

JAERI-M

7745

多目的実験炉の炉心出力分布特性

(セミピン型, マルチホール型燃料格子の
出力分布局所歪の検討)

1978年7月

土井 猛*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

多目的実験炉の炉心出力分布特性
(セミピン型, マルチホール型燃料格子の
出力分布局所歪の検討)

日本原子力研究所 動力炉開発・安全性研究管理部

土井 猛*

(1978年6月12日受理)

多目的高温ガス実験炉のバックアップ燃料として検討されているセミピン型及びマルチホール型燃料体を用いた燃料格子, 具体的には1対の制御棒が挿入及び引き抜かれた場合の単位流量調節領域内の出力分布を, ポイントモデルの格子燃焼計算コードDELIGHT - M 及び二次元輸送計算コードTWO TRAN - IIを用いて解析し, 以下の結果を得た。

- (i) 制御棒断面を正方形でモデル化する場合, 実効増倍率評価上は等表面積モデル化, 出力分布評価上では等体積モデル化が望ましい。
- (ii) 燃料体に対する均質モデルは非均質モデルに比較して制御棒反応度値を過小評価し, かつ出力ピーキングを過大評価するので設計上安全側の評価になる。
- (iii) 拡散近似による制御棒反応度値は, 制御棒を含む燃料体に対する適切な群定数の平均化を行えばほぼ十分な解析精度を得ることが可能である。

なお, 本解析結果はバックアップ炉心設計においてシステムティック燃料最高温度を評価する際の局所出力ピーキング係数の導出に利用された。

* 外来研究員 : 石川島播磨重工(株)

Power distribution characteristics of Experimental Multi-Purpose Very High Temperature Gas Cooled Reactor

---Distortions of the local power distribution in the fuel lattices of internally-cooled pin type and multi-hole type---

Takeshi DOI*

Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received June 12, 1978)

The local power distributions in a unit flow control region with and without a pair of control rods were analyzed for back-up cores of the Experimental Multi-Purpose Very High Temperature Gas Cooled Reactor by use of the point lattice burn-up code DELIGHT-IV and the two-dimensional transport code TWOTRAN-II.

The following were revealed:

- (1) In modeling the cross section of a control rod by square shape, the equi-surface model is desirable for evaluation of multiplication constants and the equi-volume model for evaluation of power distributions.
- (2) A homogeneous model of the fuel elements is conservative in core design compared with the heterogeneous one, because of the underestimation of a control rod worth and the overestimation of a local power peaking.
- (3) The diffusion model estimates the control rod worth accurately with mean cross sections of the fuel elements and control rods.

Keywords; Power Distribution, Internally-Cooled Pin type, Multi-hole type, Fuel Lattice, High Temperature Gas Cooled Reactor, Reactor Core.

* visiting researcher from Ishikawajima Harima Heavy Industry Co.Ltd.

目 次

1. 序	1
2. 計算方法	1
3. 計算条件決定のための予備解析 (A)	2
4. 制御棒形状モデル化のための予備解析 (B)	4
5. 炉心出力分布局所歪の検討	6
6. 拡散近似と輸送近似の比較	8
7. おわりに	9
参考文献	10
付録 反射境界条件用断面積	11

Contents

1. Introduction	1
2. Calculation procedure	1
3. Preliminary analysis, A for selection of calculation model ...	2
4. Preliminary analysis, B for modelling of control rod structure.	4
5. Distortion of local power distribution	6
6. Differences due to diffusion and transport approximations	8
7. Concluding remarks	9
Reference	10
Appendix ; Cross section set for reflective boundary conditio .	11

1. 序

多目的高温ガス実験炉炉心MARK-III⁽¹⁾に引き続いてバックアップ炉心として検討されたセミピン型及びマルチホール型燃料炉心を対象に、出力分布局所歪の検討を行なった。

体系としては、制御棒挿入ブロックとその周囲にある6個の標準燃料ブロックから成るスーパーセルを対象とし、群定数はポイントモデルによる格子燃焼計算コードDELIGHT-4⁽²⁾で計算するとともに、二次元輸送コードTWOTRAN-II⁽³⁾を用いてスーパーセル内出力分布歪をS4輸送近似で解析した。

炉心状態は定格運転状態とし、まず燃料濃縮度3, 4, 6%のセミピン型及びマルチホール型の両形式の燃料体系について、燃料棒を均質化するモデルで制御棒挿入及び引抜状態に対して解析を行なった。更に、燃料濃縮度4%のセミピン型燃料体系に対しては、燃料ピンの配列形状を考慮した非均質モデルによる計算を行なったほか、ポロン濃度1%の可燃性毒物棒の挿入効果を調べるための計算(均質化モデル)も行なっている。また、これらの計算結果とバックアップ炉心設計で取った計算方式に基づく計算結果との比較のために、拡散コードCITATION⁽⁴⁾による解析も行なった。但し、この場合、制御棒を挿入した燃料ブロックに対する群定数は衝突確率法に基づくSLALOM⁽⁵⁾コードによって計算された。

本報では上述の各種計算に関する計算方法と計算結果のほかに、計算形状、エネルギー群数、 S_N の次数などの計算条件を決定するために行なった予備解析及び制御棒のモデル化に関連して行なった予備解析についても述べる。

2. 計算方法

2.1 基本的考え方

炉心の径方向断面を第1図に示す。炉心は7個のスーパーセルとスーパーセルの形状を取らない余剰燃料ブロック及び反射体ブロックから成り、各スーパーセルには2本を単位とした一対の制御棒が挿入されるようになっている。スーパーセル内の出力分布は、そのスーパーセルの炉心内位置で異なり、厳密には個々に求めなければならないが、本検討では制御棒が挿入された場合の格子内での出力分布歪の解析という立場に重点が置かれていることから、空間的には同一スーパーセルの無限配列系が想定された。

第2図に対象とした燃料形式のスーパーセルとそこに挿入される制御棒の形状を示す。燃料棒はセミピン型では標準ブロックに36本、制御棒挿入ブロックに15本装荷されるが、マルチホール型では各々102本、30本となっている。また、制御棒挿入ブロックには偏心した2個の制御棒挿入孔があるほか、後備停止系用の孔及びブロック掴み孔が各1個ずつ設けられている。

スーパーセル内の出力分布歪の計算は、制御棒付近の中性子束の強い非等方性のために拡散理

1. 序

(1) 多目的高温ガス実験炉炉心MARK-IIIに引き続いてバックアップ炉心として検討されたセミピン型及びマルチホール型燃料炉心を対象に、出力分布局所歪の検討を行なった。

体系としては、制御棒挿入ブロックとその周囲にある6個の標準燃料ブロックから成るスーパーセルを対象とし、群定数はポイントモデルによる格子燃焼計算コードDELIGHT-4⁽²⁾で計算するとともに、二次元輸送コードTWOTRAN-II⁽³⁾を用いてスーパーセル内出力分布歪をS4輸送近似で解析した。

炉心状態は定格運転状態とし、まず燃料濃縮度3, 4, 6%のセミピン型及びマルチホール型の両形式の燃料体系について、燃料棒を均質化するモデルで制御棒挿入及び引抜状態に対して解析を行なった。更に、燃料濃縮度4%のセミピン型燃料体系に対しては、燃料ピンの配列形状を考慮した非均質モデルによる計算を行なったほか、ポロン濃度1%の可燃性毒物棒の挿入効果を調べるための計算(均質化モデル)も行なっている。また、これらの計算結果とバックアップ炉心設計で取った計算方式に基づく計算結果との比較のために、拡散コードCITATION⁽⁴⁾による解析も行なった。但し、この場合、制御棒を挿入した燃料ブロックに対する群定数は衝突確率法に基づくSLALOM⁽⁵⁾コードによって計算された。

本報では上述の各種計算に関する計算方法と計算結果のほか、計算形状、エネルギー群数、 S_N の次数などの計算条件を決定するために行なった予備解析及び制御棒のモデル化に関連して行なった予備解析についても述べる。

2. 計算方法

2.1 基本的考え方

炉心の径方向断面を第1図に示す。炉心は7個のスーパーセルとスーパーセルの形状を取らない余剰燃料ブロック及び反射体ブロックから成り、各スーパーセルには2本を単位とした一対の制御棒が挿入されるようになっている。スーパーセル内の出力分布は、そのスーパーセルの炉心内位置で異なり、厳密には個々に求めなければならないが、本検討では制御棒が挿入された場合の格子内での出力分布歪の解析という立場に重点が置かれていることから、空間的には同一スーパーセルの無限配列系が想定された。

第2図に対象とした燃料形式のスーパーセルとそこに挿入される制御棒の形状を示す。燃料棒はセミピン型では標準ブロックに36本、制御棒挿入ブロックに15本装荷されるが、マルチホール型では各々102本、30本となっている。また、制御棒挿入ブロックには偏心した2個の制御棒挿入孔があるほか、後備停止系用の孔及びブロック掘み孔が各1個ずつ設けられている。

スーパーセル内の出力分布歪の計算は、制御棒付近の中性子束の強い非等方性のために拡散理

な問題となって来よう。

5. 炉心出力分布局所歪の検討

第3, 4章で述べた予備解析の結論に基づいてモデル化方法を設定するとともに, 実際のスーパーセル内局所出力分布特性を行なった。すなわち, 計算に対する具体的なモデル化としては, X-Y座標, 制御棒断面に対する等体積正方形モデル化, 6群, S4近似を取るものとし, 解析手法に関するその他の関連条件は全て予備解析と同様とした。

5.1 計算の対象形状

第2図はスーパーセルに一对の制御棒が挿入された状態を示す。スーパーセルの中心と後備停止系孔の中心を通る直線に沿って反射境界条件を適用することにより計算領域を半分にすることが出来る。第23図にはスーパーセルの1/2をX-Y座標で表わした計算の対象形状を示す。ここでは, 制御棒対は偏心させたままで実物を模擬している。予備解析(A)の場合と同様, 標準ブロックと制御棒挿入ブロックに対しては燃料ピン, ブロック攔み孔及び後備停止系孔は均質化され, 制御棒引抜状態では制御棒挿入孔も均質化される。制御棒の断面は等体積の正方形にモデル化し, 制御棒構造材である Hastelloy-X と冷却材ヘリウムガスは均質化して制御棒吸収体の内側と外側に1領域ずつ割り当てた。計算の対象領域はスーパーセル全体を包含する長方形とし, スーパーセルと計算の対象領域の間の余剰領域は燃料棒を均質化した標準ブロックと同一の物質とした。一方, 第24図にはセミピン型燃料ブロックに対する非均質モデルでの計算の対象形状を示す。実際のセミピン型燃料ブロックでは燃料ピンは一直線上に並んではいず, 少しずつずれて配置されているが, 本解析ではメッシュ数削減のため一直線上に配置換えし, 中空円形断面の燃料ピンも中実長方形にモデル化した。但し, この際のモデル化による形状変更に対しても総原子数が保存されるように原子数密度は調整されている。なお, 制御棒と余剰領域の扱いは均質モデルの計算と同様である。

5.2 検討結果

第5表に計算の内容と結果が示されている。燃料濃縮度3, 4, 6%のセミピン型とマルチホール型燃料のスーパーセルに対して制御棒挿入と引抜についての全組合わせ12種類の均質化モデルの計算のほかに, 4%のセミピン型に対して濃度1%のボロンを標準ブロックの黒鉛の一部領域に希釈装荷した可燃性毒物を含む均質化モデルの計算及び燃料ピンを均質化しない非均質モデルの計算についても検討結果が示されている。

セミピン型(C-1~C-6)とマルチホール型(C-7~C-12)燃料のスーパーセルに対する計算結果を比較すると, マルチホール型の方が多少 N_c/Nu 比が大きいこともあり, 実効増倍率が若干高くなっている。制御棒反応度値は燃料濃縮度が増すにつれて減少するが, これは

な問題となって来よう。

5. 炉心出力分布局所歪の検討

第3, 4章で述べた予備解析の結論に基づいてモデル化方法を設定するとともに, 実際のスーパーセル内局所出力分布特性を行なった。すなわち, 計算に対する具体的なモデル化としては, X-Y座標, 制御棒断面に対する等体積正方形モデル化, 6群, S4近似を取るものとし, 解析手法に関するその他の関連条件は全て予備解析と同様とした。

5.1 計算の対象形状

第2図はスーパーセルに一对の制御棒が挿入された状態を示す。スーパーセルの中心と後備停止系孔の中心を通る直線に沿って反射境界条件を適用することにより計算領域を半分にすることが出来る。第23図にはスーパーセルの1/2をX-Y座標で表わした計算の対象形状を示す。ここでは, 制御棒対は偏心させたままで実物を模擬している。予備解析(A)の場合と同様, 標準ブロックと制御棒挿入ブロックに対しては燃料ピン, ブロック摺り孔及び後備停止系孔は均質化され, 制御棒引抜状態では制御棒挿入孔も均質化される。制御棒の断面は等体積の正方形にモデル化し, 制御棒構造材である Hastelloy-X と冷却材ヘリウムガスは均質化して制御棒吸収体の内側と外側に1領域ずつ割り当てた。計算の対象領域はスーパーセル全体を包含する長方形とし, スーパーセルと計算の対象領域の間の余剰領域は燃料棒を均質化した標準ブロックと同一の物質とした。一方, 第24図にはセミピン型燃料ブロックに対する非均質モデルでの計算の対象形状を示す。実際のセミピン型燃料ブロックでは燃料ピンは一直線上に並んではいず, 少しずつずれて配置されているが, 本解析ではメッシュ数削減のため一直線上に配置換えし, 中空円形断面の燃料ピンも中実長方形にモデル化した。但し, この際のモデル化による形状変更に対しても総原子数が保存されるように原子数密度は調整されている。なお, 制御棒と余剰領域の扱いは均質モデルの計算と同様である。

5.2 検討結果

第5表に計算の内容と結果が示されている。燃料濃縮度3, 4, 6%のセミピン型とマルチホール型燃料のスーパーセルに対して制御棒挿入と引抜についての全組合わせ12種類の均質化モデルの計算のほかに, 4%のセミピン型に対して濃度1%のボロンを標準ブロックの黒鉛の一部領域に希釈装荷した可燃性毒物を含む均質化モデルの計算及び燃料ピンを均質化しない非均質モデルの計算についても検討結果が示されている。

セミピン型(C-1~C-6)とマルチホール型(C-7~C-12)燃料のスーパーセルに対する計算結果を比較すると, マルチホール型の方が多少 N_c/Nu 比が大きいこともあり, 実効増倍率が若干高くなっている。制御棒反応度値は燃料濃縮度が増すにつれて減少するが, これは

るからである。座標には $X-Y$ と $R-\theta$ の2種類を、群数には4群と6群を、また、制御棒についてはその断面を等体積と等表面積の各条件で正方形にモデル化した場合を考えた。なお、体系は燃料濃縮度4%、燃料温度1200°K、減速材温度1050°Kのセミピン型燃料体系とした。

3.2 計算の対象形状

第4図、第5図に $X-Y$ 及び $R-\theta$ 座標に対する計算の形状を示す。標準ブロック及び制御棒挿入ブロックの燃料棒は均質化された。第6図にはモデル化した制御棒の断面形状を示す。 $X-Y$ 座標では中空正方形、 $R-\theta$ 座標では中空扇形に近似される。しかし、局所出力分布のピークは制御棒から遠く離れた場所に生ずるため、この制御棒の断面形状の違いには大きな影響は受けないと考えられる。また、制御棒吸収体の内外には構造材である Hastelloy-X とヘリウムガスがあるが、これらは全て吸収体に隣接する内外の1領域として総原子数が保存されるように均質化された。一方、TWO TRAN は任意の形状に対して反射境界条件を適用することは出来ないで、7個の六角形状の燃料ブロックから成るスーパーセルの外側境界は、 $X-Y$ 座標では長方形に、 $R-\theta$ 座標では円形に近似しなくてはならない。このような場合、一般的には計算の対象となる領域の面積を等しく取ったモデル化が多いが出力分布に着目した場合、これは出力ピーキングが過少評価となるため、設計データとして見た場合好ましくない。そこで、体系の外側形状としてはスーパーセルの全体を包含するような長方形あるいは円形にとるものとした。従って、実際のスーパーセルと対象計算領域の間には余剰な領域が含まれることになるが、この領域には燃料棒を均質化した標準ブロックを想定した。このことによりスーパーセル内の出力分布のピーク値は実際よりやや過大評価されることになり、設計上からは安全側の評価となる。

3.3 検討結果

第3表に計算の内容、条件及び結果が示されている。また、第7図～第11図には得られた出力分布を示す。これらの出力分布値はスーパーセル内の平均値に対する各ゾーン^(注)内の平均値の比を表わす。

第3表に示した計算A-1とA-2は制御棒の断面形状のモデル化、すなわち等体積と等表面積の条件で正方形にモデル化した場合を $X-Y$ 座標、6群、S4近似により計算した結果である。先にも述べたように、設計の立場から両者を比較する場合、出力ピーキングに対してはどちらが真の値に近いかということより、むしろどちらが過大評価となる値に近いかということに重点を置くのが妥当である。そこで、出力分布の最大値を見ると、A-1で1.33、A-2で1.32となっている。このことから出力分布歪の検討では制御棒の断面に対しては等体積正方形モデル化の方が望ましいといえる。一方、A-3は $X-Y$ 座標モデルに対する $R-\theta$ 座標モデルの違いを調べるため、等体積モデル化制御棒、6群、S4近似により計算した結果を示す。出力分布の最大値は1.30であり、A-1の場合より小さくなっている。これはA-1とA-3の体系を比較す

(注) ゾーン : 出力分布計算において、数値が計算される最小区分領域。

るとわかるように、A-1の方がスーパーセル外の余剰領域が大きいことから出力分布歪が過大評価される結果である。このことから、計算領域としてスーパーセル全体を包含する体系を採用する場合、余剰領域の大きい方が出力ピーキングに対しては設計上安全側の評価をすることがわかる。また、A-1とA-4及びA-1とA-5の結果の比較から、等体積制御棒モデル化、X-Y座標によるS4とS6、ならびに6群と4群のモデルの違いがわかる。A-1とA-4では実効増倍率、出力分布ともほぼ一致しているが、A-1とA-5では実効増倍率に多少の差が生じている。従って、計算時間と計算精度に着目すればTWO TRANによる計算は6群、S4程度の近似が最も合理的といえる。なお、S_Nの次数はこれ以上高く取っても結果には影響を与えないが、群数の場合には影響はなお若干残る可能性はある。

以上の検討に基づき、局所出力分布歪の解析は等体積制御棒モデル化、X-Y座標、6群、S4近似によって行なうこととした。

4. 制御棒形状モデル化のための予備解析(B)

出力分布局所歪の解析では、計算時間を短縮するために断面が中空円形の制御棒を中空正方形に近似し、X-Y座標を用いて輸送計算が行なわれる。実効増倍率や出力分布は制御棒のモデル化に影響されるが、その影響の程度は必ずしも明らかでない。そこで、実際の体系による局所出力分布計算を行なう前に簡単な体系で制御棒断面の形状モデル化の効果を調べる必要がある。そこで、この節では簡単な円形断面制御棒を持つ円形体系をX-Y座標で模擬し、制御棒の断面形状を正方形から徐々に円形に近づけて行った場合の効果について検討した結果について述べる。検討においては、模擬した円形体系の外側の領域に反射境界条件を与えるために特殊な断面積セットを定義して適用した。

4.1 計算の対象形状

制御棒断面を徐々に円形に近づけて行く効果を調べる場合、予め正確な結果を知っておく必要があり、そのためには円形体系が最適である。それは円形断面の制御棒を中心に持つ円形体系はR- θ 座標による計算で特性を厳密に求めることが出来るからである。外周部には反射境界条件を適用する。第12図に計算の対象形状を示す。X-Y座標で円形体系を模擬するためには外周部を多角形の境界で表現し、この外側に反射境界条件用断面積^(注)を適用する。反射境界条件用断面積を適用出来る条件として、境界部付近では中性子束の角度依存性が無視出来、境界面に平行な中性子流が生ぜず、さらにX-Y平面に垂直な方向への中性子のもれがないことが必要である。本検討で対象とする体系は燃料領域が充分大きい(平均自由行程に対して)うえ、炉心の高さも充分高いのでこの条件は一応満たされていると考えられる。計算領域としては円形の対称性を利用して全炉心の1/4を取った。第13図には制御棒の断面形状を正方形から徐々に円形に近づ

(注) 反射境界条件用断面積 : 付録参照

るとわかるように、A-1の方がスーパーセル外の余剰領域が大きいことから出力分布歪が過大評価される結果である。このことから、計算領域としてスーパーセル全体を包含する体系を採用する場合、余剰領域の大きい方が出力ピーキングに対しては設計上安全側の評価をすることがわかる。また、A-1とA-4及びA-1とA-5の結果の比較から、等体積制御棒モデル化、X-Y座標によるS4とS6、ならびに6群と4群のモデルの違いがわかる。A-1とA-4では実効増倍率、出力分布ともほぼ一致しているが、A-1とA-5では実効増倍率に多少の差が生じている。従って、計算時間と計算精度に着目すればTWOTRANによる計算は6群、S4程度の近似が最も合理的といえる。なお、 S_N の次数はこれ以上高く取っても結果には影響を与えないが、群数の場合には影響はなお若干残る可能性はある。

以上の検討に基き、局所出力分布歪の解析は等体積制御棒モデル化、X-Y座標、6群、S4近似によって行なうこととした。

4. 制御棒形状モデル化のための予備解析(B)

出力分布局所歪の解析では、計算時間を短縮するために断面が中空円形の制御棒を中空正方形に近似し、X-Y座標を用いて輸送計算が行なわれる。実効増倍率や出力分布は制御棒のモデル化に影響されるが、その影響の程度は必ずしも明らかでない。そこで、実際の体系による局所出力分布計算を行なう前に簡単な体系で制御棒断面の形状モデル化の効果を調べる必要がある。そこで、この節では簡単な円形断面制御棒を持つ円形体系をX-Y座標で模擬し、制御棒の断面形状を正方形から徐々に円形に近づけて行った場合の効果について検討した結果について述べる。検討においては、模擬した円形体系の外側の領域に反射境界条件を与えるために特殊な断面積セットを定義して適用した。

4.1 計算の対象形状

制御棒断面を徐々に円形に近づけて行く効果を調べる場合、予め正確な結果を知っておく必要があり、そのためには円形体系が最適である。それは円形断面の制御棒を中心に持つ円形体系はR- θ 座標による計算で特性を厳密に求めることが出来るからである。外周部には反射境界条件を適用する。第12図に計算の対象形状を示す。X-Y座標で円形体系を模擬するためには外周部を多角形の境界で表現し、この外側に反射境界条件用断面積^(注)を適用する。反射境界条件用断面積を適用出来る条件として、境界部付近では中性子束の角度依存性が無視出来、境界面に平行な中性子流が生ぜず、さらにX-Y平面に垂直な方向への中性子のもれがないことが必要である。本検討で対象とする体系は燃料領域が充分大きい(平均自由行程に対して)うえ、炉心の高さも充分高いのでこの条件は一応満たされていると考えられる。計算領域としては円形の対称性を利用して全炉心の1/4を取った。第13図には制御棒の断面形状を正方形から徐々に円形に近づ

(注) 反射境界条件用断面積 : 付録参照

けてゆく様子を示す。Nをモデル化した制御棒形状の凸凹の個数とし、N = 0（正方形）の場合には等体積と等表面積の両モデル化に対して計算を行なったが、N = 1, 2及び7の場合は等体積モデル化の場合のみが計算された。

4.2 検討結果

燃料としては燃料濃縮度3%のセミピン型標準ブロックと同一のものを、制御棒吸収体にはボロン濃度30%のものを想定した。

先にも述べた各種の制御棒の形状モデル化方法に対するX-Y座標による計算と真値を与えるR- θ 座標による近似度を評価するため、制御棒領域を燃料で置換した体系に対するR- θ 座標とX-Y座標による計算も行なわれた。また、体系の外側境界には反射境界条件用断面積を使用しているのので、X-Y平面に垂直な方向への中性子のもれの効果は炉心高さを大きく取ることによって実質的に無視出来るように近似した。等表面積モデル化をした制御棒の場合、等体積モデル化と比較して制御棒体積が小さくなり、逆に燃料体積が大きくなるが、総原子数は保存するように原子数密度が調整されている。

第4表に計算の内容と結果が示されている。但し、計算は予備解析(A)と同様に6群、S4近似である。第4表のB-7とB-8の結果からR- θ 座標とX-Y座標による計算結果の違いがわかる。実効増倍率はX-Y座標による計算の方が0.7%ほど大きい。これは反射境界条件を与える特殊な断面積を使用したことに原因があり、外周部を更に細かい多角形で表現すれば境界におけるメッシュ効果が少なくなり、良い一致が得られると予想される。B-2とB-3の計算は制御棒の断面を正方形に近似した場合であり、両者の結果の比較から実効増倍率の点では等体積モデル化よりも等表面積モデル化の方が良いことが分かる。また、B-4、B-5、B-6とNを徐々に大きくすると、特性はB-1の計算結果に近づくが、B-6の場合であるN=7では実効増倍率がB-1の場合よりわずかに越えてしまう。このことは上述のB-7とB-8の結果の比較からも予想出来ることである。以上の実効増倍率の変化を第14図に示す。第15図～第22図にB-1～B-8の計算で求めた出力分布を示す。B-7とB-8の計算では制御棒が存在しないので出力分布は平坦になっている。B-1で計算した出力分布は正しい分布を表わしている。また、B-2とB-3の結果から制御棒の等体積モデル化と等表面積モデル化の場合を比較すると、等表面積モデル化の場合の方が出力分布歪が小さく、出力分布はB-1で計算した出力分布より平坦になっている。等体積モデル化では、反対に出力分布歪はB-1の場合よりも大きくなっている。従って、出力分布歪の解析では制御棒に対して等体積モデル化を適用した方が出力ピーキングの過大評価を保つ上で好ましいといえる。N=1, 2, 7と円形に近づくにつれて出力分布もB-1計算結果に近づいて行くことがB-4～B-6の計算結果からわかる。

以上の検討結果から、制御棒断面を正方形で近似する場合、実効増倍率評価の点からは等表面積モデル化の方が良いが、出力分布歪の過大評価を保つ立場からは等体積モデル化の方が好ましいと結論される。しかし、実際のスーパーセルのように2本の制御棒が対になって存在する場合には、制御棒の体積や表面積のほか、相互作用のために制御棒間距離が重要な因子となり、円形断面の制御棒対を2個の正方形断面で近似する場合にその相互距離をどのように決めるかも大き

な問題となって来よう。

5. 炉心出力分布局所歪の検討

第3, 4章で述べた予備解析の結論に基づいてモデル化方法を設定するとともに, 実際のスーパーセル内局所出力分布特性を行なった。すなわち, 計算に対する具体的なモデル化としては, X-Y座標, 制御棒断面に対する等体積正方形モデル化, 6群, S4近似を取るものとし, 解析手法に関するその他の関連条件は全て予備解析と同様とした。

5.1 計算の対象形状

第2図はスーパーセルに一对の制御棒が挿入された状態を示す。スーパーセルの中心と後備停止系孔の中心を通る直線に沿って反射境界条件を適用することにより計算領域を半分にすることが出来る。第23図にはスーパーセルの1/2をX-Y座標で表わした計算の対象形状を示す。ここでは, 制御棒対は偏心させたままで実物を模擬している。予備解析(A)の場合と同様, 標準ブロックと制御棒挿入ブロックに対しては燃料ピン, ブロック掘み孔及び後備停止系孔は均質化され, 制御棒引抜状態では制御棒挿入孔も均質化される。制御棒の断面は等体積の正方形にモデル化し, 制御棒構造材である Hastelloy-X と冷却材ヘリウムガスは均質化して制御棒吸収体の内側と外側に1領域ずつ割り当てた。計算の対象領域はスーパーセル全体を包含する長方形とし, スーパーセルと計算の対象領域の間の余剰領域は燃料棒を均質化した標準ブロックと同一の物質とした。一方, 第24図にはセミピン型燃料ブロックに対する非均質モデルでの計算の対象形状を示す。実際のセミピン型燃料ブロックでは燃料ピンは一直線上に並んではいず, 少しずつずれて配置されているが, 本解析ではメッシュ数削減のため一直線上に配置換えし, 中空円形断面の燃料ピンも中実長方形にモデル化した。但し, この際のモデル化による形状変更に対しても総原子数が保存されるように原子数密度は調整されている。なお, 制御棒と余剰領域の扱いは均質モデルの計算と同様である。

5.2 検討結果

第5表に計算の内容と結果が示されている。燃料濃縮度3, 4, 6%のセミピン型とマルチホール型燃料のスーパーセルに対して制御棒挿入と引抜についての全組合わせ12種類の均質化モデルの計算のほかに, 4%のセミピン型に対して濃度1%のボロンを標準ブロックの黒鉛の一部領域に希釈装荷した可燃性毒物を含む均質化モデルの計算及び燃料ピンを均質化しない非均質モデルの計算についても検討結果が示されている。

セミピン型(C-1~C-6)とマルチホール型(C-7~C-12)燃料のスーパーセルに対する計算結果を比較すると, マルチホール型の方が多少 N_c/Nu 比が大きいこともあり, 実効増倍率が若干高くなっている。制御棒反応度値は燃料濃縮度が増すにつれて減少するが, これは

燃料濃縮度が増すとともに中性子の吸収の割合が相対的に燃料で増加するためである。そして、制御棒挿入による出力分布の歪の変化もこれと同様の傾向を示している。一方、制御棒引抜状態では燃料濃縮度が増すにつれて出力分布歪は大きくなっている。また、均質モデルによる計算と非均質モデルによる計算の結果を比較すると、前者の方が一般的に実効増倍率が高いものの、制御棒引抜状態 (C-4, C-15) ではその差が 0.5 % であるのに対して挿入状態 (C-3, C-14) では 4.6 % と大きくなり、非均質モデルによる計算では制御棒価値を均質モデルによる計算より大きく評価することがわかる。このことは、実際に設計で多く使用される均質モデルによる計算では制御棒の反応度価値が過少評価されることになり、設計上からは安全側の評価とな^(注) となっているといえよう。

第 25 図～第 39 図に各計算ケース毎に出力分布 (スーパーセル内の平均値に対する各ゾーン平均値の比) を示す。マルチホール型燃料セルの方がセミピン型セルより出力分布歪が若干大きくなっている。制御棒挿入時の局所出力分布の最大値は燃料濃縮度 3 % のマルチホール型セルの場合 (C-7) で 1.54 であり、制御棒から最も遠く離れた位置に発生している。均質モデルによる計算における制御棒挿入ブロック内の出力分布の値が標準ブロックに比べると一見非常に小さく思えるが、これは燃料棒本数が制御棒挿入ブロックと標準ブロックで異なることからくるもので、燃料棒 1 本当りの出力の分布に換算すると差は小さくなる。このことは出力分布に対する非均質モデルによる計算の結果を見れば理解出来る。

均質モデルによる計算と非均質モデルによる計算の結果を比較すると、制御棒引抜状態 (C-4, C-15) では出力分布の最大値が各々 1.13, 1.06 であり、制御棒挿入状態 (C-3, C-15) では各々 1.51, 1.47 となる。非均質モデルによる計算では制御棒価値が均質モデルによる計算よりも大きいにもかかわらず出力分布歪は小さくなっており、また制御棒引抜時でも出力分布の歪は均質モデルによる計算よりも小さくなっている。このことから、均質モデルによる計算は出力分布歪の点でも過大評価する傾向を保っているといえる。出力分布の最大値の発生位置を均質モデルによる計算と非均質モデルによる計算で見ると、制御棒挿入時では一致するものの、引抜時では異なっている。すなわち、均質モデルによる計算では出力分布の最大値の生ずる位置が制御棒挿入ブロックに接した位置であるのに対して、非均質モデルによる計算ではスーパーセルの中心に近い位置になっている。しかし厳密には均質モデルによる計算結果に対しては、制御棒挿入ブロック内の出力分布値を燃料棒 1 本当りの出力に換算した分布で見なければならぬが、これはデータ処理上不可能なため、この比較は便宜上のものといえよう。

さらに、可燃性毒物を含んだ計算ケース (C-13) を含まない場合 (C-3) と比較すると、実効増倍率で約 5 % 減少しているが、出力分布は局所的に平坦化しているに過ぎず、出力分布平坦化への効果は小さいといえよう。

(注) 設計上制御棒反応度価値は炉停止余裕の立場からは過少評価の方が安全側である。

6. 拡散近似と輸送近似の比較

これまで二次元輸送コードTWOTRAN を用いて行なった一連の計算について述べて来た。本節ではこれらの結果との比較検討のために、通常的设计で行なっている制御棒の挿入した燃料ブロックに対する群定数を衝突確率法に基く格子計算コードSLALOM によって計算することを前提に、拡散コードCITATION によって計算した出力分布について述べる。

6.1 計算の対象形状

第40図に計算の対象形状を示す。形状の取り方はTWOTRAN による計算の場合と同様である。制御棒自身は計算精度上拡散理論で扱うことは好ましくないのでSLALOMコードで自己及び相互遮蔽効果を考慮した制御棒挿入ブロックの均質化群定数を作成するものとした。このほかに三角座標によるスーパーセルに対する計算も合わせて行なった。

6.2 検討結果

計算は燃料濃縮度4%の燃料棒を均質化したセミピン型スーパーセルに対して、制御棒挿入時と引抜時について二種類の座標系で行なった。第6表に計算の内容と結果が示されている。また、第41図～第44図に出力分布に対する計算結果を示す。制御棒引抜状態(D-2)では輸送近似計算の結果(C-4)と比較すると、実効増倍率で1.2%の差があるものの、出力分布はほとんど一致している。制御棒が挿入されると拡散近似と輸送近似の差は著しくなり、(D-1)のケースと予備解析の(A-1)のケースとを比較すると実効増倍率で2.6%程度に差が広がっている。一方、出力分布は制御棒から遠く離れた領域では非常に良く一致するものの、制御棒に近づくにつれて相違は大きくなる。拡散近似による制御棒値は輸送近似による結果(A-1とC-4の結果の比較)より約3.6%過大評価するが、これは従来の制御棒値計算の精度から見た場合比較的小さな差といえ、制御棒に対しては適切な均質化モデルを取ればほぼ十分な解析度を得ることが可能であるといえる。

一方、三角メッシュによる計算においては計算領域の大きさがX-Y座標系による場合よりも小さいので、当然のことながら制御棒引抜時(D-4とD-2)には現われなかった実効増倍率の差は、挿入時(D-3とD-1)では4.1%にもなる。従って、制御棒値もX-Y座標による場合よりも約13.3%も過大評価することになる。また、出力分布はメッシュ数が少ないので直接的な比較にはならないが、傾向的にはX-Y座標による解析結果と似ているといえる。

7. おわりに

以上の解析を通して次のことが明らかになった。

(1) 座標, 群数, S_N 次数の効果

計算領域はスーパーセル全体を包含するように取った方が出力分布に対して過大評価となる。従って, $X-Y$ 座標の方が $R-\theta$ 座標よりも設計上安全側評価になる。

群数, S_N 次数に関しては計算時間と精度に着目すれば, 6群, S_4 程度が合理的である。

(2) 制御棒の形状モデル化の効果

制御棒断面を正方形でモデル化する場合, 実効増倍率評価の点からは等表面モデル化の方が良いが, 局所出力ピーキングを過大評価する立場からは等体積モデル化の方が好ましい。

(3) $X-Y$ 座標による局所出力分布歪の解析結果

(i) 均質モデルは非均質モデルよりも制御棒値を過少評価し, 局所出力ピーキングを過大評価する傾向があり, 従って均質モデルは非均質モデルより設計上安全側評価である。

(ii) 均質モデルの場合, マルチホール型の方がセミピン型よりも出力分布歪が大きくなる。

(iii) 可燃性毒物の効果は出力分布に対しては局所的な平坦化となるに過ぎない。

(4) 拡散近似と輸送近似の比較結果

(i) 制御棒引抜時には, 出力分布はほぼ一致し, 実効増倍率にはわずかに差が生じる。

(ii) 制御棒挿入時には, 出力ピーキング値はほぼ一致するが実効増倍率の差は大きくなる。

(iii) 制御棒値は群定数に対する適切な平均化により拡散近似でも十分な精度を得ることが出来る。

なお, 特に出力分布の解析については出力ピーキングを常に過大評価するような計算モデルを採用することにより設計上安全側の結果が得られるように配慮されており, 従って本解析で得られた出力分布歪は現実の歪より若干過大評価しているといえる。しかし, 今回の解析はスーパーセルの炉心内の位置を無視する条件でなされたものであり, もしこの効果を考慮すれば出力分布歪は若干大きくなる可能性がある。従って厳密な解析では計算を炉心全体まで拡張する必要があるといえる。このほか, 計算のモデル化上でのものとして対制御棒のモデル化方法, 制御棒挿入孔のボイド効果, 非均質性と群効果及びメッシュ効果との相関等今後検討を要する問題点もなお残されているといえる。

謝 辞

本作業を行なうに際して動力炉開発・安全性研究管理部の武谷清昭部長, 青地哲男次長, 多目的炉設計研究室の安野武彦室長をはじめ多くの方々にご協力をいただき深く感謝いたします。また, 技術的にも深く御指導下さいました多目的炉設計研究室の新藤隆一氏, 平野光将氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 青地哲男 他, “多目的高温ガス実験炉の炉心参考設計 MARK-III” : JAERI-M6895 (1976)
- (2) 新藤隆一 “高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-4” 未公開資料
- (3) Lathrop K.D. and Brinkley F.W. “TWOTRAN-II An Interfaced Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport” : LA-4848-MS (1973)
- (4) Fowler T.B. and Vondy D.R. “Nucler Reactor Core Analysis Code CITATION” : ORNL-TM-2496 (1969)
- (5) 有賀武夫 “異種組格子群定数平均及びチャンネル境界条件導出コード SLALOM” 未公開資料
- (6) 倉重哲雄, 平野光将, 新藤隆一 “ENDF/B-Vに基く多群定数ファイル JIMCOF” : JAERI-M6972 (1977)

付録 反射境界条件用断面積

第12図に示した様に、円形体形をX-Y座標で模擬するには円形外周部に反射境界条件を与えなくてはならないが、一般の計算コードでは任意の場所に反射境界条件を与えることは不可能である。そこで、断面積を適当に操作し、核的バランスに影響を与えずに任意の場所に反射境界条件を与えるのがこの反射条件用断面積である。この特殊な断面積の使用出来る条件として、反射境界条件を与えるこの仮想的な物質は計算コードが本来与えることの出来る反射境界面に接していなくてはならないこと、反射条件を与えるべき物質境界に沿って中性子流は存在せず、角度依存中性子束も等方であること、XY平面に垂直な方向のもれがないこと等である。第12図の体系では、平均自由行程に比べて体系の半径が充分に大きいので、上に述べた条件は満たされていると考えられる。以下、反射条件用断面積の導出を考える。

一般に、中性子輸送方程式を多群表示すると次のようになる。

$$\Omega \cdot \nabla \phi_g(\mathbf{r}, \Omega) + \Sigma_t^g(\mathbf{r}) \phi_g(\mathbf{r}, \Omega) = \frac{Xg}{K_{eff}} \sum_{g'} \nu \Sigma_f^{g'}(\mathbf{r}) \int \phi_{g'}(\mathbf{r}, \Omega') d\Omega' \\ + \sum_{g'} \int \Sigma_s^{g' \rightarrow g}(\Omega' \rightarrow \Omega; \mathbf{r}) \phi_{g'}(\mathbf{r}, \Omega') d\Omega' \quad (1)$$

但し、 $\phi_g(\mathbf{r}, \Omega)$ は座標 \mathbf{r} 、方向 Ω における g 群内の中性子束、 $\Sigma_t^g(\mathbf{r})$ は全断面積、 $\nu \Sigma_f^g(\mathbf{r})$ は核分裂断面積に発生中性子数をかけたもの、 $\Sigma_s^{g' \rightarrow g}(\Omega' \rightarrow \Omega; \mathbf{r})$ は散乱移送核、 Xg は核分裂スペクトル、 k_{eff} は実効増倍率を表わしている。

反射条件を与える断面積として、吸収も核分裂もゼロであり、上方散乱も下方散乱もなく、自群内散乱のみ存在し、かつ等方散乱という性質を持たせる。すなわち、

$$\Sigma_a^g(\mathbf{r}) = 0 \quad (2)$$

$$\nu \Sigma_f^g(\mathbf{r}) = 0 \quad (3)$$

$$\Sigma_s^{g' \rightarrow g}(\Omega' \rightarrow \Omega; \mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \Sigma_s^{g' \rightarrow g}(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi} \Sigma_s^g(\mathbf{r}); & g' = g \\ 0 & ; g' \neq g \end{cases} \quad (4)$$

(2), (3), (4)式を(1)式に代入すると、

$$\text{左辺} = \Omega \cdot \nabla \phi_g(\mathbf{r}, \Omega) + \Sigma_s^g(\mathbf{r}) \phi_g(\mathbf{r}, \Omega) \quad (5)$$

$$\text{右辺} = \frac{1}{4\pi} \Sigma_s^g(\mathbf{r}) \int \phi_g(\mathbf{r}, \Omega') d\Omega' \quad (6)$$

となり、(5)、(6)式より次式を得る。

$$\Omega \cdot \nabla \phi_g(\mathbf{r}, \Omega) = \Sigma_s^g(\mathbf{r}) \left\{ \frac{1}{4\pi} \int \phi_g(\mathbf{r}, \Omega) d\Omega - \phi_g(\mathbf{r}, \Omega) \right\} \quad (7)$$

この式において、もし、角度依存中性子束が等方であれば右辺はゼロとなり、次式が成立つ。

$$\Omega \cdot \nabla \phi_g(\mathbf{r}, \Omega) = 0 \quad (8)$$

従って、外部の反射境界条件に接したこの特殊な断面積を持つ物質領域内では、中性子束分布はフラットになり、中性子流は存在しなくなる。この物質と接する内部の体系の境界では中性子流がないために反射境界条件が成立することになる。また、この物質は吸収も核分裂もしないので核的な影響は生じない。但し、XY平面に垂直な方向のもれはこの物質にも影響を与えるのでゼロでなくてはならない。この様子を第45図に示す。

第1表 中性子スペクトルの計算条件

項目	内容			
群構造	4群 : 1	$1.0 \times 10^7 \sim 1.83 \times 10^5$	eV	
	2	$1.83 \times 10^5 \sim 2.38$		
	3	2.38	~0.65	
	4	0.65	~0.0	
	6群 1	$1.0 \times 10^7 \sim 1.83 \times 10^5$	eV	
	2	$1.83 \times 10^5 \sim 6.48$		
	3	6.48	~2.38	
	4	2.38	~1.45	
	5	1.45	~0.65	
	6	0.65	~0.0	
	温度	燃料	1200 °K	
		減速材	1050 °K	
共鳴計算	核種	U ²³⁸ 有限希釈近似		
		Intermediate Resonance 法		
		²³⁸ U 原子数密度 ($\times 10^{24}$ n/cm ³)		
		燃料濃縮度	3.0%	4.0%
			22501 $\times 10^{-2}$	22268 $\times 10^{-2}$
				21804 $\times 10^{-2}$
		²³⁸ U 散乱断面積	8.1 (barn)	
		²³⁸ U 実効散乱断面積 (barn)		
		燃料濃縮度	3.0%	4.0%
			1.6.4	1.6.6
				1.7.1
		燃料コンパクト内 ダンコフ係数	セミピン型	マルチホール型
			0.793	0.857
		燃料カーネル 平均コード長	0.04 (cm)	
		燃料棒配列格子内実効散乱断面積 (barn)	セミピン型	マルチホール型
	標準ブロック	621.0	548.7	
	制御棒挿入ブロック	679.7	608.6	
	その他の核種	無限希釈計算		
熱中性子 散乱核	核種	¹² C, ¹⁶ O, He		
		自由ガスモデル		
バックリング		6.6×10^{-5} (cm ⁻²)		

第2表 燃料ブロック内原子数密度

(1) 均質燃料ブロック原子数密度

型 式		セ ミ ピ ン 型 燃 料 ブ ロ ッ ク			マ ル チ ホ ール 型 燃 料 ブ ロ ッ ク		
濃縮度% 核種 種類		3.0	4.0	6.0	3.0	4.0	6.0
	標準 ブ ロ ッ ク	²³⁵ U	8.6348-6	1.1512-5	1.7263-5	8.7210-6	1.1626-5
²³⁸ U		2.7567-4	2.7280-4	2.6704-4	2.7843-4	2.7550-4	2.6969-4
¹⁰ B		2.1340-8	←	←	2.1809-8	←	←
¹¹ B		9.2770-8	←	←	9.4816-8	←	←
¹² C		7.6336-2	←	←	7.8239-2	←	←
¹⁶ O		5.6890-4	←	←	5.7458-4	←	←
He		2.5786-5	←	←	2.5786-5	←	←
Si		2.6515-4	←	←	2.6780-4	←	←
制 御 棒 挿 入 ブ ロ ッ ク (挿入)	²³⁵ U	4.8048-6	6.4058-6	9.6064-6	3.4515-6	4.6015-6	6.9109-6
	²³⁸ U	1.5340-4	1.5180-4	1.4860-4	1.1019-4	1.0904-4	1.0673-4
	¹⁰ B	1.8500-8	←	←	1.8591-8	←	←
	¹¹ B	8.0430-8	←	←	8.0826-8	←	←
	¹² C	7.2023-2	←	←	7.5382-2	←	←
	¹⁶ O	3.1656-4	←	←	2.2740-4	←	←
	He	1.8059-5	←	←	1.7900-5	←	←
	Si	1.4754-4	←	←	1.0599-4	←	←
制 御 棒 挿 入 ブ ロ ッ ク (引抜)	²³⁵ U	3.5996-6	4.7988-6	7.1965-6	2.5645-6	3.4190-6	5.1351-6
	²³⁸ U	1.1132-4	1.1372-4	1.1492-4	8.1877-5	8.1022-5	7.9306-5
	¹⁰ B	1.3859-8	←	←	1.3814-8	←	←
	¹¹ B	6.0255-8	←	←	6.0057-8	←	←
	¹² C	5.3958-2	←	←	5.6012-2	←	←
	¹⁶ O	2.3716-4	←	←	1.6897-4	←	←
	He	2.4090-5	←	←	2.4090-5	←	←
	Si	1.1054-4	←	←	7.8752-5	←	←

注(1)矢印は同一を表わす。

(2)a-b は $a \times 10^{-b}$ を示す。

(3)単位は (10^{24} n/cm^3)

(2) 非均質セミピン型燃料ブロック原子数密度

型式	セミピン型燃料ブロック (濃縮度 4%)					
核種	燃料ピン	標準ブロック	制御棒挿入 ブロック(挿入)	制御棒挿入 ブロック(引抜)		
²³⁵ U	4.7007-5					
²³⁸ U	1.1139-3					
¹⁰ B						
¹¹ B						
¹² C	1.1511-2	6.2074-2	6.1927-2	4.6894-2		
¹⁶ O	2.3230-3					
He						
Si	1.0827-3					

注(1) a-b は $a \times 10^{-b}$ を示す。

(2) 単位は (10^{24} n/cm³)

(3) 制御棒, 可燃性毒物原子数密度

核種	制御棒 吸収体	制御棒構造材		可燃性 毒物		
		内側	外側			
¹⁰ B	5.9358-3			1.1168-5		
¹¹ B	2.5806-2			4.8554-5		
¹² C	6.6720-2			8.1663-2		
He		2.2651-4	2.2138-4			
Fe		2.3025-3	3.1838-3			
Cr		2.9409-3	4.0667-3			
Ni		5.9077-3	8.1690-3			
Mo		6.5203-4	9.0162-4			
W		2.2684-5	3.1367-5			

注(1) a-b は $a \times 10^{-b}$ を示す。

(2) 単位は (10^{24} n/cm³)

第3表 予備解析 (A) 計算結果

種類 項目	A - 1	A - 2	A - 3	A - 4	A - 5
座 標	X - Y	X - Y	R - θ	X - Y	X - Y
群 数	6	6	6	6	4
S _N 次数	4	4	4	6	4
空間点数	20 × 24	20 × 24	26 × 21	20 × 24	20 × 24
組 成	均 質	均 質	均 質	均 質	均 質
物 質 数	5	5	5	5	5
制御棒モデル	等体積	等体積	等体積	等体積	等体積
実効増倍率	0.9361	0.9467	0.8918	0.9354	0.9345
出力分布最大値	1.33	1.32	1.30	1.34	1.34
計算時間 cpu (秒)	128	130	217	193	106
備 考	第7図	第8図	第9図	第10図	第11図

(共通計算条件)

境界条件 : 反射

バックリング : 形状バックリング (炉心長 = 400 cm)

収束条件 : 10×10^{-3}

対 象 : 濃縮度4%セミピン型

計算時間 : FACOM 230の場合

第4表 予備解析 (B) 計算結果

種類 項目	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8
座標	R-θ	X-Y	X-Y	X-Y	X-Y	X-Y	R-θ	X-Y
空間点数	20 × 1	17 × 17	17 × 17	17 × 17	18 × 18	24 × 24	20 × 1	17 × 17
N (凸凹の個数)	∞	0	0	1	2	7	-	-
実効増倍率	1.0051	1.0000	1.0019	1.0023	1.0032	1.0071	1.1651	1.1732
出力分布最大値	1.37	1.40	1.34	1.39	1.39	1.37	1.0	1.0
B-1との差 Δkeff (%)	0	-0.51	-0.32	-0.28	-0.19	+0.20	B-7とB-8の差 0.69% (Δkeff)	
計算時間 (cpu: 秒)	11.7	117	120	133	133	252	11.6	113
備考	第15図 正確値と見 なす。	第16図 等体積制御棒	第17図 等表面積制 御棒	第18図	第19図	第20図	第21図 制御棒値 (B-1) 0.1600	第22図 制御棒値 (B-6) 0.1661

(その他の共通計算条件)

群数 : 6

SN次数 : 4

散乱次数 : 0

収束条件 : 1.0×10^{-3}

バックリング : 99×10^{-8} (cm⁻²)

組成 : 3%セミピン型標準

ブロックと同一

計算時間 : FACOM 230 の場合

第5表 局所出力分布計算結果

種類 項目	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	C-11	C-12	C-13	C-14	C-15
燃料プロック 型式	SP	SP	SP	SP	SP	SP	MH	MH	MH	MH	MH	MH	SP	SP	SP
燃料濃縮度(%)	3.0	3.0	4.0	4.0	6.0	6.0	3.0	3.0	4.0	4.0	6.0	6.0	4.0	4.0	4.0
制御棒	挿入	引抜	挿入	引抜	挿入	引抜	挿入	引抜	挿入	引抜	挿入	引抜	挿入	挿入	引抜
組	均質	均質	均質	均質	均質	均質	均質	均質	均質	均質	均質	均質	均質	非均質	非均質
可燃性毒物	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	有	無	無
物質性	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	6	7	4
空間点数	28 × 51	28 × 51	28 × 51	28 × 51	28 × 51	28 × 51	28 × 51	28 × 51	28 × 51	28 × 51	28 × 51	28 × 51	28 × 51	30 × 51	30 × 54
実効増倍率	0.8538	1.1389	0.9413	1.2158	1.0251	1.2727	0.8830	1.1715	0.9592	1.2331	1.0529	1.3034	0.8925	0.8981	1.2099
制御棒価値	0.2851	0.2851	0.2745	0.2745	0.2476	0.2476	0.2885	0.2885	0.2739	0.2739	0.2505	0.2505	0.2505	0.3118	0.3118
出力分布最大値	1.52	1.13	1.51	1.13	1.49	1.14	1.54	1.17	1.52	1.18	1.50	1.20	1.47	1.47	1.06
計算時間 (cpu 秒)	373	406	372	407	357	389	365	409	364	391	357	393	368	648	900
備考	第25図	第26図	第27図	第28図	第29図	第30図	第31図	第32図	第33図	第34図	第35図	第36図	第37図	C-3と比較 第38図	C-4と比較 第39図

(共通計算条件)

座標 : X-Y

群数 : 6

S.N次数 : 4

散乱次数 : 0

境界条件 : 反射

バックリング : 形状バックリング (炉長400cm)

収束条件 : 10×10^{-3}

SP : セミピン, MH : マルチホール

計算時間 : FACOM 230の場合

第6表 出力分布に対する拡散計算結果

種類 項目	D - 1	D - 2	D - 3	D - 4		
燃料ブロック 型 式	SP	SP	SP	SP		
燃 料 濃縮度 (%)	4.0	4.0	4.0	4.0		
制 御 棒	挿 入	引 抜	挿 入	挿 入		
組 成	均 質	均 質	均 質	均 質		
座 標	X - Y	X - Y	三 角	三 角		
物 質 数	2	2	2	2		
空 間 点 数	29 × 9	29 × 9	4 × 2	4 × 2		
実効増倍率	0.9120	1.2017	0.8747	1.2029		
制御棒値	0.2897		0.3282			
出力分布 最 大 値	1.34	1.13	1.28	1.11		
計算時間 (cpu 秒)	26	26	24	24		
備 考	A-1と比較 Keff=0.9361 比出力分布最大 値=1.33 第41図	C-4と比較 Keff=1.2158 比出力分布最大 値=1.13 第42図	第43図	第44図		

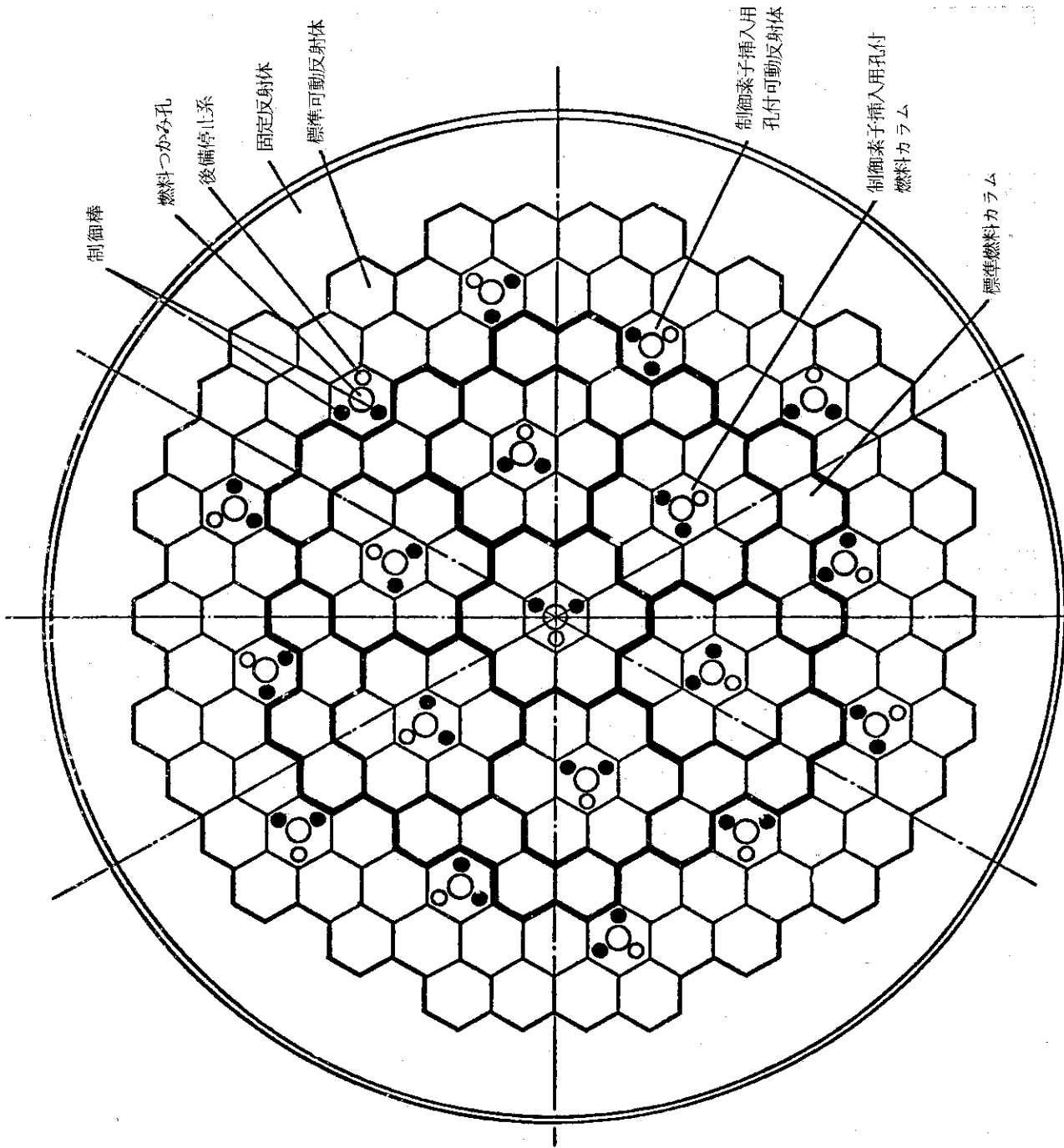
(共通計算条件)

群数 : 4 収束条件 : 10×10^{-4}

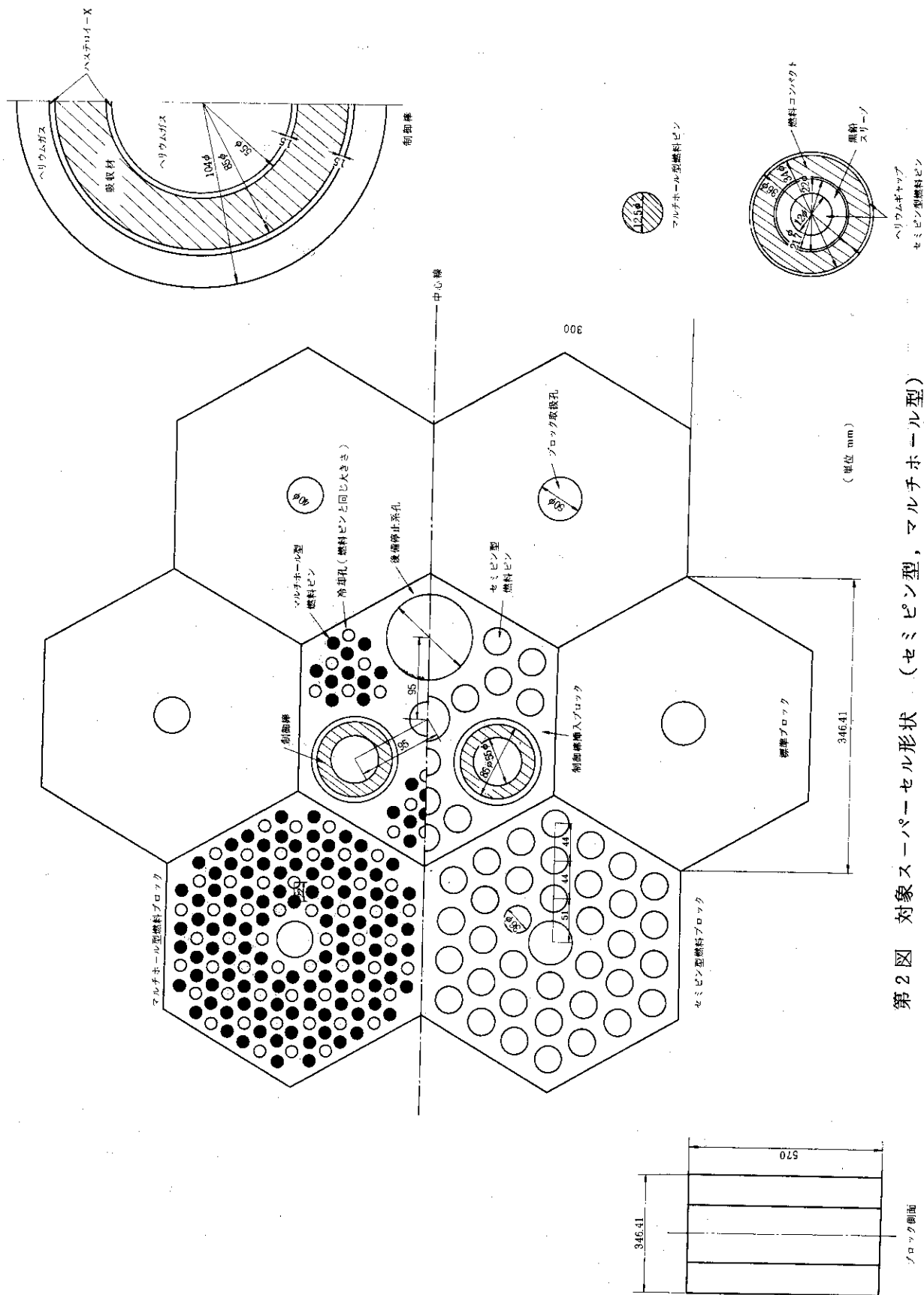
境界条件 : 反射

バックリング : 形状バックリング (炉心長400cm)

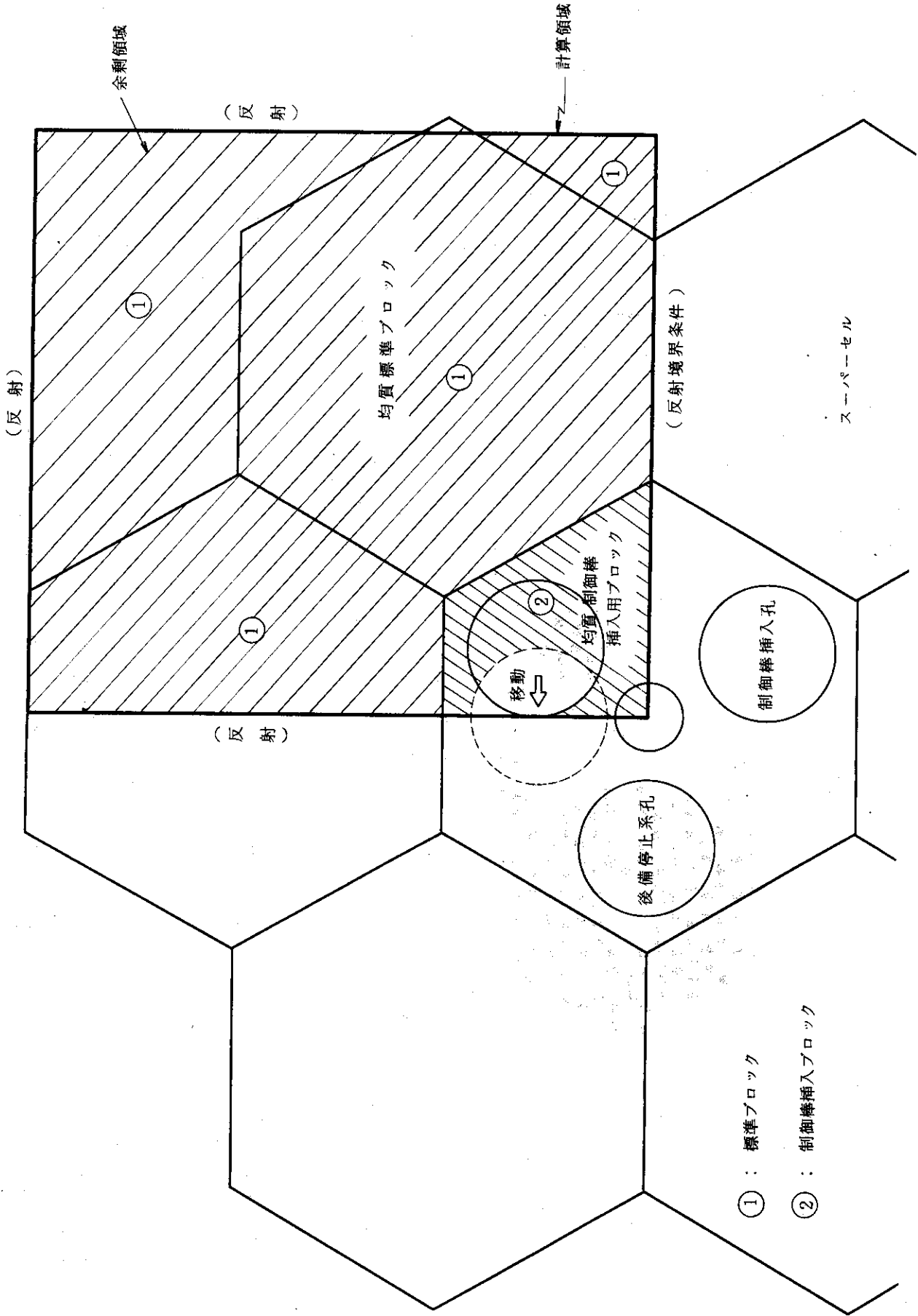
計算時間 : FACOM 230 の場合



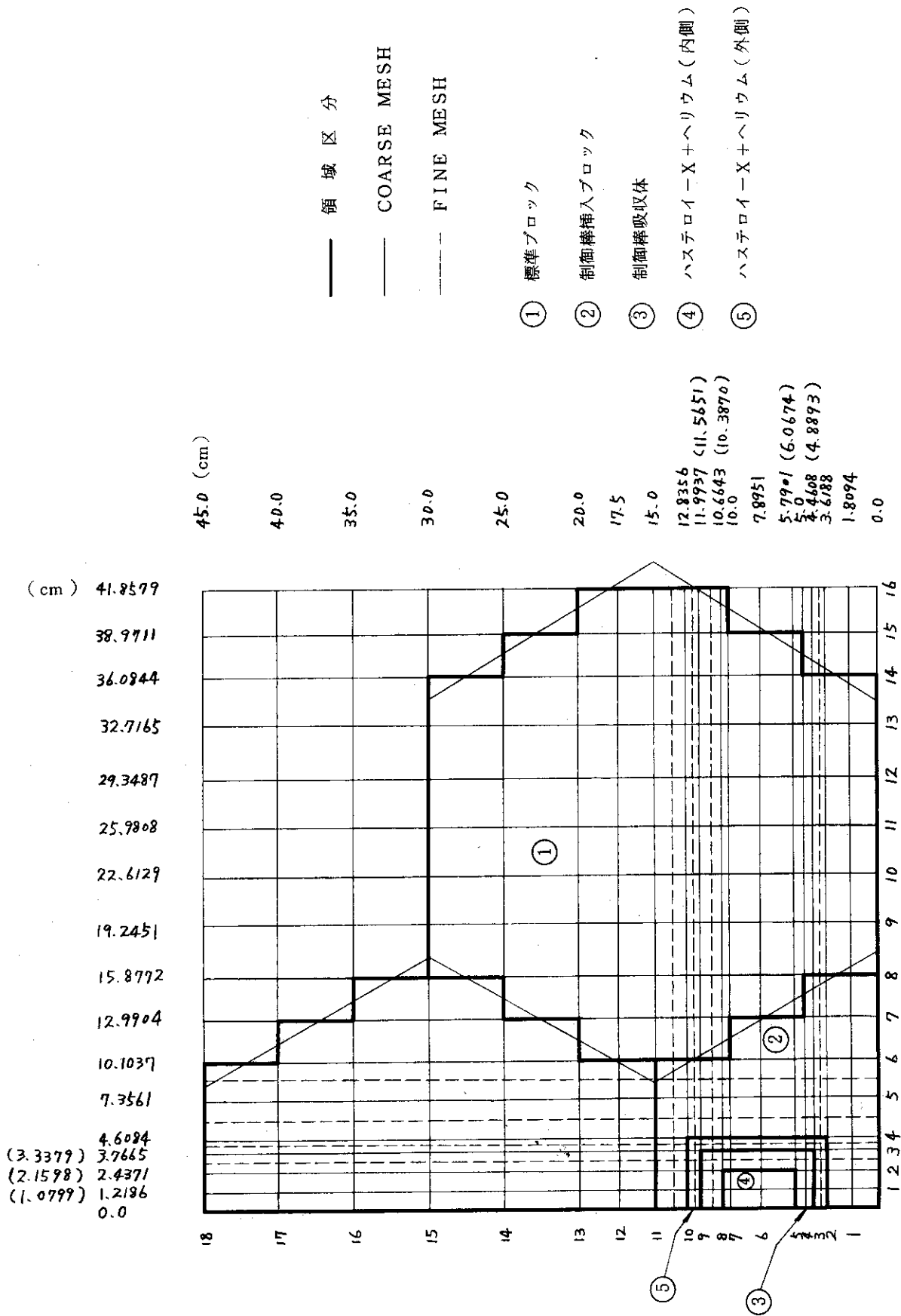
第1図 炉心構成



第2図 対象スーパーセル形状 (セミピン型, マルチホール型)

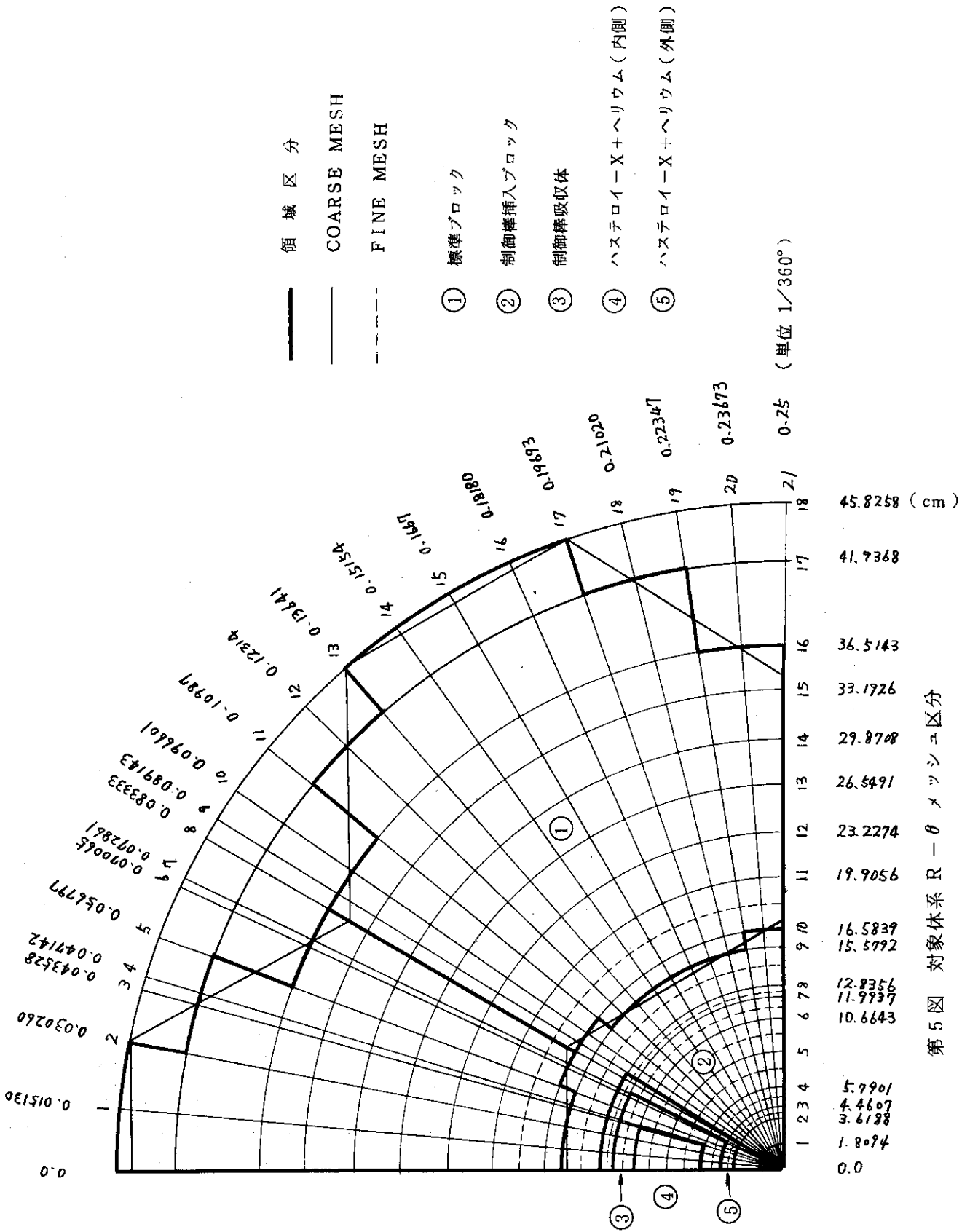


第3図 計算対象領域形状(予備解析-A)



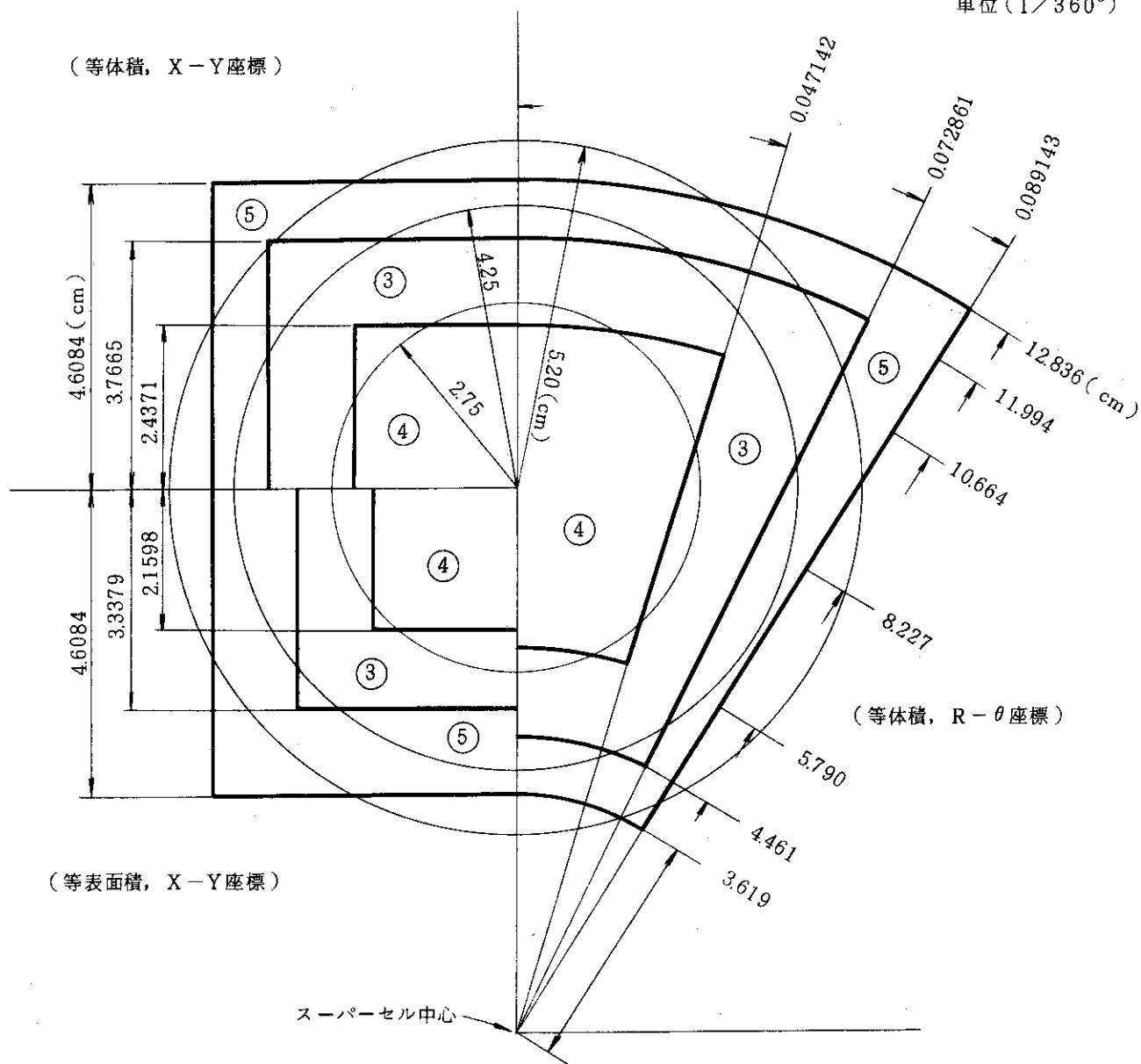
(注) ()内は等表面積制御棒の場合

第4図 対象体系 X-Y メッシュ区分



第5図 対象体系R-θメッシュ区分

単位 (1/360°)

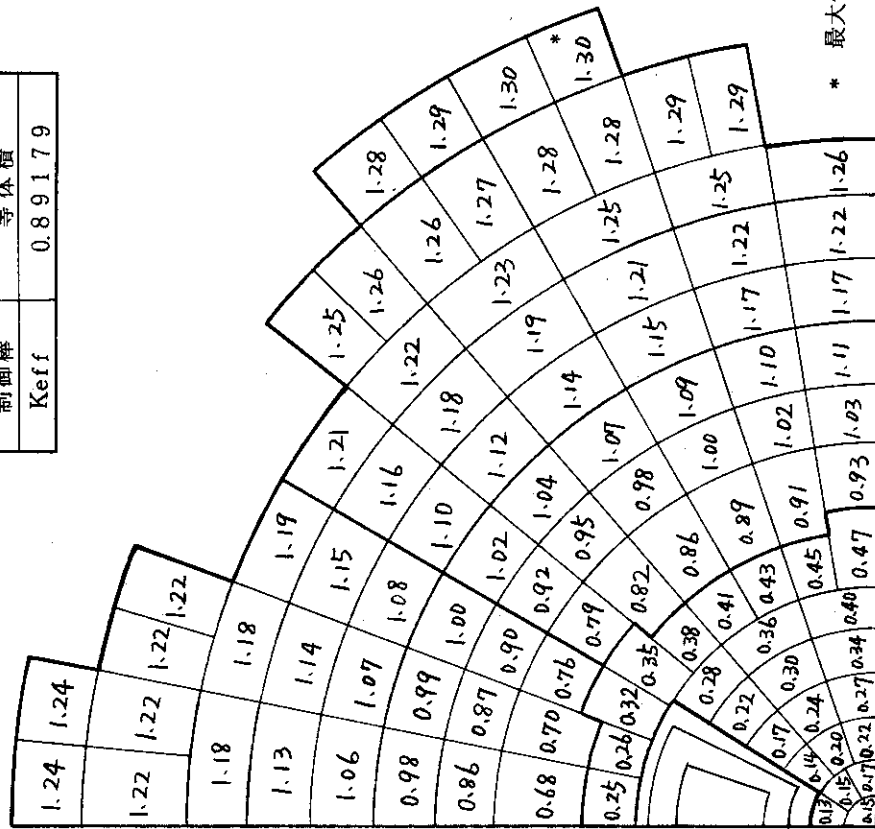


- ③ : 制御棒吸収体 (B_4C , C)
- ④ : 制御棒構造材 (ハステロイ-X, ヘリウムガス) 内側
- ⑤ : 制御棒構造材 (ハステロイ-X, ヘリウムガス) 外側

(注) ④, ⑤では, ハステロイ-Xとヘリウムガスを均質化する。

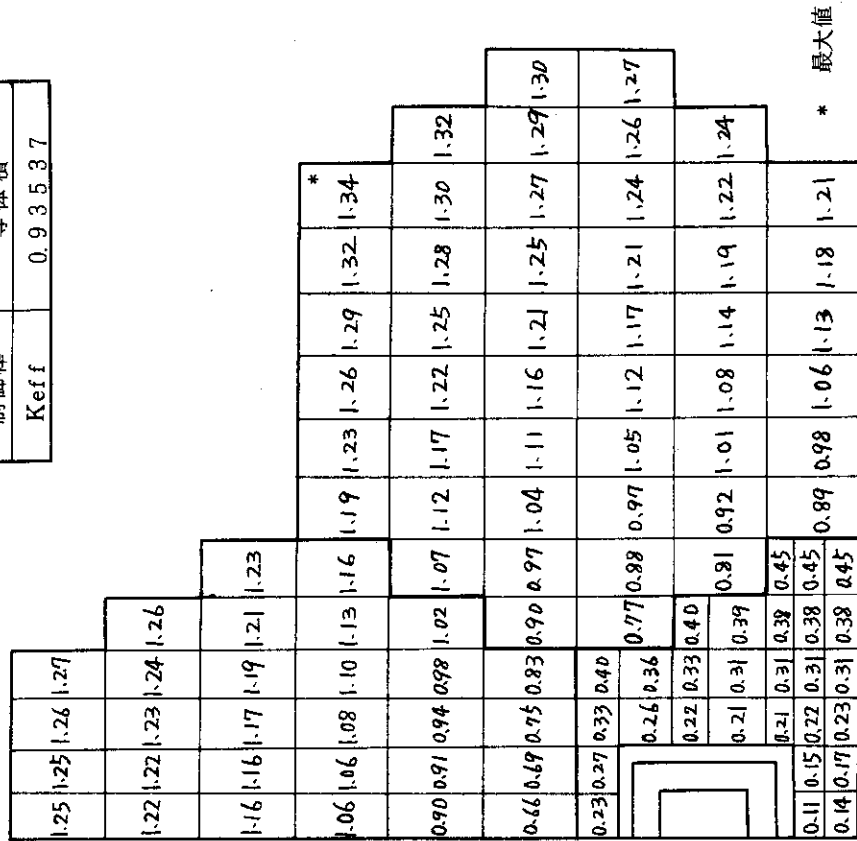
第6図 制御棒形状

群数	6
SN次数	4
形状	R-θ
制御棒	等体積
Keff	0.89179



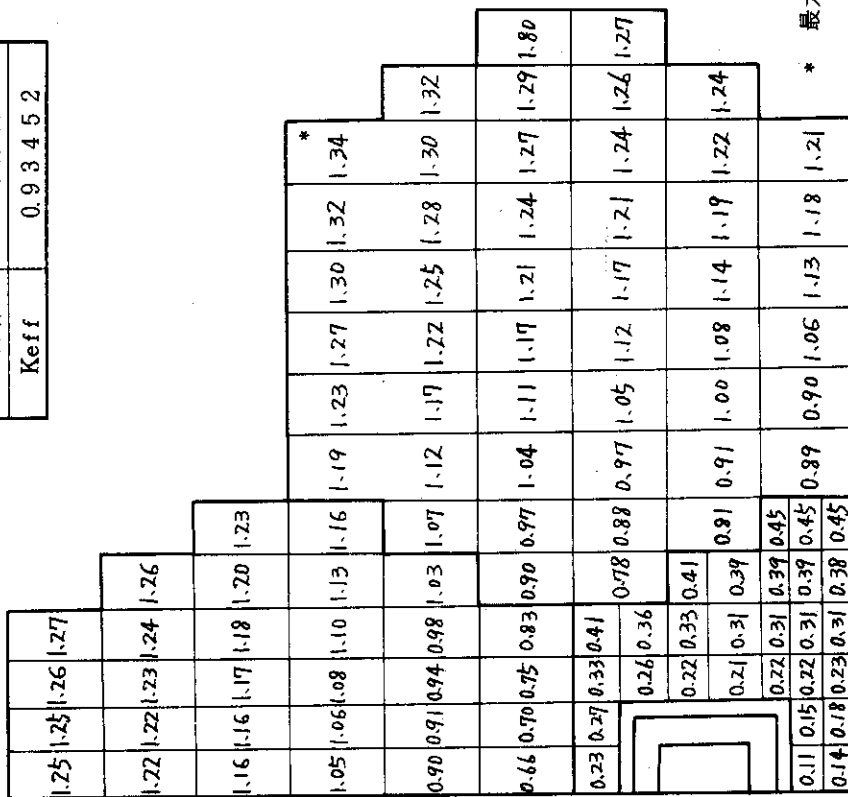
第9図 出力分布 (A-3)

群数	6
SN次数	6
形状	X-Y
制御棒	等体積
Keff	0.93537



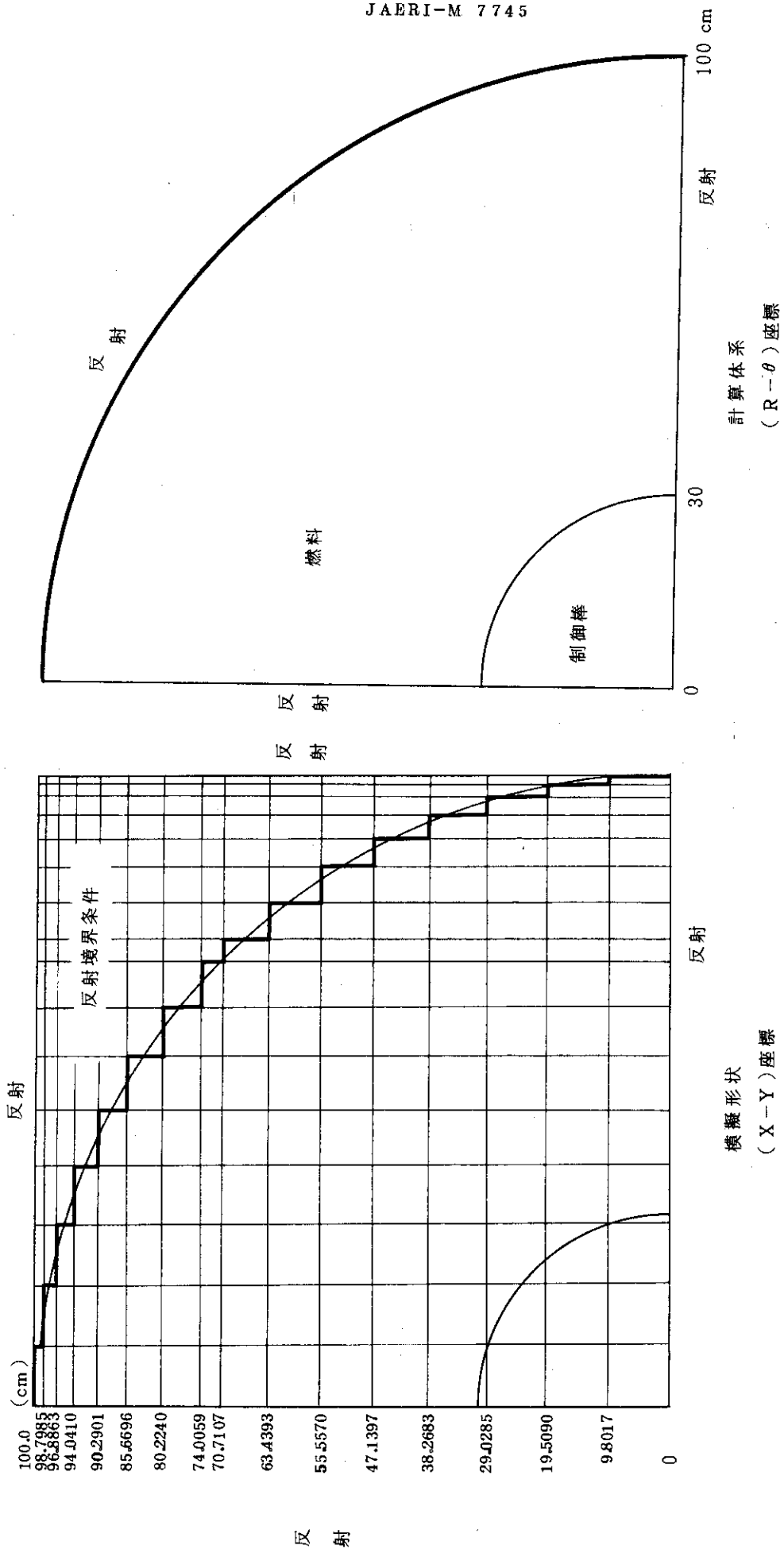
第10図 出力分布 (A-4)

群数	4
SN次数	4
形状	X-Y
制御棒	等体積
Keff	0.93452

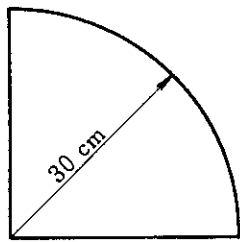


* 最大値

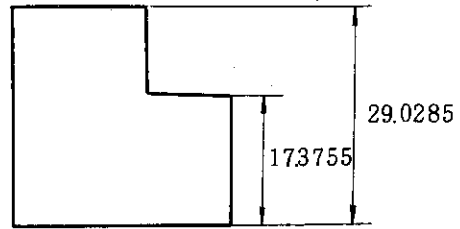
第11図 出力分布 (A-5)



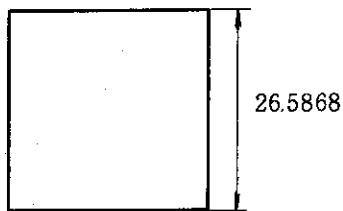
第12図 対象計算形状 (予備解析-B)



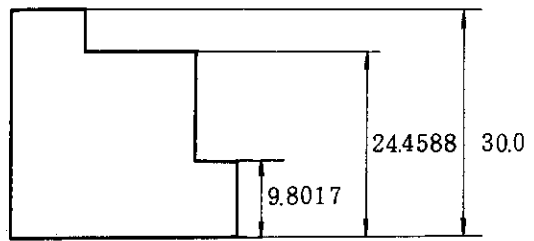
実際の制御棒



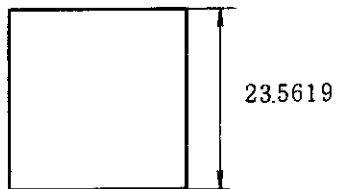
N = 1



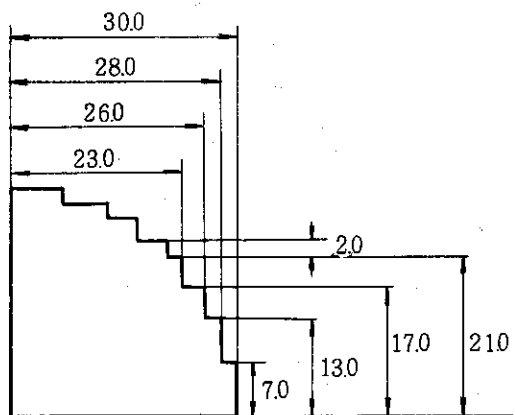
N = 0
(等体積)



N = 2



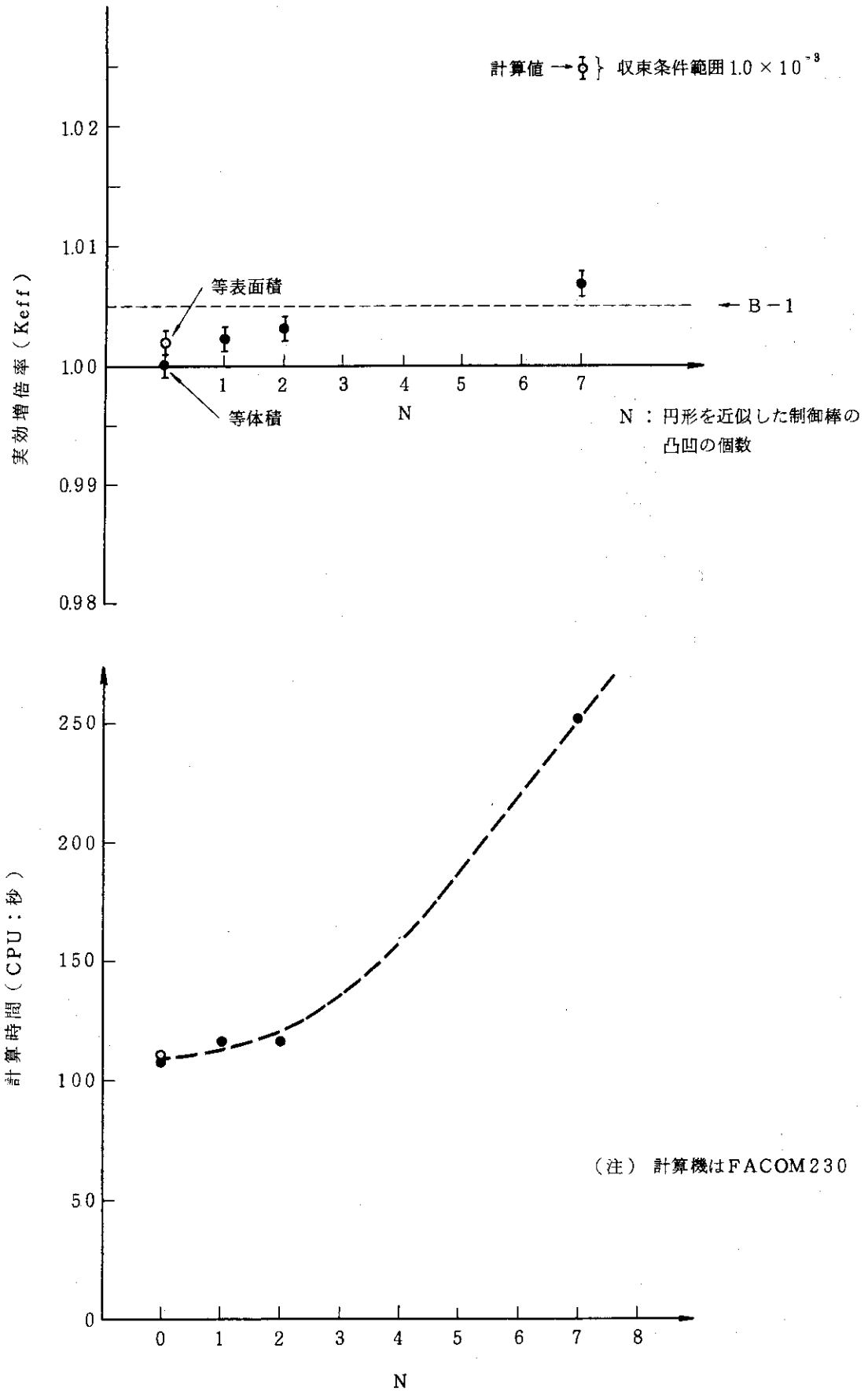
N = 0
(等表面積)



N = 7

(注) N : 凸凹の個数
単位 cm

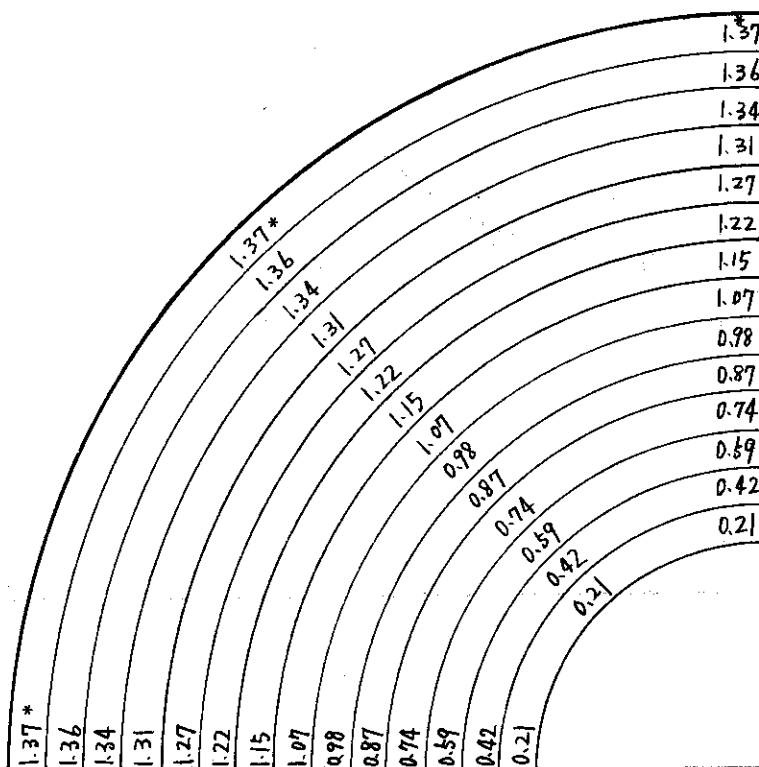
第13図 制御棒の形状モデル



第14図 実効増倍率と計算時間

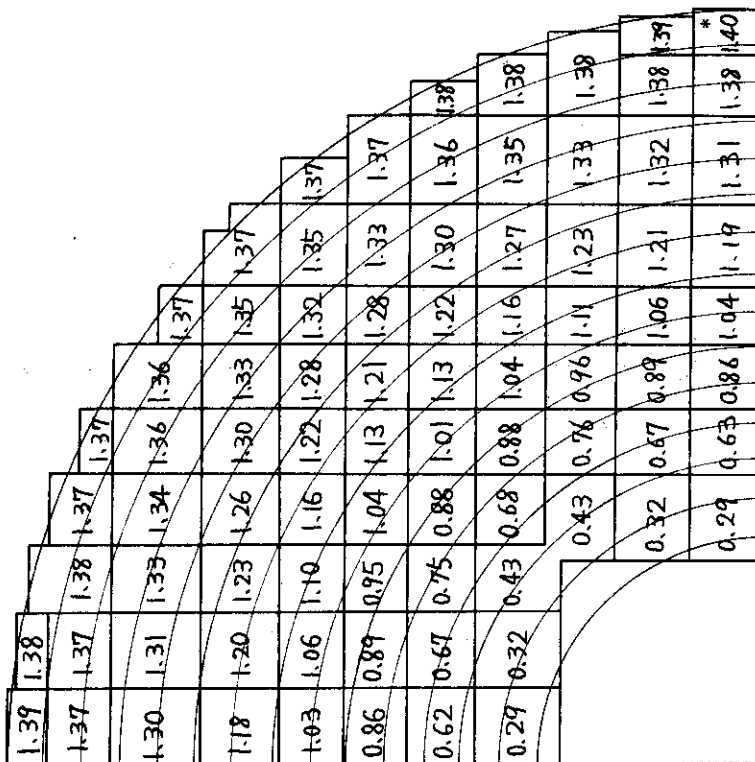
Keff	1.00509
CPU	117

Keff	0.99996
CPU	117



* 最大值

第 15 图 出力分布 (B-1)



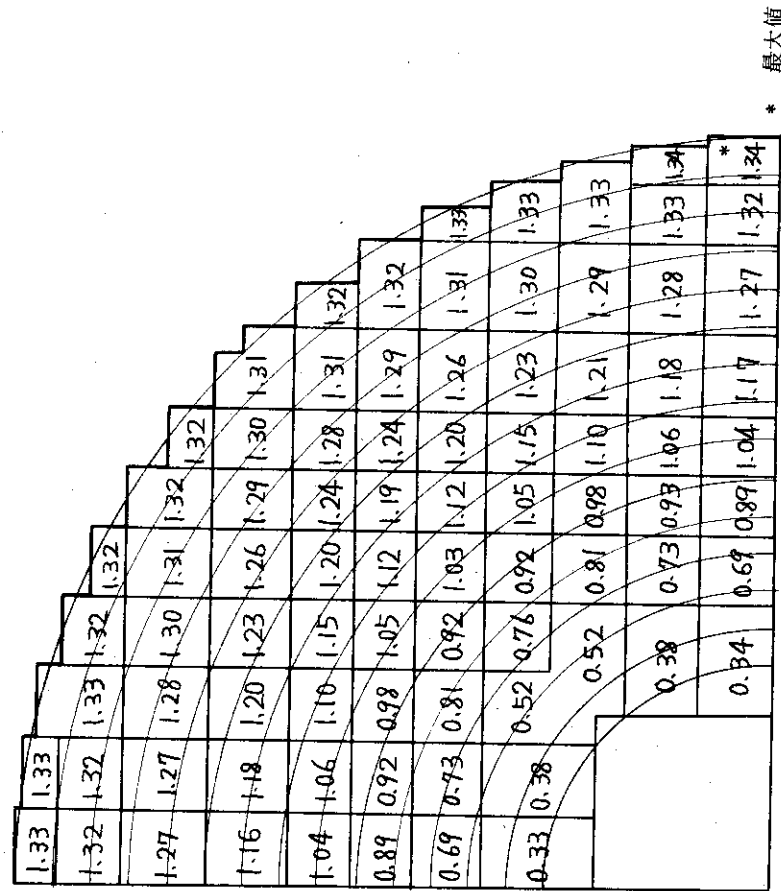
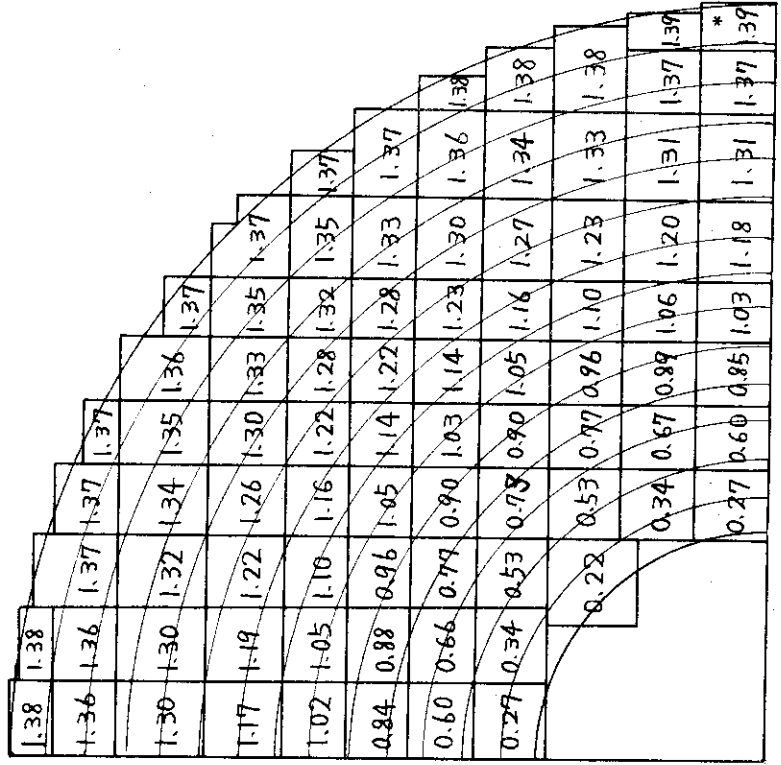
N=0
等体積

* 最大值

第 16 图 出力分布 (B-2)

Keff	1.00228
CPU	133

Keff	1.00188
CPU	120

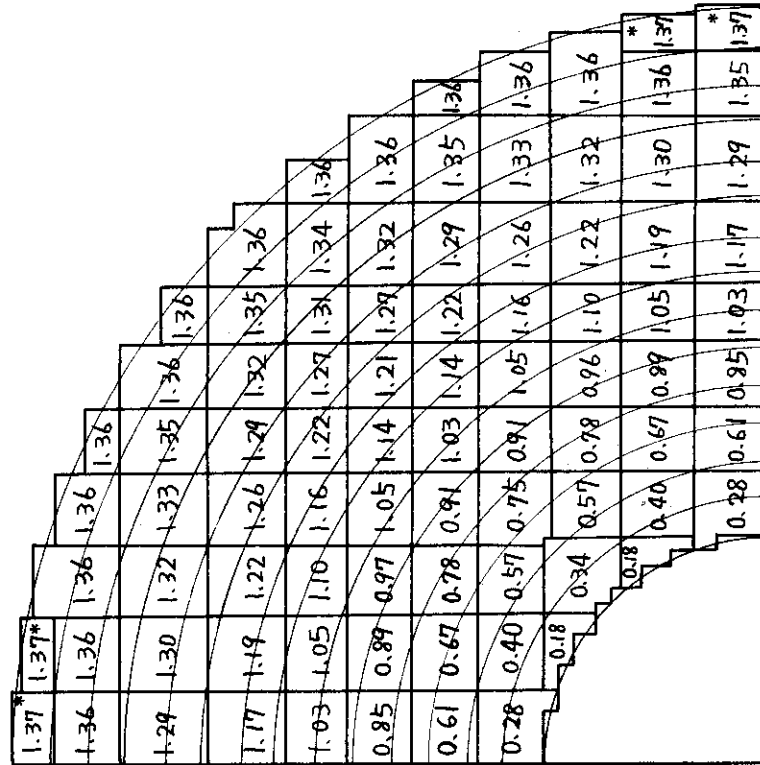


第 18 図 出力分布 (B-4)

第 17 図 出力分布 (B-3)

Keff	1.00714
CPU	252

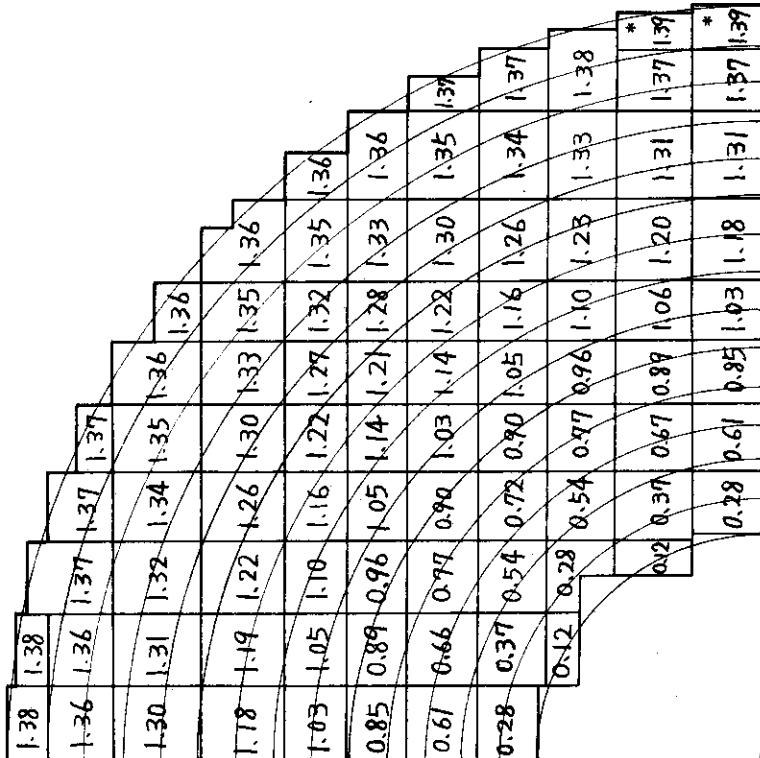
Keff	1.00318
CPU	133



N = 7

* 最大值

* 最大值



N = 2

* 最大值

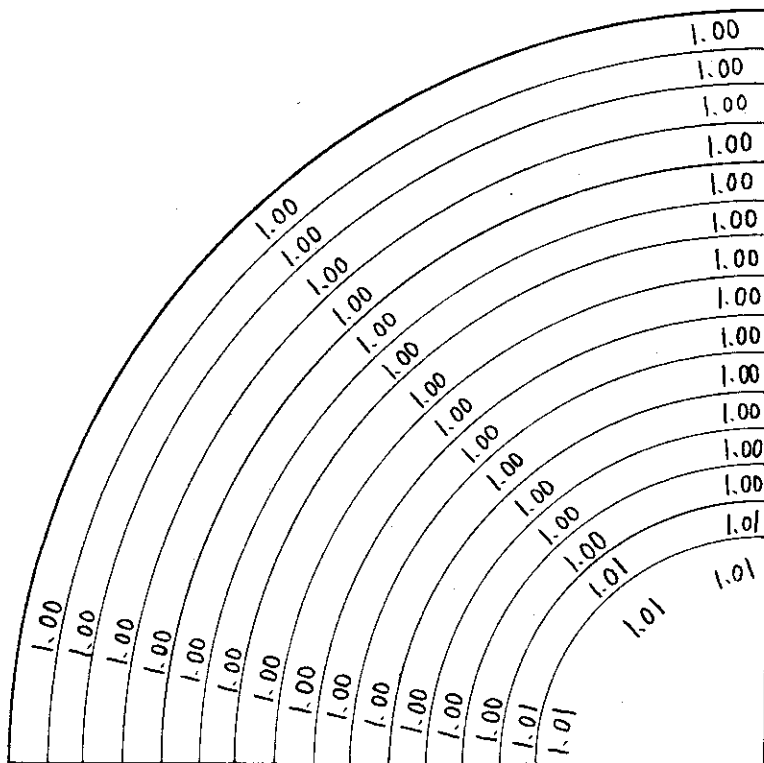
* 最大值

第 20 图 出力分布 (B-6)

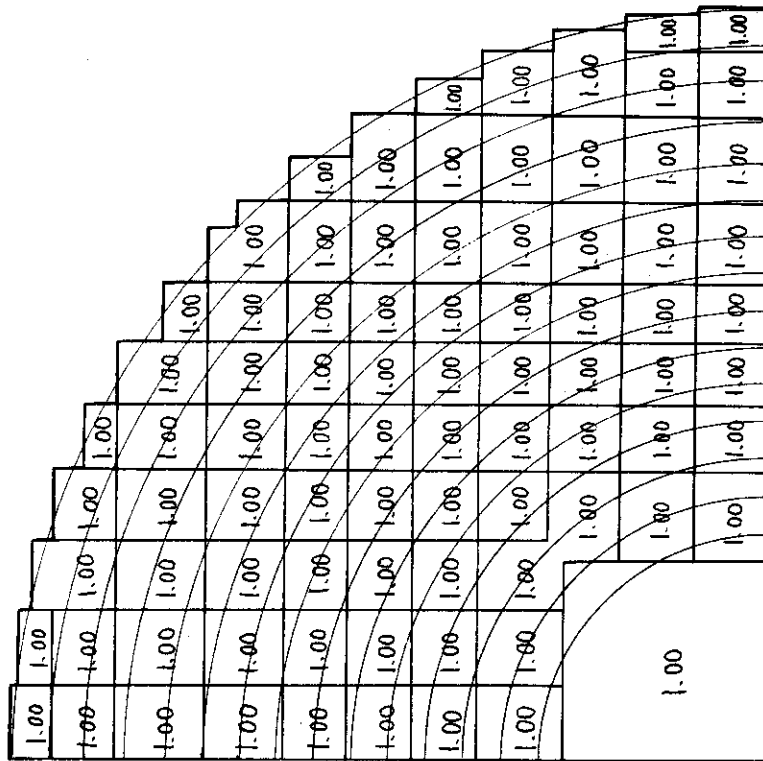
第 19 图 出力分布 (B-5)

Keff	1.16511
CPU	11.6

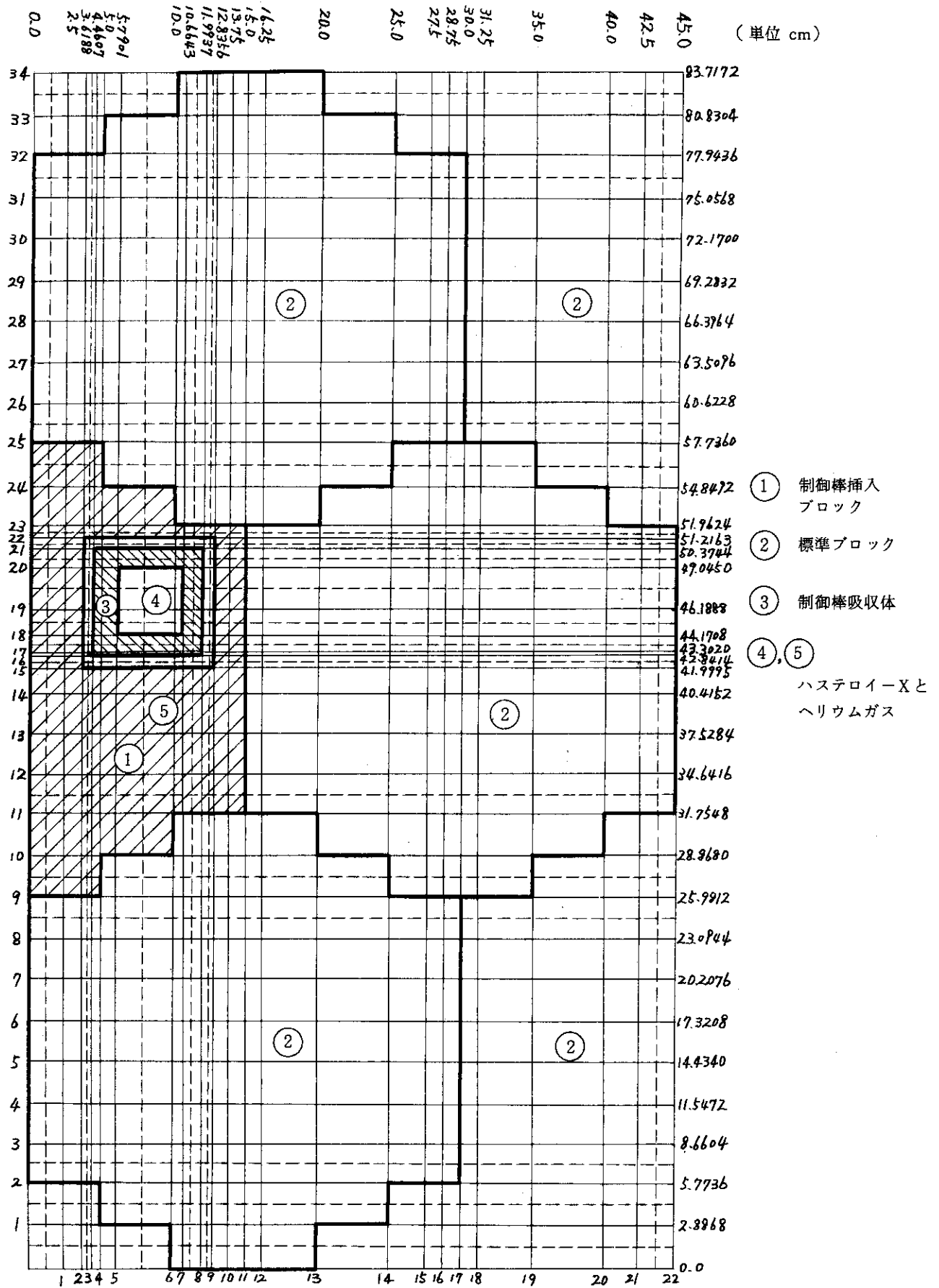
Keff	1.17315
CPU	11.3



第21图 出力分布 (B-7)

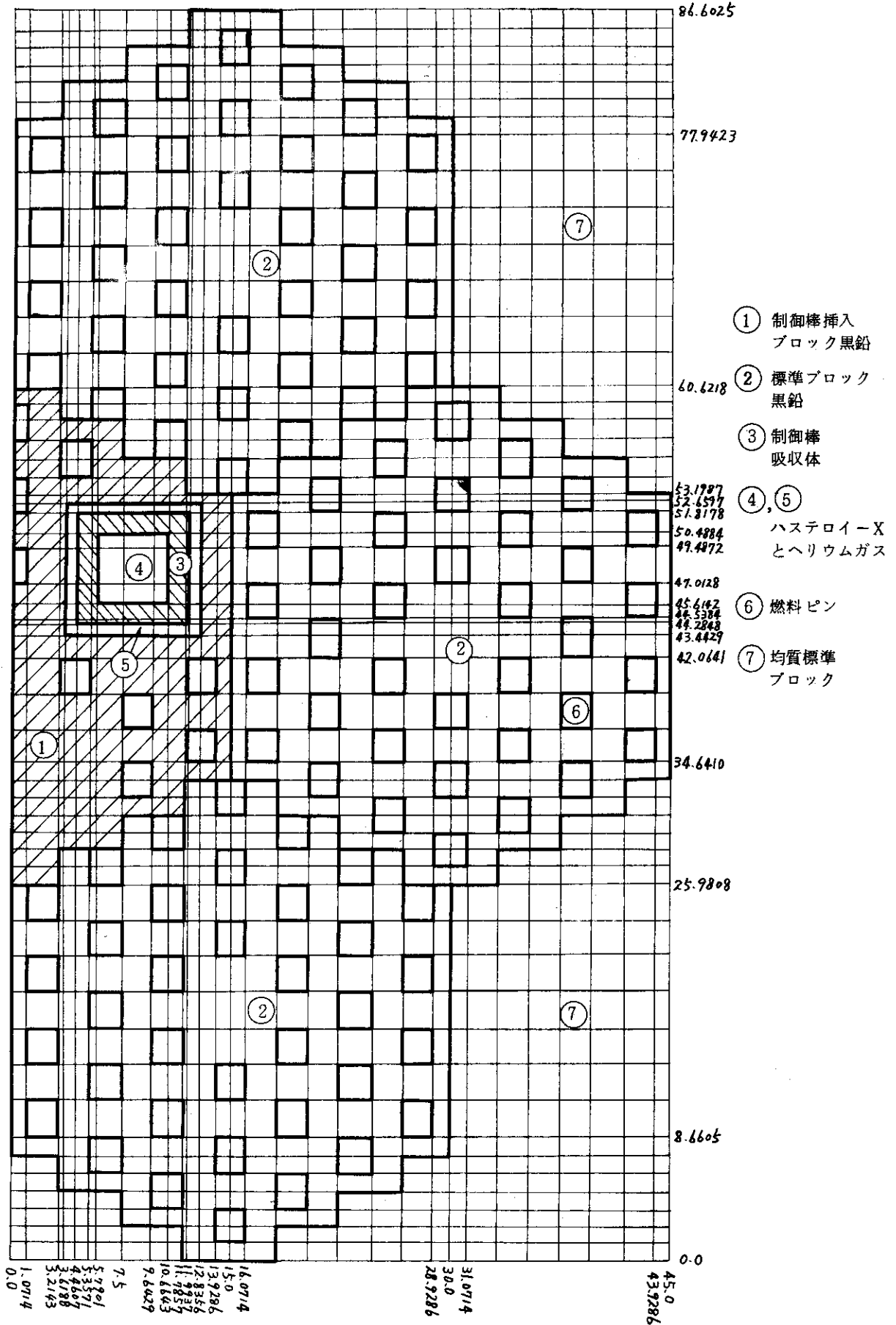


第22图 出力分布 (B-8)

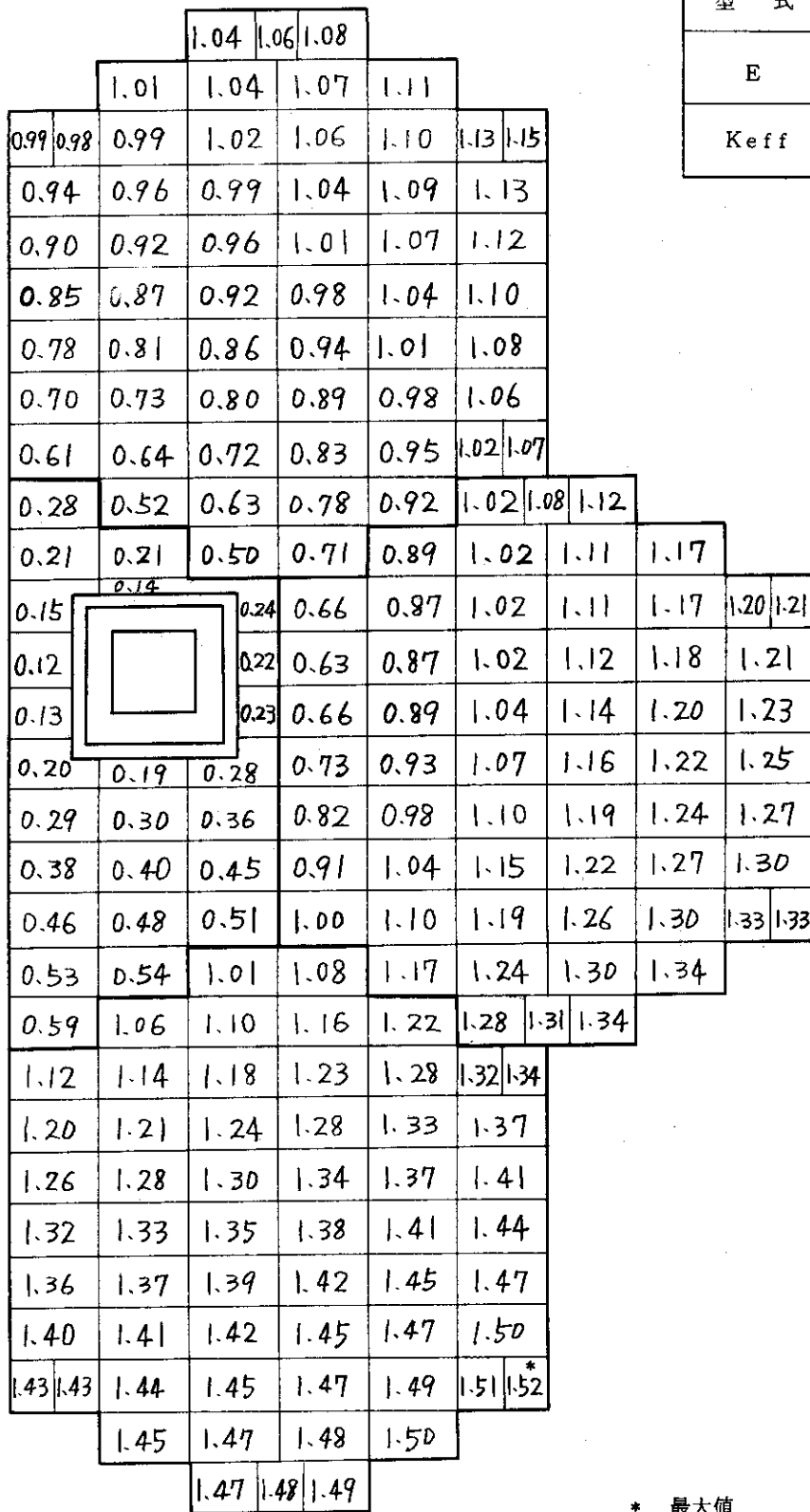


第 23 図 対象体系の均質計算形状

(単位 cm)



第 24 図 対象体系の非均質計算形状

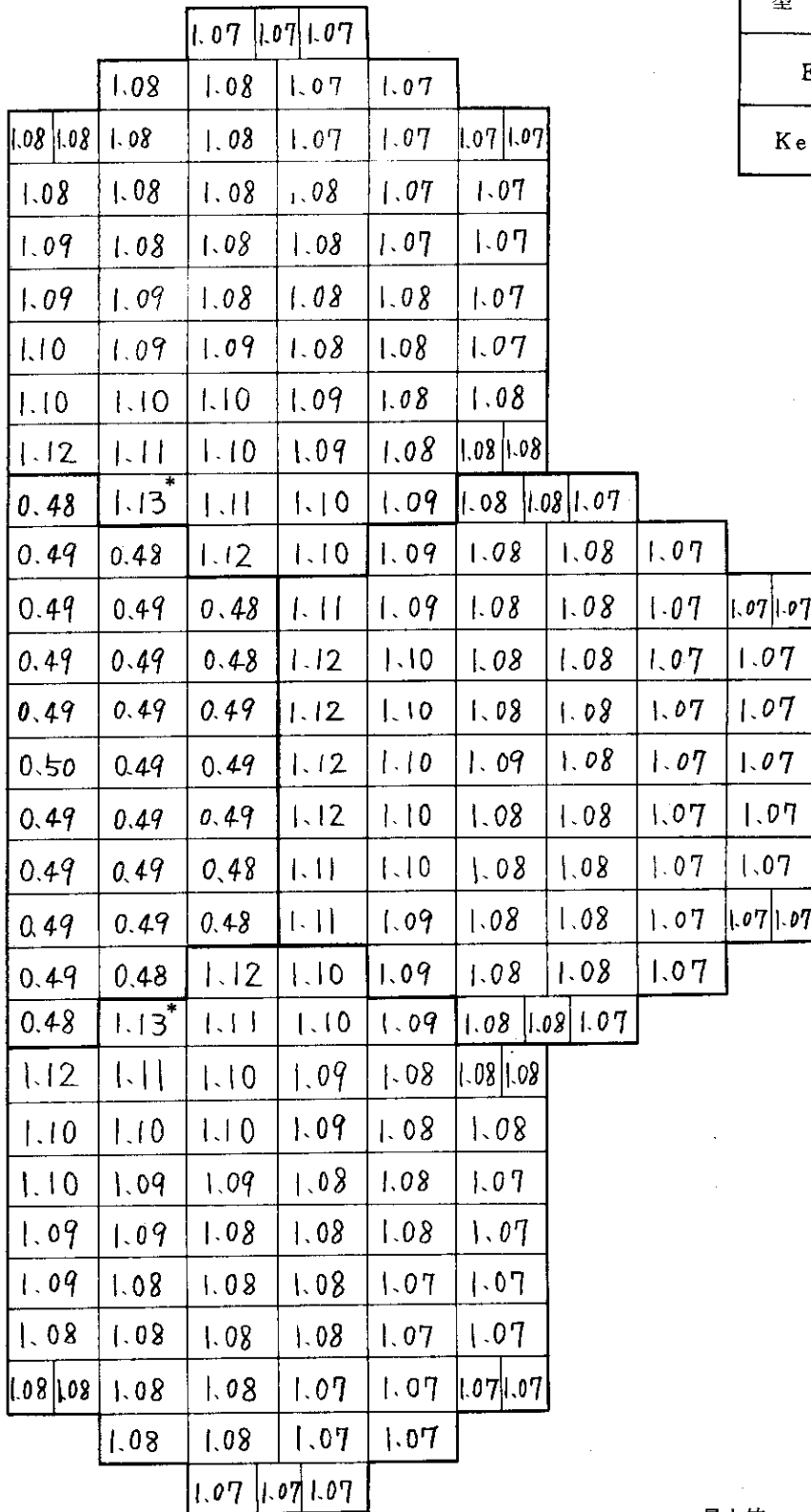


型 式	S P
E	3.0%
Keff	0.85383

* 最大値

第 25 図 出力分布 (C-1)

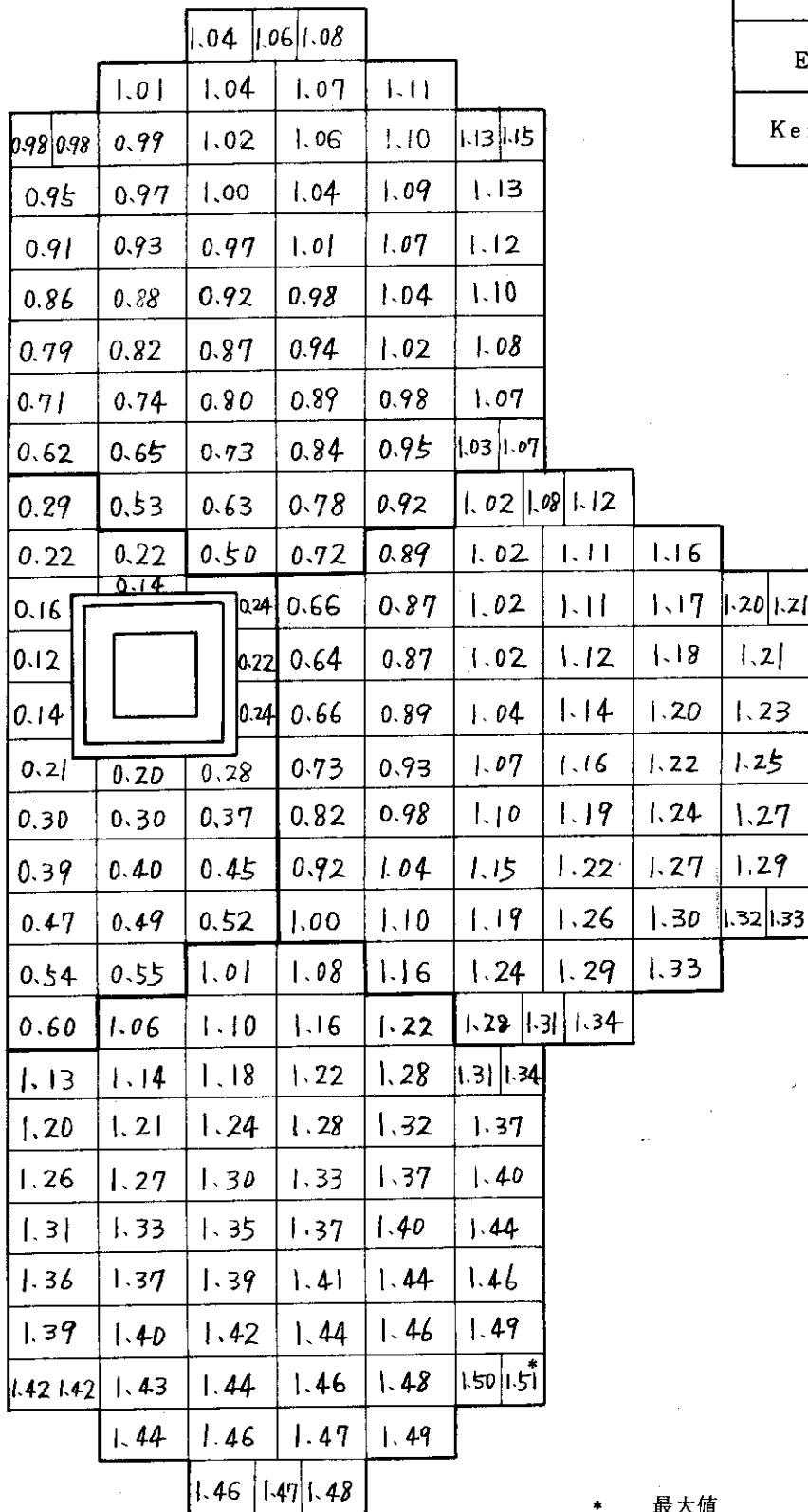
型 式	SP
E	3.0%
Keff	1.13894



* 最大値

第 26 図 出力分布 (C-2)

型 式	SP
E	4.0%
Keff	0.94132



* 最大値

第 27 図 出力分布 (C-3)

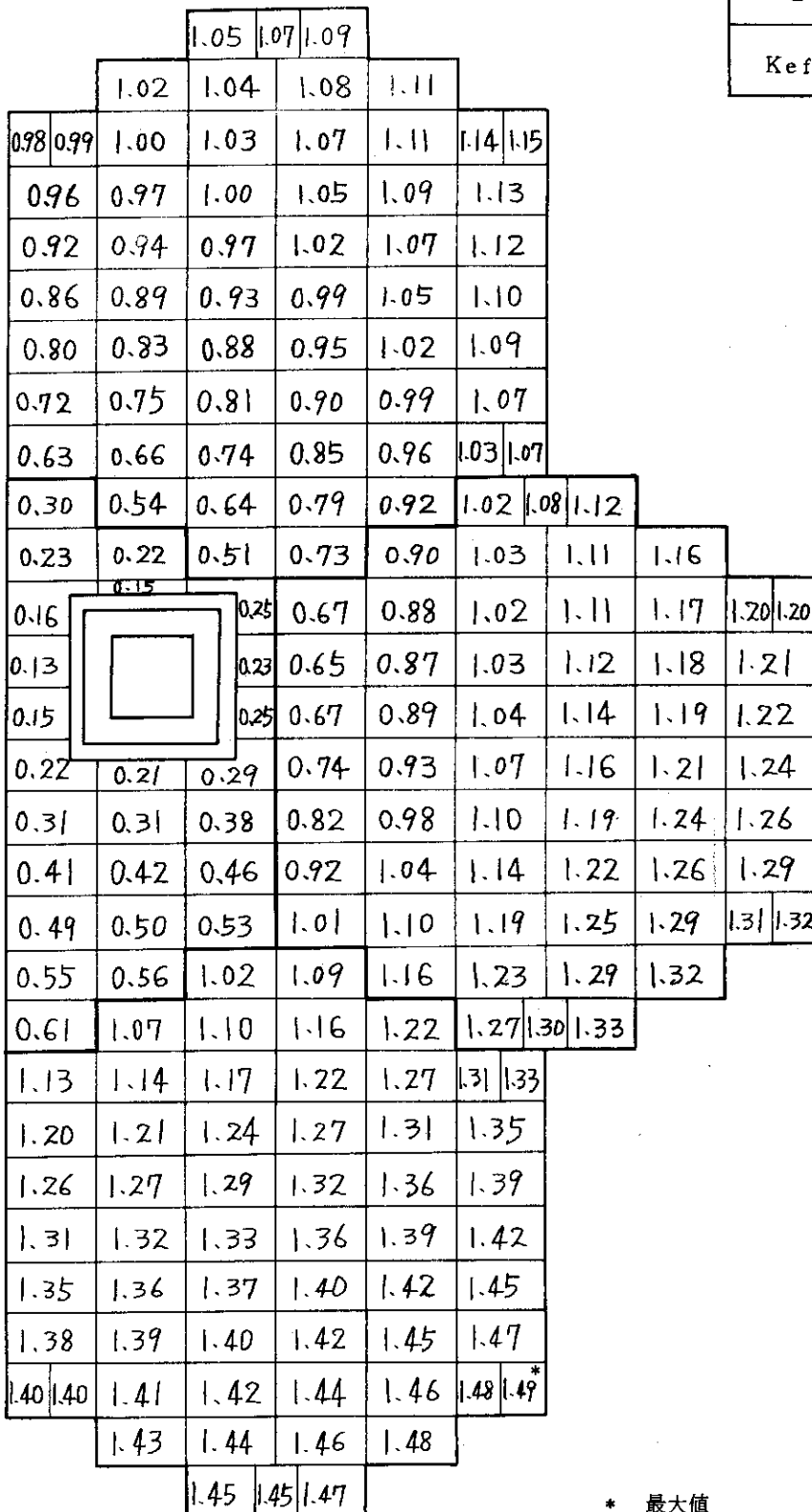
型 式	SP
E	4.0%
Keff	1.21576

			1.07	1.07	1.07					
		1.07	1.07	1.07	1.07					
1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07			
1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.07	1.07				
1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07				
1.09	1.08	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07				
1.10	1.09	1.09	1.08	1.08	1.08	1.07				
1.11	1.10	1.10	1.09	1.08	1.08	1.07				
1.12	1.12	1.10	1.09	1.08	1.08	1.07	1.07			
0.49	1.13*	1.11	1.10	1.09	1.08	1.07	1.07			
0.49	0.49	1.13	1.11	1.09	1.08	1.07	1.07			
0.50	0.49	0.49	1.11	1.09	1.08	1.07	1.07	1.07	1.07	
0.50	0.50	0.49	1.12	1.10	1.08	1.07	1.07	1.07		
0.50	0.50	0.49	1.12	1.10	1.08	1.07	1.07	1.07		
0.50	0.50	0.49	1.12	1.10	1.08	1.08	1.07	1.07		
0.50	0.50	0.49	1.12	1.10	1.08	1.07	1.07	1.07		
0.50	0.49	0.49	1.11	1.09	1.08	1.07	1.07	1.07	1.07	
0.49	0.49	1.13	1.11	1.09	1.08	1.07	1.07			
0.49	1.13*	1.11	1.10	1.09	1.08	1.07	1.07			
1.12	1.12	1.10	1.09	1.08	1.08	1.07				
1.11	1.10	1.10	1.09	1.08	1.07					
1.10	1.09	1.09	1.08	1.08	1.07					
1.09	1.09	1.08	1.08	1.07	1.07					
1.08	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07					
1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.07					
1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07			
		1.07	1.07	1.07	1.07					
			1.07	1.07	1.07					

* 最大値

第28図 出力分布 (C-4)

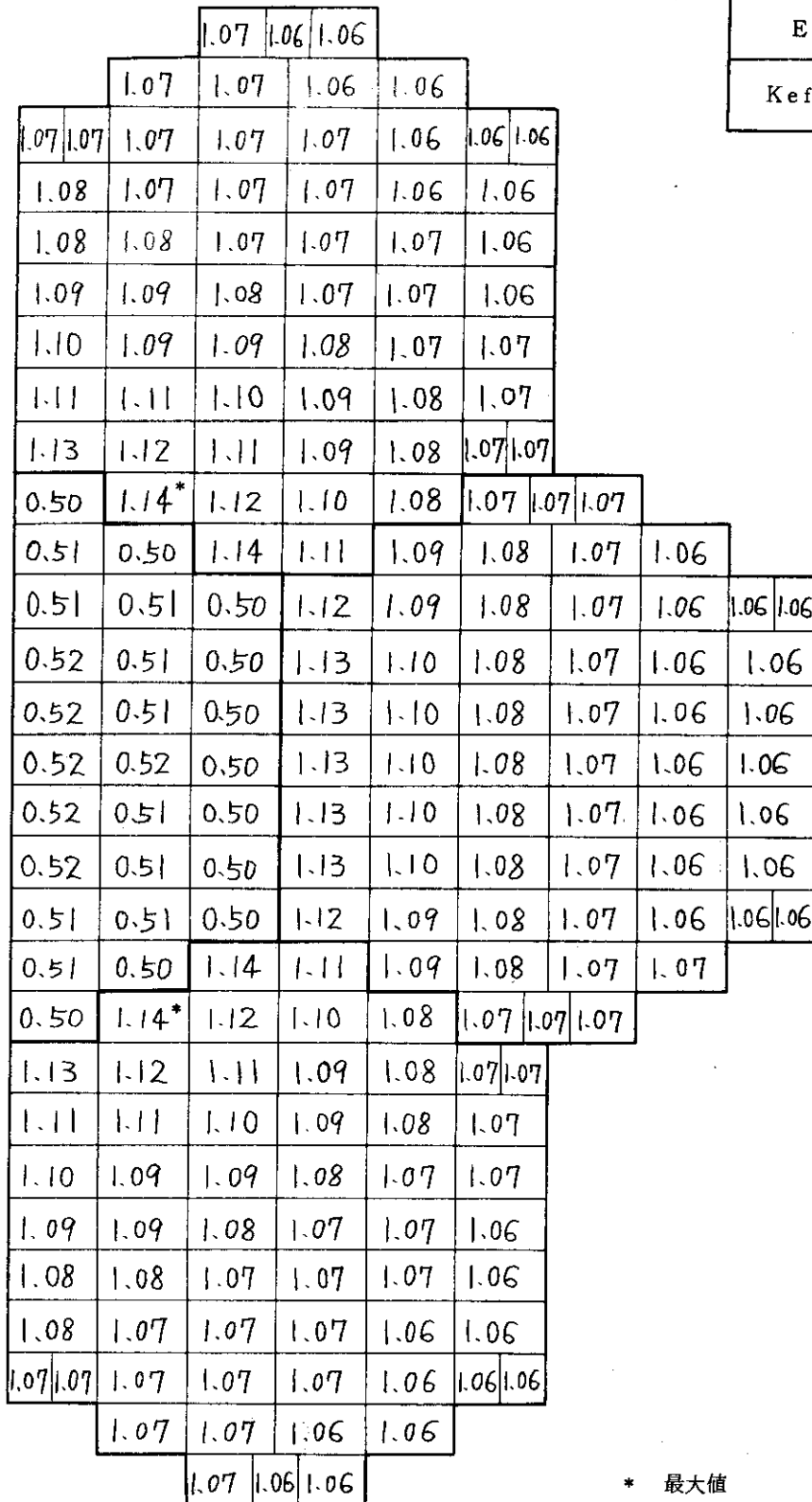
型 式	SP
E	6.0%
Keff	1.02510



* 最大値

第 29 図 出力分布 (C-5)

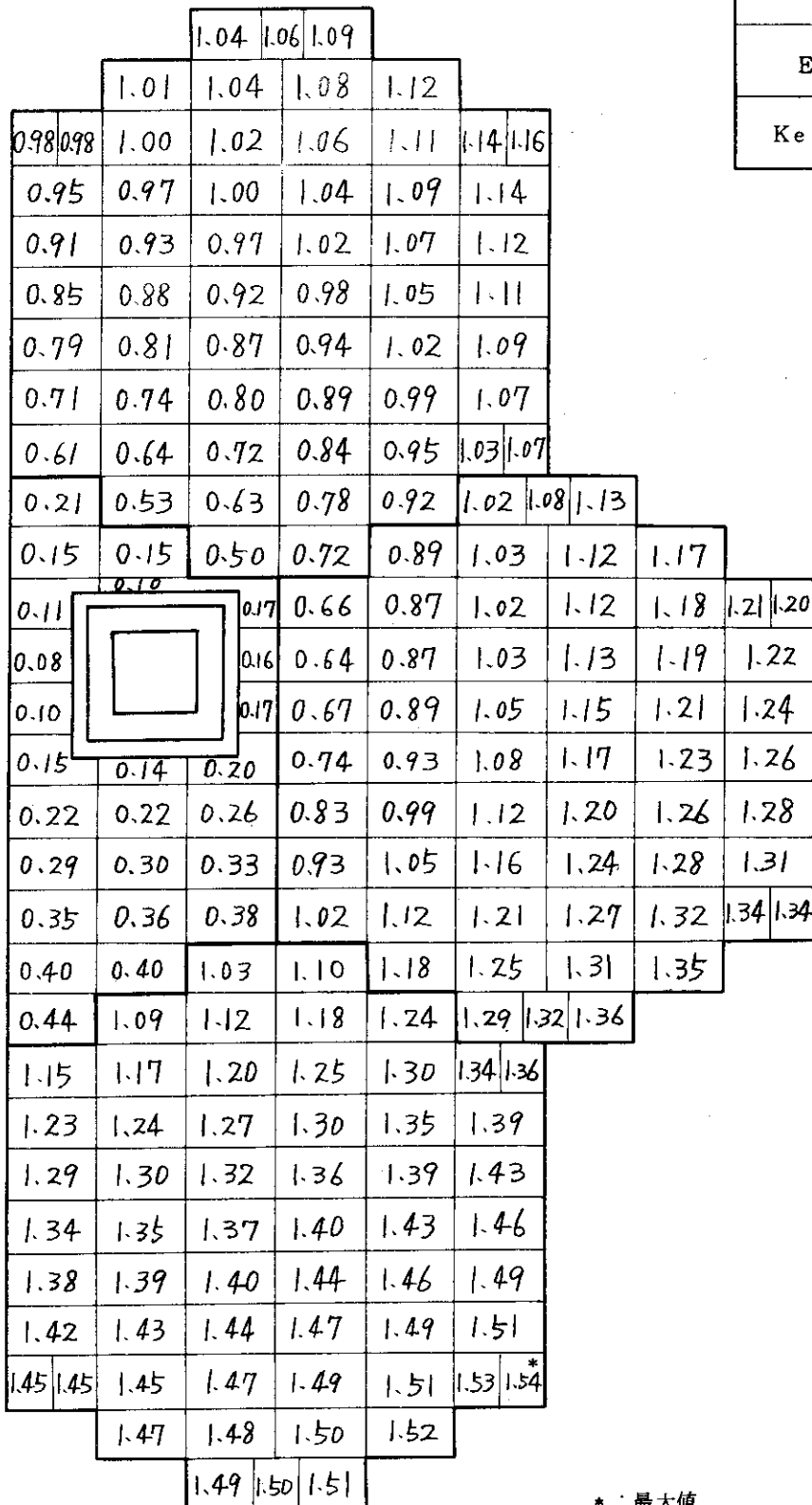
型 式	SP
E	6.0%
Keff	1.27272



* 最大値

第30図 出力分布 (C-6)

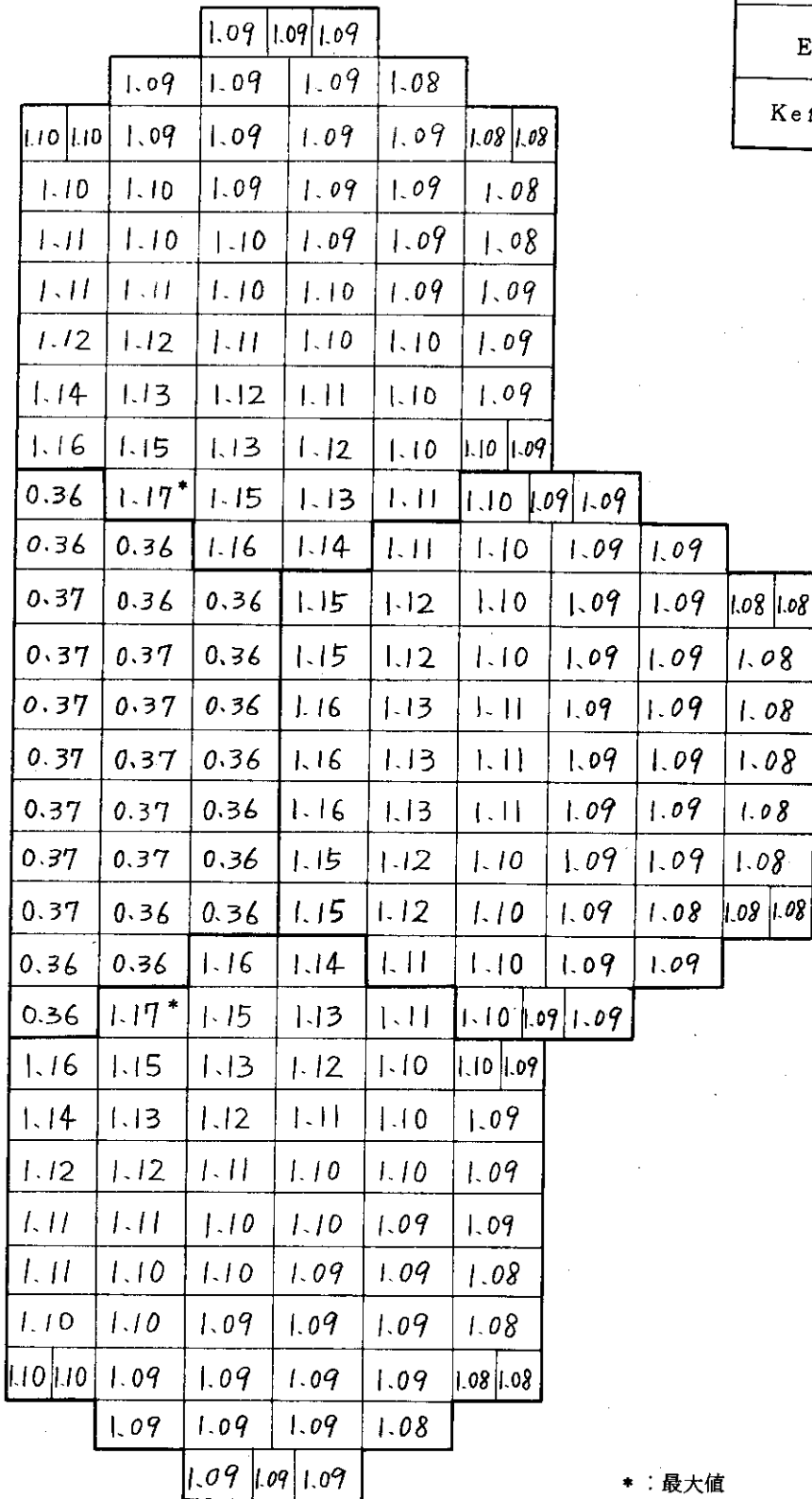
型 式	MH
E	3.0%
Keff	0.88302



* : 最大値

第 31 図 出力分布 (C-7)

型 式	MH
E	3.0%
Keff	1.17147



* : 最大値

第 32 図 出力分布 (C-8)

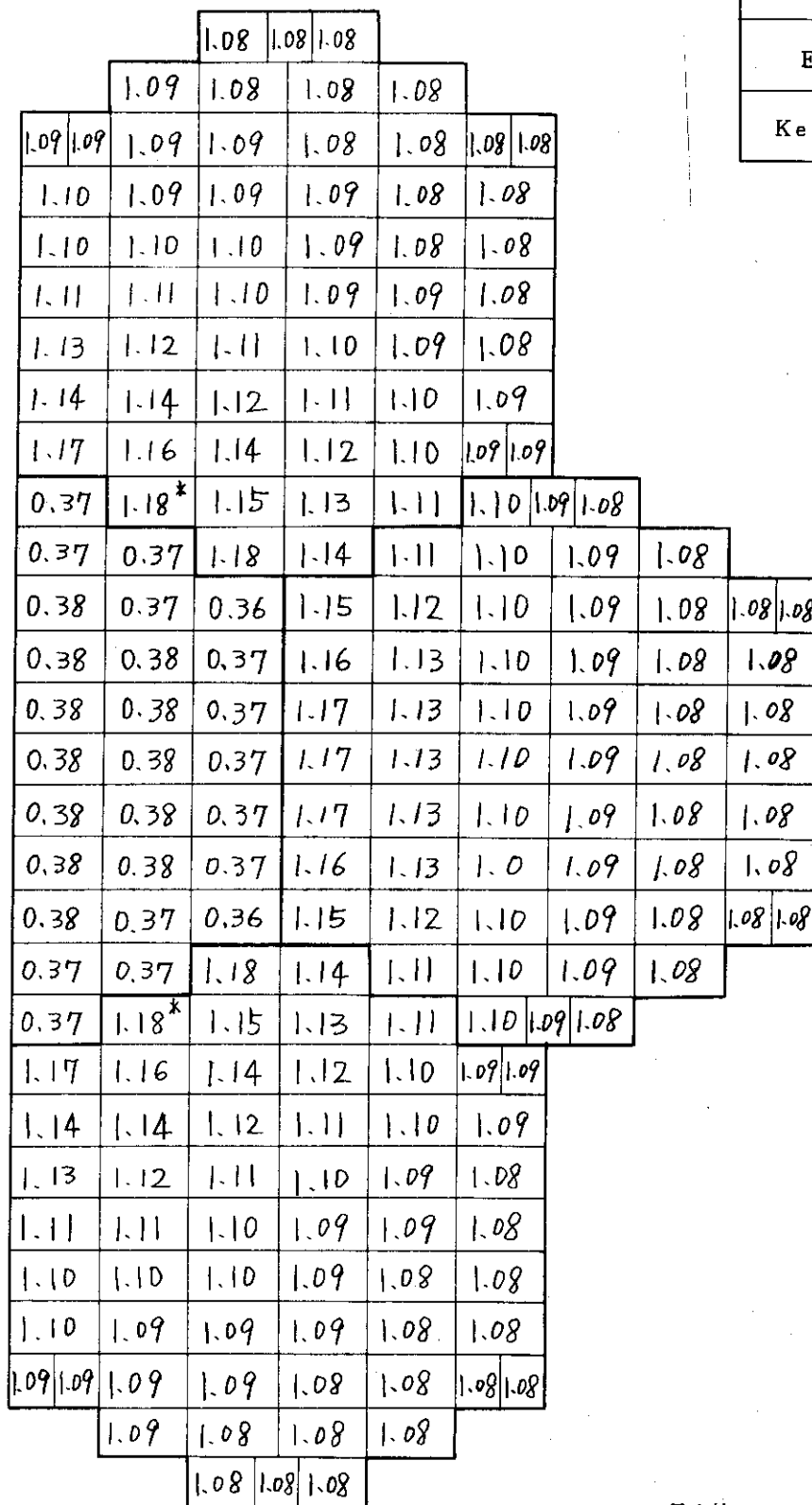
型 式	MH
E	4.0%
Keff	0.95923

		1.05 1.07 1.09								
		1.02	1.04	1.08	1.12					
0.98	0.97	1.00	1.03	1.06	1.11	1.14	1.16			
0.95	0.97	1.00	1.04	1.09	1.14					
0.91	0.93	0.97	1.02	1.07	1.12					
0.86	0.88	0.93	0.98	1.05	1.11					
0.79	0.82	0.87	0.94	1.02	1.09					
0.72	0.74	0.81	0.90	0.99	1.07					
0.62	0.65	0.73	0.84	0.96	1.03	1.07				
0.21	0.54	0.63	0.78	0.92	1.02	1.08	1.13			
0.16	0.16	0.51	0.72	0.90	1.03	1.12	1.17			
0.11	0.10	0.17	0.67	0.88	1.02	1.12	1.18	1.21	1.21	
0.09	0.10	0.16	0.64	0.88	1.03	1.13	1.19	1.22		
0.10	0.15	0.17	0.67	0.90	1.05	1.15	1.20	1.24		
0.15	0.15	0.21	0.74	0.94	1.08	1.17	1.23	1.26		
0.23	0.23	0.27	0.84	0.99	1.11	1.20	1.25	1.28		
0.30	0.30	0.34	0.94	1.05	1.16	1.23	1.28	1.31		
0.36	0.37	0.39	1.03	1.12	1.20	1.27	1.31	1.33	1.34	
0.41	0.41	1.04	1.11	1.18	1.25	1.31	1.34			
0.45	1.10	1.13	1.18	1.24	1.29	1.32	1.35			
1.16	1.17	1.20	1.24	1.29	1.33	1.35				
1.23	1.24	1.26	1.30	1.34	1.38					
1.29	1.30	1.32	1.35	1.38	1.42					
1.34	1.35	1.37	1.39	1.42	1.45					
1.38	1.39	1.40	1.43	1.45	1.48					
1.41	1.42	1.44	1.46	1.48	1.50					
1.44	1.44	1.45	1.46	1.48	1.50	1.51	1.52*			
		1.46	1.47	1.49	1.51					
		1.48	1.49	1.50						

* : 最大值

第 33 图 出力分布 (C-9)

型 式	MH
E	4.0%
Keff	1.23307



* 最大値

第 34 図 出力分布 (C-10)

型 式	MH
E	6.0%
Keff	1.05292

		1.05	1.07	1.09						
		1.02	1.05	1.08	1.12					
0.99	0.99	1.01	1.03	1.07	1.16	1.14	1.16			
0.96	0.98	1.01	1.05	1.09	1.14					
0.92	0.94	0.98	1.02	1.07	1.12					
0.87	0.89	0.93	0.99	1.05	1.11					
0.81	0.83	0.88	0.95	1.02	1.09					
0.73	0.76	0.82	0.90	0.99	1.07					
0.64	0.66	0.74	0.85	0.96	1.03	1.08				
0.22	0.55	0.64	0.79	0.93	1.03	1.08	1.13			
0.17	0.16	0.52	0.73	0.90	1.03	1.12	1.17			
0.12	0.11	0.18	0.68	0.88	1.03	1.12	1.18	1.20	1.21	
0.09		0.17	0.65	0.88	1.03	1.13	1.19	1.22		
0.11		0.18	0.68	0.90	1.05	1.14	1.20	1.23		
0.16			0.75	0.94	1.08	1.17	1.22	1.25		
	0.15	0.22								
0.24	0.24	0.28	0.85	1.00	1.11	1.19	1.24	1.27		
0.31	0.32	0.35	0.94	1.06	1.15	1.23	1.27	1.30		
0.37	0.38	0.40	1.03	1.12	1.20	1.26	1.30	1.32	1.33	
0.42	0.43	1.05	1.11	1.18	1.24	1.30	1.33			
0.46	1.11	1.13	1.18	1.23	1.28	1.31	1.34			
1.17	1.18	1.20	1.24	1.29	1.32	1.34				
1.23	1.24	1.26	1.29	1.33	1.37					
1.28	1.29	1.31	1.34	1.37	1.40					
1.33	1.34	1.36	1.38	1.41	1.43					
1.37	1.38	1.39	1.41	1.44	1.46					
1.40	1.41	1.42	1.44	1.46	1.48					
1.42	1.42	1.43	1.44	1.46	1.48	1.49	1.50*			
	1.44	1.46	1.47	1.49						
		1.46	1.47	1.48						

* : 最大值

第 35 图 出力分布 (C-11)

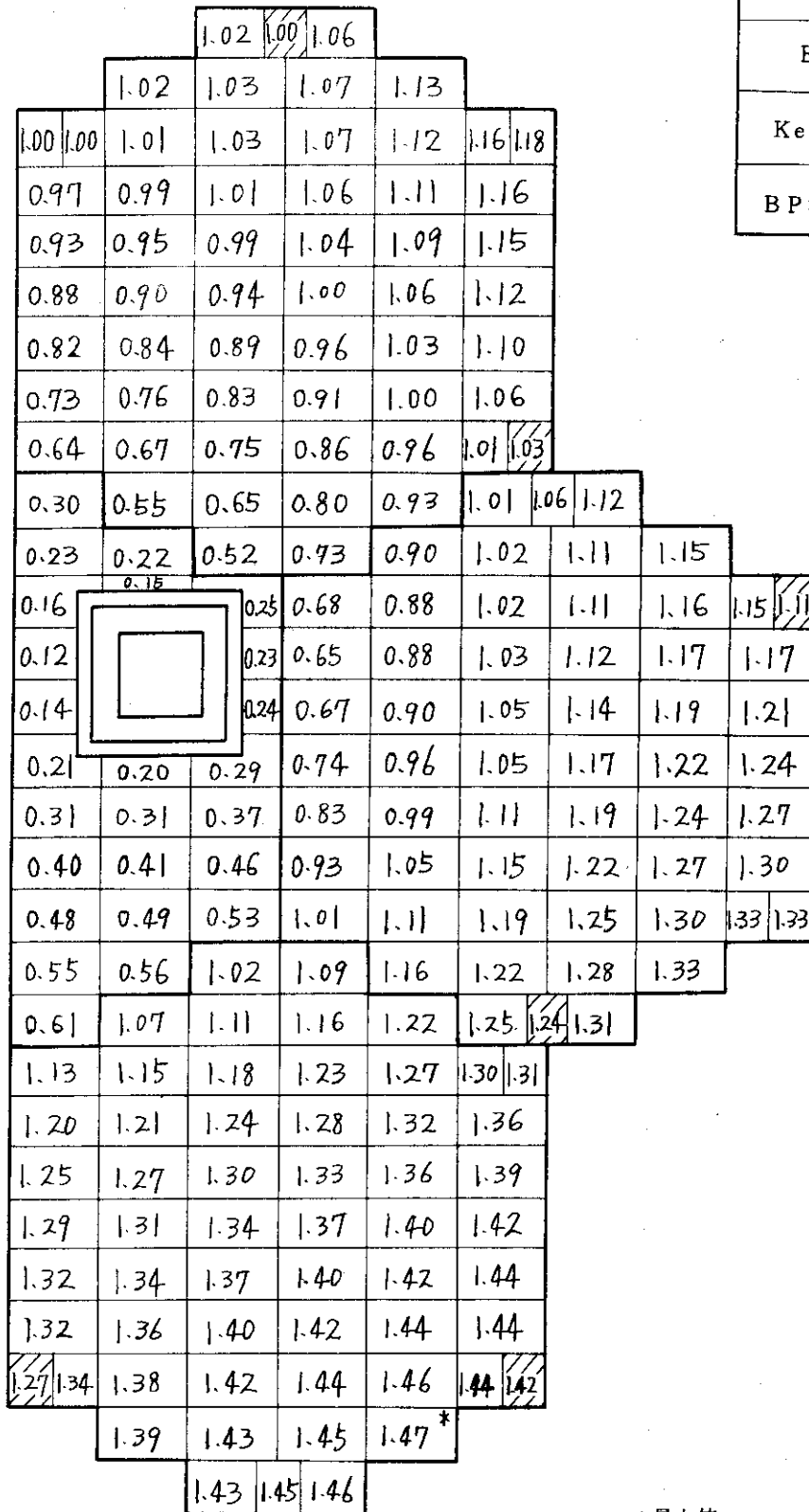
型 式	MH
E	6.0%
Keff	1.30340

		1.08	1.07	1.07					
		1.08	1.08	1.07	1.07				
1.09	1.08	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.07		
1.09	1.09	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07			
1.10	1.10	1.09	1.08	1.08	1.08	1.07			
1.11	1.11	1.10	1.09	1.08	1.08	1.07			
1.13	1.12	1.11	1.10	1.09	1.09	1.08			
1.15	1.14	1.12	1.11	1.09	1.09	1.08			
1.18	1.17	1.14	1.12	1.10	1.10	1.09	1.08		
0.38	1.20*	1.16	1.13	1.11	1.09	1.08	1.08		
0.39	0.39	1.19	1.15	1.11	1.09	1.08	1.07		
0.39	0.39	0.38	1.16	1.12	1.10	1.08	1.07	1.07	1.07
0.40	0.39	0.38	1.17	1.13	1.10	1.08	1.07	1.07	
0.40	0.40	0.38	1.18	1.13	1.10	1.08	1.07	1.07	
0.40	0.40	0.38	1.18	1.13	1.10	1.08	1.07	1.07	
0.40	0.40	0.38	1.18	1.13	1.10	1.08	1.07	1.07	
0.40	0.39	0.38	1.17	1.13	1.10	1.08	1.07	1.07	
0.39	0.39	0.38	1.16	1.12	1.10	1.08	1.07	1.07	1.07
0.39	0.38	1.19	1.15	1.11	1.09	1.08	1.07		
0.38	1.20*	1.16	1.13	1.11	1.09	1.08	1.08		
1.18	1.17	1.14	1.12	1.10	1.09	1.08			
1.15	1.14	1.12	1.11	1.09	1.08				
1.13	1.12	1.11	1.10	1.09	1.08				
1.11	1.11	1.10	1.09	1.08	1.07				
1.10	1.10	1.09	1.08	1.08	1.07				
1.09	1.09	1.08	1.08	1.07	1.07				
1.09	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.07	1.07		
		1.08	1.08	1.07	1.07				
		1.08	1.07	1.07					

* 最大値

第36図 出力分布 (C-12)

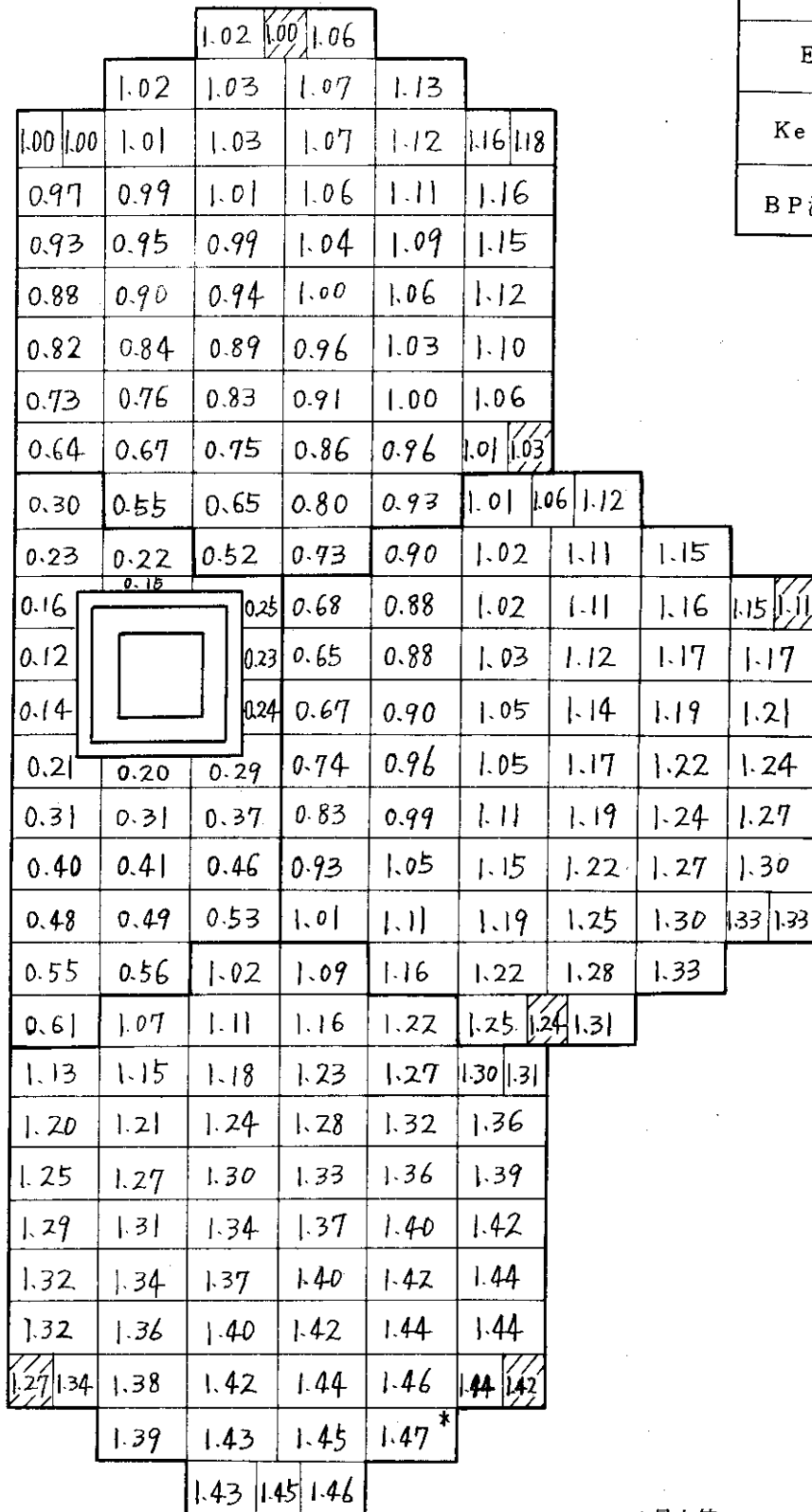
型 式	SP
E	4.0%
Keff	0.89252
BP濃度	1.0%



* : 最大値

第 37 図 出力分布 (C-13)

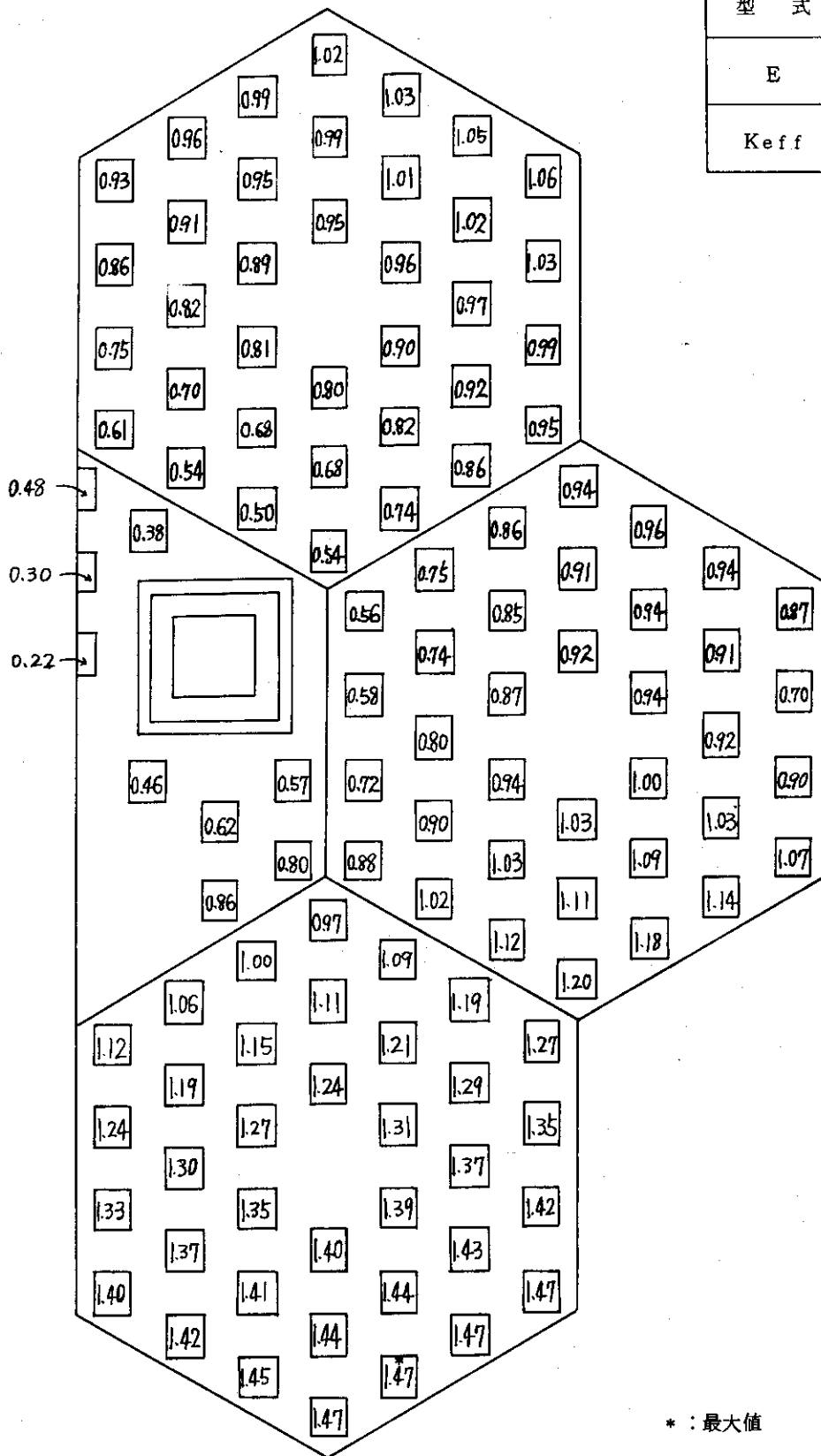
型 式	SP
E	4.0%
Keff	0.89252
BP濃度	1.0%



* : 最大値

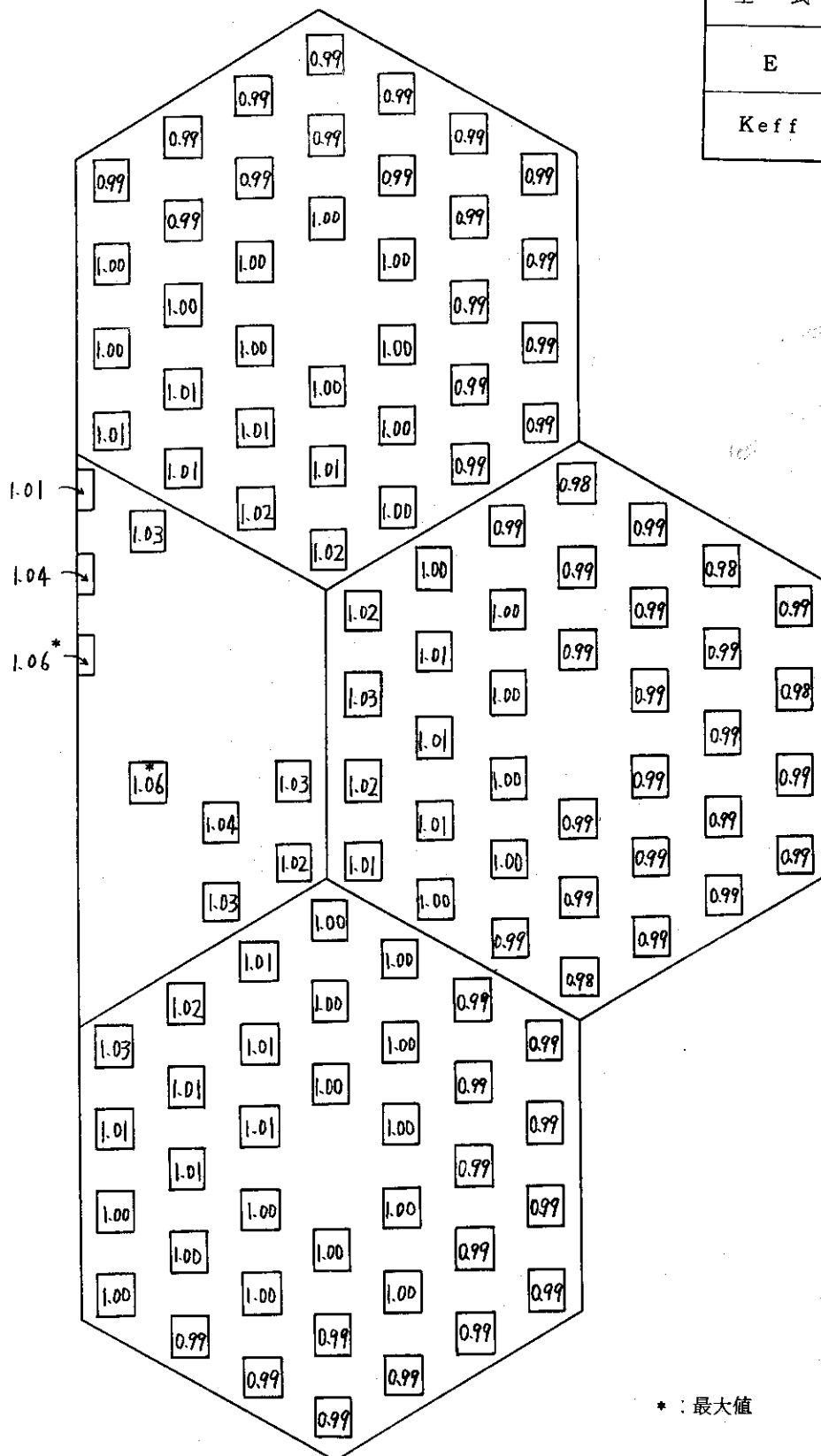
第 37 図 出力分布 (C-13)

型 式	SP
E	4.0%
Keff	0.89813

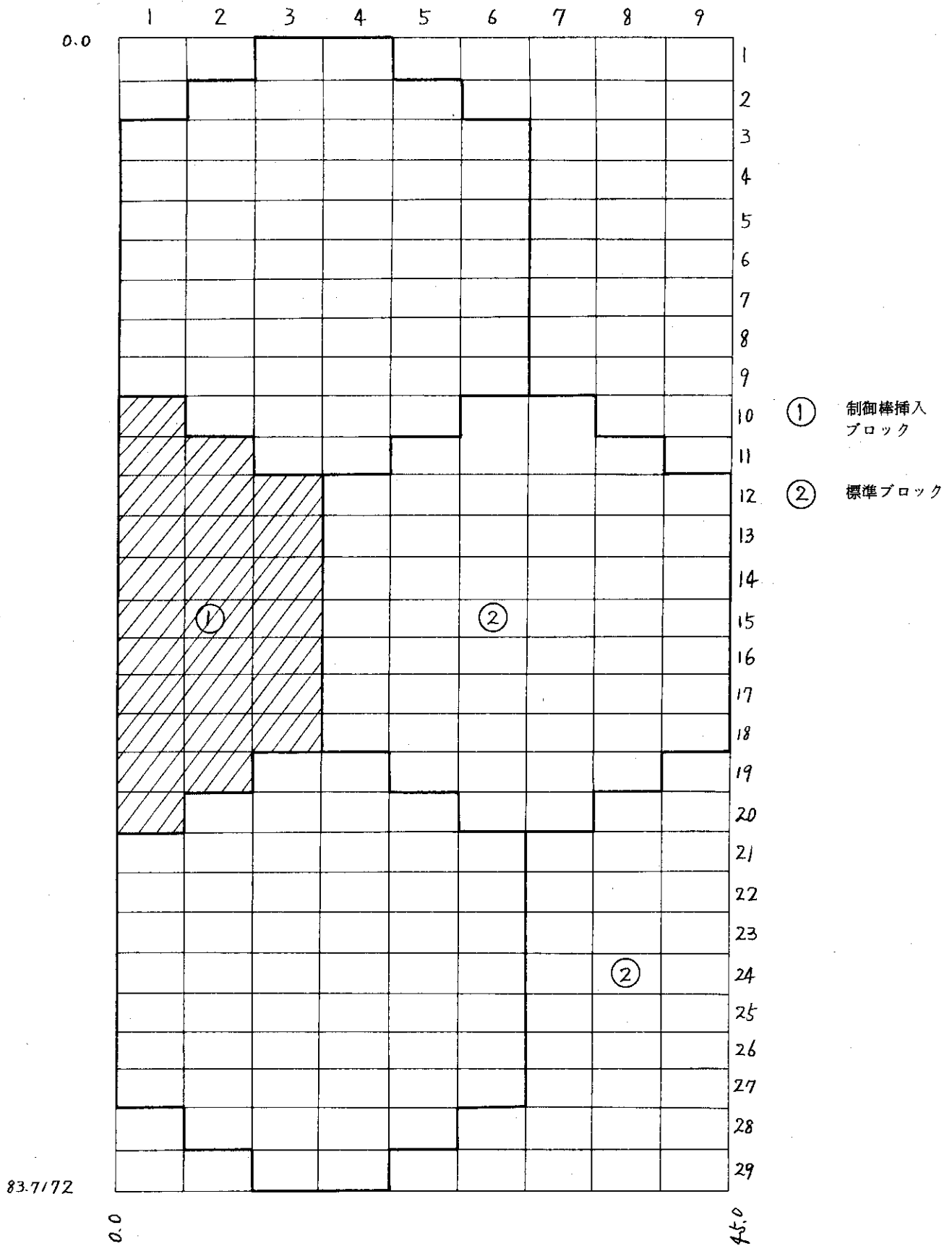


第 38 图 出力分布 (C-14)

型 式	SP
E	4.0%
Keff	1.20993

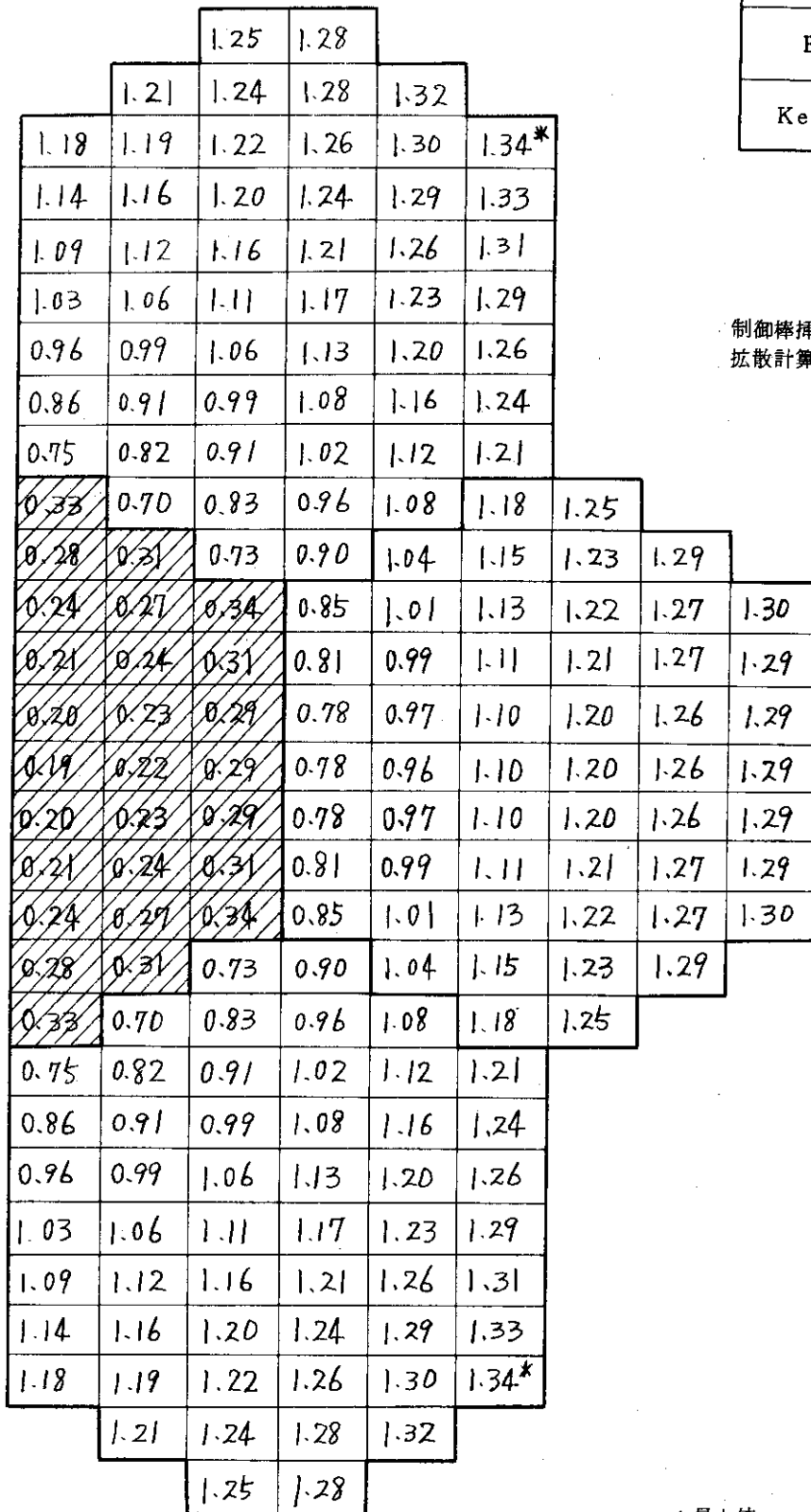


第 39 図 出力分布 (C-15)



第40図 対象体系の拡散計算形状 (CITATION 用)

型 式	SP
E	4.0%
Keff	0.91196



制御棒挿入
拡散計算

* : 最大値

第 41 図 出力分布 (D-1)

型 式	S P
E	4.0%
Keff	1.20171

		1.07	1.07						
	1.07	1.07	1.07	1.07					
1.08	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07				
1.08	1.08	1.07	1.07	1.07	1.07				
1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.07				
1.09	1.09	1.08	1.08	1.07	1.07				
1.10	1.09	1.09	1.08	1.08	1.07				
1.11	1.10	1.09	1.09	1.08	1.07				
1.13	1.12	1.10	1.09	1.08	1.08				
0.49	1.13*	1.11	1.10	1.09	1.08	1.07			
0.50	0.49	1.13	1.11	1.09	1.08	1.07	1.07		
0.50	0.50	0.49	1.11	1.09	1.08	1.07	1.07	1.07	
0.50	0.50	0.49	1.12	1.10	1.08	1.08	1.07	1.07	
0.51	0.50	0.49	1.12	1.10	1.08	1.08	1.07	1.07	
0.51	0.50	0.49	1.12	1.10	1.08	1.08	1.07	1.07	
0.51	0.50	0.49	1.12	1.10	1.08	1.08	1.07	1.07	
0.50	0.50	0.49	1.12	1.10	1.08	1.08	1.07	1.07	
0.50	0.50	0.49	1.11	1.09	1.08	1.07	1.07	1.07	
0.50	0.49	1.13	1.11	1.09	1.08	1.07	1.07		
0.49	1.13*	1.11	1.10	1.09	1.08	1.07			
1.13	1.12	1.10	1.09	1.08	1.08				
1.11	1.10	1.09	1.09	1.08	1.07				
1.10	1.09	1.09	1.08	1.08	1.07				
1.09	1.09	1.08	1.08	1.07	1.07				
1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.07				
1.08	1.08	1.07	1.07	1.07	1.07				
1.08	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07				
	1.07	1.07	1.07	1.07					
		1.07	1.07						

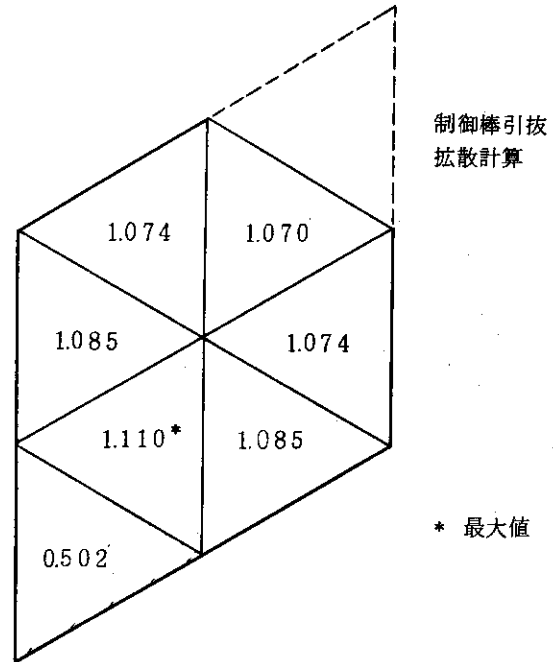
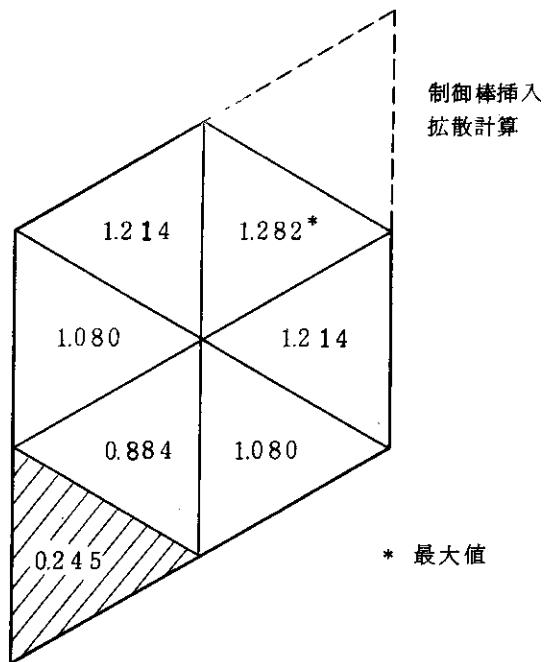
制御棒引抜
拡散計算

* : 最大値

第 4 2 図 出力分布 (D-2)

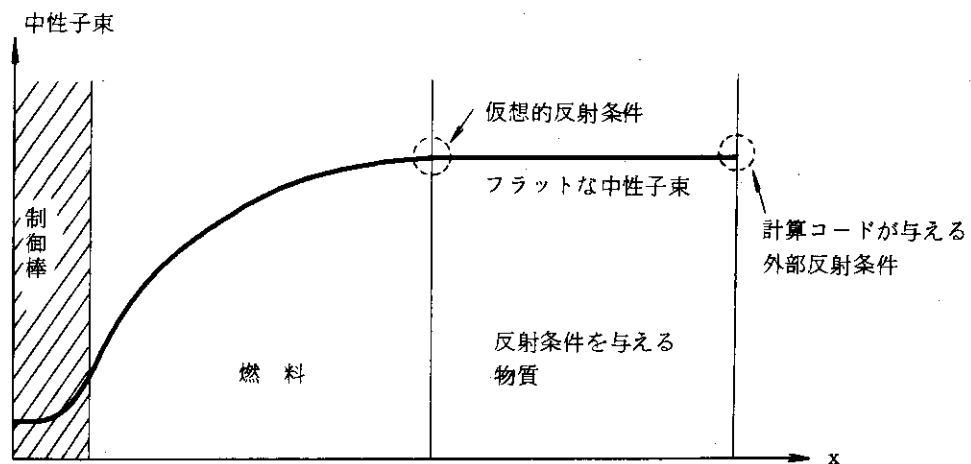
型式	SP
E	4.0%
Keff	0.87474

型式	SP
E	4.0%
Keff	1.20292



第43図 出力分布 (D-3)

第44図 出力分布 (D-4)



第45図 反射境界条件用断面積を用いた場合の中性子束分布