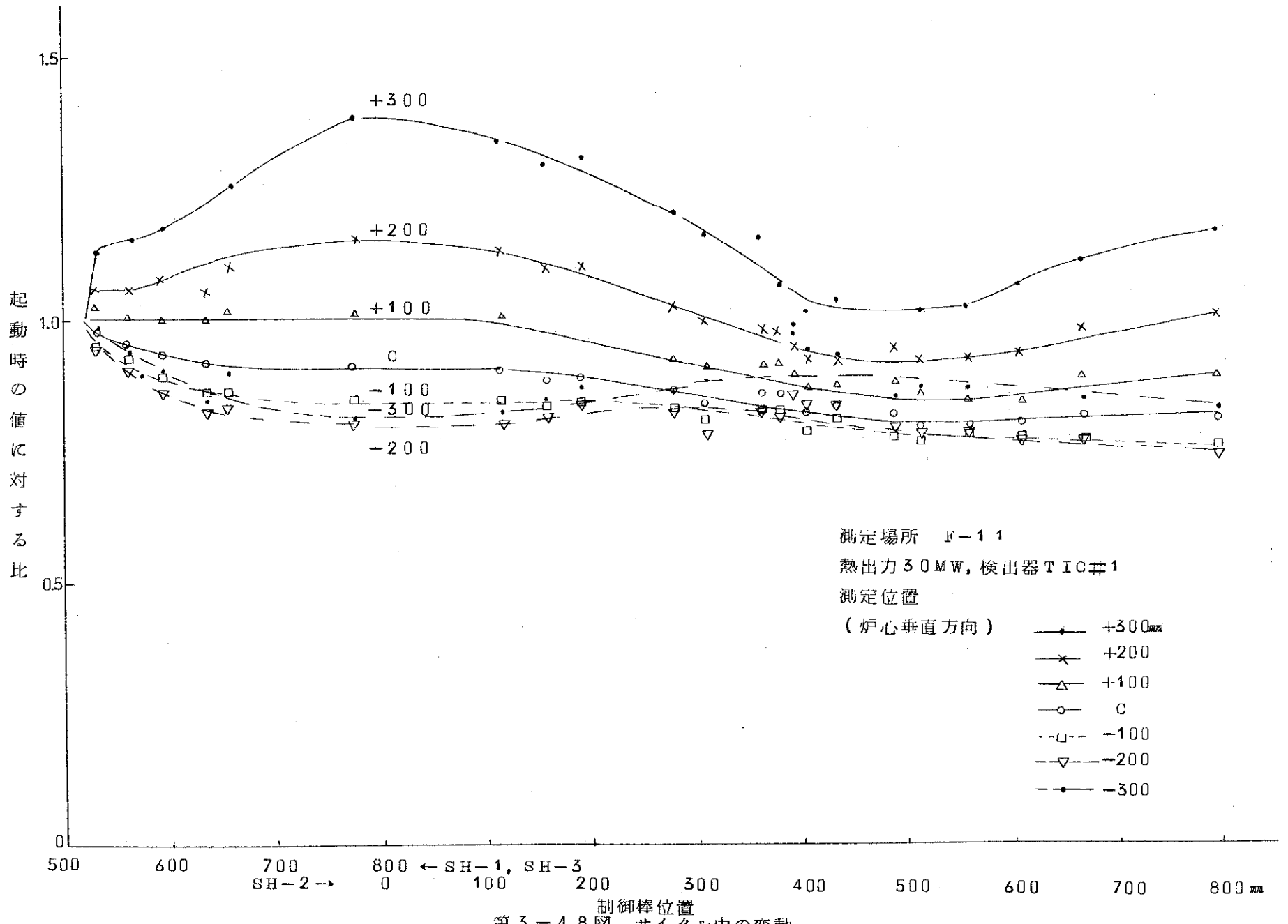
第3−45図 サイクル中の変動



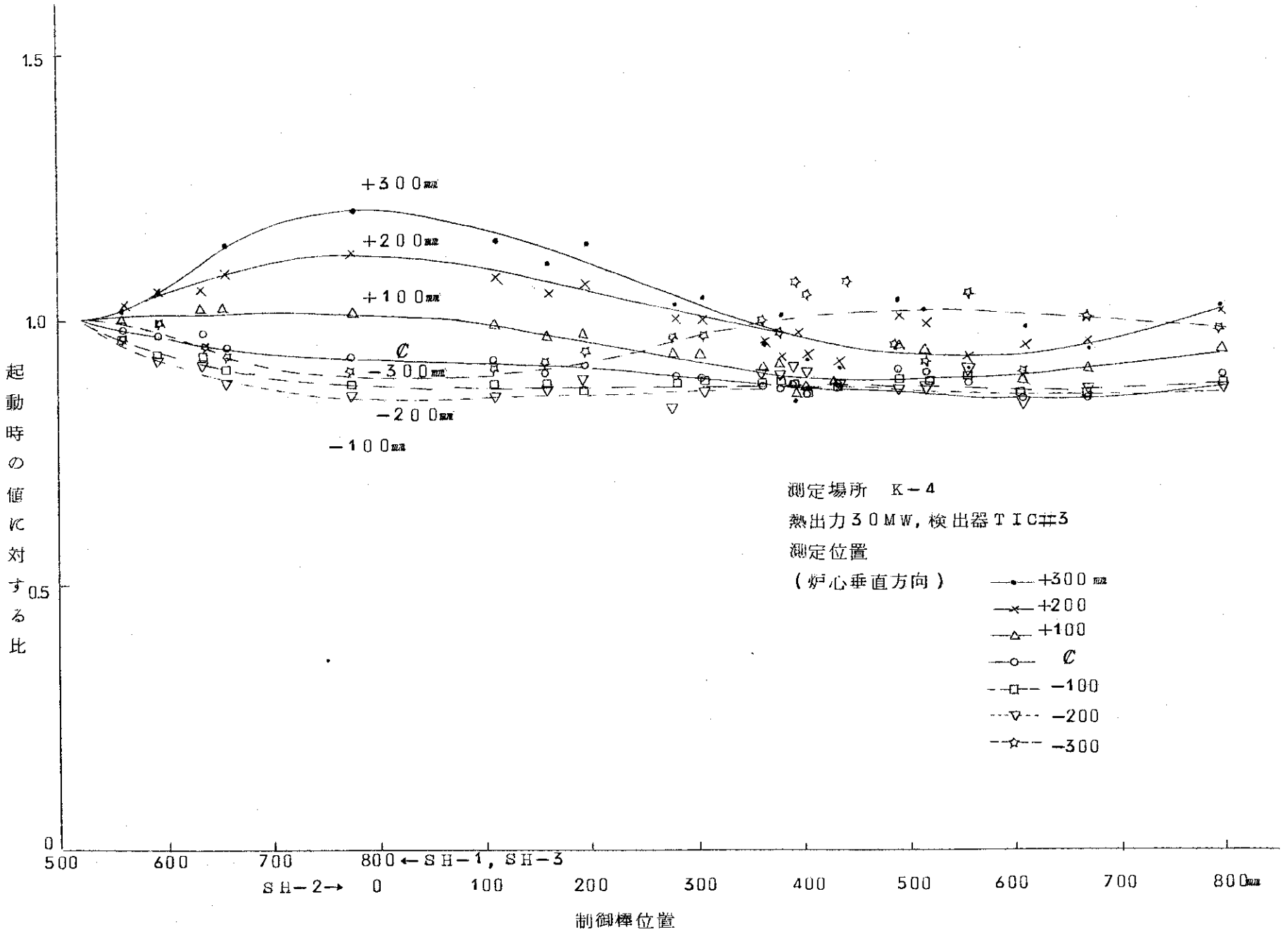
第3－46図　サイクル中の変動



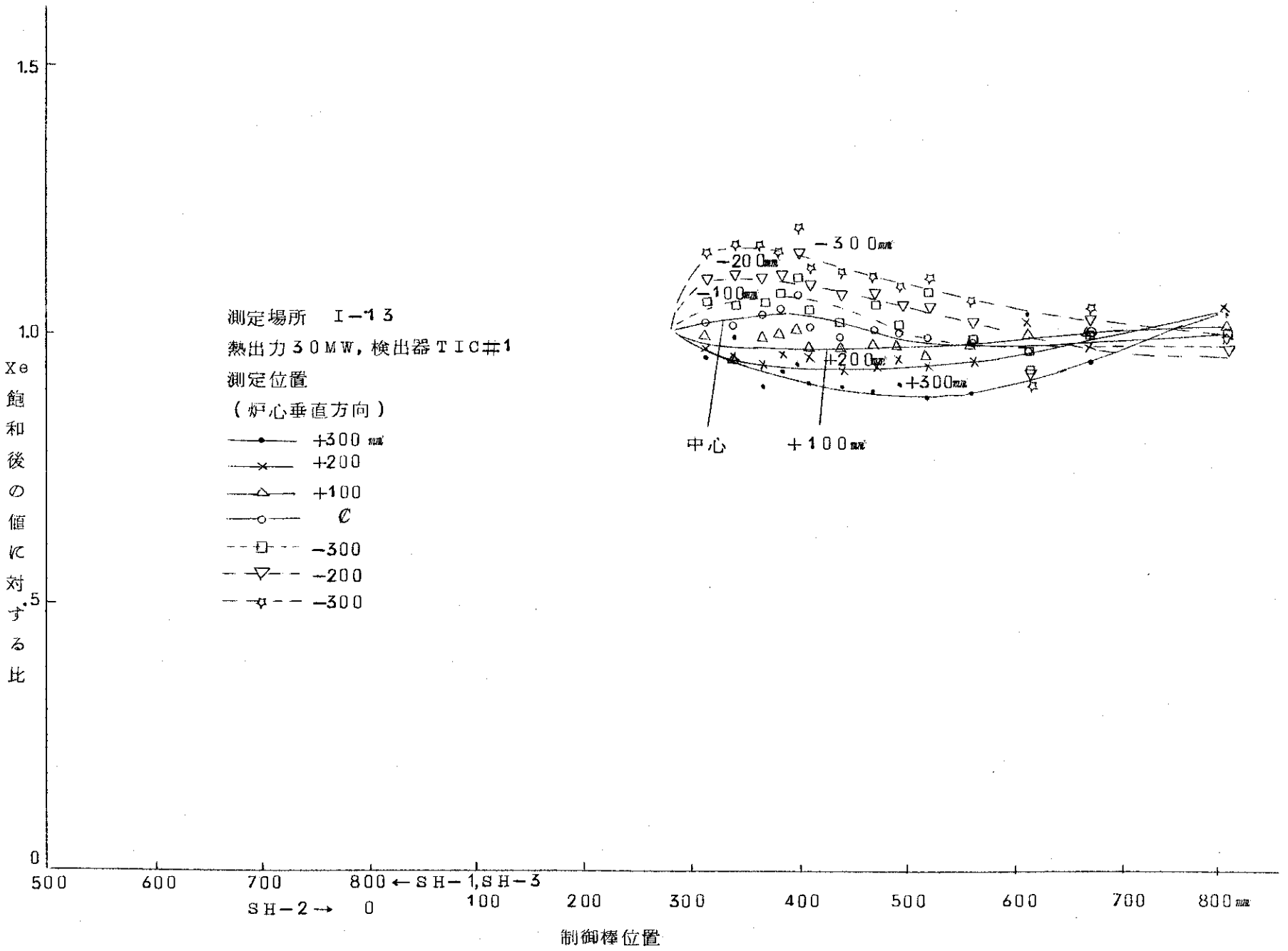
第3−47図　サイクル中の変動



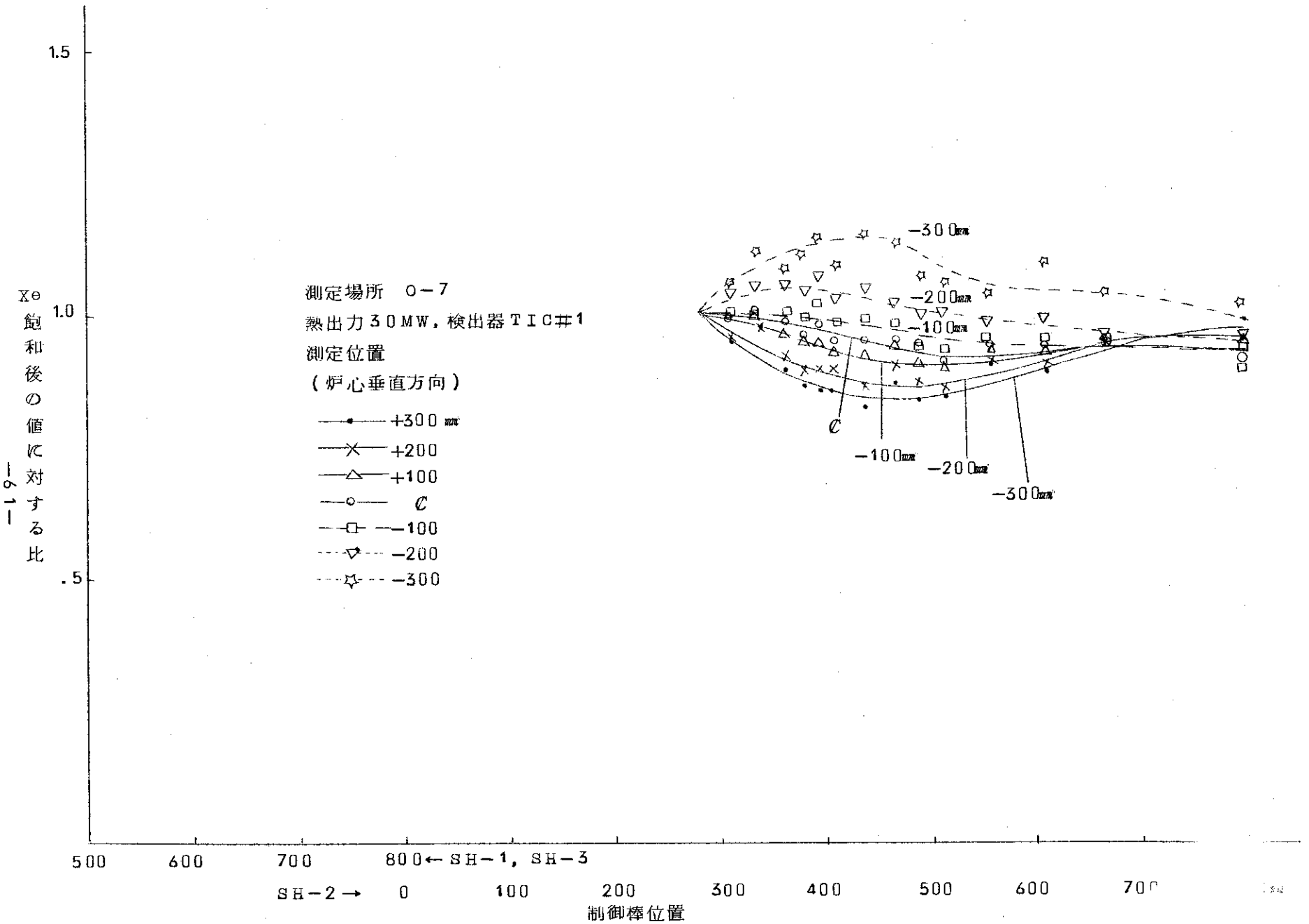
第3−48図　サイクル中の変動



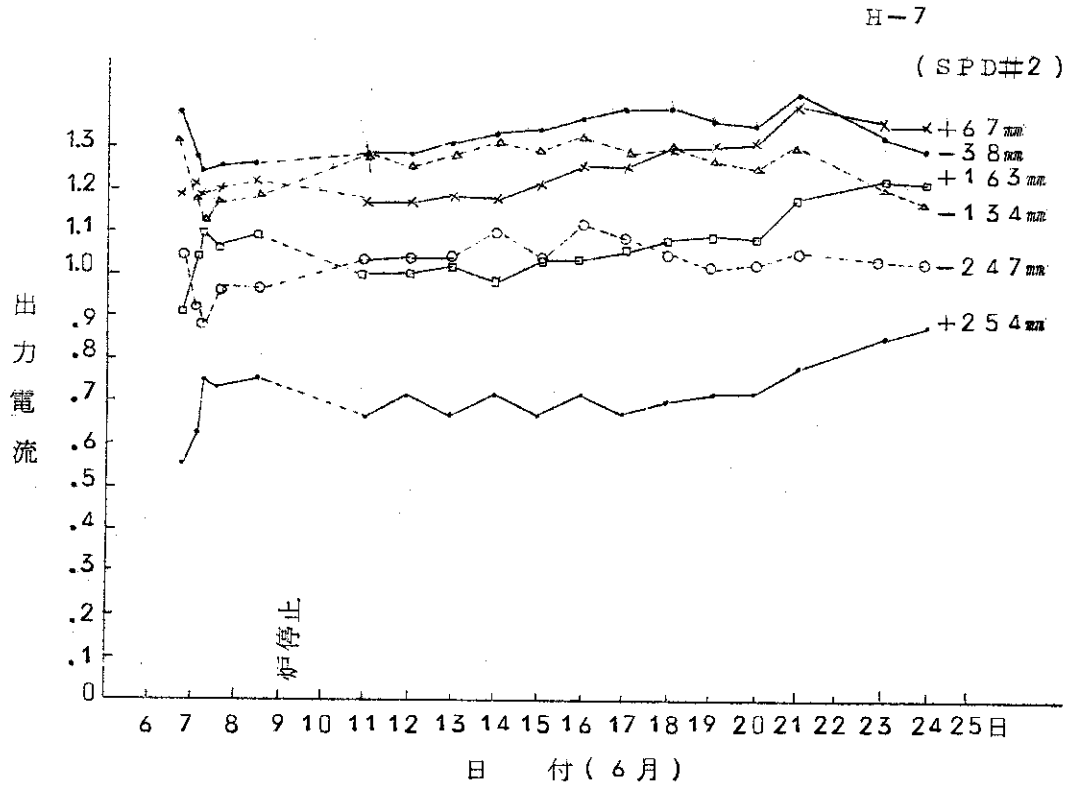
第3−49図　サイクル中の変動



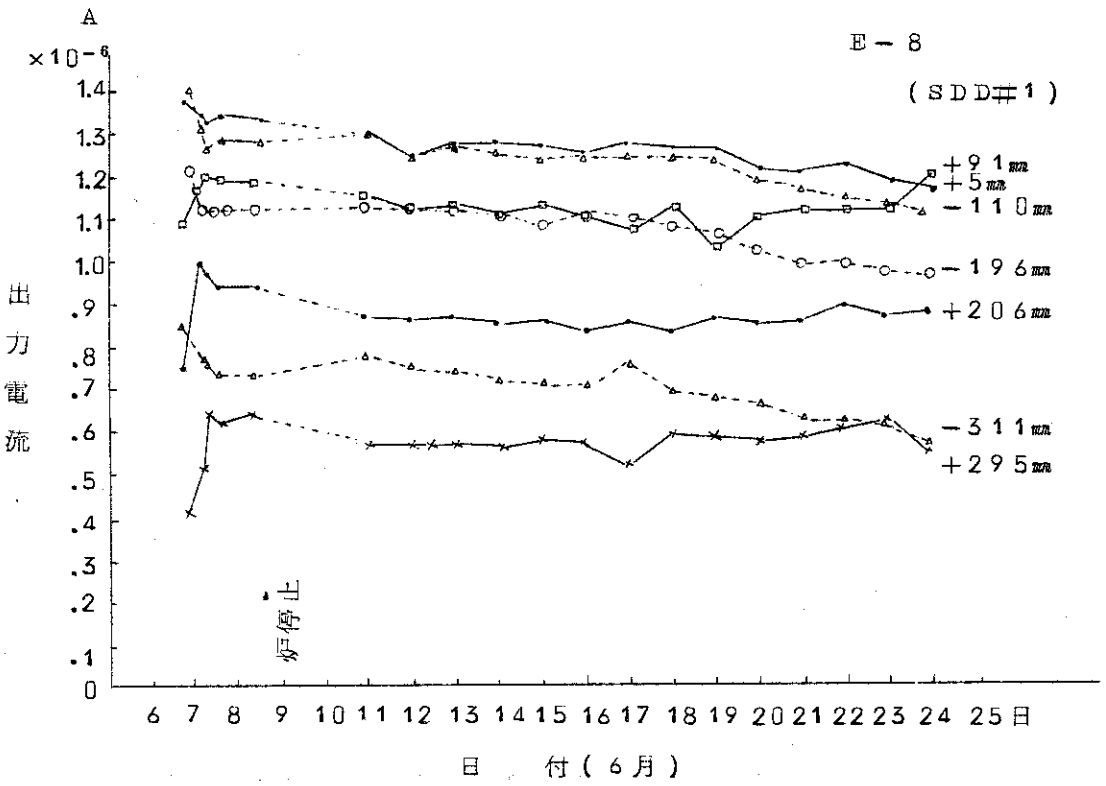
第3－50図　サイクル中の変動



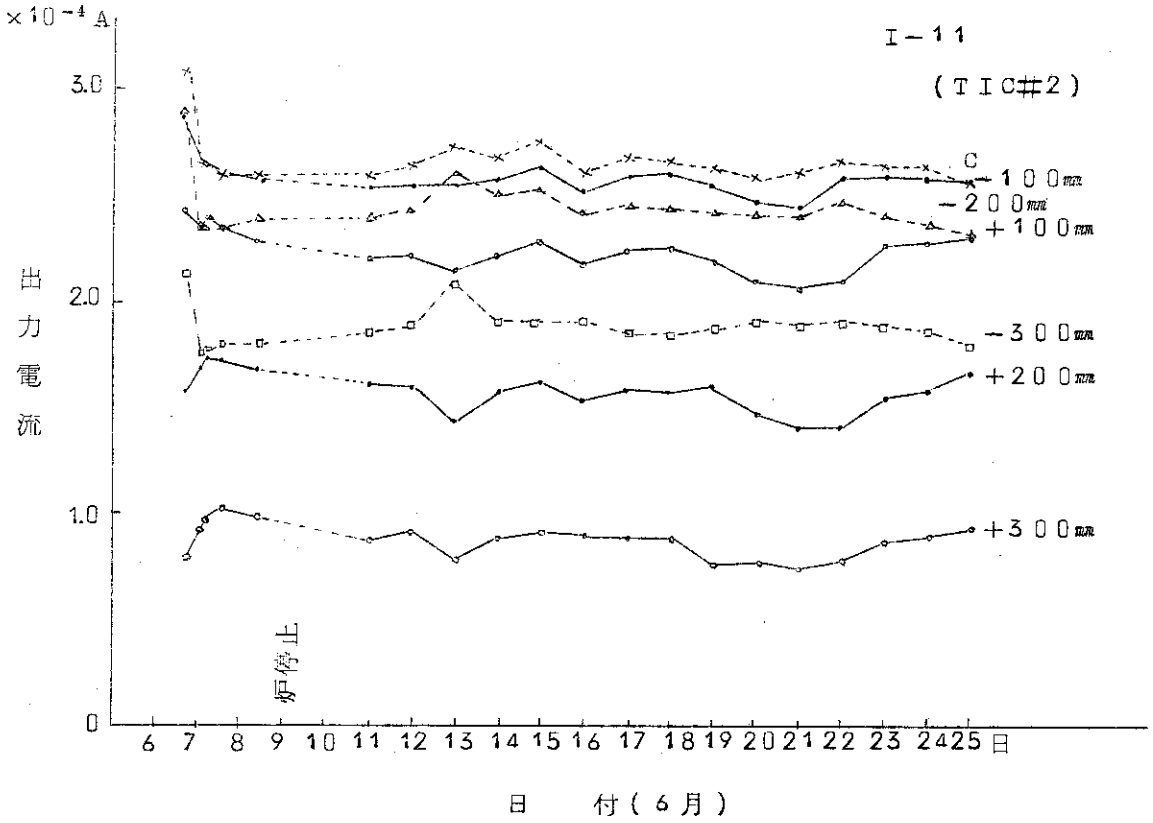
第3－51図　サイクル中の変動



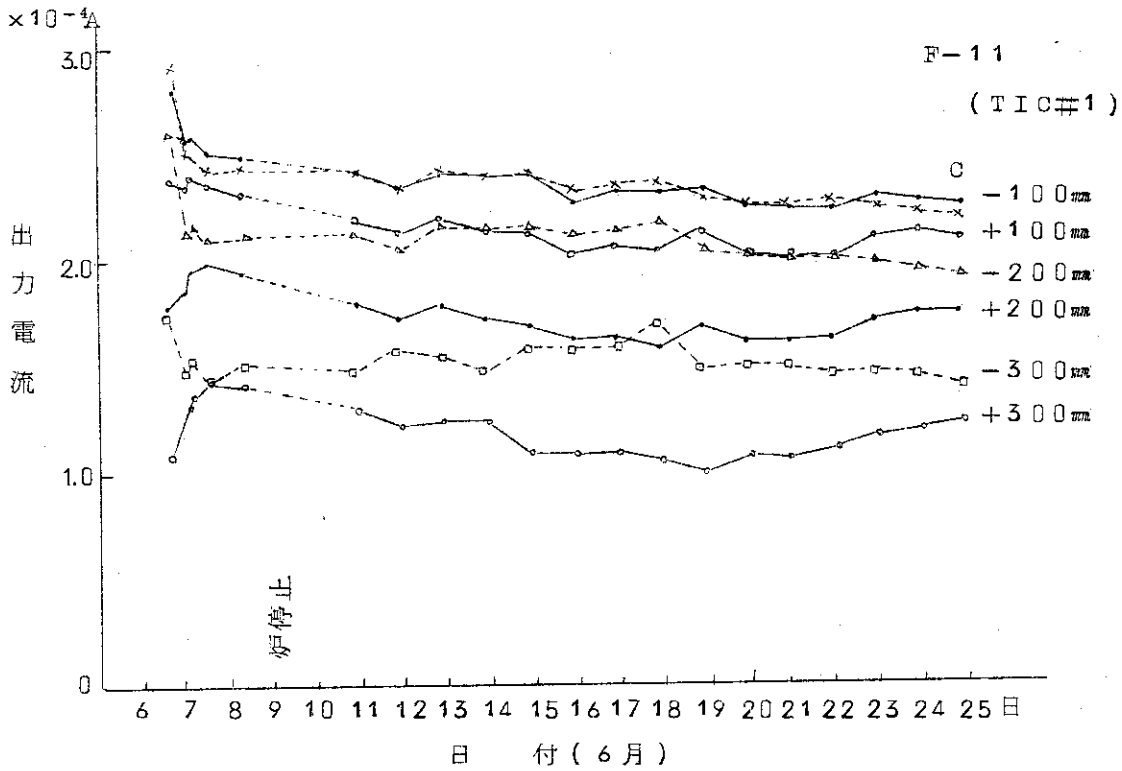
第3－52図　サイクル中の変動



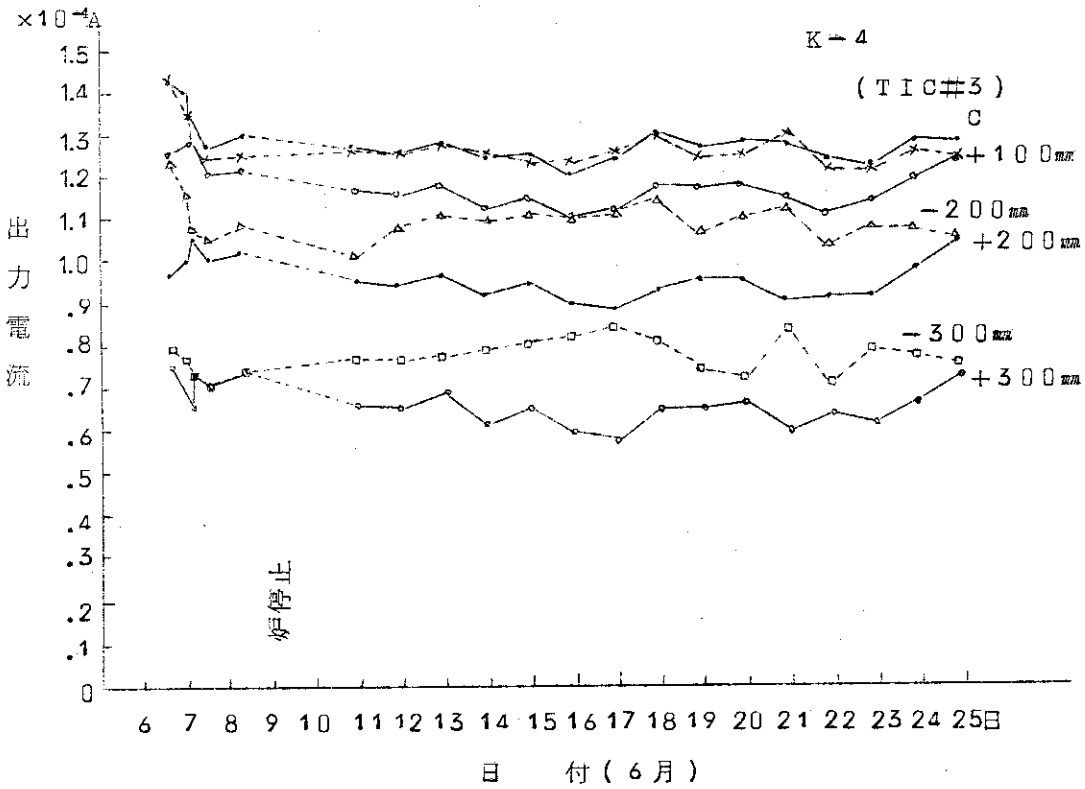
第3－53図　サイクル中の変動



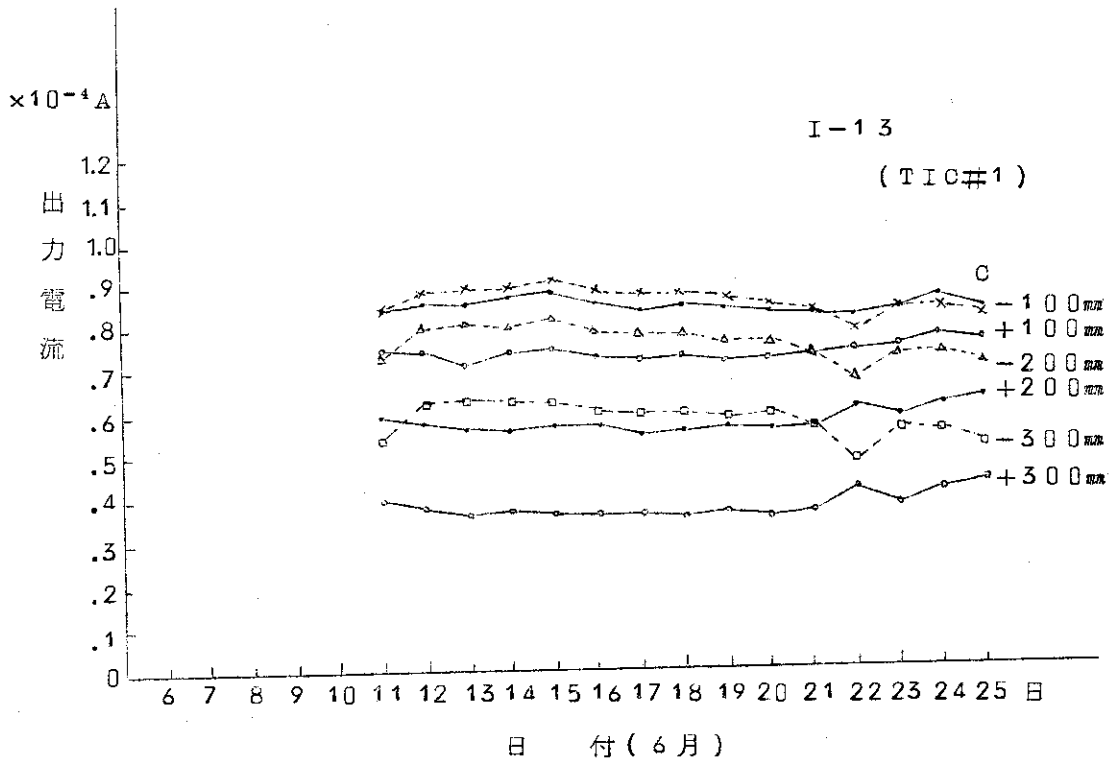
第3－54図　サイクル中変動



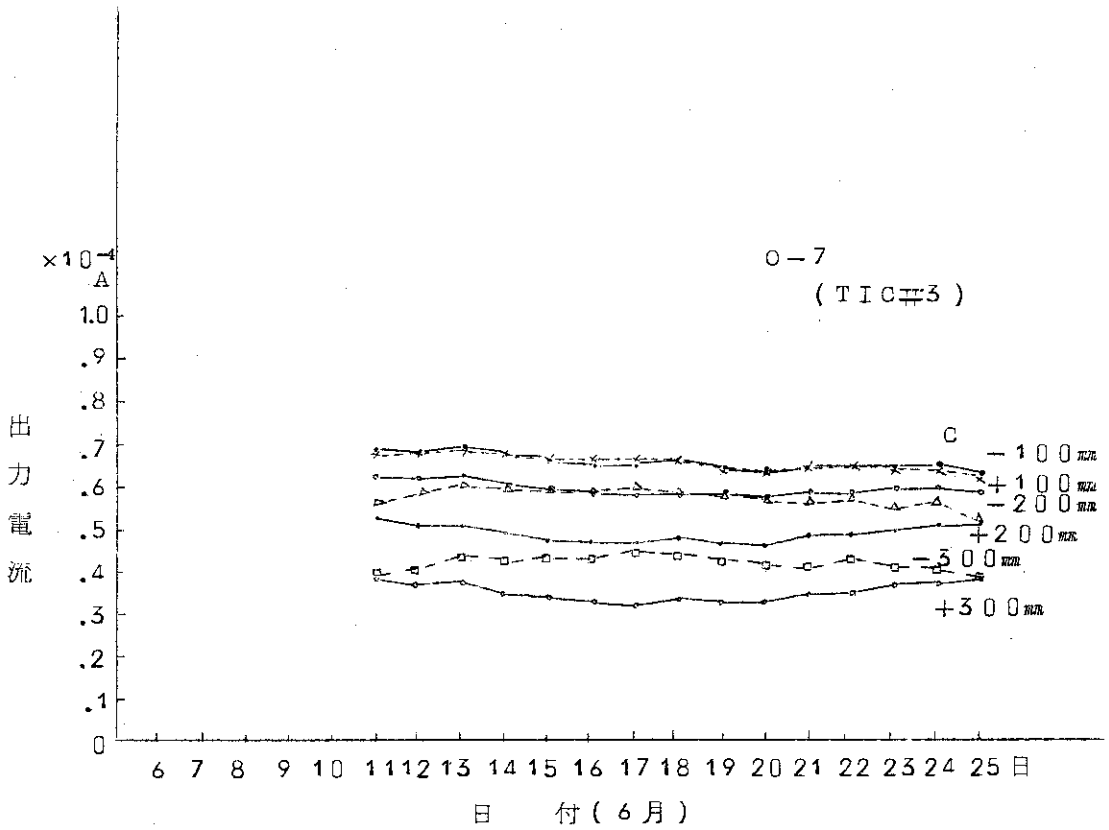
第3－55図　サイクル中変動



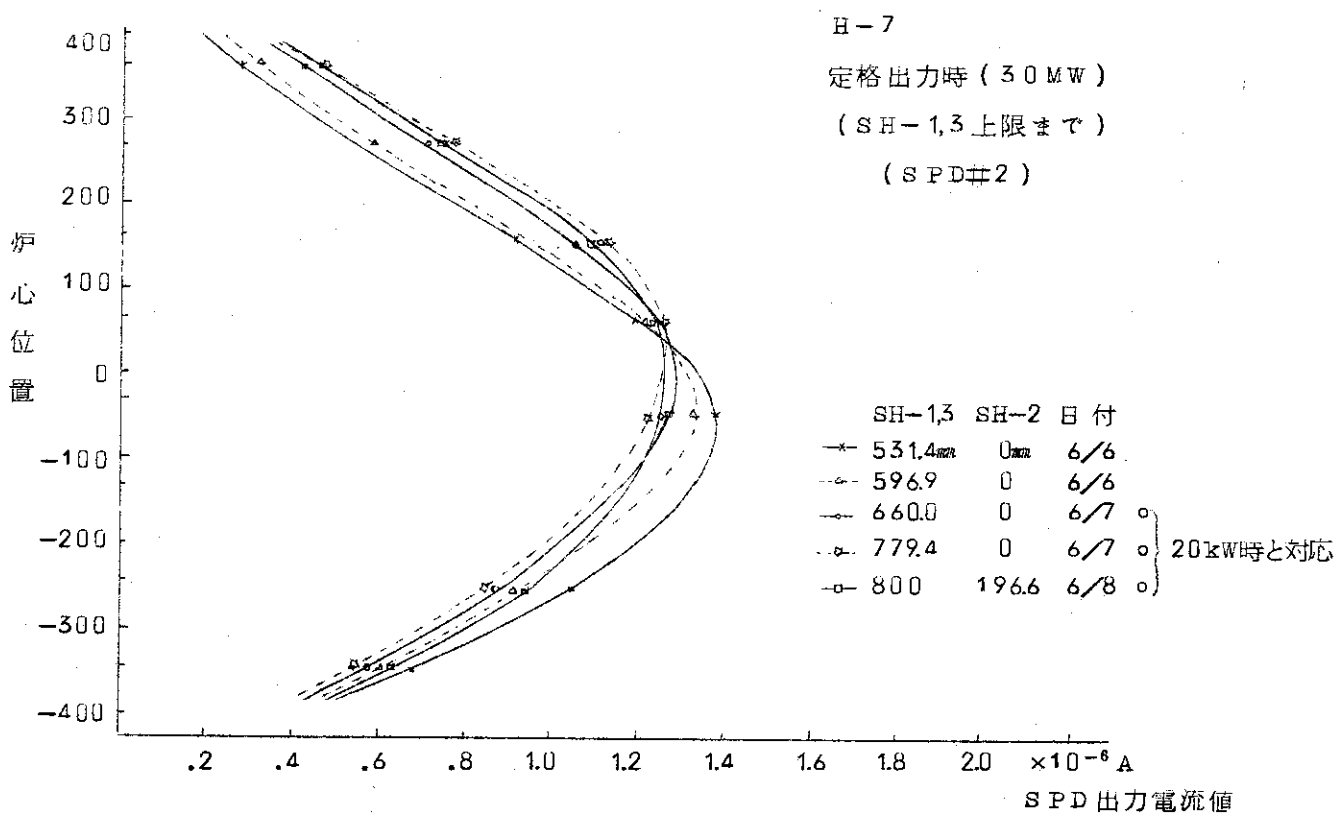
第3－56図　サイクル中変動



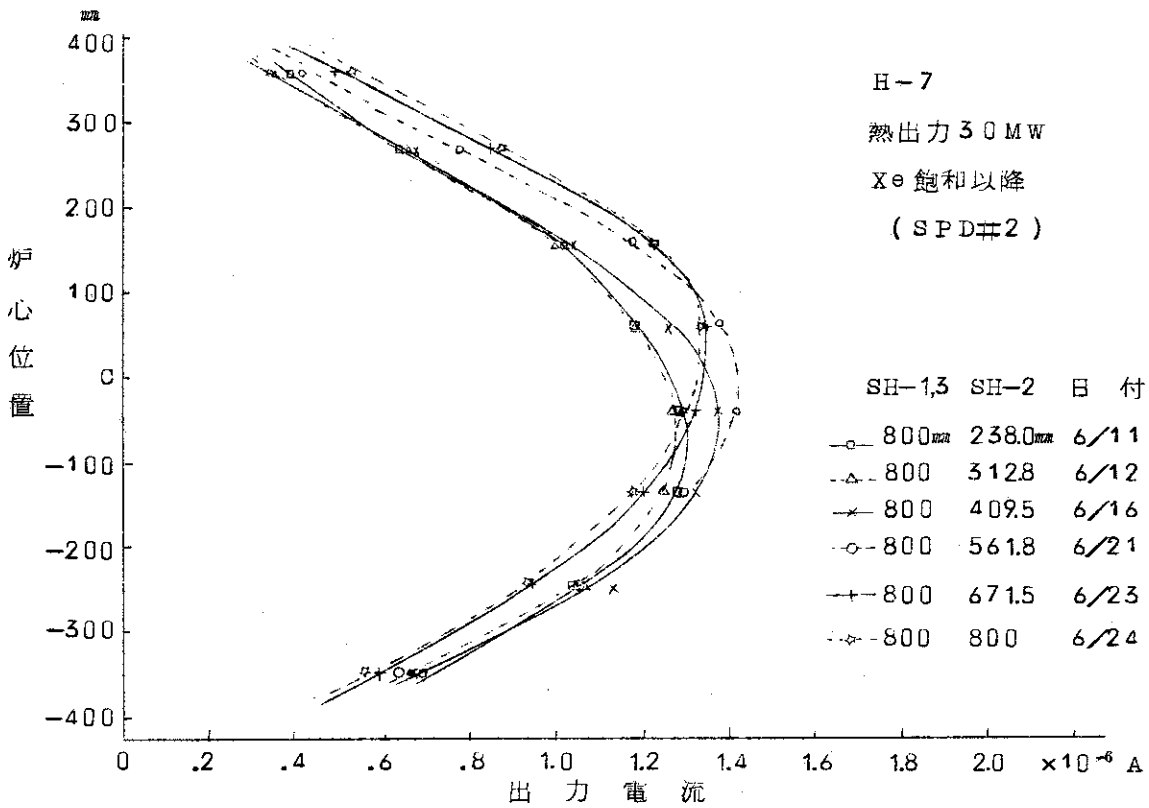
第3－57図　サイクル中変動



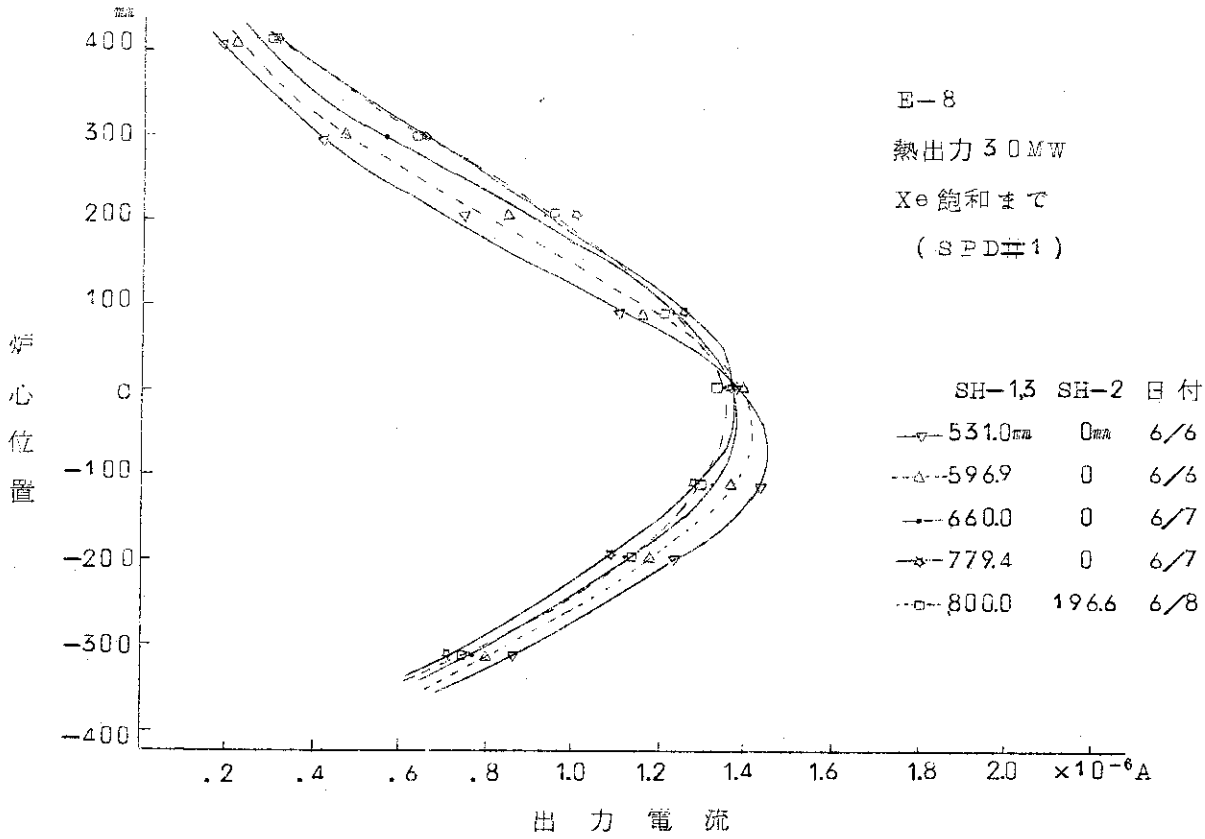
第3－58図　サイクル中変動



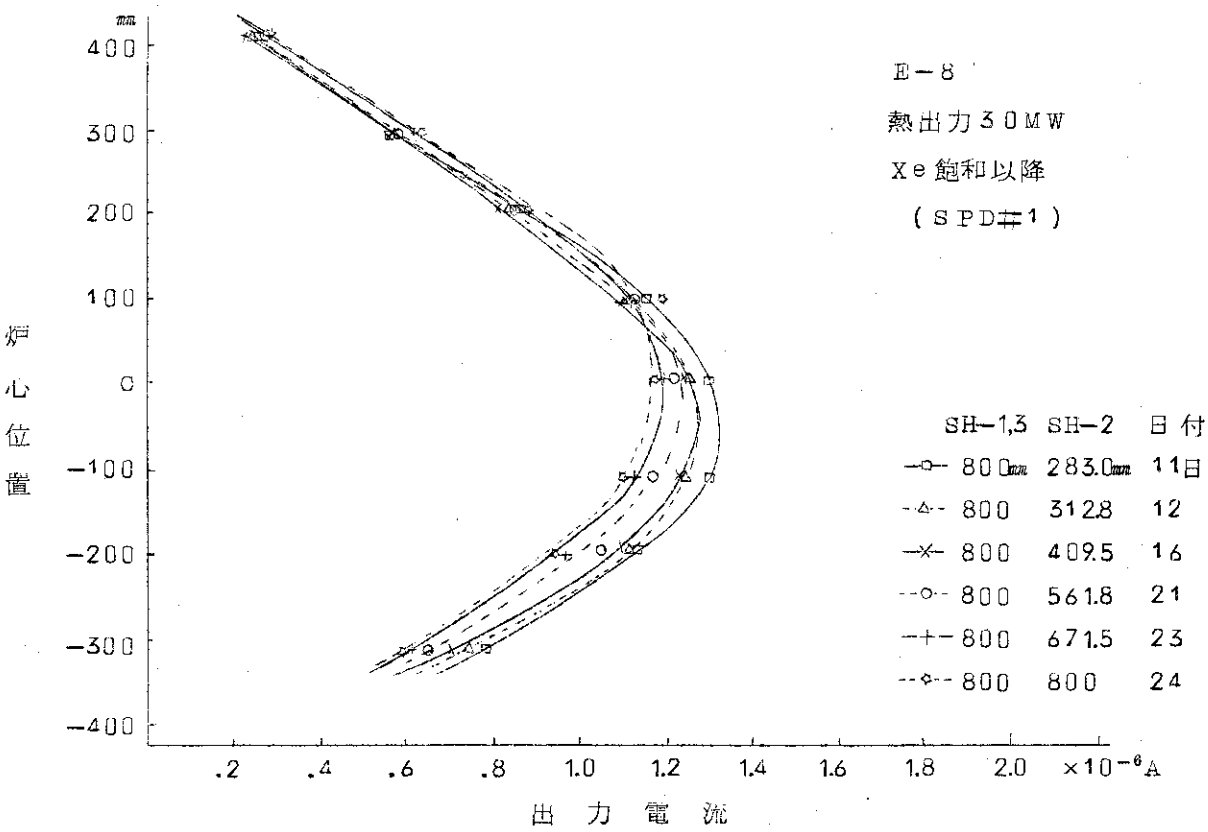
第3－59図　熱中性子束分布の変動



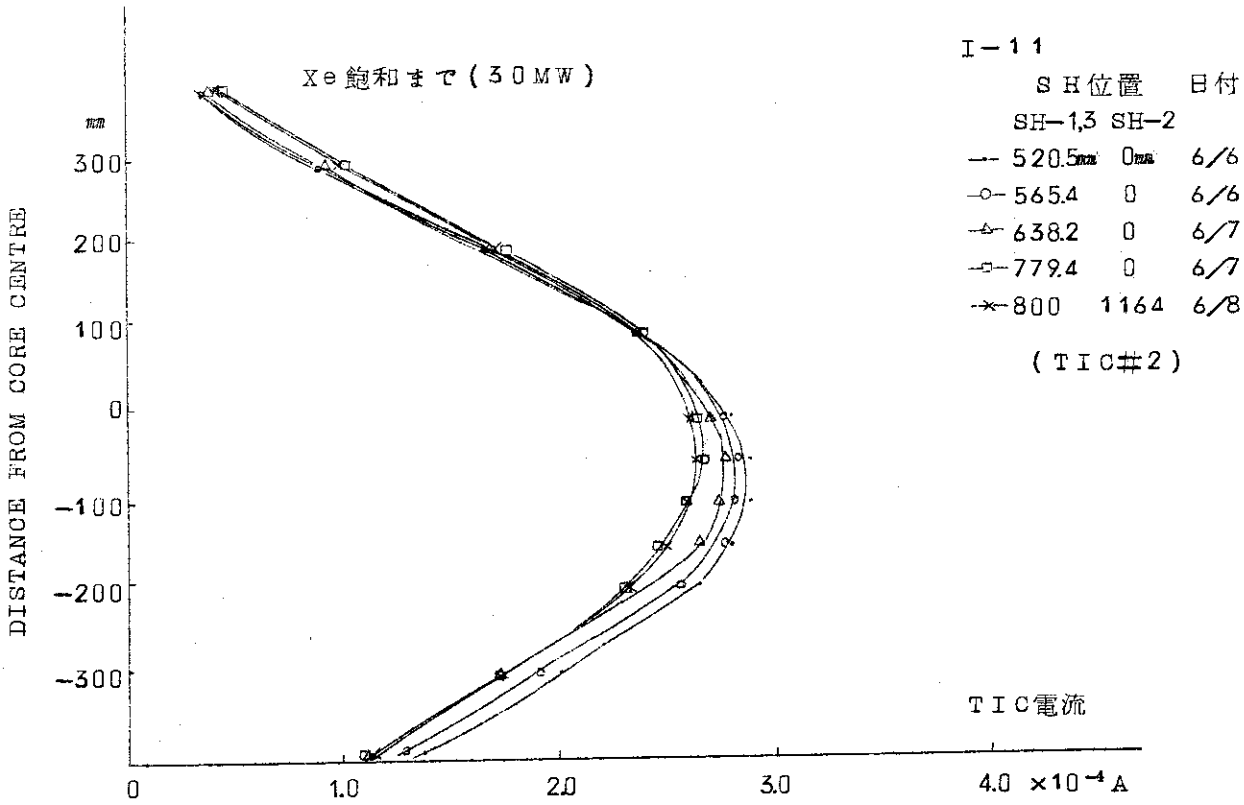
第3－60図　熱中性子束分布の変動



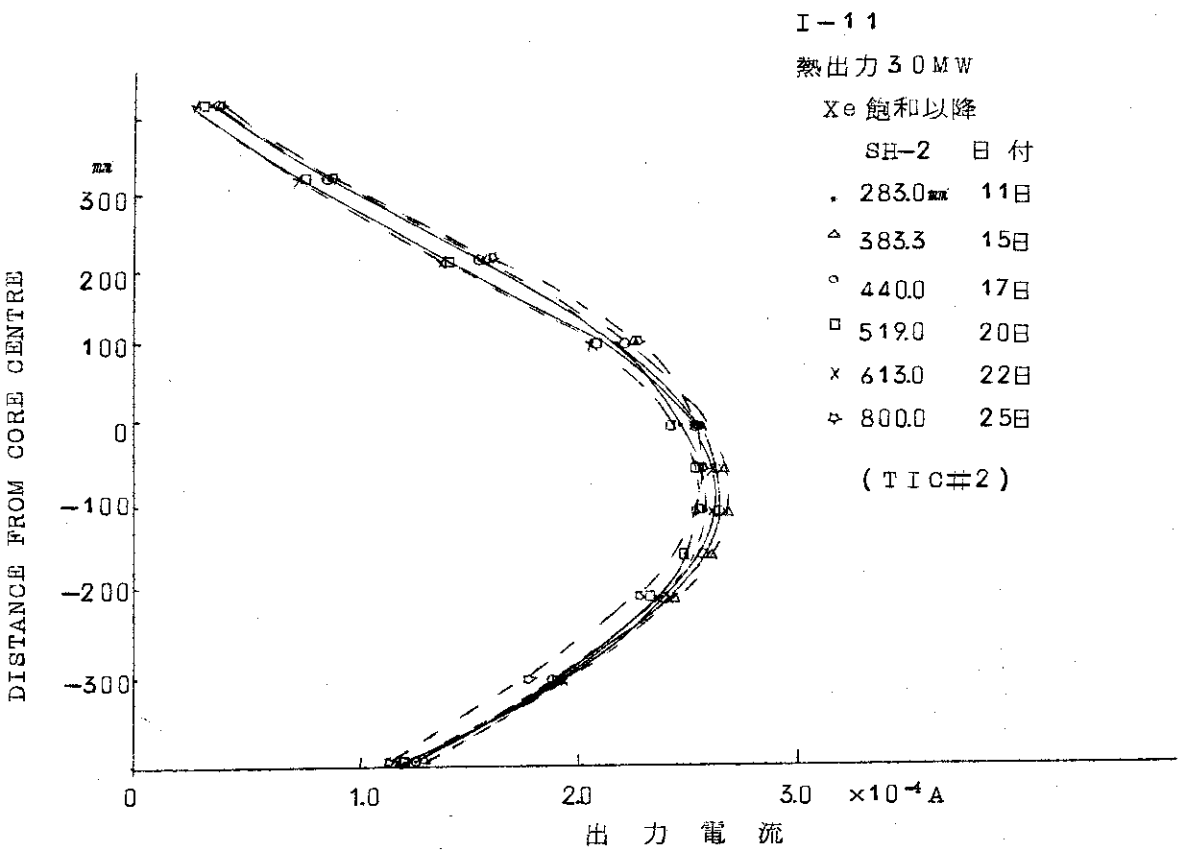
第3−61図　熱中性子束分布の変動



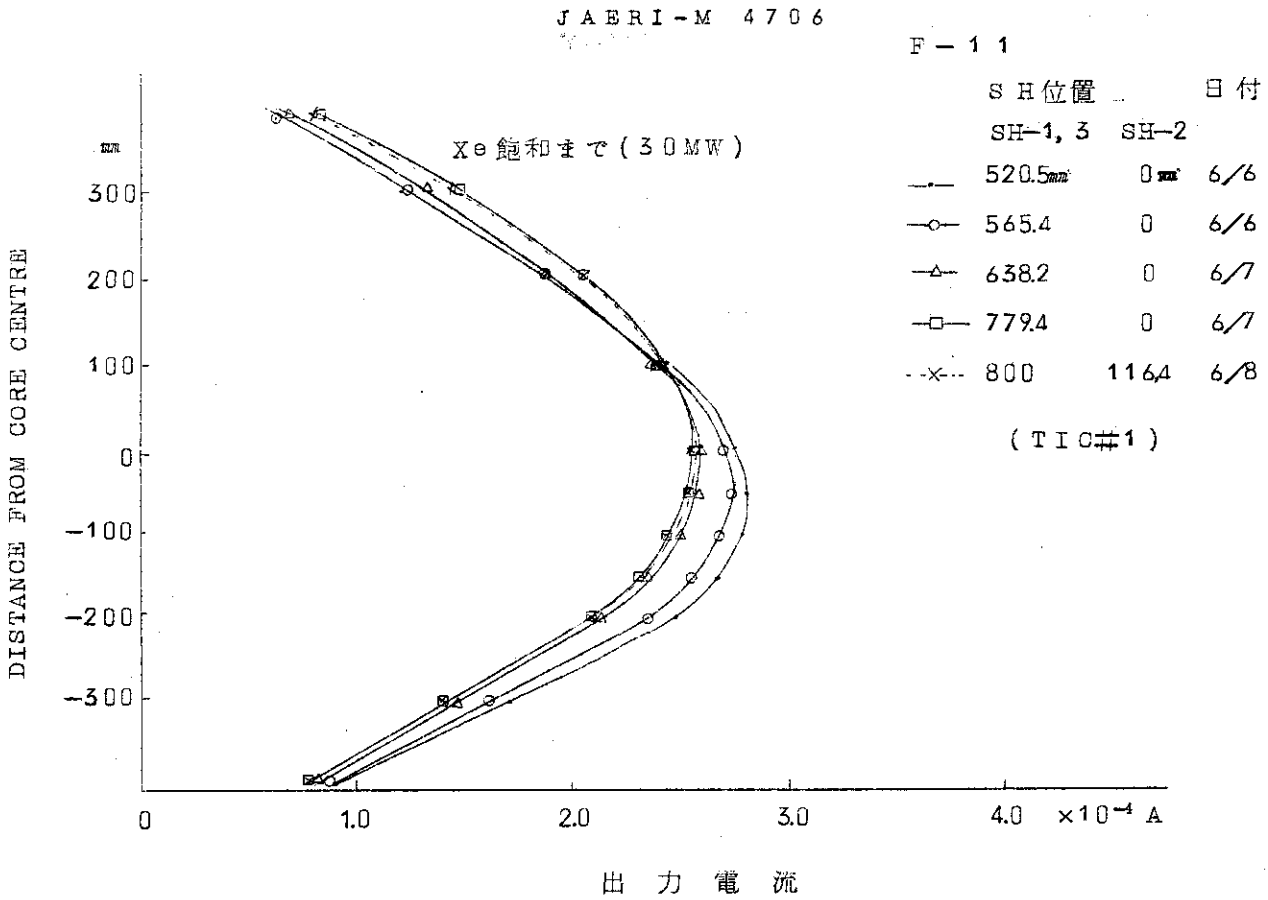
第3−62図　熱中性子束分布の変動



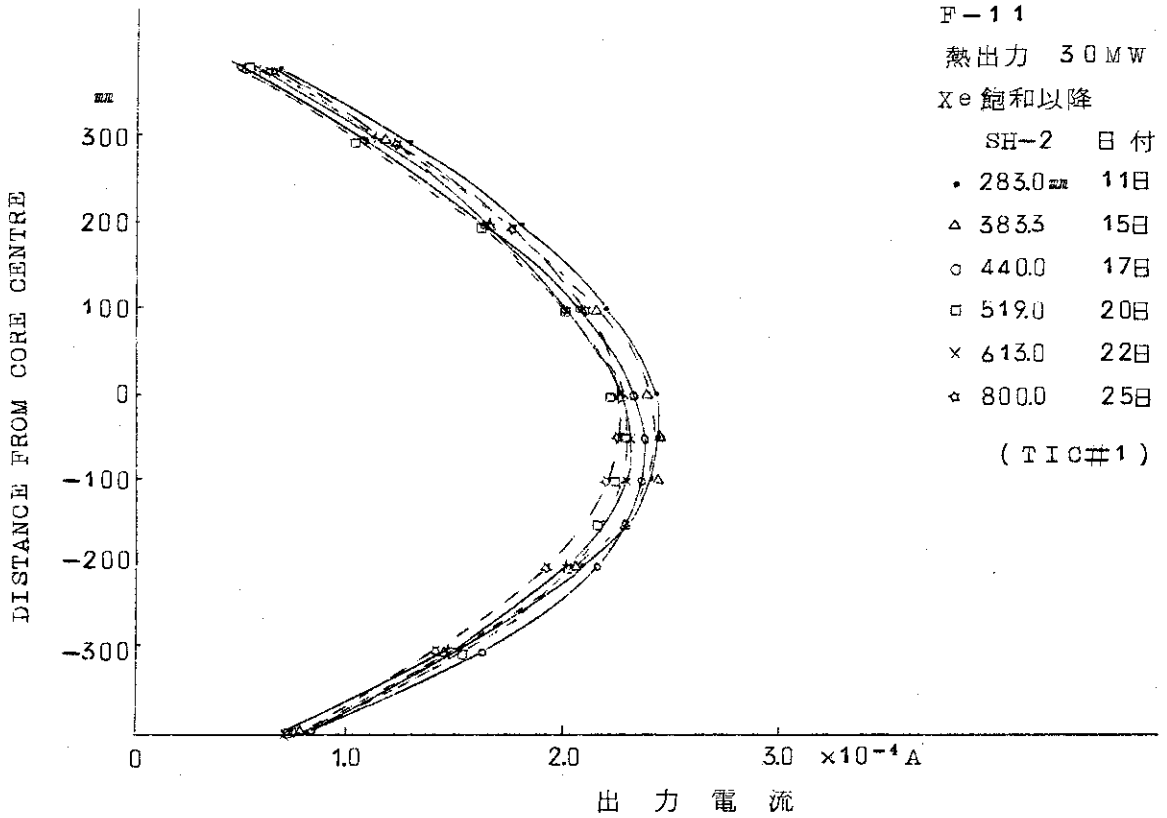
第3−63図 熱中性子束分布の変動



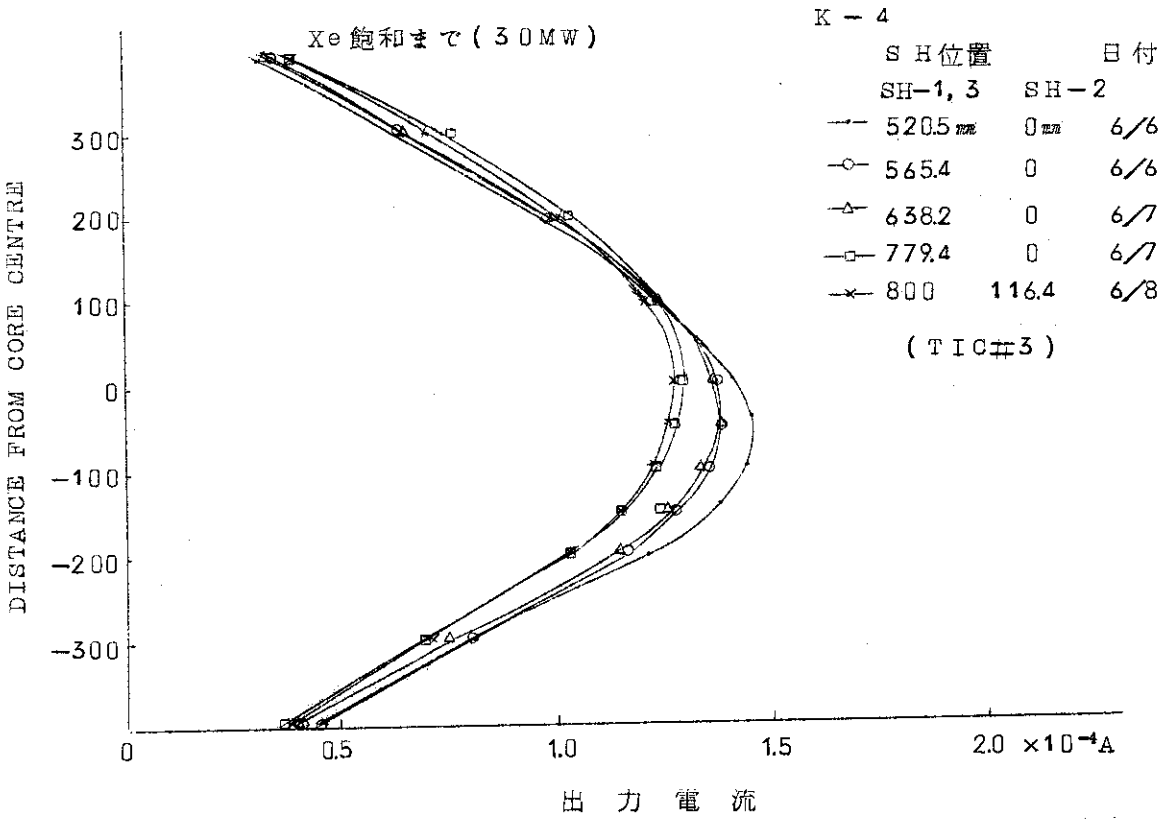
第3−64図 熱中性子束分布の変動



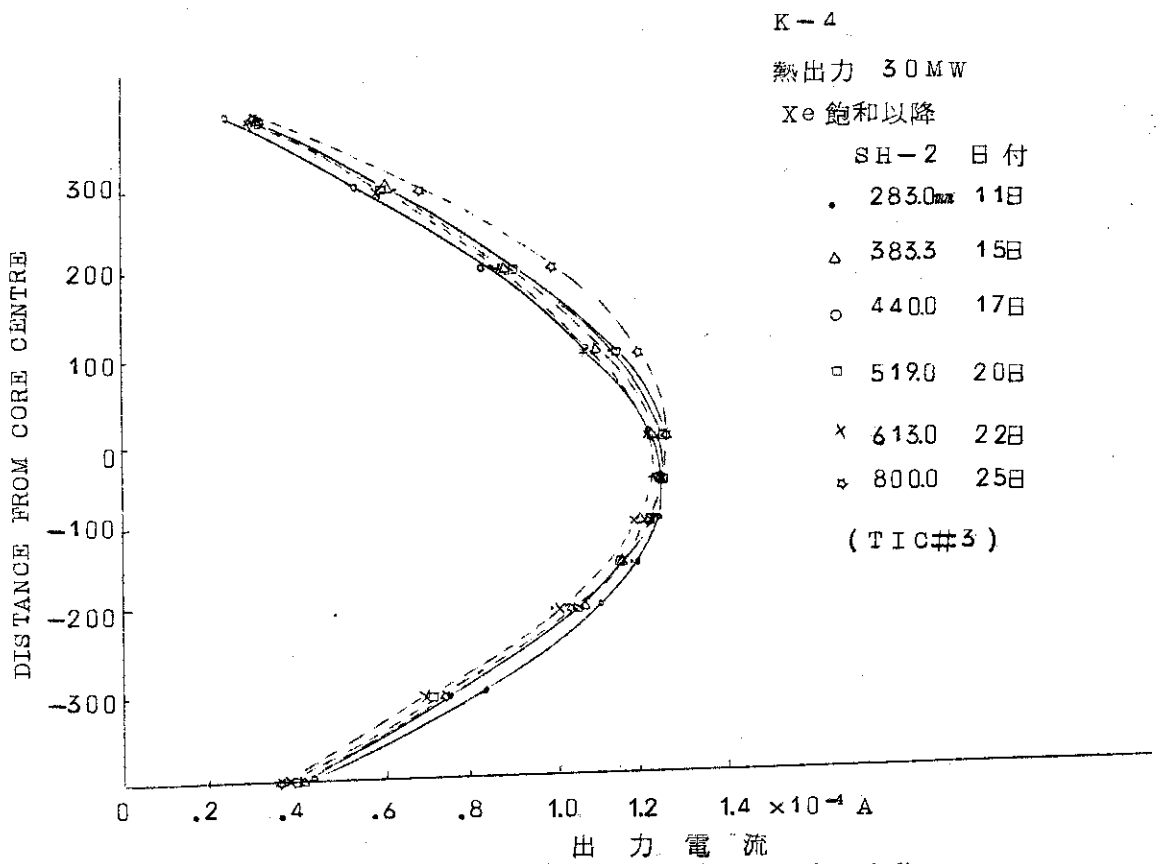
第3－65図　熱中性子束分布の変動



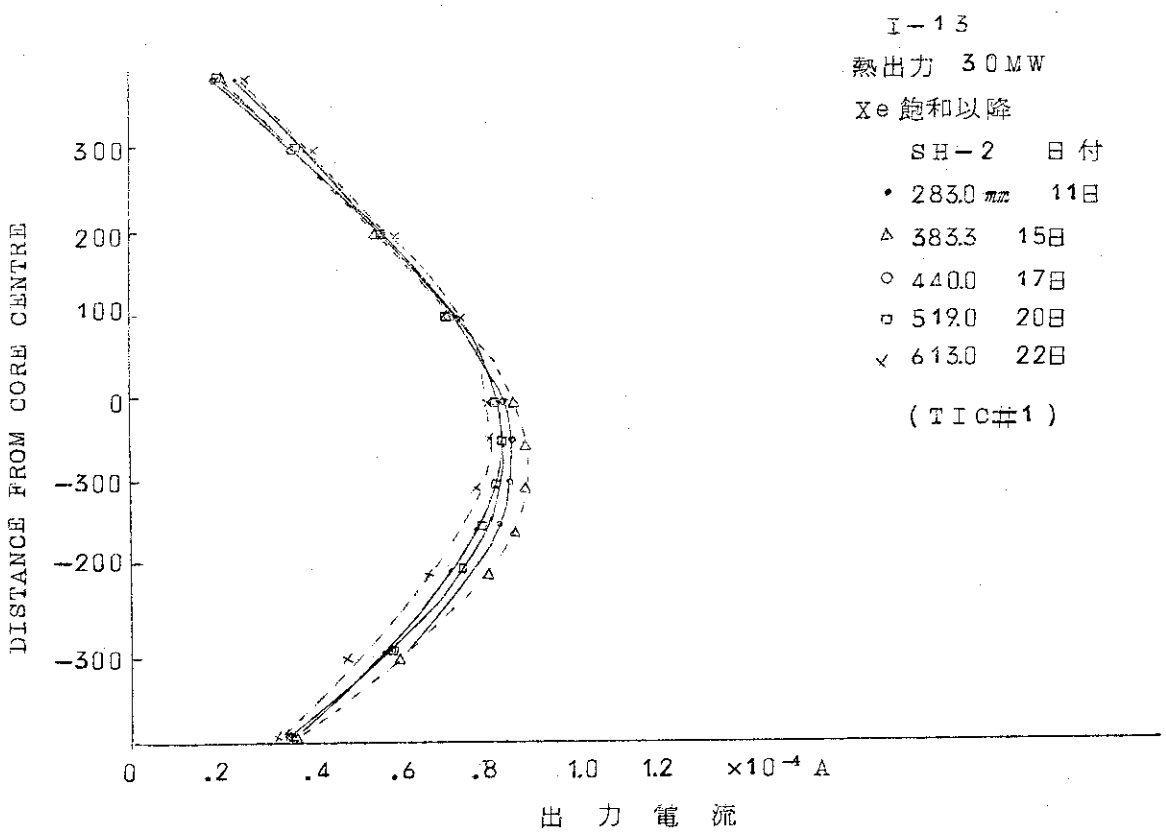
第3－66図　熱中性子束分布の変動



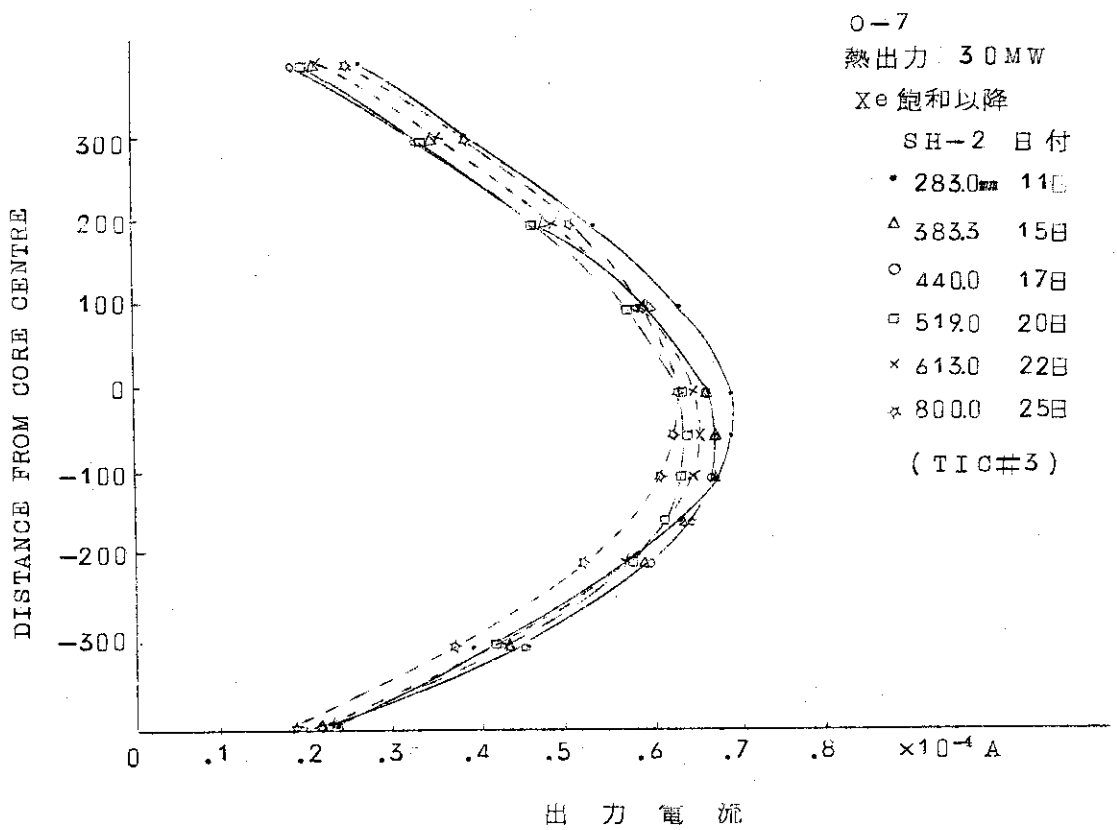
第3－67図　熱中性子束分布の変動



第3－68図　熱中性子束分布の変動



第3－69図 熱中性子束分布の変動



第3－70図 熱中性子束分布の変動

4. サイクル中変動の特性と試料配置への示唆

1) 中性子束のサイクル中変動の特性

定格出力における測定結果から，照射中性子束のサイクル中変動の特性として次のように結論できる。

a) 主たる照射の場である反射体領域照射孔の変動は，燃料領域照射孔における変動に比して小さい。

b) この反射体領域における変動は，Xe 飽和までの一日の間では大きいが，それ以降は比較的小さい。

第3－11表にXe 飽和までの変動およびXe 飽和以降の変動の値を示した。これによればXe 飽和以降の変動は，20％以内であるとみてよい。

c) 炉心垂直方向についてみた傾向としては，炉中心からその上部＋100㎜の範囲において変動が最も少ない。この領域ではXe 飽和までの間の中性子束の垂直方向分布の変動が比較的大きい期間においても，ほとんど変動が認められない。ここではサイクル全体を通じての変動が反射体領域では数％から10％内外にすぎず，燃料領域においても20％以内にとどまっている。

この変動の最も少ない領域の上半部と下半部とでは，変動の傾向が反対になっているほか，下半部の方が上半部にくらべて変動が小さくなっている。

d) 以上のことからJMTRの照射中性子束の変動は，比較的少ないと考えてよい。これは主な照射が反射体領域で行なわれること，および制御棒引抜きが対称性を考慮したシーケンスにしたがって行なわれるためである。

第3－71図，第3－72図に米国のGETRにおける垂直方向中性子束分布の変動状況を示した。* GETRでは全制御棒を一括して，いわゆるギャングで引抜いており，このため垂直方向の中性子束分布におよぼす影響が大きい。これと第3－59図より第3－70図にいたるJMTRにおける一連の垂直方向中性子束分布とを比較してみると，JMTRの中性子束変動の方が少ないことがわかる。したがって中性子束変動を少なくしようとしたJMTR設計の意図は成功しているといえよう。

e) 変動の特徴として，Xe 飽和までの変化は急であり，それ以降の変化はかなりゆるやかである。これは，Xe 蓄積の反応度効果を打消すため引抜かれる制御棒の動きの効果である。

f) またサイクル中の変動の傾向については，炉心垂直方向上半分については，途中いったん減少した後上昇し，下半部では，これと反対である。また概して反射体領域ではサイクルの後半に向って全体として減少して行く。

これも制御棒の動きの影響として説明できる。すなわちXe 飽和以降の制御棒は主として炉心中央の粗調整棒№2（SH－2）であるが，これが引抜かれて行き半挿入の状態となると，中性子束の垂直方向分布は当初のほゞ対称な分布から，上半部が制御棒の

---

* V. D. Springer GENERAL ELECTRIC TEST REACTOR IRRADIATION SERVICE GUIDE

ために抑えられ下半部が突きだした，ピークが垂直方向中心より下にある分布に移向し，さらに制御棒が引抜かれると，分布はふたゝび対称分布となるからである。

また反射体領域においては，水平面での分布を考えると当初挿入されていたSH－2によって周辺におしやられていた中性子束が，次第に炉中心に向かって歪みを回復して行くためと考えられる。

g）このように変動の傾向は制御棒の影響として説明でき，燃料の燃焼による影響は，特にこれを分離して説明し得るほど顕著ではないようである。

2）照射試料配置への示唆

さらに照射試料配置については下記のように論じられよう。

a）サイクル中の照射中性子束の変動が少ないことを希望する試料は，反射体領域の垂直方向中心より±100㎜程度の間に配置するとよい。この領域は全サイクルを通じての変動が15％以下であるような所もあり，特にXe飽和以降の変動は10％程度となるからである。

b）サイクル中の照射中性子束の最大値を問題とする照射試料は，起動時の値が最大である下半分に配置するとよい。これはJMTRCでの各サイクルの先行実験が起動時を模擬して行なわれることから，サイクルを通じての最大値である起動時の値については，実験を通して正確な値が得られるからである。

c）全般的な傾向として照射中性子束のピークは，Xe飽和までの間にあらわれる。したがってXe飽和にいたるまでを定格出力以下で運転し，Xeが飽和した後に定格出力にもどして運転する方式をとればピークをおさえることができ，燃料キャプセルなどは，その設計にあたって運転当初の短期間にあらわれるだけの中性子束のピーク値に対する配慮を軽減することができよう。

特に炉心垂直方向中心より下半部に配置された試料に対する中性子束は，Xe飽和にいたるまでに大巾に減少し，以後の変動は比較的少ないから，上記のような運転方式によって，サイクルを通じて比較的一定の値の中性子束を得ることみできる。

たゞし炉心垂直方向全体にわたる試料については上半部と下半部とで変動の傾向が異なるため，この場合はピークをおさえることができても，上半部の変動は一定出力の運転の場合よりさらに大きくなっていることを念頭におく必要がある。

d）一般に反射体領域の炉心垂直方向±200㎜の間に配置された試料のうけるサイクル中変動は，起動時の値の±20％と考えればよい。

すなわち，この範囲に配置された試料に対してJMTRCの先行試験によって得られた中性子束の値からXe飽和以降の中性子束を予測する場合の不確定さは±20％程度であるといえる。しかしながら，試料の位置，炉心垂直方向の高さなどを考慮し，これに今回の測定結果を利用すれば，変動の傾向はかなり明確なものとなってくるため，予測の精度はかなり向上すると考えられる。

第3－11表　Xe 飽和まで，およびXe 飽和以後の変動

位置	H－7		E－8		I－11		F－11		K－4		I－13		O－7	
領域	燃料		反射体		反射体		反射体		反射体		反射体		反射体	
4) 垂直方向位置	Xe飽和まで 1)	Xe飽和以後 2)	Xe飽和まで	Xe飽和以後	Xe飽和まで	Xe飽和以後	Xe飽和まで	Xe飽和以後	Xe飽和まで	Xe飽和以後	Xe飽和まで	Xe飽和以後	Xe飽和まで	Xe飽和以後
mm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	3)	%	3)	%
+300	+45	47	+56	23	+30	22	+38	22	+20	23	－	20	－	16
+200	+24	31	+35	9.7	+13	15	+15	14	+12	16	－	13	－	14
+100	+ 4	19	+13	10	－ 7	11	－ 3	8.6	－ 4	11	－	6.4	－	10
0	−12 (−38	12	－ 4	10	−12	7.5	−12	8.2	−11	7.9	－	7.0	－	9.5
−100	−16	12	−15	16	−18	7.3	−17	10	−14	6.5	－	15	－	12
−200	−17	25	−11	17	−20	13	−20	12	−15	14	－	14	－	14
−300	−19	24	−16	25	−19	16	−19	19	−11	17	－	23	－	19

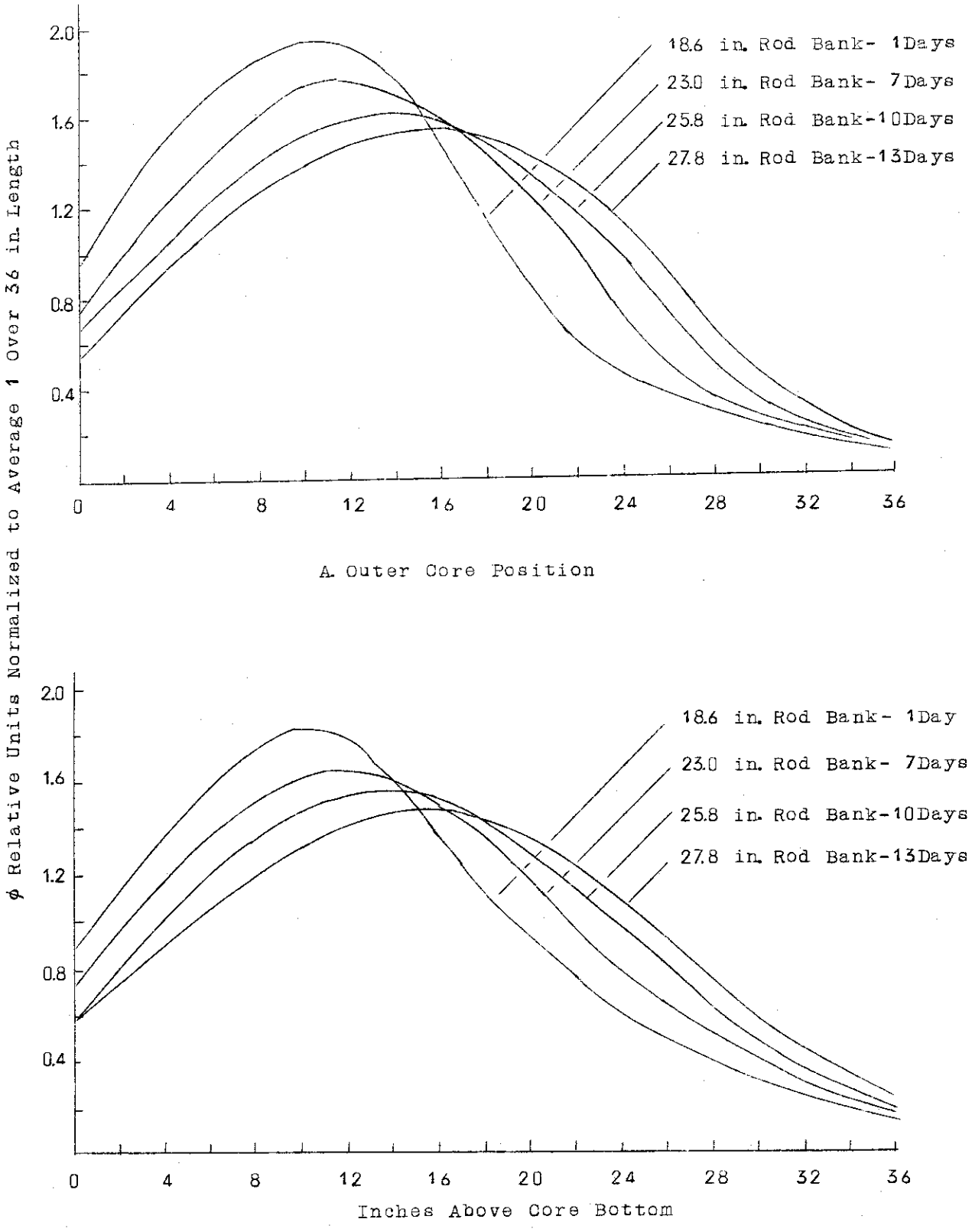
1）$\dfrac{\phi_{EX}-\phi_0}{\phi_0}$　（ϕ_{EX}；初期値に対し最も変動した値，ϕ_0；初期値）

2）$\dfrac{\phi_{Max}-\phi_{Min}}{\phi_{sat}}$　（ϕ_{Max}；Xe飽和以後の最大値，ϕ_{Min}；Xe飽和以後の最小値，ϕ_{sat}；Xe飽和時の値）

3）測定値なし

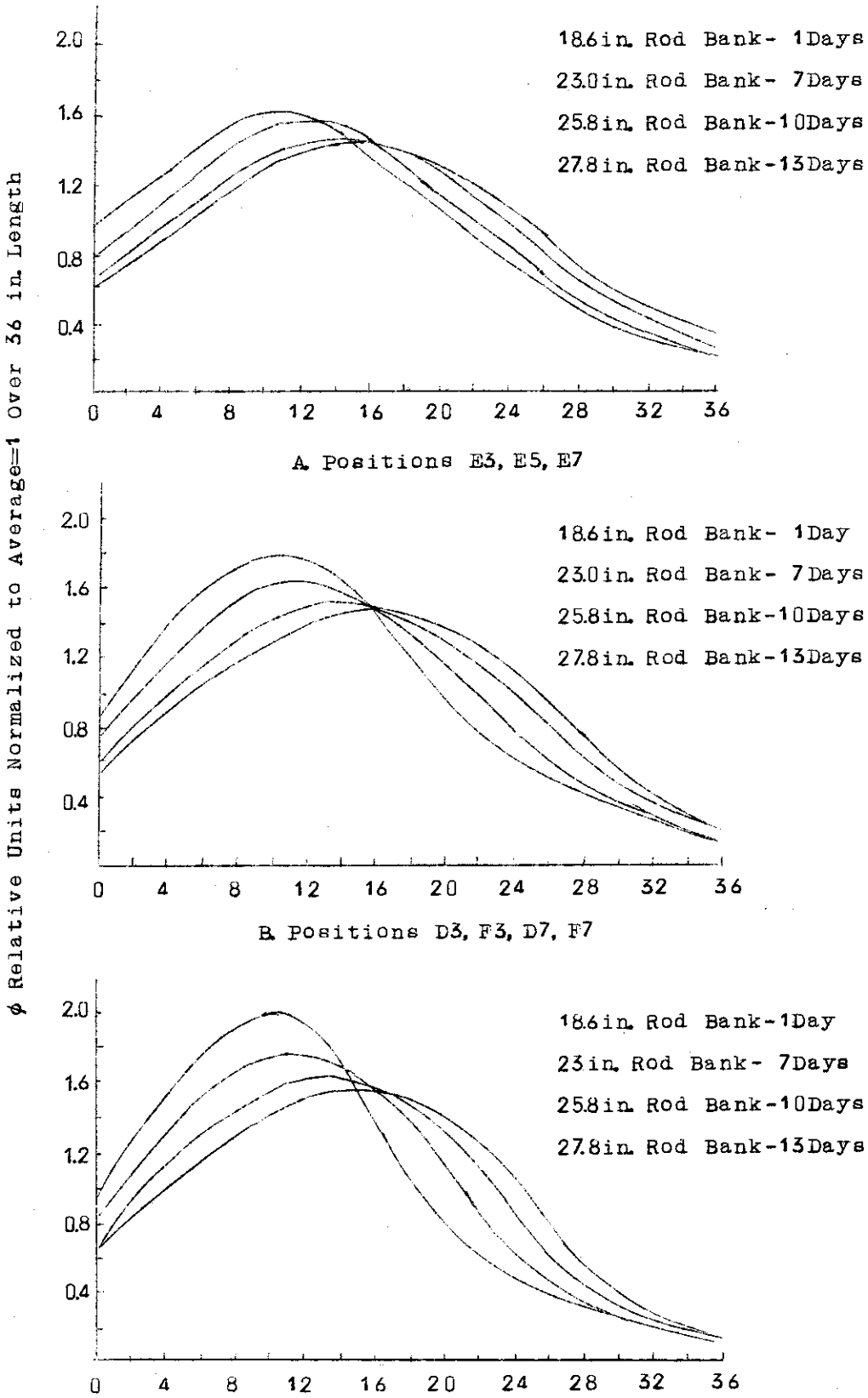
4）H－7については＋254mm，＋163mm，＋67mm，－38mm，－134mm，－247mm，－346mm

H－8については＋295mm，＋206mm，＋91mm，＋5mm，－110mm，－196mm，－311mm



AXIAL FLUX SHAPE AS A FUNCTION OF ROD BANK IN INCHES

第３－７１図　ＧＥＴＲにおけるＦＬＵＸ変動（燃料領域外）



AXIAL FLUX SHAPE AS A FUNCTION OF ROD BANK IN INCHES

第3－72図　GETRにおけるFLUX変動（燃料領域）

Ⅳ あとがき

本測定によって，照射を行なう上で重要な要素である中性子束のサイクル中変動を把握し得たこと，しかもこの変動が比較的小さく，JMTR設計の意図が満されていたことの二点が判明したことは大きな収穫であったと考える。

これらのデータをもとに，さらに照射特性改善について検討が進められることを期待したい。

本測定に多大な御援助をいただいた原子炉工学部原子炉計測研究室の川口千代二室長，虎石昭生，山田政治，角田恒巳，河上知秀の諸氏，東京芝浦電気株式会社の白山新平，野崎新一，角田十三男，葛西誠の諸氏，ならびに照射第一課の林喬雄，*馬場治（シュラウド設計担当）の諸氏，および照射第二課の佐藤均氏はじめシュラウド設置を担当された照射第二課の諸氏，さらに全般にわたり御世話になった大内信平照射第一課長（当時計画課長），SPD等の準備に御尽力いただいた元計画課の福田達氏*に深く感謝の意を表する次第である。

---

* 現在，動力炉核燃料開発事業団

付　検出器出力の初期値に対する比をとった場合の誤差

検出器出力を初期値に対する比で処理する場合，検出器出力の非直線性に起因する誤差は次のように論じられる。

まず，検出器出力電流 i と中性子束 ϕ の関係は次式の通りである。

$$i = K\alpha\phi \tag{1}$$

ここでは K は定数，α は ϕ に依存する非直線性の特性を示す係数であるが，検出器が直線性を有する場合は常に $\alpha = 1$ である。

検出器出力をサイクル初期値のような基準値に対する比で処理すれば，その値 γ は次のように示される。

$$\gamma = \frac{i}{i_0} = \frac{K\alpha\phi}{K\alpha\phi_0} = \frac{\alpha}{\alpha_0}R$$

$$= \frac{\alpha_0 \pm \Delta\alpha}{\alpha_0}R = \left(1 \pm \frac{\Delta\alpha}{\alpha_0}\right)R \tag{2}$$

ここで $R = \frac{\phi}{\phi_0}$ であり，当然，直線性に問題ない場合には $\gamma = R$ が成立する。したがって，$\Delta\alpha/\alpha_0$ が γ の R に対する誤差を示す。

したがって，ϕ が ϕ_0 に近ければ α と α_0 の差異は小さい。すなわち $\Delta\alpha/\alpha_0 \ll 1$ である。このため α それ自身は 1 より大巾にずれていても γ と R との差異は大きくない。

これらの関係を特に非直線性のいちじるしい I－11 ならびに F－11 の検出器について付－1 表に示した。ここで示した α の値は，III－(2)第 3－9 図に示されたような検出器特性の直線からのずれから求めたものである。たゞしこの測定は検出器を一点に固定して行なったため，出力上昇にともなう制御棒位置変化の効果も含まれており，この α は必らずしも正確な評価ではない。

これによれば，出力電流が大きくて非直線性の影響の最も大きい垂直方向中心附近では，サイクル中最小値は 20％ほど過大評価されている。しかしながら，この近傍の Xe 飽和以降の変動はあまり大きくないので，Xe 飽和以降の評価に大きな支障をもたらすことはないであろう。また変動巾の大きい＋300 mm の点では，出力電流が比較的小さいため，非直線性の影響は 10％以内にとゞまっている。

付 — 1 表

I — 1 1

	位置 (mm)	+300	+200	+100	0	−100	−200	−300
初期値	i_0 (×10⁻⁴A)	.790	1.58	2.43	2.89	3.08	2.91	2.14
	α_0	.868	.752	.623	.567	.531	.540	.690
サイクル中 最大値	i (×10⁻⁴A)	1.02	1.73	2.43	2.89	3.08	2.91	2.14
	γ	1.30	1.13	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	α	.812	.737	.623	.567	.531	.540	.690
	α/α_0	.94	.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	$\Delta\alpha/\alpha_0$ (%)	−6	−2	—	—	—	—	—
サイクル中 最小値	i (×10⁻⁴A)	.750	1.41	2.07	2.45	2.56	2.31	1.80
	γ	.950	.894	.853	.847	.831	.794	.842
	α	.892	.762	.689	.583	.609	.625	.750
	α/α_0	1.03	1.01	1.11	1.03	1.15	1.16	1.09
	$\Delta\alpha/\alpha_0$ (%)	3	1	11	3	15	16	9

F — 1 1

	位置 (mm)	+300	+200	+100	0	−100	−200	−300
初期値	i_0 (×10⁻⁴A)	1.08	1.79	2.38	2.82	2.92	2.60	1.74
	α_0	.940	.818	.690	.613	.607	.650	.828
サイクル中 最大値	i (×10⁻⁴A)	1.42	1.98	2.40	2.82	2.92	2.60	1.74
	γ	1.38	1.15	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
	α	.862	.793	.685	.613	.607	.650	.828
	α/α_0	.92	.97	.99	1.00	1.00	1.00	1.00
	$\Delta\alpha/\alpha_0$ (%)	−8	−3	−1	—	—	—	—
サイクル中 最小値	i (×10⁻⁴A)	1.00	1.57	1.98	2.23	2.19	1.91	1.42
	γ	.926	.877	.833	.791	.751	.735	.815
	α	.953	.859	.777	.720	.730	.790	.861
	α/α_0	1.01	1.05	1.13	1.18	1.20	1.22	1.04
	$\Delta\alpha/\alpha_0$ (%)	1	5	13	18	20	22	4