

小型塩化物溶融塩高速炉の研究開発 (2)制御棒価値の最適化に関する予備検討

Research and development of a small chloride molten salt fast reactor

(2) Preliminary investigation of optimum control rod worth

*平野はるか¹, 田原義壽¹, 千葉敏¹, 望月弘保¹

¹東工大

溶融塩炉は固有の安全性が極めて高く、1次系流量(または温度)を調節することにより炉心反応度の制御が可能であるが、原理の異なる機能と冗長性の観点からは制御棒を設置することも有効であると考えられる。制御棒の反応度が瞬時に添加される事故(RIA: Reactivity-Initiated Accident)が生じた場合の炉心の動特性解析から、設計検討中の溶融塩炉の安全性を確認し、制御棒価値の最適化の予備検討を行う。

キーワード: 溶融塩炉, 高速炉, 塩化物, 制御棒価値, 動特性

1. 緒言: 東工大では、使用済み燃料の有効活用や廃棄物の処理処分の負担軽減の観点から、MAを変換する溶融塩小型高速炉の設計検討を実施している[1]。制御棒を設置する場合、RIAに対する安全性の評価や制御棒価値の最適化の検討が必要となる。本研究では一次系を流れる燃料塩が炉心に与える影響を考慮し、一点炉近似でRIA時の炉内の動特性を解析した。

2. 解析条件: 炉心は 700MWth の小型溶融塩炉である(図1)。燃料塩は炉心を τ_c (2.4595s)、炉外ループを τ_l (2.6909s) かけて循環する。RIA時の添加反応度は、検討中の制御用反応度 $0.93\% \Delta\rho$ [1] を目安に 0.93、0.36、0.18% $\Delta\rho$ を想定した。ここで、本炉心の 1\$ の反応度は 0.22% $\Delta\rho$ である。

3. 解析手法: 一点炉動特性方程式(1)(2)、温度変化の式(3)の連立微分方程式を行列指数法にて解く python プログラムを作成した。燃料塩がループを通過するために遅発先行核濃度 C_i が変化する効果を式(2)の右辺第3項が担い、先行核の崩壊時間が長いために1次のテイラー展開を用いて近似した[2]。また、式(4)をもとに繰り返しループを用いて反応度に温度 θ によるフィードバックをかけた。遅発中性子定数 (β^{static}) は図1の体系で、連続エネルギーモンテカルロコード SERPENT2[3]により求めた。 β^{fluid} は β^{static} および崩壊定数をもとに炉心からの先行核の漏洩を考慮した値である[4]。

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{eff}^{fluid}}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (1), \quad \frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_{eff,i}^{static}}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) + \frac{-C_i(t) + C_i(t - \tau_l) e^{-\lambda_i \tau_l}}{\tau_c} \quad (2)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \kappa n(t) - \gamma \theta(t) \quad (3), \quad \rho(t) = \rho_{in}(t) - \alpha(\theta(t) - \theta(0)) \quad (4)$$

4. 解析結果: 安全側の評価を与えるため解析は断熱近似 ($\gamma = 0$) で行った。定格出力状態にて $0.93\% \Delta\rho$ の反応度が瞬時に添加された場合の温度の時間変化を図2に示す。温度は200秒程度で収束し、炉心出口温度の最高温度は1118Kである。これは本溶融塩の沸点(1738K以上)[5]以下である。また、先行研究の健全性に関する炉心出口燃料の安全制限温度[4]以下である。添加反応度が $0.36\% \Delta\rho$ 、 $0.18\% \Delta\rho$ の場合には、炉心出口の最大温度はそれぞれ1047K、1029Kと低くなる。以上の解析結果から定格出力運転時に最大で $0.93\% \Delta\rho$ の反応度が添加されるRIAが生じたとしても安全上問題がないと判断できる。

3. 結論: 本溶融塩小型高速炉は定格出力運転時にRIAが生じても安全性に問題がないことが示された。今後は上記を踏まえて、炉心の制御性の観点から、運転上最適な制御棒反応度価値の検討を行う。

参考文献: [1] 小型塩化物溶融塩高速炉の超ウラン元素燃焼性能の評価、田原、千葉、望月、2022 原子力学会春の年会、1D07。[2] W. H. Sides, Jr, "MSBR CONTROL STUDIES," ORNL-TM-2489, 1969. [3] Leppänen, J., et al. (2015) "The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013." Ann. Nucl. Energy, 82 (2015) 142-150. [4] Nobuhide SUZUKI, Yoichiro SHIMAZU, "Reactivity-Initiated-Accident Analysis without Scram of a Molten Salt Reactor," Journal of Nuclear Science and Technology, 45:6, 575-581. [5] McMurray, J., Besmann, T., Jerden, J., Williamson, M., Ard, J., Fitzpatrick, B., Piro, M., Graham, A., Taylor, Z., Collins, B., Betzler, B., Qualls, L., Pandya, T., Greenwood, S., Johnson, S., 2018., Multiphysics simulations for molten salt reactor evaluation: Chemistry modeling and database development, ORNL/SPR-2018/864.

*Haruka Hirano¹, Yoshihisa Tahara¹, Satoshi Chiba¹ and Hiroyasu Mochizuki¹

¹Laboratory for Zero-Carbon Energy, Tokyo Institute of Technology.

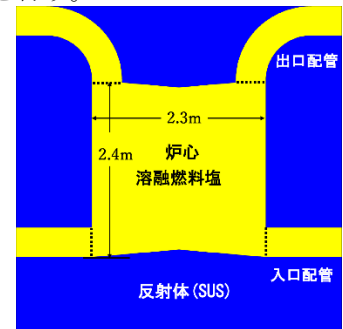


図1 炉心の縦断面

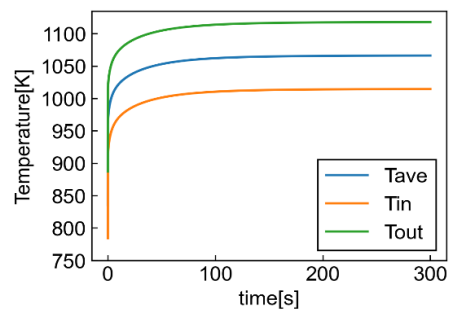


図2 反応度 $0.93\% \Delta\rho$ 添加時の炉内温度の時間変化: Tave: 炉内平均温度、Tin: 炉心入口温度、Tout: 炉心出口温度