

< 第 35 回炉物理夏期セミナー・若手研究会報告 >

(1) CANDLE 燃焼制御方式の高温ガス炉への適用に関する研究

東京工業大学大学院 理工学研究科 原子核工学専攻
 博士後期課程 2 年 (関本研究室) 大岡靖典

1. 序論

1.1 CANDLE 燃焼制御方式

CANDLE (Constant Axial shape of Neutron flux, nuclide densities and power shape During Life of Energy producing reactor) 燃焼制御方式とは、炉心を核反応の活性領域が自律的に下部から上部、または上部から下部へと移動する燃焼制御方式である。炉心は Fig. 1 に示すように未燃焼領域、燃焼領域、燃焼済み領域に大別でき、運転が進むにつれ、燃焼領域には核分裂生成物が蓄積し、反応は徐々に不活性化し、燃焼領域から漏れた中性子は未燃焼領域の新燃料と反応を始めるため、燃焼領域は未燃焼領域の方向に自律的に移動するというものである。

この燃焼方式には以下のような利点が考えられる。

- ・ 燃焼に伴う余剰反応度が無いため、制御棒が排除できる。
- ・ 燃焼に伴う原子炉特性の変化が無いため、定常運転時の炉内の状況が推測でき、運転・管理や燃料交換が容易になる。
- ・ 燃焼に伴う出力分布の変化が無いためオリフィスによる冷却材の必要がない。
- ・ 燃焼に伴う出力分布の変化が無いため、長寿命炉心の設計も容易である。
- ・ 新燃料の無限増倍率が 1 以下であり、輸送や貯蔵が安全で容易である。

また、その燃料交換は独特であり、Fig.2 のように、だるま落とし方式により連続的に燃料交換が可能である。つまり、現在燃焼中の炉心の燃焼方向に次世代炉心を装荷する事で、燃焼領域は定常状態を保ったまま次世代炉心に移動し、燃焼済み炉心は取り出すという方式を用いる事で、燃料交換が容易となる。

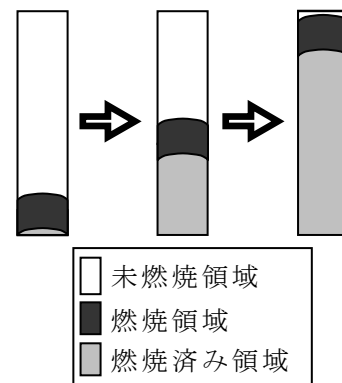


Fig. 1 CANDLE 燃焼制御方式の基礎概念

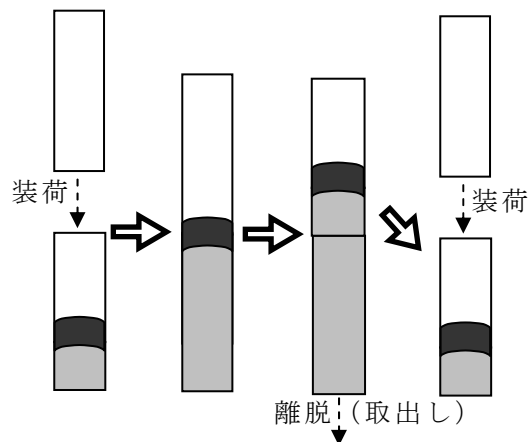


Fig. 2 だるま落とし方式による燃料交換

1.2 CANDLE 燃焼制御方式のブロック型高温ガス炉への適用

CANDLE 燃焼制御方式は過去に高速炉について調査されてきた¹⁾。本研究では熱中性子炉への適用例として、ブロック型高温ガス炉への適用性について調査した。熱中性子炉では、燃料の増殖が無い²⁾ため、新燃料には核分裂性物質を臨界量装荷しておかなければならないが、それでは新燃料が臨界になってしまい、本燃焼制御方式が成立しない。そこで、それを未臨界にするため、吸収断面積の大きい可燃性毒物を用いる。

可燃性毒物により未臨界に保たれている未燃焼領域が燃焼領域に入ると、可燃性毒物はその大きな吸収のため短時間で無くなる。そのため核分裂性物質の核分裂反応が活性化する。その後、核分裂性物質は減少し、核分裂生成物は増加するため、中性子束は燃焼領域にのみ大きなピークを持つような CANDLE 型となる。ここで、もし可燃性毒物の微視的吸収断面積が小さいと、中性子束が軸方向に広がってしまい、実効増倍率が 1 以下、または新燃料の無限増倍率が 1 以上となってしまう、成立しなくなってしまう (Fig. 3)。

2. 解析方法

CANDLE 燃焼制御方式は燃焼領域の移動が伴うため、その解析には核種数密度に関して、核反応による経時変化に加え、燃焼領域の移動による空間分布の経時変化を考慮しなければならない。しかし、それらを一度に計算する事は、非効率的であり現実的ではない。そこで、まず定常状態を解析する。ここで、定常状態とは燃焼開始から時間が十分に経ち、中性子収支は平衡し、中性子束分布は一定の形に漸近し、一定の速度で移動しているような仮想的な状態である。このような状態の解析は燃焼に伴う数密度の時間変化をゼロとおき、座標系に変換した燃焼・拡散方程式の連立方程式を解く事で、中性子束分布、核種数密度分布、実効増倍率、燃焼領域移動速度などの解を得る。詳しくは文献 1 を参考にされたい。

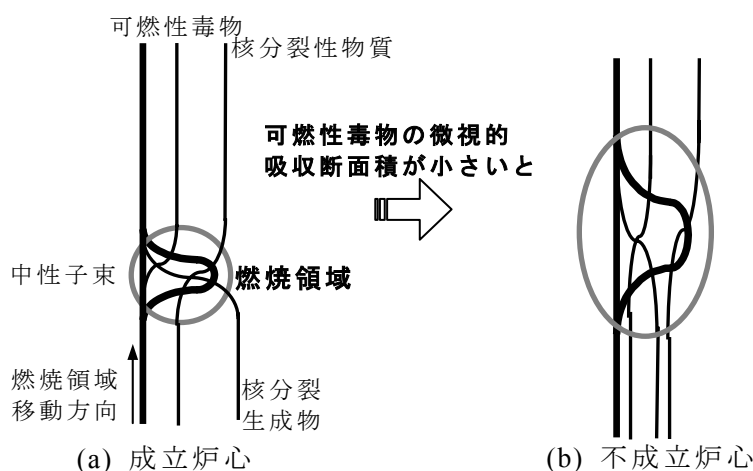


Fig. 3 CANDLE 燃焼制御方式を適用した高温ガス炉の核種数密度分布と中性子束分布

3. 解析結果

3.1 検討炉心

本研究では解析対象のブロック型高温ガス炉として日本原子力研究所の高温工学試験研究炉 HTTR を参考にした。検討炉心仕様を Table 1 に示す。体系は2次元 r-z 体系で、群構造は高速、減速、散乱、熱の4群とした。高温ガス炉の燃料は Fig. 4 のように被覆燃料粒子を使用しているため、燃料セル計算では二重非均質を考慮しなければならない。本研究では燃料セル計算に日本原子力研究所の SRAC95 の衝突確率ルーチンを用い、微視的非均質セルに被覆燃料粒子と黒鉛マトリクスを考慮し、巨視的非均質セルの燃料コンパクトの部分に反映されるものとした。

Table 1 検討炉心仕様

炉心形状	He 冷却ブロック型高温ガス炉
熱出力 [MW _{th}]	30
被覆燃料粒子	TRISO 被覆 UO ₂
カーネル/被覆粒子直径 [mm]	0.608/0.940
ウラン濃縮度 [%]	15
粒子充填率 [%]	30.0
コンパクト内径/外径 [cm]	1.00/2.60
スリーブ外径/ブロック内径 [cm]	3.40/4.10
燃料セルピッチ [cm]	6.6
炉心直径/高さ [cm]	400/800
径方向反射体厚さ [cm]	50

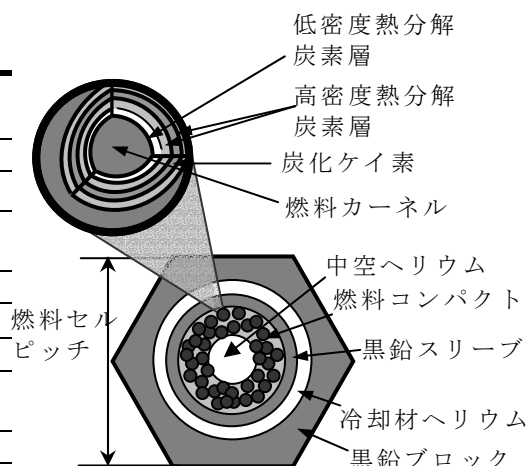


Fig. 4 二重非均質燃料セルモデル

3.2 解析結果

可燃性毒物として天然ガドリニウムを燃料カーネル内に 2.4%混入した場合における解析結果を Table 2 に、炉心径方向中央部における主要核種数密度と中性子束の軸方向分布を Fig. 5 に示す。これらの結果より、本ケースにおいて成立性は確認された。

Table 2 解析結果

実効増倍率	1.0695
燃焼領域移動速度 [cm/year]	11.32
中央部燃焼度 [MWd/t(HM)]	107.8
燃焼度 [% (HM)]	11.5
炉心平均燃焼度 [MWd/t(HM)]	85.0
燃焼度 [% (HM)]	9.0
最大出力密度 [W/cm ³]	1.71
出力密度分布半値幅 [cm]	157.8

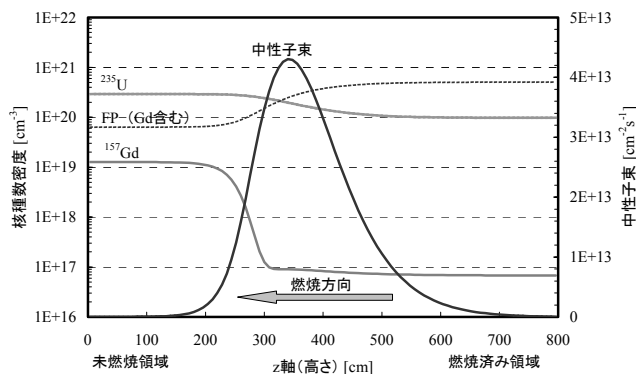


Fig. 5 主要核種数密度と中性子束の軸方向分布

参考文献

(1) Sekimoto, H., et al., 2001, A New Burnup Strategy CANDLE, Nucl. Sci. Engin., 139, 306-317.