

連続エネルギーモンテカルロコード MVP と JENDL-5 による TRIGA 型原子炉体系の 臨界ベンチマーク解析

Nuclear Criticality Benchmark Analyses on TRIGA-type Reactor Systems
by Using Continuous-energy Monte Carlo Code MVP with JENDL-5

柳澤 宏司 梅田 幹 求 惟子 村尾 裕之

Hiroshi YANAGISAWA, Miki UMEDA, Yuiko MOTOME and Hiroyuki MURAO

原子力科学研究部門

原子力科学研究所

原子力施設検査室

Nuclear Facility Inspection Office

Nuclear Science Research Institute

Sector of Nuclear Science Research

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

**連続エネルギーモンテカルロコード MVP と JENDL-5 による
TRIGA 型原子炉体系の臨界ベンチマーク解析**

日本原子力研究開発機構
原子力科学的研究部門 原子力科学研究所 原子力施設検査室

柳澤 宏司、梅田 幹、求 惟子⁺、村尾 裕之⁺

(2022 年 11 月 28 日受理)

連続エネルギーモンテカルロコード MVP と評価済み核データライブラリ JENDL-5 によつて、ウラン水素化ジルコニウム燃料棒を用いる TRIGA 型原子炉体系の臨界ベンチマーク解析を行った。解析対象は、国際臨界安全ベンチマークプロジェクト(ICSBEP)のハンドブックに掲載されている IEU-COMP-THERM-003 と IEU-COMP-THERM-013 の二種類のデータであり、中性子実効増倍率、制御棒等の反応度値について旧バーションの JENDL を使用した結果と比較した。その結果、JENDL-5 による中性子実効増倍率は JENDL-4.0 よりも 0.4 から 0.6% 大きく、制御棒等の反応度値は、JENDL-5 と JENDL-4.0 との有意な差は無いことが分かった。これらの解析結果は今後予定している NSRR の制御棒反応度値等の解析において、計算精度の確認の参考になるものと考えられる。

**Nuclear Criticality Benchmark Analyses on TRIGA-type Reactor Systems by Using
Continuous-energy Monte Carlo Code MVP with JENDL-5**

Hiroshi YANAGISAWA, Miki UMEDA, Yuiko MOTOME⁺ and Hiroyuki MURAO⁺

Nuclear Facility Inspection Office, Nuclear Science Research Institute,
Sector of Nuclear Science Research,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 28, 2022)

Nuclear criticality benchmark analyses were carried out for TRIGA-type reactor systems in which uranium-zirconium hydride fuel rods are loaded by using the continuous-energy Monte Carlo code MVP with the evaluated nuclear data library JENDL-5. The analyses cover two sorts of benchmark data, the IEU-COMP-THERM-003 and IEU-COMP-THERM-013 in the International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project (ICSBEP) Handbook, and effective neutron multiplication factors, reactivity worths for control rods etc. were calculated by JENDL-5 in comparison with those by the previous version of JENDL. As the results, it was confirmed that the effective neutron multiplication factors obtained by JENDL-5 were 0.4 to 0.6% greater than those by JENDL-4.0, and that there were no significant differences in the calculated reactivity worths by between JENDL-5 and JENDL-4.0. Those results are considered to be helpful for the confirmation of calculation accuracy in the analyses on NSRR control rod worths, which are planned in the future.

Keywords: Nuclear Criticality Benchmark Analyses, TRIGA, Uranium-Zirconium Hydride, ICSBEP Handbook, MVP, JENDL-5, JENDL-4.0, Effective Neutron Multiplication Factor, Control Rod Worth, NSRR

⁺ Department of Research Reactor and Tandem Accelerator, Nuclear Science Research Institute

目 次

1. はじめに	1
2. ベンチマーク計算方法	2
2.1 IEU-COMP-THERM-003 の計算モデル	2
2.2 IEU-COMP-THERM-013 の計算モデル	11
3. ベンチマーク計算結果	25
3.1 中性子実効増倍率	25
3.1.1 IEU-COMP-THERM-003 の計算結果	25
3.1.2 IEU-COMP-THERM-013 の計算結果	37
3.2 制御棒反応度値	51
3.3 原子炉停止余裕	56
3.4 過剰反応度	58
3.5 黒鉛反射体ブロックの反応度値	60
3.6 実験用ドライチューブの反応度値	63
4. まとめ	65
謝辞	66
参考文献	67
付録 MVP サンプル入力リスト	69

Contents

1. Introduction	1
2. Benchmark Calculation Method	2
2.1 Calculation Model of IEU-COMP-THERM-003	2
2.2 Calculation Model of IEU-COMP-THERM-013	11
3. Results of Benchmark Calculation	25
3.1 Effective Neutron Multiplication Factors	25
3.1.1 Calculation results of IEU-COMP-THERM-003	25
3.1.2 Calculation results of IEU-COMP-THERM-013	37
3.2 Reactivity Worths of Control Rod	51
3.3 Reactor Shutdown Margins	56
3.4 Excess Reactivities	58
3.5 Reactivity Worths of Graphite Reflector Block	60
3.6 Reactivity Worths of Experimental Dry Tube	63
4. Summary	65
Acknowledgements	66
References	67
Appendix Sample Input List for MVP	69

1. はじめに

TRIGA(Training, Research, Isotopes, General Atomics)型原子炉は、医療用及び産業用 RI 製造、中性子ラジオグラフィー、原子炉燃料及び材料のパルス照射試験、教育訓練等を目的とし、 ^{235}U 濃縮度約20%のウラン水素化ジルコニウム燃料を使用する試験研究炉である。TRIGA 型原子炉には燃料装荷パターン、制御棒の種類等について様々なバリエーションがあり、現在世界で37基が供用されている¹⁾。その大きな特徴は、正の反応度投入に伴う出力上昇に対して、減速材である水素を含有した固体燃料が直接核加熱されることで、急速に中性子スペクトルが硬化して大きな負のフィードバック反応度がもたらされるという固有の安全性を有することである。このような優れた自己制御性を有するコンパクトな炉心に対し、制御棒又はパルス照射用のトランジエント棒によって反応度制御の操作を行う。

我が国では、原子力科学研究所の原子炉安全性研究炉 NSRR (Nuclear Safety Research Reactor)²⁾がこの型式の試験研究炉として唯一供用運転がなされており、反応度事故を模擬した発電用原子炉燃料のパルス照射試験に専ら供されている。他のTRIGA型原子炉と同様に、NSRRはパルス出力が大きいものの上記の自己制御性により積分出力は小さく、燃料の燃焼度は低く核分裂生成物の蓄積も少ない。このことから、我が国の安全規制では低出力炉として区分されている。NSRRのような低出力炉については、特に重要な安全上の性能要求は原子炉の停止機能であり、法令に基づく毎年度の定期事業者検査において制御棒及びトランジエント棒の反応度価値、原子炉停止余裕、過剰反応度等の実測を行い、安全基準を満足することを確認する。NSRRで取得したこれら反応度に関する実測値を、炉心構成及び制御棒配置等を詳細に模擬できる連続エネルギーモンテカルロコードを用いた解析手法によって評価し、測定データのより深い物理的解釈や測定手法の改良の可能性等を検討することを考えているが、これに先立ち使用する解析手法の精度確認を行うこととした。

精度確認に必要なTRIGA型原子炉のベンチマークデータは多くはなく、国際臨界安全ベンチマークプロジェクト(ICSBEP)のハンドブック³⁾には、IEU-COMP-THERM-003⁴⁾及びIEU-COMP-THERM-013⁵⁾の二種類のデータが掲載されている。前者は、 ^{235}U 濃縮度19.9%のウラン水素化ジルコニウム燃料棒と水減速材から構成される炉心の周囲に約30cm厚さの円環状の黒鉛反射体を設けたスロベニアのTRIGA Mark II型原子炉であり、後者は可燃性中性子毒物として重量比約0.90%のエルビウムを含む ^{235}U 濃縮度19.75%のウラン水素化ジルコニウム燃料棒と水減速材で構成される炉心の周囲に黒鉛ブロックの反射体を設けた米国Idaho National LaboratoryのTRIGA Mark II型原子炉である。両者ともに中性子実効増倍率のベンチマーク解析条件が示されており、さらに後者においては制御棒等の反応度価値、原子炉停止余裕及び過剰反応度に関するベンチマーク解析条件も示されている。

本報告書のベンチマーク解析では、これらのハンドブックデータに対して中性子実効増倍率、制御棒等の反応度価値、原子炉停止余裕及び過剰反応度について、連続エネルギーモンテカルロコード MVP⁶⁾と最新の評価済み核データライブラリである JENDL-5⁷⁾を用いて計

算し、ベンチマーク実験との比較とともに旧バーションの JENDL による計算結果との比較を行った。

なお、本報告書は原子力科学研究所の独立検査組織^{*1}である原子力施設検査室と NSRR 施設の保守担当課である NSRR 管理課との共同で纏めたものであり、それぞれの課題解決に資する共通の技術資料として利用することを意図した。本報告書のデータは今後予定している NSRR 体系の詳細な解析とともに、原子力施設検査室としては定期事業者検査データの解釈評価等に、NSRR 管理課としては測定手法の改良等を含めた施設の運転保守管理の高度化にそれぞれ役立つことを期待している。

2. ベンチマーク計算方法

本報告書で示すベンチマーク解析は、連続エネルギーモンテカルロコード MVP Version 2⁶⁾と評価済み核データライブラリ JENDL-5⁷⁾から作成された MVP 用中性子断面積ライブラリー⁸⁾を用いた。また中性子実効増倍率の計算については、JENDL-3.2⁹⁾、JENDL-3.3¹⁰⁾及び JENDL-4.0¹¹⁾(初版^{*2}を用いた)を使用した結果との比較も行った。制御棒等の反応度値、原子炉停止余裕及び過剰反応度の計算については JENDL-4.0との比較を行った。計算ヒストリーニュンバーカー数は5,000万(100,000粒子/バッチ×700バッチ、初期200バッチをスキップ)である。中性子実効増倍率は、MVP の標準的手法として飛程長、衝突、アナログからなる六種類のエスティメータの最尤推定値⁶⁾により求めた。中性子実効増倍率の計算結果を解釈するために補足的に計算した中性子束と反応率は、飛程長エスティメータによって求めた。

以下では、IEU-COMP-THERM-003及びIEU-COMP-THERM-013の計算モデルを示す。なお、ベンチマーク解析条件の詳細は文献⁴⁾⁵⁾に記されているので、ここでは計算対象の概要を把握できる最小限の情報を文献から引用した記述に留める。

2.1 IEU-COMP-THERM-003 の計算モデル

解析対象は、TRIGA Mark II 型原子炉であり、SUS304被覆のウラン水素化ジルコニアム燃料棒(²³⁵U 濃縮度19.9%)、SUS304被覆の燃料フォロワ型制御棒、及びアルミニウ

*1 施設の保守担当課から独立して定期事業者検査等の検査とその合否判定を行う組織である。

*2 初版のリリース以降、アップデートファイル JENDL-4.0u 及びプラスファイル JENDL-4.0+として修正版が公開されている¹²⁾。本報告書の解析に用いた核種の修正は以下の通りであり、修正の影響はほとんど生じないと考える。

B-10: 中性子弹性散乱断面積(数バーン)の修正(MF3/MT2 修正)。Cr-52、Cr-53: 中性子断面積の共分散データ等の追加・修正(MF33 と MF34 追加、MF33/MT1 と MF33/MT102(Cr-52のみ)修正)。

U-234: 核分裂の放出エネルギーの修正(MF1/MT458 修正)、Q 値修正(MF3/MT18-21,38 修正)、共鳴パラメータのフラグ(LFW)修正(MF2/MT151 と MF32/MT151 修正)。U-235、U-238: 中性子断面積の共分散データの修正(MF33 修正)。

ム合金被覆の空気フォロワ型トランジエント棒から構成される炉心の周囲に円環上の黒鉛反射体を配置している⁴⁾。水の自然対流で炉心冷却を行うプール型の熱出力250kWの原子炉である。燃料棒、制御棒及びトランジエント棒の計算モデルを Fig.2.1.1からFig.2.1.3に示す。高さ方向の炉心中心は、燃料棒のウラン水素化ジルコニウムのスタック長中央に位置しており、全引き抜き状態での制御棒とトランジエント棒の炉心中心位置をこれらの図に記している。

ベンチマーク体系全体の平面図及び立面図をそれぞれ Fig.2.1.4 及び Fig.2.1.5 に示す。ベンチマーク体系には Core132 及び Core133 と呼ばれる二種類の燃料棒装荷パターンがあり、両者ともに燃料棒は 40 本、制御棒は 4 本、トランジエント棒は 1 本である。これらは、Fig.2.1.4 に示すように平面上で炉心中心から異なる半径の円周上 (R1 から R5) に等間隔に装荷することが可能である。今回のベンチマーク体系では中心及び半径 R1 から R4 に燃料棒、制御棒、又はトランジエント棒が装荷され、半径 R5 にはこれらは装荷されていない。燃料棒等が装荷可能な半径 R5 のさらに外側の領域には円環状の黒鉛反射体、さらにその外側には水反射体が設けられている。Fig.2.1.5 の立面図に示すように、中性子実効増倍率のベンチマーク解析においては、Core132 及び Core133 ともに全ての制御棒及びトランジエント棒は全引き抜き状態としていることから、臨界状態ではなく炉心の過剰反応度を加えた中性子実効増倍率をベンチマーク実験値としている。トランジエント棒は空気フォロワが設けられているため、炉心の垂直方向にボイド管が 1 本挿入されたものと同様の効果をもたらしている。このため、Fig.2.1.4 に示した半径 R4 の円周上に配置した 7 本の燃料棒とトランジエント棒との間の距離が短い Core132 のほうが Core133 よりも相対的に中性子インポータンスが大きくなると考えられる場所にボイド管と同様の効果となるトランジエント棒が装荷されるため、より小さな中性子実効増倍率となる。

また、今回の計算では燃料棒周囲の水減速材の影響について検討するために、Fig.2.1.4 に示すように半径 R3 と R4 の中間で減速材としての水の領域、反射体としての水の領域に分け、別々の領域として計算した。高さ方向の水減速材の領域は下部グリッド上面と上部グリッド下面の間とした。このため、半径 R4 に配置した 7 本の燃料棒の周囲の水の領域は反射体として扱うこととなるが便宜的に、このような設定とした。

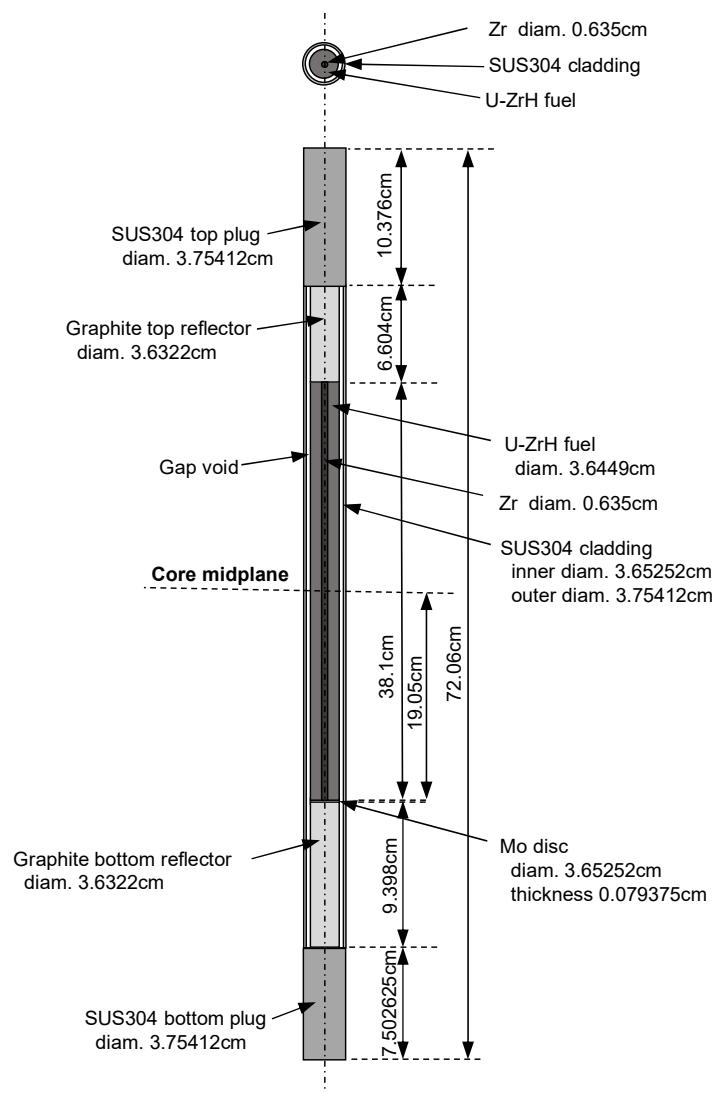


Fig.2.1.1 Calculation model for the fuel rod of IEU-COMP-THERM-003 benchmark system, quoted from the literature⁴⁾.

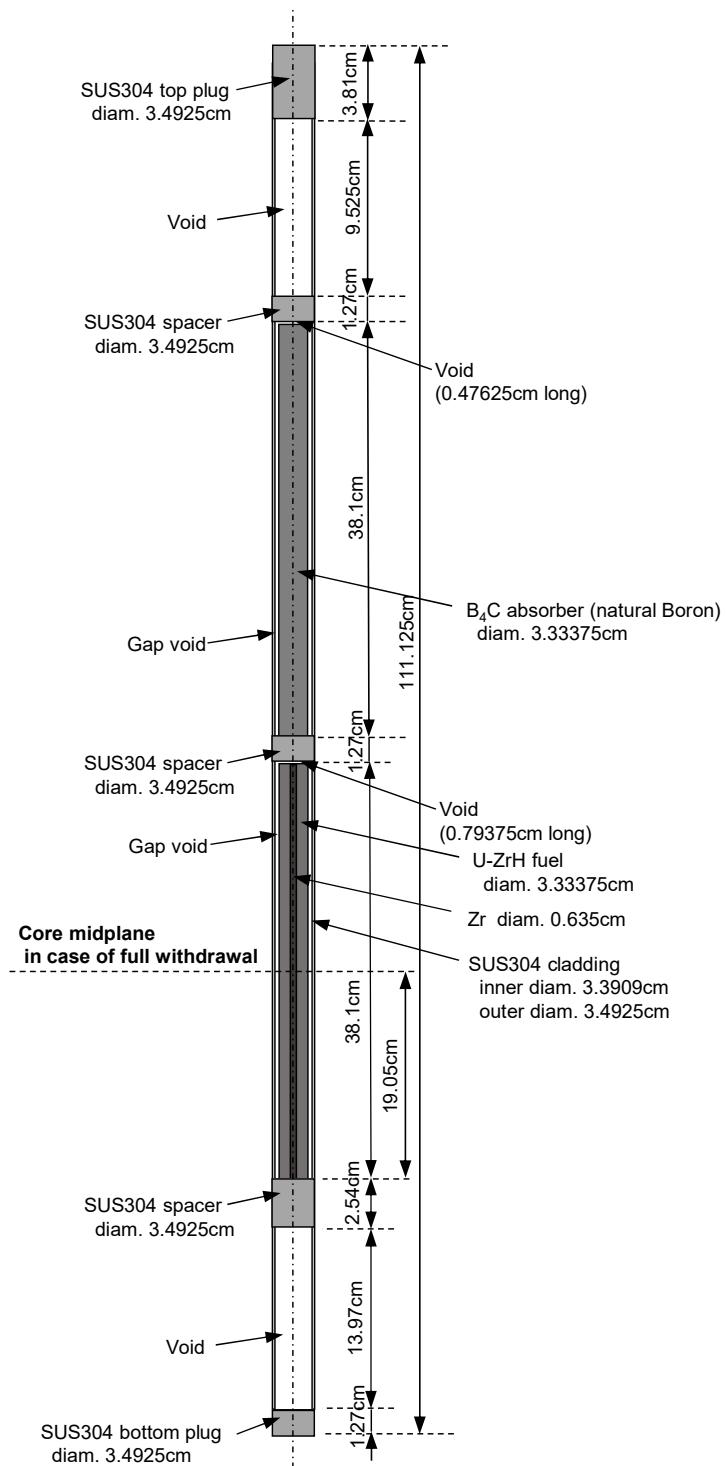


Fig.2.1.2 Calculation model for the control rod with fueled follower of IEU-COMP-THERM-003 benchmark system, quoted from the literature⁴⁾.

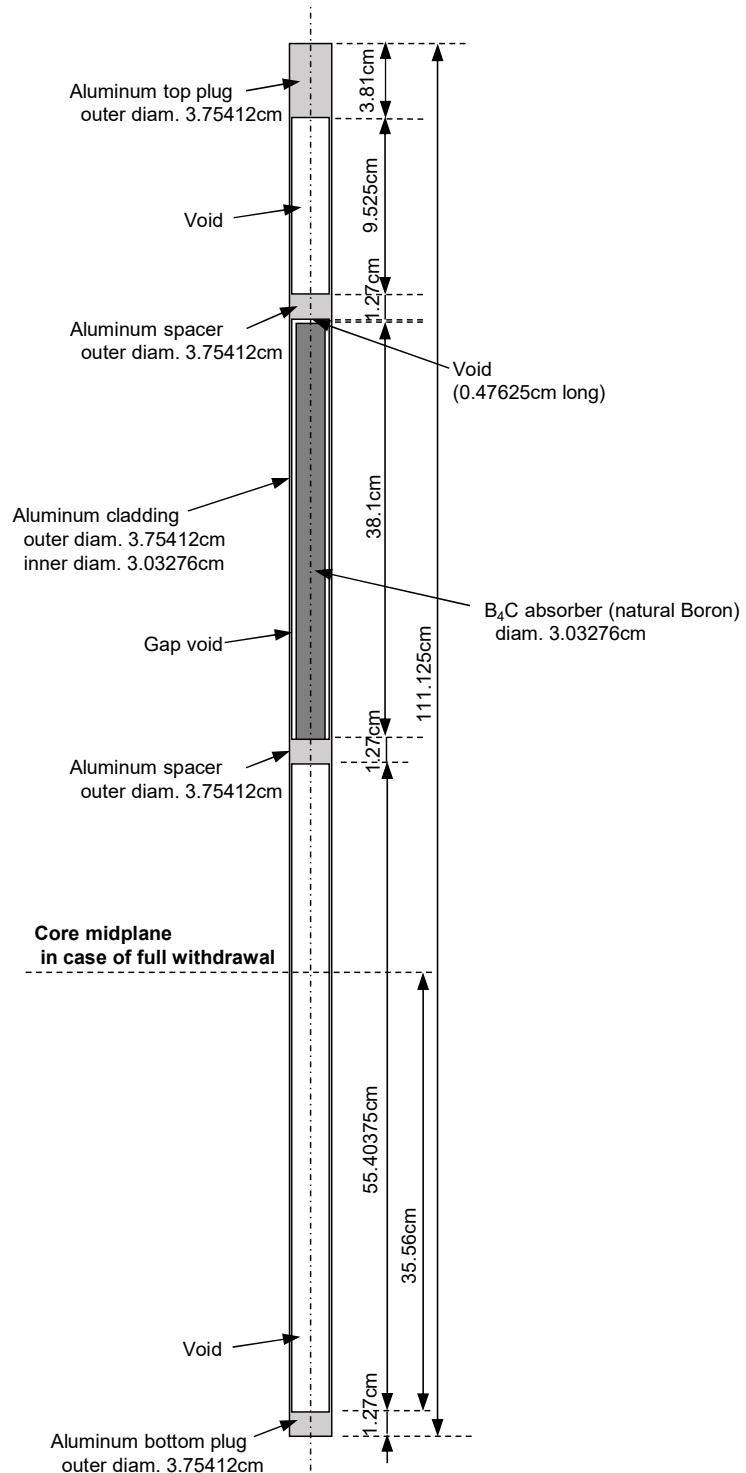
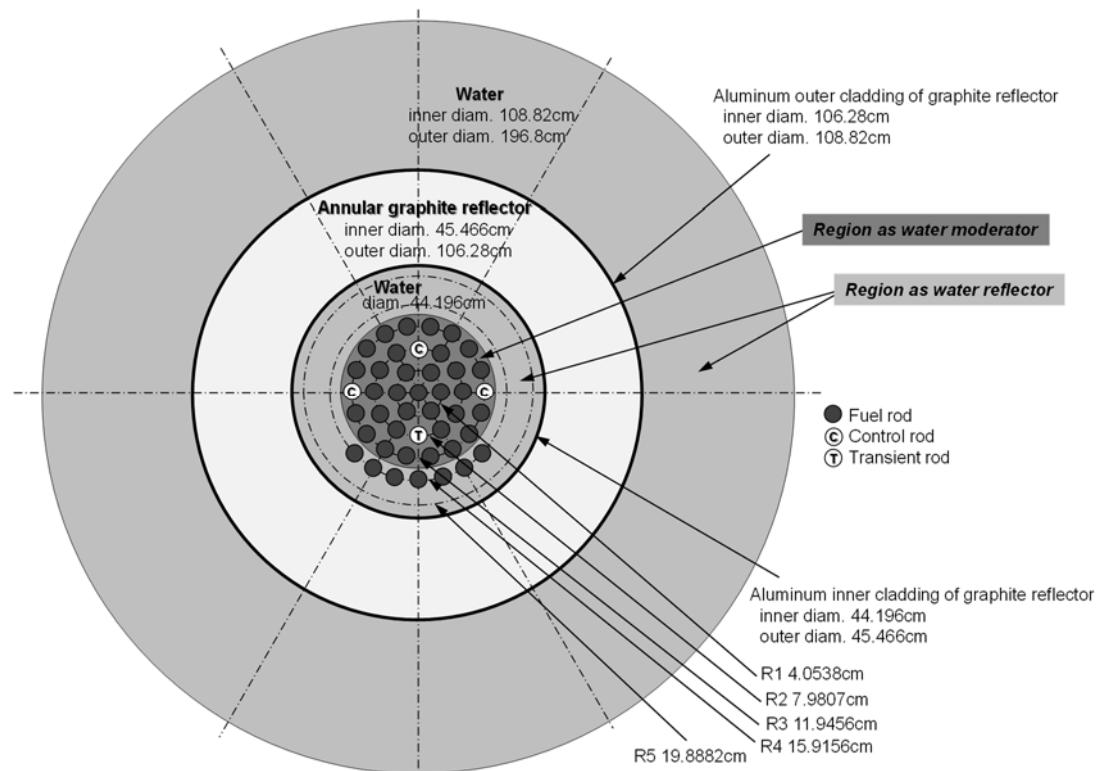
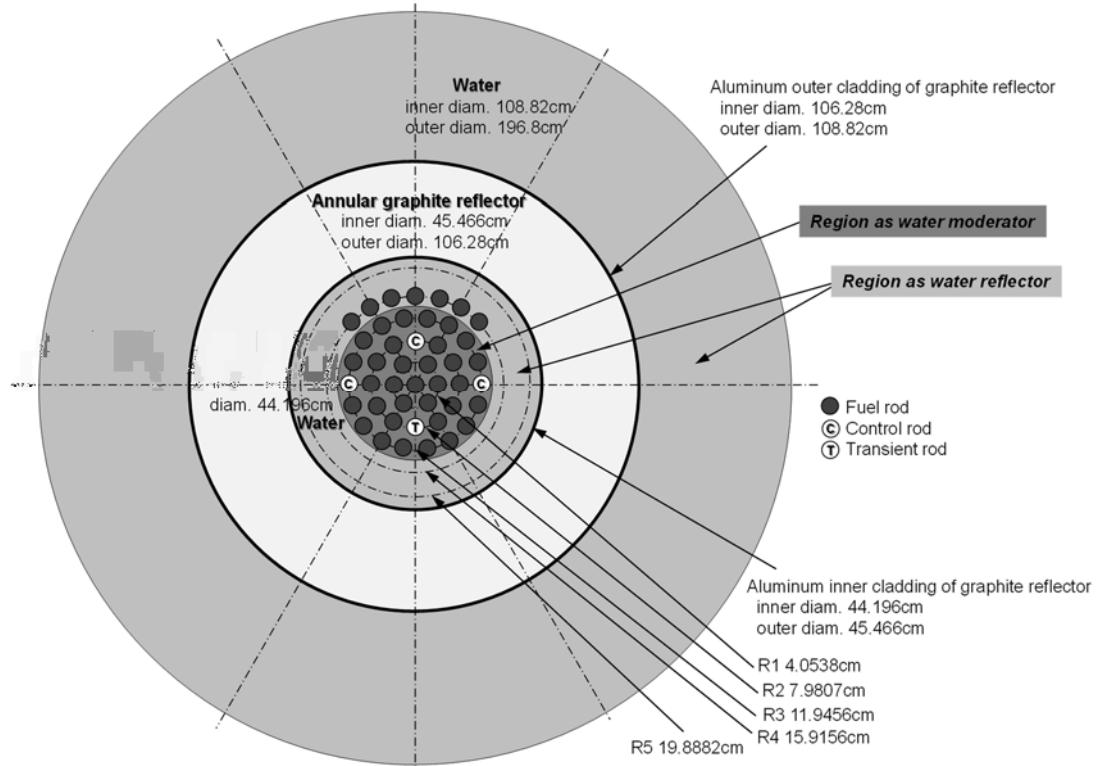


Fig.2.1.3 Calculation model for the transient rod of IEU-COMP-THERM-003 benchmark system, quoted from the literature⁴⁾.



(a) Core 132, 40 fuel rods, 3 control rods with fueled follower, and a transient rod



(b) Core 133, 40 fuel rods, 3 control rods with fueled follower, and a transient rod

Fig.2.1.4 Horizontal layout of calculation model for the core of IEU-COMP-THERM-003 benchmark system, quoted from the literature⁴⁾.

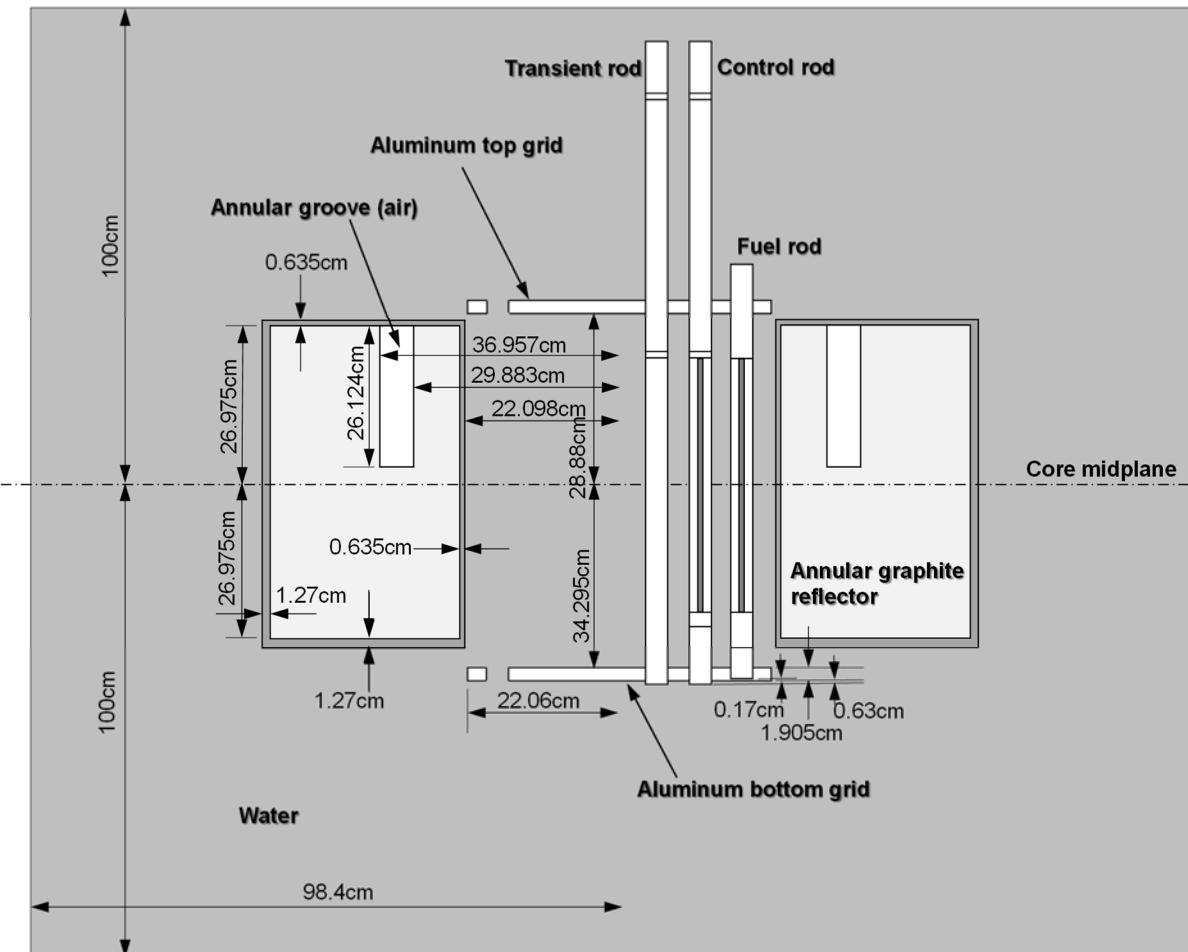


Fig.2.1.5 Vertical layout of calculation model for the core of IEU-COMP-THERM-003 benchmark system, quoted from the literature⁴⁾.

計算に使用した原子個数密度を Table 2.1.1 から Table 2.1.10 に示す。文献で示された原子個数密度から、JENDL-5 で考慮されている核種に詳細化して入力データとした。水の水素と酸素(酸素については JENDL-5 以前のバージョンでは自由ガスモデル)、水素化ジルコニウムの水素とジルコニウム、並びに黒鉛の炭素に対しては熱中性子散乱則(TSL: Thermal neutron Scattering Law)データを用いた。その他については自由ガスモデルとした。体系全体の温度は水の温度に合わせ、Core132、Core133 それぞれ、23.5°C、22.5°C である。

Table 2.1.1 Atomic number density of nuclides in zirconium
for fuel and control rods, quoted from the literature⁴⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
Zr-90	2.2359×10^{-2}
Zr-91	4.8222×10^{-3}
Zr-92	7.2906×10^{-3}
Zr-94	7.2310×10^{-3}
Zr-96	1.1406×10^{-3}

Table 2.1.2 Atomic number density of nuclides in U-ZrH
for fuel rods, quoted from the literature⁴⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
H-1*	5.5253×10^{-2}
Zr-90*	1.8020×10^{-2}
Zr-91*	3.8865×10^{-3}
Zr-92*	5.8760×10^{-3}
Zr-94*	5.8279×10^{-3}
Zr-96*	9.1931×10^{-4}
U-235	3.6801×10^{-4}
U-238	1.4625×10^{-3}

* TSL data used as ZrH

Table 2.1.3 Atomic number density of nuclides in U-ZrH
for control rods, quoted from the literature⁴⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
H-1*	5.6284×10^{-2}
Zr-90*	1.8357×10^{-2}
Zr-91*	3.9591×10^{-3}
Zr-92*	5.9858×10^{-3}
Zr-94*	5.9368×10^{-3}
Zr-96*	9.3648×10^{-4}
U-235	3.7487×10^{-4}
U-238	1.4898×10^{-3}

* TSL data used as ZrH

Table 2.1.4 Atomic number density of nuclides in B₄C
for control and transient rods, quoted from the literature⁴⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
B-10	2.1443×10^{-2}
B-11	8.6310×10^{-2}
C-12	2.7085×10^{-2}
C-13	2.7034×10^{-4}

Table 2.1.5 Atomic number density of nuclides in SUS304
for fuel and control rods, quoted from the literature⁴⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
C-12	3.1330×10^{-4}
C-13	3.1271×10^{-6}
Si-28	3.1315×10^{-3}
Si-29	1.5360×10^{-4}
Si-30	9.7997×10^{-5}
P-31	6.1353×10^{-5}
S-32	5.6408×10^{-5}
S-33	4.3791×10^{-7}
S-34	2.3994×10^{-6}
S-36	1.0564×10^{-8}
Cr-50	7.8515×10^{-4}
Cr-52	1.4559×10^{-2}
Cr-53	1.6197×10^{-3}
Cr-54	3.9572×10^{-4}
Mn-55	1.7295×10^{-3}
Fe-54	3.4406×10^{-3}
Fe-56	5.2083×10^{-2}
Fe-57	1.1817×10^{-3}
Fe-58	1.5455×10^{-4}
Ni-58	5.5805×10^{-3}
Ni-60	2.0780×10^{-3}
Ni-61	8.8847×10^{-5}
Ni-62	2.7872×10^{-4}
Ni-64	6.8762×10^{-5}

Table 2.1.6 Atomic number density of nuclides in aluminum for transient rods,
annular graphite reflector cladding and top/bottom grid, quoted from the
literature⁴⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
Al-27	6.0262×10^{-2}

Table 2.1.7 Atomic number density of nuclides in molybdenum
for fuel rods, quoted from the literature⁴⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
Mo-92	9.9114×10^{-3}
Mo-94	6.0465×10^{-3}
Mo-95	1.0297×10^{-2}
Mo-96	1.0676×10^{-2}
Mo-97	6.0492×10^{-3}
Mo-98	1.5129×10^{-2}
Mo-100	5.9167×10^{-3}

Table 2.1.8 Atomic number density of nuclides in axial graphite reflector for fuel rods and annular graphite reflector, quoted from the literature⁴⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
C-12*	7.9428×10^{-2}
C-13*	7.9279×10^{-4}

* TSL data used as graphite-P00

Table 2.1.9 Atomic number density of nuclides in water for moderator and reflector, quoted from the literature⁴⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
H-1*	6.6689×10^{-2}
O-16*	3.3344×10^{-2}

* TSL data used as H₂O

Table 2.1.10 Atomic number density of nuclides in air, quoted from the literature⁴⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
N-14	4.3330×10^{-5}
N-15	1.4859×10^{-7}
O-16	1.0868×10^{-5}

2.2 IEU-COMP-THERM-013 の計算モデル

IEU-COMP-THERM-013は、国際炉物理実験評価プロジェクト(IRPhEP)のハンドブックから ICSBEP ハンドブックデータとして採用されたものであり、IRPhEP ハンドブックでの識別番号は NRAD-FUND-RESR-001である⁵⁾。

解析対象は、IEU-COMP-THERM-003と同様の250kW の TRIGA Mark II 型原子炉であり、SUS304被覆のウラン・エルビウム水素化ジルコニウム燃料棒(²³⁵U 濃縮度 19.75%)及びアルミニウム合金被覆の制御棒から構成される炉心の周囲に黒鉛反射体ブロックを配置している⁵⁾。制御棒として粗調整用のシム棒2本と臨界調整用の調整棒1本を有するが、いずれも構造と駆動範囲は同じである。燃料棒及び制御棒の計算モデルをそれぞれ Fig.2.2.1 及び Fig.2.2.2 に示す。高さ方向の炉心中心は、燃料棒のウラン・エルビウム水素化ジルコニウムのスタック長中央に位置しており、全挿入状態での制御棒の炉心中心位置をこれらの図に記している。

ベンチマーク体系全体の平面図及び立面図をそれぞれ Fig.2.2.3 及び Fig.2.2.4 に示す。ベンチマーク体系には 56 本の燃料棒を装荷した Case1 core と 60 本の燃料棒を装荷した Case2 core と呼ばれる二種類の体系がある。Fig.2.2.3 の平面図に示すように、水を満たしたタンクに 4 本ないし 3 本の燃料棒クラスターで構成した集合体を一定間隔で平面上に配列して装荷している。燃料集合体が装荷される領域の外側には、黒鉛反射体ブ

ロックが合計 12 体装荷されている。Fig.2.2.4 の立面図に示すように、制御棒の高さ方向の位置はパラメータ RP(0~38.1cm)について可変とした MVP 入力データを作成し、RP=0cm で全挿入、RP=38.1cm で全引き抜きとした。制御棒位置 RP は 2 本のシム棒及び 1 本の調整棒それぞれについて、独立して入力できるようにした。

また IEU-COMP-THERM-003 と同様に、燃料棒周囲の水減速材の影響について検討するために、Fig.2.2.3 に示すように燃料集合体内については減速材としての水の領域、これ以外を反射体としての水の領域に分け、別々の領域として計算した。高さ方向の水減速材の領域は便宜的に燃料棒長の範囲とした。

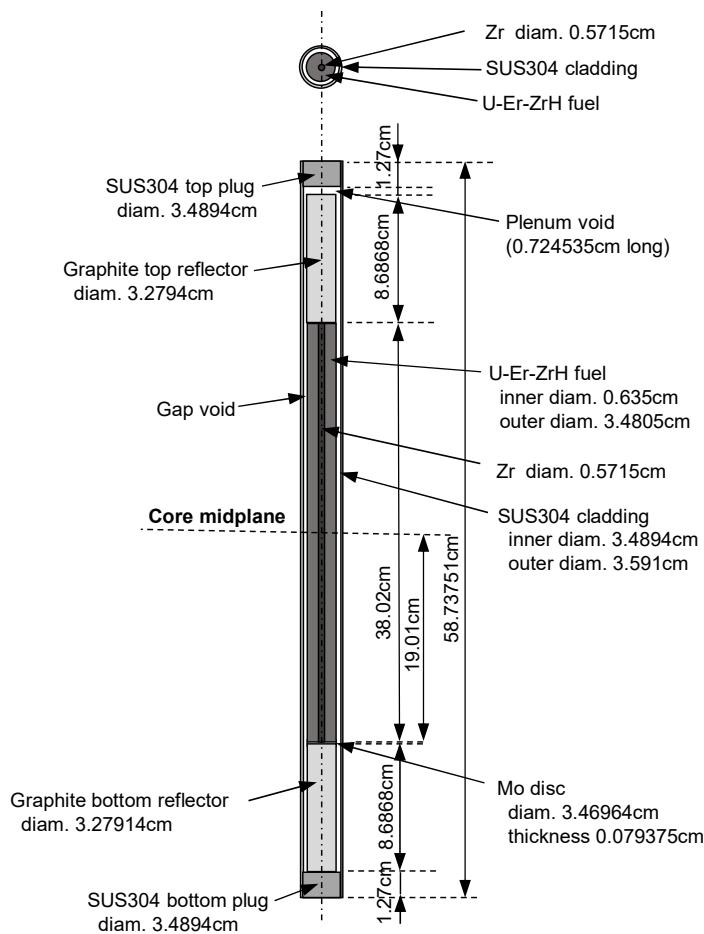


Fig.2.2.1 Calculation model for the fuel rod of IEU-COMP-THERM-013(NRAD-FUND-RESR-001) benchmark system, quoted from the literature⁵⁾.

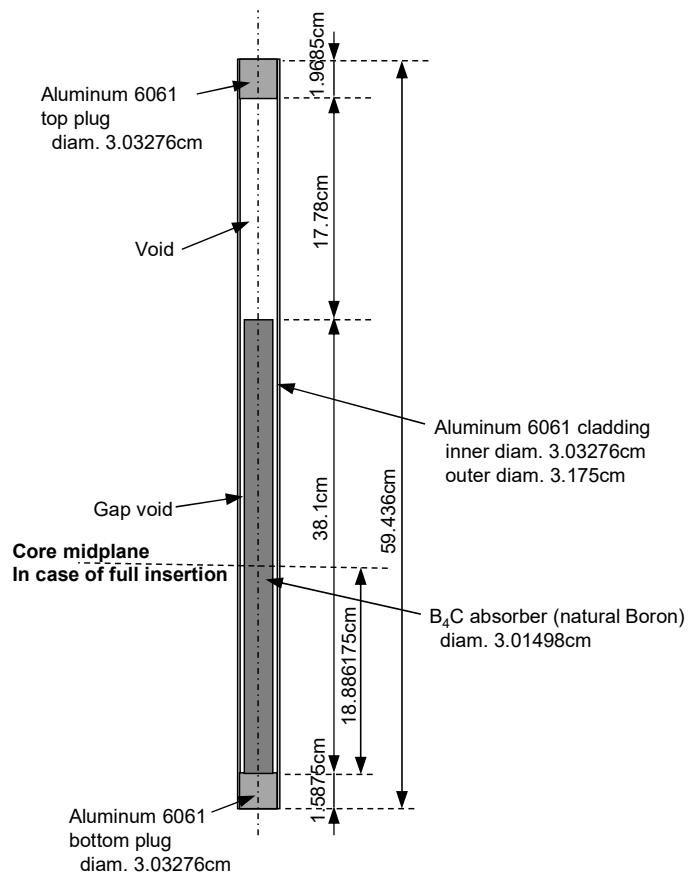
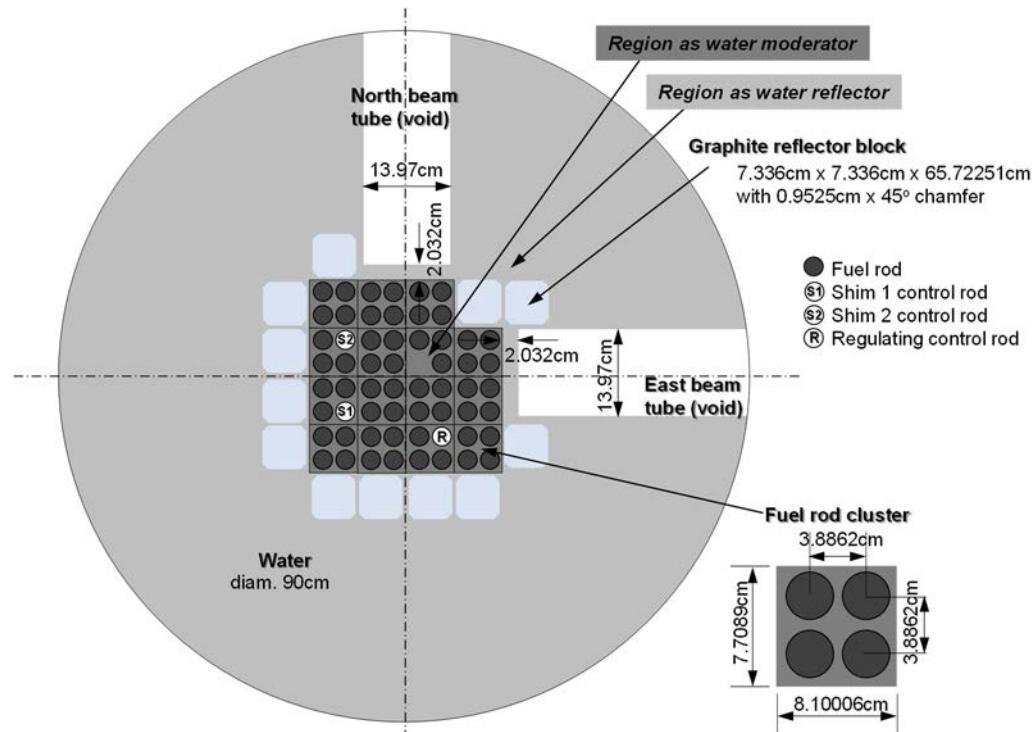
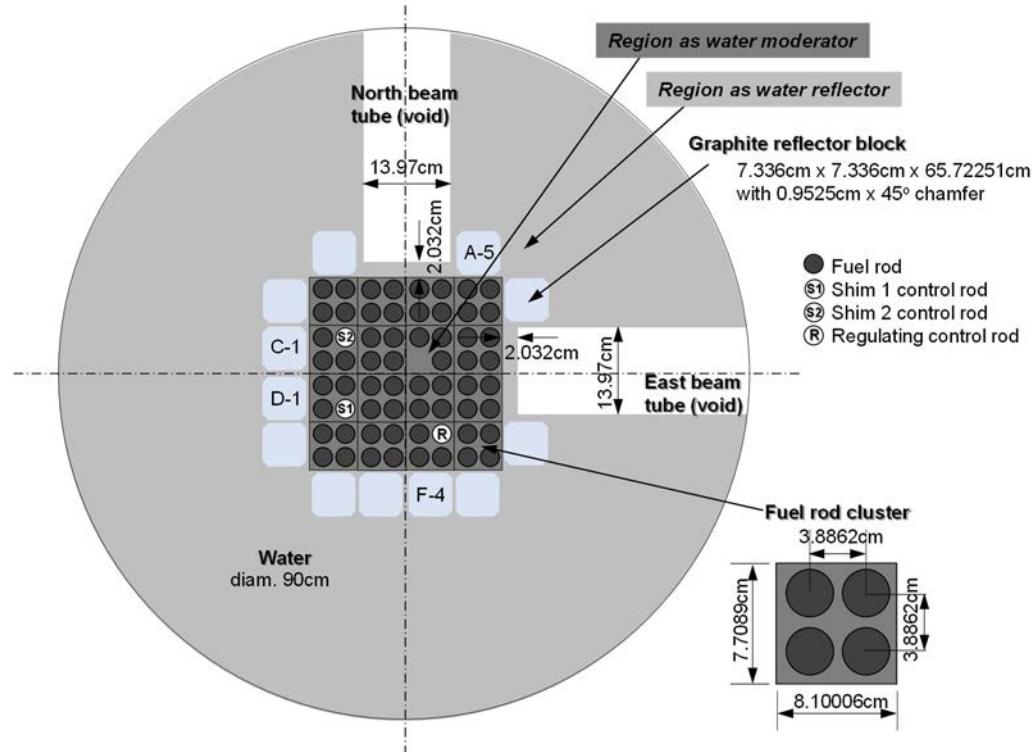


Fig.2.2.2 Calculation model for the shim and regulating control rods of IEU-COMP-THERM-013(NRAD-FUND-RESR-001) benchmark system, quoted from the literature⁵⁾.



(a) Case 1 core, 56 fuel rods, 2 shim control rods, and a regulating control rod



(b) Case 2 core, 60 fuel rods, 2 shim control rods, and a regulating control rod

Fig.2.2.3 Horizontal layout of calculation model for the core of IEU-COMP-THERM-013(NRAD-FUND-RESR-001) benchmark system, quoted from the literature^{5).}

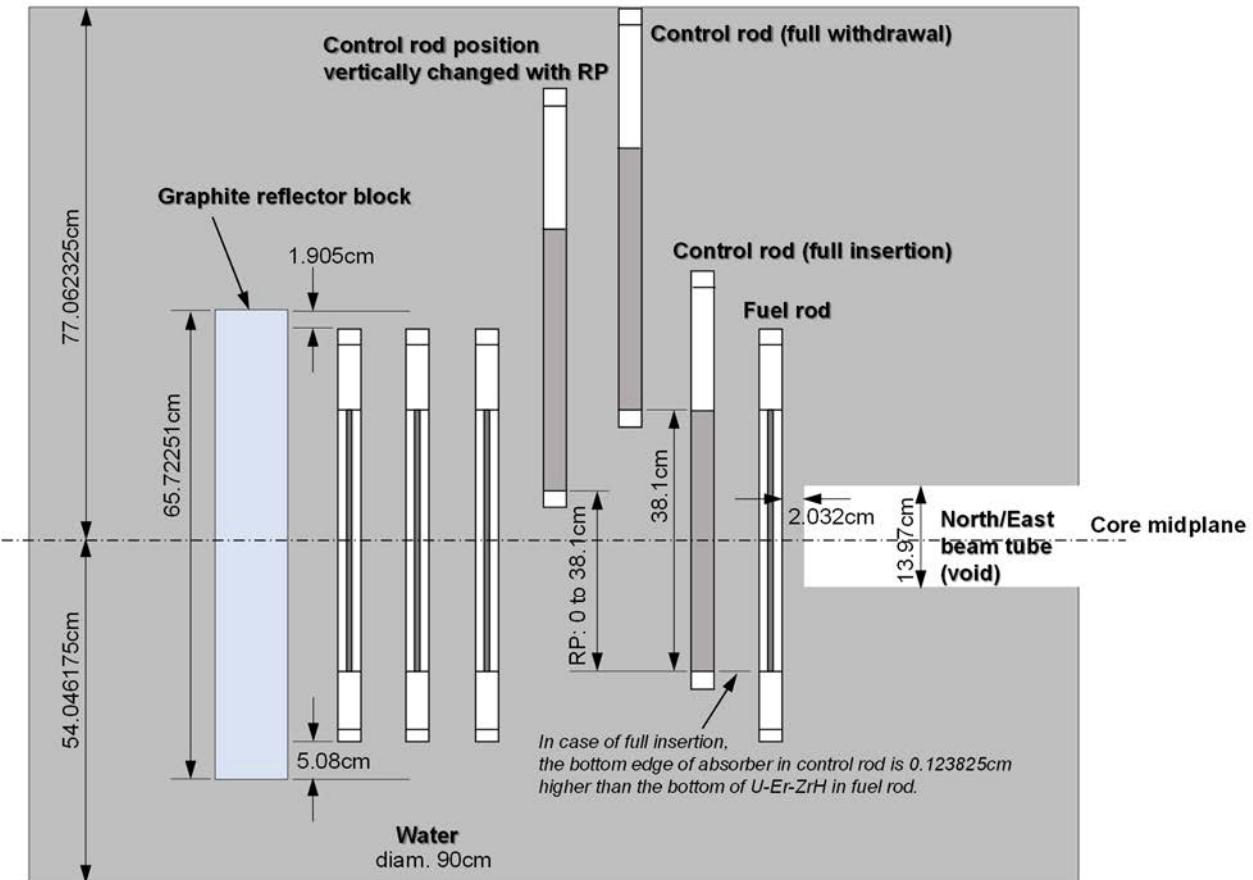


Fig.2.2.4 Vertical layout of calculation model for the core of IEU-COMP-THERM-013(NRAD-FUND-RESR-001) benchmark system, quoted from the literature⁵⁾.

中性子実効増倍率のベンチマーク解析では、56 本の燃料棒を装荷した Case1 core の臨界条件である制御棒位置として、シム棒については 2 本ともに RP=38.1cm(全引き抜き位置)、調整棒については RP=29.5275cm としている。60 本の燃料棒を装荷した Case2 core の臨界条件としては、同様にシム棒については 2 本ともに RP=38.1cm(全引き抜き位置)、調整棒については RP=20.4216cm としている。Case2 core のほうが Case1 core よりも燃料棒を 4 本(燃料集合体 1 体に相当)多く装荷しているため、調整棒の RP が小さく中性子吸收体の炉心への挿入量が大きい。

IEU-COMP-THERM-013 では、中性子実効増倍率だけではなく制御棒等の反応度価値、原子炉停止余裕及び過剰反応度についてもベンチマーク解析条件が示されている。

シム棒の反応度価値については、2 本のシム棒それぞれについて全引き抜き状態から制御棒落下法によって評価している。シム棒反応度価値の解析条件である制御棒位置を Table 2.2.1 に示す。

Table 2.2.1 Control rod position for benchmark analyses on shim control rod worths, quoted from the literature⁵⁾.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Position # ⁵⁾	Control Rod Position: RP (cm)		
				Shim1 Rod	Shim2 Rod	Regulating Rod
1	56 Fuel Elements	Shim 1 Worth (Rod Drop)	a1	38.1	38.1	29.5656
			a2	0.0	38.1	29.5656
2	56 Fuel Elements	Shim 2 Worth (Rod Drop)	a1	38.1	38.1	29.5656
			a2	38.1	0.0	29.5656
4	60 Fuel Elements	Shim 1 Worth (Rod Drop)	a1	38.1	38.1	20.4216
			a2	0.0	38.1	20.4216
5	60 Fuel Elements	Shim 2 Worth (Rod Drop)	a1	38.1	38.1	20.4216
			a2	38.1	0.0	20.4216

調整棒の反応度価値については、調整棒の部分挿入範囲の反応度価値を制御棒落下法によって評価するとともに、この部分挿入状態から全引き抜き状態までに加わる反応度をシム棒の挿入で補償しながら正ペリオド法によって評価し、これらの合計の反応度を調整棒の反応度価値としている。調整棒反応度価値の解析条件である制御棒位置を Table 2.2.2 に示す。

原子炉停止余裕は、原子炉運転中に全ての制御棒が同時に全挿入した際の炉心の負の反応度であるため、全制御棒の反応度価値から炉心の過剰反応度を差し引いて評価する必要がある。ベンチマーク解析条件では、上記の 2 本のシム棒の反応度価値の合計に加えて調整棒の部分反応度価値(臨界状態での部分挿入範囲の反応度価値)を加えたものとしている。

炉心の過剰反応度については、調整棒の部分挿入状態から全引き抜き状態までに加わる反応度として評価し、調整棒の反応度価値と同様に Table 2.2.2 に示した正ペリオド法での制御棒位置の条件を適用して求めた。

黒鉛反射体ブロックの反応度価値については、Fig.2.2.3 の Case2 core について A-5、C-1、D-1 及び F-4 のブロックをそれぞれ水に置換した場合の炉心の過剰反応度を正ペリオド法で評価し、置換前の炉心の過剰反応度との差からこれら 4 つの黒鉛反射体ブロックの反応度価値をそれぞれ評価している。黒鉛反射体ブロックを水に置換した場合の解析条件である制御棒位置を Table 2.2.3 に示す。

実験用ドライチューブ(ボイド管)の反応度価値については、Fig.2.2.5 に示す Case2 core について評価している。実験用ドライチューブの計算モデルを Fig.2.2.6 に示す。ドライチューブの下端の高さは燃料棒の下端の高さと同じである。中性子実効増倍率のベ

ンチマーク解析と同じ制御棒位置条件(シム棒:RP=38.1cm、調整棒:RP=20.4216cm)により、ドライチューブの有無による中性子実効増倍率の差から反応度価値を評価する。

これらの反応度価値については、ドル単位でベンチマーク実験データが示されており、実効遅発中性子割合として 0.00750 ± 0.000375 (5%,1 σ)が示されている⁵⁾。また、反応度価値は、次式のように中性子実効増倍率の逆数の差によって計算した。

$$\rho(\$) = \frac{1}{\beta_{eff}} \left(\frac{k_1 - 1}{k_1} - \frac{k_2 - 1}{k_2} \right) = \frac{1}{\beta_{eff}} \left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1} \right) \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、
 $\rho(\$)$: ドル単位の反応度、
 k_1, k_2 : 中性子実効増倍率、
 β_{eff} : 実効遅発中性子割合、
をそれぞれ表す。

Table 2.2.2 Control rod position for benchmark analyses on regulating control rod worths, quoted from the literature⁵⁾.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Position # ⁵⁾	Control Rod Position: RP (cm)		
				Shim1 Rod	Shim2 Rod	Regulating Rod
3	56 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Rod Drop)	a1	38.1	38.1	29.5656
			a2	38.1	38.1	0.0
3	56 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Positive Period)	b1	38.1	38.1	29.5656
			b2	38.1	38.1	31.6992
3	56 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Positive Period)	c1	35.6616	35.6616	31.6992
			c2	35.6616	35.6616	34.4043
3	56 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Positive Period)	d1	34.0614	34.0614	34.4043
			d2	34.0614	34.0614	38.1
6	60 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Rod Drop)	a1	38.1	38.1	20.4216
			a2	38.1	38.1	0.0
6	60 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Positive Period)	b1	38.1	38.1	20.4216
			b2	38.1	38.1	21.9837
6	60 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Positive Period)	c1	35.3568	35.3568	21.9837
			c2	35.3568	35.3568	23.8125
6	60 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Positive Period)	d1	33.2994	33.2994	23.8125
			d2	33.2994	33.2994	25.6794
6	60 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Positive Period)	e1	31.6230	31.6230	25.6794
			e2	31.6230	31.6230	27.6987
6	60 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Positive Period)	f1	30.2133	30.2133	27.6987
			f2	30.2133	30.2133	30.0228
6	60 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Positive Period)	g1	28.9941	28.9941	30.0228
			g2	28.9941	28.9941	32.5755
6	60 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Positive Period)	h1	27.9273	27.9273	32.5755
			h2	27.9273	27.9273	34.6329
6	60 Fuel Elements	Partial Reg Worth (Positive Period)	i1	27.3939	27.3939	34.6329
			i2	27.3939	27.3939	38.1

Table 2.2.3 Control rod position for benchmark analyses on graphite reflector block worths, quoted from the literature⁵⁾.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Position # ⁵⁾	Control Rod Position: RP (cm)		
				Shim1 Rod	Shim2 Rod	Regulating Rod
11	60 Fuel Elements (Block A-5 Out)	Excess Reactivity (Positive Period)	a1	38.1	38.1	22.0599
			a2	38.1	38.1	38.1
12	60 Fuel Elements (Block C-1 Out)	Excess Reactivity (Positive Period)	a1	38.1	38.1	24.9936
			a2	38.1	38.1	38.1
13	60 Fuel Elements (Block D-1 Out)	Excess Reactivity (Positive Period)	a1	38.1	38.1	25.1460
			a2	38.1	38.1	38.1
14	60 Fuel Elements (Block F-4 Out)	Excess Reactivity (Positive Period)	a1	38.1	38.1	24.6507
			a2	38.1	38.1	38.1

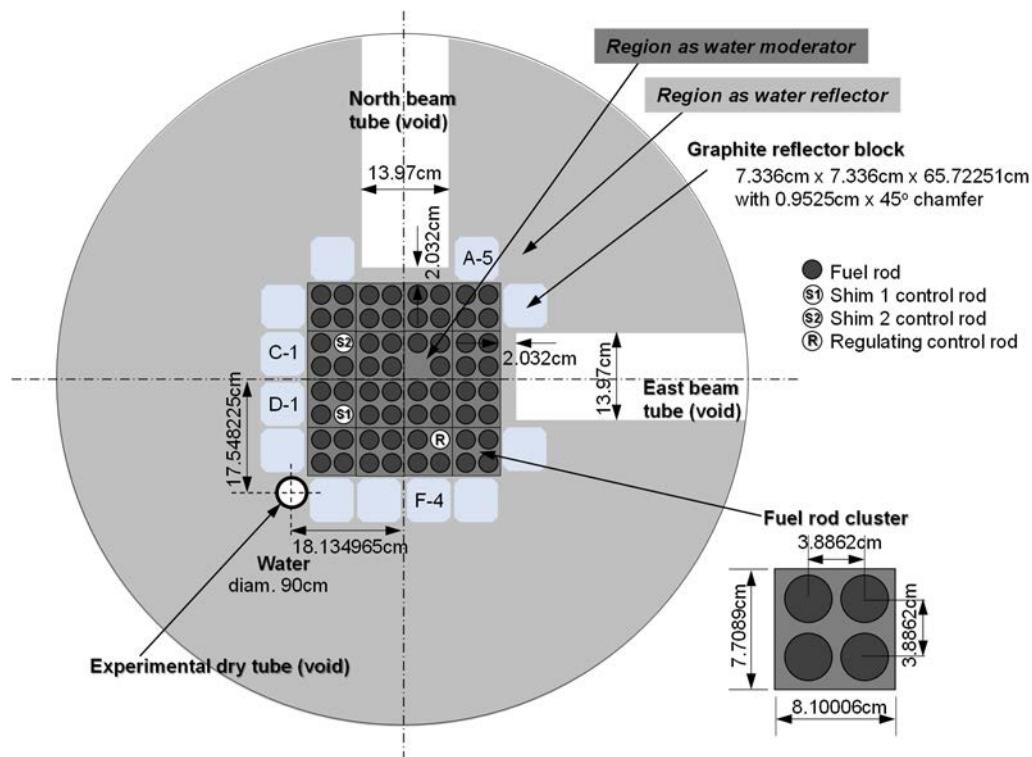


Fig.2.2.5 Horizontal layout of calculation model for reactivity worths of the experimental dry tube (void) in Case2 core of IEU-COMP-THERM-013(NRAD-FUND-RESR-001) benchmark system, quoted from the literature⁵⁾.

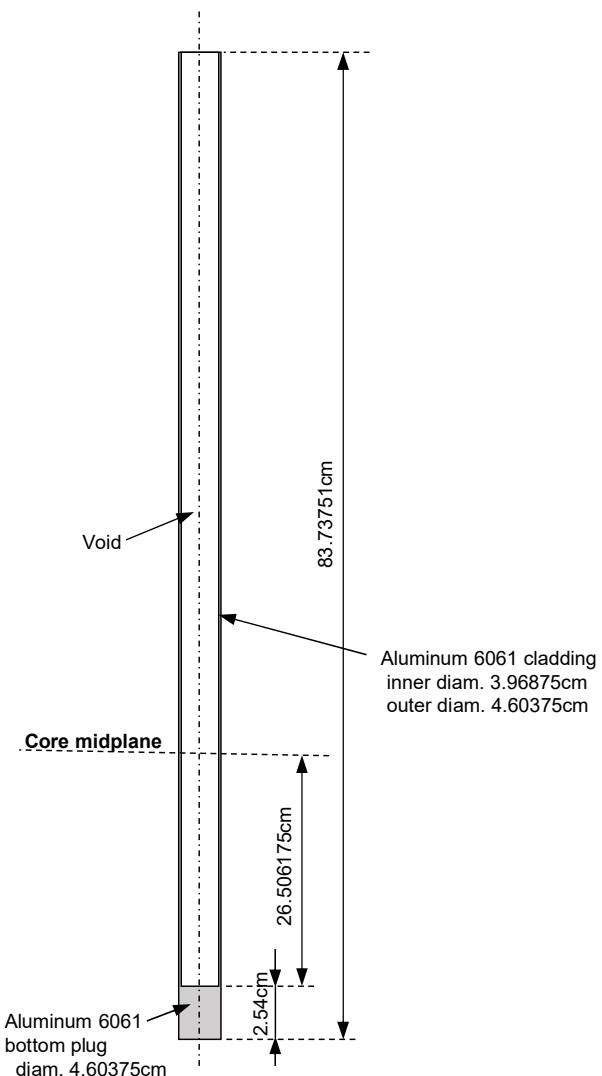


Fig.2.2.6 Calculation model for the experimental dry tube (void) of IEU-COMP-THERM-013(NRAD-FUND-RESR-001) benchmark system, quoted from the literature⁵⁾.

計算に使用した原子個数密度を Table 2.2.4 から Table 2.2.14 に示す。文献で示された原子個数密度から、JENDL-5 で考慮されている核種に詳細化して入力データとした。熱中性子散乱則(TSL)データの扱いは IEU-COMP-THERM-003 の解析と同じである。体系全体の温度は 300K である。なお、Table 2.2.4 の燃料棒中心のジルコニウム、Table 2.2.7 の制御棒の炭化ホウ素、Table 2.2.8 の燃料被覆材のステンレス鋼、Table 2.2.9 のアルミニウム、Table 2.2.10 の燃料棒内のモリブデンディスク及び Table 2.2.12 の燃料棒内の黒鉛反射体については、IEU-COMP-THERM-003 と同様の物質と考えられるが、ベンチマークデータとして示されている原子個数密度は異なっている。その理由は明らかではないが、計算では、全ての物質について IEU-COMP-THERM-003、IEU-COMP-THERM-013 それぞれのベンチマーク計算モデルとして示された原子個数密度を使用した。

Table 2.2.4 Atomic number density of nuclides in zirconium for fuel rods, quoted from the literature⁵⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
Zr-90	2.2387×10^{-2}
Zr-91	4.8283×10^{-3}
Zr-92	7.2998×10^{-3}
Zr-94	7.2401×10^{-3}
Zr-96	1.1421×10^{-3}

Table 2.2.5 Atomic number density of nuclides in U-Er-ZrH
for fuel rods in Case1 core, quoted from the literature⁵⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
H-1*	5.0620×10^{-2}
B-10	8.2234×10^{-8}
B-11	3.0105×10^{-7}
C-12	1.0674×10^{-3}
C-13	1.0654×10^{-5}
Zr-90*	1.6719×10^{-2}
Zr-91*	3.6058×10^{-3}
Zr-92*	5.4516×10^{-3}
Zr-94*	5.4070×10^{-3}
Zr-96*	8.5291×10^{-4}
Er-162**	3.3344×10^{-7}
Er-164**	3.7937×10^{-6}
Er-166**	7.8432×10^{-5}
Er-167**	5.3216×10^{-5}
Er-168**	6.2403×10^{-5}
Er-170**	3.4082×10^{-5}
Hf-174	1.3718×10^{-9}
Hf-176	4.3582×10^{-8}
Hf-177	1.5488×10^{-7}
Hf-178	2.2594×10^{-7}
Hf-179	1.1218×10^{-7}
Hf-180	2.8730×10^{-7}
U-234	9.9283×10^{-6}
U-235	1.0836×10^{-3}
U-236	1.2032×10^{-5}
U-238	4.3312×10^{-3}

* TSL data used as ZrH

** JENDL-3.3 data used in case of JENDL-3.2 calculation

Table 2.2.6 Atomic number density of nuclides in U-Er-ZrH
for fuel rods in Case2 core, quoted from the literature⁵⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
H-1*	5.0614×10^{-2}
B-10	8.2238×10^{-8}
B-11	3.0106×10^{-7}
C-12	1.0674×10^{-3}
C-13	1.0654×10^{-5}
Zr-90*	1.6717×10^{-2}
Zr-91*	3.6054×10^{-3}
Zr-92*	5.4509×10^{-3}
Zr-94*	5.4063×10^{-3}
Zr-96*	8.5280×10^{-4}
Er-162**	3.3344×10^{-7}
Er-164**	3.7937×10^{-6}
Er-166**	7.8432×10^{-5}
Er-167**	5.3216×10^{-5}
Er-168**	6.2403×10^{-5}
Er-170**	3.4082×10^{-5}
Hf-174	1.3716×10^{-9}
Hf-176	4.3577×10^{-8}
Hf-177	1.5486×10^{-7}
Hf-178	2.2592×10^{-7}
Hf-179	1.1217×10^{-7}
Hf-180	2.8727×10^{-7}
U-234	9.9323×10^{-6}
U-235	1.0844×10^{-3}
U-236	1.2036×10^{-5}
U-238	4.3326×10^{-3}

* TSL data used as ZrH

** JENDL-3.3 data used in case of JENDL-3.2 calculation

Table 2.2.7 Atomic number density of nuclides in B₄C
for control rods, quoted from the literature⁵⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
B-10	2.1515×10^{-2}
B-11	8.6601×10^{-2}
C-12	2.6762×10^{-2}
C-13	2.6712×10^{-4}

Table 2.2.8 Atomic number density of nuclides in SUS304
for fuel rods, quoted from the literature⁵⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
C-12	1.5885×10^{-4}
C-13	1.5856×10^{-6}
Si-28	6.3511×10^{-4}
Si-29	3.1151×10^{-5}
Si-30	1.9875×10^{-5}
P-31	4.0441×10^{-5}
S-32	3.1461×10^{-6}
S-33	2.4424×10^{-8}
S-34	1.3382×10^{-7}
S-36	5.8920×10^{-10}
Cr-50	7.9618×10^{-4}
Cr-52	1.4764×10^{-2}
Cr-53	1.6425×10^{-3}
Cr-54	4.0129×10^{-4}
Mn-55	8.7693×10^{-4}
Fe-54	3.5865×10^{-3}
Fe-56	5.4292×10^{-2}
Fe-57	1.2318×10^{-3}
Fe-58	1.6111×10^{-4}
Ni-58	5.6590×10^{-3}
Ni-60	2.1073×10^{-3}
Ni-61	9.0097×10^{-5}
Ni-62	2.8264×10^{-4}
Ni-64	6.9729×10^{-5}

Table 2.2.9 Atomic number density of nuclides in aluminum
for control rods and dry tube, quoted from the literature⁵⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
Al-27	5.8593×10^{-2}

Table 2.2.10 Atomic number density of nuclides in molybdenum
for fuel rods, quoted from the literature⁵⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
Mo-92	9.9276×10^{-3}
Mo-94	6.0564×10^{-3}
Mo-95	1.0314×10^{-2}
Mo-96	1.0693×10^{-2}
Mo-97	6.0592×10^{-3}
Mo-98	1.5153×10^{-2}
Mo-100	5.9264×10^{-3}

Table 2.2.11 Atomic number density of nuclides in graphite reflector blocks, quoted from the literature⁵⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
H-1*	2.4649×10^{-2}
C-12**	7.7914×10^{-2}
C-13**	7.7768×10^{-4}
O-16*	1.2325×10^{-2}

* TSL data used as H₂O

** TSL data used as graphite-P00

Table 2.2.12 Atomic number density of nuclides in axial graphite reflector for fuel rods, quoted from the literature⁵⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
C-12*	8.5877×10^{-2}
C-13*	8.5715×10^{-4}

* TSL data used as graphite-P00

Table 2.2.13 Atomic number density of nuclides in water for moderator and reflector in Case1 core, quoted from the literature⁵⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
H-1*	6.6641×10^{-2}
O-16*	3.3320×10^{-2}

* TSL data used as H₂O

Table 2.2.14 Atomic number density of nuclides in water for moderator and reflector in Case2 core, quoted from the literature⁵⁾

Nuclide	Atomic Number Density (1/barn cm)
H-1*	6.6619×10^{-2}
O-16*	3.3309×10^{-2}

* TSL data used as H₂O

3. ベンチマーク計算結果

3.1 中性子実効増倍率

3.1.1 IEU-COMP-THERM-003 の計算結果

IEU-COMP-THERM-003 に対する中性子実効増倍率の計算結果を Table 3.1.1 及び Table 3.1.2 に示す。これらの表には、今回行った MVP と JENDL による計算結果に加えて、IEU-COMP-THERM-003 に掲載の計算結果 (Case# F-1, G-1, F-2, G-2) も比較のため示した。Fig.3.1.1 には、MVP と JENDL による計算結果のみ示している。JENDL-5 による計算については、ウランの核種のみを JENDL-4.0 のデータに変更した条件 (Case# B-1, B-1-1, B-1-2, B-2, B-2-1, B-2-2) についても行い、その結果も合わせて示している。MVP と JENDL による計算結果は JENDL のバージョンによるばらつきはあるものの、3 標準偏差以内でベンチマーク実験値と一致し、概ね良好な予測精度と考えられる。JENDL バージョン間のばらつきも 3 標準偏差内に包含されている。

IEU-COMP-THERM-003 に掲載の計算結果として、連続エネルギーモンテカルロコード MCNP4B (Case# F-1, F-2) と多群モンテカルロコード KENO-V.a (Case# G-1, G-2) もまた 3 標準偏差以内でベンチマーク実験値と一致しており、MVP と JENDL による計算はこれらと同程度の予測精度を有することが確認できる。

さらに詳しく JENDL-5 と JENDL-4.0 の計算結果に着目すると、Table 3.1.1 及び Table 3.1.2 より JENDL-5 による中性子実効増倍率は、Core132 と Core133 ともに JENDL-4.0 よりも約 0.6% 大きくなった。全てのウランの核種を JENDL-4.0 のデータに変更した場合の JENDL-5 による中性子実効増倍率 (Case# B-1, B-2) は、Core132 と Core133 ともに JENDL-4.0 との差は約 0.4% と小さくなり、特にウラン-235 の変更 (Case# B-1-1, B-2-1) は JENDL-5 による中性子実効増倍率が JENDL-4.0 よりも大きくなる要因の一つと考えられる。

JENDL-5 と JENDL-4.0 との比較については、さらに JENDL-5 の計算において熱中性子散乱則 (TSL) データを JENDL-4.0 のデータに変更した計算を行って検討した。結果を Table 3.1.3 及び Table 3.1.4、並びに Fig.3.1.2 に示す。これらに示すように、水素化ジルコニウム、水、黒鉛の TSL データを全て JENDL-4.0 に変更した場合 (Case# Q-1, Q-2) は、JENDL-5 と JENDL-4.0 による中性子実効増倍率の差は Core132 と Core133 ともに約 0.2% と小さくなつた。この要因のほとんどは水素化ジルコニウムの TSL データの変更によるものであり、水素化ジルコニウムの TSL データのみ変更した場合 (Case# N-1, N-2) の JENDL-5 と JENDL-4.0 による中性子実効増倍率の差は Core132 と Core133 ともに約 0.1% であった。このことから、水素化ジルコニウムの TSL データの変更も JENDL-5 による中性子実効増倍率が JENDL-4.0 よりも大きくなる要因の一つと考えられる。

ウラン水素化ジルコニウム燃料と水減速材とでの中性子スペクトルについて、JENDL-5による計算結果を Fig.3.1.3 及び Fig.3.1.4 に示す。また、これら中性子スペクトルの JENDL のバージョン間での比較を Fig.3.1.5 から Fig.3.1.8 に示す。これらの中性子スペクトルは核分裂率当たりの中性子束としている。単位粒子源当たりの核分裂率の計算結果を Table 3.1.5 及び Table 3.1.6 に示す。

Fig.3.1.3 及び Fig.3.1.4 より、IEU-COMP-THERM-003 の体系での熱中性子束は、ウラン水素化ジルコニウム燃料中のほうが水減速材中よりも大きく、中性子減速の寄与は水素化ジルコニウムのほうが水よりも大きい。このため、水素化ジルコニウムの TSL データは、中性子実効増倍率に与える効果が水の TSL データよりも大きくなる。Fig.3.1.5 から Fig.3.1.8 より核分裂率当たりの中性子束として整理したスペクトルについては、JENDL のバージョン間での大きな違いは見られない。

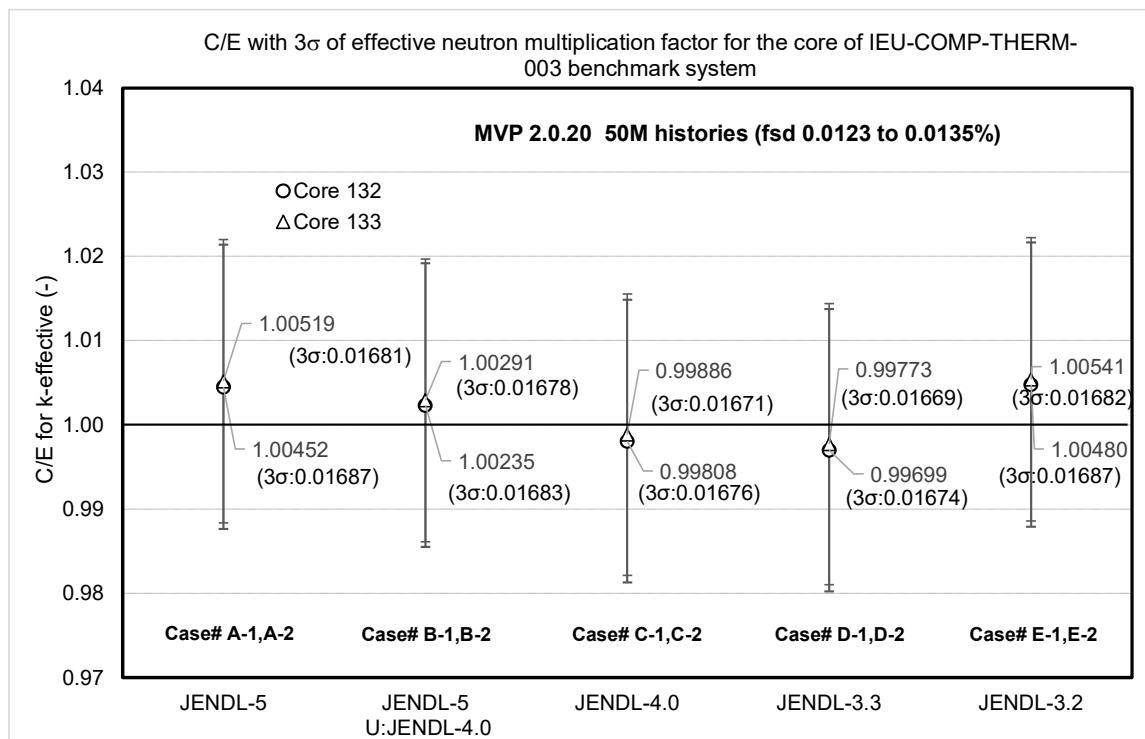


Fig.3.1.1 Comparison of calculated effective neutron multiplication factors for Core132 and Core133 of IEU-COMP-THERM-003 based on JENDL-5, 4.0, 3.3 and 3.2.

Table 3.1.1 Comparison of calculated effective neutron multiplication factors for Core132 of IEU-COMP-THERM-003.

Case #	Analysis Code	Library	Calculation		Experiment (keff $\pm 3\sigma$)	C/E $\pm 3\sigma$
			(keff \pm %fsd)	(keff $\pm 3\sigma$)		
A-1	MVP2	JENDL-5	1.00512 \pm 0.0130	1.00512 \pm 0.00039	1.0006 \pm 0.0168	1.00452 \pm 0.01687
B-1	MVP2	JENDL-5; uranium data changed into those of JENDL-4.0	1.00295 \pm 0.0129	1.00295 \pm 0.00039	1.0006 \pm 0.0168	1.00235 \pm 0.01683
B-1-1	MVP2	JENDL-5; U-235 data changed into those of JENDL-4.0	1.00335 \pm 0.0128	1.00335 \pm 0.00039	1.0006 \pm 0.0168	1.00275 \pm 0.01684
B-1-2	MVP2	JENDL-5; U-238 data changed into those of JENDL-4.0	1.00463 \pm 0.0126	1.00463 \pm 0.00038	1.0006 \pm 0.0168	1.00403 \pm 0.01686
C-1	MVP2	JENDL-4.0	0.99867 \pm 0.0129	0.99867 \pm 0.00039	1.0006 \pm 0.0168	0.99808 \pm 0.01676
D-1	MVP2	JENDL-3.3	0.99759 \pm 0.0127	0.99759 \pm 0.00038	1.0006 \pm 0.0168	0.99699 \pm 0.01674
E-1	MVP2	JENDL-3.2	1.00540 \pm 0.0128	1.00540 \pm 0.00039	1.0006 \pm 0.0168	1.00480 \pm 0.01687
F-1	MCNP4B	ENDF/B-VI	0.9994 \pm 0.0006	1.0006 \pm 0.0168	0.9988 \pm 0.0168	
G-1	KENO-V.a	ENDF/B-V, 44-group	1.0028 \pm 0.0012	1.0006 \pm 0.0168	1.0022 \pm 0.0169	

Calculation results for Case # A-1 to E-1 are obtained in the present work.

Calculation results for Case # F-1 to G-1 are shown in the literature⁴⁾.

Table 3.1.2 Comparison of calculated effective neutron multiplication factors for Core133 of IEU-COMP-THERM-003.

Case #	Analysis Code	Library	Calculation		Experiment (keff ± 3σ)	C/E ± 3σ
			(keff ± %fsd)	(keff ± 3σ)		
A-2	MVP2	JENDL-5	1.00981 ± 0.0129	1.00981 ± 0.00039	1.0046 ± 0.0168	1.00519 ± 0.01681
B-2	MVP2	JENDL-5; uranium data changed into those of JENDL-4.0	1.00752 ± 0.0123	1.00752 ± 0.00037	1.0046 ± 0.0168	1.00291 ± 0.01678
B-2-1	MVP2	JENDL-5; U-235 data changed into those of JENDL-4.0	1.00795 ± 0.0122	1.00795 ± 0.00037	1.0046 ± 0.0168	1.00333 ± 0.01678
B-2-2	MVP2	JENDL-5; U-238 data changed into those of JENDL-4.0	1.00954 ± 0.0125	1.00954 ± 0.00038	1.0046 ± 0.0168	1.00492 ± 0.01681
C-2	MVP2	JENDL-4.0	1.00345 ± 0.0124	1.00345 ± 0.00037	1.0046 ± 0.0168	0.99886 ± 0.01671
D-2	MVP2	JENDL-3.3	1.00232 ± 0.0125	1.00232 ± 0.00038	1.0046 ± 0.0168	0.99773 ± 0.01669
E-2	MVP2	JENDL-3.2	1.01003 ± 0.0135	1.01003 ± 0.00041	1.0046 ± 0.0168	1.00541 ± 0.01682
F-2	MCNP4B	ENDF/B-VI	1.00442 ± 0.0006	1.0046 ± 0.0168	0.9996 ± 0.0167	
G-2	KENO-V.a	ENDF/B-V, 44-group	1.0069 ± 0.0009	1.0046 ± 0.0168	1.0023 ± 0.0168	

Calculation results for Case # A-1 to E-1 are obtained in the present work.

Calculation results for Case # F-1 to G-1 are shown in the literature^{a)}.

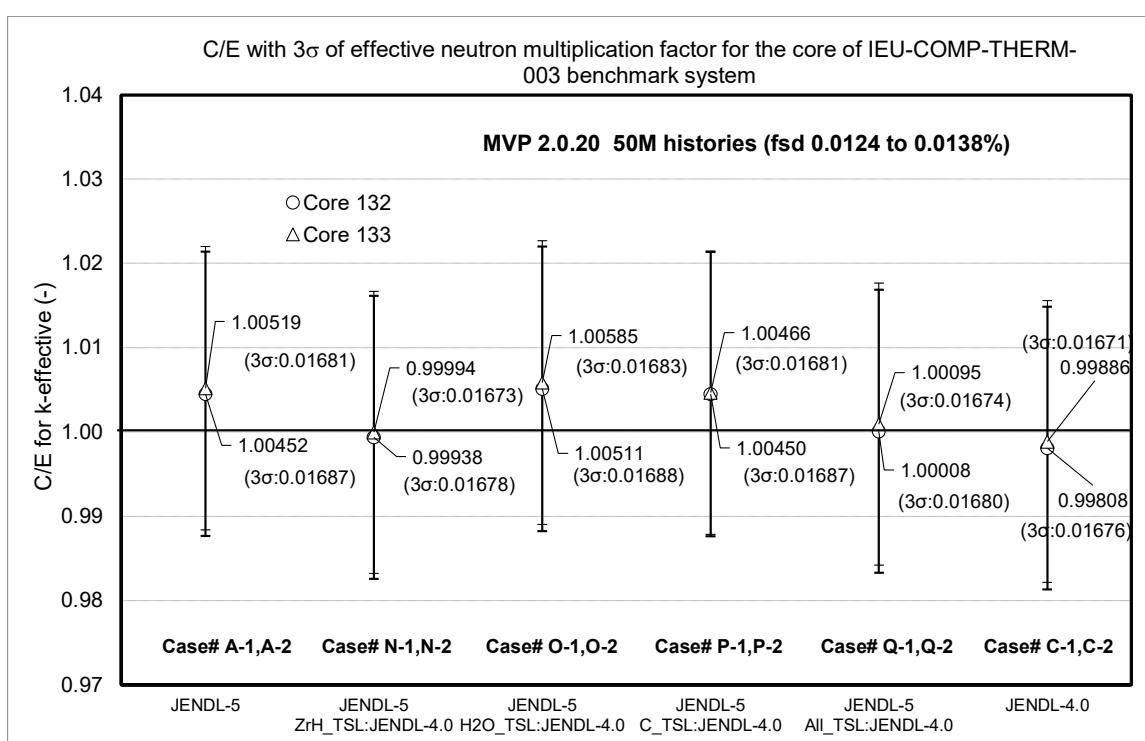


Fig.3.1.2 Calculated effective neutron multiplication factors for Core132 and Core133 of IEU-COMP-THERM-003 depending on thermal scattering law (TSL) data.

Table 3.1.3 Calculated effective neutron multiplication factors depending on thermal scattering law (TSL) data for Core132 of IEU-COMP-THERM-003.

Case #	Analysis Code	Library	Calculation		Experiment (keff ± 3σ)	C/E ± 3σ
			(keff ± %fsd)	(keff ± 3σ)		
A-1	MVP2	JENDL-5	1.00512 ± 0.0130	1.00512 ± 0.00039	1.0006 ± 0.0168	1.00452 ± 0.01687
N-1	MVP2	JENDL-5; ZH TSL data changed into those of JENDL-4.0	0.99998 ± 0.0138	0.99998 ± 0.00041	1.0006 ± 0.0168	0.99938 ± 0.0168
O-1	MVP2	JENDL-5; H ₂ O TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.00571 ± 0.0131	1.00571 ± 0.00040	1.0006 ± 0.0168	1.00511 ± 0.01688
O-1-1	MVP2	JENDL-5; H ₂ O as moderator TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.00481 ± 0.0127	1.00481 ± 0.00038	1.0006 ± 0.0168	1.00421 ± 0.01686
O-1-2	MVP2	JENDL-5; H ₂ O as reflector TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.00610 ± 0.0133	1.00610 ± 0.00040	1.0006 ± 0.0168	1.00550 ± 0.01689
P-1	MVP2	JENDL-5; C TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.00510 ± 0.0126	1.00510 ± 0.00038	1.0006 ± 0.0168	1.00450 ± 0.01687
Q-1	MVP2	JENDL-5; all TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.00068 ± 0.0132	1.00068 ± 0.00040	1.0006 ± 0.0168	1.00008 ± 0.01680
C-1	MVP2	JENDL-4.0	0.999867 ± 0.0129	0.999867 ± 0.00039	1.0006 ± 0.0168	0.99988 ± 0.01676

Table 3.1.4 Calculated effective neutron multiplication factors depending on thermal scattering law (TSL) data for Core133 of IEU-COMP-THERM-003.

Case #	Analysis Code	Library	Calculation		Experiment (keff ± 3σ)	C/E ± 3σ
			(keff ± %fsd)	(keff ± 3σ)		
A-2	MVP2	JENDL-5	1.00981 ± 0.0129	1.00981 ± 0.00039	1.0046 ± 0.0168	1.00519 ± 0.01681
N-2	MVP2	JENDL-5; ZrH TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.00454 ± 0.0133	1.00454 ± 0.00040	1.0046 ± 0.0168	0.99994 ± 0.01683
O-2	MVP2	JENDL-5; H ₂ O TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01048 ± 0.0135	1.01048 ± 0.00041	1.0046 ± 0.0168	1.00585 ± 0.01683
O-2-1	MVP2	JENDL-5; H ₂ O as moderator TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.00945 ± 0.0125	1.00945 ± 0.00038	1.0046 ± 0.0168	1.00483 ± 0.01681
O-2-2	MVP2	JENDL-5; H ₂ O as reflector TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01046 ± 0.0132	1.01046 ± 0.00040	1.0046 ± 0.0168	1.00583 ± 0.01683
P-2	MVP2	JENDL-5; C TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.00928 ± 0.0128	1.00928 ± 0.00039	1.0046 ± 0.0168	1.00466 ± 0.01681
Q-2	MVP2	JENDL-5; all TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.00555 ± 0.0130	1.00555 ± 0.00039	1.0046 ± 0.0168	1.00095 ± 0.01674
C-2	MVP2	JENDL-4.0	1.00345 ± 0.0124	1.00345 ± 0.00037	1.0046 ± 0.0168	0.99886 ± 0.01671

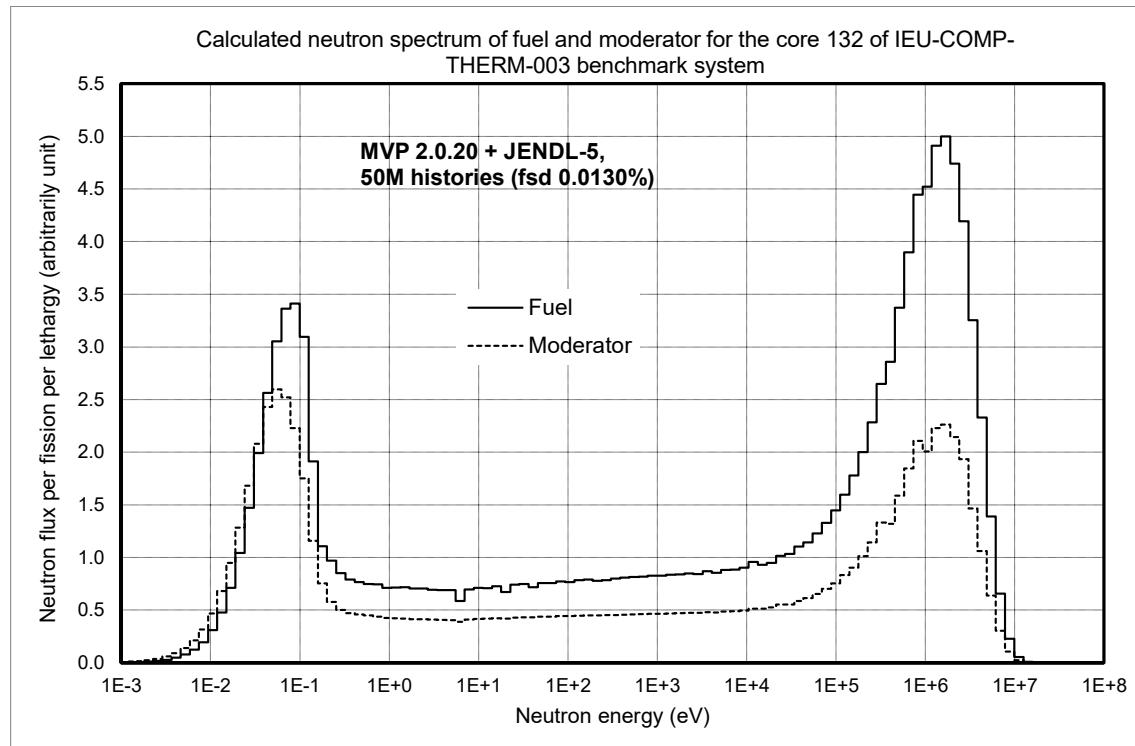


Fig.3.1.3 Calculated neutron spectra of U-ZrH fuel and water moderator for Core132 using JENDL-5.

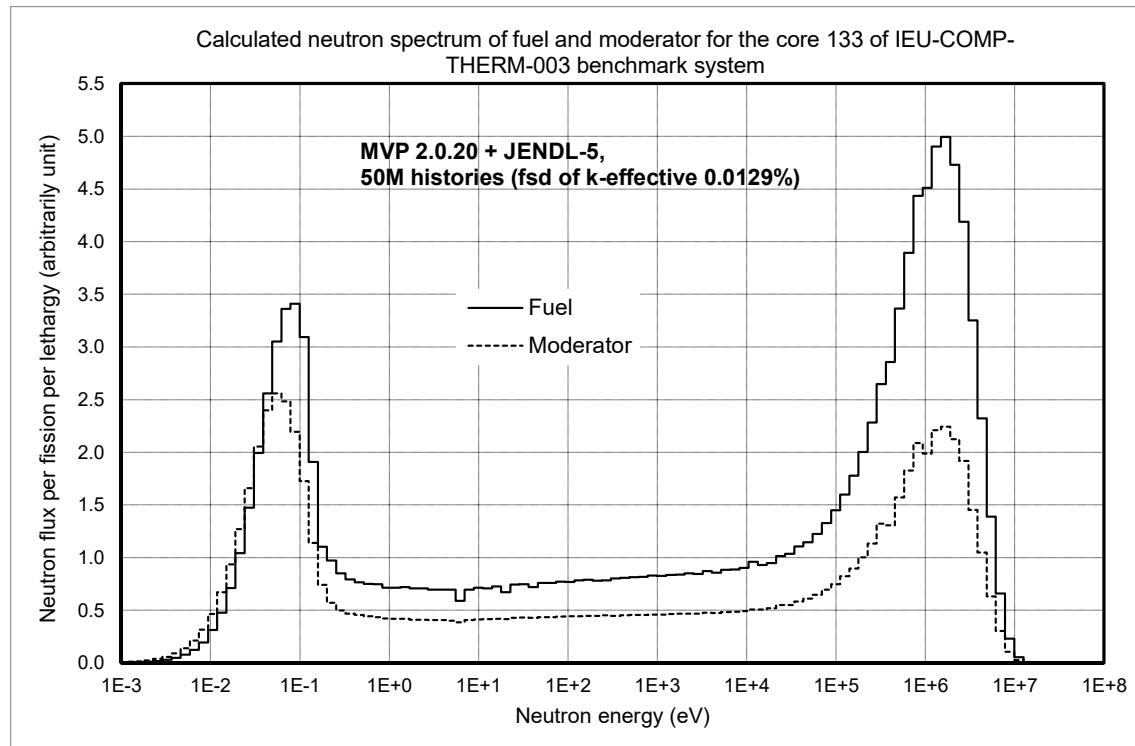


Fig.3.1.4 Calculated neutron spectra of U-ZrH fuel and water moderator for Core133 using JENDL-5.

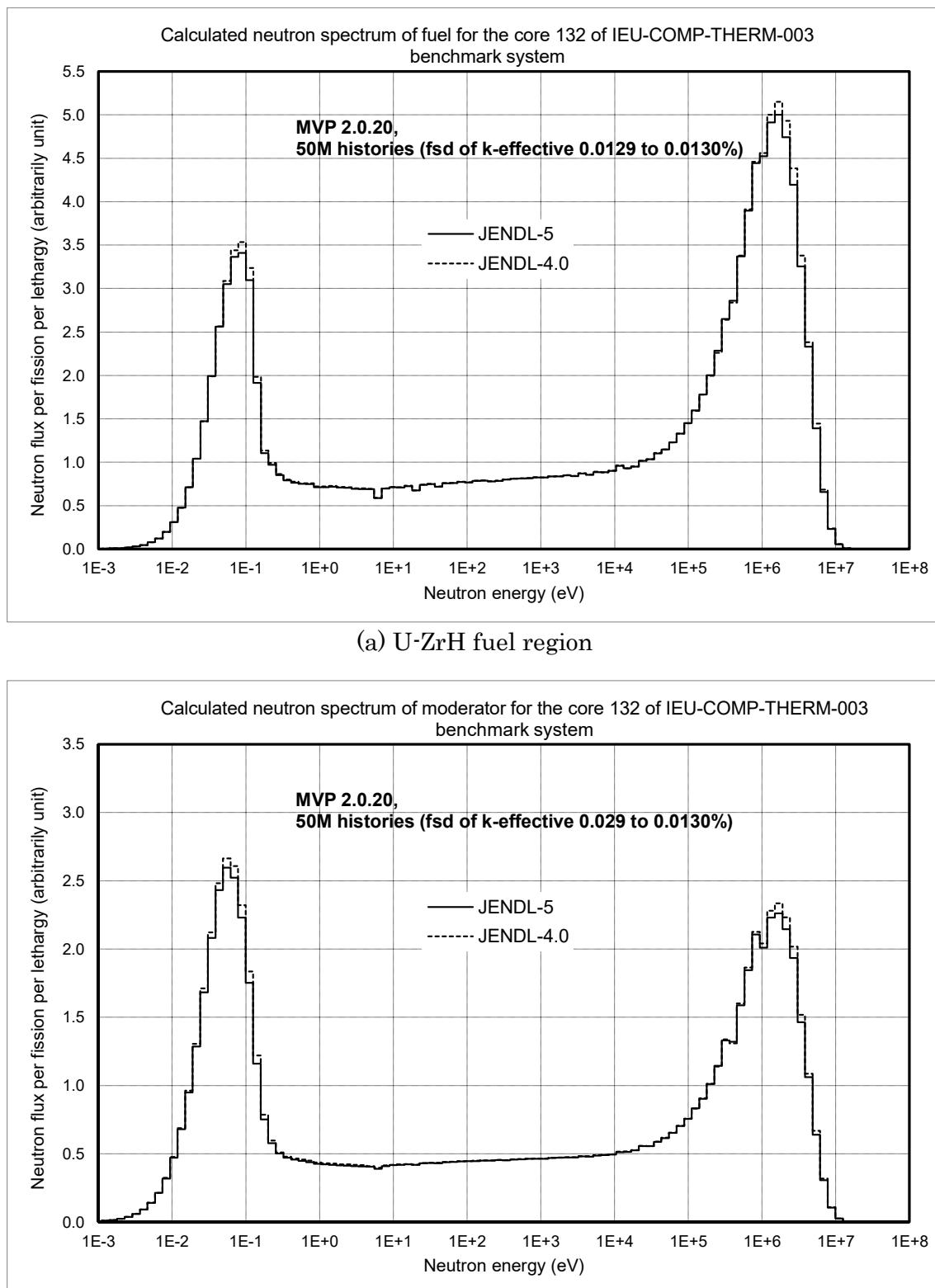


Fig.3.1.5 Comparison calculated neutron spectra for Core132 using between JENDL-5 and JENDL-4.0.

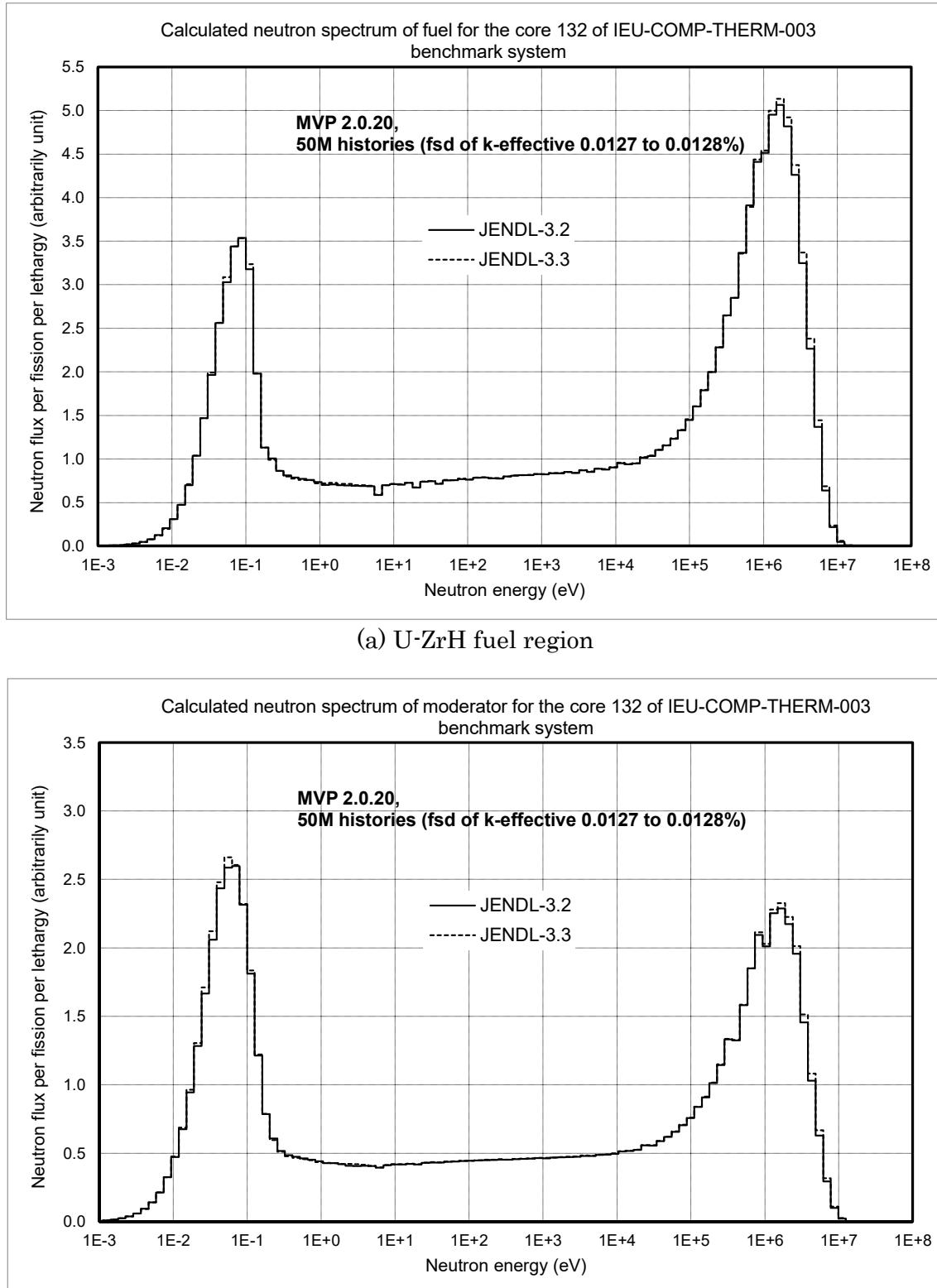


Fig.3.1.6 Comparison calculated neutron spectra for Core132 using between JENDL-3.3 and JENDL-3.2.

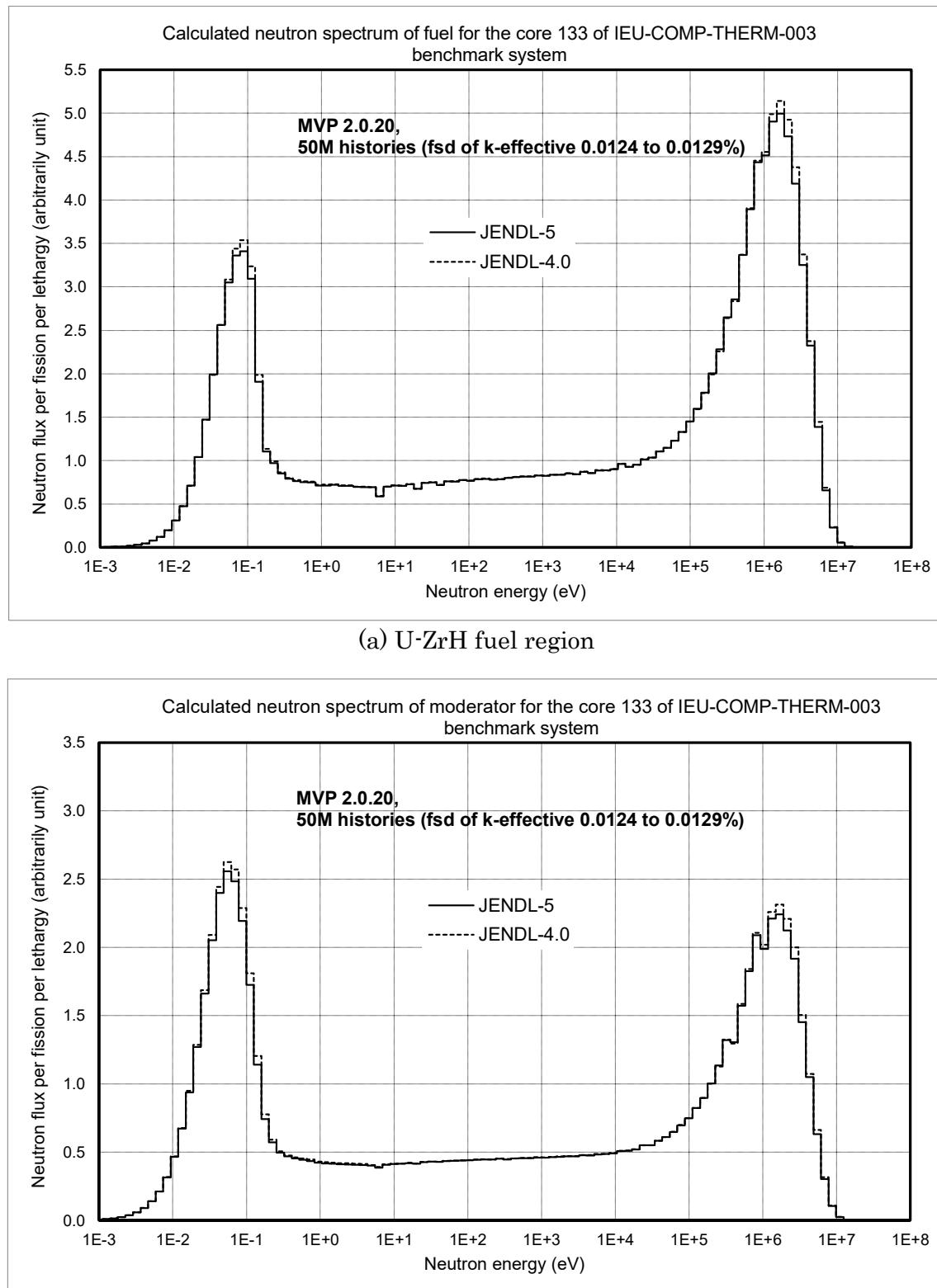


Fig.3.1.7 Comparison calculated neutron spectra for Core133 using between JENDL-5 and JENDL-4.0.

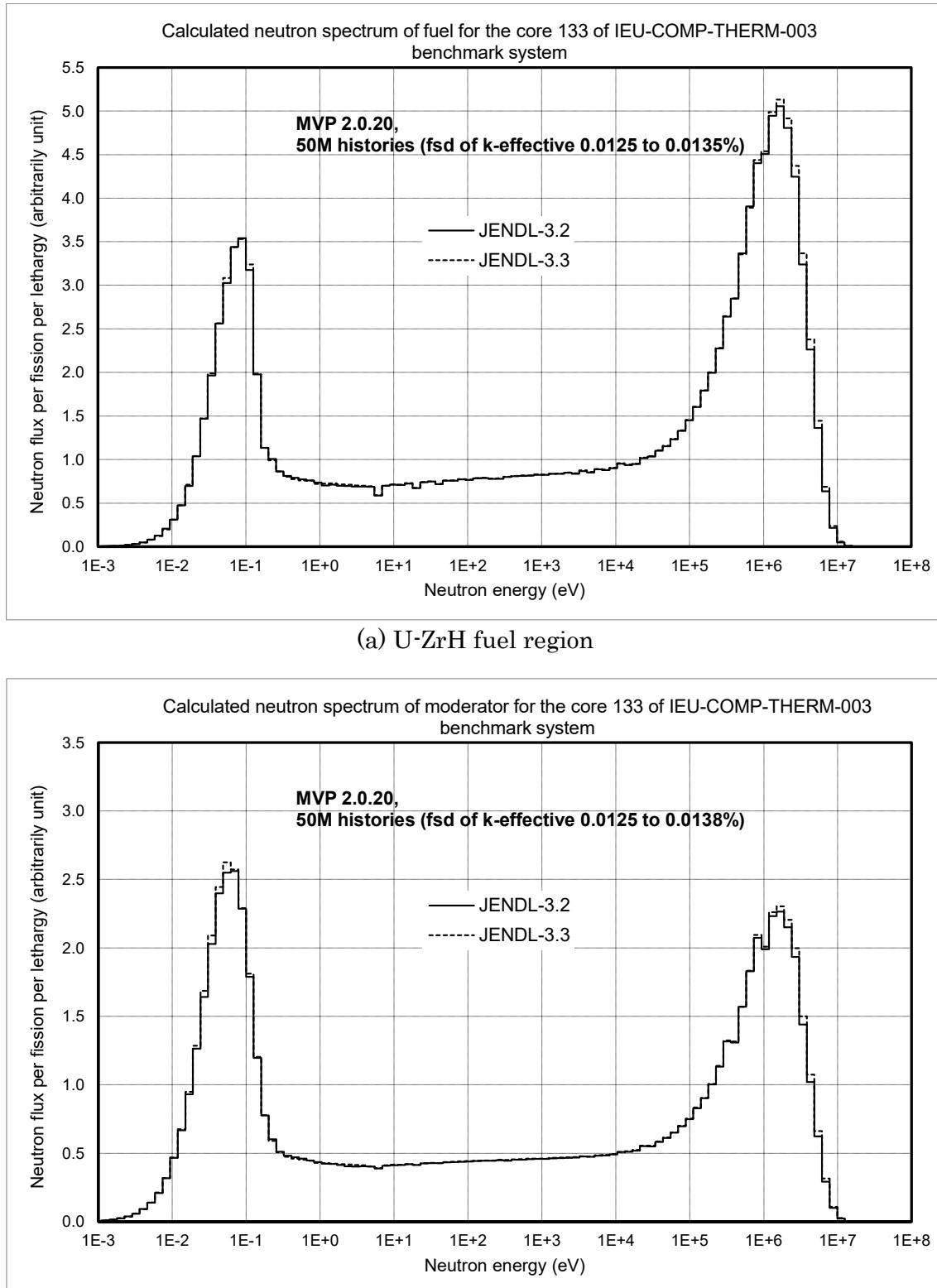


Fig.3.1.8 Comparison calculated neutron spectra for Core133 using between JENDL-3.3 and JENDL-3.2.

Table 3.1.5 Calculated fission rates per source particle for Core132 of IEU-COMP-THERM-003.

Case #	Analysis Code	Library	Calculation	
			(fission rate \pm %fsd)	(fission rate \pm 3σ)
A-1	MVP2	JENDL-5	0.41344 \pm 0.022	0.41344 \pm 0.00027
C-1	MVP2	JENDL-4.0	0.40954 \pm 0.021	0.40954 \pm 0.00026
D-1	MVP2	JENDL-3.3	0.40918 \pm 0.021	0.40918 \pm 0.00026
E-1	MVP2	JENDL-3.2	0.41225 \pm 0.021	0.41225 \pm 0.00026

Table 3.1.6 Calculated fission rates per source particle for Core133 of IEU-COMP-THERM-003.

Case #	Analysis Code	Library	Calculation	
			(fission rate \pm %fsd)	(fission rate \pm 3σ)
A-2	MVP2	JENDL-5	0.41523 \pm 0.021	0.41523 \pm 0.00026
C-2	MVP2	JENDL-4.0	0.41152 \pm 0.022	0.41152 \pm 0.00027
D-2	MVP2	JENDL-3.3	0.41097 \pm 0.020	0.41097 \pm 0.00025
E-2	MVP2	JENDL-3.2	0.41433 \pm 0.021	0.41433 \pm 0.00026

3.1.2 IEU-COMP-THERM-013 の計算結果

IEU-COMP-THERM-013 に対する中性子実効増倍率の計算結果を Table 3.1.7 及び Table 3.1.8 に示す。これらの表には、今回行った MVP と JENDL による計算結果に加えて、IEU-COMP-THERM-013 に掲載の計算結果(Case# F-1～M-1, F-2～M-2)も比較のため示した。Fig.3.1.9 には、MVP と JENDL による計算結果のみ示している。JENDL-5 による計算については、ウランの核種のみを JENDL-4.0 のデータに変更した条件(Case# B-1, B-1-1～B-1-4, B-2, B-2-1～B-2-4)についても行い、その結果も合わせて示している。MVP と JENDL による計算結果は JENDL のバージョンによるばらつきはあるものの、IEU-COMP-THERM-003 の計算結果と同様に 3 標準偏差の範囲内にバージョン間のばらつきは含まれる。しかしながら、計算結果はベンチマーク実験値よりも 1.0%から 1.6%程度大きく、その差は 3 標準偏差の範囲を超える。

IEU-COMP-THERM-013 に示される連続エネルギーモンテカルロコード MCNP5 (Case# F-1～I-1, F-2～I-2)、多群及び連続エネルギーモンテカルロコード KENO-VI (Case# J-1, K-1, J-2, K-2) 及び連続エネルギーモンテカルロコード SERPENT (Case# L-1, M-1, L-2, M-2) の中性子実効増倍率の計算結果もまた、ベンチマーク実験値よりも

1.0%から1.3%程度大きく、MVPとJENDLによる計算結果と同様に、計算値と実験値との差は3標準偏差の範囲を超える。従って、計算値が実験値よりも有意に大きくなることはMVPとJENDLによる計算に特有のものではなく、何らかのバイアスが存在している可能性がある。

さらに詳しくJENDL-5とJENDL-4.0の計算結果に着目すると、Table 3.1.7及びTable 3.1.8よりJENDL-5による中性子実効増倍率は、JENDL-4.0よりもCase1 coreで約0.5%、Case2 coreで約0.4%大きくなった。全てのウランの核種をJENDL-4.0のデータに変更した場合のJENDL-5による中性子実効増倍率(Case# B-1, B-2)は、Case1 coreとCase2 coreともにJENDL-4.0との差は約0.4%であり、前述のJENDL-5とJENDL-4.0による中性子実効増倍率の差と大きく変わらない。このことから、ウランの核種の変更はJENDL-5による中性子実効増倍率がJENDL-4.0よりも大きくなる要因の一つではあるものの、その寄与はIEU-COMP-THERM-003よりも小さいことが示唆される。

JENDL-5とJENDL-4.0との比較については、IEU-COMP-THERM-003の解析と同様にJENDL-5の計算において熱中性子散乱則(TSL)データをJENDL-4.0のデータに変更した計算も行い検討した。結果をTable 3.1.9及びTable 3.1.10、並びにFig.3.1.10に示す。これらに示すように、水素化ジルコニウム、水、黒鉛のTSLデータを全てJENDL-4.0に変更した場合(Case# Q-1, Q-2)は、JENDL-5とJENDL-4.0による中性子実効増倍率の差はCase1 coreで約0.05%、Case2 coreで約0.03%と小さくなり、モンテカルロ計算の統計誤差の2標準偏差内となった。これには、水素化ジルコニウムと水のTSLデータの変更が大きく寄与している。水素化ジルコニウムのTSLデータのみ変更した場合(Case# N-1, N-2)のJENDL-5とJENDL-4.0による中性子実効増倍率の差はCase1 coreで約0.3%、Case2 coreで約0.2%であった。また、水のTSLデータのみ変更した場合(Case# O-1, O-2)のJENDL-5とJENDL-4.0による中性子実効増倍率の差はCase1 coreとCase2 coreともに約0.2%であった。さらに、減速材としての水(Case# O-1-1, O-2-1)、反射体としての水(Case# O-1-2, O-2-2)に分けてその寄与を計算した結果、Table 3.1.9及びTable 3.1.10に示すように反射体としての水のTSLデータの変更の影響はほとんど無く、減速材としての水のTSLデータの変更の寄与が大きいことが分かる。これらのことから、IEU-COMP-THERM-013の場合、JENDL-5による中性子実効増倍率がJENDL-4.0よりも大きくなる要因は、水素化ジルコニウム及び減速材としての水のTSLデータの変更によるものが主であり、ウラン核種の変更の寄与は大きくないと言える。

このように、IEU-COMP-THERM-013でのJENDL-5による中性子実効増倍率がJENDL-4.0よりも大きくなる主な要因はIEU-COMP-THERM-003とは異なり、その理由を明らかにするために、IEU-COMP-THERM-003と同様に燃料と水減速材との中性子スペクトルを計算した。JENDL-5による計算結果をFig.3.1.11及びFig.3.1.12に

示す。また、これら中性子スペクトルの JENDL のバージョン間での比較を Fig.3.1.13 から Fig.3.1.16 に示す。これらの中性子スペクトルは IEU-COMP-THERM-003 の解析と同様に核分裂率当たりの中性子束としている。単位粒子源当たりの核分裂率の計算結果を Table 3.1.11 及び Table 3.1.12 に示す。

Fig.3.1.11 及び Fig.3.1.12 より、IEU-COMP-THERM-013 の体系での中性子スペクトルは IEU-COMP-THERM-003 の計算結果である Fig.3.1.3 及び Fig.3.1.4 と大きく異なり、特にウラン・エルビウム水素化ジルコニウム燃料中の熱中性子束は、エルビウムの中性子吸収効果によって大きく低下し、エルビウム-167 による 0.4~0.6eV 近傍の幅の広い共鳴吸収による中性子束の低下が見られる。IEU-COMP-THERM-003 とは逆に、燃料中の熱中性子束は水減速材中よりも小さくなることが分かる。これにより、水減速材による中性子減速の寄与は IEU-COMP-THERM-003 よりも相対的に大きくなる。このため、TSL データを JENDL-5 から JENDL-4.0 に変更した際の中性子実効増倍率の変化の要因として、水素化ジルコニウムに加えて減速材としての水の TSL データの変更による寄与が大きくなるものと考えられる。また、燃料中の熱中性子束が IEU-COMP-THERM-003 よりも相対的に小さいことから、ウラン-235 の熱核分裂による寄与も相対的に小さくなることが予想され、このことがウランのデータを JENDL-5 から JENDL-4.0 に変更した際に中性子実効増倍率の変化が IEU-COMP-THERM-003 よりも小さくなる原因と考えられる。

Fig.3.1.13 から Fig.3.1.16 より核分裂率当たりの中性子束として整理したスペクトルについては、IEU-COMP-THERM-003 と同様に JENDL のバージョン間での大きな違いは見られない。

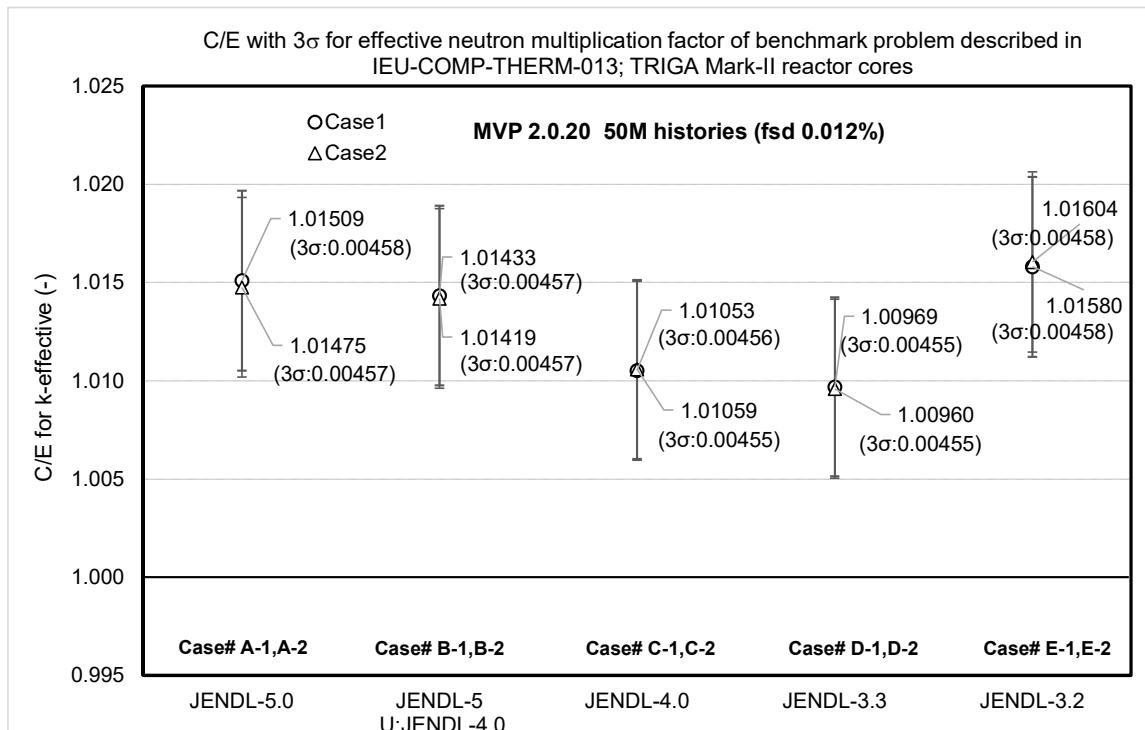


Fig.3.1.9 Comparison of calculated effective neutron multiplication factors for Case1 and Case2 cores of IEU-COMP-THERM-013 based on JENDL-5, 4.0, 3.3 and 3.2.

Table 3.1.7 Comparison of calculated effective neutron multiplication factors for Case1 core of IEU-COMP-THERM-013.

Case #	Analysis Code	Library	Calculation		Experiment (keff \pm 3 σ)	C/E \pm 3 σ
			(keff \pm %fsd)	(keff \pm 3 σ)		
A-1	MVP2	JENDL-5	1.01631 \pm 0.0117	1.01631 \pm 0.00036	1.0012 \pm 0.0045	1.0159 \pm 0.00458
B-1	MVP2	JENDL-5; uranium data changed into those of JENDL-4.0	1.01555 \pm 0.0119	1.01555 \pm 0.00036	1.0012 \pm 0.0045	1.01433 \pm 0.00457
B-1-1	MVP2	JENDL-5; U-235 data changed into those of JENDL-4.0	1.01607 \pm 0.0118	1.01607 \pm 0.00036	1.0012 \pm 0.0045	1.01485 \pm 0.00458
B-1-2	MVP2	JENDL-5; U-238 data changed into those of JENDL-4.0	1.01560 \pm 0.0116	1.01560 \pm 0.00035	1.0012 \pm 0.0045	1.01438 \pm 0.00457
B-1-3	MVP2	JENDL-5; U-234 data changed into those of JENDL-4.0	1.01611 \pm 0.0110	1.01611 \pm 0.00034	1.0012 \pm 0.0045	1.01489 \pm 0.00457
B-1-4	MVP2	JENDL-5; U-236 data changed into those of JENDL-4.0	1.01611 \pm 0.0121	1.01611 \pm 0.00037	1.0012 \pm 0.0045	1.01489 \pm 0.00458
C-1	MVP2	JENDL-4.0	1.01174 \pm 0.0123	1.01174 \pm 0.00037	1.0012 \pm 0.0045	1.01053 \pm 0.00456
D-1	MVP2	JENDL-3.3	1.01090 \pm 0.0116	1.01090 \pm 0.00035	1.0012 \pm 0.0045	1.00969 \pm 0.00455
E-1	MVP2	JENDL-3.2; erbium data taken from JENDL-3.3	1.01702 \pm 0.0111	1.01702 \pm 0.00034	1.0012 \pm 0.0045	1.01580 \pm 0.00458
F-1	MCNP5	ENDF/B-VII.0	1.01412 \pm 0.00021	1.0012 \pm 0.0045	1.01290 \pm 0.00456	
G-1	MCNP5	JEFF-3.1	1.01174 \pm 0.00021	1.0012 \pm 0.0045	1.01053 \pm 0.00455	
H-1	MCNP5	JENDL-3.3, thermal scattering data taken from ENDF/B-VII.0	1.01094 \pm 0.00021	1.0012 \pm 0.0045	1.00973 \pm 0.00454	
I-1	MCNP5	ENDF/B-VI.8, erbium data taken from ENDF/B-VII.0	1.00942 \pm 0.00021	1.0012 \pm 0.0045	1.00821 \pm 0.00454	
J-1	KENO-VI	ENDF/B-VII.0, 238-group	1.01462 \pm 0.00021	1.0012 \pm 0.0045	1.01340 \pm 0.00456	
K-1	KENO-VI	ENDF/B-VII.0, continuous energy	1.00945 \pm 0.00024	1.0012 \pm 0.0045	1.00824 \pm 0.00454	
L-1	SERPENT	ENDF/B-VII.0, v.1.1.17	1.01402 \pm 0.00024	1.0012 \pm 0.0045	1.01280 \pm 0.00456	
M-1	SERPENT	ENDF/B-VII.0, v.2.1.13	1.01293 \pm 0.00024	1.0012 \pm 0.0045	1.01172 \pm 0.00455	

Calculation results for Case # A-1 to E-1 are obtained in the present work.

Calculation results for Case # F-1 to M-1 are shown in the literature⁵⁾.

Table 3.1.8 Comparison of calculated effective neutron multiplication factors for Case2 core of IEU-COMP-THERM-013.

Case #	Analysis Code	Library	Calculation		Experiment (keff \pm 3 σ)	C/E \pm 3 σ
			(keff \pm %fsd)	(keff \pm 3 σ)		
A-2	MVP2	JENDL-5	1.01597 \pm 0.0115	1.01597 \pm 0.00035	1.0012 \pm 0.0045	1.01475 \pm 0.00457
B-2	MVP2	JENDL-5; uranium data changed into those of JENDL-4.0	1.01541 \pm 0.0108	1.01541 \pm 0.00033	1.0012 \pm 0.0045	1.01419 \pm 0.00457
B-2-1	MVP2	JENDL-5; U-235 data changed into those of JENDL-4.0	1.01635 \pm 0.0114	1.01635 \pm 0.00035	1.0012 \pm 0.0045	1.01513 \pm 0.00458
B-2-2	MVP2	JENDL-5; U-238 data changed into those of JENDL-4.0	1.01538 \pm 0.0112	1.01538 \pm 0.00034	1.0012 \pm 0.0045	1.01416 \pm 0.00457
B-2-3	MVP2	JENDL-5; U-234 data changed into those of JENDL-4.0	1.01617 \pm 0.0114	1.01617 \pm 0.00035	1.0012 \pm 0.0045	1.01495 \pm 0.00457
B-2-4	MVP2	JENDL-5; U-236 data changed into those of JENDL-4.0	1.01614 \pm 0.0116	1.01614 \pm 0.00035	1.0012 \pm 0.0045	1.01492 \pm 0.00458
C-2	MVP2	JENDL-4.0	1.01180 \pm 0.0112	1.01180 \pm 0.00034	1.0012 \pm 0.0045	1.01059 \pm 0.00455
D-2	MVP2	JENDL-3.3	1.01081 \pm 0.0116	1.01081 \pm 0.00035	1.0012 \pm 0.0045	1.00960 \pm 0.00455
E-2	MVP2	JENDL-3.2; erbium data taken from JENDL-3.3	1.01726 \pm 0.0112	1.01726 \pm 0.00034	1.0012 \pm 0.0045	1.01604 \pm 0.00458
F-2	MCNP5	ENDF/B-VII.0	1.01413 \pm 0.00021	1.0012 \pm 0.0045	1.01291 \pm 0.00456	
G-2	MCNP5	JEFF-3.1	1.01181 \pm 0.00021	1.0012 \pm 0.0045	1.01060 \pm 0.00455	
H-2	MCNP5	JENDL-3.3, thermal scattering data taken from ENDF/B-VII.0	1.01116 \pm 0.00021	1.0012 \pm 0.0045	1.00995 \pm 0.00454	
I-2	MCNP5	ENDF/B-VI.8, erbium data taken from ENDF/B-VII.0	1.00928 \pm 0.00021	1.0012 \pm 0.0045	1.00807 \pm 0.00454	
J-2	KENO-VI	ENDF/B-VII.0, 238-group	1.01462 \pm 0.00024	1.0012 \pm 0.0045	1.01340 \pm 0.00456	
K-2	KENO-VI	ENDF/B-VII.0, continuous energy	1.00937 \pm 0.00024	1.0012 \pm 0.0045	1.00816 \pm 0.00454	
L-2	SERPENT	ENDF/B-VII.0, v.1.1.17	1.01409 \pm 0.00024	1.0012 \pm 0.0045	1.01287 \pm 0.00456	
M-2	SERPENT	ENDF/B-VII.0, v.2.1.13	1.01278 \pm 0.00024	1.0012 \pm 0.0045	1.01157 \pm 0.00455	

Calculation results for Case # A-1 to E-1 are obtained in the present work.

Calculation results for Case # F-1 to M-1 are shown in the literature⁵⁾.

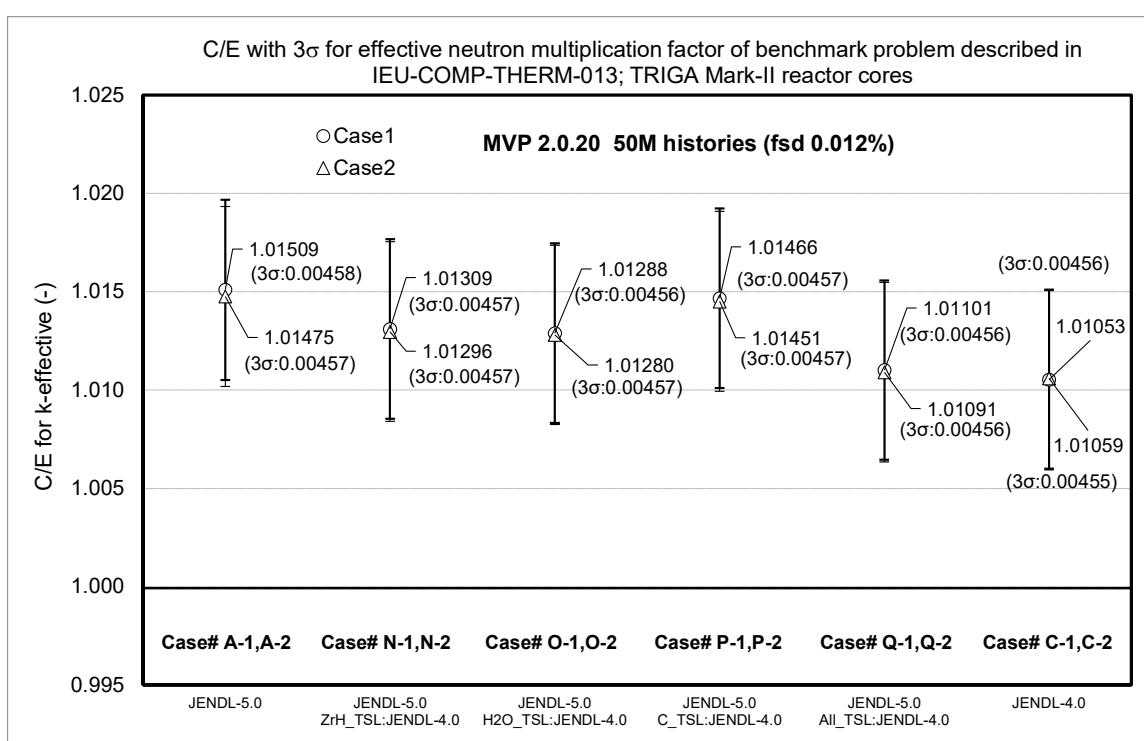


Fig.3.1.10 Calculated effective neutron multiplication factors for Case1 and Case2 cores of IEU-COMP-THERM-013 depending on thermal scattering law (TSL) data.

Table 3.1.9 Calculated effective neutron multiplication factors depending on thermal scattering law (TSL) data for Case 1 core of IEU-COMP-THERM-013.

Case #	Analysis Code	Library	Calculation		Experiment (keff ± 3σ)	C/E ± 3σ
			(keff ± %fsd)	(keff ± 3σ)		
A-1	MVP2	JENDL-5	1.01631 ± 0.0117	1.01631 ± 0.00036	1.0012 ± 0.0045	1.01509 ± 0.00458
N-1	MVP2	JENDL-5; Z/H TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01431 ± 0.0111	1.01431 ± 0.00034	1.0012 ± 0.0045	1.01309 ± 0.00457
O-1	MVP2	JENDL-5; H ₂ O TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01410 ± 0.0111	1.01410 ± 0.00034	1.0012 ± 0.0045	1.01288 ± 0.00456
O-1-1	MVP2	JENDL-5; H ₂ O as moderator TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01365 ± 0.0116	1.01365 ± 0.00035	1.0012 ± 0.0045	1.01244 ± 0.00456
O-1-2	MVP2	JENDL-5; H ₂ O as reflector TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01636 ± 0.0115	1.01636 ± 0.00035	1.0012 ± 0.0045	1.01514 ± 0.00458
P-1	MVP2	JENDL-5; C TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01588 ± 0.0114	1.01588 ± 0.00035	1.0012 ± 0.0045	1.01466 ± 0.00457
Q-1	MVP2	JENDL-5; all TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01222 ± 0.0115	1.01222 ± 0.00035	1.0012 ± 0.0045	1.01101 ± 0.00456
C-1	MVP2	JENDL-4.0	1.01174 ± 0.0123	1.01174 ± 0.00037	1.0012 ± 0.0045	1.01053 ± 0.00456

Table 3.1.10 Calculated effective neutron multiplication factors depending on thermal scattering law (TSL) data for Case2
core of IEU-COMP-THERM-013.

Case #	Analysis Code	Library	Calculation		Experiment (keff \pm 3 σ)	C/E \pm 3 σ
			(keff \pm %fsd)	(keff \pm 3 σ)		
A-2	M&P2	JENDL-5	1.01597 \pm 0.0115	1.01597 \pm 0.00035	1.0012 \pm 0.0045	1.01475 \pm 0.00457
N-2	M&P2	JENDL-5; ZrH TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01418 \pm 0.0113	1.01418 \pm 0.00034	1.0012 \pm 0.0045	1.01296 \pm 0.00457
O-2	M&P2	JENDL-5; H ₂ O TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01402 \pm 0.0113	1.01402 \pm 0.00034	1.0012 \pm 0.0045	1.01280 \pm 0.00457
O-2-1	M&P2	JENDL-5; H ₂ O as moderator TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01376 \pm 0.0120	1.01376 \pm 0.00036	1.0012 \pm 0.0045	1.01254 \pm 0.00457
O-2-2	M&P2	JENDL-5; H ₂ O as reflector TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01597 \pm 0.0114	1.01597 \pm 0.00035	1.0012 \pm 0.0045	1.01475 \pm 0.00457
P-2	M&P2	JENDL-5; C TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01573 \pm 0.0116	1.01573 \pm 0.00035	1.0012 \pm 0.0045	1.01451 \pm 0.00457
Q-2	M&P2	JENDL-5; all TSL data changed into those of JENDL-4.0	1.01212 \pm 0.0121	1.01212 \pm 0.00037	1.0012 \pm 0.0045	1.01091 \pm 0.00456
C-2	M&P2	JENDL-4.0	1.01180 \pm 0.0112	1.01180 \pm 0.00034	1.0012 \pm 0.0045	1.01059 \pm 0.0045

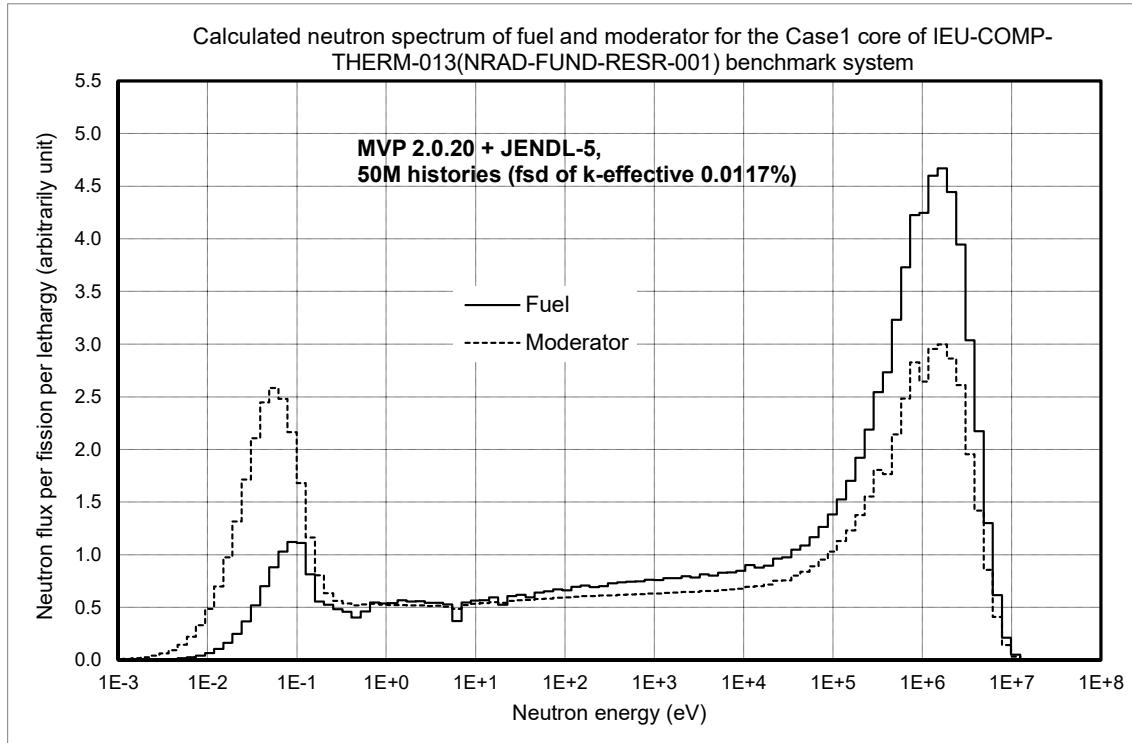


Fig.3.1.11 Calculated neutron spectra of U-Er-ZrH fuel and water moderator for Case1 core using JENDL-5.

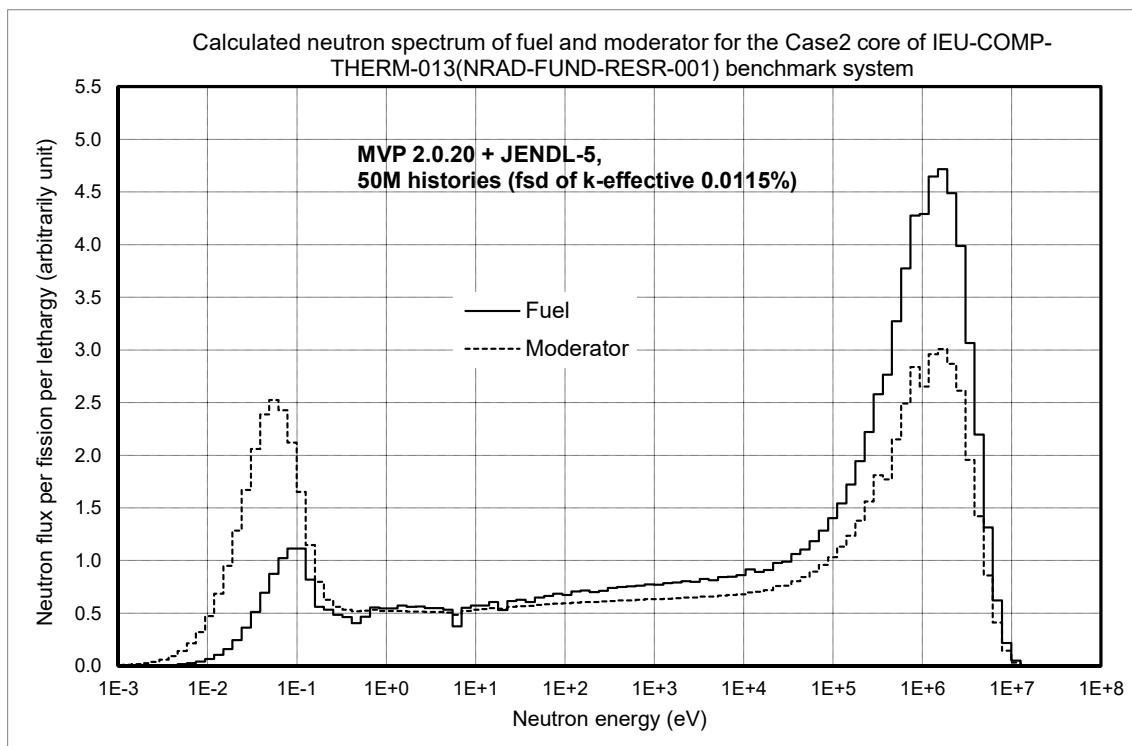


Fig.3.1.12 Calculated neutron spectra of U-Er-ZrH fuel and water moderator for Case2 core using JENDL-5.

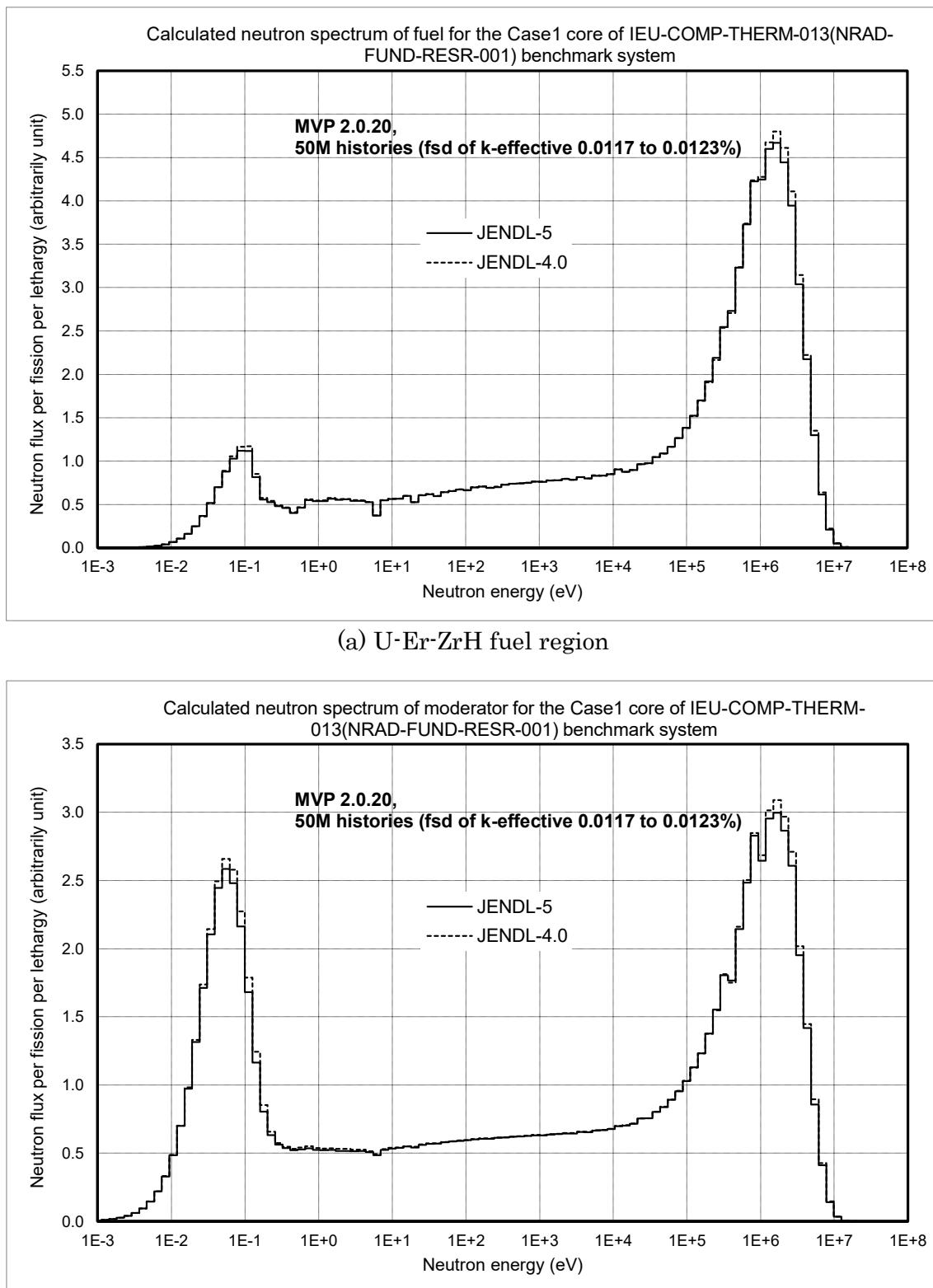


Fig.3.1.13 Comparison calculated neutron spectra for Case1 core using between JENDL-5 and JENDL-4.0.

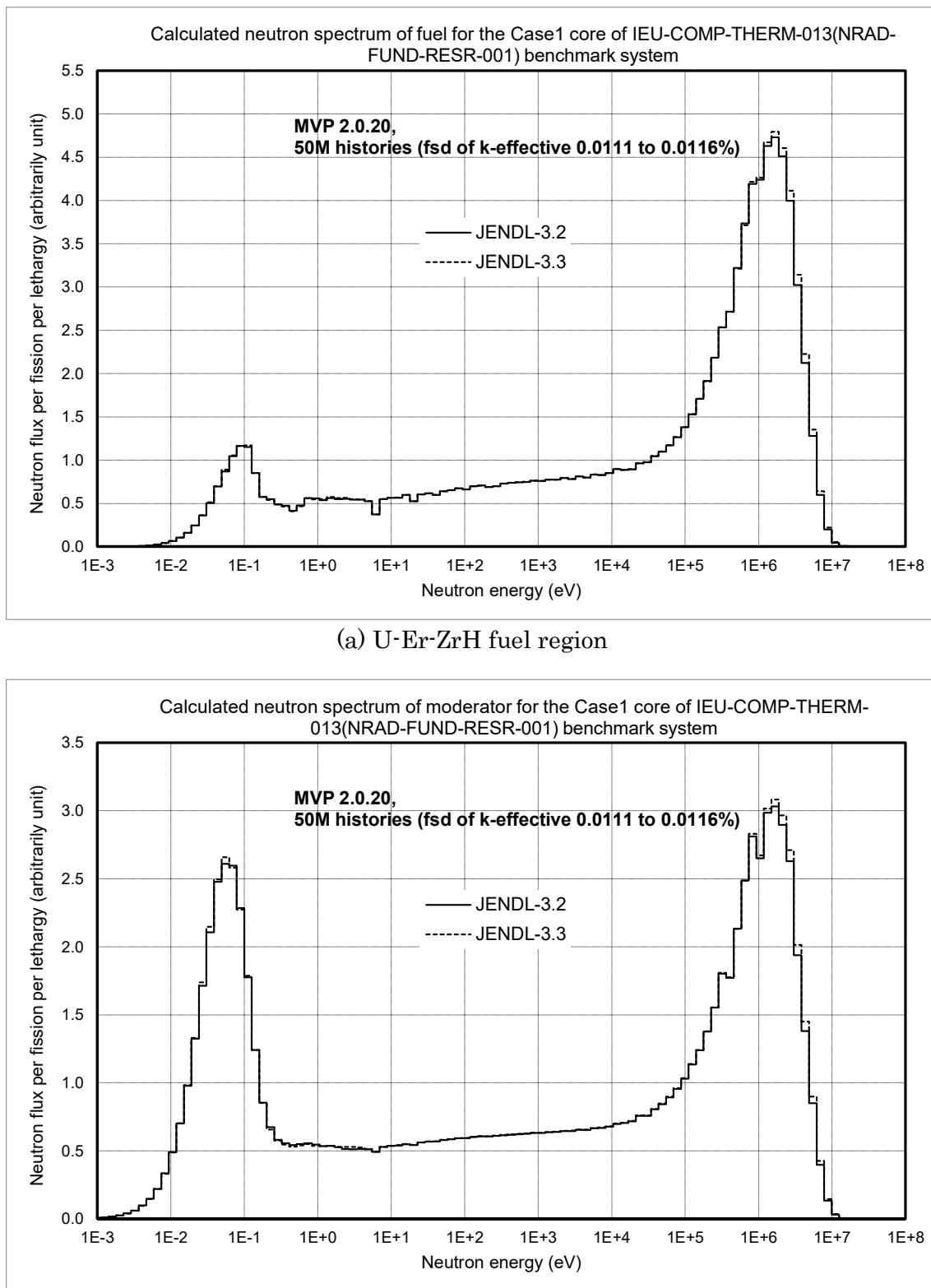


Fig.3.1.14 Comparison calculated neutron spectra for Case1 core using between JENDL-3.3 and JENDL-3.2.

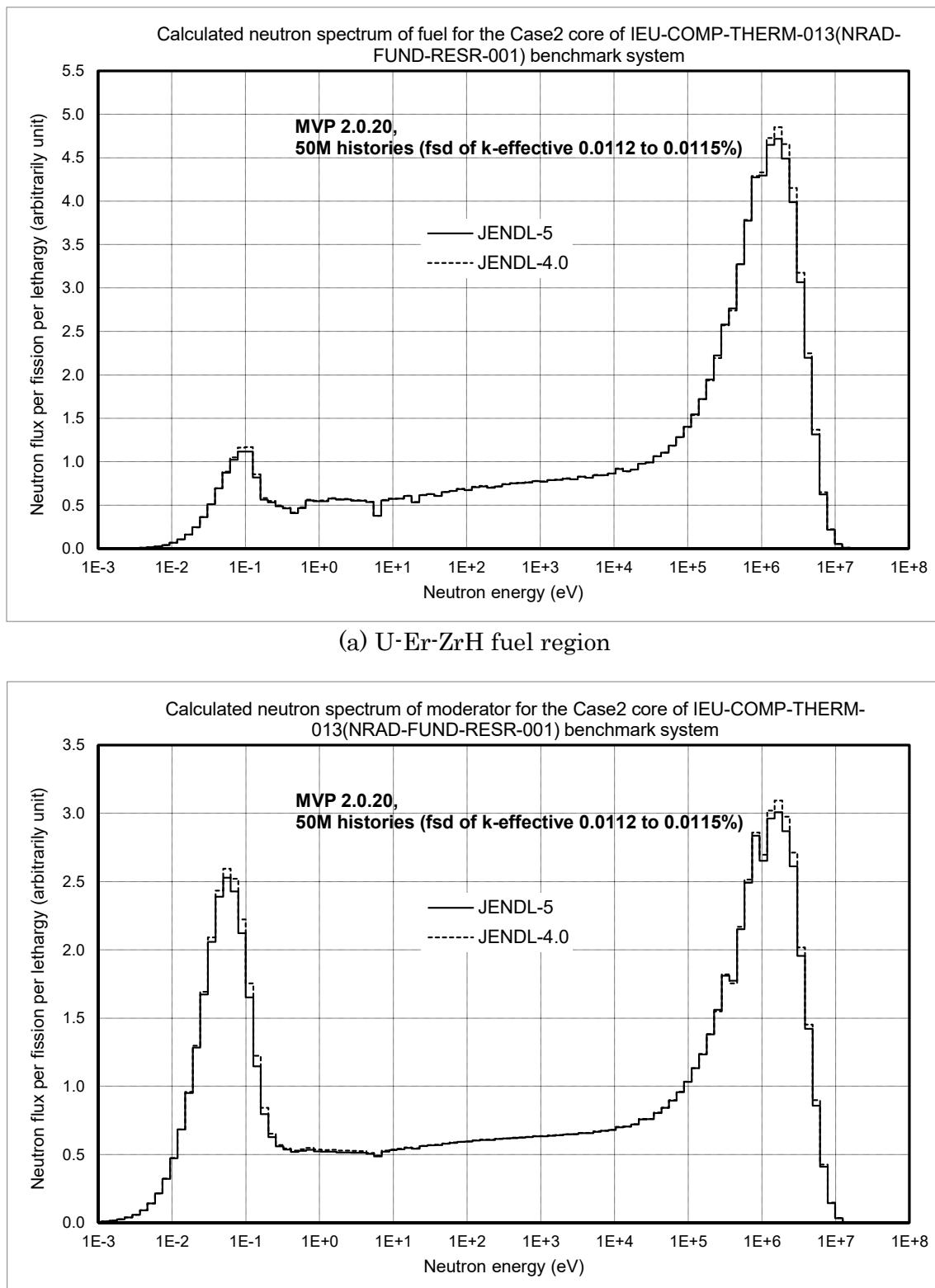


Fig.3.1.15 Comparison calculated neutron spectra for Case2 core using between JENDL-5 and JENDL-4.0.

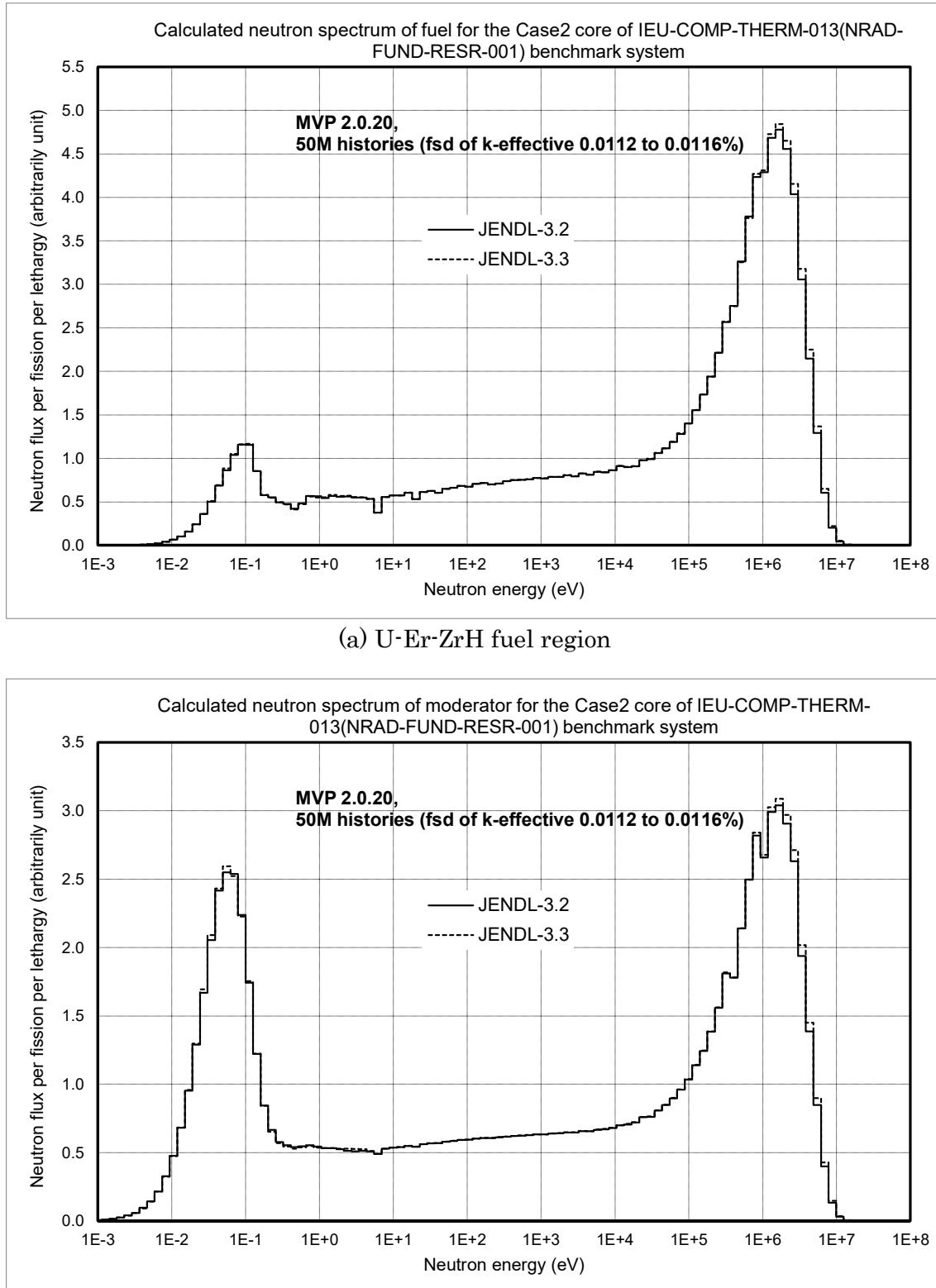


Fig.3.1.16 Comparison calculated neutron spectra for Case2 core using between JENDL-3.3 and JENDL-3.2.

Table 3.1.11 Calculated fission rates per source particle for Case1 core of IEU-COMP-THERM-013.

Case #	Analysis Code	Library	Calculation	
			(fission rate \pm %fsd)	(fission rate \pm 3σ)
A-1	MVP2	JENDL-5	0.41708 \pm 0.020	0.41708 \pm 0.00025
C-1	MVP2	JENDL-4.0	0.41401 \pm 0.022	0.41401 \pm 0.00027
D-1	MVP2	JENDL-3.3	0.41376 \pm 0.020	0.41376 \pm 0.00025
E-1	MVP2	JENDL-3.2, erbium data taken from JENDL-3.3	0.41649 \pm 0.020	0.41649 \pm 0.00025

Table 3.1.12 Calculated fission rates per source particle for Case2 core of IEU-COMP-THERM-013.

Case #	Analysis Code	Library	Calculation	
			(fission rate \pm %fsd)	(fission rate \pm 3σ)
A-2	MVP2	JENDL-5	0.41707 \pm 0.021	0.41707 \pm 0.00026
C-2	MVP2	JENDL-4.0	0.41416 \pm 0.021	0.41416 \pm 0.00026
D-2	MVP2	JENDL-3.3	0.41375 \pm 0.020	0.41375 \pm 0.00025
E-2	MVP2	JENDL-3.2, erbium data taken from JENDL-3.3	0.41656 \pm 0.020	0.41656 \pm 0.00025

3.2 制御棒反応度価値

シム棒の反応度価値の計算結果を Table 3.2.1 に示す。これらの表には、今回行った MVP と JENDL による計算結果に加えて、IEU-COMP-THERM-013 に掲載の MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果も比較のため示した(以下同様である)。MVP と JENDL による計算結果は、MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果と同様にベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致した。JENDL-5 と JENDL-4.0 による計算値は 1 標準偏差内で一致し、有意な差は無かった。

シム棒の反応度価値について、IEU-COMP-THERM-013 では代替計算方法が示されている⁵⁾。全てのシム棒と調整棒が全引き抜きの状態から、それぞれのシム棒を落下させ全挿入となった状態での中性子実効増倍率の変化から計算する方法である。これによる計算結果を Table 3.2.2 に示す。ベンチマーク解析方法との違いは、調整棒の位置の違いである。Case#5を除き、MVP と JENDL による計算結果は、MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果と同様にベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致した。Case#5

では2標準偏差内で一致し、ベンチマーク解析条件による計算結果よりも反応度価値の絶対値は小さくなつた。JENDL-5と JENDL-4.0による計算値は1標準偏差内で一致し、有意な差は無かつた。

調整棒の部分挿入状態の反応度価値と正ペリオド法による反応度を Table 3.2.3 に示す。部分挿入状態の反応度価値については、MVP と JENDL による計算結果は、MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果と同様にベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致した。正ペリオド法による反応度については、MVP と JENDL による計算結果とベンチマーク実験値との差は一部 2 標準偏差内となる場合もあるが、概ね 1 標準偏差内となつた。MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果では、Case#6、Position#b で計算結果と実験値の差は 3 標準偏差を超えているが、MVP と JENDL によるこれらの差は 2 標準偏差内となっている。JENDL-5 と JENDL-4.0 による部分挿入状態の反応度価値の計算値は 1 標準偏差内で一致し、正ペリオド法による反応度についても 2 標準偏差内で一致していることから有意な差は無かつた。

調整棒の反応度価値は、上記の部分挿入状態の反応度価値に正ペリオド法による反応度の総和を加えたものとしている。計算結果を Table 3.2.4 に示す。IEU-COMP-THERM-013 に掲載の MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果は、Case# 6 では実験値との差が 3 標準偏差を超えているが^{*3}、MVP と JENDL による計算結果は全て、ベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致した。JENDL-5 と JENDL-4.0 による計算値は 1 標準偏差内で一致し、有意な差は無かつた。

調整棒の反応度価値についても、IEU-COMP-THERM-013 では代替計算方法が示されている⁵⁾。シム棒と同様に、調整棒が全引き抜きの状態から、調整棒を落下させ全挿入となつた状態での中性子実効増倍率の変化から計算する方法である。これによる計算結果を Table 3.2.5 に示す。MVP と JENDL による計算結果は、MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果と同様にベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致し、ベンチマーク解析条件による計算結果との有意な差はなかつた。JENDL-5 と JENDL-4.0 による計算値は 1 標準偏差内で一致し、有意な差は無かつた。

^{*3} IEU-COMP-THERM-013 では $C/E=1.19\pm 0.06$ と記されており、Table 3.2.4 も同じ値を記した。しかしながら、Table 3.2.4 に記載されている計算値と実験値の桁数で C/E を計算すると 1.07 ± 0.07 となり、MVP と JENDL による計算結果よりも大きいが、実験値と 1 標準偏差内で一致する。

Table 3.2.1 Comparison of benchmark calculation of shim control rod worths for IEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Calculation ($\rho \$ \pm 1\sigma$)				Experiment ($\rho \$ \pm 1\sigma$)	$C/E \pm 1\sigma^*$	
			MVP2- JENDL-5	MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾	JENDL-5		MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾
1	56 Fuel Elements	Shim 1 Worth (Rod Drop)	-2.98 ± 0.15	-2.99 ± 0.15	-3.01 ± 0.15	-2.76 ± 0.31	1.08 ± 0.13	1.08 ± 0.13	1.09 ± 0.13
		Shim 2 Worth (Rod Drop)	-2.52 ± 0.13	-2.53 ± 0.13	-2.57 ± 0.13	-2.72 ± 0.30	0.93 ± 0.11	0.93 ± 0.11	0.94 ± 0.12
2	56 Fuel Elements	Shim 1 Worth (Rod Drop)	-2.82 ± 0.14	-2.80 ± 0.14	-2.84 ± 0.14	-2.68 ± 0.30	1.05 ± 0.13	1.05 ± 0.13	1.06 ± 0.13
		Shim 2 Worth (Rod Drop)	-2.61 ± 0.13	-2.57 ± 0.13	-2.65 ± 0.13	-2.75 ± 0.33	0.95 ± 0.12	0.93 ± 0.12	0.96 ± 0.11
4	60 Fuel Elements	Shim 1 Worth (Rod Drop)	-	-	-	-	-	-	-
		Shim 2 Worth (Rod Drop)	-	-	-	-	-	-	-
5	60 Fuel Elements	Shim 1 Worth (Rod Drop)	-	-	-	-	-	-	-
		Shim 2 Worth (Rod Drop)	-	-	-	-	-	-	-

* The C/E values shown in the table are different from those obtained by rounding of the calculation and experiment values shown above.

Table 3.2.2 Comparison of alternative calculation of shim control rod worths for IEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Calculation ($\rho \$ \pm 1\sigma$)				Experiment ($\rho \$ \pm 1\sigma$)	$C/E \pm 1\sigma^*$	
			MVP2- JENDL-5	MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾	JENDL-5		MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾
1	56 Fuel Elements	Shim 1 Worth (Rod Drop)	-2.94 ± 0.15	-2.94 ± 0.15	-2.94 ± 0.15	-2.76 ± 0.31	1.06 ± 0.13	1.06 ± 0.13	1.06 ± 0.13
		Shim 2 Worth (Rod Drop)	-2.46 ± 0.13	-2.48 ± 0.13	-2.47 ± 0.12	-2.72 ± 0.30	0.91 ± 0.11	0.91 ± 0.11	0.91 ± 0.11
2	56 Fuel Elements	Shim 1 Worth (Rod Drop)	-2.63 ± 0.13	-2.66 ± 0.13	-2.70 ± 0.14	-2.68 ± 0.30	0.98 ± 0.12	0.99 ± 0.12	1.01 ± 0.11
		Shim 2 Worth (Rod Drop)	-2.33 ± 0.12	-2.33 ± 0.12	-2.35 ± 0.12	-2.75 ± 0.33	0.85 ± 0.11	0.85 ± 0.11	0.85 ± 0.10
4	60 Fuel Elements	Shim 1 Worth (Rod Drop)	-	-	-	-	-	-	-
		Shim 2 Worth (Rod Drop)	-	-	-	-	-	-	-
5	60 Fuel Elements	Shim 1 Worth (Rod Drop)	-	-	-	-	-	-	-
		Shim 2 Worth (Rod Drop)	-	-	-	-	-	-	-

* The C/E values shown in the table are different from those obtained by rounding of the calculation and experiment values shown above.

Table 3.2.3 Comparison of steps for calculation of regulating control rod worths for IEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method) ^{#5)}	Position # ⁵⁾	Calculation ($\rho\$ \pm 1\sigma$)			Experiment ($\rho\$ \pm 1\sigma$)	C/E $\pm 1\sigma^*$	
				MVP2- JENDL-5	MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾		MVP2- JENDL-5	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾
3	56 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Rod Drop)	a	-2.14 ± 0.11	-2.16 ± 0.11	-2.18 ± 0.11	-2.06 ± 0.23	1.04 ± 0.13	1.05 ± 0.13
3	56 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Positive Period)	b	0.16 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.14 ± 0.02	1.15 ± 0.24	1.02 ± 0.22
3	56 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Positive Period)	c	0.11 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.13 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.88 ± 0.18	1.16 ± 0.20
3	56 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Positive Period)	d	0.11 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.11 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.99 ± 0.21	1.01 ± 0.22
6	60 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Rod Drop)	a	-1.24 ± 0.07	-1.20 ± 0.06	-1.26 ± 0.06	-1.21 ± 0.14	1.02 ± 0.13	0.99 ± 0.13
6	60 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Positive Period)	b	0.20 ± 0.02	0.19 ± 0.02	0.27 ± 0.02	0.15 ± 0.02	1.32 ± 0.24	1.24 ± 0.23
6	60 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Positive Period)	c	0.19 ± 0.02	0.20 ± 0.02	0.19 ± 0.02	0.17 ± 0.02	1.12 ± 0.19	1.18 ± 0.20
6	60 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Positive Period)	d	0.22 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.17 ± 0.02	1.30 ± 0.21	0.80 ± 0.16
6	60 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Positive Period)	e	0.14 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.19 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.86 ± 0.18	0.98 ± 0.19
6	60 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Positive Period)	f	0.16 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.99 ± 0.19	1.09 ± 0.20
6	60 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Positive Period)	g	0.13 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.95 ± 0.21	1.11 ± 0.23
6	60 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Positive Period)	h	0.11 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.10 ± 0.01	0.08 ± 0.01	1.32 ± 0.33	0.60 ± 0.29
6	60 Fuel Elements	Partial Reg V Worth (Positive Period)	i	0.13 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.10 ± 0.01	0.09 ± 0.01	1.49 ± 0.30	1.43 ± 0.29
								1.06 ± 0.19	

* The C/E values shown in the table are different from those obtained by rounding of the calculation and experiment values shown above.

Table 3.2.4 Comparison of benchmark calculation of regulating control rod worths for IEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Calculation ($\rho \pm 1\sigma$)			Experiment ($\rho \pm 1\sigma$)	C/E $\pm 1\sigma^*$		
			M&P2- JENDL-5	M&P2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾		M&P2- JENDL-5	M&P2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾
3	56 Fuel Elements	Reg Worth (Sum)	-2.53 ± 0.13	-2.57 ± 0.14	-2.59 ± 0.11	-2.43 ± 0.23	1.04 ± 0.11	1.06 ± 0.11	1.06 ± 0.11
		Reg Worth (Sum)	-2.52 ± 0.14	-2.39 ± 0.14	-2.60 ± 0.04	-2.42 ± 0.16	1.04 ± 0.09	0.99 ± 0.09	1.19 ± 0.06
6	60 Fuel Elements	Reg Worth (Sum)	-	-	-	-	-	-	-

* The C/E values shown in the table are different from those obtained by rounding of the calculation and experiment values shown above.

Table 3.2.5 Comparison of alternative calculation of regulating control rod worths for IEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Calculation ($\rho \pm 1\sigma$)			Experiment ($\rho \pm 1\sigma$)	C/E $\pm 1\sigma$		
			M&P2- JENDL-5	M&P2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾		M&P2- JENDL-5	M&P2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾
3	56 Fuel Elements	Reg Worth (Rod Drop)	-2.56 ± 0.13	-2.58 ± 0.13	-2.57 ± 0.13	-2.43 ± 0.23	1.05 ± 0.11	1.06 ± 0.11	1.06 ± 0.11
		Reg Worth (Rod Drop)	-2.44 ± 0.12	-2.42 ± 0.12	-2.62 ± 0.13	-2.42 ± 0.16	1.01 ± 0.08	1.00 ± 0.08	1.08 ± 0.09
6	60 Fuel Elements	Reg Worth (Rod Drop)	-	-	-	-	-	-	-

3.3 原子炉停止余裕

原子炉停止余裕の計算結果を Table 3.3.1 に示す。これらは 2.2 で記したように、2 本のシム棒の反応度価値の合計に加えて調整棒の部分反応度価値(臨界状態での部分挿入範囲の反応度価値)を加えたものである。MVP と JENDL による計算結果は、MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果と同様にベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致した。JENDL-5 と JENDL-4.0 による計算値は 1 標準偏差内で一致し、有意な差は無かった。

原子炉停止余裕についても、IEU-COMP-THERM-013 では代替計算方法が示されている⁵⁾。3.1 の臨界条件(全てのシム棒が全引き抜き、調整棒が部分挿入状態)から、全てのシム棒及び調整棒を落下させ全挿入とした状態での中性子実効増倍率の変化から計算する方法である。原子炉停止余裕は原子炉スクラム時のように全ての制御棒が全挿入されたときの中性子実効増倍率が臨界状態からどの程度小さくなるかを示すものであり、本来制御棒1本毎に評価した反応度の合算ではなく、制御棒を同時に挿入した条件で評価すべきものである。つまり、代替方法は原子炉停止余裕の定義通りの計算方法と言える。全ての制御棒を同時に挿入した代替方法による反応度価値は制御棒相互の干渉効果により、ベンチマーク実験値とその解析方法のように単独で挿入した反応度の合算による反応度価値とは異なることも考えられる。

代替方法による計算結果を Table 3.3.2 に示す。代替方法によって計算した負の反応度は、MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果と同様にいずれもその絶対値がベンチマーク解析方法による計算結果よりも大きくなり、制御棒を全数同時に挿入した場合は原子炉停止余裕が大きくなる結果となった。JENDL-5 と JENDL-4.0 による計算値は 1 標準偏差内で一致し、有意な差は無かった。また、代替方法による C/E 値に示されるように、Case#8 の MVP と JENDL による計算結果は、MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果と同様に制御棒1本毎の反応度価値の合算として評価したベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致し、Case#7 では 2 標準偏差内一致した。

Table 3.3.1 Comparison of benchmark calculation of reactor shutdown margins for IEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Calculation ($\rho \$ \pm 1\sigma$)			Experiment ($\rho \$ \pm 1\sigma$)	$C/E \pm 1\sigma^*$		
			MVP2- JENDL-5	MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾		MVP2- JENDL-5	MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾
7	56 Fuel Elements	Shutdown Margin (Rod Drops)	-7.64 ± 0.38	-7.68 ± 0.39	-7.76 ± 0.23	-7.54 ± 0.49	1.01 ± 0.08	1.02 ± 0.08	1.03 ± 0.07
8	60 Fuel Elements	Shutdown Margin (Rod Drops)	-6.67 ± 0.34	-6.57 ± 0.33	-6.75 ± 0.23	-6.73 ± 0.47	0.99 ± 0.09	0.98 ± 0.08	1.02 ± 0.07

* The C/E values shown in the table are different from those obtained by rounding of the calculation and experiment values shown above.

Table 3.3.2 Comparison of alternative calculation of reactor shutdown margins for IEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Calculation ($\rho \$ \pm 1\sigma$)			Experiment ($\rho \$ \pm 1\sigma$)	$C/E \pm 1\sigma^*$		
			MVP2- JENDL-5	MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾		MVP2- JENDL-5	MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾
7	56 Fuel Elements	Shutdown Margin (Rod Drops)	-8.70 ± 0.44	-8.71 ± 0.44	-8.73 ± 0.44	-7.54 ± 0.49	1.15 ± 0.09	1.16 ± 0.09	1.16 ± 0.10
8	60 Fuel Elements	Shutdown Margin (Rod Drops)	-7.13 ± 0.36	-7.11 ± 0.36	-7.15 ± 0.36	-6.73 ± 0.47	1.06 ± 0.09	1.06 ± 0.09	1.06 ± 0.07

* The C/E values shown in the table are different from those obtained by rounding of the calculation and experiment values shown above.

3.4 過剰反応度

過剰反応度の計算結果を Table 3.4.1 に示す。これらは 2.2 で記したように、調整棒の部分挿入状態から全引き抜き状態までに加わる反応度であり、シム棒で反応度を補償しつつ正ペリオド法によって測定した条件に基づいて計算している。Case#10 の JENDL-5 による計算を除き、MVP と JENDL による計算結果は、ベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致した。Case#10 の JENDL-5 による計算結果は実験値と 2 標準偏差内で一致した。IEU-COMP-THERM-013 に示されている MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果では、Case#10 で計算結果と実験値の差は 3 標準偏差を超える。JENDL-5 と JENDL-4.0 による計算値は 1 標準偏差内で一致し、有意な差は無かった。

IEU-COMP-THERM-013 では過剰反応度についても、代替計算方法が示されている⁵⁾。3.1 の臨界条件(全てのシム棒が全引き抜き、調整棒が部分挿入状態)から、調整棒を全引き抜きとした状態での中性子実効増倍率の変化から計算する方法である。これによる計算結果を Table 3.4.2 に示す。ベンチマーク解析方法では調整棒を全引き抜きする過程で 2 本のシム棒が反応度補償のため段階的に挿入されていくが、代替方法は 3 本の制御棒を同時に全引き抜きしたときの反応度である。Table 3.4.2 より、MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果はベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致しているが、MVP と JENDL による計算結果では、Case#10 の JENDL-5 による計算値のみ実験値と 1 標準偏差内で一致するが、残りについては実験値と 2 標準偏差内の一致であった。JENDL-5 と JENDL-4.0 による計算値は 1 標準偏差内で一致し、有意な差は無かった。

Table 3.4.1 Comparison of benchmark calculation of excess reactivities for IEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Calculation ($\rho \pm 1\sigma$)				Experiment ($\rho \pm 1\sigma$)	$C/E \pm 1\sigma^*$	
			MVP2- JENDL-5	MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾	JENDL-5		MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾
9	56 Fuel Elements	Excess Reactivity (Positive Period)	0.38 ± 0.04	0.40 ± 0.04	0.41 ± 0.03	0.37 ± 0.02	1.04 ± 0.13	1.09 ± 0.13	1.11 ± 0.10
10	60 Fuel Elements	Excess Reactivity (Positive Period)	1.28 ± 0.09	1.18 ± 0.09	1.34 ± 0.04	1.12 ± 0.05	1.14 ± 0.09	1.06 ± 0.09	1.19 ± 0.06

* The C/E values shown in the table are different from those obtained by rounding of the calculation and experiment values shown above.

Table 3.4.2 Comparison of alternative calculation of excess reactivities for IEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Calculation ($\rho \pm 1\sigma$)				Experiment ($\rho \pm 1\sigma$)	$C/E \pm 1\sigma^*$	
			MVP2- JENDL-5	MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾	JENDL-5		MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾
9	56 Fuel Elements	Excess Reactivity (Positive Period)	0.42 ± 0.03	0.42 ± 0.03	0.40 ± 0.02	0.37 ± 0.02	1.12 ± 0.10	1.13 ± 0.10	1.07 ± 0.09
10	60 Fuel Elements	Excess Reactivity (Positive Period)	1.20 ± 0.06	1.22 ± 0.06	1.19 ± 0.06	1.12 ± 0.05	1.07 ± 0.07	1.09 ± 0.08	1.06 ± 0.07

* The C/E values shown in the table are different from those obtained by rounding of the calculation and experiment values shown above.

3.5 黒鉛反射体ブロックの反応度価値

A-5、C-1、D-1 及び F-4 のブロックをそれぞれ水に置換した場合の炉心の過剰反応度の計算結果を Table 3.5.1 に示す。Case#12 の JENDL-5 による計算と Case#14 の JENDL-4.0 による計算を除き、MVP と JENDL による計算結果は、ベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致した。Case#12 の JENDL-5 による計算結果と Case#14 の JENDL-4.0 による計算結果は実験値と 2 標準偏差内で一致した。MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果は Case#14 でベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致するが、残りは実験値と 2 標準偏差内の一致である。JENDL-5 と JENDL-4.0 による計算値は Case#14 を除いて 1 標準偏差内で一致し、Case#14 でも 2 標準偏差内で一致していることから有意な差は無かった。

Table 3.5.1 に示した黒鉛反射体ブロックを水に置換した場合の過剰反応度と 3.4 に示した置換前の過剰反応度との差から黒鉛反射体ブロックの反応度価値を計算した。結果を Table 3.5.2 に示す。Case#14 の JENDL-5 による計算を除き、MVP と JENDL による計算結果は、ベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致した。Case#14 の JENDL-5 による計算結果は実験値と 2 標準偏差内で一致した。MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果は全てベンチマーク実験値と 2 標準偏差内の一致である。JENDL-5 と JENDL-4.0 による計算値は Case#14 を除いて 1 標準偏差内で一致し、Case#14 でも 2 標準偏差内で一致していることから有意な差は無かった。

IEU-COMP-THERM-013 では黒鉛反射体ブロックの反応度価値についても代替計算方法が示されている⁵⁾。3.1 の臨界条件(全てのシム棒が全引き抜き、調整棒が部分挿入状態)から、シム棒及び調整棒の位置を変更しないで黒鉛反射体ブロックを水に置換した場合での中性子実効増倍率の変化から計算する方法である。これによる計算結果を Table 3.5.3 に示す。ベンチマーク解析方法では黒鉛反射体ブロックを水に置換する際に臨界調整のため調整棒の部分挿入位置を変更しているが、代替方法は調整棒の部分挿入位置が水との置換によって変わらない。Table 3.5.3 より、代替方法によって計算した負の反応度の絶対値はベンチマーク解析方法による計算結果よりも小さくなる傾向にあることが分かる。Case#14 の JENDL-5 及び JENDL-4.0 による計算を除き MVP と JENDL による計算結果は、ベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致した。Case#14 の JENDL-5 及び JENDL-4.0 による計算結果は実験値と 3 標準偏差内で一致した。MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果は同様に Case#14 を除きベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致し、Case#14 の計算結果は実験値と 2 標準偏差内で一致した。JENDL-5 と JENDL-4.0 による計算値は 1 標準偏差内で一致し、有意な差は無かった。

Table 3.5.1 Comparison of excess reactivities for calculation of graphite reflector block worths for IEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Calculation ($\rho \pm 1\sigma$)			Experiment ($\rho \pm 1\sigma$)	$C/E \pm 1\sigma^*$	
			MVP2- JENDL-5	MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾		MVP2- JENDL-5	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾
11	60 Fuel Elements (Block A-5 Out)	Excess Reactivity (Positive Period)	1.01 ± 0.05	1.03 ± 0.06	1.03 ± 0.05	0.95 ± 0.05	1.06 ± 0.08	1.08 ± 0.08
	60 Fuel Elements (Block C-1 Out)	Excess Reactivity (Positive Period)	0.80 ± 0.04	0.77 ± 0.04	0.78 ± 0.04	0.71 ± 0.05	1.12 ± 0.10	1.09 ± 0.10
12	60 Fuel Elements (Block D-1 Out)	Excess Reactivity (Positive Period)	0.74 ± 0.04	0.74 ± 0.04	0.77 ± 0.04	0.69 ± 0.05	1.08 ± 0.10	1.07 ± 0.10
	60 Fuel Elements (Block F-4 Out)	Excess Reactivity (Positive Period)	0.70 ± 0.04	0.78 ± 0.04	0.72 ± 0.04	0.67 ± 0.05	1.05 ± 0.10	1.12 ± 0.08
13	60 Fuel Elements (Block A-5 Out)	Excess Reactivity (Positive Period)	0.74 ± 0.04	0.74 ± 0.04	0.77 ± 0.04	0.69 ± 0.05	1.08 ± 0.10	1.12 ± 0.08
	60 Fuel Elements (Block C-1 Out)	Excess Reactivity (Positive Period)	0.70 ± 0.04	0.78 ± 0.04	0.72 ± 0.04	0.67 ± 0.05	1.05 ± 0.10	1.12 ± 0.08
14	60 Fuel Elements (Block F-4 Out)	Excess Reactivity (Positive Period)	0.70 ± 0.04	0.78 ± 0.04	0.72 ± 0.04	0.67 ± 0.05	1.05 ± 0.10	1.12 ± 0.08

* The C/E values shown in the table are different from those obtained by rounding of the calculation and experiment values shown above.

Table 3.5.2 Comparison of benchmark calculation of graphite reflector block worths for IEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Calculation ($\rho \pm 1\sigma$)			Experiment ($\rho \pm 1\sigma$)	$C/E \pm 1\sigma^*$	
			MVP2- JENDL-5	MVP2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾		MVP2- JENDL-5	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾
11	60 Fuel Elements	A-5 Worth (Difference)	-0.27 ± 0.07	-0.16 ± 0.07	-0.30 ± 0.07	-0.17 ± 0.06	1.60 ± 0.69	0.93 ± 0.51
		C-1 Worth (Difference)	-0.48 ± 0.07	-0.41 ± 0.07	-0.56 ± 0.06	-0.41 ± 0.06	1.17 ± 0.24	1.01 ± 0.22
12	60 Fuel Elements	D-1 Worth (Difference)	-0.54 ± 0.07	-0.45 ± 0.07	-0.56 ± 0.06	-0.43 ± 0.06	1.24 ± 0.24	1.04 ± 0.22
		F-4 Worth (Difference)	-0.57 ± 0.07	-0.41 ± 0.07	-0.61 ± 0.06	-0.45 ± 0.06	1.28 ± 0.23	0.90 ± 0.19
13	60 Fuel Elements							
14	60 Fuel Elements							

* The C/E values shown in the table are different from those obtained by rounding of the calculation and experiment values shown above.

Table 3.5.3 Comparison of alternative calculation of graphite reflector block worths for IEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Calculation ($\rho\$ \pm 1\sigma$)			Experiment ($\rho\$ \pm 1\sigma$)	C/E $\pm 1\sigma^*$	
			M&P2- JENDL-5	M&P2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾		M&P2- JENDL-5	M&P2- JENDL-4.0
11	60 Fuel Elements	A-5 Worth (Difference)	-0.17 ± 0.02	-0.14 ± 0.02	-0.15 ± 0.01	-0.17 ± 0.06	0.97 ± 0.37	0.85 ± 0.33
12	60 Fuel Elements	C-1 Worth (Difference)	-0.41 ± 0.03	-0.42 ± 0.03	-0.44 ± 0.03	-0.41 ± 0.06	1.01 ± 0.16	1.02 ± 0.17
13	60 Fuel Elements	D-1 Worth (Difference)	-0.42 ± 0.03	-0.45 ± 0.03	-0.47 ± 0.03	-0.43 ± 0.06	0.97 ± 0.15	1.04 ± 0.16
14	60 Fuel Elements	F-4 Worth (Difference)	-0.34 ± 0.03	-0.34 ± 0.03	-0.39 ± 0.02	-0.45 ± 0.06	0.75 ± 0.12	0.76 ± 0.12
							0.86 ± 0.13	

* The C/E values shown in the table are different from those obtained by rounding of the calculation and experiment values shown above.

3.6 実験用ドライチューブの反応度価値

実験用ドライチューブの反応度価値の計算結果を Table 3.6.1 に示す。2.2 で記したように、3.1 の臨界条件(全てのシム棒が全引き抜き、調整棒が部分挿入状態)から、シム棒及び調整棒の位置を変更しないでドライチューブを挿入した場合の中性子実効増倍率の変化から反応度価値を計算している。MVP と JENDL による計算結果は、ベンチマーク実験値と 2 標準偏差内で一致した。MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果はベンチマーク実験値と 1 標準偏差内で一致した。JENDL-5 と JENDL-4.0 による計算値は 1 標準偏差内で一致し、有意な差は無かった。しかしながら、3.5 までに示した反応度価値に比べてドライチューブの反応度価値の大きさは \pm (セント) オーダーと小さいため、標準偏差も相対的に大きい。なお、Table 3.6.1 では、表示されている数値よりも多い桁数で C/E を計算して示しているため、表中の小数点以下 2 桁の計算値で C/E を計算したものと値は異なる。

実験用ドライチューブの反応度価値については、IEU-COMP-THERM-013 で代替計算方法は示されていない。

Table 3.6.1 Comparison of benchmark calculation of experimental dry tube worths for IIEU-COMP-THERM-013.

Case # ⁵⁾	Core Description	Measurement (Method)	Calculation ($\rho \pm 1\sigma$)			Experiment ($\rho \pm 1\sigma$)	$C/E \pm 1\sigma^*$		
			M&P2- JENDL-5	M&P2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾		M&P2- JENDL-5	M&P2- JENDL-4.0	MCNP5- ENDF/B-VII.0 ⁵⁾
15	60 Fuel Elements	Dry Tube Worth (Difference)	-0.04 ± 0.02	-0.03 ± 0.02	-0.06 ± 0.01	-0.06 ± 0.01	0.60 ± 0.38	0.48 ± 0.37	1.14 ± 0.29

* The C/E values shown in the table are different from those obtained by rounding of the calculation and experiment values shown above.

4. まとめ

連続エネルギーモンテカルロコード MVP と評価済み核データライブラリ JENDL-5 によつて、ウラン水素化ジルコニウム燃料棒を用いる TRIGA 型原子炉体系の臨界ベンチマーク解析を行った。解析対象は、国際臨界安全ベンチマークプロジェクト(ICSBEP)のハンドブックに掲載されている IEU-COMP-THERM-003 と IEU-COMP-THERM-013 である。

IEU-COMP-THERM-003 の中性子実効増倍率については、MVP と JENDL-5 及び JENDL-4.0, 3.3, 3.2 による計算結果は 3 標準偏差以内でベンチマーク実験値と一致し、概ね良好な予測精度であった。JENDL バージョン間のばらつきも 3 標準偏差内に包含された。また、IEU-COMP-THERM-003 に示された MCNP4B と KENO-V.a による計算結果との比較から、MVP と JENDL による計算はこれらと同程度の予測精度を有することが確認できた。JENDL-5 による IEU-COMP-THERM-003 の中性子実効増倍率は、JENDL-4.0 よりも約 0.6% 大きくなった。この理由は主として、ウラン-235 データの変更と水素化ジルコニウムの熱中性子散乱則(TSL)データの変更によるものと考えられた。

IEU-COMP-THERM-013 の中性子実効増倍率については、MVP と JENDL-5 及び JENDL-4.0, 3.3, 3.2 による計算結果はベンチマーク実験値よりも 1.0%から 1.6%程度大きく、その差は 3 標準偏差の範囲を超えた。しかしながら、JENDL バージョン間のばらつきは 3 標準偏差内に包含された。また、IEU-COMP-THERM-013 に示された MCNP5、KENO-VI 及び SERPENT による計算結果についても、MVP と JENDL による計算結果と同様に計算値と実験値との差は 3 標準偏差の範囲を超える。従って、計算値が実験値よりも有意に大きくなることは MVP と JENDL による計算に特有のものではなく、何らかのバイアスが存在している可能性がある。JENDL-5 による IEU-COMP-THERM-013 の中性子実効増倍率は、JENDL-4.0 よりも約 0.4 から 0.5% 大きくなつた。この理由は主として、水素化ジルコニウムと減速材としての水の TSL データの変更によるものと考えられる。IEU-COMP-THERM-003 とは異なり、水の TSL が JENDL-5 と JENDL-4.0 の差に効果を与えるのは、IEU-COMP-THERM-013 の燃料はエルビウムを含有するウラン水素化ジルコニウムであり、エルビウムの中性子吸収効果によって燃料中の熱中性子束が大きく低下することによるものと考えられた。

IEU-COMP-THERM-013 の制御棒反応度価値、原子炉停止余裕、過剰反応度、黒鉛ブロック反射体の反応度価値、及び実験用ドライチューブの反応度価値については、MVP と JENDL-5 及び JENDL-4.0 による計算結果はベンチマーク実験値と概ね 2 標準偏差以内で一致し、最も差が大きい一つの計算ケースにあっても 3 標準偏差内で一致した。IEU-COMP-THERM-013 に掲載の MCNP5 と ENDF/B-VII.0 による計算結果では、一部の計算値と実験値の差は 3 標準偏差を超えていたが、MVP と JENDL-5 及び JENDL-4.0 は良好な予測精度であった。中性子実効増倍率の計算結果と異なり、これら反応度に関する計算では JENDL-5 と JENDL-4.0 との有意な差はなかった。反応度は中性子実効増倍率の逆

数の差から計算しているため、中性子実効増倍率の誤差が相殺される可能性が大きいと考えられる。

今後、同じTRIGA型原子炉であるNSRRの制御棒反応度価値等の解析を予定しており、今回のベンチマーク解析結果は、計算精度の確認の参考となる。

謝辞

原子力科学研究部門原子力基礎工学研究センター炉物理・熱流動研究グループリーダーの長家康展氏からは JENDL-5 による MVP 用ライブラリーのご提供頂くとともに、水減速体系での JENDL-5 の予測精度に関する有意義な情報を頂きました。深く感謝申し上げます。

安全研究センター燃料サイクル安全研究ディビジョン長兼臨界安全研究グループリーダーの須山賢也氏には、本報告書を閲読して頂くとともに、有意義なご指摘、ご助言を頂き、深く感謝申し上げます。

本報告書で示した計算結果は、日本原子力研究開発機構のスーパーコンピュータ「HPE SGI8600」を利用して得られたものです。

参考文献

- 1) International Atomic Energy Agency, Research Reactor Database (RRDB), <https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home>(参照日:2022年10月17日).
- 2) 安全工学部 NSRR 管理室・反応度安全研究室, NSRR 臨界および特性試験報告, JAERI-M 6791, 1976, 268p.
- 3) Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development, International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, May 2020.
- 4) R. Jeraj, M. Ravnik, et al., TRIGA Mark II Reactor: U(20)-Zirconium Hydride Fuel Rods in Water with Graphite Reflector, IEU-COMP-THERM-003, NEA/NSC/DOC/(95)03/III, OECD/NEA, 2020, 88p.
- 5) J. D. Bess, T. L. Maddock, M. A. Marshall, et al., Fresh-core Reload of the Neutron Radiography (NRAD) Reactor with Uranium(20)-Erbium-Zirconium-Hydride Fuel, IEU-COMP-THERM-013, NEA/NSC/DOC/(95)03/III, OECD/NEA, 2020, 1p.
- 6) Y. Nagaya, K. Okumura, T. Mori, 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, 388p.
- 7) O. Iwamoto, N. Iwamoto, K. Shibata, et al., Status of JENDL, EPJ Web of Conferences, vol.239, 2020, ND 2019: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, no.09002, pp.1-6 (2020).
- 8) 長家康展, 多田健一, JENDL-5 の検証 (1)国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクトハンドブックを用いたベンチマークテスト, 日本原子力学会 2022 年春の年会予稿集, 1A07, 2022 年 3 月 16 日,オンライン開催.
- 9) T. Nakagawa, K. Shibata, S. Chiba, et al., Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version 3 Revision-2; JENDL-3.2, J. Nucl. Sci. Technol., vol.32, no.12, 1995, pp.1259-1271.
- 10) K. Shibata, T Kawano, T. Nakagawa, et al., Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3; JENDL-3.3, J. Nucl. Sci. Technol., vol.39, no.11, 2002, pp.1125-1136.
- 11) K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, et al., JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, J. Nucl. Sci. Technol., vol.48, no.1, 2011, pp.1-30.

- 12) Nuclear Data Center, Japan Atomic Energy Agency, JENDL-4.0 Updated Files and JENDL-4.0 Plus Files, <https://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j40/update/> (参照日:2022年11月16日).

付録 MVP サンプル入力リスト

MVP サンプル入力リストとして、IEU-COMP-THERM-003 の Core132 と IEU-COMP-THERM-013 の Case1 core について添付する。いずれも JENDL-5 による計算の入力リストである。

```

IEU-COMP-THERM-003 Core132
IEU-COMP-THERM-003 Core132 criticality
50 million histories JENDL-5.0
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* OPTIONS
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
NEUTRON_DYNAMIC_MEMORY(220000000)
EIGEN-VALUE_FLUX-PRINT
PRINT-SUPPRESS(6-7)

% NBT = 500 /* number of effective batches
% NSK = 200 /* number of skipped batches
% NHT = 100000 /* number of particles per batch

%NPART(<(NBT+NSK)*NHT>) /* total number of histories
NHIST(<NHT>) /* number of particles per batch
NBANK(<NHT*2>) /* length of particle bank
NFBANK(<NHT*2>) /* length of fission source bank
NSKIP(<NSK>) /* number of skipped batches
*
% NMEMO( 100 ) /* number of next-zone memory per zone
* TCPU( 180 ) /* calculation CPU time limit (min)
ETOP_N(2.0E7) /* top of neutron energy (eV)
EBOT_N(1.0E-5) /* bottom of neutron energy (eV)
*
NGROUP_N( 120 )
ENGYB_N( 2.0000E+07 1.5795E+07 1.2474E+07 9.8515E+06 7.7803E+06
6.1445E+06 4.8526E+06 3.8324E+06 3.0266E+06 2.3903E+06
1.8877E+06 1.4909E+06 1.1774E+06 9.2986E+05 7.3436E+05
5.7996E+05 4.5803E+05 3.6173E+05 2.8568E+05 2.2561E+05
1.7818E+05 1.4072E+05 1.1113E+05 8.7767E+04 6.9315E+04
5.4741E+04 4.3232E+04 3.4143E+04 2.6964E+04 2.1295E+04
1.6818E+04 1.3282E+04 1.0490E+04 8.2841E+03 6.5424E+03
5.1669E+03 4.8062E+03 3.2226E+03 2.5451E+03 2.0100E+03
1.5874E+03 1.2537E+03 9.9008E+02 7.8192E+02 6.1752E+02
4.8769E+02 3.9516E+02 3.0418E+02 2.4023E+02 1.8972E+02
1.4983E+02 1.1833E+02 9.3421E+01 7.3803E+01 5.8226E+01
4.6032E+01 3.6064E+01 2.8715E+01 2.2674E+01 1.7907E+01
1.4111E+01 1.1593E+01 6.2066E+00 5.5015E+00
4.3446E+00 3.4313E+00 2.7099E+00 2.1402E+00 1.6902E+00
1.3348E+00 1.0542E+00 8.3055E+01 6.5751E-01 5.1927E-01
4.1010E-01 3.2398E-01 2.5578E-01 2.0200E-01 1.5953E-01
1.2599E-01 9.9503E-02 7.8583E-02 6.2061E-02 4.9013E-02
3.8708E-02 3.0570E-02 2.4143E-02 1.9067E-02 1.5058E-02
1.1892E-02 3.3918E-03 7.4172E-03 4.8578E-03 4.6262E-03
3.6536E-03 2.8854E-03 2.2788E-03 1.7997E-03 1.4213E-03
1.1225E-03 8.8647E-04 7.0009E-03 5.5290E-04 4.3666E-04
3.4485E-04 2.7235E-04 2.1509E-04 1.6987E-04 1.3415E-04
1.0595E-04 8.3672E-05 6.6080E-05 5.2187E-05 4.1215E-05
3.2549E-05 2.5706E-05 2.0301E-05 1.6033E-05 1.2662E-05
1.0000E-5)
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* PARAMETERS FOR FUEL ROD POSITION
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
% PI = 4.0*ATAN(1.0) /* pi
% INC = 2.54 /* 2.54cm
*
% X0 = 0.0 /* 1 rod
% Y0 = 0.0
*
% R1 = 4.0538 /* 6 rods
% X11 = <R1*COS(PI*(0.5-2*0/6))>
% Y11 = <R1*SIN(PI*(0.5-2*0/6))>
% X12 = <R1*COS(PI*(0.5-2*1/6))>
% Y12 = <R1*SIN(PI*(0.5-2*1/6))>
% X13 = <R1*COS(PI*(0.5-2*2/6))>
% Y13 = <R1*SIN(PI*(0.5-2*2/6))>
% X14 = <R1*COS(PI*(0.5-2*3/6))>
% Y14 = <R1*SIN(PI*(0.5-2*3/6))>
% X15 = <R1*COS(PI*(0.5-2*4/6))>
% Y15 = <R1*SIN(PI*(0.5-2*4/6))>
% X16 = <R1*COS(PI*(0.5-2*5/6))>
% Y16 = <R1*SIN(PI*(0.5-2*5/6))>
*
% R2 = 7.9907 /* 12 rods
% X21 = <R2*COS(PI*(0.5-2*0/12))>
% Y21 = <R2*SIN(PI*(0.5-2*0/12))>
% X22 = <R2*COS(PI*(0.5-2*1/12))>
% Y22 = <R2*SIN(PI*(0.5-2*1/12))>
% X23 = <R2*COS(PI*(0.5-2*2/12))>
% Y23 = <R2*SIN(PI*(0.5-2*2/12))>
% X24 = <R2*COS(PI*(0.5-2*3/12))>
% Y24 = <R2*SIN(PI*(0.5-2*3/12))>
% X25 = <R2*COS(PI*(0.5-2*4/12))>
% Y25 = <R2*SIN(PI*(0.5-2*4/12))>
% X26 = <R2*COS(PI*(0.5-2*5/12))>
% Y26 = <R2*SIN(PI*(0.5-2*5/12))>
% X27 = <R2*COS(PI*(0.5-2*6/12))>
% Y27 = <R2*SIN(PI*(0.5-2*6/12))>
% X28 = <R2*COS(PI*(0.5-2*7/12))>
% Y28 = <R2*SIN(PI*(0.5-2*7/12))>
% X29 = <R2*COS(PI*(0.5-2*8/12))>
% Y29 = <R2*SIN(PI*(0.5-2*8/12))>
% X210 = <R2*COS(PI*(0.5-2*9/12))>
% Y210 = <R2*SIN(PI*(0.5-2*9/12))>
% X211 = <R2*COS(PI*(0.5-2*10/12))>
% Y211 = <R2*SIN(PI*(0.5-2*10/12))>

% X212 = <R2*COS(PI*(0.5-2*11/12))>
% Y212 = <R2*SIN(PI*(0.5-2*11/12))>
*
% R3 = 11.9456 /* 18 rods
% X31 = <R3*COS(PI*(0.5-2*0/18))>
% Y31 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*0/18))>
% X32 = <R3*COS(PI*(0.5-2*1/18))>
% Y32 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*1/18))>
% X33 = <R3*COS(PI*(0.5-2*2/18))>
% Y33 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*2/18))>
% X34 = <R3*COS(PI*(0.5-2*3/18))>
% Y34 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*3/18))>
% X35 = <R3*COS(PI*(0.5-2*4/18))>
% Y35 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*4/18))>
% X36 = <R3*COS(PI*(0.5-2*5/18))>
% Y36 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*5/18))>
% X37 = <R3*COS(PI*(0.5-2*6/18))>
% Y37 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*6/18))>
% X38 = <R3*COS(PI*(0.5-2*7/18))>
% Y38 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*7/18))>
% X39 = <R3*COS(PI*(0.5-2*8/18))>
% Y39 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*8/18))>
% X40 = <R3*COS(PI*(0.5-2*9/18))>
% Y40 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*9/18))>
% X41 = <R3*COS(PI*(0.5-2*10/18))>
% Y41 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*10/18))>
% X42 = <R3*COS(PI*(0.5-2*11/18))>
% Y42 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*11/18))>
% X43 = <R3*COS(PI*(0.5-2*12/18))>
% Y43 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*12/18))>
% X44 = <R3*COS(PI*(0.5-2*13/18))>
% Y44 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*13/18))>
% X45 = <R3*COS(PI*(0.5-2*14/18))>
% Y45 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*14/18))>
% X46 = <R3*COS(PI*(0.5-2*15/18))>
% Y46 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*15/18))>
% X47 = <R3*COS(PI*(0.5-2*16/18))>
% Y47 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*16/18))>
% X48 = <R3*COS(PI*(0.5-2*17/18))>
% Y48 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*17/18))>
% X49 = <R3*COS(PI*(0.5-2*18/18))>
% Y49 = <R3*SIN(PI*(0.5-2*18/18))>
% X50 = <R4*COS(PI*(0.5-2*19/24))>
% Y50 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*19/24))>
% X51 = <R4*COS(PI*(0.5-2*20/24))>
% Y51 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*20/24))>
% X52 = <R4*COS(PI*(0.5-2*1/24))>
% Y52 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*1/24))>
% X53 = <R4*COS(PI*(0.5-2*2/24))>
% Y53 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*2/24))>
% X54 = <R4*COS(PI*(0.5-2*3/24))>
% Y54 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*3/24))>
% X55 = <R4*COS(PI*(0.5-2*4/24))>
% Y55 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*4/24))>
% X56 = <R4*COS(PI*(0.5-2*5/24))>
% Y56 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*5/24))>
% X57 = <R4*COS(PI*(0.5-2*6/24))>
% Y57 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*6/24))>
% X58 = <R4*COS(PI*(0.5-2*7/24))>
% Y58 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*7/24))>
% X59 = <R4*COS(PI*(0.5-2*8/24))>
% Y59 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*8/24))>
% X60 = <R4*COS(PI*(0.5-2*9/24))>
% Y60 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*9/24))>
% X61 = <R4*COS(PI*(0.5-2*10/24))>
% Y61 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*10/24))>
% X62 = <R4*COS(PI*(0.5-2*11/24))>
% Y62 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*11/24))>
% X63 = <R4*COS(PI*(0.5-2*12/24))>
% Y63 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*12/24))>
% X64 = <R4*COS(PI*(0.5-2*13/24))>
% Y64 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*13/24))>
% X65 = <R4*COS(PI*(0.5-2*14/24))>
% Y65 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*14/24))>
% X66 = <R4*COS(PI*(0.5-2*15/24))>
% Y66 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*15/24))>
% X67 = <R4*COS(PI*(0.5-2*16/24))>
% Y67 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*16/24))>
% X68 = <R4*COS(PI*(0.5-2*17/24))>
% Y68 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*17/24))>
% X69 = <R4*COS(PI*(0.5-2*18/24))>
% Y69 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*18/24))>
% X70 = <R4*COS(PI*(0.5-2*19/24))>
% Y70 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*19/24))>
% X71 = <R4*COS(PI*(0.5-2*20/24))>
% Y71 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*20/24))>
% X72 = <R4*COS(PI*(0.5-2*21/24))>
% Y72 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*21/24))>
% X73 = <R4*COS(PI*(0.5-2*22/24))>
% Y73 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*22/24))>
% X74 = <R4*COS(PI*(0.5-2*23/24))>
% Y74 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*23/24))>
% X75 = <R4*COS(PI*(0.5-2*24/24))>
% Y75 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*24/24))>
% X76 = <R4*COS(PI*(0.5-2*25/24))>
% Y76 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*25/24))>
% X77 = <R4*COS(PI*(0.5-2*26/24))>
% Y77 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*26/24))>
% X78 = <R4*COS(PI*(0.5-2*27/24))>
% Y78 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*27/24))>
% X79 = <R4*COS(PI*(0.5-2*28/24))>
% Y79 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*28/24))>
% X80 = <R4*COS(PI*(0.5-2*29/24))>
% Y80 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*29/24))>
% X81 = <R4*COS(PI*(0.5-2*30/24))>
% Y81 = <R4*SIN(PI*(0.5-2*30/24))>
% X82 = <R5*COS(PI*(0.5-2*0/30))>
% Y82 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*0/30))>
% X83 = <R5*COS(PI*(0.5-2*1/30))>
% Y83 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*1/30))>
% X84 = <R5*COS(PI*(0.5-2*2/30))>
% Y84 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*2/30))>
% X85 = <R5*COS(PI*(0.5-2*3/30))>
% Y85 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*3/30))>
% X86 = <R5*COS(PI*(0.5-2*4/30))>
% Y86 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*4/30))>
% X87 = <R5*COS(PI*(0.5-2*5/30))>
% Y87 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*5/30))>
% X88 = <R5*COS(PI*(0.5-2*6/30))>
% Y88 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*6/30))>
% X89 = <R5*COS(PI*(0.5-2*7/30))>
% Y89 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*7/30))>
% X90 = <R5*COS(PI*(0.5-2*8/30))>
% Y90 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*8/30))>
% X91 = <R5*COS(PI*(0.5-2*9/30))>
% Y91 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*9/30))>
% X92 = <R5*COS(PI*(0.5-2*10/30))>
% Y92 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*10/30))>
```

```

% X55 = <R5*COS(PI*(0.5-2*4/30))>
% Y55 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*4/30))>
% X56 = <R5*COS(PI*(0.5-2*5/30))>
% Y56 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*5/30))>
% X57 = <R5*COS(PI*(0.5-2*6/30))>
% Y57 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*6/30))>
% X58 = <R5*COS(PI*(0.5-2*7/30))>
% Y58 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*7/30))>
% X59 = <R5*COS(PI*(0.5-2*8/30))>
% Y59 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*8/30))>
% X510 = <R5*COS(PI*(0.5-2*9/30))>
% Y510 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*9/30))>
% X511 = <R5*COS(PI*(0.5-2*10/30))>
% Y511 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*10/30))>
% X512 = <R5*COS(PI*(0.5-2*11/30))>
% Y512 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*11/30))>
% X513 = <R5*COS(PI*(0.5-2*12/30))>
% Y513 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*12/30))>
% X514 = <R5*COS(PI*(0.5-2*13/30))>
% Y514 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*13/30))>
% X515 = <R5*COS(PI*(0.5-2*14/30))>
% Y515 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*14/30))>
% X516 = <R5*COS(PI*(0.5-2*15/30))>
% Y516 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*15/30))>
% X517 = <R5*COS(PI*(0.5-2*16/30))>
% Y517 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*16/30))>
% X518 = <R5*COS(PI*(0.5-2*17/30))>
% Y518 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*17/30))>
% X519 = <R5*COS(PI*(0.5-2*18/30))>
% Y519 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*18/30))>
% X520 = <R5*COS(PI*(0.5-2*19/30))>
% Y520 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*19/30))>
% X521 = <R5*COS(PI*(0.5-2*20/30))>
% Y521 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*20/30))>
% X522 = <R5*COS(PI*(0.5-2*21/30))>
% Y522 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*21/30))>
% X523 = <R5*COS(PI*(0.5-2*22/30))>
% Y523 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*22/30))>
% X524 = <R5*COS(PI*(0.5-2*23/30))>
% Y524 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*23/30))>
% X525 = <R5*COS(PI*(0.5-2*24/30))>
% Y525 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*24/30))>
% X526 = <R5*COS(PI*(0.5-2*25/30))>
% Y526 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*25/30))>
% X527 = <R5*COS(PI*(0.5-2*26/30))>
% Y527 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*26/30))>
% X528 = <R5*COS(PI*(0.5-2*27/30))>
% Y528 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*27/30))>
% X529 = <R5*COS(PI*(0.5-2*28/30))>
% Y529 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*28/30))>
% X530 = <R5*COS(PI*(0.5-2*29/30))>
% Y530 = <R5*SIN(PI*(0.5-2*29/30))>
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* PARAMETERS FOR FUEL ELEMENT
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
% FR1 = 0.3175 /* radius of zirconium
% FR2 = 1.82245 /* outer radius of U-ZrH
% FR3 = 1.82626 /* inner radius of cladding
% FR4 = 1.87706 /* outer radius of cladding
% FR5 = 1.8161 /* radius of graphite
% FR6 = 1.82626 /* radius of Mo disc
*
% B20 = -36.03 /* bottom of fuel element
% B21 = <B20 + 7.502625> /* bottom of graphite
% B22 = <B21 + 9.398> /* bottom of Mo disc
% B23 = <B22 + 0.079375> /* bottom of U-ZrH
% B24 = <B23 + 38.1> /* bottom of graphite
% B25 = <B24 + 6.604> /* bottom of top cap
% B26 = <B25 + 10.376> /* top of fuel element
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* PARAMETERS FOR CONTROL ROD
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
% CR1 = 0.3175 /* radius of zirconium
% CR2 = 1.666875 /* outer radius of U-ZrH
% CR3 = 1.69545 /* inner radius of cladding
% CR4 = 1.74625 /* outer radius of cladding
% CR5 = 1.666875 /* radius of absorber
*
% C20 = -36.83 /* bottom of control rod
% C21 = <C20 + 1.27> /* bottom of void
% C22 = <C21 + 13.97> /* bottom of stainless steel
% C23 = <C22 + 2.54> /* bottom of U-ZrH
% C24 = <C23 + 38.1> /* bottom of void
% C25 = <C24 + 0.79375> /* bottom of stainless steel
% C26 = <C25 + 1.27> /* bottom of absorber
% C27 = <C26 + 38.1> /* bottom of void
% C28 = <C27 + 0.47625> /* bottom of stainless steel
% C29 = <C28 + 1.27> /* bottom of void
% C210 = <C29 + 9.525> /* bottom of stainless steel
% C211 = <C210 + 3.81> /* top of control rod
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* PARAMETERS FOR TRANSIENT ROD
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
% TR1 = 1.51638 /* inner radius of cladding
% TR2 = 1.87706 /* outer radius of cladding
*
% TZ0 = -36.83 /* bottom of transient rod
% TZ1 = <TZ0 + 1.27> /* bottom of void
% TZ2 = <TZ1 + 55.40375> /* bottom of Al
% TZ3 = <TZ2 + 1.27> /* bottom of absorber
% TZ4 = <TZ3 + 38.1> /* bottom of void
% TZ5 = <TZ4 + 0.47625> /* bottom of Al
% TZ6 = <TZ5 + 1.27> /* bottom of void
% TZ7 = <TZ6 + 9.525> /* bottom of Al
% TZ8 = <TZ7 + 3.81> /* top of transient rod
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* PARAMETERS FOR SOURCE ELEMENT
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
% SR1 = 1.87706 /* radius of Al
%
% SZ0 = -36.03 /* bottom of source element
% SZ1 = <SZ0 + 72.06> /* top of source element
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* PARAMETERS FOR VESSEL STRUCTURE
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
% ICR1 = 22.098 /* inner radius of Al inner cladding
% ICR2 = 22.733 /* outer radius of Al inner cladding
%
% OCR1 = 53.14 /* inner radius of Al outer cladding
%
% OCR2 = 54.41 /* outer radius of Al outer cladding
%
% WR1 = 98.4 /* radius of water
%
% BGRI = 22.06 /* radius of bottom grid
% TGRI = 22.06 /* radius of top grid
%
% AGR1 = 29.883 /* inner radius of annular groove
% AGR2 = 36.957 /* outer radius of annular groove
*
% G20 = -28.245 /* bottom of GR cladding
% G21 = <G20 + 1.27> /* bottom of GR
% G22 = <G21 + 53.95> /* top of GR
% G23 = <G22 + 0.635> /* top of GR cladding
*
% BGZ0 = -36.2 /* bottom of bottom grid
% BGZ1 = <BGZ0 + 1.905> /* top of bottom grid
% TGZ0 = 28.88 /* bottom of top grid
% TGZ1 = <TGZ0 + 1.905> /* top of top grid
%
% AGZ0 = 0.851 /* bottom of annular groove
% AGZ1 = <AGZ0 + 26.124> /* top of annular groove
*
% W20 = <-100.0 /* bottom of water
% W21 = <W20 + 200.0> /* top of water
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* TEMPERATURE
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
% TP = 23.5 /* temperature (deg-C)
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* CONSTANTS: WATER DENSITY 0.9975 g/cm3
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
% FR = 100.0 /* water density (%)
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* CROSS SECTION
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
% SXSEC
% ZIRCONIUM
& IDMAT(1)
TPRECS( 0.1 )
TEMPMT( <73.15+TP> )
Z0900J500 2.2359E-03
Z0910J500 4.8222E-03
Z0920J500 7.2906E-03
Z0940J500 7.2310E-03
Z0960J500 1.1406E-03
*
* U-ZrH fuel element
& IDMAT(2)
TPRECS( 0.1 )
TEMPMT( <73.15+TP> )
H00012J500 5.5253E-02
Z0902J500 1.8020E-02
Z0912J500 3.8865E-03
Z0922J500 5.8760E-03
Z0942J500 5.8279E-03
Z0962J500 9.1931E-04
U02350J500 3.6801E-04
U02380J500 1.4625E-03
*
* U-ZrH control rod
& IDMAT(3)
TPRECS( 0.1 )
TEMPMT( <73.15+TP> )
H00012J500 5.6284E-02
Z0902J500 1.8357E-02
Z0912J500 3.8865E-03
Z0922J500 5.9885E-03
Z0942J500 5.9366E-03
Z0962J500 9.3648E-04
U02350J500 3.7487E-04
U02380J500 1.4898E-03
*
* B4C
& IDMAT(4)
TPRECS( 0.1 )
TEMPMT( <73.15+TP> )
B00100J500 2.1443E-02
B00110J500 8.6310E-02
C00120J500 2.7085E-02
C00130J500 2.7.034E-04
*
* SUS304 CLADDING
& IDMAT(5)
TPRECS( 0.1 )
TEMPMT( <73.15+TP> )
C00102J500 3.1330E-04
C00130J500 3.1271E-06
S10280J500 3.1315E-03
S10290J500 1.5360E-04
S10300J500 9.7997E-05
P00310J500 6.1335E-05
S00320J500 5.6400E-05
S00330J500 4.3791E-07
S00340J500 2.3994E-06
S00360J500 1.0564E-08
C05050J500 7.8515E-04
C05060J500 1.4552E-02
C05030J500 1.6372E-03
C05040J500 3.3572E-03
MN0550J500 3.2235E-03
F00540J500 3.4400E-03
F00560J500 5.2038E-02
F00570J500 1.1817E-03
F00580J500 1.5455E-04
NI0580J500 5.5805E-03
NI0600J500 2.0780E-03
NI0610J500 8.8847E-05
NI0620J500 2.7872E-04
NI0640J500 6.8762E-05
*
* AL CLADDING
& IDMAT(6)
TPRECS( 0.1 )
TEMPMT( <73.15+TP> )
A02070J500 6.0262E-02
*
* MO DISC
& IDMAT(7)
TPRECS( 0.1 )
TEMPMT( <73.15+TP> )
M00920J500 9.9114E-03
M00940J500 6.0465E-03
M00950J500 1.0297E-02

```

```

MO0960J50( 1.0676E-02 )
MO0970J50( 6.0492E-03 )
MO0980J50( 1.5129E-02 )
MO1000J50( 5.9167E-03 )
*
* GRAPHITE
& IDMAT(8)
TPRECS( 1.0 )
TEMPMT( <273.15+TP> )
C0012CJ50P00( 7.9428E-02 )
C0013CJ50P00( 7.9279E-04 )
*
* WATER
& IDMAT(9)
TPRECS( 0.1 )
TEMPMT( <273.15+TP> )
H0001HJ50( <6.6689E-02*FR/100.0> )
O0016HJ50( <3.3344E-02*FR/100.0> )
*
* AIR
& IDMAT(10)
TPRECS( 0.1 )
TEMPMT( <273.15+TP> )
N00140J50( 4.3330E-05 )
N00150J50( 1.4859E-07 )
O00160J50( 1.0868E-05 )
*
$END XSEC
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* GEOMETRY
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
$GEOMETRY
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*A1_fuel
CYL( 10010 <X0> <Y0> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR1> ) /* Zr
CYL( 10011 <X0> <Y0> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR2> ) /* U-ZrH
CYL( 10012 <X0> <Y0> <BZ2> <BZ3-BZ2> <FR3> ) /* Mo
CYL( 10013 <X0> <Y0> <BZ1> <BZ2-BZ1> <FR4> ) /* C-bot.
CYL( 10014 <X0> <Y0> <BZ4> <BZ5-BZ4> <FR5> ) /* C-top
CYL( 10015 <X0> <Y0> <BZ1> <BZ3-BZ1> <FR3> ) /* Air
CYL( 10016 <X0> <Y0> <BZ0> <BZ6-BZ0> <FR4> ) /* Sus
*
*B1_fuel
CYL( 10020 <X14> <Y14> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR1> ) /* Zr
CYL( 10021 <X14> <Y14> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR2> ) /* U-ZrH
CYL( 10022 <X14> <Y14> <BZ2> <BZ3-BZ2> <FR6> ) /* Mo
CYL( 10023 <X14> <Y14> <BZ1> <BZ2-BZ1> <FR5> ) /* C-bot.
CYL( 10024 <X14> <Y14> <BZ4> <BZ5-BZ4> <FR5> ) /* C-top
CYL( 10025 <X14> <Y14> <BZ1> <BZ3-BZ1> <FR3> ) /* Air
CYL( 10026 <X14> <Y14> <BZ0> <BZ6-BZ0> <FR4> ) /* Sus
*
*B2_fuel
CYL( 10030 <X15> <Y15> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR1> ) /* Zr
CYL( 10031 <X15> <Y15> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR2> ) /* U-ZrH
CYL( 10032 <X15> <Y15> <BZ2> <BZ3-BZ2> <FR6> ) /* Mo
CYL( 10033 <X15> <Y15> <BZ1> <BZ2-BZ1> <FR5> ) /* C-bot.
CYL( 10034 <X15> <Y15> <BZ4> <BZ5-BZ4> <FR5> ) /* C-top
CYL( 10035 <X15> <Y15> <BZ1> <BZ3-BZ1> <FR3> ) /* Air
CYL( 10036 <X15> <Y15> <BZ0> <BZ6-BZ0> <FR4> ) /* Sus
*
*B3_fuel
CYL( 10040 <X16> <Y16> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR1> ) /* Zr
CYL( 10041 <X16> <Y16> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR2> ) /* U-ZrH
CYL( 10042 <X16> <Y16> <BZ2> <BZ3-BZ2> <FR6> ) /* Mo
CYL( 10043 <X16> <Y16> <BZ1> <BZ2-BZ1> <FR5> ) /* C-bot.
CYL( 10044 <X16> <Y16> <BZ4> <BZ5-BZ4> <FR5> ) /* C-top
CYL( 10045 <X16> <Y16> <BZ1> <BZ3-BZ1> <FR3> ) /* Air
CYL( 10046 <X16> <Y16> <BZ0> <BZ6-BZ0> <FR4> ) /* Sus
*
*B4_fuel
CYL( 10050 <X11> <Y11> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR1> ) /* Zr
CYL( 10051 <X11> <Y11> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR2> ) /* U-ZrH
CYL( 10052 <X11> <Y11> <BZ2> <BZ3-BZ2> <FR6> ) /* Mo
CYL( 10053 <X11> <Y11> <BZ1> <BZ2-BZ1> <FR5> ) /* C-bot.
CYL( 10054 <X11> <Y11> <BZ4> <BZ5-BZ4> <FR5> ) /* C-top
CYL( 10055 <X11> <Y11> <BZ1> <BZ3-BZ1> <FR3> ) /* Air
CYL( 10056 <X11> <Y11> <BZ0> <BZ6-BZ0> <FR4> ) /* Sus
*
*B5_fuel
CYL( 10060 <X12> <Y12> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR1> ) /* Zr
CYL( 10061 <X12> <Y12> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR2> ) /* U-ZrH
CYL( 10062 <X12> <Y12> <BZ2> <BZ3-BZ2> <FR6> ) /* Mo
CYL( 10063 <X12> <Y12> <BZ1> <BZ2-BZ1> <FR5> ) /* C-bot.
CYL( 10064 <X12> <Y12> <BZ4> <BZ5-BZ4> <FR5> ) /* C-top
CYL( 10065 <X12> <Y12> <BZ1> <BZ3-BZ1> <FR3> ) /* Air
CYL( 10066 <X12> <Y12> <BZ0> <BZ6-BZ0> <FR4> ) /* Sus
*
*B6_fuel
CYL( 10070 <X13> <Y13> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR1> ) /* Zr
CYL( 10071 <X13> <Y13> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR2> ) /* U-ZrH
CYL( 10072 <X13> <Y13> <BZ2> <BZ3-BZ2> <FR6> ) /* Mo
CYL( 10073 <X13> <Y13> <BZ1> <BZ2-BZ1> <FR5> ) /* C-bot.
CYL( 10074 <X13> <Y13> <BZ4> <BZ5-BZ4> <FR5> ) /* C-top
CYL( 10075 <X13> <Y13> <BZ1> <BZ3-BZ1> <FR3> ) /* Air
CYL( 10076 <X13> <Y13> <BZ0> <BZ6-BZ0> <FR4> ) /* Sus
*
*C1_fuel
CYL( 10080 <X27> <Y27> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR1> ) /* Zr
CYL( 10081 <X27> <Y27> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR2> ) /* U-ZrH
CYL( 10082 <X27> <Y27> <BZ2> <BZ3-BZ2> <FR6> ) /* Mo
CYL( 10083 <X27> <Y27> <BZ1> <BZ2-BZ1> <FR5> ) /* C-bot.
CYL( 10084 <X27> <Y27> <BZ4> <BZ5-BZ4> <FR5> ) /* C-top
CYL( 10085 <X27> <Y27> <BZ1> <BZ3-BZ1> <FR3> ) /* Air
CYL( 10086 <X27> <Y27> <BZ0> <BZ6-BZ0> <FR4> ) /* Sus
*
*C2_fuel
CYL( 10090 <X28> <Y28> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR1> ) /* Zr
CYL( 10091 <X28> <Y28> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR2> ) /* U-ZrH
CYL( 10092 <X28> <Y28> <BZ2> <BZ3-BZ2> <FR6> ) /* Mo
CYL( 10093 <X28> <Y28> <BZ1> <BZ2-BZ1> <FR5> ) /* C-bot.
CYL( 10094 <X28> <Y28> <BZ4> <BZ5-BZ4> <FR5> ) /* C-top
CYL( 10095 <X28> <Y28> <BZ1> <BZ3-BZ1> <FR3> ) /* Air
CYL( 10096 <X28> <Y28> <BZ0> <BZ6-BZ0> <FR4> ) /* Sus
*
*C3_fuel
CYL( 10100 <X29> <Y29> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR1> ) /* Zr
CYL( 10101 <X29> <Y29> <BZ3> <BZ4-BZ3> <FR2> ) /* U-ZrH
CYL( 10102 <X29> <Y29> <BZ2> <BZ3-BZ2> <FR6> ) /* Mo
CYL( 10103 <X29> <Y29> <BZ1> <BZ2-BZ1> <FR5> ) /* C-bot.
CYL( 10104 <X29> <Y29> <BZ4> <BZ5-BZ4> <FR5> ) /* C-top
CYL( 10105 <X29> <Y29> <BZ1> <BZ3-BZ1> <FR3> ) /* Air
CYL( 10106 <X29> <Y29> <BZ0> <BZ6-BZ0> <FR4> ) /* Sus
*
*C4_transient_rod
CYL( 10110 <X210> <Y210> <T23> <T24-T23> <TR1> ) /* B4C
CYL( 10111 <X210> <Y210> <T21> <T22-T21> <TR1> ) /* Air
CYL( 10112 <X210> <Y210> <T24> <T25-T24> <TR1> ) /* Air
CYL( 10113 <X210> <Y210> <T26> <T27-T26> <TR1> ) /* Air

```



```

CYL (100228 <X528> <Y528> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* F13
CYL (100229 <X529> <Y529> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* F14
CYL (100230 <X530> <Y530> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* F15
*
CYL (100231 <X423> <Y423> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E11
CYL (100232 <X424> <Y424> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E12
CYL (100233 <X425> <Y425> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E13
CYL (100234 <X426> <Y426> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E14
CYL (100235 <X427> <Y427> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E15
CYL (100236 <X428> <Y428> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E16
CYL (100237 <X429> <Y429> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E17
CYL (100238 <X430> <Y430> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E18
CYL (100239 <X431> <Y431> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E19
CYL (100240 <X432> <Y432> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E20
CYL (100241 <X433> <Y433> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E21
CYL (100242 <X434> <Y434> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E22
CYL (100243 <X435> <Y435> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E23
CYL (100244 <X436> <Y436> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E24
CYL (100245 <X437> <Y437> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E1
CYL (100246 <X438> <Y438> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E2
CYL (100247 <X439> <Y439> <TGZ0> <TGZ1-TGZ0> <FR4> ) /* E3
*
*annular_groove
CYL (200010 0.0 0.0 <AGZ0> <GZ2-AGZ0> <AGR1> ) /* inner
CYL (200020 0.0 0.0 <AGZ0> <GZ2-AGZ0> <AGR2> ) /* outer
*
*graphite_reflector
* below annular_groove
CYL (300010 0.0 0.0 <GZ1> <AGZ0-GZ1> <ICR2> ) /* inner
CYL (300020 0.0 0.0 <GZ1> <AGZ0-GZ1> <OCR1> ) /* outer
* above annular_groove
CYL (300030 0.0 0.0 <AGZ0> <GZ2-AGZ0> <ICR2> ) /* outer
CYL (300040 0.0 0.0 <AGZ0> <GZ2-AGZ0> <OCR1> ) /* outer
*
*graphite_reflector_Al_cladding
CYL (400010 0.0 0.0 <GZ0> <GZ3-GZ0> <ICR1> ) /* inner
CYL (400020 0.0 0.0 <GZ0> <GZ3-GZ0> <OCR2> ) /* outer
*
water_reflector
CYL (500010 0.0 0.0 <WZ0> <WZ1-WZ0> <WR1> )
CYL (500020 0.0 0.0 <WZ0> <WZ1-WZ0> <ICR1> )
*
*moderator between R3 and R4, and between top and bottom grid
CYL (600000 0.0 0.0 <BGZ1> <TGZ0-BGZ1> <0.5*(R4-R3)+R3> )
*
END
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* ZONE
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
VOUT : REF1 : -1000 :-500010 /* outer void
REF1 : REF1 : 9 : 500010 -500020 -400020 /* water ref.
REF2 : REF1 : 9 : 500020 -100010 -100020 -600000
    -10016 -10026 -10036 -10046 -10056
    -10066 -10076 -10086 -10096 -10106
    -10114 -10126 -10136 -10146 -10156
    -10166 -10177 -10186 -10196 -10207
    -10216 -10226 -10236 -10246 -10256
    -10266 -10276 -10286 -10297 -10306
    -10316 -10326 -10336 -10346 -10356
    -10366 -10376 -10386 -10396 -10406
    -10416 -10426 -10436 -10446
MODR : MODR : 9 : 600000
    -10016 -10026 -10036 -10046 -10056
    -10066 -10076 -10086 -10096 -10106
    -10114 -10126 -10136 -10146 -10156
    -10166 -10177 -10186 -10196 -10207
    -10216 -10226 -10236 -10246 -10256
    -10266 -10276 -10286 -10297 -10306
    -10316 -10326 -10336 -10346 -10356
    -10366 -10376 -10386 -10396 -10406
    -10416 -10426 -10436 -10446
GRCL : GRCL : 6 : 400020 -400010 /* grph clad
GRP1 : GRP1 : 8 : 300020 -300010 /* graphite
GRP2 : GRP2 : 8 : 300040 -200020 /* graphite
GRP3 : GRP3 : 8 : 200010 -300030 /* graphite
ANGR : ANGR : 10 : 200020 -200010 /* air
BTGD : BTGD : 6 : 100010
    -10016 -10026 -10036 -10046 -10056
    -10066 -10076 -10086 -10096 -10106
    -10114 -10126 -10136 -10146 -10156
    -10166 -10177 -10186 -10196 -10207
    -10216 -10226 -10236 -10246 -10256
    -10266 -10276 -10286 -10297 -10306
    -10316 -10326 -10336 -10346 -10356
    -10366 -10376 -10386 -10396 -10406
    -10416 -10426 -10436 -10446
    -10016 -10026 -10036 -10046 -10056
    -10066 -10076 -10086 -10096 -10106
    -10114 -10126 -10136 -10146 -10156
    -10166 -10177 -10186 -10196 -10207
    -10216 -10226 -10236 -10246 -10256
    -10266 -10276 -10286 -10297 -10306
    -10316 -10326 -10336 -10346 -10356
    -10366 -10376 -10386 -10396 -10406
    -10416 -10426 -10436 -10446
    -100201 -100202 -100203 -100204 -100205
    -100206 -100207 -100208 -100209 -100210
    -100211 -100212 -100213 -100214 -100215
    -100216 -100217 -100218 -100219 -100220
    -100221 -100222 -100223 -100224 -100225
    -100226 -100227 -100228 -100229 -100230
    -100231 -100232 -100233 -100234 -100235
    -100236 -100237 -100238 -100239 -100240
    -100241 -100242 -100243 -100244 -100245
    -100246 -100247
BH01 : BHWA : 9 : 100101
BH02 : BHWA : 9 : 100102
BH03 : BHWA : 9 : 100103
BH04 : BHWA : 9 : 100104
BH05 : BHWA : 9 : 100105
BH06 : BHWA : 9 : 100106
BH07 : BHWA : 9 : 100107
BH08 : BHWA : 9 : 100108
BH09 : BHWA : 9 : 100109
BH10 : BHWA : 9 : 100110
BH11 : BHWA : 9 : 100111
BH12 : BHWA : 9 : 100112
BH13 : BHWA : 9 : 100113
BH14 : BHWA : 9 : 100114
BH15 : BHWA : 9 : 100115
BH16 : BHWA : 9 : 100116
BH17 : BHWA : 9 : 100117
BH18 : BHWA : 9 : 100118
BH19 : BHWA : 9 : 100119
BH20 : BHWA : 9 : 100120
BH21 : BHWA : 9 : 100121
BH22 : BHWA : 9 : 100122
BH23 : BHWA : 9 : 100123
BH24 : BHWA : 9 : 100124
BH25 : BHWA : 9 : 100125
BH26 : BHWA : 9 : 100126
BH27 : BHWA : 9 : 100127
BH28 : BHWA : 9 : 100128
BH29 : BHWA : 9 : 100129
BH30 : BHWA : 9 : 100130
BH31 : BHWA : 9 : 100131
BH32 : BHWA : 9 : 100132
BH33 : BHWA : 9 : 100133
BH34 : BHWA : 9 : 100134
BH35 : BHWA : 9 : 100135
BH36 : BHWA : 9 : 100136
BH37 : BHWA : 9 : 100137
BH38 : BHWA : 9 : 100138
BH39 : BHWA : 9 : 100139
BH40 : BHWA : 9 : 100140
BH41 : BHWA : 9 : 100141
BH42 : BHWA : 9 : 100142
BH43 : BHWA : 9 : 100143
BH44 : BHWA : 9 : 100144
BH45 : BHWA : 9 : 100145
BH46 : BHWA : 9 : 100146
BH47 : BHWA : 9 : 100147
TH01 : THWA : 9 : 100201
TH02 : THWA : 9 : 100202
TH03 : THWA : 9 : 100203
TH04 : THWA : 9 : 100204
TH05 : THWA : 9 : 100205
TH06 : THWA : 9 : 100206
TH07 : THWA : 9 : 100207
TH08 : THWA : 9 : 100208
TH09 : THWA : 9 : 100209
TH10 : THWA : 9 : 100210
TH11 : THWA : 9 : 100211
TH12 : THWA : 9 : 100212
TH13 : THWA : 9 : 100213
TH14 : THWA : 9 : 100214
TH15 : THWA : 9 : 100215
TH16 : THWA : 9 : 100216
TH17 : THWA : 9 : 100217
TH18 : THWA : 9 : 100218
TH19 : THWA : 9 : 100219
TH20 : THWA : 9 : 100220
TH21 : THWA : 9 : 100221
TH22 : THWA : 9 : 100222
TH23 : THWA : 9 : 100223
TH24 : THWA : 9 : 100224
TH25 : THWA : 9 : 100225
TH26 : THWA : 9 : 100226
TH27 : THWA : 9 : 100227
TH28 : THWA : 9 : 100228
TH29 : THWA : 9 : 100229
TH30 : THWA : 9 : 100230
TH31 : THWA : 9 : 100231
TH32 : THWA : 9 : 100232
TH33 : THWA : 9 : 100233
TH34 : THWA : 9 : 100234
TH35 : THWA : 9 : 100235
TH36 : THWA : 9 : 100236
TH37 : THWA : 9 : 100237
TH38 : THWA : 9 : 100238
TH39 : THWA : 9 : 100239
TH40 : THWA : 9 : 100240
TH41 : THWA : 9 : 100241
TH42 : THWA : 9 : 100242
TH43 : THWA : 9 : 100243
TH44 : THWA : 9 : 100244
TH45 : THWA : 9 : 100245
TH46 : THWA : 9 : 100246
TH47 : THWA : 9 : 100247
*
Z001 : ZIRC : 1 : 10010
F001 : FUEL : 2 : 10011 -10010
M001 : MODS : 7 : 10012
E001 : GRPB : 8 : 10013
U001 : GRPT : 8 : 10014
K001 : VAIR : 10 : 10015 -10011 -10012 -10013 -10014
S001 : SUSC : 5 : 10016 -10015
*
Z002 : ZIRC : 1 : 10020
F002 : FUEL : 2 : 10021 -10020
M002 : MODS : 7 : 10022
E002 : GRPB : 8 : 10023
U002 : GRPT : 8 : 10024
K002 : VAIR : 10 : 10025 -10021 -10022 -10023 -10024
S002 : SUSC : 5 : 10026 -10025
*
Z003 : ZIRC : 1 : 10030
F003 : FUEL : 2 : 10031 -10030
M003 : MODS : 7 : 10032
E003 : GRPB : 8 : 10033
U003 : GRPT : 8 : 10034
K003 : VAIR : 10 : 10035 -10031 -10032 -10033 -10034
S003 : SUSC : 5 : 10036 -10035
*
Z004 : ZIRC : 1 : 10040
F004 : FUEL : 2 : 10041 -10040
M004 : MODS : 7 : 10042
E004 : GRPB : 8 : 10043
U004 : GRPT : 8 : 10044
K004 : VAIR : 10 : 10045 -10041 -10042 -10043 -10044
S004 : SUSC : 5 : 10046 -10045
*
Z005 : ZIRC : 1 : 10050
F005 : FUEL : 2 : 10051 -10050
M005 : MODS : 7 : 10052
E005 : GRPB : 8 : 10053
U005 : GRPT : 8 : 10054
K005 : VAIR : 10 : 10055 -10051 -10052 -10053 -10054
S005 : SUSC : 5 : 10056 -10055
*
Z006 : ZIRC : 1 : 10060
F006 : FUEL : 2 : 10061 -10060
M006 : MODS : 7 : 10062
E006 : GRPB : 8 : 10063
U006 : GRPT : 8 : 10064

```

K006 : VAIR : 10 : 10065 -10061 -10062 -10063 -10064	S022 : SUSC : 5 : 10226 -10225
S006 : SUSC : 5 : 10066 -10065	*
Z007 : ZIRC : 1 : 10070	Z023 : ZIRC : 1 : 10230
F007 : FUEL : 2 : 10071 -10070	F023 : FUEL : 2 : 10231 -10230
M007 : MODS : 7 : 10072	M023 : MODS : 7 : 10232
E007 : GRPB : 8 : 10073	E023 : GRPB : 8 : 10233
U007 : GRPT : 8 : 10074	U023 : GRPT : 8 : 10234
K007 : VAIR : 10 : 10075 -10071 -10072 -10073 -10074	K023 : VAIR : 10 : 10235 -10231 -10232 -10233 -10234
S007 : SUSC : 5 : 10076 -10075	S023 : SUSC : 5 : 10236 -10235
*	*
Z008 : ZIRC : 1 : 10080	Z024 : ZIRC : 1 : 10240
F008 : FUEL : 2 : 10081 -10080	F024 : FUEL : 2 : 10241 -10240
M008 : MODS : 7 : 10082	M024 : MODS : 7 : 10242
E008 : GRPB : 8 : 10083	E024 : GRPB : 8 : 10243
U008 : GRPT : 8 : 10084	U024 : GRPT : 8 : 10244
K008 : VAIR : 10 : 10085 -10081 -10082 -10083 -10084	K024 : VAIR : 10 : 10245 -10241 -10242 -10243 -10244
S008 : SUSC : 5 : 10086 -10085	S024 : SUSC : 5 : 10246 -10245
*	*
Z009 : ZIRC : 1 : 10090	Z025 : ZIRC : 1 : 10250
F009 : FUEL : 2 : 10091 -10090	F025 : FUEL : 2 : 10251 -10250
M009 : MODS : 7 : 10092	M025 : MODS : 7 : 10252
E009 : GRPB : 8 : 10093	E025 : GRPB : 8 : 10253
U009 : GRPT : 8 : 10094	U025 : GRPT : 8 : 10254
K009 : VAIR : 10 : 10095 -10091 -10092 -10093 -10094	K025 : VAIR : 10 : 10255 -10251 -10252 -10253 -10254
S009 : SUSC : 5 : 10096 -10095	S025 : SUSC : 5 : 10256 -10255
*	*
Z010 : ZIRC : 1 : 10100	Z026 : ZIRC : 1 : 10260
F010 : FUEL : 2 : 10101 -10100	F026 : FUEL : 2 : 10261 -10260
M010 : MODS : 7 : 10102	M026 : MODS : 7 : 10262
E010 : GRPB : 8 : 10103	E026 : GRPB : 8 : 10263
U010 : GRPT : 8 : 10104	U026 : GRPT : 8 : 10264
K010 : VAIR : 10 : 10105 -10101 -10102 -10103 -10104	K026 : VAIR : 10 : 10265 -10261 -10262 -10263 -10264
S010 : SUSC : 5 : 10106 -10105	S026 : SUSC : 5 : 10266 -10265
*	*
A011 : AESO : 4 : 10110	Z027 : ZIRC : 1 : 10270
K011 : VAI0 : 10 : 10111	F027 : FUEL : 2 : 10271 -10270
K111 : VAI0 : 10 : 10112	M027 : MODS : 7 : 10272
K211 : VAI0 : 10 : 10113	E027 : GRPB : 8 : 10273
S011 : ALCO : 6 : 10114 -10110 -10111 -10112 -10113	U027 : GRPT : 8 : 10274
*	K027 : VAIR : 10 : 10275 -10271 -10272 -10273 -10274
Z012 : ZIRC : 1 : 10120	S027 : SUSC : 5 : 10276 -10275
F012 : FUEL : 2 : 10121 -10120	*
M012 : MODS : 7 : 10122	Z028 : ZIRC : 1 : 10280
E012 : GRPB : 8 : 10123	F028 : FUEL : 2 : 10281 -10280
U012 : GRPT : 8 : 10124	M028 : MODS : 7 : 10282
K012 : VAIR : 10 : 10125 -10121 -10122 -10123 -10124	E028 : GRPB : 8 : 10283
S012 : SUSC : 5 : 10126 -10125	U028 : GRPT : 8 : 10284
*	K028 : VAIR : 10 : 10285 -10281 -10282 -10283 -10284
Z013 : ZIRC : 1 : 10130	S028 : SUSC : 5 : 10286 -10285
F013 : FUEL : 2 : 10131 -10130	*
M013 : MODS : 7 : 10132	Z029 : ZIRI : 1 : 10290
E013 : GRPB : 8 : 10133	F029 : FUEL : 2 : 10291 -10290
U013 : GRPT : 8 : 10134	A029 : ABSI : 4 : 10292
K013 : VAIR : 10 : 10135 -10131 -10132 -10133 -10134	K029 : VAI1 : 10 : 10293
S013 : SUSC : 5 : 10136 -10135	K129 : VAI1 : 10 : 10294 -10291
*	K229 : VAI1 : 10 : 10295 -10292
Z014 : ZIRC : 1 : 10140	K329 : VAI1 : 10 : 10296
F014 : FUEL : 2 : 10141 -10140	S029 : SUSI : 5 : 10297 -10293 -10294 -10295 -10296
M014 : MODS : 7 : 10142	*
E014 : GRPB : 8 : 10143	Z030 : ZIRC : 1 : 10300
U014 : GRPT : 8 : 10144	F030 : FUEL : 2 : 10301 -10300
K014 : VAIR : 10 : 10145 -10141 -10142 -10143 -10144	M030 : MODS : 7 : 10302
S014 : SUSC : 5 : 10146 -10145	E030 : GRPB : 8 : 10303
*	U030 : GRPT : 8 : 10304
Z015 : ZIRC : 1 : 10150	K030 : VAIR : 10 : 10305 -10301 -10302 -10303 -10304
F015 : FUEL : 2 : 10151 -10150	S030 : SUSC : 5 : 10306 -10305
M015 : MODS : 7 : 10152	*
E015 : GRPB : 8 : 10153	Z031 : ZIRC : 1 : 10310
U015 : GRPT : 8 : 10154	F031 : FUEL : 2 : 10311 -10310
K015 : VAIR : 10 : 10155 -10151 -10152 -10153 -10154	M031 : MODS : 7 : 10312
S015 : SUSC : 5 : 10156 -10155	E031 : GRPB : 8 : 10313
*	U031 : GRPT : 8 : 10314
Z016 : ZIRC : 1 : 10160	K031 : VAIR : 10 : 10315 -10311 -10312 -10313 -10314
F016 : FUEL : 2 : 10161 -10160	S031 : SUSC : 5 : 10316 -10315
M016 : MODS : 7 : 10162	*
E016 : GRPB : 8 : 10163	Z032 : ZIRC : 1 : 10320
U016 : GRPT : 8 : 10164	F032 : FUEL : 2 : 10321 -10320
K016 : VAIR : 10 : 10165 -10161 -10162 -10163 -10164	M032 : MODS : 7 : 10322
S016 : SUSC : 5 : 10166 -10165	E032 : GRPB : 8 : 10323
*	U032 : GRPT : 8 : 10324
Z017 : ZIRC : 1 : 10170	K032 : VAIR : 10 : 10325 -10321 -10322 -10323 -10324
F017 : FUEL : 2 : 10171 -10170	S032 : SUSC : 5 : 10326 -10325
A017 : ABSI : 4 : 10172	*
K017 : VAI1 : 10 : 10173	Z033 : ZIRC : 1 : 10330
K117 : VAI1 : 10 : 10174 -10171	F033 : FUEL : 2 : 10331 -10330
K217 : VAI1 : 10 : 10175 -10172	M033 : MODS : 7 : 10332
K317 : VAI1 : 10 : 10176	E033 : GRPB : 8 : 10333
S017 : SUS1 : 5 : 10177 -10173 -10174 -10175 -10176	U033 : GRPT : 8 : 10334
*	K033 : VAIR : 10 : 10335 -10331 -10332 -10333 -10334
Z018 : ZIRC : 1 : 10180	S033 : SUSC : 5 : 10336 -10335
F018 : FUEL : 2 : 10181 -10180	*
M018 : MODS : 7 : 10182	Z034 : ZIRC : 1 : 10340
E018 : GRPB : 8 : 10183	F034 : FUEL : 2 : 10341 -10340
U018 : GRPT : 8 : 10184	M034 : MODS : 7 : 10342
K018 : VAIR : 10 : 10185 -10181 -10182 -10183 -10184	E034 : GRPB : 8 : 10343
S018 : SUSC : 5 : 10186 -10185	U034 : GRPT : 8 : 10344
*	K034 : VAIR : 10 : 10345 -10341 -10342 -10343 -10344
Z019 : ZIRC : 1 : 10190	S034 : SUSC : 5 : 10346 -10345
F019 : FUEL : 2 : 10191 -10190	*
M019 : MODS : 7 : 10192	Z035 : ZIRC : 1 : 10350
E019 : GRPB : 8 : 10193	F035 : FUEL : 2 : 10351 -10350
U019 : GRPT : 8 : 10194	M035 : MODS : 7 : 10352
K019 : VAIR : 10 : 10195 -10191 -10192 -10193 -10194	E035 : GRPB : 8 : 10353
S019 : SUSC : 5 : 10196 -10195	U035 : GRPT : 8 : 10354
*	K035 : VAIR : 10 : 10355 -10351 -10352 -10353 -10354
Z020 : ZIRC : 1 : 10200	S035 : SUSC : 5 : 10356 -10355
F020 : FUEL : 2 : 10201 -10200	*
A020 : ABSI : 4 : 10202	Z036 : ZIRC : 1 : 10360
K020 : VAI1 : 10 : 10203	F036 : FUEL : 2 : 10361 -10360
K120 : VAI1 : 10 : 10204 -10201	M036 : MODS : 7 : 10362
K220 : VAI1 : 10 : 10205 -10202	E036 : GRPB : 8 : 10363
K320 : VAI1 : 10 : 10206	U036 : GRPT : 8 : 10364
S020 : SUS1 : 5 : 10207 -10203 -10204 -10205 -10206	K036 : VAIR : 10 : 10365 -10361 -10362 -10363 -10364
*	S036 : SUSC : 5 : 10366 -10365
Z021 : ZIRC : 1 : 10210	*
F021 : FUEL : 2 : 10211 -10210	Z037 : ZIRC : 1 : 10370
M021 : MODS : 7 : 10212	F037 : FUEL : 2 : 10371 -10370
E021 : GRPB : 8 : 10213	M037 : MODS : 7 : 10372
U021 : GRPT : 8 : 10214	E037 : GRPB : 8 : 10373
K021 : VAIR : 10 : 10215 -10211 -10212 -10213 -10214	U037 : GRPT : 8 : 10374
S021 : SUSC : 5 : 10216 -10215	K037 : VAIR : 10 : 10375 -10371 -10372 -10373 -10374
*	S037 : SUSC : 5 : 10376 -10375
Z022 : ZIRC : 1 : 10220	*
F022 : FUEL : 2 : 10221 -10220	Z038 : ZIRC : 1 : 10380
M022 : MODS : 7 : 10222	F038 : FUEL : 2 : 10381 -10380
E022 : GRPB : 8 : 10223	M038 : MODS : 7 : 10382
U022 : GRPT : 8 : 10224	E038 : GRPB : 8 : 10383
K022 : VAIR : 10 : 10225 -10221 -10222 -10223 -10224	U038 : GRPT : 8 : 10384
S022 : SUSC : 5 : 10226 -10225	K038 : VAIR : 10 : 10385 -10381 -10382 -10383 -10384

```

S038 : SUSC : 5 : 10386 -10385
* Z039 : ZIRC : 1 : 10390
F039 : FUEL : 2 : 10391 -10390
M039 : MODS : 7 : 10392
E039 : GRPB : 8 : 10393
U039 : GRPT : 8 : 10394
K039 : VAIR : 10 : 10395 -10391 -10392 -10393 -10394
S039 : SUSC : 5 : 10396 -10395
*
Z040 : ZIRC : 1 : 10400
F040 : FUEL : 2 : 10401 -10400
M040 : MODS : 7 : 10402
E040 : GRPB : 8 : 10403
U040 : GRPT : 8 : 10404
K040 : VAIR : 10 : 10405 -10401 -10402 -10403 -10404
S040 : SUSC : 5 : 10406 -10405
*
Z041 : ZIRC : 1 : 10410
F041 : FUEL : 2 : 10411 -10410
M041 : MODS : 7 : 10412
E041 : GRPB : 8 : 10413
U041 : GRPT : 8 : 10414
K041 : VAIR : 10 : 10415 -10411 -10412 -10413 -10414
S041 : SUSC : 5 : 10416 -10415
*
Z042 : ZIRC : 1 : 10420
F042 : FUEL : 2 : 10421 -10420
M042 : MODS : 7 : 10422
E042 : GRPB : 8 : 10423
U042 : GRPT : 8 : 10424
K042 : VAIR : 10 : 10425 -10421 -10422 -10423 -10424
S042 : SUSC : 5 : 10426 -10425
*
Z043 : ZIRC : 1 : 10430
F043 : FUEL : 2 : 10431 -10430
M043 : MODS : 7 : 10432
E043 : GRPB : 8 : 10433
U043 : GRPT : 8 : 10434
K043 : VAIR : 10 : 10435 -10431 -10432 -10433 -10434
S043 : SUSC : 5 : 10436 -10435
*
* SOUR : SOUR : 6 : 10450
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* TALLY REGION
DEFINE @UZH (FUEL FUE1 )
*
$END GEOMETRY
*
$TALLY
&
LABEL( NEUTRON FLUX IN U-ZRH )
EVENT( TRACK )
NEUTRON
DIMENSION ( REGION ENERGY )
REGION( @UZH )
IENERGY ( 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
31 32 33 34 35 36 37 38 39 40
41 42 43 44 45 46 47 48 49 50
51 52 53 54 55 56 57 58 59 60
61 62 63 64 65 66 67 68 69 70
71 72 73 74 75 76 77 78 79 80
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90
91 92 93 94 95 96 97 98 99 100
101 102 103 104 105 106 107 108 109 110
111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 )
*
LABEL( NEUTRON FLUX IN MODERATOR )
EVENT( TRACK )
NEUTRON
DIMENSION ( REGION ENERGY )
REGION( MODS )
IENERGY ( 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
31 32 33 34 35 36 37 38 39 40
41 42 43 44 45 46 47 48 49 50
51 52 53 54 55 56 57 58 59 60
61 62 63 64 65 66 67 68 69 70
71 72 73 74 75 76 77 78 79 80
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90
91 92 93 94 95 96 97 98 99 100
101 102 103 104 105 106 107 108 109 110
111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 )
*
LABEL( THE NUMBER OF NU-FISSION PER SOURCE )
EVENT( TRACK )
NEUTRON
DIMENSION ( REGION )
REGION( @UZH )
MACRO( NUFUSION )
*
LABEL( THE NUMBER OF FISSION PER SOURCE )
EVENT( TRACK )
NEUTRON
DIMENSION ( REGION )
REGION( @UZH )
MACRO( FISSION )
*
SEND TALLY
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* SOURCE
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
$SOURCE
& RATIO( 1.0 )
@( X Y ) = #DISC( 0.0 <ICR1> );
@Z = #UNIFORM( <BZ3> <BZ4> );
@E= #FISSION( U02350J50* 0.0253 );
$END SOURCE
/
50 million histories JENDL-5.0
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* OPTIONS
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
NEUTRON DYNAMIC-MEMORY(250000000)
EIGEN-VALUE FREE-LATTICE-FRAME LATTICE FLUX-PRINT
PRINT-SUPPRESS(6 7)
*
% NBT = 500 /* number of effective batches
% NSK = 200 /* number of skipped batches
% NHT = 100000 /* number of particles per batch
*
NPART(<(NBT+NSK)*NHT>) /* total number of histories
NHIST(<NHT>) /* number of particles per batch
NBANK(<NHT*>) /* length of particle bank
NF BANK(<NHT*>) /* length of fission source bank
NSKIP(<NSK>) /* number of skipped batches
*
NMEMO( 100 ) /* number of next-zone memory per zone
* TCPU( 180 ) /* calculation CPU time limit (min)
ETOP.N(2.0E7) /* top of neutron energy (eV)
EBOT.N(1.0E-5) /* bottom of neutron energy (eV)
*
NGROUP.N( 120 )
ENGYB.N( 2.0000E+07 1.57795E+07 1.2474E+07 9.8515E+06 7.7803E+06
6.1445E+06 4.8526E+06 3.8324E+06 3.0266E+06 2.3903E+06
1.8877E+06 1.4909E+06 1.1774E+06 9.2986E+05 7.3436E+05
5.7996E+05 4.5803E+05 3.6173E+05 2.8568E+05 2.2561E+05
1.7818E+05 1.4072E+05 1.1113E+05 8.7776E+04 6.9315E+04
5.4741E+04 4.3282E+04 3.4143E+04 2.6964E+04 2.1295E+04
1.6818E+04 1.3282E+04 1.0490E+04 8.2841E+03 6.5424E+03
1.6669E+03 4.0806E+03 3.2226E+03 2.5451E+03 2.0100E+03
1.5874E+03 1.2537E+03 9.9008E+02 7.8192E+02 6.1752E+02
4.8769E+02 3.8516E+02 3.0418E+02 2.4023E+02 1.8972E+02
1.8769E+02 1.133E+02 9.3451E+01 7.3803E+01 5.8286E+01
4.6032E+01 3.6383E+01 2.6102E+01 2.2674E+01 1.7904E+01
1.4142E+01 1.1163E+01 8.8206E+00 6.9661E+00 5.5015E+00
4.3449E+00 3.4313E+00 2.7099E+00 2.5751E+00 1.8642E+00
3.3348E+00 1.0546E+00 8.3225E+00 6.5751E+00 5.1927E+00
4.1010E+01 3.4088E+01 2.5554E+01 2.0200E+01 1.953E+01
1.2599E+01 9.9503E+02 8.6883E+02 6.2061E+02 4.9013E+02
3.8708E+02 3.0570E+02 2.4143E+02 1.9067E+02 1.5058E+02
1.1892E+02 9.3918E+02 7.4172E+02 5.8578E+02 4.6262E+02
1.6536E+03 2.8854E+03 2.2788E+03 1.7979E+03 1.4213E+03
1.1225E+03 8.8647E+04 7.0009E+04 5.5290E+04 4.3666E+04
3.4485E+04 2.7235E+04 2.1509E+04 1.6987E+04 1.3415E+04
1.0595E+04 8.3672E+05 6.6080E+05 5.2187E+05 4.1215E+05
3.2549E+05 2.5706E+05 2.0301E+05 1.6033E+05 1.2662E+05
1.0000E-5 )
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* PARAMETERS FOR FUEL ELEMENT
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
% FR1 = 0.28575 /* radius of zirconium
% FR2 = 0.3175 /* inner radius of U-Er-ZrH
% FR3 = 1.74025 /* outer radius of U-Er-ZrH
% FR4 = 1.7447 /* inner radius of cladding
% FR5 = 1.7955 /* outer radius of cladding
% FR6 = 1.63957 /* radius of graphite
% FR7 = 1.73482 /* radius of Mo disc
*
% B20 = -19.01 /* bottom of U-Er-ZrH
% B21 = <B20 - 0.079375> /* bottom of Mo disc
% B22 = <B21 - 8.6668> /* bottom of graphite
% B23 = <B22 - 1.27> /* bottom of fuel rod
% B24 = 19.01 /* top of U-Er-ZrH
% B25 = <B24 + 8.6668> /* top of graphite
% B26 = <B25 + 0.724535> /* top of plenum void
% B27 = <B26 + 1.27> /* top of fuel rod
%
% PCF = 3.8862 /* fuel rod pitch
%
% PXA = 8.10006 /* assembly pitch x-axis
% PYA = 7.7089 /* assembly pitch y-axis
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* PARAMETERS FOR CONTROL ROD
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
% CR1 = 1.50749 /* radius of absorber
% CR2 = 1.51638 /* inner radius of cladding
% CR3 = 1.5875 /* outer radius of cladding
*
% CZS1 = 38.1 /* full insertion (0.0)
* full withdrawal (38.1)
% CZS2 = 38.1 /* full insertion (0.0)
* full withdrawal (38.1)
% CZRR = 29.5275 /* full insertion (0.0)
* full withdrawal (38.1)
%
% CZS10 = <B20 + 0.123825 + CZS1 > /* bottom of absorber
% CZS11 = <CZS10 - 1.5875> /* bottom of control rod
% CZS12 = <CZS10 + 38.1> /* top of absorber
% CZS13 = <CZS12 + 17.78> /* top of plenum void
% CZS14 = <CZS13 + 1.9685> /* top of control rod
%
% CZS20 = <B20 + 0.123825 + CZS2 > /* bottom of absorber
% CZS21 = <CZS20 - 1.5875> /* bottom of control rod
% CZS22 = <CZS20 + 38.1> /* top of absorber
% CZS23 = <CZS22 + 17.78> /* top of plenum void
% CZS24 = <CZS23 + 1.9685> /* top of control rod
%
% CZRR0 = <B20 + 0.123825 + CZRR > /* bottom of absorber
% CZRR1 = <CZRR0 - 1.5875> /* bottom of control rod
% CZRR2 = <CZRR0 + 38.1> /* top of absorber
% CZRR3 = <CZRR2 + 17.78> /* top of plenum void
% CZRR4 = <CZRR3 + 1.9685> /* top of control rod
%
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* PARAMETERS FOR GRAPHITE REFLECTOR BLOCK
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
% GR1 = 0.9525 /* length of chamfer
% GR2 = <7.366 - 2 * GR1> /* length of inner block
%
% T20 = <B23 - 5.08> /* bottom of graphite block
% T21 = <B27 + 1.905> /* top of graphite block
%
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* PARAMETERS FOR VESSEL STRUCTURE
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
% BH1 = 13.97 /* horizontal width of beam tube
% BV1 = 16.51 /* vertical width of beam tube
%
% XEB = <1.5 * PXA + 0.5 * PCF + FR5 + 2.032>
* east beam tube position

```

IEU-COMP-THERM-013 Casel core

IEU-COMP-THERM-013 NRAD Core Casel criticality

```

% YNB    = <1.5 * PYA + 0.5 * PCF + FR5 + 2.032>
*                               /* north beam tube position
* WR1    = 45.0               /* radius of water
* WZ0    = <WZ0 - 19.92>      /* bottom of water
* WZ1    = <WZ0 + 108.73751 + 22.37099> /* top of water
* TP     = 26.85              /* temperature (deg-C) =300 Kelvin
* CONSTANTS: WATER DENSITY
* FR     = 100.0              /* water density (%)
*
* PARAMETERS FOR FUEL ASSEMBLY POSITION
*
% AXL3   = <-2.5 * PXA>
% AXL2   = <-1.5 * PXA>
% AXL1   = <-0.5 * PXA>
% AXR3   = < 2.5 * PXA>
% AXR2   = < 1.5 * PXA>
% AXR1   = < 0.5 * PXA>
*
% AYB3   = <-2.5 * PYA>
% AYB2   = <-1.5 * PYA>
% AYB1   = <-0.5 * PYA>
% AYT3   = < 2.5 * PYA>
% ATT2   = < 1.5 * PYA>
% ATT1   = < 0.5 * PYA>
*
* PARAMETERS FOR FUEL ROD POSITION
*
% FXL4   = <AXL2 - 0.5 * PCF>
% FXL3   = <AXL2 + 0.5 * PCF>
% FXL2   = <AXL1 - 0.5 * PCF>
% FXL1   = <AXL1 + 0.5 * PCF>
% FXR4   = <AXR2 + 0.5 * PCF>
% FXR3   = <AXR2 - 0.5 * PCF>
% FXR2   = <AXR1 + 0.5 * PCF>
% FXR1   = <AXR1 - 0.5 * PCF>
*
% FYB4   = <AYB2 - 0.5 * PCF>
% FYB3   = <AYB2 + 0.5 * PCF>
% FYB2   = <AYB1 - 0.5 * PCF>
% FYB1   = <AYB1 + 0.5 * PCF>
% FYT4   = <AYT2 + 0.5 * PCF>
% FYT3   = <AYT2 - 0.5 * PCF>
% FYT2   = <AYT1 + 0.5 * PCF>
% FYT1   = <AYT1 - 0.5 * PCF>
*
* CROSS SECTION
*
$XSEC
* ZIRCONIUM
& IDMAT(1)
  TPRECS( 0.1 )
  TEMPMT( <273.15+TP> )
  ZR0300J50( 2.2387E-02 )
  ZR0310J50( 4.8283E-03 )
  ZR0320J50( 7.2998E-03 )
  ZR0340J50( 7.2401E-03 )
  ZR0360J50( 1.1421E-03 )
*
* U-Ec-ZrH fuel element
& IDMAT(2)
  TPRECS( 0.1 )
  TEMPMT( <273.15+TP> )
  H0001ZJ50( 5.6020E-02 )
  B00100J50( 8.2234E-08 )
  B00110J50( 3.0105E-07 )
  C00120J50( 1.0674E-03 )
  C00130J50( 1.0654E-05 )
  ZR0902J50( 1.6719E-02 )
  ZR0912J50( 3.6058E-03 )
  ZR0922J50( 5.4516E-03 )
  ZR0942J50( 5.4070E-03 )
  ZR0962J50( 8.5291E-04 )
  ER1620J50( 3.3344E-07 )
  ER1640J50( 3.7937E-06 )
  ER1660J50( 7.8432E-05 )
  ER1670J50( 5.3216E-05 )
  ER1680J50( 6.2403E-05 )
  ER1700J50( 3.4082E-05 )
  HF1740J50( 1.3718E-09 )
  HF1760J50( 4.3582E-08 )
  HF1770J50( 1.5488E-07 )
  HF1780J50( 2.2594E-07 )
  HF1790J50( 1.2181E-07 )
  HF1800J50( 2.8771E-07 )
  U023240J50( 9.3283E-06 )
  U023250J50( 1.0836E-03 )
  U02360J50( 1.2032E-05 )
  U02380J50( 4.3312E-03 )
*
* B4C
& IDMAT(3)
  TPRECS( 0.1 )
  TEMPMT( <273.15+TP> )
  B00100J50( 2.1515E-02 )
  B00110J50( 8.6601E-02 )
  C00120J50( 2.6762E-02 )
  C00130J50( 2.6712E-04 )
*
* SUS303 CLADDING
& IDMAT(4)
  TPRECS( 0.1 )
  TEMPMT( <273.15+TP> )
  C00120J50( 1.5885E-04 )
  C00130J50( 1.5856E-06 )
  S10280J50( 6.3511E-04 )
  S10290J50( 3.1151E-05 )
  S10300J50( 1.9875E-05 )
  P00310J50( 4.0441E-05 )
  S00320J50( 3.1461E-06 )
  S00330J50( 2.4424E-08 )
  S00340J50( 1.3382E-07 )
  S00360J50( 5.8920E-10 )
*
* AL CLADDING
& IDMAT(5)
  TPRECS( 0.1 )
  TEMPMT( <273.15+TP> )
  AL0270J50( 5.8593E-02 )
*
* MO DISC
& IDMAT(6)
  TPRECS( 0.1 )
  TEMPMT( <273.15+TP> )
  MO0920J50( 9.9276E-03 )
  MO0940J50( 6.0564E-03 )
  MO0950J50( 1.0314E-02 )
  MO0960J50( 1.0693E-02 )
  MO0970J50( 6.0592E-03 )
  MO0980J50( 1.5153E-02 )
  MO1000J50( 5.9264E-03 )
*
* GRAPHITE REFLECTOR BLOCK
& IDMAT(7)
  TPRECS( 1.0 )
  TEMPMT( <273.15+TP> )
  H0001HJ50( 2.4649E-02 )
  C0012CJ50P00( 7.7914E-02 )
  C0013CJ50P00( 7.7768E-04 )
  O0016HJ50( 1.2325E-02 )
*
* GRAPHITE IN FUEL ROD
& IDMAT(8)
  TPRECS( 1.0 )
  TEMPMT( <273.15+TP> )
  C0012CJ50P00( 8.5877E-02 )
  C0013CJ50P00( 8.5715E-04 )
*
* WATER
& IDMAT(9)
  TPRECS( 0.1 )
  TEMPMT( <273.15+TP> )
  H0001HJ50( <6.6641E-02*FR/100.0> )
  O0016HJ50( <3.3320E-02*FR/100.0> )
*
$END XSEC
*
*-----+
* GEOMETRY
*-----+
$GEOMETRY
*
* square lattice (u-er-zrh)
*
IDLAT(100)
LTYP(1) NVLAT(4 4 1) SZLAT(<PX> <PY> <B24-B20>)
KLATT(
  10 10 10 1
  11 10 12 10
  13 10 10 10
  10 10 11 10
  )
KSLAT (<4*4>(0))
*
* square lattice (mo)
*
IDLAT(200)
LTYP(1) NVLAT(4 4 1) SZLAT(<PX> <PY> <B20-B21>)
KLATT(
  20 20 20 2
  21 20 22 20
  23 20 20 20
  20 20 21 20
  )
KSLAT (<4*4>(0))
*
* square lattice (bottom graphite)
*
IDLAT(300)
LTYP(1) NVLAT(4 4 1) SZLAT(<PX> <PY> <B21-B22>)
KLATT(
  30 30 30 3
  31 30 32 30
  33 30 30 30
  30 30 31 30
  )
KSLAT (<4*4>(0))
*
* square lattice (bottom cap)
*
IDLAT(400)
LTYP(1) NVLAT(4 4 1) SZLAT(<PX> <PY> <B22-B23>)
KLATT(
  40 40 40 4
  41 40 42 40
  43 40 40 40
  40 40 41 40
  )
KSLAT (<4*4>(0))
*
* square lattice (top graphite)
*
IDLAT(500)
LTYP(1) NVLAT(4 4 1) SZLAT(<PX> <PY> <B25-B24>)
KLATT(
  50 50 50 5
  51 50 52 50
  53 50 50 50
  50 50 51 50
  )
KSLAT (<4*4>(0))
*
* square lattice (plenum void)
*
IDLAT(600)
LTYP(1) NVLAT(4 4 1) SZLAT(<PX> <PY> <B26-B25>)
KLATT(
  60 60 60 6
  )

```



```

C121 : : -999 : -100
C122 : MDR : 9 : 100
      -115 -125 -135 /* water moderator
C123 : CLAD : 4 : 115 -114 OR
      125 -124 OR
      135 -134 /* cladding
C124 : VOID : 0 : 114 -113 OR
      124 -123 OR
      134 -133 /* void
C125 : FUEL : 2 : 113 -112 OR
      123 -122 OR
      133 -132 /* u-zrh
C126 : VOID : 0 : 112 -111 OR
      122 -121 OR
      132 -131 /* void
C127 : ZIRC : 1 : 111 OR 121 OR 131 /* zr
#END CELL *
*CELL ID(13) TYPE(BOX)
C131 : : -999 : -100
C132 : MDR : 9 : 100
      -115 -125 -145 /* water moderator
C133 : CLAD : 4 : 115 -114 OR
      125 -124 OR
      145 -144 /* cladding
C134 : VOID : 0 : 114 -113 OR
      124 -123 OR
      144 -143 /* void
C135 : FUEL : 2 : 113 -112 OR
      123 -122 OR
      143 -142 /* u-zrh
C136 : VOID : 0 : 112 -111 OR
      122 -121 OR
      142 -141 /* void
C137 : ZIRC : 1 : 111 OR 121 OR 141 /* zr
#END CELL *
*CELL ID(1) TYPE(BOX)
C11 : : -999 : -100
C12 : REFL : 9 : 100 /* water moderator
#END CELL *
*CELL ID(20) TYPE(BOX)
C201 : : -999 : -200
C202 : MDR : 9 : 200
      -215 -225 -235 -245 /* water moderator
C203 : CLAD : 4 : 215 -214 OR
      225 -224 OR
      235 -234 OR
      245 -244 /* cladding
C204 : VOID : 0 : 214 -211 OR
      224 -221 OR
      234 -231 OR
      244 -241 /* void
C205 : MODS : 6 : 211 OR 221 OR 231 OR 241 /* mo
#END CELL *
*CELL ID(21) TYPE(BOX)
C211 : : -999 : -200
C212 : MDR : 9 : 200
      -215 -235 -245 /* water moderator
C213 : CLAD : 4 : 215 -214 OR
      235 -234 OR
      245 -244 /* cladding
C214 : VOID : 0 : 214 -211 OR
      234 -231 OR
      244 -241 /* void
C215 : MODS : 6 : 211 OR 231 OR 241 /* mo
#END CELL *
*CELL ID(22) TYPE(BOX)
C221 : : -999 : -200
C222 : MDR : 9 : 200
      -215 -225 -235 /* water moderator
C223 : CLAD : 4 : 215 -214 OR
      225 -224 OR
      235 -234 /* cladding
C224 : VOID : 0 : 214 -211 OR
      224 -221 OR
      234 -231 /* void
C225 : MODS : 6 : 211 OR 221 OR 231 /* mo
#END CELL *
*CELL ID(23) TYPE(BOX)
C231 : : -999 : -200
C232 : MDR : 9 : 200
      -215 -225 -245 /* water moderator
C233 : CLAD : 4 : 215 -214 OR
      225 -224 OR
      245 -244 /* cladding
C234 : VOID : 0 : 214 -211 OR
      224 -221 OR
      244 -241 /* void
C235 : MODS : 6 : 211 OR 221 OR 241 /* mo
#END CELL *
*CELL ID(2) TYPE(BOX)
C21 : : -999 : -200
C22 : REFL : 9 : 200 /* water moderator
#END CELL *
*CELL ID(30) TYPE(BOX)
C301 : : -999 : -300
C302 : MDR : 9 : 300
      -315 -325 -335 -345 /* water moderator
C303 : CLAD : 4 : 315 -314 OR
      325 -324 OR
      335 -334 OR
      345 -344 /* cladding
C304 : VOID : 0 : 314 -311 OR
      324 -321 OR
      334 -331 OR
      344 -341 /* void
C305 : GRAP : 8 : 311 OR 321 OR 331 OR 341 /* graphite
#END CELL *
*CELL ID(31) TYPE(BOX)
C311 : : -999 : -300
C312 : MDR : 9 : 300
      -315 -335 -345 /* water moderator
C313 : CLAD : 4 : 315 -314 OR
      335 -334 OR
      345 -344 /* cladding
C314 : VOID : 0 : 314 -311 OR
      334 -331 OR
      344 -341 /* void
C315 : GRAP : 8 : 311 OR 331 OR 341 /* graphite
#END CELL *
*CELL ID(32) TYPE(BOX)
C321 : : -999 : -300
C322 : MDR : 9 : 300
      -315 -325 -335 /* water moderator
C323 : CLAD : 4 : 315 -314 OR
      325 -324 OR
      335 -334 /* cladding
C324 : VOID : 0 : 314 -311 OR
      324 -321 OR
      334 -331 /* void
C325 : GRAP : 8 : 311 OR 321 OR 331 /* graphite
#END CELL *
*CELL ID(33) TYPE(BOX)
C331 : : -999 : -300
C332 : MDR : 9 : 300
      -315 -325 -345 /* water moderator
C333 : CLAD : 4 : 315 -314 OR
      325 -324 OR
      345 -344 /* cladding
C334 : VOID : 0 : 314 -311 OR
      324 -321 OR
      344 -341 /* void
C335 : GRAP : 8 : 311 OR 321 OR 341 /* graphite
#END CELL *
*CELL ID(3) TYPE(BOX)
C31 : : -999 : -300
C32 : REFL : 9 : 300 /* water moderator
#END CELL *
*CELL ID(40) TYPE(BOX)
C401 : : -999 : -400
C402 : MDR : 9 : 400
      -415 -425 -435 -445 /* water moderator
C403 : CLAD : 4 : 415 OR 425 OR 435 OR 445 /* cladding
#END CELL *
*CELL ID(41) TYPE(BOX)
C411 : : -999 : -400
C412 : MDR : 9 : 400
      -415 -435 -445 /* water moderator
C413 : CLAD : 4 : 415 OR 435 OR 445 /* cladding
#END CELL *
*CELL ID(42) TYPE(BOX)
C421 : : -999 : -400
C422 : MDR : 9 : 400
      -415 -425 -435 /* water moderator
C423 : CLAD : 4 : 415 OR 425 OR 435 /* cladding
#END CELL *
*CELL ID(43) TYPE(BOX)
C431 : : -999 : -400
C432 : MDR : 9 : 400
      -415 -425 -445 /* water moderator
C433 : CLAD : 4 : 415 OR 425 OR 445 /* cladding
#END CELL *
*CELL ID(4) TYPE(BOX)
C41 : : -999 : -400
C42 : REFL : 9 : 400 /* water moderator
#END CELL *
*CELL ID(50) TYPE(BOX)
C501 : : -999 : -500
C502 : MDR : 9 : 500
      -515 -525 -535 -545 /* water moderator
C503 : CLAD : 4 : 515 -514 OR
      525 -524 OR
      535 -534 OR
      545 -544 /* cladding
C504 : VOID : 0 : 514 -511 OR
      524 -521 OR
      534 -531 OR
      544 -541 /* void
C505 : GRAP : 8 : 511 OR 521 OR 531 OR 541 /* graphite
#END CELL *
*CELL ID(51) TYPE(BOX)
C511 : : -999 : -500
C512 : MDR : 9 : 500
      -515 -535 -545 /* water moderator
C513 : CLAD : 4 : 515 -514 OR
      535 -534 OR
      545 -544 /* cladding
C514 : VOID : 0 : 514 -511 OR
      534 -531 OR
      544 -541 /* void
C515 : GRAP : 8 : 511 OR 531 OR 541 /* graphite
#END CELL *
*CELL ID(52) TYPE(BOX)
C521 : : -999 : -500
C522 : MDR : 9 : 500
      -515 -525 -535 /* water moderator
C523 : CLAD : 4 : 515 -514 OR
      525 -524 OR
      535 -534 /* cladding
C524 : VOID : 0 : 514 -511 OR
      524 -521 OR
      534 -531 /* void
C525 : GRAP : 8 : 511 OR 521 OR 531 /* graphite
#END CELL *
*CELL ID(53) TYPE(BOX)
C531 : : -999 : -500
C532 : MDR : 9 : 500
      -515 -525 -545 /* water moderator
C533 : CLAD : 4 : 515 -514 OR
      525 -524 OR
      545 -544 /* cladding
C534 : VOID : 0 : 514 -511 OR
      524 -521 OR
      544 -541 /* void
C535 : GRAP : 8 : 511 OR 521 OR 541 /* graphite
#END CELL *
*CELL ID(5) TYPE(BOX)
C51 : : -999 : -500
C52 : REFL : 9 : 500 /* water moderator
#END CELL *
*CELL ID(60) TYPE(BOX)
C601 : : -999 : -600
C602 : MDR : 9 : 600
      -615 -625 -635 -645 /* water moderator
C603 : CLAD : 4 : 615 -614 OR
      625 -624 OR

```

```

635 -634 OR
645 -644 /* cladding
C604 : VOID : 0 : 614 OR 624 OR 634 OR 644 /* void
#END CELL

#CELL ID(61) TYPE(BOX)
C611 : : -999 : -600
C612 : MODR : 9 : 600
C613 : CLAD : 4 : 615 -614 OR
       635 -634 OR
       645 -644 /* cladding
C614 : VOID : 0 : 614 OR 634 OR 644 /* void
#END CELL
*
#CELL ID(62) TYPE(BOX)
C621 : : -999 : -600
C622 : MODR : 9 : 600
C623 : CLAD : 4 : 615 -625 -635 /* water moderator
       625 -624 OR
       635 -634 /* cladding
C624 : VOID : 0 : 614 OR 624 OR 634 /* void
#END CELL
*
#CELL ID(63) TYPE(BOX)
C631 : : -999 : -600
C632 : MODR : 9 : 600
C633 : CLAD : 4 : 615 -614 OR
       625 -624 OR
       645 -644 /* cladding
C634 : VOID : 0 : 614 OR 624 OR 644 /* void
#END CELL
*
#CELL ID(6) TYPE(BOX)
C61 : : -999 : -600
C62 : REFL : 9 : 600 /* water moderator
#END CELL
*
#CELL ID(70) TYPE(BOX)
C701 : : -999 : -700
C702 : MODR : 9 : 700
C703 : CLAD : 4 : 715 -725 -735 -745 /* water moderator
       715 OR 725 OR 735 OR 745 /* cladding
#END CELL
*
#CELL ID(71) TYPE(BOX)
C711 : : -999 : -700
C712 : MODR : 9 : 700
C713 : CLAD : 4 : 715 -735 -745 /* water moderator
       715 OR 735 OR 745 /* cladding
#END CELL
*
#CELL ID(72) TYPE(BOX)
C721 : : -999 : -700
C722 : MODR : 9 : 700
C723 : CLAD : 4 : 715 -725 -735 /* water moderator
       715 OR 725 OR 735 /* cladding
#END CELL
*
#CELL ID(73) TYPE(BOX)
C731 : : -999 : -700
C732 : MODR : 9 : 700
C733 : CLAD : 4 : 715 -725 -745 /* water moderator
       715 OR 725 OR 745 /* cladding
#END CELL
*
#CELL ID(7) TYPE(BOX)
C71 : : -999 : -700
C72 : REFL : 9 : 700 /* water moderator
#END CELL
*
#TALLY REGION
DEFINE @UZH (ZIRC FUEL CLAD MODR)
*
SEND GEOMETRY
*
STALLY
&
LABEL( NEUTRON FLUX IN U-Er-ZrH )
EVENT( TRACK )
NEUTRON
DIMENSION ( REGION ENERGY )
REGION( FUEL )
IENERGY ( 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40
 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50
 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60
 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70
 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80
 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90
 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100
 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110
 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 )
&
LABEL( NEUTRON FLUX 120 ENERGY GROUP )
EVENT( TRACK )
NEUTRON
DIMENSION ( REGION ENERGY )
REGION( @UZH )
IENERGY ( 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40
 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50
 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60
 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70
 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80
 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90
 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100
 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110
 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 )
&
LABEL( NEUTRON FLUX 120 ENERGY GROUP )
EVENT( TRACK )
NEUTRON
DIMENSION ( REGION ENERGY )
REGION( @UZH )
IENERGY ( 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40
 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50
 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60
 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70

```