

JAERI-M

7886

FCA V-1集合体による非均質効果実験
(FCAによる高速実験炉模擬実験報告)

1978年10月

溝尾 宣辰・白方 敬章・小西 俊雄*
野本 昭二・安野 武彦・弘田 実弥

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

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、複製などのお問合せは、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.

FCA V-1 集合体による非均質効果実験
(FCAによる高速実験炉模擬実験報告)

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
溝尾 宣辰・白方 敬章・小西 俊雄*
野本 昭二・安野 武彦・弘田 実弥

(1978年9月4日受理)

V-1 集合体は高速実験炉「常陽」のモックアップのためにくまれた炉心である。この炉心の非均質効果を調べるために Bunching 実験を行った。

炉心の一部分の領域の Bunching 実験値より、それらの単純な算術和によって炉心全体の Bunching 効果を推定して、Bunching 領域の大きさと炉心全体の Bunching 効果の推定値との関係を実験的に調べた。すなわち、円筒型炉心の動径上の数点において、抽出し全体を Bunching して、Bunching 効果の r -dependence を測定し(十字形実験)、炉心中心抽出しの 1 pack づつを Bunching して z -dependence を測定した(Single Pack Bunching 実験)。さらに、炉心内中性子の輸送についての異方性を考慮して、 $x-y-z$ の直交座標系の軸上数 pack を Bunching して、各軸上における Bunching 効果の空間依存性を調べ(Zone Bunching 実験)、最後に炉心全体の Bunching を行った(Bulk Bunching 実験)。

加算性の仮定の下に炉心全体の Bunching 効果を推定した結果、Single pack Bunching 実験および Zone Bunching 実験による推定値は、十字形実験および Bulk Bunching 実験による値よりも約 40% 大きく出ることが分った。

*) 日立エネルギー研究所

本報告書は、日本原子力研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託によって行った研究成果である。

Experiment on Heterogeneity Effect in FCA Assembly V-1

Nobutatsu MIZOO, Keisho SHIRAKATA, Toshio KONISHI*,

Shoji NOMOTO, Takehiko YASUNO and Jitsuya HIROTA

Division of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 4, 1978)

The FCA assembly V-1 is the first physics mock-up in series assemblies for which mock-up experiments of the JOYO (Japan Experimental Fast Reactor) are planned. To examine heterogeneity effect of the core, a bunching experiment was performed.

Bunching effect of the bulk volume of core was estimated from the data obtained by bunching different volumes of regions in the core, and validity of the additivity was studied. R-dependence and Z-dependence of bunching effect were obtained by bunching a single drawer on radial axis of the core (CDB experiment) and a single pack on Z axis (SPB experiment), respectively.

The bunching effect of several packs on the orthogonal axes of x-y-z in the core was also observed (ZB experiment). To get the exact value of full-core bunching effect, the bulk volume of core was bunched (BB experiment).

The full-core bunching effect estimated from SPB or ZB experiment was about 40 % larger than that from CDB or BB experiment.

Keywords: Heterogeneity Effect, FCA Assembly, Fast Critical Experiment, Bunching Effects, Plate Lattice Cell, Cell Pattern, Reactivity Change, JOYO Reactor Core

* Hitachi Energy Research Laboratory

The work performed under contracts between Power Reactor Nuclear Fuel Development Corporation and JAERI.

目 次

1. 緒 言.....	1
2. 十字形実験.....	7
3. Single Pack Bunching 実験.....	11
4. Zone Bunching 実験.....	16
5. Bulk Bunching 実験.....	27
6. 検 討.....	31
参考 文 献.....	35
Appendix A.....	37
Appendix B.....	38

C o n t e n t s

1. Introduction	1
2. Cross Traverse Experiment	7
3. Single Pack Bunching Experiment	11
4. Zone Bunching Experiment	16
5. Bulk Bunching Experiment	27
6. Discussion	31
References	35
Appendix A	37
Appendix B	38

1. 緒 言

高速炉臨界実験装置（FCA）による炉物理実験では、炉心物質すなわち燃料およびその他の炉心模擬物質が全て板状物質を使用するために、装置固有の問題として炉心非均質効果を考慮しなければならない。炉心内の非均質効果は、核分裂中性子源すなわち燃料、および共鳴吸収物質や冷却材その他の減速物質が空間的に均質に分布していないこと、すなわち板状セルを積み重ねて炉心が構成されていることによって発生するものであり、この板状セルはセル内に中性子束の微細構造を作り、セルを構成する板状物質内の中性子束角度分布に強い非等方性をもたらす。セル内の中性子束の微細構造は中性子の反応率を均質な炉心の場合と異ったものにする。すなわち高いエネルギー領域では、中性子束は燃料板内で高くそこでの反応率を増加させ、共鳴領域では吸収物質が板状にかたまって存在することにより、この部分での中性子束を低くしさらに共鳴吸収の self-shielding を強めて反応率の減少をきたす。中性子束分布の非等方性は、中性子のもれの特性の変化および炉心内の中性子輸送に関して異方性をもちこむ。したがって非均質効果の発生はセル内の核分裂性物質および共鳴吸収物質の存在による所が大きいが、 U^{235} 、 Pu^{239} 等は高速領域での反応率の増大の結果、中性子発生を増加し炉の反応度に対して正に働く一方、共鳴領域では反応率の減少は中性子の発生に対しては $-\sum_j x_j \phi_j^+$ 、吸収に対しては $+\phi_i^+$ の重みをもち、反応の種類によって self-shielding の度合は異なるが、反応度に対して負に働く可能性をもつ。また U^{238} などのしきい核分裂性の物質では、高速領域での中性子発生を増加し、共鳴領域での吸収を減少させる結果非均質的分布は炉の反応度に正に働く。

非均質効果の存在は、臨界実験装置による均質炉心の臨界の推定に補正を必要とし、中性子微細スペクトルを均質炉心と異ったものにするために、諸物質の反応度価値、Doppler 効果や、カウンター管による反応率の測定値に影響し、中性子束角度分布の非等方性は Na-void 効果の測定において考慮しておくべき項目である。高速炉の大型化、炉心スペクトルの軟化に伴って、現有の型式の臨界実験装置による実験条件は非均質効果の増大によって、本来の模擬すべき炉心の状態と異り、実験値は本来求めている諸物理量から離れたものになる可能性がある。したがって諸物理量の測定値に対する非均質効果の影響を調べておくことは次第に重要になる。しかしながら、実験と計算の比較の場を均質炉心にとる必要はなく、解析を非均質炉心の方へ拡大する方法が有る。この場合解析における非均質性のとり入れ方が、現実の実験状況を忠実に再現していることが前提となり、これを検定し得る様な非均質効果に関する実験的な情報を取ることが必要になって来る。

非均質効果に関する実験は ZPR-3 による高速炉臨界実験のはじまり以来行われており、実験の種類としては、中性子束微細構造の測定、Bunching 実験、相隣る抽出し毎にセルの軸を 90° 回転させることによる反応度変化の測定などに分類される。中性子束の微細構造の測定は、反応度変化を知る直接的な情報となり、解析側からの非均質性のとり入れ方の検定にも役に立つ。測定は主に U^{235} 、 U^{238} の管が使用されている。一方、Bunching 実験は 反応度変化を測定値とし臨界量に対する補正をする。セル軸の 90° 回転の方法は、板状物質内の中性子束角度分

布の非等方性をゆるめて、その方から均質炉心への接近をねらいとしたものである。すなわち炉心内中性子の輸送における異方性を無くすることを目的とするものである。セル内微細構造の測定は上述のとおり計算を非均質の場に拡大した場合、もっとも直接的な検定量となし得るが、更にこれを用いてセル構成状態と非均質の度合との関係を知る情報とすることが出来る。しかし、これは測定値が反応率分布であることから、実験的に反応度として非均質効果を知ることは不可能であり更に測定精度に関する難点もある。それは測定量が測定点における反応率であることから、測定点における平均的炉内核特性からのずれに敏感であることを一因とする。平均的特性からの局所的なずれは、その測定点をかこむ諸物質の平均的な特性からのずれ、測定点近傍における平均的形状や寸法からのずれによって生ずる。

Bunching 実験は理想的にはセル内諸物質の配列順序の変更なしにセルの単位長さを変えてゆくことが望ましいが、実験と比較される計算法によっては必ずしもこれを必要としない。すなわち、解析を非均質の場においていたとき、解析において取り入れられた非均質効果の妥当性を検定するために使用された場合、実験に採用される各 Bunching パターンは解析にのるような明確な形状を条件とする。一方実験的に非均質効果を出す方向にあるときは、構成されるパターンとその非均質の度合が明確になっていることが肝要である。一般的には燃料厚みがこの尺度として用いられて来たが、燃料要素がウランとプルトニウムのように異種のものが混在するに至って今後さらに検討を必要とする。

Bunching に伴う効果は反応率の変化と中性子の流れの変化に大別される。小型高速炉心のように中性子のもれの大きな系では、後者による効果を無視することが出来ない。反応率の変化については燃料厚みが非均質の度合として有効な尺度となり得るが、もれの変化に関してはセル内の諸物質の配列が問題になって来る。実験解析的には単純な一次摂動的などり扱いに検討を要する。

この中性子のもれの変化について配慮された実験として、前述のセルの軸を 90° 回転させて反応度変化を見る方法があるが、これだけで非均質効果を決定し得るものではない。

Bunching 実験は上述の如く種々多様な効果を含み、Bunching 領域と摂動領域の関係、中性子のもれの変化の効果等実験解析上複雑な問題をもっている。しかし板状物質による非均質効果は本来それらの効果全てを含めたものを云っていること、測定値が反応度であり適当な Bunching パターンの選定により（場合によってはある種の仮定のもとに）実験的に非均質効果の推定が、可能であることから、非均質効果に関する最も普遍的な実験方法として位置づけることが出来る。

高速炉の大型化、炉心スペクトルの軟化の傾向に伴って、炉心の非均質効果は共鳴領域における群定数のとり扱い方、したがって Doppler 効果などにおよぼす影響に関連して注目され、1966年のシカゴ会議¹⁾、1967年のカールスルーエの会議²⁾で多くの計算および幾つかの実験の報告がなされた。後者の会議において F. STORRER は非均効果に関する今後の課題として、(1)非均質効果の空間依存性、(2)炉心—ブランケット間の非均質効果、(3)非均質効果に対する非等方散乱の寄与、の三点を掲げている。これらの会議で提出された報告では、セル内の中性子束の微細構造は、Integral-Transport, Monte-Carlo, SN などの方法によって計算され、使用された定数は数十群の coarse group constant であった。実験は主に Bunching 実験であり、

特殊なものとしてZPR-6においては、燃料板の厚みをかえたときの中心反応度価値の変化及びセルの軸の90°回転したときの効果から炉心の非均質効果を推定している。Bunching領域は抽出し一本から炉心体積の1/4まで行われた例がある。

その後計算機の発達や核データの整備に伴い、計算に使用される定数は ultra-fine group より出発し、非均質な場での実験と計算との比較が行われるのが一般的になってきた。実験は PCTR法による Bunching に伴う K_{∞} の変化の測定³⁾、Pin 状燃料の使用など新たな種類のものが現れている。小領域 Bunching 実験の解析において問題とされる Bunching 領域と摂動領域との関係は、BNLにおいてセル内中性子束の微細構造の測定⁴⁾が行われている。又、平板炉に関する思考実験的な計算が行われ、非等方散乱の影響、実効断面積の算出法についての検討がなされている。⁴⁾

FCAでは初臨界以来各炉心において、非均質効果についての情報を得ており、実験方法は Bunching 実験、箔および原子核乾板による中性子束微細構造の測定などである。Ⅱ系、Ⅲ系など中速系球型炉心では一パックの Bunching 効果の径方向 Traverse が行われ、これより体積積分により炉心全体の非均質効果の推定が行われた。³⁾ AB BN の群定数の Bell 補正を加えた f を使用し Integral-Transport によって算出されたセル内中性子束の微細構造を重みとした実効断面積を用い、一次摂動法で一パックの Bunching 効果の計算を行ったが実験とよい一致を見るに至らなかった。よりかたいスペクトルの系では Bunching 実験の測定値と Monte-Carlo 法による計算値の比較が行われている。⁵⁾ いずれの場合にも実験的情報の不足がより充実した解析を妨げている。Bunching 実験と中性子束微細構造の測定とを組み合せてゆくことが将来計画とされる。

V-1集合体は高速実験炉「常陽」の Physics Mock up Core として組まれ既にその特性試験の段階で臨界質量が実験的に決定され、いくつかの補正項目について検討が行われた。⁶⁾ 非均質効果についても一応の実験結果は報告されているが更に詳しく調べるために未だ不確定性は残されている。従って今回は臨界質量に与える非均質効果について前回の実験に対していくつかの独立な approach を試みそれぞれの結果に対して評価検討を加えて不確定性を絞ることにした。

V-1炉心の燃料は 20% EU および 92% Pu²³⁹⁺²⁴¹ で構成され臨界量は 120.8kg U²³⁵ および 66.2 kg Pu²³⁹⁺²⁴¹ であり、Median Fission Energy は約 200 keV、炉心の K_{∞} は約 1.7、等価半径 28.7 cm、炉心高さ 61 cm の円筒炉心でプランケットは厚さ 30 cm の天然ウランである。炉心は Fig. 1.1 のようなかたちをしており抽出しの装填状態は Fig. 1.2 の A パターンが標準である。

V-1炉心における Bunching 効果は主に核分裂中性子源の非均質的分布と、中性子の流れの変化にもとづくものである。前者は反応率の変化の問題であり、 K_{∞} の変化に相当する。これは Bunching に伴う中性子束微細構造の変化を原因とするから、小領域の Bunching によって炉心全体の Bunching 効果を加算的に推定することは可能である。ただしこのとき、Bunching による周辺への摂動の程度が問題となる。したがって Bunching する領域の大きさをどの程度にするかが問題になる。後者の中性子の流れの変化は、小領域 Bunching の値をもって全体を加算的に推定することは本質的に無理がある。炉心は円筒形であるが、中性子の流れに関しては、x-y-z のデカルト座標系によって考えなければいけない。すなわち、抽出し長さ方向(z 方向)

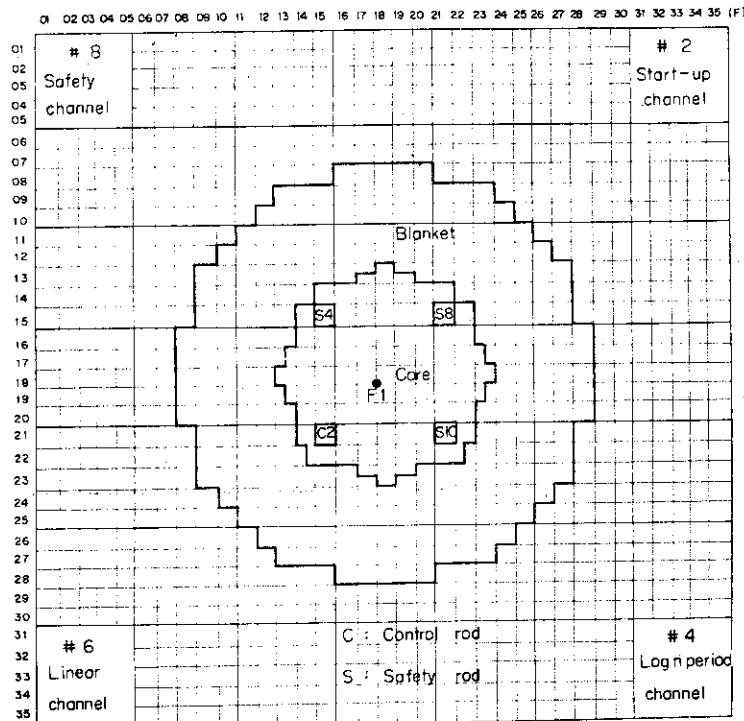
では streaming 的現象が予想され、中性子束の勾配の大きな炉心中心より離れた所では Bunching 領域の拡大は中性子のもれについては単純な算術和よりも大きな効果をもたらすと考えられる。 z 方向および沿直方向の動径上 (y 方向) では、Bunching の上述の二つの効果は相殺する様に働くが、それに対して水平方向の動径上 (x 方向) では同じように正又は負に働くものと予想される。さらに z 方向と y 方向は格子管の有無によって同一と考えることが出来ない。

このような問題について、炉心中心部又は周辺部において Bunching 領域を変化させて単純な算術和との比較を行うことによってその影響の度合を調べることにした。

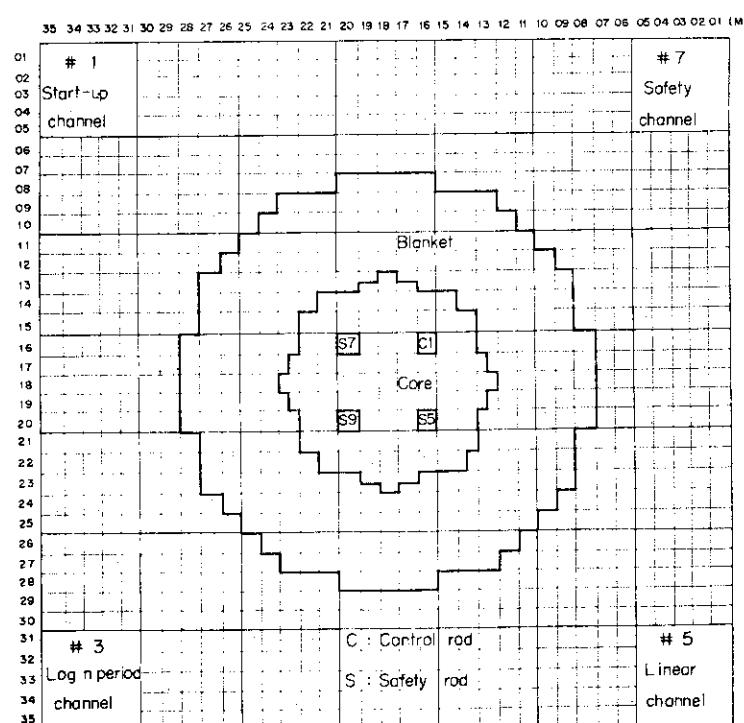
本稿は Bunching 実験によって V-1 炉心の非均質効果の推定を行い、Bunching 領域のとり方とその推定値との相異を明確にしたものである。すなわち、2 章^{*}では炉心 z 方向を貫通する抽出し 2 本を単位として Bunching を行い、3 章では 1 pack を単位として Bunching した。また 4 章では 9~12 packs を単位として Bunching し、最後に 5 章では炉心全体を Bunching して、各章において加算性を仮定して体積積分により、それぞれ炉心全体の非均質効果の推定を行い、6 章においてこれらの結果について検討を試みた。Bunching パターンは Fig.1.2 に示す通りである。2 章では A パターンから B パターン、A パターンから C パターンに Bunching したときの値を用いて均質炉心への外挿式を決定し、全章共に同じ式を用い、この式に関してはさらに進んだ議論を行っていない。したがって非均質効果は、各章において独立した実験値を用いて炉心全体を A パターンから B パターンに移したときの反応度変化を推定し、次に 2 章で決定された非均質性の式を用いて推定された。

実験値の誤差評価とその方法は各章においてそれぞれ明記されており、とり入れられた誤差源の範囲は必ずしも一貫していないが本質的なものはつくしていると考えてよい。測定値の反応度変化は主に ρ_0 単位を用いた。ここに ρ_0 は $0.0484\% \Delta K/K$ である。結論および主要な部分については $\% \Delta K/K$ および燃料重量に換算して並記してある。

*) 2 章は参考文献 6) より再録したものである。



Assembly V-1-B drawer loading in fixed half

Fig. 1.1 Assembly V-1-B drawer loading
in movable half

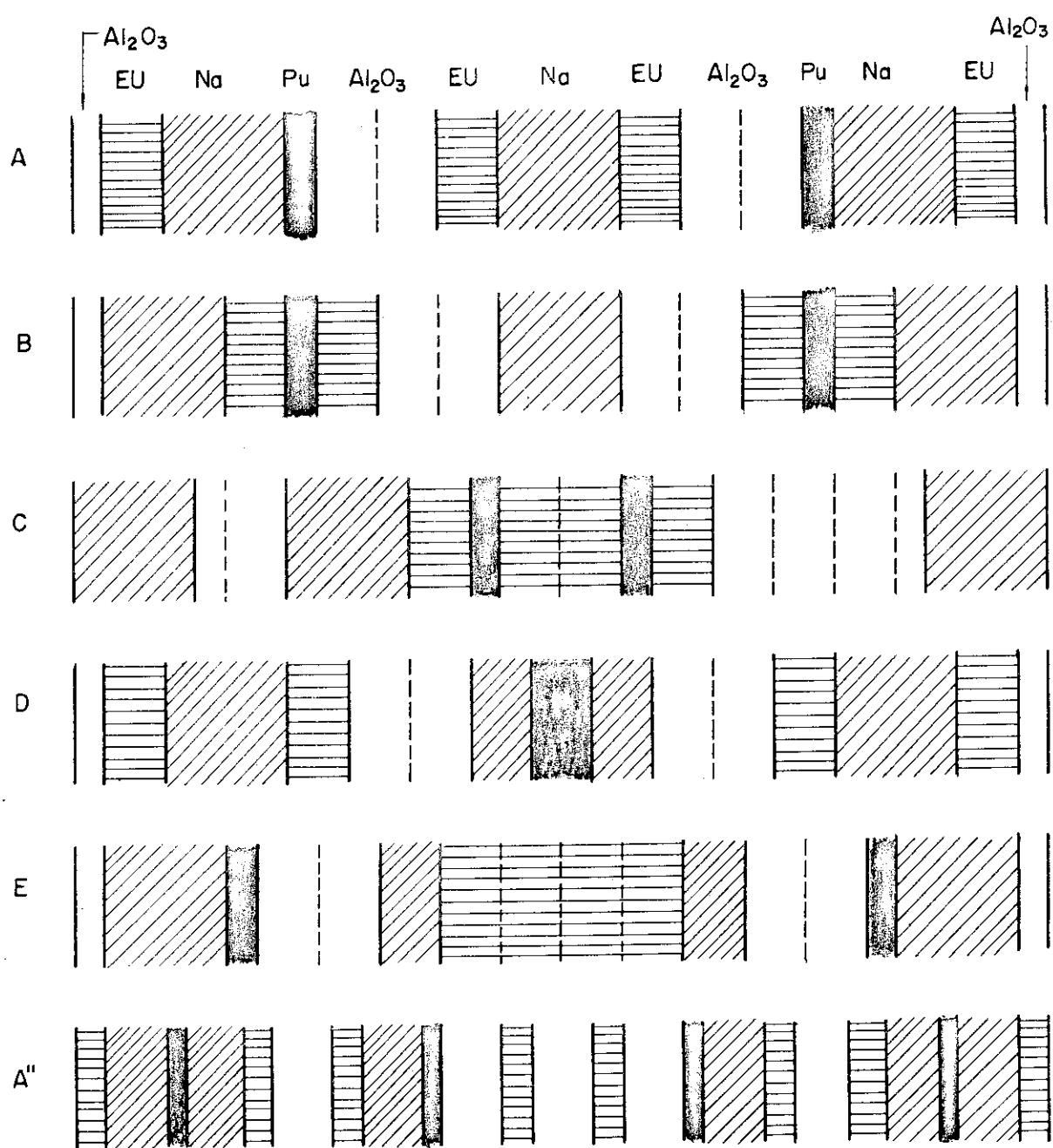


Fig. 1.2 Loading pattern for bunching experiment

2. 十字形実験 (Cross Drawer Bunching)

この実験ではZ軸方向6パックの全てをBunchingした抽出しをR軸方向に移動し各場所の反応度変化から炉心全体のBunching効果を推定した。このBunching法では反応率の変化のみではなく φ 軸に関しては中性子の流れの影響も調べることができる。 x 軸と y 軸は中性子の流れに対して異なった性質を持っているが、この実験では両方向の影響を合せて測定した。

Bunchingした抽出し位置はFig. 2.1に示すように各 $\frac{1}{2}$ 集合体(移動側、固定側)につき4本である。図中の番号は、置換の各ステップに対応するがステップ0とステップ3は直接測定せず他の測定点から内外挿により推定した。

この実験では、「非均質度」の検討をも目的としてBパターンの他にさらにBunchingを強化したCパターンによる反応度変化も測定した。Fig. 2.2にこれらのBunchingパターンを通常のAパターンと共に示す。

各ステップで測定された反応度変化をTable 2.1(第2, 3欄)とFig. 2.3に示す。炉心全体のBunching効果は次のようにして推定した。各ステップでのBunched Drawerと等価な位置にあると見做し得る円環の面積を求め^{**}抽出しとの面積比を転換係数C.F.とする(Table 2.1, 第4欄)。測定された反応度変化にC.F.を乗じて全体の和をとることによって炉心全体のBunching効果が得られる。(Table 2.1, 第5, 6欄)。反応度測定の誤差は、各ステップでの置換に際して $\frac{1}{2}$ 集合体の分離密着による再現性が主な原因であり、数回の測定で積算されて $0.169 \rho_0$ ($\rho_0 = 0.0484\% \Delta K/K$)と評価されている。

炉心全体のBunching効果から逆に均質炉心にしたときの反応度を推定するには、非均質の度合をあらわす尺度が必要となる。ここでは、非均質効果の主なものが²³⁸Uや²⁴⁰PuのThreshold Fission Bonusにあると考えて格子中の核分裂物質(燃料)の平均厚さを尺度とした。^{***}

Pu燃料の厚さ $t = \frac{1}{16}''$ を単位とするとBパターンでは $\frac{1}{2}[(2t+t+2t)+(2t+t+2t)] = 5t$ となり、Cパターン、Aパターンでは同様にして $10t$ 、 $1.67t$ となる。このとき炉心全体のBunching効果との関係はFig. 2.4に示すようにほぼ直線関係にあることがわかる。

燃料平均厚と反応度変化の間に直線関係を仮定すると ρ_{A-Homo} と ρ_{A-B} または ρ_{A-C} の間には次の関係が成立つ。

$$\rho_{A-Homo} = -\frac{1}{2} \rho_{A-B}$$

$$\rho_{A-Homo} = -\frac{1}{3} \rho_{A-C}$$

* 中性子の勾配に対して物質の配列方向が x 軸では垂直、 y 軸では平行である(4章参照)

** 等価な円環のとり方はある程度任意である。ここでは、ステップ0に対しては等断面積の円とし、ステップ1からは各抽出しの境界に接する同心円を考えてそれにはさまれる領域をとった(Fig. 5.1)。ただし、この等価円のとり方によって最終結果は殆んど影響を受けない。

*** 非均質度については、6章でさらに検討する。

十字形実験では、これらの値がそれぞれ $-5.52\rho_0$, $-5.18\rho_0$ となる。ここでは、これらの値が直線関係にある母集団からの標本と考え ρ_{A-Homo} の最確値として両者の平均値 $-(5.35 \pm 0.17)\rho_0$ をとる。

これは、燃料の量に換算すると

$$\begin{aligned}\rho_{A-Homo} &= -(5.35 \pm 0.17) \rho_0 \\ &= -(0.251 \pm 0.008) \% \Delta K / K \\ &= -(1.17 \pm 0.06) \text{ kg} - \text{Pufis} - (1.49 \pm 0.06) \text{ kg} - U^{235}\end{aligned}$$

に相当する。ここに、 $\rho_0 = 0.0484 \% \Delta K / K$ であり、炉心周辺の質量係数は

$$1 \% \Delta K / K = (3.139 \pm 0.041) \text{ kg} - \text{Pufis} + (5.732 \pm 0.074) \text{ kg} - U^{235}$$

である。その結果、最確値 ρ_{A-Homo} と測定値 ρ_{A-B} の間には

$$\rho_{A-Homo} = -(0.485 \pm 0.017) \rho_{A-B}$$

の関係が生ずる。次章以降の実験方法ではBパターンへのBunchingのみを行ったので、均質体系への外挿は十字形実験で観測された上式に基いて行った。

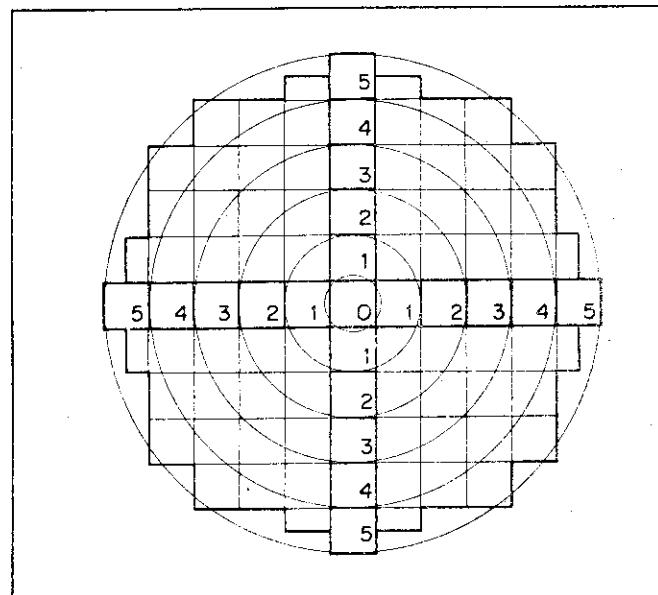


Fig. 2.1 Drawer positions replaced during the fuel bunching experiment

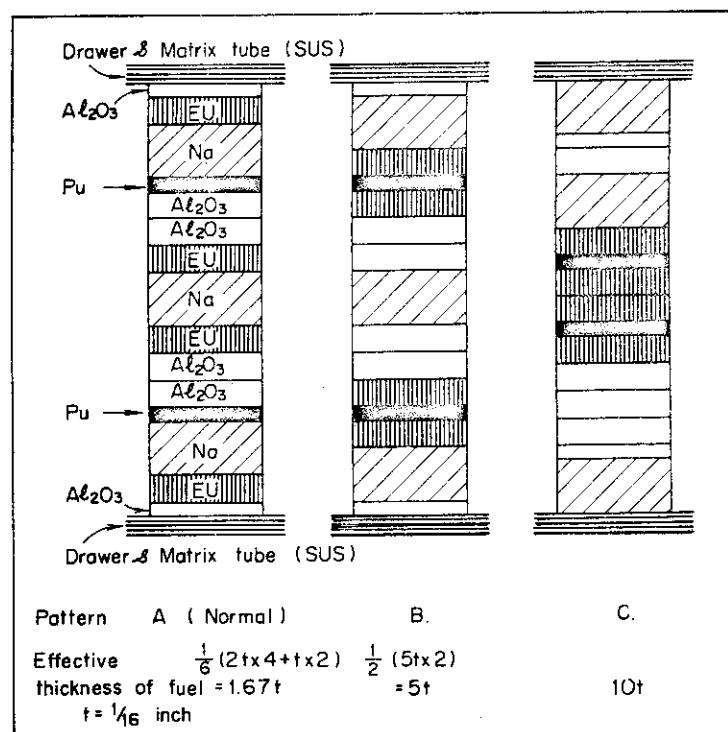


Fig. 2.2 Loading pattern in the drawer for the fuel bunching experiment

Table 2.1 Reactivity change due to the change of the effective fuel thickness

Position of annular cell	Reactivity change measured due to the change of the pattern bunched		Conversion factor C.F.(*)	Reactivity change multiplied by C.F.	
	A → B	A → C		A → B	A → C
0	(0.24 ρ_0)	(0.69 ρ_0)	1.000	0.24 ρ_0	0.69 ρ_0
1	0.92 ρ_0	2.50 ρ_0	1.517	1.40 ρ_0	3.79 ρ_0
2	0.83 ρ_0	2.10 ρ_0	3.142	2.61 ρ_0	6.60 ρ_0
3	(0.69 ρ_0)	(1.58 ρ_0)	4.712	3.25 ρ_0	7.45 ρ_0
4	0.45 ρ_0	0.95 ρ_0	6.283	2.83 ρ_0	5.97 ρ_0
5	0.13 ρ_0	0.26 ρ_0	5.471	0.71 ρ_0	1.42 ρ_0
Total				11.04 ρ_0	25.92 ρ_0

* CF: the ratio of area of the annular cell to that of a cross section of the drawers replaced

() : values in parentheses are inter-or exte-polated ones

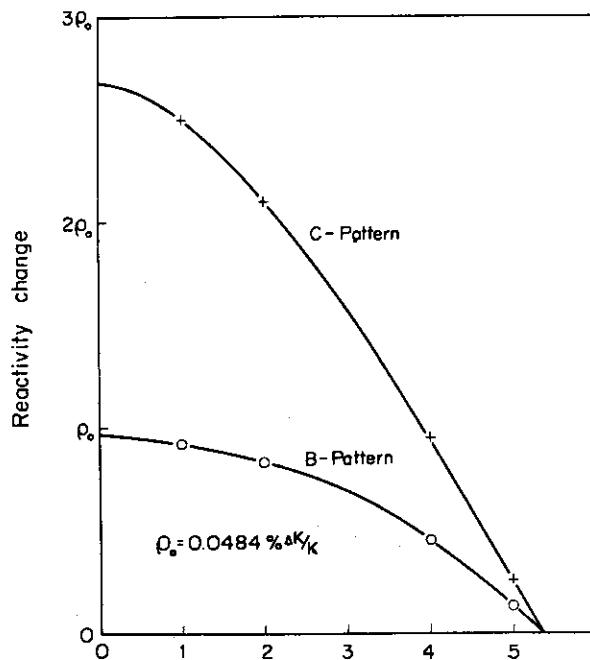


Fig. 2.3 Reactivity difference between normally loaded drawers and drawers loaded with bunched fuels in corresponding lattice positions

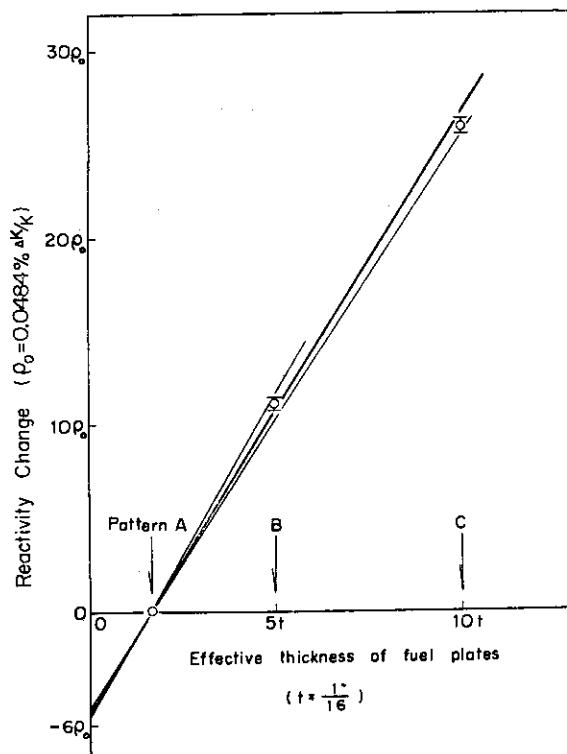


Fig. 2.4 Reactivity change vs. effective fuel thickness for determining the heterogeneity effect

3. Single-Pack Bunching 実験

Bunching に伴う炉の反応度変化を、サンプル物質を炉心に投入した場合のそれと同様に見なせば、一次振動論的には Bunching 領域をなるべく小さくすることが好ましい。但しこの場合の炉の反応度変化は Bunching に伴う反応率の変化によってひきおこされる部分が大部分である。すなわち小領域の Bunching 実験は Bunching に伴う反応率の変化に関する情報を得ることを主目的とし、Bunching に伴う中性子の流れの変化についての情報を得ることは期待出来ない。又、Bunching 領域と振動領域との関係は、Bunching 領域の大きさを種々変化させて反応度の測定を行うことにより実験的に確認することが期待され、小領域 Bunching 実験はその一環をなすものである。

FCAにおいては炉心 Z 軸に沿う中心抽出しは Half-Machine を開くことなく炉心外に抜き出して装填パターンの変更が可能であり、この場合の実験精度は比較的良好になし得る。Single-Pack Bunching 実験では反応度変化の絶対値が極めて小さい為実験精度が良くなれば有意義な測定値を得ることが出来ない。したがってこの実験は上記の抽出しによって行われ、炉に Z 軸上 6 Packs の各 Pack について A パターンより B パターンと Bunching した際の反応度変化の値を得た。

この章においては、Bunching 領域をそのまま反応率変化の摂動領域と考え、Bunching 領域の大きさと中性子の流れの変化の度合との関係を無視して、単純な加算性を仮定することによって炉心全体を A パターンから B パターンに Bunching した場合の反応度変化を推定し、後章における他のより大きな Bunching 領域における実験値より推定した値との比較検討の資料とする。

なお中心抽出しにおける Single-Pack Bunching 実験は、データを得るに必要とする時間が他の場合に比し少なくて済み、この方法による炉心全体の Bunching に起因する反応度変化の推定値が如何なる位置にあるかを知ることは、今後の実験においても有用な情報となり得る。

3.1 実験方法

実験のブロックダイアグラム Fig. 3.1 に示す。これはサンプル物質の中心反応度の測定と同じ機構をなすものでありハーフマシンの開閉を伴わない。実験において行われた Bunching パターンの図を Fig. 1.2 に示す。本章においては、A パターンより B パターンへの Bunching をした場合の測定値のみを解析の対象とする。

測定方法は中心抽出しの各 Pack を A パターンより B パターンに置きかえ、その時の微調整棒の位置変化より反応度変化を知る。各測定における微調整棒の位置の決定は次のように行われる。炉出力が設定値からずれないように微調整棒は自動制御により出し入れを行っている(P. I.D 制御; P = 300%, I = 1 sec, G = 1 とし detector out put は 4 sec のフィルターを通してある。炉出力の設定値はほぼ 2 W である)。炉出力が定常に達してから数分後微調整棒の

位置を2秒毎に300秒の間読み取り、その平均値を微調整棒の位置とした。実際にはパターン変えの為に抜き出した中心抽出しのFull-inの再現性を考えて、上に述べた操作にもとづいて微調整棒位置を測定したあとで中心抽出しを数mm抜き出してもFull-inにし同上の測定を行い、この操作を二、三回行って各回の微調整棒の位置の平均値を求めた。

Bunching領域は1 packに限定し、中心抽出し内の6個のpacksについて各packだけがBunchingされた場合の反応度変化を求めた。

ハーフマシンの開閉は伴わないから、実験精度は主に測定中における炉心の温度変化および中心抽出しの位置再現性に依存する。炉出力の設定値は炉雑音を考えれば高出力の方が好ましいが、再現性による誤差の方が大きい為に低出力にして測定データを多く求めるようにした。日時を変えた再実験による値のはらつきはむしろ大きく、これによって実験精度は推定される。この原因としては、中心抽出し内の各種物質の微少なる移動も一つの要因と考え得る。実験精度の推定値は何回かの再実験の平均値のまわりの分散より標本標準偏差として求めた。

3.2 実験結果および非均質効果の推定

中心抽出しによるSingle-Pack Bunching実験の各PackについてのAパターンよりBパターンに変えたときの反応度変化の測定値およびその誤差の推定値をTable 3.1に示す。中心抽出し内のPackは炉心中心側より1p, 2p, …… 6pと名づけてある。Aパターンは燃料領域が

Table 3.1 SINGLE PACK BUNCHING
EFFECT IN CENTER DRAWER

Position	$\rho_0 \times 10^2$	Norm ¹⁾
1 p	3.54	±0.09
2 p	3.45	0.25
3 p	3.02	0.26
4 p	2.39	0.25
5 p	2.01	0.11
6 p	0.935	0.18
Total	15.34	±0.49
		4.337

1) Norm ; Normalized value by 1 pworth

$$\rho_0 = 0.0484 \times 10^{-2} \Delta K/K$$

1 Pack内に6個あり、Bパターンはそれぞれが2個にBunchingされている。燃料領域が厚くなることによって、高いエネルギー領域における燃料板内の反応率の増大と共に鳴領域における燃料板内の反応率の減少により反応度は増大するが、一方中性子の流れをも増大させることにより反応度を減少させる要因を持つことになる。炉心最外部の6pにおいて、実験値はなお正の反応度変化を示している。Fig. 3.2に1pの値で規格化した値をZ軸を横軸として図示する。 $\cos^2 BZ$ の曲線と比較すると6pの所で実験値がはずれて小さな値を示していることが分る。図に

示された曲線 $\cos^2 BZ$ は $B = 3.15 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ であり、相当する反射体節約は 19.4 cm となる。これは極めてゆるやかな減衰を意味するものである。この実験値についての、他の方法による測定値との比較検討は後章において論ずるものとする。

次にこの Z 軸に沿った Single-Pack Bunching の効果より炉心全体を B パターンに Bunching したときの反応度変化を推定する。比較的小さな領域の Bunching 効果は反応率の変化に基づくものであり、したがって Bunching に伴う実効断面積の変化分とその点における中性子束 ϕ および随伴中性子束 ϕ^+ の積によって近似的に表わされる。すなわち Bunching 効果の空間依存性は $\phi \times \phi^+$ の空間依存性と同様であると考える。なお、実際には実効断面積の変化分も炉心内で変化するが、ここではそれを無視してある。 ϕ および ϕ^+ の空間分布はエネルギーによって異なるが、今問題となるエネルギー領域においては炉心周辺を除外すれば大きな差はなく、近似的に $J_0(Brr)$ の関数型を仮定する。したがって、Bunching 効果の空間分布は $J_0^2(Brr)$ を仮定する。

今炉心全体を A パターンより B パターンにしたときの反応度変化を $\rho_{A \rightarrow B}$ (core) とし、中心抽出しのそれを $\rho_{A \rightarrow B}$ (center drawer) とすると、

$$\rho_{A \rightarrow B}(\text{core}) = f \cdot \rho_{A \rightarrow B}(\text{center drawer}) \times 2$$

とすることが出来る。ここに f は上の空間依存の仮定にしたがって次の様なであらわされる。今、 I および I_0 を、

$$I = \int_0^R J_0^2(Brr) 2\pi r dr, \quad I_0 = \int_0^{R_0} J_0^2(Brr) 2\pi r dr,$$

とすると、

$$f = \frac{1}{I_0} = \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \cdot \frac{J_0^2(BrR) + J_1^2(BrR)}{J_0^2(BrR_0) + J_1^2(BrR_0)},$$

となり、ここに $R = 28.71 \text{ cm}$ (炉心実効半径), $R_0 = 3.11 \text{ cm}$ (中心抽出し実効半径) である。この章においては、小領域 Bunching 効果より炉心全体を Bunching したときの効果を推定することを目的としているから、 $\rho_{A \rightarrow B}$ (center drawer) は中心抽出しの各 1 pack のみを B パターンに Bunching したときの値の単純な算術和を用い、

$$\rho_{A \rightarrow B}(\text{center drawer}) = (15.34 \pm 0.49) \times 10^{-2} \rho_0,$$

となる。

次に f の値を確定する為に径方向バックリング Br の値を以下に述べる三種の方法によって推定した。第一には核分裂計数管による径方向核分裂率分布より Br を求める。第二の方法は今上に求めた Z 方向の Single-Pack Bunching の反応度変化の分布を $\cos^2 BZ$ (この B は径方向の Br とは当然異なる。) に fitting して反射体節約 ℓ を求め、これを用いて径方向の B を推定する。第三の方法は V - 1 炉心の異った位置の制御棒の反応度価値の差より求めた。すなわち、V - 1 炉心においては、制御棒は移動側では中心 5 行 5 列の格子管の円隅にあり固定側では中心 7 行 7 列の格子管の四隅にあって中心から径方向の距離の差を利用して求めた。

第一の径方向核分裂率分布を用いる方法では U^{235} , U^{238} , Pu^{239} の fission counter の実験値を使用した。整理の結果径方向バックリング Br は三者異なった値を示し, $5.50 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$ (U^{235}), $6.42 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$ (U^{238}), $5.73 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$ (Pu^{239}) であった。計算による炉心内の各核種の核分裂率を重みとして上の値を平均すると,

$$\begin{aligned} Br &= 5.67 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1} \\ f &= 44.7 \\ \rho_{A-B}(\text{core}) &= 13.72 \pm 0.44 \rho_0 \end{aligned}$$

となる。但し誤差は Br の算出にもとづく誤差を含まない。

第二の Z 方向 Single-Pack Bunching 効果の分布を用いる方法では、分布を $\cos^2 BZ$ を仮定した分布をほぼ満足し、このとき Z 方向のバックリングは $3.15 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$ となり、反射体節約は 19.4 cm であった。径方向のバックリングの Br はこれを用いると,

$$\begin{aligned} Br &= 4.99 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1} \\ f &= 51.6 \\ \rho_{A-B}(\text{core}) &= 15.83 \pm 0.51 \rho_0 \end{aligned}$$

となる。上と同様に誤差は Br の算出に伴う誤差を含まない。

第三の制御棒位置の相異を用いた方法の結果は以下に示すように第二の方法と一致する。移動側および固定側制御棒の径方向位置 r_1 および r_2 はそれぞれ 15.62 cm, 23.42 cm である。

$$RC = J_0^2(Brr_1) / J_0^{22}(Brr_2),$$

を第一および第二の方法による Br を用いて計算すると、それぞれ 1.34 および 1.25 となる。一方 Full-in から 55 mm 引き抜きによる反応度価値の変化の比の実験値は 1.25 となり第二の方法による Br が妥当である。

Single-Pack Bunching 効果にもとづく非均質効果の推定値は結論として次のようになる。炉心全体を A パターンから B パターンにすることによる反応度変化の推定は第二の計算法の結果に従って,

$$\begin{aligned} \rho_{A-B}(\text{core}) &= 15.83 \pm 0.51 \rho_0 \\ &= (0.766 \pm 0.025) \% \Delta k / k \end{aligned}$$

である。又、板状燃料の非均質性の尺度としては前章の十字形実験の結果を適用し周辺質量係数を用いて反応度変化を燃料の臨界量に対する補正值に計算すると,

$$\begin{aligned} \rho_{\text{heterc}} &= -7.68 \pm 0.25 \rho_0 \\ &= (-0.372 \pm 0.013) \% \Delta k / k \\ &= 1.167 \pm 0.042 \text{kg Pu} \text{ および } 2.131 \pm 0.076 \text{kg U}^{235} \end{aligned}$$

となる。

上記非均質効果の算出にあたっていくつかの仮定を用いたが使用した数値は全て実測値であ

る。得られた結果に関する吟味は後章にゆずるものとし、以下に用いた仮定を明記する。

- (1) 1 Pack Bunching 効果の加算性。
- (2) 反応度変化の分布の R - Z 変数分離可能。 $i \cdot e (\cos BZ J_0(Brr))^2$ の仮定。
- (3) 反射体節約は R 方向と Z 方向で同じである。

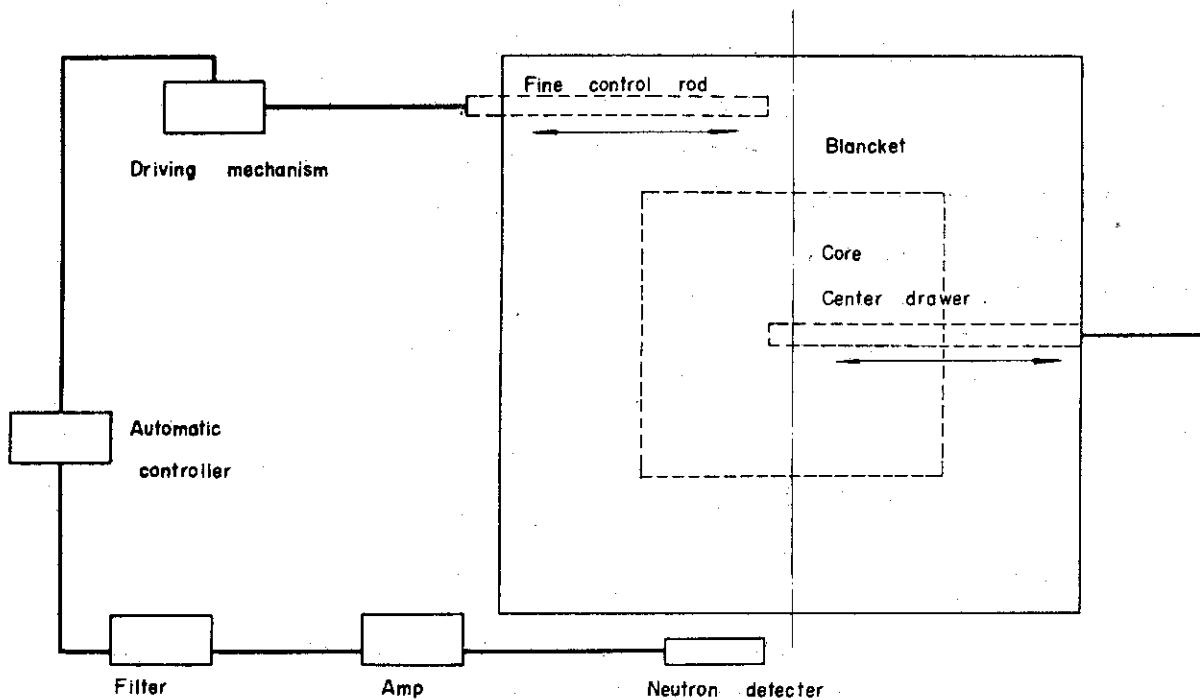


Fig. 3.1 Experimental block diagram

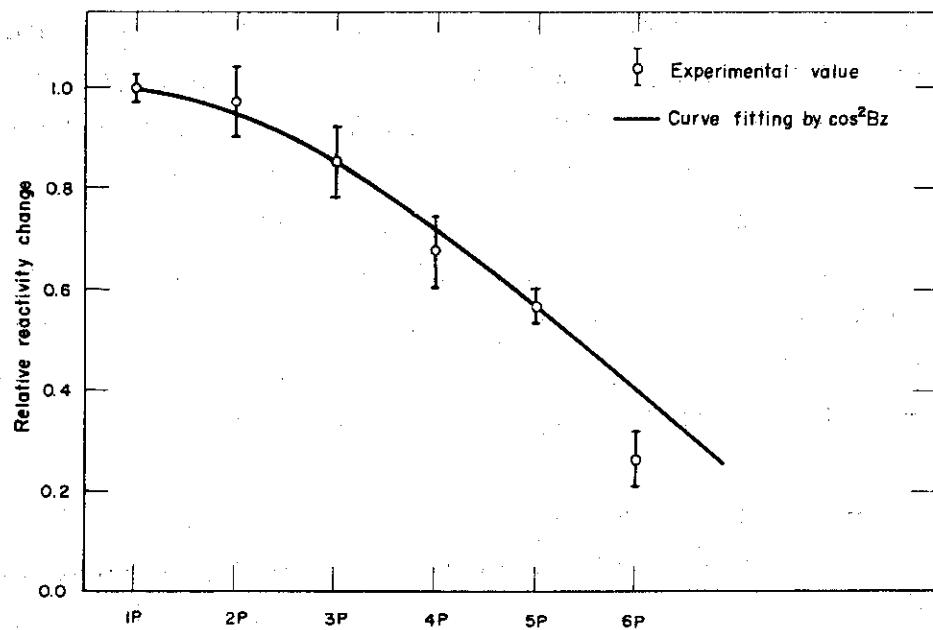


Fig. 3.2 Single-Pack bunching experiment

4. Zone Bunching実験

この実験は、Bunching 領域を Single pack の数十倍、すなわち炉心全体の数%まで拡大して炉心の方向別 Bunching 効果を測ることにより、Bunching 領域と摂動領域の関係、燃料板の配列方向が中性子の流れに及ぼす影響の有無、および炉心全体の非均質効果に関する情報を得ようとするものである。Bunching 領域の大きさは前章の Single pack bunching 実験の場合の数十倍、一方次章で述べる Bulk bunching 実験の場合の数十分の1に当っており、これらの実験と相補って Bunching 領域と摂動領域の関係、具体的には Bunching 効果の加算性に関する情報が期待される。Single pack bunching 実験と比較した場合のこの実験の特徴は、ハーフ・マシンを分離して loading change を行うため 1 つのデータを取るのに数時間を要すること、引出しの装填荷およびハーフ・マシンの開閉に伴う誤差が実験値に導入されること、任意の場所および任意の大きさの Bunching 領域が選べること、等である。以下この章ではまず Zone bunching 実験の手法を述べ、続いて各領域を A パターンから B パターンに bunch した際の反応度変化を図と表で示し、Bunching 効果の加算性を仮定した場合の炉心全体の非均質効果を算出し、また Bunching 効果の加算性、Bunching 効果に対する燃料板配列方向の寄与等に言及する。

4.1 実験方法

FCAV-1 炉心において隣接する数十 pack をゾーンと見做し、それらの燃料配列を標準の A パターンから B パターンに同時に bunch した際の臨界点の推移からその Bunching 効果に対する反応度変化を求めるという方法により、V-1 炉心の各領域の Bunching 効果が測定された。Fig. 4.1 は V-1 炉心固定側の一部分であり、この Zone bunching 実験で測定対象となった領域である。以後この円筒炉心の中心軸を Z 軸、切断面の水平方向、鉛直方向をそれぞれ x 軸、y 軸として各 pack の位置を表わし、固定側の中心の引出し F 18-18 の密着面側の 1 pack 目が (1x, 1y, 1z) であるとする。z 軸方向の測定は炉心中心部 3 行 3 列の同じ z の 9 pack から成る扁平なゾーンを両 $\frac{1}{2}$ 集合体に対称に作って行われた。x 軸と y 軸はどちらも円筒体系の半径方向であるが、燃料板の配列方向が炉心全体一樣で x 軸に直角、y 軸に平行であることから Bunching 効果が等しくない可能性があり、それぞれ別個に測定された。測定は Fig. 4.1 に示されているように密着面から両 $\frac{1}{2}$ 集合体に奥行き 2 pack までの 12 pack から成る扁平なゾーンを炉心中心の両側に対称に作って行われた。方向別 Bunching 効果を求めるこれら一連の測定のほかに、加算性に関する情報を得るためにこれらの扁平なゾーンを 3 個重ね合わせたもうひとまわり大きいゾーンの Bunching 効果も測定された。

反応度変化は A パターン時と B パターン時の臨界点の推移から求められ、実際には出力 2 W (線形出力系 No. 6 の出力レベル 0.5×10^{-8} amp) において Backing current source 90% を使用して C/R# 2 で臨界点を押えることにより測定された。出力 2 W の出力平衡時におけるこの炉心の未臨界度は $0.0013\% \Delta k/k$ ($0.03 \rho_0$) であることがすでに確かめられている^{*}が、こ

こでは臨界点の推移のみを問題としているため同じ出力レベルで臨界点を押えている限り真の臨界点の代りに出力平衡点を用いても差支えない。この反応度変化の測定はハーフマシンの開閉を伴うので、密着の再現性の誤差が測定値に含まれている。この誤差の大きさはこの炉心では最大 $0.017\rho_0$ であると推定されている*。また制御棒による臨界点の認定に伴う誤差は最大 $0.013\rho_0$ と推定されている*。したがってこの2種類の誤差がシリーズにはいり込むこの一連のZone bunching 実験では、装置の精度に由来する測定誤差は高々

$$\pm 0.02 \rho_0 \quad (\pm 9 \times 10^{-4} \% \Delta k/k)$$

である。

4.2 実験結果および非均質効果の推定

Zone bunching 実験の測定結果を Table 4.1 に示す。この一連の測定の過程で基準の臨界点を押えるため炉心全体を A パターンに戻したいわゆる Reference が何度か測定されたが、それらの臨界位置は前述した装置の最大誤差 $\pm 0.02 \rho_0$ よりもかなり大きくばらついていることが明らかになった。Reference は実験日が変るたびに 1 回づつ計 10 回測定されているが、まずこの Reference の測定結果について検討する。

Table 4.2 に各 Reference の臨界位置、それらの平均値からのずれ、および Reference 間に行われた炉心変更等が示されている。Ref.8 以降は x 軸方向の引出しの Na プレートを全部 “Short” に統一するため炉心外の Na プレートと差換えを行ったので、Ref.7 以前の臨界位置よりも全体的に less-reactive な方向へずれている。そこで臨界位置の平均値としては Ref.7 までの測定値だけから求めた値を採用している。Fig. 4.2 は各 Reference の平均値からのずれを描いたもので、図の誤差は装置の最大誤差 $\pm 0.02 \rho_0$ を用いている。Fig. 4.2において Ref.2 の平均値からのずれが一番大きいが、Ref.2 の場合各引出しに詰める spacer が甘くて装填状態がかなりゆるくなり装脱装荷の際炉心物質の移動した可能性の大きいことが確認され、それが原因であろうと考えられる。この Ref.2 を除いて平均値のまわりの分散からこれらの測定値の標準偏差を求めるとき、

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (\rho_i - \bar{\rho})^2}$$

$$= 0.0446 (\rho_0)$$

となる。これが V-1 炉心で数十本の装填装荷作業をした場合の臨界位置の実験誤差である。また、臨界点の推移から反応度変化を測る場合の実験誤差は、

$$\sqrt{0.0446^2 + 0.0446^2} = 0.0631 (\rho_0)$$

となる。

* 平川直弘他、FCAV-1 集合体の特性試験と臨界質量、JAERI-M 7882

Table 4.1 Data of the zone bunching experiments

Bunched zone	No of packs in the zone	C/R#2 position change (mm)	Reactivity change (ρ_0)	Bunching effect per unit pack (ρ_0)
(1, 2, 3,) z	5 4	89.18 → 175.42	1.699	0.0315
4 z	1 8	82.69 → 107.51	0.527	0.0293
5 z	1 8	82.69 → 98.41	0.337	0.0187
6 z	1 8	91.88 → 96.82	0.106	0.0059
(4, 5, 6,) z	5 4	91.88 → 135.52	0.893	0.0165
4 z	1 8	89.45 → 111.58	0.485	0.0269
3 z	1 8	86.70 → 114.85	0.592	0.0329
(4, 5, 6,) x	3 2	87.67 → 124.76	0.771	0.0241
3 x	2 4	87.67 → 131.42	0.903	0.0376
4 x	2 4	81.38 → 115.39	0.717	0.0299
5 x	2 4	81.38 → 97.67	0.344	0.0143
6 x	1 6	81.38 → 89.88	0.183	0.0114
3 y	2 4	81.48 → 119.99	0.808	0.0337
5 y	2 4	81.48 → 99.18	0.340	0.0142
4 y	2 4	81.48 → 109.52	0.595	0.0248

Table 4.2 References in the zone bunching experiments

Reference No	C/R # 2 Position (mm)	Excess reactivity $\rho(\rho_0)$	$\Delta\rho - \Delta\rho(\rho_0)$	備考
1	89.18	1.8856	-0.0345	中心部の引出し 18 本の Pu2-4-1/16 を Pu2-2-1/4 に差し換え, Center drawer を取りはずす。
2	82.68	1.7456	-0.1055	(1, 2, 3) zB, 4zB, 5zB を途中にはさみ Ref. 1 以後の装脱装荷量多い。
3	91.88	1.9437	0.0926	Ref. 2 と連続, 但し Ref. 1 と Ref. 2 の差大にかんがみ, 引出しの装填をやり直す。
4	89.45	1.8914	0.0403	6zB, (4, 5, 6) zB, (4, 5, 6) zC を途中にはさみ, Ref. 3 以後の装脱装荷量多い。
5	86.70	1.8322	-0.0189	4zB, 3zB, (4, 5, 6) zA _L を途中にはさみ, Ref. 4 以後の装脱装荷量多い。
6	85.48	1.8059	-0.0452	Ref. 5 と連続 Foil を取出し別の Foilを入れず。
7	87.67	1.8531	0.0020	4zA _L , 5zA _L , 6zA _L , (1, 2, 3) zA _L を途中にはさみ, Ref. 6 以後装脱装荷量多い。
8	81.38	1.7176	-0.1335	(4, 5, 6) xB, 3xB, 4zB, 5xB を途中にはさみ Ref. 7 以後の装脱装荷量多い。半径引出引出しの Na を全部 Short に統一。
9	81.48	1.7198	-0.1313	6xB を途中にはさむ
10	69.41	1.4592	-0.3919	3yB, 5yB, 4yB を途中にはさむ 引出しの差し換えあり Center drawer を取付ける。

実験的に求められたこの誤差の値は装置の精度に由来する最大誤差 $0.02 \rho_0$ よりはるかに大きい。反応度測定の場合、実験誤差の原因として考えられる要素は大きく分けて三つは分類することができる。すなわち、装置自体の精度に帰因する誤差、炉心の温度変化による臨界点の移動、装填荷作業の再現性に伴う誤差、である。炉心の温度変化による臨界点の移動は、ハーフ・マシン密着後は Fir rod の目盛で数 mm, C/R # 2 に換算して約 0.5 mm, すなわち $0.01 \rho_0$ 程度であることが確かめられている。そこで、装置の精度に起因する標準偏差を半分、すなわち $0.01 \rho_0$ と仮定した上で装填荷状態の再現性に伴う反応度変化の実験誤差を算出してみると、

$$\sqrt{0.0631^2 - (0.01 \times \sqrt{2})^2 - 0.01^2} \doteq 0.06 (\rho_0)$$

また装填荷作業の再現性に伴う臨界点測定の実験誤差は、

$$\sqrt{0.0446^2 - 0.01^2 - 0.01^2} \doteq 0.04 (\rho_0)$$

となる。これを制御棒の移動に換算すると約 2 mm, そこで一般的の炉心用引出しの反応度値が制御棒のそれと同じであると仮定すると、数十本の装填荷作業による炉心物質の移動は引出し 1 本にしわ寄せした場合ほぼ 2 mm ということになる。

以上のような実験誤差の事情を考慮してこの Zone bunching 実験では、反応度変化の測定に際してその測定に最も近くてその間の装脱荷量の割合が少ない当日の Reference をそれぞれの臨界点の基準として用いることにする。また反応度変化の実験誤差としては、装脱荷量の多少に関らず上記の $0.0631 \rho_0$ を一様に用いることにする。

さて本論に立返って、Zone bunching 実験の測定結果を方向別に整理して Table 4.3 に掲げ、またそれらを各々 Fig. 4.3, 4.4, 4.5 に図示する。Fig. 4.3 で 5 pack 目の値 $\Delta\rho_{5x}$ が異常に小さいのが注目されるが、これに対する物理的根拠は何も考えられず、Fig. 4.4 の y 方向の分布に照らし合わせてもおかしいので何か測定上の誤りによるものと考えざるを得ない。この $\Delta\rho_{5x}$ の値を $\Delta\rho_{3x}$, $\Delta\rho_{4x}$, $\Delta\rho_{6x}$ の値と滑らかに連なるように持ち上げた場合でも、加算性に関してはほぼ

$$\Delta\rho_{4x} + \Delta\rho_{5x} + \Delta\rho_{6x} < \Delta\rho_{(4,5,6)x}$$

である。Fig. 4.5 の z 方向は $\Delta\rho_{1z}$, $\Delta\rho_{2z}$ の測定値がないため根拠は薄いが、加算性に関しては

$$\Delta\rho_{1z} + \Delta\rho_{2z} + \Delta\rho_{3z} > \Delta\rho_{(1,2,3)z}$$

$$\Delta\rho_{4z} + \Delta\rho_{5z} + \Delta\rho_{6z} \doteq \Delta\rho_{(4,5,6)z}$$

である。但しこれらの大小関係は、その差が実験誤差の範囲内に止まっている。ここで $\Delta\rho_{(1,2,3)z}$ は、固定後・移動側の 2 つのゾーンが隣接して一つになった 3 行 3 列奥行き 6 pack の大きなゾーンに対応する測定値であることを忘れてはならない。

次に Fig. 4.6 は、これらの方向別 Bunching 効果を同じ図面にプロットしてその絶対値の大きさ並びに曲線の曲がり具合を比較したものである。この図の横軸は、同じ目盛にプロットして相互に意味を持つように測定対象となったゾーンの炉心中心からの平均半径 r を採用している。

すなわち、測定対象のゾーンをその断面 ΔS として平面的にとらえて

$$\bar{r} = \frac{\int_{\Delta S} r dS}{\int_{\Delta S} dS}$$

なる値を用いている。図中の $\Delta\rho_{2x}$ の測定点は、別の実験の機会に得られたものを参考のために同図にプロットしたものである。また Cross type と表示されている測定点は、第 2 章で述べた Cross drawer 実験の結果から炉心の半径方向の Bunching 効果を算出してみた値である。すなわち、Z 方向の Bunching 効果が $\cos^2 B_z Z$ 分布をしている、また Z 方向の加算性が成立つ、という仮定をした上で奥行き (1, 2) Z の半径方向 Bunching 効果を出してみた。この軸 Z 方向のバックリング B_z としては、Zone bunching 実験で得られた Z 方向の分布を $\cos^2 B_z Z$ に最小二乗 fitting して得られた値を用いている。

Fig. 4.6 から判明したことを探りてみると、

- (1) x 軸、y 軸の両半径方向は分布の形は類似しているが値の大きさは x 軸方向すなわち燃料プレートに直角の方向のほうが大きくなっている。これは、Bunching によって x 軸方向は中性子の流れを小さくする効果がある、或は y 軸方向は中性子の流れを大きくする効果があるといえる。
- (2) z 軸方向は燃料配列が同じである y 軸方向よりは Bunching 効果が大きく、x 軸方向とはほぼ等しくなっている。しかし分布の形は予想通り半径方向より勾配が少しゆるやかになっている。
- (3) 前章までの他の小領域 Bunching 実験の結果と比較してみると、半径方向は Cross drawer 実験結果よりも値は大きく分布の形は勾配の急な側に出ており、z 軸方向は Single pack の実験結果よりも値は大きく分布の形は少し勾配の急な側に出ていている。

次に、これらの Zone bunching 実験の測定結果から V-1 炉心全体を標準の A パターンから B パターンに変更した場合の Bunching 効果を求め、その値から炉心全体の非均質効果を推定する。この実験では方向別のゾーンの Bunching 効果が測定されただけで炉心全体が空間的に網羅されたわけではないので、この推定に当っては次のような仮定を設けた。すなわち、

- ① 測定された中心軸付近の Z 方向分布の形は任意の半径の場所においても同様に保存されている。
- ② x 軸方向と y 軸方向の測定値の平均値を以って密着面付近（奥行き各 2 pack）の半径方向 Bunching 効果とする。但し、異常に小さい値を出した $\Delta\rho_{5x}$ の測定値は用いず、その代りに $\Delta\rho_{3x}$, $\Delta\rho_{4x}$, $\Delta\rho_{6x}$ の値を $J_0^2(B_x x)$ 分布に最小二乗法で fitting した曲線から推定される値を用いた。
- ③ これらのゾーンの Bunching 効果は、相互の空間的加算性がある。

以上のような仮定をした上で炉心全体の Bunching 効果を求める。ところが Table 4.3 および Fig. 4.6 でわかるように炉心中心部の測定値としては $\Delta\rho_{(1,2,3)z}$ だけしかないが、この値は $\Delta\rho_{3z}$ よりも小さく、これらの値から $\Delta\rho_{(1,2)z}$ を算出してみると、

$$\Delta\rho_{(1,2)z} = 0.0308 \rho_0$$

Table 4.3 Zone bunching effect per unit pack in each axis of FCA V-1 core due to loading change from pattern A to pattern B (ρ_0 unit)

Axis	Lattice No	1	2	3	4	5	6
x		0.0358 ± 0.0037	0.0376 ± 0.0026	0.0299 ± 0.0026	0.0143 ± 0.0026	0.0114 ± 0.0039	
					0.0241 ± 0.0020		
y			0.0337 ± 0.0026	0.0248 ± 0.0026	0.0142 ± 0.0026		
z		0.0329 ± 0.0035	0.0281 ± 0.0025	0.0187 ± 0.0035	0.0059 ± 0.0012		
		0.0315 ± 0.0012					

Table 4.4 炉心中心部バンチング効果の方向別外挿

	仮定した分数関数	最小二乗 fitting により得られた Bunching (cm ⁻¹)	炉心中心部 3 行 3 列奥行き 4 ノックのゾーンの 1 ノック当りのバンチング効果 $\Delta \rho_{(1,2)} (\rho_0)$	炉心全体のバンチング効果 $\Delta \rho_{A \rightarrow B} (\rho_0)$
x	$J_0^2 (B_x x)$	$B_x = 5.10 \times 10^{-2}$	0.0419	17.60
y	$J_0^2 (B_y y)$	$B_y = 6.20 \times 10^{-2}$	0.0407	17.77
z	$\cos^2 (B_z z)$	$B_z = 3.95 \times 10^{-2}$	0.0444	17.27

となって軸方向、半径方向の周囲の値よりも小さい結果になる。Bunching効果が第一義的には反応率の変化に基づくものとすれば、反応率のもっとも高い中心でBunching効果が小さくなる理由は見当らない。したがって炉心中心のBunching効果として上記の値を用いるのは適当でない。そこでx, y, z各方向の測定値の分布を外挿して中心部3行3列の $\Delta\rho_{(1,2)z}$ をそれぞれ独立に推定してみる。

軸方向および半径方向のBunching効果がそれぞれ $\cos^2 B_z Z$ 分布および $J_0^2(B_r r)$ 分布をすると仮定して、各方向の測定値に最小二乗法でfittingしたカーブからそれぞれ炉心中心の値を外挿して求めた。その結果をTable 4.4に示す。これらの外挿値はほぼ一致した値を示しており、各方向の測定値の分布が中心の値としてほぼ同じ値を導き出したことになる。そこで炉心中心の値としてこれら三方向の推定値の平均値

$$\Delta\rho_{(1,2)z} = 0.0423 \pm 0.0025 (\rho_0)$$

を用いることにする。この値を用いて炉心全体のBunching効果を積算すると、

$$\begin{aligned}\Delta\rho_{A-B} &= 17.54 \pm 0.86 \rho_0 \\ &= 0.849 \pm 0.042 \% \Delta k/k\end{aligned}$$

となる。板状燃料の非均質性の尺度としてAパターンおよびBパターンのeffective fuel thickness*を用いてV-1炉心を均質にした場合の反応度変化 $\Delta\rho_{hom}$ を求める

$$\begin{aligned}\Delta\rho_{hom} &= -8.51 \pm 0.42 \rho_0 \\ &= -0.412 \pm 0.020 \% \Delta k/k\end{aligned}$$

となる。但しeffective fuel thicknessに関する誤差は考慮に入れてない。炉心周辺の質量係数からこの $\Delta\rho_{hom}$ を燃料の質量に換算すると

$$(1.293 \pm 0.080) \text{ kg Pu}^{239+241} + (2.362 \pm 0.145) \text{ kg U}^{235}$$

となる。すなわち同じ組成の均質体系は臨界量がこれだけ殖えることを意味している。

* 2章参照

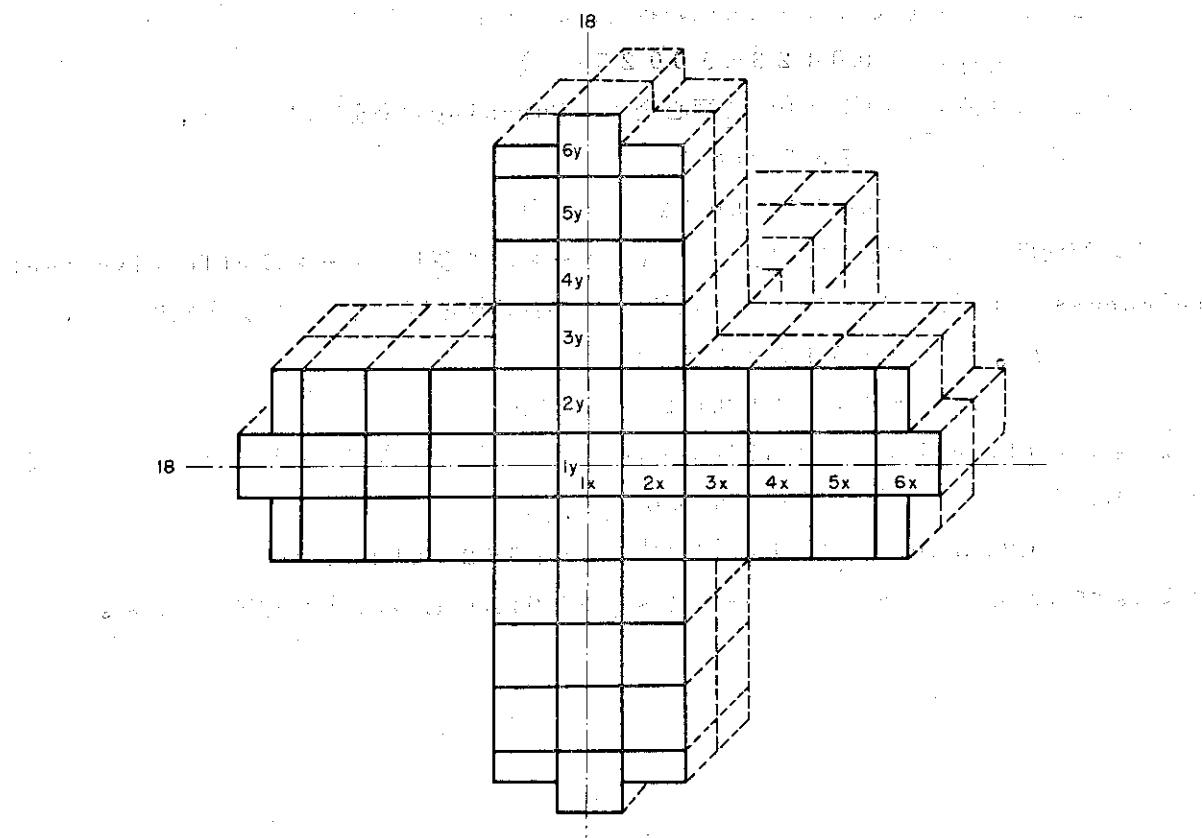


Fig. 4.1 Bunching zones in the zone bunching experiments

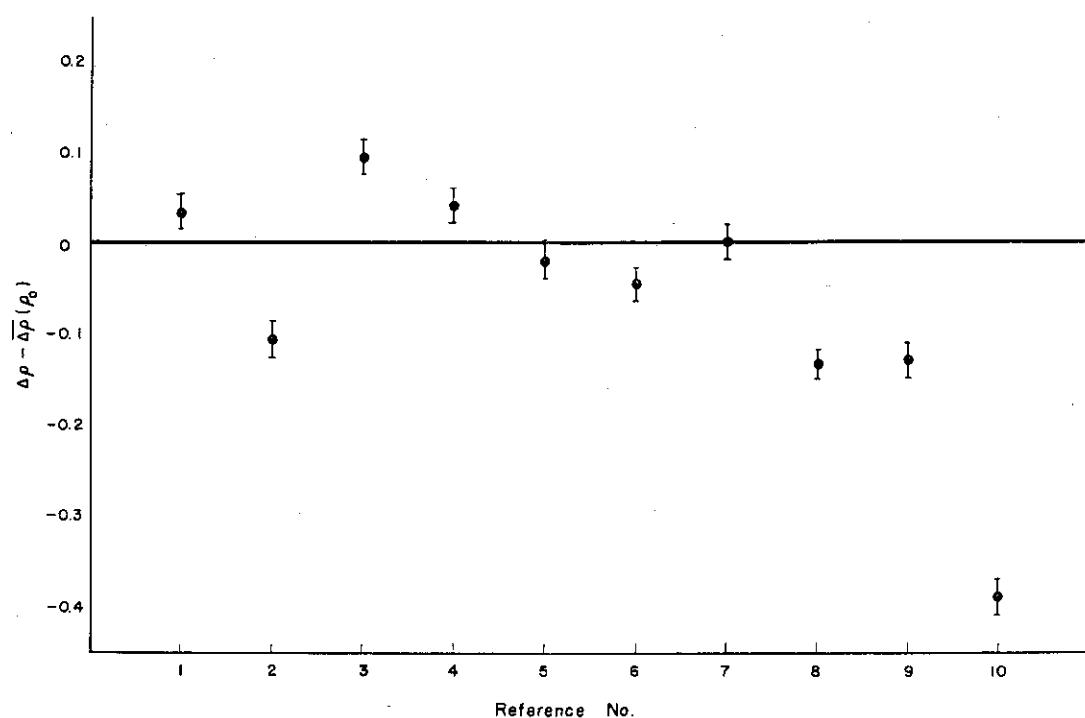


Fig. 4.2 Difference between reference in the zone bunching experiments

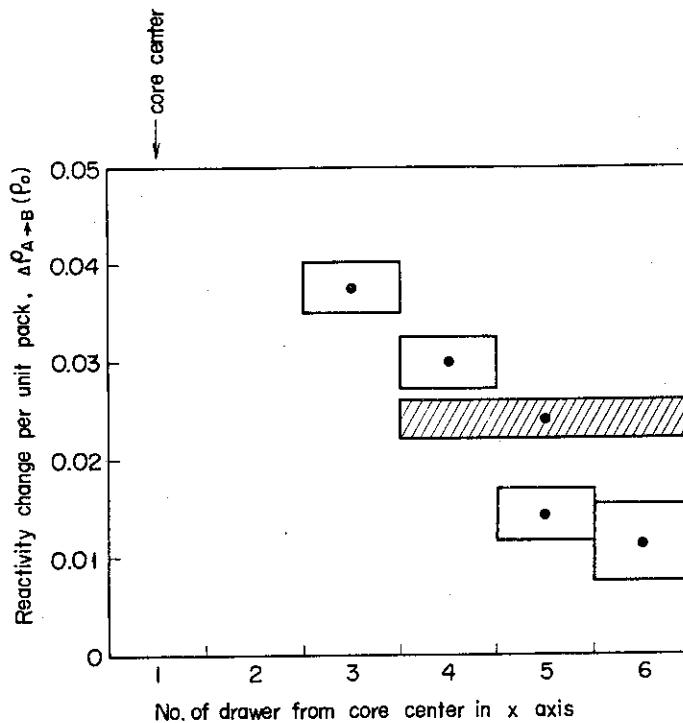


Fig. 4.3 Zone bunching effect from pattern A to pattern B
in x axis of FCA V-1 core

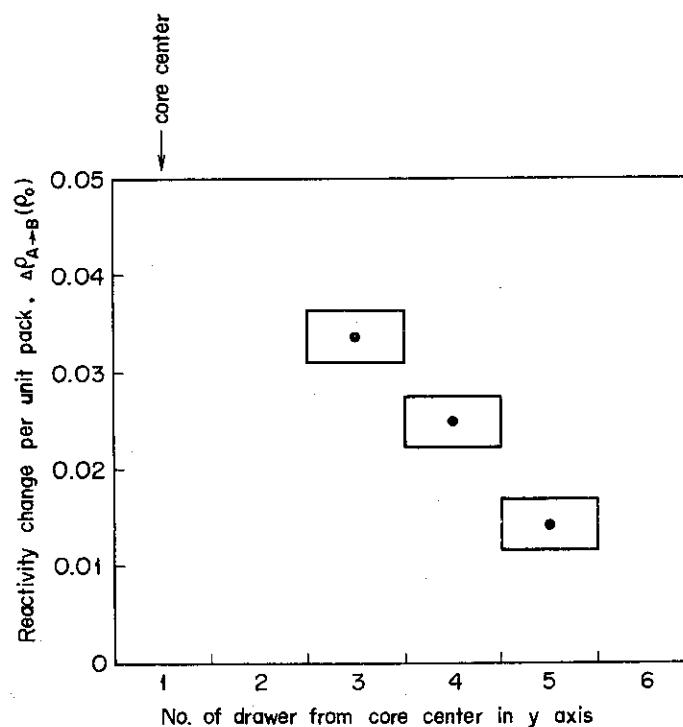


Fig. 4.4 Zone bunching effect from pattern A to pattern B
in y axis of FCA V-1 core

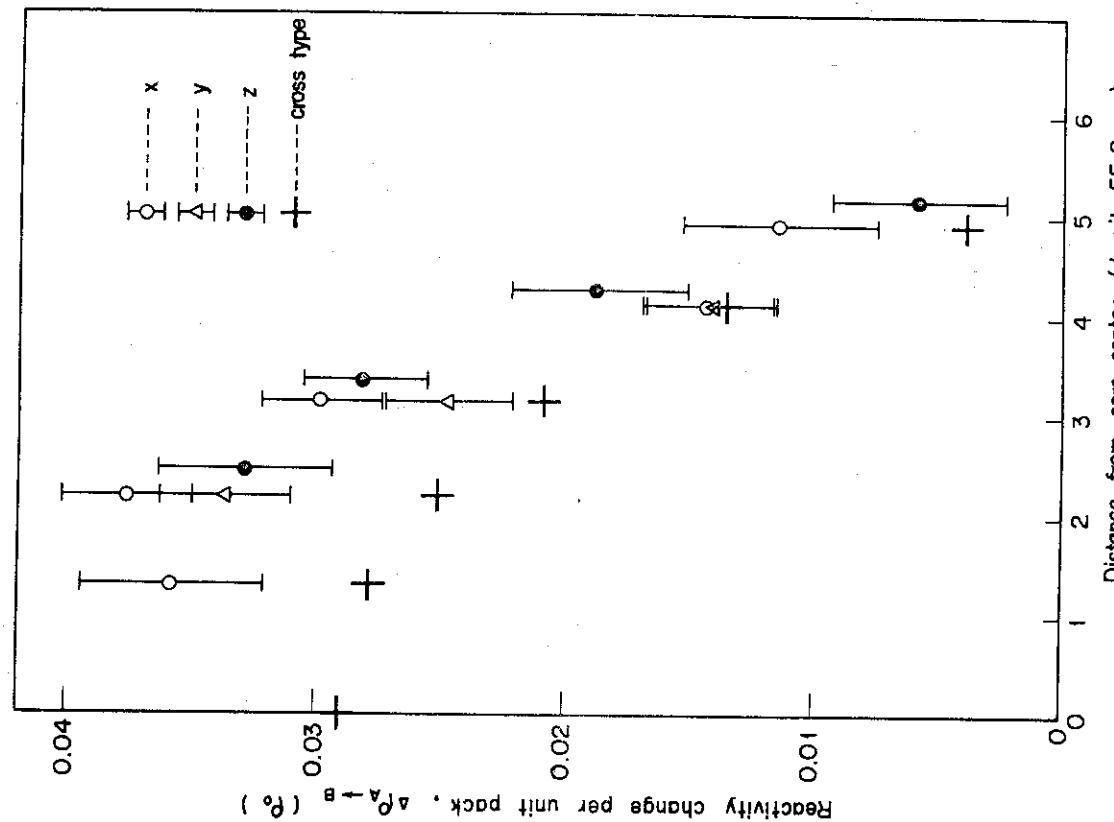


Fig. 4.6 Zone bunching effect from pattern A to pattern B in each axis of FCA V-1 core

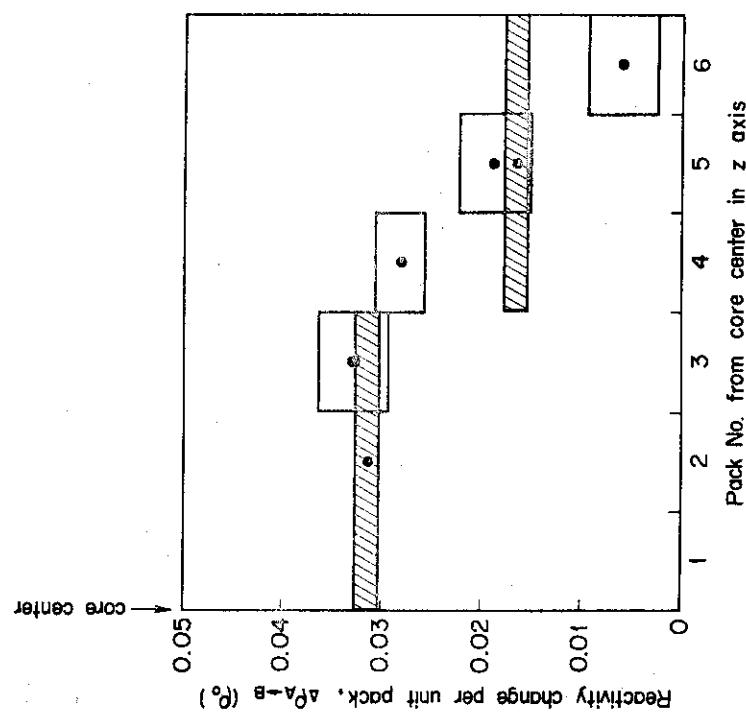


Fig. 4.5 Zone bunching effect from pattern A to pattern B in y axis of FCA V-1 core

5. Bulk Bunching 実験

V-1 廉心は抽出し総数が 180 本あまりで比較的小さな廉心であり廉心全体を Bunching することが現実的に可能である。前章迄の実験が空間的に微分的な量を求める方向の実験に対して Bulk Bunching 実験は全ての相殺し得る過程を包含した積分度の高い量を求める実験であり、今迄述べた種々の廉心全体の Bunching 効果の推定値と比較検討することにより各種方法に関して規格化することが出来る。

各種方法による推定値と直接的な Bulk Bunching の実験値との比較が可能になることにより、小領域 Bunching 実験より廉心全体の Bunching 効果の推定の方法についての手がかりを得る。すなわち、単純な算術和による推定の妥当性を検討することにより、Bunching に伴う反応率の変化および中性子のもの変化の効果について高次摂動のとり入れ方に関する情報を得る。

5.1 実験方法

廉心全体を A パターンより B パターンに Bunching することにより、前章迄の推定では最大 $+0.8\% \Delta k/k$ の大きな正の反応度が廉心に附加されることになり、一挙に廉心全体を Bunching することは危険を伴う。更に前章迄の廉心全体に対する Bunching 効果の推定の過程において、各段階で実験値と比較出来ることが望ましく、したがって Bulk Bunching を行うにあたって Bunching 領域を数段階にわたって拡大して行くことが望ましい。時間的制約もあって今回は二段階に分けて Bunching 領域の拡大を行い、第一段階で廉心の半分を B パターンにし、次の段階で廉心全体を B パターンにした。

第一段階における Bunching 領域のとり方は種々考え得るが、Fig.5.1 の概念図に示すようにここでは三種の領域をとりそれぞれについて Bunching 効果を測定した。第一に廉心移動側の全部、すなわち円筒廉心の Z 軸について中心より片側を B パターンに変えた。この場合は Bunching 領域は偏平な円筒となるが他の場合に比べて S/D の小さな領域を形成する。FCA による円筒廉心の模擬は Z 軸が水平方向にあり、したがって廉心は横向きの円筒である。第二、第三の Bunching 領域のとり方は、この横向きの円筒廉心の上半分及び右半分の領域を取った。(今円筒の径方向について垂直方向を y 軸、水平方向を x 軸とすると、y 軸について上半分および x 軸について右半分の領域を指す。) 上半分と右半分の領域のとり方の相異は、廉心の動径とセルの構成物の長さ方向が平行であるか垂直であるかの違いである。これらの Bunching 領域はかまぼこ形ではそろそろ長く、S/V は第一の領域のとり方に比べて大きな値になるが、Bunching 領域のプランケットに接する面積はいずれも同じである。

廉心の B パターンへの Bunching に伴って附加される反応度は比較的大きなものだが、制御棒等の引き抜きによって測定出来ない範囲ではない。しかし、ここでは廉心内に大きな摂動を与えること、および制御棒等の周辺が B パターンに Bunching されることによってそれらの反応度値が変化する可能性を考慮すると、Bunching の各段階において、制御棒がほぼ同じ位置

で臨界になることが望ましい。（実際には、全部AパターンのときC/R#2が約100mm、半分BパターンのときC/R#2が約100mm、全部BパターンのときC/R#2が約180mmで臨界になった。）それでBunching領域の拡大に伴って炉心周辺の抽出（1本あたり $1.64 \pm 0.005\%$ ）を天燃ウランブランケットに置換することにより附加される正の反応度を相殺した。この置換によって中性子拡散の特性はあまり変化をうけない。

5.2 実験結果および非均質効果の推定

Bulk Bunching実験の各段階における附加された正の反応度値の測定値をTable 5.1に示す。誤差は主に炉心温度変化、ハーフマシンの密着時の再現性を考慮したものであり、抽出の出

Table 5.1 BULK BUNCHING EXPERIMENT

Bunching zone	Movable half	Right half	Upper half	Bulk
Reactivity change ρ_0	5.35 ± 0.03	5.67 ± 0.05	5.63 ± 0.05	12.08 ± 0.05

$$\rho_0 : 0.0484 \% \Delta k/k$$

し入れに伴って生じる誤差も一部とり入れられている。表中第二、第三、第四欄の実験値に関しては、それらの間の差の誤差は $\pm 0.01\%$ と推定される。

制御棒周辺の装填パターンの変化による制御棒値の変化の可能性については実験的に次のような方法によって調べた。炉心半分をBパターンにした段階においてAパターンの領域内にある制御棒とBパターンにBunchingされた領域内にある制御棒とで臨界に到達せしめる位置の差異は 0.1% 以下であり、全部Bパターンにした炉心におけるC/R#9の40mmから0.0mm挿入時のDoubling TimeがAパターン炉心に比べて差が0.1sec以内であり実験精度内で制御棒値の変化は生じなかつたものと結論し得た。

Bunchingに伴って附加される反応度は、上記のC/R#2の臨界点の測定と共に、ハーフマシンの密着時（二本の制御棒がFull-outの位置にある。）における未臨界度の測定により確認した結果、半分Bパターンにおいて $+1.5\%$ 、全部Bパターンにおいて -1.0% 、C/R#2により測定値と差を生じたが未臨界法の測定誤差を考えて以下ではC/R#2による測定値を用いる。

炉心半分のBunchingの場合形状による効果のちがいが確認出来、移動側をBunchingした場合と炉心円筒の上半又は右半分をBunchingした場合では明らかに有意な差が見られる。半分Bunchingと全部Bunchingを比較すると、加算性は成立せず領域の拡大に伴ってBunching領域の体積よりも、より大きな反応度の増加を示している。

V-1炉心では制御棒等が移動側では中心 5×5 の格子の四隅にある。更に制御棒等は他の炉心内抽出しより反応度値が高く作られており、通常実験時は移動側制御棒はFull-inにし固定側制御棒によって臨界にすることから、この炉心の場合反応度が移動側にやや偏在し

ている。移動側と固定側の制御棒位置の相異によって、半分Bパターンと全部Bパターンとで各段階では同数本の抽出しの Bunching を行うのであるが、固定側の方が四本だけ内側の位置で Bunching される結果になる。しかしこれらの実験条件を考慮しても上の結果は大きな変更をうけない。実際、十字形実験の結果より、四本の抽出しの位置の相異による反応度変化は $\sim 0.12 \rho_0$ と推定され、加算性からのずれ $12.1 - 0.535 \times 2 = 1.4 \rho_0$ を説明することは出来ない。この加算性のずれは反応率の変化や中性子のもれの変化など相殺する過程を含めて生じたものだから原因は単純ではないが、AパターンとBパターンのセルの接点が広く存在しこれが炉心中心部にあることが原因の一つと考えられる。

Bulk Bunching 実験による非均質効果の推定は次のようになる。炉心全体を Aパターンから Bパターンにしたときの反応度変化は表より、 $12.08 \pm 0.05 \rho_0$ であり、正の反応度附加に伴つて天燃ウランブランケットに置換された抽出を Bunching した場合、および制御棒位置にある抽出し 8 本を Bunching した場合附加される正の反応度値を十字形実験の結果により推定すると $0.61 \rho_0$ となり、したがって

$$\begin{aligned}\rho_{A-B} (\text{core}) &= 12.08 + 0.61 \\ &= 12.69 \pm 0.05 \rho_0 \\ &= +0.614 \pm 0.002 \% \Delta k/k\end{aligned}$$

となる。ただしこの誤差は上に行つた算術和に伴う誤差を含まない。

セルの板状構成による非均質の度合の尺度としては、前章迄と同様に十字形実験の解析より得た値を使用すると、Aパターン炉心を均質炉心にした場合の反応度変化は、

$$\begin{aligned}\rho_{\text{homo}} &= -6.16 \pm 0.03 \rho_0 \\ &= -0.298 \pm 0.002 \% \Delta k/k \\ &= -0.935 \pm 0.019 \text{Pu}^{239+241} \text{ および } -1.707 \pm 0.034 \text{ kg U}^{235}\end{aligned}$$

となる。

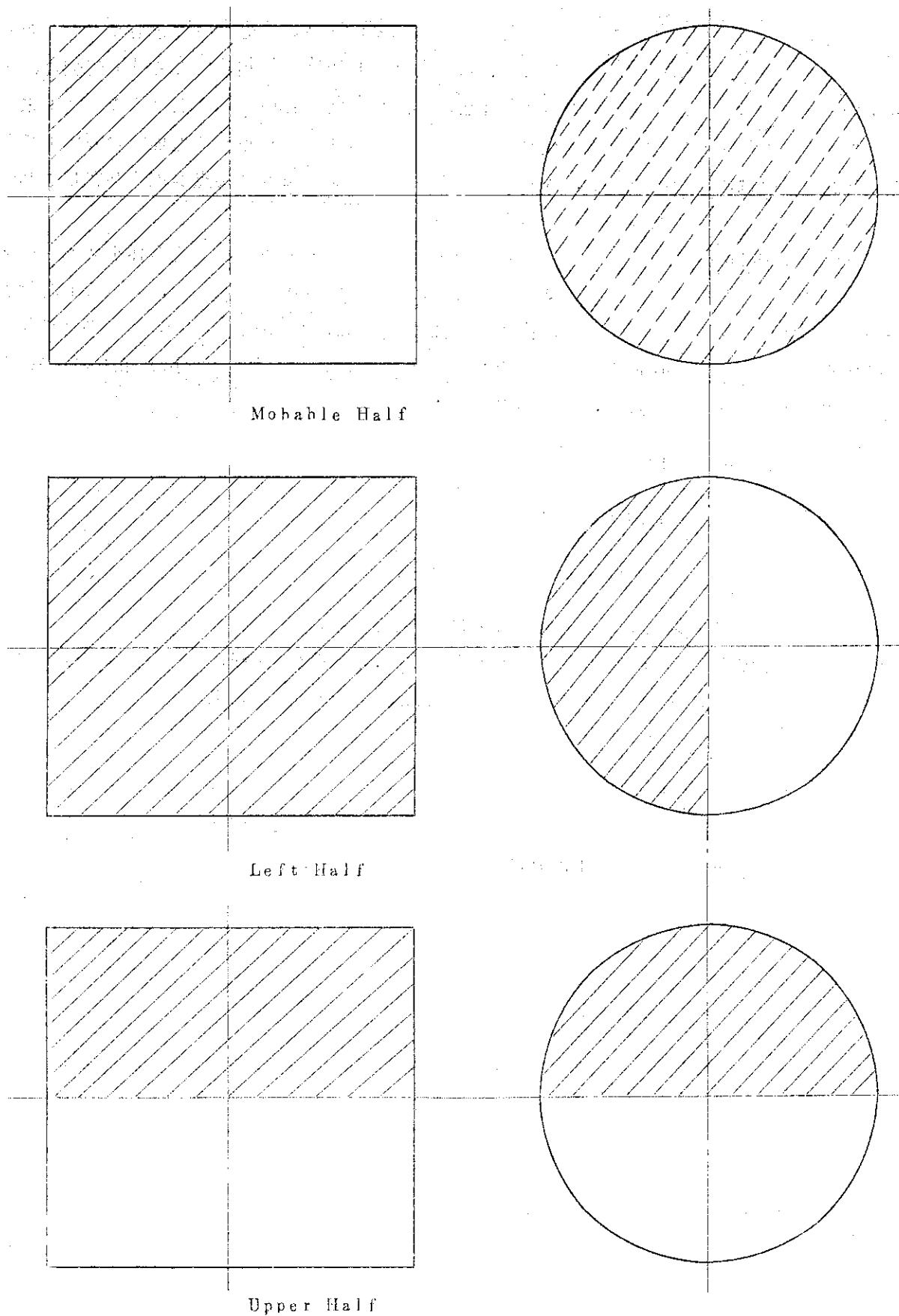


Fig.5.1 Bulk bunching zone

6. 檢 討

非均質効果には幾つもの要因が存在するから、対象とする問題によってそれにふさわしい実験方法、解析手段が限定される。実験方法を解析方法と切離して優劣を論することはできないが、今回問題点として取上げた「臨界量に与える影響」という観点に限っても解析方法が確立されているとは言えない。そこで本報では今後の解析に供する意味で実験値のみを集録し実験値間の相互比較にとどめることとする。

本章では先ず、各測定方法の特長について述べ、次に各測定方法から得られる「炉心全体の Bunching 効果」について比較検討する。最後に「非均質度」をあらわす尺度について考察する。

(1) Single-Pack Bunching (SPB)

この実験で Bunching した領域は、炉心全体の体積の 0.1 % に満たない小さな領域 ($5.52 \times 5.52 \times 5.08 \text{ cm}^3$) である。炉心内の中性子スペクトルは 300 keV 附近で最高値を示し、このエネルギーでの平均自由行路が約 4 cm であるから Bunching によってその周囲での中性子場は殆んど乱されないと考えてよい。このことから実験解析手法として一次摂動論が高い精度で適用できることが期待される。また、Bunching による反応度変化の空間分布が求められるから $\phi\phi^*$ の空間分布に関する情報も得られることになる。

一方、Bunched cell の均質化した実効断面積を求めるには摂動領域が Bunched Region よりもかなり拡大している可能性があることを考慮する必要があり通常のセル計算法には限界がある*。また、観測される反応度変化が小さいので測定値に対する実験精度が比較的悪く、炉心の温度変化による系の反応度のゆらぎや中心抽出の位置ぎめの再現性による誤差が無視できなくなる恐れがある。さらに、測定値から炉心全体の Bunching Effect を推定する過程で持込まれる誤差も大きくなることが予想される。

(2) Zone Bunching (ZB)

Bunching した領域は、18~54 Pack で炉心全体の体積の 2 ~ 5 % を占める。SPB 実験に比して摂動領域はかなり拡大されているが、大きい場合でも中性子平均自由行路の 5 倍程度である。したがって、Bunching によって新しい固有の中性子場が完全に形成されるには不充分であり一次摂動論による解析が可能である。また、この実験では x 軸方向と y 軸方向を別々に Bunching しているので中性子の流れに対して炉心物質の配列方向のもつ影響を調べることができる。

一方、この実験方法の欠点は解析の困難さにある。Bunched Region は SPB の場合に比して大きくなっているから無限平板の無限繰返しという条件に幾らか近いがまだ充分ではないこと、また、Bunched Region が Z 軸方向にも R 軸 (x 軸, y 軸) 方向にも localize しているので 1 次元解析や 2 次元解析には限界がある。

* 通常の Cell 計算は、無限平板からなる格子が無限に反復されると考えて行われる。

(3) Cross Drawer Bunching (CDB)

この実験では Bunching した抽出しあは Z 軸方向の 6 Pack 全体を Bunching しているからこの方向には反応度効果が積分されて測定される。したがって R - Z 分離を前提とする必要はなく R 方向での加算性のみを仮定すればよい。したがって一次元計算によってもある程度の解析は期待される。

また、炉心物質の配列方向が動径方向と平行な y 軸と垂直な x 軸上の抽出しを常に組として Bunching してあるから中性子の流れに対して性質の異なる両方向の反応度効果が積分されて測定値となっている。その意味で前項の Zone Bunching とは相補的である。

動径面内の Bunched Region は SPB と同様であり、したがって Perturbed Region が相対的に拡大されている可能性がある。解析ではこの点を考慮に入れなければならない。

(4) Bulk Bunching (BB)

「臨界量に与える効果」を求めるには明らかに最も直接的であり、加算性や R - Z 分離などの仮定は一切必要としない。

一方、現実的問題として燃料操作量が多いこと、そのために Half-machine 自体の再現性以外に抽出しの装荷状態の再現が問題となること、また、制御棒周囲の中性子場が変るために制御棒の等価反応度が変る可能性があることなどが欠点である*。

Bunching によって生ずる反応度変化が大きく、したがって精度の良い実験が期待される一方、本文に述べたように Full Core Bunching (FCB) を 1 段階で実施することは困難で Half Core Bunching (HCB) を中間段階とする必要が生ずる。さらに、反応度相殺のために炉心周辺から燃料除去が必要となり若干の誤差の原因となる。

しかし、これらの欠点はいずれも解決できることではなく、何らの仮定や補正を必要としないで直接結果が得られる長所は見逃すことができない。

解析の立場からは、前項までの方法と異なり固有値を直接比較する方法が適している。実効断面積を求めるために通常のセル計算を採用することもできる。

以上の各測定方法によって得られる炉心全体の非均質効果、つまり「炉心全体を A パターンから均質炉心へ装填変更したときに生ずる反応度変化 ρ_{A-Homo} 」を Table 6.1 に示す。

非均質効果の生ずる要因は単純ではないが、後に記述する「非均質度」の項で検討するよう、核分裂中性子源が局在することが原因の一つであることは確かである。したがって、特定の組成の燃料を特定の混合割合で使用している今回の実験から各測定方法の優劣について結論を急ぐことはできない。しかし、集合体 V - 1 と特性のあまり大きく変わらない体系、例えば実験炉 JYOYÖ の Full Mock-up である集合体 V - 2 や V - 3 などに対しては応用性が高いであろう。

次に、全体の測定結果から引出される事実を列挙する。

(1) Bunched Region の大きさとの関係

反応度変化の加算性が完全に成立つのであればどの方法から得られる ρ_{A-Homo} も同じ値を示す筈であるのに事実はそうでない。したがって干渉効果が存在することは明らかである。もし、

* V - 1 の実験ではこの変化は生じなかった。(本文参照)

Table 6.1 Heterogeneity effect measurement by different methods

Experimental method	ρ_o	Heterogeneity effect	
		% $\Delta k/k$	kg-Pufis + kg-U ²³⁵
Full - core bunching (exact)	-6.16 ± 0.21	-0.298 ± 0.010	-0.94 ± 0.03 -1.71 ± 0.06
Half - core bunching			
Upper or right half	-5.48 ± 0.20	-0.265 ± 0.010	-0.83 ± 0.03 -1.52 ± 0.06
Movable half	-5.19 ± 0.18	-0.251 ± 0.009	-0.79 ± 0.03 -1.44 ± 0.05
Cross-drawer bunching	-5.35 ± 0.17	-0.259 ± 0.008	-0.81 ± 0.03 -1.49 ± 0.06
Cingle - pack bunching	-7.68 ± 0.37	-0.372 ± 0.018	-1.17 ± 0.06 -2.13 ± 0.11
Zone bunching	-8.51 ± 0.51	-0.412 ± 0.025	-1.29 ± 0.08 -2.36 ± 0.16

note : $\rho_o = 0.0484 \text{ % } \Delta k/k$

$$\begin{aligned} 1\% \Delta k/k &= (3.139 \pm 0.041) \text{ kg-Pufis} \\ &+ (5.732 \pm 0.074) \text{ kg-U}^{235} \end{aligned}$$

この干渉効果の大きさが、Bunched Region と Non-Bunched Region の接触面積の大きさに単調に依存するのであれば Bunched Region が大きくなるにしたがって Exact Value である ρ_{A-Homo} (FCB) に単調に近づくことが期待される。しかし、実際には ρ_{A-Homo} (Zone Bunching) が ρ_{A-Homo} (SPB) よりも大きな偏差を示すなど複雑な相関が見られ、干渉効果の複雑さを示している。

(2) 反応度変化の R-Z 分離性について

反応度変化の R-Z 分離を仮定した方法 (SPB, ZB) では、仮定しない方法 (CDB, BB) に比較して偏差が大きく、かつ、偏差の方向が逆である。このことから Z 方向にかなりの干渉効果が存在し、この方向の反応度分布が単純な $COS^2(BZ)$ からずれていることが予想される。SPB で得られた中心抽出における Z 方向各 Pack の反応度分布は図 3.2 に示されているようになり $COS^2(BZ)$ に近い形をしている。しかし、これから得られる抽出全体の Bunching 効果が Table から $(15.34 \pm 0.49) \times 10^{-2} \rho_0$ であるのに対して CDB で求められた中心抽出の Bunching の効果は約 $0.12 \rho_0$ でその比は 1.28 に達する。

(3) 廉心物質の配列方向との関係

ZBにおいて x 軸上の測定値とそれに対応する y 軸上の測定値を比較すると一貫して y 軸上の測定値が低い値を示している。このことから廉心物質の配列方向が中性子の流れに影響を与えていていることは明らかである。

(4) 中性子の流れの方向との関係

中性子は廉心中心から境界に流れるが、その方向が廉心物質の配列方向と平行な y 軸または z 軸方向には垂直な x 軸方向よりも Leakage が多いことは容易に想像される。ZBにおいて x 軸上と y 軸上の対応する領域の Bunching 効果を比較すると y 軸上の測定値が小さくなること、中心軸 (Z 軸) の Bunching 効果が SPB の和より CDB の値が小さくなることはいずれもこのことを証明している。同一物質が規則正しく廉心境界まで直線上に存在することによって中性子の流れの通路を形成していると考えることができる。

次に、「非均質度」について考察する。非均質効果には幾つもの要因が考えられるがその主なものは、核分裂中性子源（燃料）や強い吸収体（共鳴吸収体を含む）などが局在していることである。たとえば、 ^{238}U や ^{240}Pu などの閾核分裂核種は Bunching によって正の反応度効果をもたらす。

共鳴吸収体としての ^{238}U は Bunching によって捕獲率が減少して正の効果を有する。Bunching 効果はこれらの相反する正負の効果の競合過程である。さらに Non-Fuel の配列は Moderation を通して高エネルギー中性子の Removal や共鳴中性子の供給の原因となって非均質効果に寄与する。集合体 V-2 の組成では、正の効果も負の効果も共に ^{238}U の寄与が大きく、したがって ^{238}U の存在量、存在位置が最も非均質度の尺度に対する役割が大きい。そこで ^{238}U の原子数を重みとして燃料板の重量（厚み）を平均したもの尺度ととることが考えられる。一方、核分裂中性子の供給源という立場から考えれば各燃料板の平均厚が尺度となって今回の解析に用いた尺度に一致する。U と Pu の比重や ν の差を考慮しても尺度自体には殆んど差がない。

核分裂中性子源の強さをあらわすものとして $(\nu \sum f - \sum a)$ の平均値をとることも考えられる。また、これらの方法では燃料と燃料の間隔が考慮されていないことや燃料は同時に強い共鳴吸

収体でもあるという立場から、Dancoff 因子をとりいた尺度を考えることもできる。しかし、これらの方法ではある程度の計算や人為的な数値である群定数の使用を必要とする点で望ましくない。実験面からは、このような人為的な値を用いない普遍的な尺度が望ましい。

CDB の項で述べたように A → B → C と装填パターンを変えたときに観測された反応度変化は、燃料平均厚 \bar{t} を尺度としたときにはほぼ直線的関係を示している。したがって、今回の実験で採用した程度の燃料の大きさは一次摂動で扱える範囲にあると考えてもよいようである。しかし、これはあくまで 20% 濃縮ウランと高純度 Pu という特定の組成の燃料を使用した場合に言えることすぎない。組成や混合割合の異なる体積での議論はあらたな実験結果をもとにして行わなければならない。

更に、「平均燃料厚 \bar{t} 」と「Bunching 効果 ρ 」の間に直線関係が観測されるのは、炉心全体の Bunching Effect を考える場合にしか適用できないことが次のとおり結論される。

Fig. 6.1 は装填方式がパターン A-B-C と变成了ときの反応度変化の動径方向の場所による差を示したものである。この結果は十字形実験から得られたもので図中の番号は Fig. 2.1 のステップ番号に対するものである。図から \bar{t} と ρ の関係は場所によって異なることがわかる。図では、中心から外側に移るにつれて反応度効果 ρ が小さくなると同時に下に凸の曲線から上に凸の曲線に移行し、かつ、その曲りが大きくなっている。その理由には、場所によってスペクトルが違うことも影響していると考えられる* が中性子の流れの効果が場所によって異なることも原因と考えることができる。中心 (#0) では流れの効果は小さい。場所が異なることの効果が単に ϕ^* の大きさのみに比例するのであれば、中心での曲線がその形を保存しながら値の小さい方へ移ることが期待される。実際にはそれから予想される値よりさらに小さい値をとるために上に凸な曲線に変化している。これは、中性子の流れが $\nabla \phi$ に比例し中心から離れるにつれてその効果が大きくなるために ϕ^* の値から予想される値より負の効果が大きくなることが一つの理由と考えられる。

このように、 \bar{t} と ρ の間の直線関係は非直線関係がお互に相殺した結果偶然観測されたことがわかる。

参 考 文 献

- 1) ANL-7320 Proc. of the International Conference on Fast Critical Experiments and Their Analysis (1966)
- 2) Proc. Symp. on Fast Reactor Physics., Karlsruhe, International Atomic Energy Agency, Vienna (1968).
- 3) Physics of Fast Reactor Operation and Design Conference, British Nuclear Energy Society, London (1969).

* Fission Ratio $\sigma_f^{28}/\sigma_f^{25}$, $\sigma_f^{49}/\sigma_f^{25}$, $\sigma_f^{37}/\sigma_f^{25}$ の空間分布は境界近傍の一部を除いて炉心内で殆んど一定であり、スペクトル変化は小さいことがわかっている。

収体でもあるという立場から、Dancoff 因子をとりいた尺度を考えることもできる。しかし、これらの方法ではある程度の計算や人為的な数値である群定数の使用を必要とする点で望ましくない。実験面からは、このような人為的な値を用いない普遍的な尺度が望ましい。

CDB の項で述べたように $A \rightarrow B \rightarrow C$ と装填パターンを変えたときに観測された反応度変化は、燃料平均厚 \bar{t} を尺度としたときにはほぼ直線的関係を示している。したがって、今回の実験で採用した程度の燃料の大きさは一次摂動で扱える範囲にあると考えてもよいようである。しかし、これはあくまで 20% 濃縮ウランと高純度 Pu という特定の組成の燃料を使用した場合に言えることすぎない。組成や混合割合の異なる体験での議論はあらたな実験結果をもとにして行わなければならない。

更に、「平均燃料厚 \bar{t} 」と「Bunching 効果 ρ 」の間に直線関係が観測されるのは、炉心全体の Bunching Effect を考える場合にしか適用できないことが次のとおり結論される。

Fig. 6.1 は装填方式がパターン A-B-C と変ったときの反応度変化の動径方向の場所による差を示したものである。この結果は十字形実験から得られたもので図中の番号は Fig. 2.1 のステップ番号に対するものである。図から \bar{t} と ρ の関係は場所によって異なることがわかる。図では、中心から外側に移るにつれて反応度効果 ρ が小さくなると同時に下に凸の曲線から上に凸の曲線に移行し、かつ、その曲りが大きくなっている。その理由には、場所によってスペクトルが違うことも影響していると考えられる*が中性子の流れの効果が場所によって異なることも原因と考えることができる。中心 (#0) では流れの効果は小さい。場所が異なることの効果が単に ϕ^* の大きさのみに比例するのであれば、中心での曲線がその形を保存しながら値の小さい方へ移ることが期待される。実際にはそれから予想される値よりさらに小さい値をとるために上に凸な曲線に変化している。これは、中性子の流れが $\nabla \phi$ に比例し中心から離れるにつれてその効果が大きくなるために ϕ^* の値から予想される値より負の効果が大きくなりしていくことが一つの理由と考えられる。

このように、 \bar{t} と ρ の間の直線関係は非直線関係がお互に相殺した結果偶然観測されたことがわかる。

参 考 文 献

- 1) ANL-7320 Proc. of the International Conference on Fast Critical Experiments and Their Analysis (1966)
- 2) Proc. Symp. on Fast Reactor Physics., Karlsruhe, International Atomic Energy Agency, Vienna (1968).
- 3) Physics of Fast Reactor Operation and Design Conference, British Nuclear Energy Society, London (1969).

* Fission Ratio $\sigma_f^{28}/\sigma_f^{25}$, $\sigma_f^{49}/\sigma_f^{25}$, $\sigma_f^{37}/\sigma_f^{25}$ の空間分布は境界近傍の一部を除いて炉心内で殆んど一定であり、スペクトル変化は小さいことがわかっている。

- 4) Trans. Am. Nucl. Soc. 13 (1970).
 5) Nomoto, S., et al., J. Nucl. Sci. Technol., 7 [4], 212 (1970).
 6) 平川直弘他, FCA V-1 集合体の特性試験と臨界質量, JAERI-M 7882 (1978).

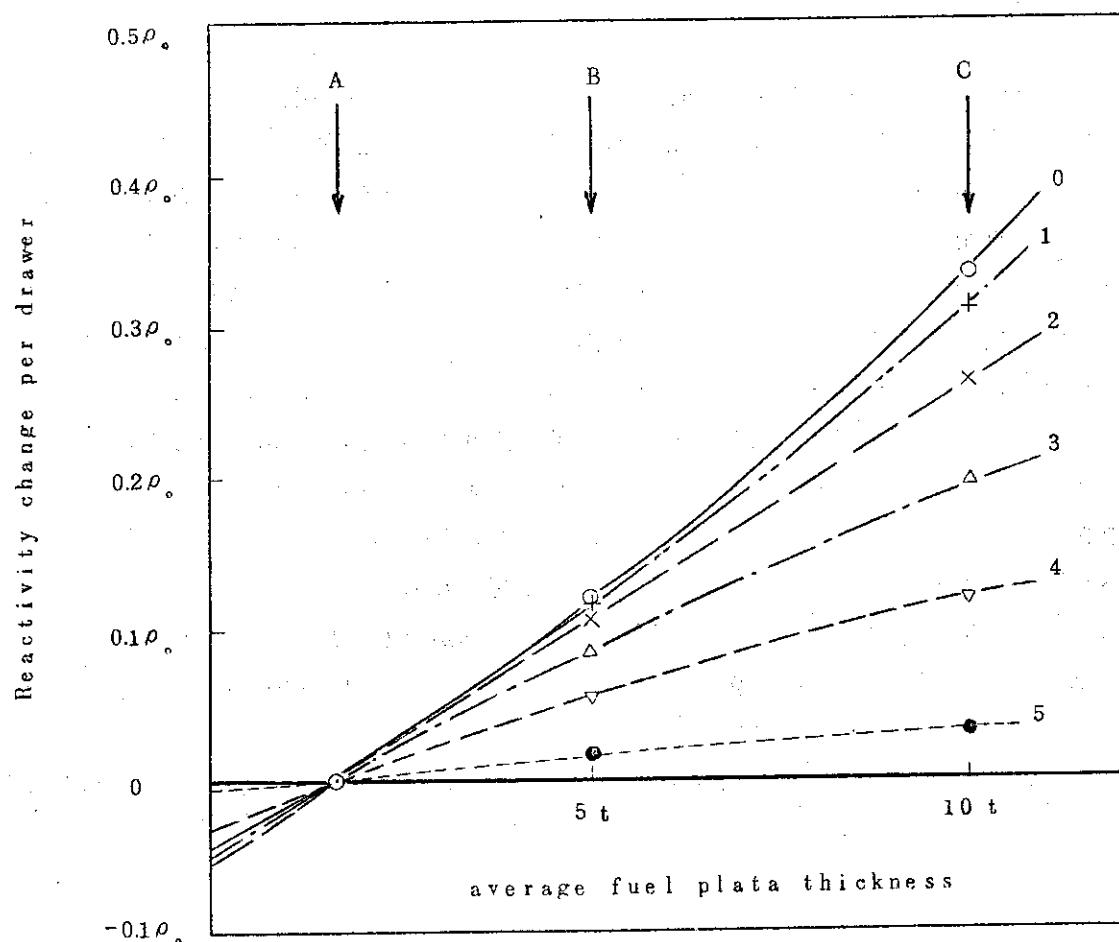


Fig. 6.1 Fuel bunching effect

Appendix A

FCAの炉心用燃料および模擬物質は厚さ $\frac{1}{8}$ インチ或は $\frac{1}{16}$ インチのプレート状をしているので、組成が非均質であるための効果を生ずるのみならずプレートの配列方向に起因した効果も生ずることになる。この配列効果は炉心内における中性子の流れの特性に対応しており、燃料等の炉心物質が板状の形状をしている場合に特有の一種の非均質効果である。

そこでV-1炉心の非均質効果測定のための一連の実験においてこの配列効果の測定が行われた。炉心のx方向とy方向とは炉心から見てプレートの配列方向がちょうど逆になっており、半径方向の配列効果は全体の reactivity としては互に相殺する関係にある。実際の測定は実際時間の制限からz方向のみに限られ、z軸に平行に並んでいるAパターンの板状セルをそれぞれ90度回転させてz軸に対して直角の方向に置き換えた場合の反応度変化を測定した。測定ゾーンの大きさ並びに反応度の測定方法は第4章の zone bunching 実験の場合と同じである。配列効果の測定結果をTable A.1に示す。この測定法における問題点は、2インチ平方の燃料や模擬物質を重ね合わせて作った標準の板状セルは高さが2インチよりわずかに低めであることが明らかになり、標準状態から配列方向をz軸に直角の方向に回転させると結果として測定ゾーンの炉心物質がわずかながら炉心中心寄りへ移動することが確かめられたということである。したがって本来の配列効果は、この測定結果より少し less-reactive な方向へずれることが予想される。

Table A.1 Data of the array-change experiments

Array-changed zone	No. of packs in the zone	C/R# 2 position change (mm)	Reactivity change (μ_0)	Reactivity per unit pack (μ_0)
(4, 5, 6,) z	54	86.70 → 134.17	0.978	0.0181
4 z	18	85.48 → 106.21	0.435	0.0242
5 z	18	85.48 → 106.45	0.440	0.0244
6 z	18	85.48 → 102.11	0.350	0.0194
(1, 2, 3,) z	54	87.67 → 143.96	1.148	0.0213

Appendix B

Bunching 実験より、炉心の非均質効果を推定する際に必要とされる非均質性の尺度を知る方法の一つとして、さらに非均質計算が正しく行われているかどうかを調べるために、Bunching パターンをいくつか変えて、その効果を調べた。Table B.1 および Table B.2 に Single Pack Bunching 実験における炉心中心 (1 p) およびブランケットとの境界 (6 p) における各種パターンの反応度変化を示す。各種パターンは Fig. 1.2 に示す通りである。

上記実験においてはセルを 90° 回転したときの効果も調べており、実験結果を Table B.3 に示す。

測定量が反応度であることから計算との比較において、実験値を規格化する意味を含めて、 B_4C のサンプルの反応度価値の空間依存性を調べた。結果は Table B.4 に示す。

これらの実験値の誤差評価の詳細は今後にゆずるものとする。

Table B.1 BUNCHING EFFECT BY VARIOUS
MODIFIED PATTERN (1p)

Modification	$\rho_o \times 10^2$	Modification	$\rho_o \times 10^2$
A → B	3.54 ± 0.09	$A^* \rightarrow B^*$	4.48 ± 0.26
A → C	8.13 0.26	$A^* \rightarrow D$	2.46 0.26
$A' \rightarrow A''$	-1.12 0.26	$A^* \rightarrow E$	3.35 0.26
$A' \rightarrow B'$	1.26 0.26		

Table B.2 BUNCHING EFFECT BY VARIOUS
MODIFIED PATTERN (6p)

Modification	$\rho_o \times 10^2$	Modification	$\rho_o \times 10^2$
A → B	0.935 ± 0.180	$A' \rightarrow A''$	0.12 ± 0.26
A → C	1.880 0.26	$A' \rightarrow B''$	0.52 0.26

Table B3 SINGLE CELL ROTATION EFFECT
IN CENTER DRAWER

Modification	$\rho_o \times 10^2$	Modification	$\rho_o \times 10^2$
1 p	0.22 ± 0.26	5 p	2.08 ± 0.26
2 p	1.37 ± 0.26	6 p	$1.25 \quad 0.26$
4 p	1.79 0.26	(4, 5) p	3.10 0.26

$$\rho_o = 0.0484 \times 10^{-2} \Delta k/k$$

(4, 5)p ; Both 4p and 5p are rotated at once.

Table B4 B₄C WORTH TRAVERSE ALONG
Z-AXIS

Position ¹⁾ cm	15.40	25.72	5.08
	0.259	0.133	0.349

$$\rho_o = 0.0484 \times 10^{-2} \Delta k/k$$

Position ; Distance from core center.

Shape of sample material ; $5.08 \times 5.08 \times 0.16$ (in cm unit)

Experimental error ; About $0.26 \times 10^{-2} \rho_o$