

HTGR燃料ブロック冷却流路の流動特性の研究

Study of the Flow Characteristics of Coolant Channel of Fuel Blocks for HTGR

辻 延 昌*	大 橋 一 孝*	田澤勇次郎*
Nobumasa Tsuji	Kazutaka Ohashi	Yujiro Tazawa
橘 幸 男**	大 橋 弘 史**	高 松 邦 吉**
Yukio Tachibana	Hirofumi Ohashi	Kuniyoshi Takamatsu

〔概 要〕

高温ガス炉 (HTGR) の固有の安全性にとって受動的除熱は最も関心のあるところである。強制冷却喪失事故では、ブロック型HTGRの崩壊熱は輻射、熱伝導および自然対流で除去されなければならないが、燃料温度は炉心領域の自然対流に強く影響されるため炉心領域の自然対流を精度高く評価することが重要となる。自然対流における燃料温度の検討を熱流動CFDコードを使って1燃料カラムで行った。熱流動解析は通常運転状態と強制冷却喪失事故状態で、流量と燃料ブロックの熱伝達特性を定量的に強制対流モードと自然対流モードで評価した。さらに炉心の自然対流を計算する炉心領域の30°セクターモデルも開発したが、上昇流の流量は1カラムモデルに比べてかなり減少した。またMHTGRのマルチホール型燃料ブロックをモデル化し、流量と熱伝達特性をピンインブロック型とマルチホール型と比較した。マルチホール型燃料ブロックはピンインブロック型より炉心の自然対流が大きくなった。本論文は、2014年7月にチェコ プラハにて開催された国際会議ICONE22 (22th International Conference on Nuclear Engineering) で発表した内容を紹介するものである。

1. ま え が き

本研究の目的は、強制冷却喪失事故において炉心領域に生じる自然対流の特性を調べることである。この場合、いわゆる加圧事象(PCC)においては、一次系冷却材は加圧状態のままであるため、炉心領域の自然対流は燃料ブロック温度に影響を与える。以前の研究で、我々は現在稼働しているブロック型高温ガス炉であるHTTR¹⁾の炉心ブロック、炉内構造物および原子炉圧力容器 (RPV) 全体をモデル化して自然対流のCFD解析を試みた。²⁾しかし計算機能力の制約から、HTTRでは1燃料ブロックあたり33個ある円環形状の冷却材孔を7個の円管流路に簡単化しなければならず、自然対流流量のような定量的な特性は十分な信頼性で評価できたとはいえなかった。炉心領域に生じる自然対流を正確に理解するためには、燃料ブロックの詳細な形状を正確に反映した3次元モデルによるCFD解析が望ましい。本研究では、実機の燃料ブロック流路の伝熱・

流動特性を調べることが目的である。

本研究では、最初に燃料ブロックの1カラムモデルを作成して強制対流および自然対流モードにおけるCFD解析を行い、燃料ブロック流路の基本的な流動・伝熱特性を把握した。

次に燃料ブロックの複数カラムモデルを作成して炉心領域における自然対流のパターンをCFD解析により計算した。モデルは燃料ブロック、制御棒案内ブロックおよび固定反射体ブロックに限定した30°セクターモデルである。

2. HTTR 燃料ブロックの形状

HTTR (高温工学試験研究炉) は日本で最初のブロック型高温ガス炉 (HTGR) であり、熱出力30MWで、炉心は30カラム5段積の燃料ブロックで構成され、高さは2.9mである。燃料ブロック形状は平径 (対面間距離) 360mm、高さ580mmの六角柱で、外径34mmの燃料ピンが外径41mmの孔にピンインブロック型配置されている。図1に燃料ブロックの概観を示す。

* 富士電機(株) 発電・社会インフラ事業本部 発電プラント事業部 原子力技術部

** 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力水素・熱利用研究センター

ブロック型高温ガス炉の燃料ブロック冷却構造にはHTTRで採用したピンインブロック型の他にマルチホール型があるが、燃料ブロックの流路特性をより包括的に理解するために、比較用としてマルチホール型の燃料ブロックもモデル化した。マルチホール型燃料ブロックはHTTRの燃料ブロックと同じ直径であるMHTGR³⁾の燃料ブロックを対象として、外径13mmの燃料ピン120個と外径16mmの冷却材孔102個を配置した。燃料ブロックの高さは580mmと同じとした。図2にマルチホール型燃料ブロックの平面図を示す。

3. 1 カラムモデルの解析

(1) 解析モデルおよび解析条件

1カラムモデルは燃料ブロック5段積で全高2.9mである。ピンインブロック型燃料ブロックのモデル

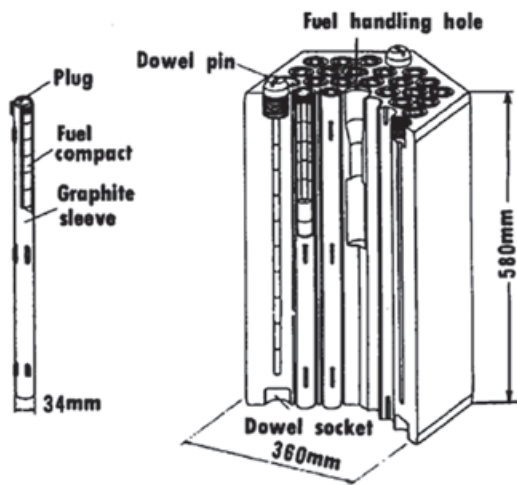


図1 ピンインブロック型燃料ブロック (HTTR)

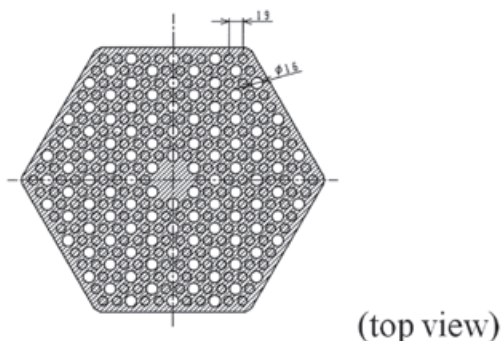


図2 マルチホール型燃料ブロック (MHTGR)

は33個の燃料ピンとその周囲の円環形状冷却流路を忠実にモデル化する。マルチホール型燃料ブロックのモデルは210個の燃料ピンと102個の円管冷却流路をモデル化する。5段積燃料ブロックモデルの上端と下端には、自然な冷却材の流入と流出を実現するために、高さ1mの流体空間を追加する。

CFD解析は強制対流モードと自然対流モードについて各々定常解析を実施する。解析は汎用流体解析コードANSYS-CFX v.14⁴⁾を使用し、 $k-\omega$ 乱流モデルで計算する。

強制対流モードでは定格運転時を想定し、定格運転における1カラムあたりの冷却材流量372g/sと温度395℃をモデルの上面に流入条件として設定し、燃料ピンに定格出力30MWに相当する発熱密度を設定する。

自然対流モードでは加圧事象 (PCC) を想定し、モデルの上面・下面を開口とし、下面の冷却材温度を600℃と設定する。燃料ピンに崩壊熱レベルである定格出力30MWの1%に相当する発熱密度を設定する。

解析モデルおよび解析条件を図3に示す。

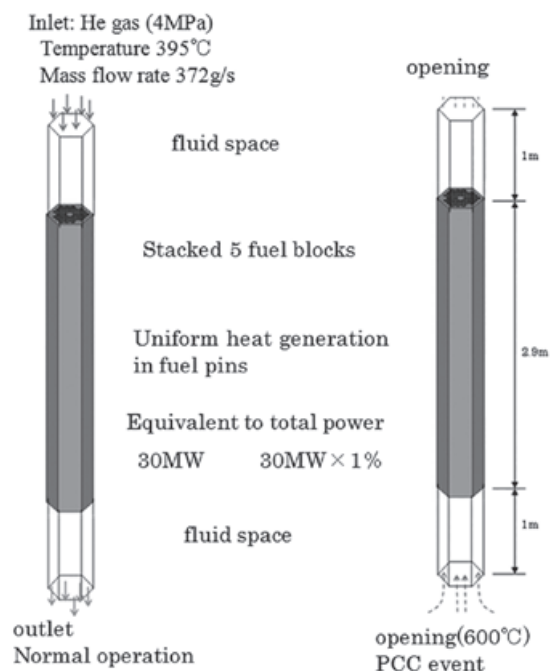


図3 1カラムモデルの解析モデル・解析条件

(2) 解析結果

i) 強制対流モード (定格運転)

定格運転条件における1カラムモデルの解析結果として温度分布を図4に示す。ピンインブロック型、マルチホール型ともにモデル上端から下端に向けて単調に温度が上昇している。燃料ブロックの最高温度は当然ながら下端付近に生じている。

解析結果のうち、ブロックと燃料ピンの最高温度と全流路圧損を表1にまとめる。冷却材流量と流入温度が同じ条件ではピンインブロック型の方がマル

チホール型よりブロックと燃料ピンの最高温度は低くなる。逆に流路圧損はピンインブロック型の方がかなり大きくなる。

ii) 自然対流モード

加圧事象 (PCC) 条件における1カラムモデルの解析結果として温度分布を図5に示す。燃料ピンの発熱により自然対流上昇流が生じブロックが加熱され燃料ブロック上段に高温部が生じる。

解析結果のうち、ブロックと燃料ピンの最高温度と自然対流上昇流量を表2にまとめる。ピンインブ

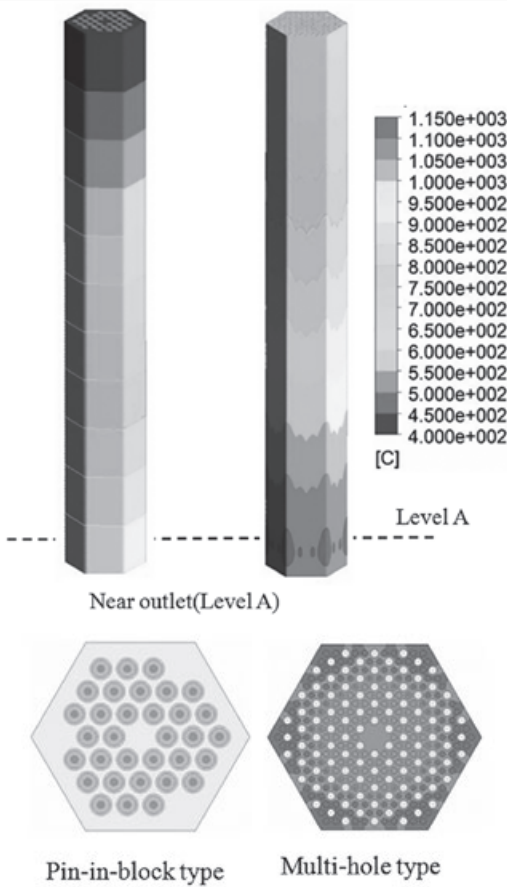


図4 1カラムモデル解析結果
温度分布一定格運転時

表1 1カラムモデル解析結果
各部最高温度・全体圧損一定格運転時

	Pin-in-block	Multi-hole
Tmax of block (℃)	939	1113
Tmax of fuel pin (℃)	1076	1121
Pressure loss (Pa)	2867	485

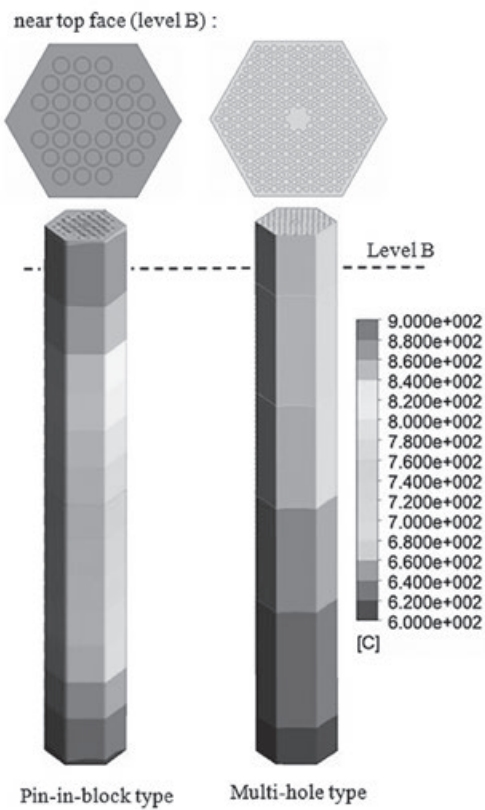


図5 1カラムモデル解析結果
温度分布ー加圧事象 (PCC)

表2 1カラムモデル解析結果
各部最高温度・上昇流量ー加圧事象 (PCC)

	Pin-in-block	Multi-hole
Tmax of block (℃)	869	703
Tmax of fuel pin (℃)	873	704
Mass flow rate of upward flow (g/s)	7.2	21.1

ロック型の方がマルチホール型よりブロックと燃料ピンの最高温度は高くなる。自然対流上昇流量はピンインブロック型の方が小さい。

4. 30° セクターモデルの解析

(1) 解析モデルおよび解析条件

加圧事象 (PCC) においては炉心の内側で温度が高く外側に向かって温度が低くなるのが典型的な炉心温度分布であるので、炉心領域における自然対流は高温の内側カラムで上昇流、低温の外側カラムで下降流というパターンが想定される。この炉心領域の自然対流パターンを定量的に把握するには、複数の燃料ブロックカラムで構成するモデルによるCFD解析が必要となる。

解析モデルは5段積の燃料ブロック、制御棒案内ブロック、反射体ブロックおよび固定反射体ブロックから構成する。燃料ブロックについては1カラムモデルと同様に、ピンインブロック型燃料ブロックのモデルは33個の燃料ピンとその周囲の円環形状冷却流路を、マルチホール型燃料ブロックのモデルは210個の燃料ピンと102個の円管冷却流路を忠実にモデル化する。炉心のカラム配置はHTTRを対象とし、計算時間の節約のため30° セクターモデルとする。モデルの上端と下端には、自然対流による燃料ブロックへの流入と流出を実現するために、高さ1mの流体空間を追加する。

CFD解析は自然対流モードについて定常解析を実施する。解析は汎用流体解析コードANSYS-CFX v.14を使用し、 $k-\omega$ 乱流モデルで計算する。

境界条件は、上部、下部の流体空間は断熱壁で囲まれているとし、固定反射体の背面は、適切な炉心の温度分布をつけるために、熱伝達境界 (450°C , $20\text{W}/\text{m}^2$) を設定する。

燃料ピンに崩壊熱レベルである定格出力30MWの1%に相当する発熱密度を設定する。

解析モデルおよび解析条件を図6に示す。

(2) 解析結果

30° セクターモデルの解析結果として温度分布を図7、燃料ブロック中心レベルにおける流速分布を図8に示す。

ピンインブロック型、マルチホール型ともに炉心の内側カラムにブロック最高温度が生じるが、マル

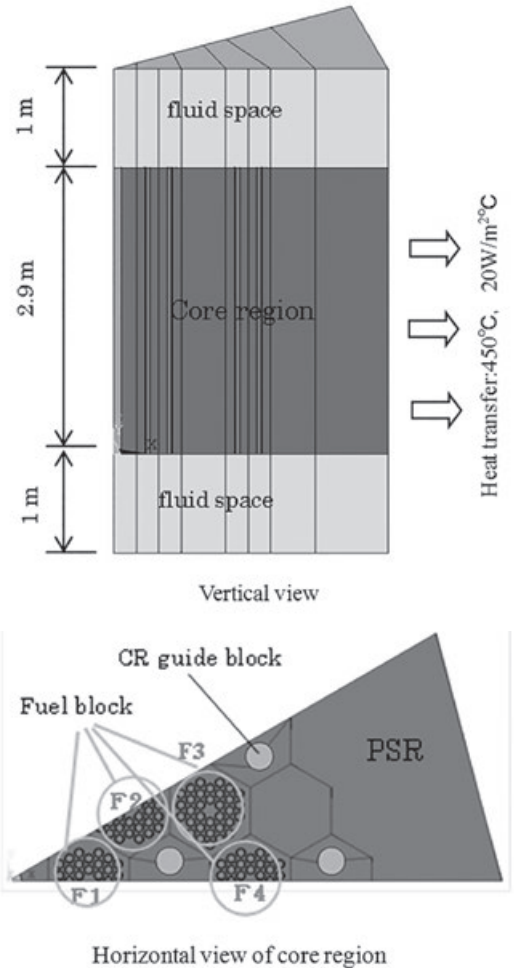


図6 30° セクターモデルの解析モデル・解析条件

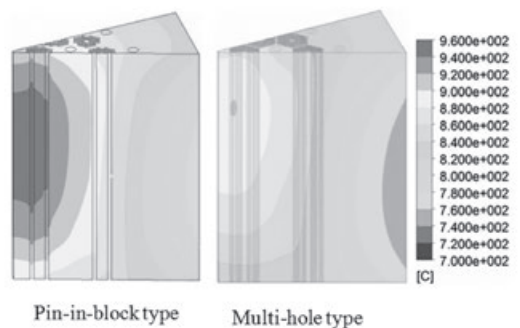


図7 30° セクターモデル解析結果
温度分布—加圧事象 (PCC)

チホール型の方が発生位置は高い。炉心の自然対流は内側カラム (F1, F2) で上昇流、外側カラム (F3, F4) で下降流となっている。

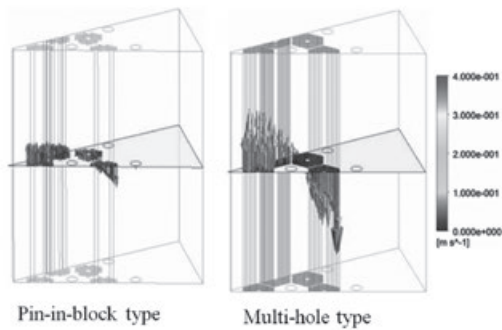


図8 30° セクターモデル解析結果
中央面における流速分布－加圧事象（PCC）

表3 30° セクターモデル解析結果
各部最高温度・上昇／下降流量－加圧事象（PCC）

	Pin-in-block		Multi-hole	
Tmax of block (°C)	952		900	
Tmax of fuel pin (°C)	955		900	
Mass flow rate of upward flow (g/s)*	F1	F2	F1	F2
	1.2	0.8	5.8	4.0
Mass flow rate of downward flow (g/s)*	F3	F4	F3	F4
	0.2	0.7	2.0	5.0

*flow rate per one column

解析結果のうち、ブロックと燃料ピンの最高温度と各カラムの自然対流上昇／下降流量を表3にまとめる。ピンインブロック型の方がマルチホール型よりブロックと燃料ピンの最高温度は高くなる。自然対流上昇流量はピンインブロック型の方が小さい。これらの傾向は、1カラムモデルでみられたものと同様である。

5. 結 論

特に強制冷却喪失事故時に炉心に発生する自然対流の特性を調べる目的で、1カラムモデルと30°

セクターモデルのCFD解析を実施した。

ピンインブロック型の燃料ブロックについては、1カラムモデル解析による自然対流上昇流は7g/s程度であるが、30°セクターモデルでは内側カラムの上昇流は1カラム換算で2g/s程度と小さい。これは、1カラムモデルは上端/下端が開口条件であるのに対して30°セクターモデルはモデルの外表面がすべて壁で囲まれている閉空間体系であることによる。実機の体系はさらに広い閉空間であるので、30°セクターモデルの自然対流評価は過小評価していると思われる。数g/s程度の自然対流流量は生じていると推定される。

マルチホール型と比べるとピンインブロック型燃料ブロックは自然対流流量が少なく燃料温度は高くなるが、反面、自然対流で上昇する高温冷却材の流量が少ないことは炉上部にある上鏡や制御棒駆動機構などの金属部品に対する加熱の影響が緩和されることも期待できる。

参 考 文 献

- 1) S.Saito, T.Tanaka, Y.Sudo, O.Baba, M.Shindo, S. Shiozawa, F.Kobayashi, R.Kurihara, K.Hada, K. Yamashita, K.Kawasaki, T.Iyoku, K.Kunitomi, S.Maruyama Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), JAERI 1332, 1994.
- 2) N.Tsuji, M.Nakano, E.Takada, K. Tokuhara, K.Ohashi, F.Okamoto, Y.Tazawa, Y.Inaba, Y. Tachibana Study of the applicability of CFD calculation for HTTR reactor, HTR2012, 2012.
- 3) General Atomics Preliminary Safety Information Document for Standard MHTGR Report HTGR-86-024 (1986)
- 4) ANSYS 14.0 Use's Guide, ANSYS Inc., 2012

Nobumasa Tsuji, Kazutaka Ohashi, Yujirou Tazawa, Yukio Tachibana, Hirofumi Ohashi, Kuniyoshi Takamatsu,

Study of the Flow Characteristics of Coolant Channel of Fuel Blocks for HTGR

FAPIG No. 190 pp.X ~ X (2015)

Passive heat removal performance is of primary concern for enhanced inherent safety of HTGR. In a loss of forced cooling accident, decay heat of fuels must be removed to graphite blocks by radiation, thermal conduction and natural convection in block-type HTGR. Because the temperature of fuels is strongly affected by natural convection of coolant in core region, it becomes important to estimate the behavior of natural convection in core region precisely. The numerical studies are performed using thermal hydraulic CFD code for one column-model of fuel blocks which is represented explicitly as individual coolant channels in fuel block. The thermal hydraulic analyses are conducted for normal operation and loss of forced cooling accident conditions, as results, the flow and heat transfer characteristics of fuel blocks are quantitatively evaluated both in forced convection mode and natural convection mode.

KEYWORDS : HTGR, HTTR, fuel block, natural convection, CFD code
