

一般セッション | III. 核分裂工学：301-1 炉物理，核データの利用，臨界安全

2024年9月11日(水) 14:45 ~ 15:35 D会場(講義棟A棟1F A106)

[1D08-10] 計算コード開発

座長:鈴木 求(電中研)

14:45 ~ 15:00

[1D08]

三菱3次元詳細輸送計算コードGALAXY-Zの開発

(9) 高温ガス炉の燃焼計算と全炉心計算

*山路 和也¹、小池 啓基¹、浅野 耕司¹ (1. MHI)

15:00 ~ 15:15

[1D09]

三菱FBR核設計コードシステムGALAXY-H/ENSEMBLE-TRIZの開発

(12) 軸方向反応率比保存による均質化誤差低減手法

*小池 啓基¹、山本 真人¹、浅野 耕司¹ (1. MHI)

15:15 ~ 15:30

[1D10]

燃焼計算コードシステムSWAT-Xの開発

(1) CRAMOとMVPを用いた燃焼計算の検証

*渡邊 友章¹、菊地 丈夫¹、多田 建一¹、山本 章夫²、須山 賢也¹ (1. JAEA、2. 名大)

15:30 ~ 15:35

座長持ち時間

三菱 3次元詳細輸送計算コード GALAXY-Z の開発

(9) 高温ガス炉の燃焼計算と全炉心計算

Development of Mitsubishi Three-Dimensional Heterogeneous Transport Calculation Code GALAXY-Z

(9) Burnup Calculation and Whole Core Calculation for High Temperature Gas-cooled Reactor

*山路 和也¹, 小池 啓基¹, 浅野 耕司¹

¹MHI

PWR 炉心計算の参照解コードとして開発した三菱 3次元詳細輸送計算コード GALAXY-Z^[1]を、高温ガス炉向けの核設計コードとして拡張中である。今般、燃焼計算機能を導入し、高温ガス炉の 3次元非均質全炉心計算を行ったため、その結果を報告する。

キーワード：高温ガス炉、燃焼計算、炉心計算、GALAXY-Z

1. はじめに

GALAXY-Z を高温ガス炉へ適用するため、被覆燃料粒子に対応した共鳴計算機能を導入済みである^[2]。今回、燃焼計算機能を導入し、高温ガス炉を対象とした 3次元非均質全炉心計算を行った。

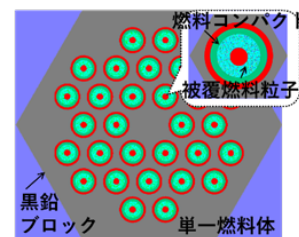


図1 高温ガス炉燃料体

2. 燃焼計算機能

燃焼計算機能として、約 150 核種からなる燃焼チェーンを採用し、燃焼行列の数値解法として krylov 部分空間法を用いた。核データライブラリは JENDL-5 を採用した。

被覆燃料粒子の燃料カーネルに含まれる核種 i の数密度 N_i 、エネルギー群 g のミクロ断面積 σ_i^g 、及び、燃料カーネルの中性子束 ϕ_{fuel}^g が燃焼計算の入力となる。中性子束を求める輸送計算では、計算負荷を抑制するため、図 1 に示す被覆燃料粒子が含まれる燃料コンパクト内を均質化して取り扱うことから、得られる中性子束は燃料コンパクト平均 $\phi_{compact}^g$ である。DSTG (Deterministic Statistical Geometry)法に基づく燃料カーネルの不利因子 f_{fuel}^g (=燃料カーネルと燃料コンパクト内平均の中性子束の比)を $\phi_{compact}^g$ に乘じることで、(1)式のように被覆燃料粒子の燃料カーネルの中性子束 ϕ_{fuel}^g を求めることができる。

$$\phi_{fuel}^g = f_{fuel}^g \phi_{compact}^g \quad (1)$$

上記の N_i 、 σ_i^g 、 ϕ_{fuel}^g を入力とした燃焼計算により、3次元炉心計算において、被覆燃料粒子の燃料カーネル内の核種生成量(核種数密度)を直接評価できる。

3. 検証

＜燃焼モンテカルロコードとの比較＞ JENDL-5、及び、開発者用の詳細チェーンを用いた連続エネルギー燃焼モンテカルロコード MVP-BURN と、燃料コンパクト体系において燃焼計算結果を比較した。図 2 より、寿命末期までを通じて、無限増倍率は 0.08%dk/k 以内で一致し、顕著な差異がないことを確認した。

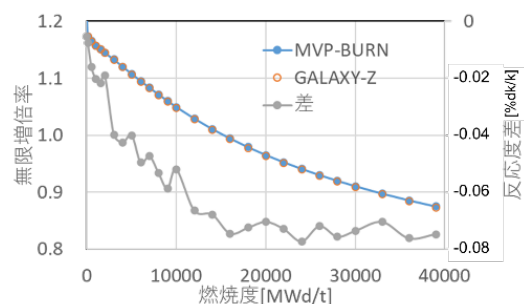


図2 MVP-BURN との比較

＜全炉心計算＞ メッシュ内の軸方向中性子束分布を関数展開する 3次元非均質輸送計算^[1]の並列化により、図 3 に示す 3次元全炉心非均質体系にて、1 サイクル分の燃焼計算を 3 日程度で計算可能であること確認した。径方向出力分布を図 4 に示す。

参考文献 [1]山路, 他 日本原子力学会春の年会(2023)

[2]山路, 他 日本原子力学会春の年会(2024)

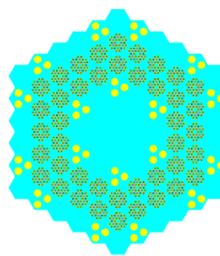


図3 高温ガス炉
環状炉心

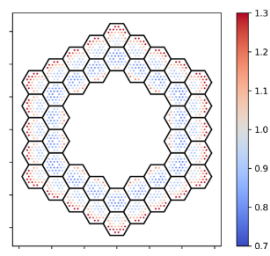


図4 径方向出力分布
(サイクル末期)

* Kazuya Yamaji¹, Hiroki Koike¹, Koji Asano¹, ¹MHI

三菱 FBR 核設計コードシステム GALAXY-H/ENSEMBLE-TRIZ の開発
(12)軸方向反応率比保存による均質化誤差低減手法

Development of Mitsubishi FBR Nuclear Design Code System GALAXY-H/ENSEMBLE-TRIZ

(12) Reduction of Spatial Homogenization Error by Reaction-Rate-Ratio Preservation for Axial Direction

*小池 啓基¹, 山本 真人¹, 浅野 耕司¹

¹ MHI

三菱高速炉核設計コードシステム GALAXY-H/ENSEMBLE-TRIZ における実効増倍率、Na ボイド反応度及び軸方向出力分布の予測精度を向上させるため、非均質体系の軸方向反応率分布を均質輸送計算で再現する核定数補正手法を開発した。高速炉体系に本手法を適用し実効増倍率を評価した結果、連続エネルギーモンテカルロコードによる参照解との差異は±200pcm 以下となり、本手法の有効性を確認した。

キーワード:GALAXY-H/ENSEMBLE-TRIZ、高速炉、均質化誤差低減手法、軸方向、Simultaneous-SPH 法、反応率比保存法

1. 緒言

MHI では、高速炉用核設計コードシステム GALAXY-H/ENSEMBLE-TRIZ を開発中である。本システムでは、格子計算コード GALAXY-H によって燃料集合体等の均質核定数を作成し、この均質核定数を入力として炉心計算コード ENSEMBLE-TRIZ にて 3 次元 70 群輸送計算により炉心核特性を算出する。本システムによる実効増倍率、Na ボイド反応度及び軸方向出力分布等の予測精度を向上させるため、非均質体系の軸方向反応率分布を、軸方向の異種媒質ごとに集合体内を均質化した輸送計算で再現する核定数補正手法を開発した。

2. 手法

本手法では、反応率比保存法^[1]と Simultaneous-SPH 法^[2]を組合せ、代表的な 3 次元単一集合体体系で核定数補正因子（Simultaneous-Reaction-Rate-Ratio Preservation factor : S-R3P 因子） f_i を式(1)に基づき作成する。あらかじめ連続エネルギーモンテカルロコード等により算出した f_i を用いて式(2)(3)の通り補正された核定数 $\tilde{\Sigma}$ を ENSEMBLE-TRIZ の 3 次元全炉心均質輸送計算に入力するため、3 次元全炉心計算の時間は f_i なしの場合と変わらない。

$$f_i = \frac{\int_i d\mathbf{r} \phi(\mathbf{r}) / \tilde{\phi}_i^{hom}}{\int_0 d\mathbf{r} \phi(\mathbf{r}) / \tilde{\phi}_0^{hom}} \cdots (1), \quad \tilde{\Sigma}_i = f_i \cdot \Sigma_i \text{ (輸送断面積以外)} \cdots (2), \quad \tilde{\Sigma}_{tr,i} = \frac{1}{f_i} \cdot \Sigma_{tr,i} \text{ (輸送断面積)} \cdots (3)$$

(i : 均質化領域, 0 : 基準均質化領域, $\phi(\mathbf{r})$: 位置 $\mathbf{r}$ の非均質中性子束, $\tilde{\phi}^{hom}$: 均質中性子束, Σ : 断面積)

3. 検証

MOX-3600 ベンチマーク体系^[3]に本手法を適用し実効増倍率を評価した結果、表に示す通り、連続エネルギーモンテカルロコード MVP3^[4]による参照解との差異は±200pcm 以下となり、Na ボイド反応度の差異も低減されることを確認した。

表 MVP3、ENSEMBLE-TRIZ 間の核特性差異

手法	実効増倍率の相対差異[pcm]		Naボイド反応度の相対差異[%]
	Naボイドなし	Naボイドあり	
S-R3P因子なし	339	437	4.4
S-R3P因子あり	175	117	-3.0

(*)実効増倍率の MVP3 統計誤差(1 σ) : 13pcm

4. 結言

高速炉を対象に軸方向反応率比保存による均質化誤差低減手法を開発し、MVP3 との比較により本手法の有効性を確認した。発表では、複数の高速炉炉型への適用性についても報告する。

参考文献

[1]T.Kitada, S.Kosaka, et al., New Control Rod Homogenization Method for Fast Reactors, J.Nucl.Sci.Technol., 31, 7, pp.647-653, 1994.
[2]G.Chiba, et al., A note on application of superhomogénéisation factors to integro-differential neutron transport equations, J.Nucl.Sci.Technol., 49, 2, pp.272-280, 2012. [3] NEA, Benchmark for Neutronic Analysis of Sodium-cooled Fast Reactor Cores with Various Fuel Types and Core Sizes, www.oecd-nea.org, 2016. [4]Y. Nagaya, et al., MVP/GMVP Version 3 : General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations Based on Continuous Energy and Multigroup Methods, JAEA-Data/Code 2016-018, 2017.

* Hiroki Koike¹, Masato Yamamoto¹, Koji Asano¹, ¹MHI

Development of Burnup Calculation Code System SWAT-X

(1) Verification of burnup calculation using CRAMO and MVP

*渡邊 友章¹, 菊地 丈夫¹, 多田 健一¹, 山本 章夫², 須山 賢也¹

¹JAEA, ²名大

SWAT4.0 の後継として、最新の計算手法及び核データが利用可能な燃焼計算コードシステム SWAT-X の開発を進めている。開発の第一ステップとして、CRAMO と MVP を用いた燃焼計算機能を開発した。

キーワード : SWAT-X, 燃焼計算, CRAM, CRAMO, MVP

1. 背景

JAEA が開発した燃焼計算コードシステム SWAT4.0 は燃焼計算に一点炉燃焼計算コード ORIGEN2 を利用しているが、ORIGEN2 は既に開発が終了しており、最新の計算手法や核データが利用できないという課題があった。そこで、SWAT4.0 の後継として新規に SWAT-X の開発を開始した。開発の第一ステップとして、一点炉燃焼計算コード CRAMO[1]と連続エネルギーモンテカルロコード MVP を組み合わせた燃焼計算機能を整備した。CRAMO は ORIGEN2 用核データライブラリ(ORLIB)と最新の燃焼計算手法であるチェビシェフ有理関数近似法(CRAM)に基づくコードであり、本開発は ORIGEN2 における Matrix Exponential 法から CRAM への燃焼計算手法の更新に相当する。また、燃料集合体のような多領域問題において、SWAT4.0 では各領域の重核種個数あたりの発生エネルギーの比を用いて出力分布を計算していたが[2]、SWAT-X では燃焼度及び比出力の単位に基づき、初期重核種重量あたりの発生エネルギーを用いるように修正した。

2. CRAMO と MVP を用いた燃焼計算機能の検証

開発した燃焼計算機能の検証のため、BWR 燃料集合体体系(OECD/NEA ベンチマーク Phase-IIIIC)で 50 GWd/t まで燃焼計算を行い、核データ等の条件は統一して SWAT4.0 の結果と比較した。図 1 に SWAT4.0 からの k_{eff} の差異を示す。1 燃焼ステップあたりの燃焼計算回数(サブステップ数)を 2 として比較したところ、10 GWd/t 付近や 40 GWd/t 以降で 100 pcm 以上の差異が生じた。そこで、SWAT4.0 のサブステップ数を 5 に増やしたところ、高燃焼度での差異が解消した。また、SWAT-X における出力分布設定方法を、修正した方法(A)から SWAT4.0 と同じ方法(B)に変更した場合、10 GWd/t 付近の差異が減少し SWAT4.0 と良く一致した。その他、燃焼度分布や核種重量も SWAT4.0 と良く一致することを確認した。以上より、CRAMO と MVP を用いた燃焼計算の妥当性確認するとともに、燃焼計算手法の更新によりステップ幅に対する数値安定性が改善されること、Gd 燃料を含む体系において出力分布設定方法の修正が実効増倍率に影響することが分かった。今後は、任意の核データライブラリや燃焼チェーンの利用、POD などを活用した高速・高精度な燃焼計算などの機能について開発を進める予定である。

謝辞 本成果の一部は JSPS 科研費 24K08300 の助成を受けたものである。

参考文献 [1] 横山賢治, 神智之, JAEA-Data/Code 2021-001, 2021. [2] 鹿島陽夫, 他, JAEA-Data/Code 2014-028, 2015.

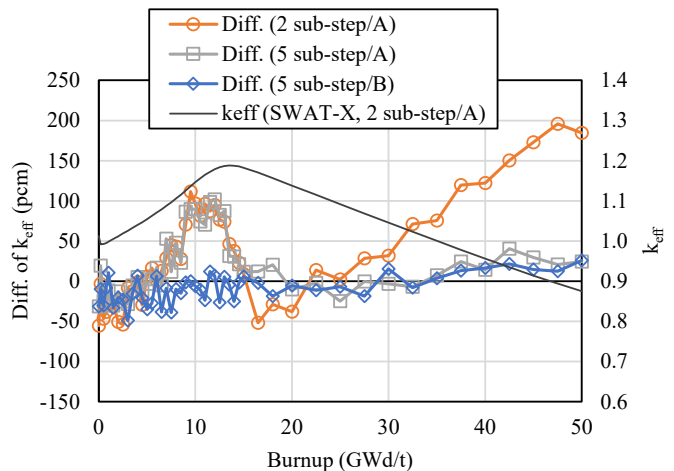


図 1 SWAT-X と SWAT4.0 の k_{eff} の比較

* Tomoaki Watanabe¹, Takeo Kikuchi¹, Kenichi Tada¹, Akio Yamamoto², Kenya Suyama¹ ¹JAEA, ²Nagoya Univ.