

NMB コードの燃焼計算に用いる高速行列指数法の開発

Development of Accelerated Exponential Method for Burnup Calculation in Nuclear Material

Balance Code

*岡村 知拓¹, 大泉 昭人², 西原 健司², 中瀬 正彦¹, 竹下 健二¹

¹東京工業大学 先導原子力研究所, ²日本原子力研究開発機構

NMB コードの燃焼計算において、計算コストをかけることなく、短半減期核種を精度良く解析する手法として高速行列指数法を考案した。

キーワード：燃焼計算、行列指数法、短半減期核種、諸量評価、NMB コード

1. 背景 東工大と原子力機構は共同で核燃料サイクルのマスバランス解析コード(Nuclear Material Balance コード[1] (以下、NMB コード))の開発を行っている。NMB コードでは ORIGEN[2]用核データライブラリである ORLIBJ40[3]を用いて、入力した原子炉の運転条件に応じて行列指数法[4]で燃焼計算を行っている。燃焼計算は原子炉毎、燃料バッチ毎に、非常に多くの回数を行うため、計算コストが問題となっていた。例えば、Xe-135 (9.14h) に代表される燃焼チェーンに影響を及ぼす短半減期核種があるが、このような核種を行列指数法で解くためにはタイムステップを半減期より十分に短くするもしくは、高い次数まで計算する必要がある。しかし、いずれの方法においても計算コストが増加する。そこで、計算コストをかけることなく短半減期核種を精度良く計算する方法として高速行列指数法を考案した。

2. 高速行列指数法 行列指数法は(1)式で示される行列の方程式を解いて、同位体量(原子個数密度)ベクトル X を求める。遷移行列 A は崩壊や単位中性子当たりの核反応による変化を表す行列である。核種 i が短半減期の場合、対角成分 $A_{i,i}$ は崩壊定数の負値 $-\lambda_i$ に近い値になる(断面積が極めて大きい核種では $-\sigma_i$)。一方、一次の行数指数法では同位体量 X は(2)式で表される。短半減期核種 i では $(1 - \lambda_i \Delta t)X_i(0)$ と近似され、 $\lambda_i \Delta t$ が1より大きい場合に同位体量が負値となり、破綻する。そこで今回考案した高速行列指数法では、対角成分が大きな負値を取った場合にも破綻しないように、式(3)に変形した。なお、本手法は一次の展開でのみ成立する。

$$\frac{dX}{dt} = AX \quad (1)$$

$$X = \left(I + A\Delta t + \frac{1}{2}(A\Delta t)^2 \dots \right) X(0) \cong (I + A\Delta t)X(0) \quad (2)$$

$$A\Delta t \cong \begin{pmatrix} A_{11}\widetilde{\Delta t}_1 & \dots & A_{i1}\widetilde{\Delta t}_i & \dots & A_{N1}\widetilde{\Delta t}_N \\ A_{1j}\widetilde{\Delta t}_1 & \dots & A_{ij}\widetilde{\Delta t}_i & \dots & A_{Nj}\widetilde{\Delta t}_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{iN}\widetilde{\Delta t}_1 & \dots & A_{iN}\widetilde{\Delta t}_i & \dots & A_{iN}\widetilde{\Delta t}_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{N1}\widetilde{\Delta t}_1 & \dots & A_{N1}\widetilde{\Delta t}_i & \dots & A_{N1}\widetilde{\Delta t}_N \end{pmatrix}, \quad \widetilde{\Delta t}_i = \frac{e^{A_{i,i}\Delta t} - 1}{A_{i,i}} \quad (3)$$

3. 結果および考察

各燃焼計算手法を用いて NMB コードの燃焼計算を行った結果を表1に示す。燃焼条件は17×17PWR 炉心、燃焼度45 GWd/tHMである。従来の行列指数法(三次)ではタイムステップ10^{-3} GWd/tHM の条件では

表1 高速行列指数法の実装結果

タイムステップ [GWd/tHM]	行列指数法(三次)	高速行列指数法(一次)					
		10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	
計算時間 [s]		56.5	6.61	0.664	0.0898	0.0469	0.0195
Xe-135のNMBと ORIGENの差 [%]		2.23%	2.26%	2.26%	2.29%	2.45%	4.30%

計算が破綻するため、 10^{-3} GWd/tHM の結果のみを示した。高速行列指数法を用いた場合、タイムステップを大きくしても安定に計算結果が得られた。タイムステップを1 GWd/tHM まで大きくしたとしても Xe-135 の NMB コードと ORIGEN の差はほぼ一定となった。タイムステップが10 GWd/tHM の場合、断面積ライブラリの更新幅が ORIGEN よりも大きくなり精度が約2%悪化した。計算時間は行列指数法のタイムステップ 10^{-3} GWd/tHM と高速行列指数法の1 GWd/tHM で比較した場合、約140倍高速化された。この結果、NMB コードに高速行列指数法を実装したことで、行列指数法の一次の展開かつタイムステップを1 GWd/tHM まで大きくしたとしても精度を維持しつつ、計算時間を短縮することが可能となった。

参考文献 [1] Nishihara, et, al., J. Nucl. Sci. Technol., 51(2), pp. 150-165, 2014., [2] Transmittal memo of CCC-371/17, 2002

[3] JAEA-Data/Code 2012-032 [4] JAERI1250, 1977

*Tomohiro Okamura¹, Akito Oizumi², Kenji Nishihara², Masahiko Nakase¹, Kenji Takeshita¹, ¹Tokyo Tech., ²JAEA.