

A208

持続可能なエネルギー源の新たな展開： 次世代型原子炉コンセプト・熔融塩炉という選択

(神戸高専) (正)山本 高久*・(豊橋技科) 三田地 紘史

【緒言】省エネルギー化，脱化石エネルギー，二酸化炭素排出量の低減などが現在大きく取りざたされており，様々な分野にて技術革新が日夜行われている．原子力分野においては，現在，沸騰水型原子炉，加圧水型原子炉からその高効率化・長寿命核廃棄物の低減を図った改良型原子炉(第三世代原子炉)への移行が進められている．その一方で更なる高効率化を図った第四世代原子炉の研究開発が 2030 年頃の実用化に向けて世界各国で行われている．熔融塩炉とはこの第四世代原子炉の一つであり，熔融塩中に核燃料を溶解させた液体核燃料を使用するという特徴を有している．これにより長期にわたる連続運転を可能とするとともに，長寿命核廃棄物の低減を可能としている．本報では著者らが行った熔融塩炉の炉心設計例を報告し，熔融塩炉に特化した数値解析モデルについて言及する．

【環状 2 炉心熔融塩炉】Fig. 1 は著者らが行った炉心設計例である⁽¹⁾．本炉の直径 7.16m，高さ 3.36m，定格熱出力 465MW であり，環状に 2 つ炉心を有している．炉は内側から燃料塩体積率 (Fr) がそれぞれ異なるブランケット，炉心 1，炉心 2，反射体，炉容器の順に構成されている．また，炉容器と反射体，炉心部と反射体の間に燃料塩をスムーズに流すための燃料塩ダクトが設けられている．燃料塩は温度 833 K，流量 0.735m³/s 一定で炉下部より炉内に流入する．燃料塩は核分裂反応と発熱を伴いつつ，燃料塩ダクト及び黒鉛減速材に設けられた燃料塩流路を上方へと流れる．そして炉上部中央の排出口から循環ポンプ，熱交換器がある一次ループ系へと流出する．

【解析モデル】流動解析には以下に示す，連続の式，運動量保存方程式を考える．

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

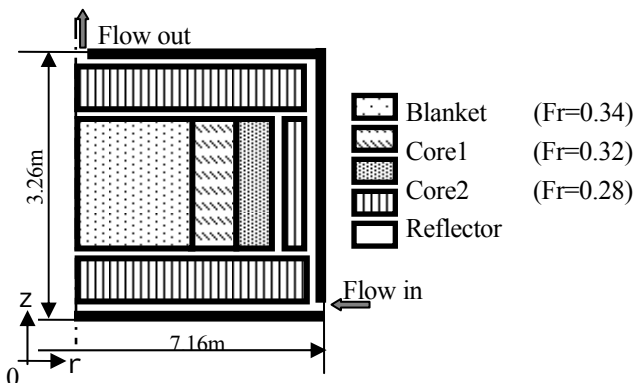


Fig.1. Molten Salt Reactor with annular two cores

$$\rho_F \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = B_r - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (2)$$

$$\rho_F \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = B_z - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

ここで(2)，(3)式中の B_r, B_z は物体項であり，燃料塩流路を流れる際の管摩擦等による圧損が含まれている⁽²⁾．

$$B_r = -\frac{\zeta}{l_r} \frac{\rho_F}{2} u^2 \quad B_z = -\frac{\zeta}{l_z} \frac{\rho_F}{2} w^2 \quad (4)$$

伝熱解析には以下に示す対流伝熱式，熱伝導式を用い，燃料塩温度 T_F 及び黒鉛減速材温度 T_G を解析する．

$$\rho_F c_F \left(\frac{\partial T_F}{\partial t} + u \frac{\partial T_F}{\partial r} + w \frac{\partial T_F}{\partial z} \right) = \lambda_F \nabla^2 T_F + q_F + \frac{q_{GF}}{Fr} \quad (5)$$

$$\rho_G c_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \lambda_G \nabla^2 T_G + q_G - \frac{q_{GF}}{1 - Fr} \quad (6)$$

上式中の q_F, q_G は燃料塩及び黒鉛減速材の発生熱量を， q_{GF} は燃料塩と黒鉛減速材の間の熱交換量を表す．

核解析には以下に示す高速中性子束 ψ と熱中性子束 ϕ に対する 2 群拡散方程式及び 1-6 群遅発中性子先核密度 C_i ($i=1-6$) に対する収支式を用いる⁽²⁾．

$$\frac{1}{v_1} \frac{\partial \psi}{\partial t} = D_1 \nabla^2 \psi - (\Sigma_{a1} + \Sigma_{12}) + (1 - \beta) \frac{v}{k_{eff}} (\Sigma_{f1} \psi + \Sigma_{f2} \phi) + \lambda \bar{C} \quad (7)$$

$$\frac{1}{v_2} \frac{\partial \phi}{\partial t} = D_2 \nabla^2 \phi - \Sigma_{a2} \phi + \Sigma_{12} \psi \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial r} + w \frac{\partial C_i}{\partial z} = \beta_i \frac{v}{k_{eff}} (\Sigma_{f1} \psi + \Sigma_{f2} \phi) - \lambda_i C_i \quad (9)$$

式中の発生中性子数 ν ，先行核の収率 β_i ，崩壊定数 λ_i ，核分裂断面積 Σ_{f1}, Σ_{f2} ，吸収断面積 Σ_{a1}, Σ_{a2} ，拡散係数 D_1, D_2 等の核データには JENDL3.3 を使用した．

離散化にはコントロールボリューム法を適用し，Fig. 1 に示した炉体系を r 方向に 32 分割， z 方向に 64 分割した．対流項にはハイブリット法，拡散項には中心差分法，時間項には完全陰解法，圧力項には Patankar の SIMPLE 法を適用した．

【結果と考察】本解析モデルの妥当性を検証する為に SRAC'02⁽⁴⁾ との比較を行った．尚，炉内温度は 900K 一定，燃料塩の流動は無いものとした．高速及び熱中性

Table 1 Comparison between SRAC and present study

| | Neutron flux [n/cm ² /s] | | [-] | [1/T] |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|
| | Fast | Thermal | k_{eff} | T |
| SRAC'02 | 1.346×10^{14} | 3.70×10^{13} | 1.0121 | -2.1×10^{-5} |
| Present study | 1.317×10^{14} | 3.79×10^{13} | 1.0179 | -2.3×10^{-5} |

子束のピーク値，中性子実効増倍係数 k_{eff} ，反応度温度係数 α_T を比較したものを Table 1 に示す．本解析モデルは高速中性子束では過大評価，熱中性子束では過小評価する傾向があるものの，その誤差は 2～3% 以内で収まっており，十分な予測精度を有しているものと考えられる．核反応と伝熱・流動との相互干渉を考慮した定格運転時の解析結果について，定格運転時の中性子実効増倍係数 k_{eff} は 1.0189 となり，温度 900K 一定，燃料塩流動無しとした場合の値 1.0179 と比較すると，高い値を示している事が分かる．

Fig. 2 に燃料塩及び黒鉛減速材の温度分布を示す．燃料塩温度は炉下部から上部に向かって徐々に上昇し，炉上部反射体領域で最高温度 980K に達した．一方，黒鉛減速材は炉下面から急激に上昇し，炉心上部で最高温度 1073K に達するが，炉上部反射体領域では熱発生量が少ない為にむしろ燃料塩温度は低下した．

Fig. 3 に定格運転時の z 方向及び r 方向の高速，熱中性子束分布を示す．温度 900K 一定，燃料塩流動無しとした際の解析結果を併せて示すと，定格運転時の高速中性子のピークが僅かに炉中心から下方に移動する事がわかる．Fig. 2 に示すように炉上部には高温領域が広がっており，その為，核分裂反応が抑制された事によるものと考えられる．尚， r 方向の中性子束分布は炉心領域で平坦化されている事が分かる．これは炉心をブランケット，炉心 1，炉心 2 の 3 領域に分割している為であり，本結果では環状 2 炉心熔融塩炉の結果が顕著に現われている．

Fig. 4, Fig. 5 に z 方向及び r 方向の 1 群，6 群遅発中性子先行核密度分布を示す．Fig. 3 と同様に温度 900K 一定，燃料塩流動無しとした際の解析結果も併せて示す．遅発中性子先行核密度分布は 1 群，6 群共に燃料塩の流動を受け，下流方向である炉上部へ流された．更に，6 群先行核よりも寿命の長い 1 群先行核が大きく変化することが明らかになった．

【結言】本報では熔融塩炉の炉心設計例を示したのちに，核反応，伝熱，流動の相互作用を考慮した解析モデルについて言及し，その上で炉心設計例の定格運転時および定常炉心解析を行った．

1. 定格運転時の実効増倍係数 k_{eff} は 1.0189 となり，温度 900K 一定，燃料塩流動無しでの 1.0179 と比較すると高い値を示すことが明らかになった．
2. 定格運転時の燃料塩最高温度は 980K，黒鉛減速材最高温度は 1073K であった．
3. 定格運転時の中性子束は，高速中性子ピークが僅かに下方に移動した．尚， r 方向の中性子束分布は炉心領域で平坦化され，環状 2 炉心熔融塩炉の特徴を顕著に示した．
4. 先行核密度は燃料塩流動の影響を受け，下流方向である炉上部に流され，寿命の長い 1 群先行核で

その傾向が顕著に現われた．

【参考文献】

- (1) 奥村嘉英，他：環状炉心熔融塩炉の研究，日本原子力学会「2003 年秋の大会」
- (2) 三田地紘史，他：流れと温度分布を考慮した熔融塩炉の定常炉心特性，原子力学会和文論文誌，Vol.2, No.4, pp.400-407 (2003)
- (3) kumura K, SRAC: The Comprehensive Neutronics Calculation Code System (JAERI-Data/Code96-015), Japan Atomic Energy Research Institute(1996)

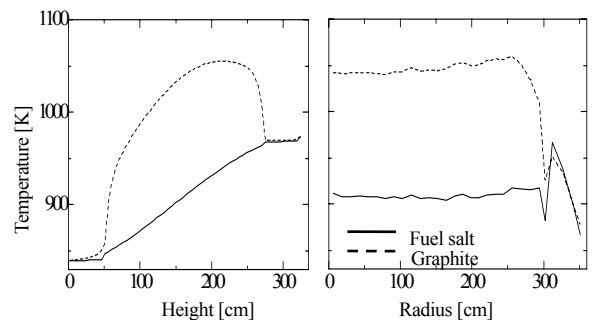


Fig.2 Distribution of fuel salt and graphite temperature

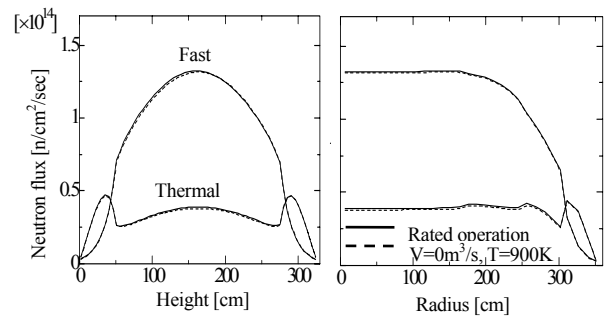


Fig.3 Distribution of neutron flux

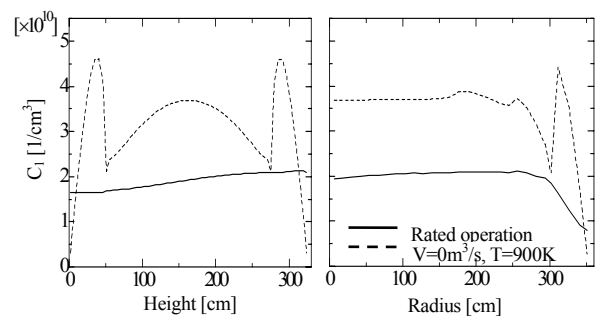


Fig.4 Distribution of 1st-group precursor

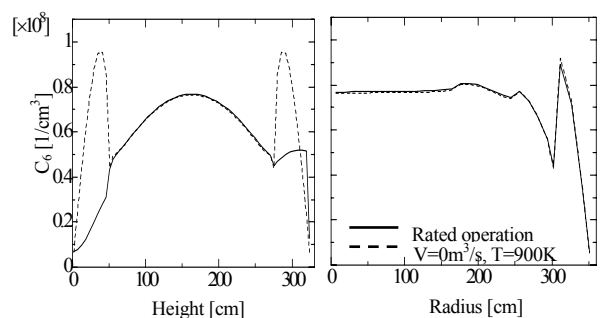


Fig.5 Distribution of 6th-group neutron precursor