

JAERI - M
84-194

PWR型燃料集合体における分散型吸収棒の
反応度効果および出力分布の測定

1984年10月

村上 清信・青木 功・広瀬 秀幸
須崎 武則

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

PWR型燃料集合体における分散型吸収棒の
反応度効果および出力分布の測定

日本原子力研究所東海研究所安全工学部
村上清信・青木 功・広瀬秀幸・須崎武則

(1984年10月1日受理)

臨界安全性計算コード検証用の実験データおよび分散型制御棒の核特性を求めることを目的としてPWR型の燃料集合体を模擬し、制御棒および水ホールの反応度および出力分布に与える効果を測定した。実験は軽水臨界実験装置(TCA)を用いて行った。TCAの炉心タンク中央部に、濃縮度3.2 w/o UO₂燃料棒による15×15のPWR燃料集合体を模擬した試験領域と、その外側を濃縮度2.6 w/o UO₂燃料棒による臨界調整用領域で取り囲んだ体系を構成した。その試験領域に制御棒を模擬した中性子吸収棒(吸収棒)を装荷し、その種類や配置をパラメータとして反応度効果、および出力分布を測定した。吸収棒としては、ボロンカーバイド含有量の異なる7種類を用い、最大21本を試験領域に装荷した。

PWR型の分散型吸収棒配置において、吸収棒のボロンカーバイド含有量を増加させた場合の反応度変化(臨界水位の変化)率は、予想通りボロンカーバイド含有量の低い所で大きく、含有量が高くなるに従い小さくなった。しかし、含有量が1.66 g/cm³と高密度の場合でも、反応度値は飽和しておらず、熱外・高速中性子に対する中性子の吸収能力にまだかなりの余裕があることを示している。

試験領域内に配置した吸収棒の吸収体濃度と本数をパラメータとした反応度効果と、試験領域内の平均出力の間には良い直線関係が認められた。

Measurements of Reactivity Effects of Distributed Absorber
Rods and Power distributions in a PWR-type Fuel Assembly

Kiyonobu MURAKAMI, Isao AOKI,
Hideyuki HIROSE and Takenori SUZAKI

Department of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 1, 1984)

Reactivity and power distribution effects were measured by using a mock-up PWR fuel assembly to obtain bench mark data for criticality safety calculation codes and to measure reactor physical performance of cluster type control rod. Criticality experiments were performed by using a Tank-type Critical Assembly (TCA). A two-regional core was constructed for the experiments. The central test region, which was a 15×15 square array of 3.2w/o UO_2 fuel rods, was surrounded by a 2.6w/o UO_2 driver region. The square rod cells in both regions have the same water-to-fuel volume ratio, 1.50. In the experiments, the critical water levels and power distributions were measured changing the loading pattern of absorber rods in the test region and B_4C content in absorber rods from 0 to 1.66 g/cm^3 . In a series of the same loading pattern, negative reactivity increased but did not saturated with B_4C contents from 0 to 1.66 g/cm^3 . It shows that the B_4C absorber rod has more residual absorption effect in epi-thermal and fast neutrons. A linear correlation was found between changes of the average power and the reactivity of the test region, when the absorber rods were loaded in the test region.

Keywords : Reactivity Effect, Absorber Rod. Light-water Lattice, Critical Experiment, Low Enriched Fuel, B_4C , Power Distribution, Control Rod.

目 次

1. 序	1
2. 実験装置	2
2.1 軽水臨界実験装置	2
2.2 燃料棒	2
2.3 中性子吸収棒	2
2.4 炉心の構成	2
3. 測定方法	4
4. 測定結果	5
4.1 反応度効果	5
4.2 出力分布	5
5. 結 論	7
謝 辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental facility	2
2.1 Light-water moderated critical assembly	2
2.2 Fuel rods	2
2.3 Absorber rods	2
2.4 Core construction	2
3. Methods for reactivity and power distribution measurements ..	4
4. Experimental results	5
4.1 Reactivity effect	5
4.2 Power distribution	5
5. Conclusion	7
Acknowledgements	7
Reference	7

1. 序

核燃料サイクル施設の臨界安全性を評価するための計算コードとして、KENO^MおよびSRAC¹⁾がよく用いられている。しかし、棒状燃料と中性子吸収棒との組合せからなる不均一体系については、計算コードの妥当性、計算精度等の検証が充分でない。今回、軽水臨界実験装置(TCA)を用いてPWR型燃料集合体を例にとり、内部に配置した中性子吸収棒の炉心全体に与える反応度効果、および出力分布を測定し、不均一燃料格子に関する臨界ベンチマークデータを求めた。実験に用いた炉心は、TCAの炉心タンクの中央部に、濃縮度3.2 W/oのUO₂燃料棒による15×15のPWR燃料集合体を模擬した試験領域と、その外側を濃縮度2.6 W/oのUO₂燃料棒によるドライバー燃料領域で取り囲んだ体系である。試験領域の吸収棒配置や吸収棒種類をパラメータとして反応度と出力分布を測定した。燃料棒格子間隔は、試験領域が14.79 mm、ドライバー燃料領域が18.49 mmで、水対燃料体積比はともに1.50である。反応度は、この実験中に求めた水位と微分水位反応度を用い、測定した臨界水位の水位差から求めた。燃料棒の相対出力分布は、数分間臨界状態を保った後臨界実験装置を停止し、燃料棒中に生成した核分裂生成物(FP)から放出されるガンマ線を測定するガンマスキニング法により求めた。

2. 実験装置

2.1 軽水臨界実験装置 (TCA)

TCA は軽水減速低濃縮 UO_2 および $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料格子の炉物理特性を測定するための臨界実験装置である。炉心は上部開放型の直径 1.8 m 高さ 2.1 m の円筒状ステンレススチール製タンクの中央部に構成される。燃料棒は上方から挿入され、上下 2 枚の燃料格子板によって固定される。この格子板は実験の種類によって交換することが出来る構造になっており、単純な炉心から複雑な動力炉の模擬炉心まで広範囲な実験が行えるように設計されている。反応度の制御は炉心タンクの水位を制御することによって行われる。

2.2 燃料棒

実験には、PWR 燃料集合体の模擬用として 3.2 w/o 濃縮 UO_2 燃料棒 (32 PA 燃料棒)、ドライバー燃料用として 2.6 w/o 濃縮 UO_2 燃料棒 (26 PA 燃料棒) を使用した。

32 PA 燃料棒は、 ^{235}U 濃縮度 3.205 w/o、ペレット直径 9.6 mm、ペレット密度 10.4 g/cm^3 、燃料有効長 1,440 mm で、被覆管はアルミニウムである。

26 PA 燃料棒は、 ^{235}U 濃縮度 2.6 w/o、ペレット直径 12.5 mm、ペレット密度 10.4 g/cm^3 、燃料有効部長 1,441.5 mm で、被覆管はアルミニウムである。燃料棒の詳細を Fig.1 に示す。

2.3 中性子吸収棒

中性子吸収棒の中性子吸収部は、外径 6.05 mm、肉厚 0.5 mm のステンレススチール製パイプにボロンカーバイド (B_4C) を充填したものであり、全長 1,473 mm、 B_4C の充填長さ 1,460 mm で、 B_4C の含有率が異なる 7 種類を用いた。 B_4C の含有率は、アルミニウム粉末と混合することにより調整しており、100% のものは振動充填法により製作されているが、他の 6 種類のものはスレーピング法により製作されている。これらの中性子吸収体を、外径 11.8 mm、肉厚 0.9 mm のアルミニウム製中空パイプの中に挿入することにより吸収棒を構成した。吸収棒を炉心に装荷した場合の B_4C 有効部下端は、燃料棒の有効部下端よりも約 11 cm 下になっている。吸収棒の詳細を Fig. 2 に示す。

2.4 炉心の構成

炉心タンクの中央部に、32 PA 燃料棒による PWR の 15×15 燃料集合体を模擬した試験領域 (燃料格子間隔: 14.79 mm, 水対燃料体積比: 1.50) と、その外側を 26 PA 燃料棒によるドライバー燃料領域 (燃料格子間隔: 18.49 mm, 水対燃料体積比: 1.50) で取り囲んだ炉心を構成

した。試験領域とドライバー燃料領域の間にはユニットセル分の水の領域があり、いわゆる水ギャップは存在しない。また、ドライバー燃料領域の水平断面寸法は 24×24 配列とし、一連の実験において一定とした。実験体系の水平断面を Fig. 3 に示す。炉心の垂直方向断面を Fig. 4 に示す。

実験では試験領域中の 0～21本の燃料棒を吸収棒、ボイド管（吸収棒の内部の中性子吸収部を除いたもの）、または水ホール（燃料棒引抜き後の空間を水で満たしたもの）に置換し、臨界水位と出力分布の測定を行った。また、吸収棒内部の空間に水が有る場合と無い場合の臨界水位差についても測定し、吸収体周辺のボイド効果を求めた。この一連の実験における炉心の臨界水位は、燃料有効部上端および吸収棒有効部上端よりも低い範囲であった。したがって炉心の構成は、上部が水の無いドライ格子、下部と水平方向がそれぞれ約 30 cm および 60 cm 以上の水反射体という体系である。実験中における炉水温度の変化は、 $10.4 \sim 12.6$ °C の範囲であった。

3. 測定方法

試験領域内の吸収棒の配置および吸収体の濃度を変えた場合の反応度効果は、ある基準炉心の臨界水位を0として、それからの水位差として求めた。臨界水位は、原子炉出力が数ワットで一定のレベルを保つ様に炉心タンク内水位の調整を行い、その水位を最小目盛0.2 mmのサーボ・マンومترにより測定した。水位差の反応度への換算には、今回の一連の測定で得られた水位と微分水位反応度の関係を用いた。水位と微分水位反応度の関係をFig.5に示す。

出力分布は、炉を一定の出力で運転した後、燃料棒を炉心から取出し、燃料棒内に生成した核分裂生成物から放出される γ 線を計測することにより求めた。 γ 線の検出には、直径2インチ、長さ2インチのNaI(Tl)シンチレーション検出器を用いた。測定系のブロック図をFig.6に示す。計測は0.6 MeV以上の γ 線について行い、時間減衰、バックグラウンド、不感時間の補正をほどこした。時間的な γ 線の減衰を補正するために、0.6 MeV以上の γ 線の相対的時間減衰特性として次の式を用いた。

26 PA 燃料棒に関して、

$$F(t) = 6.494 e^{-0.001709t} + 3.663 e^{-0.0005711t} + 1.273 e^{-0.0001276t} \dots\dots\dots(1)$$

32 PA 燃料棒に関して、

$$F(t) = 5.528 e^{-0.001207t} + 2.693 e^{-0.0004664t} + 1.096 e^{-0.0001175t} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 t は冷却時間(秒)であり、上式は $t = 4,500$ で $F(t) = 1$ となるように規格化されている。(2)式は、32 PA 燃料棒にペレット直径、密度、被覆材が類似している26 JPA 燃料棒(^{235}U 濃縮度2.588%、ペレット直径10.7 mm、ペレット密度10.4 g/cm³、0.7 mm厚アルミニウム被覆、外径12.23 mm)の時間減衰特性である。したがって32 PA 燃料棒に適用するにあたってはその差を考慮する必要があるが、燃料ペレットの直径が大きく異なる(1)式の特性和比較しても、今回の測定時間帯である、照射終了後40分～165分の範囲では最大+1.7～-0.9%の差を与えているだけであるため、26 JPA 燃料棒の特性を用いても有意な差は生じないと考えた。

4. 測定結果

4.1 反応度効果

試験領域内の吸収棒種類および配列を変えた実験の要目一覧を Table 1 に示す。図表には、日付、吸収棒の種類、吸収棒配置パターン、臨界水位、および試験領域が 32 PA 燃料棒のみで構成された炉心（基準炉心）との反応度差を示してある。試験領域を 32 PA 燃料棒のみで構成するには燃料棒の所有本数が不足していたため、基準炉心の臨界水位を直接求めることが出来なかった。このため、試験領域の対角コーナー各 5 本計 10 本が欠けている炉心（パターンⅦ）の臨界水位と、4 コーナー各 5 本計 20 本の燃料棒が欠けている炉心（パターンⅧ）の臨界水位を求め、その反応度差を燃料棒の欠けが無い場合に対して外挿することにより基準炉心の臨界水位 432.9 mm を得た。水位は、燃料有効部下端から水面までの距離である。Table 1 の吸収棒配置パターン番号に対応する配置図を Fig. 7 - 1 ~ 7 - 4 に示した。

吸収棒配置パターン I において、吸収棒の種類を変えた場合の臨界水位の変化を Fig. 8 に、反応度の変化を Fig. 9 に示す。この図から、吸収棒内のボロン含有量の低い場合は、含有量の増加に伴って負の反応度が急激に増加するが、含有量の高い場合は、負の反応度の増加はゆるやかな傾向を示していることがわかる。

次に、Fig. 7 のパターン XV ~ XXI のように、9 本の J 吸収棒を試験領域の中心部に固めて置いた場合から、試験領域の外側部に分散して置いた場合の臨界水位の変化を Fig. 10 に示す。中心と外側の吸収棒が 3 ピッチ離れた所で臨界水位が最も高くなっている。

吸収棒は、中空アルミパイプの中に挿入して用いているため、吸収棒の周囲には約 2mm 厚さのボイド領域がある。吸収棒配置パターン I で、J 吸収棒の場合について、ボイド部分に水を注入した場合についても臨界水位を測定した。この結果は、水の入った吸収棒の方が臨界水位が約 74mm 低く、吸収棒の周りのボイドによる反応度効果は、約 45 ϕ 負であることがわかった。

4.2 出力分布

出力分布の測定は次のような炉心配置について行った。(1) 吸収棒配置パターン I の炉心において、21 本の吸収棒の B₄C 含有量を同時に変えた場合。(2) 吸収棒配置パターン I の J 吸収棒を中央から順次水ホールに変えた場合（パターン I ~ VI）。および、(3) 試験領域が 32 PA 燃料棒のみで構成されている場合（パターンⅦ）。パターンⅡは対角コーナー 5 本ずつ、計 10 本が水ホールになっている体系であるが、以前に行った測定から、水ホール²⁾の影響は 5 ピッチ以上離れた燃料棒に対しては無視し得ることがわかっているため、パターンⅦの炉心について測定した水ホールの無い部分の対角方向の出力分布は、基準炉心の出力分布と同じであると考えられる。これらの炉心の出力分布の測定結果を Fig. 11 ~ 20 に示す。

図中には 3 種の値が示してある。上段の値はドライバー領域の 8 本の燃料棒(外端から対角方向

2本ずつ、炉心側面に平行方向2本ずつの計8本)の平均出力が1となるように規格化した値であり、試験領域内の吸収棒等の置換によって変化する出力分布を相対的に比較できるものである。中段には基準炉心と比較するために、基準炉心の出力値で除した相対分布を示した。また、その相対分布を用いて試験領域の平均値が1となるよう規格化を行うことにより、試験領域の径方向出力ピーキング係数を求め下段に示した。

吸収棒配置パターンIの炉心において、吸収棒のボロン含有量を変えた場合の基準炉心に対する相対出力分布を炉心側面に平行方向および対角方向についてFig. 21, 22に示す。また、吸収棒配置パターンIのJ。吸収棒を、中央から順次水ホールに変えた場合の同様な相対出力分布をFig. 23, 24に示す。これらの図からわかるように、試験領域内の出力分布の局所的な変動は比較的小さく、同領域内の平均出力は、吸収棒等の強度と配置により大きく変化している。

出力分布を測定した全炉心について、試験領域内の平均出力の基準炉心(パターンVII炉心)に対する比率をTable 2に示す。同Tableには、積分水位反応度値を用いて求めた各炉心の基準炉心からの反応度差についても合わせて示している。両者の関係をFig. 25に示す。PWR型の分散型吸収棒等は、燃料集合体を模擬した試験領域の平均出力を、その反応度効果にほぼ比例して変化させることがわかる。

5. 結 論

今回の実験結果から、下記の結論を得た。

- (1) 吸収棒のボロンカーバイドの含有量の増加とともに、吸収棒の反応度値は飽和する傾向を示すが、含有量が 1.66 g/cm^3 と高密度（理論密度は 2.5 g/cm^3 ）の場合でもまだ反応度値は増加しており、熱外・高速中性子に対する吸収効果にまだかなりの余裕を持っていることを示している。
- (2) PWR 型燃料集合体中の吸収棒等の配置を模擬した実験の結果、集合体内の平均出力は分散型吸収棒等の反応度効果にほぼ比例して変化し、局所的な出力変動は比較的小さいことがわかった。

謝 辞

この実験の計画および実施にあたり、有意義な御指導、御鞭撻をいただきました臨界安全研究室室長小林岩夫氏、および TCA の運転および出力分布の測定にあたり、種々御協力下さいました TCA グループ新田一雄、三好慶典、中島 健、橋本 修（現：三井造船）、阿見則男（現：外来研究員、千代田メンテナンス）、瀬沼一郎（現：日本ビジネスオートメーション）の諸氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) K. TSUCHIHASI et al : "SRAC : JAERI Thermal Reactor Standard Cord System for Reactor Design and analysis", JAERI - 1285 (1983)
- (2) 村上清信, 他 : "プルトニウム燃料の出力平坦化に関する臨界実験 (1) 出力分布の測定", JAERI - M 9876 (1982)

5. 結 論

今回の実験結果から、下記の結論を得た。

- (1) 吸収棒のボロンカーバイドの含有量の増加とともに、吸収棒の反応度値は飽和する傾向を示すが、含有量が 1.66 g/cm^3 と高密度（理論密度は 2.5 g/cm^3 ）の場合でもまだ反応度値は増加しており、熱外・高速中性子に対する吸収効果にまだかなりの余裕を持っていることを示している。
- (2) PWR 型燃料集合体中の吸収棒等の配置を模擬した実験の結果、集合体内の平均出力は分散型吸収棒等の反応度効果にほぼ比例して変化し、局所的な出力変動は比較的小さいことがわかった。

謝 辞

この実験の計画および実施にあたり、有意義な御指導、御鞭撻をいただきました臨界安全研究室室長小林岩夫氏、および TCA の運転および出力分布の測定にあたり、種々御協力下さいました TCA グループ新田一雄、三好慶典、中島 健、橋本 修（現：三井造船）、阿見則男（現：外来研究員、千代田メンテナンス）、瀬沼一郎（現：日本ビジネスオートメーション）の諸氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) K. TSUCHIHASHI et al : "SRAC : JAERI Thermal Reactor Standard Cord System for Reactor Design and analysis", JAERI - 1285 (1983)
- (2) 村上清信, 他 : "プルトニウム燃料の出力平坦化に関する臨界実験(1) 出力分布の測定", JAERI - M 9876 (1982)

5. 結 論

今回の実験結果から、下記の結論を得た。

- (1) 吸収棒のボロンカーバイドの含有量の増加とともに、吸収棒の反応度値は飽和する傾向を示すが、含有量が 1.66 g/cm^3 と高密度（理論密度は 2.5 g/cm^3 ）の場合でもまだ反応度値は増加しており、熱外・高速中性子に対する吸収効果にまだかなりの余裕を持っていることを示している。
- (2) PWR 型燃料集合体中の吸収棒等の配置を模擬した実験の結果、集合体内の平均出力は分散型吸収棒等の反応度効果にほぼ比例して変化し、局所的な出力変動は比較的小さいことがわかった。

謝 辞

この実験の計画および実施にあたり、有意義な御指導、御鞭撻をいただきました臨界安全研究室室長小林岩夫氏、および TCA の運転および出力分布の測定にあたり、種々御協力下さいました TCA グループ新田一雄、三好慶典、中島 健、橋本 修（現：三井造船）、阿見則男（現：外来研究員、千代田メンテナンス）、瀬沼一郎（現：日本ビジネスオートメーション）の諸氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) K. TSUCHIHASI et al : "SRAC : JAERI Thermal Reactor Standard Cord System for Reactor Design and analysis", JAERI - 1285 (1983)
- (2) 村上清信, 他 : "プルトニウム燃料の出力平坦化に関する臨界実験(1) 出力分布の測定", JAERI - M 9876 (1982)

Table 1 List of experimental core

Run no.	Date	Absorber rod	Pattern	Critical water level (mm)	Reactivity* worth (β)
7096	Feb. 10, '83	J0-21**	I	1048.05	1029.9
7097	Feb. 15, '83	J0-20, WH-1	II	959.8	974.3
7098	Feb. 15, '83	J0-16, WH-5	III	746.4	768.9
7099	Feb. 15, '83	J0-12, WH-9	IV	615.65	554.8
7100	Feb. 15, '83	J0-4, WH-17	V	453.15	85.7
7101	Feb. 15, '83	WH-21	VI	406.2	-126.1
7102	Feb. 15, '83	Void-21	I	440.85	34.8
7103	Feb. 16, '83	J6-21	I	451.1	77.4
7104	Feb. 16, '83	J5-21	I	463.35	125.8
7105	Feb. 16, '83	J4-21	I	479.4	185.2
7106	Feb. 16, '83	J3-21	I	518.9	314.5
7108	Feb. 16, '83	J2-21	I	602.65	527.6
7109	Feb. 16, '83	J1-21	I	737.8	757.5
7111	Feb. 16, '83	WH-10	VII	428.1	-21.3
7112	Feb. 16, '83	WH-20	VIII	423.45	-42.6
7113	Feb. 18, '83	J0-20, WH-1	II	959.05	973.8
7114	Feb. 21, '83	J0-20, WH-1	II	960.9	975.1
7115	Feb. 23, '83	J0-16, WH-5	III	746.3	768.8
7116	Feb. 25, '83	J0-12, WH-9	IV	615.65	554.8
7117	Feb. 28, '83	WH-21	VI	406.1	-126.6
7118	Mar. 2, '83	J6-21	I	451.05	77.2
7119	Mar. 4, '83	J4-21	I	479.3	184.8
7120	Mar. 7, '83	J2-21	I	602.25	526.7
7121	Mar. 9, '83	J0-21	I	1049.8	1030.9
7122	Mar. 11, '83	Void-21	I	440.8	34.5
7125	Mar. 14, '83	WH-10	VII	428.2	-20.8
7126	Mar. 17, '83	J0-12	IX	601.55	525.2
7127	Mar. 17, '83	J0-12	X	627.9	579.3
7128	Mar. 17, '83	J0-12	XI	638.25	599.2
7129	Mar. 17, '83	J0-12	XII	639.6	601.7
7130	Mar. 17, '83	J0-21***	I	980.85	988.7
7131	Mar. 17, '83	J0-21	I	1054.7	1033.6
7132	Mar. 23, '83	J0-21	XIII	1063.0	1038.2
7133	Mar. 23, '83	J0-21	XIV	1058.8	1035.9
7134	Mar. 23, '83	J0-9	XV	543.95	385.9
7135	Mar. 23, '83	J0-9	XVI	573.85	462.2
7136	Mar. 23, '83	J0-9	XVII	583.9	485.8
7137	Mar. 23, '83	J0-9	XVIII	582.85	483.4
7138	Mar. 23, '83	J0-9	IXX	574.7	464.2
7139	Mar. 23, '83	J0-9	XX	563.2	436.1
7140	Mar. 23, '83	J0-9	XXI	551.45	405.9

* : Integral water level worth from the critical water level of the standard core, 432.9mm.

** : In the expression of X-Y, X means the Jn-type absorber rod, the water hole, or the void pipe (same as the A1 pipe shown in Fig.2), and Y means the number loaded in the test region.

*** : The space inside an absorber rod was filled with water (see Fig.2).

Table 2 Average power in test region and reactivity difference from reference core

Core		Average power in test region	Reactivity difference from reference core (ρ)
Pattern	Absorber rod		
VII	WH-10	1.0	20.8
II	J ₀ -20, WH-1	0.684	- 975.1
III	J ₀ -16, WH-5	0.747	- 768.8
IV	J ₀ -12, WH-9	0.828	- 554.8
VI	WH-21	1.087	126.6
I	J ₆ -21	0.961	- 77.2
I	J ₄ -21	0.916	- 184.8
I	J ₂ -21	0.802	- 526.7
I	J ₀ -21	0.659	-1030.9
I	Void-21	0.970	- 34.5

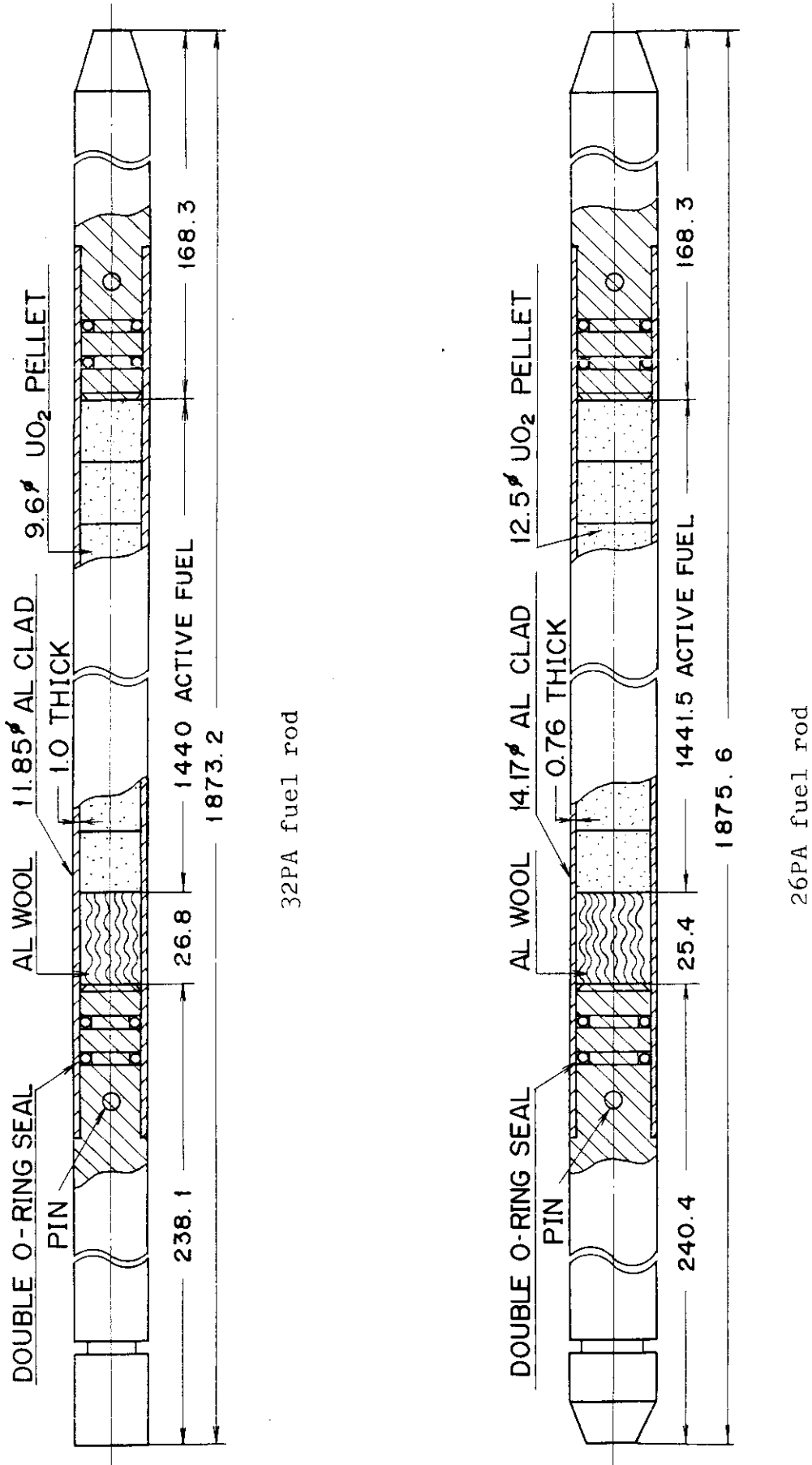
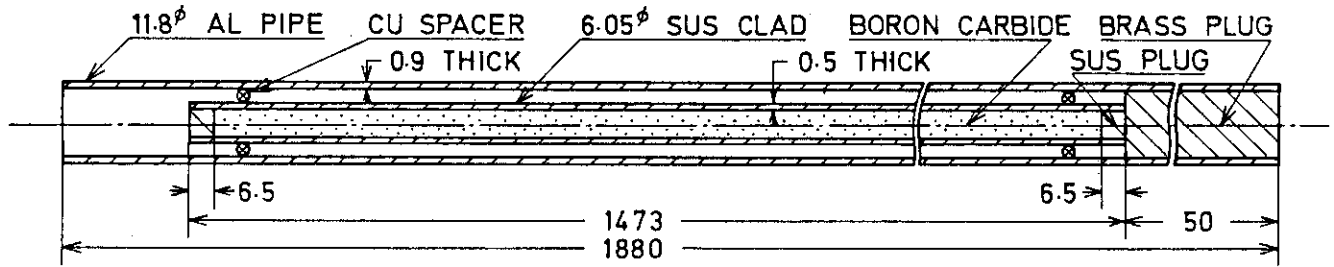


Fig. 1 Fuel rods



B₄C content in absorber rods

Absorber rod	J ₀	J ₁	J ₂	J ₃	J ₄	J ₅	J ₆
B ₄ C/(B ₄ C+Al) (w/o)	100	22.5	7.70	2.65	0.95	0.40	0
B ₄ C content (g/cm ³)	1.659	0.5911	0.2014	0.07165	0.02594	0.01084	0

Impurities in cladding material of J₁ to J₆ absorber rods

Component	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Concentration (w/o)	0.06	0.59	1.01	0.012	0.019	8.72	18.35

Impurities in aluminum powder

Component	Fe	Si	Cu	Mn
Concentration (w/o)	0.12	0.07	0.002	0.001

Impurities in aluminum pipe

Component	Fe	Si
Concentration (w/o)	0.14	0.07

Fig. 2 Absorber rods

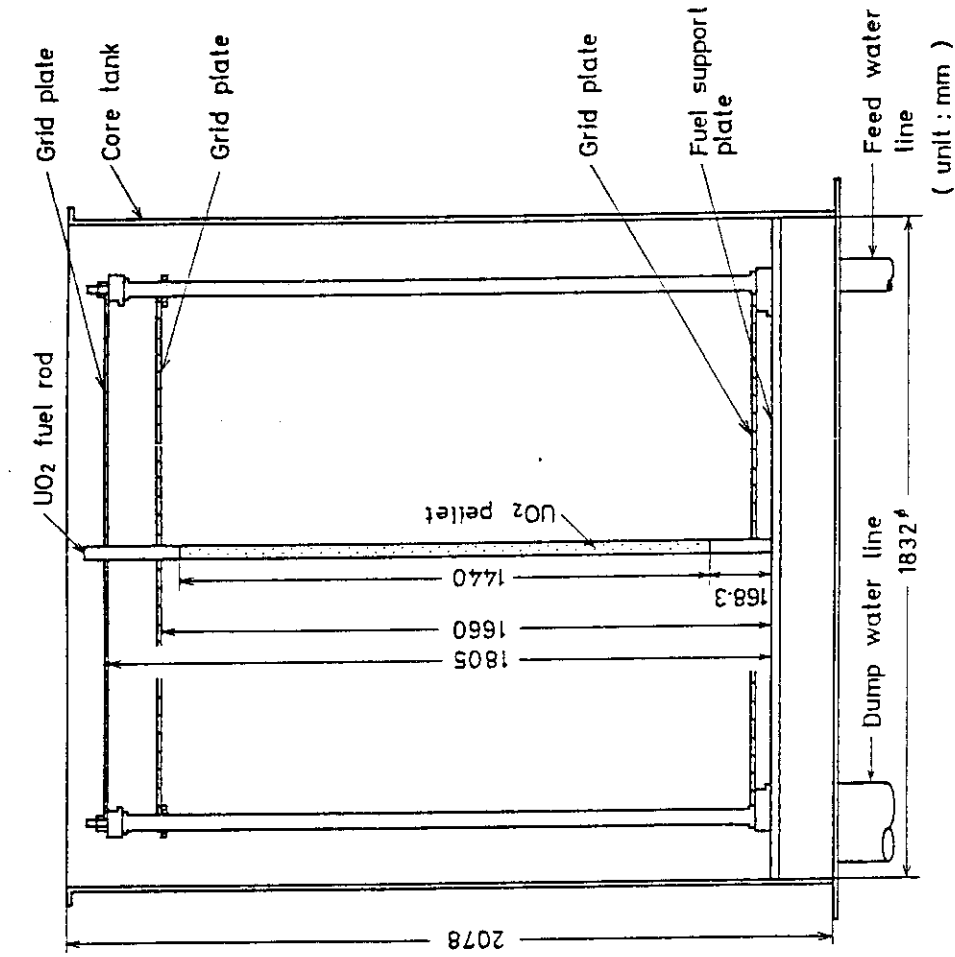


Fig. 4 Vertical cross-sectional view of core

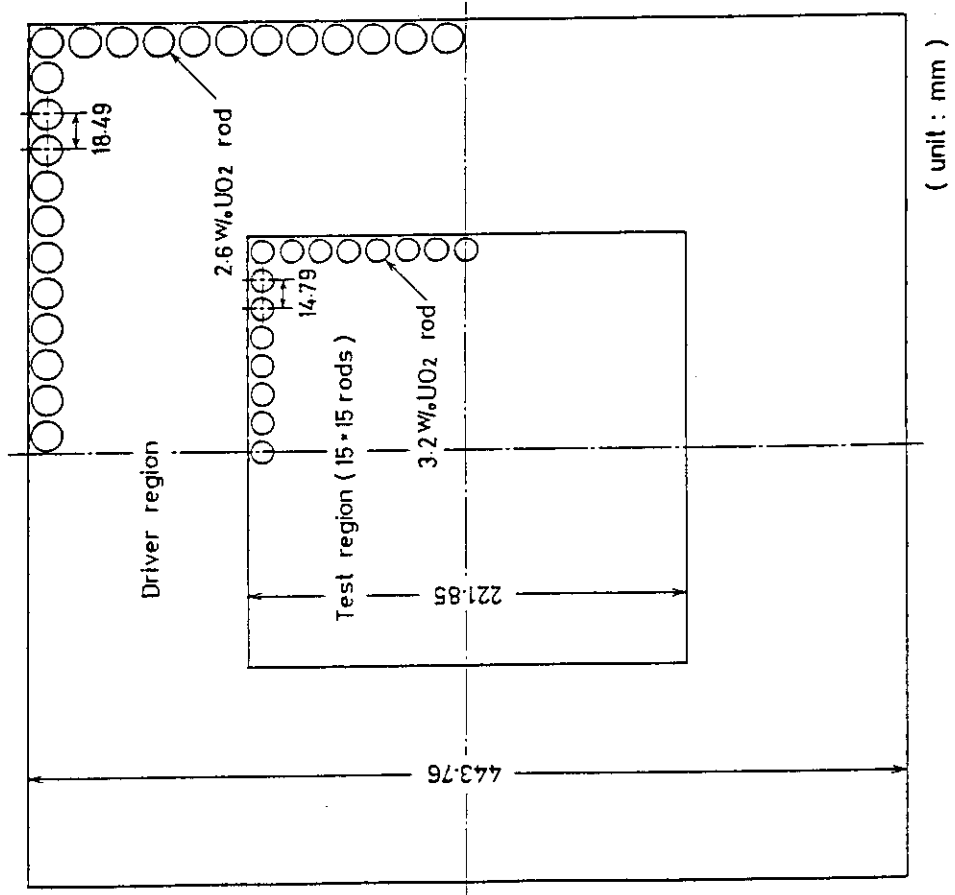


Fig. 3 Plan view of core

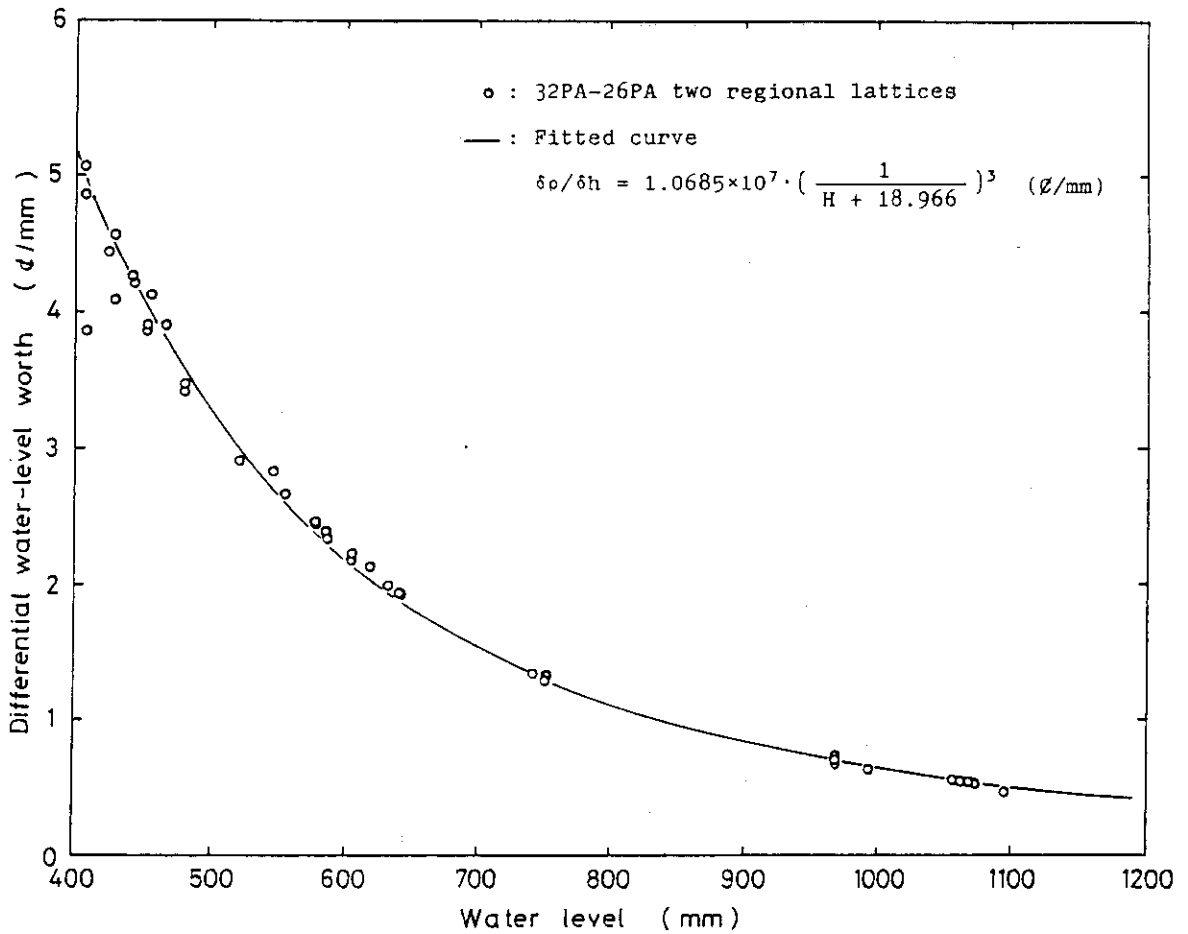


Fig. 5 Differential water-level worth

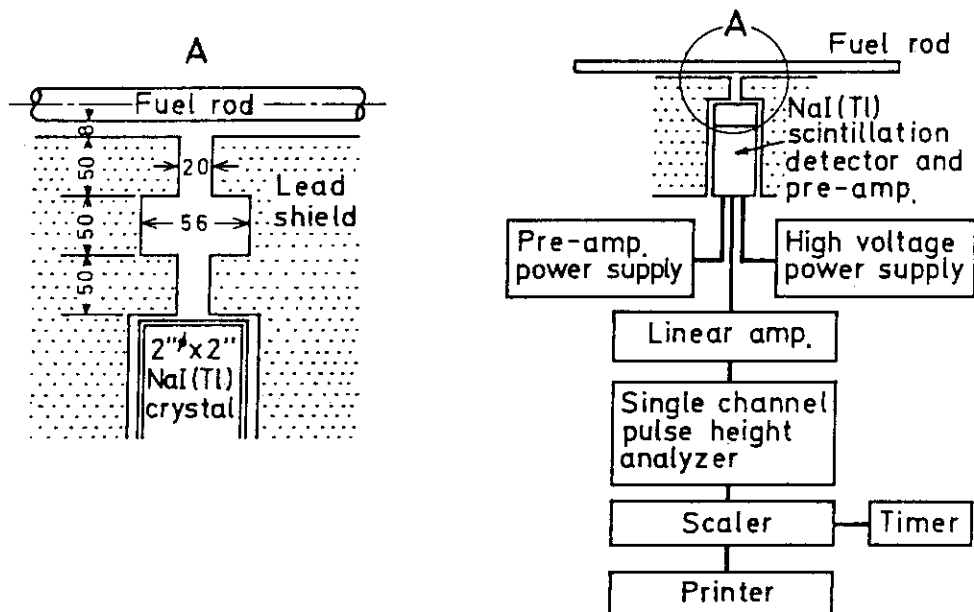
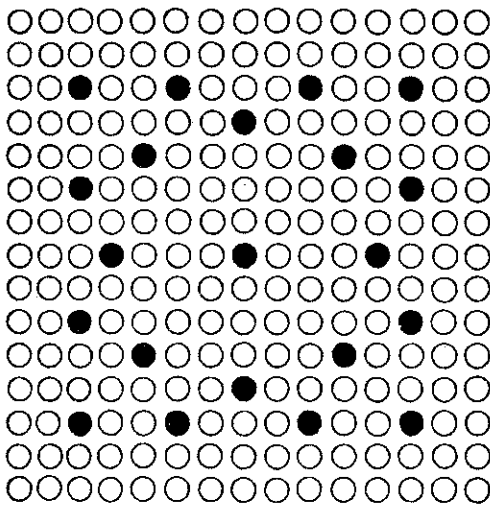
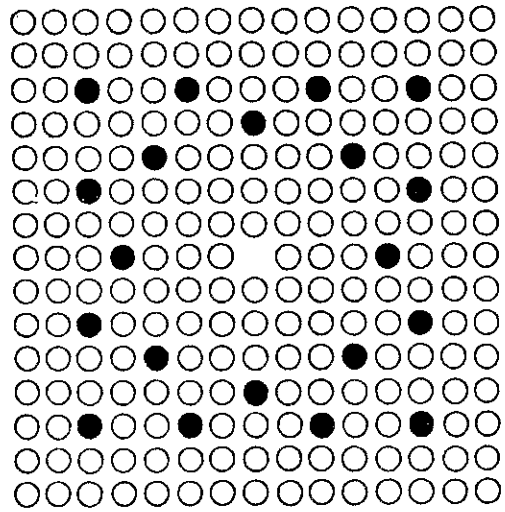


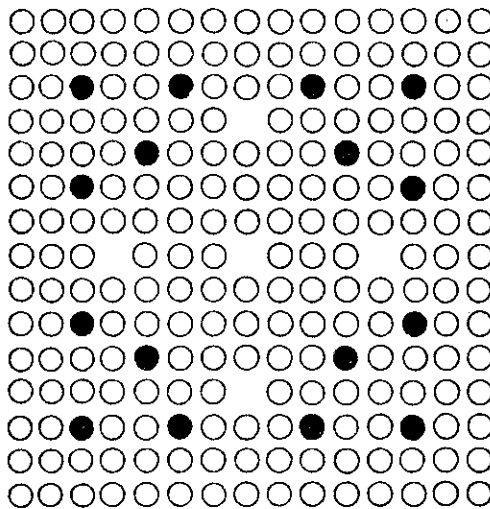
Fig. 6 Block diagram of γ -ray counting system for power distribution measurement



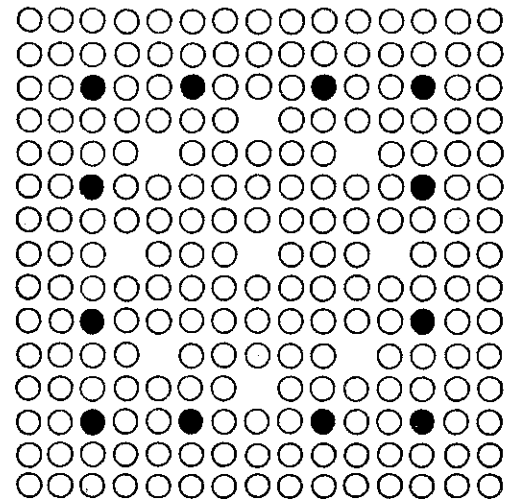
(I)



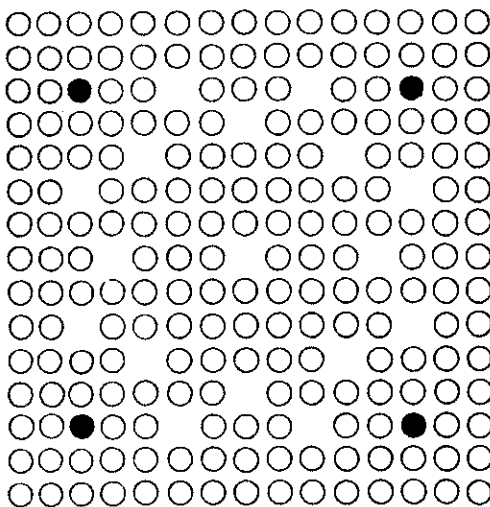
(II)



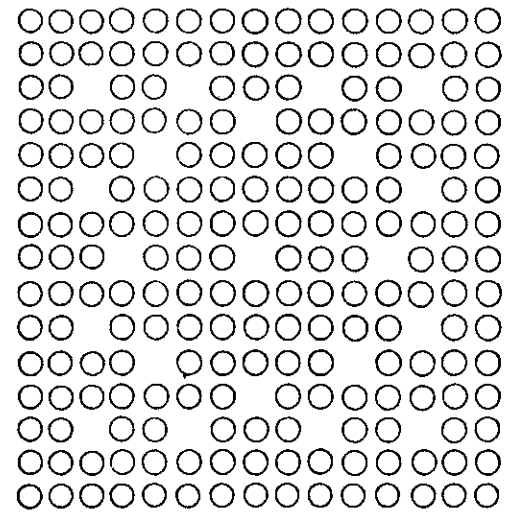
(III)



(IV)



(V)

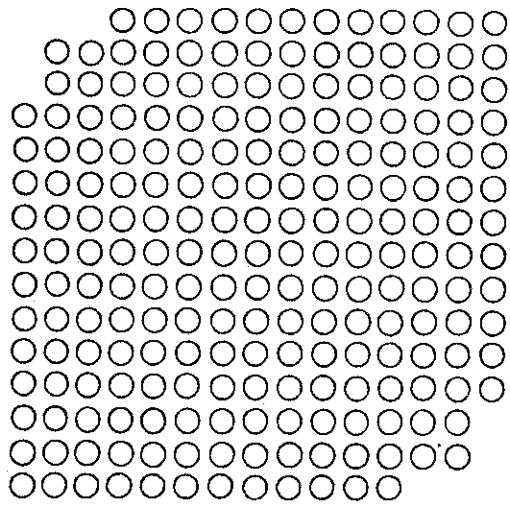


(VI)

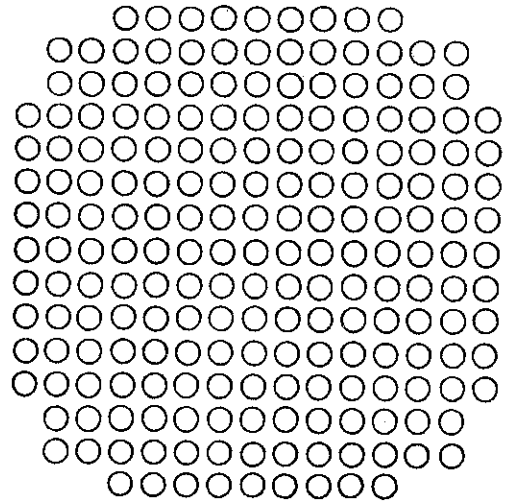
○ : 32PA fuel rod

● : Absorber rod

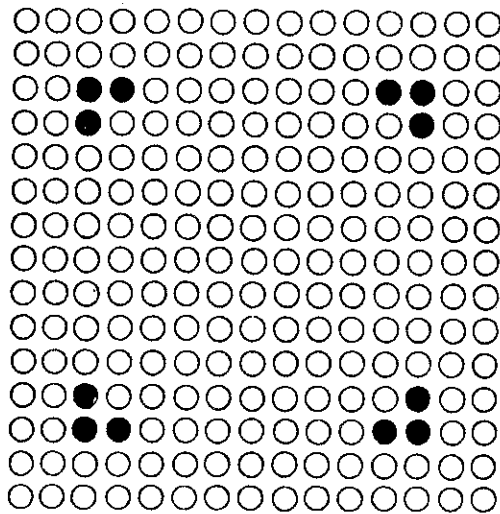
Fig. 7-1 Loading pattern in test region



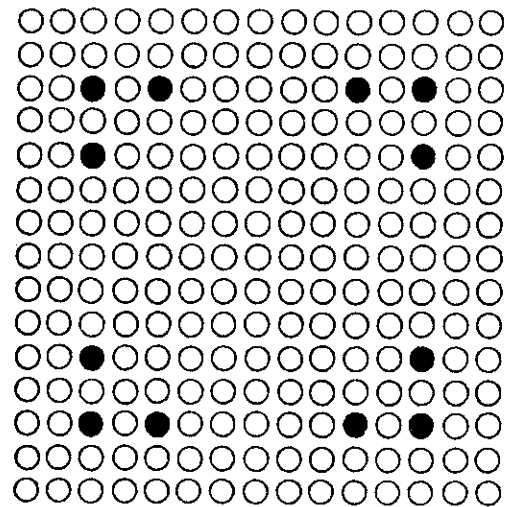
(VII)



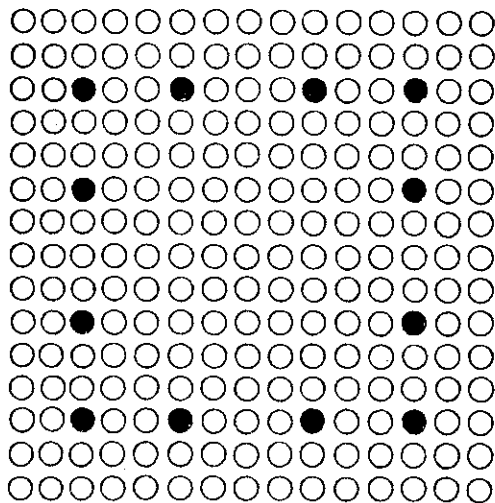
(VIII)



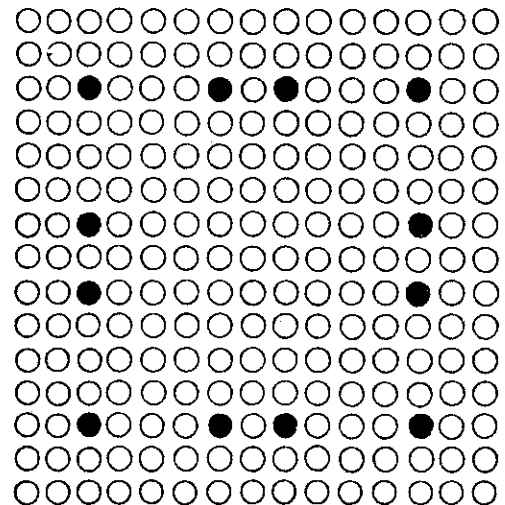
(IX)



(X)



(XI)

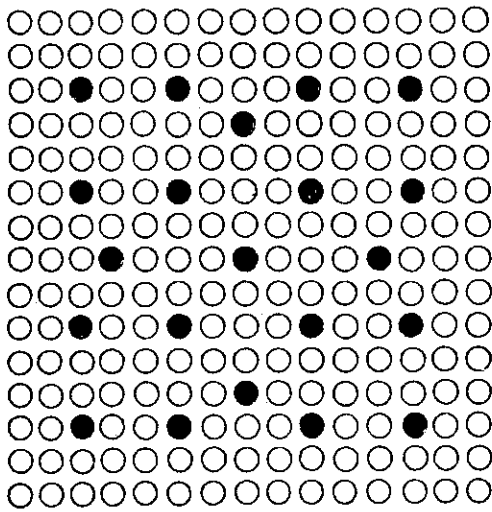


(XII)

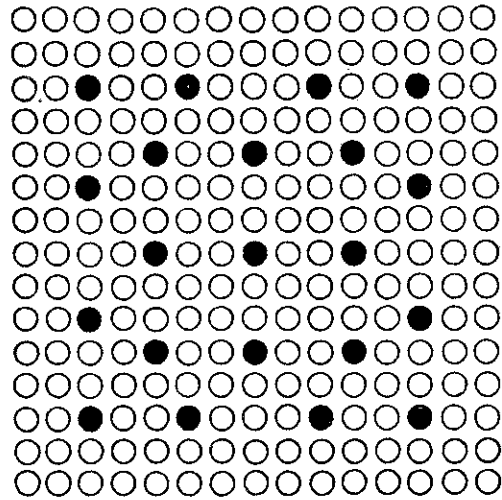
○ : 32PA fuel rod

● : Absorber rod

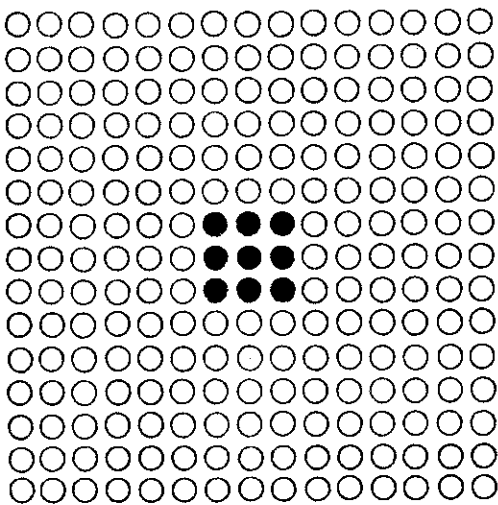
Fig. 7-2 Loading pattern in test region



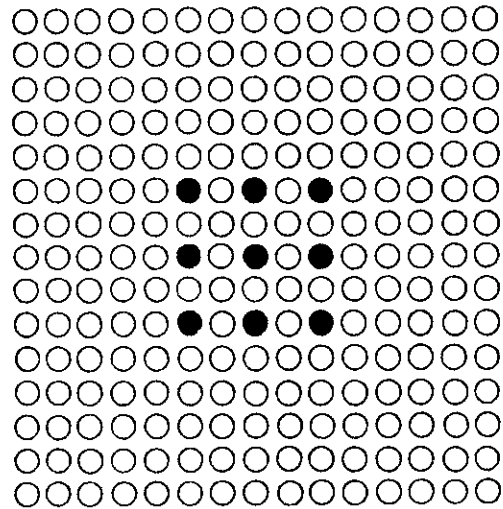
(XIII)



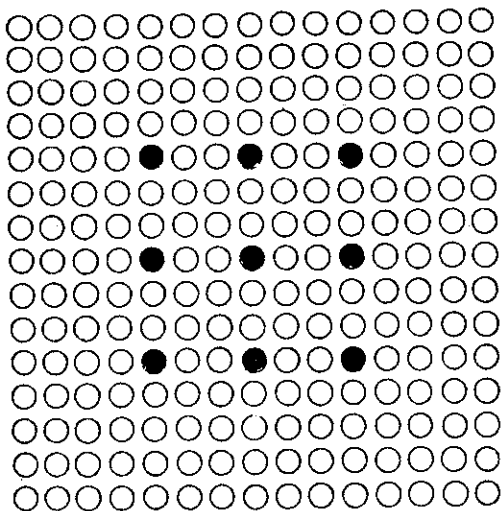
(XIV)



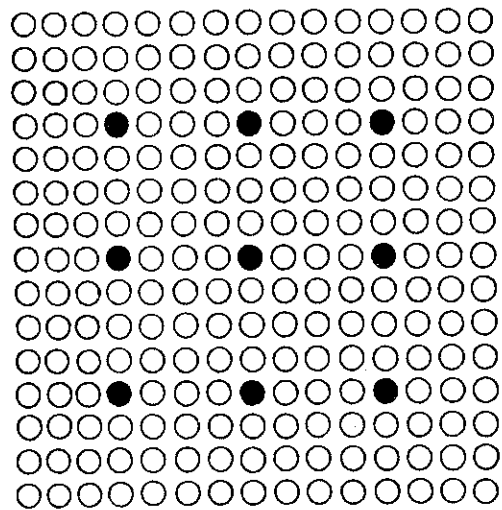
(XV)



(XVI)



(XVII)

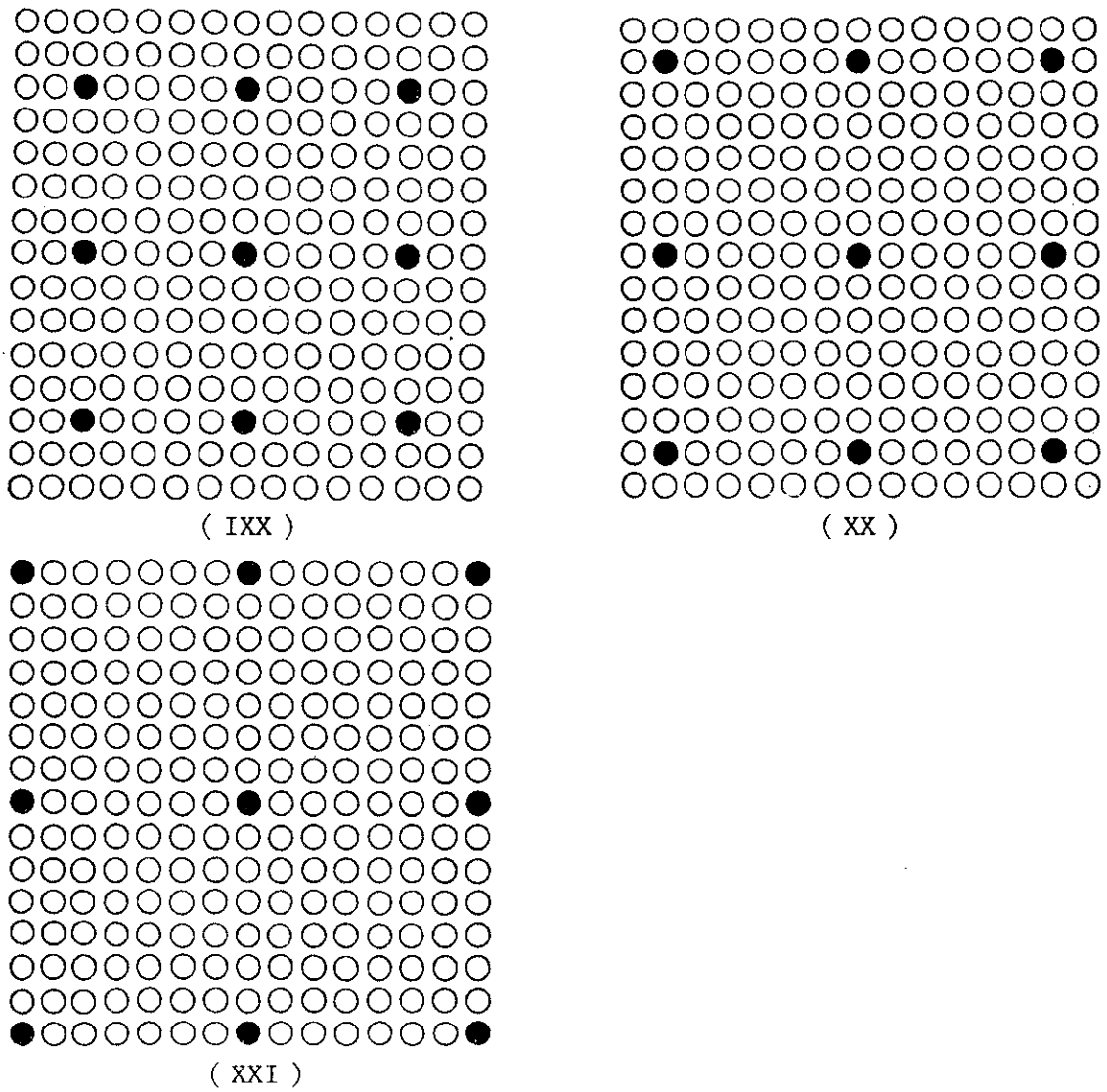


(XVIII)

○ : 32PA fuel rod

● : Absorber rod

Fig. 7-3 Loading pattern in test region



○ : 32PA fuel rod

● : Absorber rod

Fig. 7-4 Loading pattern in test region

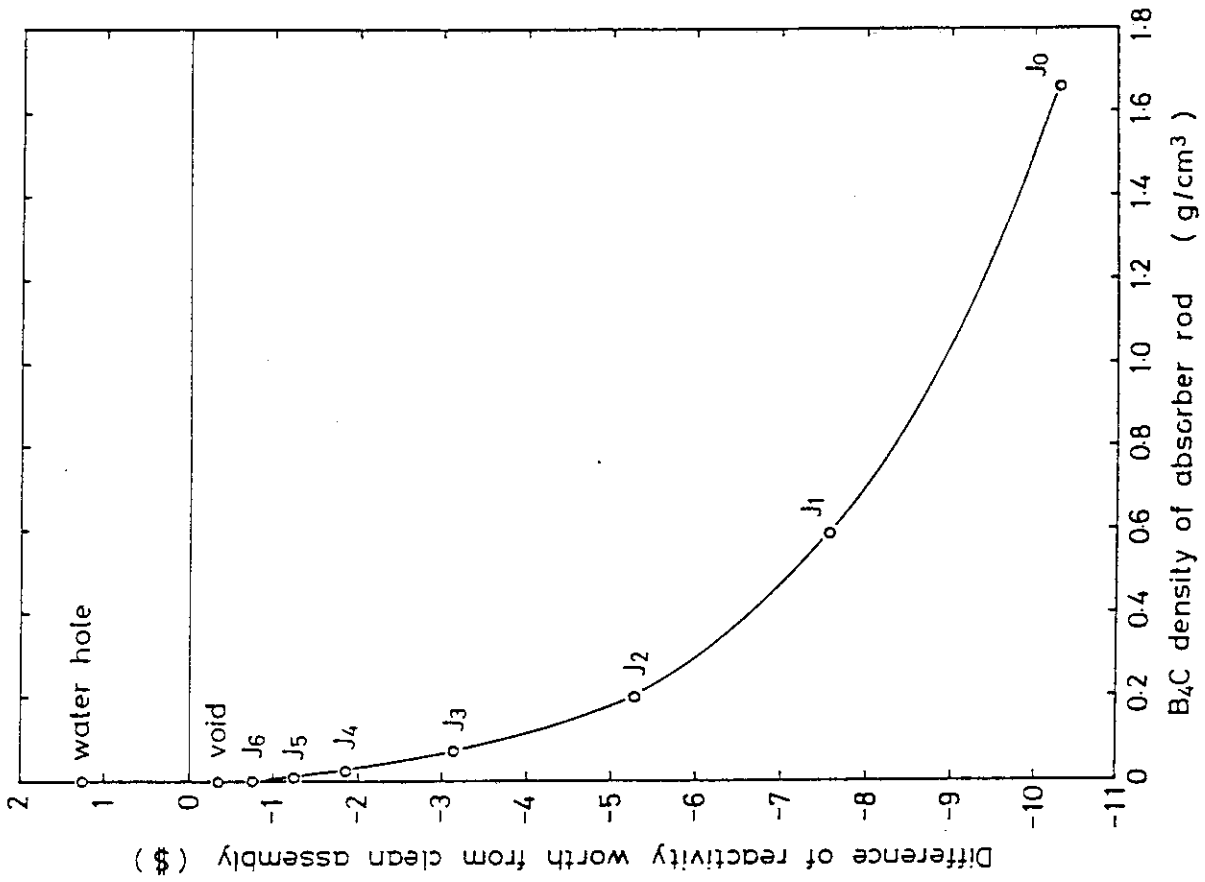


Fig. 9 Change of reactivity worth according to increase of B_4C content in absorber rod

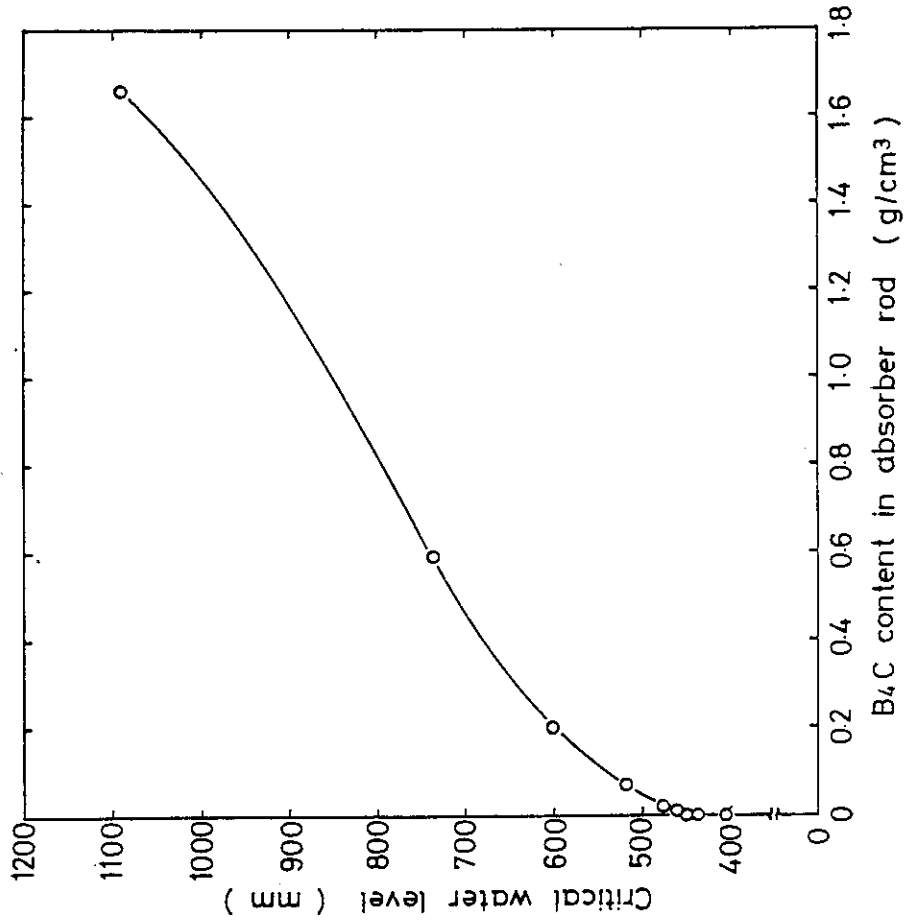


Fig. 8 Change of critical water level according to increase of B_4C content in absorber rod

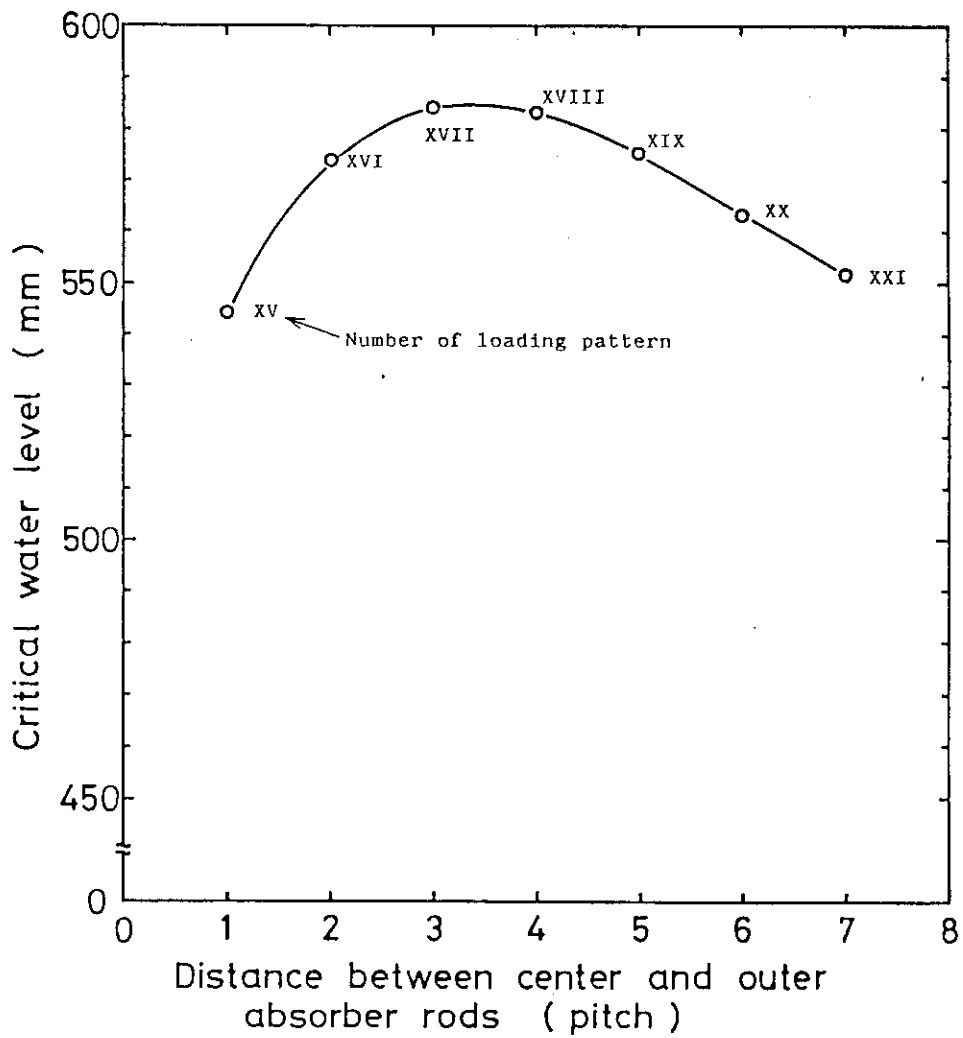


Fig. 10 Change of critical water level according to increase of distance between center and outer absorber rods

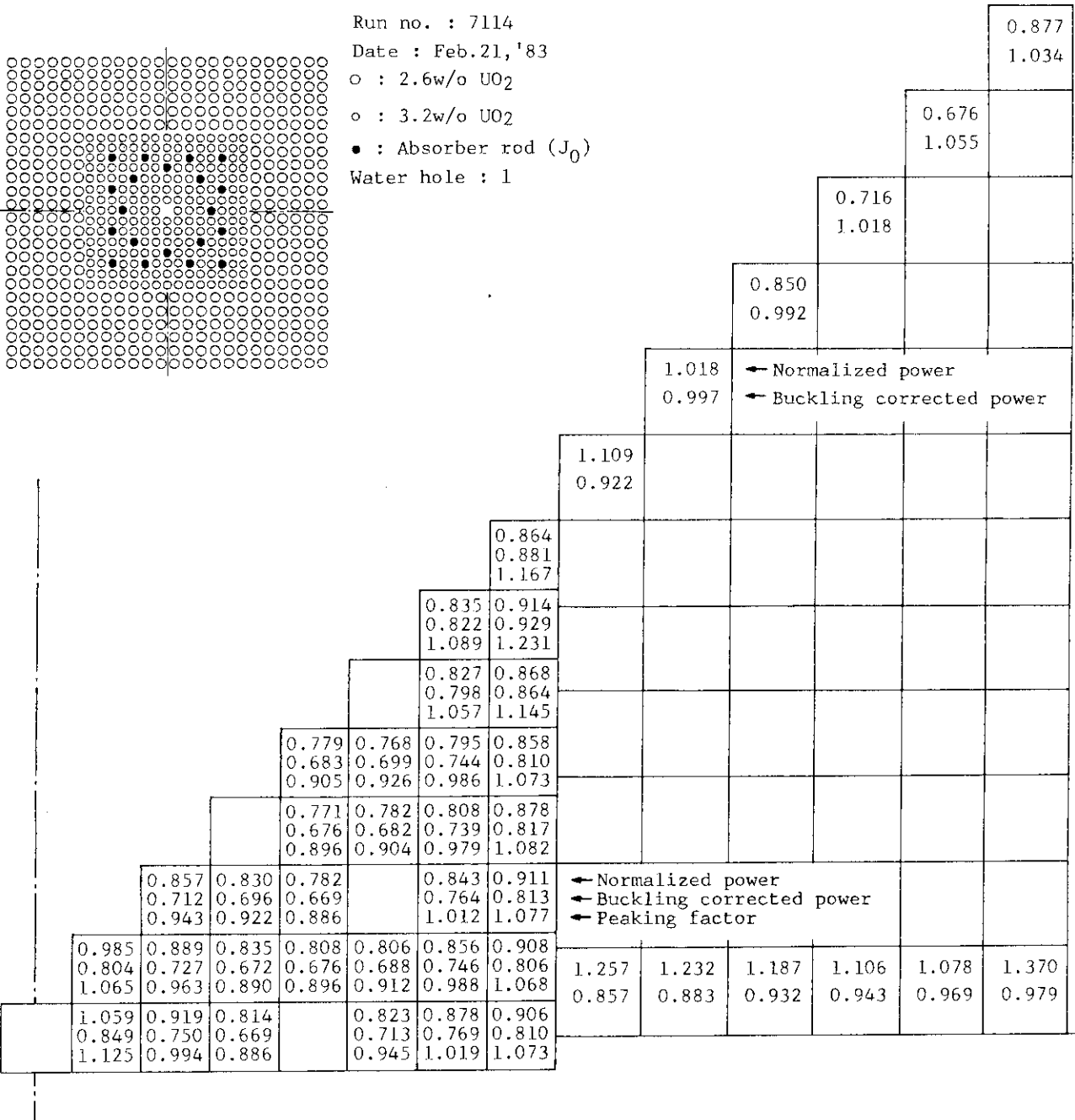


Fig. 11 Power distribution in the core (II)

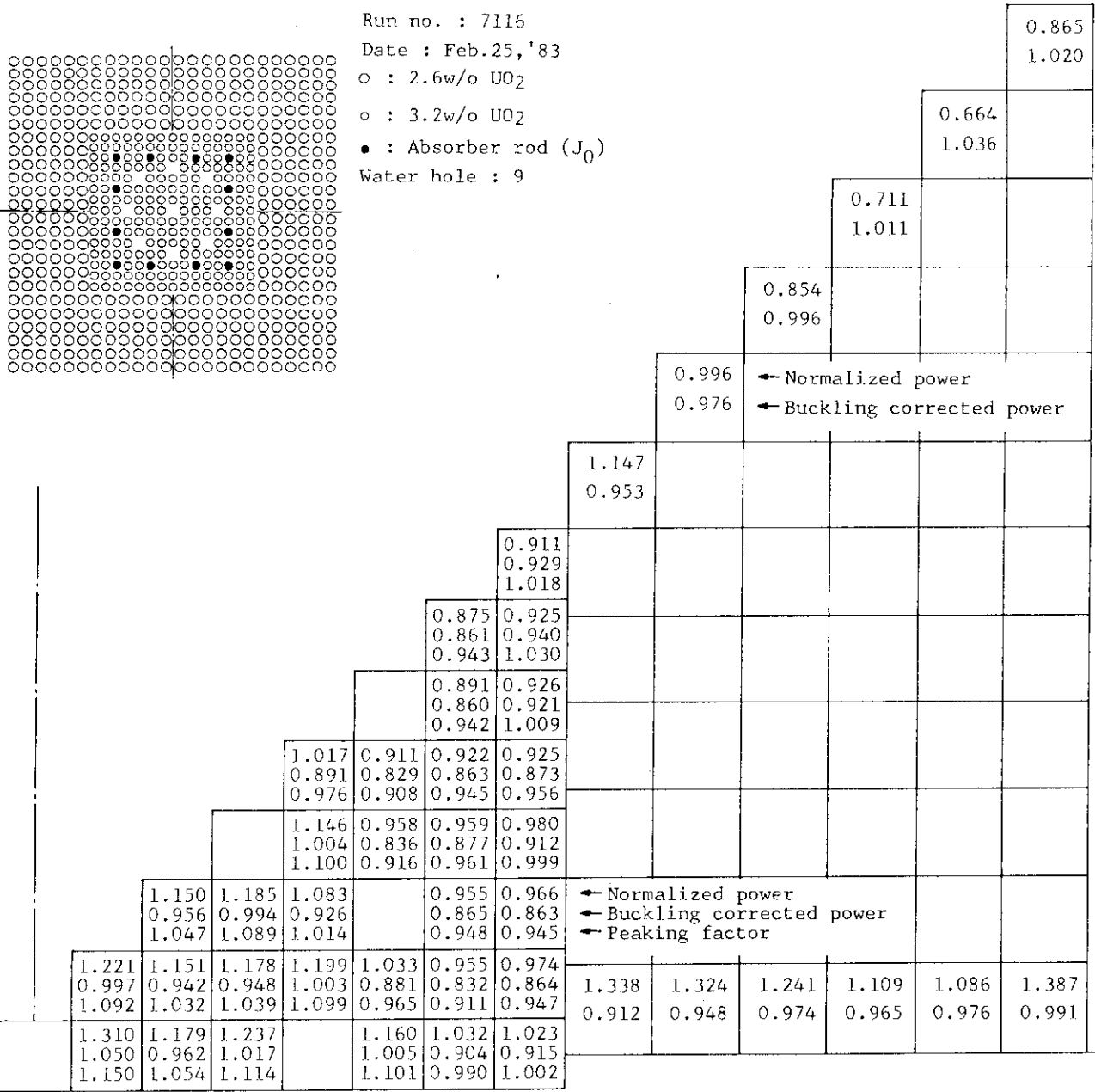


Fig. 13 Power distribution in the core (IV)

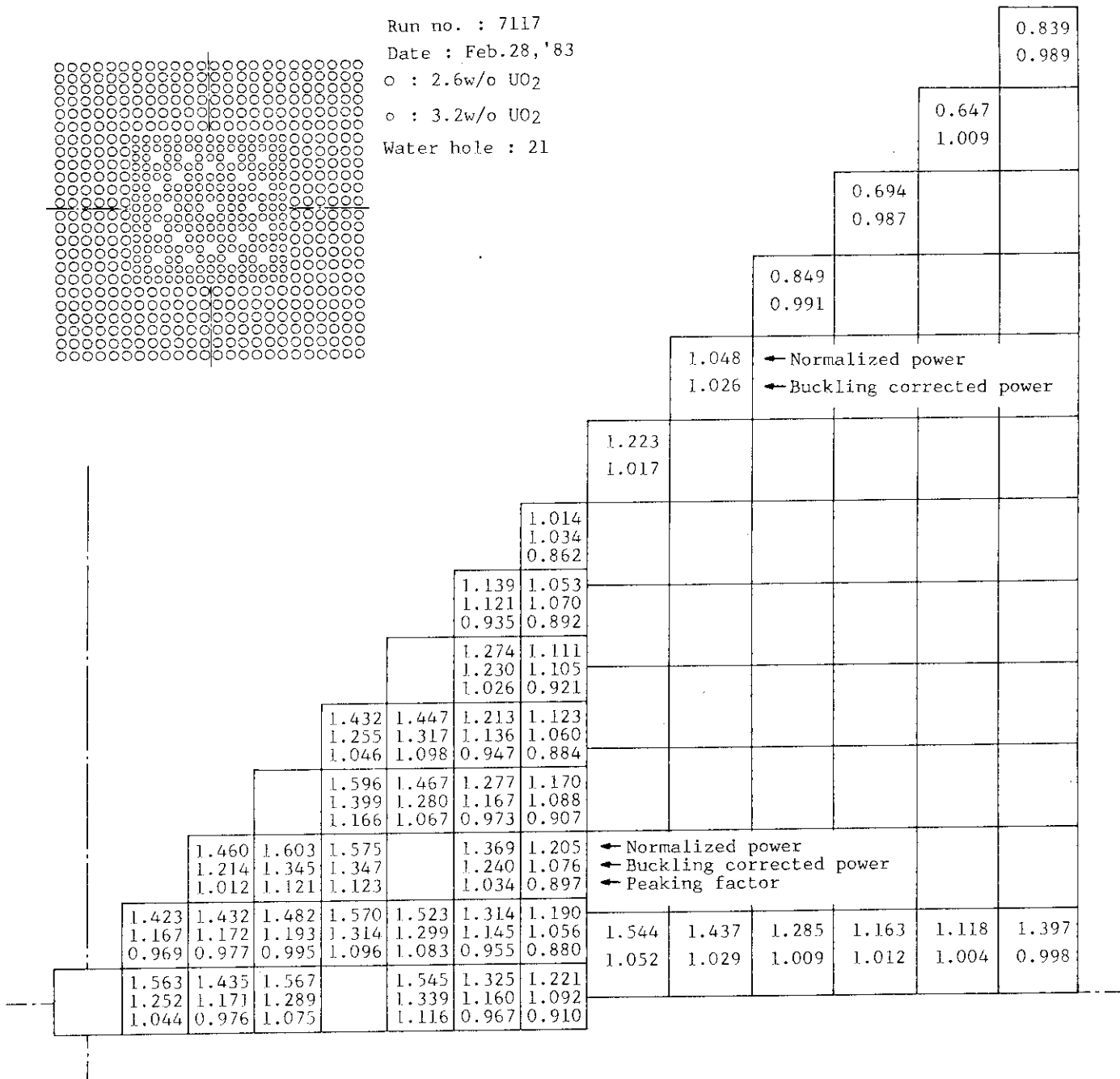


Fig. 14 Power distribution in the core (VI)

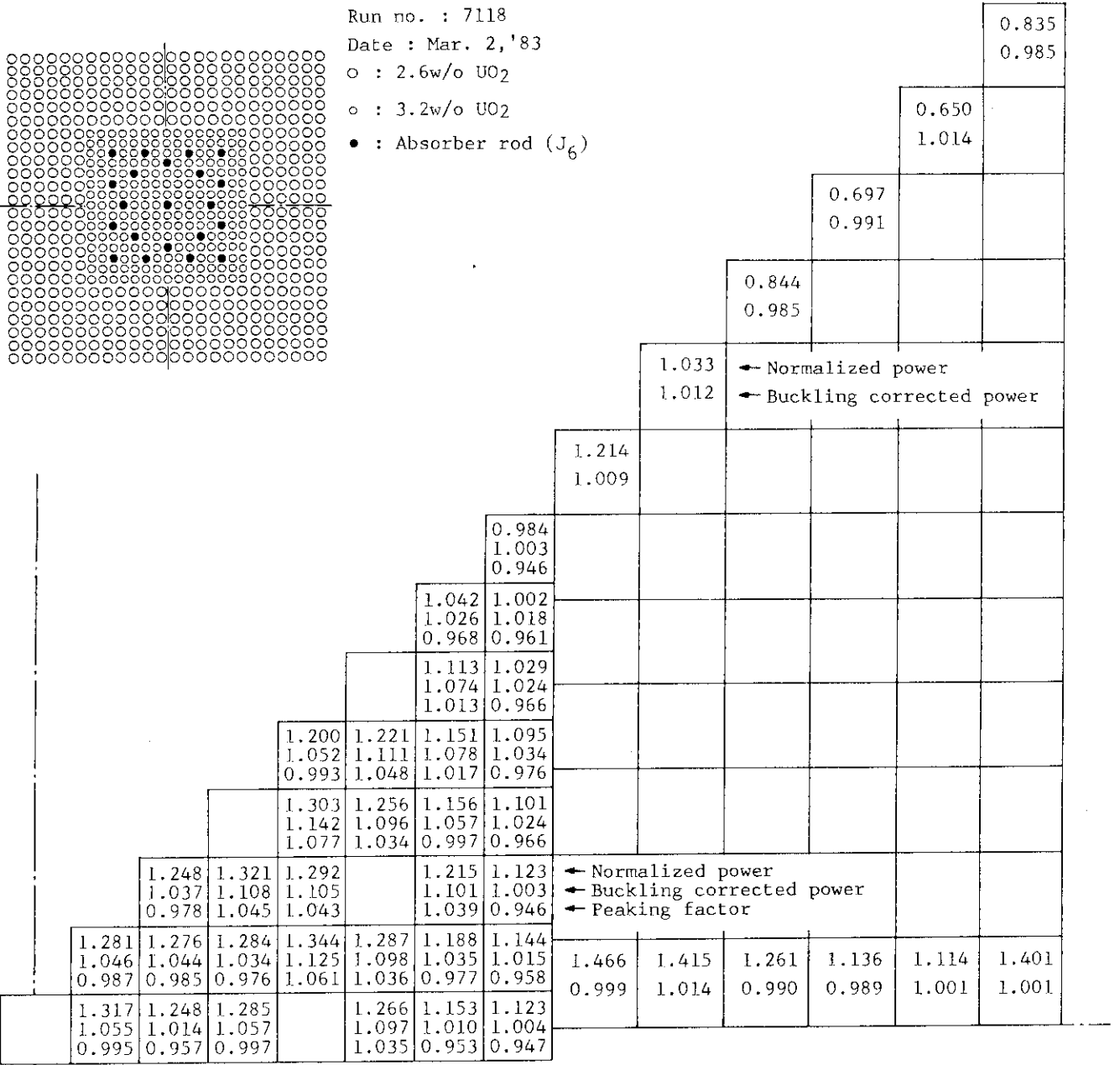


Fig. 15 Power distribution in the core (I)

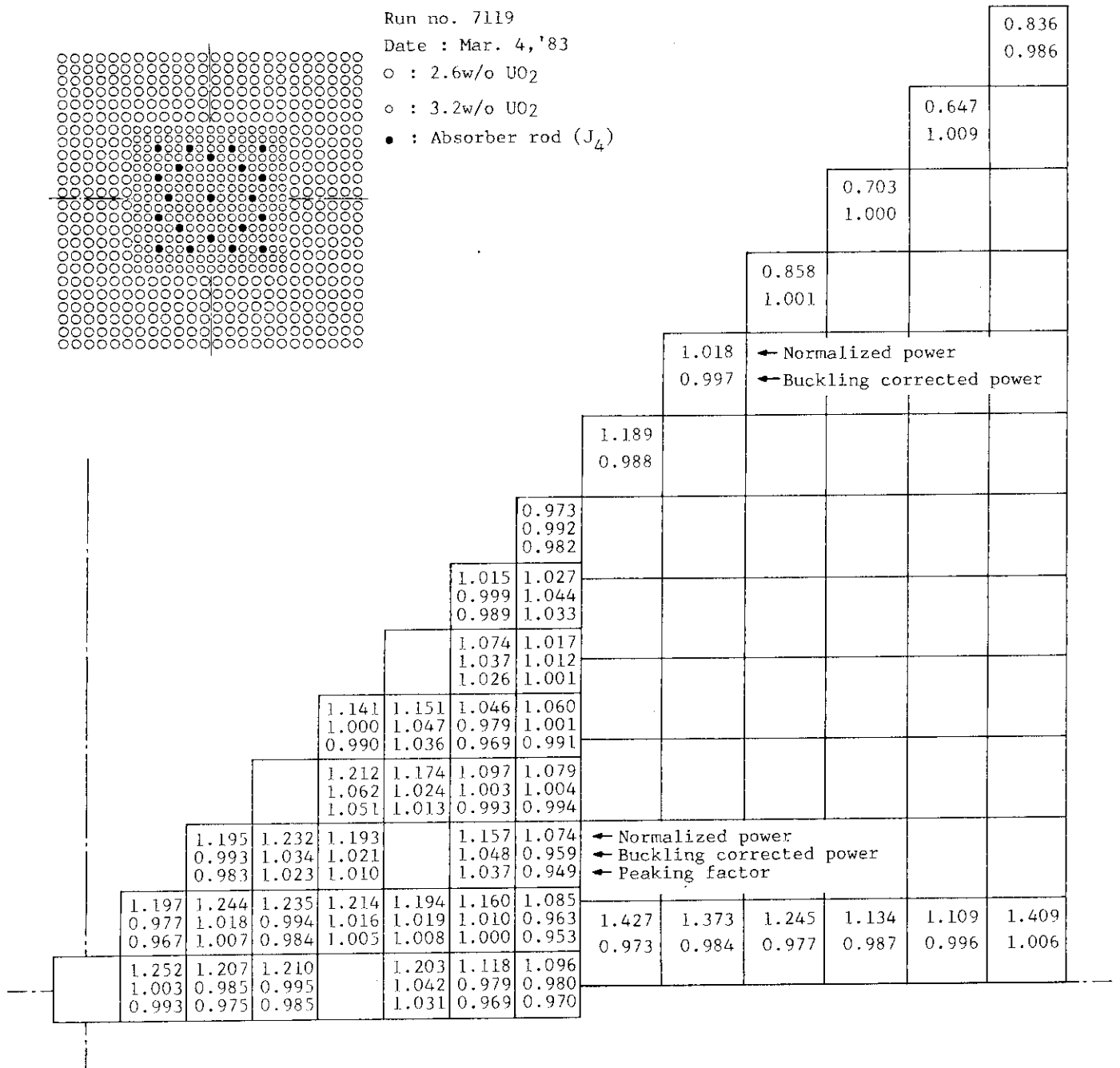


Fig. 16 Power distribution in the core (I)

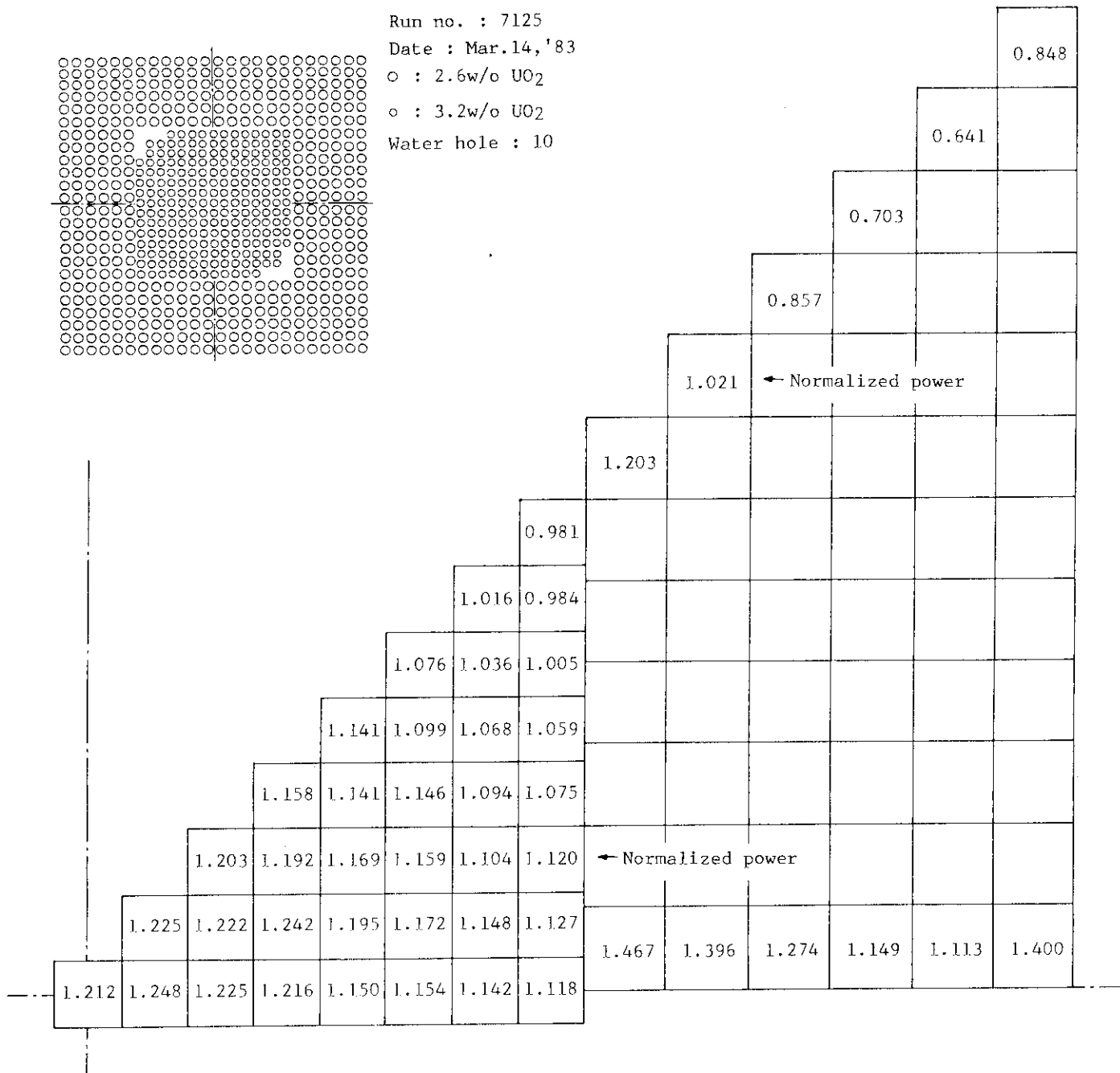


Fig. 20 Power distribution in the core (VII)

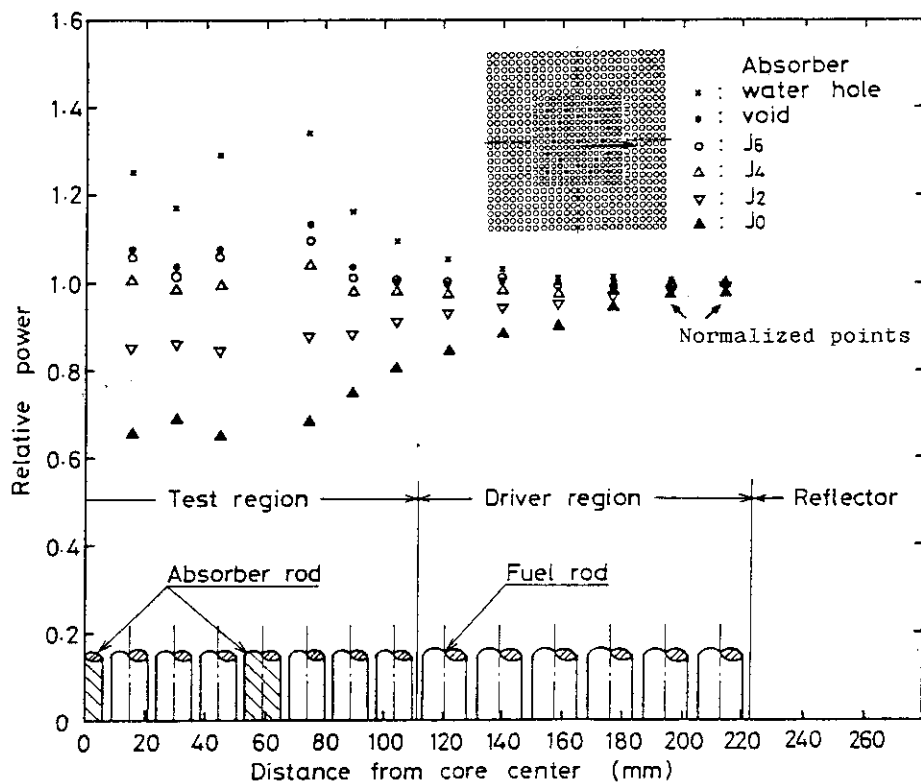


Fig. 21 Relative power distributions along horizontal direction

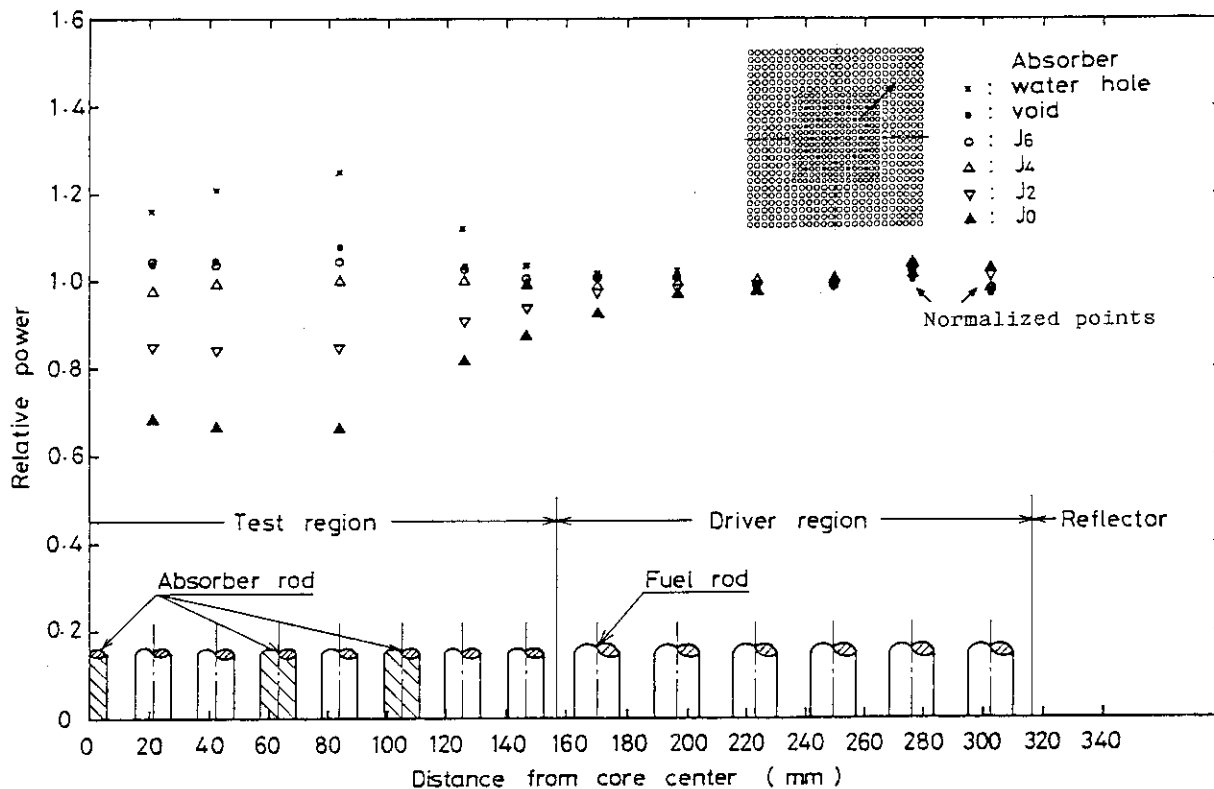


Fig. 22 Relative power distributions along diagonal direction

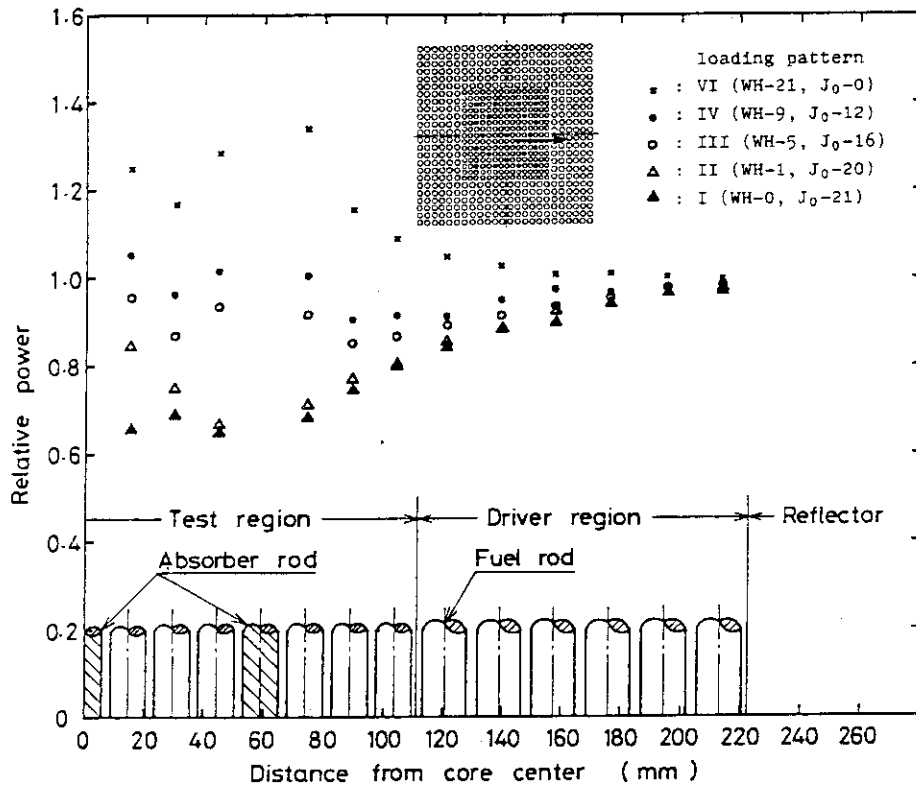


Fig. 23 Relative power distributions along horizontal direction

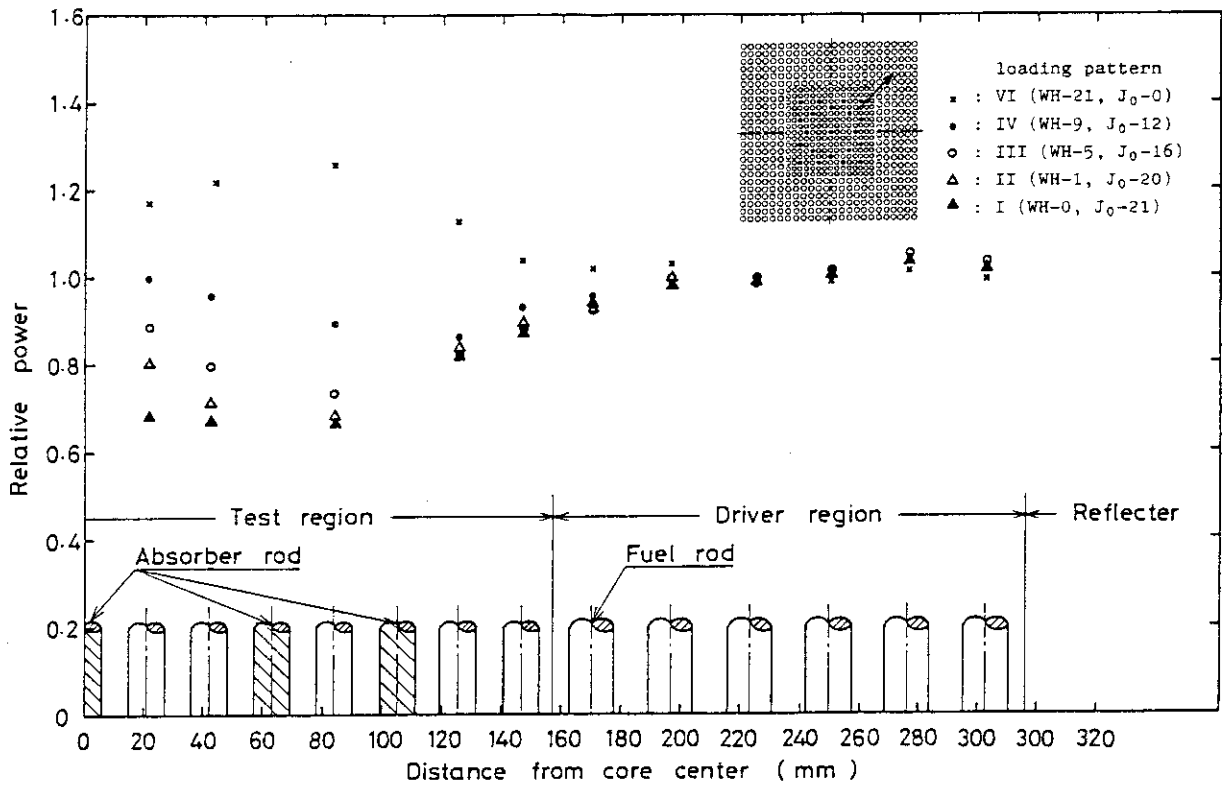


Fig. 24 Relative power distributions along diagonal direction

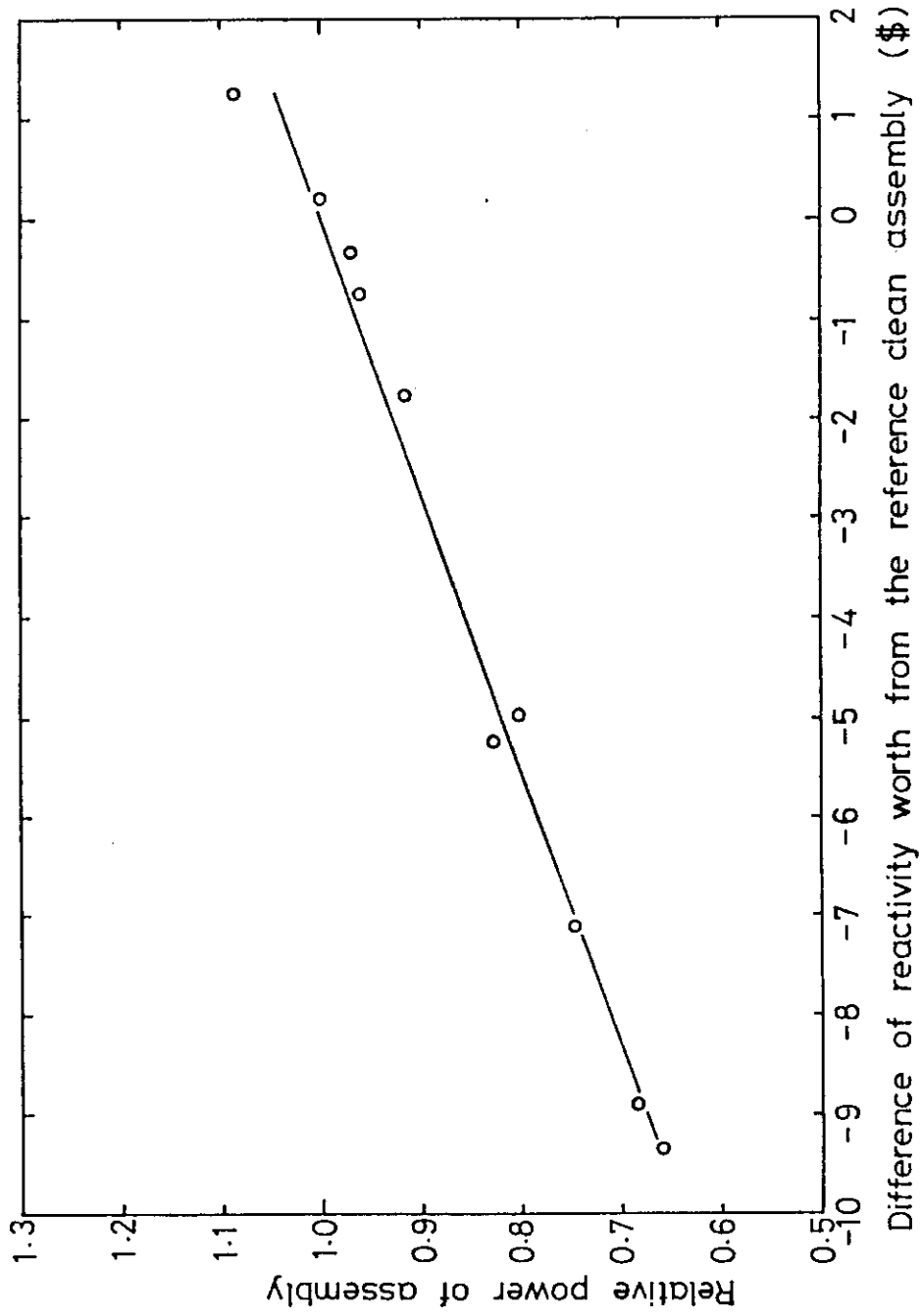


Fig. 25 Relative power of test fuel assembly vs. difference of reactivity worth from the reference clean fuel assembly