

J A E R I - M

88-129

高転換軽水炉の炉心燃焼特性（I）
—HCLWR-J1($V_m/V_p \approx 0.8$)の炉心解析—

1988年7月

奥村 啓介・石黒 幸雄・土井 英示*

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

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。
入手の問合せは、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, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

高転換軽水炉の炉心燃焼特性 (I)
—HCLWR-J1 ($V_m/V_p \approx 0.8$) の炉心解析—

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
奥村啓介・石黒幸雄・土井英示*

(1988年6月14日受理)

稠密格子による高転換軽水炉(HCLWR)の炉心燃焼特性を評価するため、二次元拡散法による炉心燃焼計算を実施した。対象とする炉心(HCLWR-J1)の減速材対燃料体積比は約0.8である。燃焼計算は、3バッチ、アウト－イン燃料交換方式を仮定し、初装荷炉心から平衡サイクルに至るまで行った。この炉心に対して、取り出し燃焼度、転換率、出力分布、反応度係数等の核特性を詳細に評価した。

Core Burnup Characteristics of High
Conversion Light Water Reactor (I)
- Core Analyses for HCLWR-J1 ($V_m/V_p \approx 0.8$) -

Keisuke OKUMURA, Yukio ISHIGURO and Eiji DOI*

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 14, 1988)

In order to evaluate core burnup characteristics of a high conversion light water reactor (HCLWR) with tight pitched lattice, core burnup calculation was made using two dimensional diffusion method. The volume ratio of moderator to fuel is about 0.8 in the reactor (HCLWR-J1) under study. The burnup calculations were carried out under the assumption of three batch and out-in fuel loading from the first cycle to the equilibrium cycle.

A detailed evaluation was made for discharge burnup, conversion ratio, power distribution, and reactivity coefficients and so on.

Keywords: HCLWR, Conversion Ratio, Burnup Calculation, Tight Lattice, Reactivity Coefficient

* I.S.A. Co. Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. 想定炉心 (HCLWR-J1) の概要	3
3. 計算モデルと解析手法	8
3.1 格子燃焼計算	8
3.2 炉心燃焼計算	10
3.3 転換率の定義と計算法	11
3.4 反応度係数と制御棒反応度価値の計算手法	13
4. 計算結果と検討	25
4.1 格子燃焼計算による予測	25
4.2 HCLWR-J1 の燃焼性能	25
4.3 反応度係数と制御棒反応度価値	27
5. まとめ	45
謝 辞	47
参考文献	48
付録 入力データ, ジョブ制御文の例	50

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Assumed Reactor (HCLWR-J1)	3
3. Calculation Models and Analysis Methods	8
3.1 Cell Burnup Calculation	8
3.2 Core Burnup Calculation	10
3.3 Definition of Conversion Ratio and Calculation Method	11
3.4 Calculation Methods for Reactivity Coefficients and Control Rod Worth	13
4. Calculated Results and Discussions	25
4.1 Prediction by Cell Burnup Calculation	25
4.2 Burnup Performance of HCLWR-J1	25
4.3 Reactivity Coefficients and Control Rod Worth	27
5. Conclusions	45
Acknowledgements	47
References	48
Appendix Sample Input and JCL	50

1. まえがき

軽水炉時代の長期化予想にともない、次世代を担う新型炉のひとつとして高転換軽水炉(HCLWR)が注目を集めている。これは、MOX燃料棒の格子間隔を小さくし、炉内平均中性子スペクトルを硬化させ、転換率の向上を図ろうとするものである。格子の稠密化により、減速材対燃料ペレット体積比(V_m/V_p)は現用軽水炉(LWR)の約2.0に比べて小さくされ、現在国内外において、 V_m/V_p が0.5～1.4の範囲でHCLWRの概念設計がなされている^{1)～4)}。一般に V_m/V_p を小さくするほど転換率は向上するが、反面ボイド反応度特性が悪化し、かつ燃料インベントリが増大する。逆に V_m/V_p を1.0以上(準稠密炉心)とすれば、ボイド特性の悪化は緩和され、また、現用LWR技術の適用項目が多くなり、開発コストは低減するが、HCLWRで目標としている転換率0.9以上の達成は困難となる。このような広範囲にわたる V_m/V_p の選択領域に対し、HCLWRの概念成立の範囲を限定し、かつ炉物理特性量を把握するため、炉心の主要パラメータである燃料濃縮度、燃料ピン直徑、燃料棒ピッチ等を変数とする格子燃焼パラメータ・サーベイが実施された。⁵⁾その結果、ボイド特性及び到達燃焼度の観点から、 V_m/V_p が約0.8以上のところに設計領域を求めるのが現実的であると判断された。ただし、サーベイ計算は一点炉近似に基づく格子燃焼計算により行われ、炉心性能を評価するには、精度、情報量共に充分であるとは言い難い。例えば、一点炉近似による計算では、熱水力設計に必要とされる出力分布等のデータは取得できない。また、反応度の計算においても、燃焼度の異なる燃料の非均質効果が反映されない。したがって、より詳細な炉心燃焼計算が必要不可欠となる。そこで、手始めとして V_m/V_p が約0.8の炉心を想定し、初装荷炉心から平衡サイクルに至るまでの炉心燃焼計算を実施し、その性能評価を行った。さらに、HCLWR設計上、特に問題とされる燃焼過程のボイド反応度係数、及び制御棒の反応度価値についても検討を行った。

一連の計算はSRACシステム^{6), 7)}を用いて行った。SRACシステムでは、14種類の格子形状に対し衝突確率法による格子計算が可能であり、またサブコードとして多次元拡散法による炉心燃焼計算コードCOREBN2、及び燃料管理コードHIST2が準備されている。このシステムの使用により、格子計算から炉心燃焼計算、さらに燃焼過程における反応度計算まで一貫して行うことが可能である。

HCLWRは、その中性子スペクトルに関して、LWRとFBRの中間に位置する、いわば共鳴中性子炉である。このような経験の少ない体系に対する解析法の研究が、この数年精力的に行われ^{8)～13)}、その結果はSRACシステム及びデータの改良に反映してきた。また、EIRのPROTEUS実験解析^{14), 15)}を初めとし、FCA実験解析、^{16)～19)}国内メーカーとの協力研究^{20), 21)}及びNEACRP国際ベンチマーク計算²²⁾等の実施により、SRACシステムのHCLWR格子系への適用性と信頼度はますます高まっている。

本報告書の構成は以下の通りである。第2章では、今回の計算で想定した炉心(HCLWR-J1)の概要を説明する。第3章において、一連の計算の解析手法とモデルを、予備検討結果を含めて説明する。第4章では、計算結果に基づきHCLWR-J1の燃焼特性、反応度係数、制御性につ

いて論じ、第5章でまとめと今後の方針を述べる。最後に、SRACシステムを使用して同様の炉心燃焼計算を行う利用者に対して便宜を図るため、格子計算及び炉心燃焼計算等のジョブ制御文と使用例を添付する。

2. 想定炉心 (HCLWR-J1) の概要

先ず、本報告書の計算において想定した高転換軽水炉 (HCLWR-J1) の仕様とその設定法について概説する。HCLWR では、同一燃料棒ピッチで、正方格子より V_m/V_p を小さくすることが可能な六角格子配列が採用され、燃料集合体は高速炉同様の六角型となる。Fig. 2.1 及び Table 2.1 は、HCLWR-J1 の燃料集合体の概形及び主要パラメータを示したものである。燃料集合体は、300 本の燃料棒、24 本の制御棒案内管、6 本の支持棒、及び集合体中心に配置される 1 本の計装管から構成される。

燃料には、再処理 Pu とウラン濃縮の段階で排出される減損ウランを加工した中富化度の MOX 燃料を使用する。ちなみに、減損ウラン中の ^{235}U の割合は 0.2 w/o 程度であるが、LWR の取り出し燃料から回収されるウランの場合、約 1.0 w/o であるため、これを用い、核分裂性 Pu のインベントリを減らそうとする考え方もある。ここでは保守的に減損ウランの使用を仮定した。燃料棒直径は 9.5 mm とした。これは現用 PWR のものと同じである。ただし燃料被覆管には、西独で提案されている 0.4 mm 厚さのヘリカルリブ・スペーサ付きステンレス管²⁾ を使用する (Fig. 2.2 参照)。稠密格子系では熱エネルギー領域における中性子の寄生吸収が少なくなるため、0.4 mm 厚さのステンレス (SS 304) 管は、中性子経済の観点上、現用 PWR で使用されている 0.57 mm 厚さのジルカロイ管とほぼ等価となることが確認されている。このため、 V_m/V_p が約 1.0 以下の設計範囲では、DNBR の優位、LOCA 時の耐性及び加工性等の観点から、リブ付ステンレス被覆管が使用される。ワイヤ・スペーサの使用も考えられるが、核計算の上では、これらの選択は特に重要とはならない。

燃料集合体の各コーナーに存在する 6 本の支持棒は、現用 LWR には使用されていない。PWR の場合には、制御棒案内管を骨組みとし、これに固定されたグリッド・スペーサの板バネにより燃料棒が支持される。制御棒案内管を持たない BWR の場合には、集合体を取りまくラッパ管とグリッド・スペーサにより燃料棒が支持される。一方、ハニカムグリッド・スペーサが使用できない程に稠密な HCLWR では、コーナーの支持棒に巻かれるストラップバンドにより燃料棒を束ねこれを支持する。ラッパ管の使用も考えられるが、集合体間の冷却水の混合 (クロスフロー) を良くするために、支持棒を採用した。また、HCLWR-J1 の燃料集合体内の制御棒案内管数は制御棒反応度価値の予備検討 (第 3.4 節参照) を行い、余剰反応度を充分制御できるように設定してある。

V_m/V_p は、炉心の核特性を決定する重要な因子である。過度に燃料棒格子を稠密化すると、Pu の熱エネルギー領域における核分裂反応が減少するため、中性子増倍率、すなわち余剰反応度が小さくなりすぎる。格子の稠密化により転換率は高くなるため、燃焼による単位時間あたりの反応度損失は小さくなるが、充分な余剰反応度がとれず、結果的に高い燃焼度は得られなくなる。これを補償するため、核分裂性 Pu の富化度を上げると、転換率が低下するとともにボイド反応度係数が正の値を示すようになる。したがって、 V_m/V_p を設定する際には、転換率と中性子増倍率のトレードオフの関係及びボイド反応度係数を充分考慮する必要がある。これら

の関係を定量的に把握するため、単一ピンモデルを使用した燃焼パラメータ・サーベイが実施された。⁵⁾ この結果に基づき、現用 LWR 以上の燃焼度が得られ、かつボイド反応度係数が負になると予測される限界点として、HCLWR-J1 の V_m/V_p を 0.81 に設定した。燃料棒格子のピッチは、Fig. 2.1 に示される燃料集合体及び集合体間クリアランスの全領域を考慮して、 V_m/V_p が 0.81 になるように決定した。この結果、ピッチは 1.11 cm となり、ヘリカルリブ・スペーサを想定しているため、必然的に計装管、制御棒案内管及び支持棒の外径もこの値となる。なお、この V_m/V_p 値は制御棒を引き抜いた場合のものであり、挿入時には 0.72 となる。

Fig. 2.3 は、HCLWR-J1 の初装荷炉心の 1/6 体系図（反射体部分は計算用にモデル化してある）を示したものである。また、Table 2.2 に、その諸元を、KfK 均質型 HCLWR²⁾ 及び標準 4 ループ PWR と比較して示してある。総熱出力は現用 PWR と同等とした。炉心有効長は、稠密化による炉心部圧力損失の増大を緩和するため、223 cm まで短尺化し、径方向の炉心サイズを現用 PWR に比べて大きくすることにより、平均線出力を 169 W/cm まで低減した。平均線出力は、燃料中心温度及び LOCA 時の発熱等に関連して制限されるが、冷却水路が小さい HCLWR では、むしろ後者により制限されることになる。そこで、KfK において行われた P/d²⁾（燃料棒ピッチ／燃料棒直径）をパラメータとする LOCA 解析結果²⁾ を参考にし平均線出力を決定した。燃料装荷方式は、Fig. 2.3 に示される 3 つの領域に対して、アウト・インー 3 バッチ燃焼方式を採用した。取り替え燃料の核分裂性 Pu 富化度は、いくつかの Pu 富化度に対して行った格子燃焼計算結果に基づき、現用 LWR 以上の燃焼度が期待される 9.0 w/o とした。また、Fig. 2.3 に示される初装荷炉心の Pu 富化度分布は、様々な Pu 富化度の組み合わせにより炉心燃焼計算を繰り返し、早期に平衡燃焼へ移行するように調整したものである。

Table 2.1 Specifications of Fuel Assembly (HCLWR-J1)

Pin Pitch	1.11 cm
Fuel Rod OD	0.95 cm
Pellet OD	0.851 cm
Fuel Material	PuO ₂ -UO ₂
Cladding Thickness	0.04 cm
Cladding and Rib Material	SS 304
Rib Height	0.08 cm
Rib Width	0.053 cm
Tie Rod OD	1.11 cm
Guide Tube OD	1.11 cm
Guide Tube and Tie Rod Material	SS 304
Fuel Pins per Assembly	300
C.R.Guide Tubes per Assembly	24
Tie Rods per Assembly	6
Detector Guide Tubes per Assembly	1
Assembly band Thickness	0.08 cm
Interassembly Water Gap	0.1 cm
Assembly Pitch	20.6 cm
Active Core Height	223 cm
Fissile Pu Enrichment (charged fuel in equilibrium cycle)	9.0 w/o

Table 2.2 Specifications of HCLWRs and Current PWR

	HCLWR-J1 (JAERI)	HCLWR (KfK)	PWR (17x17)
Core Thermal Output (MWt)	3411	3730	3411
Equivalent Core Diameter (cm)	375	386	337
Active Core Height (cm)	223	221	366
Water to Pellet Volume Ratio in Assembly	0.81	0.7	1.9
Average Linear Heating Rate (W/cm)	169	180	183
H.M. Inventory (ton)	103	111	89
Fissile Inventory (ton)	7.9	8.0	2.3
Number of Fuel Assembly	301	301	193
Assembly Pitch	20.6	21.2	21.5

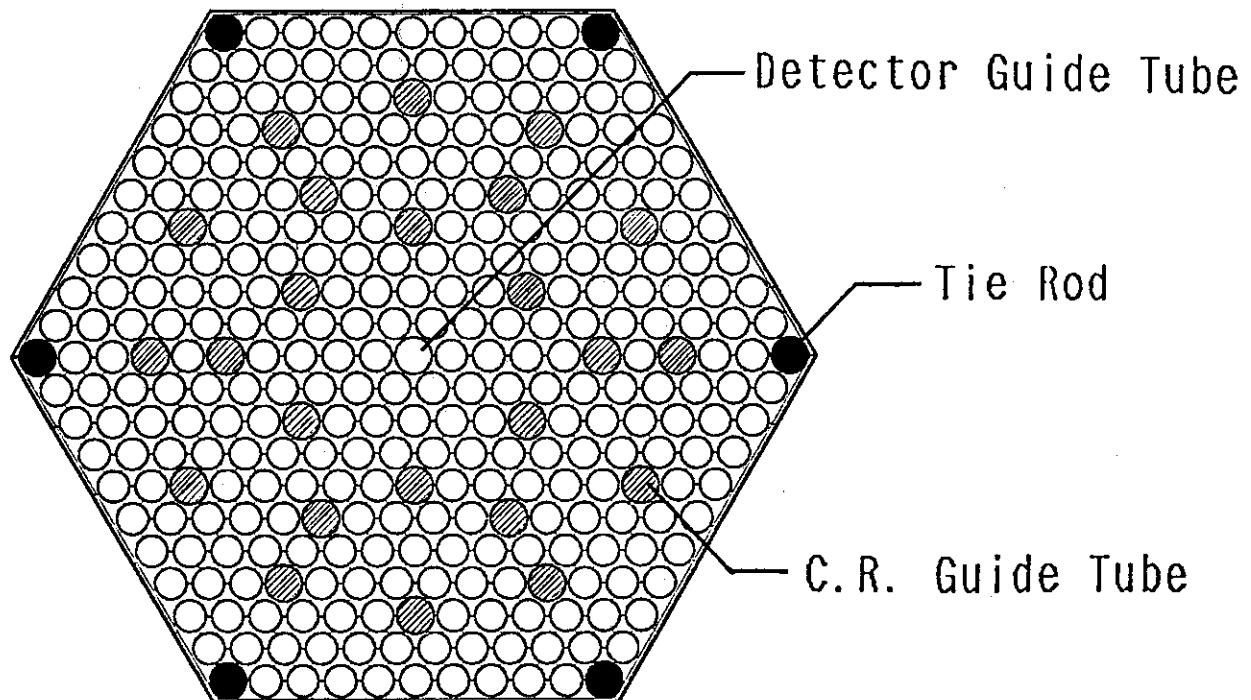


Fig. 2.1 Fuel assembly of HCLWR-J1

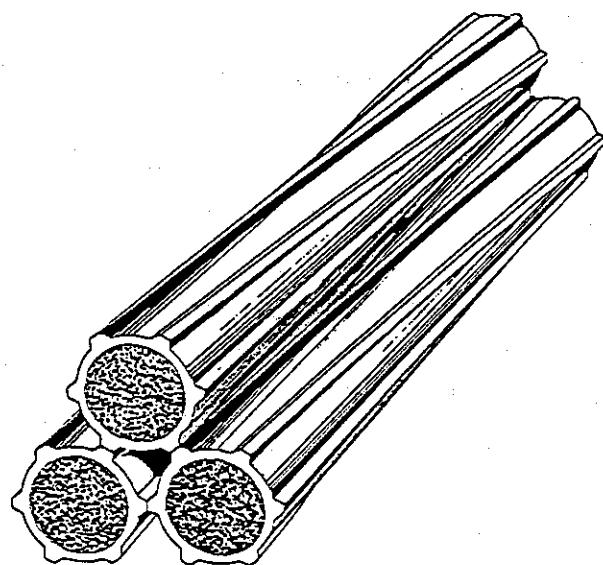


Fig. 2.2 Fuel pin with spacer of helical ribs²⁾
developed in FRG

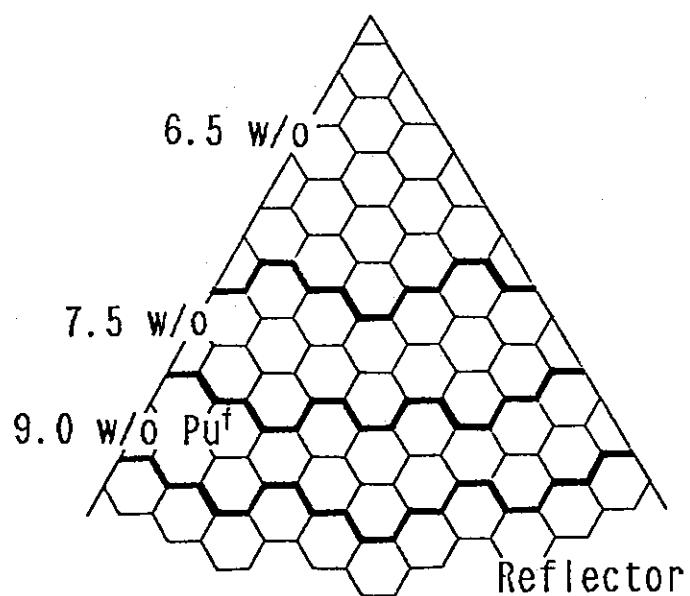


Fig. 2.3 1/6 core geometry and initial fissile
Pu distribution in HCLWR-J1

3. 計算モデルと解析手法

3.1 格子燃焼計算

炉心燃焼計算は巨視的断面積内挿法により行った。この方法では、炉心計算に先立ち、格子燃焼計算が独立して行われ、使用する燃料体の巨視的断面積テーブル、及び燃焼履歴が作成される。本節では、格子燃焼計算部分のモデルと手法を解説する。

HCLWR-J1 の V_m/V_p は、燃料集合体及び集合体間クリアランスの全領域において、0.81である。一方、Fig. 3.1 の左図に示されるような、単一燃料棒格子で考えると、 V_m/V_p は 0.58 となる。これらの差は、集合体中に存在する制御棒案内管、支持棒、集合体間クリアランス等に起因するものであり、緻密体系であるほど差は大きくなる。したがって、実寸の燃料棒ピッチを用いて格子計算を行っても、集合体平均の核特性を得ることができない可能性がある。そこで、Table 3.1 に示される燃料集合体全体の体積比を保存する実効単位格子モデル（Fig. 3.1 の右図）を使用する。この際、燃料 - 被覆管の間隙は燃料の密度を希釈することにより考慮した。また、減速材領域は構造材等の体積を含めて大きくし、リブ・スペーサ、支持棒、制御棒案内管等のステンレスを減速材領域に均質に溶けたものを考える。

このような実効格子モデルの妥当性を検討するため、集合体体系を直接解く場合との比較計算を行った。集合体計算には、連続エネルギー・モンテカルロコード VIM²³⁾ 及び HCLWR 解析用に SRAC システムに新しく追加された、六角型燃料集合体用衝突確率ルーチンを使用した。

VIM はもともと ENDF/B-4 ライブライバーを使用するコードであるが、計算条件を等しくするため、SRAC で採用した JENDL-2 ライブライバーに合わせ、新たに JENDEL-2 に基づく VIM ライブライバーを作成した。これらの集合体計算では、Fig. 2.1 の集合体体系を近似することなく厳密に扱うことが可能である。Table 3.2 は、集合体計算と実効格子モデルによる、燃焼前高温全出力状態（Table 3.3 参照）の無限格子体系に対する中性子増倍率と各手法の計算時間を比較したものである。ただし、核分裂性 Pu 富化度は、初装荷炉心の平均富化度である 7.7w/o を使用した。集合体計算に関しては、VIM と SRAC の計算結果は良い一致を示している。一方、実効格子モデルによる SRAC の計算は、集合体計算に比べ、中性子増倍率を約 0.8% 過小評価している。Fig. 3.2 は、SRAC により得られた、集合体及び実効格子モデルによる格子平均スペクトルを比較したものである。実効格子モデルによる計算では、必ずしも実際の集合体平均スペクトルを充分反映しているとは言い難い。案内管等の存在により、減速材が局所的に存在する場合の方が、同じ V_m/V_p 値をもつ体系であっても、中性子スペクトルは柔らかくなり、中性子増倍率は大きくなる傾向がある。したがって、集合体体系による計算の方が好ましいが、燃焼計算まで行おうとすると、計算時間が膨大となり実用的ではない。そこで、今回の計算に関しては、敢えて Fig. 3.1 の右図で示される実効格子モデルを採用した。特に V_m/V_p が小さく、かつ案内管等が多く存在するような体系においては、集合体に核的等価となる実効モデルを検討する必要がある。ちなみに、現用 PWR のように燃料棒回りの減速材領域が大きい場合には、実寸格子を使

用しても、その V_m/V_p は集合体単位での値と大差ないため、このような実効格子モデル化は、HCLWR 格子の場合ほど重要とならない。

MOX 燃料の Pu 同位体組成は、3.2 w/o 濃縮ウランを、現用 PWR ($V_m/V_p \approx 1.9$) で 33 GWd/t まで燃焼させ、再処理前 6 年、再処理後 1 年冷却した場合に相当するものを仮定した (Table 3.4 参照)。この組成は、 V_m/V_p が約 1.9 である標準 4 ループ PWR を模擬した正方格子モデルを用いて、SRAC により格子燃焼計算を実施して求めたものである。ただし、7 年の冷却期間のうち、再処理前の 6 年間では、 ^{241}Pu の β 崩壊により生成される ^{241}Am は、再処理段階で除去され、後の 1 年間で蓄積するものとした。一般に、LWR の高燃焼度化により、Pu の組成は劣化する傾向にあるが、ウラン濃縮度を上げることにより長期燃焼化を図る場合には、同位体組成はそれほど大きく変化しない (Table 3.4 参照)。HCLWR の計算においては、ウラン燃料の場合と異なり、燃料の同位体組成が将来の炉型戦略に依存するため、このような燃料同位体組成の変化による核的挙動の変化を把握しておくことが重要である。本計算で採用した燃料、被覆管、減速材及び反射体に対する各核種の個数密度を Table 3.5 に示しておく。被覆管には 304 ステンレス・スチールを、減速材には定格運転時 (158 atm, 581 °K) に対応する軽水に 11.3% のステンレスを均質に混合させたものを仮定した。また、反射体にも 30% のステンレスを軽水に混合させてある。

格子燃焼計算の概要は以下の通りである。上述の実効格子モデル及び組成に基づき、実効共鳴断面積と多群格子スペクトルが衝突確率法により計算される。この際、スペクトル計算に炉心からの中性子の漏れを反映させるため、幾何学的バックリングを P 1 近似で取り込んだ。また、実効共鳴断面積計算法としては、サーマル・カットオフエネルギーから 131 eV までのエネルギー領域に対して超詳細群衝突確率法による中性子スペクトル計算ルーチン PEACO を使用し、それ以外のエネルギー範囲では、NR 近似に基づく、共鳴遮蔽因子のテーブル内挿法を採用した。燃焼計算はタイムステップ法により行われ、各燃焼ステップにおける格子計算に引き続き、一定出力の下で、燃焼チェーンに沿って、各燃焼核種の個数密度変化が計算される。燃焼チェーンモデルとしては、当初 45 F.P (Fission Products) 核種と 1 つの擬似 FP 核種を扱う飯島等のモデル⁵⁾ を使用していたが、稠密系では擬似 F.P 核種による中性子吸収の寄与が大きくなるため、現在は取り扱う F.P 核種を 65 核種まで拡張したモデルを採用している (Fig. 3.3)。また、重核種チェーンについても、当初 SRAC で採用していたモデルに、稠密系で中性子吸収効果が大きくなる Am, Cm¹¹⁾ を加えたモデル (Fig. 3.4) を使用した。さらに、NEACRP 国際ベンチマーク計算結果により従来 SRAC で使用してきた、核分裂あたりの放出エネルギー値が小さく、燃焼による反応度損失が過大評価されることが判明したため、今回の計算では Table 3.6 に示される値²⁴⁾ を使用した。各燃焼ステップで得られる多群実効断面積及び多群格子スペクトルを使用し、格子内領域平均及び群縮約が行われる。こうして得られた小数群巨視的断面積セットは、燃焼度を変数としてテーブル化され、炉心燃焼計算に備えられる。また、炉心燃焼計算には直接必要とされないが、後で行う、各種反応度、取り出し燃料組成等の計算に必要とされる、燃料組成の燃焼変化も同様にテーブル化される。なお、格子燃焼計算は、Table 3.7 に示される、高速 59 群、熱 31 群の全 90 群を行った。サーマル・カットオフエネルギーは 3.93 eV とした。共鳴計算法に関連して、中性子増

倍率に対し、若干の群構造依存性があるが、この群構造による HCLWR 系での解析結果は、連続エネルギー・モンテカルロコードによる計算値と良い一致を示す。²²⁾

3.2 炉心燃焼計算

炉心燃焼計算は、SRAC のサブコードである燃料管理コード HIST2 及び炉心燃焼計算コード COREBN 2 を組み合わせて行う。HIST2 コードは、炉心体系、使用する燃料体の登録の他、各燃焼ノード（燃焼度が一様であるとみなす領域）の燃焼度、組成等の編集機能を持つ。

COREBN 2 コードは、CITATION をベースに作成された、巨視的断面積内挿型の燃焼コードである。このコードでは、各燃焼ステップにおいて拡散計算を行い、炉内出力分布を得る。これに燃焼ステップ時間を感じて、各ノードの燃焼度増分とし、炉内の燃焼度分布を更新する。次に格子燃焼計算によりテーブル化された巨視的断面積を使用して、炉内各燃焼ノードに対応する巨視的断面積を、その燃焼度に対して内挿することにより作成し、次の燃焼ステップに移行する。燃焼ノードの燃料組成についても同様に内挿され、炉心内の燃料組成分布を得ることが可能である。また、COREBN 2 コードでは、断面積内挿後、炉内の熱中性子束分布に応じて、Xe の平衡濃度を算出し、熱群吸収断面積の補正が行われる。⁷⁾ この補正是、熱中性子束レベルに敏感な Xe の空間分布を、出力を一定とする一点炉近似による格子燃焼計算では正確に評価することができないために行われる。ただし、スペクトルが硬い HCLWR 系では、この補正効果は比較的小さくなる。

拡散計算は、Fig. 2.3 に示した 1/6 炉心に対し、三角メッシュを使用して径方向二次元計算により行った。軸方向の中性子漏洩は、幾何学的バックリング（cosine 分布）を用いて考慮する。この際、漏洩計算に使用する拡散係数には、方向依存（Benoist-D）のものを使用した。また、炉心計算では、Table 3.8 に示される高速 5 群及び熱 2 群からなる少数群構造を用いて行った。

炉心燃焼計算において、各サイクル間の燃料交換を行う場合には、Fig. 3.5 に示されるシャッフリング・パターンを使用した。これは予備計算により、平衡サイクルに対して、出力分布が平坦になるように最適化したものである。具体的には、各サイクルで燃焼度分布と、出力ピーキングが大きくなるサイクル初期の出力分布に基づき、前サイクルで出力密度が大きくなった所へ、燃焼度の大きい燃料体を配置して、順次燃焼計算を進める。そして、最終的に得られたシャッフリング・パターンを使用し、再び 1 サイクルから 6 サイクルまでの燃焼計算を行った。ただし、このシャッフリングパターンの決定では、3 層炉心の配置と炉の対称性を乱さないことを前提とした。

その他、予備計算としてメッシュ効果について検討を行った。拡散計算メッシュとして、フラット面ピッチが 20.6 cm の 1 燃料集合体を、1 分割（六角メッシュ）、6 分割（三角メッシュ）及び 24 分割（三角メッシュ）した場合について調べた。Fig. 3.6 は、初装荷炉心の燃焼前における中性子増倍率及び出力分布を、各分割方法に対して比較したものである。6 分割メッシュ及び 24 分割メッシュの両ケースについては、中性子増倍率及び出力分布は良い一致を示すが、六角メッシュを使用すると、フランクス分布が、Pu 富化度の高い炉周辺部で高くなり、中性子増倍率を過大評価する傾向がある。そこで、1 燃料集合体を 6 分割する三角メッシュを使用して拡散計算

を行うことにした。ただし、巨視的断面積の内挿が行われる燃焼ノードとしては、6つの三角メッシュ内で平均化される燃料集合体を1ユニットとして扱った。

3.3 転換率の定義と計算法

転換率は、高転換軽水炉の性能評価において重要な指標の1つとなる。ところが、高転換軽水炉の研究を行っている各研究機関により、その定義式あるいは計算法が異なり、しばしば混乱を招くことがある。そこで本節において、その定義式及び計算法を明確にしておく。

一般に、炉物理の上で転換率(CR)と呼ばれる量は、(3-2)式で表され、燃焼時間あるいは燃焼度と共に増大する(Fig. 3.7 参照)。

$$\text{Instantaneous Conversion Ratio (CR)} = \frac{P(t)}{C(t)} \quad (3-1)$$

$P(t)$: fissile production rate = fertile capture rate

$C(t)$: fissile consumption rate

格子燃焼計算の場合には、各タイムステップ毎に得られる燃料領域の一群縮約微視的断面積及び個数密度を使用し、次式により $P(t)$ 及び $C(t)$ が算出される。

$$P(t) = \sum_i N_i(t) \sigma_{ci}(t) \phi(t) \quad i : {}^{238}\text{U}, {}^{240}\text{Pu} \quad (3-2)$$

$$C(t) = \sum_j N_j(t) \sigma_{aj}(t) \phi(t) \quad j : {}^{235}\text{U}, {}^{239}\text{Pu}, {}^{241}\text{Pu} \quad (3-3)$$

${}^{241}\text{Pu}$ は約14年の半減期で減衰するため、これを考慮し、(3-3)式の代りに、(3-4)式を使用することがあり、この場合、転換率は若干小さく評価されることになる。

$$C(t) = \sum_j \{ N_j(t) \sigma_{aj}(t) \phi(t) + \lambda_j N_j(t) \} \quad (3-4)$$

$$\lambda({}^{241}\text{Pu}) = 1.68 \text{ E-9 (sec}^{-1})$$

$$\lambda({}^{235}\text{U}, {}^{239}\text{Pu}) \approx 0$$

仏のフライアム社では、減損ウラン中の ${}^{235}\text{U}$ (0.2 w/o) は、核燃料サイクル上無価値であるとの考え方から、(3-3)式で ${}^{235}\text{U}$ を対象外とした Pu 生成率(Pu Generation Ratio)を転換率の代りに使用している。フライアム社の設計炉心の場合³⁾、45 GWD/t 燃焼時点での Pu 生成率は転換率に比べ0.06程度大きくなる。さらに、Pu 生成率の計算上、各同位体に Baker-Ross の方法により算出された等価係数 (${}^{239}\text{Pu}$: 1.0, ${}^{241}\text{Pu}$: 1.75) を掛けて ${}^{239}\text{Pu}$ と等価であるとしているため、 ${}^{239}\text{Pu}$ が焼失し ${}^{241}\text{Pu}$ の存在率が高くなる燃焼末期において、Pu 生成率は等価係数を使用しない場合に比べ大きな値となる。炉心性能を比較する際、これらの転換率あるいは Pu 生成率の定義及び計算法に注意する必要がある。本報告においては、格子計算の場合、(3-1)式～(3-3)式～(3-4)式を使用して転換率の計算を行った。

Fig. 3.7 に、PWR を模擬した格子計算により得られた転換率が示してある。燃焼前において現用 PWR の転換率は約 0.46 であり、33 GWD/t の燃焼度時点で約 0.74 となる。したがって、このように定義される転換率は、常にどの時点(燃焼度)での値かを注意する必要がある。燃焼前の転換率は、特に初期転換率(Initial Conversion Ratio)と呼ばれ、燃焼計算を行わないパラメータ・サーベイ等で使用されることがある。このような瞬時の転換率は、燃焼度と共に刻々と変化する量であるため、炉心性能評価には向かない。そこで、この転換率を到達燃焼度時点

まで時間平均したものを、平均転換率（Average Conversion Ratio）と称して採用する(3-5式)。(3-6)式により平均転換率を定義する場合もあるが、通常これらの両式で得られる値に大差は見られない。

$$\text{Average Conversion Ratio (ACR)} = \frac{\int_0^{t_0} CR(t) dt}{\int_0^{t_0} dt} \quad (3-5)$$

$CR(t) = P(t)/C(t)$, t_0 : 燃焼末期

$$ACR' = \frac{\int_0^{t_0} P(t) dt}{\int_0^{t_0} C(t) dt} \quad (3-6)$$

PWR の場合、平均転換率は約 0.6 となる。ただし、このように定義される平均転換率は、核分裂性物質の残存率を示す量とはならない。したがって、炉型戦略あるいは、再処理量等を考える場合には平均転換率は実用的であるとは言えず、核分裂性物質の残存率を示す量として、核分裂性物質インベントリ比 (Fissile Inventory Ratio) を使用する。

$$\text{Fissile Inventory Ratio (FIR)} = \frac{\sum_i N_i (t = t_0)}{\sum_i N_i (t = 0)} \quad (3-7)$$

$i : {}^{235}\text{U}, {}^{239}\text{Pu}, {}^{241}\text{Pu}$

FIR は広義の転換率として認識されており、CR や ACR と混同されることが多いので注意を要する。当研究室においては、FIR を FSR (Fissile Surviving Rate) と称して使用している。同様の定義式で、 ${}^{235}\text{U}$ を無視する場合には FPSR (Fissile Pu Surviving Rate), 全Pu を考慮する場合には PSR (Pu Surviving Rate) として区別している。Fig. 3.7 に、PWR の FIR が示してある。33 GWd/t の取り出し燃料中に存在する核分裂性物質は、炉心への装荷時の45%程度であることが分かる。

転換率の評価は、一点炉近似による格子燃焼計算で間に合わず場合が多いが、SRAC システムでは、より厳密な手法により、炉内の燃焼度分布、フランクス分布を考慮した転換率及び核分裂性物質の残存率を、炉心計算段階で得ることが可能である。炉心燃焼計算で転換率及び残存率を評価する場合には、次の式が採用される。

$$CR(t) = \frac{\sum_{I,G} \Sigma_c^{\text{fer}} (I, G, t) \phi (I, G, t) V(I)}{\sum_{I,G} \Sigma_a^{\text{fiss}} (I, G, t) \phi (I, G, t) V(I)} \quad (3-8)$$

I : 炉内メッシュ位置

G : 少数群番号

$$FIR = \frac{\sum_I \sum_i N_i (I, t = t_0) V(I)}{\sum_I \sum_i N_i (I, t = 0) V(I)} \quad (3-9)$$

$i : {}^{235}\text{U}, {}^{239}\text{Pu}, {}^{241}\text{Pu}$

ここで Σ_c^{fer} , Σ_a^{fiss} は、各々少数群に縮約された格子平均の親物質中性子捕獲断面積及び核分裂性物質の中性子吸収断面積を示す。これらの断面積は、他の拡散計算用の断面積同様に、燃焼度に

対してテーブル化されており、メッシュ点 I の燃焼度に対して内挿することにより得られる。核分裂性物質の残存率についても、炉内各領域で燃焼度に対する内挿により得られる燃料組成を基に、(3-9) 式により計算される。この手法により、炉内の燃焼度分布、中性子スペクトル及び空間分布を反映した転換率を得ることが可能となる。ただし、炉心内の全メッシュ点に対して (3-8) 式を適用して得られる炉心転換率は、取り替え燃料富化度に対する格子燃焼計算より得られる転換率と必ずしも対応しない。格子燃焼計算で得られる転換率は、注目している燃料の燃焼履歴に沿った変化を表わす。したがって、燃焼初期における転換率は、全く燃焼していない装荷燃料に対する値であり、燃焼末期における転換率は、取り出し燃料に対する値となる。一方、炉心計算の場合、3 バッチ炉心であれば、全く燃焼度の異なる 3 領域の平均値である転換率が得られる。すなわち、3 バッチ炉心の場合には、格子計算上の転換率 (CR) と炉心計算上の転換率 (CR*) は、次のような近似式で関係付けられる。ただし、 t_0 は装荷時から取り出し時までの全燃焼期間を示す。 $t_0/3$ が炉心のサイクル燃焼期間となる。

$$CR^*(BOC) \approx \{ CR(0) + CR(\frac{1}{3} t_0) + CR(\frac{2}{3} t_0) \} / 3 \quad (3-10)$$

$$CR^*(EOC) \approx \{ CR(\frac{1}{3} t_0) + CR(\frac{2}{3} t_0) + CR(t_0) \} / 3 \quad (3-11)$$

$$ACR = \frac{\int_{BOC}^{EOC} CR^*(t) dt}{\int_{BOC}^{EOC} dt} \approx \frac{\int_0^{t_0} CR(t) dt}{\int_0^{t_0} dt} \quad (3-12)$$

我々の望む炉心は、高燃焼度が達成される上で、核分裂性核種の残存率 (FIR) が大きくなるものである。燃焼度が低ければ、転換率の良さとは関係なく、必然的に FIR は大きくなる。逆に、燃焼度が高ければ、転換率の良い炉心であっても FIR は小さくなる。したがって、FIR を広義の転換率として認識する場合には、常に取り出し燃料の燃焼度と照らして炉心性能を評価する必要がある。そこで、高転換軽水炉の炉心性能を評価する 1 つの指標として、正味燃焼度 (B_{net}) を (3-13) 式により定義する。

$$B_{net} = B / \{ \frac{\epsilon}{100} (1 - FSR) \} \quad (3-13)$$

B : 取り出し燃料燃焼度 (GWd/t)

ϵ : 平衡サイクル装荷燃料の核分裂性核種の富化度

FIR : 核分裂性核種の残存率

これは、核分裂性核種 1 t の実質消費（装荷量 - 残存量）より得られるエネルギー量として定義され、対象とする炉の核分裂性物質の有効利用率を評価する際に使用する。

3.4 反応度係数と制御棒反応度価値の計算手法

反応度係数としては、以下の 4 つのものについて評価を行った。それらは減速材ボイド反応度係数、減速材密度係数、減速材温度係数、及び燃料温度（ドップラ）係数である。これらのうち最初の 3 つの反応度係数は、いずれも減速材の密度変化に起因する量であるため、減速材密度係

数と減速材温度係数については、定格運転時近傍のボイド係数（ボイド率 0 ~ 10%）を換算することにより評価した。この際、定格運転時（高温全出力状態、0 % ボイド）の減速材密度は 0.71 g/cm^3 、単位温度上昇あたりの減速材密度変化は、 $-2.1 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3/\text{°C}$ とした。一般的には、減速材温度係数の場合、定格運転時の減速材温度を基準として、 $\pm 5^\circ\text{F}$ ($\sim 2.8^\circ\text{C}$) の温度変化に対して計算される。これは、ボイド率に換算すれば $\pm 2\%$ ボイドに相当する。

減速材ボイド率あるいは燃料温度が変化した場合の反応度の計算は、炉内のすべての燃料が新燃料からなる第 1 サイクル燃焼初期においては容易であるが、燃焼が進んだ時点では煩雑となる。これは、炉内の各燃焼ノードが個別の組成をもつようになるためである。そこで、平衡サイクルにおけるボイド炉心の計算では次のような方法を採用した。炉内の各燃焼ノード（燃料集合体に相当）毎に、その燃焼度から内挿されて得られる燃料組成を使用し、ノード毎に格子計算を行いボイド時の巨視的断面積を作成する。この断面積を使用して炉心計算を行い、ボイド炉心の反応度を得ることができる。ただし、ボイド炉心の計算の際、径方向反射体を含めて均一ボイドを仮定した。なお、ボイド反応度係数は (3-14) 式の定義に従い評価を行った。

$$\text{Void Coefficient} = \ln \left\{ \frac{k_{\text{eff}} (x \% \text{ void})}{k_{\text{eff}} (0 \% \text{ void})} \right\} \times 10^5 / x \quad (3-14)$$

[pcm/% void]

燃料温度係数の計算においては、計算量が多くなる各燃焼ノード毎に巨視的断面積を作成する方法を避け、より簡便な断面積内挿法を採用した。先ず、定格運転状態に対する格子燃焼計算結果から、各燃焼ステップにおける燃料組成を読み取る。この組成の下に、燃料ペレット部の温度を上げた状態で格子計算を行い巨視的断面積を作成し、燃焼度に対してテーブル化する（昇温時テーブル）。次に平衡サイクルまで炉心燃焼計算を行った後、定格運転時用の巨視的断面積テーブルを昇温時テーブルで置きかえ、燃焼度に対して内挿され得られる巨視的断面積を使用して炉心計算を行う。この手法の長所は、三次元計算の場合のように燃焼ノード数が多くなっても、断面積作成の手間が少なくてすむことである。このため、一般的にはこの内挿手法により、ボイド係数や温度係数が計算されることが多い。両手法の差は、各燃焼ノードの燃焼度に対し、燃料組成の段階で内挿を行うか、ボイド時あるいは昇温時巨視的断面積の段階で内挿を行うかによるものであり、これらの手法による計算結果は、格子燃焼計算ステップ幅が充分小さくしてあれば良い一致を示す。

制御棒の反応度価値計算は、その計算手法と HCLWR-J1 における反応度制御の可能性を検討するために行ったものであり、今回の計算では詳細な炉心計算まで行わず、無限格子体系を使用して制御棒の反応度価値を概算評価した。計算は、Fig. 3.8 に示される燃料集合体の無限体系に対して、SRAC 及び VIM コードを使用して行った。SRAC による計算では、集合体を直接衝突確率法で解く方法に加え、Fig. 3.9 に示されるモデルを使用する簡便手法 (2-step cell calculation)²⁵⁾ も採用し、その精度を検討した。²⁶⁾ 核分裂性 Pu の富化度としては、初装荷炉心の体積平均値である 7.7 w/o を仮定してある。制御棒要素の仕様は、Table 3.9 に示したものを使用し、¹⁰B 富化度が 19.6 % (天然), 50% 及び 90% の場合について制御棒反応度価値を評価した。

Table 3.1 Volume Fraction of Each Material
in Fuel Assembly of HCLWR-J1

Fuel Pellet (MOX)	46.4 %
Pellet-Cladding Clearance	2.1 %
Cladding (SS)	9.3 %
Rib (SS)	2.1 %
Moderator* (H_2O)	37.4 %
Structure etc. (SS)	2.6 %

* : including water clearance between assemblies

Table 3.2 Comparison of k_{∞} and Elapsed CPU Time
by Each Cell Calculation Method

Method	Effective Cell(SRAC)	Assembly (SRAC)	Assembly (VIM-JENDL2)
k_{∞}	1.0921	1.1030	$1.1061 \pm 0.0030^*$
CPU time	34 sec.	19 min.	40 min.

* : 1.0×10^5 historiesTable 3.3 Material Temperature and Moderator
Density in Each Condition

Condition	Temperature (K)			Moderator Density (g/cm ³)
	Fuel	Clad	Moderator	
Hot Full Power	1000	600	581	0.71
Hot Zero Power	581	581	581	0.71
Cold Zero Power	300	300	300	0.997

Table 3.4 Assumed Fuel Isotope Vector for HCLWR

* Pu and Am-241	depleted U
Pu-239 57.8 (55.7) wt%	U-235 0.2 wt%
Pu-240 24.9 (26.4)	U-238 99.8
Pu-241 11.1 (10.9)	
Pu-242 5.7 (6.5)	
Am-241 0.5 (0.5)	

* : Fuel burned up to 33000Mwd/t in PWR with 3.2wt% enriched UO₂ and cooled for 7 years (6 years before reprocessing)
 () : 40000Mwd/t in PWR with 3.7wt% UO₂

Table 3.6 Energy Release from Fission of Each Nuclide
(Modified Burnup Data of SRAC Library)

Nuclide	MeV / fission	J / fission
U-235	202.62	3.2464E-11
U-238	205.92	3.2992E-11
Pu-239	211.69	3.3917E-11
Pu-241	213.46	3.4200E-11
U-233	200.32	3.2095E-11
Th-232	194.26	3.1124E-11

Table 3.5 Atomic Number Densities ($\times 10^{24}$ atoms/cm 3)

Fuel(MOX)			
Nuclide	6.5wt.%	7.5wt.%	9.0wt.%
U -235	4.0019E-5	3.9378E-5	3.8417E-5
U -238	1.9718E-2	1.9402E-2	1.8929E-2
Pu-239	1.1854E-3	1.3678E-5	1.6413E-3
Pu-240	5.0889E-4	5.8719E-4	7.0464E-4
Pu-241	2.2481E-4	2.5940E-4	3.1129E-4
Pu-242	1.1445E-4	1.3206E-4	1.5847E-4
Am-241	1.0219E-5	1.1791E-5	1.4149E-5
Oxygen	4.3603E-2	4.3599E-2	4.3594E-2

Cladding(SS304)		Moderator(Water+11.3%SS)		Reflector(Water+30%SS)	
Fe	5.9620E-2	6.7073E-3		1.7886E-2	
Cr	1.7380E-2	1.9553E-3		5.2140E-3	
Ni	8.0980E-3	9.1103E-4		2.4294E-3	
Mn	8.6590E-4	9.7414E-5		2.5977E-4	
		Hot(581K)	Cold(300K)	Hot(581K)	Cold(300K)
H		4.2163E-2	5.9178E-2	3.3256E-2	4.6675E-2
O		2.1082E-2	2.9589E-2	1.6628E-2	2.3338E-2

Table 3.7 Fine Energy Group Structure for Cell Calculation

Total number of user's fast groups 59

Total number of user's thermal groups 31

Group	E _{upper} (ev)	ΔU	Group	E _{upper} (ev)	ΔU
<<< Fast >>>					
1	0.10000E+08	0.2500	47	0.10130E+03	0.2500
2	0.77880E+07	0.2500	48	0.78893E+02	0.2500
3	0.60653E+07	0.2500	49	0.61442E+02	0.2500
4	0.47237E+07	0.2500	50	0.47851E+02	0.2500
5	0.36788E+07	0.2500	51	0.37266E+02	0.2500
6	0.28651E+07	0.2500	52	0.29023E+02	0.2500
7	0.22313E+07	0.2500	53	0.22603E+02	0.2500
8	0.17377E+07	0.2500	54	0.17604E+02	0.2500
9	0.13534E+07	0.2500	55	0.13710E+02	0.2500
10	0.10540E+07	0.2500	56	0.10677E+02	0.2500
11	0.82085E+06	0.2500	57	0.83153E+01	0.2500
12	0.63928E+06	0.2500	58	0.64760E+01	0.2500
13	0.49787E+06	0.2500	59	0.50435E+01	0.2500
<<< Thermal >>>					
14	0.38774E+06	0.2500	60	0.39279E+01	0.2500
15	0.30197E+06	0.2500	61	0.30590E+01	0.2500
16	0.23518E+06	0.2500	62	0.23824E+01	0.2500
17	0.18316E+06	0.2500	63	0.18554E+01	0.1250
18	0.14264E+06	0.2500	64	0.16374E+01	0.1250
19	0.11109E+06	0.2500	65	0.14450E+01	0.1250
20	0.86517E+05	0.2500	66	0.12752E+01	0.1250
21	0.67380E+05	0.2500	67	0.11253E+01	0.1250
22	0.52475E+05	0.2500	68	0.99312E+00	0.1250
23	0.40868E+05	0.2500	69	0.87643E+00	0.1250
24	0.31828E+05	0.2500	70	0.77344E+00	0.1250
25	0.24788E+05	0.2500	71	0.68256E+00	0.1250
26	0.19305E+05	0.2500	72	0.60236E+00	0.1250
27	0.15034E+05	0.2500	73	0.53158E+00	0.1250
28	0.11709E+05	0.2500	74	0.46912E+00	0.1250
29	0.91188E+04	0.2500	75	0.41399E+00	0.1252
30	0.71017E+04	0.2500	76	0.36528E+00	0.1252
31	0.55308E+04	0.2500	77	0.31961E+00	0.1432
32	0.43074E+04	0.2500	78	0.27699E+00	0.1541
33	0.33546E+04	0.2500	79	0.23742E+00	0.1670
34	0.26126E+04	0.2500	80	0.20090E+00	0.1823
35	0.20347E+04	0.2500	81	0.16743E+00	0.2006
36	0.15846E+04	0.2500	82	0.13700E+00	0.2228
37	0.12341E+04	0.2500	83	0.10963E+00	0.2498
38	0.96112E+03	0.2500	84	0.85397E-01	0.2882
39	0.74852E+03	0.2500	85	0.64017E-01	0.3352
40	0.58295E+03	0.2500	86	0.45785E-01	0.4029
41	0.45400E+03	0.2500	87	0.30602E-01	0.5051
42	0.35357E+03	0.2500	88	0.18467E-01	0.6773
43	0.27536E+03	0.2500	89	0.93805E-02	1.0320
44	0.21445E+03	0.2500	90	0.33423E-02	5.8117
45	0.16702E+03	0.2500			1.00000E-05
46	0.13007E+03	0.2500			

Table 3.8 Coarse Energy Group Structure for Core Calculation

	Group	Upper Energy(eV)	Lower Energy(eV)
Fast Energy Range	1	1.0000E+7	8.2085E+5
	2	8.2085E+5	6.7380E+4
	3	6.7380E+4	9.1188E+3
	4	9.1188E+3	1.3007E+2
	5	1.3007E+2	3.9279E 0
Thermal Range	6	3.9279E 0	4.1399E-1
	7	4.1399E-1	1.0000E-5

Table 3.9 Specifications of Rod Cluster Control Elements (RCC) in HCLWR-J1

Number of Control Elements per Assembly	24
Guide Tube Outer Diameter	1.11 cm
Guide Tube Inner Diameter	1.03 cm
Control Element Outer Diameter	0.86 cm
Cladding Thickness	0.05 cm
Guide Tube & Cladding Material	SS 304
Absorber Outer Diameter	0.76 cm
Absorber Material	B ₄ C
Absorber Density	2.2 g/cm ³
Number Density for B ₄ C Absorber (x10 ²⁴ n/cm ³)	
¹⁰ B Enrichment	19.6%(natural)
50%	50%
90%	90%
¹⁰ B	1.8806E-2
¹¹ B	7.7145E-2
C	2.3990E-2
	4.9060E-2
	4.9060E-2
	2.4530E-2
	9.1003E-2
	1.0111E-2
	2.5279E-2

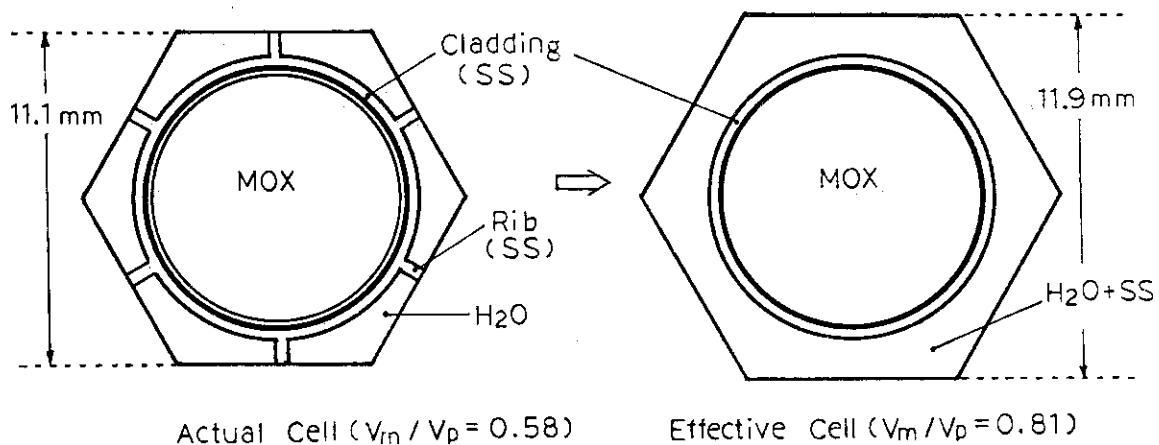


Fig. 3.1 Cell burnup calculation model (effective cell equivalent to fuel assembly)

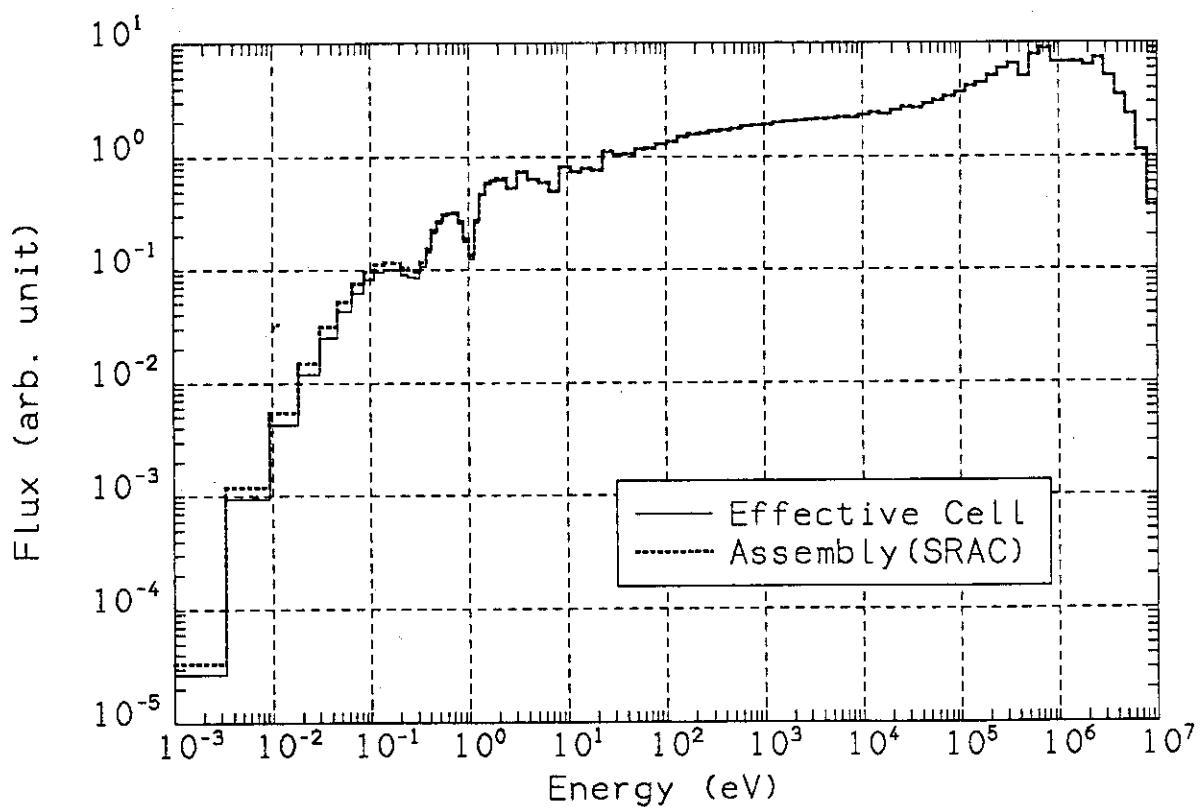


Fig. 3.2 Comparison of neutron spectra by calculation model (whole fuel assembly and effective unit pin cell)

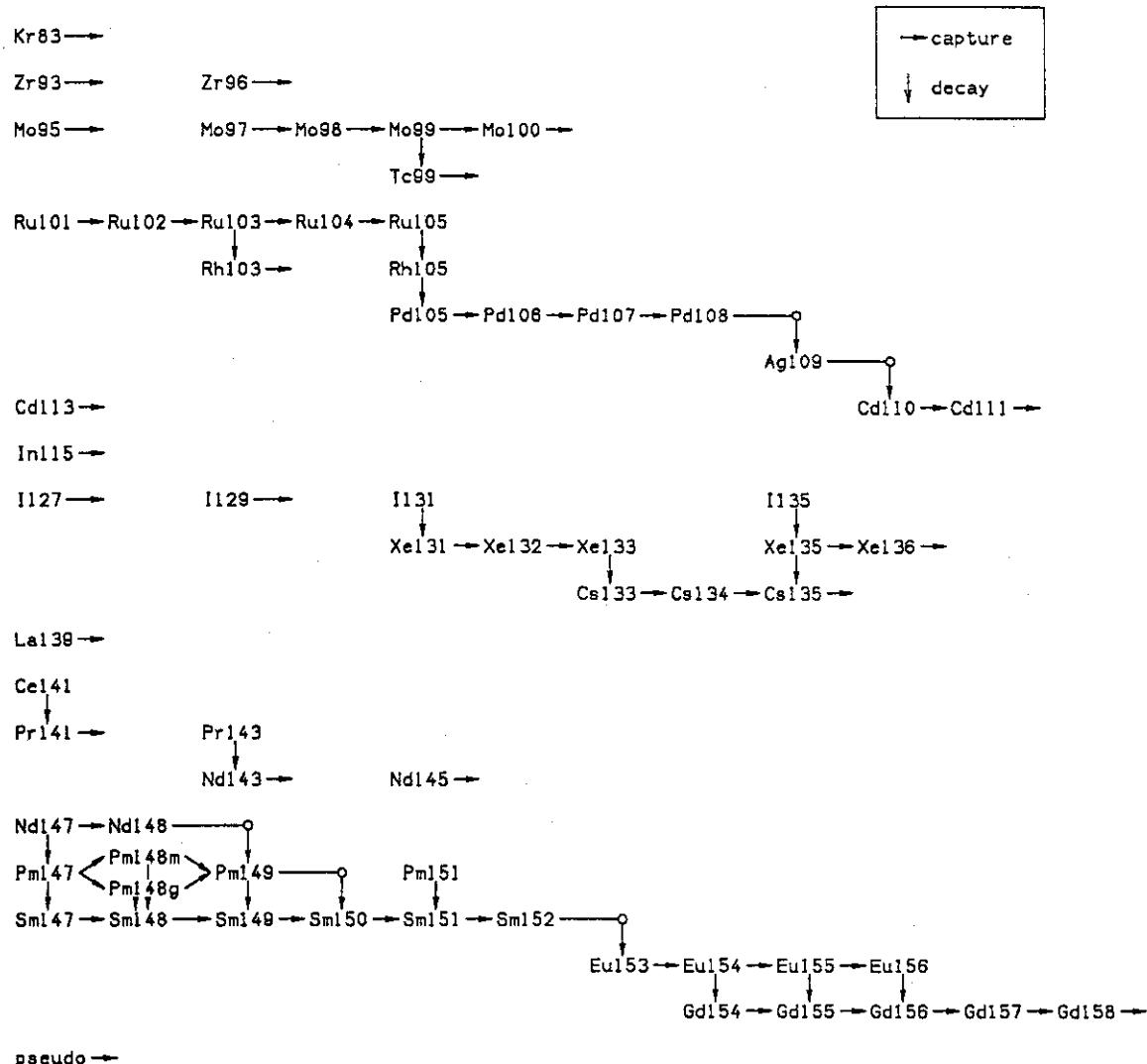


Fig. 3.3 Fission products chain model for cell burnup calculations
(65 explicit and 1 pseudo F.P.)

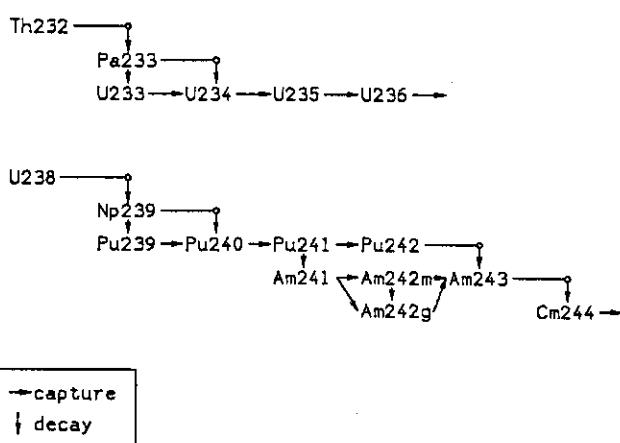


Fig. 3.4 Heavy nuclide chain model for cell burnup calculations

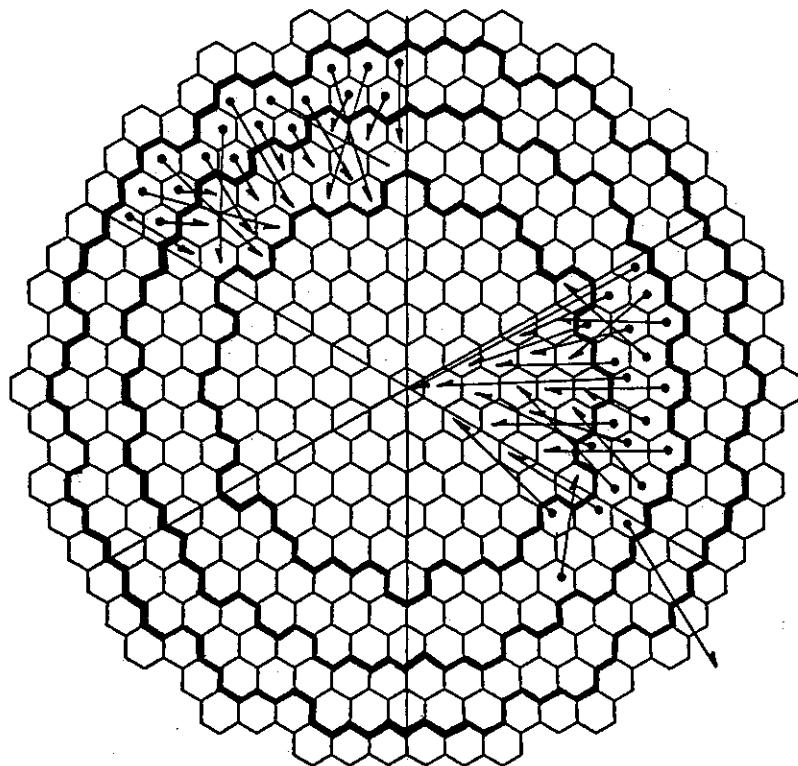


Fig. 3.5 Optimized shuffling pattern

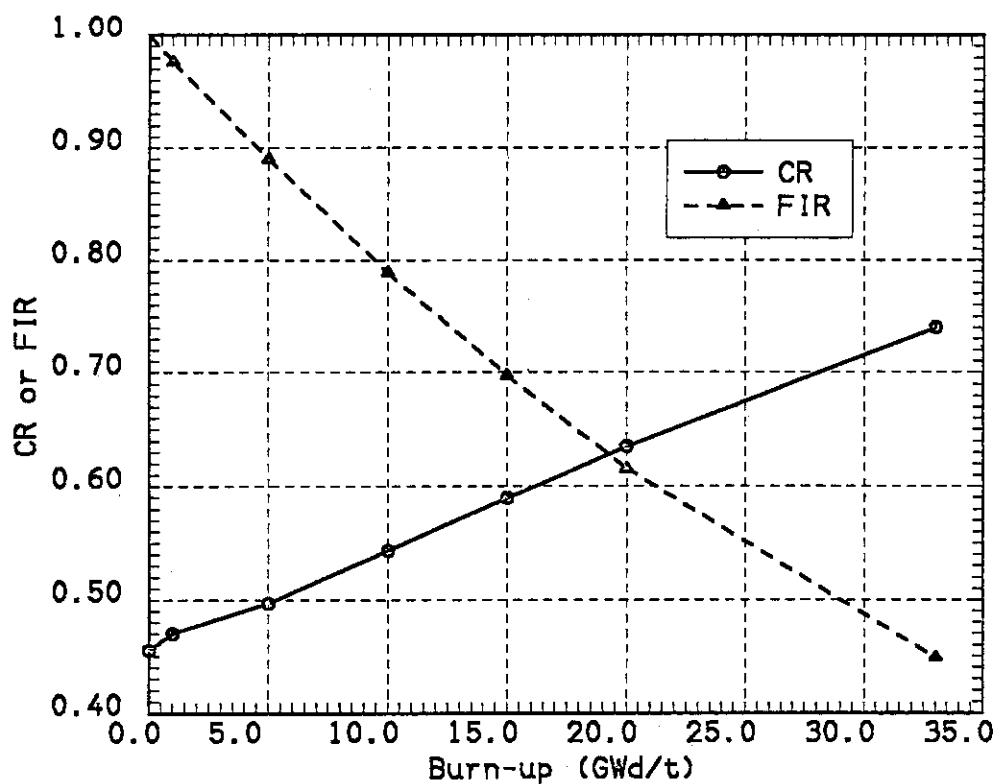


Fig. 3.7 Burnup dependence of conversion ratio(CR) and fissile inventory ratio(FIR) of current PWR evaluated by cell burnup calculation

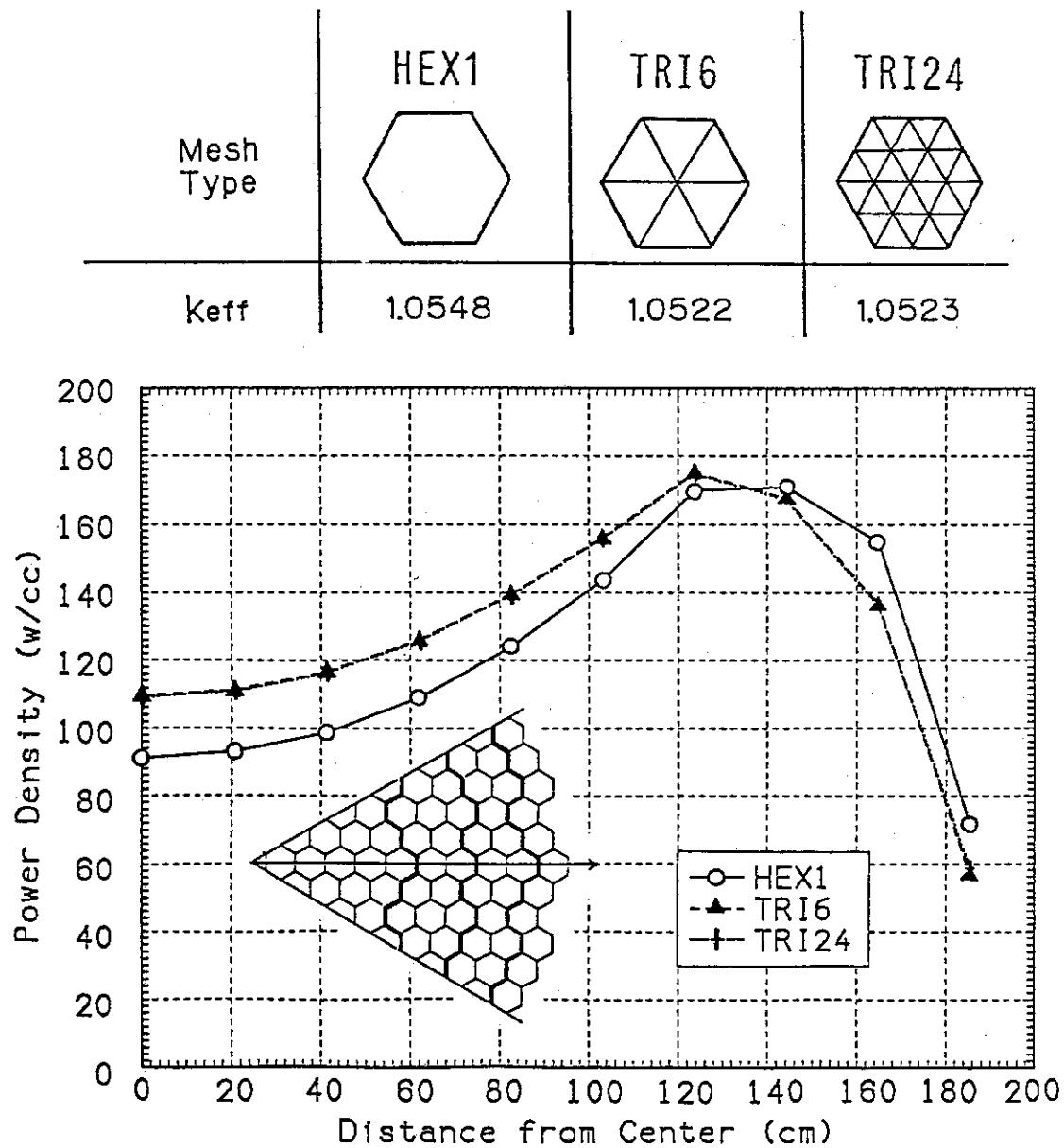


Fig. 3.6 Mesh effects to k_{eff} and power distribution in HCLWR-J1
(beginning of the first cycle)

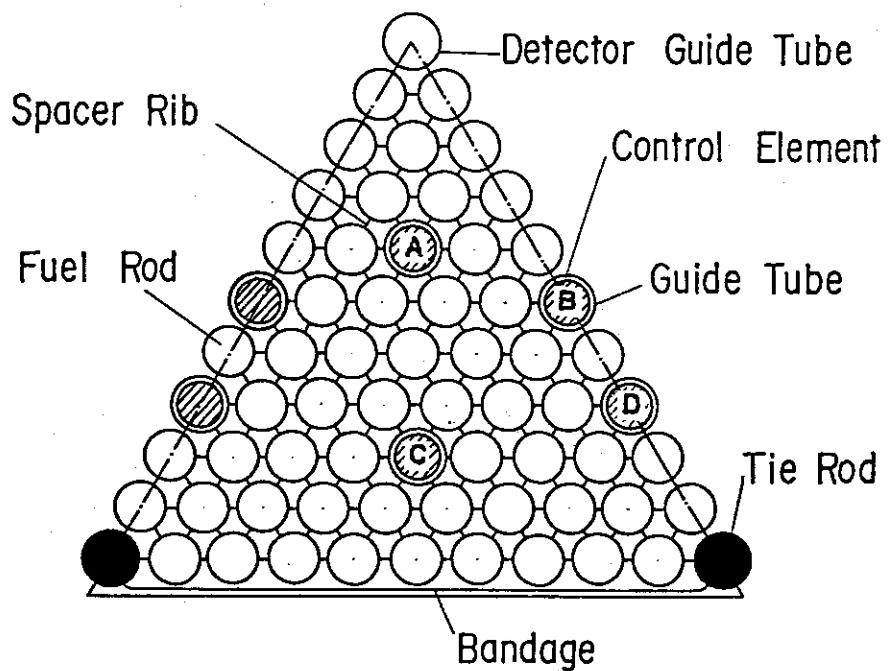


Fig. 3.8 1/6 geometry for control rod worth calculations
(A^D : index of control element position)

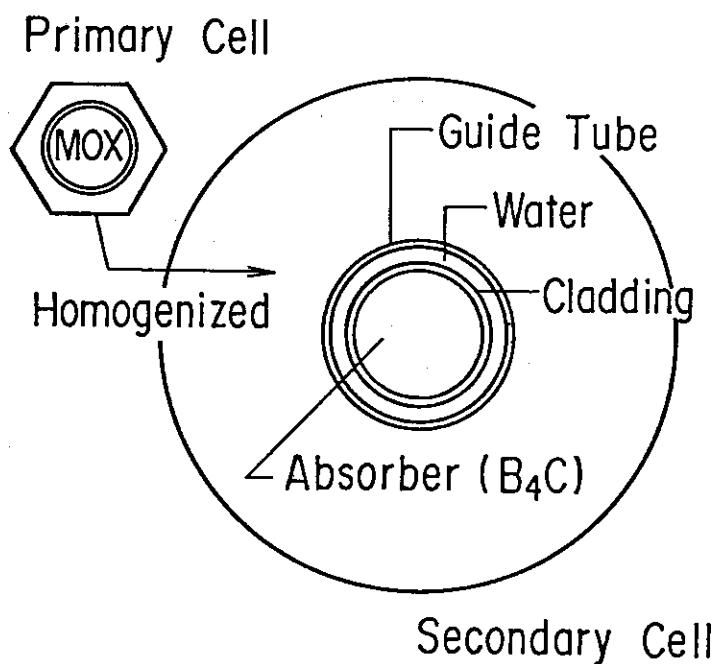


Fig. 3.9 Simplified model for control rod worth calculation
(2-step cell calculation)

4. 計算結果と検討

4.1 格子燃焼計算による予測

前章で述べたように、炉心燃焼計算に先立ち、格子燃焼計算が行われる。この際、各燃焼ステップで、一点炉近似による実効中性子増倍率 (k_{eff}) 及び転換率 (CR) が計算される。取り替え燃料富化度を持つ燃料棒格子に対して、このような燃焼データを得ることにより、多バッチ炉心の平衡サイクル燃焼特性を近似的に予測することが可能である。Fig. 4.1 は、3 バッチ炉心に対する到達燃焼度の予測法を模式的に示したものである。3 バッチの場合には、平衡時取り出し燃料の燃焼度は、 k_{eff} のラインが臨界点 ($k_{\text{eff}} = 1.0$) を通る時点の 1.5 倍として求めることができる。一般には、n バッチ炉心とすると、1 バッチ炉心に対し、 $2n/(n+1)$ 倍の燃焼度を得ることが期待されるが、サイクル燃焼期間は逆に $2/(n+1)$ 倍と短くなる。Fig. 4.2 は、HCLWR-J1 の取り替え燃料 (Pu^{fiss} 富化度：9.0 w/o) に対する格子燃焼計算結果である。この図より、3 バッチ炉心とした場合、約 45 GWd/t の燃焼度が期待できることが分かる。また、Fig. 4.3 には、核分裂性核種 (^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu の総和) の焼失の様子を、燃焼初期において規格化し、現用 PWR の場合と比較して示してある。PWR の場合、33 GWd/t の取り出し燃焼度において、装荷時核分裂性核種の 45% が残るにすぎないが、HCLWR では、同燃焼度において 88%, 45 GWd/t まで燃焼しても 85% の残存率となる。

Table 4.1 に格子燃焼計算結果により予測される、3 バッチ炉心の燃焼性能をまとめた。基本的なパラメータ・サーベイ等の場合には、炉心燃焼計算は行わず、本節で述べた手法により炉心性能を評価することが多い。Table 4.1 の値を、後に示す炉心燃焼計算結果と比較することにより、格子燃焼計算による燃焼特性評価の予測精度を把握することができる。

4.2 HCLWR-J1 の燃焼性能

一点炉近似に基づく格子燃焼計算により、ある程度の燃焼性能を把握することはできるが、より詳細な特性量を得るためにには、炉心燃焼計算が不可欠となる。本節では、径方向二次元拡散計算に基づく燃焼計算の結果を総括する。

Fig. 4.4 は、炉心燃焼計算により得られた、初装荷炉心から 6 サイクル燃焼末期までの、中性子増倍率、燃焼度及び径方向出力ピーキング係数 (FR) を示したものである。第 3 サイクル以降、初装荷燃料の影響はほぼ無くなり平衡燃焼に至る。第 1 サイクルでは、炉心の全領域が新燃料からなり、Xe 及び Sm による反応度低下が平衡時に比べて大きく、サイクル燃焼期間は短くなる。平衡時におけるサイクル期間は、約 370 FPD (Full Power Days) であり、現用 PWR の 1.3 倍程度となる。また、取り出し燃料（第 2 領域からの 5 燃料集合体を含む）燃焼度は約 36.4 GWd/t である。これは、前節で述べた格子燃焼計算による予測値の約 80% に相当する。格子燃焼計算は、一点炉近似で行われるため、燃焼度分布は完全に一様であると仮定して中性子増倍率

の計算がなされる。これに対し、実際の炉心では、一般に富化度の高い新燃料を、インポータンスが小さい炉心周辺部に配置する。さらに、燃焼が進み核分裂性物質が焼失するとともにF.P.が蓄積した燃料を炉心中央部へ配置するため、炉心計算による中性子増倍率は、格子計算による予測値を下まわることになる。仮に、燃焼初期において均質な炉心であっても、有限な体系であればその出力分布に応じて燃焼度分布ができ、燃焼が進むにつれ、一点炉近似の予測値からはずれていく。すなわち、格子計算による燃焼度の予測値は、理想的な燃焼条件における上限値であると考えるべきであり、一般には多次元計算に移行するにつれ、格子計算による予測値を下まわる結果が得られる。

出力ピーピング係数に関しては、各サイクルの燃焼初期において極大となり、また、初装荷炉心に比べ、平衡炉心の場合の方が大きくなる。Fig. 4.4で、第2サイクル初期でピーピングが大きくなっているのは、便宜的に平衡サイクル用に最適化したシャックリングパターンを、初装荷炉心燃焼末期の燃料体に対して適用したためである。Fig. 4.5は、平衡サイクル（第6サイクルで代表）燃焼初期及び末期における径方向出力分布を示したものである。3層炉心でアウト・イン燃料交換方式を採用したため、燃焼度の高い炉心中央領域で出力分布は指數関数的になり、第2領域で出力分布は極端なピークを作る。このため径方向の出力ピーピング係数は1.45と、稠密炉心としては比較的大きな値となる。径方向のピーピングをさらに下げるためには、炉心内部2領域を一様に混合するような装荷パターンに変更することが望ましい。Fig. 4.6～Fig. 4.12に各サイクル燃焼初期及び第6サイクル末期における出力密度のマップを示しておく。ただし図中の値は、各集合体領域中の6つの三角メッシュ点の平均出力密度である。また、Fig. 4.13～Fig. 4.18には、各サイクル燃焼末期における燃焼度のマップが示してある。炉心平均の燃焼度は、各サイクル間で新燃料（燃焼度0 GWd/t）が装荷されるため、Fig. 4.4に示されるように、鋸歯状変化をする。取り出し燃料平均燃焼度は、3サイクル期間燃焼する第3サイクル以降一定となり、約36.4 GWd/tとなる。また、平衡サイクルにおける燃料集合体の最大燃焼度は、44.3 GWd/tである。

転換率は、3.3節で述べた定義及び手法に基づき計算した。Fig. 4.19は、炉心領域全体における転換率(CR)の燃焼度変化を、第6サイクル末期まで示したものである。転換率は、燃焼度と共に増加するため、炉心平均の燃焼度変化(Fig. 4.4参照)と同様に鋸歯状変化をする。ただし第1、第2サイクルでは、Pu富化度が小さい燃料が装荷されているため、一時的に高い転換率を示す。Fig. 4.19の第6サイクルにおいて、BOCからEOCまで時間平均した平均転換率(ACR)は、0.791となる。

Table 4.2は、平衡サイクル取り出し時におけるF.P.及び重核種の平均組成を示したものである。これらは、燃焼度からテーブル内挿により得られた各集合体の組成を取り出し燃料集合体に対して平均化して得られる。この取り出し燃料組成と装荷時の組成(Table 3.5参照)から、FIRは(3-9)式により計算され、0.870となる。減損ウラン中の0.2 wt% ^{235}U をMOX燃料炉心では無価値であると考える場合には、核分裂性Puの残存率(FPSR)をFIRに代って使用する。この場合、FPSRは0.875となる。

(3-13)式により定義される正味燃焼度は、現用PWRの場合、約1900 GWd/tである。これに対し、HCLWR-J1では、3111 GWd/tとなる。したがって、核分裂性UとPuが等価であ

ると仮定し、再処理段階におけるFIRのロスを無視すれば、HCLWR-J1の核分裂性核種の有効利用率は、現用PWRの約1.64倍となる。本来、核分裂性核種の単位インベントリの燃焼により得られるエネルギー量は、ほぼ一定であるから(Table 3.6参照)，これらの正味燃焼度の差は、各炉心において親物質が転換され、その核分裂により余分に得られるエネルギー量に対応する。

HCLWR-J1における平衡サイクルの取り出し燃料中のPu同位体組成比を、プルサーマル炉心の場合と比較して、Table 4.3に示した。Pu組成は、一般に燃焼度が高くなるほど劣化する方向にあるが、HCLWRでは中性子スペクトルが硬いため、プルサーマル炉に比べ燃焼度が高いにもかかわらず良質なPuが得られる。

4.3 反応度係数と制御棒反応度価値

スペクトルが硬く、Pu富化度が比較的高い高転換軽水炉では、特にボイド反応度係数が問題となる。一般に、減速材対燃料体積比が小さい程、またPu富化度が高くなる程ボイド反応度特性は悪化する。プルサーマル炉のように格子ピッチが大きい場合には、Pu富化度が比較的高い燃料を使用しても、ボイド発生に伴うスペクトル硬化による熱領域核分裂反応の大幅な減少及び²³⁸Uの共鳴吸収増大により、ボイド係数は負に保たれる。ところが、もともとスペクトルが硬い高転換軽水炉では、このようなボイド係数に対する負の寄与が小さく、ボイド特性が悪化しやすい。ボイド係数に正の寄与をする主な要因としては、以下のものが挙げられる。低ボイド領域(0%~40%)における主な要因は、²⁴⁰Pu(1.06 eV)及び²⁴²Pu(2.67 eV)の共鳴中性子捕獲反応がボイド率の増大によるスペクトル硬化により減少し、反応度を増大させることにある。さらにスペクトルが硬くなる高ボイド領域(40%~100%ボイド)においては、数eV領域に巨大共鳴吸収を持つ偶-偶核Puの寄与は小さくなり、むしろ η 値の大きい²³⁹Puの高速核分裂効果によりボイド特性は悪化する。核分裂性Puは、低ボイド領域では、ボイド係数に対し負の寄与をするがボイド率が高くなると正の寄与に転ずる。このように、減速材ボイドによる反応度変化の要因がボイド率あるいは格子ピッチによって異なるため、高転換軽水炉におけるボイド反応度係数は、低ボイド領域において負になっても、高ボイド領域において正に転ずることが多い。

Fig. 4.20は、初装荷炉心の燃焼初期、及び平衡サイクルの燃焼初期、末期に対するボイド特性を示したものである。このグラフより、燃焼が進行するに伴いボイド特性が悪化する様子がうかがわれる。これは主に熱エネルギー領域で中性子吸収が大きいEPの蓄積によるものと考えられる。したがって、ボイド特性の評価は平衡サイクル末期において行う必要がある。ただし、今回の計算では制御方式の仕様を決定していないため、初期炉心に対するボイド特性の結果には臨界調整の効果、すなわち制御材の影響は考慮されていない。 $1/v$ 吸収体であるボロン等の制御材は、ボイド特性を悪化させる要因となるため、制御状態におけるボイド特性も検討する必要がある。

平衡サイクル末期におけるボイド特性に注目すると、ボイド率約40%を境に、ボイド係数は負から正に逆転し、ボイド率0%~100%の範囲で平均すれば、ボイド係数は正となる。加圧水型炉で、通常運転時に40%を越えるボイドが発生することはないため、ボイド率が0%~40%の範

囲で、ボイド係数を(3-14)式により計算すれば $-16.6 \text{ pcm}/\% \text{ void}$ となり、わずかながらも負の値を示す。熱中性子炉の場合、ボイド率の増大に伴い、中性子倍率は単調に減少し、しかもその勾配はボイド率が高くなるほど大きくなる。したがって、定格運転時(0%ボイド)近傍においてボイド係数を定義すれば安全側の評価となる。これに対し、高転換軽水炉の場合には、必ずしもそうはならないことに注意すべきである。Fig. 4.20に見られるように、0%ボイド率近傍でボイド係数を計算するよりは、ボイド率が0%~40%の範囲で計算する方が安全側の評価となる。また、ボイド係数から換算されるその他の反応度係数(減速材密度係数、減速材温度係数)はTable 4.4に示してある。ただし、これらの値は、定格運転時近傍でのものである。通常運転時におけるボイド係数は負であるが、ボイド率が40%を越えると正に転ずるため、炉の成立性を検討するためには、ATWS(Anticipate Transient Without Scram)に対する安全解析及び動特性解析が重要となる。今回の一連の計算では、動特性解析まで行っていないが、これに必要とされる遅発中性子データをTable 4.5に示す。ただし、炉心燃焼コードには遅発中性子データの計算オプションが装備されていないため、SRAC内蔵のCITATIONを使用し、初装荷炉心に対する値で代用した。

燃料温度係数は、平衡サイクルの初期及び末期炉心に対し、平均燃料温度が900°K及び1200°Kの場合について計算を行い評価した。Table 4.4に示されるように、燃料温度係数はサイクル初期、末期共に負の値を示し、ボイド係数と同様に、サイクル末期でわずかに厳しくなる。したがって、一連の反応度係数は、燃焼が最も進んだ平衡サイクル末期炉心に対して評価する必要がある。

次に、HCLWR-J1の余剰反応度制御の可能性について検討した結果を述べる。高転換軽水炉では、燃料棒格子が稠密になるほど中性子スペクトルが硬くなり、制御材の中性子吸収効率は悪くなる。また、減速材領域が小さくなり、かつボイド係数が悪化するため、可溶性ボロンのようなケミカル・シムの使用が困難となる。このため、HCLWR-J1のように稠密性の高い高転換軽水炉では、濃縮B₄Cを用いたクラスター型制御棒のみで、余剰反応度を制御する。計算では先ず、初装荷炉心に対して、高温全出力、高温零出力及び冷温停止状態(Table 3.3参照)に対する炉心計算を行い、制御すべき余剰反応度を概算した。Table 4.6は、現用PWR(平衡炉心)と比較して、その結果を示したものである。現用PWRでは、約22%Δk/kの反応度を制御することになり、そのほとんどがケミカル・シムにより制御される。PWRの制御棒は、高温全出力状態から、所定の未臨界度をもった高温零出力状態に移行させるために使用され、停止余裕を含め約5.5%Δk/kの反応度を制御する。一方、HCLWR-J1では、現用PWRの約半分(11%Δk/k)の反応度を制御すれば良い。この際、ケミカル・シムは使用されないため、この反応度制御は、2系統の制御棒により分担されることになる。高転換軽水炉において、制御すべき余剰反応度が小さくなるのは、以下の事由による。先ず、スペクトルが硬い高転換軽水炉では、Xe及びSmの効果が極めて小さいことが挙げられる。全炉心が新燃料から成る初装荷炉心では、これらの反応度寄与は0.45%Δk/k程度であるが、平衡サイクルに至ると、わずかに0.13%Δk/k程度にすぎない。次に、転換率が高いため、燃焼による反応度ロスが小さいことによる。現用PWRの反応度ロスは、約0.038%Δk/k/FPDであるのに対し、高転換軽水炉では約0.0114%Δk/k程度となる。さらに、減速材密度係数の絶対値が小さく、昇温による反応度差が小さいことによ

る。ただし、この点については、非稠密格子からなる現用 PWR でも、ケミカル・シムの使用により冷温時の減速材密度係数は正となっているため、特に大きな効果とは言えない。

制御棒の反応度価値については、3.4 節で述べた 3 つの手法により、初装荷炉心を仮定した無限格子体系において評価した。Fig. 4.21 にその結果を示してある。VIM と SRAC による集合体計算は、統計誤差範囲で良く一致し、稠密系における制御棒価値計算手法としては充分妥当であると考えられる。2-ステップ・セル計算による簡便手法は、 ^{10}B の濃縮度が高くなると反応度価値を過大評価する傾向にある。しかしその差は小さく、また他の手法に比べ計算時間が極端に少なくすむため、²⁶⁾ 必要な制御棒本数の概算評価等には有効な手法と言える。Table 4.7 は、SRAC 及び VIM による集合体計算において、Fig. 3.8 に示される制御棒要素別の中性子吸収率を示したものである。ローカルな中性子吸収率に対しても最大 3% 程度の差で評価することができる。また、各制御棒要素の吸収率は、ほぼ均等であり、集合体内の制御棒要素配置の妥当性が裏付けられている。

Fig. 4.21 より、天然 B を使用した場合の反応度価値は、約 18% $\Delta k/kk'$ であるので、炉内の全燃料集合体に制御棒クラスターを配置すれば、反応度制御は充分可能である。仮に、炉心上部の制御棒駆動装置の設置空間が不足し、全燃料集合体の $1/3$ にしか制御棒を配置できない場合にも 50% 程度の濃縮 B を使用することで対処可能である。

Table 4.1 Burnup Performance of HCLWR-J1
Predicted by Cell Burnup
Calculation

Discharge Burnup	44.4 Gwd/t
ACR	0.799
FIR	0.846
Cycle Duration	448 FPD*
Excess Reactivity	5.17% $\Delta k/k$

* : Full Power Days

Table 4.2 Number Density of Each Nuclide in Discharged Fuel
 (unit : $\times 10^{24}$ n/cm³)

U05	2.45087E-5	Rh3	4.34192E-5	Nd3	3.27343E-5
U06	3.98662E-6	Rh5	8.26516E-8	Nd5	2.32469E-5
U08	1.82860E-2	Pd5	4.00257E-5	Nd7	2.46898E-7
Pu9	1.39617E-3	Pd6	3.77976E-5	Nd8	1.42456E-5
Pu0	7.07901E-4	Pd7	2.51208E-5	Pm7	7.26891E-6
Pu1	3.11675E-4	Pd8	1.75175E-5	PmM	1.98496E-7
Pu2	1.58697E-4	Ag9	9.63551E-6	PmG	2.62507E-8
Np9	1.74457E-6	Cd0	4.04860E-6	Pm9	3.58203E-8
Am1	3.88312E-5	Cd1	2.86140E-6	Pm1	1.00806E-8
AmM	1.23041E-6	Cd3	2.88068E-7	Sm7	2.90482E-6
AmG	2.04080E-8	In5	2.73751E-7	Sm8	5.57954E-6
Am3	3.24054E-5	I07	3.14954E-6	Sm9	2.03916E-6
Cm4	1.32591E-5	I09	1.03817E-5	Sm0	8.81930E-6
Kr3	2.25857E-6	I01	2.95410E-7	Sm1	3.33777E-6
Zr3	2.99377E-5	I05	1.85410E-8	Sm2	5.55745E-6
Zr6	3.84968E-5	Xe1	2.11099E-5	Eu3	4.58221E-6
Mo5	3.48112E-5	Xe2	4.66251E-5	Eu4	1.70509E-6
Mo7	4.13586E-5	Xe3	3.77816E-7	Eu5	5.25261E-7
Mo8	4.48194E-5	Xe5	5.26027E-9	Eu6	7.62724E-8
Mo9	1.77236E-7	Xe6	5.86360E-5	Gd4	1.41257E-7
Mo0	5.08134E-5	Cs3	4.73156E-5	Gd5	7.02630E-8
Tc9	4.41938E-5	Cs4	4.65164E-6	Gd6	2.60592E-6
Ru1	4.76232E-5	Cs5	5.33955E-5	Gd7	1.89208E-7
Ru2	5.50041E-5	La9	4.49519E-5	Gd8	1.29552E-6
Ru3	2.71142E-6	Ce1	1.77838E-6	P67	5.03477E-4
Ru4	5.04368E-5	Pr1	3.98411E-5		
Ru5	1.04717E-8	Pr3	6.29389E-7		

Table 4.3 Isotope Vector of Discharged Fuel

	HCLWR-J1	Pu-thermal
Pu ^f Enrichment	9.0 w/o	3.75 w/o
Discharge Burnup	36.4 Gwd/t	33.0 Gwd/t
Uranium	Depleted	Depleted
U-235 / U	0.13	0.11
U-236 / U	0.02	0.02
U-238 / U	99.85	99.87
Pu-239/Pu	54.2	40.9
Pu-240/Pu	27.5	31.9
Pu-241/Pu	12.1	17.3
Pu-242/Pu	6.2	9.9

Table 4.4 Reactivity Coefficients at the Equilibrium Cycle

Moderator Void Coefficient [EOC]	
Void Range : 0~ 40% void	-16.6 pcm/%void
40~100% void	+39.6 pcm/%void
0~100% void	+18.0 pcm/%void
Moderator Density Coefficient [EOC]	+4020 pcm/g/cm ³
Moderator Temperature Coefficient [EOC]	-8.45 pcm/°C
Doppler Coefficient [BOC] [EOC]	-2.86 pcm/°C -2.72 pcm/°C

Table 4.5 Delayed Neutron Data of HCLWR-J1
(Beginning of the First Cycle)

Prompt Neutron Life Time : τ (sec)	1.9629E-6	
Prompt Neutron Generation Time : Λ (sec)	1.8655E-6	
Effective Delayed Neutron Fraction : β_{eff}	4.0596E-3	
Group Index : i	Decay Constants : λ_i^*	$\beta_{\text{eff}} i$
1	0.0128 ± 0.0005	8.5600E-5
2	0.0301 ± 0.0022	8.7467E-4
3	0.124 ± 0.009	7.3996E-4
4	0.325 ± 0.036	1.4847E-3
5	1.12 ± 0.39	6.8953E-4
6	2.69 ± 0.47	1.8513E-4

* : based on thermal fission of ^{239}Pu

Table 4.6 Comparison of Excess Reactivity to be Controlled

	HCLWR-J1	PWR
Xe & Sm Effects	0.454	3
Burnup Reactivity Loss	4.51	~11
Hot Zero Power → Hot Full Power	1.31	2
Cold Zero Power → Hot Zero Power	4.57	6
Total	10.85 %ΔK/K	~22%ΔK/K

Table 4.7 Neutron Absorption Rate in Each Control Element ($90\% {}^{10}\text{B}$)

Element Index*	A	B	C	D	Average
VIM	7.63E-2 $\pm 0.09\text{E-}2$	7.57E-2 $\pm 0.11\text{E-}2$	8.01E-2 $\pm 0.09\text{E-}2$	8.08E-2 $\pm 0.13\text{E-}2$	7.83E-2
SRAC-direct	7.87E-2	7.78E-2	7.90E-2	8.07E-2	7.91E-2
Discrepancy	3%	3%	1%	0.1%	1%

(total absorption rate in a whole fuel assembly = 1.0)

* : Location of Each Control Element in Fig.3.8

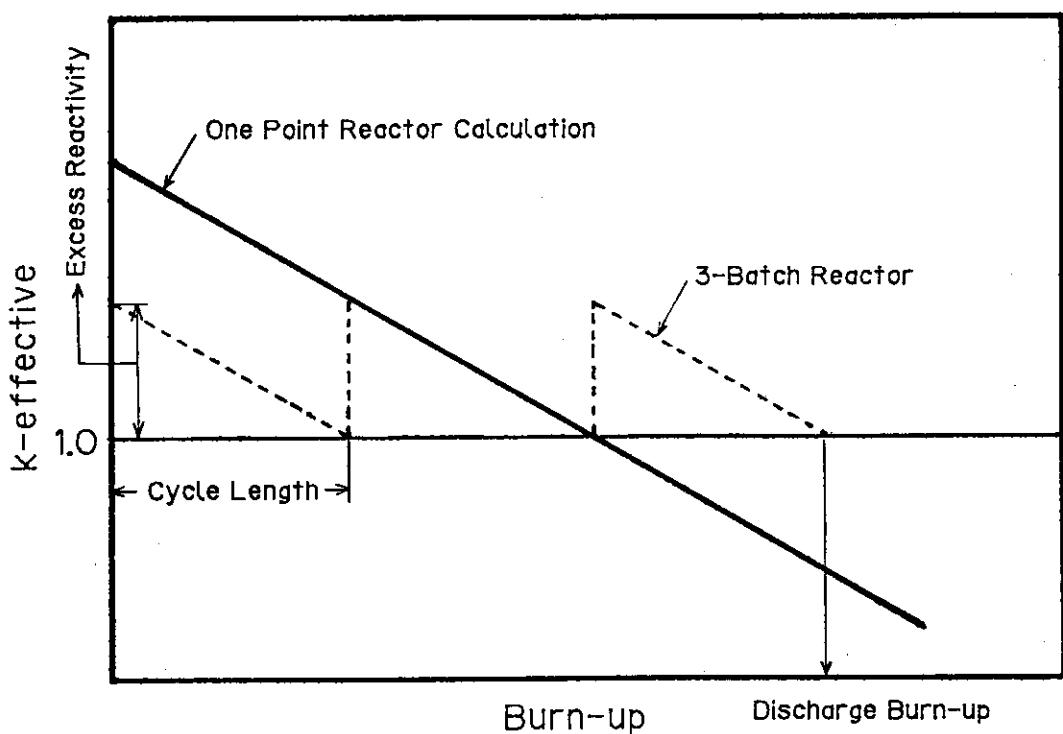


Fig. 4.1 Illustration for how to predict burnup performance of 3-zone reactor from cell burnup (1-point reactor) calculation

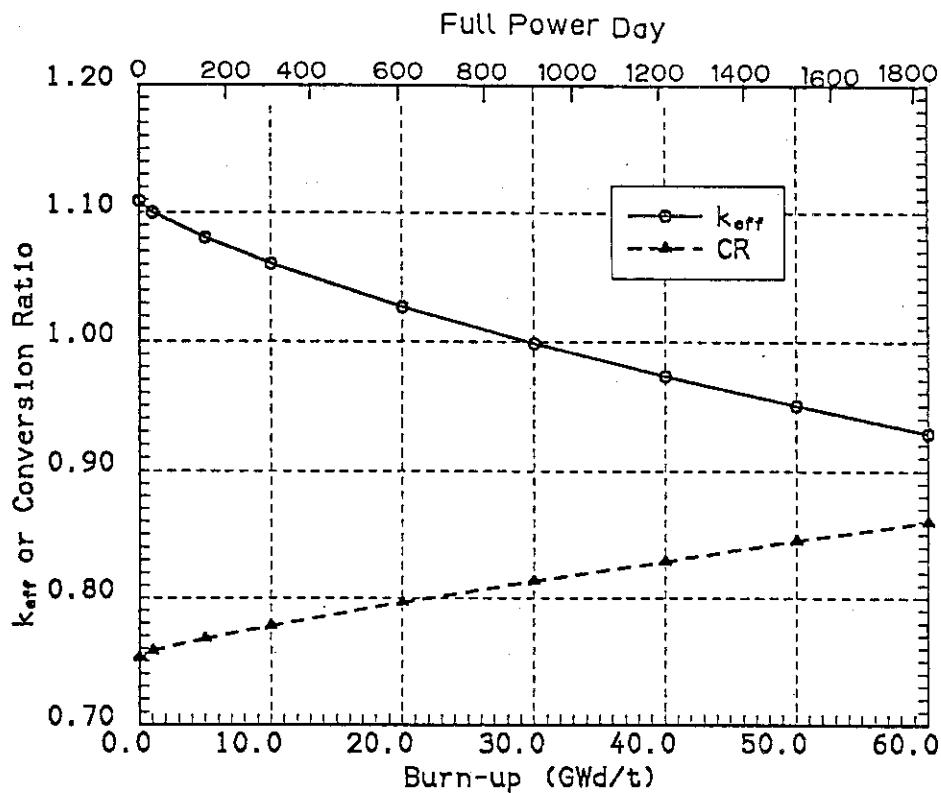


Fig. 4.2 Burnup dependence of k_{eff} and conversion ratio of HCLWR-J1 evaluated by cell burnup calculation

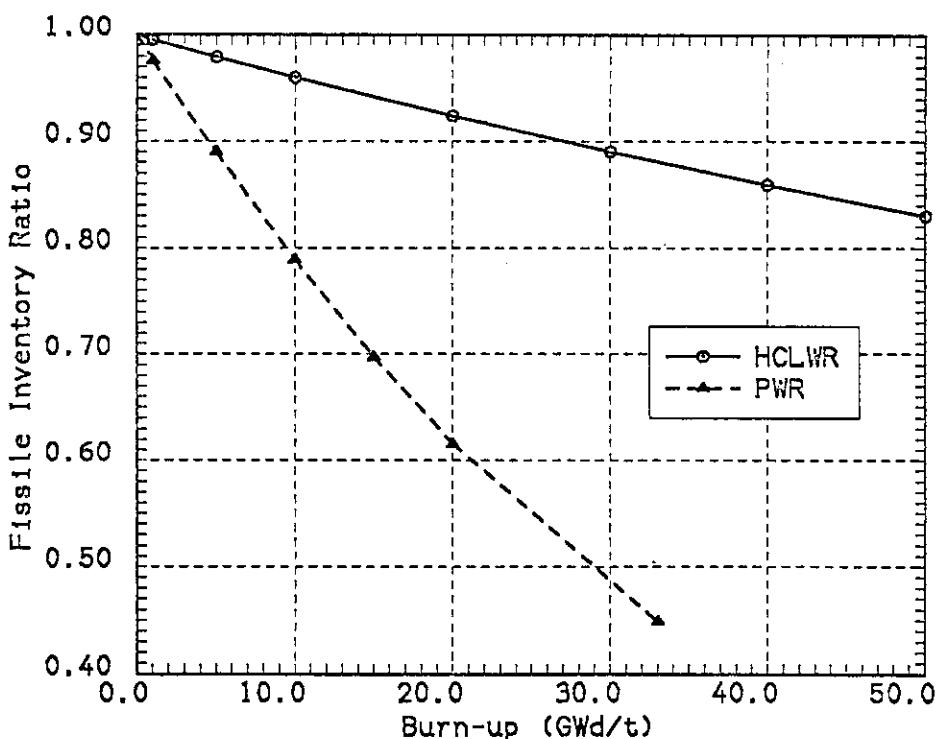


Fig. 4.3 Burnup dependence of fissile inventory ratio of PWR and HCLWR-J1 evaluated by cell burnup calculation

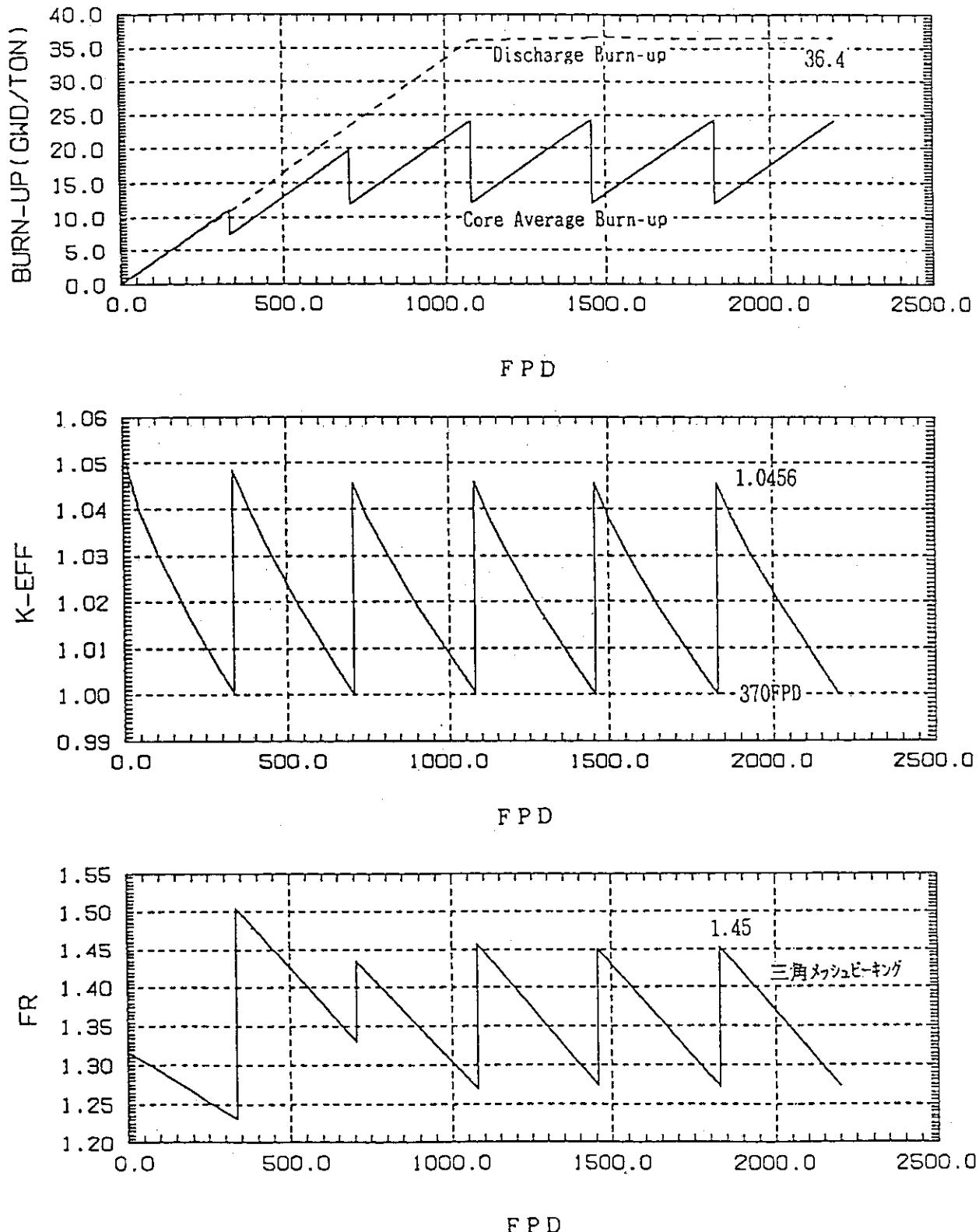


Fig. 4.4 Core burnup calculation results for burnup, k_{eff} and radial power peaking factor (FR) of HCLWR-J1 (FPD : Full Power Days)

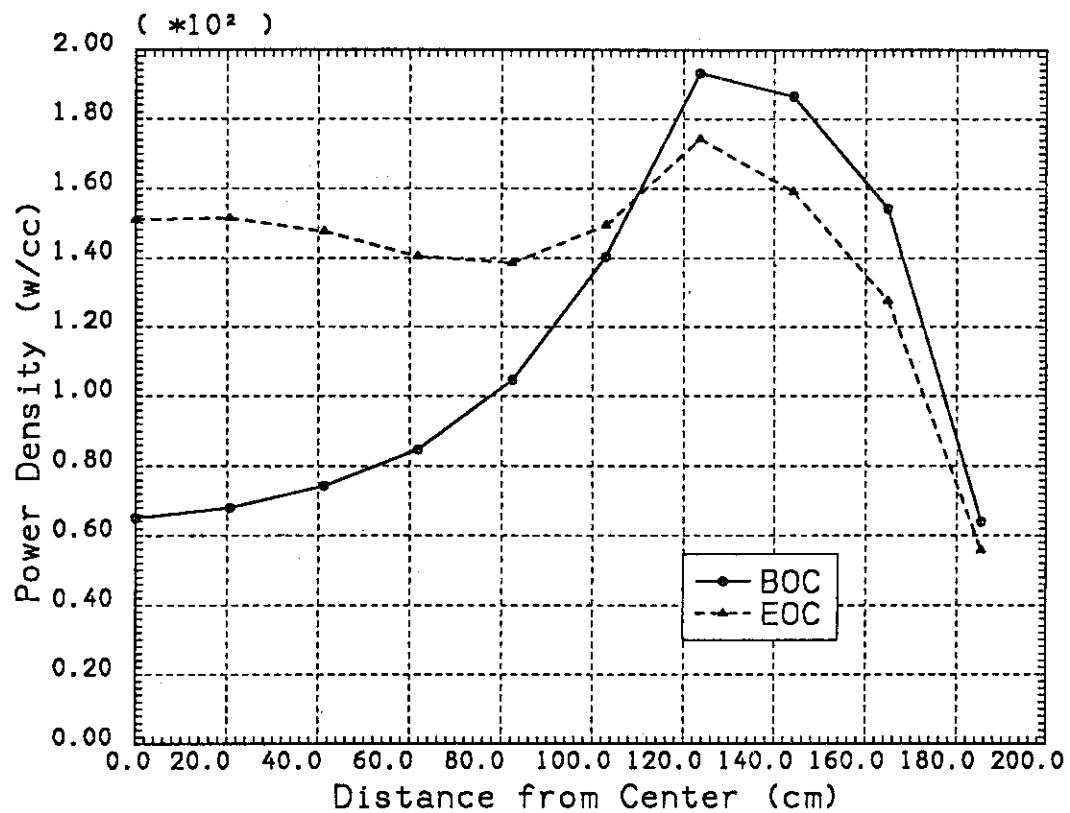


Fig. 4.5 Radial power distribution in HCLWR-J1 at the sixth cycle
(same position shown in Fig. 3.6)

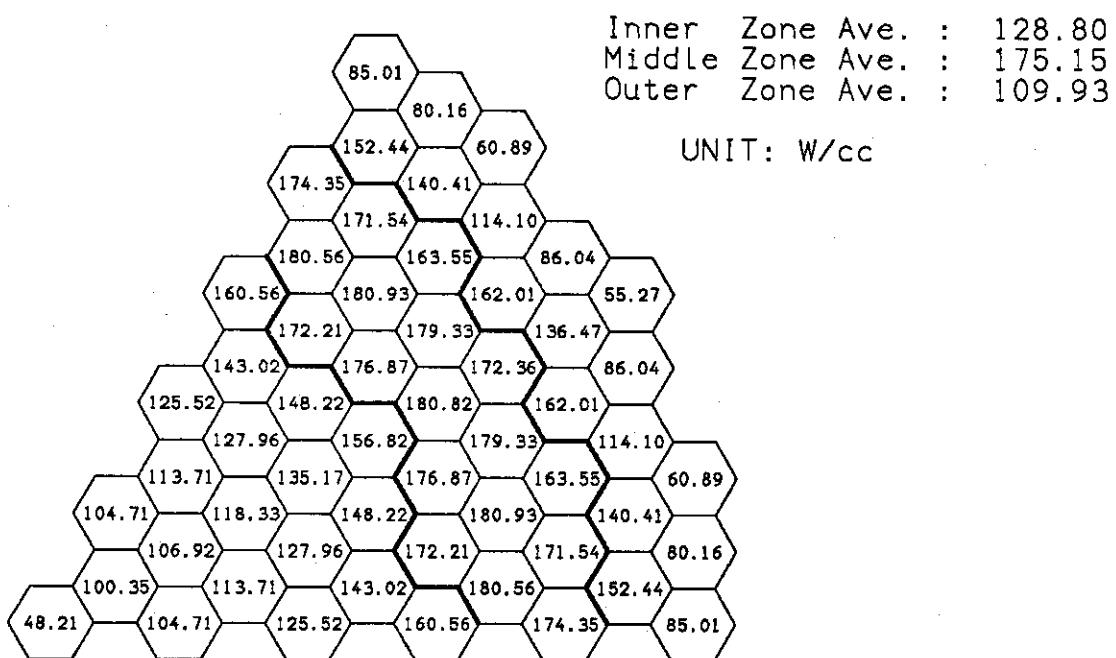


Fig. 4.6 Power distribution (beginning of the first cycle)

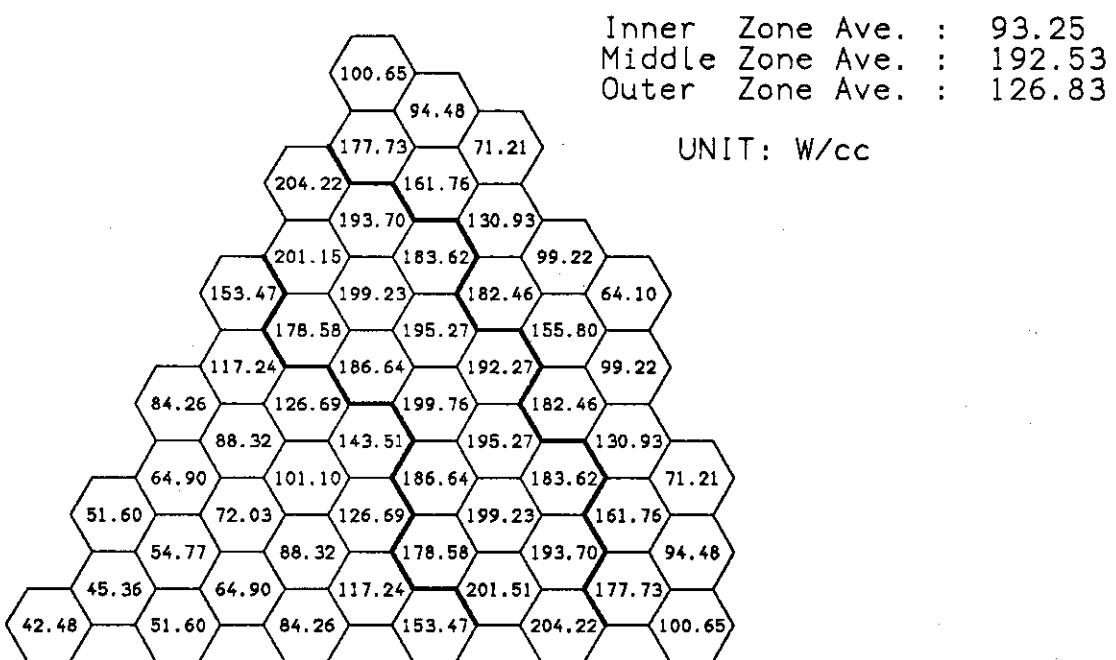


Fig. 4.7 Power distribution (beginning of the second cycle)

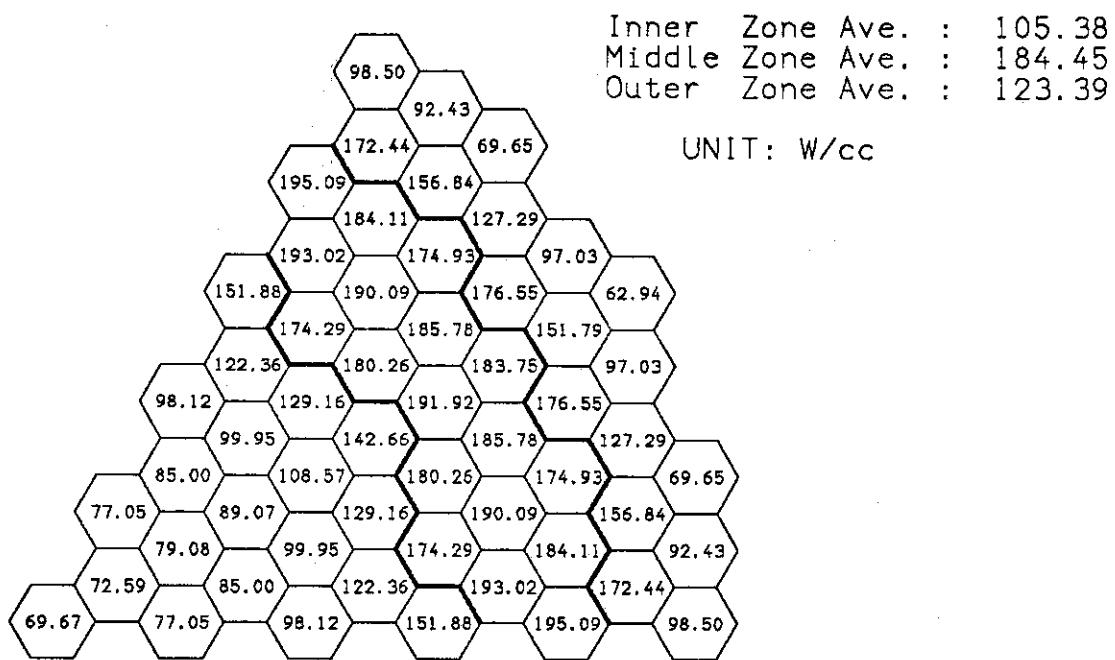


Fig. 4.8 Power distribution (beginning of the third cycle)

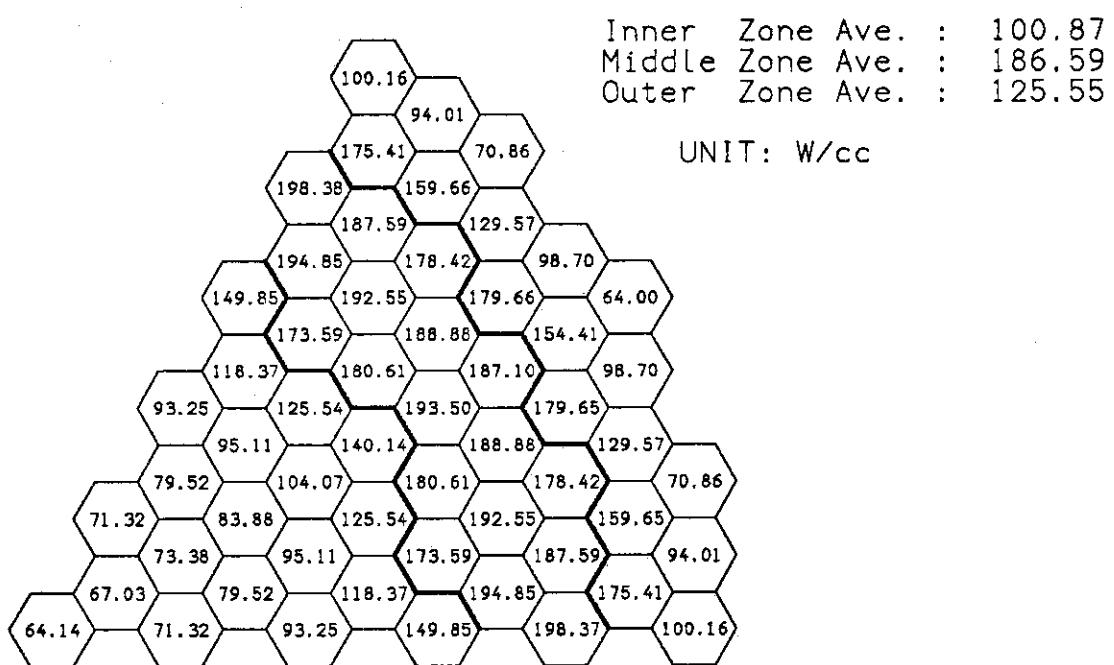


Fig. 4.9 Power distribution (beginning of the fourth cycle)

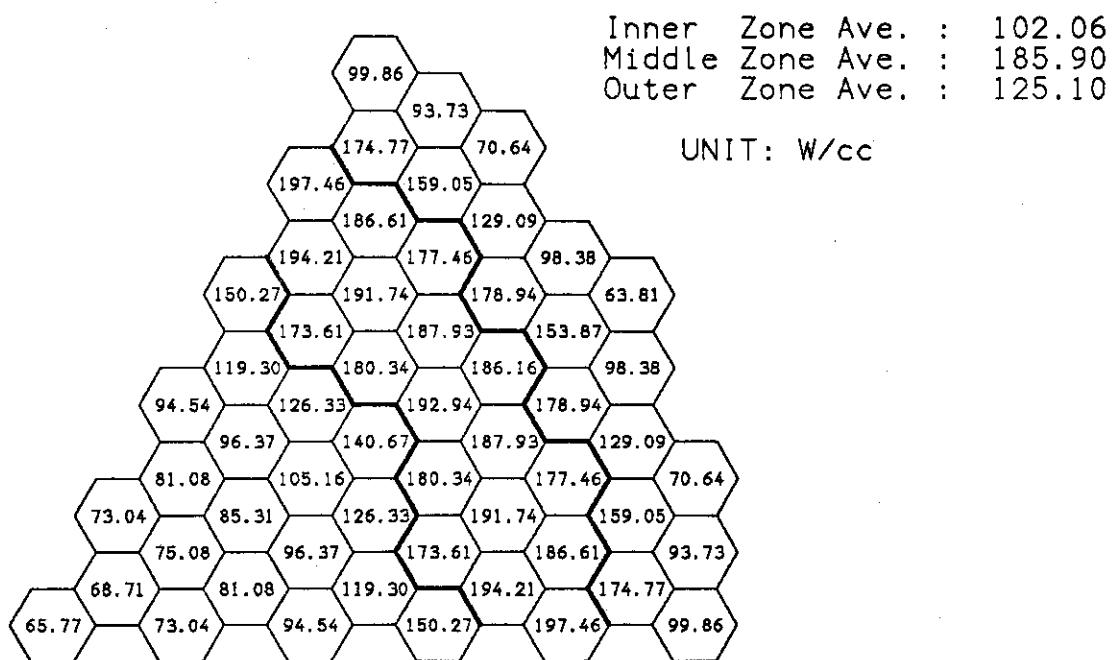


Fig. 4.10 Power distribution (beginning of the fifth cycle)

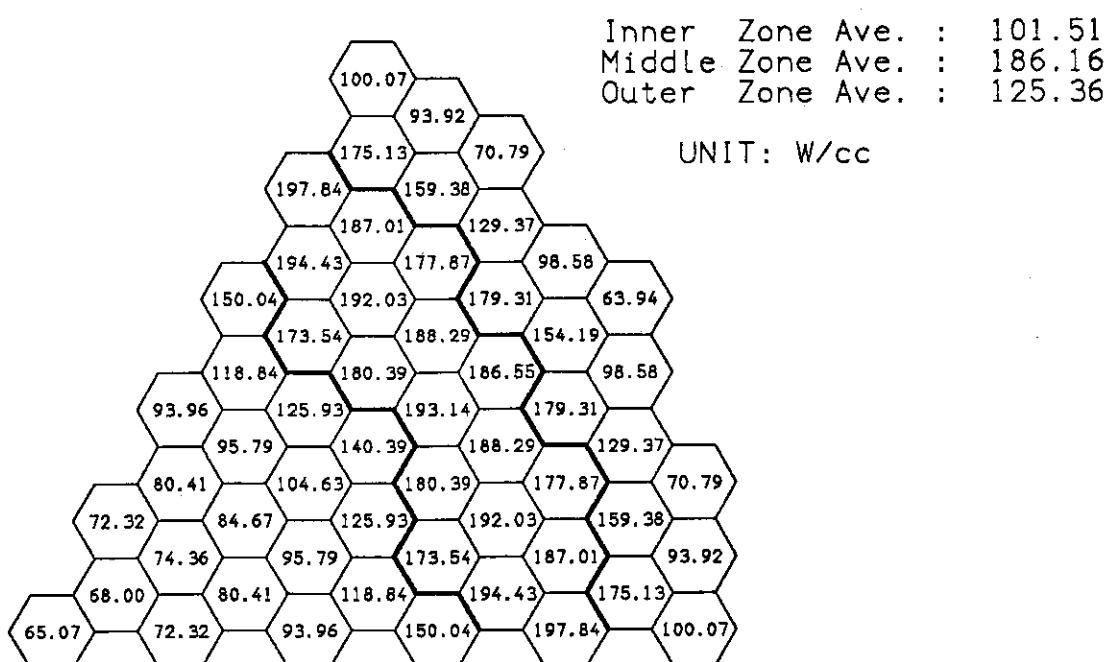


Fig. 4.11 Power distribution (beginning of the sixth cycle)

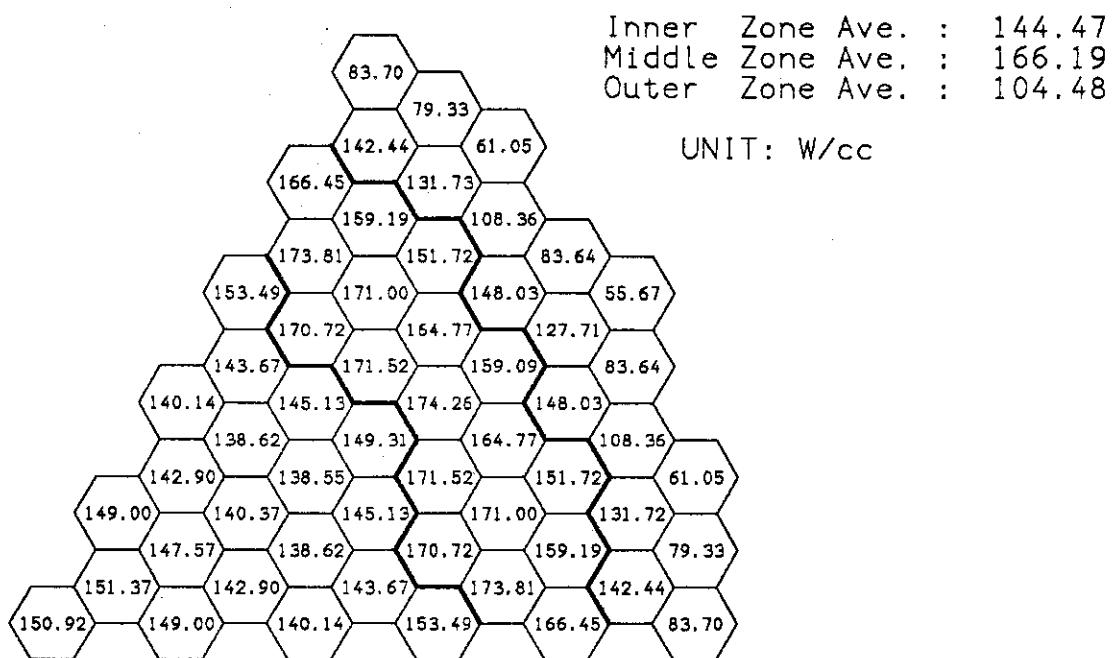


Fig. 4.12 Power distribution (end of the sixth cycle)

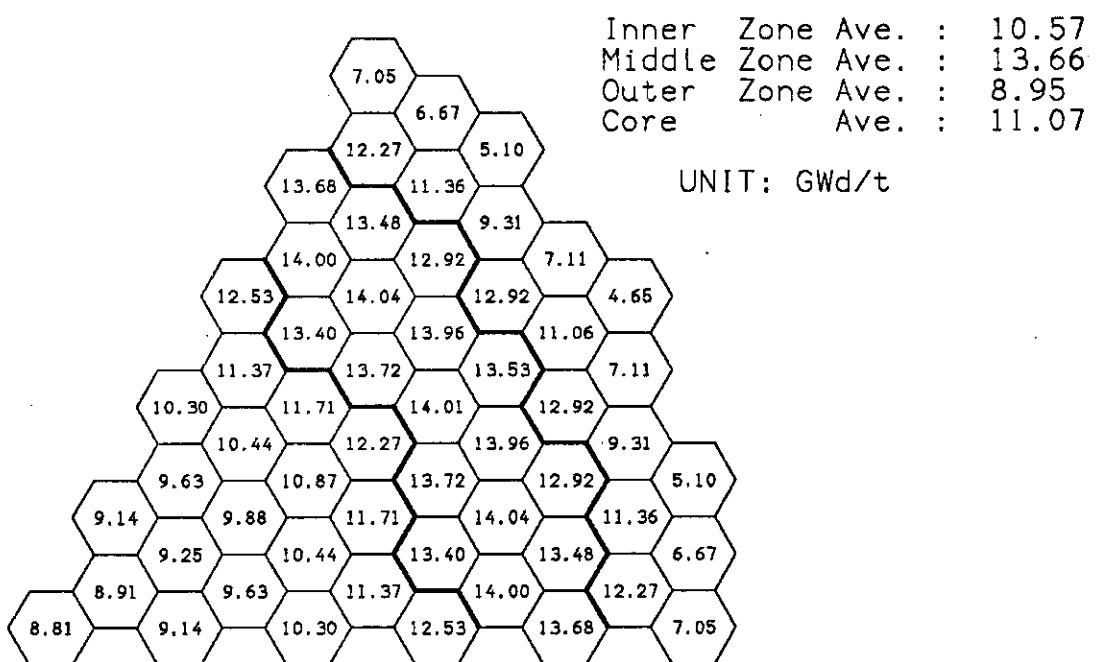


Fig. 4.13 Burnup distribution (end of the first cycle)

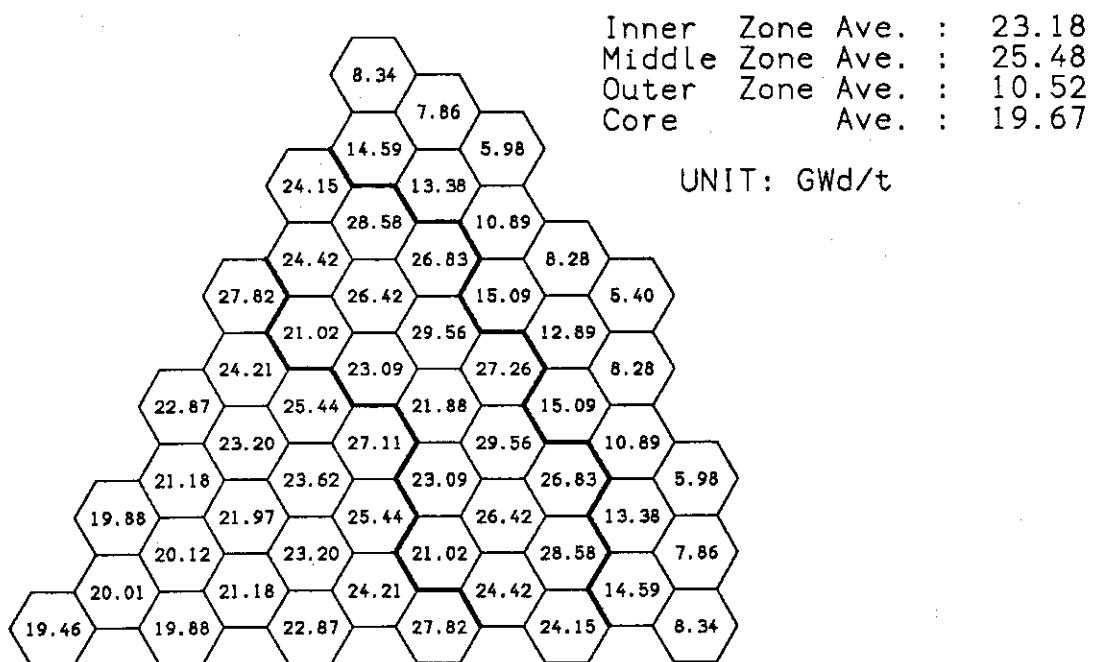


Fig. 4.14 Burnup distribution (end of the second cycle)

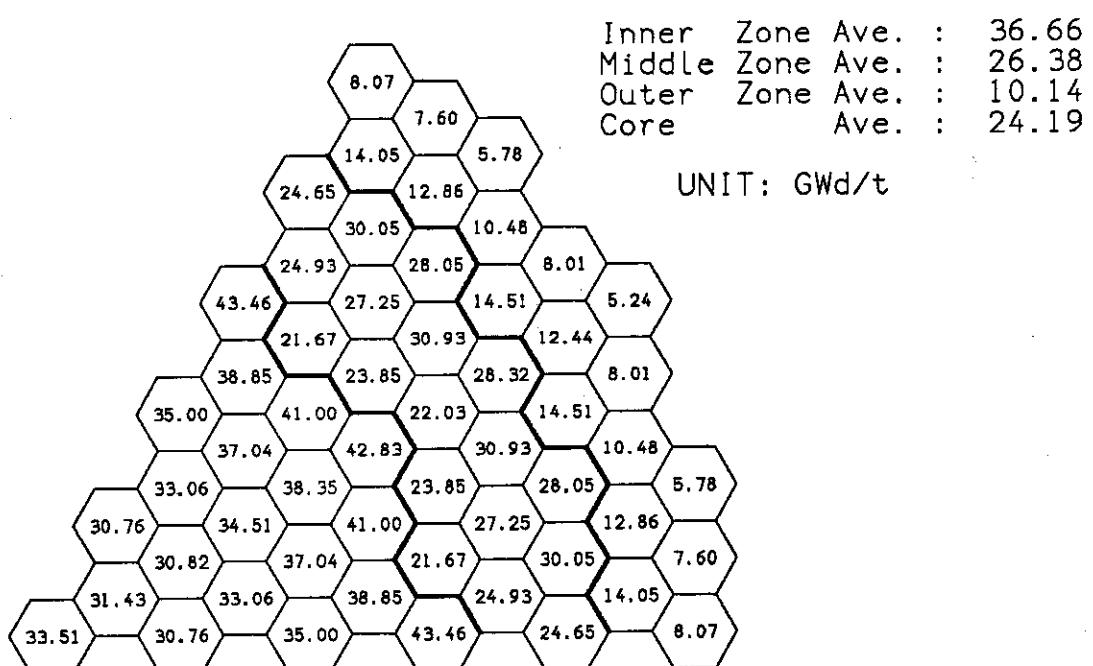


Fig. 4.15 Burnup distribution (end of the third cycle)

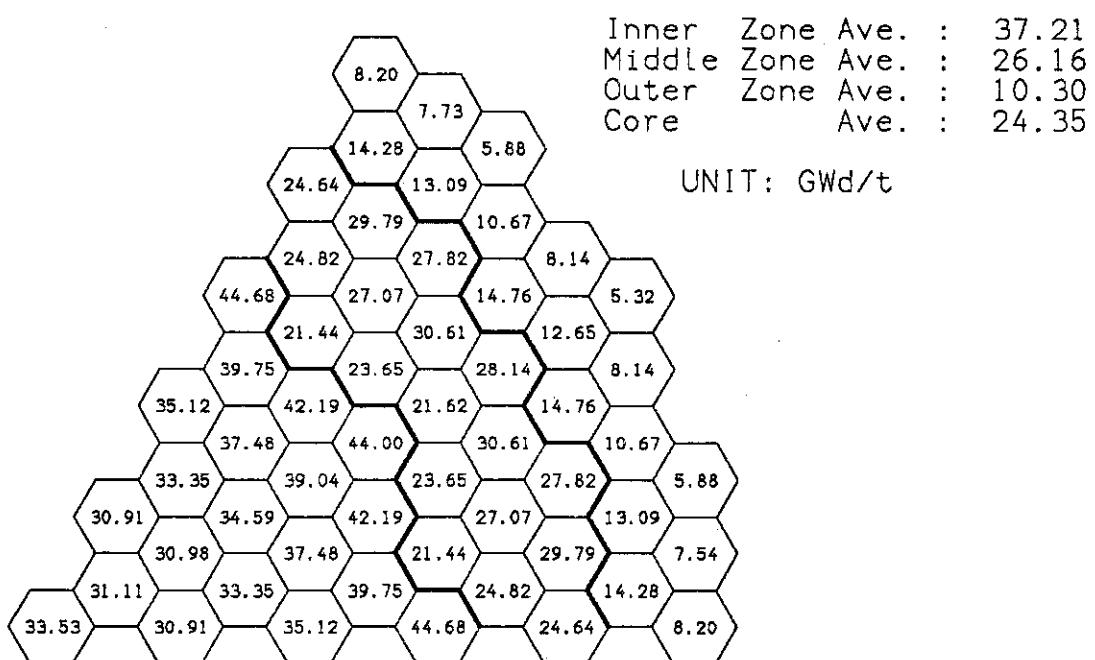


Fig. 4.16 Burnup distribution (end of the fourth cycle)

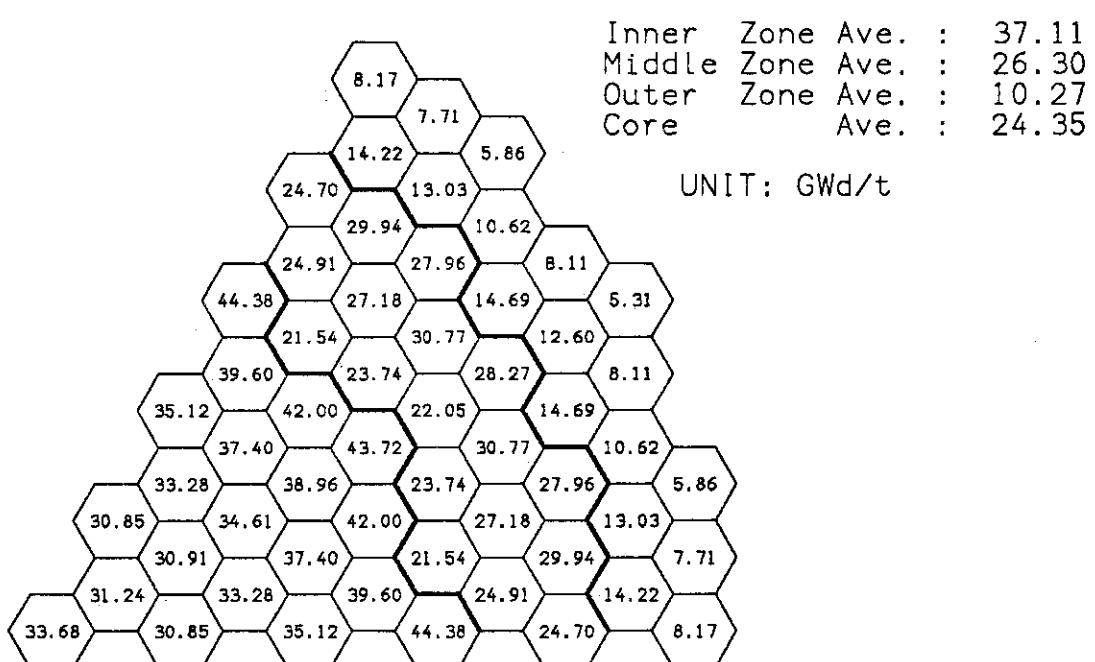


Fig. 4.17 Burnup distribution (end of the fifth cycle)

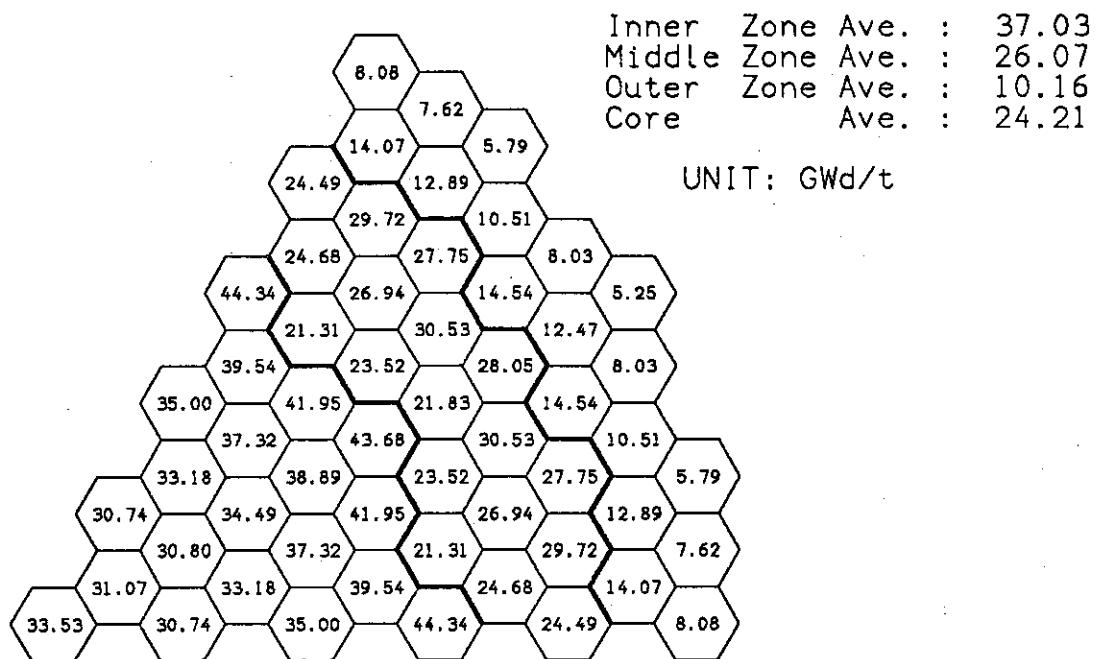


Fig. 4.18 Burnup distribution (end of the sixth cycle)

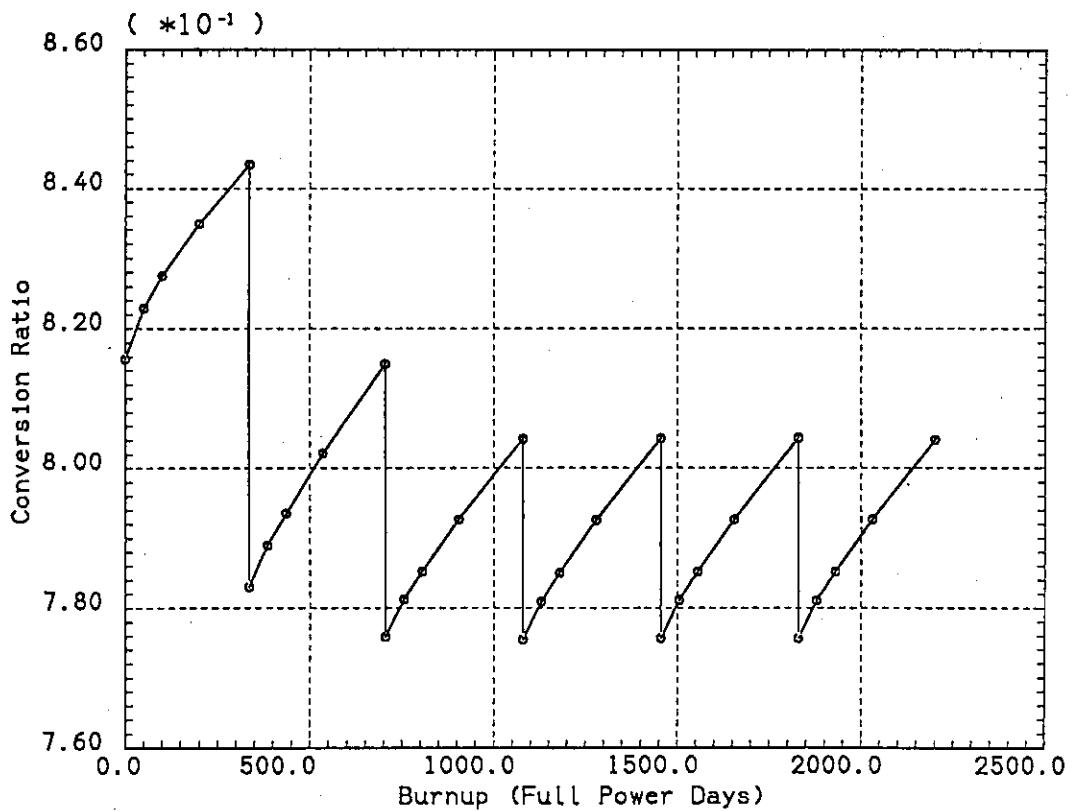


Fig. 4.19 Conversion ratio averaged in whole core region of HCLWR-J1

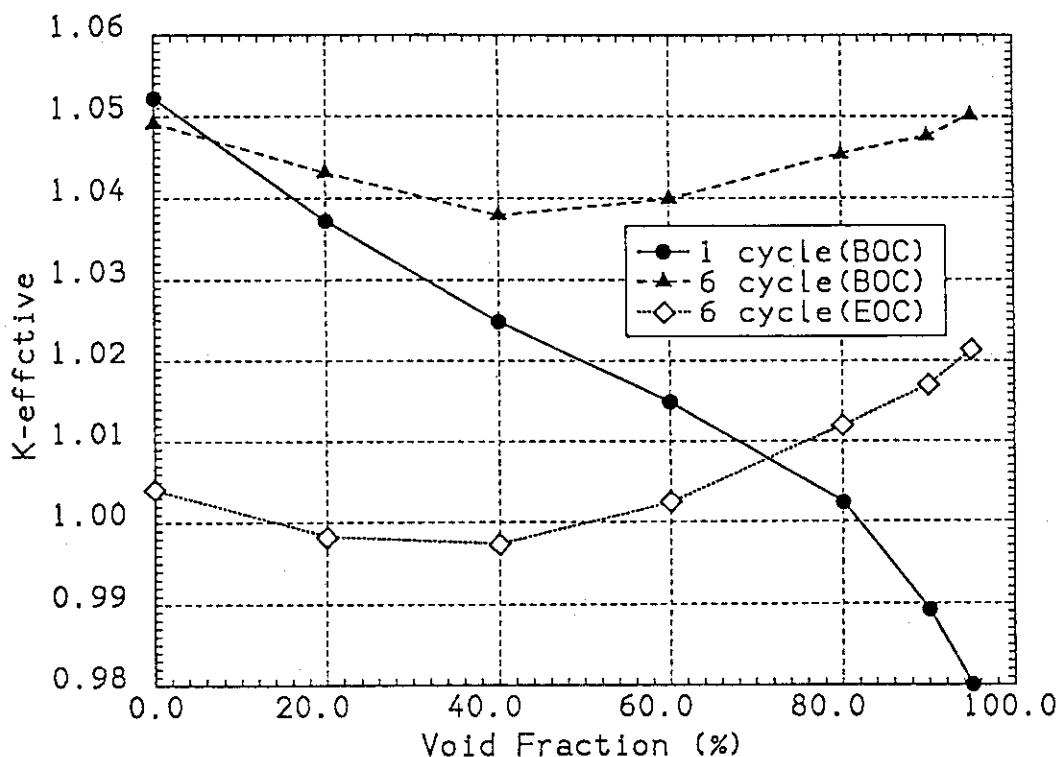
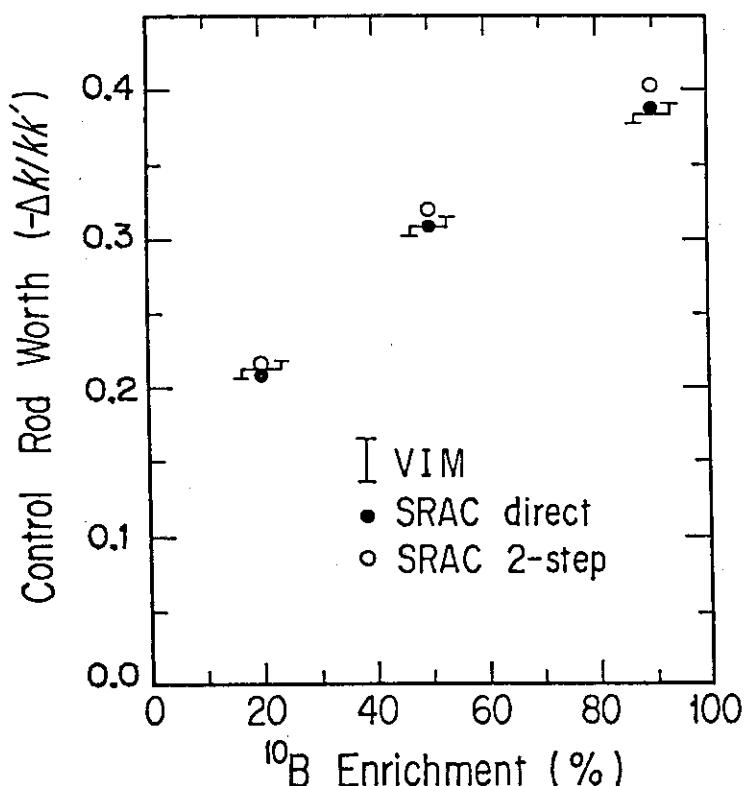
Fig. 4.20 Dependence of k_{eff} on moderator void fraction in HCLWR-J1

Fig. 4.21 Control rod worth by 3-methods in the infinite lattice of HCLWR-J1 fuel assembly (Pu-fiss. enrichment is 7.7w/o : initial core averaged)

5. ま　と　め

稠密格子による高転換軽水炉の核特性と炉心性能を評価するため、減速材対燃料体積比が 0.81 の炉心を想定し、その計算手法を検討すると伴に、巨視的断面積内挿法及び径方向二次元拡散法に基づく炉心燃焼計算を、平衡サイクルに至るまで行った。主な計算結果を Table 5.1 にまとめる。取り替え燃料富化度を 9.0 w/o と、他の設計例に比べ高く設定したにもかかわらず、取り出し燃焼度は約 36.4 GWd/t となり、現用軽水炉の燃焼度をわずかに越えるものの、一点炉近似に基づく格子燃焼計算により予測された目標値 45 GWd/t には至らない。これは、空間的に異なる燃焼度の非均質効果によるものであり、一点炉近似により予測される到達燃焼度は、下方修正される必要がある。また、核分裂性物質の残存率 (FIR) は 0.87 であり、当初の目標値である 0.9 を下回る結果が得られた。燃焼度と FIR の兼ね合いから、核分裂性物質の有効利用率を試算すると、現用軽水炉の 1.64 倍程度の値は期待できる。仮に、さらに高い燃焼度を達成するため、Pu 富化度を高めたとしても、逆に転換率が低下するため、核分裂性物質の有効利用の観点からは、効果的であるとは言えない。また、核分裂性 Pu の富化度を高めると、減速材ボイド反応度特性が悪化し、充分な安全余裕を維持できなくなる。実際、本炉心の平衡サイクル燃焼末期におけるボイド係数は、通常運転状態でわずかに負の値を示すが、ボイド率が 40% を越えると正の値に転ずる。したがって、ATWS (Anticipate Transient Without Scram) に対する充分な安全性解析が必要である。以上のような理由により、格子を単純に稠密化するだけでは、高転換率と高燃焼度の同時達成は困難であると言える。最も効果的な方法は、低富化度燃料を使用した上で燃焼度を高めることであるが、これには、フラマトム社の提案による親物質棒を使用したスペクトル・シフト概念³⁾ の利用が有効であると考えられる。親物質棒によるスペクトル・シフト炉心は、高燃焼度、高転換率の同時達成が期待される他に、核分裂性 Pu インベントリの低減及びボイド特性の改善にも効果的であると考えられる。このような特殊炉型に対する炉心燃焼計算は複雑となり、既存の計算コードでは対処できない。このため、現段階では、一点炉近似に基づく格子燃焼計算による予測に甘んじている状態である。したがって、高転換軽水炉に親物質棒によるスペクトル・シフト概念を導入するには、先ずその計算手法を確立する必要がある。また、高転換軽水炉では、熱炉に比べスペクトルが硬くなり、かつ炉心長が短くなるため、径、軸方向ブランケットの効率的な利用により、転換率をさらに高めることも検討すべき課題である。

Table 5.1 Main Specifications and Neutronics Performance of HCLWR-J1
Evaluated by Core Burnup Calculation

Core Thermal Output	3411 Mwt
Active Core Height	223 cm
Equivalent Core Diameter	375 cm
Fuel Rod Pitch	1.11 cm
Fuel Rod Outer Diameter	0.95 cm
V _m /V _p (assembly)	0.81
Number of Fuel Assemblies in the Core	301 (97/102/102)
Number of Fuel Rods in the Core	90300 (301x300)
Average Fissile Pu in the Core(1 cycle)	7.7 (6.5/7.5/9.0) w/o
Fissile Pu Enrichment of Charged Fuel	9.0 w/o
Total Fuel Inventory	103.2 tHM
Average Linear Heating Rate	169.4 W/cm
Average Thermal Heat Flux	56.8 W/cm ²
Average Power Density	138.5 W/cm ³
Radial Power Peaking Factor	1.45
Number of Fuel Cycles	3
Fuel Cycle Duration	370 FPD
Burnup Reactivity Loss	-1.14x10 ⁻⁴ Δk/k/FPD
Average Conversion Ratio	0.791
Fissile Material Surviving Rate	0.870
Fissile Pu Surviving Rate	0.875
Total Pu Surviving Rate	0.914
Doppler Coefficient (BOC/EOC,900~1200K)	-2.86 / -2.72 pcm/°C
Void Reactivity Coefficient at EOC (0~40% void)	-16.6 pcm/%void
(0~100%void)	+18.0 pcm/%void
Moderator Density Reactivity Coefficient at EOC (operating condition)	4020 pcm/g/cm ³
Moderator Temperature Reactivity Coefficient at EOC (operating condition)	-8.45 pcm/°C

謝 辞

SRAC システムに高転換軽水炉集合体に対する衝突確率ルーチンを組み込んで下さいました原子炉システム研究室主任研究員土橋敬一郎氏に謝意を表します。また、燃焼計算用ライブラリーに関して様々な情報をいただいた原子炉システム研究室秋江拓志氏、及び本計算を進める上で御助力をいただいた I.S.L の井戸 勝、佐々木敏彦の両氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Oldekop W. et al. : "General Features of Advanced Pressurized Water Reactor with Improved Fuel Utilization," Nucl. Technol., 59, 212 (1982)
- 2) Broeders C.H.M. et al. : "Conceptual Design of a (Pu, U)₂O₅ Core with a Tight Fuel Rod Lattice for an Advanced Pressurized Light Water Reactor," Nucl. Technol. 71, 82 (1985)
- 3) Hittner D. et al. : "Preliminary Results of the Feasibility Study on the Convertible Spectral Shift Reactor Concept," Nucl. Technol., 80, 181 (1988)
- 4) Saji E. et al. : "Feasibility Studies on High Conversion Pressurized Water Reactors with Semitight Core Configurations," Nucl. Technol., 80, 18 (1988)
- 5) 秋江拓志他：“高転換軽水炉格子の燃焼パラメータ・サーベイ”，JAERI-M 86-197 (1987)
- 6) Tsuchihashi K. et al. : "SRAC : JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis," JAERI 1285 (1983)
- 7) Tsuchihashi K. et al. : "Revised SRAC Code System," JAERI 1302 (1986)
- 8) 石黒幸雄他：“SRACシステムの高転換加圧水型炉（HCPWR）への適応性”，日本原子力学会昭和59年秋の分科会B 74.
- 9) 石黒幸雄他：“高転換軽水炉燃料集合体の炉物理的研究(I)解析用一般化Dancoff係数の導出”，日本原子力学会昭和60年秋の分科会E 11.
- 10) 石黒幸雄他：“高転換軽水炉燃料集合体の炉物理的研究(II)解析コードの問題点の検討”，同上E 12.
- 11) Takano H. et al. : "Effect of Transplutonium Nuclides on Burnup Reactivity Changes in HCLWRs," J. Nucl. Sci. Technol. 24, No.6 (1987)
- 12) Akie H. et al. : "Effect of Fission Gas Release on Burnup Characteristics and Void Reactivity in HCLWRs," J. Nucl. Sci. Technol. 24, No.8 (1987)
- 13) Takano H. et al. : "The Effect of Fission Products on Burnup Characteristics in High Conversion Light Water Reactors," Nucl. Technol., 80, 250 (1988)

- 14) 石黒幸雄他：“高転換加圧水炉（HCPWR）の核特性解析上の問題点（SRACシステムによるPROTEUS-LWHCR炉心の解析）,” JAERI-M 84-180 (1984).
- 15) 石黒幸雄他：“高転換軽水炉の核特性解析上の問題点(II),” JAERI-M 86-039 (1986)
- 16) 大杉俊隆他：“FCAによる高転換軽水炉模擬実験,” 日本原子力学会昭和61年秋の分科会 D 37, D 38
- 17) 大部 誠他：“FCAによる高転換軽水炉模擬実験Ⅱ,” 日本原子力学会昭和62年年会 E 30～E 32
- 18) 吉田弘幸他：“FCAによる高転換軽水炉模擬実験Ⅲ,” 日本原子力学会昭和62年秋の大会 D 34～D 38
- 19) 岡嶋成晃他：“FCAによる高転換軽水炉模擬実験Ⅳ,” 日本原子力学会昭和63年年会 C 17～C 19
- 20) 桜田光一他：“高転換沸騰水型炉の燃焼ベンチマーク計算,” 日本原子力学会昭和61年秋の分科会 F 9
- 21) 秋江拓志他：“高転換加圧水型炉のベンチマーク計算,” 同上 F 18
- 22) 秋江拓志他：“NEACRP HCLWR格子燃焼ベンチマーク計算結果のまとめ,” 日本原子力学会昭和62年秋の大会, D 27
- 23) Prael R.E. et al. : "A User's Manual for the Monte Carlo Code VIM," FRA-TM-84 (1976)
- 24) Tasaka K et al. : "JNDC Nuclear Data Library of Fission Products," JAERI 1287 (1983)
- 25) 嶋田昭一郎：“高転換軽水炉の諸問題（制御棒反応度効果）,” 日本原子力学会第18回炉物理夏期セミナー (1986)
- 26) Okumura K. et al. : "Calculational Methods of Control Rod Worth for High Conversion Light Water Reactor," J. Nucl. Sci. Technol., 25, No.3 (1988)

付録 入力データ、ジョブ制御文の例

高転換軽水炉を含め、新型炉の設計がさかんに行われている昨今、炉心燃焼計算に対する需要は増え高まっている。そこで、SRAC システムを使用して炉心燃焼計算を行う利用者への便宜を図るために、今回の一連の計算における代表的な入力データ及びジョブ制御文のサンプルを示しておく。サンプルとしては以下のものを挙げた。

- 1) 格子燃焼計算による巨視的断面積テーブルの作成
- 2) 衝突確率法による六角燃料集合体計算
- 3) 炉心燃焼計算用ヒストリーファイルの新規作成（炉心体系、燃料体等の登録）
- 4) 炉心燃焼計算（1サイクル初期～末期）
- 5) ヒストリーファイルの更新（2サイクル用新燃料の登録）
- 6) 指定燃焼ノードの燃料組成の編集
- 7) 転換率の編集計算
- 8) 平衡サイクル燃焼ノードの燃焼度編集

Fig.A.1 には、初装荷炉心の燃料集合体とメッシュ位置の対応を示すマップを、Fig.A.2～Fig.A.4 には、1サイクルから3サイクルまでの燃料集合体配置が示してある。3サイクル以降は平衡燃焼に至り、集合体配置は変わらない。本計算は、三角メッシュを使用した径方向二次元計算であるが、燃焼コードは CITATION をベースに作成されているため、CITATION で使用できる体系はすべて適用可能である。

```

//JCL6 JOB
// EXEC JCLG
// SYSIN DD DATA=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
// JUSER 2567424,OKUMURA,0431.01
// T.7 C.3 W.6 I.8 GRP
OPTP PASSWORD=XX,MSCCLASS=X,NOTIFY=J4244,CLASS=5
***** SAMPLE INPUT : J4244.HCLWRK2.CNTL(F900) *****
//SARACK EXEC LMGO,LM='J4244.SRACN',PNM=SRAC666X,QBS1ZE=137
***** CELL BURNUP CALCULATION AND GENERATE MACRO-
// SCOPIC XS TABLE FOR CORE CALCULATION *
// PU-FISS. ENRICHMENT : 9.0%/
***** EXEC ANY *****
//SARACK EXEC LMGO,LM='J4244.SRACN',PNM=SRAC666X,QBS1ZE=137
***** F106F001 DD DUMMY
//RUN.F107F001 DD DUMMY
//RUN.F107F001 DD DSN=J4244.RESTART,DATA,DISP=SHR
// EXPAND GRNLPS,SYSDT=N
//F181F001 DD DSN=&WRK81,SPACE=(TRK,(120,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=2)
//F182F001 DD DSN=&WRK82,SPACE=(TRK,(100,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=2)
//F183F001 DD DSN=&WRK83,SPACE=(TRK,(100,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=2)
//F184F001 DD DSN=&WRK84,SPACE=(TRK,(100,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=2)
//F104F001 DD DSN=&WRK04,SPACE=(TRK,(30,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F192F001 DD DSN=&WRK92,SPACE=(TRK,(5,2)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=FB,BLKSIZE=5120,LRECL=80)
//F101F001 DD DSN=&WRK01,SPACE=(TRK,(30,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F102F001 DD DSN=&WRK02,SPACE=(TRK,(30,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F103F001 DD DSN=&WRK03,SPACE=(TRK,(30,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F108F001 DD DSN=&WRK08,SPACE=(TRK,(30,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F110F001 DD DSN=&WRK09,SPACE=(TRK,(30,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F110F001 DD DSN=&WRK10,SPACE=(TRK,(30,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F111F001 DD DSN=&WRK11,SPACE=(TRK,(30,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F112F001 DD DSN=&WRK12,SPACE=(TRK,(30,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F113F001 DD DSN=&WRK13,SPACE=(TRK,(30,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F121F001 DD DSN=&WRK21,SPACE=(TRK,(30,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
***** JEND12 *****
//F122F001 DD DSN=&WRK22,SPACE=(TRK,(30,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F131F001 DD DSN=&WRK31,SPACE=(TRK,(20,5)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=FB,BLKSIZE=3200,LRECL=80,BUFNO=1)
//F132F001 DD DSN=&WRK32,SPACE=(TRK,(20,5)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F133F001 DD DSN=&WRK33,SPACE=(TRK,(20,5)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
***** JEND12 *****
//F134F001 DD DSN=J2031.FASTLB2.PSEUDO,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J2031.FASTLB2.ACTIN0,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J2031.FASTLB2.FP,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J2031.FASTLB2.FPINFINITE,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J2031.FASTLB2.HEAVYUC,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J1480.FASTLB2,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J2031.FASTLB2,ACTIN0,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J1480.FASTLB2A,UPDATE,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J0752.FASTLB2A,ACTIN0,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J3973.THERMLB2,ACTIN0,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J2031.THERMLB2,ACTIN0,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J2031.THERMLB2A,ACTIN0,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J1480.THERMLB4,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J1480.MCROSSA,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J0752.MCROSS.B,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
// DD DSN=J2031.MCROSSA,DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
***** JEND12 *****
//FASTU DD DSN=&WRKFEST1,SPACE=(TRK,(50,10,50)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=U,BLKSIZE=19069),DISP=(,DELETE)
//THERMALU DD DSN=&WRKTPH1,SPACE=(TRK,(50,10,50)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=U,BLKSIZE=19069),DISP=(,DELETE)
//MCREF DD DSN=&WRKMC1,SPACE=(CYL,(5,3,200)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=U,BLKSIZE=2500),DISP=(,DELETE)
//FLUX DD DSN=&WRKFUX,SPACE=(TRK,(20,15,50)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=U,BLKSIZE=2500),DISP=(,DELETE)
//MACRO DD DSN=J4244.HCJ2,MACRO,DATA,UNIT=0430,DISP=0D
//MACRO DD DSN=&WRKNAC,SPACE=(TRK,(20,10,10)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=U,BLKSIZE=2500),DISP=(,DELETE)
//MACRO DD DSN=J4244.HCJ2.MACRO,DATA,SPACE=(TRK,(10,15,50)),
// DCB=(RECfm=U,BLKSIZE=2500),DISP=(,DELETE)
//MACROWK DD DSN=&WRKCKW,SPACE=(CYL,(3,1,50)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=U,BLKSIZE=2500),DISP=(,DELETE)
//CHAIN6 ***** BORN DATA COMING6E,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
//F150F001 DD DSN=J3973.BORN,DATA,COMING6E,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
***** JEND12 *****
//F151F001 DD DSN=&WRK51,SPACE=(TRK,(20,5)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)
//F152F001 DD DSN=&WRK52,SPACE=(TRK,(20,5)),UNIT=WK10,
// DCB=(RECfm=VBS,BLKSIZE=32760,LRECL=X,BUFNO=1)

```



```

// DCH=(REC FM=VBS,BLK SIZE=32760,L RECL=X,BUF NO=1)
// F131F001 DD DSN=&WRK31,SPACE=(TRK,(20,5)),UNIT=WK10,
// DCB=(REC FM=FB,BLK SIZE=32760,L RECL=80,BUF NO=1)
// F132F001 DD DSN=&WRK32,SPACE=(TRK,(20,5)),UNIT=WK10,
// DCB=(REC FM=VBS,BLK SIZE=32760,L RECL=X,BUF NO=1)
// F133F001 DD DSN=&WRK33,SPACE=(TRK,(20,5)),UNIT=WK10,
// DCB=(REC FM=VBS,BLK SIZE=32760,L RECL=X,BUF NO=1)

***** JEM012 *****
//FASTP 00 DSN=J2031.FASTLB2.PSEUDO.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J2031.FASTLB2.ACTINDE.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J2031.FASTLB2.FP.DAT,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J2031.FASTLB2.PINFNT.DAT,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J2031.FASTLB2.HEAVNUC.DAT,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J1480.FASTLB2.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J2031.FASTLB5.FP.DAT,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J1480.FASTLB4.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J0752.FASTLB4.UPDATE.DAT,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// THERMALP 00 DSN=J2973.THERMLJ2.ACTINDE.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J2031.THERMLJ2.ACTINDE.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J2031.THERMLJ2.ACTINDE.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J1480.THERMLJ2.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J0752.THERMLJ2.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J1480.THERMLB4.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// MCROSS 00 DSN=J1480.MCROSS22.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J0752.MCROSS24.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
// DSN=J2031.MCROSSB4.INS.DATA,DISP=SHR, LABEL=(,,IN)

***** FASTU *****
//FASTU 00 DSN=&WRKFST,SPACE=CIRK,(50,10,50),UNIT=WK10,
// DCB=(REC FM=U,BLK SIZE=19069),DISP(,DELETE)
// THERHALU DD DSN=&WRKTHL,SPACE=CIRK,(50,10,50),UNIT=WK10,
// DCB=(REC FM=U,BLK SIZE=19069),DISP(,DELETE)
// MCREF DD DSN=&WRKMC,SPACE=CYL,(5,3,2000),UNIT=WK10,
// DCB=(REC FM=U,BLK SIZE=25000),DISP(,DELETE)
// FLUX DD DSN=&WRKFLX,SPACE=CIRK,(20,15,50),UNIT=WK10,
// DCB=(REC FM=U,BLK SIZE=25000),DISP(,DELETE)
// FLUX DD DSN=J244.HCJ2.FLX.CELL2,DISP=OLD,UNIT=
// DSN=J4244.HCJ2.FLX.CELL,SPACE=CIRK,(1,1,20),
// DCB=(REC FM=U,BLK SIZE=25000),DISP(NEW,CATLG,DELETE),
// UNIT=TSRK2

//MACRO 00 DSN=&WRKMAC,SPACE=CIRK,(20,10,10),UNIT=WK10,
// DCB=(REC FM=U,BLK SIZE=25000),DISP(,DELETE)
// MACRO 00 DSN=J4244.HCJ2.MACR0,DATA,SPACE=(TRK,(10,15,50)),
// DCB=(REC FM=U,BLK SIZE=25000),DISP(NEW,CATLG,DELETE),UNIT=00430
// MACROWK 00 DSN=&WRKHW,SPACE=CCVL,(3,1,50),UNIT=WK10,
// DCB=(REC FM=U,BLK SIZE=25000),DISP(,DELETE)

***** CHAIN66 *****
//FT50F001 DD DSN=j3973.BURN,DATA(CHAIN66E),DISP=SHR, LABEL=(,,IN)
//FT51F001 DD DSN=&WRKS1,SPACE=CIRK,(20,5),UNIT=WK10,
// DCB=(REC FM=VBS,BLK SIZE=32760,L RECL=X,BUF NO=1)


```



```

7(0,0)
F6XXXXF0
 1
FUELTYPE3 1
39779.39 /
7(0,0)
F3XXXXF0
 0 / TERMINATE OF BLOCK -2
 3 11 12
 1
H2ORFFLE 1
REFLAOXO
 0 / TERMINATE OF BLOCK -3
 4 12 13
 1
FUELTYPE1 2(0,0) / 6.5W/0 PU-FISSILE
4.0019E-5 0.0 1.9718E-2 1.1854E-3 5.0889E-4 2.2481E-4 1.1445E-4
 0.0 1.0219E-5 70(0,0) / U5,6,8 , P9,0,1,2 , NP9 , AM1 , ESE
FUELAD02 FUELTYPE1 2(0,0)
4.0019E-5 0.0 1.9718E-2 1.1854E-3 5.0889E-4 2.2481E-4 1.1445E-4
 0.0 1.0219E-5 70(0,0)
FUELAD03 FUELTYPE1 2(0,0)
4.0019E-5 0.0 1.9718E-2 1.1854E-3 5.0889E-4 2.2481E-4 1.1445E-4
 0.0 1.0219E-5 70(0,0)
FUELAD04 FUELTYPE1 2(0,0)
4.0019E-5 0.0 1.9718E-2 1.1854E-3 5.0889E-4 2.2481E-4 1.1445E-4
 0.0 1.0219E-5 70(0,0)
FUELAD05 FUELTYPE1 2(0,0)
4.0019E-5 0.0 1.9718E-2 1.1854E-3 5.0889E-4 2.2481E-4 1.1445E-4
 0.0 1.0219E-5 70(0,0)
FUELAD06 FUELTYPE1 2(0,0)
4.0019E-5 0.0 1.9718E-2 1.1854E-3 5.0889E-4 2.2481E-4 1.1445E-4
 0.0 1.0219E-5 70(0,0)
FUELAD07 FUELTYPE1 2(0,0)
4.0019E-5 0.0 1.9718E-2 1.1854E-3 5.0889E-4 2.2481E-4 1.1445E-4
 0.0 1.0219E-5 70(0,0)
FUELAD08 FUELTYPE1 2(0,0)
4.0019E-5 0.0 1.9718E-2 1.1854E-3 5.0889E-4 2.2481E-4 1.1445E-4
 0.0 1.0219E-5 70(0,0)
FUELAD09 FUELTYPE1 2(0,0)
4.0019E-5 0.0 1.9718E-2 1.1854E-3 5.0889E-4 2.2481E-4 1.1445E-4
 0.0 1.0219E-5 70(0,0)
FUELAD10 FUELTYPE1 2(0,0)
4.0019E-5 0.0 1.9718E-2 1.1854E-3 5.0889E-4 2.2481E-4 1.1445E-4
 0.0 1.0219E-5 70(0,0)
FUELAD11 FUELTYPE1 2(0,0)
4.0019E-5 0.0 1.9718E-2 1.1854E-3 5.0889E-4 2.2481E-4 1.1445E-4
 0.0 1.0219E-5 70(0,0)
FUELAD12 FUELTYPE1 2(0,0)
4.0019E-5 0.0 1.9718E-2 1.1854E-3 5.0889E-4 2.2481E-4 1.1445E-4
 0.0 1.0219E-5 70(0,0)
FUELAD13 FUELTYPE1 2(0,0)
 1
FUELTYPE1 1 1
39779.39 / S(BHANDLE)*223(H)*VOLFR
 7(0,0)
F3XXXXF0
 1
FUELTYPE2 1 1
 39779.39 /

```



```

0.0 1.4149E-5 70(0.0) FUELTYPE3 2(0.0) FUELTYPE3 2(0.0)
FUELCO16 FUELTYPE3 2(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
0.0 1.4149E-5 70(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO17 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO18 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO19 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO20 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO21 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO22 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO23 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO24 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO25 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO26 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO27 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO28 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO29 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO30 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO31 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
FUELCO32 FUELTYPE3 2(0.0) 0.0 1.4149E-5 70(0.0) 3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0464E-4 3.1129E-4 1.5847E-4

```


FUEL A003	28 30	17 17	1	-1	2 0	/ 4		FUEL A033	-32 34	10 10	1	-1	1	1	/31
FUEL A004	-30 32	15 15	1	-1	1 0	/ 5		FUEL A019	31 33	11 11					
	29 31	16 16						FUEL A020	16 18	17 17	1	-1	2	0	/32
FUEL A022	-30 32	15 15	1	-1	1 1	/ 6		FUEL A020	-34 34	8 8	1	-1	2	0	/33
	29 31	16 16						FUEL B001	33 34	9 9					
FUEL A005	-34 34	14 14	1	-1	2 0	/ 7		FUEL B001	-18 20	15 15	1	-1	1	0	/ 1-BANDLE:7.5W/0
	33 34	15 15						FUEL B020	-20 22	13 13	1	-1	1	0	
FUEL A006	-26 28	16 16	1	-1	1 0	/ 8		FUEL B003	19 21	14 14		-1	1	1	/ 2
	25 27	17 17						FUEL B021	-22 24	11 11	1	-1	1	0	/ 5
FUEL A023	-26 28	16 16	1	-1	1 1	/ 9		FUEL B004	21 23	12 12					
	25 27	17 17						FUEL B021	-22 24	11 11	1	-1	1	1	/ 6
FUEL A007	-28 30	14 14	1	-1	1 0	/ 10		FUEL B020	21 23	12 12					
	27 29	15 15						FUEL B004	-26 28	10 10	1	-1	1	0	/ 7
FUEL A024	-28 30	14 14	1	-1	1 1	/ 11		FUEL B022	-26 28	10 10	1	-1	1	1	
	27 29	15 15						FUEL B005	-30 32	9 9	1	-1	1	0	/ 9
FUEL A008	-32 34	13 13	1	-1	1 0	/ 12		FUEL B023	29 31	10 10	1	-1	1	1	
	31 33	14 14						FUEL B006	-14 16	16 16	1	-1	1	0	/ 11
FUEL A025	-32 34	13 13	1	-1	1 1	/ 13		FUEL B024	13 15	17 17		-1	1	1	/ 12
	31 33	14 14						FUEL B007	29 31	10 10	1	-1	1	0	/ 10
FUEL A009	22 24	17 17	1	-1	2 0	/ 14		FUEL B006	-14 16	16 16	1	-1	1	1	/ 8
	24 26	15 15	1	-1	1 0	/ 15		FUEL B005	-30 32	9 9	1	-1	1	0	
FUEL A010	23 25	16 16	1	-1	1 0	/ 16		FUEL B023	-30 32	9 9	1	-1	1	1	
	24 26	15 15	1	-1	1 1	/ 16		FUEL B006	-14 16	16 16	1	-1	1	0	
FUEL A026	23 25	16 16	1	-1	1 1	/ 17		FUEL B024	-14 16	16 16	1	-1	1	1	/ 10
	23 25	16 16						FUEL B007	13 15	17 17		-1	1	1	
FUEL A011	-26 28	13 13	1	-1	1 0	/ 17		FUEL B006	-14 16	16 16	1	-1	1	0	
	25 27	14 14						FUEL B005	-16 18	14 14	1	-1	1	1	/ 11
FUEL A027	-26 28	13 13	1	-1	1 1	/ 18		FUEL B023	13 15	17 17		-1	1	1	
	25 27	14 14						FUEL B006	-14 16	16 16	1	-1	1	1	
FUEL A012	-30 32	12 12	1	-1	1 0	/ 19		FUEL B024	-14 16	16 16	1	-1	1	1	
	29 31	13 13						FUEL B007	13 15	17 17		-1	1	0	
FUEL A028	-30 32	12 12	1	-1	1 1	/ 20		FUEL B006	-16 18	14 14	1	-1	1	0	
	29 31	13 13						FUEL B023	15 17	15 15		-1	1	1	
FUEL A013	-34 34	11 11	1	-1	2 0	/ 21		FUEL B006	-16 18	14 14	1	-1	1	1	/ 14
	33 34	12 12						FUEL B024	-15 17	15 15		-1	1	0	
FUEL A014	-20 22	16 16	1	-1	1 0	/ 22		FUEL B008	-18 20	12 12	1	-1	1	0	/ 15
	19 21	17 17						FUEL B027	-20 22	10 10	1	-1	1	1	
FUEL A029	-20 22	16 16	1	-1	1 1	/ 23		FUEL B026	-18 20	12 12	1	-1	1	1	/ 16
	21 23	15 15						FUEL B006	-17 19	13 13		-1	1	1	
FUEL A016	-24 26	12 12	1	-1	1 0	/ 26		FUEL B009	-20 22	10 10	1	-1	1	0	/ 17
	23 25	13 13						FUEL B028	-24 26	9 9	1	-1	1	1	/ 20
FUEL A031	-24 26	12 12	1	-1	1 1	/ 27		FUEL B011	23 25	10 10	1	-1	1	1	
	23 25	13 13						FUEL B010	-24 26	9 9	1	-1	1	0	/ 19
FUEL A017	-28 30	11 11	1	-1	1 0	/ 28		FUEL B029	-28 30	8 8	1	-1	1	1	/ 22
	27 29	12 12						FUEL B012	27 29	9 9	1	-1	1	0	/ 23
FUEL A032	-28 30	11 11	1	-1	1 1	/ 29		FUEL B030	-32 34	7 7	1	-1	1	0	
	27 29	12 12						FUEL B030	-31 33	8 8	1	-1	1	1	/ 24
FUEL A018	-32 34	10 10	1	-1	1 0	/ 30		FUEL B030	-32 34	7 7	1	-1	1	1	
	31 33	11 11													

FUEL013	31 33	8 8	17 17	1 -1	2 0	/25	FUEL009	-20 22	7 7	1 -1	1 0	/17
FUEL014	-12 14	15 15	1 -1	1 0	/26		FUEL027	-20 22	7 7	1 -1	1 1	/18
FUEL031	11 13	16 16					FUEL010	-24 26	6 6	1 -1	1 0	/19
FUEL015	-14 16	13 13	1 -1	1 0	/28		FUEL028	-24 26	6 6	1 -1	1 1	/20
FUEL032	-14 16	13 13	1 -1	1 1	/29		FUEL011	-28 30	5 5	1 -1	1 0	/21
FUEL016	-26 28	7 7	1 -1	1 0	/30		FUEL029	-28 30	5 5	1 -1	1 1	/22
FUEL033	-26 28	7 7	1 -1	1 1	/31		FUEL012	-32 34	4 4	1 -1	1 0	/23
FUEL017	-30 32	6 6	1 -1	1 0	/32		FUEL030	-32 34	4 4	1 -1	1 1	/24
FUEL034	-30 32	6 6	1 -1	1 1	/33		FUEL013	4 6	17 17	1 -1	2 0	/25
FUEL018	-29 31	7 7	1 -1	1 1	/34		FUEL014	-6 8	15 15	1 -1	1 0	/26
FUEL035	-34 34	5 5	1 -1	2 0			FUEL031	-6 8	15 15	1 -1	1 1	/27
FUEL001	-33 34	6 6					FUEL015	5 7	16 16	1 -1	1 1	/28
FUEL001	-16 18	11 11	1 -1	1 0	/1 C-BUNDLE 9.0W/0		FUEL032	-8 10	13 13	1 -1	1 1	/29
FUEL019	-15 17	12 12					FUEL016	-26 28	4 4	1 -1	1 0	/30
FUEL003	-16 18	11 11	1 -1	1 1	/2		FUEL033	-25 27	5 5			
FUEL002	-15 17	12 12					FUEL017	-26 28	4 4	1 -1	1 1	/31
FUEL020	-18 20	9 9	1 -1	1 1	/4		FUEL034	-29 31	4 4	1 -1	1 1	/32
FUEL004	-17 19	10 10					FUEL018	-34 36	2 2	1 -1	2 0	/34
FUEL003	-22 24	8 8	1 -1	1 0	/5		BLACKABS / BLOCK 7-1 Alt ZONE FILLED WITH BLACK-ABSORBER	33 34	3 3	1 -1	1 0	
FUEL021	-22 24	8 8	1 -1	1 1	/6		H2REFLE / H2O(30% SUS) REFLECTOR	32 34	1 1			
FUEL005	-10 12	14 14	1 -1	1 0	/9			32 34	1 1			
FUEL023	-10 12	14 14	1 -1	1 1	/10			28 33	2 2			
FUEL006	-9 11	15 15	1 -1	0	/11			24 29	3 3			
FUEL024	-12 14	12 12	1 -1	0	/12			23 25	4 4			
FUEL007	-14 16	10 10	1 -1	0	/13			22 24	5 5			
FUEL025	-14 16	10 10	1 -1	1 1	/14			18 23	6 6			
FUEL026	-16 18	8 8	1 -1	0	/15			14 19	7 7			
	15 17	9 9	1 -1	1 1	/16			13 15	8 8			
								12 14	9 9			
								11 13	10 10			
								10 12	11 11			
								6 11	12 12			
								5 7	13 13			
								4 6	14 14			
								3 5	15 15	1		


```

0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0012 FUELTYPE3 2(0,0) FUEL0029 FUELTYPE3 2(0,0)
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0013 FUELTYPE3 2(0,0) FUEL0030 FUELTYPE3 2(0,0)
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0014 FUELTYPE3 2(0,0) FUEL0031 FUELTYPE3 2(0,0)
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0015 FUELTYPE3 2(0,0) FUEL0032 FUELTYPE3 2(0,0)
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0016 FUELTYPE3 2(0,0) FUEL0033 FUELTYPE3 2(0,0)
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0017 FUELTYPE3 2(0,0) FUEL0034 FUELTYPE3 2(0,0)
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0018 FUELTYPE3 2(0,0) 10 11 0 / RECORDS OF INDIVIDUAL FUEL ELEMENT
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4 FUEL0001 2
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0019 FUELTYPE3 2(0,0) FUEL0002 2
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4 FUEL0001 2
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0020 FUELTYPE3 2(0,0) 11 11 0 / TERMINATION OF BLOCK 10-2
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4 FUEL0001 2
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0021 FUELTYPE3 2(0,0) 12 11 0 / LIST OF OPERATION RECORDS
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4 FUEL0001 2
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0022 FUELTYPE3 2(0,0) 13 0 / LIST OF FUEL ELEMENTS
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4 FUEL0001 2
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0023 FUELTYPE3 2(0,0) 14 0 / JOB TERMINATED
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4 FUEL0001 2
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0024 FUELTYPE3 2(0,0)
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0025 FUELTYPE3 2(0,0)
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0026 FUELTYPE3 2(0,0)
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0027 FUELTYPE3 2(0,0)
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
0.0 1.4149E-5 70(0,0) FUEL0028 FUELTYPE3 2(0,0)
3.8417E-5 0.0 1.8929E-2 1.6413E-3 7.0466E-4 3.1129E-4 1.5847E-4
0.0 1.4149E-5 70(0,0)

```



```

/*+
**+
//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLIM='++'
// JUSER 2567444,OKUNURA,0431.01
        T 1 W A C 1 I O P 0
        OPTP PASSWORD=X,MSGCLASS=X,NOTIFY=J4244
***** SAMPLE INPUT : J4244.HCLWRJ2.CNTLCHTBLT2D
//*
//* EDIT BURNUP DEGREE OF EACH FUEL ASSEMBLIES
//* IN THE 6-TH CYCLE CORE
***** HIST EXEC LM60,PNM=HIST2,LH=J480.COREIN2
//F101F001 00 SPACE=CIRK(10,1) RLSE,UNIT=WK10
//F110F001 00 DSN=J4244.HCJ2.HIST6B,DATA,DISP=SHR,YNLT=00430
//F111F001 00 DSN=J4244.HCJ2.HIST6E,DATA,DISP=SHR,UNI1=00430
//SYSIN DD *
14 10 11/ BLOCK 14 1 LIST OF BURN-UP
0 0 0   / JOB TERMINATED
//*

```

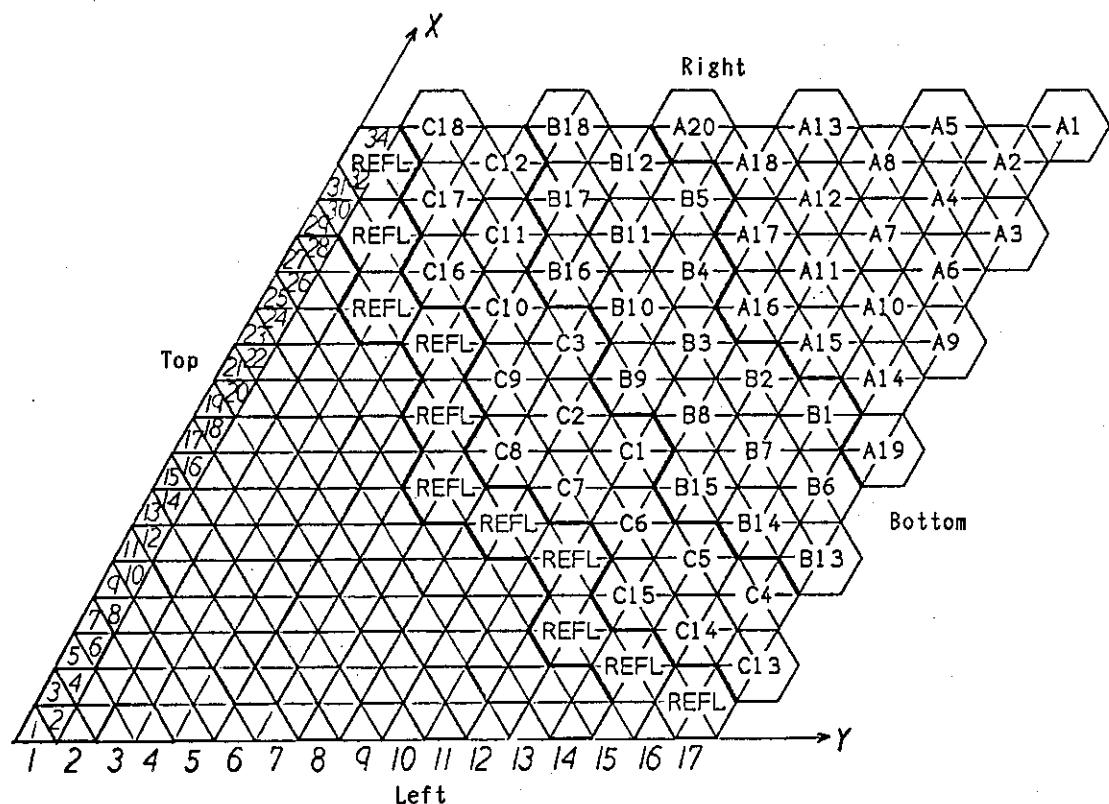


Fig. A.1 Triangular mesh map for core burnup code (for the first cycle)

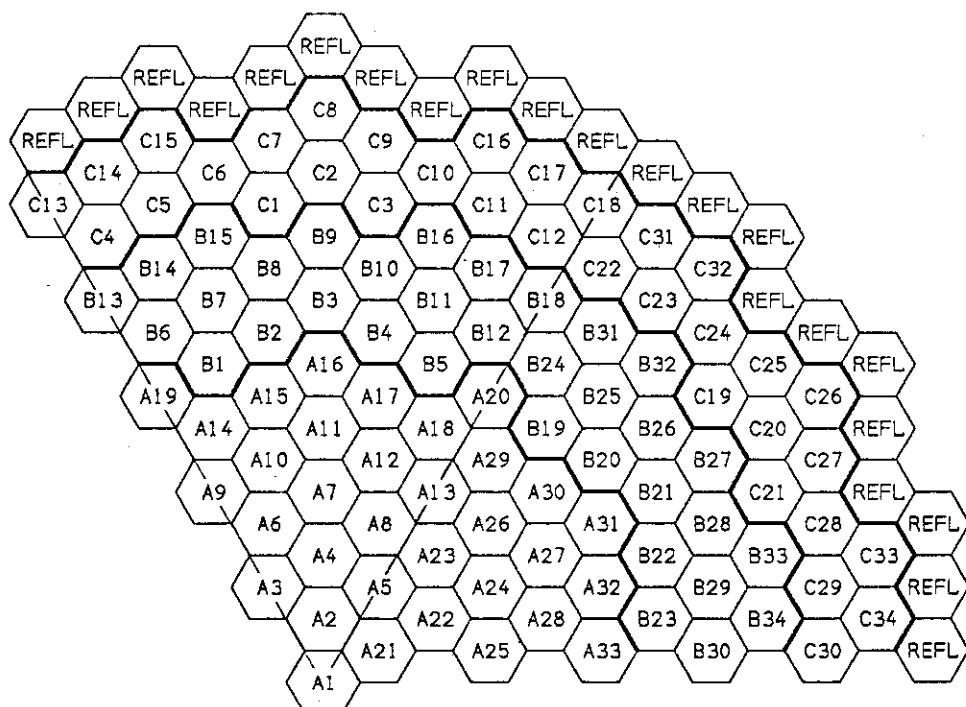


Fig. A.2 Position of fuel assemblies in 1/3 core at the first cycle

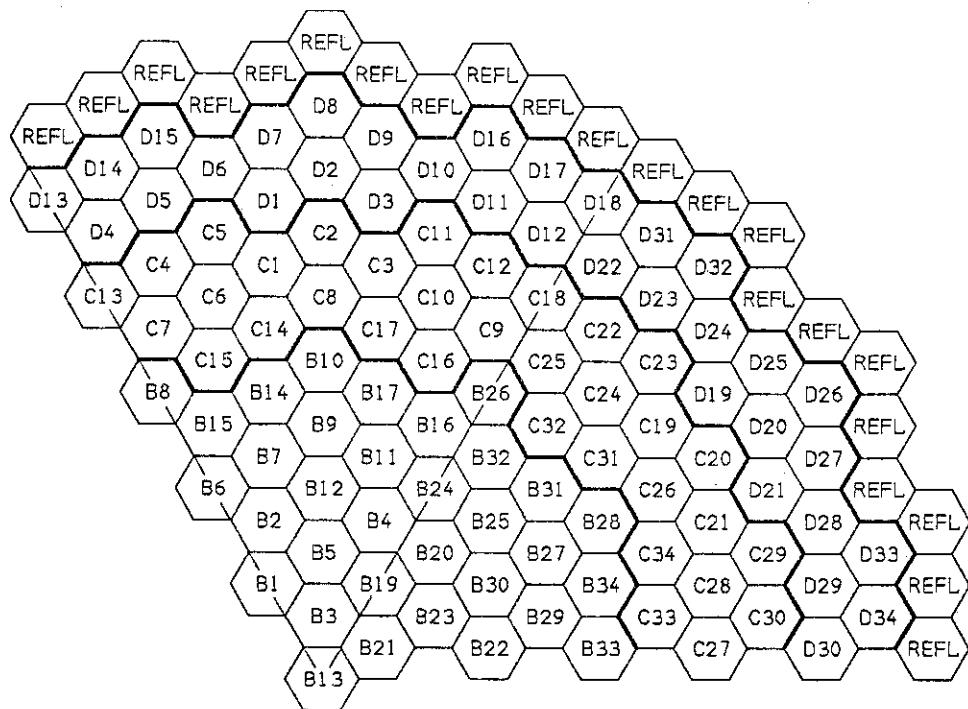


Fig. A.3 Position of fuel assemblies in 1/3 core at the second cycle

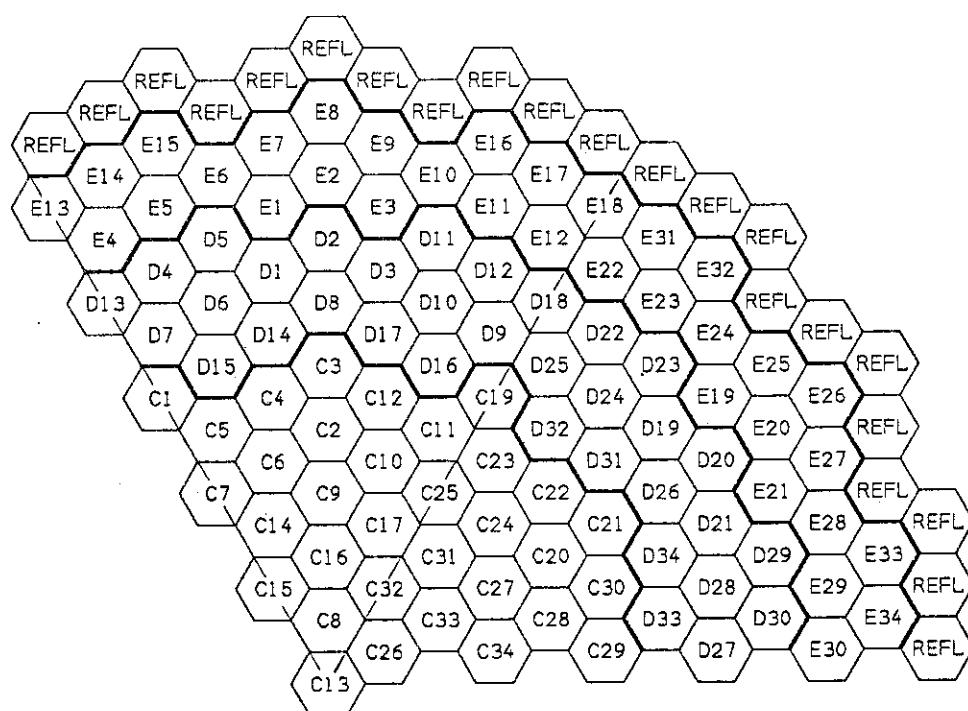


Fig. A.4 Position of fuel assemblies in 1/3 core at the third cycle
(same position numbers are repeated at following cycles)