

## MOX 燃料解析のための核計算法の高度化

大阪大学大学院 工学研究科

原子力工学専攻 竹田敏一

Email : takeda@nucl.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

PWR、BWR における MOX 燃料の使用、すなわちプルサーマルが本格的に開始されようとしている。MOX 燃料の使用に当たっては炉心設計が妥当なものかどうかを調べる必要があり、そのためベルギーの VENUS PWR 及び BWR 炉心を対象として CASMO-SIMULAT による解析が行われた。燃料棒単位の出力分布、臨界性についての結果については計算と測定データの比較で特に問題となることは指摘されていない。

また、最近では全炉心 MOX 燃料の炉物理実験データを取得する為、フランスカダラッシュにある CEA の Eole 炉を用いた MISTRAL 計画が進行中である。

本報告ではプルサーマル炉の核特性を正確に評価するため、どのような計算法の高度化がなされており、その結果、どのような核特性が明らかにされたかを紹介する。

計算法についてはマルチバンド法による実効断面積の作成、キャラクタリスティック法による格子・集合体計算、輸送ノード法による炉心計算法について述べる。

### 2. 核計算法の高度化

#### 2.1 マルチバンド法

マルチバンド法は、共鳴領域の全断面積をサブグループに分け、そのサブグループのスペクトルを求める方法であるが、この方法を用いると、領域依存そして方向依存の実効断面積を計算できる事が特色である。さらに従来のマルチバンド法を発展させ、2 核種の共鳴が存在する場合のスペクトルを取り扱えるようにされた。<sup>(1)</sup>

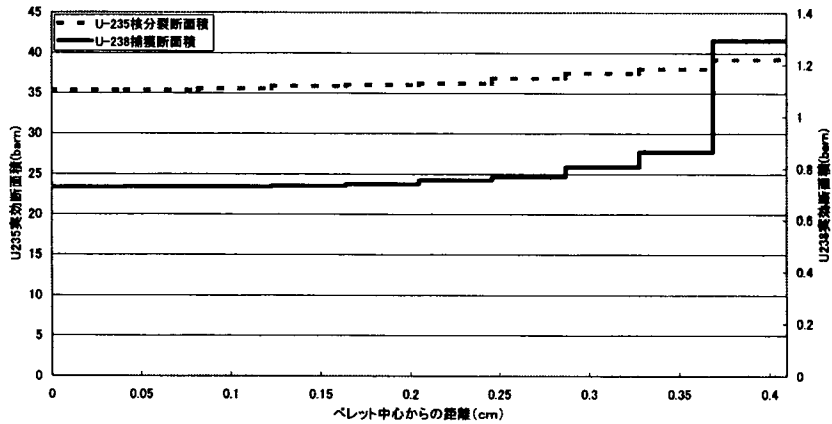
マルチバンド法を用いると、ウラン燃料、MOX 燃料とも U238、U235、Pu239、Pu242 の燃料内の実効断面積の空間依存性を考慮した核計算、燃焼計算が可能となる。この空間依存性に基づく出力分布の変化、核分裂生成物(とくに FP ガス)の生成の空間依存性を取り入れて RIM 効果を評価する事ができる。

図 1 には MOX 燃料(Pu Fissile 7.1%)における主な重核種の実効断面積を示す。燃料周辺部で自己遮蔽が無い為、実効断面積が立ち上がっている。

MOX 燃料とウラン燃料とが混在している炉心では中性子スペクトルのミスマッチの問題が生じる。このため、実効断面積は複雑な空間依存性を示す。

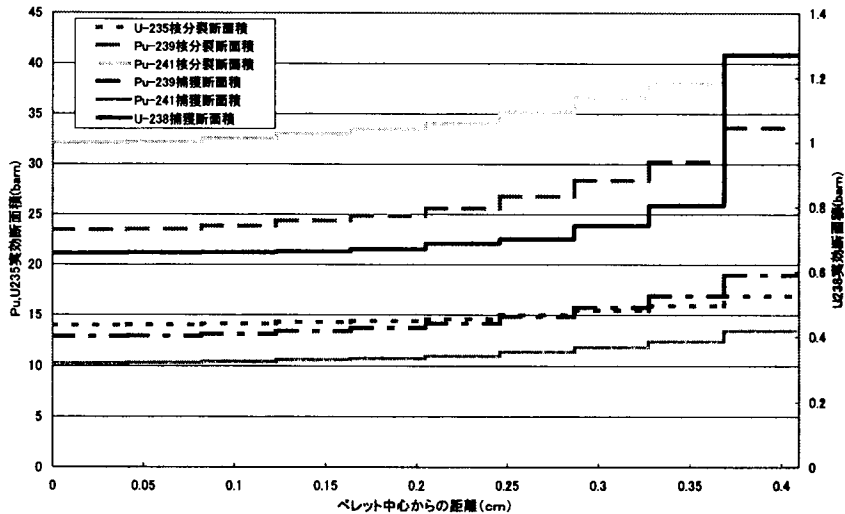
図 2 のような 2x2 の燃料集合体を考える。境界では反射境界条件を用いた。

熱エネルギーでの Pu の大きな吸収断面積のため、MOX 燃料内のウラン燃料に接する領域の Pu239 の実効断面積が大きくなり、Pu239 の数密度の燃焼による消滅割合が大きくなり、隣接 MOX 燃料に接する領域に比べ、燃焼度が 44,000MWd/t 程度になると 20%もの差が生じることが表 1 に示される。



1 群縮約実効断面積ペレット内分布

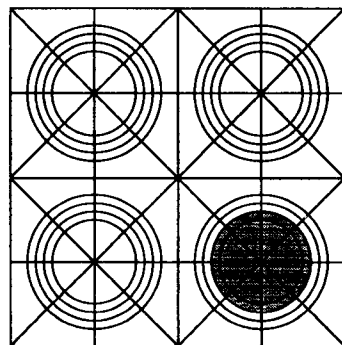
UO2



1 群縮約実効断面積ペレット内分布

MOX

図 1 UO2、MOX 燃料における 1 群に縮約されたマイクロ断面積



ピンセル 1.26×1.26 cm  
 被覆管外系 0.475 cm  
 燃料半径 0.403 cm  
 Vm/Vf 比 1.73

図2 計算体系(黒塗り部分が MOX 燃料、その他の燃料は UO<sub>2</sub>)

表1 MOX燃料内 Pu-239 数密度分布(10\*\*24n/cm\*\*2)

| 角度(領域)   | 燃焼度<br>燃料(外側) | 0Mwd/t<br>(内側) | 燃焼度<br>燃料(外側) | 22000Mwd/t<br>(内側) | 燃焼度<br>燃料(外側) | 44000Mwd/t<br>(内側) |
|----------|---------------|----------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|
| 90-135度  | 1.3810E-03    | 1.3810E-03     | 7.5236E-04    | 8.6765E-04         | 4.3612E-04    | 5.0395E-04         |
| 135-180度 | 1.3810E-03    | 1.3810E-03     | 7.5236E-04    | 8.6765E-04         | 4.3612E-04    | 5.0395E-04         |
| 180-225度 | 1.3810E-03    | 1.3810E-03     | 7.7515E-04    | 8.8033E-04         | 4.5455E-04    | 5.1666E-04         |
| 225-270度 | 1.3810E-03    | 1.3810E-03     | 8.1752E-04    | 9.0107E-04         | 4.8866E-04    | 5.3761E-04         |
| 270-315度 | 1.3810E-03    | 1.3810E-03     | 8.4984E-04    | 9.1676E-04         | 5.1621E-04    | 5.5380E-04         |
| 315-360度 | 1.3810E-03    | 1.3810E-03     | 8.4984E-04    | 9.1676E-04         | 5.1621E-04    | 5.5380E-04         |
| 0- 45度   | 1.3810E-03    | 1.3810E-03     | 8.1752E-04    | 9.0107E-04         | 4.8866E-04    | 5.3761E-04         |
| 45- 90度  | 1.3810E-03    | 1.3810E-03     | 7.7515E-04    | 8.8033E-04         | 4.5455E-04    | 5.1666E-04         |

燃料棒内の 自己遮蔽の空間依存性と温度分布より、ドップラー反応度の評価を行った。<sup>(2),(3)</sup> 平均温度、平均自己遮蔽因子を用いた方法1、自己遮蔽の空間依存性のみ考慮した方法2、両方の空間依存性を考慮した方法3による結果を比較した。(表2) 方法3による結果は方法1、2に比べドップラー反応度が20%減少していることがわかり、従来の計算方法に問題点があることが示された。この理由は方法2に比べ方法3は図3に示されるように、燃料周辺部の効果が少なくなるためである。

表2.1 Doppler reactivity coefficient for UO<sub>2</sub> fueled cell

|                | Method 1           | Method 2        | Method 3 |
|----------------|--------------------|-----------------|----------|
| BOC (0 GWD/t)  | -2.526* (+21.5%)** | -2.532 (+21.8%) | -2.079   |
| MOC (20 GWD/t) | -2.789 (+20.4%)    | -2.546 (+9.9%)  | -2.316   |
| EOC (40 GWD/t) | -2.667 (+27.1%)    | -2.610 (+24.4%) | -2.098   |

\* :  $\times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$

\*\* : difference from Method 3

表 2.2 Doppler reactivity coefficient for MOX fueled cell

|                | Method 1           | Method 2        | Method 3 |
|----------------|--------------------|-----------------|----------|
| BOC (0 GWD/t)  | -3.198* (+18.4%)** | -3.200 (+18.5%) | -2.700   |
| MOC (20 GWD/t) | -3.002 (+21.5%)    | -2.920 (+18.2%) | -2.470   |
| EOC (40 GWD/t) | -2.950 (+17.1%)    | -2.980 (+18.3%) | -2.520   |

\* :  $\times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$

\*\* : difference from Method 3

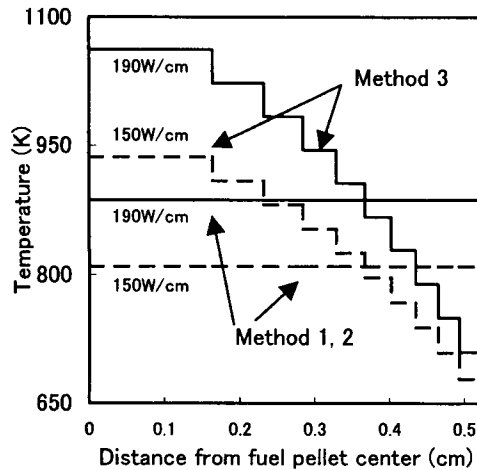


図3.1 Temperature distribution in  $\text{UO}_2$  fuel pellet

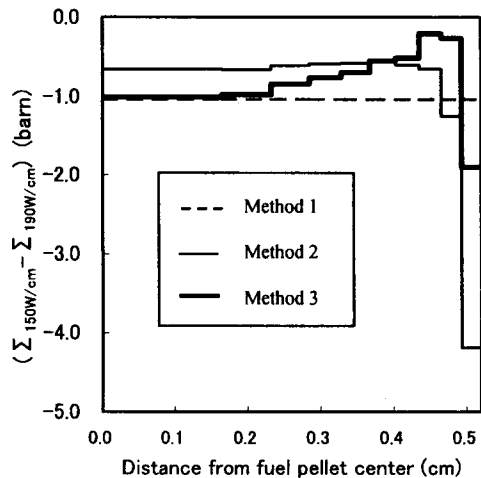


図3.2 Change of  $^{238}\text{U}$  macroscopic capture X.S. by temperature change

## 2.2 キャラクタリスティック法

燃料集合体の高度化、MOX 燃料の導入、燃料の高燃焼度化により、燃料集合体内の中性子束分布、スペクトルを精度よく計算する手法として、Characteristics 法がこの 10 年間で精力的に使われるようになった。

Characteristics 法は、Askew により 1972 年に格子計算に導入された。最近、Characteristics 法による燃料ピンの非均質性を取り入れた全炉心計算<sup>(4)</sup>、MOX 燃料解析への応用が注目される。特に MOX 燃料では、 $\text{UO}_2$  燃料に比べ、中性子角度分布の異方性が顕著であり、さらに散乱に対する輸送断面積の使用の誤差が大きくなることが示された。<sup>(5)</sup>

例として正方格子の MOX 燃料の正方格子の燃料中心での 0.3eV の中性子角度分布を図 4 に示す。ウラン燃料に比べ、0.45 度方向には隣接 MOX 燃料による中性子吸収のため、

角度分布にへこみが見られる。一方、ウラン燃料格子ではほぼ等方な分布になっている。

このような中性子束角度分布の異方性により、燃料内の出力分布、燃焼度分布に歪みが生じるかどうかについての検討を行った。MOX 燃料内を方位角方向に 22.5 度で 16 分割し合計 48 領域に分割して、40000Mwd/t までの燃焼計算を実施したが、この時点でも重核種の数密度の方位角の変化は 1%以内であり、中性子角度分布の異方性による方位角方向の燃料依存性はないことが示された。

表 4 には MOX、UO<sub>2</sub> 格子における P1 散乱効果を示す。

MOX 格子では中性子吸収により、中性子束の傾きが大きく、中性子流が大きくなる。このため、P1 散乱の影響が大きくなる。輸送断面積を用いても P1 効果を取り入れられないことがわかり、MOX 格子解析には散乱の異方性を考慮する必要があることが示された。

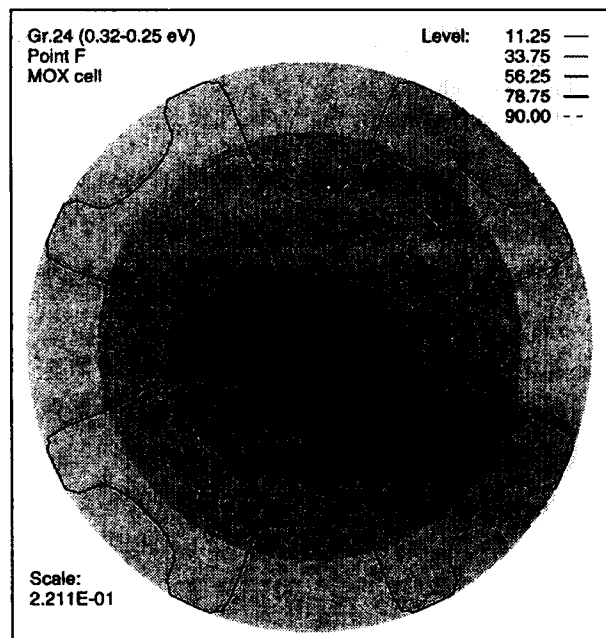


図 4 燃料領域の角度依存中性子束

表 4 Effects of the transport correction and linearly  
anisotropic scattering on  $k_{\infty}$  ( $\Delta k_{\infty}$  is in pcm)

|                     | $\Delta k_{\infty} (\Sigma^u)$ | $k_{\infty} (\Sigma^{s0})$ | $\Delta k_{\infty} (\Sigma^{s1})$ |
|---------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| MARIKO              |                                |                            |                                   |
| MOX-00              | +140                           | 1.13406                    | -199                              |
| MOX-20              | +123                           | 1.05003                    | -198                              |
| MOX-40              | +115                           | 0.98946                    | -202                              |
| UO <sub>2</sub> -00 | +41                            | 1.22693                    | +16                               |
| UO <sub>2</sub> -20 | +56                            | 1.01050                    | -22                               |
| UO <sub>2</sub> -40 | +67                            | 0.86856                    | -38                               |
| ANISN               |                                |                            |                                   |
| MOX-00              | -44                            | 1.12980                    | -214                              |
| MOX-20              | -43                            | 1.04599                    | -214                              |
| MOX-40              | -44                            | 0.98549                    | -215                              |
| UO <sub>2</sub> -00 | +13                            | 1.22697                    | +15                               |
| UO <sub>2</sub> -20 | -11                            | 1.00941                    | -29                               |
| UO <sub>2</sub> -40 | -21                            | 0.86709                    | -45                               |
| 1D plane geometry   |                                |                            |                                   |
| MARIKO              |                                |                            |                                   |
| MOX-20              | -267                           | 1.06158                    | -465                              |
| UO <sub>2</sub> -20 | -76                            | 1.01017                    | -57                               |
| ANISN               |                                |                            |                                   |
| MOX-20              | -303                           | 1.06212                    | -501                              |
| UO <sub>2</sub> -20 | -67                            | 1.00985                    | -42                               |

### 2.3 輸送ノード法の開発

MOX 燃料集合体とウラン燃料集合体が混在した炉心では、中性子輸送効果が大きいため、精度良く炉心特性を評価するには輸送計算が望ましい。

2 次元四角体系の輸送計算を効率良く実施するため輸送ノード法(Discrete Nodal Transport Method 理論)に基づく炉心計算コード TECHXY を開発した。この方法で MOX,UO<sub>2</sub> 燃料集合体の 1 次元中性子束分布を計算した結果を図 5 に示す。基準計算としてはモンテカルロコード GMVP を用いた。ノード内の中性子束分布を 4 次以上にとると中性子束分布は基準計算と同程度になり、実効増倍率も表 5 に示されるように、Nodal Equivalent Finite Difference アルゴリズムを組み込むことで誤差を約半分まで低減することができた。

### 3. 今後の研究

以上、述べたように MOX 燃料にはミクロ的に興味のある特性が見られた。さらに、これらの特性を取り扱う計算法の開発について紹介した。実効断面積が燃料内の空間依存性をもつことも示された。

今後の研究として、実効断面積の燃料から見て外向き、内向きの方向依存性、キャラクターリスティック法とマルチバンド法との結合、これらを総合的に取り入れた燃料解析、過渡解析、安全解析が挙げられる。

表 5 実効増倍率

|             | K-eff   | 誤差     |
|-------------|---------|--------|
| GMVP        | 1.29895 | ±0.02% |
| TECHXY (2次) | 1.29774 | -0.09% |
| TECHXY (4次) | 1.29798 | -0.07% |
| TECHXY (6次) | 1.29799 | -0.07% |
| NEFD (2次)   | 1.29826 | -0.05% |
| NEFD (4次)   | 1.29849 | -0.04% |
| NEFD (6次)   | 1.29851 | -0.03% |

注1. パーセンテージは GMVP からの誤差

GMVP についてはその標準偏差を表す

注2. TECHXY : DNTM 理論

NEFD : DNTM 理論+NEFD アルゴリズム

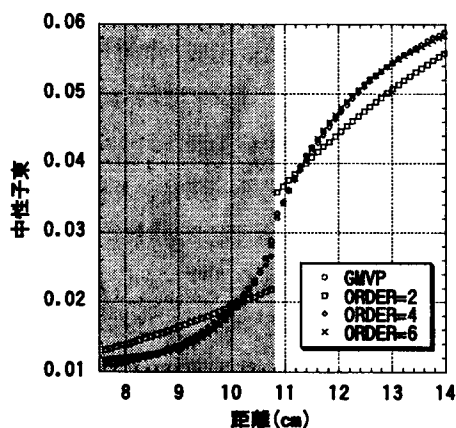


図.5 1次元中性子束分布 (熱群)

## 参考文献

- /1/ T.Takeda et al, J.Nucl.Sci.Technol.,33[7]604(1996).
- /2/ 佐野忠史他、日本原子力学会「1998 春の年会」予稿集、G2.
- /3/ Y.Ogawa et al, Progress in Nuclear Energy,24,223(1990).
- /4/ 小坂進矢他、日本原子力学会「1998 秋の大会」予稿集、D32.
- /5/ P.Petkov 他、日本原子力学会「1998 秋の大会」予稿集、D33