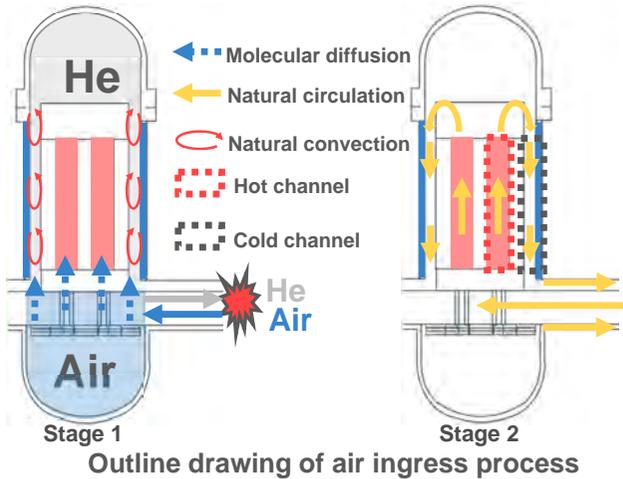


研究背景

GTHTR300Cの1次冷却系主配管破断事故時の空気浸入過程



Stage 1

- ◆ 対向置換流により炉内に空気が浸入する。
- ◆ 炉内は安定な密度成層が形成される。

Stage 2

- ◆ 炉内を一巡する自然循環流が発生する。
(炉心流路と環状流路間で十分な浮力が生じた時に生成される。)

2

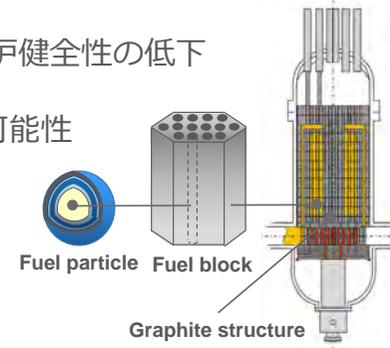
炉の安全性を向上させるために重要なこと
原子炉内に空気が浸入することにより生じる問題

問題点

燃料ブロックや黒鉛構造物の酸化による原子炉健全性の低下
燃料粒子の放射性物質閉じ込め機能への影響
COやH₂といった可燃性ガスの生成と爆発の可能性

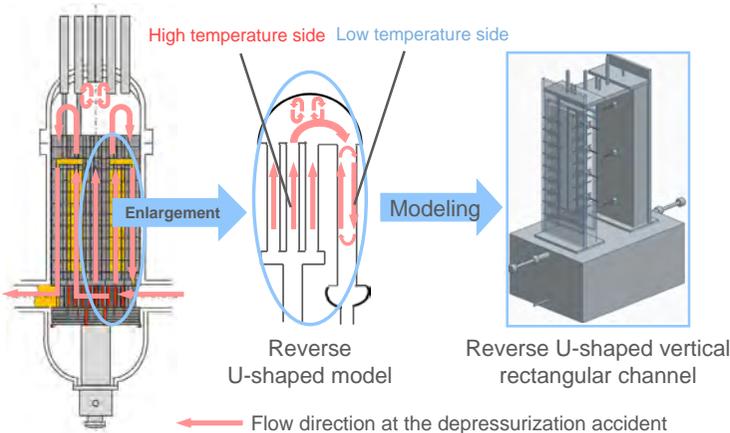
安全性向上のために重要なこと

炉内への空気浸入を防止・制御することが重要である。



3

1次冷却系主配管破断事故時の流路構成とそのモデル化 (逆U字型鉛直矩形流路)



高温側流路
高温プレナム，炉心等で構成される内側流路
低温側流路
炉心と圧力容器間の環状流路で構成される外側流路

両流路が原子炉圧力容器上部で接続され、**全体的に逆U字型流路を形成**

炉心と圧力容器間の環状流路を含む事故時の流路構成をモデル化

4

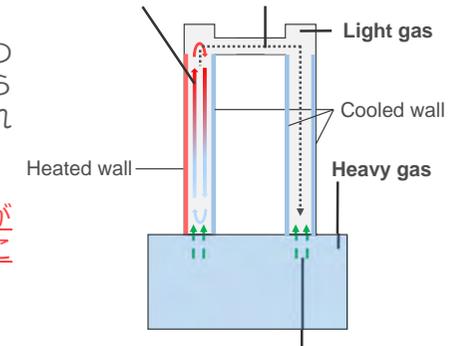
実験目的

実験目的

鉛直矩形流路の一方を加熱・冷却し，密度の小さい気体の自然対流を発生させ，下部から密度の大きい気体が分子拡散により輸送されるとき

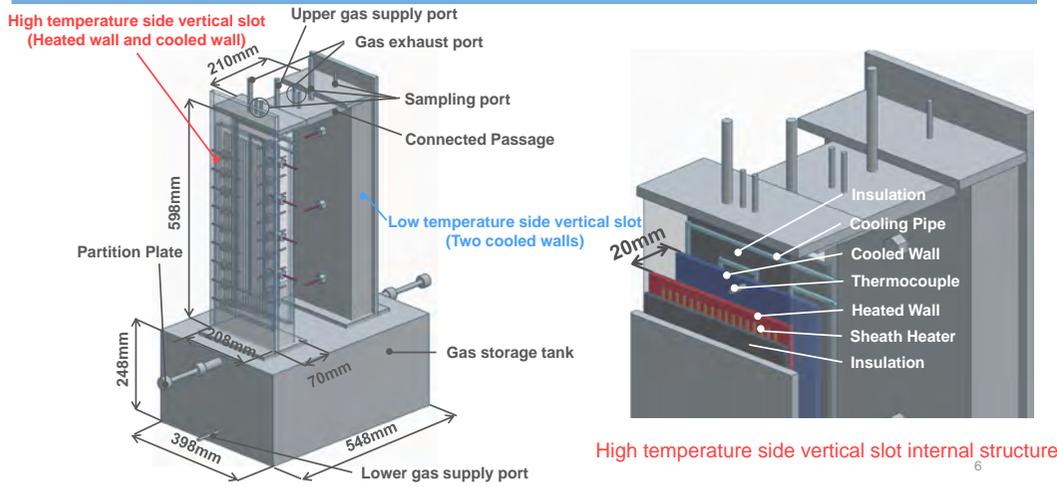
2成分気体の局所的な自然対流，分子拡散が自然循環流発生時間に及ぼす影響を調べることを目的としました。

Natural convection Natural circulation



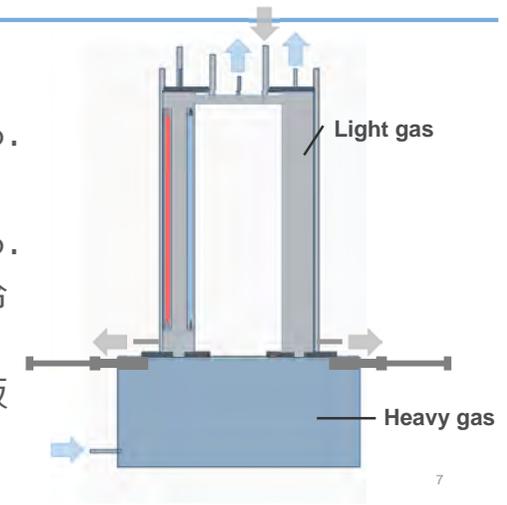
5

逆U字型鉛直矩形流路の実験装置



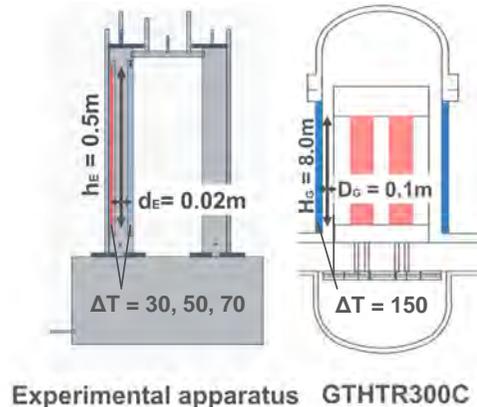
実験方法

1. 仕切り板を開く。
2. 密度の大きい気体を注入する。
3. 仕切り板を閉じる。
4. 密度の小さい気体を注入する。
5. 高温側スロット内の加熱，冷却をする。
6. 定常状態を確認後，仕切り板を開放し実験を開始する。



実験条件・加熱・冷却壁間の流路と原子炉の環状流路比較

実験条件		
2成分気体	密度比	加熱・冷却壁温度差
He-Air	1.38/10	$\Delta T = 30, 50, 70$ [K]
He-N ₂	1.43/10	
Ne-Ar	5/10	
N ₂ -Ar	7/10	
レイリー数範囲 ($\times 10^4$)		$0.0226 \leq Ra_{d_E} \leq 4.32$
装置の加熱・冷却壁間の流路と原子炉の環状流路比較		
	実験装置	GTHTR300C
高さ [m]	$h_E = 0.5$	$H_G = 8.0$
幅 [m]	$d_E = 0.02$	$D_G = 0.1$
アスペクト比	$h_E/d_E = 25$	$H_G/D_G = 80$
温度差 ΔT [K]	30, 50, 70	150*

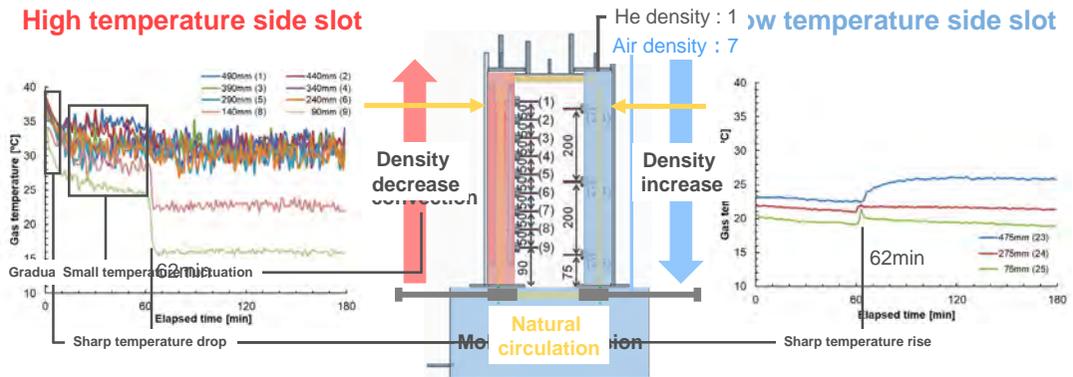


Experimental apparatus GTHTR300C

* : X. Yan, K. Kunitomi, T. Nakata, S. Shiozawa, "GTHTR300 design and development", Nuclear Engineering and Design 222, pp247-262, 2003

実験結果 (自然循環流発生までのメカニズム) 両鉛直スロット内気体温度の時間変化

He-Air 密度比 : 1.38/10 $\Delta T=70$ [K] Ra_{d_E} 数範囲 ($\times 10^4$) : 0.0590~2.63 最大温度変動幅 : 7.7°C

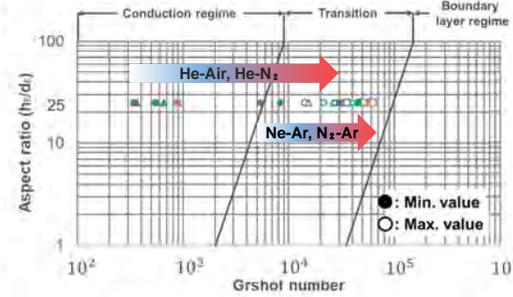
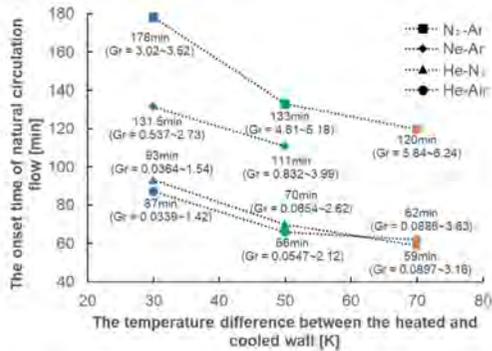
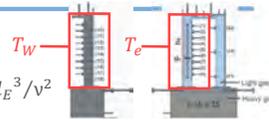


各2成分気体の自然循環流発生時間とGr数の関係

密度差の大きい2成分気体は密度差の小さい2成分気体と比較して、Gr数は小さいが、自然循環流発生時間は短くなった。

Gr数の定義式

$$Gr_{d_E} = g\beta(T_W - T_e)d_E^3/\nu^2$$



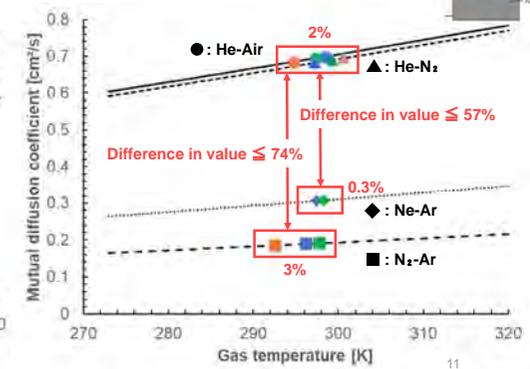
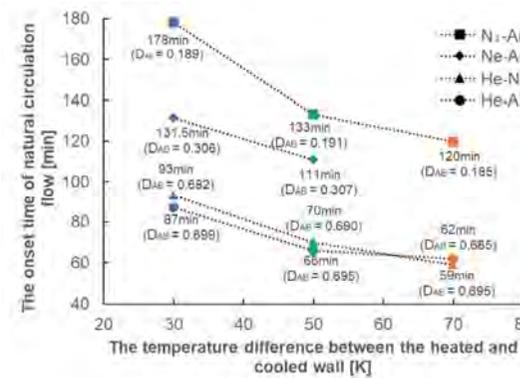
Min.: 仕切り板開放直前のGr数 (密度の小さい気体のみ)
Max.: 自然循環流発生直前のGr数 (2成分気体)

各2成分気体の自然循環流発生時間と相互拡散係数の関係

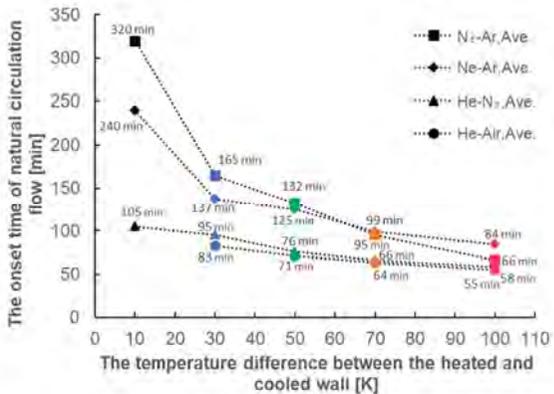
密度差の大きい2成分気体は密度差の小さい2成分気体と比較して、D_AB数は大きく、自然循環流発生時間は短くなった。

相互拡散係数算出式 (D_AB)

$$D_{AB} = 1.858 \times 10^{-7} \times T^{3/2} \frac{(M_A + M_B)(M_A M_B)^{1/2}}{P \sigma_{AB}^2 Q_D} \times 10^4$$



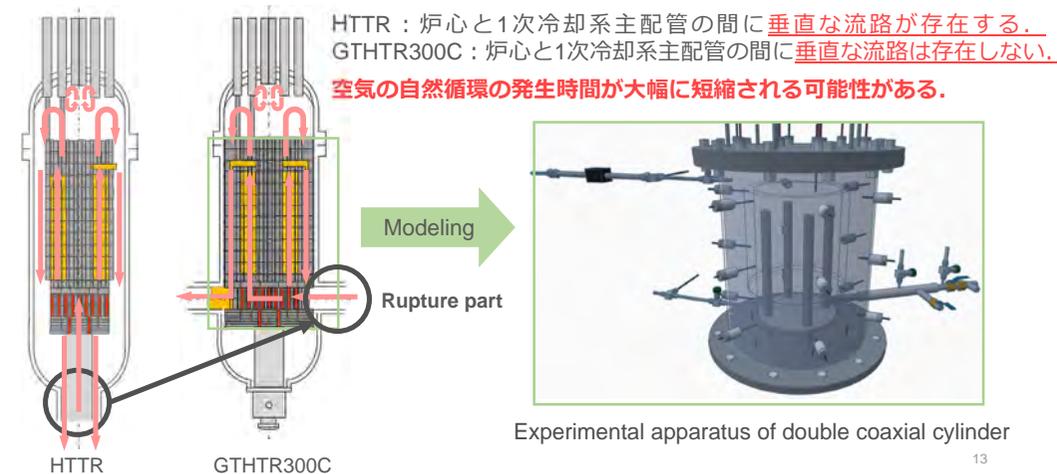
2成分気体の分子拡散と局所的な自然対流が自然循環流発生時間へ及ぼす影響



加熱・冷却壁間の温度差が増大すると、密度差の小さい2成分気体 (He-Air, He-N₂) と密度差の大きい2成分気体 (Ne-Ar, N₂-Ar) の自然循環流発生時間の差は減少した。

従って、自然循環流発生時間の短縮は加熱・冷却壁間の温度が低い場合、分子拡散による影響が大きいが、加熱・冷却壁間の温度差が増大すると、自然対流の影響が大きくなる。

1次冷却系主配管破断事故時の流路構成とそのモデル化 (水平二重管を含む二重円筒)



Experimental apparatus of double coaxial cylinder

・磯田 直幸, “炉内流体層内の気体混入過程に関する研究”, 山梨大学大学院工学部機械システム工学専攻平成22年度修士論文
・大野浩志, “炉内流体層内の気体混入過程に関する研究”, 山梨大学大学院工学部機械システム工学専攻平成24年度修士論文
・宇野寛史, “高炉炉内1次冷却系主配管破断事故時の空気混入に関する研究”, 山梨大学大学院工学部機械システム工学専攻平成27年度修士論文
・田中裕夫, “異種気体による自然循環流の制御に関する研究”, 山梨大学大学院工学部機械システム工学専攻平成29年度修士論文

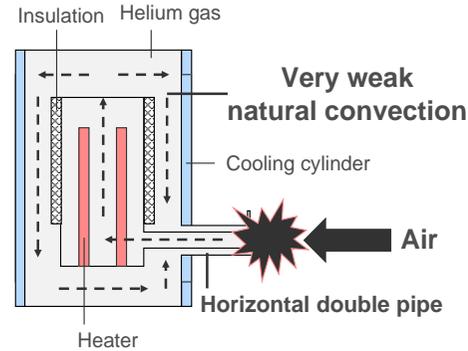
実験目的

実験目的

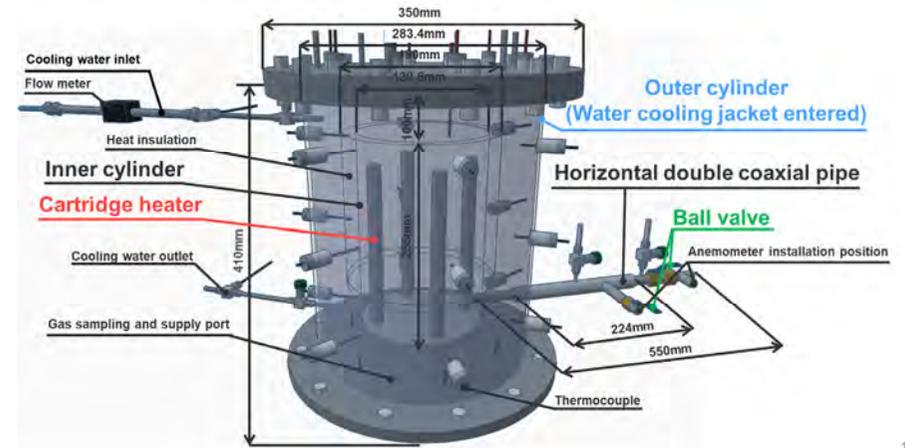
水平二重管破断事故時の炉内流路を模擬した実験装置を用い、

1. 不安定または安定な密度成層下での密度の異なる気体浸入過程
2. 分子拡散と自然対流、又は微弱な自然循環流が重畳する場合の気体混合挙動

について調べた。

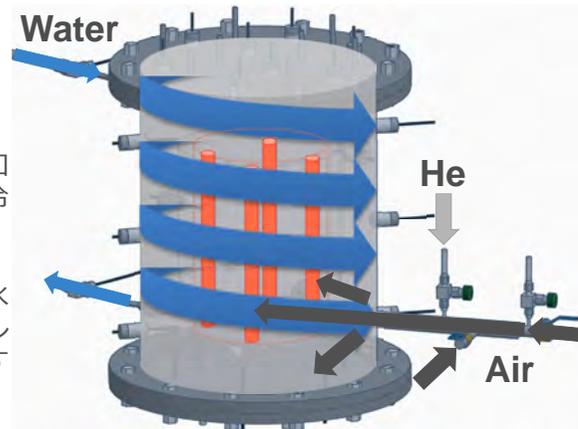


同軸二重円筒の実験装置



実験方法

1. 装置内を真空置換する。
2. 装置内にHeガスを注入する。
3. ヒーターを起動し内側円筒内を加熱，冷却水を注入し外側円筒を冷却する。
4. ヒーターの定常状態を確認後，水平二重管の内管・環状流路のバルブを同時に開放し，実験を開始する。



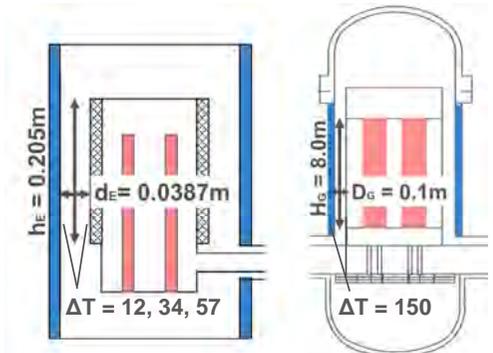
実験条件・装置と原子炉の環状流路比較

実験条件

2成分気体	密度比	ヒーターの熱入力
He-Air	1.38/10	36W, 144W, 324W
レイリー数範囲 ($\times 10^4$)		$0.014 \leq Ra_{d_E} \leq 10.5$

装置と原子炉の環状流路比較

	実験装置	GTHT300C
高さ [m]	$h_E = 0.205$	$H_G = 8.0$
幅 [m]	$d_E = 0.0387$	$D_G = 0.1$
アスペクト比	$h_E/d_E = 5.3$	$H_G/D_G = 80$
温度差 ΔT [K]	12, 34, 57	150*

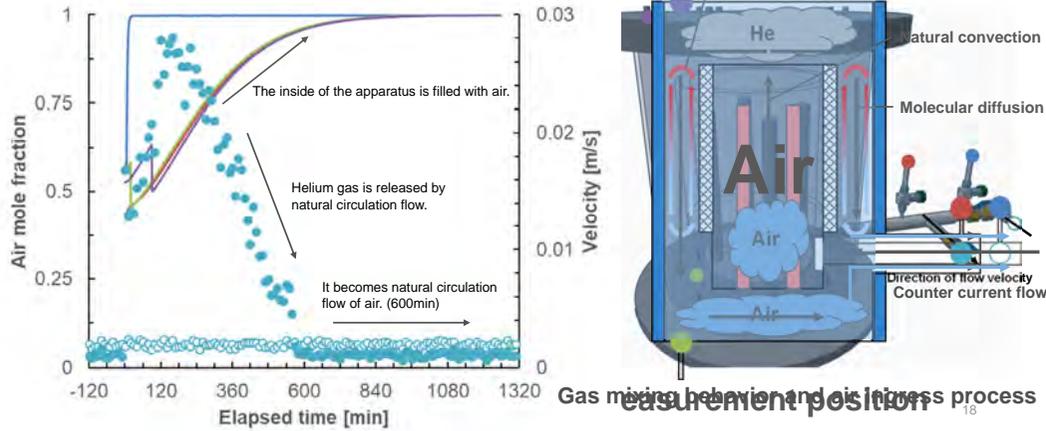


Experimental apparatus GTHT300C

* : X. Yan, K. Kunitomi, T. Nakata, S. Shiozawa, "GTHT300 design and development", Nuclear Engineering and Design 222, pp247-262, 2003

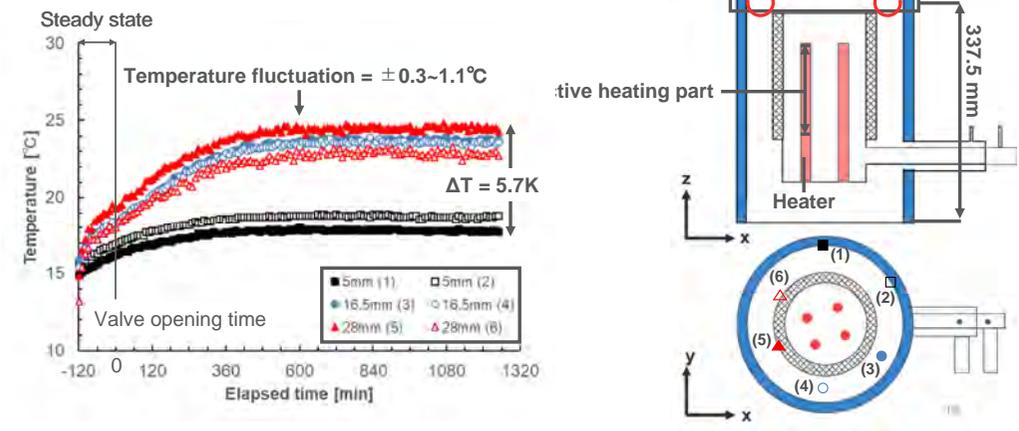
実験結果（自然循環流発生までのメカニズム） 装置内の空気モル分率・水平二重管出入口部流速の時間変化

実験条件：熱入力36W，冷却水流量一定

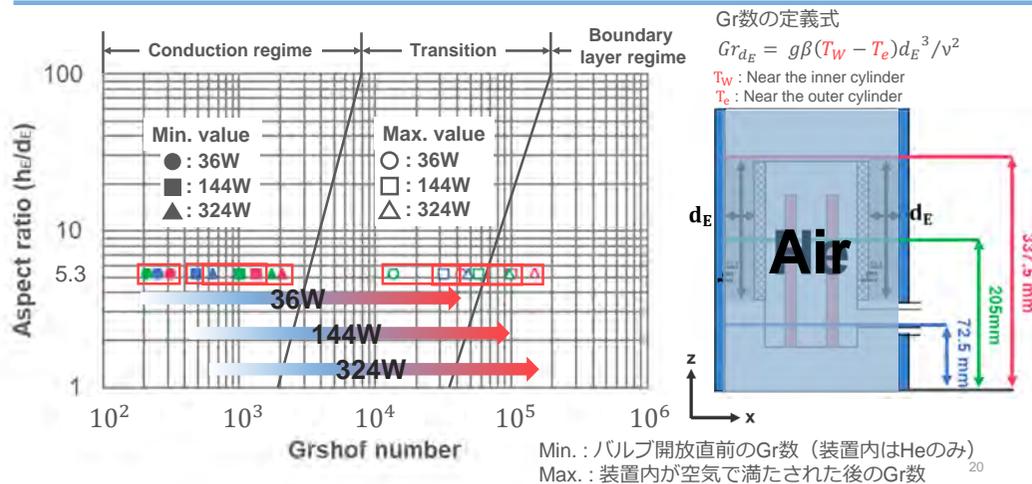


実験結果（装置内の気体温度の時間変化）

実験条件：熱入力36W，冷却水流量一定， Ra_{d_E} 数範囲 ($\times 10^4$) : 0.021~3.05

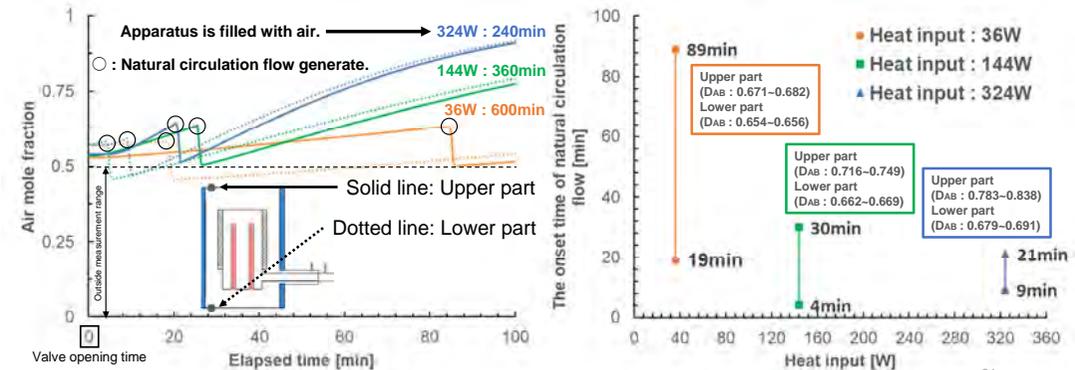


各熱入力・測定箇所における対流の流動領域変化



各熱入力における自然循環流発生時間の変化

熱入力が増大するに従い，内側円筒内と環状流路間で生じる気体密度差の増大が加速し，自然循環流発生時間と装置内が空気で満たされた時間も短くなった。



結論

逆U字型鉛直矩形流路の2成分気体混合過程に関する実験

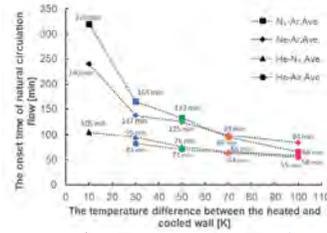
1. 分子拡散と局所的な自然対流が重畳して発生すると、自然循環流発生時間を短縮させる。
2. 壁間温度差：小⇒2成分気体の混合は分子拡散の影響大
壁間温度差：大⇒2成分気体の混合は局所的な自然対流の影響増加

加熱・冷却壁間の温度差が増大するほど、各2成分気体の自然循環流発生時間の差は縮まる。

高温ガス炉の配管破断事故時の空気浸入過程を予測する際には、各構造物の温度分布や温度変化が分子拡散と自然対流、自然循環流による気体浸入過程に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

D_{AB}	He-Air > He-N ₂ > Ne-Ar > N ₂ -Ar
Gr	He-Air < He-N ₂ < Ne-Ar < N ₂ -Ar

大 ← 自然循環流発生時間の差 → 小



小 ← 加熱・冷却壁間の温度差 → 大

結論

水平二重管破断時の気体混合挙動と空気浸入過程に関する実験

Stage 1

- 水平二重管内に対向置換換流が発生
- Heガスが放出・空気が浸入
- 装置内に安定密度成層が形成
- 水平二重管内管から内側円筒容器内に空気が浸入

Stage 2

- 内側円筒容器内で対流が発生
 - 装置上部のHeガスは下部に拡散
 - 環状流路で局所的な自然対流が発生
- 自然循環流生成
- VHTRの永久反射体と圧力容器間で発生する現象と定性的に同じである。

装置内は空気で満たされる。

装置内で生じている複雑な流れの詳細を明らかにするために、モル分率・流速測定点を増やす可視化実験を行う、数値解析を行う必要がある。

