

JAERI-M

4 9 7 1

高温ガス冷却炉の実験用制御棒の反応度効果

1972年9月

金子義彦・秋濃藤義・黒川良右

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

高温ガス冷却炉の実験用制御棒の反応度効果

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

金子義彦・秋濃藤義・黒川良右

北館憲二

(1 9 7 2 年 8 月 2 4 日受理)

高温ガス冷却実験炉の予備設計においては二重円環配置の中空円柱形制御棒の使用が決定されている。これらの制御棒は炉の初期の大きな超過反応度を押えると共に、必要な停止余裕を有するものでなければならないことはいうまでもない。そのため制御棒効果に対する核計算の精度を、実験炉の本設計が進められる前に、あらかじめ実証しておくことが要請された。そこで実験炉の設計と核的には同一の特性を有した実験用制御棒の反応度効果を S H E においてパルス中性子法により測定した。実験用制御棒は厚さ 1 mm の薄肉厚アルミニウム円筒に外径 50 mm, 内径 30 mm, グロス密度 $2.029/cm^3$, 長さ約 1150 mm の 10 w/o B₄C 入り加圧成型黒鉛ペレット吸収体を収納したものである。実験用制御棒の S H E 炉心における配置としては実験炉における配置に類似した一重円環配置を主として、制御棒間の相互干渉効果がよく把握しうるよう配慮した 30 ケースが選定された。実験の結果と二群拡散理論による計算値との比較から

- 1) 予備設計炉心の制御棒の全反応度価値は、相互干渉効果を無視した計算を行うと約 10 % 過大評価されることになる。
 - 2) 制御棒の価値は、B₄C 濃度を 10 w/o からさらに大きくすれば、なおある程度増加させることができる。また冷却用ガス流路のため 30 mm の孔をもうけたが、このためによる反応度価値の減少は 5 % 程度にとどまっている。
 - 3) 炉心に偏心して挿入された一本の制御棒の反応度効果の空間変化は、擾動論により予測されるものよりいちじるしく異っていて、反射体中では急激に小さくなる。
 - 4) 多数本配置された制御棒の反応度効果は、制御棒表面における直線外挿距離を半実験的に決定すれば、二群拡散という簡単な計算方法によっても多くの場合 8 % 以内の精度で予測しうる。
- ことが結論された。

Reactivity Worth of the Control Rods for the High-Temperature
Gas Cooled Reactor

Yoshihiko KANEKO, Fujiyoshi AKINO
Ryōsuke KUROKAWA, Kenji KITADATE

Div. of Reactor Engineering, Tokai, JAERI
(Received August 24, 1972)

Befor final design of the experimental, multi-purpose, high-temperature gas cooled reactor, the reactivity worth of the experimental control rods simulating those to be used in the reactor were measured with SHE by the pulsed-neutron method. The "experimental" rod is prepared by inserting the cold-pressed graphite pellets containing 10 w/o of B_4C as powder into a thin aluminum cylinder. Thirty different patterns of the control rods in SHE are selected such that they are similar to those in the reactor. By comparing the measured reactivity worths with the calculated ones based on the two-group diffusion theory, the following are concluded:

- 1) Interference effect between the control rods is fairly large, but very small when the distances among the control rods are larger than $6M^2$ (where M^2 is the migration area).
- 2) Reactivity worth of the control rod is not saturated even at 10 w/o B_4C .
- 3) The reactivity worth of multiple control rods can be calculated with the accuracy of $\pm 8\%$ by the simple two-group diffusion theory if the extrapolated distance at the surface of the control rods is determined by a semi-empirical formula.

目 次 な し

1 序 言

高温ガス実験炉の予備設計⁽¹⁾では、炉心および反射体部に総計32本の制御、安全棒が配置されている。制御棒と安全棒は組になり、互に近接した配置になっており、相互距離は約21cmであってShadowingの現象がある程度、起きると予想される。一般論として、原子炉内に複数ヶ設置された全等価反応度はその相互干渉効果のため、個々の制御棒の等価反応度の単純和とならないことは、これまで各種の原子炉において経験されてきている。一方、これまでのわれわれの基礎的研究から制御棒の反応度効果は、各個々の制御棒周辺での中性子輸送の問題と制御棒間の相互作用により決まるので、両者をかなり分離して考察する解析法が可能であることが判明している。そこで予備設計で採用されたものと核的にはほとんど同一と云つてよい10w/o B₄C入り黒鉛製中空実験用制御棒(密度2.02)を製作し、黒鉛減速の臨界集合体SHEにおいてその反応度効果を測定することが計画され実行された。

制御棒周辺の中性子輸送の問題を解決するために單一本の全長挿入制御棒効果をSHEの炉心中央より反射体にかけて約10点測定する。また制御棒間の相互干渉と云う中性子拡散領域の問題を解決するために多数本同時全長挿入の反応度効果を予備設計炉心に類似した配置について測定すると云う方針で実験データを集積した。その結果を本報告書はまとめている。今後炉心設計コードによる計算値との対比などにより、設計値の確度がかなり明らかになることが期待されている。

測定方法としては、パルス中性子法を採用した。これは特に測定値が制御棒と検出器の相対的位置による依存性のないことが明確であり、かつ大きな反応度の測定には最も信頼できる結果を与えると判断されたからである。

一方、我々はSHEにおいてこれまで黒鉛減速炉心における制御棒効果の系統的研究をつづけてきており、一つの制御棒効果計算のシステムを開発している。そこで、このシステムがどの程度10w/o B₄C入り黒鉛中空実験用制御棒の反応度効果を予測しうるか、実験値との比較からその信頼性を検討し、問題点をさぐり、その解決策を考えることにした。

2 実験

2.1 実験体系

実験を行なった半均質臨界集合体⁽²⁾の炉心構成は炉心番号SHE-8である。黒鉛中に分散した20%濃縮酸化ウラン半均質燃料を使用し、 C/U^{235} 原子数比は2226である。SHEは水平1/2集合体型であり、一辺約120cm高さ240cmの六角柱状の形状をしている。中心部が炉心で直径約58.6cmで周辺は黒鉛反射体となっている。この体系の臨界量は燃料棒数146.4本²³⁵U換算8.69kgであり、高温ガス炉の予備設計炉心の直径110cmと比較するとかなり小型の炉心になっている。

SHE-8炉心の幾何学的寸法をTable 1に、燃料装荷の模様をFig.1に示す。この炉心の炉物理的特徴は、黒鉛炉共通の問題のほかに反射体効果が極めて強いため臨界量が裸炉の場合の約7分の1であること、炉心部から反射体部にかけてかなりはげしい熱および熱中性子スペクトルの空間変化があることおよび反射体部に大きな熱中性子束のピークができるなどである。これらは制御棒効果の決定に強い影響を有しているので核計算の際特に注意を払う必要がある。

2.2 実験用制御棒

実験に使用された実験用制御棒は、高温ガス実験炉の炉心設計に採用されたものと核的にはほとんど同一であって、反応度効果評価用の核計算コードの信頼性がチェックされるよう留意した。Fig.2のようにアルミニウム製外筒部にFig.3のような吸収体ペレットを精密に装填したものである。外筒部は外径53mm、内径51mm、肉厚1mm、長さ1155mmのアルミニウム円筒に固定用の尾がついたものである。吸収体ペレットはFig.3に示すように外径50mm、内径30mm、高さ50mmの中空円筒形のものであり、天然黒鉛粒中にB₄C粒の混合濃度はメーカー側は品川化学に分析依頼し、9.75w/oという数値を原研側は分析センターにて分析し、10.26w/oと云う数値を得ている。この数値は仕様の10.0w/oの上下にはらついているがサンプルをことなる吸収ペレットの一部から数グラム切出しているためであって平均的には、10.0w/oになっていることは、吸収ペレットの製造工程から考えて確かであろう。B₄C粒は、電気化学工業製のものであって、粒度100~200メッシュ、全ホウ素量78.6%，全炭素量20.8%，鉄分0.06%のものである。製作した実験用制御棒総数は16本であった。

2.3 制御棒の反応度効果の表示

制御棒効果を測定する方法は、よく知られているようにパルス法、ペリオド法、バックリンク法および逆増倍法などがある。制御棒の反応度効果が小さい場合は、ペリオド法が最も信頼できるが、その値がドル単位で扱うほど大きい今回の実験では、パルス中性子法が最も信頼がおけるのは云うまでもない。

こゝでは、まず制御棒効果の表示に関連してパルス法で測定される即発中性子崩壊定数 α と炉の反応度の関係について少し述べてみることにする。

実験で測定される即発中性子崩壊定数 α と炉の反応度 ρ_s の関係はよく知られているように、逆時間方程式により与えられる。つまり、

$$\rho_s = \frac{-\alpha \ell}{k_{\text{eff}}} - \sum_{i=1}^6 \frac{\alpha \beta_{i\text{eff}}}{\lambda_i - \alpha} \quad (1)$$

ここに、

k_{eff} : 実効倍率

ℓ : 中性子寿命

$\beta_{i\text{eff}}$: i 群の遅発中性子分率

λ_i : i 群の遅発中性子先行核の崩壊定数

であって、これから動特性パラメータは、中性子束としては、即発中性子崩壊モードを、重み関数としては静的共役中性子束を使って求めたものとしておく。つまりこの約束によって実効倍率は静的実効倍率となることが、保証されるからである。⁽³⁾

式(1)の両辺を β_{eff} で割って、

$$\frac{\rho_s}{\beta_{\text{eff}}} = \frac{\ell}{\beta_{\text{eff}} \cdot k_{\text{eff}}} \cdot (-\alpha) - \frac{1}{\beta_{\text{eff}}} \sum_{i=1}^6 \frac{\alpha \beta_{i\text{eff}}}{\lambda_i - \alpha}$$

原子炉が臨界にあるときには $\rho_s = 0$ であるから、そのときの動特性パラメータには 0 という添字をつけて

$$0 = \frac{\ell_c (-\alpha_c)}{\beta_{\text{eff}c}} - \frac{1}{\beta_{\text{eff}c}} \sum_{i=1}^6 \frac{\alpha_c \beta_{i\text{eff}c}}{\lambda_i - \alpha_c} \quad (2)$$

式(1) - 式(2)は

$$\frac{-\rho_s}{\beta_{\text{eff}}} = \frac{1}{\beta_{\text{eff}c}} (\alpha - \alpha_c) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{1}{\frac{\beta_{\text{eff}} k_{\text{eff}}}{\ell}} - \frac{1}{\frac{\beta_{\text{eff}c}}{\ell_c}} \right) \alpha \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{\beta_{\text{eff}}} \sum_{i=1}^6 \frac{\alpha \beta_{i\text{eff}f}}{\lambda_i - \alpha} - \frac{1}{\beta_{\text{eff}c}} \sum_{i=1}^6 \frac{\alpha_c \beta_{i\text{eff}c}}{\lambda_i - \alpha_c} \quad (5)$$

$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$ と云う近似の範囲で、

$$\frac{-\rho_s}{\beta_{\text{eff}}} = \frac{1}{\beta_{\text{eff}c}} (\alpha - \alpha_c) \quad (6)$$

と云ういわゆる Simon-king の式⁽⁴⁾が成立する。 β_{eff} は臨界未満度によっては、ほとんど変わらない量であるが、 $\frac{k_{\text{eff}}}{\ell}$ と云う量はある程度変るので式(6)によって α と ρ_s を結びつけられるのは、一応 10% 程度、つまり $k_{\text{eff}} = 0.93$ くらいまでであると云われている。それ以上大きな負の反応度について式(6)を使う場合には、式(4)(5)のよう $\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$ と云う補正量を核計算により求めなければならず、その信頼度も問題になる。そのため、 α の増分自体を臨界未

満度の尺度として当面考え、核計算コードによる制御棒効果の評価の精度を検討するのがのぞましいと考え、実験値の整理にあたり、式(6)のドル単位の反応度と α の増分 $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_c$ の両方を併記することにした。

反応度効果の表示*

$$\text{ドル単位の反応度} \equiv -\rho_s / \beta_{\text{eff}} \div \frac{\alpha - \alpha_c}{\beta_{\text{eff}} c / l_c} \quad (7)$$

$$\Delta\alpha \equiv \alpha - \alpha_c \quad (8)$$

(7)式で与えられるドル単位の反応度と静的反応度(Static reactivity)の数値的な差異の程度は、炉心構造や制御棒配置などにより変ってくるので、一般論として簡単な式で評価することはむずかしい。一応の議論を附録にのせたので参考されたい。

$\Delta\alpha$ および(6)式で表示される制御棒効果の数値は一般に臨界に近い系において測定した方がいくらか大きくなることが実験的経験的に判明している。実際の実験では臨界本数から6本引きぬいた140本の炉心を基準炉心としてそこからの制御棒効果を測定している。そこで理論計算値との対比が便利なように、臨界状態を標準状態とする補正されたドル単位の反応度と $\Delta\alpha$ の値を併記してまとめると云う方針をとった。

2.4 制御棒の配置

各パターンの制御棒配置の様子をTable.2 および Fig.4 にまとめた。まず制御棒が入る前の基準状態として、臨界から6本燃料を引きぬいた140本の炉心を選びパターン1で α を測定するようにした。制御棒周辺の中性子輸送が正しく設計コードで記述されているかを検討する基本的な問題に対して、一次元の詳細解析が可能な單一本の制御棒が炉心軸に貫通した配置としてパターン2を考えた。制御棒間の相互干渉と云う中性子拡散領域の問題を検討するための基本的な制御棒配置として同一円環上に1本(パターン3, 4, 5, 6および7), 2本(パターン8, 9, 10, 11および12), 3本(パターン13, 14, 15および16)および6本(パターン18, 19, 20および21)が配置されているパターンを用意した。さらにそれらの円環配置に炉心中央に1本の制御棒が加った場合について、6本の円環配置を代表に選びパターン22, 23, 24および25を考えた。

次に予備設計では、後備停止装置として硼素鋼球の落下用Channelが制御・安全棒に隣接してもうけてある。これを模擬するため3本1組の制御棒群同志の影響をみるためにパターン26と27を考えた。以上のCaseの他、予備設計では炉心部と反射体部に同時に多数の制御・安全棒が配置されているので、この様子を模擬する目的でパターン28, 29および30が用意された。

2.5 実験装置

200kVコックロフト形パルス中性子発生装置を用いて、炉心二分割面で炉心部に隣接した反射体領域の(MC9)の位置にあるトリチウムターゲットをパルス巾100μS, くりかえし周

波数 $0.1 \sim 10$ pps の重水素イオンビームで衝撃し、パルス当たり約 10^6 箇の 14MeV パルス中性子を発生させた。1 ケース当たりのパルス中性子打込み回数は $10^3 \sim 10^4$ で所要時間約 20 分であった。パルス中性子の投入によって起る中性子密度の生成消滅の時間変化を、理論的に最も純粹に即発中性子基本モードを観測できる位置 (MB4 でかつ 30cm 炉心中央面より引込んだところ) に $1''$ 直径の BF₃ カウンター (日立 EB-125) を置き検出した。検出された中性子パルスは、増巾され弁別されその時間分布が TMC 256 チャンネル時間分析器により測定された。測定系のプロック図を Fig.5 に示す。測定系の分解時間はダブルパルス発生器を使い約 $3\mu\text{s}$ と測定されたが、この実験のように、計数率の大きな変化が短時間に起る場合には、不確定の要素もあるのでパルス中性子打込み後約 20ms 経過した後約 10^4cps 以下になるようにパルス中性子発生量を調整した。

2.6 データ処理

一例として Fig.6 に示すような時間分析器に記録された中性子密度の生成、消滅のデータから基本モードの即発中性子崩壊定数 α を導き出すには、空間高調波成分の除去、バックグラウンドの決定および計数損失補正をおこなう必要がある。基本モードの即発中性子崩壊が十分純粹に観測できるまでの待ち時間は一般には、炉形式、パルス中性子投入位置と検出器位置等の状況で定まってくる。本実験では、種々の待ち時間をとった場合の最小自乗法による α の最確値の飽和の状態を調べ、時間分析のデータを次の条件のもとに最小自乗法により処理して、 α および標準偏差を IBM 7044 を使い算出した。

1) あてはめ関数

$$\text{Const. } e^{-\alpha t} + \text{Const.} \quad (9)$$

2) 待ち時間

約 20ms

3) 重み関数は、チャンネルの計数値の逆数をとること。

各実験ケースについて、飽和値を α として決定した。この様子の一例を Fig.7 にまとめてみた。

α の測定誤差としては、計数統計によるランダム誤差のほかに、遅発中性子モードの減衰や測定系の分解時間のあいまいさなどに原因する系統誤差があり、多くの場合、後者は 1% 前後になると考えられている。ランダム誤差は最小自乗法によるデータのあてはめの過程ではつきり求められてくる量で今回の実験ではたいがいの Case で 0.5% 程度になった。個々の α の誤差をはっきりきめるのは系統誤差の評価を厳密に行なう必要があるが、それを行なう時間的余裕がないので、一応全実験ケースについて α の測定誤差を一律に 1% とした。ランダム誤差が 1% を越える 1, 2 の場合については例外的にその値を測定誤差とした。

3 実験結果

パルス中性子の打込みに後続する中性子束の減衰の様子の一例を Fig.6 に示した。各実験番号についてバックグラウンドがことなるのは、主として、臨界に近いほど遅発中性子のモードの相対振幅が大きくなることに原因している。実験結果のまとめとして、各パターンにおける制御棒効果を Table.3 にまとめた。同一のパターン 1 の基準状態の実験番号 3 と 33 で α の値が少しことなっているのは、制御棒の挿入作業の過程で燃料棒の end plug をはずしていたため、微少ではあるが、反射体効果が減少して実験番号 33 では、やゝ α の値が大きくなつたためと考えられる。それで制御棒効果の算定に際しては、この変化を考慮して実験番号が増加するにつれ、 linear in α が増加したものとした。

(1) 中心制御棒効果

炉心中心軸に貫通して挿入された制御棒の効果は、 Table.3 のパターン 2 のところに示されているように、

$$\text{中心制御棒効果} = 9.38 \pm 0.40 \text{ ドル}$$

である。一方、今回の実験用制御棒と構造が比較的似ている制御棒の効果がすでにこれまで測定されているので比較検討してみる。

J A E R I - 1173 「黒鉛減速炉心における系統的制御棒効果の実験」には、制御棒効果を決定する主因子として、1) 炉心燃料濃度、2) 中性子吸収材の核種および濃度、3) 中性子吸収材の形状寸法、4) 相互干渉を選びこれらを系統的に変えた 300 ケース以上の実験データの集積が報告されている。

まず、制御棒吸収体の B_4C 含有量と制御棒効果の関係は、 J A E R I - 1173⁽⁵⁾ の Fig.8 本報告書でも Fig.8 に示されている。制御棒挿入位置によりかなり様子がちがうが、炉心中央 (図中 S, N) では、 SHE-8 に関するかぎり、 B_4C 含有量の対数に制御棒効果が比例するといつてよい。図中に示されるように、直径 4.2 mm B_4C 含有量約 0.2 g/cm の円柱形制御棒については、

$$\text{中心制御棒効果 (円柱, } 4.2 \text{ mm }) = 8.35 \pm 0.43 \text{ ドル}$$

直径と制御棒効果の関係は J A E R I - 1173 の Fig.12 に (本報告では Fig.9) に示されているように、やや飽和の特性が、 3.72 mm から 4.72 mm の直径の変化の附近について推察される。と云うのは図中 B_4C 含有量 0.053 ~ 0.057 g/cm の場合は、その直径の増加に伴う制御棒効果の増分は、直径の増加分 2.6.8 % にはほぼ等しい 2.5.2 % なのに対し、 B_4C 含有量 1.23 ~ 1.42 g/cm の場合は 1.5.2 % 増にとどまるから、両者の中間の B_4C 含有量 0.2 g/cm の今回の制御棒については、制御棒効果の増分も両者の平均の 2.0 % 程度と考えるのが妥当であろう。したがって 4.2 mm 直径の円柱形制御棒効果を 5.0 mm に外挿すると、直径の増分に比例せずやや少なめになると考えられる。つまり

$$\text{中心制御棒効果 (円柱 } 5.0 \text{ mm }) = 9.78 \pm 0.50 \text{ ドル}$$

と推定される。

したがって、 5.0 mm の直径の円柱の中心に 3.0 mm の冷却孔をもうけても制御棒効果は約 5

%減少するにすぎないことがわかる。

つぎに、制御棒効果を増加させたい場合は、飽和の傾向がある程度あるとはいえる B_4C 含有量を 10 w/o より増すことはなお有効と考えられる。制御棒が反射体中にあるときは、別としても、炉心にあれば、10 w/o より 25 w/o に増加させれば、予備設計に近い燃料濃度の SHE-5 炉心では、約 9 % の制御棒効果の増加が期待しうることが、Fig.8 より推定しうる。これは熱中性子に対する吸収の度合を示す Blackness factor は飽和していても熱外中性子吸収は B_4C 含有量の増加にしたがいなお増加しつづけるからである。

(2) 偏心制御棒効果

Fig.10 に單一本の制御棒が炉心軸に偏心して挿入された場合の制御棒効果の測定結果が示されている。中心から離れるにしたがい制御棒効果は減少する。炉心部にあるときは少しづつ減少していた効果も、炉心外に出ると急激に減少していくことが特徴である。flux-importance の積の関数は炉心内ではほぼ一定で、反射体境界で増加し始め、反射体部で最高値に達した後減少する。微少な吸収体の効果はこのパターンによりその空間変化が記述されることは摂動論より明らかである。また直徑が細い灰色制御棒では実際に経験していることであり、直徑が 20 mm B_4C 含有量が 0.01 ~ 0.02 g/cm の程度でも傾向は似ている (Fig.8 参照)。しかし直徑 50 mm 程度では近似値としても、flux-importance の積で空間変化をきめるのは慎重であることが要求される。一般には反射部の制御棒の効果は、flux-importance の積により推定されるものより、ずっと低いものになることが、Fig.10 より結論される。

(3) 多数本制御棒効果

円環配置のパターンについて、制御棒間の距離と制御棒効果の関係を Fig.10 に示した。2 本、3 本および 6 本と制御棒本数が増加していくと全効果の最高値は炉心中央よりだんだん離れたところで記録されるようになることがわかる。これは制御棒間の相互干渉現象のためであって、炉設計にあたっては十分な精度で推定することが要求される。

Fig.11 に S の制御棒本数、制御棒間距離に対する依存の様子を示してみた。さらにこのデータの信頼性を評価するために、制御棒間の相互干渉の程度を示す量として interference factor S が定義されている。

$$S = \frac{\text{多数本の制御棒の効果}}{\text{単独に挿入された場合の個々の制御棒の効果の総和}} \quad (10)$$

定義から明かのように S が 1 より大きいときは、antishadowing. S が 1 より小のときは Shadowing を表わしている。

相互干渉現象の制御棒の B_4C 含有量および燃料濃度に対する影響を調べるために、Fig.12 と 13 および 14 を用意した。Fig.12 は B_4C 約 1.0 g/cm 充填直徑 4.37 mm (名称 $B_4C - S 8$)、Fig.13 は直徑 20 mm B_4C 含有量約 0.2 g/cm (名称 G R A Y - 204) の制御棒に関する実験データで、JAERI-1173 に報告しているものである。Fig.11, 12 および 13 の比較から次のようなことが云える。

- 1) Shadowing より Antishadowing に転んずる制御棒間距離は、三種類の制御棒について、共通して 2 本および 3 本円環に対しては 50 ± 12 cm, 6 本円環に対しては、

40 ± 10 cm の範囲にある。

2) Shadowing, antishadowing の程度は, B₄C 含有量が多いほど, 制御棒直径が大きいほど強い。

3) 以上の状況は, 上記燃料濃度の変化範囲では炉心燃料濃度にほとんど依存しないことが Fig.12 の SHE-5 と SHE-8 における実験結果からうかがえる。

このことは黒鉛炉の場合減速距離が拡散距離よりかなり大きい場合について限定されるであろう。しかし平均の移動距離が SHE-5, 8 でほとんど共通に 62.7 cm (= 6 M²) であり, この距離をこえると制御棒間の Shadowing 現象はほぼ完全に消失することは注意するに値しよう。

予備設計では制御棒・安全棒ペアの相互距離は 21 cm であるので, SHE-8 との炉心のちがいを考慮しなければ, Fig.10 に示すように, S = 0.85 となり, 約 15% 効果は減少することになる。またボロン鋼球の Channel 1 の効果も相互干渉効果により S = 0.7 となるが, 一応の効果は期待できそうである。

予備設計においても採用されているように, 実際の炉の制御棒の配置は, 互に等距離になるようにはばらまくのが普通であって, 中心に制御棒が加った 2 重円環配置をとる場合が多い。制御棒の本数も 16 本と限定されているので, それらの状況を実現する目的で 6 本円環配置の中央に 1 本の制御棒が加ったパターンについて実験を行なった。この配置とすでに述べた中央に制御棒がない円環配置の場合との比較を Table.4 にまとめた。

最近接制御棒間距離が 58.5 cm と 71.5 cm の場合は, 両配置について, S でほとんど同じなので相互干渉の度合は, 中心の制御棒の追加によっては変化はない。円環が小さくなつた制御棒間距離 32.5 cm 以下では中心に制御棒があると S が小さくなり Shadowing 現象がより強く表われることが示されている。予備設計では, 制御・安全棒のペアとペア同志の距離は, 約 90 cm である。Fig.11 より, 相互干渉現象は, 弱い antishadowing の状態にあると推定され, S = 1.05 程度になっているのではないかと思われる。

この 3. の実験結果の章は実験の生データについてはくわしく述べていない。各パターンにおける中性子密度の減衰曲線, あてはめ開始時間に対する最小自乗法による α の決定値の変化策については, 実験内容を詳細に記録した JAERI-memo 4834 「高温ガス冷却炉の実験用制御棒効果の測定」を参照すると有効である。

4 理 論 的 解 析

4.1 計 算 方 法

SHEではこれまで黒鉛減速炉心における制御棒効果の系統的な研究をつづけてきて、制御棒効果計算のシステムをほぼ完成している。このシステムの考えは、制御棒の反応度効果は、各個々の制御棒周辺での中性子輸送の問題と制御棒間の相互作用によってきまつてくるので、両者をかなり分離して考察することができるということで、それぞれの分担に応じた適切な精度と汎用性をもたせたいいくつかのブロックからシステムは構成されている。その内容を Fig. 14 にまとめた。このシステムの有効性は、炉心燃料濃度、制御棒の太さ、吸収材濃度等について系統的な実験値との対比から実証されていて、今回の高温ガス炉の 10 w/o B, C 入り中空円筒制御棒に対してもほぼ適応できるという見通しをもつてるのでこのシステムを使うことにした。システムの簡単な説明を行なうことにしておこう。Fig. 14 中、[A], [D] のブロックは JAERI レポート 1173 に詳述されているように、一本および多数本の種々の材質、形状をした制御棒の種々の燃料濃度の炉心における効果の実験値を集積したもので、その実験ケースの数は 300 以上にわたっている。[B] のブロックは、可能な限り精度よく、炉心中心に全長挿入された制御棒の反応度効果を理論的に求める仕事であって、多群 SN 計算が主に標準的な方法としては、熱中性子一群速中性子 8 群・S₄ 近似でほとんどの体となっている。標準的な方法としては、熱中性子一群速中性子 8 群・S₄ 近似でほとんどの制御棒の反応度効果を 5 % 以内で予測しうることがわかっている。[C] のブロックは炉心全領域にわたる 2 群拡散計算の入力となる制御棒表面の直線挿外距離の決定に関するもので、つきの criteria を結論している。つまり熱中性子群の λ_2 については、良く知られた Davison-Kushneriuk の式によって、制御棒の black, gray の程度に応じて挿外距離 λ_2 を定める。速中性子群の挿外距離 λ_1 に対しては、各々の制御棒に対して炉心中央に全長挿入された場合にその反応度効果の実測値と計算値（2 群拡散計算）が一致するように定めるという半実験的な方法を採用している点に特徴がある。

速中性子群の制御棒挿外距離 λ_1 の決定条件

$\Delta \alpha$ の実測値 = $\Delta \alpha$ の計算値 (10)

このような半実験式を導入した理由は、さきに述べたように制御棒周辺の中性子輸送の問題と互に離れた制御棒間の相互干渉という中性子拡散の問題に分離して解析するという方針から、前者の問題で最も決定が困難な速中性子群の挿外距離 λ_1 という量を実験値を使って決めてしまえば、後は拡散領域の問題が残されるだけで、後者は幾何学的な複雑さを除くと見通しが極めてよいからである。ブロック E の炉心全領域を二群拡散で解く計算には、Nordheim-Scaletlar 法⁽⁶⁾による計算コード C R O D E R⁽⁷⁾ がくみこまれている。このコードは円筒形炉心にあるいはそれをとりまく反射体のいずれかに同時に挿入された多数本制御棒の反応度効果を計算することができる。制御棒が円柱でありさえすればよく、本数、挿入位置、挿入長に対して制限は少い。反応度効果は静的反応度あるいは即発中性子減衰定数 α のどちらかの形で

計算しうる。後者の場合について説明してみよう。

中性子バランスの方程式

炉心において

$$D_{1c} \nabla^2 \phi_{1c} - (\Sigma_{1c} + \Sigma'_{1c}) \phi_{1c} + \frac{k}{p} (1 - \beta_{eff}) \Sigma_{2c} \phi_{2c} = -\frac{\alpha}{V_{1c}} \phi_{1c} \quad (11)$$

$$D_{2c} \nabla^2 \phi_{2c} - \Sigma_{2c} \phi_{2c} + p \Sigma_{1c} \phi_{1c} = -\frac{\alpha}{V_{2c}} \phi_{2c} \quad (12)$$

反射体中にいて

$$D_{1r} \nabla^2 \phi_{1r} - \Sigma_{1r} \phi_{1r} - \Sigma'_{1r} \phi_{1r} = -\frac{\alpha}{V_{1r}} \phi_{1r} \quad (13)$$

$$D_{2r} \nabla^2 \phi_{2r} - \Sigma_{2r} \phi_{2r} + \Sigma_{1r} \phi_{1r} = -\frac{\alpha}{V_{2r}} \phi_{2r} \quad (14)$$

境界条件

炉心反射体境界において

$$D_{1c} \text{ grad}_n \phi_{1c} = D_{1r} \text{ grad}_n \phi_{1r} \quad (15)$$

$$D_{2c} \text{ grad}_n \phi_{2c} = D_{2r} \text{ grad}_n \phi_{2r} \quad (16)$$

反射体の挿外表面において

$$\phi_{1r} = 0 \quad (17)$$

$$\phi_{2r} = 0 \quad (18)$$

制御棒表面の対数微分条件

$$\left. \frac{\partial \phi_1}{\partial \rho} \right|_{\text{rod surface}} = \frac{1}{\lambda_1} \phi_1 \quad (19)$$

$$\left. \frac{\partial \phi_2}{\partial \rho} \right|_{\text{rod surface}} = \frac{1}{\lambda_2} \phi_2 \quad (20)$$

ここに、

ϕ_{1r}, ϕ_{1c} : 炉心および反射体中における高速中性子束

ϕ_{2c}, ϕ_{2r} : 炉心および反射体中における熱中性子束

Σ_{1c}, Σ_{1r} : 炉心および反射体中における高速中性子除去断面積

$\Sigma'_{1c}, \Sigma'_{1r}$: 炉心および反射体中における高速中性子吸収断面積

Σ_{2c}, Σ_{2r} : 炉心および反射体中における熱中性子吸収断面積

D_{1c}, D_{1r} : 炉心および反射体中における高速中性子拡散係数

D_{2c}, D_{2r} : 炉心および反射体中における熱中性子拡散係数

V_{1c}, V_{1r} : 炉心および反射体中における高速中性子速度

V_{2c}, V_{2r} : 炉心および反射体中における熱中性子速度

β_{eff} : 実効遅発中性子分率

また中途挿入の場合の制御棒表面の境界条件は Ligou の導入したものと同じく、制御棒挿入位置まで式(19, 20)を適用することとし、そこからさきは式(19 および 20)の右辺は零とした。式(11)より式(20)は Nordheim-Scalettar 法によって解かれるが、解法は JAERI-memo 4351⁽⁷⁾に詳説されているのでここでは省略する。要点は式(19)および(20)の制御棒表面の対数微分条件が、制御棒を中心とする座標系で表現されているのを、他の式のように炉心軸を中心とする座標で調和展開して、固有値問題に帰着させているところにある。

解析の対象となったのは、実験ケースの中でも同一円環上に 1 本(パターン 3, 4, 5, 6 および 7), 2 本(パターン 8, 9, 10, 11 および 12), 3 本(パターン 13, 14, 15 および 16) および 6 本(パターン 18, 19, 20 および 21) が配置されている 18 このパターンである。これは二群拡散計算コード CRODER が、炉心と反射体の両方に同時に制御棒が挿入された場合については取扱うことができていないためで今後の CRODER の整備が進行するにしたがい二重円環等の制御棒配置に対してもその反応度効果を計算できるようになるはずである。

4.2 群定数

拡散計算に使用された熱中性子群定数は炉心における熱中性子化の空間依存性を考慮し、 Young-Koppel の散乱則 (ENDF/A) を使って求められた。このために、計算コード PIXSE⁽⁸⁾ および TUD⁽⁹⁾ が使用されたが、制御棒の挿入によるその近傍の熱中性子スペクトルの変化は無視された。というのは Lu/Mn 比の制御棒近傍における測定から⁽¹⁰⁾、 中性子温度にして約 50°C 以内のスペクトル変化にすぎないことがわかったからであって、反応度効果に及ぼす影響は 1% 程度にすぎないとと思われる。また Lu/Mn 比の炉心部中央における計算値は 2.08 で実測値の 2.10 ± 0.03 とよく一致しており、計算に使用した熱中性子散乱則や群定数が適正であることがわかる。一方速中性子群定数は、 GAM データライブラリのミクロの断面積から計算コード FAXSE-TUD を使って求められた。ここでも中性子減速の空間依存性が考慮された。²³⁵U と ²³⁸U の共鳴積分は RICM によって計算された。制御棒表面の挿外距離は、 4.1 cm のべたように熱中性子群に対しては Davison-Kushnerink の式から、 また速中性子群に対しては式(10)の半実験的方法によって決定した。計算に使用した群定数等の値の全部を以下に一括してまとめた。

(1) 実験体系

SHE-8 (C/²³⁵U = 2226)

炉心領域 原子箇数密度

$$N^{235} = 0.3599 \times 10^{20} \text{ ケ}/\text{cm}^3$$

$$N^{238} = 0.1435 \times 10^{21} \text{ ケ}/\text{cm}^3$$

$$N^C = 0.802 \times 10^{23} \text{ ケ}/\text{cm}^3$$

反射体領域 原子箇数密度

$$N^C = 0.7741 \times 10^{23} \text{ ケ}/\text{cm}^3$$

等価臨界半径 $r = 29.28 \text{ cm}$

(燃料棒 147 本に相当)

遅発臨界即発中性子減衰定数 $\alpha_c = 6.9 \text{ sec}^{-1}$

(2) 群 定 数

熱中性子群定数は $0 \sim 0.683 \text{ eV}$, 30 群より中性子スペクトル平均で求めた。高速中性子群定数も同様に 0.683 eV より 10 MeV , 66 群の GAM data library より中性子スペクトル平均で求めた。

$$D_{1c} = 1.2026$$

$$D_{1r} = 1.1208$$

$$D_{2c} = 0.82205$$

$$D_{2r} = 0.84770$$

$$\Sigma_{1c} = 0.23856 \times 10^{-2}$$

$$\Sigma_{1r} = 0.42670 \times 10^{-2}$$

$$\Sigma_{2c} = 0.15394 \times 10^{-1}$$

$$\Sigma_{2r} = 0.31119 \times 10^{-3}$$

$$1/V_{1c} = 0.10602 \times 10^{-6}$$

$$1/V_{1r} = 0.10602 \times 10^{-6}$$

$$1/V_{2c} = 0.29049 \times 10^{-5}$$

$$1/V_{2r} = 0.44355 \times 10^{-5}$$

$$P = 0.834591$$

$$K_\infty = 1.5784$$

$$H = 240 \text{ cm} \quad (\text{炉心高さ})$$

$$R = 129.2 \text{ cm} \quad (\text{全炉心半径})$$

$$r = 29.28 \text{ cm} \quad (\text{炉心半径})$$

$$\beta_{\text{eff}} = 0.00684$$

(3) 実験用制御棒

外径 50 mm, 内径 30 mm, 中空円筒状

黒鉛粒に B_4C 粒を混合し加圧成形したもの

密度 2.02 g/cm^3

B_4C 濃度 10 w/o

原子箇数密度

$$N^B = 0.8819 \times 10^{22} \text{ 個}/\text{cm}^3$$

$$N^C = 0.9337 \times 10^{23} \text{ 個}/\text{cm}^3$$

(4) 実験用制御棒の直線外挿距離

Davison-Kushneriuk の直線外挿距離の式は円柱形の制御棒について求められたものであり, 今問題にしている中空円筒形に対してはそのまま適用するわけにいかない。そこでまず B_4C 密度としては実際の $0.8819 \times 10^{22} \text{ 個}/\text{cm}^3$ ではなく, 平均して中空部分をうずめ円柱にしたときの $0.5644 \times 10^{22} \text{ 個}/\text{cm}^3$ を採用することにした。

つまり

$$\text{平均化した } B_4C \text{ 箇数密度} = 0.5644 \times 10^{22} \text{ 個}/\text{cm}^3$$

また, 硼素の吸収断面積は $0 \sim 0.683 \text{ eV}$ の 30 群の TUD の出力で与えられた炉心の中心における熱中性子スペクトルによる平均を行なったもので,

$$B \text{ の吸収断面積} = 4.05 \text{ パーン}$$

したがって制御棒の吸収断面積は

$$\text{制御棒の吸収断面積 } \Sigma_{a^2} = 4.05 \times 0.5644 \times 10^{-2} \\ = 2.286 \text{ cm}^{-1}$$

直線挿外距離を与える Davison-Kushneriuk の式は

$$\lambda(\text{black}) = \lambda_{\text{tr}} \left[4/3 + \left(\left(1 - \frac{16}{3\pi^2} \right) \ln \frac{a}{\lambda_{\text{tr}}} - 0.2164 \right) \frac{a}{\lambda_{\text{tr}}} \right] \quad (21)$$

$$\lambda(\text{gray}) = \lambda_{\text{tr}} \left[4/3 \left(\frac{1}{2a\Sigma_a(1-P_c(a\Sigma_a))} - 1 \right) + \frac{\lambda(\text{black})}{\lambda_{\text{tr}}} \right] \quad (22)$$

$\lambda(\text{black})$ の式は $a < \lambda_{\text{tr}}$ の場合にあてはまる式である。ところが $a = 2.5 \text{ cm}$ $\lambda_{\text{tr}} = 2.466 \text{ cm}$ と $a \sim \lambda_{\text{tr}}$ であるので、式(21)を使用せず、Davison と Kushneriuk の $a < \lambda_{\text{tr}}$ やび $a > \lambda_{\text{tr}}$ の場合の直線外挿距離の計算結果をまとめた TPI-45 の⁽¹⁾ "Probable shape of dependence for a cylinder of finite radius" の図より読みとったものを $\lambda(\text{black})$ として採用した。

$$\lambda(\text{black}) = 2.3107 \text{ cm}$$

微少ではあるが制御棒の gray の度合を加味するために式(22)を使って

$$\lambda(\text{gray}) = 2.3307 \text{ cm}$$

を熱中性子群直線外挿距離として使うことにした。

$$\lambda_2 = 2.3307 \text{ cm}^{-1}$$

$\lambda(\text{black})$ と $\lambda(\text{gray})$ の差異は 1% 程度であつて、実際は $\lambda(\text{black})$ を使用してもよいことがわかる。

一方、速中性子群に対する直線外挿距離は 4.1 の式(10)で半実験的に定めた。

$$\lambda_1 = 1.252 \text{ cm}$$

また、式(10)の右辺の計算値の方には α_c の計算値が必要になるが、これは上記群定数による計算値

$$\alpha_c = 6.0311 \quad (\text{sec}^{-1})$$

を用いた。

4.3 計算結果

さきにのべたように制御棒が同一円環上に配置されている 18 ヶのパターンについて計算を行なった。CRODER の調和関数展開に使った高周波の項数は半径回転角方向については、1, 2, 3 本挿入の場合 10 項、6 本挿入の場合は 5 項であった。項数がこの程度で十分であることは Amano 等⁽¹²⁾ によって調べられている。

以上の計算結果を実験値と共に、Table 3 および Fig. 10 と 11 に示した。

5 討論

Table 3 および Fig.10 と Fig.11 から明らかのように、制御棒が炉心およびその周辺に挿入された場合については、実験と計算の一致はかなり良く、両者の差異は、炉心中で各パターンについて 7 %以内、炉心周辺（中心から 4.0 cm 以内）でも 10 %以内にとどまっている。このことは、我々の Fig.14 に示した計算システムが、中性子インポータンスの高い炉心領域では、かなり精度よく global を中性子束分布を記述する能力をもっていることに原因しているものと考えられる。速中性子群に対する制御棒表面の直線挿外距離 λ_1 を半実験的に式(10)で決定しているのが、このシステムの特徴であるが、この方式によって炉心、およびその周辺の多数本制御棒配置の問題が極めて簡単な 2 群拡散近似というモデルによってかなり精度よく解かれている点は興味深い。

制御棒が炉心から離れた反射体中に挿入された場合は、このシステムはあまり良く実験値を説明することが出来ない、15から35 %も過大評価するようになる。それでも炉心-反射体境界から 20 cm 以内にあれば実験値との差異は 1.5 %以内にとどまるものと考えられる。実験炉の予備設計では炉心-反射体境界から 50 cm 程度のところまで制御棒が配置されているので、今後の問題として、このように反射体中でそれも炉心から遠く離れた場所で中性子インポータンスも低下している場所における制御棒の反応度効果を精度よく推定する方策も考えねばならない。だが、このシステムのように 2 群という簡単な近似では、制御棒が入る前からすでに反射体中の中性子束分布の記述精度はそれほど良いとは考えられないで、群数を上げることも考慮せねばならず、システムの複雑化につながり、種々の利点が失なわれるおそれがあるので慎重に検討する必要がある。このシステムをそのまま使って反射体中に挿入された制御棒の反応度効果をより良く推定するには、やはり式(10)の半実験的方法を拡張すれば容易である。つまりこれまで、炉心中央に一本の制御棒が全長挿入されたパターンについて、実験と理論が一致するように速中性子挿外距離 λ_1 を決め、この値を他の場所に制御棒が入った場合にも使用して来た。これを拡張して、一本の制御棒を炉心中央から偏心させてその反応度効果の空間依存を調べ、その各場所ごとに実験と理論が一致するように速中性子挿外距離 λ_1 を空間に依存した形で定めるという方式をとるようシス템を改良したらどの程度反射体多数本制御棒効果の実験・理論の一致が改善されるか試してみた。制御棒位置は炉心中央より 3.25 cm の反射体領域を考えた。決定された速中性子挿外距離 λ_1 は

$$\lambda_1 (3.25 \text{ cm}) = 8.2590 \text{ cm}$$

この λ_1 をつかって 2, 3 および 6 本の円環配置の多数本制御棒効果を計算した結果を Fig.11 に添示した。この図から明らかのように、2 本および 3 本円環については実験と計算の一一致は非常によく改善され両者はほとんど一致した。また 6 本円環に対しては両者の相違は半分くらい減少し約 4 %になった。この λ_1 の空間依存性を考慮する提案はかなり有効に反射体中の制御棒効果を計算するのに使用できることがわかる。

これまでの議論から我々のシステムが高温ガス炉の制御棒効果の計算にかなり適切なものに手をおしによつてなりうることも示していると推論される。しかし今回の解析のように式(10)

により半実験的に速中性子群制御棒挿外距離 λ_1 を決定するという方式は、実験値が得られていない今後建設される炉に対してはそのままでは、適用できないのは当然である。そこでシステムのブロック[B]の炉中心の單一本制御棒反応度効果の精密計算をより充実させ、精度の高い計算値を実験値のかわりに式(10)の左辺に使って、 λ_1 を決定するという方式をとることにすればよい。現在のところ SHE 体系については、熱中性子一群、速中性子 8 群の S₄ 近似で 5 % 以内の精度で実験値を説明しうることがわかっている。実験炉の炉心でも炉を中心とした幾何学的対象の強い位置なので計算精度を上げることは比較的容易である、と考えられる。

6 結 論

高温ガス実験炉の予備設計では炉心および反射体部に総計32本の制御安全棒が配置されている。このうち制御棒と安全棒は互に組になり、相互距離は21cmとかなり短いのでshadowingの現象が起るものと予想された。また制御棒、安全棒の組同志の距離は、約90cmであるが、この組同志の間にも相互干渉効果がある程度あるものと考えられた。そこで設計計算の信頼性を検討すると共にその改良をめざして、実験炉の制御棒と核的にはほとんど同一といつてよい10w/o B₄C入り黒鉛製中空実験用制御棒を製作し、黒鉛減速の臨界集合体SHEにおいて、その反応度効果をパルス中性子法により測定することが計画され実行された。

約30このパターンの制御棒配置について実験値が集積されると共に、2群拡散近似を基礎とする計算システムにより解析された。その結果次のことが結論された。

(1) 中心制御棒効果は9.38±0.40ドルである。50mmの直径の円柱の中心に30mmφの冷却孔があるため、中実円柱に比較して制御棒効果は約5%少くなっていることが、これまでの種々の制御棒効果の実験値の集積結果との比較から推定される。つぎに制御棒効果を増加させるには、もちろん、直径を増すのが全く有効であるが、これが炉心の機械的設計から困難であれば、B₄C含有量を増加させるのがよい。現状の10w/oより25w/oに含有量を増加させれば、約9%の反応度効果の増加が期待される。

(2) 偏心制御棒効果

直径が50mmφ、10w/o B₄C入りの制御棒では、擾動論による、反応度効果の空間変化の推定はかなりの過大評価となることがわかった。

半径方向の空間高調波を10項程度とり入れた解析が必要になる。我々のシステムでは、炉心内に制御棒が円環上に配置されている場合には8%，またその周辺の反射体中に配置されている場合には約10%の精度でその反応度効果を予想することができる。

(3) 多数本制御棒効果

円環配置のパターンについて、制御棒間の距離とその反応度効果の関係を調べると、本数が2本、3本および6本と増加していくにつれ、全効果の最高値は炉心中央よりだんだん離れた大きな円環について記録された。相互干渉効果がShadowingよりAntishadowingに転んずる距離は、制御棒の太さやB₄C濃度あるいは炉心燃料濃度にあまり関係なく、むしろ制御棒の本数に強く依存している。つまり2本と3本の円環に対しては、この転んずる距離は50±12cm、6本円環に対しては40±10cmの範囲にある。相互干渉の激しさは、制御棒が太いほど、B₄C濃度が高いほど大きくなる。つまり1本の制御棒にもたせる反応度量が大きいほど、干渉効果は激しくなる。実験炉の予備設計では一つのペア中の制御、安全棒の相互距離は21cmであるので、SHE-8との炉心構成の差を無視していくと、S=0.85となり、Shadowingにより約15%反応度効果は減少する。またボロン鋼球のChannelの効果も、制御・安全棒と一緒に挿入されるとすると、S=0.7となるが一応の効果は期待しうる。円環配置の中心に一本制御棒が追加されても、相互干渉の因子はほとんど変わらないことが6本円環について実証された。予備設計では、制御棒安全棒のペアとペア同志は約90cm離れている。ペア同志は弱

いAntishadowingにより、いくらか反応度効果を強め合うことになるであろう。おそらく $S = 1.05$ 程度に相当すると思われる。

(4) 多数本制御棒効果計算システムの評価

我々の整備した多数本制御棒効果計算システムにより円環上の制御棒配置のパターンについて実験結果を解析してみた。その結果、予備設計で採用された中空円筒形、10w/o B₄C入り制御棒についてもこのシステムはかなりよく反応度効果を評価しうることがわかった。つまり、2, 3および6本の円環に対してまで、それらが炉心内にある限り相違8%以内で計算値は実験値を説明することができた。また反射体中における配置についても速中性子群の制御棒表面における挿外距離決定法を改良すれば4%以内の精度をこのシステムは有することが実証された。現在のところ我々のシステムのブロック[E]の二群拡散コードCRODERは、炉心、反射体のいずれか一方に制御棒が入った場合に限り適用できるようになっている。炉心、反射体の両方に制御棒が入った場合についても問題が解けるように改良されるならば、実験炉の炉心についてもシステムが適用できる。

7 謝 辞

この研究は多目的高温ガス炉の研究開発計画の一環として行なわれた。研究を進めるにあたっては、動力炉開発管理室、室長 野沢俊弥氏、熱中性子炉班長 能沢正雄氏から助言と激励をいただいた。研究の結果について炉物理実験研究室、室長 後藤頼男氏から有役な討論をしていただいた。また実験用制御棒中のB₄C濃度の分析は全面的に化学部分析センター永井斉氏にお願いし心よく引受けさせていただいた。ここに謝意を表します。

附録 1. Simmon - king の式の評価

さきに述べたように、Simmon - king の式

$$\frac{-\rho_s}{\beta_{eff}} = \frac{1}{\beta_{effc}/\ell_c} (\alpha - \alpha_c) \quad (A-1)$$

は近似式であって、実際は、静的反応度 ρ_s は

$$\frac{-\rho_s}{\beta_{eff}} = \frac{1}{\beta_{effc}/\ell_c} (\alpha - \alpha_c) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (A-2)$$

ε_1 , ε_2 と云う補正項が加ってくる。

補正項の大きさは、炉心構造や制御棒配置などによっても影響されるので、一般論は困難であり、実験を行なった Caseについて個々の場合について計算を進めねばならぬ。ここでは、SHE-1炉心について (end reflector つき円柱形炉心 $C/\text{U}=5336$) の (A-1) 式の評価結果⁽¹³⁾を参考のため Table A-1 にのせた。A'は炉心部、B'は反射体部、C'は両方を均質に poisoning したときの状況を示している。

ρ_{d1} が Simmon - king の式によって与えられる % 単位の反応度である。

A' では (A-1) 式は ρ_s を僅か過小評価、B' では過大評価、C' では僅か過大評価している。実験を行なったのは棒状の吸収体でそれが局在して入れてあるので、Table A-1 の評価がそのまま今回の実験にあてはめられるとは考えられないが、大体 10% くらいの未臨界度までは、5% くらいの精度で (A-1) 式は ρ_s を評価していると判断してよさそうに思われる。

附録 2. β_{effc}/ℓ_c の測定と β_{eff} の計算

データのまとめに使用された SHE-8 炉心の β_{effc}/ℓ_c の測定はやはりパルス中性子法にて行なわれており、JAERI-memo 1970⁽¹⁴⁾に詳説されているので、ここでは概要を述べることとする。この場合、BF₃検出器を SHE 固定側背面においているところが、ちがうだけで他の実験装置は 2.5 に述べたものと同じである。

臨界燃料棒数は 146.42 本であったので、順次燃料棒数を 145 より 132 まで減らした各状態について α を測定した結果を Fig. A-1 に記した。直線外挿法により臨界における α の値 α_c を 6.9 と決定した。

$\frac{\beta_{effc}}{\ell_c}$ は α_c の値より逆時間方程式から導かれる次式により求められた。

$$\frac{\beta_{effc}}{\ell_c} = \alpha_c \frac{1}{1 + \frac{1}{\alpha_c} \sum_{i=1}^6 \lambda_i \beta_{ieff}/\beta_{eff}} \quad (A-3)$$

$$\frac{\beta_{effc}}{\ell_c} = 6.86 \quad (A-4)$$

核計算コードで通常算出される静的反応度との対比のためには β_{eff} の値が必要になる。中性子束と重みづけの関数に β_{eff} が依存することは J A E R I - m e m o - 3 7 0 7⁽³⁾ において議論してあるが、実際の数値としては、それらの選択にほとんど依存しない。それで、静的な中性子束と重みづけ関数にはその共役関数を選ぶと云う conventional を方法で、K P A R A M⁽¹⁵⁾ を使って計算を行なった。計算の条件は、中性子エネルギー群数 9 群一次元拡散近似である。

計算結果は、

$$\beta_{\text{effc}} = 0.00683 \quad \dots \dots \dots \quad (\text{A-5})$$

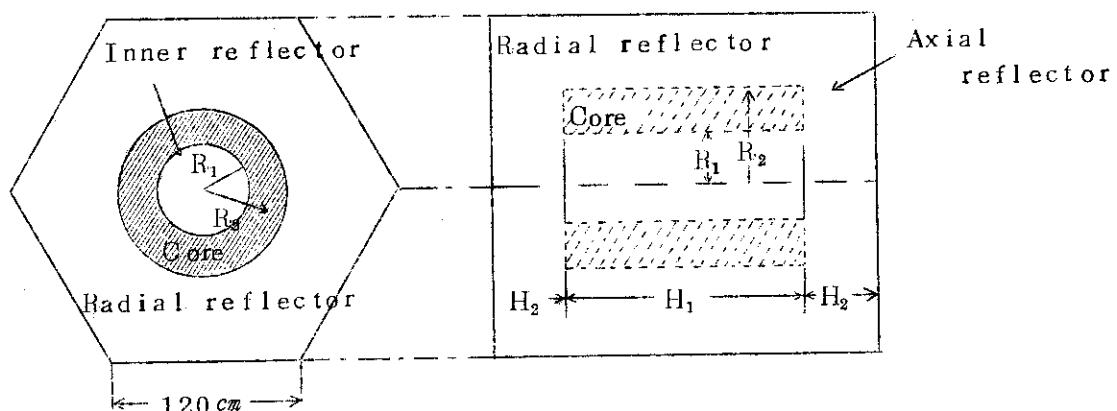
であった。

References

1. ~~多川茂徳~~; JAERI-memo 4467 (1971).
2. Inoue K. et al. ; JAERI 1032 (1962).
3. Kaneko Y. ; JAERI-memo 3707 (1969).
4. Simmon,B.E. & King J.S. ; Nucl.Sci.Eng.3 595 (1958).
5. Kaneko Y. et al. ; JAERI-1173 (1969).
6. Scalettar, R. and Nordheim, L.W. ; MDDC-42 (1946).
7. Inoue, T. et al. ; JAERI-memo 4351 (1971).
8. Macdougall, J.D. ; AEEW-M318 (1963).
9. Tuchihashi, K. ; private communication.
10. Kitadate, K. et al. ; private communication.
11. Davison, B. and Kushnerink, S. ; TPI-45 (1947).
12. Amano F. et al. ; J.Nucl.Sci.Technol. Vol.9, No.4
p224-236 (1972).
13. Amano F. et al. ; J.Nucl.Sci.Technol. Vol.3
p275-288 (1966).
14. Kaneko Y. et al.; JAERI-memo-1970 (1970).
15. Suzuki T. ; JAERI-1082 (1965).

Table 1 The physical and nuclear properties
of the different core configurations
of SHE

Configuration	$C / {}^{235}U$	Number of loaded fuel rods at delayed critical	Critical mass in ${}^{235}U$ (kg)	Inner reflector R_1 (cm)	Core radius R_2 (cm)	Core length H_1 (cm)	α_c
SHE - 5	5378	219	5.29	0	35.7	240	5.73 ± 0.07
SHE - 6	4328	196	5.95	0	33.8	240	5.86 ± 0.15
SHE - 7	3276	173	6.99	0	31.8	240	6.48 ± 0.29
SHE - 8	2226	147	8.69	0	29.3	240	6.90 ± 0.02
SHE - 9	5378	298	7.20	44.4	6.08	240	3.86 ± 0.34



$H_2 = 0$ for all the cores given above

JAERI-M 4971

Table.2. Control rods configurations for the pulsed neutron measurement.

Core	Critical fuel rod number	Loaded fuel rod number	Loaded control rod number	Control rods configuration					Experimental number	prompt neutron decay constant at standard state
				Pattern number	Control rods position					
SHE-8	147	140	0	1					3	13.34 ± 0.13
		138	2	2	S,		N		4	
		138	2	3	1F1,		1Z1,		5	
		138	2	4	3F1,		3Z1,		6	
		140	2	5	5E1,		5Y1,		13	
		140	2	6	9F1,		9Z1,		12	
		140	2	7	MF1,		MZ1,		11	
		136	4	8	1F1, 1C1,		1Z1, 1W1,		8	
		136	4	9	3F1, 3C1,		3Z1, 3W1,		7	
		140	4	10	5E1, 5B1,		5Y1, 5V1,		14	
		140	4	11	9F1, 9C1,		9Z1, 9W1,		9	
		140	4	12	MF1, MC1,		MZ1, MW1,		10	
		134	6	13	1F1, 1B1, 1D1,		1Z1, 1V1, 1X1,		15	
		134	6	14	3F1, 3B1, 3D1,		3Z1, 3V1, 3X1,		17	
		140	6	15	5F1, 5B1, 5D1,		5Z1, 5V1, 5X1,		18	
		140	6	16	9F1, 9B1, 9D1,		9Z1, 9V1, 9X1,		19	
		140	6	17	MF1, MB1, MD1,		MZ1, MV1, MX1,		20	
		128	12	18	9F1, 3A1, 3B1,	3C1, 3D1, 3E1,	3Z1, 3U1, 3V1,	3W1, 3X1, 3Y1,	29	
		140	12	19	5F1, 5A1, 5B1,	5C1, 5D1, 5E1,	5Z1, 5U1, 5V1,	5W1, 5X1, 5Y1,	28	
		140	12	20	9F1, 9A1, 9B1,	9C1, 9D1, 9E1,	9Z1, 9U1, 9V1,	9W1, 9X1, 9Y1,	26	
		140	12	21	MF1, MA1, MB1,	MC1, MD1, ME1,	MZ1, MU1, MV1,	MW1, MX1, MY1,	25	
		125	14	22	S, 3F1, 3A1, 3B1,	3C1, 3D1, 3E1,	N, 3Z1, 3U1, 3V1,	3W1, 3X1, 3Y1,	30	
		138	14	23	S, 5F1, 5A1, 5B1,	5C1, 5D1, 5E1,	N, 5Z1, 5U1, 5V1,	5W1, 5X1, 5Y1,	27	
		138	14	24	S, 9F1, 9A1, 9B1,	9C1, 9D1, 9E1,	N, 9Z1, 9U1, 9V1,	9W1, 9X1, 9Y1,	23	
		138	14	25	S, MF1, MA1, MB1,	MC1, MD1, ME1,	N, MZ1, MU1, MV1,	MW1, MX1, MY1,	26	
		128	12	26	2F1, 3F1, 3E3,	2C1, 3C1, 3B3,	2W1, 3W1, 3V3,	2Z1, 3Z1, 3Y3,	16	
		140	12	27	7F1, 8F1, 8E8,	7C1, 8C1, 8B8,	7W1, 8W1, 8V8,	7Z1, 8Z1, 8Y8,	32	
		140	12	28	MF1, MFN, MB1,	MC1, 8C1, 8B8,	MZ1, MU1, MV1,	MW1, MX1, MY1,	21	
		138	14	29	S, MF1, MFN, MB1,	MC1, MD1, ME1,	N, MZ1, MU1, MV1,	MW1, MX1, MY1,	22	
		132	16	30	4A3, 3C1, 4D3F1,	BB3, BC7, BE3, BF7,	4U3, 3W1, 4X3, 3Z1,	6V3, SW7, SY3, SZ7,	31	
		140	0	1					33	14.32 ± 0.29

Table 3 measured and calculated control rod effects

Pattern number	Control rod effect						Control rod configuration	
	$\Delta\alpha$ (at critical)	dollar unit (S in min on -king)	A_k (in %)	interference factor S	distance between the adjacent two rods (cm)	Comment		
measured	calculated	measured	calculated	measured	calculated			
1								
2	64.38±0.89	64.38	9.13±0.40	9.38	6.42	6.41		
3	63.91±0.89	63.53	9.07±0.40	9.26	6.37	6.32		
4	58.91±0.84	57.40	8.36±0.38	8.36	5.88	5.71		
5	50.15±0.76	46.78	7.12±0.32	68.2	5.00	4.66		
6	17.33±0.46	14.02	2.52±0.15	2.04	1.72	1.39		
7	84.0±0.35	64.7	11.9±0.09	0.94	0.83	0.64		
8	100.90±12.5	99.19	14.32±0.60	14.45	10.1	9.87	0.789±0.021	0.781
9	108.93±1.33	107.35	15.46±0.64	15.65	10.9	10.02	0.950±0.025	0.935
10	105.49±1.29	99.25	14.97±0.62	14.47	10.5	9.88	1.052±0.029	1.061
11	38.63±0.64	30.37	54.8±0.25	4.43	3.85	3.03	1.114±0.038	1.084
12	17.60±0.44	13.59	2.50±0.14	1.98	1.76	1.35	1.048±0.070	1.050
13	118.11±1.42	117.82	16.77±0.70	17.17	11.8	11.73	0.616±0.016	0.618
14	146.58±1.70	141.07	20.81±0.85	20.56	14.6	14.04	0.829±0.021	0.819
15	152.27±1.75	144.94	21.61±0.85	21.13	15.1	14.43	1.012±0.027	1.033
16	59.83±0.85	48.43	8.49±0.37	7.06	5.96	4.82	1.151±0.037	1.152
17	26.60±0.53	21.18	3.78±0.19	3.09	2.65	2.11	1.056±0.0065	1.090
18	196.83±2.19	190.06	27.94±1.13	27.71	19.62	18.92	0.557±0.010	0.552
19	243.16±2.64	225.16	34.52±1.39	32.82	24.25	2.242	0.808±0.021	0.802
20	135.33±1.59	107.79	19.21±0.79	15.71	13.49	10.73	1.302±0.039	1.282
21	59.18±0.85	45.00	8.40±0.37	6.56	5.90	4.48	1.174±0.066	1.159
22	208.01±2.75		29.53±0.31		20.7			
23	251.14±2.72		3.565±1.44		2.50			
24	208.14±2.30		29.54±1.20		2.08			
25	135.5±1.59		19.23±0.79		1.35			
26	160.66±18.3		2.280±0.10		16.0			
27	101.52±1.26		14.41±0.60					
28	58.27±0.84		8.27±0.36					
29	135.22±1.59		19.19±0.79					
30	270.78±2.05		38.47±1.42					
			26.99					

Table 4 Interference among the 6 control rods arranged in a ring with and without a central control rod

Distance between the most adjacent two control rods	Effect of ring without a central control rod	Effect of ring with a central control rod	Sum of individual control rod effect
19.5 cm	$28.69 \pm 1.13 \$$ $S = 0.56 \pm 0.01$	$30.32 \pm 1.20 \$$ $S = 0.50 \pm 0.04$	$8.59 \times 6 + 9.38$ $= 60.92 \$$
32.5 cm	$35.45 \pm 1.39 \$$ $S = 0.81 \pm 0.02$	$36.61 \pm 1.44 \$$ $S = 0.69 \pm 0.06$	$7.31 \times 6 + 9.38$ $= 53.24 \$$
58.5 cm	$19.73 \pm 0.79 \$$ $S = 1.30 \pm 0.05$	$30.34 \pm 1.20 \$$ $S = 1.24 \pm 0.05$	$2.52 \times 6 + 9.38$ $= 24.50 \$$
71.5 cm	$8.63 \pm 0.37 \$$ $S = 1.17 \pm 0.07$	$19.75 \pm 0.79 \$$ $S = 1.18 \pm 0.05$	$1.22 \times 6 + 9.38$ $= 16.7 \$$

Table A-1 Relationship of static
reactivity ρ_s to approximate
equations ρ_{d_1} and ρ_{d_2} in case
of absorber insertion

Case	No.	Core A.C.S (cm^{-1})	Reflec- tor A.C.S (cm^{-1})	ρ_s (%)	ρ_{d_1} (%)	ρ_{d_2} (%)
A'	1	0.0030	0.0002	0.00	0.00	0.00
	2	0.0031	0.0002	2.88	2.86	2.88
	3	0.0032	0.0002	5.79	5.70	5.77
	4	0.0033	0.0002	8.64	8.51	8.62
	5	0.0034	0.0002	11.42	11.30	11.38
	6	0.0035	0.0002	14.16	14.07	14.10
	7	0.0036	0.0002	16.85	16.81	16.77
	8	0.0037	0.0002	19.49	19.52	19.37
	9	0.0038	0.0002	22.07	22.21	21.92
	10	0.0039	0.0002	24.58	24.85	24.41
B'	11	0.003	0.0004	1.40	1.42	1.40
	12	0.003	0.0006	2.69	2.76	2.69
	13	0.003	0.0008	3.89	4.02	3.89
	14	0.003	0.0010	4.98	5.21	4.99
	15	0.003	0.0015	7.42	7.89	7.42
	16	0.003	0.0020	9.49	10.21	9.48
	17	0.003	0.0025	11.27	12.25	11.25
	18	0.003	0.0030	12.83	14.04	12.79
	19	0.003	0.0035	14.20	15.63	14.16
	20	0.003	0.0040	15.43	17.06	15.35
C'	21	0.003	0.0044	16.53	18.33	16.44
	22	0.0030	0.0002	0.00	0.00	0.00
	23	0.0031	0.0003	3.60	3.61	3.61
	24	0.0032	0.0004	7.18	7.22	7.20
	25	0.0033	0.0005	10.75	10.83	10.79
	26	0.0034	0.0006	14.30	14.43	14.79
	27	0.0035	0.0007	17.84	18.04	17.95
	28	0.0036	0.0008	21.37	21.66	21.52
	29	0.0037	0.0009	24.89	25.26	25.08

A.C.S. stands for absorption cross section.

平均質臨界実験装置炉心装填図

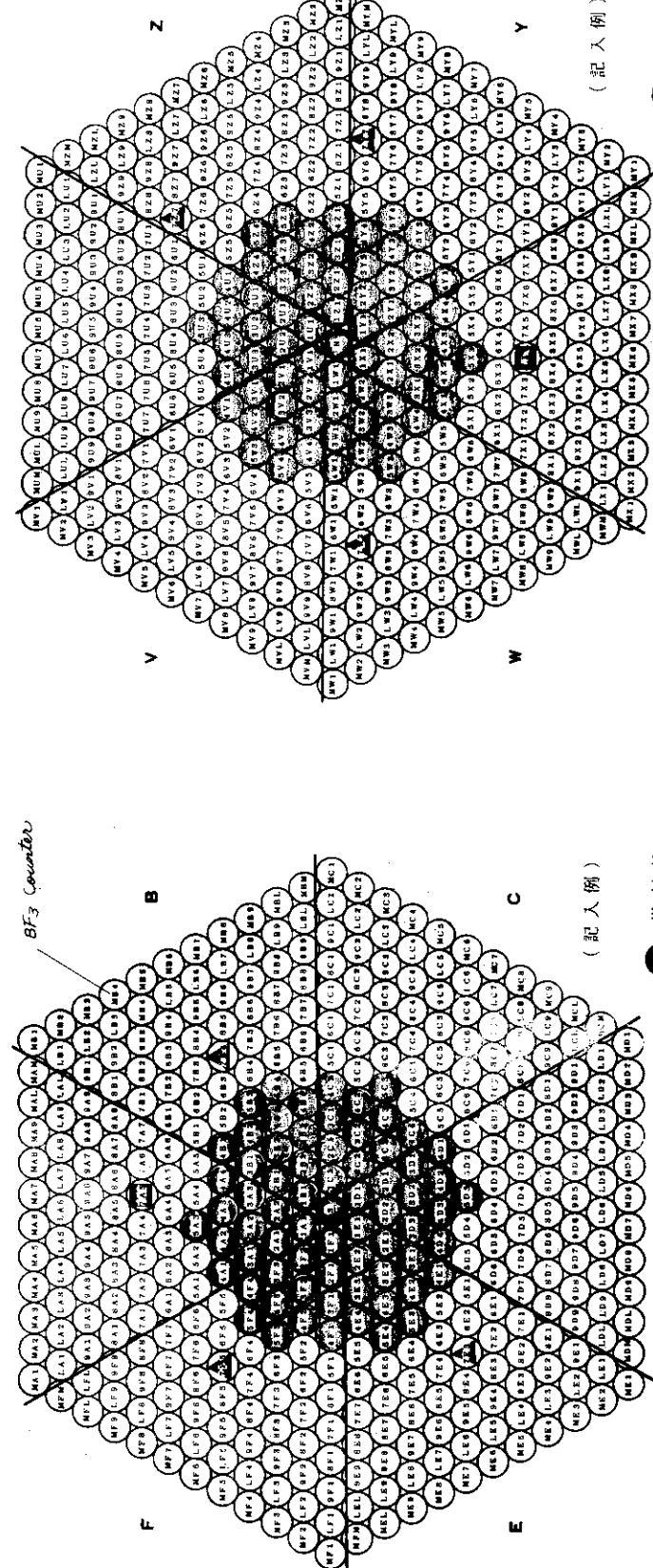
平均質臨界実験装置炉心装填図

固定側

移動側

A

BTF₃ Counter



- 26 -

月 日 _____
炉心番号 SHE-8
燃料棒数 70
備考 Pattern number : 1

月 日 _____
炉心番号 SHE-8
燃料棒数 70
備考 Pattern number : 1

Fig. 1. Fuel loading pattern of SHE-8.

● 燃料棒
■ 制御棒
▲ 安全棒

月 日 _____
炉心番号 SHE-8
燃料棒数 70
備考 Pattern number : 1

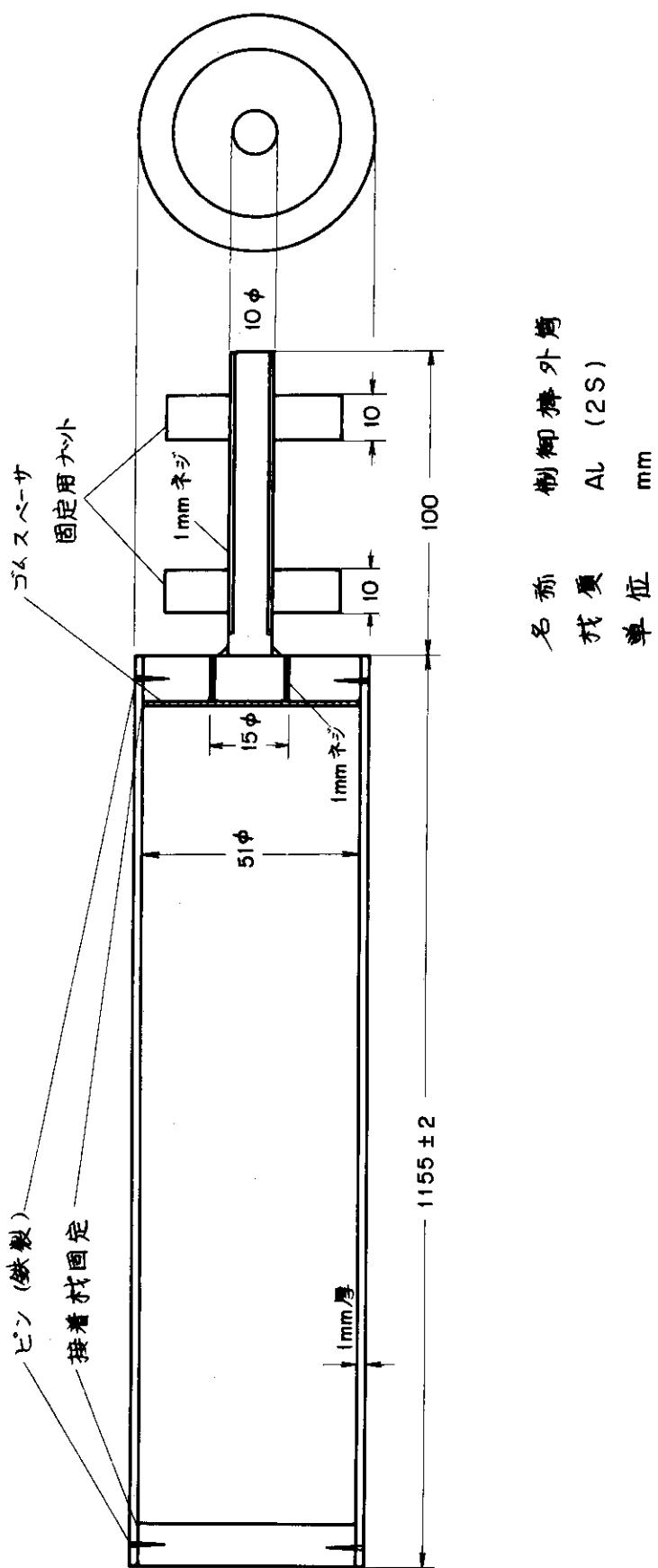
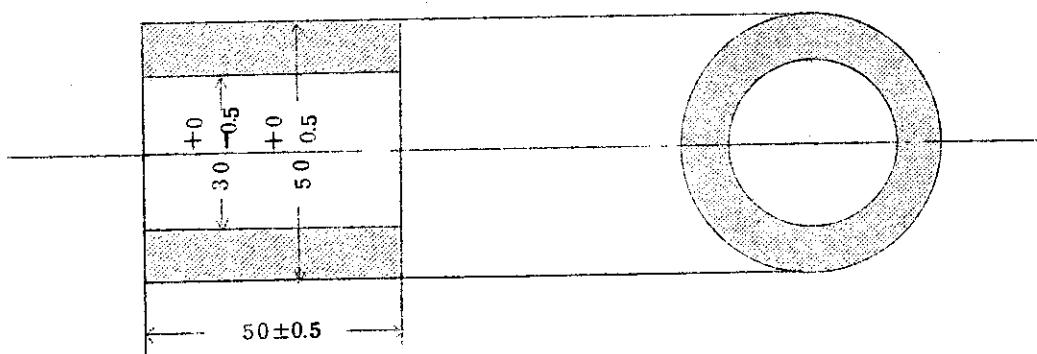


Fig.2. Aluminum cylinder used for control rod.



B₄C 10w/o, gross density 2.02 g/cm³, unit in mm

Fig. 3 Neutron absorber pellet used for control rods

凶圖裝填爐心驗實臨界質均半均

均質實驗裝置圖

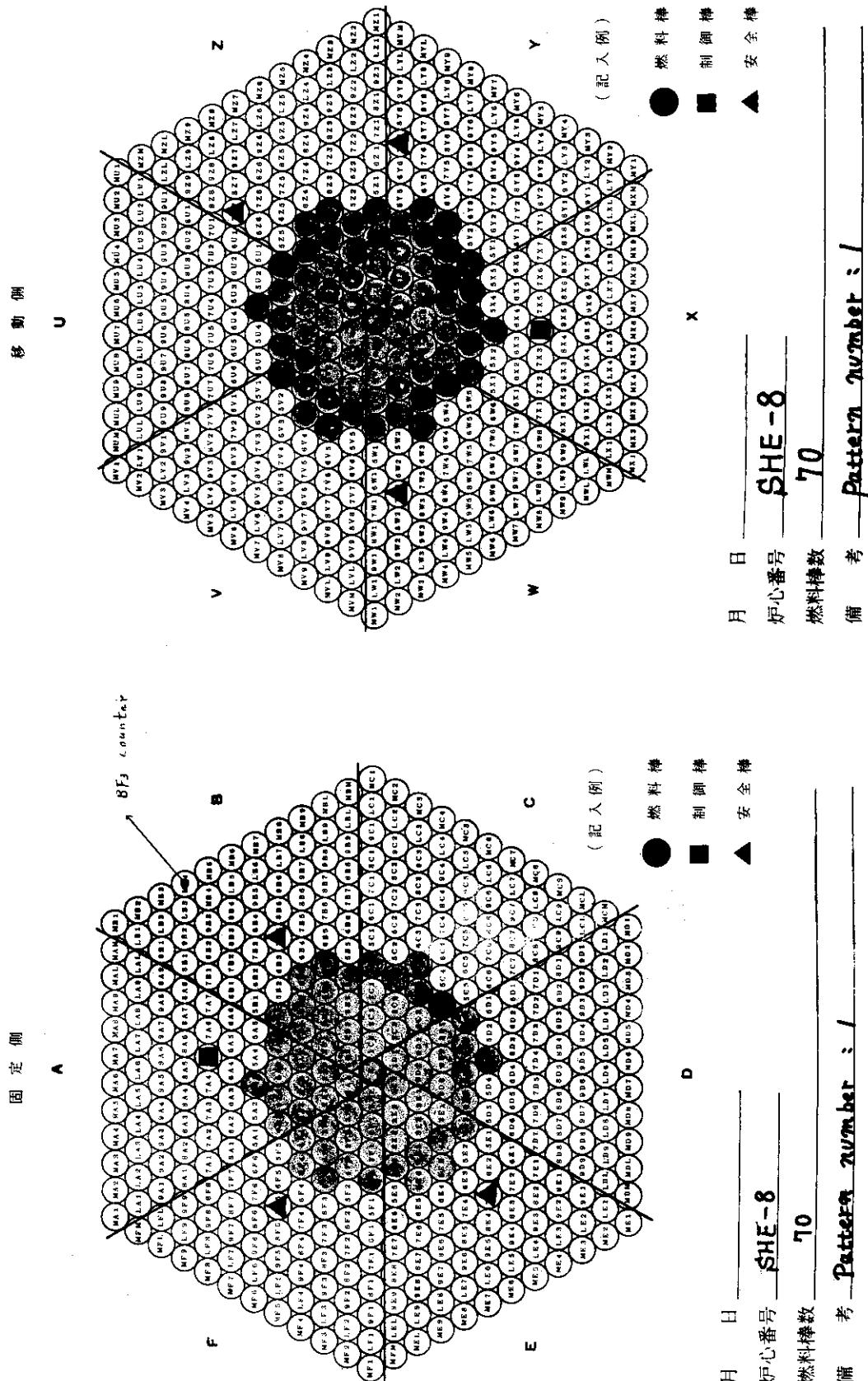


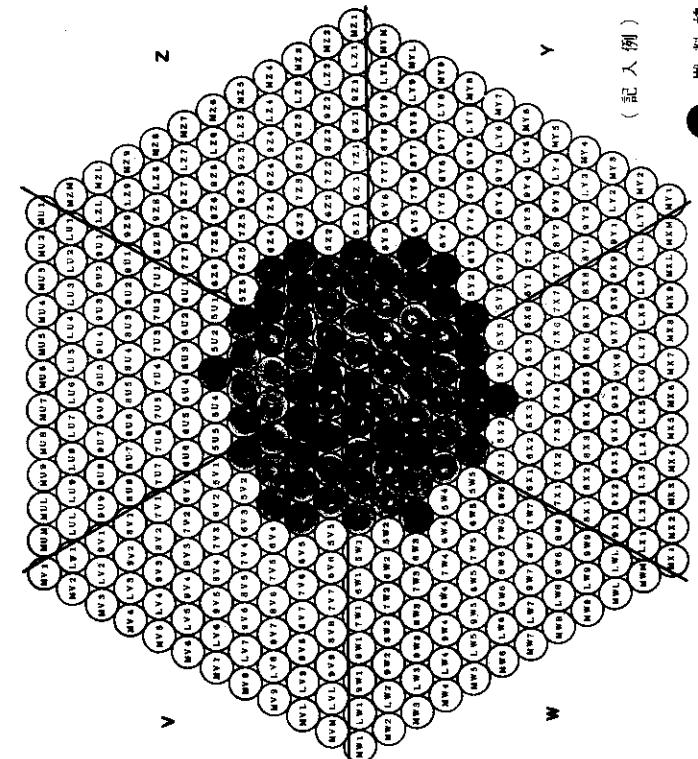
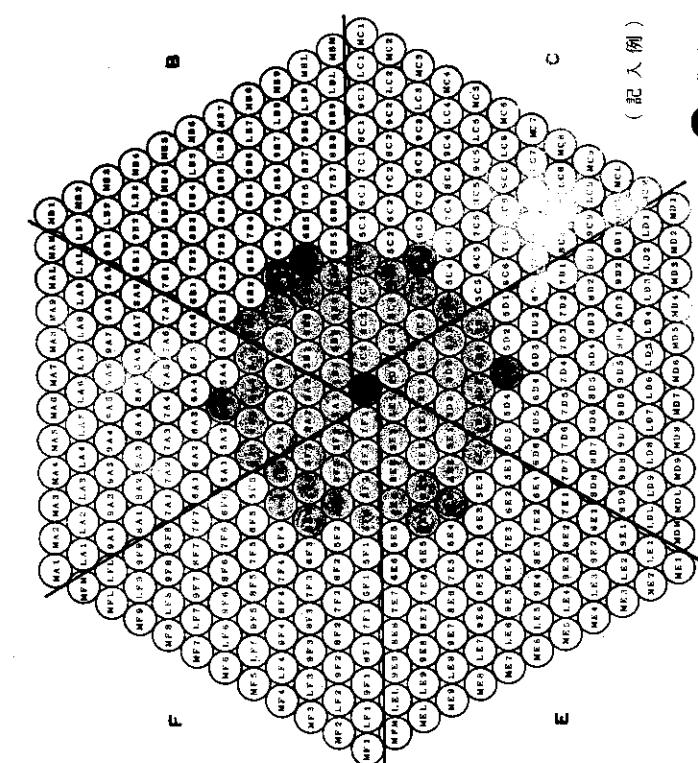
Fig. 4-1a Pattern of control rods configuration in a fixed half of SHE. Fig. 4-1b Pattern of control rods configuration in a movable half of SHE.

平均質臨界実験装置炉心装填図

平均質臨界実験装置炉心装填図

固定側

移動側



D 燃料棒
■ 制御棒
▲ 安全棒

X 燃料棒
■ 制御棒
▲ 安全棒

月 日 SHE-8
炉心番号 69
燃料棒数 Pattern number : 2

Fig. 4-2a

Fig. 4-2b

JAERI-M 4971

JAERI-M 4971

圖 塘 壇 裝 心 爐 置 裝 置 驗 實 範 例 畫 半 均 質 臨 界

平均質臨界實驗裝置爐心裝填圖

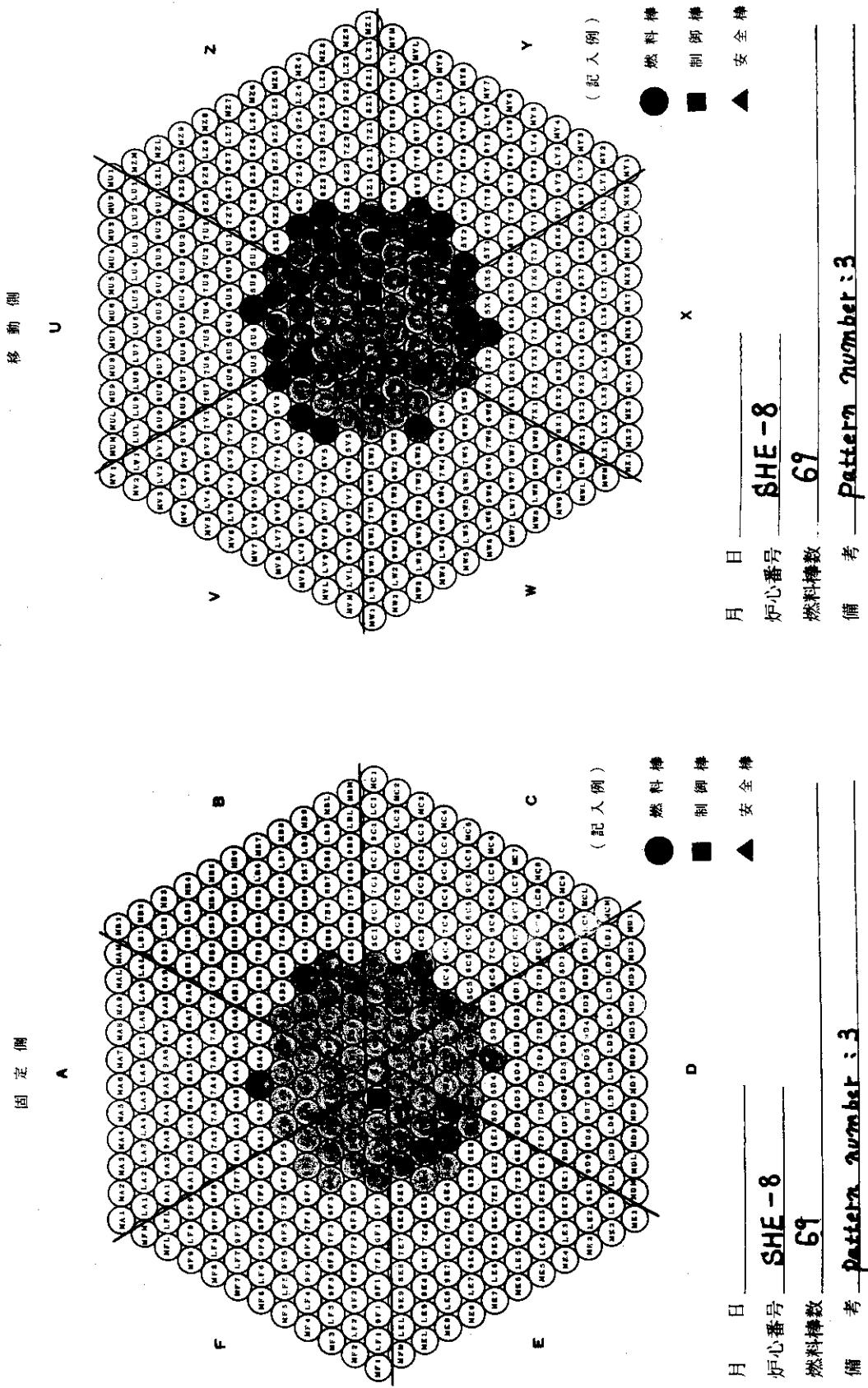


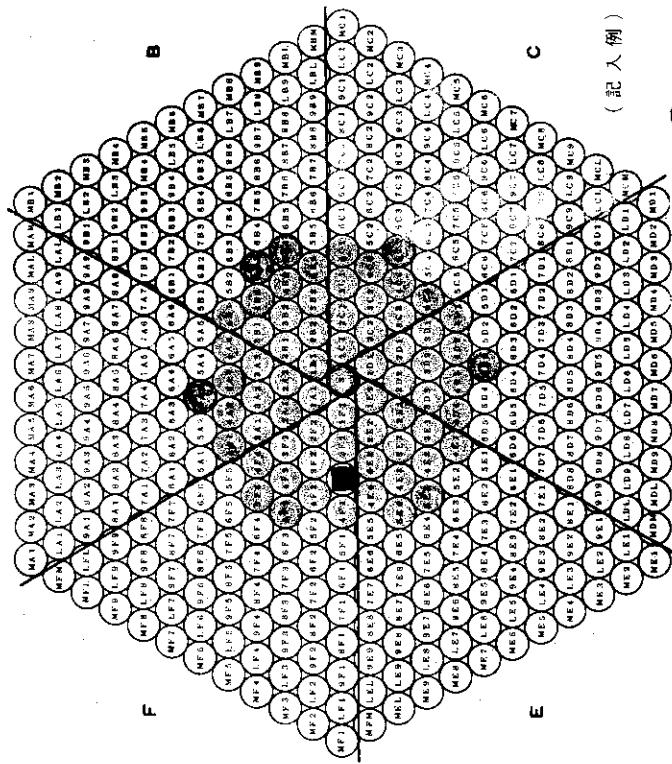
Fig. 4-3a

Fig. 4-3b

平均質臨界実験装置炉心装填図

固定側

A



燃料棒

■ 制御棒
▲ 安全棒

(記入例)

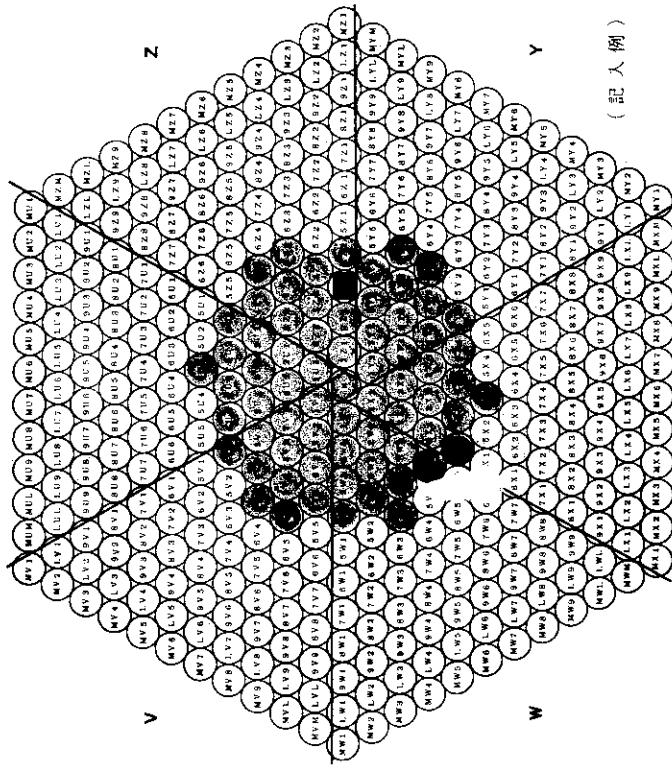
月 日 SHE-8
炉心番号 69

備考 Pattern number: 4

平均質臨界実験装置炉心装填図

移動側

U



● 燃料棒
■ 制御棒
▲ 安全棒

月 日 SHE-8
炉心番号 69

備考 Pattern number: 4

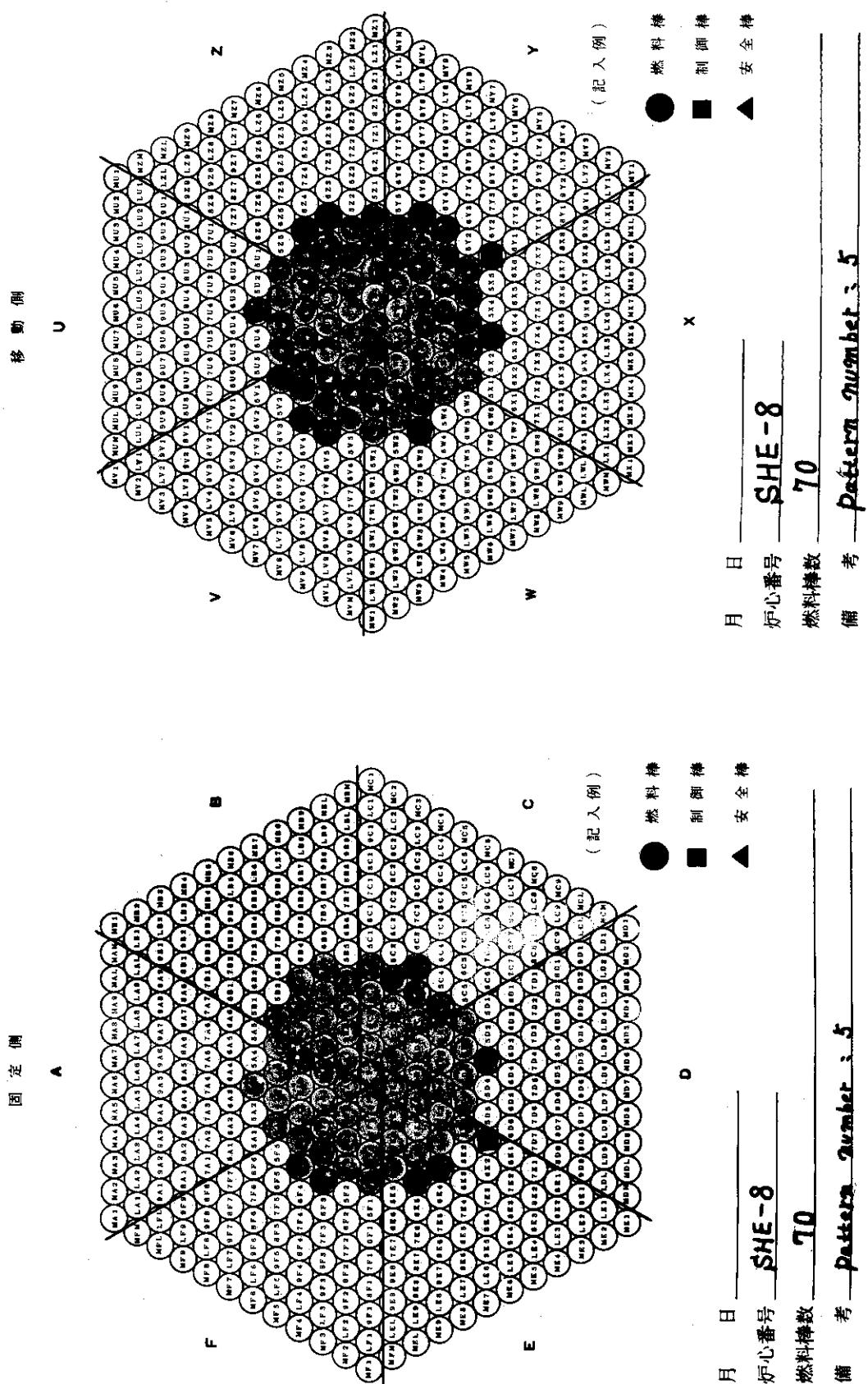
燃料棒数
(記入例)

Fig. 4-4a

Fig. 4-4b

平均質臨界実験装置炉心装填図

平均質臨界実験装置炉心装填図



月 日 SHE-8
炉心番号 70
燃料棒数 Pattern Number : 5

Fig. 4-5a

半均質臨界実験装置炉心装填図

半均質臨界実験装置炉心装填図

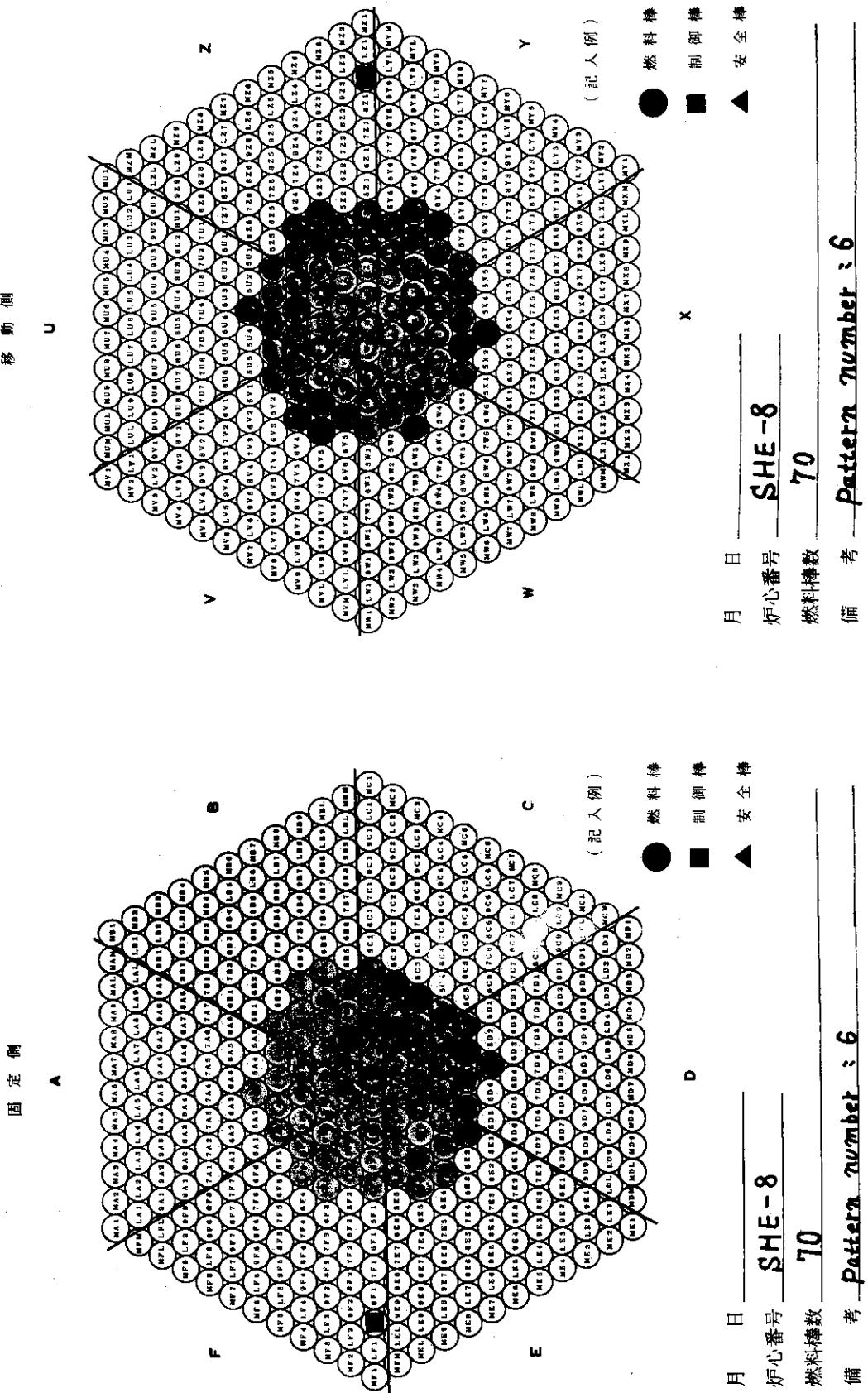


Fig. 4-6a

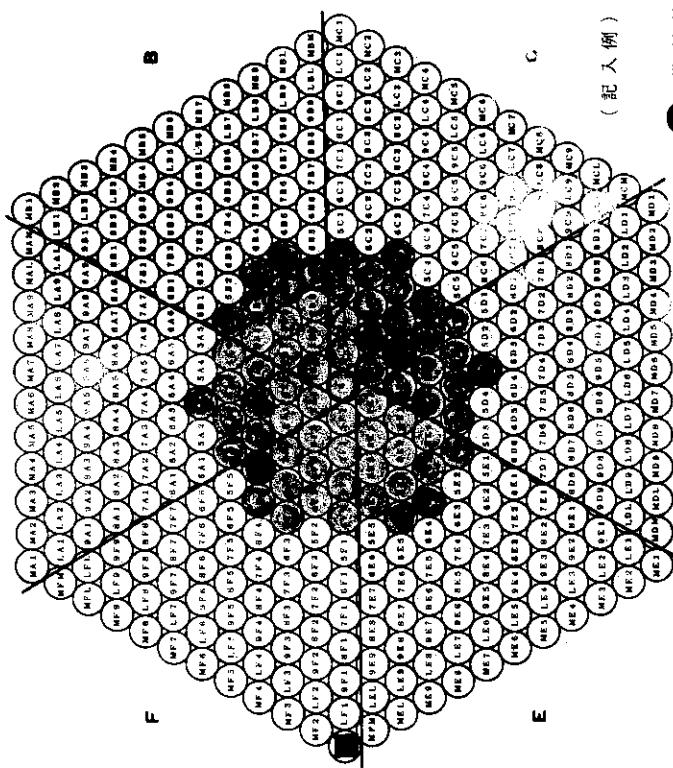
Fig. 4-6b

平均質臨界実験装置炉心装填図

平均質臨界実験装置炉心装填図

固定側

A



● 燃料棒
■ 制御棒
▲ 安全棒

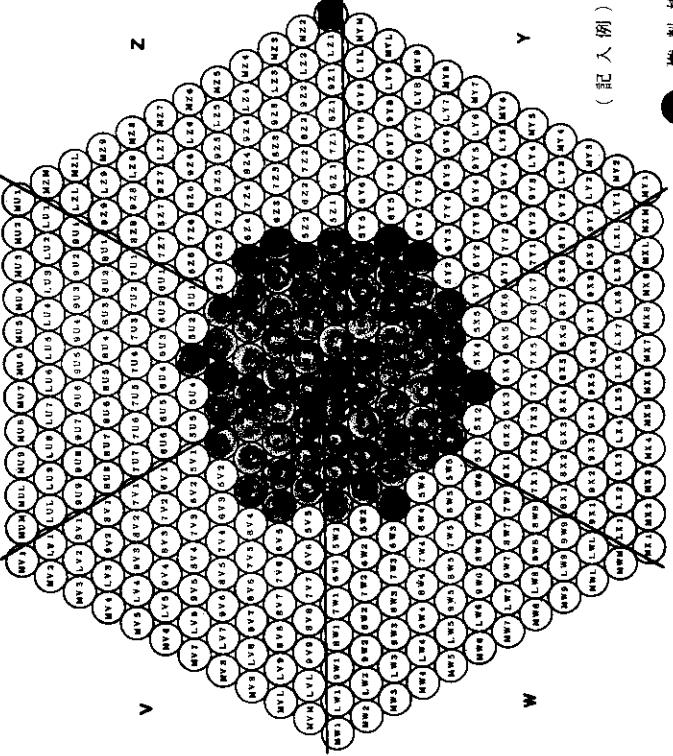
D 日月年

月日年
炉心番号 SHE-8
燃料棒数 70
備考 pattern number: 7

Fig. 4-7a

移動側

U



● 燃料棒
■ 制御棒
▲ 安全棒

X 日月年

月日年
炉心番号 SHE-8
燃料棒数 70
備考 pattern number: 7

Fig. 4-7b

半均質臨界實驗裝置爐心裝填圖

半均質臨界実験装置図

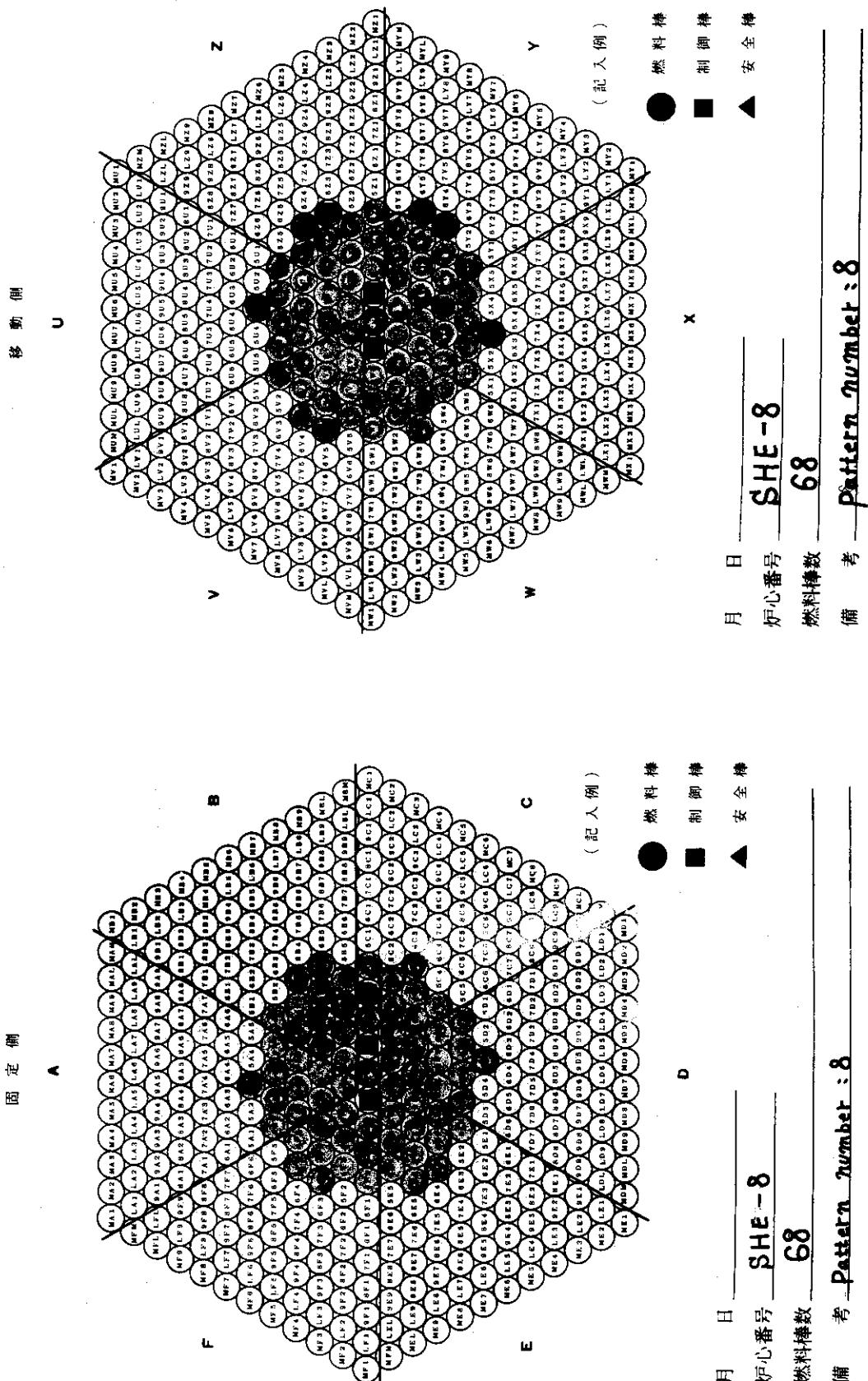


Fig. 4-8a

Fig. 4-8b

平均質臨界実験装置炉心装填図

平均質臨界実験装置炉心装填図

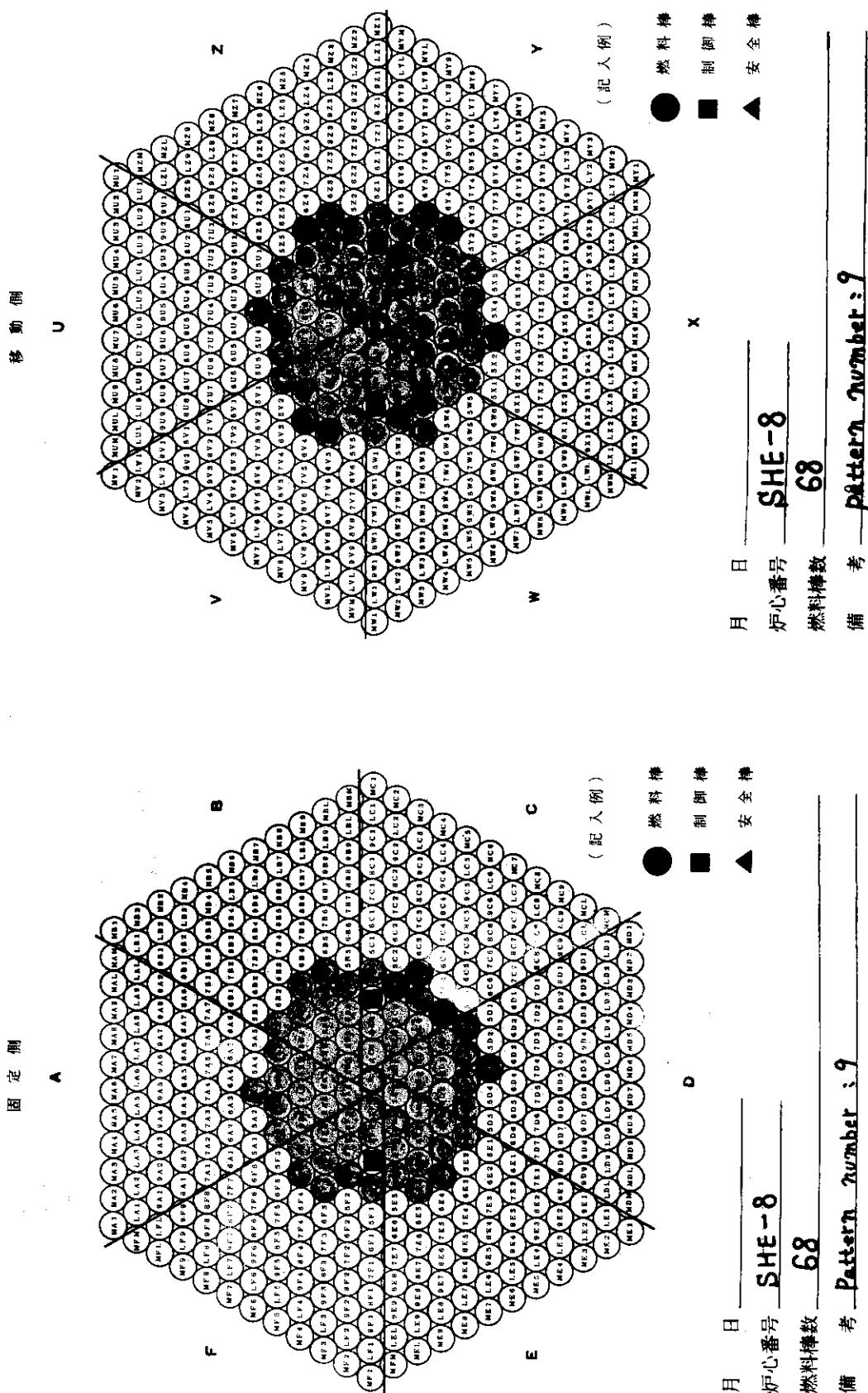


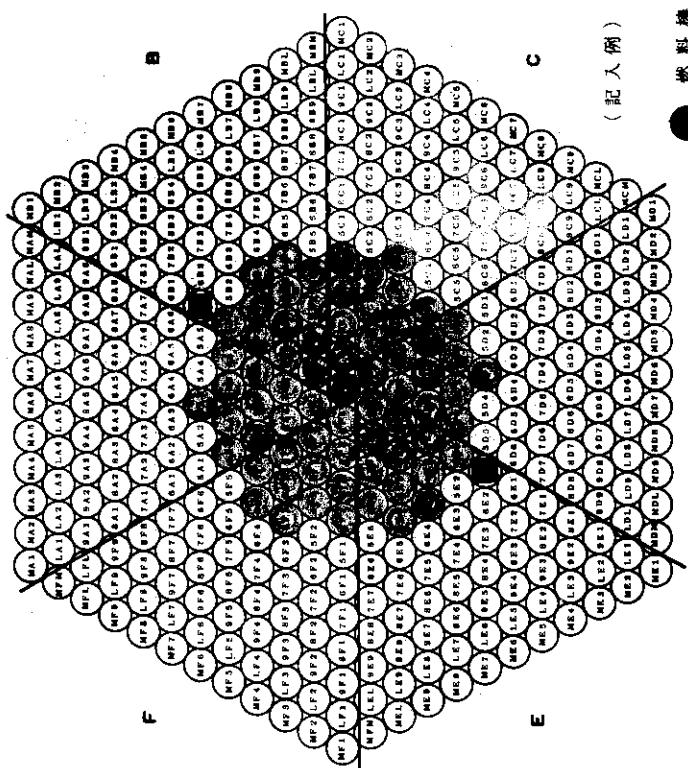
Fig. 4-9a

Fig. 4-9b

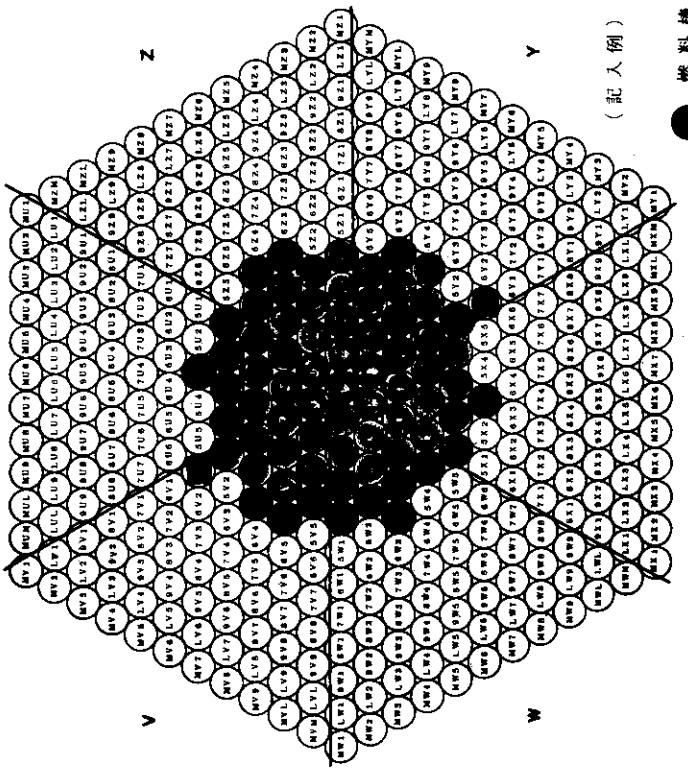
平均質臨界実験装置炉心装填図

平均質臨界実験装置炉心装填図

固定側



移動側



月 日 _____
炉心番号 SHE-8
燃料棒数 70
備考 Pattern number : 10

月 日 _____
炉心番号 SHE-8
燃料棒数 70
備考 Pattern number : 10

Fig. 4-10a

Fig. 4-10b

凶壇裝置駿實臨界質均半

圖彙裝置爐心驗試實驗臨界質均半

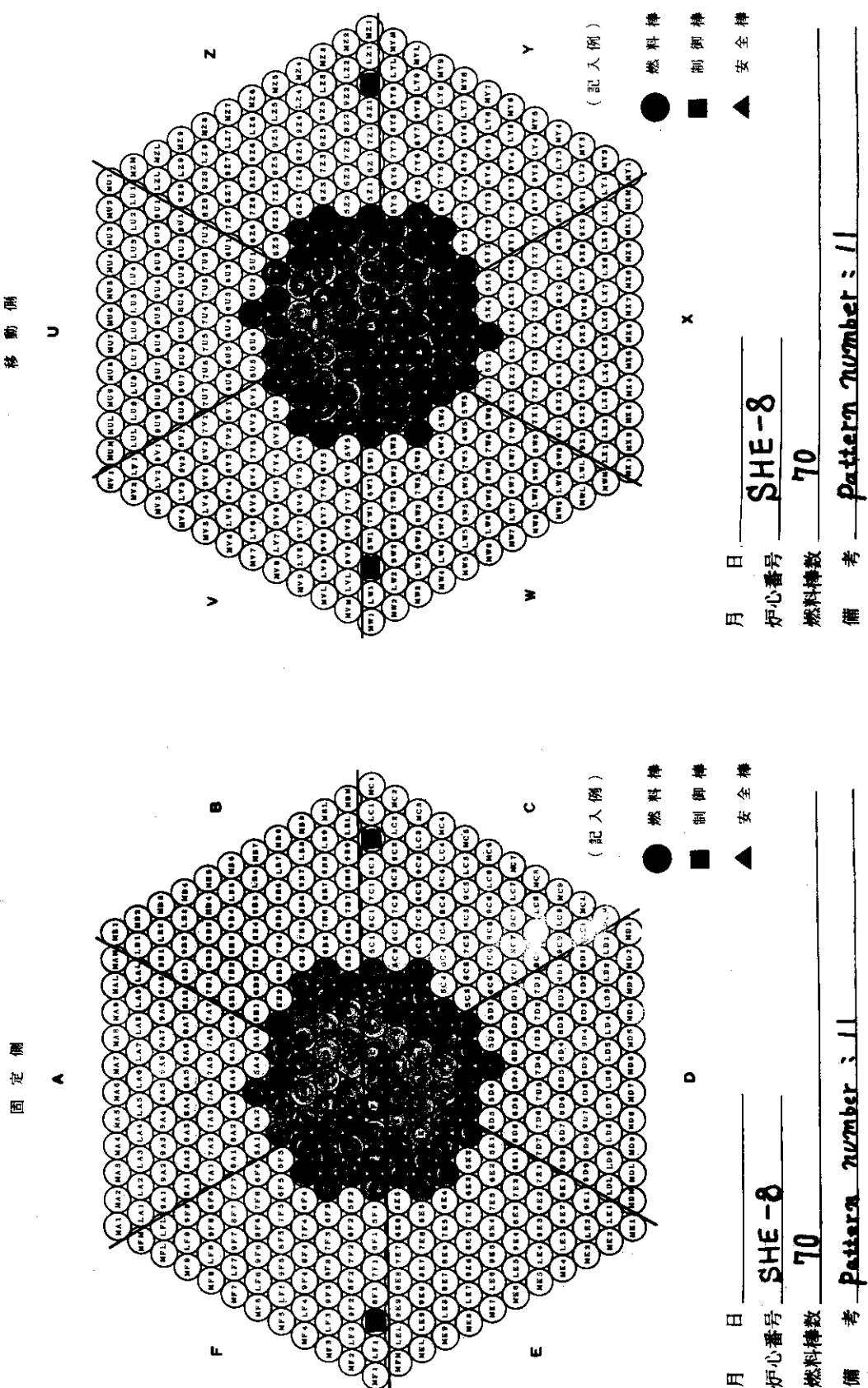


Fig. 4-11a

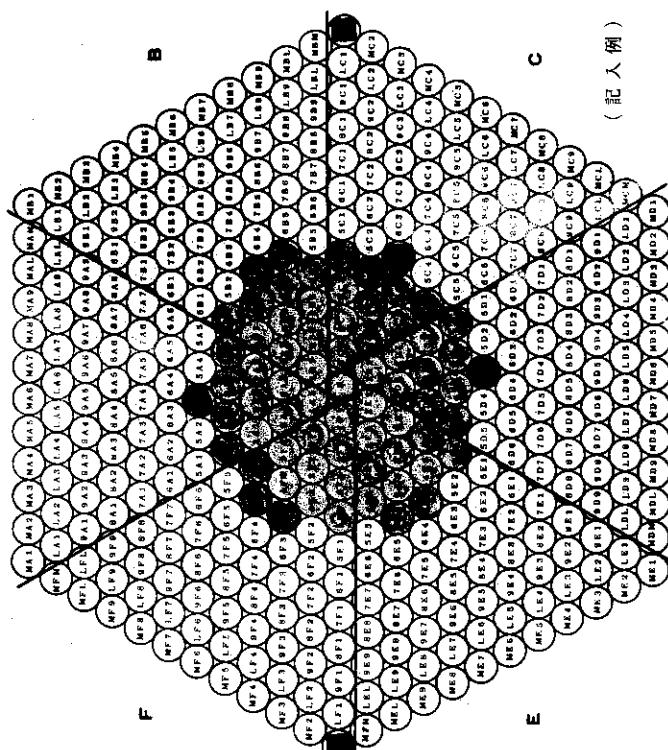
Fig. 4-11b

平均質臨界実験装置炉心装填図

平均質臨界実験装置炉心装填図

固定側

A



(記入例)

燃料棒
■ 制御棒
△ 安全棒

月 日

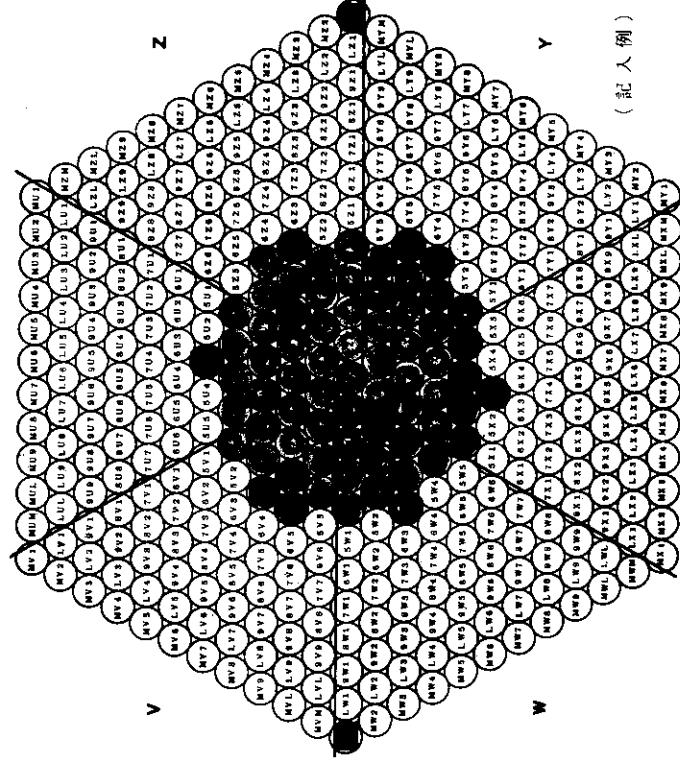
炉心番号 SHE-8
燃料棒数 70

Pattern Number : 12

Fig. 4-12a

移動側

U



(記入例)

燃料棒
■ 制御棒
△ 安全棒

月 日

炉心番号 SHE-8
燃料棒数 70

Pattern Number : 12

Fig. 4-12b

平均質臨界実験装置炉心装填図

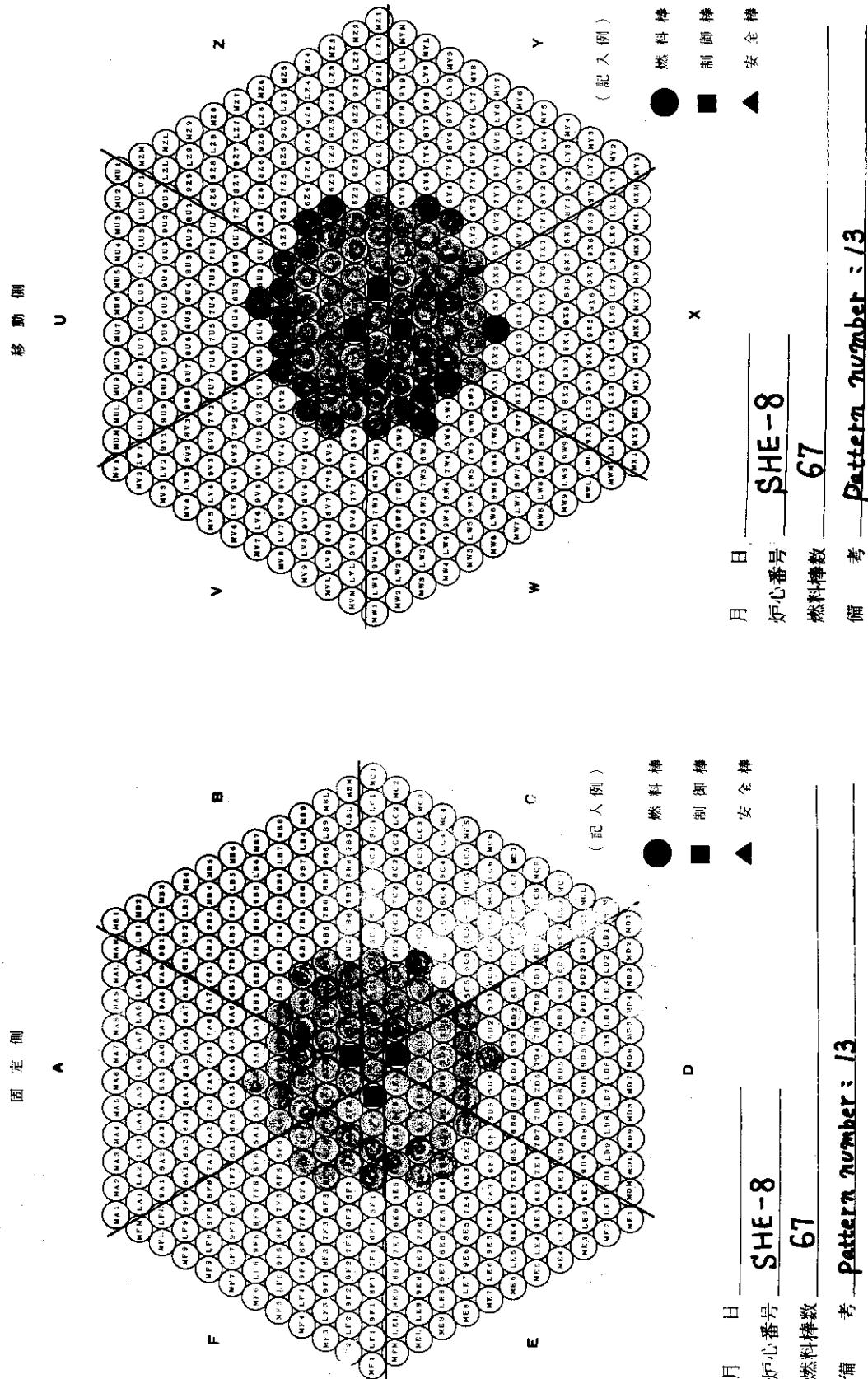


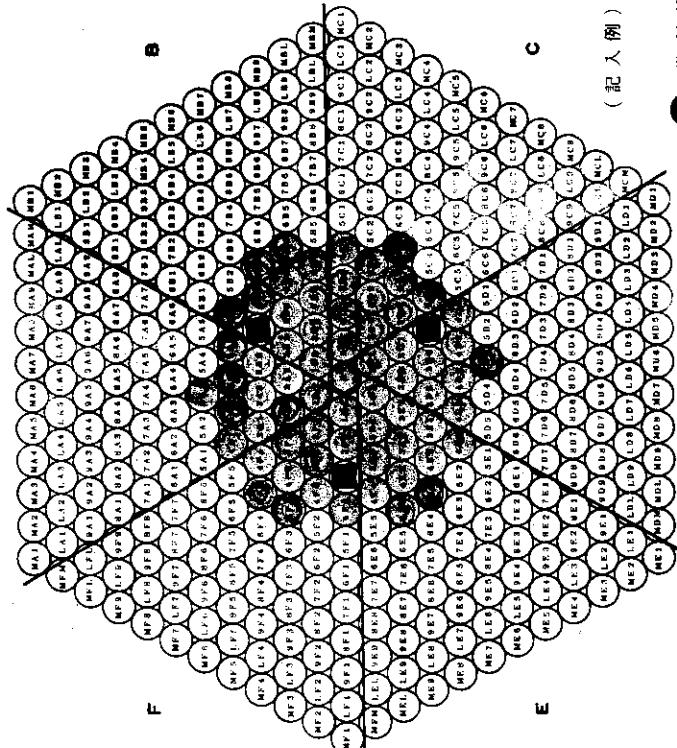
Fig. 4-13a
Fig. 4-13b

平均質臨界実験装置炉心装填図

平均質臨界実験装置炉心装填図

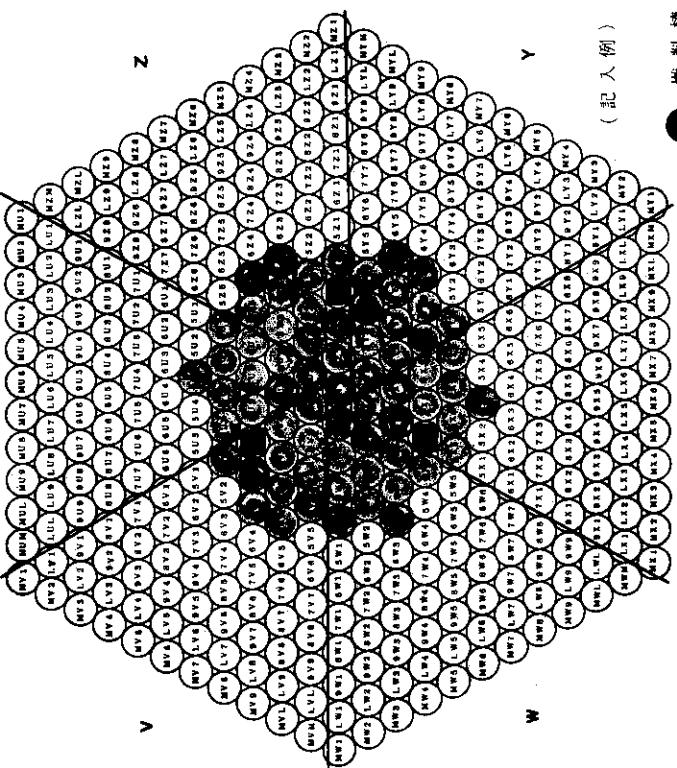
固定側

移動側

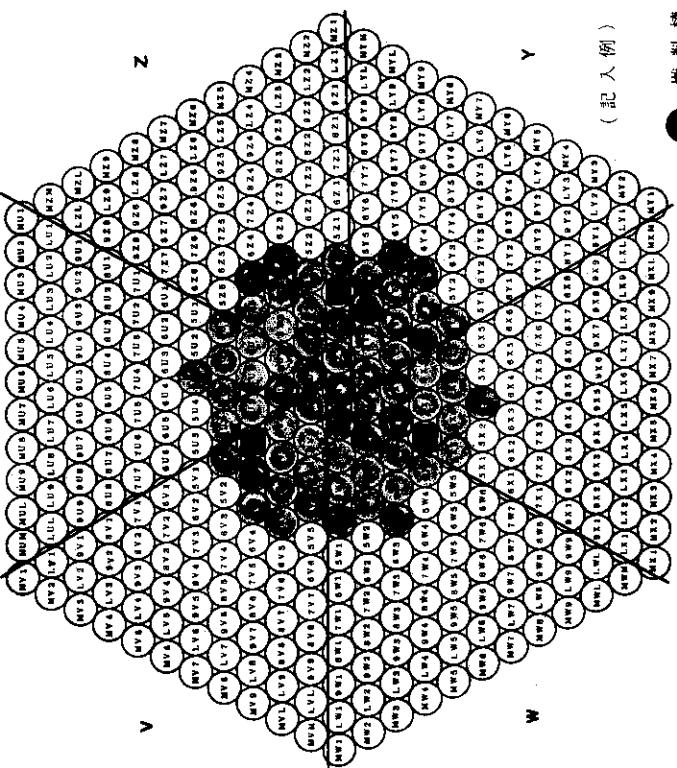


D 日月 SHE-8
E 炉心番号 67
F 燃料棒数 Pattern number : 14
G 備考 (記入例)

X 日月 SHE-8
Y 炉心番号 67
Z 燃料棒数 Pattern number : 14
U 備考 (記入例)



X 日月 SHE-8
Y 炉心番号 67
Z 燃料棒数 Pattern number : 14
U 備考 (記入例)



X 日月 SHE-8
Y 炉心番号 67
Z 燃料棒数 Pattern number : 14
U 備考 (記入例)

Fig. 4-14a

Fig. 4-14b

平均質臨界実験装置炉心装填図

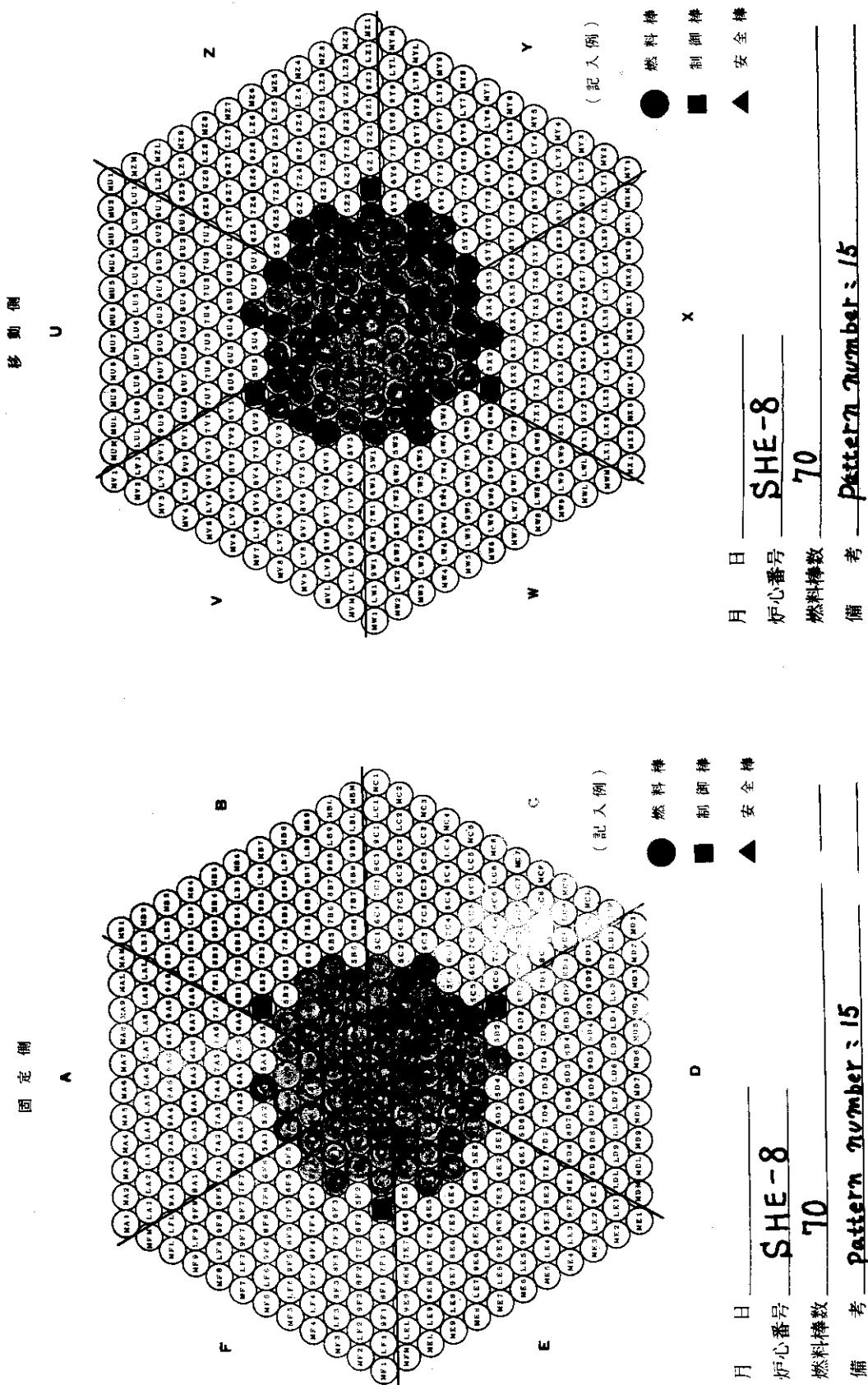


Fig. 4-15a

Fig. 4-15b

平均質臨界実験装置炉心装填図

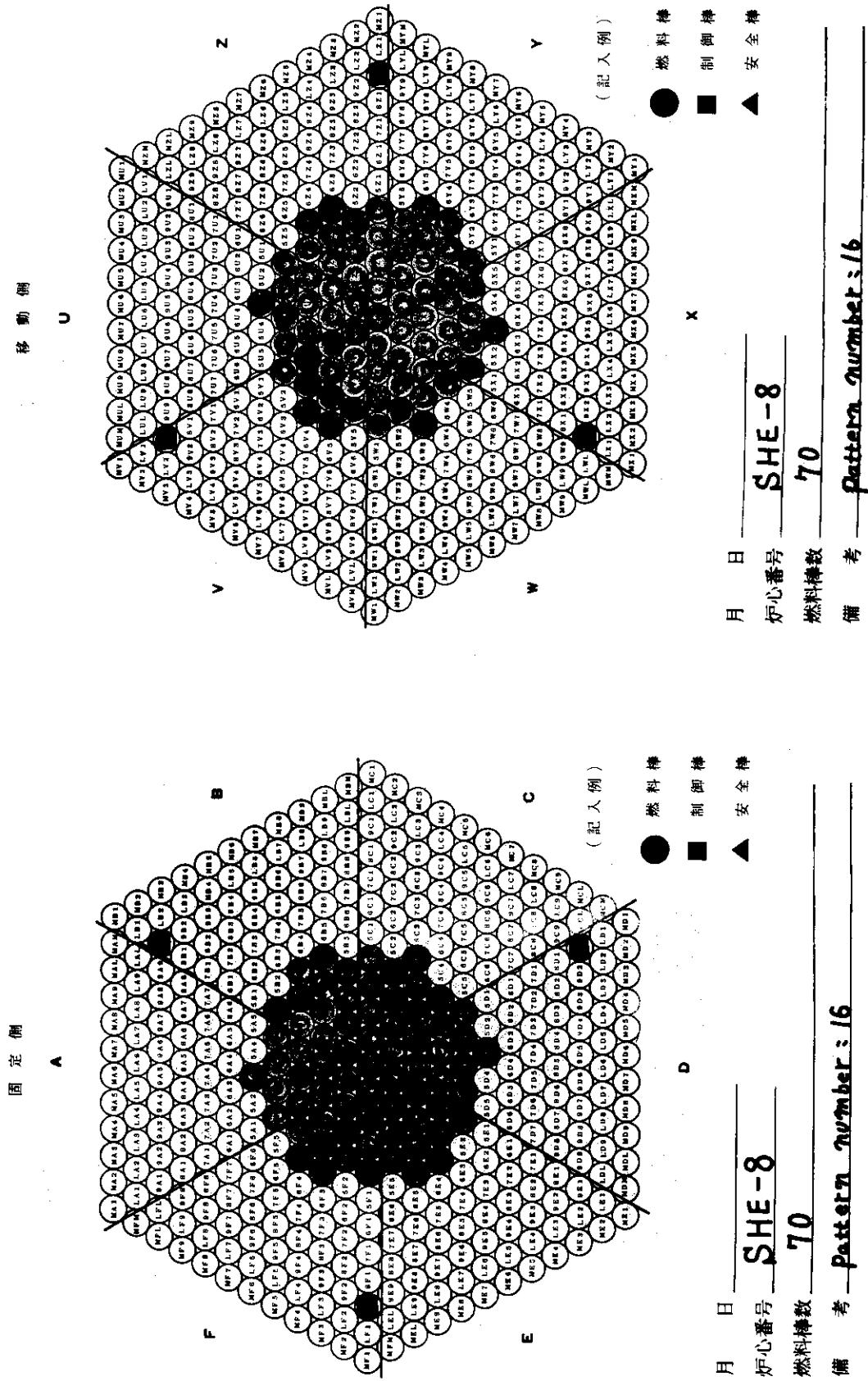


Fig. 4-16a

Fig. 4-16b

平均質臨界実験装置炉心装填図

半均質臨界実験装置炉心装填図

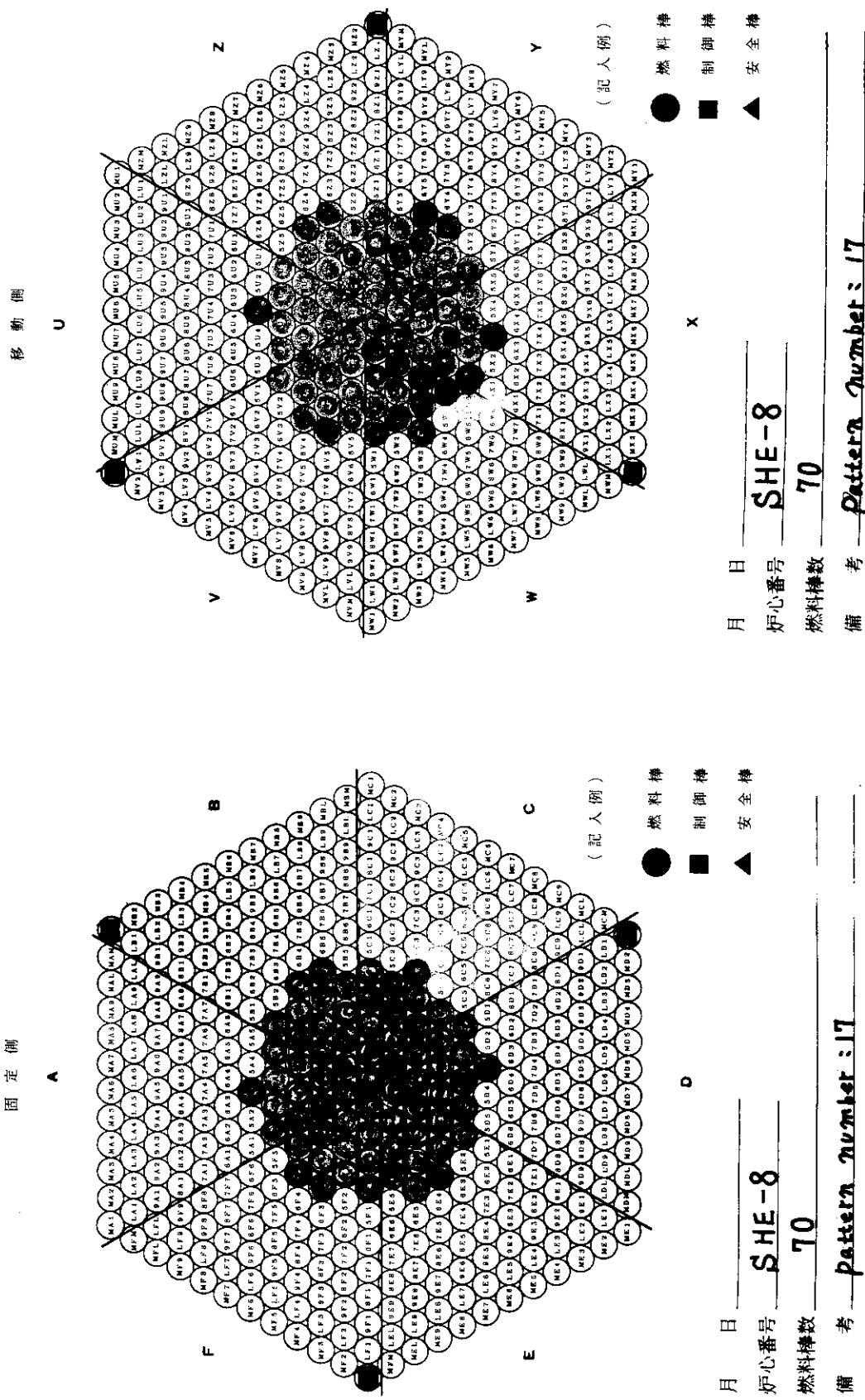


Fig. 4-17a

Fig. 4-17b

半均質臨界實驗裝置爐心裝填圖

平均質臨界實驗裝置圖

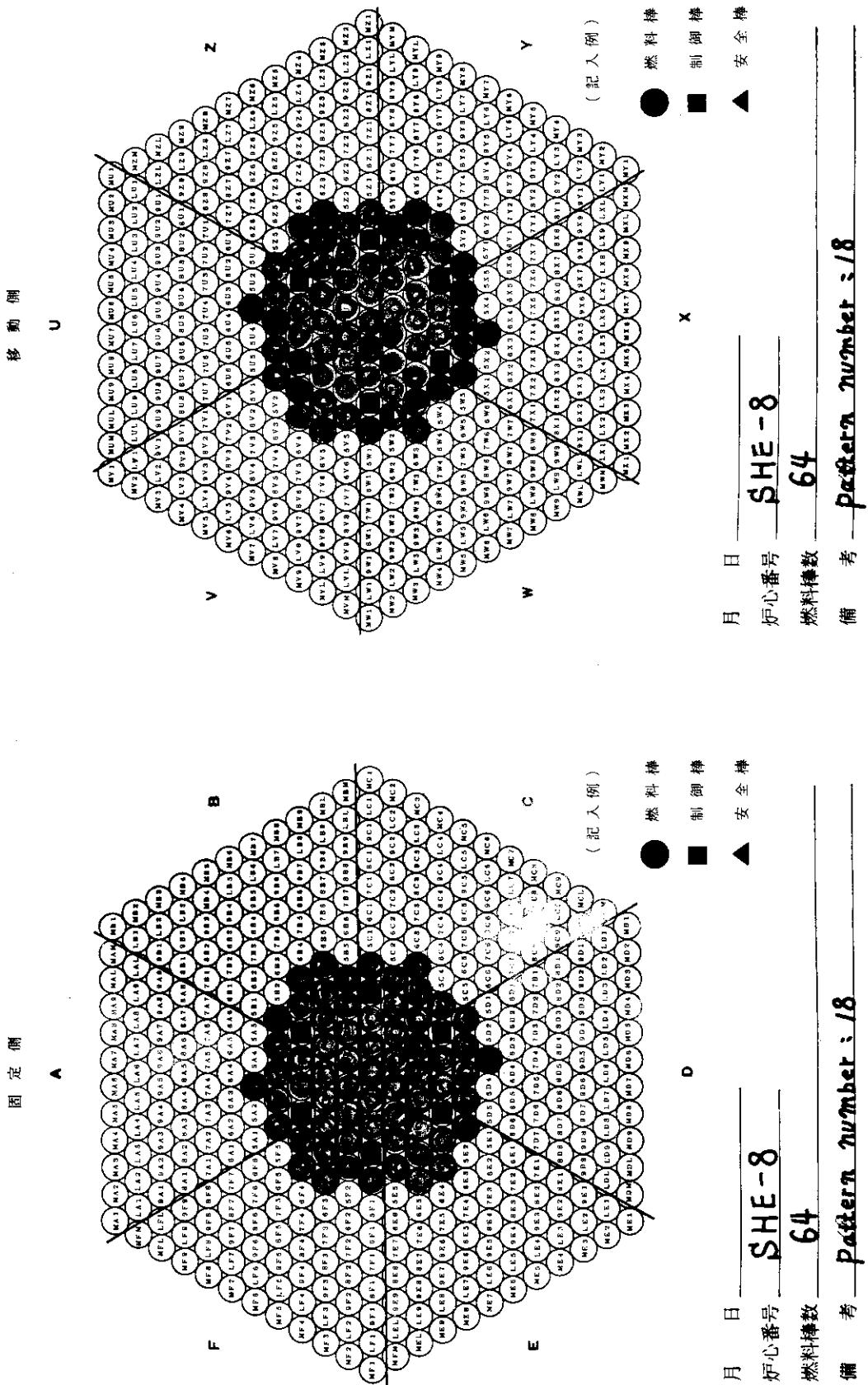


Fig. 4-18a

圖 填裝置心爐驗美臨質均半

半均質臨界實驗裝置爐心裝填圖

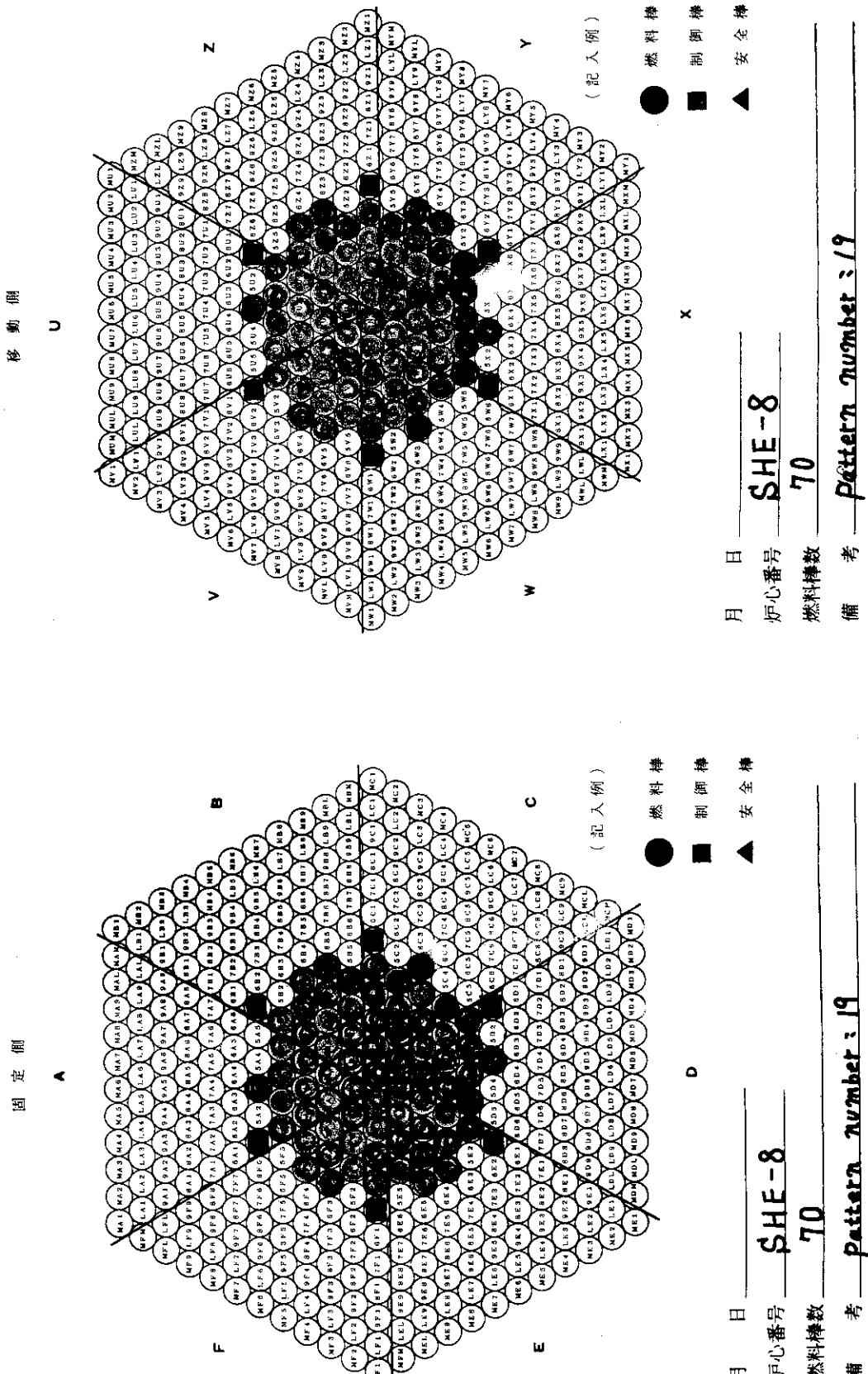


Fig. 4-19a

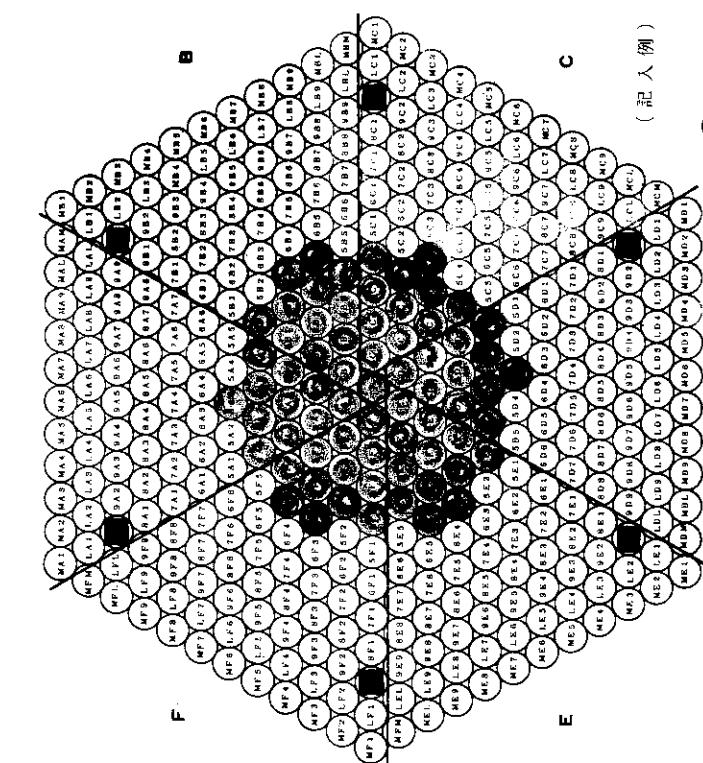
Fig. 4-19b

平均質臨界実験装置炉心装填図

半均質臨界実験装置炉心装填図

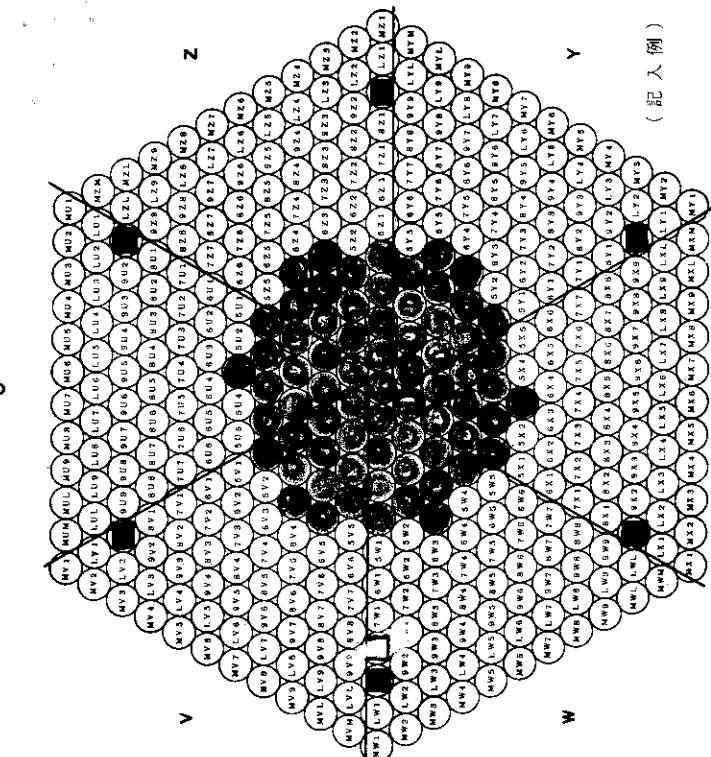
固定側

移動側



月 日 炉心番号 SHE-8
燃料棒数 70
備考 Pattern number : 20

Fig. 4-20a



月 日 炉心番号 SHE-8
燃料棒数 70
備考 Pattern number : 20

Fig. 4-20b

平均質臨界実験装置炉心装填図

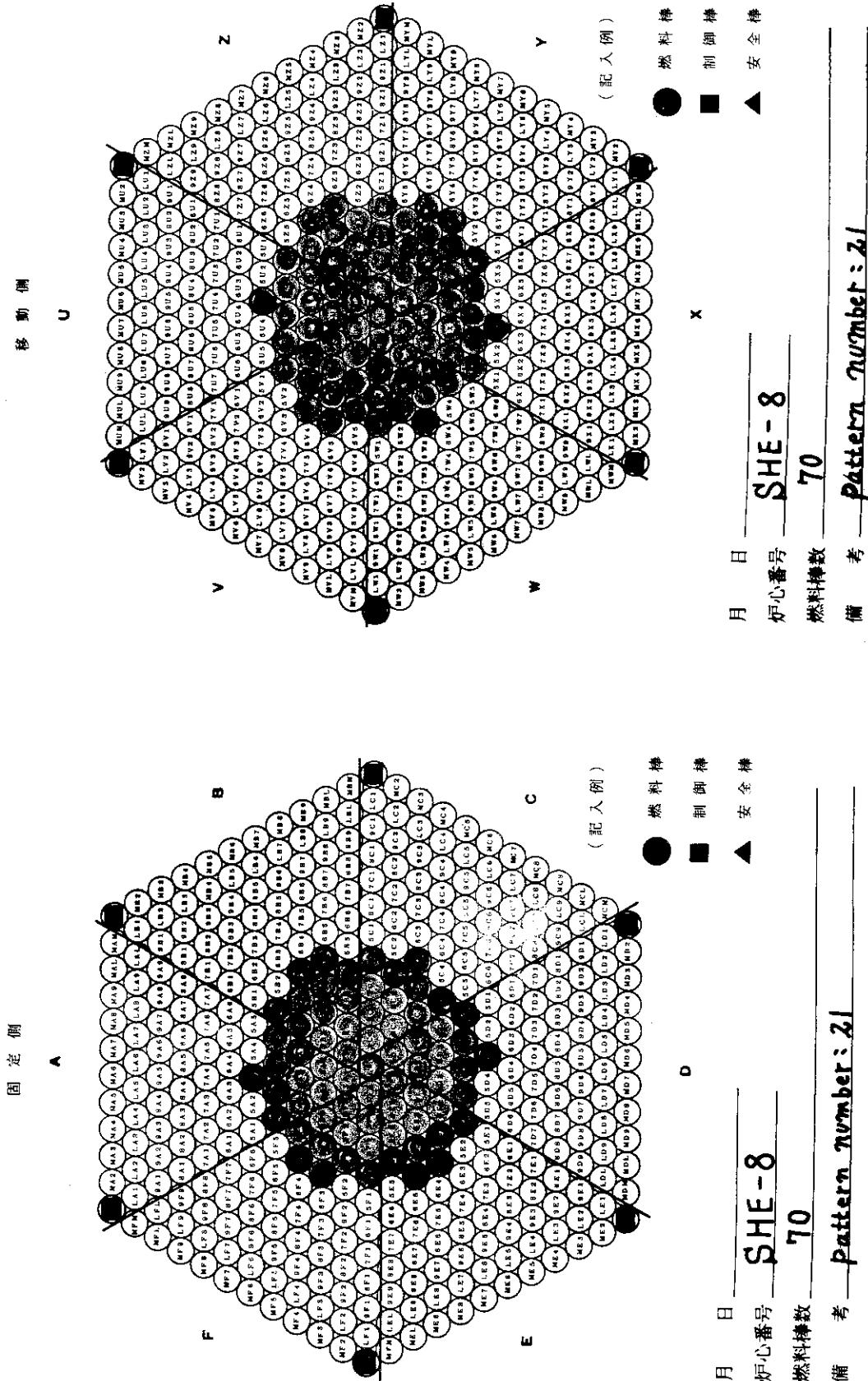


Fig. 4-21a

Fig. 4-21b

平均質臨界実験装置炉心装填図

圖填裝爐置實驗裝置半均質臨界

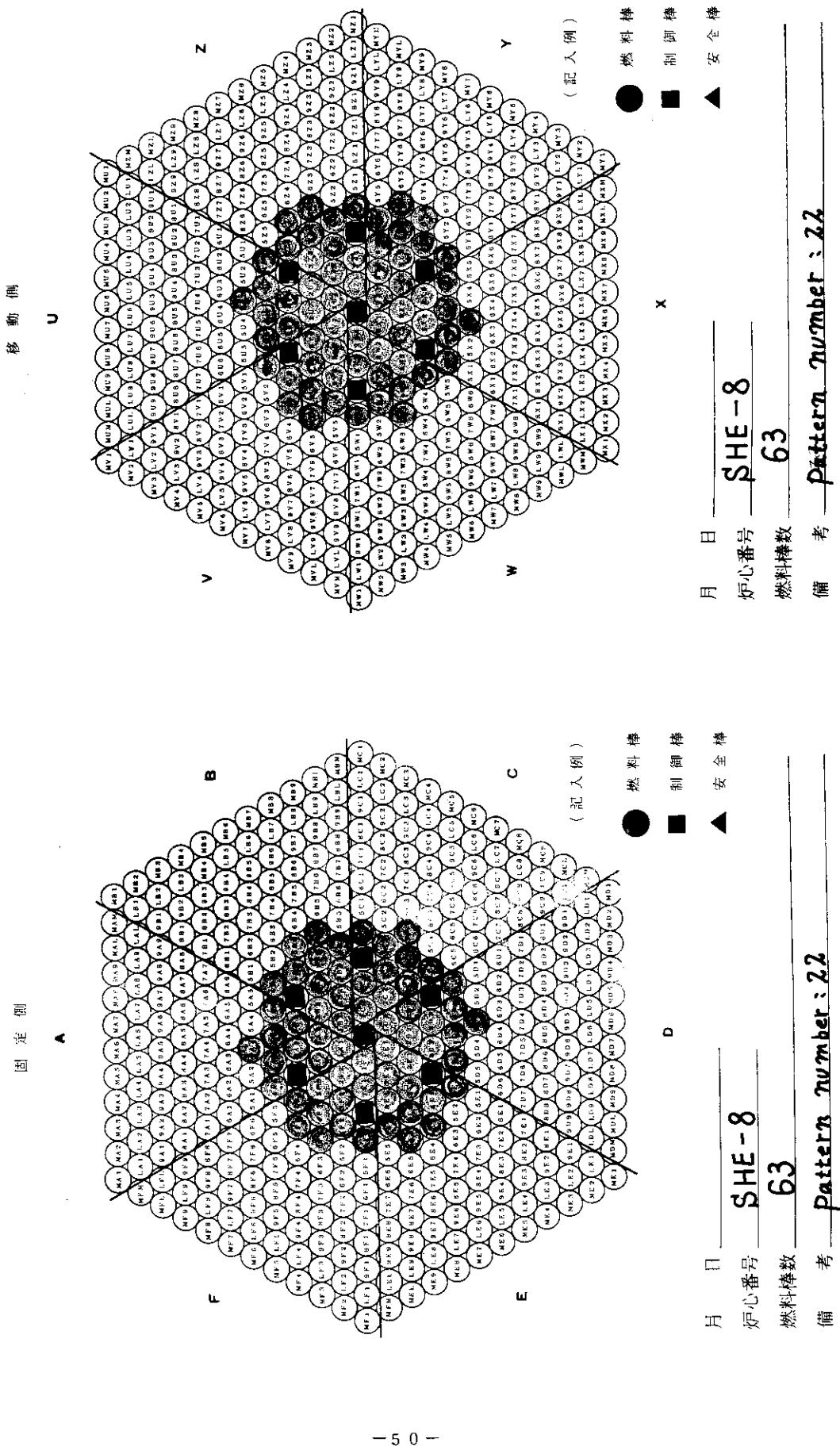


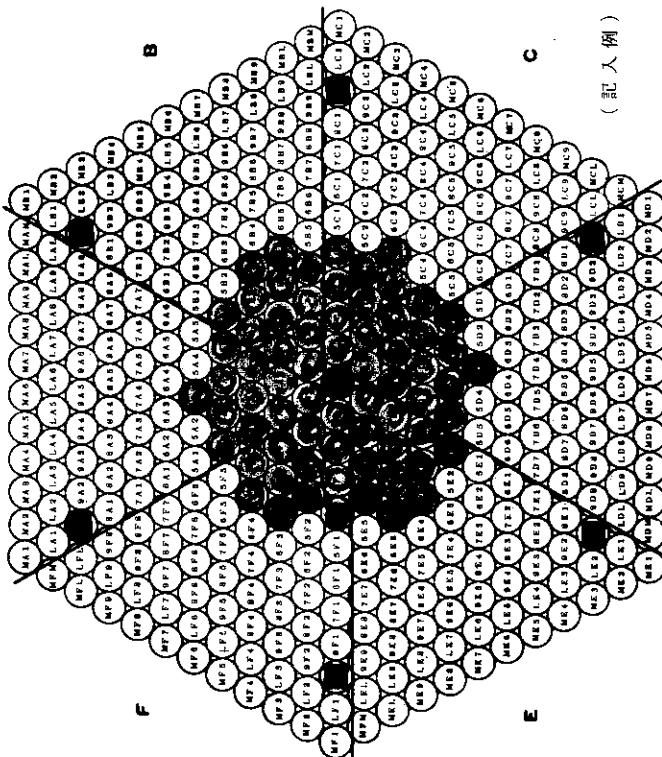
Fig. 4-22a

Fig. 4-22b

平均質臨界実験装置炉心装填図

固定側

A



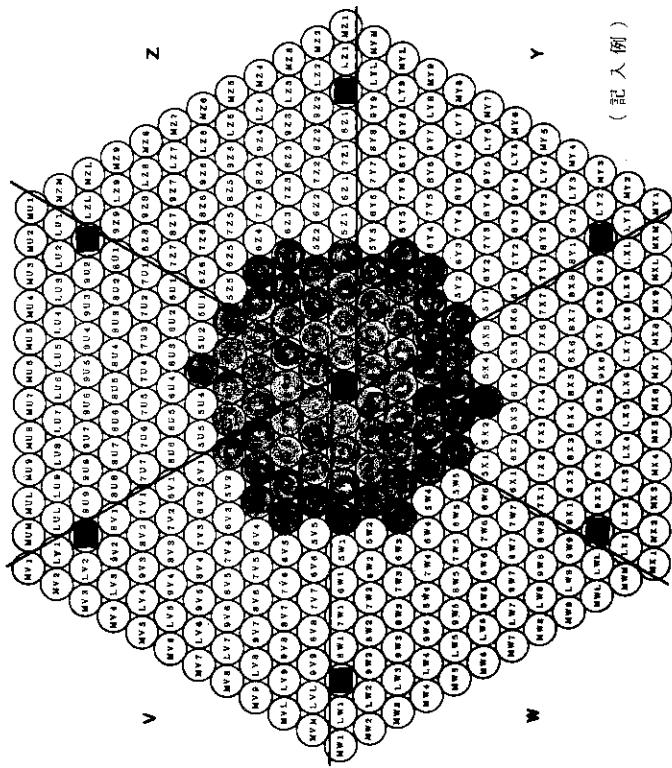
- 燃料棒
 - 制御棒
 - ▲ 安全棒
- 月 日 SHE-8
炉心番号 69
燃料棒数

備考 pattern number: 24

平均質臨界実験装置炉心装填図

移動側

U



- 燃料棒
 - 制御棒
 - ▲ 安全棒
- 月 日 SHE-8
炉心番号 69
燃料棒数

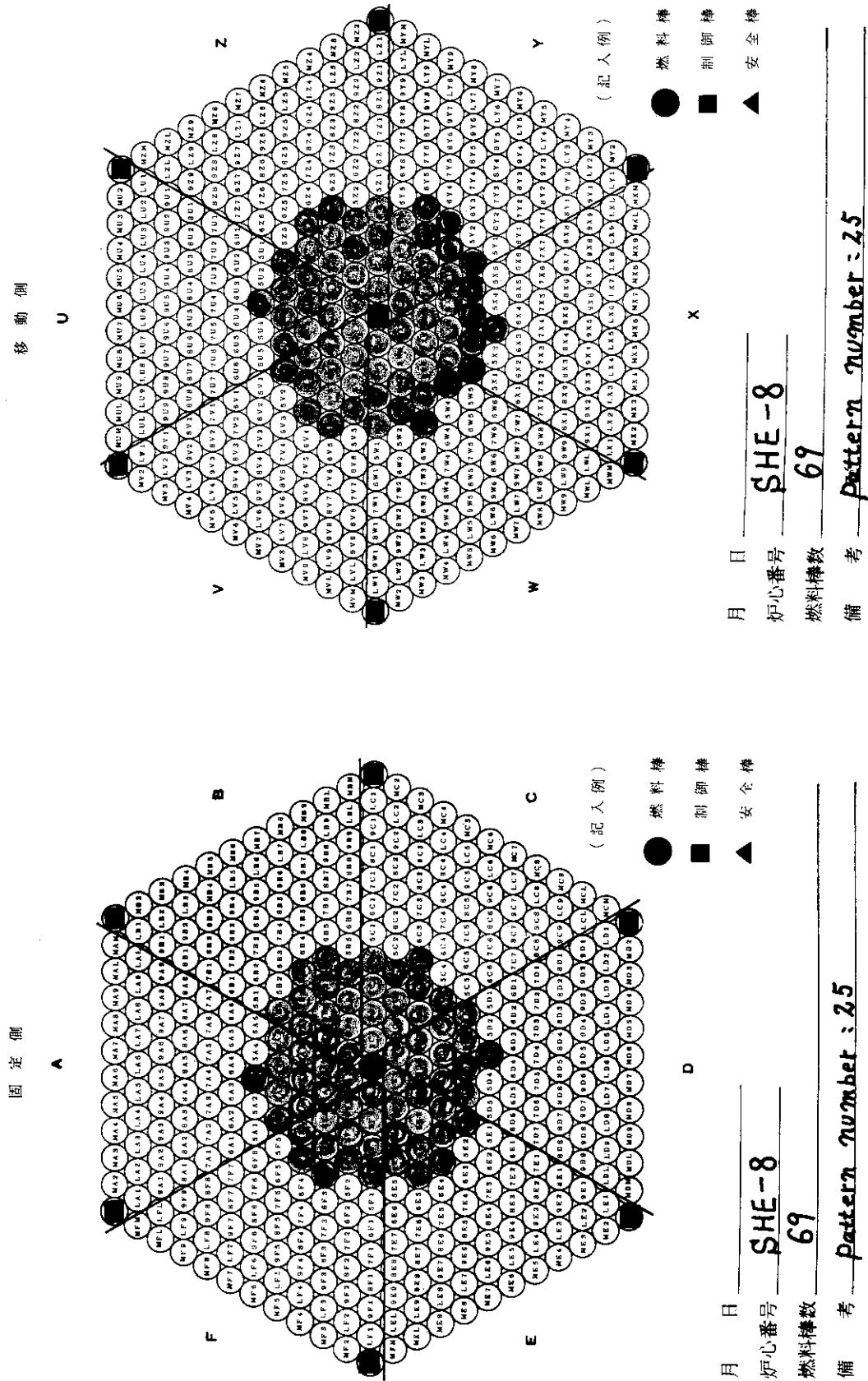
備考 pattern number: 24

Fig. 4-24a

Fig. 4-24b

平均質臨界実験装置炉心装填図

半平均質臨界実験装置炉心装填図



半均質臨界実験装置炉心装填図

半均質臨界實驗裝置圖

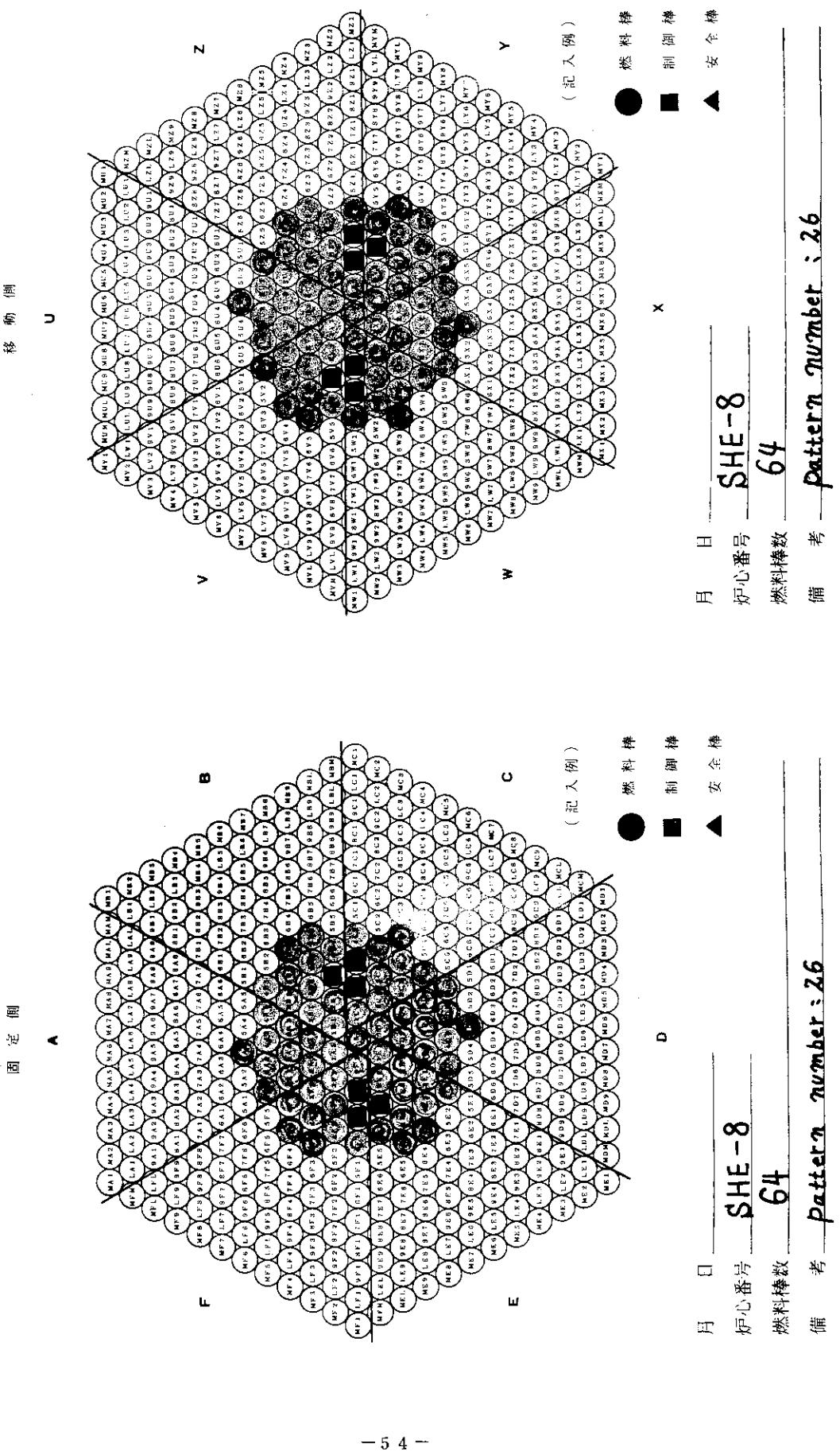


Fig. 4-26a

□ SHE-8
考 pattern number
月 烟心番号
然然然然然然然然
備

日 番号 考 備

Fig. 4-26b

圖填裝裝心爐置駿實臨界質均半

均質實驗裝置圖

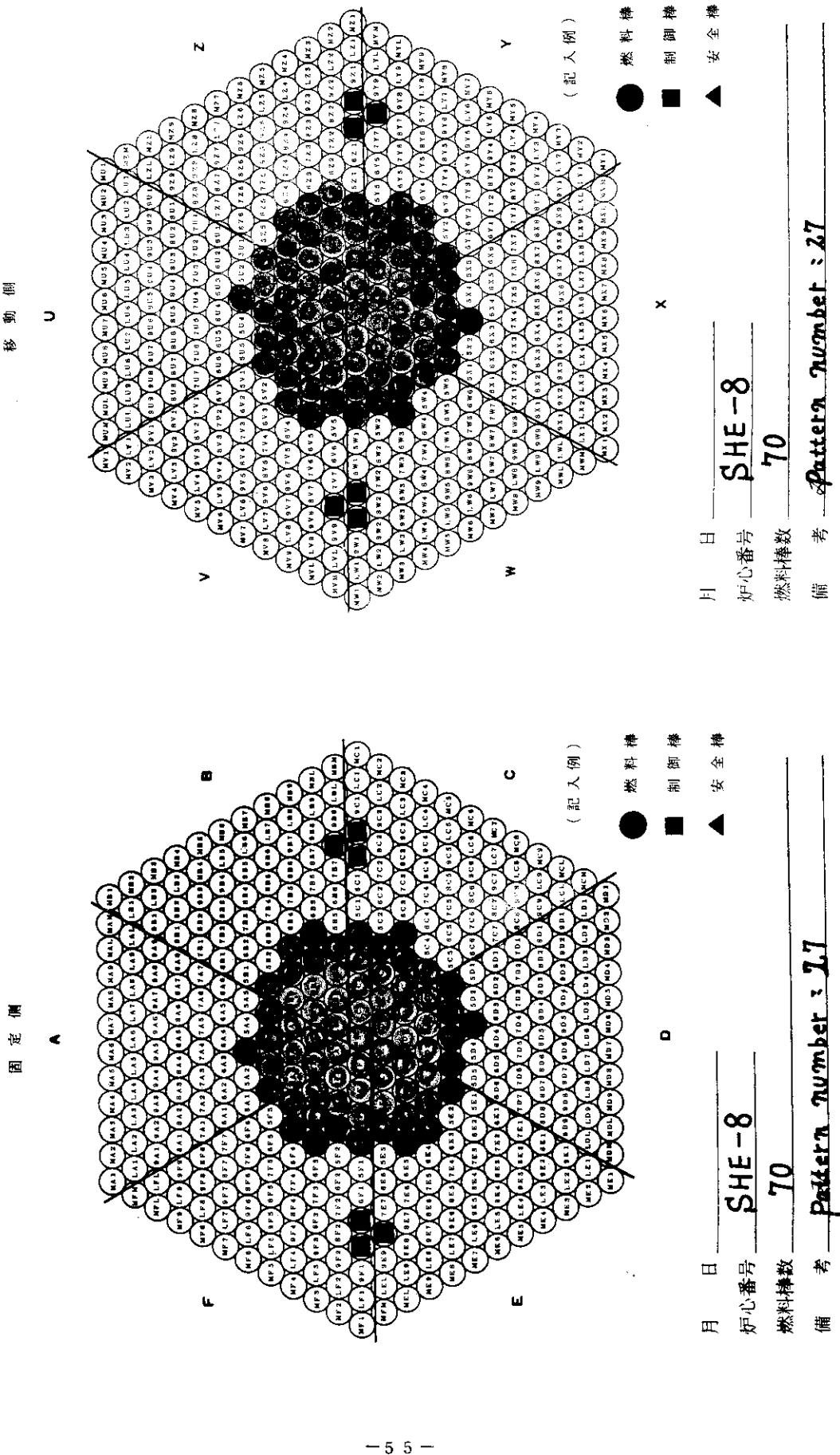


Fig. 4-27a

Fig. 4-27b

國 壓 塊 裝 置 爐 心 實 驗 際 境 質 幾 均 半

圖 構 墓 実 驗 裝 置 煙 爐 心 裝 墓 墓

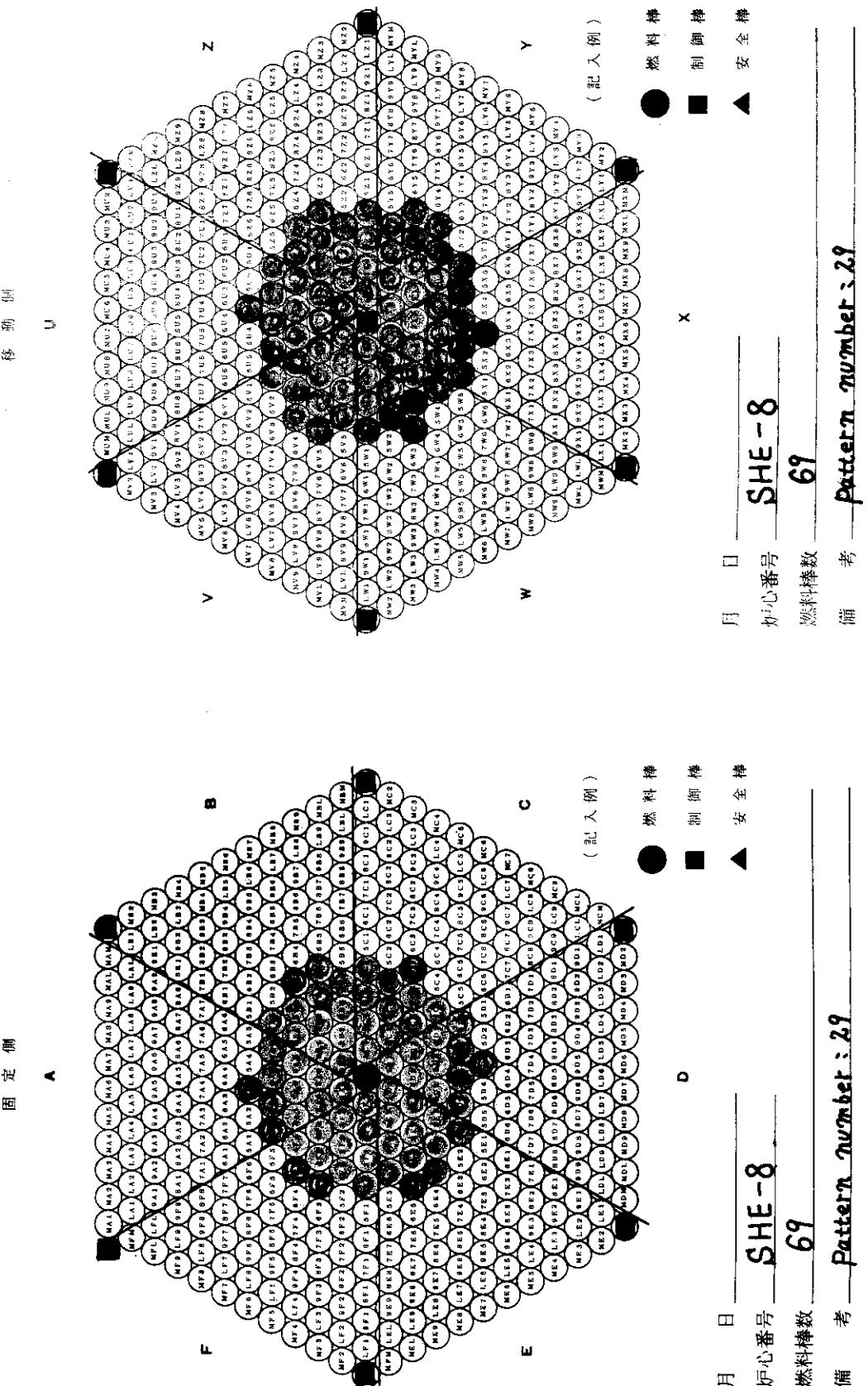


Fig. 4-29a

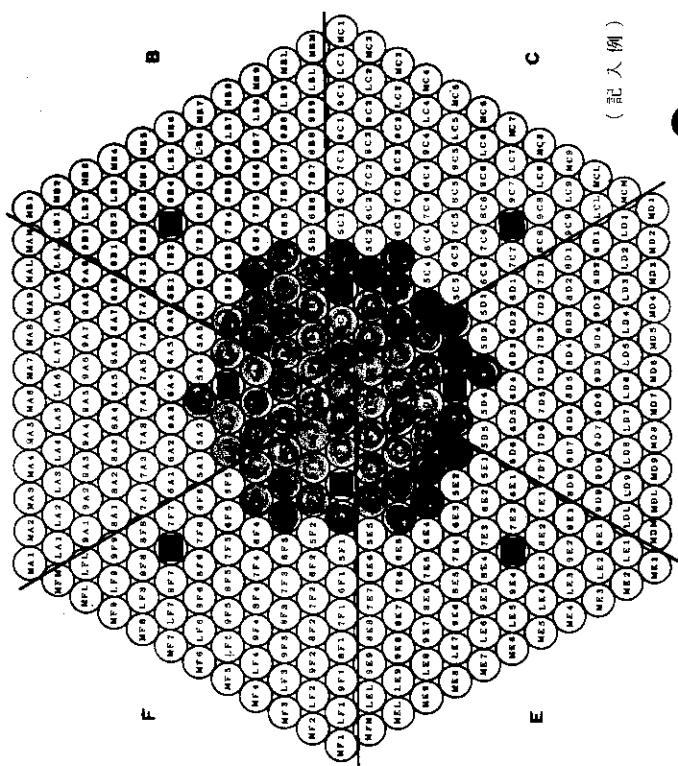
Fig. 4-29b

平均質臨界実験装置炉心装填図

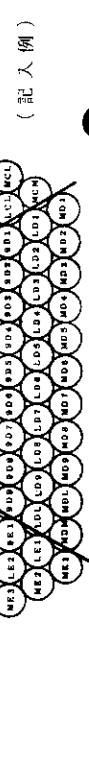
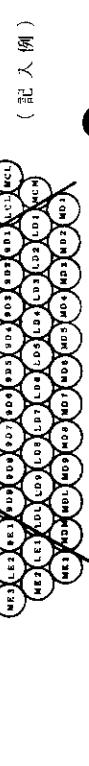
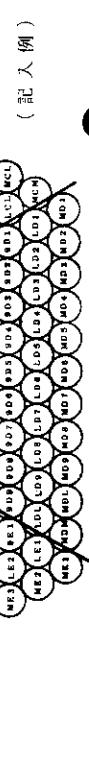
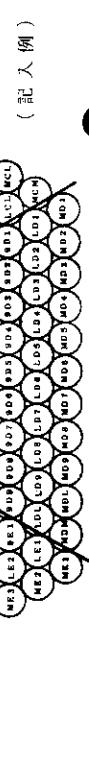
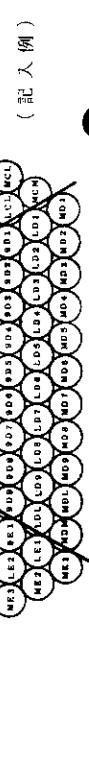
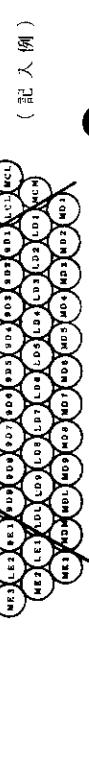
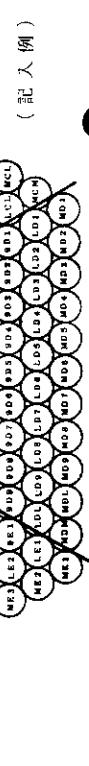
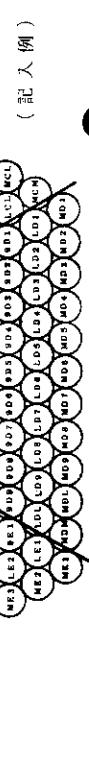
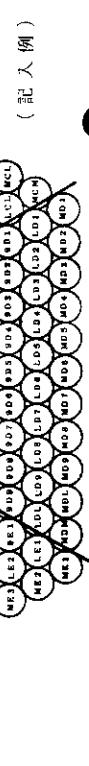
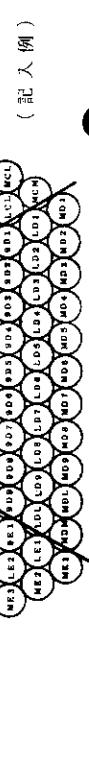
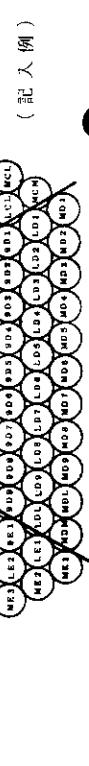
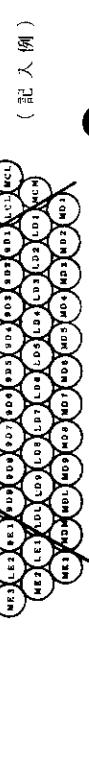
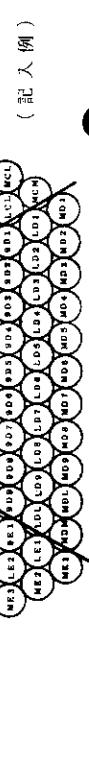
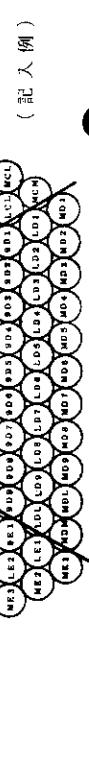
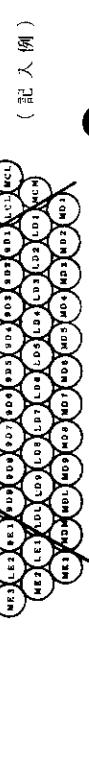
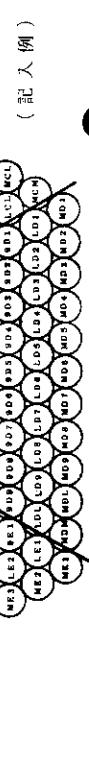
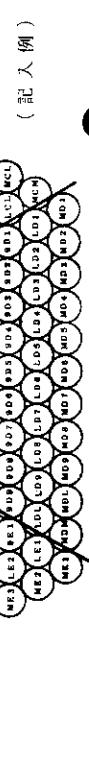
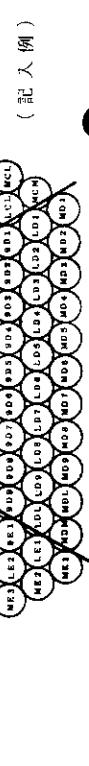
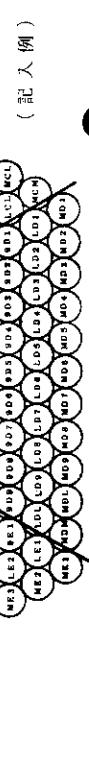
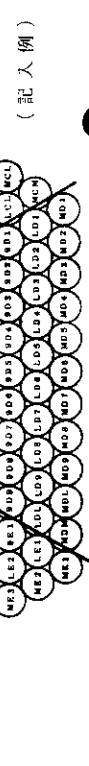
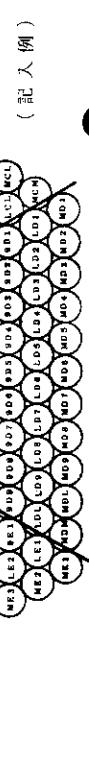
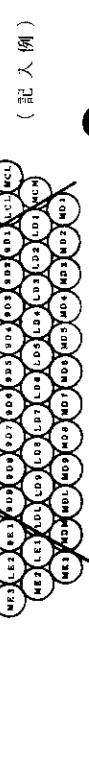
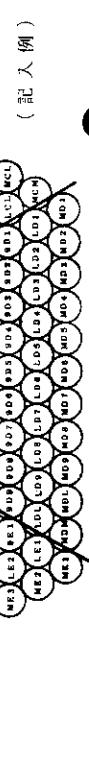
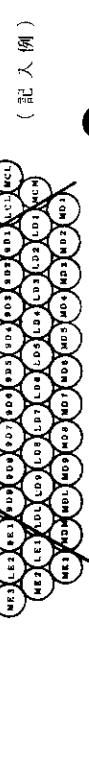
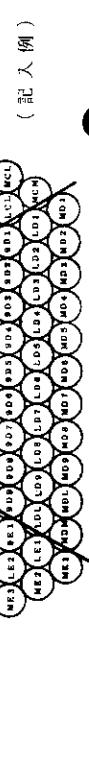
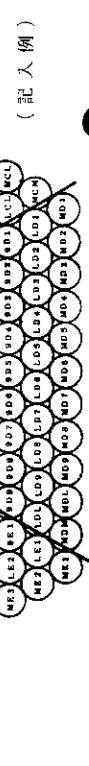
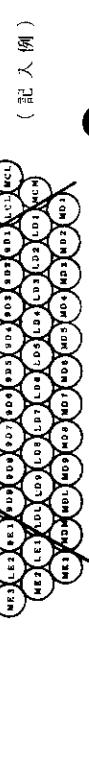
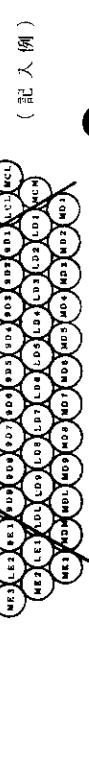
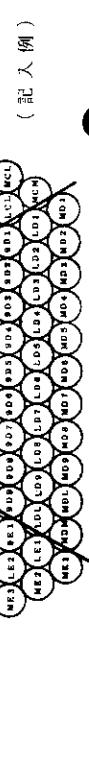
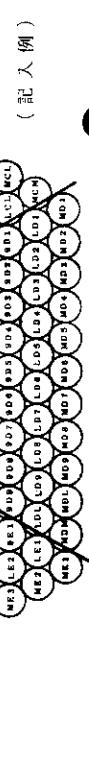
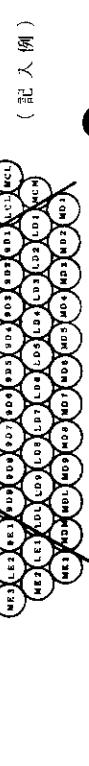
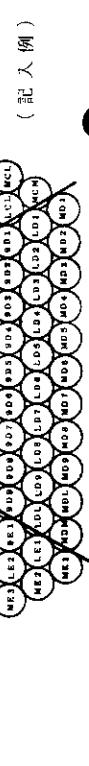
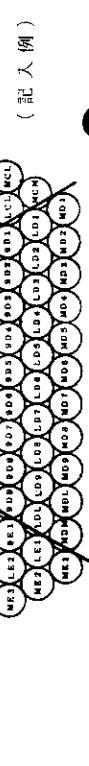
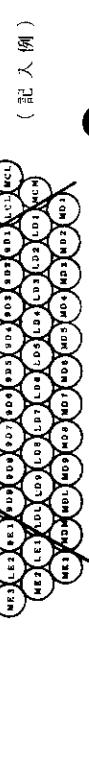
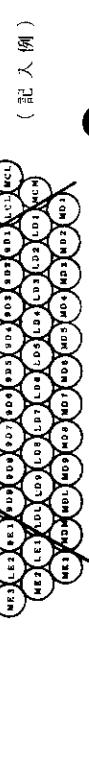
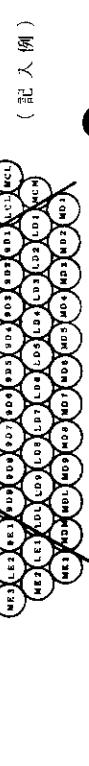
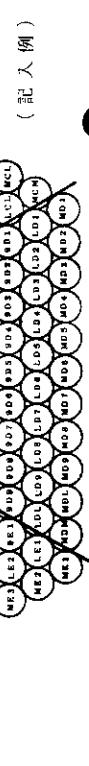
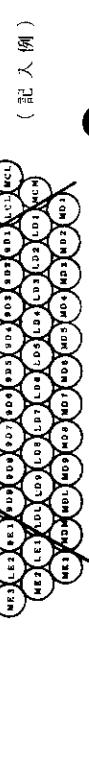
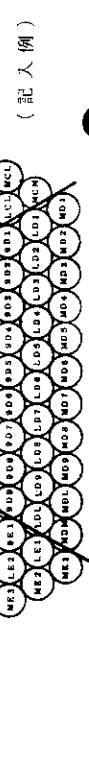
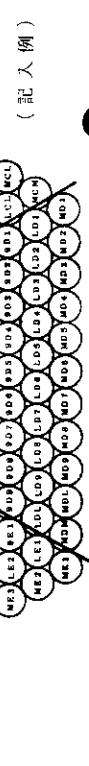
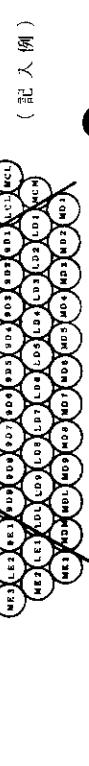
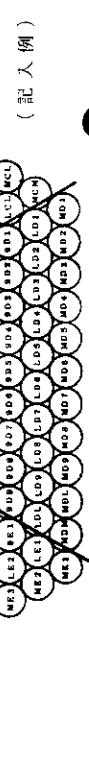
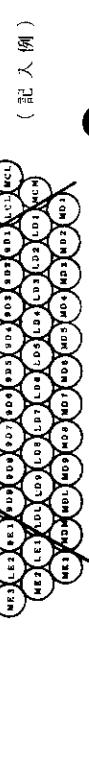
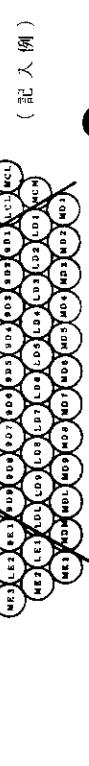
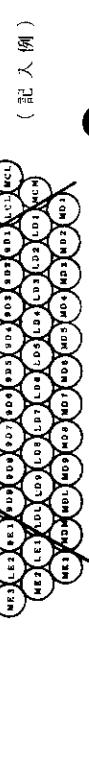
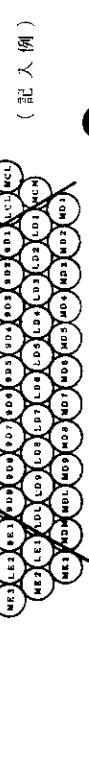
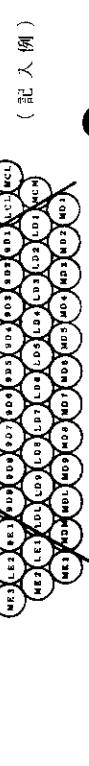
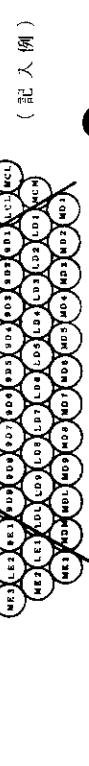
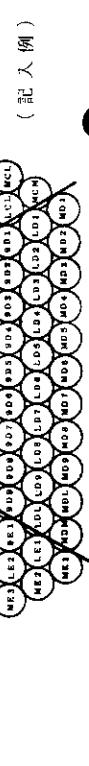
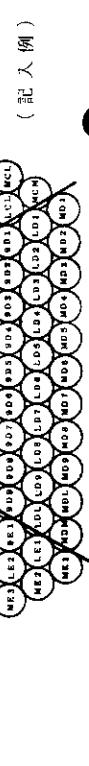
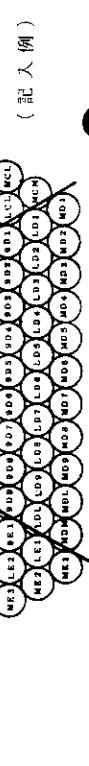
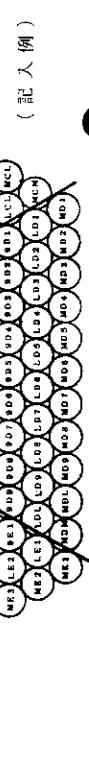
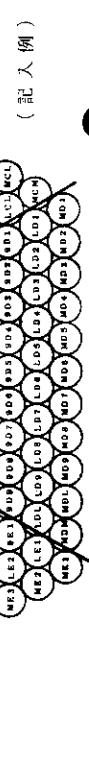
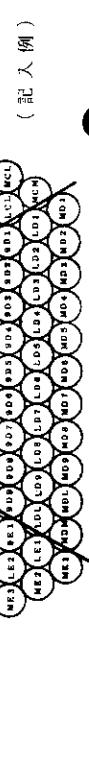
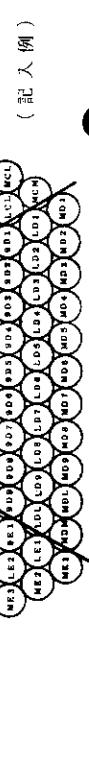
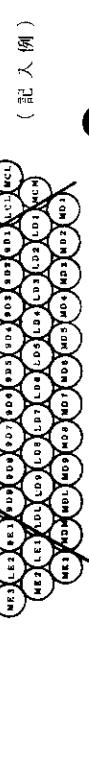
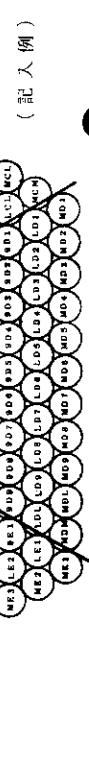
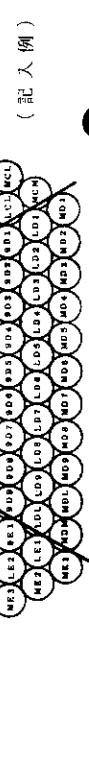
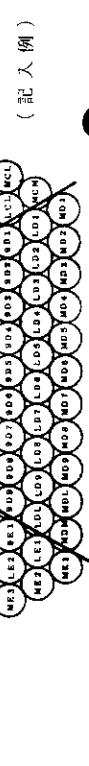
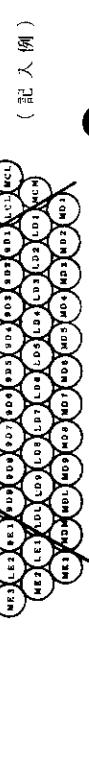
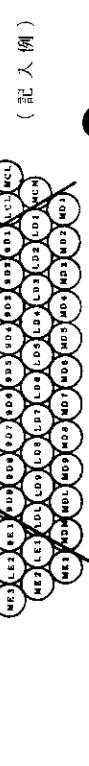
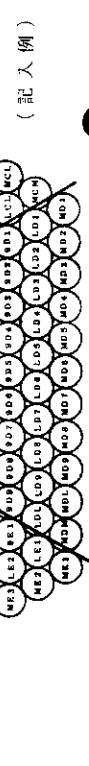
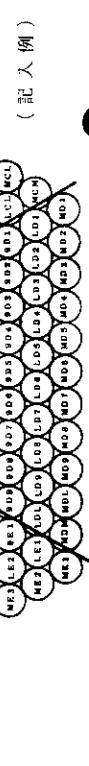
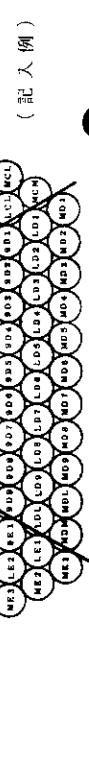
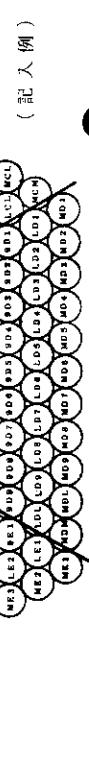
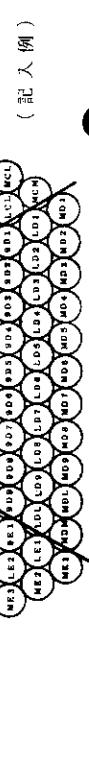
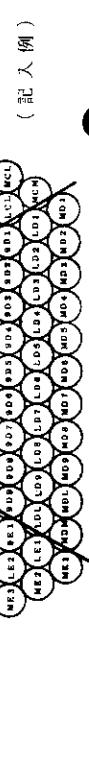
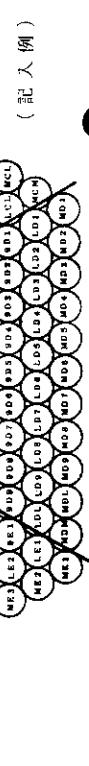
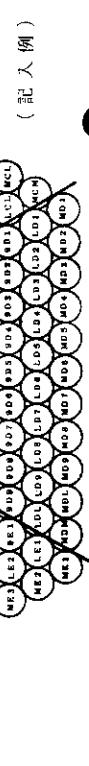
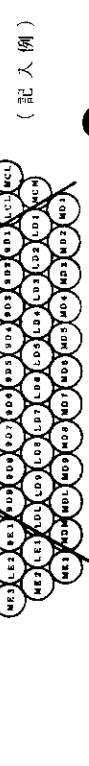
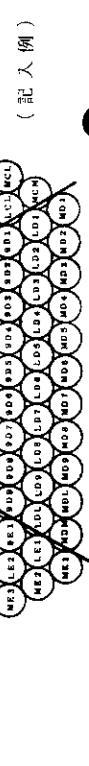
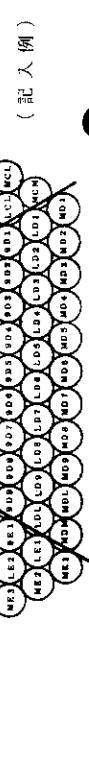
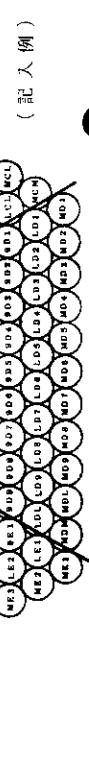
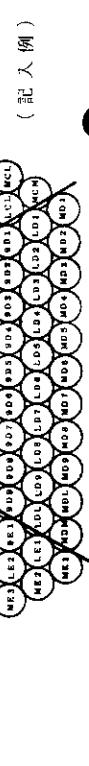
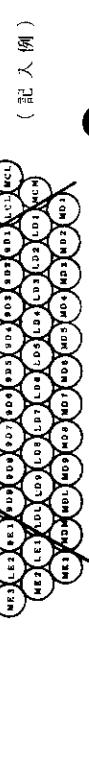
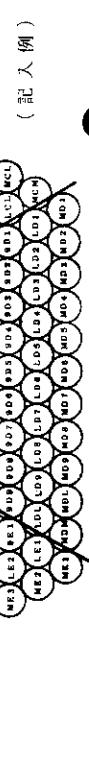
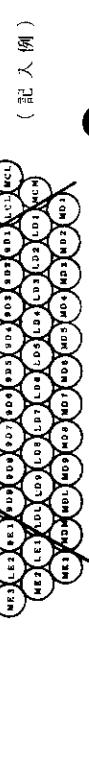
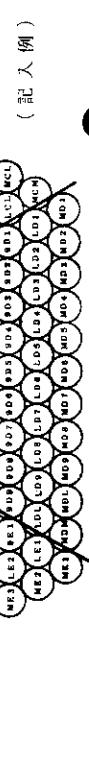
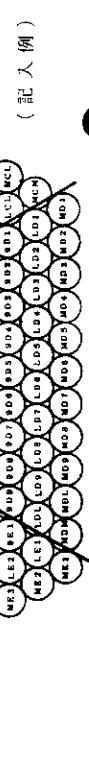
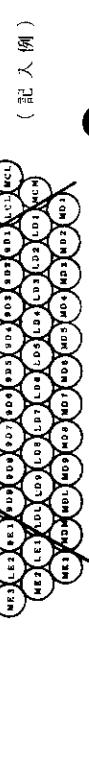
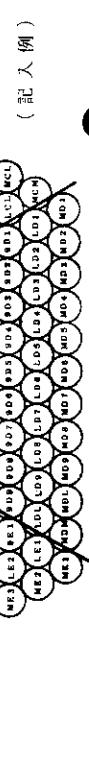
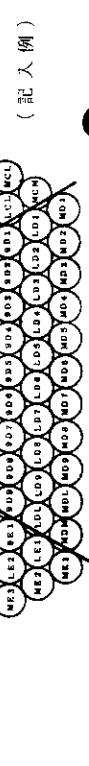
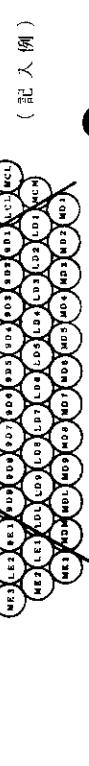
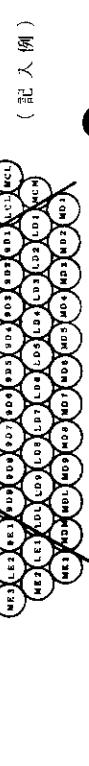
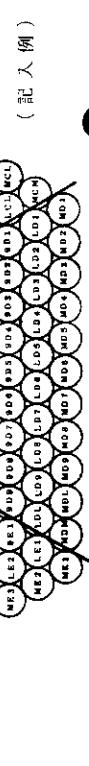
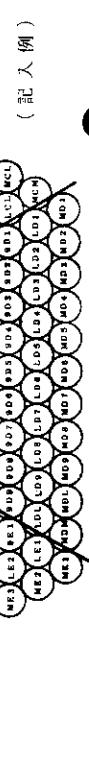
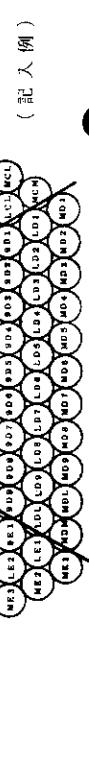
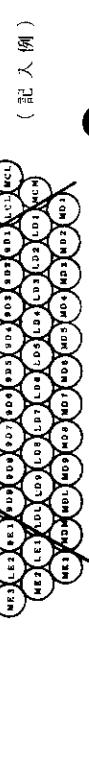
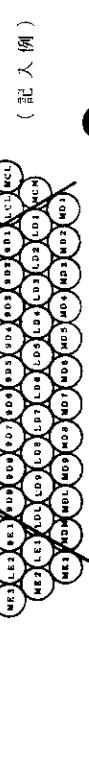
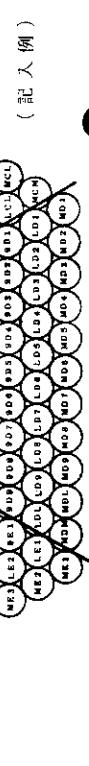
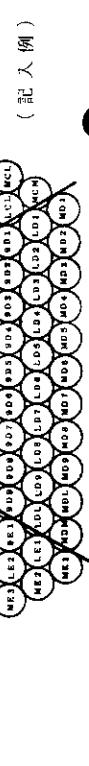
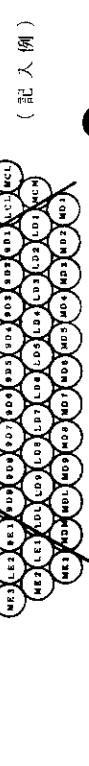
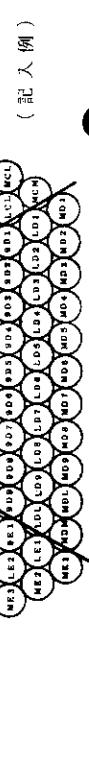
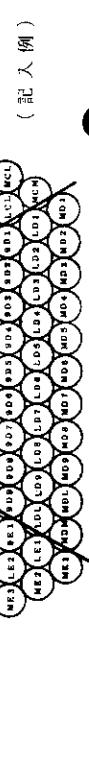
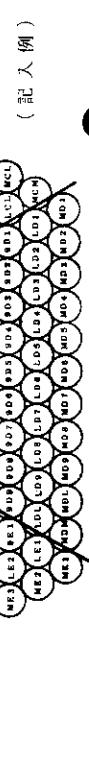
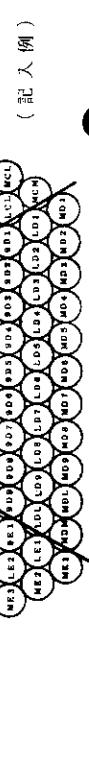
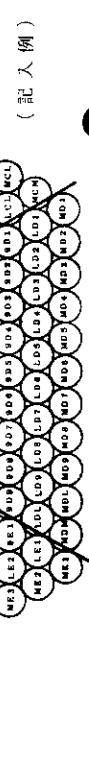
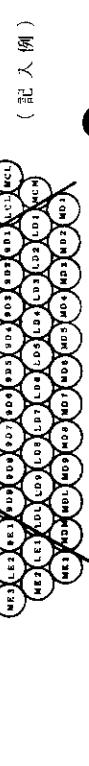
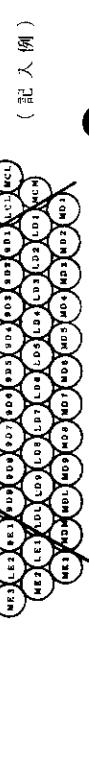
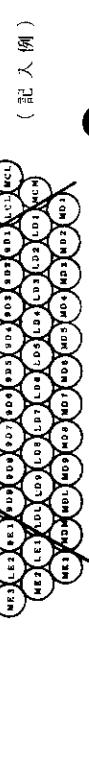
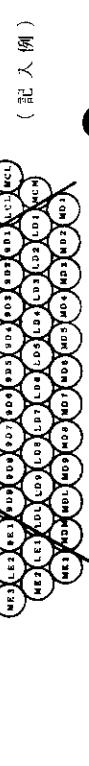
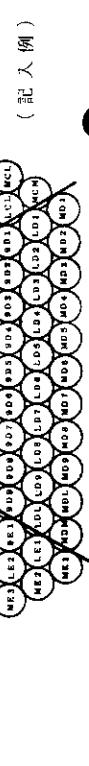
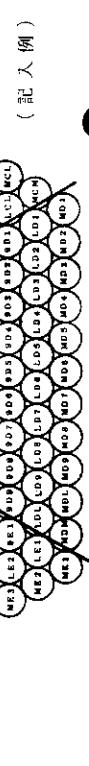
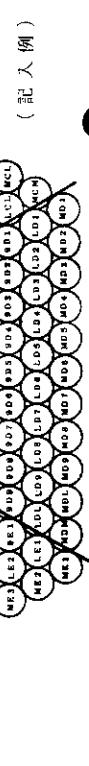
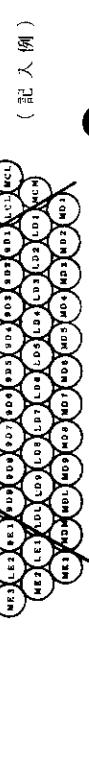
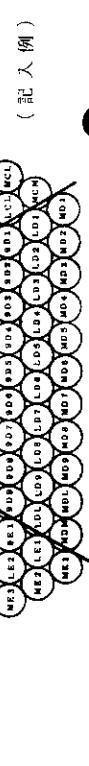
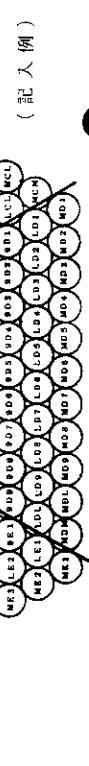
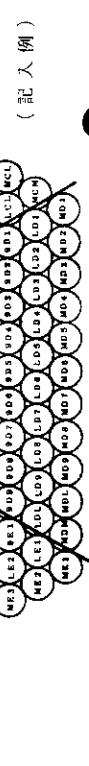
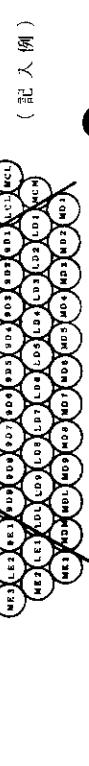
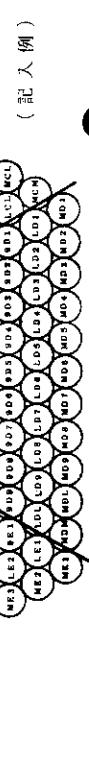
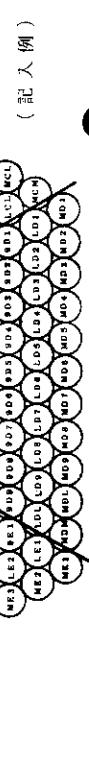
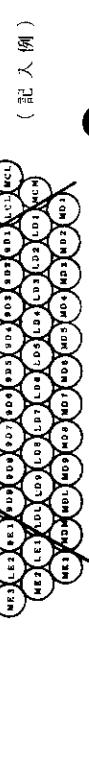
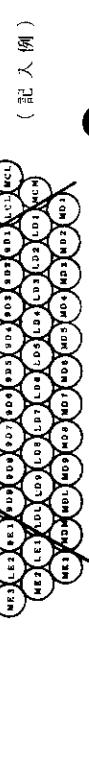
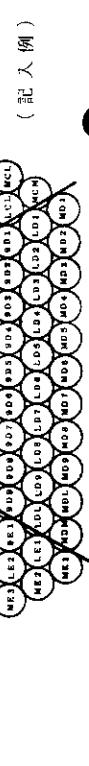
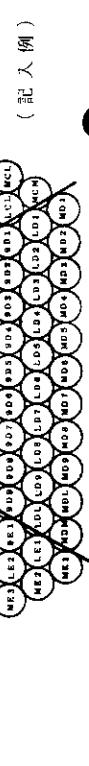
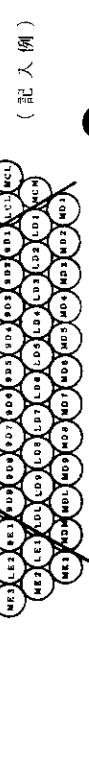
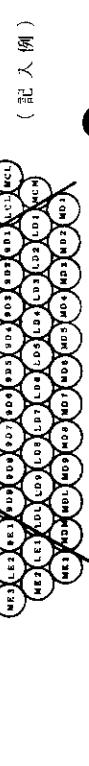
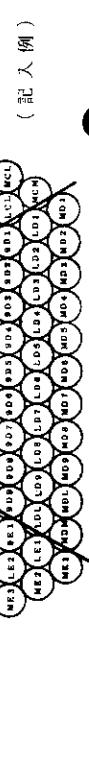
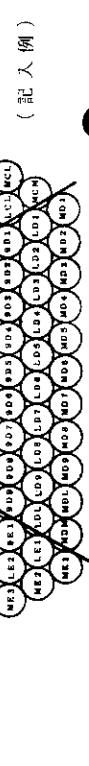
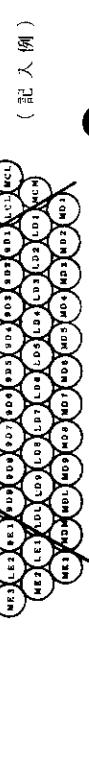
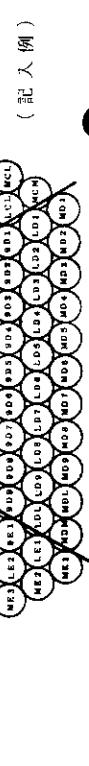
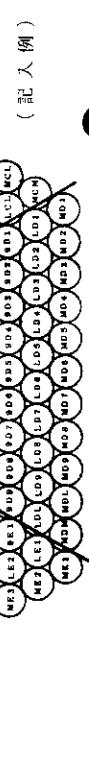
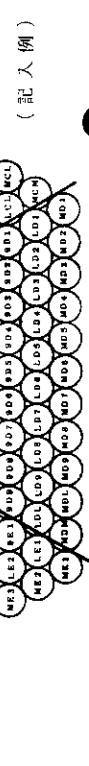
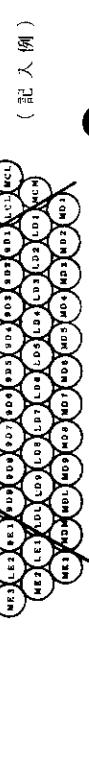
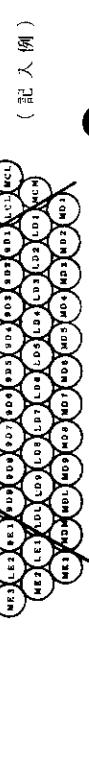
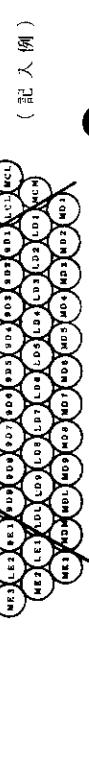
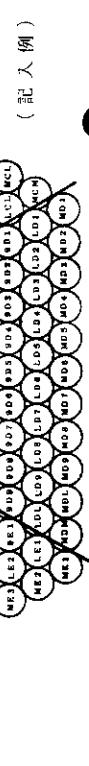
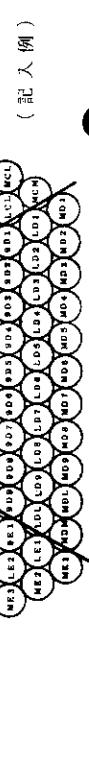
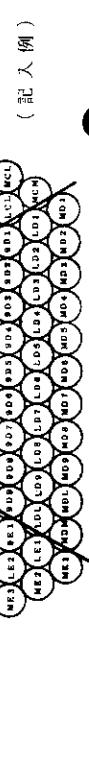
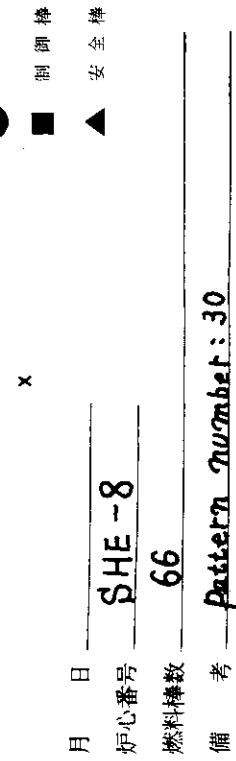
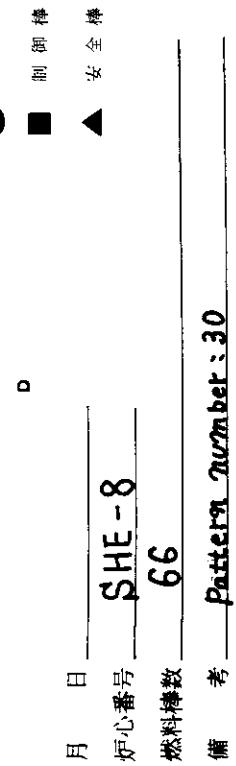
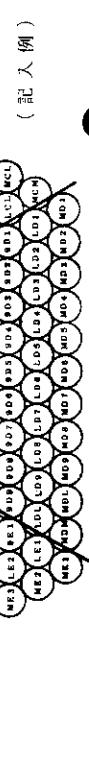
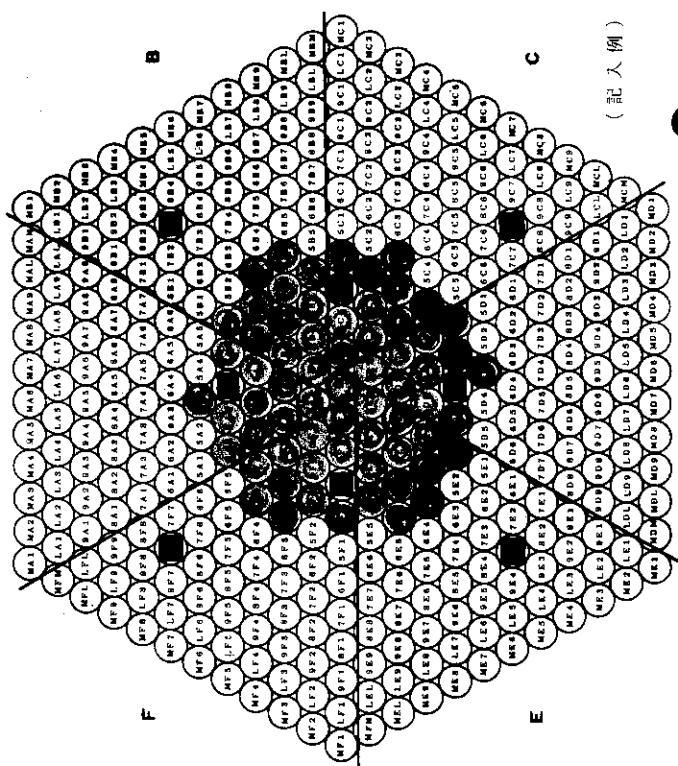
平均質臨界実験装置炉心装填図

固定側

移動側



I 5 8 I



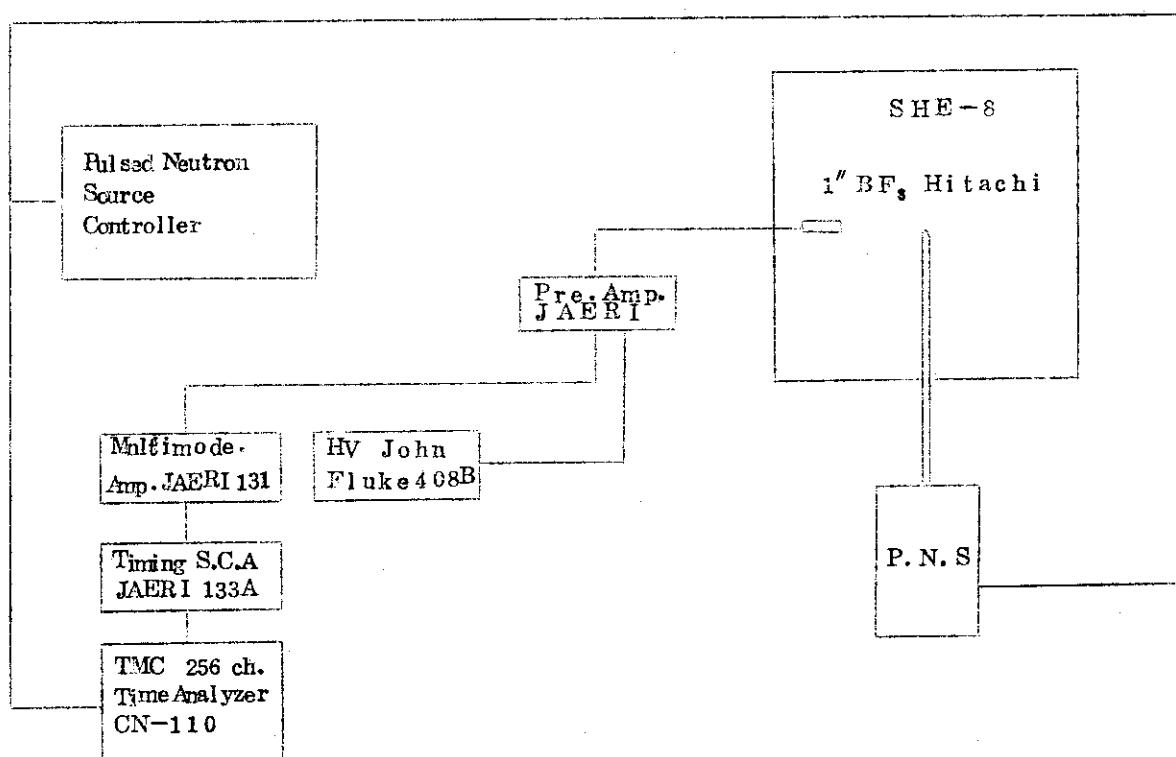


Fig. 5 Block diagram for the pulsed neutron experiment

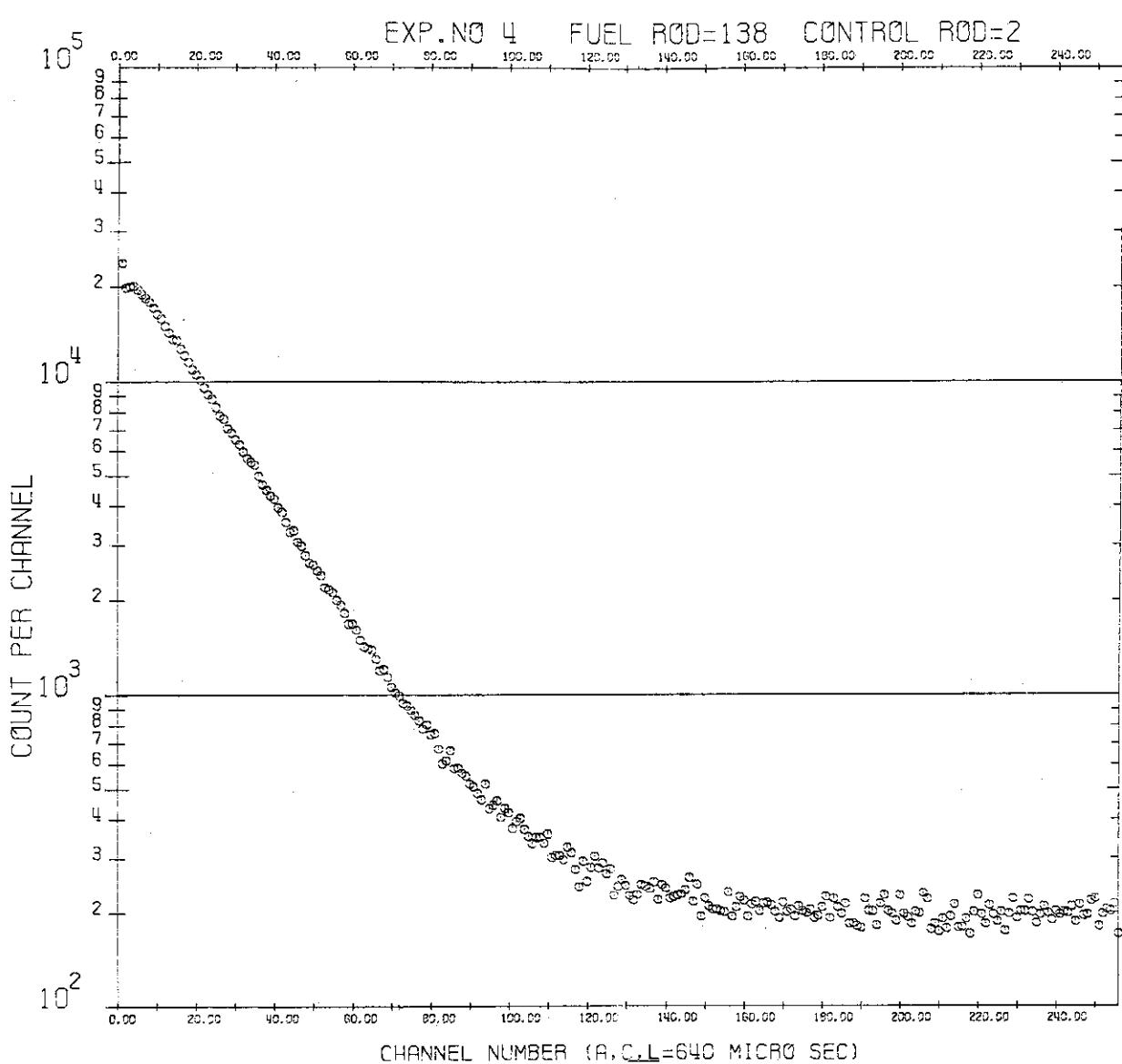


Fig.6. Variation of α value with fitting delay time.

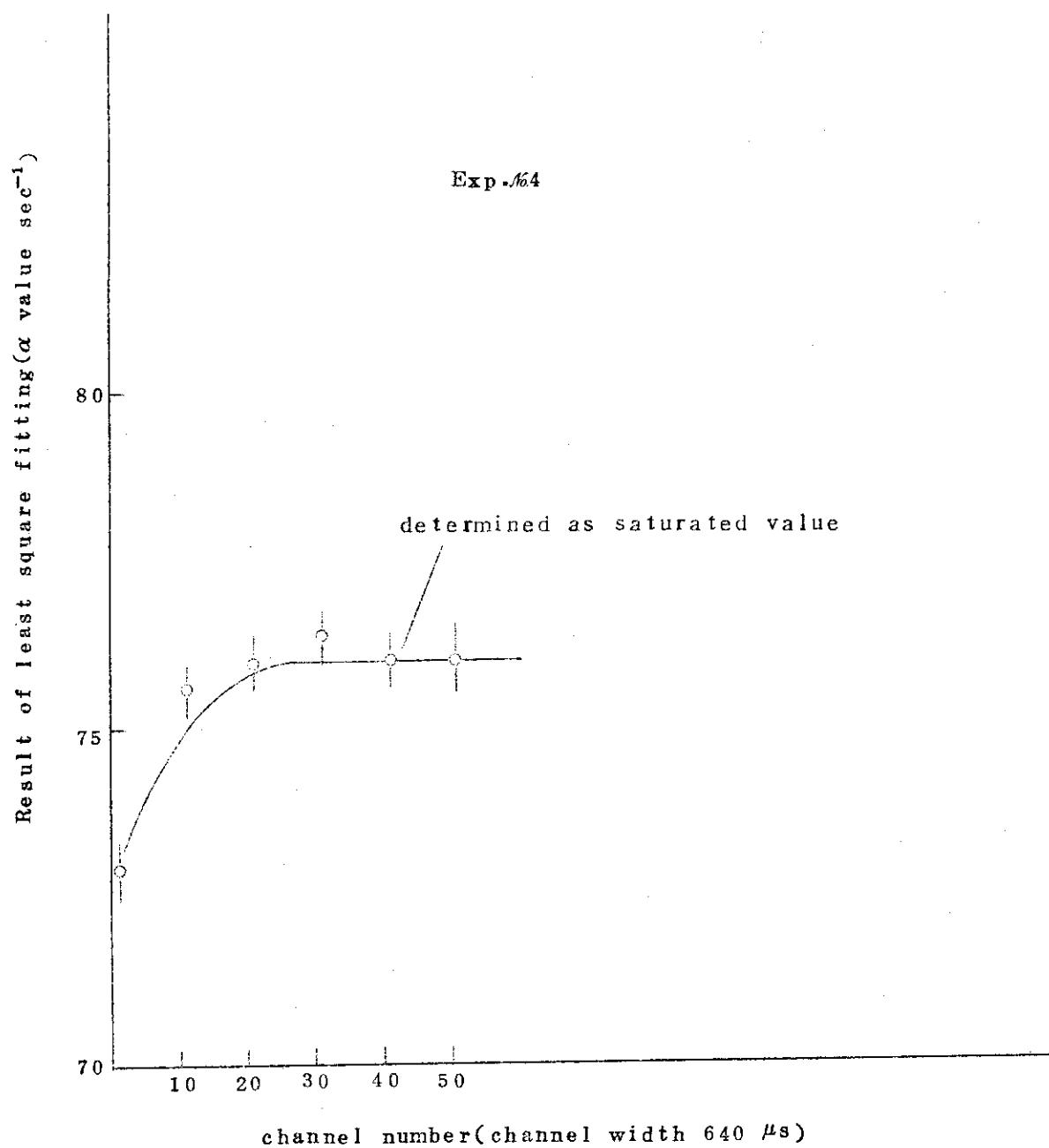


Fig. 7 Variation of α value with fitting delay time

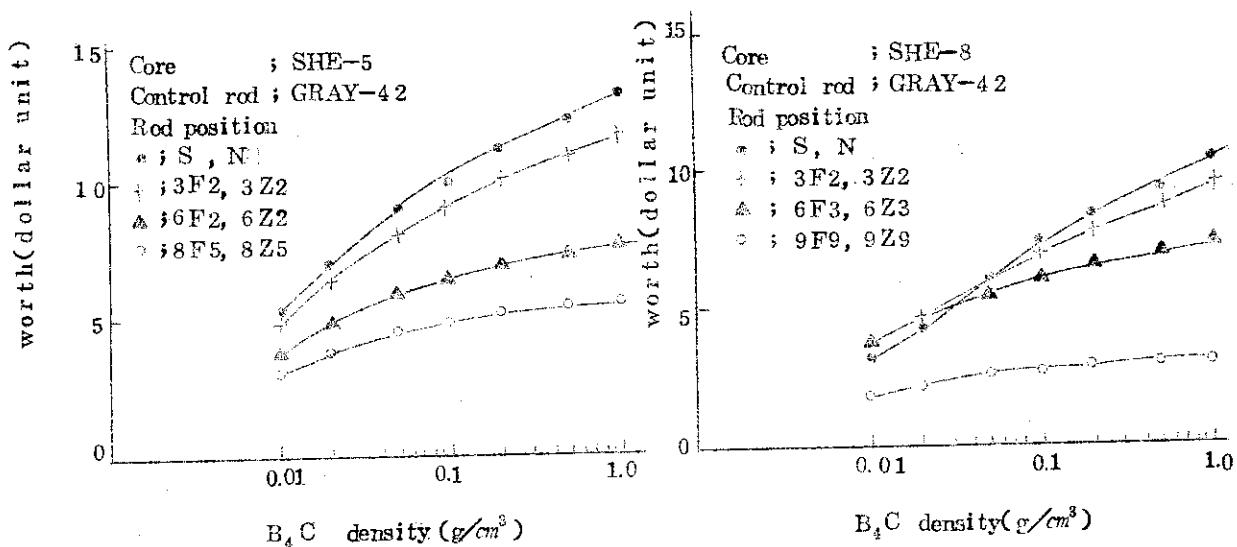


Fig. 8 Worths of gray control rods with diameter of 42mm

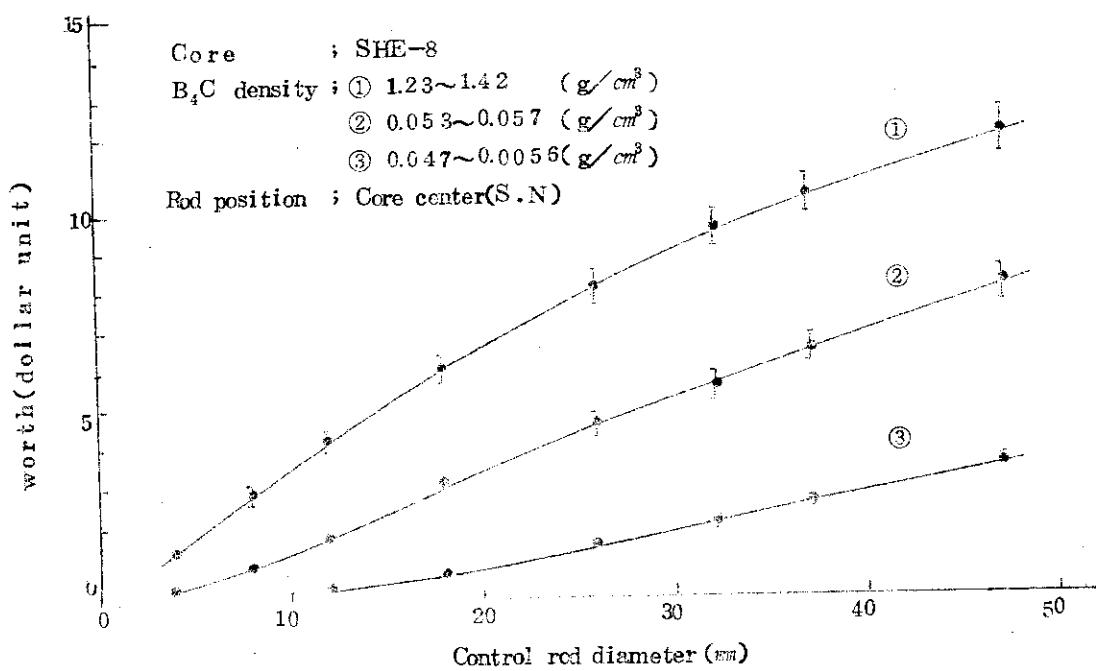


Fig. 9 Worths of gray control rods with various diameters

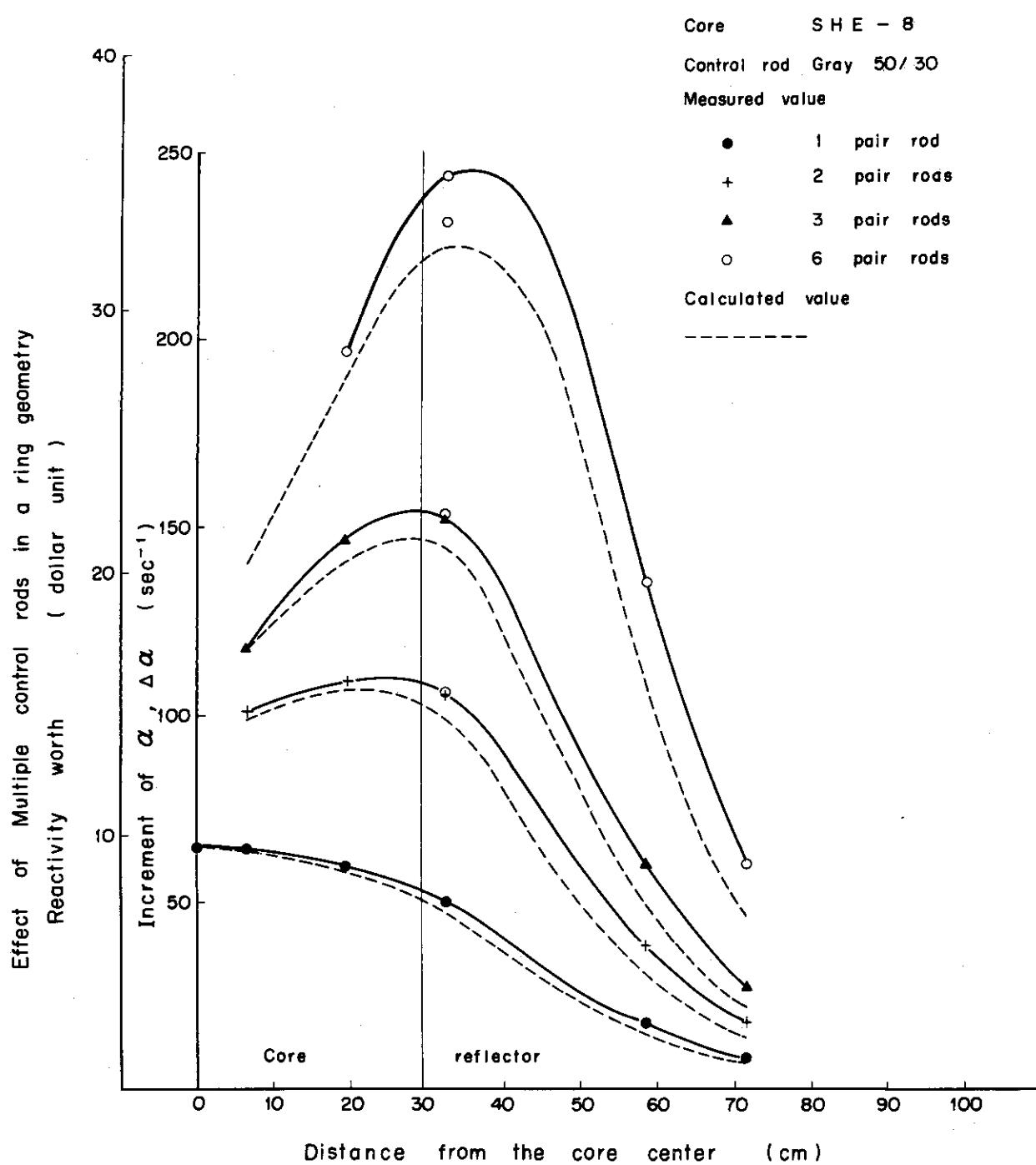


Fig.10. Measured and calculated effect of control rods configurated in a ring geometry.

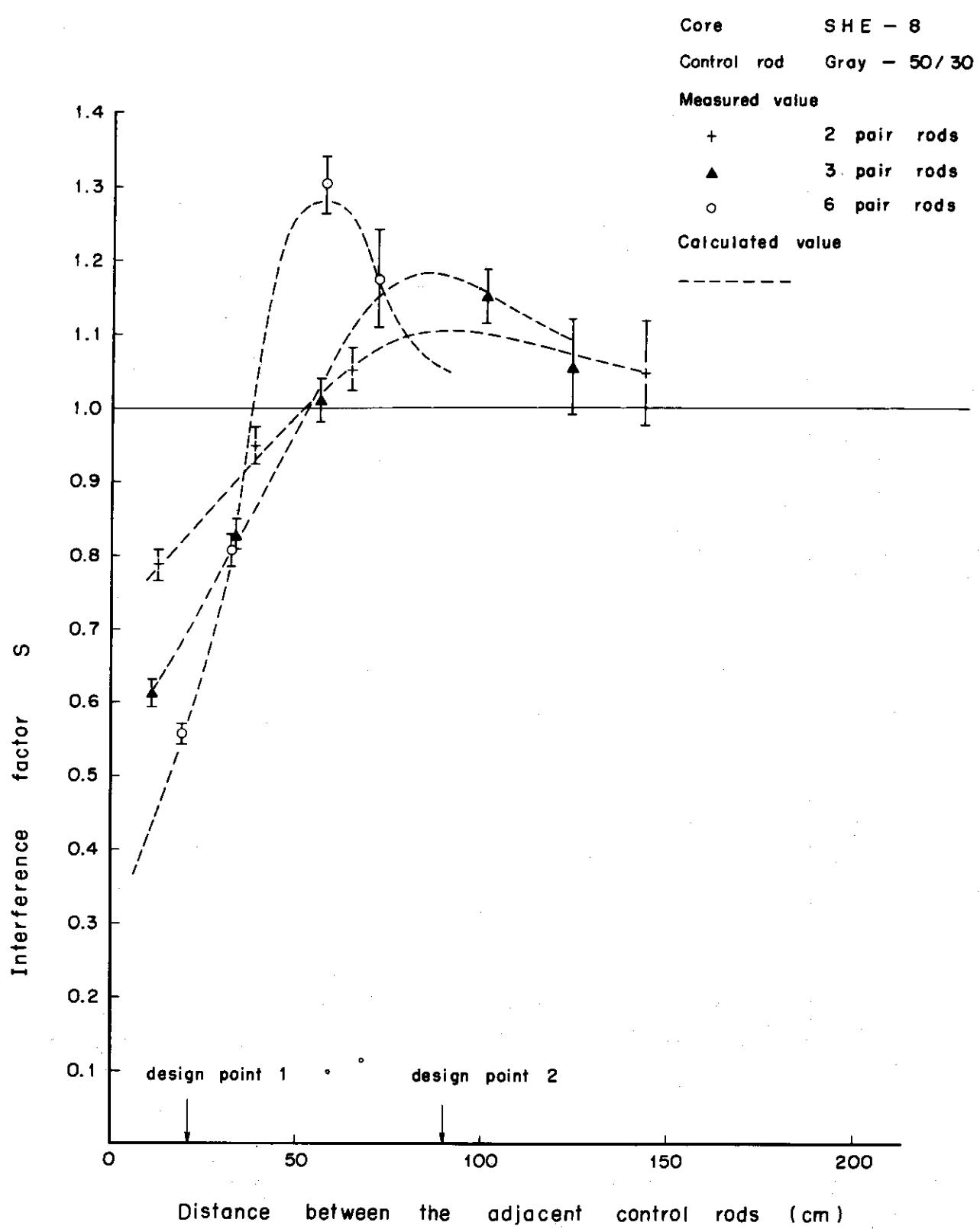


Fig.11. Interference among the control rods in SHE-8.

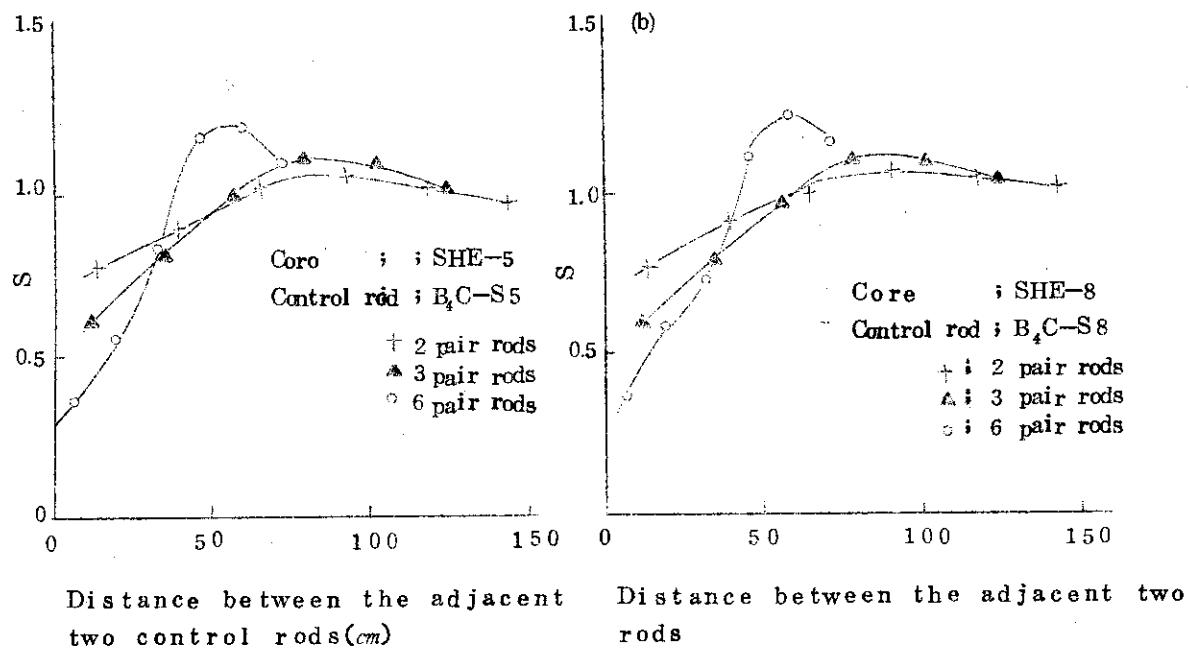


Fig. 12 Interaction among the fully inserted B_4C control rods

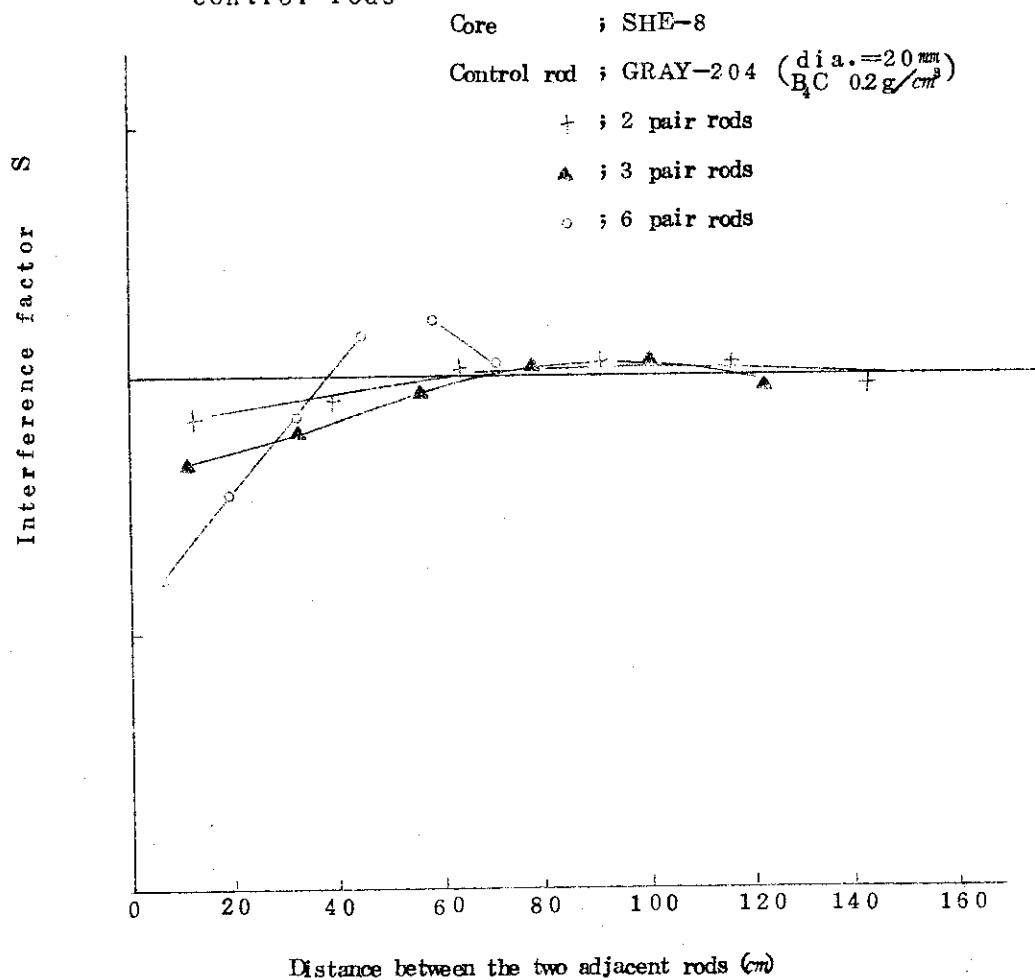


Fig. 13 Interference among the gray rods 204 in SHE-8

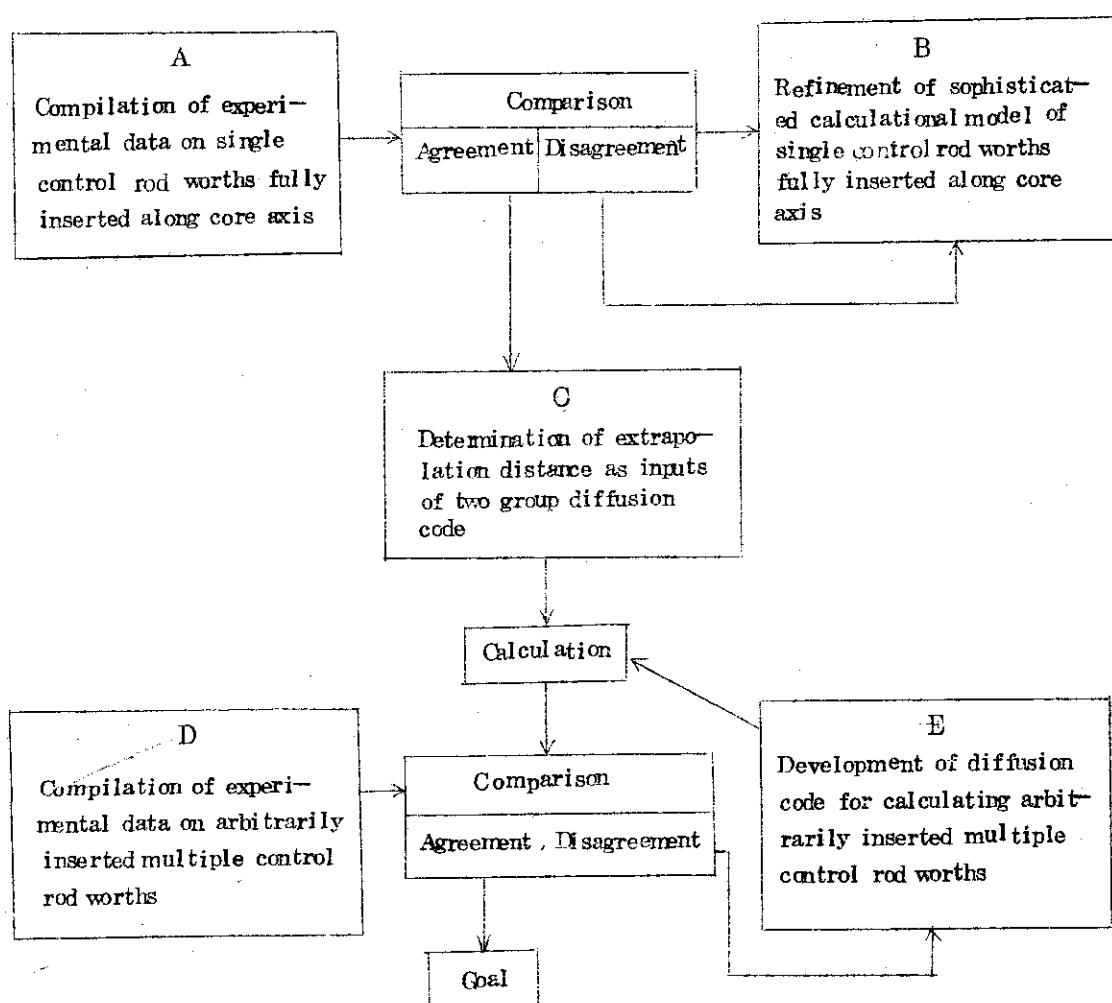


Fig. 14 System for calculating the effects of multiple control rods

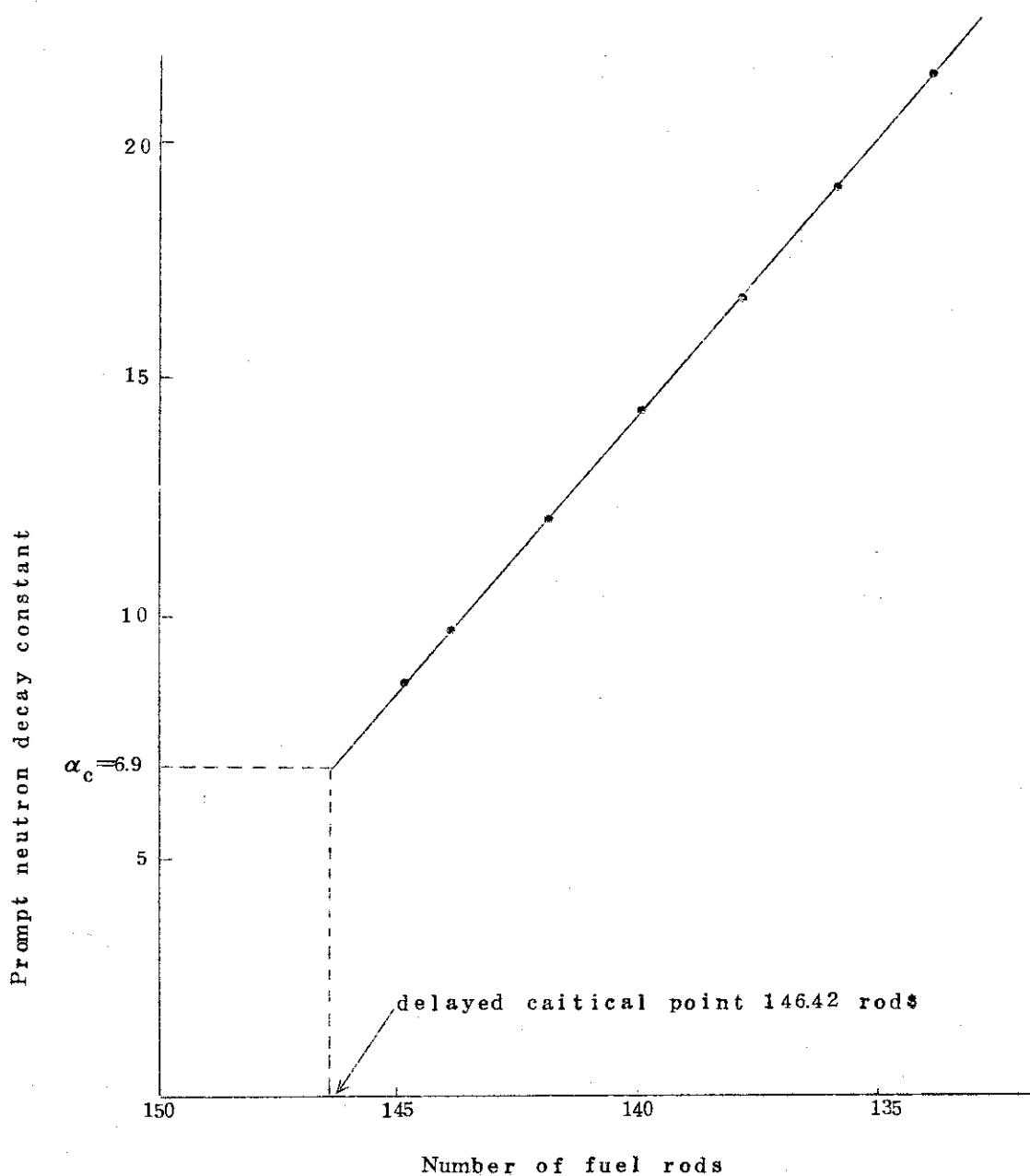


Fig. A-1 Prompt neutron decay constant vs. fuel rods of SHE-8