

軽水炉燃料集合体の燃焼挙動を再現する
等価ピンセルモデルの導出法に関する研究

原子炉工学研究室

本多京介

目次

第1章 緒論.....	3
1.1 研究背景.....	3
1.2 研究目的.....	4
第2章 検討手法.....	5
2.1 解析手法.....	5
2.1.1 汎用炉物理解析コードシステム CBZ の概要.....	5
2.1.2 汎用炉物理解析コードシステム CBZ の計算.....	5
2.2 解析体系.....	6
2.2.1 燃料集合体構成.....	6
2.2.2 ピンセル体系構成.....	9
第3章 検討結果・考察.....	10
3.1 燃料集合体内の核種インベントリの位置依存性.....	10
3.2 (H/HM)に基づく位置依存性を表すパラメータの導出.....	15
3.2.1 ピンセル体系の(H/HM)へのピンピッチと水密度の影響.....	16
3.2.2 燃料集合体内の位置依存性を表すパラメータ.....	18
3.2.3 (H/HM) _{Equiv.} の変数 α 、 β を変化させることによる影響.....	19
3.3 PWR 燃料における燃料集合体と等価となるピンセル体系の検討.....	21
3.4 Gd入り燃料棒による核種生成への影響評価.....	28
第4章 結言.....	32
参考文献.....	33
謝辞.....	34

第1章 緒論

1.1 研究背景

核燃料の燃焼後の組成を正確に予想することは、使用済み核燃料の貯蔵（臨界管理や除熱、放射線防護、核物質管理）や、燃料の再利用において重要である。燃焼後の核燃料の組成の予測は、一般に、「燃焼計算」と呼ばれる数値シミュレーションにより行われる。核燃料の燃焼計算では、着目する燃料において時々刻々に変化する中性子束のレベル（大きさ）とそのエネルギースペクトル（分布）の情報が必要となる。理想的には原子炉の炉心全体をモデル化してこれらを計算することが最も正確と言えるが、中性子束の平均自由行程が短い軽水炉については、一般的に燃料集合体一体、もしくは数体のモデルで計算が行われている。

現在、原子炉工学研究室では、軽水炉の燃料集合体における燃焼特性（燃焼中の中性子実効増倍率やさまざまな原子核の数密度）の不確かさを定量化、特に燃焼計算の入力情報となる核データの不確かさに起因する燃焼特性の不確かさに集中して取り組んでいる。この核データに起因する燃焼特性の不確かさを定量化の方法として種々のものが提案されているが、我々は燃焼特性の核データに対する感度係数（微係数）を燃焼感度理論（Depleted Perturbation Theory、DPT）によって計算し、これを用いて核データから燃焼特性への不確かさを伝播計算を行う、という方法を採用している。最近、原子炉工学研究室では、燃料集合体の燃焼計算にその導入が必須といえる Predictor-Corrector 法のための DPT の導出を行い、計算コードへの実装を行った[1]。ところが、この計算には膨大な計算時間（1~2時間）と計算容量（10GB 以上）を要することが分かっており、複数の異なる燃料集合体の燃焼特性の不確かさを定量化を行うには、さらなる改良を必要としている状況である。

一方、それとは異なるアプローチとして、燃料集合体における燃料棒の燃焼計算を、それと等価なピンセルモデルで行う、という方法がある。これに基づいた場合、DPT による燃焼感度の計算をピンセルモデルで行うことが可能となり、燃焼特性の核データに対する感度係数の計算に要する時間と容量は劇的に低下し（計算時間は数分のオーダーとなる）、現実的なものとなる。

また、新型原子炉の概念設計の計算では、複雑な燃料集合体体系ではなく、ピンセルモデルが採用されることも多い。また、バックエンドの分野で必要となる核種インベントリの計算では、その計算に必要となる核データ（一群断面積）を作成するモデルとして、ピンセルモデルが用いられる。実際に、原子炉物理の分野で広く使われている ORIGEN2 コードでも以下のように使用されている。

ORIGEN2 での計算は集合体平均の同位体組成を計算することを目的としているため、作成対象の燃料集合体と等価な単一ピンセルモデルを基に作成した。単一ピンセルにおいては、燃料ペレットと被覆管の大きさ、燃料棒ピッチは基となった集合体と同一であるが、

集合体を平均するようなウラン対水素比を与えるように冷却材領域の原子個数密度を調整し、さらに、非均質補正のためのダンコフ係数を適切に選んで設定した[2]。

以上のように、原子炉や燃料集合体内に装荷された燃料棒の燃焼挙動を評価するために、それと等価なピンセルモデルを構築することは重要であると言える。

ピンセルモデルの構築にあたっては、着目する燃料集合体での燃焼挙動を極力再現するようなものが望ましい。一方、燃料集合体内には、通常の燃料棒に加えて、水で満たされている計装管や制御棒案内管、ガドリニウムなど可燃性毒物を含んだ燃料棒が配置されており、燃料棒の装荷位置によって燃焼挙動が異なることに留意する必要がある。

等価ピンセルモデルを作る上での条件として以下のものが考えられる。

1. 燃料集合体内の物質配置のみの情報
2. 燃焼初期中性子束の空間・エネルギー分布の情報
3. 燃焼を通した中性子束の空間・エネルギー分布の情報
4. 燃焼感度の情報

項目番号が大きくなるに従って、情報の詳細度は高くなる。詳細度が高いほどモデルとして良い再現が可能であると考えられる。現在でも、中性子束のエネルギースペクトルを考慮した等価ピンセルモデルが考案されているが、高い詳細度の情報を得るためには事前の計算が必要となり、情報に相応の手間や時間を要している。事前の計算が必要ない上記1の燃料集合体内の物質配置のみの情報から、等価ピンセルモデルの導出が可能となれば、計算負荷が小さくこれまでには存在しなかった研究ツールの一つとなることが期待できる。

1.2 研究目的

本研究の目的は、燃料集合体の物質配置の情報から燃焼挙動を再現する等価ピンセルモデルを導出することとする。

第 2 章 検討方法

2.1 燃焼計算手法

本研究において、燃焼計算は汎用炉物理解析コードシステム CBZ を用いて行った。

2.1.1 汎用炉物理解析コードシステム CBZ の概要

汎用炉物理解析コードシステム CBZ は、臨界、燃焼、遮蔽といった、原子炉内とその周囲における中性子、ガンマ線の輸送に関わる物理現象を数値的に模擬するためのコードシステムである。日本原子力研究開発機構で開発されたコードシステム CBG をベースとして、2012 年 4 月より本研究室で開発が行われている。

プログラムはコンピュータ言語 C++ で記述されており、原子炉物理の計算に関する情報（原子炉を表現するための幾何形状や、原子炉を構成する媒質といったものに加えて、計算手法や収束条件なども含む）は全て「クラス」として定義される。中性子、ガンマ線の輸送方程式、拡散方程式を解くソルバーが複数実装されており、それらソルバーはそれぞれ関連する複数のクラスで構成されている。また、ソルバー間のデータのやり取りはクラスのインスタンスを通して行われることから、複数のソルバーを組み合わせた多種多様な炉物理計算が容易に実現可能であることが特徴である。

2.1.2 汎用炉物理コードシステム CBZ の計算

本研究における燃焼計算は、MulticellBurner と Burner という 2 つのモジュールを用いた。MulticellBurner では、 3×3 体系のマルチセルや、 17×17 体系など燃料集合体に対する燃焼計算を行うことが可能である。Burner では、ピンセル体系に対する燃焼計算を行うことが可能であり、燃料、被覆管、冷却材の三領域からなる正方、六角格子体系の燃焼計算を行う。また、MulticellBurner では特性曲線法によって、Burner では衝突確率法によって、中性子輸送方程式を解くことで中性子束計算を行う。

2.2 計算体系

本研究では、燃料集合体体系とピンセル体系の2つの体系を計算対象とした

2.2.1 燃料集合体体系

燃料集合体の幾何形状は図 2.1 に示すような典型的な PWR（Pressurized Water Reactor：加圧水型原子炉）を模擬した 17×17 体系である。その構成は UO_2 燃料、制御棒案内管、可燃性毒物である Gd_2O_3 燃料の3種類である。全ての方向で境界条件は完全反射条件とする。なお、燃料ペレットと被覆管の間のギャップは無いものとして計算を行った。図 2.1 に示す通り、燃料集合体は8分の1対称な図形であることから、ナンバリングをした燃料ピンを検討の対象とした。ここで、 Gd_2O_3 燃料ピンについては対象外とした。対象燃料ピンのナンバリングは便宜上、0~13、22~33、42~52 であり、その総数は37本である。図 2.2 に燃料集合体の k_{inf} を示す。燃焼の初期では、可燃性毒物である Gd_2O_3 燃料による影響により k_{inf} が緩やかに減少していく。燃焼度 $20[\text{GWd/t}]$ を過ぎると Gd_2O_3 燃料の影響がなくなり減少の傾きが大きくなる。また、表 2.1、表 2.2、表 2.3、表 2.4、表 2.5 にそれぞれ、燃料集合体内各寸法、 UO_2 燃料の原子数密度、 Gd_2O_3 燃料の原子数密度、減速材の組成、各領域の温度を示す。なお、 UO_2 燃料と Gd_2O_3 燃料は同じ燃料温度を使用する。出力密度は $218[\text{W/cm}]$ で一定とし、燃料集合体内のボイド率は $0[\%]$ とした。

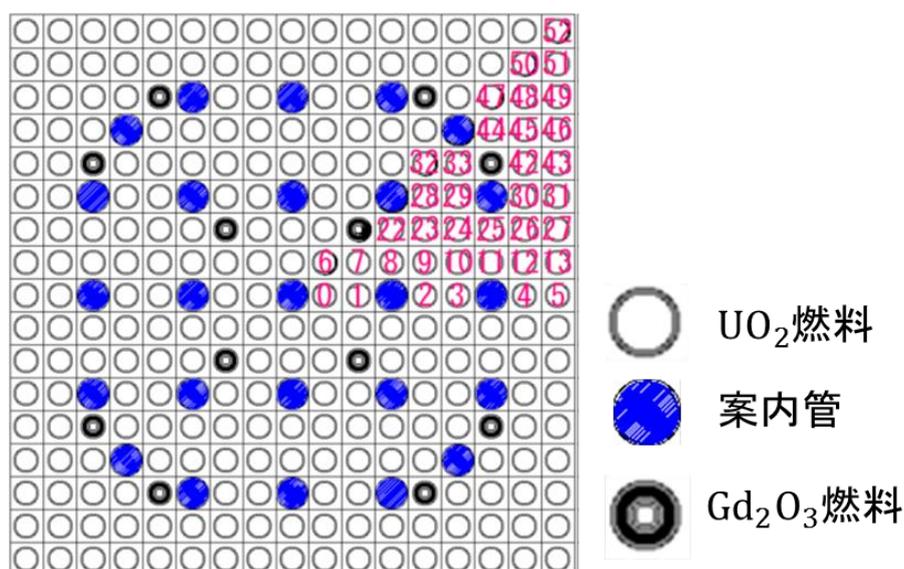


図 2.1：燃料集合体 17×17 体系

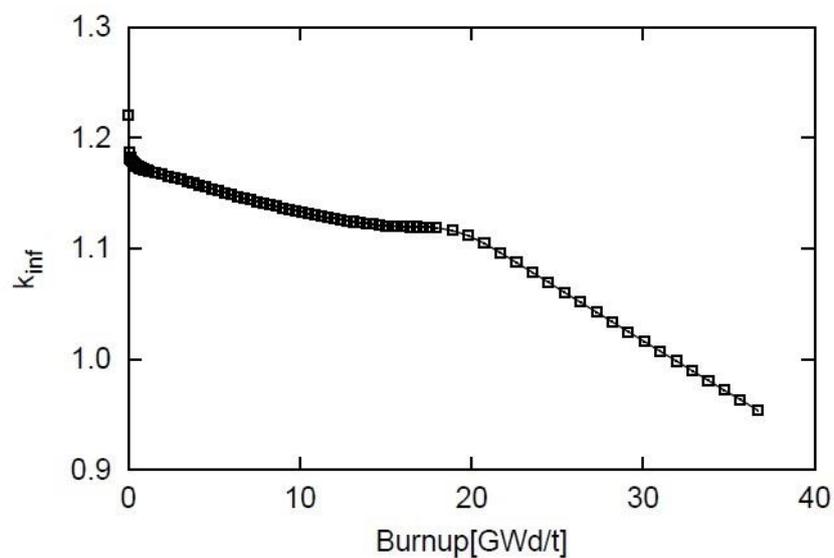


図 2.2 : 燃料集合体の k_{inf}

表 2.1 : 燃料集合体内各寸法

内容	寸法[cm]
燃焼棒ピッチ	1.2588
ペレット外径	0.805
燃料被覆管内径	0.805
燃料被覆管外径	0.95
案内管内径	0.569
案内管外径	0.61

表 2.2 : UO_2 燃料の組成

核種	原子数密度[/barn/cm]
O-16	4.4824E-2
U-234	8.9648E-6
U-235	9.2114E-4
U-238	2.1482E-2

表 2.3 : Gd₂O₃ 燃料の組成

核種	原子数密度[/barn/cm]
O-16	5.0129E-2
Gd-152	7.0725E-7
Gd-154	7.7090E-5
Gd-155	5.2337E-4
Gd-156	7.2387E-4
Gd-157	5.5342E-4
Gd-158	8.7841E-4
Gd-160	7.7302E-4
U-234	4.4824E-6
U-235	5.8944E-4
U-238	2.1796E-2

表 2.4 : 減速材の組成

核種	原子数密度[/barn/cm]
H-1	6.6735E-2
O-16	3.3368E-2
B-10	3.7989E-6
B-11	1.529E-5

表 2.5 : 各領域における温度

領域	温度[K]
燃料	900
被覆管	600
減速材 (水)	591

2.2.2 ピンセル体系

図 2.3 に示す UO_2 燃料、燃料被覆管、減速材である水の 3 領域からなるピンセル体系を用いて燃焼計算を行った。幾何形状、組成、温度、燃焼条件については、燃料集合体体系と同一とした。また、図 2.4 にピンセル体系での k_{inf} を示す。燃料集合体とは違い、燃料の寿命である燃焼度 30[GWd/t] となるまで直線的に k_{inf} が減少していることが分かる。

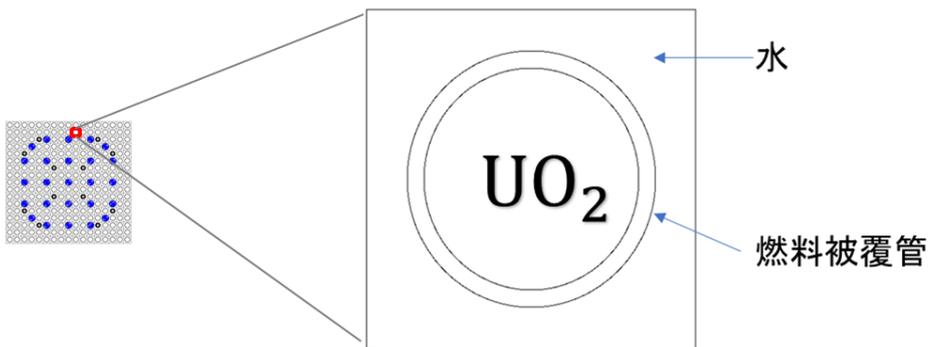


図 2.3：ピンセル体系

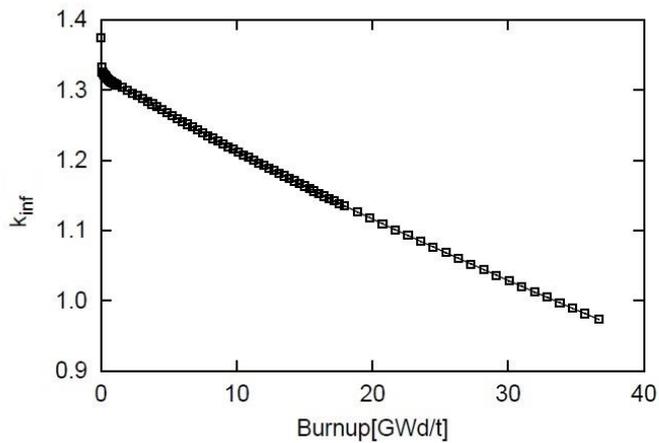


図 2.4：ピンセル体系の k_{inf}

第3章 検討結果・考察

3.1 燃料集合体内の核種インベントリの位置依存性

燃料集合体と等価となるピンセル体系を検討するに当たって、集合体における燃焼後の燃料組成の位置依存特性を調べた。燃料集合体内の位置による依存性のみを調べるため、燃料ピンの燃焼度のずれを線形補間により 30[GWd/t]に補正した。図 3.1 に燃料集合体計算の平均値に対する燃料ピンの各核種数密度の差異を示す。この結果より、燃料集合体内の燃料ピンごとに燃焼後の燃料組成が異なり、燃料集合体内の核種生成量に位置依存性があることを確認した。

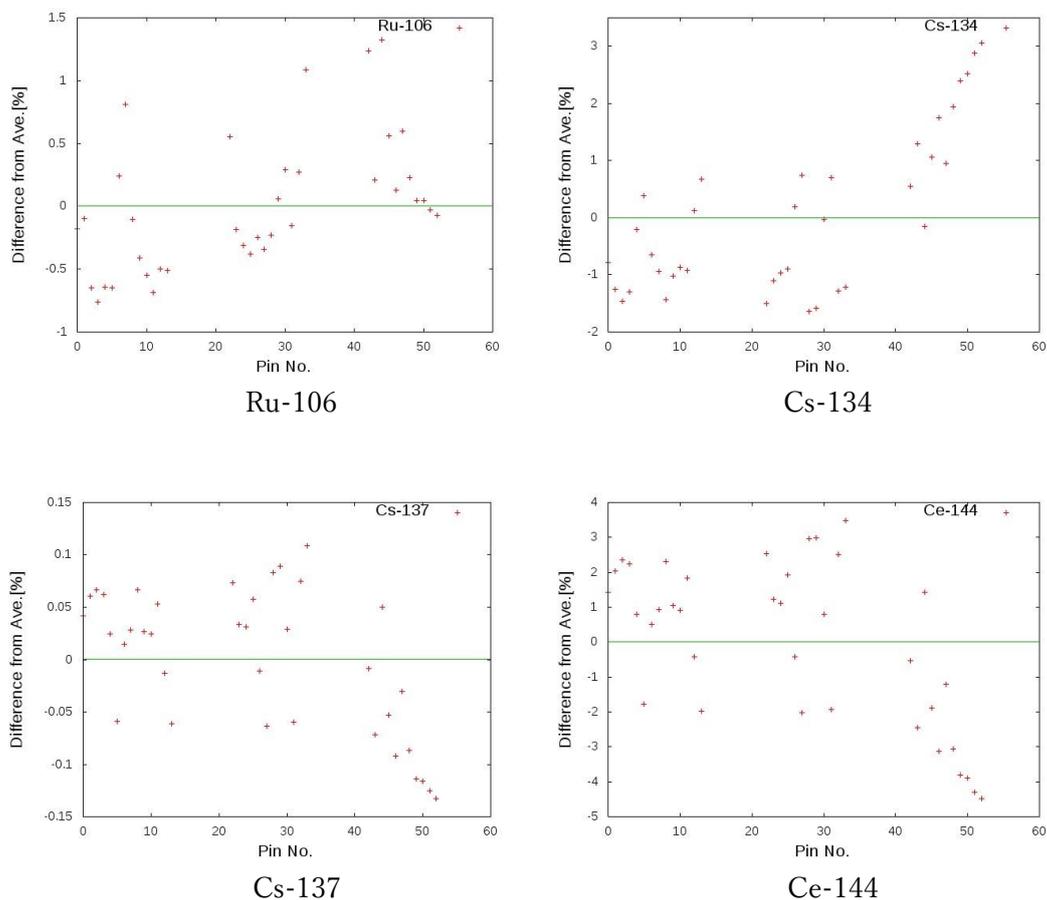
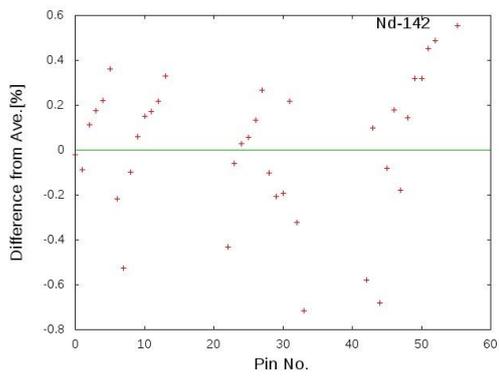
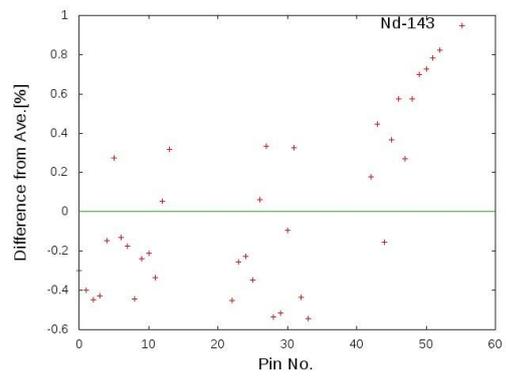


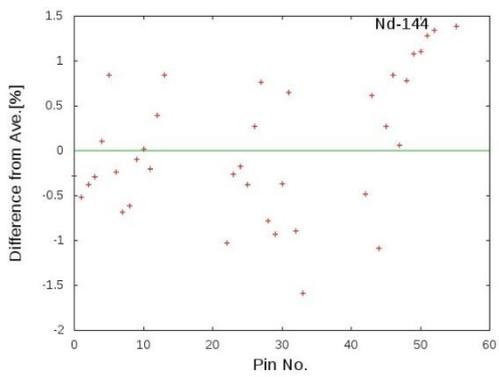
図 3.1 : 各ピンによる数密度の差異 (1/5)



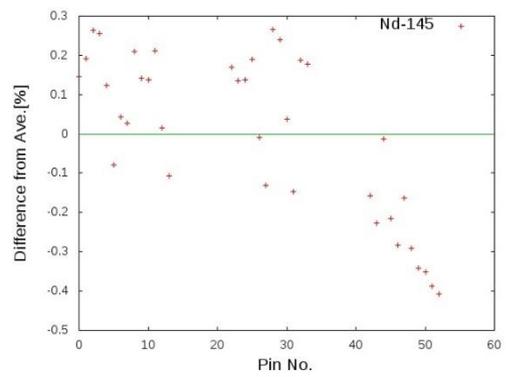
Nd-142



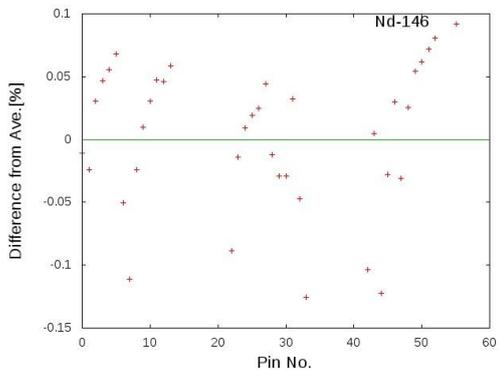
Nd-143



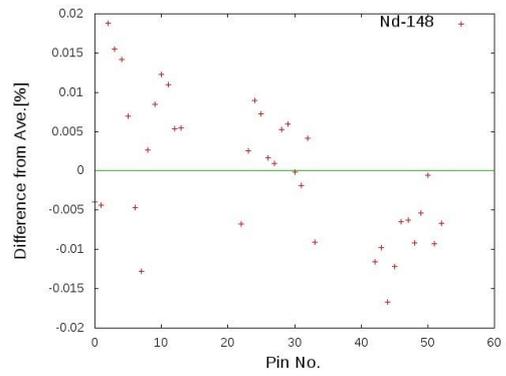
Nd-144



Nd-145

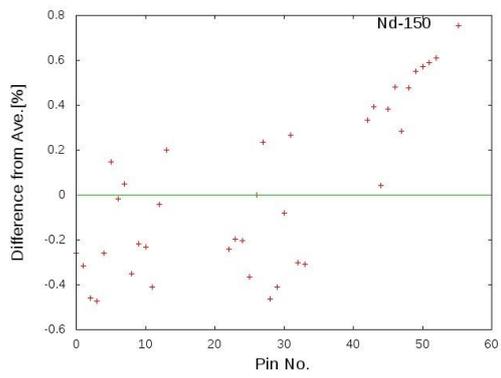


Nd-146

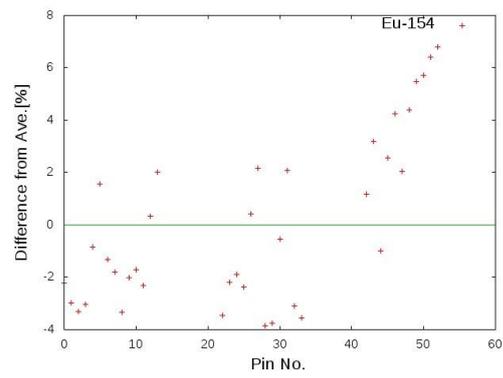


Nd-148

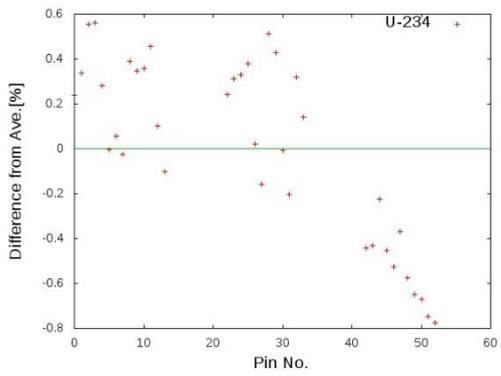
図 3.1 : 各ピンによる数密度の差異 (2/5)



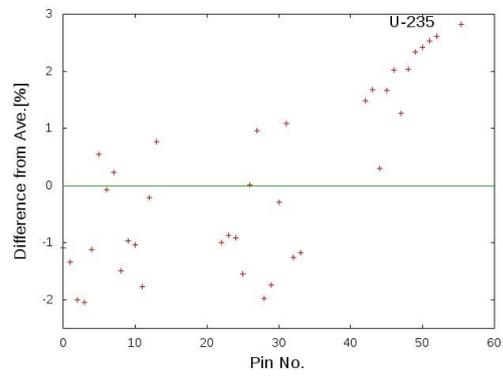
Nd-150



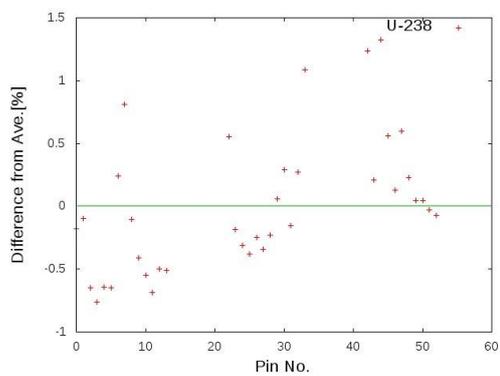
Eu-154



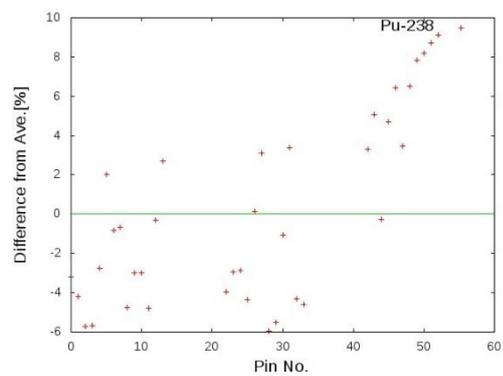
U-234



U-235

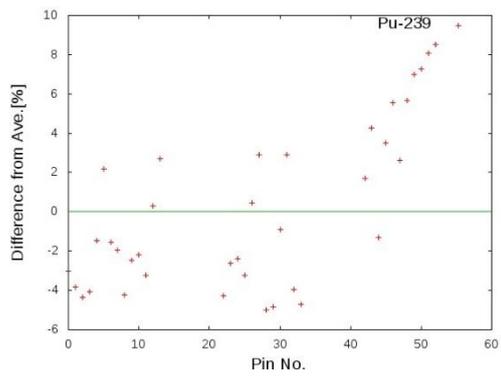


U-238

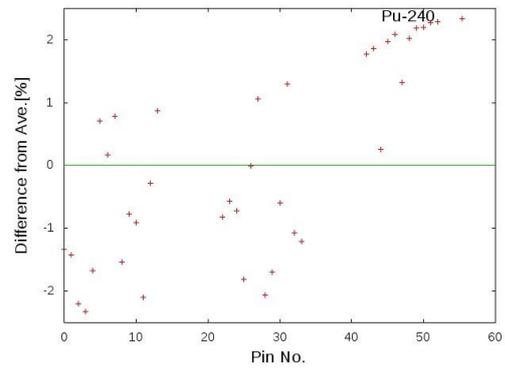


Pu-238

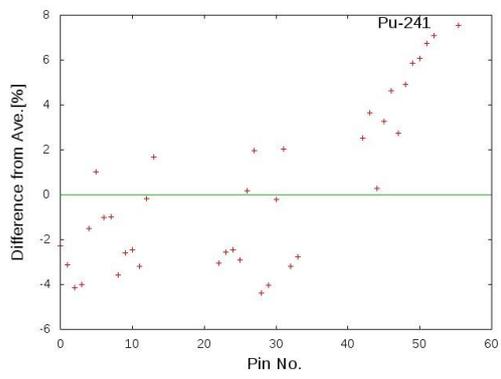
図 3.1 : 各ピンによる数密度の差異 (3/5)



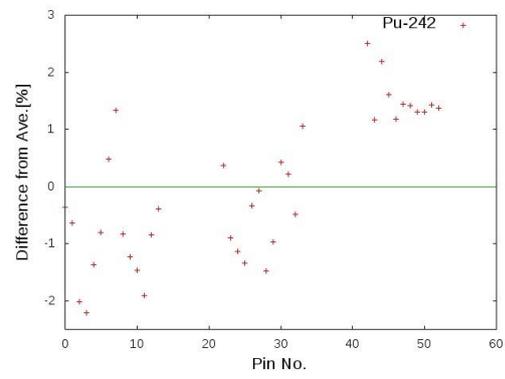
Pu-239



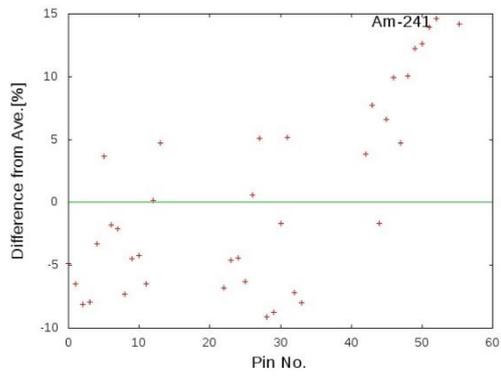
Pu-240



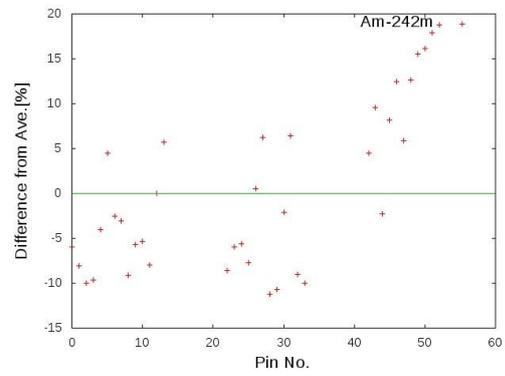
Pu-241



Pu-242

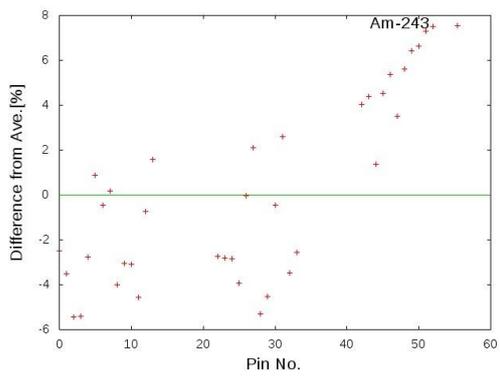


Am-241

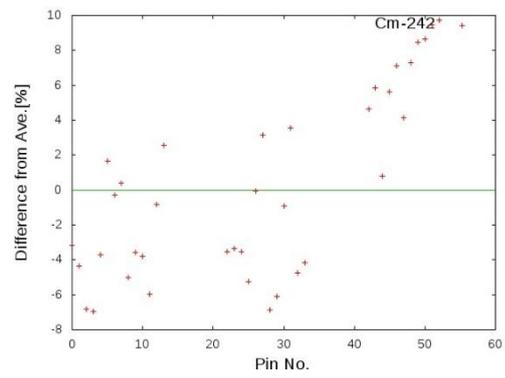


Am-242m

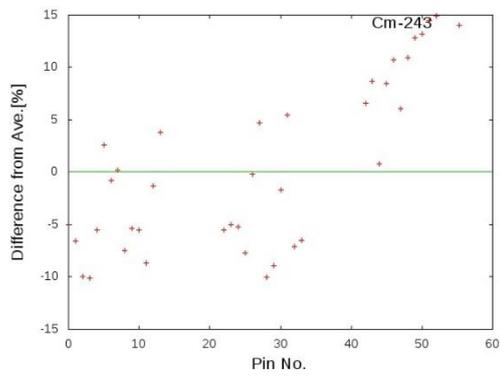
図 3.1 : 各ピンによる数密度の差異 (4/5)



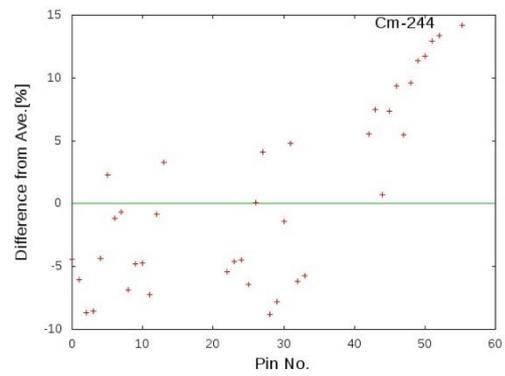
Am-243



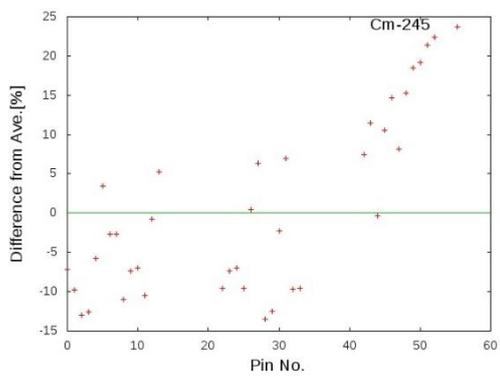
Cm-242



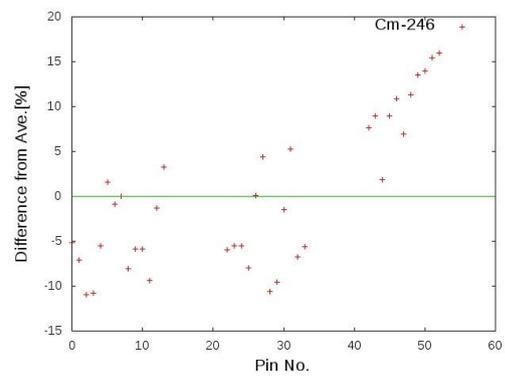
Cm-243



Cm-244



Cm-245



Cm-246

図 3.1 : 各ピンによる数密度の差異 (5/5)

3.2 (H/HM)に基づく位置依存性を表すパラメータの導出

図 3.1 の通り、燃料集合体には燃料ピンによって核種生成量に位置依存性があることを確認した。等価ピンセルモデルを作る際、燃料集合体中の位置依存性を表すパラメータを設定することができれば、そのパラメータをピンセル体系で保存することで、目標とする等価ピンセルモデルを作ることができると考えた。

本研究では、燃焼集合体内の物質配置のみの情報を基に等価ピンセルモデルを導出することを目的としている。そこで、原子炉の炉心設計の分野で使用されている水素対重金属原子数比(H/HM)に基づいてパラメータを設定することとした。この(H/HM)は、以下の式によって求められる。

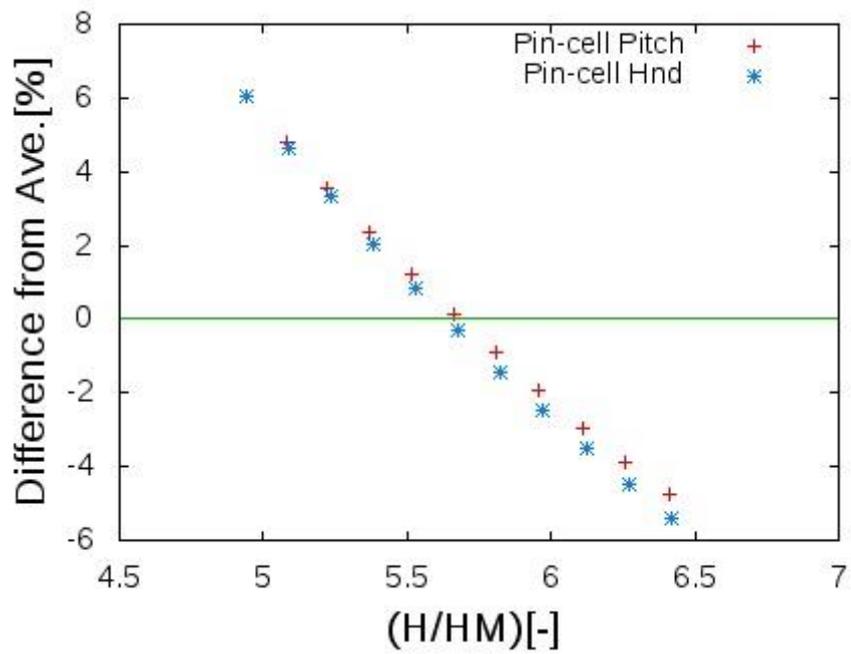
$$\left(\frac{H}{HM}\right) = \frac{\text{減速材である水の水素原子数[個]}}{\text{燃料中のウラン同位体の総原子数[個]}}$$

この(H/HM)は、中性子の減速環境を示している。炉心設計で応用する例としては、(H/HM)を増加させることで初期のウラン濃縮度を低減させることだけでなく、燃料燃焼後の残存濃縮度も低減が可能となり、燃料の経済性の向上や資源の有効利用が可能となる。

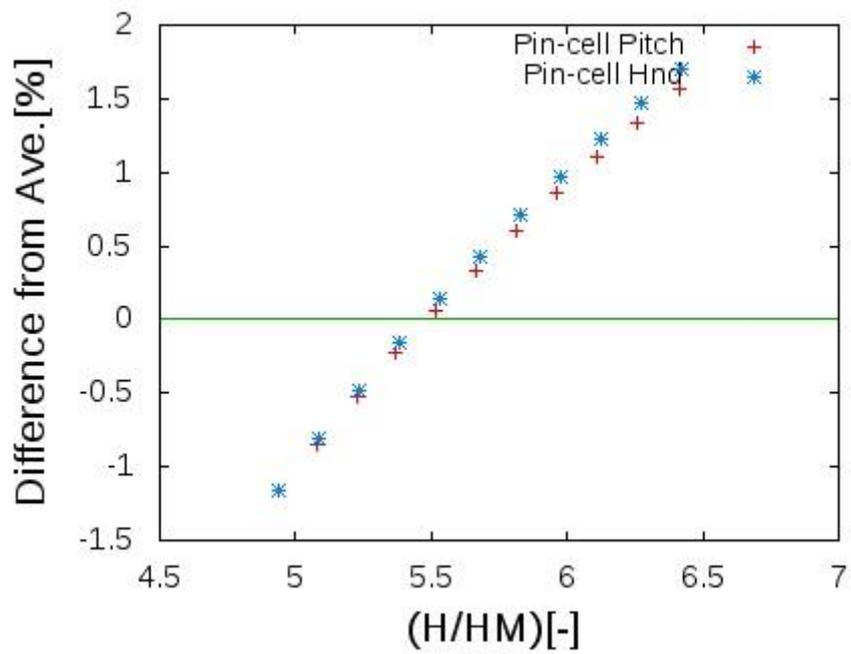
(H/HM)を変化させるために様々な手法がある。例えば、燃料棒の直径、燃料ピンピッチ、減速材である水密度を変更させる手法がある。実際の炉心設計の分野でもこれらを変化させることで適切な(H/HM)を実現している。ピンピッチを変更させる場合であれば、燃料ピン直径より大きくなければ炉心の幾何形状は維持されず、また、原子炉として臨界を達成することなどの制限を受けることとなる。しかしながら、本研究では、核種生成量のみを保存することを目的としているため臨界を達成するかの是非については検討しないこととした。

3.2.1 ピンセル体系の(H/HM)へのピンピッチと水密度の影響

等価ピンセルモデルを導出するにあたって、ピンセル体系の(H/HM)を変更させるパラメータとしてピンピッチと減速材である水密度を変更させることの影響を評価した。図3.2に、ピンピッチを変更した場合と水密度を変更した場合の、ピンセルモデルでの(H/HM)における核種生成量の結果を示す。対象核種はCs-134、U-234である。水密度は6.6735～8.6735[/barn/cm]の範囲で0.2ずつ、ピンピッチは1.2588～1.3588[cm]の範囲で0.01[cm]ずつ変化させた。ピンピッチ、水密度は前述の通り、いずれも(H/HM)を変更させる効果を持っているが、同じ(H/HM)の値であっても核種生成量に差異があることが確認された。しかしながら、この効果は燃料集合体の位置依存性に対して比較的小さいといえる。そこで本研究は、ピンピッチを変更させることで等価ピンセルモデルを作成することとした。



Cs-134



U-234

図 3.2 : ピンセル体系のピンピッチと水密度変更の差異

3.2.2 燃料集合体内の位置依存性を表すパラメータ

本研究で設定したパラメータを $(H/HM)_{Equiv.}$ として (3.1) 式に示す。 (3.1) 式の右辺第一項は、燃料集合体全体の平均の (H/HM) である。右辺第二項は、 α 、 β を変数として、対象ピン k 周り 17×17 体系におけるそれぞれの制御棒案内管 i との距離 $d_{k \rightarrow i}$ の平均 \hat{d}_k を、全対象ピンの案内管までの平均距離 $\hat{d}_{Ave.}$ と比較して評価している項である。 (3.2)、 (3.3) 式はそれぞれ、 \hat{d}_k 、 $\hat{d}_{Ave.}$ についての導出式である。 N_{gt} は燃料集合体内の制御棒案内管の本数、 N_f は対象ピンの本数である。具体的には、 $N_{gt} = 20$ 、 $N_f = 37$ である。 α によって、案内管距離との平均との差異に重み付けを行い、 β によって、案内管距離 $d_{k \rightarrow i}$ に重み付けを行った。制御棒案内管は、制御棒が挿入されていない場合は水で満たされており、対象燃料ピンが案内管に近いほど水の影響が大きくなり、 (H/HM) は大きく評価されこととなる。

$$\left(\frac{H}{HM}\right)_{Equiv.} = \left(\frac{H}{HM}\right)_{Ave.} \times \left(1 + \alpha \times \left(\frac{\hat{d}_{Ave.} - \hat{d}_k}{\hat{d}_{Ave.}}\right)\right) \quad (3.1)$$

$$\hat{d}_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{gt}} d_{k \rightarrow i}^{\beta}}{N_{gt}} \quad (3.2)$$

$$\hat{d}_{Ave.} = \frac{\sum_{k=1}^{N_f} \hat{d}_k}{N_f} \quad (3.3)$$

3.2.3 $(H/HM)_{Equiv.}$ の変数 α 、 β を変化させることによる影響

$(H/HM)_{Equiv.}$ に対して2つの変数 α 、 β を設定したが、それぞれの変数を変化させることで $(H/HM)_{Equiv.}$ がどのように変化するかを評価した。対象の核種はCs-134とした。ピンセル体系ではピンピッチを変更した。“ $\alpha = -0.5$ ”として β を“-0.5、-1.0、-1.5”の3つに変化させた結果を図3.3に示す。 β の符号によって(3.2)式の値の大小が変化し、それに伴って(3.1)式右辺第二項の平均からの大小の評価も変化するため、 α の値は同じであっても α の符号も β と同じように設定する必要がある。この変数 β は指数であるため、正の場合は、対象ピンと案内管との遠さが強調され、負の場合は、案内管との近さが強調される。さらに、図3.3を基に“ $\beta = -1.0$ ”として、“ $\alpha = -0.5、-1.0、-1.5$ ”の3つに変化させた結果を図3.4に示す。図3.4中では、 α が大きければ、燃料集合体内の位置依存性の傾きがx軸に近づき、 α が小さくなれば、傾きはy軸に近づくことが分かった。

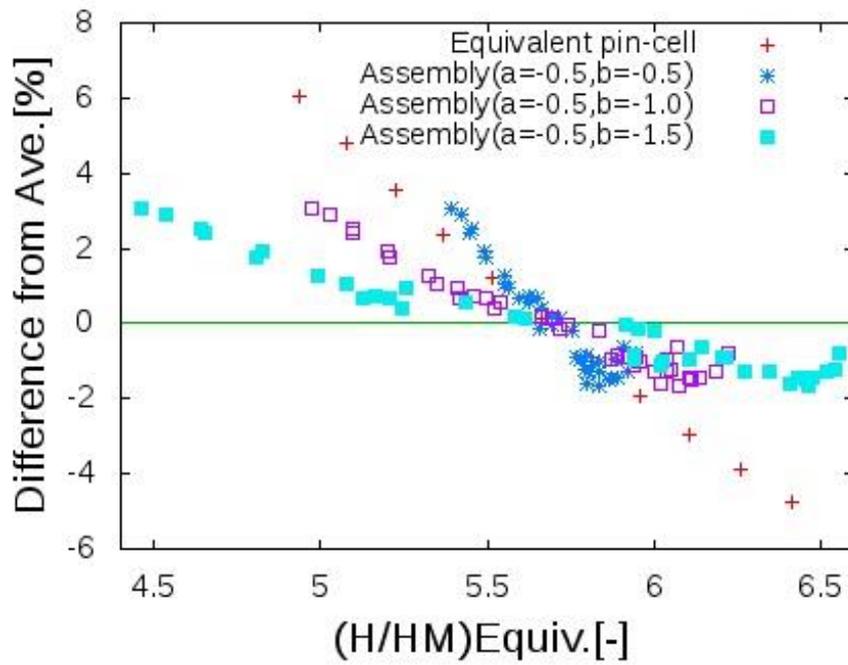


図 3.3: “ $\alpha = -0.5$ ”として β を変化させた $(H/HM)_{Equiv.}$ の評価

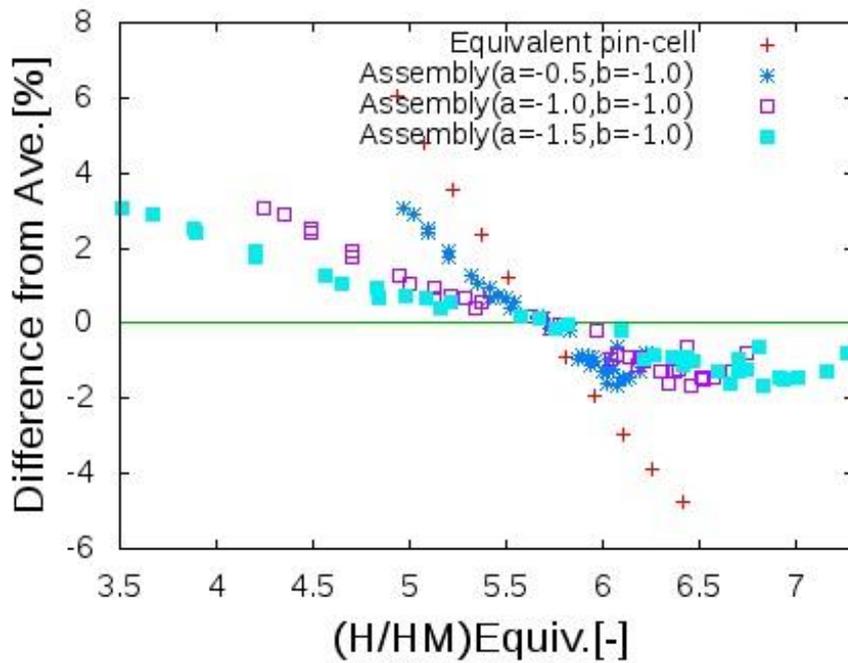


図 3.4: “ $\beta = -1.0$ ”として α を変化させた $(H/HM)_{Equiv.}$ の評価

3.3 PWR 燃料における燃料集合体と等価となるピンセル体系の検討

図 3.5 に、前章 (3.1) 式によって導出した $(H/HM)_{Equiv.}$ における燃料集合体の計算結果と等価ピンセルモデルの計算結果とを重ねたものを示す。ピンセル体系では、ピンピッチを 1.2588~1.3588[cm]まで 0.01[cm]刻みで変化させ、合計 11 個のモデルを作成した。図 3.5 では、 $(H/HM)_{Equiv.}$ の変数“ $\beta = -1.0$ ”で一定として、 α については、0.1 刻みで変化させて核種ごとに図内に示した値に設定した。図 3.5 から、核種生成量において、(3.1) 式のパラメータとピンセル体系のピンピッチには相関があることがあるといえることが分かった。以下の表 3.1 では、燃料集合体計算とピンセル計算との RMS (Root Mean Square、二乗平均平方根) を、ピンセル体系のモデル間の核種生成量を内挿することで求めた。

図 3.5 の多くの核種では集合体計算とピンセル計算のプロットは一次式上に重なるようにプロットされた。これら対象核種中の集合体計算の $(H/HM)_{Equiv.}$ が大きい部分では、ピンセル計算からのずれが比較的大きいものがいくつか確認できた。これらはピン No.が 0,1,6,7,8 の集合体の中心部分に位置している。核種生成量から判断すると、 $(H/HM)_{Equiv.}$ の過大評価がなされていると考えられる。また、Cs-137、Nd-142、Nd-144、Nd-148、Ru-106、では、 (H/HM) に対する核種生成量の傾向が燃焼集合体とピンセル体系とでは逆になっていたり、Nd-146、U-238 では (H/HM) に対する核種生成量の傾向が薄かったりしていた。これらは、他の核種に比べて平均からの差異が比較的小さいものが多かった。なお、Ce-144 は (H/HM) に対する核種生成量の傾向としては再現可能といえるが、 $(H/HM)_{Equiv.}$ の範囲が 0~10 程度となっており、そのほかの核種では 4.5~6.5 程度の範囲に収まっていることを考慮すると特異な性質が得られた。

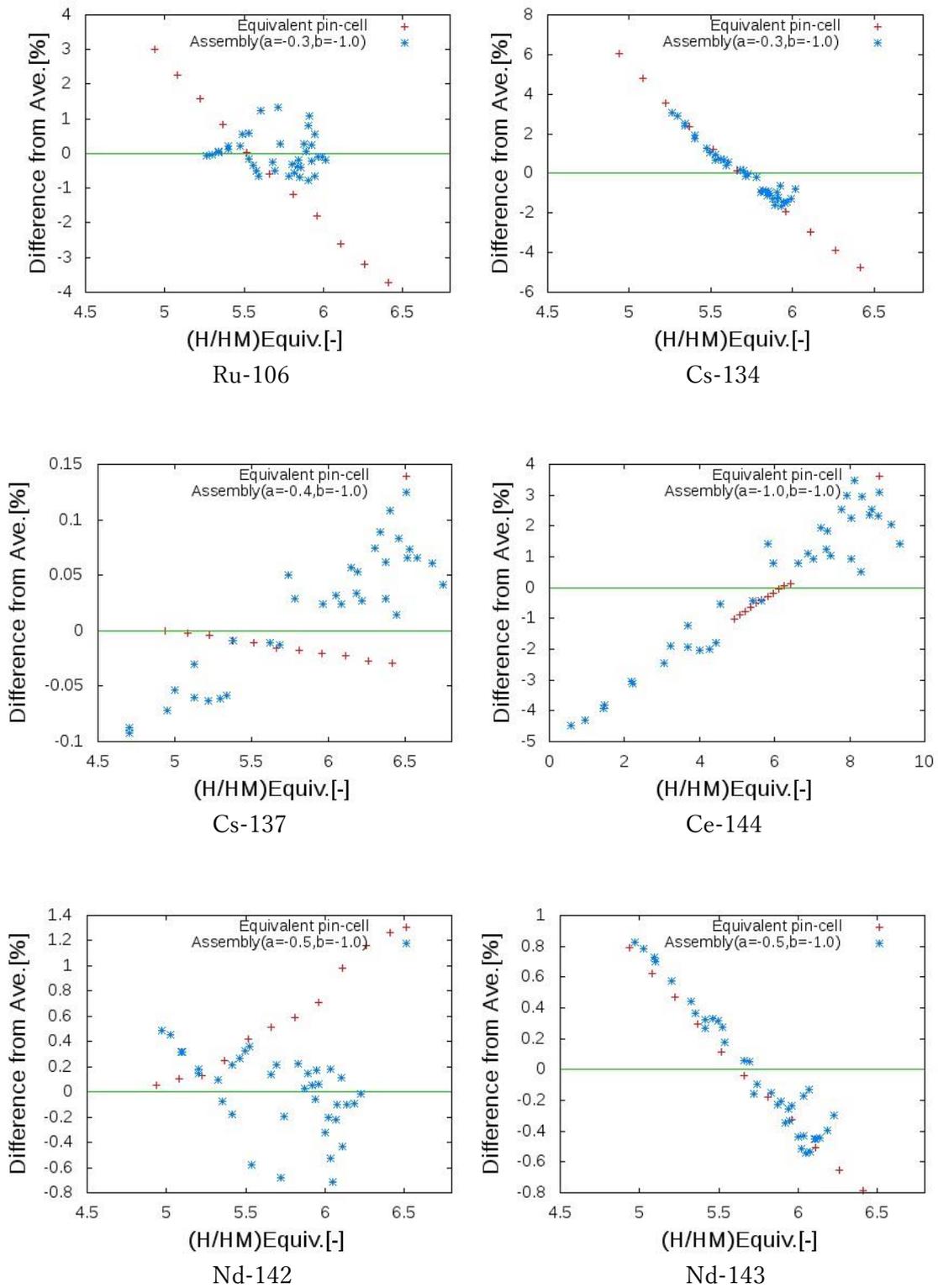


図 3.5 : $(H/HM)_{Equiv.}$ による燃料集合体計算と等価ピンセルモデル (1/5)

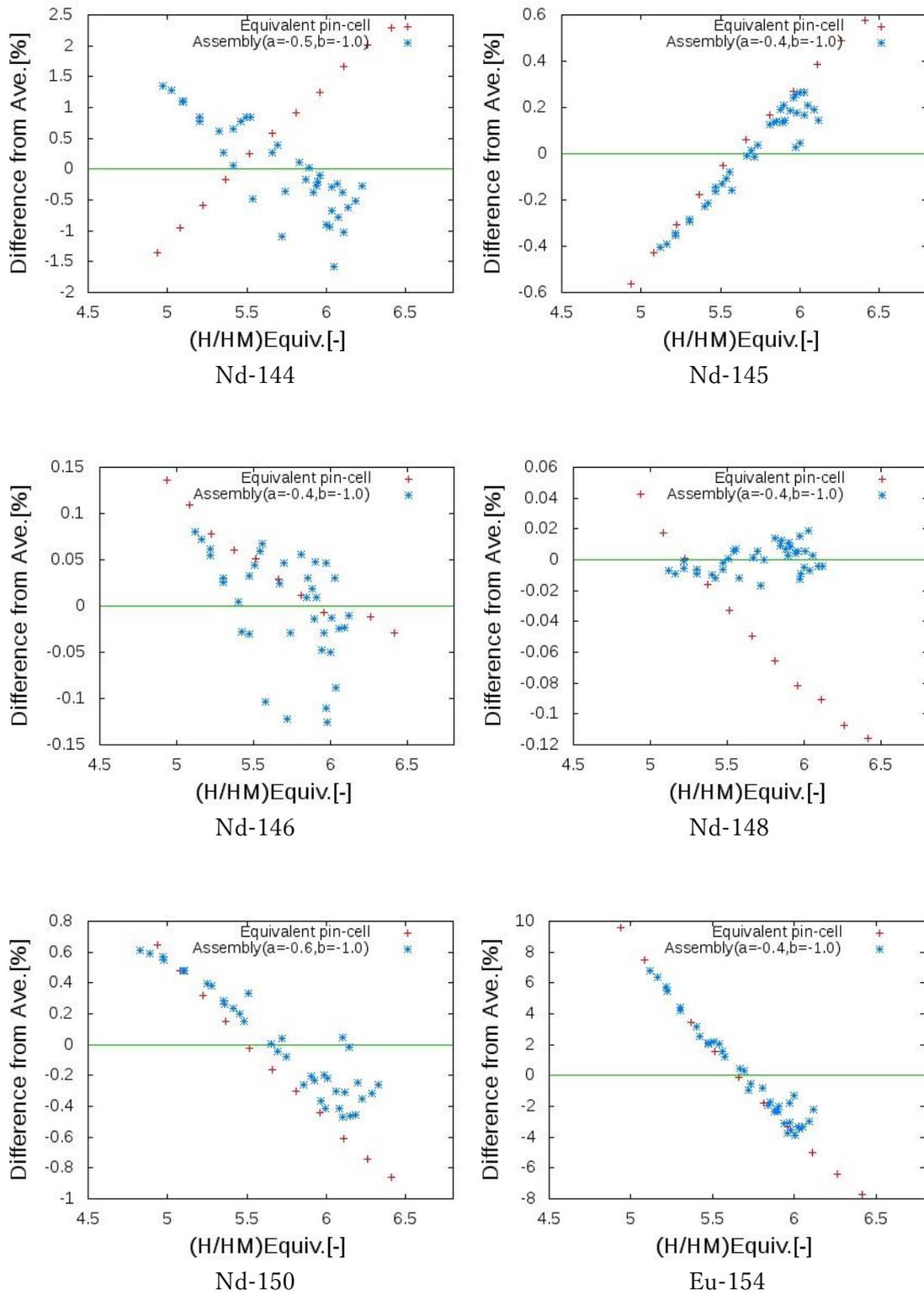


図 3.5 : $(H/HM)_{Equiv.}$ による燃料集合体計算と等価ピンセルモデル (2/5)

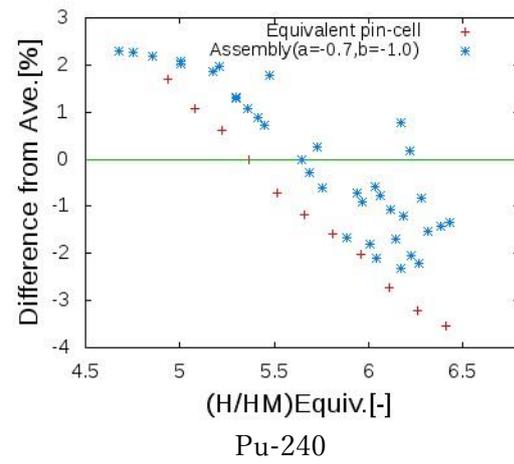
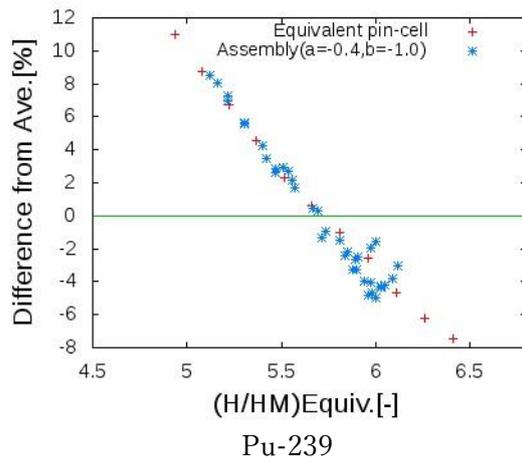
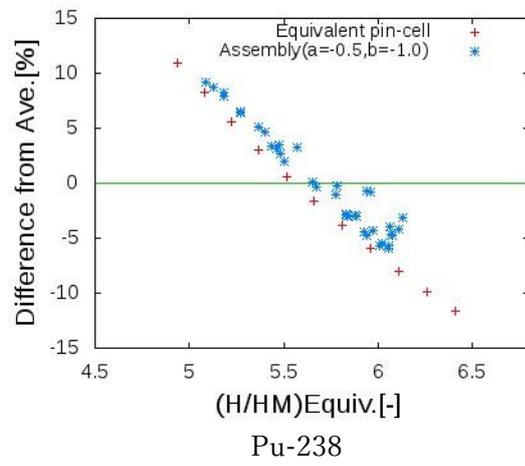
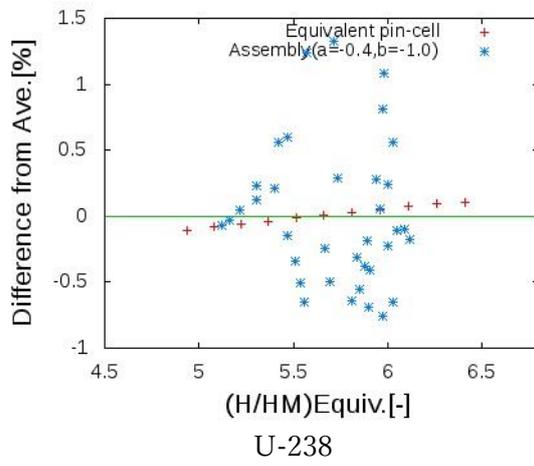
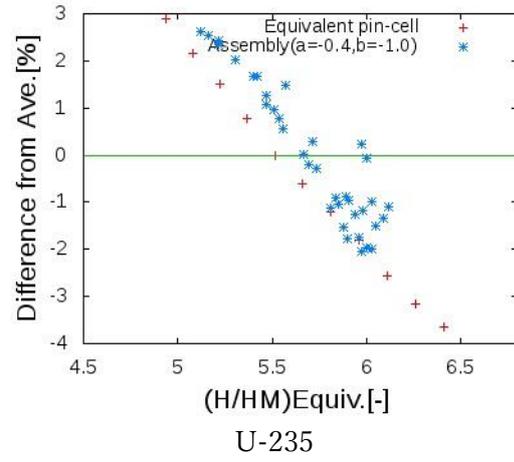
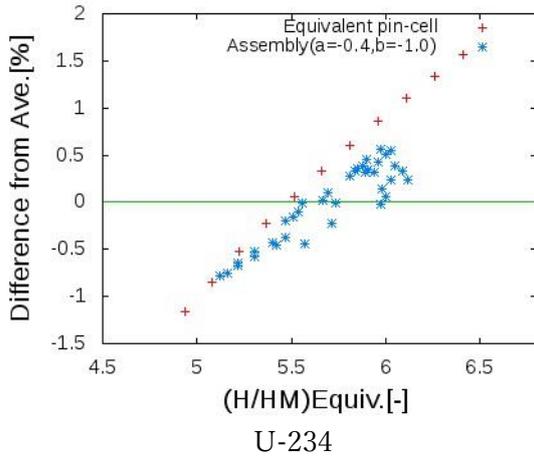


図 3.5 : $(H/HM)_{Equiv.}$ による燃料集合体計算と等価ピンセルモデル (3/5)

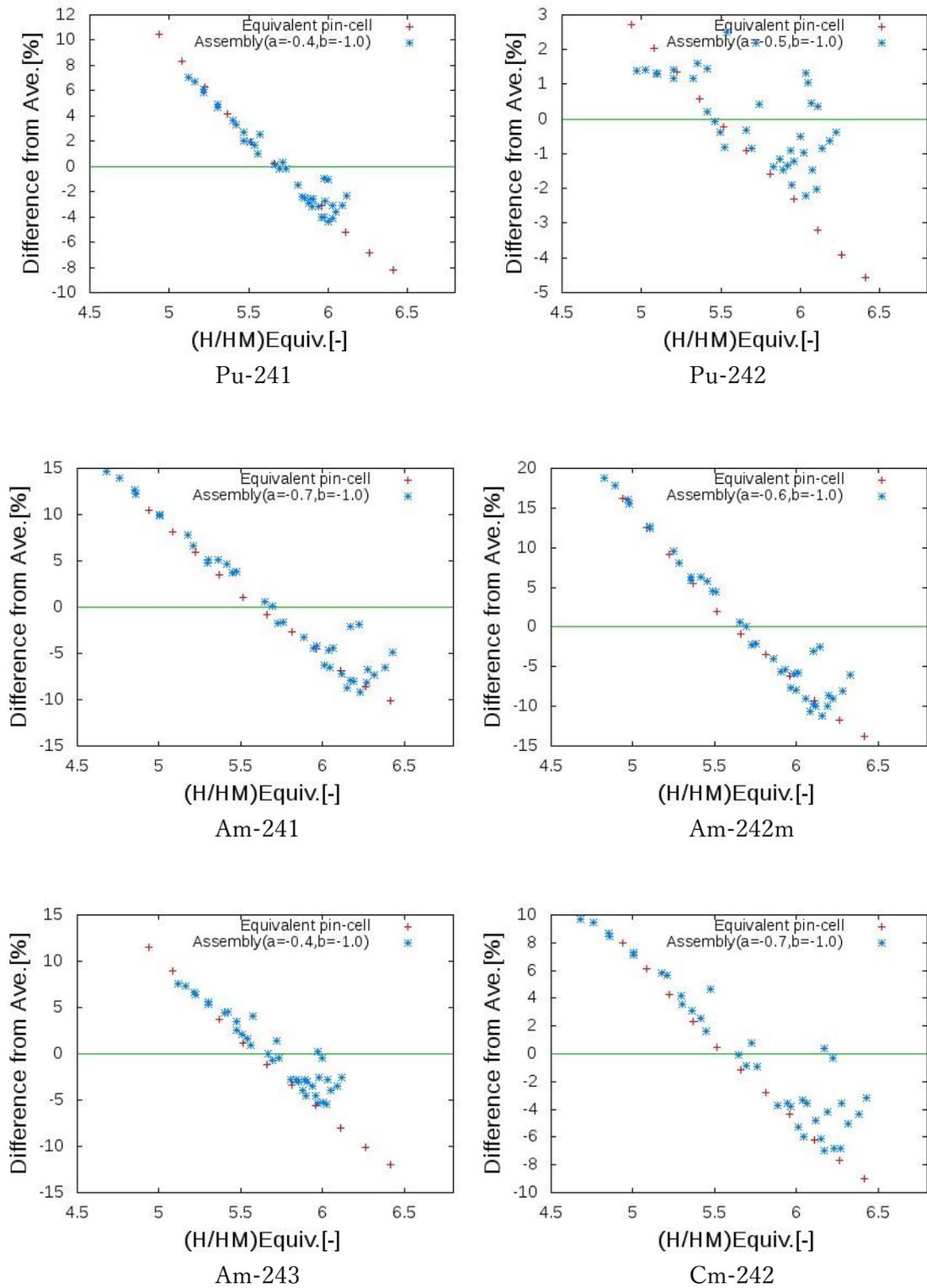
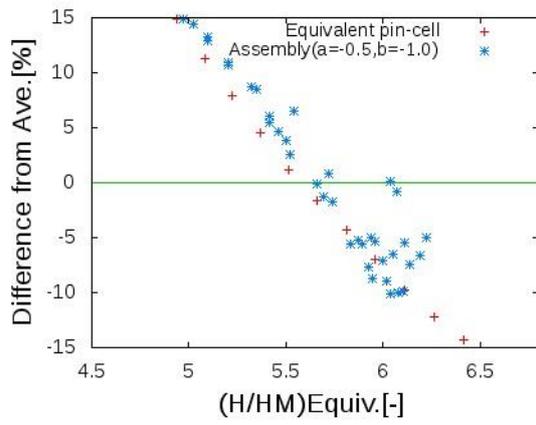
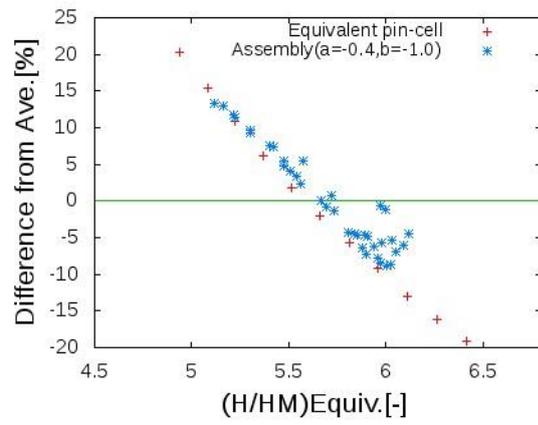


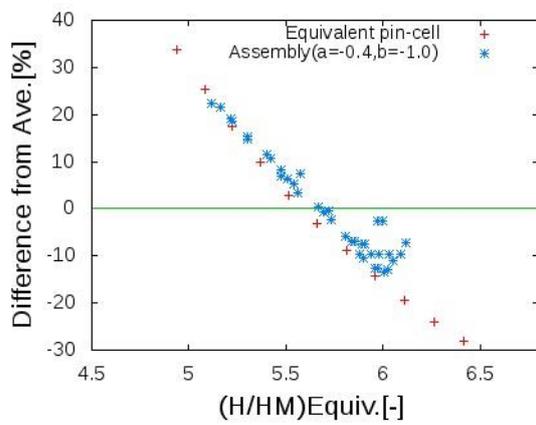
図 3.5 : $(H/HM)_{Equiv.}$ による燃料集合体計算と等価ピンセルモデル (4/5)



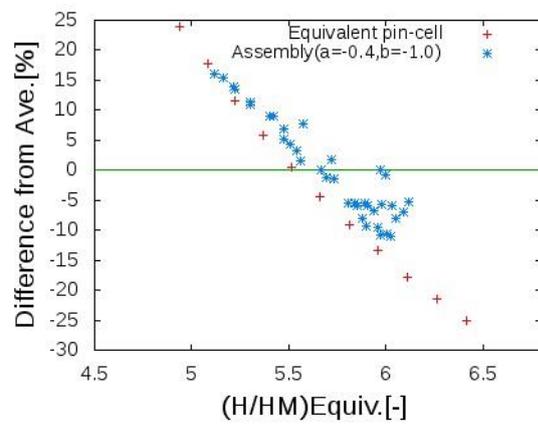
Cm-243



Cm-244



Cm-245



Cm-246

図 3.5 : $(H/HM)_{Equiv.}$ による燃料集合体計算と等価ピンセルモデル (5/5)

表 3.1 : 集合体体系と等価ピンセルモデルの RMS

核種	RMS[%]	核種	RMS[%]
Ru-106	1.3	U-238	0.53
Cs-134	0.42	Pu-238	2.4
Cs-137	0.075	Pu-239	1.0
Ce-144	-----	Pu-240	1.5
Nd-142	0.78	Pu-241	1.0
Nd-143	0.13	Pu-242	1.9
Nd-144	1.7	Am-241	2.2
Nd-145	0.11	Am-242m	2.4
Nd-146	0.15	Am-243	2.4
Nd-148	0.065	Cm-242	2.5
Nd-150	0.32	Cm-243	3.2
Eu-154	0.87	Cm-244	6.8
U-234	0.46	Cm-245	5.2
U-235	0.92	Cm-246	6.3

3.4 Gd 入り燃料棒による核種生成への影響評価

(*H/HM*)には対する影響評価だけではなく、 Gd_2O_3 燃料の影響を評価するため、燃料集合体体系の Gd_2O_3 燃料を全て UO_2 燃料に置き換えて、再計算を行った。図 3.6 には、図 3.5 に示す結果に加えて、 Gd_2O_3 燃料を含まない燃料集合体の燃焼計算結果を重ねたものを示す。表 3.2 には Gd_2O_3 燃料の有無による核種生成量の RMS を示す。

図 3.6、表 3.2 から、 Gd_2O_3 燃料の有無による核種生成量の影響は、対象とした核種ではほとんど 1[%]未満でありその効果は二次的であったといえることが分かった。また、U-238 では Gd_2O_3 燃料が無くなることで燃料集合体内の核種生成量の位置依存性が低くなり、(*H/HM*)に基づいたピンセル計算の結果との差異が 0.02[%]となった。

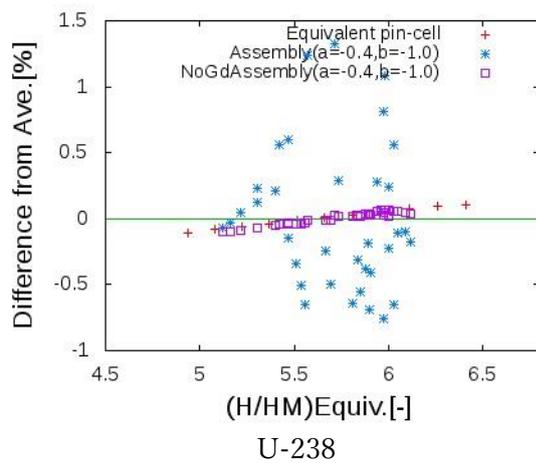
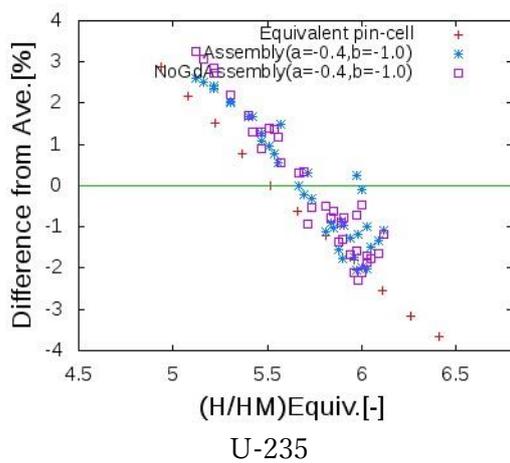
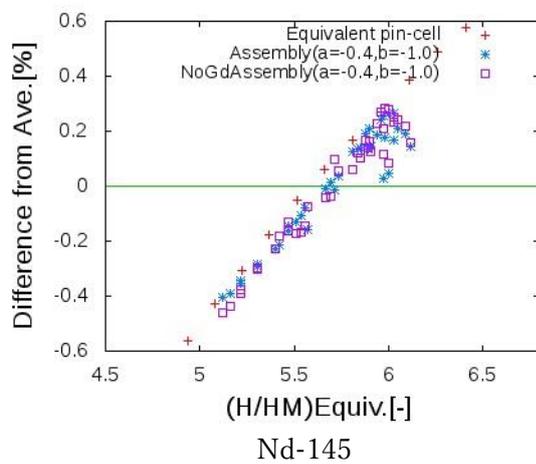
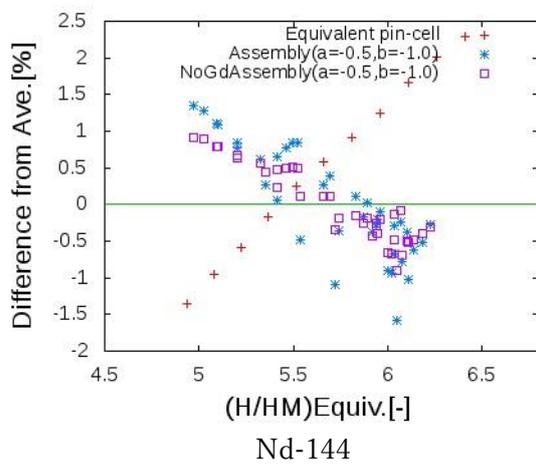
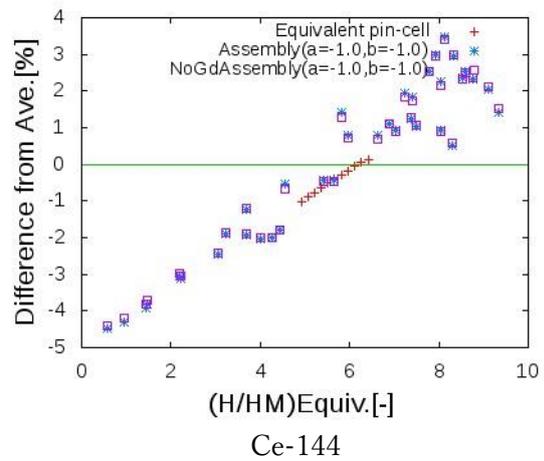
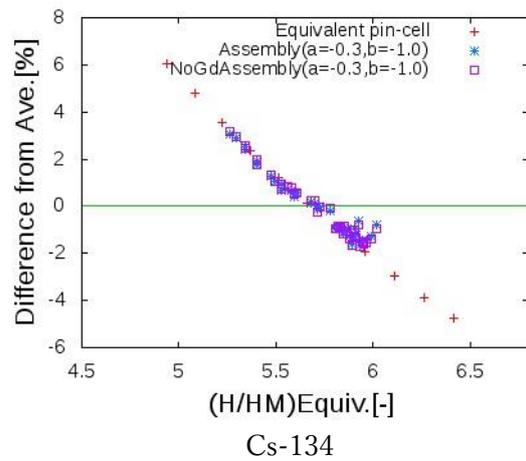


図 3.4 : Gd₂O₃ 燃料による核種生成量の差異 (1/2)

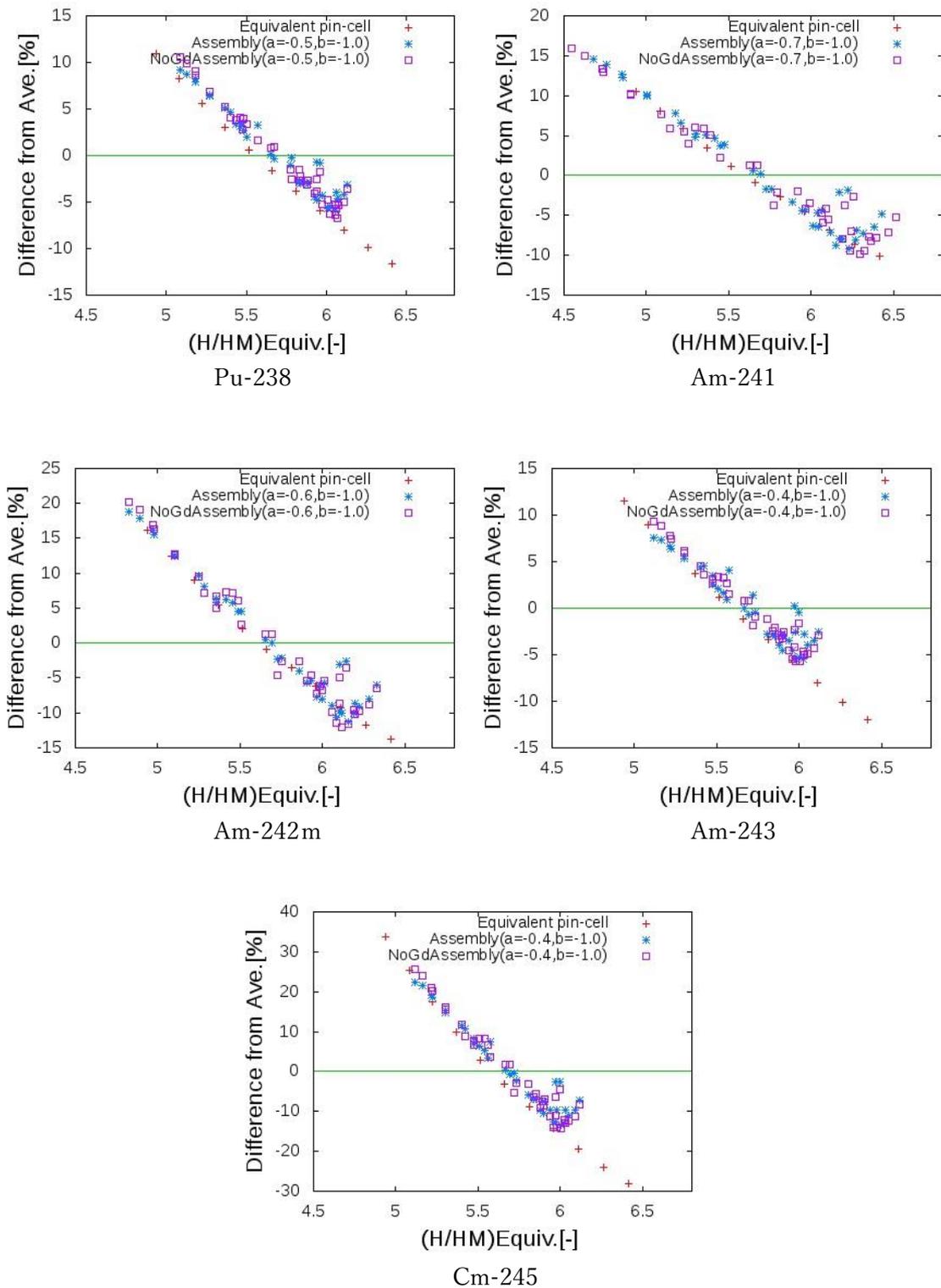


図 3.4 : Gd₂O₃ 燃料による核種生成量の差異 (2/2)

表 3.2 : Gd₂O₃ 燃料無し燃料集合体と等価ピンセルモデルの RMS

核種	Gd ₂ O ₃ 燃料あり RMS[%]	Gd ₂ O ₃ 燃料無し RMS [%]	Gd ₂ O ₃ 燃料による差異 [%]
Cs-134	0.42	0.38	0.039
Ce-144	----	-----	-----
Nd-144	1.7	1.6	0.16
Nd-145	0.11	0.098	0.007.0
U-235	0.92	0.91	0.0066
U-238	0.53	0.020	0.51
Pu-238	2.4	2.3	0.12
Am-241	2.2	2.3	-0.13
Am-242m	2.4	2.5	-0.098
Am-243	2.4	2.0	0.37
Cm-245	5.2	4.8	0.36

第4章 結言

燃料集合体の位置依存性を表すパラメータを設定することで、そのパラメータを保存するピンセル体系の燃焼計算によって燃焼特性を再現するモデルを考案した。以上の検討の結果、より良い等価ピンセルモデルの導出のために以下の課題があると考えられる。

- ・ 3.3 節で示した通り、燃料集合体の中心部分に位置しているピン No.0,1,6,7,8 の再現性が低くなっているが、対象燃料とその周辺の燃料ピンとの影響の度合いを表す Dancoff 係数の影響を評価した式の導出する方法が考えられる。
- ・ 本研究で導出した位置依存性を表すパラメータ $(H/HM)_{Equiv.}$ の変数 α 、 β は核種によって異なる最適値が存在している。等価ピンセルモデルの燃料集合体計算との差異を最小とし、差異の定量化をするため、この最適値を求めることが望まれる。
- ・ 本研究では、28 核種を対象とした。しかしながら、本検討では対象としていなかった核種には、I-129、Pd-107 等の燃料中のインベントリの評価が重要な核種が多く残っており、対象とする核種を増やし、その差異について評価する必要がある。

参考文献

- [1]Go Chiba, “Perturbation theory for nuclear fuel depletion calculations with predictor-corrector method,” J. Nucl. Sci. Technol., 55, p.290-300 (2018)
- [2] 片倉純一、他、「JENDL-3.3～(省略)～ORLIBJ33」、JAERI-Data/Code 2004-015、日本原子力研究所 (2004)

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始丁寧にご教授、ご指導いただきました千葉豪准教授、普段から研究へ助言を頂きました奈良林直教授、山本泰功助教に厚くお礼申し上げます。また、研究を進める上で多くのサポートを頂いた研究室の修士の皆さん、同期に深く感謝します。