

中性子スペクトルを考慮した ORIGEN2 計算システム

(株)東芝 原子力技術研究所

安藤 良平

E-mail: raa@rcg.nel.rdc.toshiba.co.jp

1. はじめに

米国オークリッジ国立研究所で開発された核種生成消滅計算コード ORIGEN2 は、燃料組成の燃焼変化・使用済燃料の放射化量・線源強度・崩壊熱等幅広い分野における世界的な標準コードである。しかしながら、ORIGEN2 コードと共に公開された断面積ライブラリーは各炉型 (PWR、BWR、FBR、CANDU) の代表燃料について作成されているために、適用範囲が限定されている。当社では、今後の幅広い軽水炉燃料の仕様に対応するために中性子スペクトルを考慮した改良 ORIGEN2 計算システム (以下、SPINOZA 計算システム) を開発した。

2. システムの特長

本システムにおける計算の流れを図 1 に示す。

本システムには、下記の特長がある。

- ① 燃料核設計コード TGBLA で求めた中性子スペクトルに基づいて作成した実効 1 群断面積ライブラリーを ORIGEN2 計算で用いる。
- ② 最新の核データ (JENDL-3、ENDF/B-VI) および核分裂収率データ (JNDC FP Data Library-2 版: 以下 JNDC-2 版、または ENDF/B-VI) に基づく計算ができる。
- ③ 燃料集合体内の任意の領域 (特定の燃料棒の燃料ペレット・被覆管、減速材、制御棒チャンネルボックス等) を対象とした計算ができる。

TGBLA コードでは、通常の BWR、PWR 燃料集合体を扱えるだけでなく、実機照射履歴 (出力履歴・ボイド履歴・制御棒履歴) や任意の集合体境界条件を考慮した計算ができるので、本システムを利用すれば、幅広い軽水炉燃料の仕様に対応できる。また、1 群断面積ライブラリー作成時に燃料集合体内の任意の領域の中性子スペクトルを指定することができるので、使用済燃料の核種組成評価にも高い精度で適用できるシステムである。

3. BWR 炉心における実効 1 群断面積の変化と使用済燃料評価手法に関する検討

BWR 炉心には、

- ① 軸方向にボイド分布がある。
- ② 燃料集合体は多種類の濃縮度燃料と多数本の Gd 入り燃料で構成されており、中央部には太径のウォーターロッドが配置されている。
- ③ 燃料集合体間に広い水ギャップが設けられている（制御棒が挿入できる）。

といった特徴がある。そのため、PWR 炉心に比べて、炉心内で中性子スペクトルは大きく変化する。

以下、これらの非均一性によって ORIGEN2 計算で用いる実効 1 群断面積がどのように変化するかについて調査すると共に使用済燃料の核種組成を評価する場合の手法について検討した。

(1) 中性子場の非均一性に伴う実効 1 群断面積の変化

a. ボイド率による 1 群断面積の変化

ボイド率による実効 1 群断面積を主要アクチニド核種の核分裂断面積について図 2 に示す。

これから、炉心下部のボイドなし状態から炉心上部の 70 % ボイド状態の間で核分裂性核種の実効 1 群断面積は、約 40 % 変化することがわかる。これは、軽水炉で反応の 70 % 以上が起こる熱群 (0 ~ 0.68 eV) に占める中性子束の割合がボイドなし状態では 20 % 程度であるのに対して 70 % ボイド状態では 10 % 程度に減少するためである。

b. 燃料棒位置による実効 1 群断面積の変化

BWR 燃料集合体では、周辺部に低濃縮度燃料、中央部に高濃縮度燃料を配置されている。また、全燃料棒の 10 ~ 15 % 程度を Gd 入り燃料としている。そこで、中性子スペクトルはボイド率だけでなく、燃料棒の濃縮度によっても大きく変化する。燃料棒位置による実効 1 群核分裂断面積の比較を図 3 に示す。これから、燃料棒の濃縮度、燃料タイプおよび燃料位置によって実効 1 群断面積は大きく変化することがわかる。

以上より、BWR 燃料組成の燃焼変化は、ボイド率、燃料棒の濃縮度、燃料タイプおよび燃料位置によって大きく変化することがわかる。

(2) 使用済燃料の核種組成評価手法

燃料のバックエンドの臨界安全性を検討する際には、使用済燃料の核種組成評価が重要となる。そこで、実機 BWR で照射された燃料の核種組成を評価する場合の手法につ

いて検討した。

図4にBWR炉心における典型的な燃料装荷パターンを示す。

ここでは、現行の炉心設計で代表的なバッチ数(燃料を取出すまでの運転サイクル数)として4を想定した。

燃料集合体は、反応度の高い第1～第3サイクルは炉心内部に、反応度の低下した第4サイクルには炉心の外周またはコントロールセルと呼ばれる制御棒が挿入される特定の領域に配置されることが多い。

ここでは、燃料集合体を取り巻く環境を境界条件として考え、第1～第3サイクルは無限体系境界条件(炉中心境界条件)、第4サイクルは最外周境界条件(PH)またはコントロールセル境界条件(CC)で照射されている場合を考えた。

近年の炉心は、濃縮度多種類炉心となっているので、炉心内部でも集合体間の中性子流も無視できないが、ここでは簡単のため検討の対象外とした。

PH境界条件およびCC境界条件を設定した場合の主要アクチノイド核種の核分裂断面積の比較を図5に示す(評価条件:40%ボイド率)。

これから、次のことがわかる。

- ① 炉心最外周に装荷された燃料集合体では、炉中心に装荷された燃料と比べて炉中心側のRod((1,1)Rod)はゆっくり燃焼するのに対して、炉外側のRod((8,8)Rod)は速く燃焼する。これは、炉中心側では熱中性子が流れ出すため実効1群断面積が小さくなる(15～20%)のに対して、炉外側では熱中性子が流れ込むため実効1群断面積が大きくなる(50～60%)ためである。
- ② 制御棒が挿入された燃料集合体では、制御棒によって熱中性子が吸収されるため集合体全体の中性子スペクトルが硬くなり、すべての燃料棒での実効1群断面積は小さくなる。この傾向は制御棒に隣接するRod((1,1)Rod)で大きく(30～40%)、制御棒から離れたRod((8,8)Rod)で小さい(5～10%)。

以上より、BWR炉心で照射された使用済燃料の核種組成を評価する場合には、実機照射履歴(出力履歴・ボイド履歴・制御棒履歴)を考慮する以外に燃料集合体を取り巻く環境を境界条件等により考慮した中性子スペクトル計算に基づいてORIGEN2用の実効1群断面積を作成する必要があることがわかった。

4. JENDL-3を使った場合に燃焼特性が大きく改良される例

最後に、中性子反応断面積データ(JENDL-3)および核分裂収率(JNDC-2版)を使うことによって燃焼特性が大きく改良される例について報告する。

図6に、JENDL-3を使った場合に大きく特性の変化する例として¹⁵⁴Eu、

JNDC-2版を使った場合に大きく特性の変化する例として ^{124}Sb に対する燃焼特性の比較を示す。

^{154}Eu の生成量は、JENDL-3を使うとORIGEN2(1982年版)コードと共に公開された断面積ライブラリー(核データ: ENDF/B-IV)を使う場合に比べて約半分になる。これは、JENDL-3がENDF/B-IVに比べると、 ^{153}Eu の捕獲断面積は小さく、 ^{154}Eu の捕獲断面積は大きいためである。PWRの使用済燃料の解析によれば、公開断面積ライブラリーを使ったORIGEN2計算ではC/E(C: 計算値、E: 測定値)は2~3になることが報告されている¹⁾ので、JENDL-3を使うと計算精度は大幅に向上すると期待される。

^{125}Sb の生成量は、断面積の効果は小さく、核分裂収率としてORIGEN2の公開断面積ライブラリーに内蔵されている値(ENDF/B-IV)からJNDC-2版で評価されている値に改訂すると生成量は約半分になる。

これについてもBWR燃料の核種組成データの解析より改良が示唆されている。

これは、JNDC-2版における ^{235}U と ^{238}U のYieldが中間質量領域(質量数105~130)でENDF/B-IVの値に比べて大幅に小さくなったためである。

5. まとめ

今後の幅広い仕様の軽水炉燃料に対するORIGEN2計算や使用済燃料の核種組成評価に適用できる改良ORIGEN2計算システム(SPINOZA計算システム)を開発した。

今後、実機照射後試験データ等実測値に基づき検証を行い、本システムを燃料サイクルバックエンドの幅広い分野で運用していく予定である。

参考文献

- 1) T.Adachi et al., "Comparison of Calculated Values on the Amount of TRU and FP Nuclides Accumulated in Gadolinium Bearing PWR Spent Fuels" J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 31, No. 10 (1994) 1119.

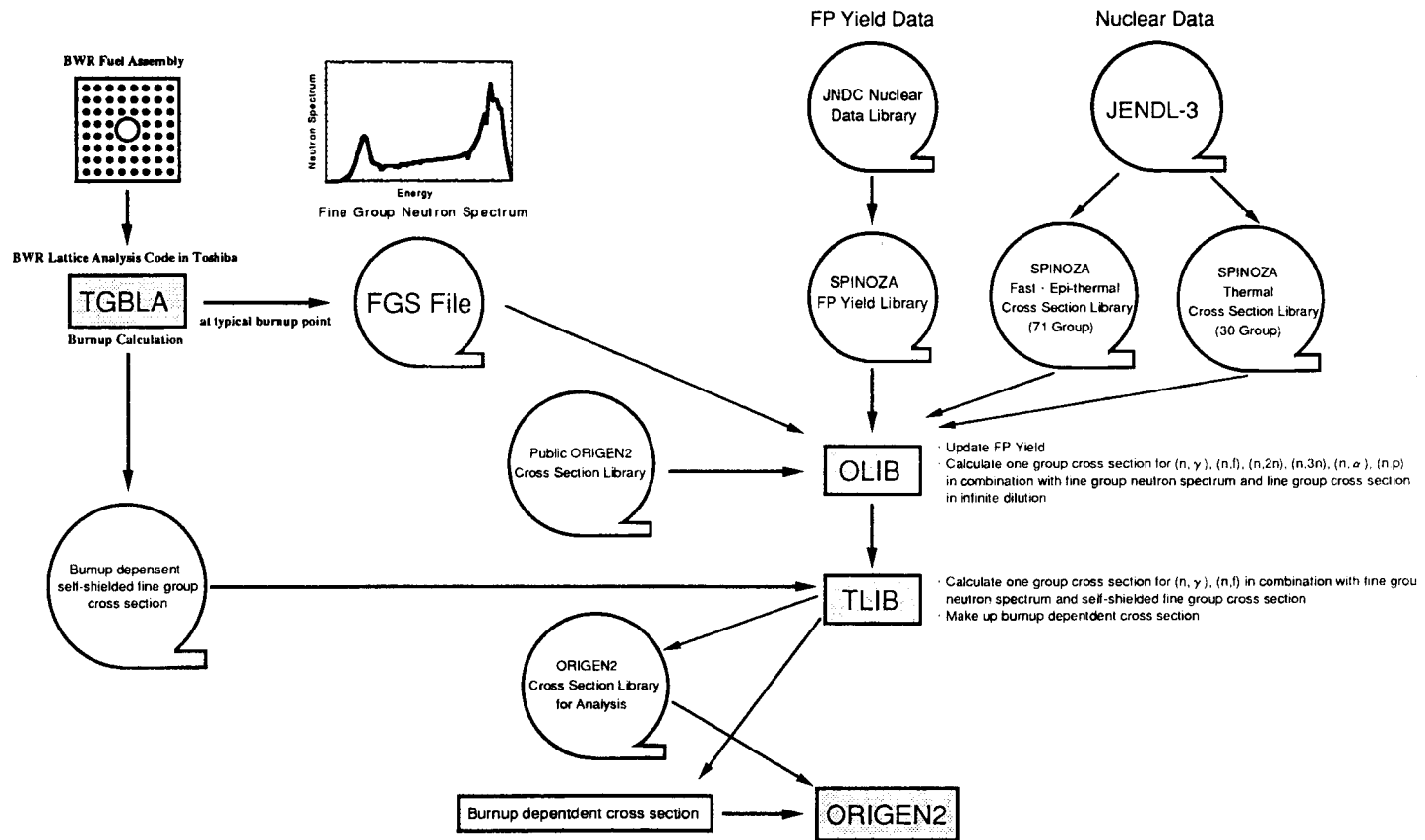


図1 SPINOZA 計算システムにおける計算の流れ

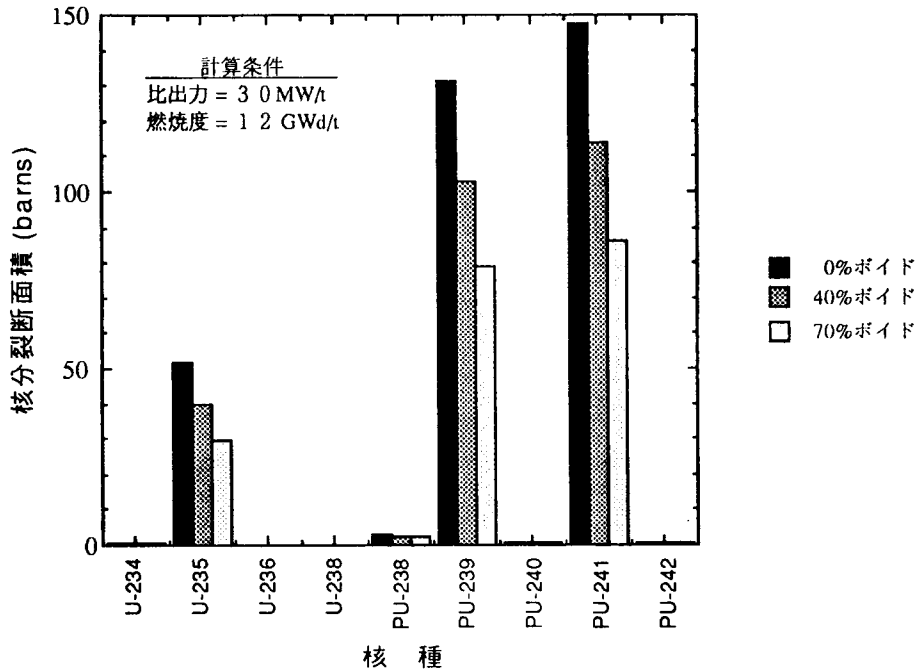


図2 ボイド率による主要アクチノイド核種の核分裂断面積の変化

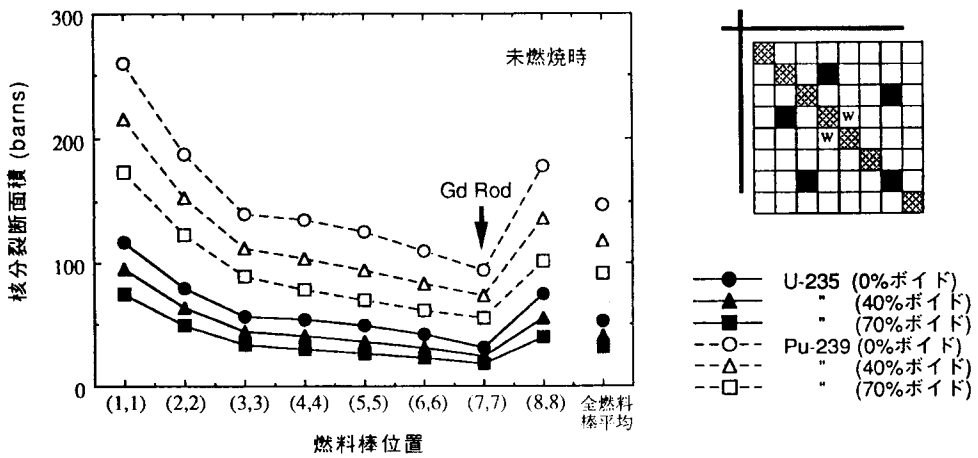


図3 燃料棒位置による1群断面積の比較

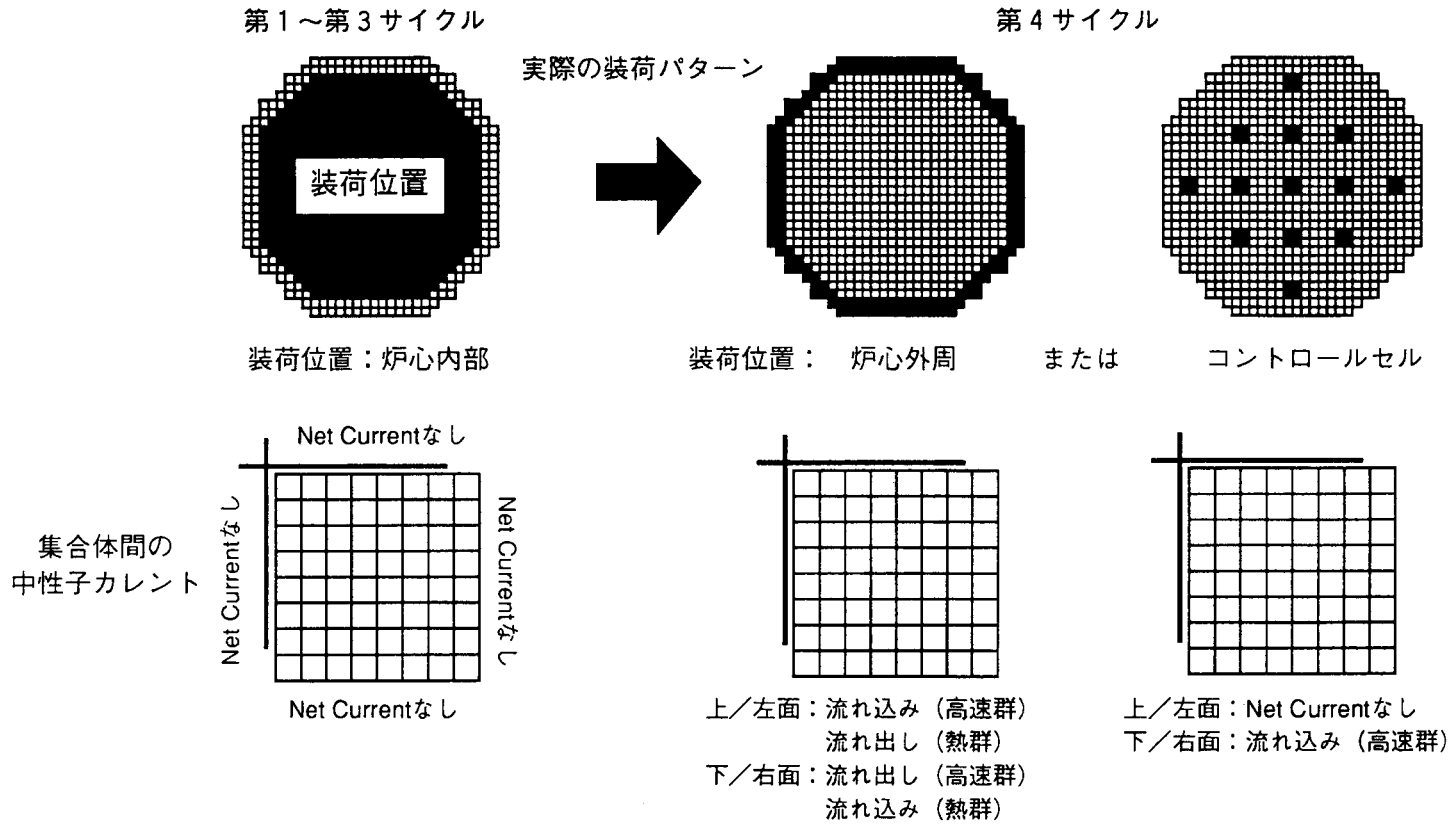


図4 BWR炉心における典型的な燃料装荷パターンと境界条件

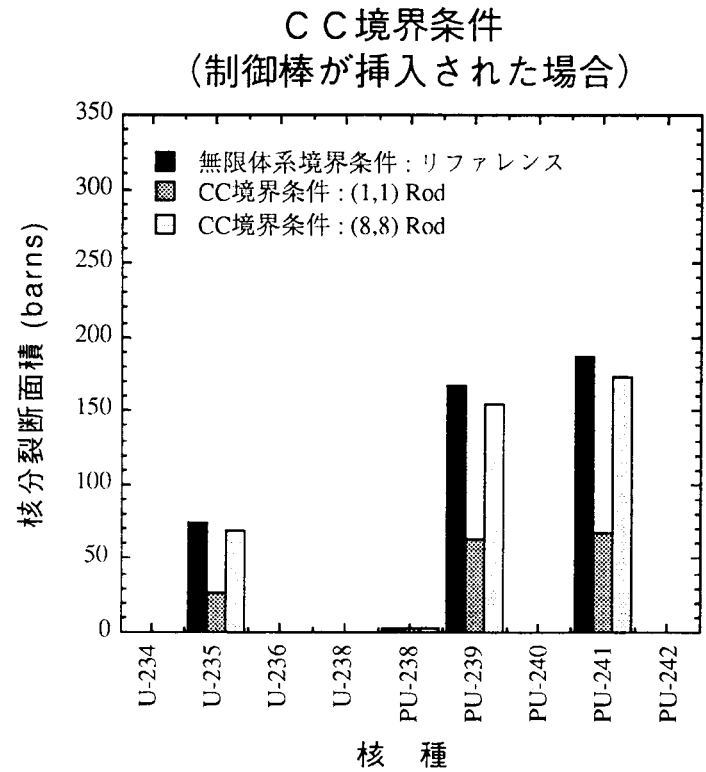
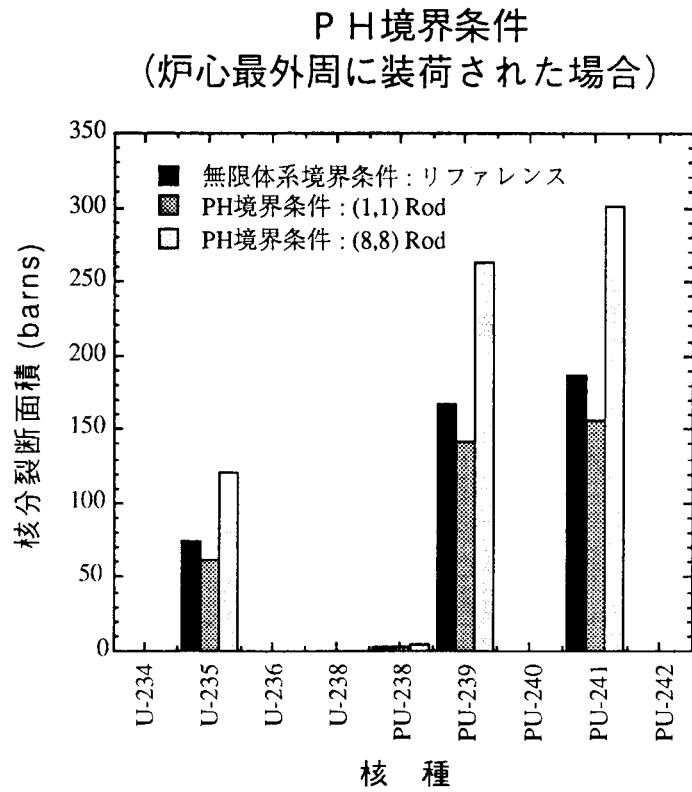


図5 主要アクチニド核種の核分裂断面積の境界条件による比較

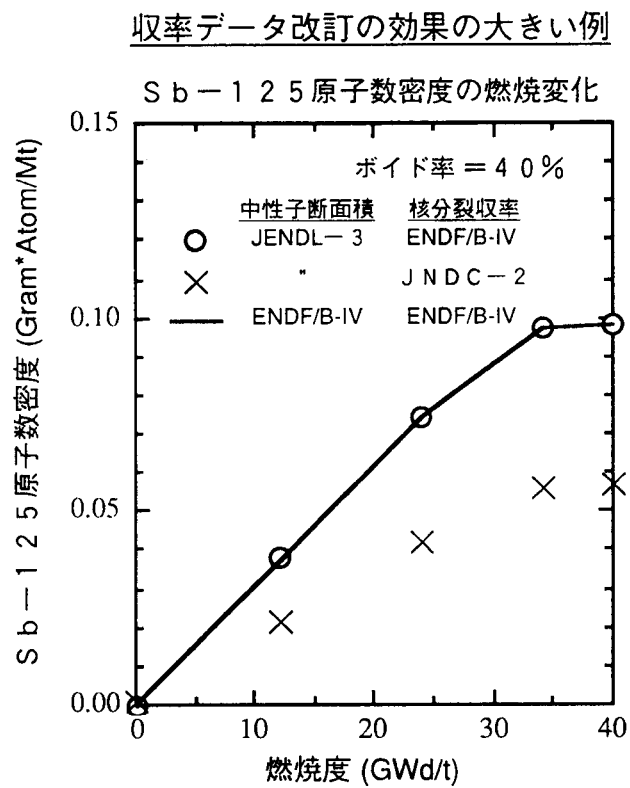
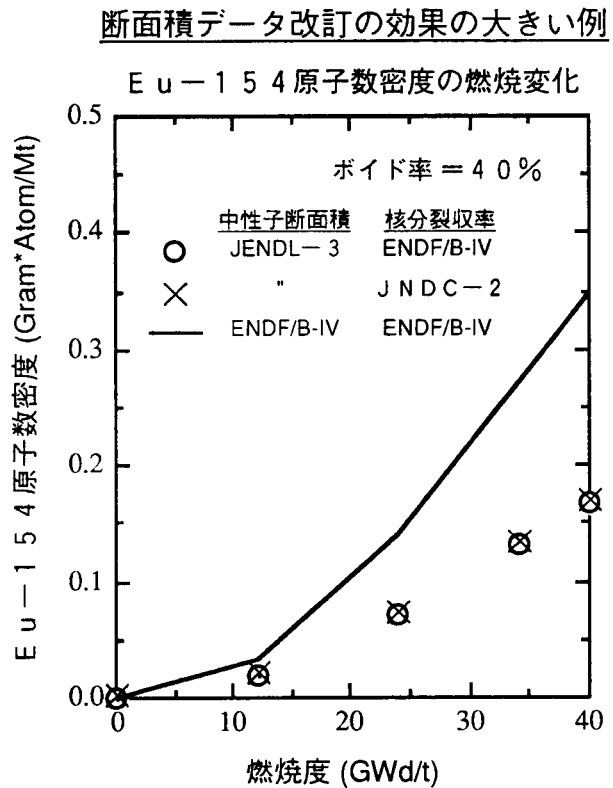


図6 JENDL-3 を使った場合に燃焼特性が大きく改良される例