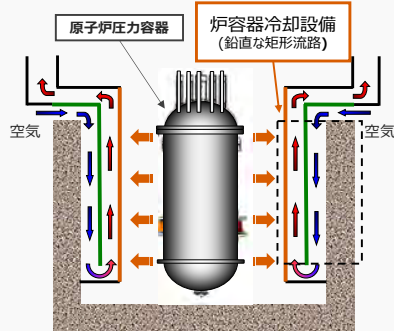


研究背景

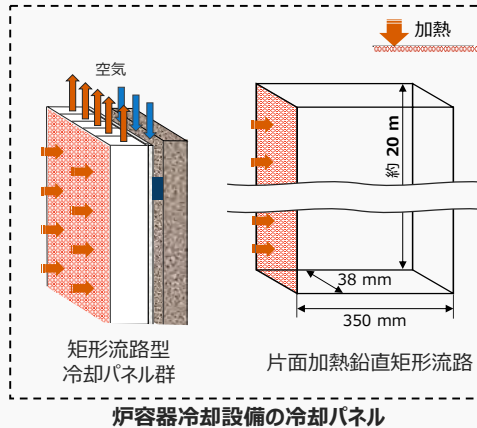
高温ガス炉の炉容器冷却設備



高温ガス炉ガスタービン発電システム (GTHT300) の

受動的原子炉圧力容器冷却設備 概略図

- 1次冷却材喪失や全電源喪失の場合においても炉心の強制冷却が必要ないシステム
- 受動的冷却設備により安全性を確保できる設計
- 圧力容器の外に冷却パネルを設ける冷却設備



炉容器冷却設備の冷却パネル

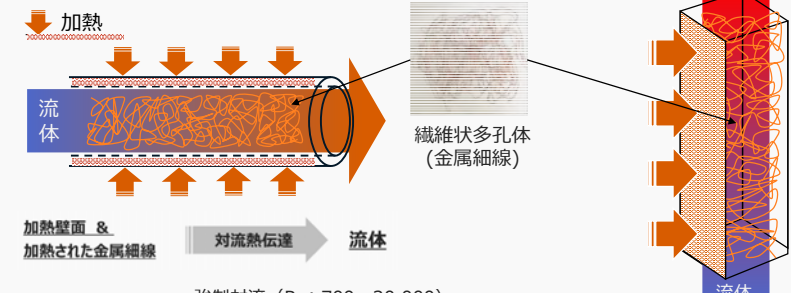
- 空気の自然循環を利用した設備
- 動的機器を用いない受動的冷却設備
- 冷却パネルには鉛直な矩形流路を多数構成

2

本研究

伝熱促進方法

繊維状多孔体を流路内に挿入する方法



過去の研究成果 強制対流 ($Re \approx 700 \sim 20,000$)
高空隙率 ($0.990 \leq \epsilon$) 条件

- 高い空隙率 (0.996, 0.997) で良好な伝熱性能
- 細線の径を大きくすることで除熱量増大, 圧力損失の増大抑制
- 加熱面が 800°C でも, 輻射の影響は小さい

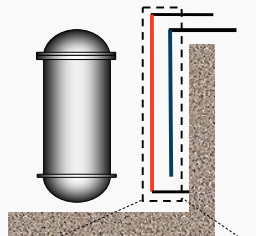
片面加熱鉛直矩形流路

- 自然対流条件下の片面加熱鉛直矩形流路内に, 繊維状多孔体として金属細線を高い空隙率で挿入
- 伝熱促進に効果があるか検討する

3

本研究の目的

高温ガス炉の炉容器冷却設備



最終目標

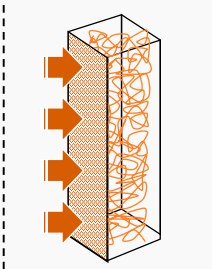
金属細線を用いた伝熱促進方法を原子炉圧力容器冷却設備に適用する

金属細線が挿入された流路を数値解析により再現する

本研究の目的

- 片面加熱鉛直矩形流路の自然対流熱伝達特性
- 片面加熱鉛直矩形流路内に金属線を高空隙率で挿入した場合の自然対流熱伝達特性を実験により調査する

片面加熱鉛直矩形流路



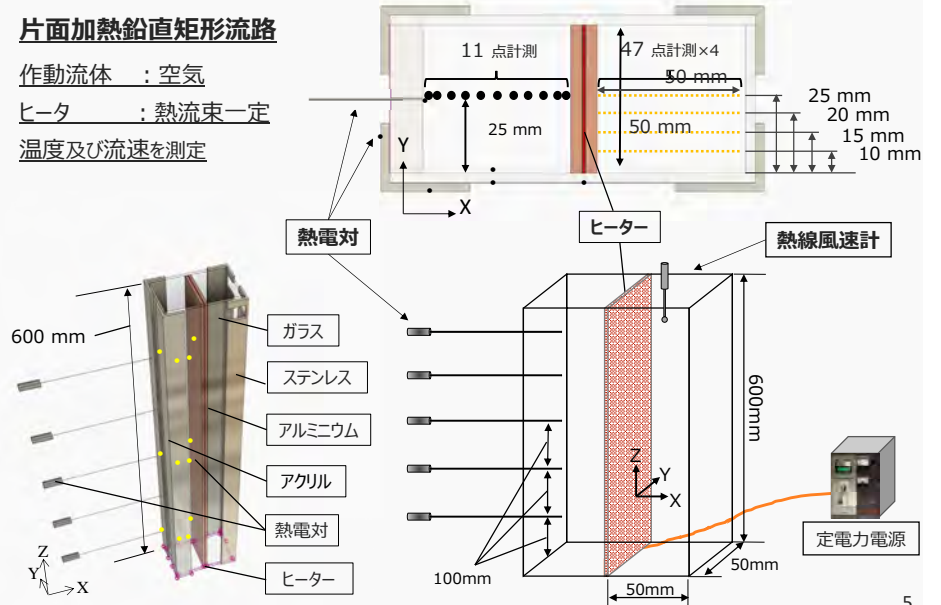
流路内に金属細線挿入

4

実験装置概略図：片面加熱鉛直矩形流路

片面加熱鉛直矩形流路

作動流体 : 空気
ヒータ : 熱流束一定
温度及び流速を測定



5

発表項目

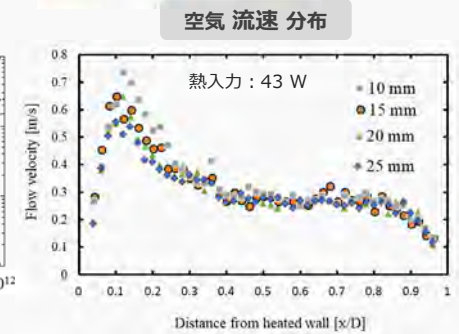
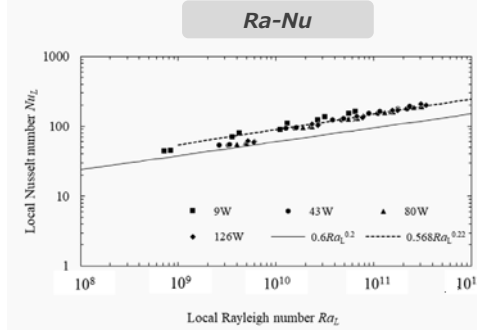
1. 加熱鉛直矩形平滑流路における自然対流熱伝達
2. 片面加熱鉛直矩形流路内に銅細線を空隙率一定で挿入した時の自然対流熱伝達
3. 片面加熱鉛直矩形流路内に銅細線を表面積一定で挿入した時の自然対流熱伝達

6

実験結果：片面加熱鉛直矩形平滑流路

実験条件

熱入力：■ 9 W ● 43 W ▲ 80 W ◆ 126 W
 加熱面最高温度 50, 100, 150, 200 °C



- 流路入り口部 (L=100 mm) は層流域の流れ
- 流路高さ L=200 mm以降の高さでは乱流域の流れ
- 空気は加熱面及び、流路側壁面からも加熱されている

7

実験条件：空隙率一定

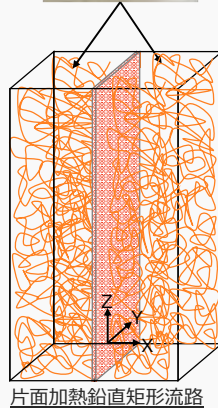
加熱条件 (熱流束一定) : 9 W, 43 W, 80 W, 126 W
 繊維状多孔性材料 : 銅細線 (純度99.9%)
 銅細線充填条件 : 空隙率一定

空隙率算出式

$$\varepsilon = 1 - \frac{V'}{V_0} = \frac{\text{流路空隙部の体積}}{\text{流路の体積}}$$

ε : 空隙率, V' : 銅線の体積, V_0 : 流路の体積

銅細線



片面加熱鉛直矩形流路

8

評価方法

除熱量の算出式

$$Q = \rho C_p U A (T_{out} - T_{\infty})$$

ρ 空気密度 [kg/m³]
 C_p 定圧比熱 [J/kg·K]
 U 出口空気流速 [m/s]
 A 流路断面面積 [m²/s]
 T_{out} 出口空気温度 [K]
 T_{∞} 雰囲気温度 [K]

局所ヌセルト数の算出式

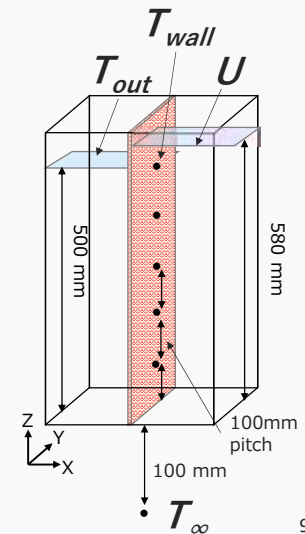
$$Nu = \frac{q_w}{(T_{wall} - T_{\infty})} \cdot \frac{d}{k}$$

q_w 熱流束 [W/m²]
 d 流路直径 [m]
 k 熱伝導率 [W/m·K]
 T_{wall} 加熱面温度 [K]
 T_{∞} 雰囲気温度 [K]

レイノルズ数の算出式

$$Re = \frac{dU}{\nu}$$

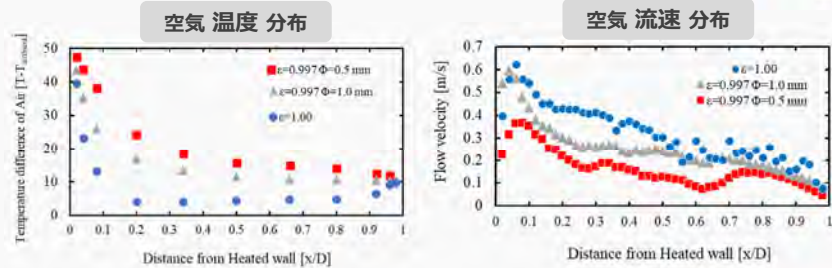
d 流路直径 [m]
 U 出口空気流速 [m/s]
 ν 空気動粘度 [m²/s]



9

実験結果：空気温度及び空気流速

- 熱入力 : 43 W
- 空隙率 : 0.997 及び 1.00 (銅細線無し)
- 銅細線直径 : 0.5 mm & 1.0 mm



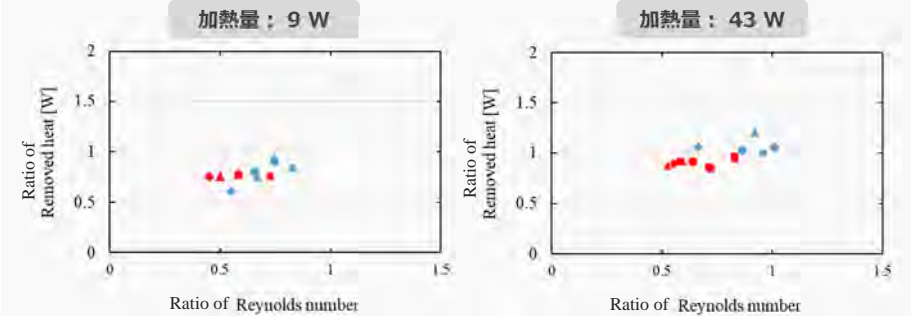
- 空気温度は銅細線を挿入すると増大した
- 空気流速は銅細線を挿入すると減少した
- 銅細線の直径が小さくなると空気温度は増大した
- 銅細線の直径が小さくなると空気流速は減少した

同じ空隙率（充填量）においても
銅細線の直径が変化することで空気の温度と流速の分布は異なる
銅細線の充填量以外の条件が温度と流速に影響を及ぼしている

10

実験結果：各加熱条件における除熱量

銅細線直径 : 赤 : $\Phi 0.5$ mm 青 : $\Phi 1.0$ mm
空隙率 : \blacklozenge 0.996 \blacktriangle 0.997 \bullet 0.998 \blacksquare 0.999

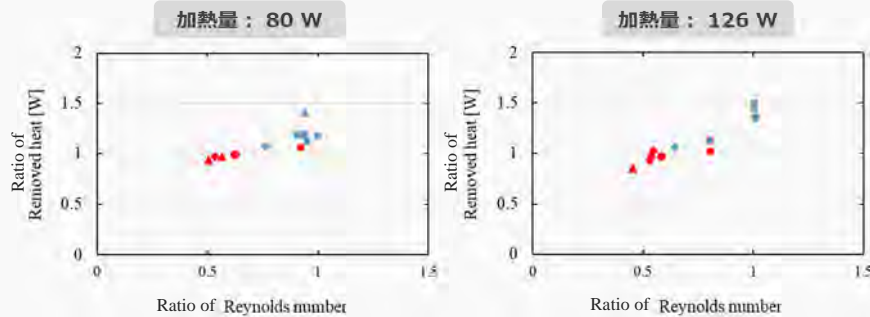


- $\Phi 1.0$ mmの条件の方が $\Phi 0.5$ mmの条件に比べレイノルズ数が大きい
- 除熱量は空隙率1.00の条件が銅細線を挿入した条件を上回る
- 空隙率が高い条件で $\Phi 1.0$ mmの条件の方が $\Phi 0.5$ mmの条件に比べ除熱量が大きい
- 加熱が大きくなるとレイノルズ数は大きくなる
- $\Phi 1.0$ mmの条件の方が $\Phi 0.5$ mmの条件に比べ除熱量が大きい
- 空隙率が高い直径が大きい条件で空隙率1.00の条件を上回る

11

実験結果：各加熱条件における除熱量

銅細線直径 : 赤 : $\Phi 0.5$ mm 青 : $\Phi 1.0$ mm
空隙率 : \blacklozenge 0.996 \blacktriangle 0.997 \bullet 0.998 \blacksquare 0.999



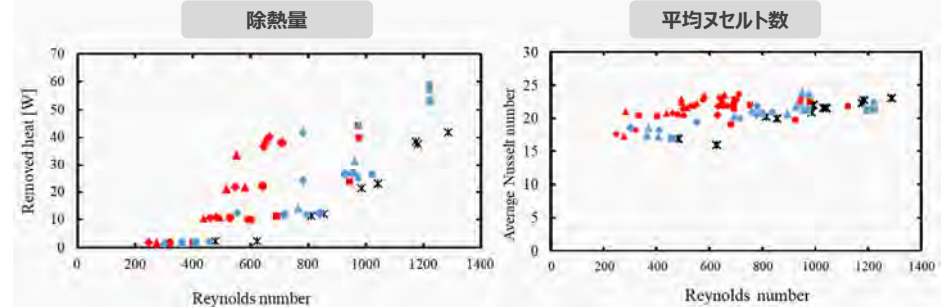
- 空隙率が高い及び $\Phi 1.0$ mmの条件では空隙率1.00の条件を上回る
- 空隙率が低い $\Phi 0.5$ mmの条件では空隙率1.00の条件より低いレイノルズ数で除熱量は同程度
- $\Phi 1.0$ mmの条件で空隙率1.00の条件を上回る
- 空隙率が低い $\Phi 0.5$ mmの条件では、加熱量80 Wと同様な傾向がみられる

加熱量が大きくなると、除熱量は平滑流路に対して増大する傾向
空隙率が高い条件、銅線直径が大きい条件で除熱量は増大する傾向

12

実験結果：除熱量及びヌセルト数

銅細線直径 : 赤 : $\Phi 0.5$ mm 青 : $\Phi 1.0$ mm
空隙率 : \blacklozenge 0.996 \blacktriangle 0.997 \bullet 0.998 \blacksquare 0.999 $*$ 1.00



- $\Phi 1.0$ mmの条件で、空隙率0.997から0.999の条件でレイノルズ数は大きくなり、除熱量も大きい
- $\Phi 0.5$ mmの条件で、空隙率0.999の条件でレイノルズ数が大きくなる
- $\Phi 0.5$ mmの条件では、空隙率1.00よりもヌセルト数は大きくなるが、レイノルズ数が低下する
- $\Phi 1.0$ mmの条件では、 $\Phi 0.5$ mmの場合よりもヌセルト数は小さくなるが、レイノルズ数は大きくなる

銅細線の充填量を少なく、かつ
銅細線直径1.0mmの条件で伝熱性能が優れる

- 銅細線の表面積を伝熱面とすると Φ が小さいと伝熱面積が大きくなりヌセルト数は増大するが、摩擦損失も増大する

13

実験条件：銅細線直径の相違

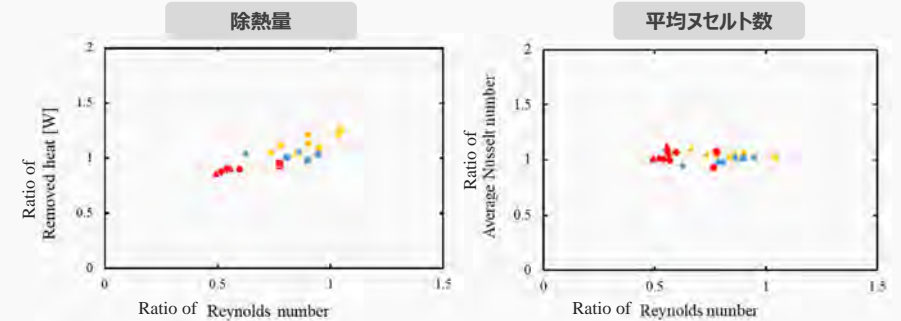
加熱条件（熱流束一定）：43 W 加熱面最高温度 100 °C
 繊維状多孔性材料：銅細線（純度99.9%）
 銅細線充填条件：空隙率一定

空隙率 ε	銅線直径 [mm]	銅線長さ[m]	銅線表面積 [m ²]
1.00	—	—	—
0.999	0.5	7.64	0.012
0.998		15.23	0.024
0.997		22.92	0.036
0.996		30.56	0.048
0.999	1.0	1.92	0.006
0.998		3.84	0.012
0.997		5.76	0.018
0.996		7.68	0.024
0.999	1.5	0.85	0.004
0.998		1.70	0.008
0.997		2.55	0.012
0.996		3.40	0.016

14

実験結果：除熱量及びヌセルト数

銅細線直径：赤：Φ0.5 mm 青：Φ1.0 mm 橙：Φ1.5 mm
 空隙率：◆0.996 ▲0.997 ●0.998 ■0.999



- Φ1.5 mmの条件では、ほとんどの条件で空隙率1.00の条件における除熱量を上回る
- Φ1.5 mmの条件では高いレイノルズ数で、空隙率1.00やΦ1.0 mmの条件よりヌセルト数は増大する
- 同じ空隙率で直径が異なる条件では、レイノルズ数はΦ1.5 mmの条件で最も大きくなる
- Φ1.5 mmの条件はΦ0.5 mmの条件よりもヌセルト数は減少する

銅細線の表面積を小さくし、摩擦損失を抑制することで
 伝熱性能を向上させることができる

15

実験条件：銅細線の表面積一定

銅細線の表面積を一定とした場合

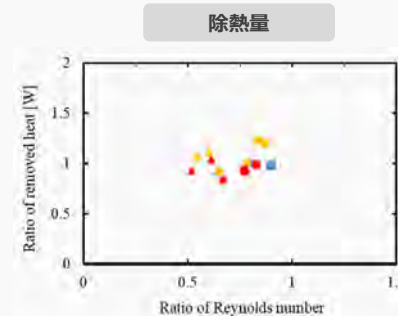
加熱条件（熱流束一定）：43 W , 加熱面最高温度 100 °C
 繊維状多孔性材料：銅細線（純度99.9%）
 銅細線充填条件：表面積一定

銅線表面積 [m ²]	銅線直径 [mm]	銅線長さ[m]	空隙率
1.00	—	—	—
0.006	0.5	3.82	0.9995
	1.0	1.92	0.999
	1.5	1.27	0.9985
0.012	0.5	7.64	0.999
	1.0	3.84	0.998
	1.5	2.54	0.997
0.018	0.5	11.47	0.9985
	1.0	5.76	0.997
	1.5	3.82	0.9955

16

実験結果：除熱量

銅細線直径：赤：Φ0.5 mm 青：Φ1.0 mm 橙：Φ1.5 mm
 表面積 [m²]：■0.006 ●0.012 ▲0.018



銅線表面積 [m ²]	レイノルズ数の平均値	標準偏差
0.006	746	39
0.012	655	67
0.018	506	47

- 銅細線を流路に挿入した時のレイノルズ数は空隙率ではなく、銅細線の表面積が同じ条件で近い値をとる
- 除熱量は表面積が0.006 m²の条件と0.018 m²の条件で大きな変化はみられない

銅細線の表面積の小さい条件では
 空気流速の減少を抑えながら除熱量を確保することができる

17