

粒子法に基づく中性子拡散計算手法に関する研究

名古屋大学工学部エネルギー理工学科 山本研究室 汲田 翔吾

1. 緒言 東京電力福島第一原子力発電所における燃料デブリ取出作業時に臨界超過リスクを適切に評価するためには、流体・熱伝導計算により計算体系の動的変化(例：燃料の水中落下)を予測し、変化後の体系について核計算により実効増倍率 k_{eff} を推定する、といった一連の連成解析が必要となる。先行研究[1]において、粒子法[2]に基づく流体計算により燃料デブリが水中に落下する過程をシミュレーションし、得られた燃料位置情報を近似して中性子輸送モンテカルロ計算により k_{eff} を評価する研究がなされている。ただし、粒子法で得られた流体計算結果を核計算の入力データとして与える際に、空間メッシュ分割・均質化といった近似が必要であった。この課題を解決するため、粒子法による流体計算結果の情報をそのまま活用できるよう、粒子法に基づいた中性子拡散計算コードを開発することを本研究の目的とした。粒子法では、体系を計算格子で離散化することなく、連続体の動きを仮想的な計算点(粒子)の移動とみなすことで複雑な形状変化を扱うことができる。本研究では、粒子法を用いた熱伝導計算の手法[3]を参考として、粒子法に基づく中性子拡散計算コードを新たに開発し、エネルギー2群・2次元体系の k_{eff} 計算精度を検証した。さらに、粒子法に基づく流体計算結果に基づいた変形後の体系について k_{eff} の計算を試みた。

2. 計算手法 粒子法では、各粒子に対して物理量と影響半径 h を $\langle P \rangle_i^{\text{SPH}} = \sum_j V_j P(\mathbf{r}_j) W_h(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|)$ (1)

与え、粒子間の影響を考慮することで数値解

を求める。具体的には、式(1)で示すように、

$$\langle -\nabla D_g \nabla \phi_g \rangle_i^{\text{SPH}} = 2 \sum_{j=1}^N V_j \bar{D}_{g,ij} (\phi_{g,j} - \phi_{g,i}) \frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \cdot \nabla W_{h,ij}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^2} \quad (2)$$

周辺粒子 j の物理量 $P(\mathbf{r}_j)$ からの寄与を、各

粒子中心からの距離が h 以下の範囲で各粒子中心に近いほど値が大きくなる滑らかな関数(カーネル関数 $W_h(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|)$)で重み付けした体積積分により、物理量の空間分布を近似する。中性子拡散計算の場合、物理量 $P(\mathbf{r})$ として単位時間当たりの核反応率(中性子吸収/散乱/核分裂)や中性子漏洩量の空間分布を考え、粒子法により離散化した k_{eff} 固有値方程式を解くことで k_{eff} や各粒子位置の中性子束 $\phi_{g,i}$ を計算できる。例えば、エネルギー g 群の中性子漏洩量は、調和平均した拡散係数 $\bar{D}_{g,ij}$ を用いて式(2)のように求めることができる。

3. 計算結果 ①60 cm×60 cmの燃料周りに厚さ25 cmの反射体を巻いた体系、②同じ核燃料が水中落下し変形した体系について、エネルギー2群・2次元 xy 体系の中性子拡散計算を実施した。粒子法の粒径は1 cm、影響半径 $h = 2.00$ cmとし、体系①では体系内で粒子を等間隔に配置し、体系②では粒子法による流体計算結果に基づき粒子位置を決定した。粒子法によって得られた熱中性子束分布を図1に示す。体系①において、粒子法による k_{eff} 計算値と参照解(有限体積法)の相対差異は0.01%と良く一致することを確認した。本研究の成果として、①のような体系で従来手法と同等の k_{eff} 計算精度を得ることが可能となり、②のような変形した体系についても、粒子法による流体計算で得られた位置情報をそのまま活用して、 k_{eff} や中性子束分布の数値解析が可能となった。

参考文献 [1] T. Muramoto et al., *Progress in Nuclear Energy*, **139**, 103857 (2021). [2] 浅井 光輝, “明解 粒子法 SPH, MPS, DEM の理論と実践,” 丸善出版(株) (2022); [3] P. W. Cleary et al., *J. Comput. Phys.*, **148**, p.227 (1999).

口頭発表 : 1. 汲田翔吾, 他, 第56回日本原子力学会中部支部研究発表会, (2024); 2. 汲田翔吾, 他, 日本原子力学会 2025 春の年会, 1C07 (2025).

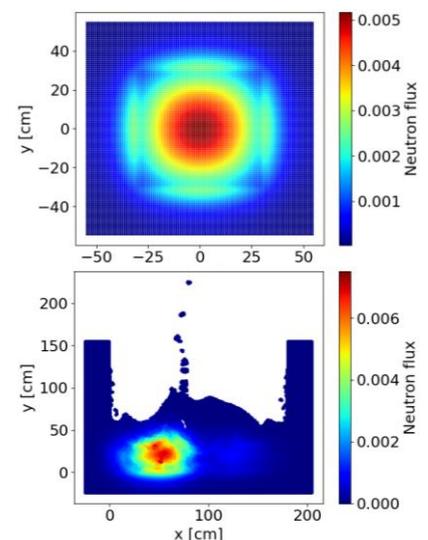


図1 熱群中性子束分布計算結果 (①：上図, ②：下図)