

MVP 新ドップラー解析機能整備

(平成 25 年度受託事業成果報告書)

平成 26 年 2 月

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

本報告書は、独立行政法人 原子力安全基盤機構からの
委託調査の成果をとりまとめたものです。

目次

| | | |
|------|--|----|
| 1 | はじめに | 1 |
| 2 | 拡張MVP断面積ライブラリの作成 | 1 |
| 3 | Mostellerベンチマーク解析 | 4 |
| 3.1 | ドップラー反応度係数ベンチマーク問題 | 4 |
| 3.2 | 改良MVPによる計算結果の比較 | 5 |
| 3.3 | U-238とPu-240のドップラー反応度係数に対する寄与 | 8 |
| 3.4 | 従来MVPライブラリとの比較 | 13 |
| 3.5 | 断面積一定モデルによる結果 | 18 |
| 4 | Hellstrand実験解析 | 21 |
| 4.1 | 解析条件 | 21 |
| 4.2 | 基準計算 | 22 |
| 4.3 | 漸近モデルによる温度係数計算 | 24 |
| 4.4 | 厳密モデルによる温度係数計算 | 34 |
| 5. | まとめ | 43 |
| | 参考文献 | 44 |
| 付録A. | 本解析で使用したMVP入力データ | 45 |
| A.1 | Mostellerベンチマーク問題 (原子炉リサイクルMOX体系、HFP、PuO ₂ 重量割合1.0%のケース) | 45 |
| A.2 | Hellstrand実験解析 (金属燃料-軽水減速体系、燃料直径8 mm、燃料温度293.15 Kのケース) | 49 |

表目次

| | | |
|--------|--|----|
| 表 2.1 | エネルギー点数に対する従来ライブラリ(基準温度 293.15 K)と新ライブラリ(基準温度 0 K)の比較 | 2 |
| 表 2.2 | MVP ライブラリ#3 レコードに対する従来ライブラリ(基準温度 293.15 K)と新ライブラリ(基準温度 0 K)の比較 | 2 |
| 表 2.3 | バイナリファイル容量に対する従来ライブラリ(基準温度 293.15 K)と新ライブラリ(基準温度 0 K)の比較 | 3 |
| 表 2.4 | 拡張版 MVP ライブラリ(0 K 基準)の核種 ID | 3 |
| 表 3.1 | 図 3.2 の数値データ | 6 |
| 表 3.2 | 図 3.3 の数値データ | 7 |
| 表 3.3 | 図 3.4 の数値データ | 9 |
| 表 3.4 | 図 3.5 の数値データ | 10 |
| 表 3.5 | 図 3.6 の数値データ | 11 |
| 表 3.6 | 図 3.7 の数値データ | 12 |
| 表 3.7 | 図 3.8-3.10 の数値データ | 15 |
| 表 3.8 | 図 3.11-3.13 の数値データ | 17 |
| 表 3.9 | 図 3.14 の数値データ | 19 |
| 表 3.10 | 図 3.15 の数値データ | 20 |
| 表 4.1 | 天然ウランの金属及び酸化物の外径と密度 | 21 |
| 表 4.2 | 軽水と重水の密度 | 21 |
| 表 4.3 | 天然ウランの存在比 | 21 |
| 表 4.4 | 計算に用いた原子量 | 21 |
| 表 4.5 | 共鳴積分計算で用いた燃料温度 | 24 |
| 表 4.6 | 金属燃料-軽水減速体系(燃料直径 8 mm)における共鳴積分の温度依存性(漸近モデル) | 26 |
| 表 4.7 | 金属燃料-軽水減速体系(燃料直径 28 mm)における共鳴積分の温度依存性(漸近モデル) | 27 |
| 表 4.8 | 酸化物燃料-軽水減速体系(燃料直径 8 mm)における共鳴積分の温度依存性(漸近モデル) | 28 |
| 表 4.9 | 酸化物燃料-軽水減速体系(燃料直径 17 mm)における共鳴積分の温度依存性(漸近モデル) | 29 |
| 表 4.10 | 酸化物燃料-軽水減速体系(燃料直径 28 mm)における共鳴積分の温度依存性(漸近モデル) | 30 |
| 表 4.11 | 金属燃料-重水減速体系(燃料直径 28 mm)における共鳴積分の温度依存性(漸近モデル) | 31 |
| 表 4.12 | 酸化物燃料-重水減速体系(燃料直径 28 mm)における共鳴積分の温度依存性(漸近モデル) | 32 |
| 表 4.13 | 漸近モデルを用いて計算した温度係数 β と実験値の比較 | 33 |
| 表 4.14 | 金属燃料-軽水減速体系(燃料直径 8 mm)における共鳴積分の温度依存性(厳密モデル) | 35 |
| 表 4.15 | 金属燃料-軽水減速体系(燃料直径 28 mm)における共鳴積分の温度依存性(厳密モデル) | 36 |
| 表 4.16 | 酸化物燃料-軽水減速体系(燃料直径 8 mm)における共鳴積分の温度依存性(厳密モデル) | 37 |
| 表 4.17 | 酸化物燃料-軽水減速体系(燃料直径 17 mm)における共鳴積分の温度依存性(厳密モデル) | 38 |
| 表 4.18 | 酸化物燃料-軽水減速体系(燃料直径 28 mm)における共鳴積分の温度依存性(厳密モデル) | 39 |
| 表 4.19 | 金属燃料-重水減速体系(燃料直径 28 mm)における共鳴積分の温度依存性(厳密モデル) | 40 |
| 表 4.20 | 酸化物燃料-重水減速体系(燃料直径 28 mm)における共鳴積分の温度依存性(厳密モデル) | 41 |
| 表 4.21 | 厳密モデルを用いて計算した温度係数 β と実験値の比較 | 42 |

目次

| | | |
|--------|---|----|
| 図 3.1 | ドブラー反応度係数ベンチマーク計算体系 | 4 |
| 図 3.2 | 改良 MVP コードと拡張 MVP ライブラリ(JENDL-4.0)を用いてドブラー反応度係数ベンチマーク問題を計算した時の漸近モデルと厳密モデルの比較(リサイクル MOX ピンセル体系) | 6 |
| 図 3.3 | 改良 MVP コードと拡張 MVP ライブラリ(JENDL-4.0)を用いてドブラー反応度係数ベンチマーク問題を計算した時の漸近モデルと厳密モデルの比較(兵器級 MOX ピンセル体系) | 7 |
| 図 3.4 | U-238 に対してのみ拡張 MVP ライブラリ(JENDL-4.0)を用いてドブラー反応度係数ベンチマーク問題を計算した時の漸近モデルと厳密モデルの比較(リサイクル MOX ピンセル体系) | 9 |
| 図 3.5 | U-238 に対してのみ拡張 MVP ライブラリ(JENDL-4.0)を用いてドブラー反応度係数ベンチマーク問題を計算した時の漸近モデルと厳密モデルの比較(兵器級 MOX ピンセル体系) | 10 |
| 図 3.6 | Pu-240 に対してのみ拡張 MVP ライブラリ(JENDL-4.0)を用いてドブラー反応度係数ベンチマーク問題を計算した時の漸近モデルと厳密モデルの比較(リサイクル MOX ピンセル体系) | 11 |
| 図 3.7 | Pu-240 に対してのみ拡張 MVP ライブラリ(JENDL-4.0)を用いてドブラー反応度係数ベンチマーク問題を計算した時の漸近モデルと厳密モデルの比較(兵器級 MOX ピンセル体系) | 12 |
| 図 3.8 | 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)と拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用いて計算した HZP に対する無限増倍率の比較(リサイクル MOX 体系) | 14 |
| 図 3.9 | 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)と拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用いて計算した HFP に対する無限増倍率の比較(リサイクル MOX 体系) | 14 |
| 図 3.10 | 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)と拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用いて計算したドブラー反応度係数の比較(リサイクル MOX 体系) | 15 |
| 図 3.11 | 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)と拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用いて計算した HZP に対する無限増倍率の比較(兵器級 MOX 体系) | 16 |
| 図 3.12 | 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)と拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用いて計算した HFP に対する無限増倍率の比較(兵器級 MOX 体系) | 16 |
| 図 3.13 | 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)と拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用いて計算したドブラー反応度係数の比較(兵器級 MOX 体系) | 17 |
| 図 3.14 | 拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用い、断面積一定モデルで計算したドブラー反応度係数の比較(リサイクル MOX 体系) | 19 |
| 図 3.15 | 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)を用い、断面積一定モデルで計算したドブラー反応度係数の比較(リサイクル MOX 体系) | 20 |
| 図 4.1 | 金属燃料-軽水減速体系における U-238 共鳴積分の燃料棒ピッチ依存性 | 23 |
| 図 4.2 | 酸化燃料-軽水減速体系における U-238 共鳴積分の燃料棒ピッチ依存性 | 23 |
| 図 4.3 | 金属燃料-重水減速体系における U-238 共鳴積分の燃料棒ピッチ依存性 | 23 |
| 図 4.4 | 金属燃料-軽水減速体系(燃料直径 8 mm)における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性(漸近モデル) | 26 |
| 図 4.5 | 金属燃料-軽水減速体系(燃料直径 28 mm)における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性(漸近モデル) | 27 |
| 図 4.6 | 酸化燃料-軽水減速体系(燃料直径 8 mm)における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性(漸近モデル) | 28 |
| 図 4.7 | 酸化燃料-軽水減速体系(燃料直径 17 mm)における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性(漸近モデル) | 29 |
| 図 4.8 | 酸化燃料-軽水減速体系(燃料直径 28 mm)における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性(漸近モデル) | 30 |
| 図 4.9 | 金属燃料-重水減速体系(燃料直径 28 mm)における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性(漸近モデル) | 31 |
| 図 4.10 | 酸化燃料-重水減速体系(燃料直径 28 mm)における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性(漸近モデル) | 32 |
| 図 4.11 | 金属燃料体系における温度係数 β の表面積対質量比 S/M に対する依存性(漸近モデル) | 33 |
| 図 4.12 | 酸化燃料体系における温度係数 β の表面積対質量比 S/M に対する依存性(漸近モデル) | 33 |

| | | |
|--------|---|----|
| 図 4.13 | 金属燃料-軽水減速体系 (燃料直径 8 mm) における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性 (厳密モデル) | 35 |
| 図 4.14 | 金属燃料-軽水減速体系 (燃料直径 28 mm) における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性 (厳密モデル) | 36 |
| 図 4.15 | 酸化物燃料-軽水減速体系 (燃料直径 8 mm) における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性 (厳密モデル) | 37 |
| 図 4.16 | 酸化物燃料-軽水減速体系 (燃料直径 17 mm) における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性 (厳密モデル) | 38 |
| 図 4.17 | 酸化物燃料-軽水減速体系 (燃料直径 28 mm) における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性 (厳密モデル) | 39 |
| 図 4.18 | 金属燃料-重水減速体系 (燃料直径 28 mm) における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性 (厳密モデル) | 40 |
| 図 4.19 | 酸化物燃料-重水減速体系 (燃料直径 28 mm) における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性 (厳密モデル) | 41 |
| 図 4.20 | 金属燃料体系における温度係数 β の表面積対質量比 S/M に対する依存性 (厳密モデル) . | 42 |
| 図 4.21 | 酸化物燃料体系における温度係数 β の表面積対質量比 S/M に対する依存性 (厳密モデル) | 42 |

1. はじめに

ドップラー反応度係数は、原子炉の安全設計における非常に重要な炉心パラメータであり、FCA を用いた実験的評価及び最新の解析手法を用いた解析的評価が行われている。解析的評価の参照解を求めるためにモンテカルロコードが用いられることが多いが、最近の研究結果により、現状のモンテカルロコードに内蔵されている共鳴散乱モデルではドップラー反応度に対する計算精度が悪いことが報告されている¹⁻⁵⁾。本事業では、モンテカルロコードにおける共鳴散乱モデルを改良し、汎用的に参照解を与えることができるようなモンテカルロコードを整備することを目的としている。

この目的を達成するため、平成 24 年度は、評価計算用として開発されていた共鳴散乱モデルを最新版の MVP コード⁶⁾へ実装した。また、改良共鳴散乱モデルは、0 K の弾性散乱断面積データを必要とするため、断面積ライブラリフォーマットを拡張し、0 K を基準温度とする断面積ライブラリを作成した。さらに、U-235 と U-238 に対して、0 K を基準温度とする断面積ライブラリを作成し、ウラン燃料に対するドップラー反応度ベンチマーク問題により改良共鳴散乱モデルと拡張 MVP ライブラリの検証を行った。

本年度は、JENDL-4.0 の主要な重核に対する拡張 MVP 断面積ライブラリを追加整備し、拡張 MVP ライブラリと改良共鳴散乱モデルに対して、MOX 燃料に対するベンチマークも含む幅広い検証を行う。本年度の作業により、UO₂ 燃料体系から MOX 燃料体系に至る汎用的な体系に対して、参照解となる連続エネルギーモンテカルロコード MVP を用いたドップラー反応度評価の精度向上が期待できる。

2. 拡張 MVP 断面積ライブラリの作成

平成 24 年度は、JENDL-4.0 の U-235 と U-238 に対してのみ拡張 MVP 断面積データを作成したが、今年度は、MOX 燃料に対する解析ができるように Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Am-241(6 核種)に対する拡張 MVP 断面積データを作成した。MVP ライブラリに作成したプラットフォームは以下の通りである。

OS: Linux master 2.6.32-45-generic #101-Ubuntu SMP Mon Dec 3 15:41:13 UTC 2012
i686 GNU/Linux

CPU: Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E8500 @ 3.16GHz

Compiler: Fujitsu Fortran Compiler Driver Version 5.0 (Nov 12 2003 20:08:33)

MVP ライブラリ作成システムは、LICEM2009 を用いて処理を行った。

断面積データ容量について従来ライブラリ（基準温度 293.15 K）と新ライブラリ（基準温度 0 K）を比較した。表 2.1-2.3 に、それぞれ、エネルギー点数、MVP ライブラリ#3 レ

コード、バイナリファイル容量に対する比較を示す。Pu と AM の MVP ライブラリについては、従来ライブラリと比較して、データ容量は 2 倍以下であり、計算上メモリを大きく圧迫するものではない。

表 2.1 エネルギー点数に対する従来ライブラリ（基準温度 293.15 K）と新ライブラリ（基準温度 0 K）の比較

| 核種名 | エネルギー点数 (NPTS) | | |
|----------------|----------------|-----------|--------------|
| | 従来ライブラリ | 新ライブラリ | 比 |
| | (293.15 K) | (0 K) | (0K/293.15K) |
| U-235 (J-4.0) | 44,420 | 117,713 | 2.7 |
| U-238 (J-4.0) | 226,502 | 1,087,860 | 4.8 |
| Pu-238 (J-4.0) | 15,634 | 21,464 | 1.4 |
| Pu-239 (J-4.0) | 79,736 | 210,051 | 2.6 |
| Pu-240 (J-4.0) | 60,924 | 129,246 | 2.1 |
| Pu-241 (J-4.0) | 17,929 | 26,227 | 1.5 |
| Pu-242 (J-4.0) | 22,314 | 33,909 | 1.5 |
| Am-241 (J-4.0) | 21,811 | 36,442 | 1.7 |

表 2.2 MVP ライブラリ#3 レコードに対する従来ライブラリ（基準温度 293.15 K）と新ライブラリ（基準温度 0 K）の比較

| 核種名 | MVP ライブラリ#3 レコードのワード数 (NTDATA) | | |
|----------------|-----------------------------------|-----------|--------------|
| | 従来ライブラリ | 新ライブラリ | 比 |
| | (293.15 K) | (0 K) | (0K/293.15K) |
| U-235 (J-4.0) | 1,844,981 | 2,450,443 | 1.3 |
| U-238 (J-4.0) | 3,146,109 | 8,089,165 | 2.6 |
| Pu-238 (J-4.0) | 878,514 | 898,218 | 1.0 |
| Pu-239 (J-4.0) | 1,440,265 | 2,142,410 | 1.5 |
| Pu-240 (J-4.0) | 1,288,938 | 1,638,291 | 1.3 |
| Pu-241 (J-4.0) | 1,007,988 | 1,040,047 | 1.0 |
| Pu-242 (J-4.0) | 928,472 | 976,275 | 1.1 |
| Am-241 (J-4.0) | 926,132 | 993,577 | 1.1 |

表 2.3 バイナリファイル容量に対する従来ライブラリ（基準温度 293.15 K）と新ライブラリ（基準温度 0 K）の比較

| 核種名 | バイナリファイル容量 (bytes) | | |
|----------------|--------------------|------------|--------------|
| | 従来ライブラリ | 新ライブラリ | 比 |
| | (293.15 K) | (0 K) | (0K/293.15K) |
| U-235 (J-4.0) | 7,392,684 | 9,814,532 | 1.3 |
| U-238 (J-4.0) | 12,597,196 | 32,369,420 | 2.6 |
| Pu-238 (J-4.0) | 3,526,816 | 3,605,632 | 1.0 |
| Pu-239 (J-4.0) | 5,773,820 | 8,582,400 | 1.5 |
| Pu-240 (J-4.0) | 5,168,512 | 6,565,924 | 1.3 |
| Pu-241 (J-4.0) | 4,044,712 | 4,172,948 | 1.0 |
| Pu-242 (J-4.0) | 3,726,648 | 3,917,860 | 1.1 |
| Am-241 (J-4.0) | 3,717,288 | 3,987,068 | 1.1 |

新たに作成した 0 K 基準の MVP ライブラリに対する核種名は、従来の 293.15 K 基準の MVP ライブラリと区別するために以下のように核種 ID の最後に TZ(Temperature Zero) をつけることにした。表 2.4 に新ライブラリの核種 ID を示す。

表 2.4 拡張版 MVP ライブラリ (0 K 基準) の核種 ID

| 核種 | 従来ライブラリ (293.15 K 基準) | 新ライブラリ (0 K 基準) |
|--------|-----------------------|-----------------|
| U-235 | U02350J40 | U02350J40TZ |
| U-238 | U02380J40 | U02380J40TZ |
| Pu-238 | PU2380J40 | PU2380J40TZ |
| Pu-239 | PU2390J40 | PU2390J40TZ |
| Pu-240 | PU2400J40 | PU2400J40TZ |
| Pu-241 | PU2410J40 | PU2410J40TZ |
| Pu-242 | PU2420J40 | PU2420J40TZ |
| Am-241 | AM2410J40 | AM2410J40TZ |

現在のデフォルトでは、上記の核種 ID が用いられるが、インデックスファイルを編集することによりユーザが自由に核種 ID を変更することが可能である。

3. Mosteller ベンチマーク解析

3.1. ドップラー反応度係数ベンチマーク問題

改良共鳴散乱モデルと拡張 MVP ライブラリ (0 K 基準ライブラリ) の検証のため、Mostellerによって提案された燃料ピンセル体系におけるドップラー反応度係数ベンチマーク問題⁷⁾に対し、改良した MVP コードでドップラー反応度係数を計算した。計算体系を図 3.1 に示す。ドップラー反応度係数は、ゼロ出力時の温度($T_{\text{HZP}}=300\text{ K}$)とフル出力時の温度($T_{\text{HFP}}=600\text{ K}$)の反応度変化を次式

$$\Delta\rho_{\text{Dop}} = \frac{1}{k_{\text{HZP}}} - \frac{1}{k_{\text{HFP}}}$$

から求め、ドップラー反応度係数は、

$$\frac{\rho_{\text{Dop}}}{\Delta T_{\text{Fuel}}}$$

として計算する。温度変化は常に、 $\Delta T_{\text{Fuel}} = 300$ である。

ベンチマーク問題では、燃料としてPWRのウラン燃料とリサイクルMOXと兵器級MOXの3種類が用意されている。ウラン燃料については、平成24年度の作業で計算が終了しているので、今年度は、リサイクルMOXと兵器級MOXに対するベンチマーク計算を実施した。

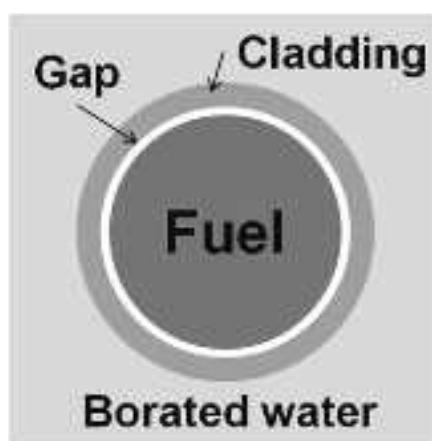


図 3.1 ドップラー反応度係数ベンチマーク計算体系

3.2. 改良 MVP による計算結果の比較

拡張 MVP ライブラリ (0 K 基準ライブラリ) は、U-235, U-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242 についてのみ使用し、その他の核種については、通常の MVP ライブラリ (293.15 K 基準ライブラリ) を用いて計算を行った。(Pu-238, Am-241 については、ベンチマーク問題で用いられていないことに注意。)評価済み核データは、すべて JENDL-4.0 に基づいている。MVP の計算はすべて、バッチサイズ 10,000 ヒストリー、バッチ数 (スキップバッチ数含まない) 5,000、スキップバッチ数 100 で行った。漸近モデルと厳密モデルによる計算結果の比較を以下の図 3.2-3.3 と表 3.1-3.2 に示す。PuO₂ 重量割合が 0wt%の結果については、UO₂ ピンセル問題の天然ウラン組成(0.7%)に対する結果を示している。

漸近モデルは、従来からモンテカルロコードで用いられていた二体運動学モデルに基づく近似モデルである。MOX ピンセル体系においても、厳密モデルは漸近モデルに比べて、ドップラー反応度係数を負側に大きく評価することが分かる。リサイクル MOX 体系で 5%-8%、兵器級 MOX 体系で 5%-10%の過大評価 (絶対値) となる

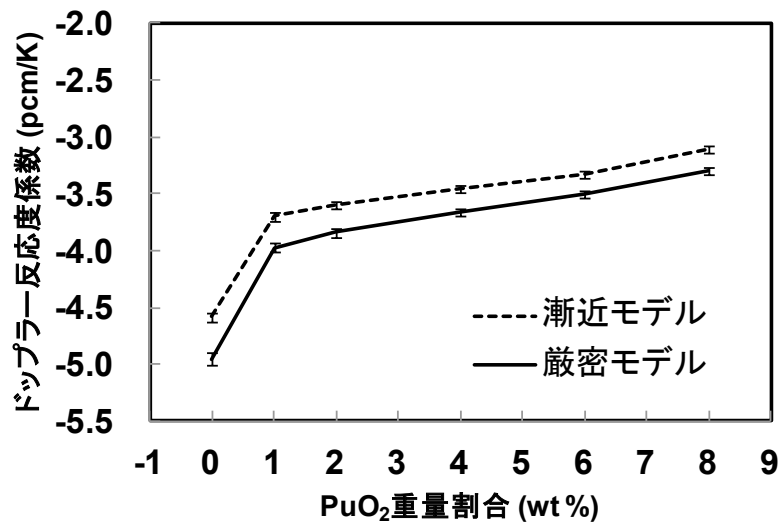


図 3.2 改良 MVP コードと拡張 MVP ライブラリ(JENDL-4.0)を用いてドップラー反応度係数ベンチマーク問題を計算した時の漸近モデルと厳密モデルの比較(リサイクル MOX ピンセル体系)

表 3.1 図 3.2 の数値データ

| PuO ₂ 重量割 合 (wt.%) | 漸近モデル(A) | | ドップラー 反応度係数 (pcm/K) (%1σ) | 厳密モデル(E) | | ドップラー 反応度係 数 (pcm/K) (%1σ) | E/A (1σ) |
|--|----------------------|---------------------|------------------------------------|----------------------|---------------------|--|----------------|
| | k _∞ (%1σ) | | | k _∞ (%1σ) | | | |
| | HZP | HFP | HZP | HFP | | | |
| 0.0 | 0.66597 (0.0057) | 0.65993 (0.0057) | -4.58 (0.9) | 0.66521 (0.0066) | 0.65870 (0.0075) | -4.95 (1.0) | 1.08 (0.01) |
| 1.0 | 0.94795 (0.0066) | 0.93808 (0.0068) | -3.70 (0.9) | 0.94707 (0.0075) | 0.93649 (0.0083) | -3.97 (1.0) | 1.07 (0.01) |
| 2.0 | 1.02416 (0.0069) | 1.01297 (0.0071) | -3.60 (0.9) | 1.02321 (0.0077) | 1.01130 (0.0086) | -3.84 (1.0) | 1.07 (0.01) |
| 4.0 | 1.07872 (0.0072) | 1.06678 (0.0072) | -3.46 (0.9) | 1.07809 (0.0079) | 1.06548 (0.0086) | -3.66 (1.0) | 1.06 (0.01) |
| 6.0 | 1.10691 (0.0070) | 1.09480 (0.0073) | -3.33 (0.9) | 1.10645 (0.0079) | 1.09374 (0.0085) | -3.50 (1.0) | 1.05 (0.01) |
| 8.0 | 1.12958 (0.0071) | 1.11779 (0.0072) | -3.11 (1.0) | 1.12951 (0.0078) | 1.11701 (0.0082) | -3.30 (1.0) | 1.06 (0.01) |

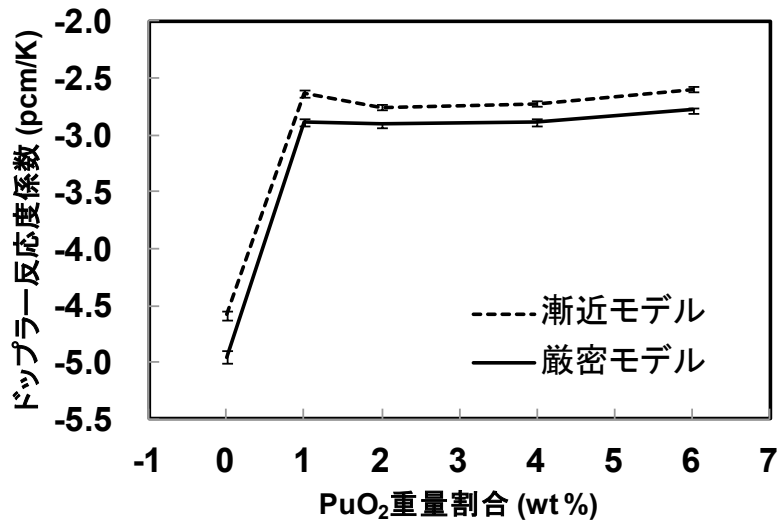


図 3.3 改良 MVP コードと拡張 MVP ライブラリ(JENDL-4.0)を用いてドップラー反応度係数ベンチマーク問題を計算した時の漸近モデルと厳密モデルの比較(兵器級 MOX ピンセル体系)

表 3.2 図 3.3 の数値データ

| PuO ₂ 重量割 合 (wt.%) | 漸近モデル(A) | | ドップラー 反応度係数 (pcm/K) (%1σ) | 厳密モデル(E) | | ドップラー 反応度係 数 (pcm/K) (%1σ) | E/A (1σ) |
|--|----------------------|---------------------|------------------------------------|----------------------|---------------------|--|----------------|
| | k _∞ (%1σ) | | | k _∞ (%1σ) | | | |
| | HZP | HFP | HZP | HFP | | | |
| 0.0 | 0.66597 (0.0057) | 0.65993 (0.0057) | -4.58 (0.9) | 0.66521 (0.0066) | 0.65870 (0.0075) | -4.95 (1.0) | 1.08 (0.01) |
| 1.0 | 1.09439 (0.0058) | 1.08500 (0.0058) | -2.63 (1.0) | 1.09318 (0.0067) | 1.08291 (0.0074) | -2.89 (1.1) | 1.10 (0.02) |
| 2.0 | 1.18509 (0.0058) | 1.17358 (0.0059) | -2.76 (0.8) | 1.18389 (0.0066) | 1.17177 (0.0074) | -2.91 (1.0) | 1.05 (0.01) |
| 4.0 | 1.25369 (0.0059) | 1.24097 (0.0061) | -2.73 (0.8) | 1.25260 (0.0067) | 1.23915 (0.0074) | -2.89 (0.9) | 1.06 (0.01) |
| 6.0 | 1.29024 (0.0057) | 1.27739 (0.0060) | -2.60 (0.8) | 1.28914 (0.0065) | 1.27543 (0.0073) | -2.78 (0.9) | 1.07 (0.01) |

3.3. U-238 と Pu-240 のドップラー反応度係数に対する寄与

今回新たに作成した拡張 MVP ライブラリは、0 K を基準にしているため、エネルギー点数も多く、従来の 293.15 K のライブラリより多くのメモリを必要とする。また、0 K からドップラー拡張(broadening)するため、計算時間がよりかかることになる。したがって、すべての核種に対して 0 K 基準の拡張 MVP ライブラリを用いるよりは、重核種のみ、もしくは、ドップラー反応度に最も大きな寄与を与える重核種のみ 0 K 基準の拡張 MVP ライブラリを用いる方が効率的である。

MOX 燃料においてドップラー反応度に最も大きな寄与を及ぼすのは U-238 と Pu-240 であり、今回のベンチマーク問題に対して、U-238 のみと Pu-240 のみ 0 K 基準の拡張 MVP ライブラリを用いた場合にどれくらい精度よく計算できるのか調査した。図 3.4 と表 3.3 にリサイクル MOX 体系に対して U-238 のみ 0 K 基準の拡張 MVP ライブラリを用いた場合の結果を示す。また、図 3.5 と表 3.4 に兵器級 MOX 体系に対する結果を示す。リサイクル MOX 体系の PuO₂ 重量割合 6% の場合に対して、厳密モデルから約 3% の差異が見られるがそれ以外は厳密モデルとほぼ同じ結果が得られる。

図 3.6 と表 3.5 にリサイクル MOX 体系に対して Pu-240 のみ 0 K 基準の拡張 MVP ライブラリを用いた場合の結果を示す。また、図 3.7 と表 3.6 に兵器級 MOX 体系に対する結果を示す。リサイクル MOX 体系と兵器級 MOX 体系ともに、Pu-240 のみを厳密モデルで取り扱ったときには、漸近モデルに比べて負側ではなく、多少正側へ偏った結果が得られるが、これは Pu-240 以外の核種に対して、断面積一定モデルが用いられていることによるものと思われる。現在の MVP の仕様では、DOPPLER-SCATTERING オプションについて核種ごとに指定できるようにはなっていない。現在、単一核種の感度解析を行う場合は、DOPPLER-SCATTERING(EXACT)オプションを指定し、その単一核種についてのみ拡張ライブラリを用い、それ以外は従来ライブラリとしている。この場合、0 K データが断面積に与えられていない核種については、DOPPLER-SCATTERING(NORES)で計算するようになっている。

今回の結果から、通常の MOX 燃料のドップラー係数については、U-238 の影響が支配的であり、U-238 に対してのみ厳密な共鳴弾性散乱モデルを用いれば、十分な精度のドップラー反応度係数を計算できると考えられる。

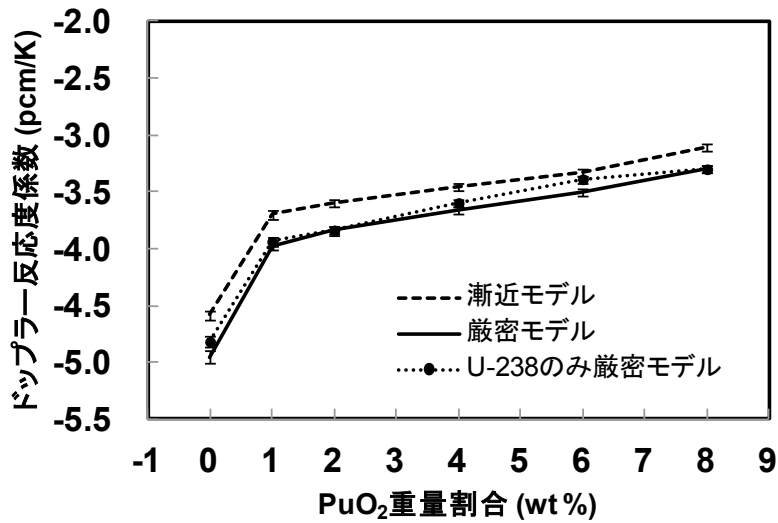


図 3.4 U-238 に対してのみ拡張 MVP ライブラリ(JENDL-4.0)を用いてドップラー反応度係数ベンチマーク問題を計算した時の漸近モデルと厳密モデルの比較(リサイクル MOX ピンセル体系)

表 3.3 図 3.4 の数値データ

| PuO2 重量割 合 (wt.%) | U238 のみ厳密モデル(B) | | ドップラー 反応度係数 (pcm/K) (%1σ) | 厳密モデル(E) | | ドップラー 反応度係 数 (pcm/K) (%1σ) | E/B (1σ) |
|----------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|--|----------------|
| | k_{∞} (%1σ) | | | k_{∞} (%1σ) | | | |
| | HZP | HFP | | HZP | HFP | | |
| 0.0 | 0.66535 (0.0066) | 0.65901 (0.0073) | -4.82 (1.0) | 0.66521 (0.0066) | 0.65870 (0.0075) | -4.95 (1.0) | 1.03 (0.01) |
| 1.0 | 0.94714 (0.0075) | 0.93666 (0.0082) | -3.94 (1.0) | 0.94707 (0.0075) | 0.93649 (0.0083) | -3.97 (1.0) | 1.01 (0.01) |
| 2.0 | 1.02331 (0.0076) | 1.01140 (0.0083) | -3.84 (1.0) | 1.02321 (0.0077) | 1.01130 (0.0086) | -3.84 (1.0) | 1.00 (0.01) |
| 4.0 | 1.07801 (0.0080) | 1.06562 (0.0083) | -3.60 (1.0) | 1.07809 (0.0079) | 1.06548 (0.0086) | -3.66 (1.0) | 1.02 (0.01) |
| 6.0 | 1.10625 (0.0079) | 1.09395 (0.0082) | -3.39 (1.0) | 1.10645 (0.0079) | 1.09374 (0.0085) | -3.50 (1.0) | 1.03 (0.01) |
| 8.0 | 1.12945 (0.0077) | 1.11696 (0.0082) | -3.30 (1.0) | 1.12951 (0.0078) | 1.11701 (0.0082) | -3.30 (1.0) | 1.00 (0.01) |

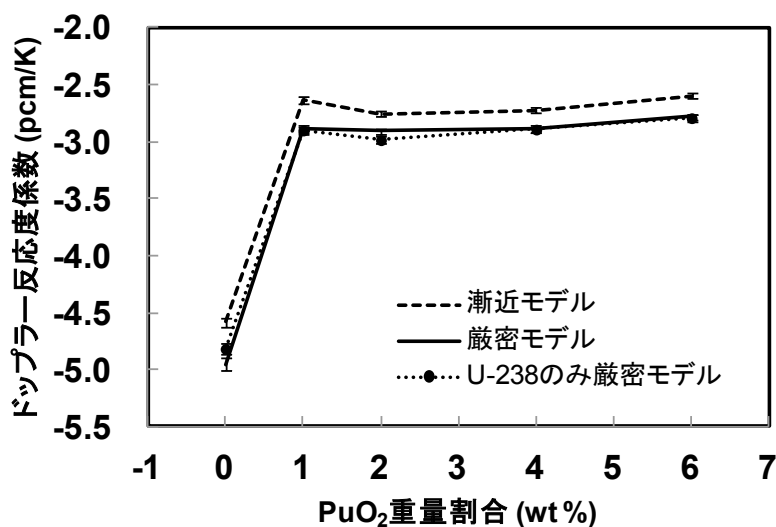


図 3.5 U-238 に対してのみ拡張 MVP ライブラリ(JENDL-4.0)を用いてドップラー反応度係数ベンチマーク問題を計算した時の漸近モデルと厳密モデルの比較(兵器級 MOX ピンセル体系)

表 3.4 図 3.5 の数値データ

| PuO2 重量割 合 (wt.%) | U238 のみ厳密モデル(B) | | ドップラー 反応度係数 (pcm/K) (%1σ) | 厳密モデル(E) | | ドップラー 反応度係 数 (pcm/K) (%1σ) | E/B (1σ) |
|----------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------|---------------------|--|----------------|
| | $k_{\infty}(\%1\sigma)$ | | | $k_{\infty}(\%1\sigma)$ | | | |
| | HZP | HFP | HZP | HFP | (%1σ) | (1σ) | |
| 0.0 | 0.66535 (0.0066) | 0.65901 (0.0073) | -4.82 (1.0) | 0.66521 (0.0066) | 0.65870 (0.0075) | -4.95 (1.0) | 1.03 (0.01) |
| 1.0 | 1.09334 (0.0066) | 1.08304 (0.0073) | -2.90 (1.0) | 1.09318 (0.0067) | 1.08291 (0.0074) | -2.89 (1.1) | 1.00 (0.01) |
| 2.0 | 1.18399 (0.0068) | 1.17156 (0.0075) | -2.99 (1.0) | 1.18389 (0.0066) | 1.17177 (0.0074) | -2.91 (1.0) | 0.98 (0.01) |
| 4.0 | 1.25255 (0.0067) | 1.23908 (0.0074) | -2.89 (0.9) | 1.25260 (0.0067) | 1.23915 (0.0074) | -2.89 (0.9) | 1.00 (0.01) |
| 6.0 | 1.28934 (0.0065) | 1.27556 (0.0071) | -2.79 (0.9) | 1.28914 (0.0065) | 1.27543 (0.0073) | -2.78 (0.9) | 1.00 (0.01) |

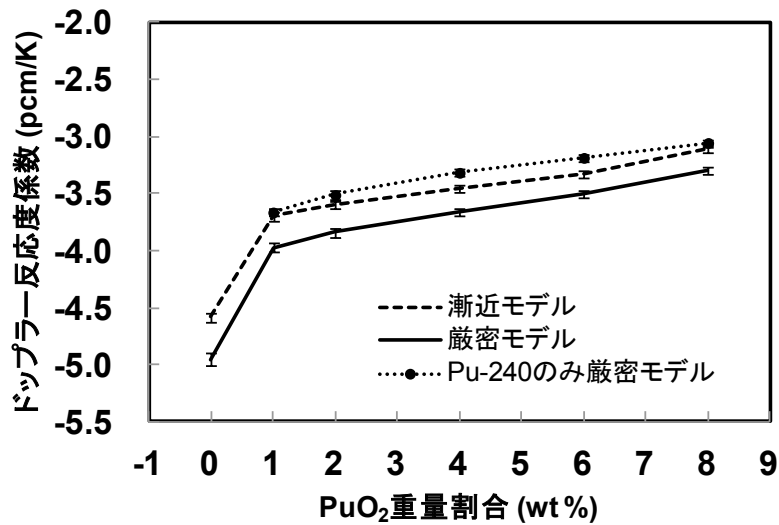


図 3.6 Pu-240 に対してのみ拡張 MVP ライブラリ (JENDL-4.0) を用いて Doppler 反応度係数ベンチマーク問題を計算した時の漸近モデルと厳密モデルの比較 (リサイクル MOX ピンセル体系)

表 3.5 図 3.6 の数値データ

| PuO2 重量割 合 (wt.%) | 漸近モデル(A) | | Doppler 反応度係数 (pcm/K) (%1σ) | Pu240 のみ厳密モデル(B) | | Doppler 反応度係 数 (pcm/K) (%1σ) | B/A (1σ) |
|----------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------|--|----------------|
| | $k_{\infty}(\%1\sigma)$ | | | $k_{\infty}(\%1\sigma)$ | | | |
| | HZP | HFP | HZP | HFP | (%1σ) | (1σ) | |
| 0.0 | 0.66597 (0.0057) | 0.65993 (0.0057) | -4.58 (0.9) | --- | --- | --- | --- |
| 1.0 | 0.94795 (0.0066) | 0.93808 (0.0068) | -3.70 (0.9) | 0.94801 (0.0066) | 0.93824 (0.0068) | -3.66 (0.9) | 0.99 (0.01) |
| 2.0 | 1.02416 (0.0069) | 1.01297 (0.0071) | -3.60 (0.9) | 1.02411 (0.0071) | 1.01318 (0.0071) | -3.51 (0.9) | 0.98 (0.01) |
| 4.0 | 1.07872 (0.0072) | 1.06678 (0.0072) | -3.46 (0.9) | 1.07885 (0.0071) | 1.06739 (0.0073) | -3.32 (1.0) | 0.96 (0.01) |
| 6.0 | 1.10691 (0.0070) | 1.09480 (0.0073) | -3.33 (0.9) | 1.10709 (0.0072) | 1.09550 (0.0073) | -3.19 (1.0) | 0.96 (0.01) |
| 8.0 | 1.12958 (0.0071) | 1.11779 (0.0072) | -3.11 (1.0) | 1.13025 (0.0072) | 1.11866 (0.0072) | -3.06 (1.0) | 0.98 (0.01) |

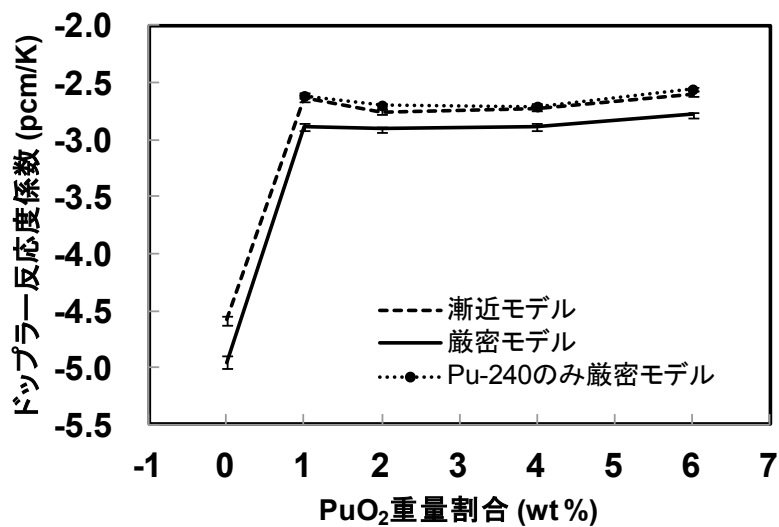


図 3.7 Pu-240 に対してのみ拡張 MVP ライブラリ (JENDL-4.0) を用いて Doppler 反応度係数ベンチマーク問題を計算した時の漸近モデルと厳密モデルの比較 (兵器級 MOX ピンセル体系)

表 3.6 図 3.7 の数値データ

| PuO2 重量割 合 (wt.%) | 漸近モデル(A) | | Doppler 反応度係数 (pcm/K) (%1σ) | Pu240 のみ厳密モデル(B) | | Doppler 反応度係 数 (pcm/K) (%1σ) | B/A (1σ) |
|----------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------|--|----------------|
| | $k_{\infty}(\%1\sigma)$ | | | $k_{\infty}(\%1\sigma)$ | | | |
| | HZP | HFP | HZP | HFP | (%1σ) | (1σ) | |
| 0.0 | 0.66597 (0.0057) | 0.65993 (0.0057) | -4.58 (0.9) | --- | --- | --- | --- |
| 1.0 | 1.09439 (0.0058) | 1.08500 (0.0058) | -2.63 (1.0) | 1.09429 (0.0057) | 1.08497 (0.0058) | -2.61 (1.0) | 0.99 (0.01) |
| 2.0 | 1.18509 (0.0058) | 1.17358 (0.0059) | -2.76 (0.8) | 1.18500 (0.0057) | 1.17374 (0.0059) | -2.70 (0.9) | 0.98 (0.01) |
| 4.0 | 1.25369 (0.0059) | 1.24097 (0.0061) | -2.73 (0.8) | 1.25365 (0.0059) | 1.24101 (0.0061) | -2.71 (0.8) | 0.99 (0.01) |
| 6.0 | 1.29024 (0.0057) | 1.27739 (0.0060) | -2.60 (0.8) | 1.29018 (0.0058) | 1.27754 (0.0060) | -2.56 (0.8) | 0.98 (0.01) |

3.4. 従来 MVP ライブラリとの比較

今回の作業において 0 K 基準の拡張 MVP ライブラリを新たに作成したため、従来の 293.15 K 基準の MVP ライブラリと 2 種類のライブラリが存在することになる。漸近モデルを用いる限り、どちらのライブラリを用いても計算は可能であるが、計算結果は完全には一致しない。これは、入射中性子のエネルギーグリッドが異なるからである。この影響を調べるために、漸近モデルを用いた同じ入力データに対して、拡張 MVP ライブラリと従来 MVP ライブラリを用いたときの結果を比較した。リサイクル MOX 体系、兵器級 MOX 体系とも、U-235, U-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242 について 0 K 基準の拡張 MVP ライブラリを用いた。図 3.8 と図 3.9 に、リサイクル MOX 体系に対して、漸近モデルの HZP と HFP に対する無限増倍率について従来ライブラリと拡張ライブラリで計算した結果を比較したものをそれぞれ示す。また、図 3.10 にドップラー反応度係数を比較した図を示す。表 3.7 には、図 3.8-3.10 の数値データを示す。兵器級 MOX 体系についても同様に、図 3.11 から図 3.13 と表 3.8 に結果を示す。

無限増倍率で見ると従来ライブラリと新ライブラリの差異は非常に小さく、影響はほとんどない。ドップラー反応度係数で見たときには、2%ほどの差異が見られるが、2 標準偏差の統計誤差の範囲内で一致しており、従来ライブラリと新ライブラリを用いた時の差異はほとんど無視できると考えられる。

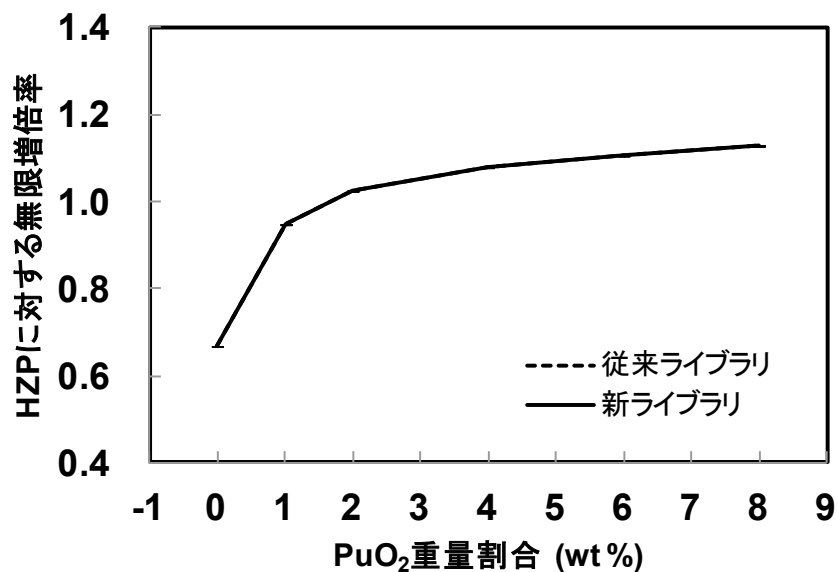


図 3.8 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)と拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用いて計算した HZP に対する無限増倍率の比較 (リサイクル MOX 体系)

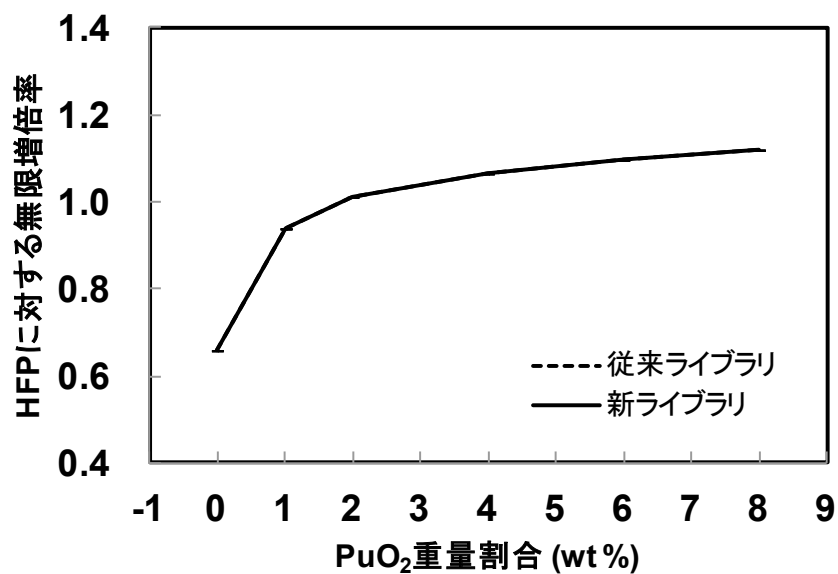


図 3.9 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)と拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用いて計算した HFP に対する無限増倍率の比較 (リサイクル MOX 体系)

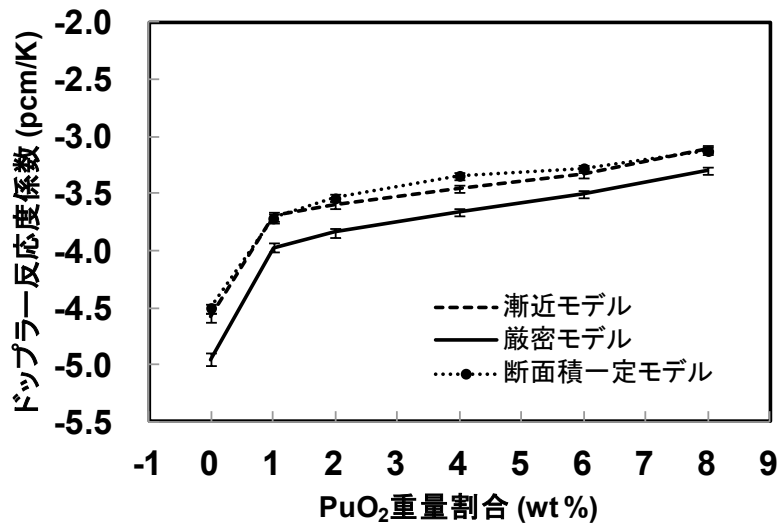


図 3.10 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)と拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用いて計算したドップラー反応度係数の比較 (リサイクル MOX 体系)

表 3.7 図 3.8–3.10 の数値データ

| 濃縮度 (wt.%) | 従来ライブラリ | | | 新ライブラリ | | | 新/従来 (1σ) |
|---------------|-------------------------|----------|-------------------------------|-------------------------|----------|-------------------------------|--------------|
| | $k_{\infty}(\%1\sigma)$ | | ドップラー 反応度係 数 (pcm/K) | $k_{\infty}(\%1\sigma)$ | | ドップラー 反応度係 数 (pcm/K) | |
| | HZP | HFP | (%1σ) | HZP | HFP | (%1σ) | |
| 0 | 0.66606 | 0.65993 | -4.65 | 0.66597 | 0.65993 | -4.58 | 0.99 |
| | (0.0056) | (0.0057) | (0.9) | (0.0057) | (0.0057) | (0.9) | (0.01) |
| 1.0 | 0.94805 | 0.93804 | -3.75 | 0.94795 | 0.93810 | -3.69 | 0.98 |
| | (0.0066) | (0.0068) | (0.9) | (0.0066) | (0.0068) | (0.9) | (0.01) |
| 2.0 | 1.02415 | 1.01271 | -3.68 | 1.02416 | 1.01278 | -3.66 | 0.99 |
| | (0.0070) | (0.0071) | (0.9) | (0.0069) | (0.0071) | (0.9) | (0.01) |
| 4.0 | 1.07870 | 1.06668 | -3.48 | 1.07872 | 1.06678 | -3.46 | 0.99 |
| | (0.0073) | (0.0072) | (0.9) | (0.0072) | (0.0073) | (0.9) | (0.01) |
| 6.0 | 1.10691 | 1.09473 | -3.35 | 1.10691 | 1.09493 | -3.29 | 0.98 |
| | (0.0071) | (0.0074) | (0.9) | (0.0070) | (0.0073) | (0.9) | (0.01) |
| 8.0 | 1.12981 | 1.11787 | -3.15 | 1.12958 | 1.11782 | -3.10 | 0.98 |
| | (0.0071) | (0.0072) | (1.0) | (0.0071) | (0.0072) | (1.0) | (0.01) |

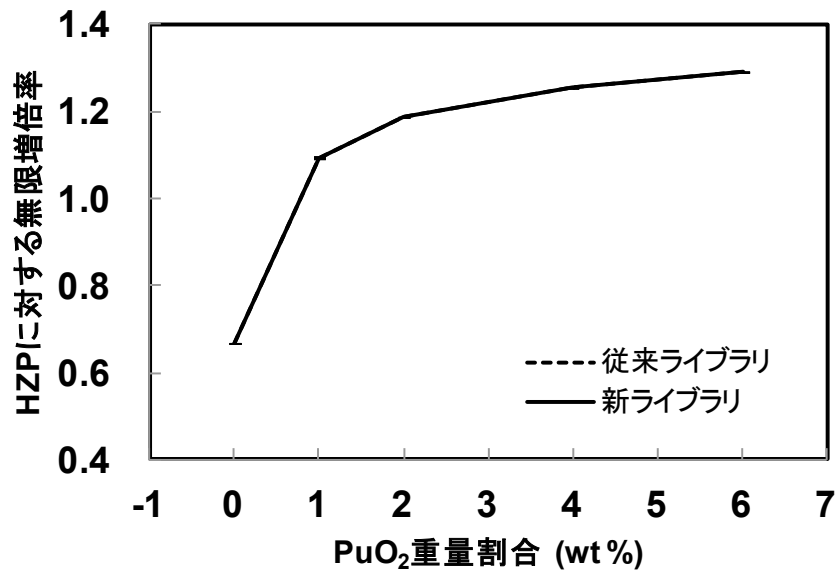


図 3.11 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)と拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用いて計算した HZP に対する無限増倍率の比較 (兵器級 MOX 体系)

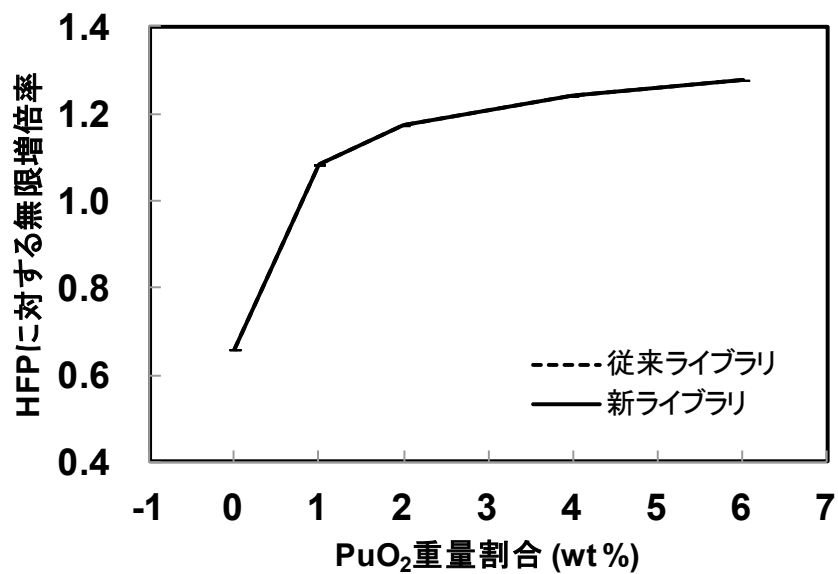


図 3.12 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)と拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用いて計算した HFP に対する無限増倍率の比較 (兵器級 MOX 体系)

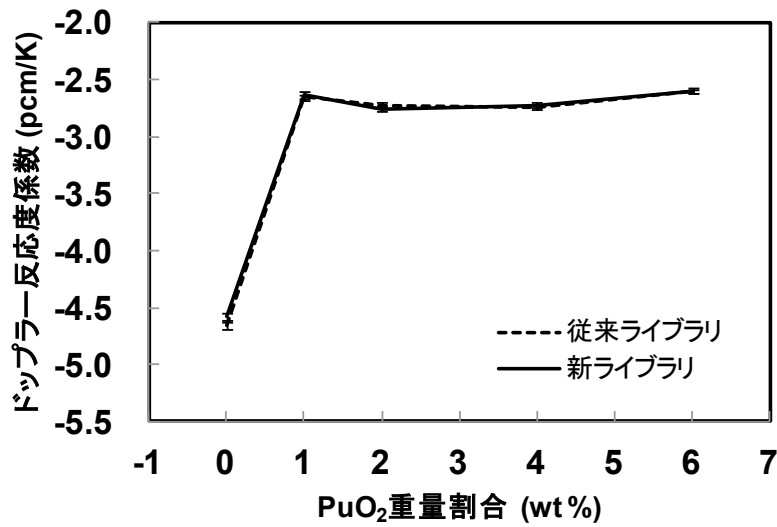


図 3.13 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)と拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用いて計算したドップラー反応度係数の比較 (兵器級 MOX 体系)

表 3.8 図 3.11-3.13 の数値データ

| 濃縮度 (wt.%) | 従来ライブラリ | | | 新ライブラリ | | | 新/従来 (1σ) |
|---------------|-------------------------|----------|-------------------------------|-------------------------|----------|-------------------------------|--------------|
| | $k_{\infty}(\%1\sigma)$ | | ドップラー 反応度係 数 (pcm/K) | $k_{\infty}(\%1\sigma)$ | | ドップラー 反応度係 数 (pcm/K) | |
| | HZP | HFP | (%1σ) | HZP | HFP | (%1σ) | |
| 0 | 0.66606 | 0.65993 | -4.65 | 0.66597 | 0.65993 | -4.58 | 0.99 |
| | (0.0056) | (0.0057) | (0.9) | (0.0057) | (0.0057) | (0.9) | (0.01) |
| 1.0 | 1.09441 | 1.08495 | -2.66 | 1.09439 | 1.08500 | -2.63 | 0.99 |
| | (0.0058) | (0.0059) | (0.9) | (0.0058) | (0.0058) | (1.0) | (0.01) |
| 2.0 | 1.18500 | 1.17364 | -2.72 | 1.18509 | 1.17358 | -2.76 | 1.01 |
| | (0.0058) | (0.0060) | (0.9) | (0.0058) | (0.0059) | (0.8) | (0.01) |
| 4.0 | 1.25373 | 1.24092 | -2.75 | 1.25369 | 1.24097 | -2.73 | 0.99 |
| | (0.0059) | (0.0060) | (0.8) | (0.0059) | (0.0061) | (0.8) | (0.01) |
| 6.0 | 1.29018 | 1.27731 | -2.60 | 1.29024 | 1.27739 | -2.60 | 1.00 |
| | (0.0059) | (0.0060) | (0.8) | (0.0057) | (0.0060) | (0.8) | (0.01) |

3.5. 断面積一定モデルによる結果

3.3 節において Pu-240 のみに厳密モデルを適用した場合、ドップラー反応度係数が漸近モデルに比べて負側でなく、少し正側の結果が得られた。これは、Pu-240 だけが厳密モデルで、それ以外の核種に対して、断面積一定モデルが用いられていることが原因であることを述べた。ここでは、それを確かめるために MVP コードで実装されている断面積一定モデル[DOPPLER-SCATTERING(NORES)オプション]を用いて、リサイクル MOX 体系についてドップラー反応度係数を計算した。

図 3.14 と表 3.9 に拡張ライブラリを用いて、すべての核種について断面積一定モデルで計算したドップラー反応度係数の結果を示す。図 3.14 から分かるように、断面積一定モデルの結果は、漸近モデルに比べて少し正側に大きい結果となる。

また、図 3.15 と表 3.10 に従来ライブラリを用いて、すべての核種について断面積一定モデルで計算したドップラー反応度係数の結果を示す。断面積一定モデルは、0 K における断面積データを必要としないため、従来ライブラリでも計算が可能である。拡張ライブラリと同様に、断面積一定モデルの結果は、漸近モデルに比べて少し正側に大きい結果を与える。

以上の結果により、感度解析としてある核種だけを厳密モデルにしたときには、漸近モデルからの比較ではなく、断面積一定モデルからの比較であることに注意する必要がある。

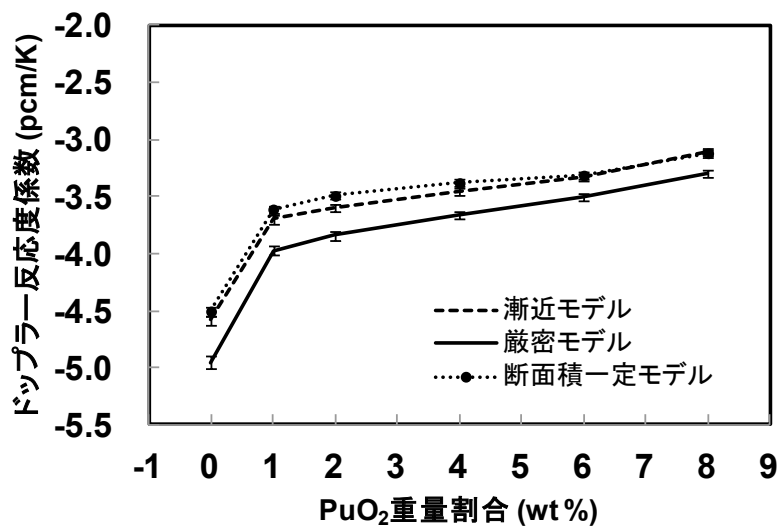


図 3.14 拡張ライブラリ(基準温度 0 K, JENDL-4.0)を用い、断面積一定モデルで計算したドップラー反応度係数の比較 (リサイクル MOX 体系)

表 3.9 図 3.14 の数値データ

| PuO ₂ 重量割 合 (wt.%) | 漸近モデル(A) | | ドップラー 反応度係数 (pcm/K) (%1σ) | 断面積一定モデル(C) | | ドップラー 反応度係 数 (pcm/K) (%1σ) | C/A (1σ) |
|--|----------------------|---------------------|------------------------------------|----------------------|---------------------|--|----------------|
| | k _∞ (%1σ) | | | k _∞ (%1σ) | | | |
| | HZP | HFP | HZP | HFP | | | |
| 0.0 | 0.66597 (0.0057) | 0.65993 (0.0057) | -4.58 (0.9) | 0.66586 (0.0057) | 0.65992 (0.0057) | -4.50 (0.9) | 0.98 (0.01) |
| 1.0 | 0.94795 (0.0066) | 0.93808 (0.0068) | -3.70 (0.9) | 0.94787 (0.0067) | 0.93824 (0.0069) | -3.61 (0.9) | 0.98 (0.01) |
| 2.0 | 1.02416 (0.0069) | 1.01297 (0.0071) | -3.60 (0.9) | 1.02403 (0.0070) | 1.01316 (0.0071) | -3.49 (0.9) | 0.97 (0.01) |
| 4.0 | 1.07872 (0.0072) | 1.06678 (0.0072) | -3.46 (0.9) | 1.07884 (0.0071) | 1.06716 (0.0072) | -3.38 (0.9) | 0.98 (0.01) |
| 6.0 | 1.10691 (0.0070) | 1.09480 (0.0073) | -3.33 (0.9) | 1.10711 (0.0071) | 1.09505 (0.0072) | -3.31 (0.9) | 1.00 (0.01) |
| 8.0 | 1.12958 (0.0071) | 1.11779 (0.0072) | -3.11 (1.0) | 1.13022 (0.0071) | 1.11839 (0.0072) | -3.12 (1.0) | 1.00 (0.01) |

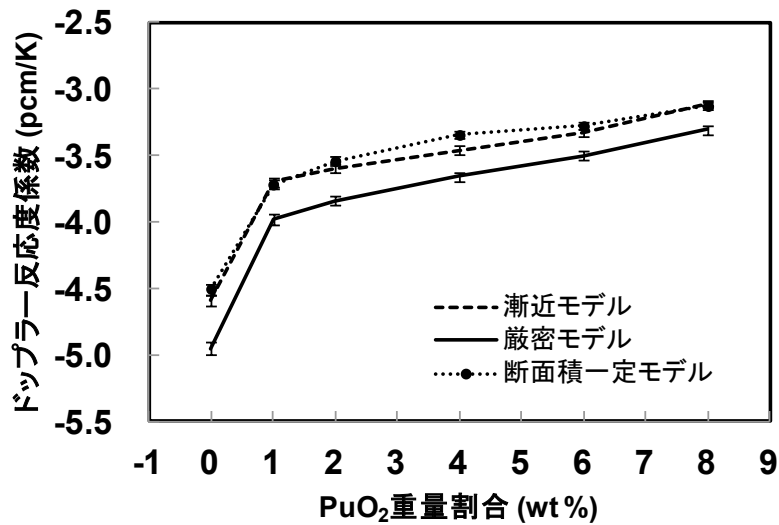


図 3.15 従来ライブラリ(基準温度 293.15 K, JENDL-4.0)を用い、断面積一定モデルで計算したドップラー反応度係数の比較 (リサイクル MOX 体系)

表 3.10 図 3.15 の数値データ

| PuO ₂ 重量割 合 (wt.%) | 漸近モデル(A) | | 断面積一定モデル(C) | | ドップラー 反応度係 数 (pcm/K) | C/A (1σ) |
|--|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------|----------------|
| | $k_{\infty}(\%1\sigma)$ | | $k_{\infty}(\%1\sigma)$ | | | |
| | HZP | HFP | HZP | HFP | | |
| 0.0 | 0.66597 (0.0057) | 0.65993 (0.0057) | 0.66595 (0.0056) | 0.66002 (0.0058) | -4.58 (0.9) | 0.98 (0.01) |
| 1.0 | 0.94795 (0.0066) | 0.93808 (0.0068) | 0.94809 (0.0066) | 0.93817 (0.0068) | -3.70 (0.9) | 1.00 (0.01) |
| 2.0 | 1.02416 (0.0069) | 1.01297 (0.0071) | 1.02414 (0.0070) | 1.01312 (0.0071) | -3.60 (0.9) | 0.98 (0.01) |
| 4.0 | 1.07872 (0.0072) | 1.06678 (0.0072) | 1.07886 (0.0073) | 1.06731 (0.0073) | -3.46 (0.9) | 0.97 (0.01) |
| 6.0 | 1.10691 (0.0070) | 1.09480 (0.0073) | 1.10712 (0.0071) | 1.09520 (0.0073) | -3.33 (0.9) | 0.98 (0.01) |
| 8.0 | 1.12958 (0.0071) | 1.11779 (0.0072) | 1.13014 (0.0071) | 1.11828 (0.0073) | -3.11 (1.0) | 1.01 (0.01) |

4. Hellstrand 実験解析

MVP コードに実装した厳密共鳴散乱モデルの検証のため、Hellstrand らによって行われた実効共鳴積分測定実験⁸⁾の解析を行う。

4.1. 解析条件

解析体系は、軸方向無限のピンセル体系とし、さらに被覆管はないものとする。燃料は、天然ウランの金属及び酸化物とする。燃料ピン外径、密度を表 4.1 に示す。減速材は、軽水と重水とし、理科年表(2007)の密度 (293 K、大気圧) を採用した。軽水と重水の密度を表 4.2 に示す。天然ウランの組成については、原子力機構の核データセンターのウェブサイト⁹⁾から公開されているウランの存在比データを採用した。表 4.3 にその値を示す。また、原子数密度の計算に用いた原子量もそのウェブサイトで公開されている値を用いた。表 4.4 に計算に用いた原子量を示す。アボガドロ数は、理科年表(2007)から引用し、 $0.60221415 \times 10^{24}$ atoms/mol を用いた。

表 4.1 天然ウランの金属及び酸化物の外径と密度

| 燃料タイプ | 燃料外径 D (mm) | 密度 ρ (g/cm ³) | 表面積/質量 S/M (cm ² /g) |
|-------|----------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 金属 | 8 | 18.95 | 0.264 |
| | 28 | 18.95 | 0.075 |
| 酸化物 | 8 | 10.3 | 0.485 |
| | 17 | 10.3 | 0.228 |
| | 28 | 9.7 | 0.147 |

表 4.2 軽水と重水の密度

| 密度 ρ (g/cm ³) | |
|-----------------------------------|--------|
| 軽水 | 0.9982 |
| 重水 | 1.105 |

*公開文献による値 (理年表(2010))、

**本報告の計算値： $S/M=4/(D \rho)$

表 4.3 天然ウランの存在比

| 核種 | 存在比 |
|-------|----------|
| U-234 | 0.000054 |
| U-235 | 0.007204 |
| U-238 | 0.992742 |

表 4.4 計算に用いた原子量

| 核種 | 原子量 |
|-------|-------------|
| H-nat | 1.00794 |
| H-2 | 2.014101778 |
| O-nat | 15.9994 |
| U-234 | 234.0409536 |
| U-235 | 235.0439314 |
| U-238 | 238.0507895 |

4.2. 基準計算

燃料ピッチを決定するための基準計算を実施した。燃料棒外径は 28 mm で、減速材は、軽水または重水として計算を行い、293.15 K における U-238 の共鳴積分(RI)を計算した。MVP の計算は、ピンセル体系中に一様中性子源分布がある固定源問題で計算を行った。中性子源分布のエネルギー分布は、U-235 の核分裂スペクトルとした。U-238 の共鳴積分は、MVP の EDIT-MICRO-DATA オプションで計算される U-238 の微視的反応率とレサジー当りの中性子束を用いて以下のような式から計算した。

$$R_g^{C28} = \int_{V_f} d\mathbf{r} \int_{E_{g+1}}^{E_g} dE N^{28} \sigma_c^{28}(E) \phi(\mathbf{r}, E) \quad (1)$$

ここで、 R_g^{C28} は微視的 U-238 捕獲反応率、 N^{28} は燃料領域における U-238 の数密度、 σ_c^{28} は微視的 U-238 断面積、 ϕ は中性子束、 V_f は燃料領域の体積、 E_g は g 群のエネルギー境界上限値である。

$$\bar{\phi}_g = \frac{\int_{V_f} d\mathbf{r} \int_{E_{g+1}}^{E_g} dE \phi(\mathbf{r}, E)}{\Delta U_g} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{\phi}_g$ は g 群のレサジー単位の平均中性子束、 ΔU_g は g 群のレサジー幅である。

$$RI^{C28} = \sum_g \frac{R_g^{C28}}{N^{28} \bar{\phi}_g} \quad (3)$$

ここで、 RI^{C28} が U-238 の共鳴積分である。エネルギー群数については、SRAC 107 群構造について、0.5 eV を追加した 108 群で計算を行い、MVP の上限エネルギーは 10 MeV とした。(73 群を 0.53158 eV - 0.5 eV, 74 群を 0.5 eV - 0.46912 eV とし、ETOP.N = 1.0E+7 とした。) MVP の計算はすべて、バッチサイズ 10,000 ヒストリー、バッチ数 (スキップバッチ数含まない) 2,000、スキップバッチ数 100 で行い、共鳴弾性散乱モデルは漸近モデルを使用した。

図 4.1 に金属燃料-軽水減速体系に対して燃料棒ピッチを変化させたときの実効増倍率及び U-238 共鳴積分を示す。燃料ピッチを変えても共鳴積分はほぼ一定値(約 15 barn)であり、ピッチが大きくなるにつれて統計誤差は大きくなるのが分かる。どのピッチにおいても同じヒストリー数で計算しているの、ピッチを大きくすれば燃料領域に到達する中性子が減るため統計誤差はピッチとともに大きくなる。金属燃料に対する共鳴積分の実験値として、S/M=0.067 のとき 10.96 barn という報告があり¹⁰⁾、非常に単純化された本解析の体系でも割とよい値を再現している。

図 4.2 に酸化燃料—軽水減速体系に対して燃料棒ピッチを変化させたときの実効増倍率及び U-238 共鳴積分を示す。金属燃料—軽水減速体系と同様に、燃料ピッチを変えても共鳴積分はほぼ一定値(約 20 barn)となる。酸化燃料に対する共鳴積分の実験値として、S/M=0.171 のとき 16.35 barn と報告されており¹⁰⁾、酸化燃料についても割とよい値を再現している。

図 4.3 に金属燃料—重水減速体系に対して燃料棒ピッチを変化させたときの実効増倍率

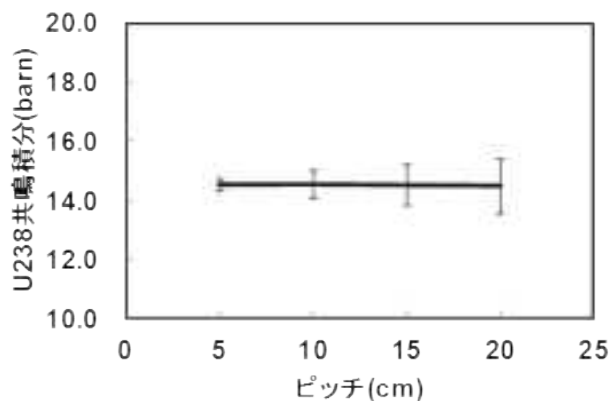


図 4.1 金属燃料—軽水減速体系における U-238 共鳴積分の燃料棒ピッチ依存性

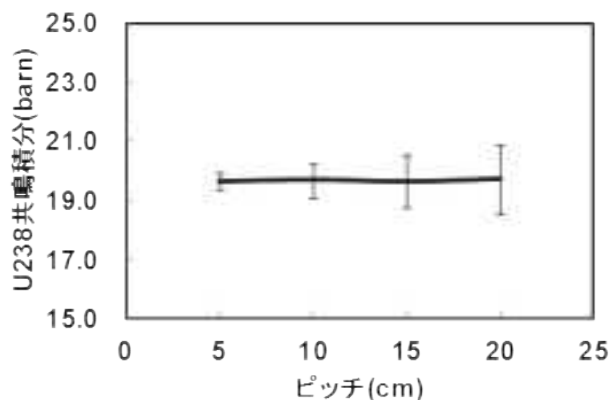


図 4.2 酸化燃料—軽水減速体系における U-238 共鳴積分の燃料棒ピッチ依存性

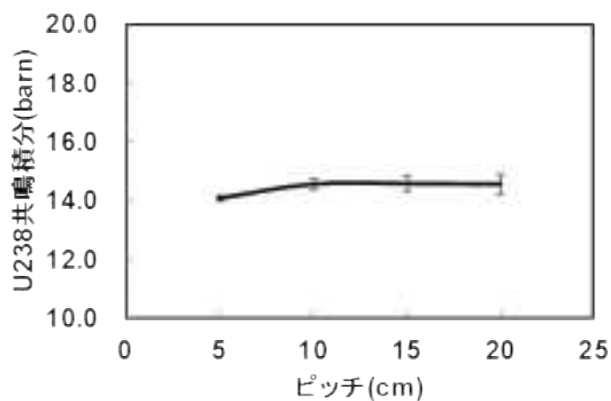


図 4.3 金属燃料—重水減速体系における U-238 共鳴積分の燃料棒ピッチ依存性

及び U-238 共鳴積分を示す。この場合も軽水減速体系と同様ほぼ共鳴積分は一定値であるが、ピッチが 5 cm のときのみ若干共鳴積分が小さい。重水の場合は、中性子の吸収がほとんどないため、燃料に到達する中性子が減ることはなく、ピッチを大きくしても統計誤差は、軽水減速体系ほど大きくはならない。

以上の結果より、共鳴積分は、燃料ピッチ 10 cm にすれば、十分一定値に達したとみなすことができる。以降の燃料温度を変化させた計算においては、すべて燃料ピッチ 10 cm で計算することとした。

4.3. 漸近モデルによる温度係数計算

まず、漸近モデルを用いて共鳴積分の温度依存性を調べる。燃料温度については、表 4.5 に示すような温度点で共鳴積分を計算した。また、燃料温度の上昇に伴う熱膨張はないと仮定した。MVP の計算は、燃料直径 8 mm の体系について、バッチサイズ 10,000 ヒストリー、バッチ数 4,000 で行い、燃料直径 17 mm と 28 mm の体系について、バッチサイズ 10,000 ヒストリー、バッチ数 2,000 で行った。

表 4.5 共鳴積分計算で用いた燃料温度

| ケース | T (K) | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ |
|-----|---------|-------------------------|
| 1 | 293.15 | 0.0 |
| 2 | 385 | 2.5 |
| 3 | 489 | 5.0 |
| 4 | 606 | 7.5 |
| 5 | 735 | 10.0 |
| 6 | 877 | 12.5 |
| 7 | 1032 | 15.0 |

表 4.6 と表 4.7 に金属燃料-軽水減速体系における燃料直径 8 mm と 28 mm の計算結果をそれぞれ示す。また、図 4.4 と図 4.5 に温度平方根差 $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ に対する共鳴積分相対値 $RI(T)/RI(T_0)$ のプロットを示す。ここで、 $T_0 = 293.15$ K である。図の直線は、以下の式を用いて最小二乗法でフィッティングしたものである。フィッティングには、python 言語用の科学技術計算パッケージである Scipy¹¹⁾の中に含まれている最小二乗フィッティング関数(scipy.optimize.leastsq)を用いた。

$$\frac{RI(T)}{RI(T_0)} = 1 + \beta(\sqrt{T} - \sqrt{T_0}) \quad (4)$$

同様に、表 4.8 から表 4.10 に酸化物燃料－軽水減速体系における燃料直径 8 mm、17 mm、28 mm の計算結果を示す。また、図 4.6 から図 4.8 に温度平方根差に対する共鳴積分相対値のプロットを示す。

表 4.11 は、軽水から重水に変えたときの感度解析計算として、金属燃料－重水減速体系における 28 mm の計算結果を示す。図 4.9 は、その体系における温度平方根差に対する共鳴積分相対値のプロットである。

表 4.12 は、酸化物燃料－重水減速体系における 28 mm の計算結果であり、図 4.10 は、その体系における温度平方根差に対する共鳴積分相対値のプロットである。

表 4.13 に漸近モデルを用いて計算した温度係数 β と実験値の比較を示す。計算値は、最小二乗法によるフィッティングによって計算したものであるが、フィッティング誤差は非常に小さい。(表には、Scipy の最小二乗フィッティング関数が傾きに対して出力する誤差をそのまま記載している。)燃料直径 28 mm については多少過小評価、また、燃料直径 8 mm と 17 mm については多少過大評価する傾向が見られるものの、ほぼ実験誤差の範囲内で計算値と実験値は一致することが分かる。感度解析として重水減速体系について計算した結果は、軽水減速体系とほぼ同じ計算値が得られ、軽水減速体系の結果は重水減速体系についても当てはまるものと考えられる。

図 4.11 と図 4.12 にそれぞれ金属燃料体系と酸化物燃料体系における温度係数 β の表面積対質量比 S/M に対する依存性を示す。金属燃料体系に対しては、実験値に比べて多少傾きが大きくなっているが、実験誤差を考えれば、よく実験値と一致していると言える。酸化物燃料体系についても同様の傾向が見られ、実験値に比べて多少傾きが大きくなっているが、実験誤差の範囲内で実験値とよく一致している。

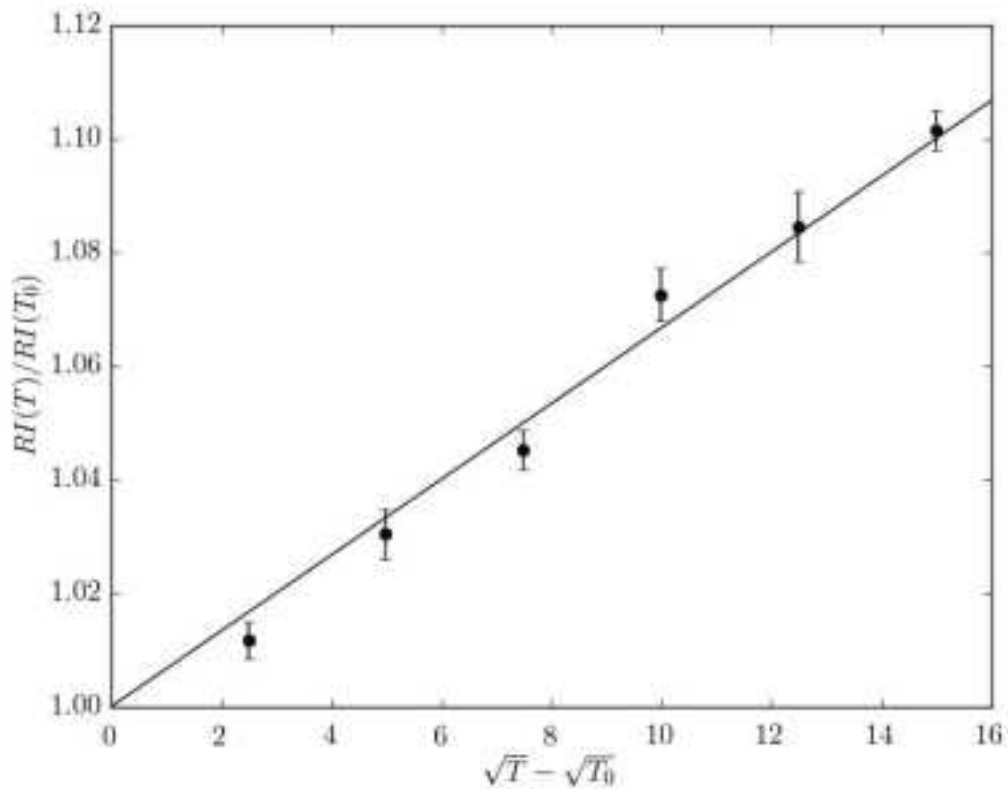


図 4.4 金属燃料-軽水減速体系（燃料直径 8 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（漸近モデル）

表 4.6 金属燃料-軽水減速体系（燃料直径 8 mm）における共鳴積分の温度依存性（漸近モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 21.81 | 0.07 | 0.0 | 1.000 | 0.003 |
| 385 | 22.06 | 0.07 | 2.5 | 1.012 | 0.003 |
| 489 | 22.47 | 0.10 | 5.0 | 1.030 | 0.004 |
| 606 | 22.79 | 0.08 | 7.5 | 1.045 | 0.003 |
| 735 | 23.39 | 0.10 | 10.0 | 1.073 | 0.005 |
| 877 | 23.65 | 0.13 | 12.5 | 1.085 | 0.006 |
| 1032 | 24.02 | 0.08 | 15.0 | 1.102 | 0.004 |

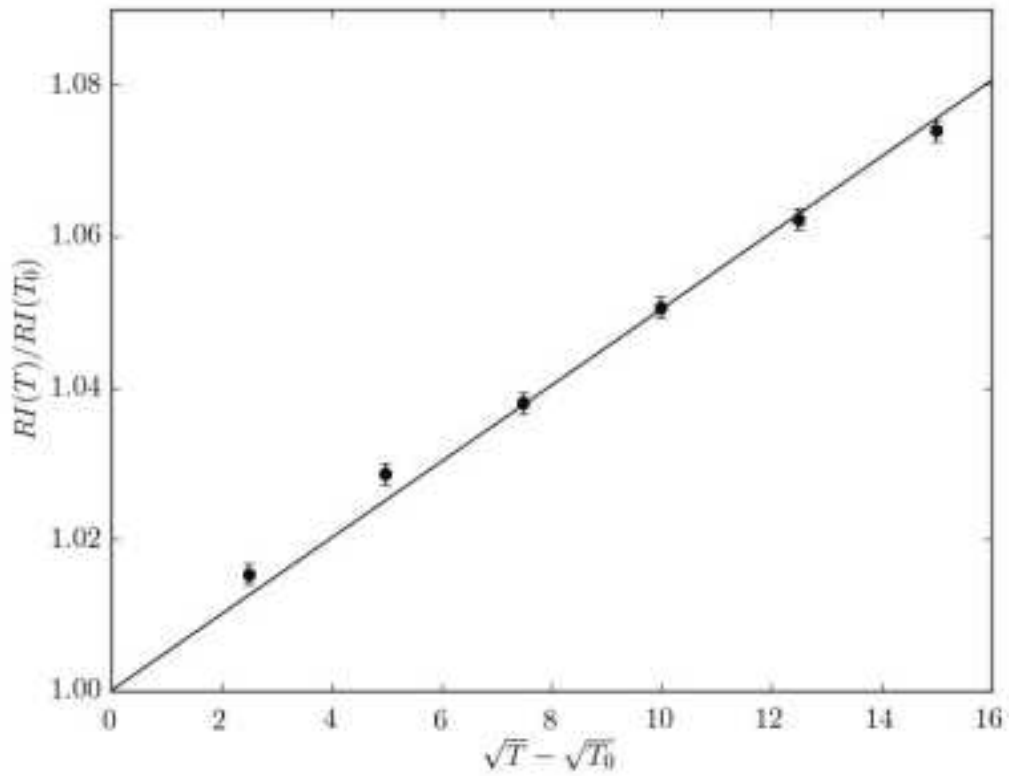


図 4.5 金属燃料-軽水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（漸近モデル）

表 4.7 金属燃料-軽水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分の温度依存性（漸近モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 14.74 | 0.02 | 0.0 | 1.000 | 0.001 |
| 385 | 14.97 | 0.02 | 2.5 | 1.015 | 0.001 |
| 489 | 15.16 | 0.02 | 5.0 | 1.029 | 0.001 |
| 606 | 15.30 | 0.02 | 7.5 | 1.038 | 0.001 |
| 735 | 15.49 | 0.02 | 10.0 | 1.051 | 0.001 |
| 877 | 15.66 | 0.02 | 12.5 | 1.062 | 0.001 |
| 1032 | 15.83 | 0.02 | 15.0 | 1.074 | 0.001 |

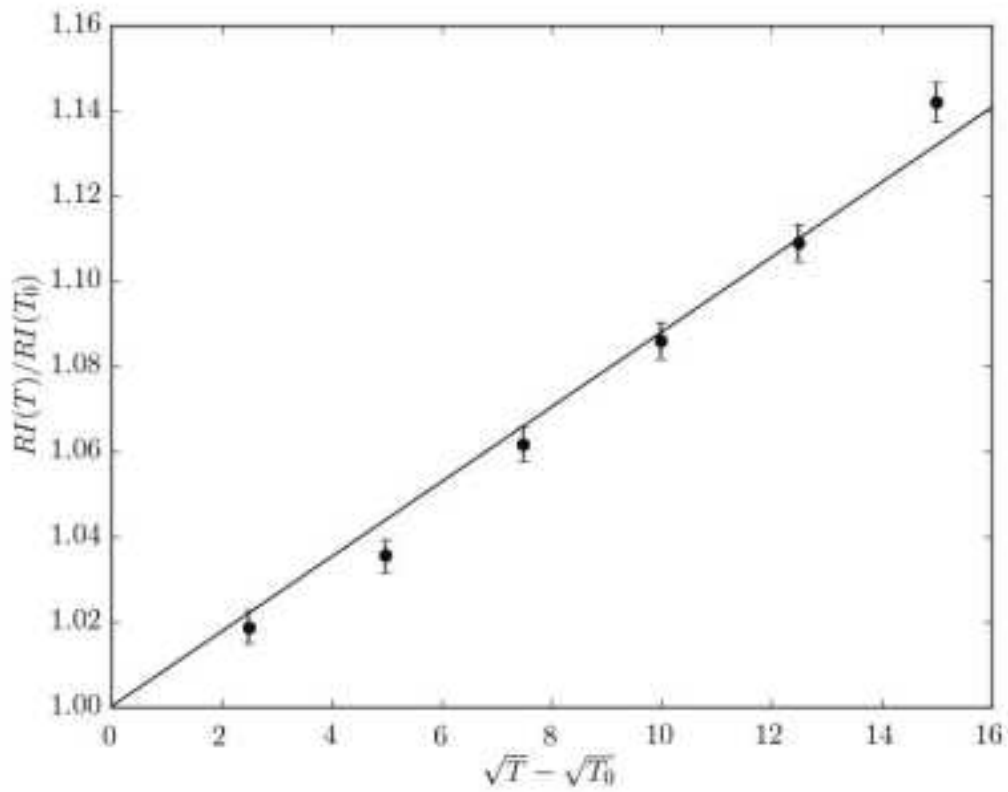


図 4.6 酸化物燃料－軽水減速体系（燃料直径 8 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（漸近モデル）

表 4.8 酸化物燃料－軽水減速体系（燃料直径 8 mm）における共鳴積分の温度依存性（漸近モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 28.99 | 0.11 | 0.0 | 1.000 | 0.004 |
| 385 | 29.54 | 0.11 | 2.5 | 1.019 | 0.004 |
| 489 | 30.02 | 0.11 | 5.0 | 1.036 | 0.004 |
| 606 | 30.78 | 0.12 | 7.5 | 1.062 | 0.004 |
| 735 | 31.49 | 0.13 | 10.0 | 1.086 | 0.004 |
| 877 | 32.16 | 0.13 | 12.5 | 1.109 | 0.004 |
| 1032 | 33.11 | 0.14 | 15.0 | 1.142 | 0.005 |

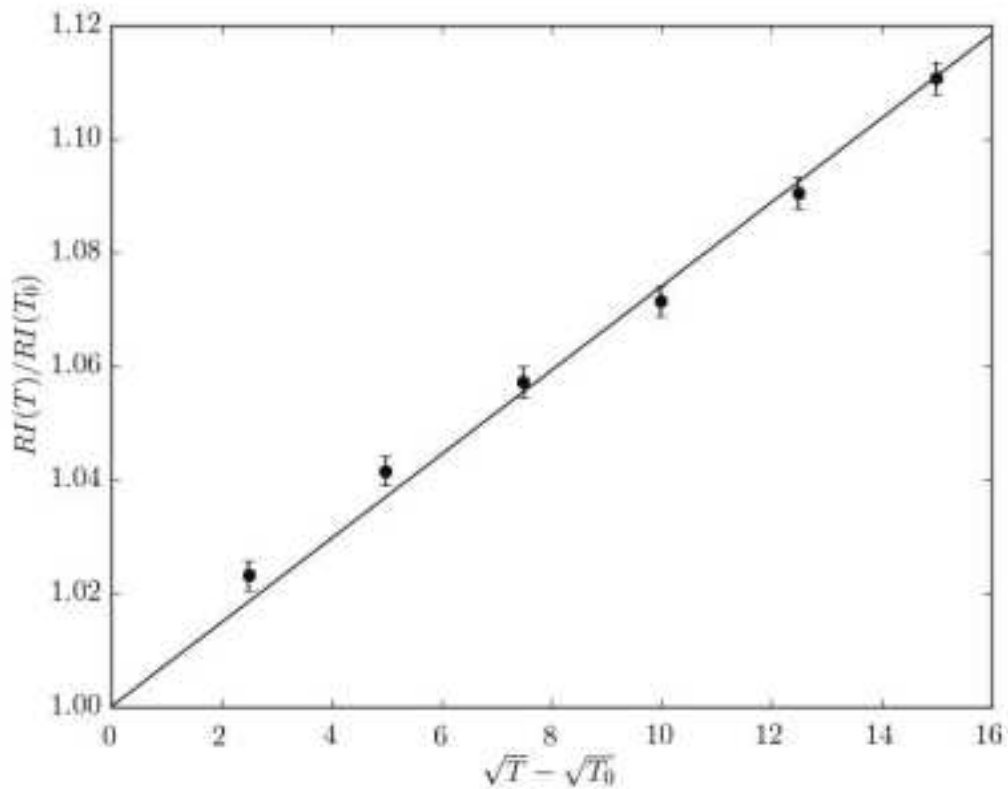


図 4.7 酸化物燃料－軽水減速体系（燃料直径 17 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（漸近モデル）

表 4.9 酸化物燃料－軽水減速体系（燃料直径 17 mm）における共鳴積分の温度依存性（漸近モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 22.28 | 0.06 | 0.0 | 1.000 | 0.003 |
| 385 | 22.79 | 0.06 | 2.5 | 1.023 | 0.003 |
| 489 | 23.21 | 0.06 | 5.0 | 1.042 | 0.003 |
| 606 | 23.55 | 0.06 | 7.5 | 1.057 | 0.003 |
| 735 | 23.87 | 0.06 | 10.0 | 1.072 | 0.003 |
| 877 | 24.29 | 0.06 | 12.5 | 1.091 | 0.003 |
| 1032 | 24.74 | 0.06 | 15.0 | 1.111 | 0.003 |

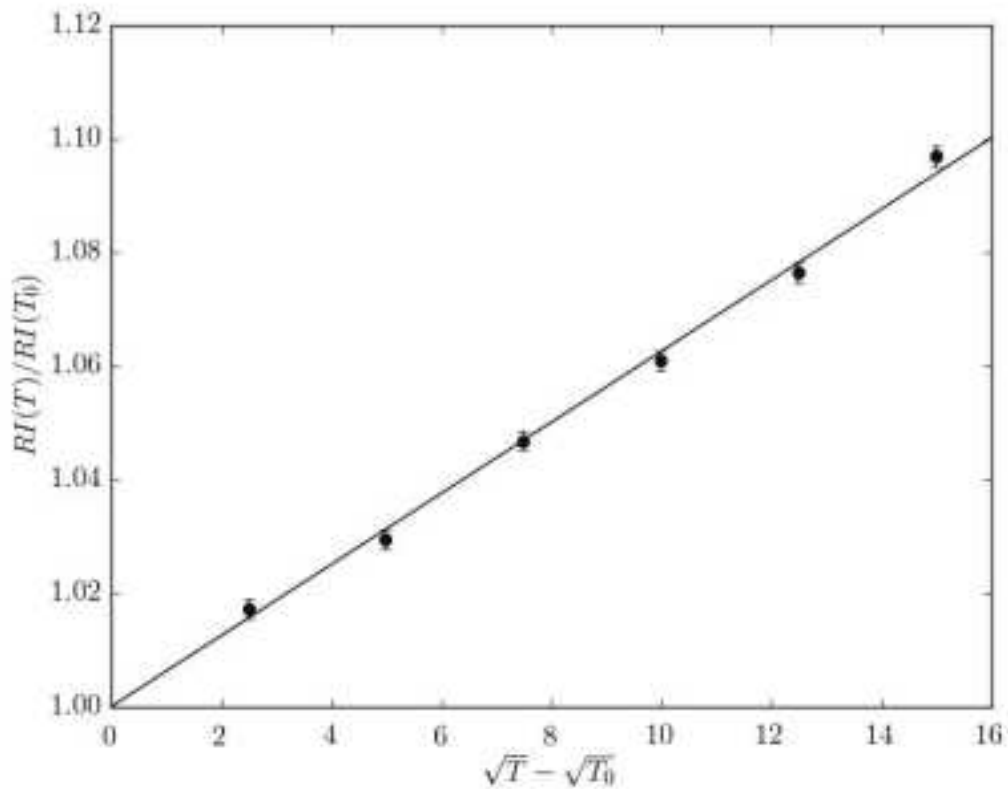


図 4.8 酸化物燃料－軽水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（漸近モデル）

表 4.10 酸化物燃料－軽水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分の温度依存性（漸近モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 19.91 | 0.03 | 0.0 | 1.000 | 0.002 |
| 385 | 20.25 | 0.03 | 2.5 | 1.017 | 0.002 |
| 489 | 20.49 | 0.03 | 5.0 | 1.029 | 0.002 |
| 606 | 20.84 | 0.03 | 7.5 | 1.047 | 0.002 |
| 735 | 21.12 | 0.03 | 10.0 | 1.061 | 0.002 |
| 877 | 21.43 | 0.04 | 12.5 | 1.077 | 0.002 |
| 1032 | 21.83 | 0.04 | 15.0 | 1.097 | 0.002 |

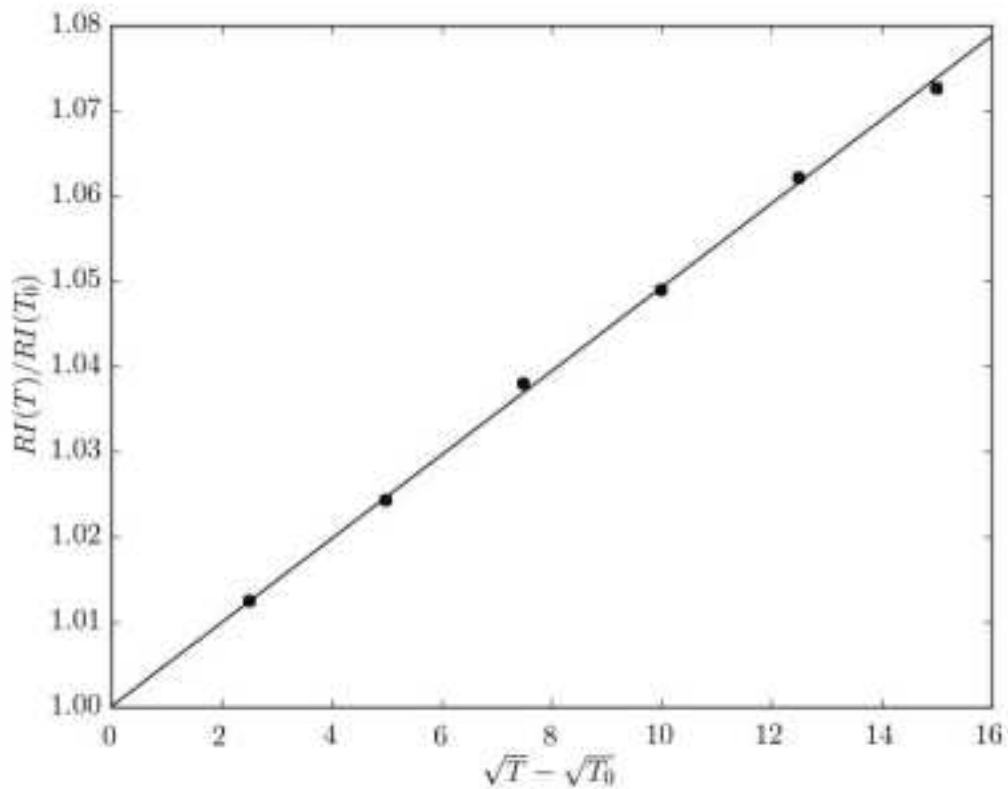


図 4.9 金属燃料-重水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（漸近モデル）

表 4.11 金属燃料-重水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分の温度依存性（漸近モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 14.59 | 0.01 | 0.0 | 1.000 | 0.000 |
| 385 | 14.77 | 0.01 | 2.5 | 1.012 | 0.000 |
| 489 | 14.95 | 0.01 | 5.0 | 1.024 | 0.001 |
| 606 | 15.15 | 0.01 | 7.5 | 1.038 | 0.001 |
| 735 | 15.30 | 0.01 | 10.0 | 1.049 | 0.001 |
| 877 | 15.50 | 0.01 | 12.5 | 1.062 | 0.001 |
| 1032 | 15.65 | 0.01 | 15.0 | 1.073 | 0.001 |

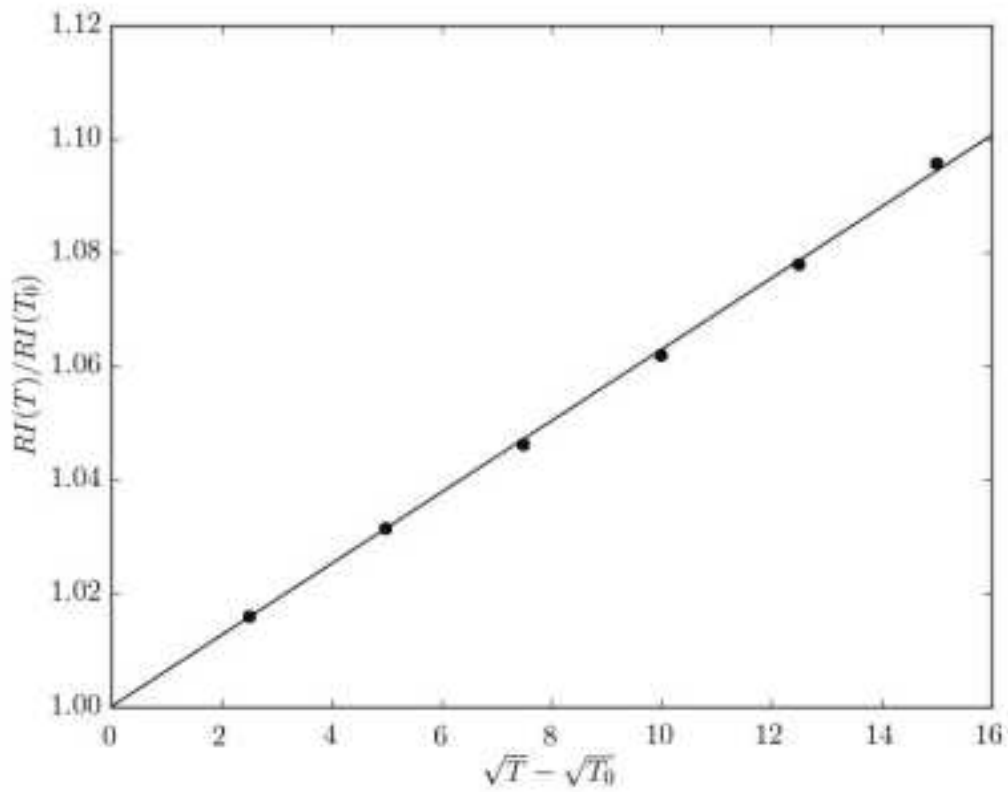


図 4.10 酸化物燃料－重水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（漸近モデル）

表 4.12 酸化物燃料－重水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分の温度依存性（漸近モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1 σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1 σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 19.70 | 0.01 | 0.0 | 1.000 | 0.001 |
| 385 | 20.01 | 0.01 | 2.5 | 1.016 | 0.001 |
| 489 | 20.32 | 0.01 | 5.0 | 1.031 | 0.001 |
| 606 | 20.61 | 0.01 | 7.5 | 1.046 | 0.001 |
| 735 | 20.92 | 0.01 | 10.0 | 1.062 | 0.001 |
| 877 | 21.23 | 0.01 | 12.5 | 1.078 | 0.001 |
| 1032 | 21.58 | 0.01 | 15.0 | 1.096 | 0.001 |

表 4.13 漸近モデルを用いて計算した温度係数 β と実験値の比較

| 燃料 タイプ | 減速材 | 燃料 直径 (mm) | S/M (cm ² /g) | β ($\times 100$) | | 計算値 | フィッテ ィング 誤差(%) | C/E | 誤差 |
|-----------|-----|------------------|-----------------------------|--------------------------|----------|------|----------------------|------|------|
| | | | | 実験値 | 実験 誤差 | | | | |
| 金属 | 軽水 | 8 | 0.264 | 0.64 | 0.05 | 0.67 | 0.00045 | 1.04 | 0.08 |
| 金属 | 軽水 | 28 | 0.075 | 0.55 | 0.05 | 0.50 | 0.00007 | 0.92 | 0.08 |
| 酸化物 | 軽水 | 8 | 0.485 | 0.82 | 0.06 | 0.88 | 0.00039 | 1.07 | 0.08 |
| 酸化物 | 軽水 | 17 | 0.228 | 0.69 | 0.05 | 0.74 | 0.00019 | 1.07 | 0.08 |
| 酸化物 | 軽水 | 28 | 0.147 | 0.65 | 0.05 | 0.63 | 0.00009 | 0.96 | 0.07 |
| 金属 | 重水 | 28 | 1.293 | — | — | 0.49 | 0.00001 | — | — |
| 酸化物 | 重水 | 28 | 1.293 | — | — | 0.63 | 0.00001 | — | — |

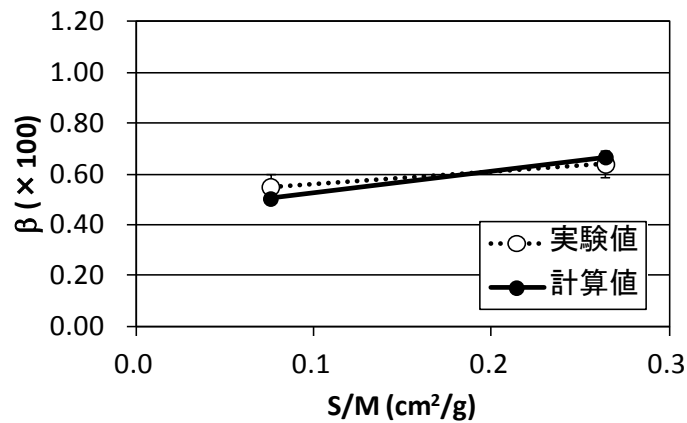


図 4.11 金属燃料体系における温度係数 β の表面積対質量比 S/M に対する依存性 (漸近モデル)

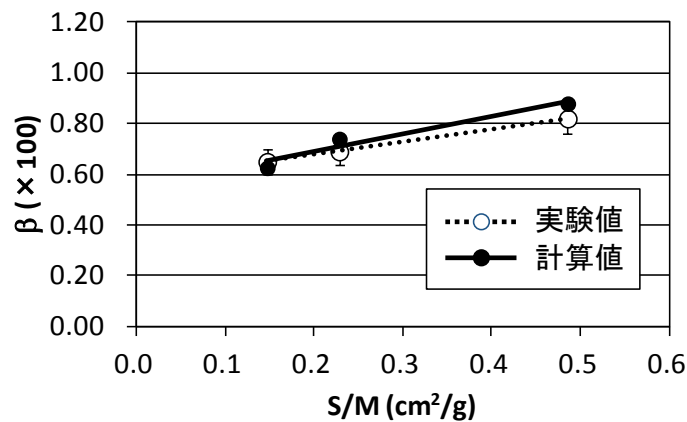


図 4.12 酸化物燃料体系における温度係数 β の表面積対質量比 S/M に対する依存性 (漸近モデル)

4.4. 厳密モデルによる温度係数計算

Hellstrand 実験解析における厳密モデルと漸近モデルの影響を調べるために前節と同じケースの問題について厳密モデルを用いて計算を行った。

表 4.14 と表 4.15 に金属燃料-軽水減速体系における燃料直径 8 mm と 28 mm について厳密モデルを用いて計算を行った結果をそれぞれ示す。また、図 4.13 と図 4.14 に温度平方根差 $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ に対する共鳴積分相対値 $RI(T)/RI(T_0)$ のプロットを示す。

表 4.16 から表 4.18 は、酸化物燃料-軽水減速体系における燃料直径 8 mm、17 mm、28 mm について厳密モデルを用いて計算を行った結果を示している。図 4.15 から図 4.17 に温度平方根差に対する共鳴積分相対値のプロットを示す。

表 4.19 は、軽水から重水に変えたときの感度解析計算として、金属燃料-重水減速体系における 28 mm の計算結果を示す。図 4.18 は、その体系における温度平方根差に対する共鳴積分相対値のプロットである。

表 4.20 は、酸化物燃料-重水減速体系における 28 mm の計算結果であり、図 4.19 は、その体系における温度平方根差に対する共鳴積分相対値のプロットである。

表 4.21 に厳密モデルを用いて計算した温度係数 β と実験値の比較を示す。漸近モデルの場合と同様、フィッティング誤差は非常に小さい。(表には、Scipy の最小二乗フィッティング関数が傾きに対して出力する誤差をそのまま記載している。) 金属燃料-軽水減速体系の燃料直径 28 mm について過小評価、また、酸化物燃料-軽水減速体系の燃料直径 8 mm については過大評価する傾向が見られる。それ以外の体系については、実験値と実験誤差の範囲内で一致する。

感度解析として重水減速体系について計算した結果は、金属燃料の場合に多少の差異が見られるが、酸化物燃料の場合はほぼ同じ結果が得られる。この差異の原因については、今のところまだ分かってはいないが、厳密モデルを用いた場合、漸近モデルよりも統計誤差が大きくなる傾向があり、モンテカルロ計算の統計誤差の要因等も考えられる。別のケースでの感度解析を行う、または決定論的手法での傾向を見るなどして原因を検討する必要がある。

図 4.20 と図 4.21 にそれぞれ金属燃料体系と酸化物燃料体系における温度係数 β の表面積対質量比 S/M に対する依存性を示す。金属燃料体系に対しては、漸近モデルを用いた場合と同様、実験値に比べて多少傾きが大きくなるが、実験誤差の範囲内で一致している。しかしながら、酸化物燃料体系については、実験値の傾きに比べて大きくなる傾向が見られる。

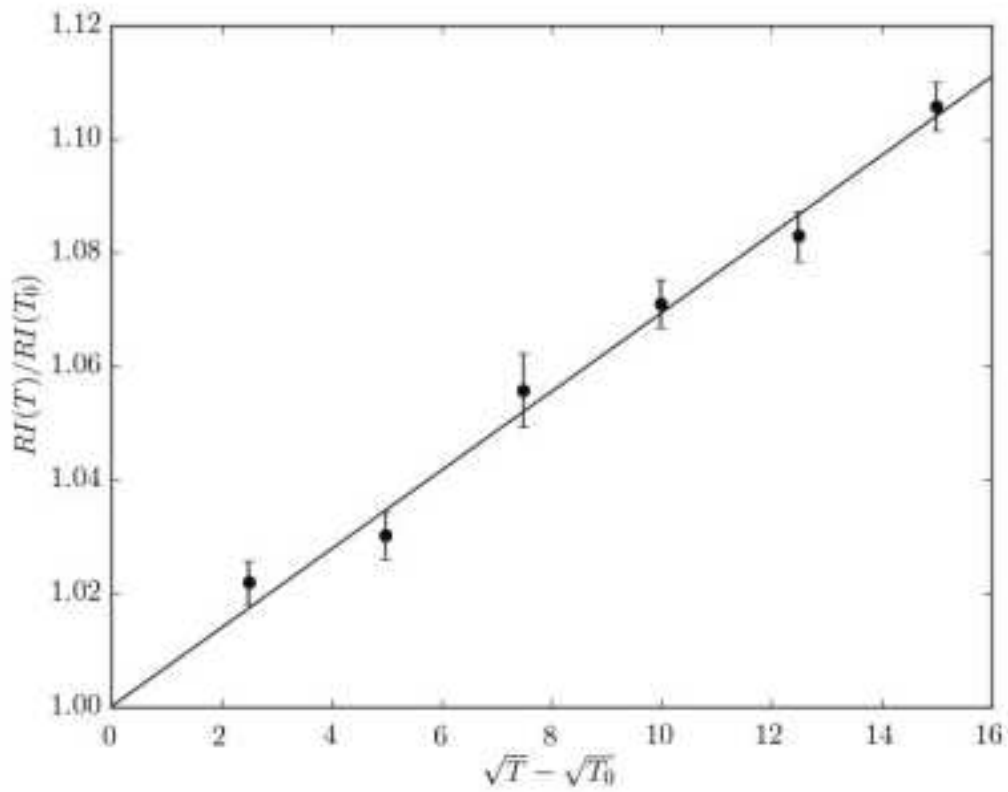


図 4.13 金属燃料-軽水減速体系（燃料直径 8 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（厳密モデル）

表 4.14 金属燃料-軽水減速体系（燃料直径 8 mm）における共鳴積分の温度依存性（厳密モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1 σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1 σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 21.73 | 0.08 | 0.0 | 1.000 | 0.004 |
| 385 | 22.20 | 0.08 | 2.5 | 1.022 | 0.004 |
| 489 | 22.38 | 0.09 | 5.0 | 1.030 | 0.004 |
| 606 | 22.93 | 0.14 | 7.5 | 1.056 | 0.007 |
| 735 | 23.27 | 0.09 | 10.0 | 1.071 | 0.004 |
| 877 | 23.53 | 0.09 | 12.5 | 1.083 | 0.004 |
| 1032 | 24.02 | 0.09 | 15.0 | 1.106 | 0.004 |

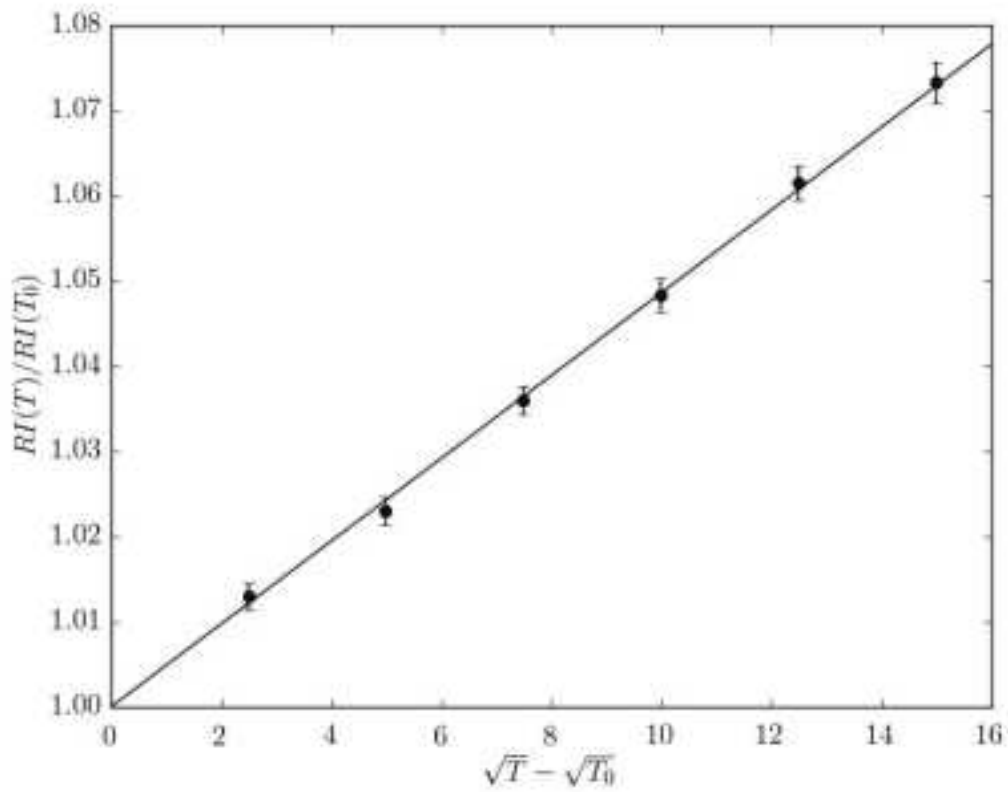


図 4.14 金属燃料-軽水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（厳密モデル）

表 4.15 金属燃料-軽水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分の温度依存性（厳密モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 14.80 | 0.02 | 0.0 | 1.000 | 0.002 |
| 385 | 14.99 | 0.02 | 2.5 | 1.013 | 0.002 |
| 489 | 15.14 | 0.02 | 5.0 | 1.023 | 0.002 |
| 606 | 15.33 | 0.03 | 7.5 | 1.036 | 0.002 |
| 735 | 15.51 | 0.03 | 10.0 | 1.048 | 0.002 |
| 877 | 15.71 | 0.03 | 12.5 | 1.061 | 0.002 |
| 1032 | 15.88 | 0.04 | 15.0 | 1.073 | 0.002 |

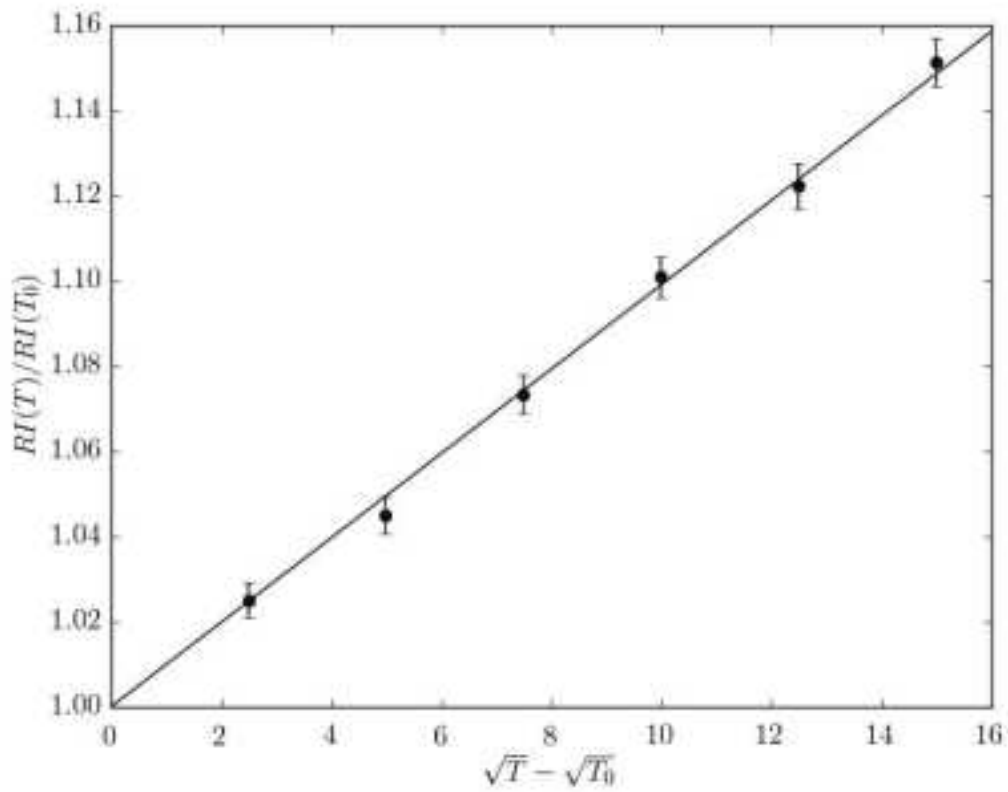


図 4.15 酸化物燃料-軽水減速体系（燃料直径 8 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（厳密モデル）

表 4.16 酸化物燃料-軽水減速体系（燃料直径 8 mm）における共鳴積分の温度依存性（厳密モデル）

| T (K) | $RI(\text{barn})$ | 1σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1σ |
|---------|-------------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 28.82 | 0.12 | 0.0 | 1.000 | 0.004 |
| 385 | 29.55 | 0.12 | 2.5 | 1.025 | 0.004 |
| 489 | 30.12 | 0.13 | 5.0 | 1.045 | 0.004 |
| 606 | 30.94 | 0.13 | 7.5 | 1.073 | 0.004 |
| 735 | 31.73 | 0.14 | 10.0 | 1.101 | 0.005 |
| 877 | 32.34 | 0.15 | 12.5 | 1.122 | 0.005 |
| 1032 | 33.18 | 0.16 | 15.0 | 1.151 | 0.006 |

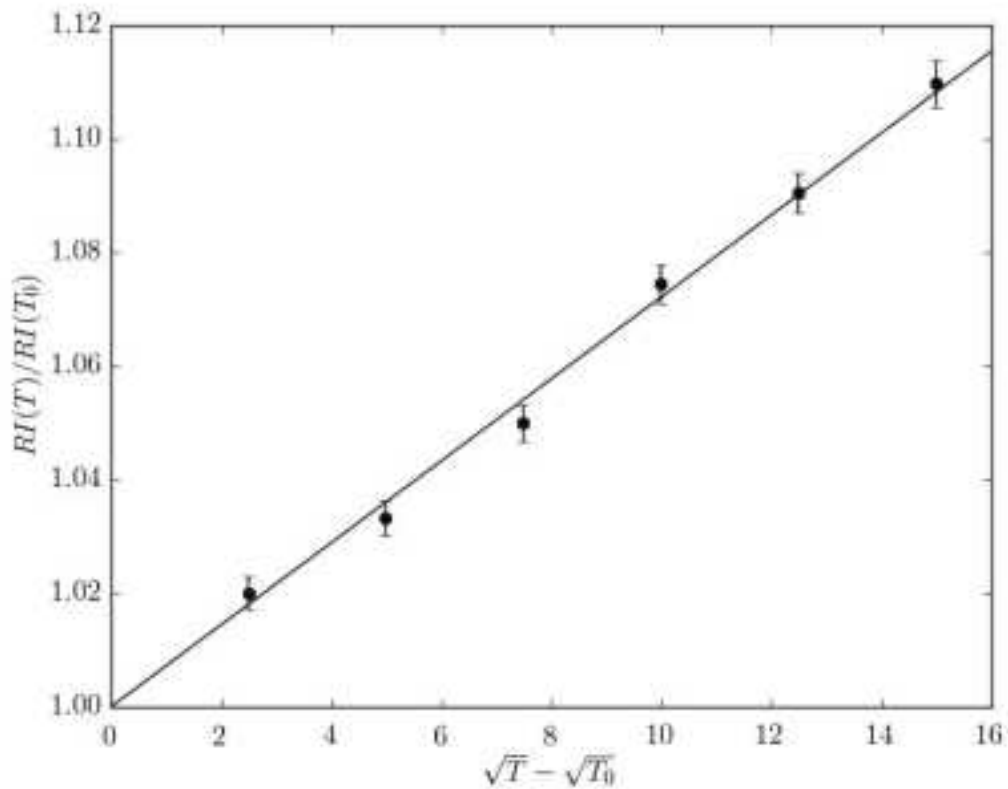


図 4.16 酸化物燃料-軽水減速体系（燃料直径 17 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（厳密モデル）

表 4.17 酸化物燃料-軽水減速体系（燃料直径 17 mm）における共鳴積分の温度依存性（厳密モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 22.32 | 0.06 | 0.0 | 1.000 | 0.003 |
| 385 | 22.77 | 0.06 | 2.5 | 1.020 | 0.003 |
| 489 | 23.07 | 0.07 | 5.0 | 1.033 | 0.003 |
| 606 | 23.44 | 0.07 | 7.5 | 1.050 | 0.003 |
| 735 | 23.99 | 0.08 | 10.0 | 1.074 | 0.003 |
| 877 | 24.34 | 0.08 | 12.5 | 1.090 | 0.004 |
| 1032 | 24.77 | 0.09 | 15.0 | 1.110 | 0.004 |

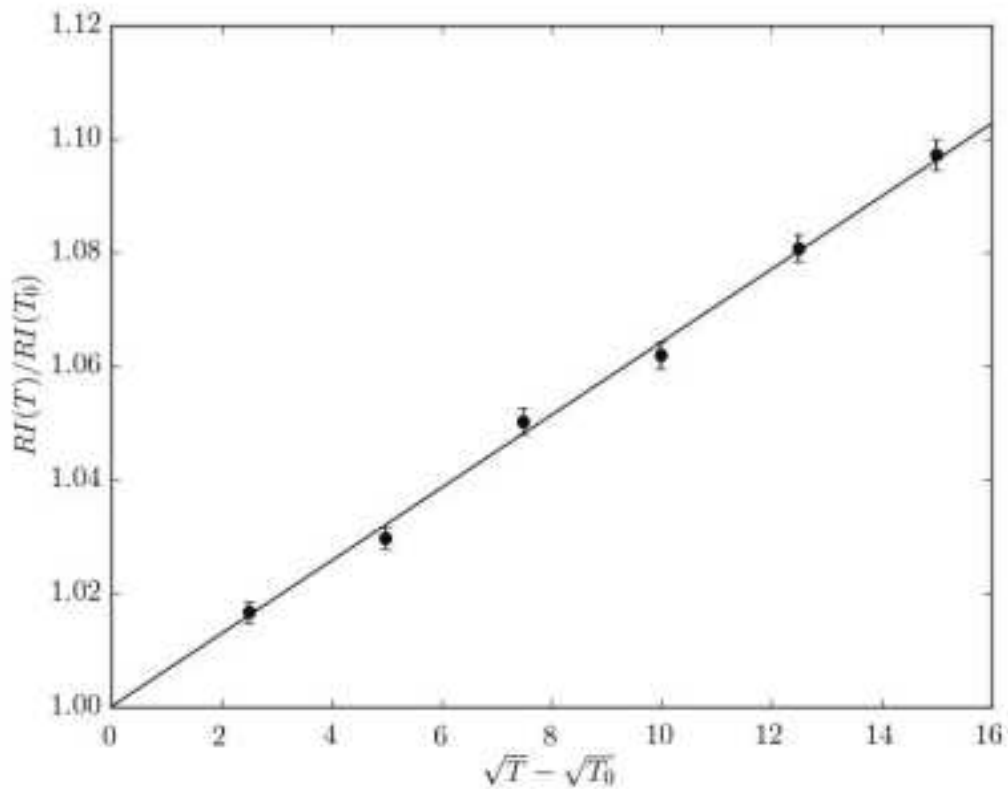


図 4.17 酸化物燃料-軽水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（厳密モデル）

表 4.18 酸化物燃料-軽水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分の温度依存性（厳密モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 19.87 | 0.04 | 0.0 | 1.000 | 0.002 |
| 385 | 20.20 | 0.04 | 2.5 | 1.017 | 0.002 |
| 489 | 20.46 | 0.04 | 5.0 | 1.030 | 0.002 |
| 606 | 20.87 | 0.05 | 7.5 | 1.050 | 0.002 |
| 735 | 21.10 | 0.05 | 10.0 | 1.062 | 0.002 |
| 877 | 21.48 | 0.05 | 12.5 | 1.081 | 0.002 |
| 1032 | 21.80 | 0.05 | 15.0 | 1.097 | 0.003 |

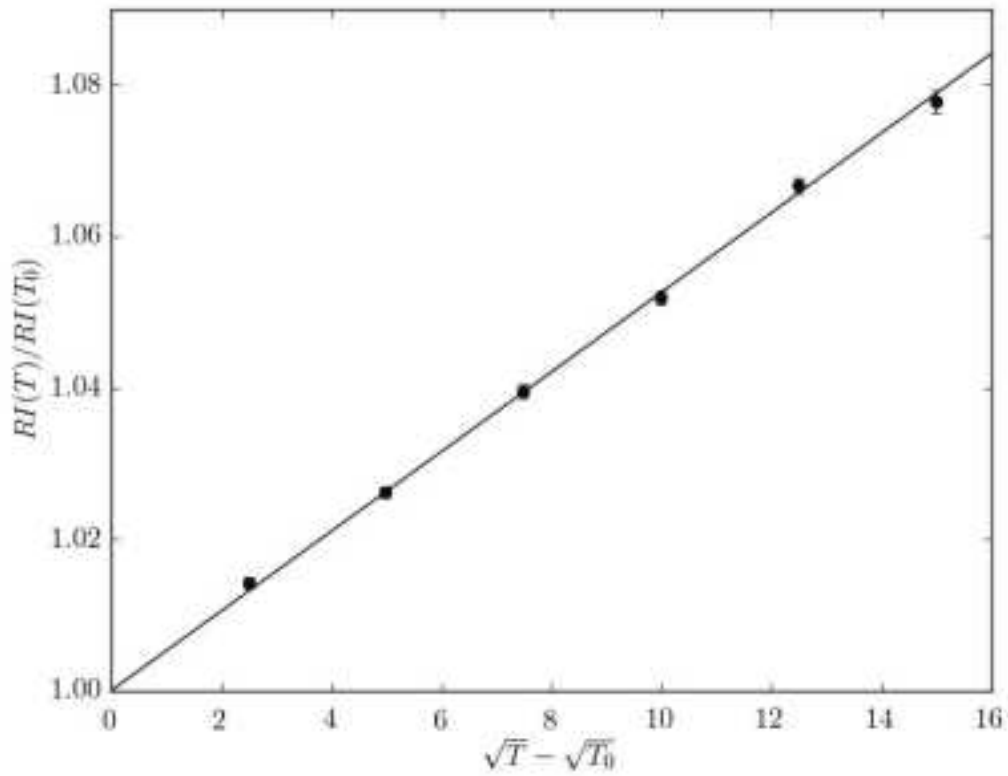


図 4.18 金属燃料-重水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（厳密モデル）

表 4.19 金属燃料-重水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分の温度依存性（厳密モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 14.61 | 0.01 | 0.0 | 1.000 | 0.001 |
| 385 | 14.81 | 0.01 | 2.5 | 1.014 | 0.001 |
| 489 | 14.99 | 0.01 | 5.0 | 1.026 | 0.001 |
| 606 | 15.18 | 0.01 | 7.5 | 1.040 | 0.001 |
| 735 | 15.37 | 0.01 | 10.0 | 1.052 | 0.001 |
| 877 | 15.58 | 0.02 | 12.5 | 1.067 | 0.001 |
| 1032 | 15.74 | 0.02 | 15.0 | 1.078 | 0.001 |

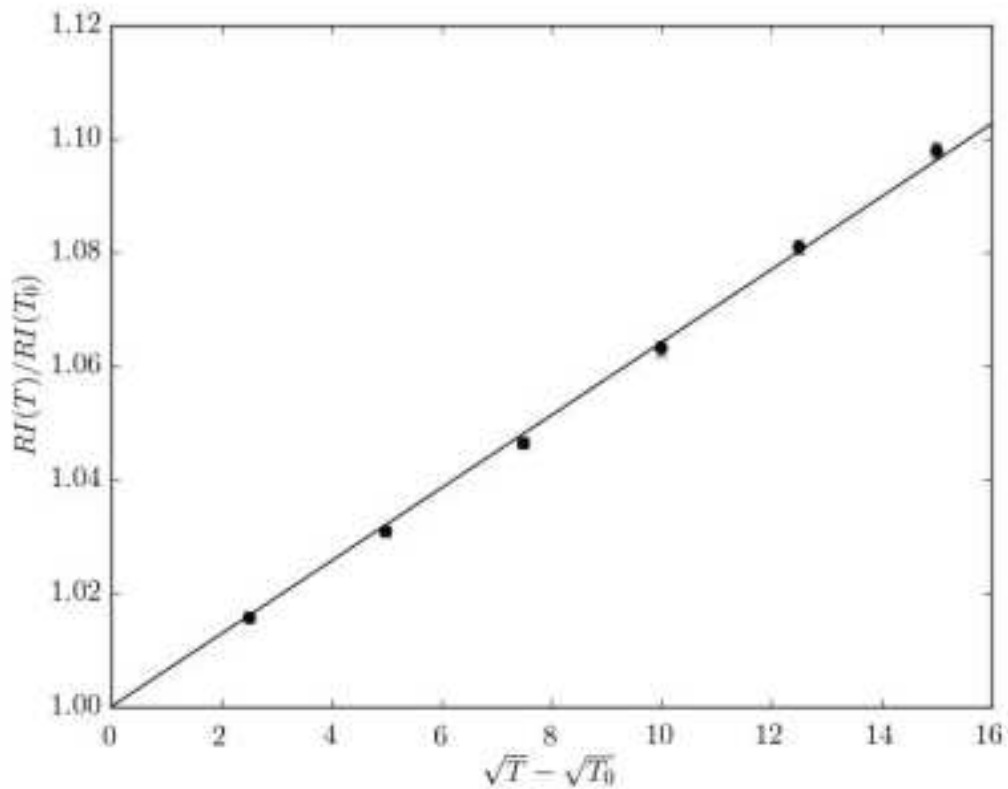


図 4.19 酸化物燃料－重水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分相対値の温度平方根差に対する依存性（厳密モデル）

表 4.20 酸化物燃料－重水減速体系（燃料直径 28 mm）における共鳴積分の温度依存性（厳密モデル）

| T (K) | RI (barn) | 1σ | $\sqrt{T} - \sqrt{T_0}$ | $\frac{RI(T)}{RI(T_0)}$ | 1σ |
|---------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 293.15 | 19.69 | 0.02 | 0.0 | 1.000 | 0.001 |
| 385 | 20.01 | 0.02 | 2.5 | 1.016 | 0.001 |
| 489 | 20.30 | 0.02 | 5.0 | 1.031 | 0.001 |
| 606 | 20.61 | 0.02 | 7.5 | 1.047 | 0.001 |
| 735 | 20.94 | 0.03 | 10.0 | 1.063 | 0.001 |
| 877 | 21.29 | 0.02 | 12.5 | 1.081 | 0.001 |
| 1032 | 21.62 | 0.03 | 15.0 | 1.098 | 0.001 |

表 4.21 厳密モデルを用いて計算した温度係数 β と実験値の比較

| 燃料 タイプ | 減速材 | 燃料 | | β ($\times 100$) | | | フィッテ ィング 誤差(%) | C/E | 誤差 |
|-----------|-----|------------|-----------------------------------|--------------------------|----------|------|----------------------|------|------|
| | | 直径 (mm) | S/M (cm^2/g) | 実験値 | 実験 誤差 | 計算値 | | | |
| 金属 | 軽水 | 8 | 0.264 | 0.64 | 0.05 | 0.69 | 0.00049 | 1.08 | 0.08 |
| 金属 | 軽水 | 28 | 0.075 | 0.55 | 0.05 | 0.49 | 0.00015 | 0.88 | 0.08 |
| 酸化物 | 軽水 | 8 | 0.485 | 0.82 | 0.06 | 0.99 | 0.00047 | 1.21 | 0.09 |
| 酸化物 | 軽水 | 17 | 0.228 | 0.69 | 0.05 | 0.72 | 0.00032 | 1.05 | 0.08 |
| 酸化物 | 軽水 | 28 | 0.147 | 0.65 | 0.05 | 0.64 | 0.00017 | 0.99 | 0.08 |
| 金属 | 重水 | 28 | 1.293 | — | — | 0.53 | 0.00004 | — | — |
| 酸化物 | 重水 | 28 | 1.293 | — | — | 0.64 | 0.00004 | — | — |

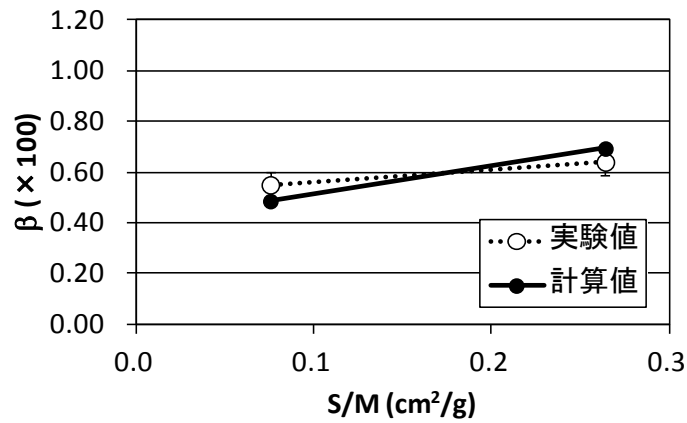


図 4.20 金属燃料体系における温度係数 β の表面積対質量比 S/M に対する依存性
(厳密モデル)

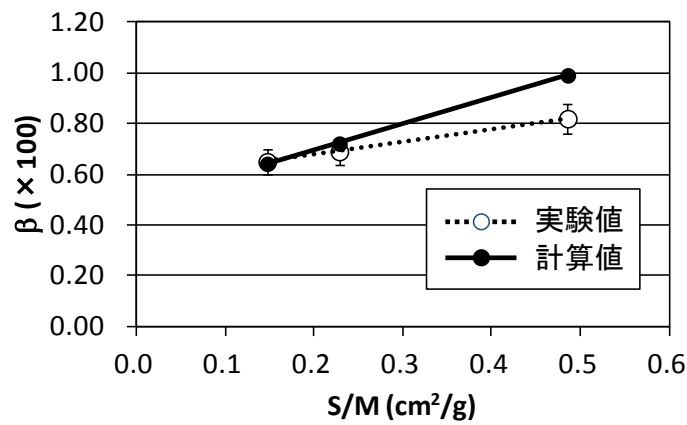


図 4.21 酸化物燃料体系における温度係数 β の表面積対質量比 S/M に対する依存性
(厳密モデル)

5. まとめ

昨年度、連続エネルギーモンテカルロ輸送計算コード MVP に対し、標的核熱運動を考慮した厳密なモデルによるドップラー反応度計算機能を整備するため、最新版の MVP コードへ共鳴断面積を用いた自由単一原子核モデル（厳密モデル）を実装した。今年度は、MOX 体系について厳密モデルを適用できるようにするため、JENDL-4.0 の主要な重核に対する拡張 MVP 断面積ライブラリを追加整備した。

追加整備した拡張 MVP 断面積ライブラリを検証するために、Mosteller によって提案された Doppler 反応度価値ベンチマークのリサイクル MOX ピンセル問題と兵器級 MOX ピンセル問題により、厳密モデルと拡張 MVP 断面積ライブラリの検証を行った。その結果、ドップラー反応度係数に対して従来モデルである漸近モデルと厳密モデルの結果を比較すると 5-10% の差異が生じ、共鳴散乱のドップラー反応度に対するエネルギー依存性も 10 eV - 100 eV のエネルギー領域が最も影響が大きいことを確認した。これは昨年度実施した UO_2 ピンセルと同じ傾向であり、厳密モデルと新たに追加整備した拡張 MVP 断面積ライブラリは、MOX 体系についても問題なく適用できることが確認できた。

拡張版 MVP 断面積ライブラリは、0 K を基準温度とするライブラリであり、従来の 293.15 K を基準温度とするライブラリに比べて、ファイル容量や計算時間の観点で計算コストがかかることになるため、新たに追加整備した核種に対するライブラリのファイル容量を調べた。その結果、U-238 ほど大きくファイル容量は増加するものではなく、現在の計算機環境を考えれば、問題にはないことを確認した。

更に、実験値に対する漸近モデルと厳密モデルの違いによる影響を調べるために、Hellstrand の実験解析を行った。その結果、漸近モデルは、ほぼ実験誤差の範囲内で実験値の傾向をよく再現したが、厳密モデルについては、酸化物燃料体系において S/M 値が大きくなるにつれて実験値を過大評価する傾向が見られた。今回の解析では、非常に単純化した体系を用いており、本当に実験で得られた結果を再現しているのかどうかを含めて、差異の原因について詳細に検討する必要がある。

昨年度と今年度の作業において、ウラン燃料及び MOX 燃料を用いたピンセル体系に対する検証を実施し、ウラン燃料体系から MOX 燃料体系に至る汎用的な体形に対して、連続エネルギーモンテカルロコード MVP を用いたドップラー反応度価値の参照解を計算できることが確認できた。現状では、ドップラー反応度係数は値が非常に小さいため、モンテカルロ法による直接計算による評価が困難であり、本解析で行ったような温度差の大きなピンセル体系に対してのみ現実的には適用可能である。今後は、計算機の進歩やモンテカルロ計算手法の発達とともに、ドップラー反応度価値測定の実験解析にも適用し、広範な検証を進めていくことが望まれる。

参考文献

- 1) R. Dagan, "On the use of $S(\alpha,\beta)$ tables for nuclides with well pronounced resonances," *Ann. Nucl. Energy*, **32**, 367-377 (2005).
- 2) V. V. Kolesov, V. F. Ukraintsev, "Temperature Effects and Resonance Elastic Cross Section Influence on Secondary Energy Distributions of Scattered Neutrons in the Resolved Resonance Region," *Proc. PHYSOR-2006*, Vancouver, BC, Canada, 2006 Sep. 10-14 (2006), [CD-ROM].
- 3) B. Becker, et al., "Improvement of the Resonance Scattering Treatment in MCNP in View of HTR Calculations," *Proc. PHYSOR-2008*, Interlaken, Switzerland, Sep. 14-19, 2008 (2008), [CD-ROM].
- 4) D. Lee, K. Smith, J. Phodes, "The impact of ^{238}U resonance elastic scattering approximations on thermal reactor Doppler reactivity," *Proc. PHYSOR-2008*, Interlaken, Switzerland, Sep. 14-19, 2008 (2008), [CD-ROM].
- 5) R. Dagan, B. Becker, D. Roubtsov, "Evaluation of the CANDU6 Neutron Characteristics in View of Application of the Resonance Dependent Kernel in MCNP(X)," *Prog. Nucl. Sci. Technol.*, **2**, 782-787 (2011).
- 6) Y. Nagaya, et al., "MVP/GMVP II : General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods," *JAERI 1348* (2005).
- 7) R. D. Mosteller, "Computational Benchmarks for the Doppler Reactivity Defect," *LA-UR-06-2968* (2006).
- 8) E. Hellstrand, P. Blomberg, S. Hörner, "The Temperature Coefficient of the Resonance Integral for Uranium Metal and Oxide," *Nucl. Sci. Eng.*, **8**, 497-506 (1960).
- 9) 核データセンターホームページ, http://www.ndc.jaea.go.jp/index_J.html
- 10) J. Hardy, Jr., G. G. Smith, D. Klein, "The Effective U^{238} Resonance Capture Integrals of Uranium Metal and UO_2 Rods," *Nucl. Sci. Eng.*, **14**, 358-365 (1962).
- 11) <http://www.scipy.org/>

付録 A. 本解析で使用した MVP 入力データ

A.1. Mosteller ベンチマーク問題 (原子炉リサイクル MOX 体系、HFP、PuO₂ 重量割合 1.0% のケース)

以下に、高温全出力時 (HFP 温度 900 K)、PuO₂ 重量割合 1.0% の場合の MVP 入力データを示す。ベンチマーク問題で指定されているすべての濃縮度に対する数密度データを入力で与えており、ゾーン指定の物質指定において、物質 ID を変更すれば、他の濃縮度に対する計算も行えるようになっている。

オプション部で DOPPLER-SCATTERING (EXACT) が指定されており、厳密モデルの共鳴散乱モデルを使用する入力となっている。核種の指定では、U-235, U-238, Pu-239, Pu-240, Pu241, Pu-242 に対して、それぞれ核種 ID, U02350J40TZ、U02380J40TZ、PU2390J40TZ、PU2400J40TZ、PU2410J40TZ、PU2420J40TZ が指定されており、0 K を基準温度とする拡張 MVP ライブラリを使用する。

----- ここから MVP 入力データ -----

Reactor-Recycle MOX PIN CELL CALCULATION FOR DOPPLER BENCHMARK

Enrichment:1.0wt%, HFP 900K, JENDL-4.0

NO-RESTART

FISSION EIGEN-VALUE

NO-RUSS-ROUL WEIGHT-WINDOW

* EDIT-MACR-DATA (03303030) FLUX-PRINT

PRINT-SUPPRESS (6) /* 6 = averaged source position in each batch

DYNAMIC-MEMORY (60000000)

DOPPLER-SCATTERING (EXACT)

% NG=1

NGROUP (<NG>) NMEMO (5)

TCPU (0) /* minutes

*

NHIST (10000) NPART (<%NHIST*5100>) NSKIP (100)

*

NBANK (<NINT (1.5*%NHIST)>) NFBANK (<NINT (1.5*%NHIST)>)

IRAND (1)

*

ETOP(2.0E+7) EBOT(1.0E-5)

EWCUT(0.1) ETHMAX(4.5) /* eV

*

\$XSEC

% MF10 = 1, MF20 = 2, MF40 = 3, MF60 = 4, MF80 = 5

% MCLD = 11

% MWTR = 21

& IDMAT(<MF10>) /* 1.0% FUEL, HZP 900K

TEMPMT(900.0)

PU2390J40TZ(1.02762E-4)

PU2400J40TZ(6.85079E-5)

PU2410J40TZ(3.42539E-5)

PU2420J40TZ(2.28360E-5)

U02350J40TZ(1.63939E-4)

U02380J40TZ(2.26044E-2)

000160J40(4.59936E-2)

& IDMAT(<MF20>) /* 2.0% FUEL, HZP 900K

TEMPMT(900.0)

PU2390J40TZ(2.05524E-4)

PU2400J40TZ(1.37016E-4)

PU2410J40TZ(6.85079E-5)

PU2420J40TZ(4.56719E-5)

U02350J40TZ(1.62283E-4)

U02380J40TZ(2.23761E-2)

000160J40(4.59904E-2)

& IDMAT(<MF40>) /* 4.0% FUEL, HZP 900K

TEMPMT(900.0)

PU2390J40TZ(4.11047E-4)

PU2400J40TZ(2.74031E-4)

PU2410J40TZ(1.37016E-4)

PU2420J40TZ(9.13438E-5)

U02350J40TZ(1.58971E-4)

U02380J40TZ(2.19194E-2)

000160J40(4.59838E-2)

& IDMAT(<MF60>) /* 6.0% FUEL, HZP 900K

TEMPMT(900.0)

```

PU2390J40TZ ( 6. 16571E-4 )
PU2400J40TZ ( 4. 11047E-4 )
PU2410J40TZ ( 2. 05524E-4 )
PU2420J40TZ ( 1. 37016E-4 )
U02350J40TZ ( 1. 55659E-4 )
U02380J40TZ ( 2. 14628E-2 )
000160J40 ( 4. 59773E-2 )
& IDMAT ( <MF80> ) /* 8.0% FUEL, HZP 900K
TEMPMT ( 900.0 )
PU2390J40TZ ( 8. 22094E-4 )
PU2400J40TZ ( 5. 48063E-4 )
PU2410J40TZ ( 2. 74031E-4 )
PU2420J40TZ ( 1. 82688E-4 )
U02350J40TZ ( 1. 52347E-4 )
U02380J40TZ ( 2. 10061E-2 )
000160J40 ( 4. 59708E-2 )

& IDMAT ( <MCLD> ) /* Cladding 600K
TEMPMT ( 600.0 )
% ZR90=51. 45, ZR91=11. 22, ZR92=17. 15, ZR94=17. 38, ZR96=2. 80
% ZRN = 4. 21838E-2
ZR0900J40 ( <ZR90*ZRN/100> )
ZR0910J40 ( <ZR91*ZRN/100> )
ZR0920J40 ( <ZR92*ZRN/100> )
ZR0940J40 ( <ZR94*ZRN/100> )
ZR0960J40 ( <ZR96*ZRN/100> )

& IDMAT ( <MWTR> ) /* Borated light water 600K
TEMPMT ( 600.0 )
H0001HJ40 ( 4. 42326E-2 )
000160J40 ( 2. 21163E-2 )
B00100J40 ( 1. 02133E-5 )
B00110J40 ( 4. 11098E-5 )
$END XSEC
$GEOM
***** BODY DEFINITION *****

```

```

% PCH = 1.26678 /* P : PITCH OF UNIT PIN CELL
% HT = 1000 /* HT: HEIGHT OF FUEL ASSEMBLY
% RF0 = 0.39433 /* RF0 : OUTER RADIUS OF FUEL PELLETT
% RF1 = 0.40226 /* RF1 : inner radius of Zr cladding
% RF2 = 0.45972 /* RF2 : outer radius of Zr cladding
*
*----- BODY FOR UNIT CELL FRAME
RPP ( 100 <-PCH/2> <PCH/2> <-PCH/2> <PCH/2> 0.0 <HT> )
*----- BODY FOR FUEL PIN
RCC ( 200 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 <HT> <RF0> )
RCC ( 300 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 <HT> <RF1> )
RCC ( 400 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 <HT> <RF2> )
END
***** ZONE DEFINITION *****
ZONE1 : FUEL : <MF10> : 200
ZONE2 : GAP : 0 : 300 -200
ZONE3 : CLADDING : <MCLD> : 400 -300
ZONE4 : MODERATOR : <MWTR> : 100 -400
REF : : -2000 : -100
$END GEOM
***** OTHER DATA *****
*% PI=3.1415926535, VPT=PI*RF*RF
TRVOL( R(1.0) )
*
*ENGYB( 1.0000E+7 5.5308E+3 3.9279E+0 1.0000E-5 )
ENGYB( <%ETOP> <%EBOT> )
*
% NR = %NREG
% NRG = NR*NG
WKIL( <NRG>(0.25) ) WSRV( <NRG>(1.0) )
WGTF( <%NREG>(0.94) )
***** INITIAL SOURCE *****
$SOURCE
& NEUTRON
RATIO( 1.0 )
@( X Y ) = #DISC( 0.0 <RF0> );

```

```

@Z = #UNIFORM( 0.0 <HT> );
@( A B C ) = #ISOTROPIC();
@E = #FISSION( U0235* 0.0253 );
$END SOURCE
/

```

A.2. Hellstrand 実験解析 (金属燃料-軽水減速体系、燃料直径 8 mm、燃料温度 293.15 K のケース)

以下に、金属燃料-軽水減速体系、燃料直径 8 mm、燃料温度 293.15 K の場合の MVP 入力データを示す。オプション部で DOPPLER-SCATTERING (EXACT) が指定されており、厳密モデルの共鳴散乱モデルを使用する入力となっている。

----- ここから MVP 入力データ -----

```

Hellstrand Experiment: Pin Cell Geometry
uranium metal
*****
NO-RESTART
RUSS-ROUL
NO-FISSION    FIXED-SOURCE
EDIT-MACR-DATA( 04404004 )
EDIT-MICR-DATA( 04404004 )
FLUX-PRINT
PRINT-SUPPRESS(6)
DYNAMIC-MEMORY(50000000)
DOPPLER-SCATTERING(EXACT)

% NG=108
NGROUP(<NG>) NMEMO(2)
TCPU(0) /* minutes
*
NHIST(10000) NSKIP(0) NPART(<1000*%NHIST>)
*
NBANK(<NINT(1.5*%NHIST)>) NFBANK(<NINT(1.5*%NHIST)>)
IRAND(1)
*

```

```

ETOP.N(1.0E+7) EBOT.N(1.0E-5)
EWCUT(0.1) ETHMAX(4.5) /* eV
*
* ... input parameters ...
*
% DPLT = 0.8 /* pellet diameter (cm)
% PCH = 10.0 /* pin pitch (cm)
% DFUL = 18.95 /* density of natural uranium (g/cm^3)
% FTEMP = 293.15 /* fuel temperature (K)
% CTEMP = 293.15 /* room temperature (K)
*
* ... unspecified parameters ...
*
% HT = 1000 /* cell height (cm)
% AU8 = 0.992742 /* abundance of U-238
% AU5 = 0.007204 /* abundance of U-235
% AU4 = 0.000054 /* abundance of U-234
% DMOD = 0.99820 /* H2O density = 0.99820 (g/cm^3) Rikanenpyo 2007
/* D2O density = 1.105 (g/cm^2) Rikanenpyo 2007
% AH1 = 2.0 /* atomic ratio of H-1
% A06 = 1.0 /* atomic ratio of O-16
% AWU4 = 234.040953616 /* atomic weight of U-234
% AWU5 = 235.043931368 /* atomic weight of U-235
% AWU8 = 238.050789466 /* atomic weight of U-238
% AWH = 1.00794 /* atomic weight of nat-H
% AWO = 15.9994 /* atomic weight of nat-O
% AV0 = 0.60221415 /* Avogadro number (10^24 atoms/mol) Rikanenpyo 2007
*
* ... calculated parameters ...
*
% RF = DPLT/2 /* pellet radius (cm)
% AWU = AU4*AWU4+AU5*AWU5+AU8*AWU8
% AWW = AWH*2+AWO
% U234 = AU4*DFUL*AV0/AWU
% U235 = AU5*DFUL*AV0/AWU
% U238 = AU8*DFUL*AV0/AWU

```


% H001 = AH1*DMOD*AVO/AWW

% 0016 = A06*DMOD*AVO/AWW

\$XSEC

% MFUEL = 1, MMODE = 2

& IDMAT (<MFUEL>) /* fuel

TEMPMT (<FTEMP>)

U02340J40 (<U234>)

U02350J40TZ (<U235>)

U02380J40TZ (<U238>)

& IDMAT (<MMODE>) /* moderator

TEMPMT (<CTEMP>)

H0001HJ40 (<H001>)

000160J40 (<0016>)

\$END XSEC

\$GEOM

***** BODY DEFINITION *****

RPP (100 <-PCH/2> <PCH/2> <-PCH/2> <PCH/2> 0.0 <HT>)

RCC (200 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 <HT> <RF>)

END

***** ZONE DEFINITION *****

ZONE1 : FUEL : <MFUEL> : 200

ZONE2 : MODERATOR : <MMODE> : 100 -200

MIRROR : : -2000 : -100

#TALLY REGION

DEFINE @FUEL (!FUEL)

DEFINE @MODERATOR (!MODERATOR)

DEFINE @ALL (!*)

\$END GEOM

***** OTHER DATA *****

* ... 108 group structure ...

ENGYB (1.0000E+07 7.7880E+06 6.0653E+06 4.7237E+06 3.6788E+06
2.8650E+06 2.2313E+06 1.7377E+06 1.3534E+06 1.0540E+06
8.2085E+05 6.3928E+05 4.9787E+05 3.8774E+05 3.0197E+05
2.3518E+05 1.8316E+05 1.4264E+05 1.1109E+05 8.6517E+04
6.7380E+04 5.2475E+04 4.0868E+04 3.1828E+04 2.4788E+04

1. 9304E+04 1. 5034E+04 1. 1709E+04 9. 1188E+03 7. 1017E+03
 5. 5308E+03 4. 3074E+03 3. 3546E+03 2. 6126E+03 2. 0347E+03
 1. 5846E+03 1. 2341E+03 9. 6112E+02 7. 4852E+02 5. 8295E+02
 4. 5400E+02 3. 5358E+02 2. 7536E+02 2. 1445E+02 1. 6702E+02
 1. 3007E+02 1. 0130E+02 7. 8893E+01 6. 1442E+01 4. 7851E+01
 3. 7266E+01 2. 9023E+01 2. 2603E+01 1. 7604E+01 1. 3710E+01
 1. 0677E+01 8. 3153E+00 6. 4759E+00 5. 0435E+00 3. 9279E+00
 3. 0590E+00 2. 3824E+00 1. 8554E+00 1. 6374E+00 1. 4450E+00
 1. 2752E+00 1. 1253E+00 9. 9312E-01 8. 7643E-01 7. 7344E-01
 6. 8256E-01 6. 0236E-01 5. 3158E-01 5. 0000E-01
 4. 6912E-01 4. 1399E-01
 3. 8926E-01 3. 6528E-01 3. 4206E-01 3. 1961E-01 2. 9792E-01
 2. 7699E-01 2. 5683E-01 2. 3742E-01 2. 1878E-01 2. 0090E-01
 1. 8378E-01 1. 6743E-01 1. 5183E-01 1. 3700E-01 1. 2293E-01
 1. 0963E-01 9. 7080E-02 8. 5397E-02 7. 4276E-02 6. 4017E-02
 5. 4520E-02 4. 5785E-02 3. 7813E-02 3. 0602E-02 2. 4154E-02
 1. 8467E-02 1. 3543E-02 9. 3805E-03 5. 9804E-03 3. 3423E-03
 1. 4663E-03 3. 5238E-04 1. 0000E-05)

% NR = %NREG

% NRG = NR*NG

WKIL (<NRG>(0.25)) WSRV (<NRG>(1.0))

WGTF (<%NREG>(1.0))

***** tally region volume *****

TRVOL (<%NTREG>(1.0)) /* default

***** INITIAL SOURCE *****

\$SOURCE

& NEUTRON

RATIO(1.0)

@X = #UNIFORM (<-PCH/2> <PCH/2>);

@Y = #UNIFORM (<-PCH/2> <PCH/2>);

@Z = #UNIFORM(0.0 <HT>);

@(A B C) = #ISOTROPIC();

@E = #FISSION(U0235* 0.0253);

\$END SOURCE

/

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。