

電力中央研究所 正員 ○守屋洋一 田中伸和 片野尚明

1. はじめに タンク型高速増殖炉の原子炉停止時に発生する温度成層化現象は、炉壁等に強い熱応力、および熱疲労を発生させる恐れがあるため、設計上の大きな検討課題となっている。本研究では、タンク型炉を単純に模擬した円筒容器を用いて熱流動実験を行ない、主容器内で生ずる温度成層化現象に反ばす、レイノルズ(Re)数、およびリチャードソン(Ri)数の効果について、検討を行なったものである。

2. 実験装置、および実験条件 実験装置は、実験水槽、温・冷水循環ループ、および流量制御システムより構成されている。(詳細は文献¹⁾を参照)実験領域は、図1に示したように、直径80cmの円筒容器になっており、炉心上部構造物(UIS)を模擬した直径20cmの内筒、UIS下面からの噴出口、および中間熱交換器(IHX)の吸い込み口を模擬した幅2.5cmのスリット状吸い込み口が設けられている。

実験の定格運転時においては、炉心から噴出された高温の冷却材は、UIS底部に衝突した後、主容器内に放射状に噴出され、円筒容器内で十分混合した後、IHXへ吸い込まれる。ところが、原子炉停止時には、炉心出力が低下するために、低温の冷却材が高温流体で満たされている主容器内に噴出され、温度成層化現象が発生する恐れがある。このような成層化現象は、主容器の形状が相似であれば、Re、およびRi数に依存している。ここで、 $Re = UD/\nu$ 、 $Ri = \epsilon g D / U^2$ 、U:炉心出口での断面平均流速、D:UIS直径、 ν :動粘性係数、 $\epsilon = (\rho_c - \rho_h) / \rho_c$:相対密度差、g:重力加速度、 ρ_c 、 ρ_h :冷・温水の密度である。そのため実験は、Re数、およびRi数の効果をそれぞれ検討できるようにCase A, Bに分けて行なった。ここで、Case A(表1): $Ri \approx 4$ の条件下で、Re数を6000~20000の範囲で6種類変化させ、Re数の効果を検討する。Case B(表2): 十分大きなRe数の条件下で、Ri数を0.5~16の範囲で8種類変化させて、Ri数の効果を検討する。なお、実験は温度過渡のみを与え、その間の流量は一定として行なった。

3. 実験結果と考察

(a) Re数の効果(Case A): 図2は、UIS側面中位部における無次元温度 T^* と無次元時間 τ^* との関係を示している。ここで、 $T^* = 100 \times (T - T_c) / (T_h - T_c)$ 、 $\tau^* = Ut/D$ 、T:計測点温度、 T_c : T_h :冷・温水温度、 τ :実験時間である。Re数の大きなRun A3、A6にみられる周期的な温度変動は、成層界面が主容器直径スケールの波長をもった波動を起こすため生じるものであり、この波動は一般に内部スロッシングと呼ばれている。ところが、Re数が小さいRun A1の場合には内部スロッシングは発生していないことがわかる。

図3は成層界面の無次元高さ z^* と無次元時間 τ^* との関係を示している。成層界面の上昇は、その上昇機構より、混合、遷移、および連行領域の3領域

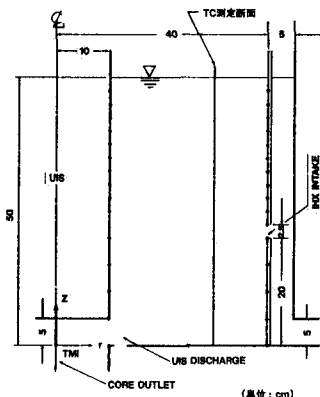


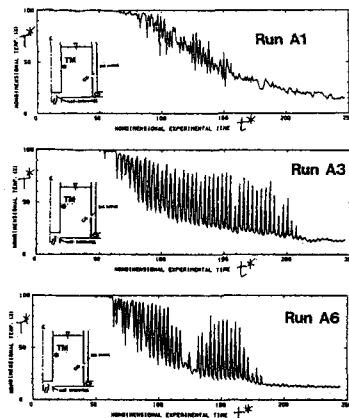
図1. 実験水槽

表1. 実験条件 (Case A)

	O (1/s)	Th (°C)	Tc (°C)	Ri	Re (10 ³)
A 1	1.03	22.5	8.3	3.8	6.7
A 2	1.30	31.4	16.3	4.1	8.3
A 3	1.56	30.8	7.5	3.8	9.9
A 4	2.10	42.4	8.2	4.1	13.3
A 5	2.79	51.5	9.4	3.5	17.8
A 6	3.01	61.6	9.9	3.7	19.2

表2. 実験条件 (Case B)

	O (1/s)	Th (°C)	Tc (°C)	Ri	Re (10 ³)
B 1	4.02	30.1	9.4	0.5	25.6
B 2	2.91	33.5	12.0	1.1	18.5
B 3	1.99	29.9	8.3	2.0	12.7
B 4	2.10	42.4	8.2	4.1	13.3
B 5	2.07	47.8	9.3	4.7	13.2
B 6	1.86	51.6	7.6	6.3	12.5
B 7	1.95	59.5	10.0	8.3	12.7
B 8	1.56	61.7	9.4	13.8	9.9

図2. 無次元温度 T^* と無次元時間 τ^* との関係 (UIS側面中位部)

に分類できる。連行領域では、冷水が温水を連行するために界面は上昇し、この時の勾配、すなわち界面の無次元上昇速度 dz^*/dt^* はほぼ一定となる。ここで、混合、連行領域のデータより求められる直線の交点を、折れ曲り点、 (t_t^*, Z_t^*) と定義すると、連行領域での界面の高さは図中の式(1)で表わされる。

図4は、 dz^*/dt^* と Re 数との関係を示している。 dz^*/dt^* の値は $Re \approx 10000$ で一定値に漸近し、 $Re > 10000$ では Re 数に依存していないことがわかる。

(b). Ri 数の効果 (Case B): 実験は Case A の結果より、 Re 数が約 10000 以上になるようにして行なった。したがって、ここで得られた結果には、 Re 数の影響は含まれていない。

図5は、成層界面上昇特性量である dz^*/dt^* 、 Z_t^* 、 t_t^* と Ri 数との関係を示したものである。ここで、 Z_t^* は IHX 吸い込み口上端から界面、および水面までの高さの比であり、 $Z_t^* = (Z_t^* - Z_i^*) / (1 - Z_i^*)$ 、 $Z_i^* = Z_i / H$ 、 Z_i : スリット状吸い込み口上端高さ、 H : 全水深で表わされる。 Z_t^* の替わりに Z_i^* を用いることにより、 Z_i の違いの影響を減らすことができる。図より、 $dz^*/dt^* \propto Ri^{-1/2}$ および $t_t^* \propto Ri^{-1/2}$ なる関係があることがわかる。図中には、Vidilらの実験結果を再整理し、プロットしてある。Vidilらの結果は、勾配に関しては本実験結果と同様であるが、全体的に大きな値になっている。これは、容器形状の相違による影響と考えられる。

写真1は、内部スロッシング発生時の界面形状を示している。この内部スロッシングの無次元周期 τ^* と Ri 数との関係を図6に示す。ここで、 $\tau^* = U \tau / D$ 、 τ : 周期、である。 $Ri < 1$ の場合には、界面は非常に乱れ小規模の内部波が卓越するため、また $Ri > 5$ の場合には、界面が非常に安定化するために、内部スロッシング現象は発生しない。したがって、本実験で用いた容器形状に関しては $1 < Ri < 5$ のとき内部スロッシング現象が生じ、 τ^* は Ri 数の約一乗に比例して変化することがわかる。

4. まとめ 炉内熱流動現象に及ぼす、 Re 、 Ri 数の影響について、実験的に検討を行なった。

その結果、熱流動現象は $Re > 10000$ では、 Re 数に関係しないこと、および、成層界面上昇特性量内部スロッシング周期は Ri 数のべき乗に比例することがわかった。

参考文献 1). 田中、守屋、片野、和田、水講、1983 2). Vidil et. al. ANS Topical meeting 1980

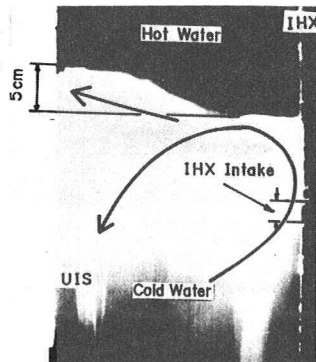


写真1. 内部スロッシング発生時の界面形状

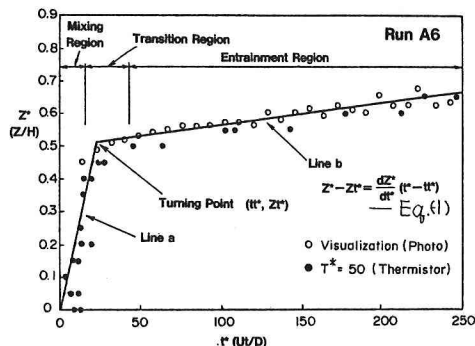


図3. 成層界面上昇速度 Z^* と無次元時間 t^* との関係

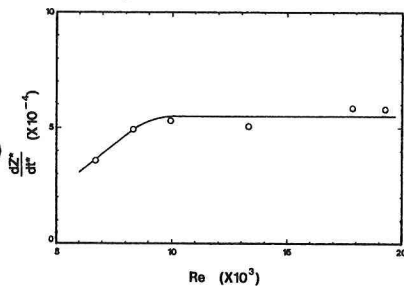


図4. 界面上昇速度 dz^*/dt^* と Re 数との関係

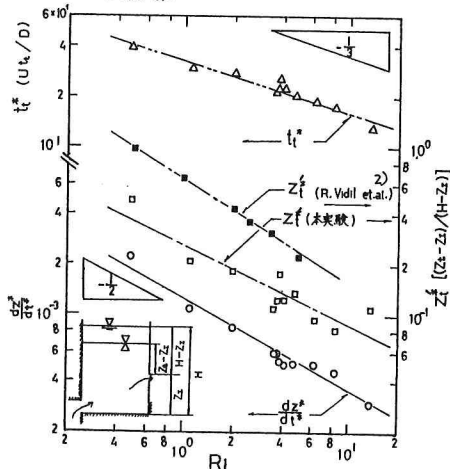


図5. 界面上昇特性量 (dz^*/dt^* , t_t^* , Z_t^*) と Ri 数との関係

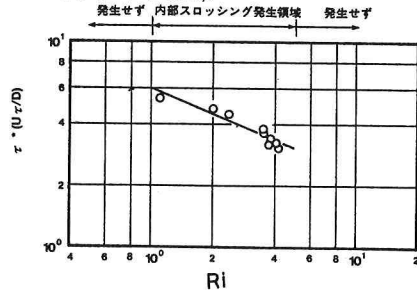


図6. 内部スロッシングの無次元周期 τ^* と Ri 数との関係