

円筒容器内での流況と温度成層化に関する研究
Flow Patterns and Thermal Stratifications in Cylindrical Plenum

財団法人 電力中央研究所 正 員 田 中 伸 和
財団法人 電力中央研究所 正 員 守 屋 祥 一
財団法人 電力中央研究所 正 員 片 野 尚 明
財団法人 電力中央研究所 正 員 和 田 明

1. は じ め に

現在運転されている軽水炉に続く次代の原子炉として注目されている高速増殖炉 (Fast Breeder Reactor ; 以下, FBR と呼ぶ) においては, 冷却材 (炉内の熱輸送媒体) として液体ナトリウムが使われる。この液体ナトリウムの物性は, 表 1 に示すように, 密度や粘性といった物理的性質は水と同程度であるが, 伝導度や比熱といった熱的性質は大きく異なる。とくに, 熱拡散係数は水に比べ数百倍以上の高い値である。このような物性の違いにより, FBR では水を冷却材として使う軽水炉に比べ, 定常運転時や原子炉停止時に原子炉構造材に与える熱過渡条件が厳しくなることが予測される。

すなわち, 図 1 に示すように, タンク型の FBR においては, 炉心部で熱せられた冷却材 (約 500℃) は原子炉容器 (100万KWe 級では直径 20 m 以上) 内の上方にあるホットプレナム内で十分に混合された後, 中間熱交換器 (以下 IHX と呼ぶ) 内へ吸込まれ, そこで 2 次冷却系へ熱を伝達して低温 (約 350℃) となり, 下方にあるコールドプレナム内へ流入する。そこで混合されてからポンプで再び炉心部へ送られる。

このように, タンク型 FBR では原子炉容器内の各プレナムを介して冷却材が循環するという特徴を持っており, また IHX やポンプが炉心上部構造 (制御棒案内管や計装配線を保護し, 炉心出口冷却材の混合を促進する構造物, 以下, UIS と呼ぶ) の回りに配置されており, ホットプレナムやコールドプレナム内ではこれらの機器間を冷却材が複雑に流れることになる。したがって, それらの配置によっては, 定常運転時においても冷却材の局所対流, 停滞や流れの短絡等が生じる恐れがある。また, 原子炉を停止させた場合には, コールドプレナム内の低温の冷却材が直接ホットプレナム内に流れ込み, 場合によっては, 高温の冷却材が低温の上方に滞留し成層化することも予想される。

表 1. 水と液体ナトリウムとの物性比較

物 性 名	単 位	流 体		ナ ト リ ウ ム		水		備 考
		365℃	500℃	20℃	60℃	20℃	60℃	
密 度 ρ	g/cm^3	0.8645	0.8322	0.9982	0.9832	水より若干軽い		
	kg/m^3	864.5	832.2	998.2	983.2			
比 熱 C_p	$kcal/(kg \cdot ^\circ C)$	0.307	0.302	0.999	0.998	水の約 1/3 倍		
	$J/(kg \cdot ^\circ C)$	1285.3	1264.4	4182.6	4178.4			
粘 度 η	$kg/(m \cdot h)$	0.865	0.851	3.62	1.69	水の約 1/3 倍		
	$Pa \cdot s$	2.40×10^{-4}	2.78×10^{-4}	1.03×10^{-3}	0.48×10^{-3}			
動粘性係数 ν	m^2/h	0.94×10^{-3}	1.02×10^{-3}	0.37×10^{-2}	0.17×10^{-2}	水の約 1/2 倍		
	m^2/s	2.61×10^{-7}	2.83×10^{-7}	1.01×10^{-6}	0.48×10^{-6}			
熱伝導率 λ	$kcal/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$	63.07	57.47	0.518	0.562	水の 100 倍以上		
	$W/(m \cdot ^\circ C)$	73.35	68.84	0.602	0.654			
熱拡散係数 α	m^2/h	0.238	0.229	5.08×10^{-4}	5.72×10^{-4}	水の約 500 倍		
	m^2/s	6.6×10^{-5}	6.4×10^{-5}	1.4×10^{-7}	1.6×10^{-7}			
プラント数 Pr	無次元	0.051	0.046	7.09	3.02	水の約 1/1000		

(注) 下段は SI 単位系。

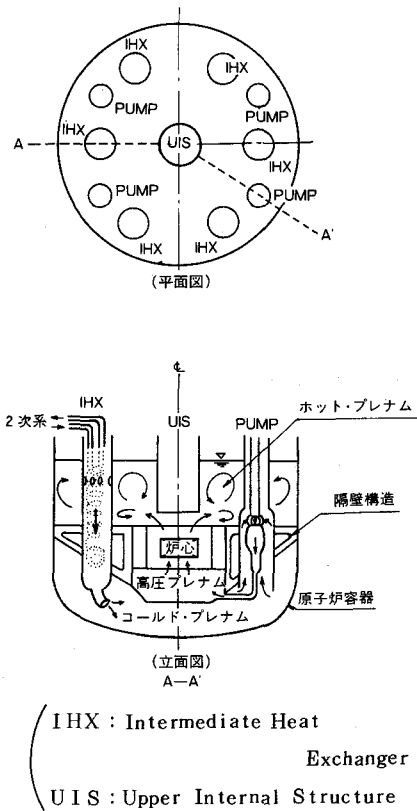


図 1. タンク型 FBR の原子炉概念図

そのため、ここでは、このような原子炉容器内での定常時の流況や熱過渡現象の基本的な特性を把握するため、円筒容器というきわめて単純な形体下で冷温水を用いた定常実験ならびに熱過渡実験を行ない、とくに、ホットブレナム内のU I Sからの冷却材噴出位置とI H Xへの吸込み位置がホットブレナム内の熱流動現象に及ぼす影響について基礎的検討を加えた。また、円筒2次元($r-z$)座標下での熱流動解析を行ない、計算手法の特性と適用性を評価するとともに、熱過渡実験時における流況変化の把握を行なった。

2. 実験装置の概略

実験装置は、図2に示すように、実験水槽、温水循環系統、冷水循環系統、および流量と温度の制御系統から成り立っている。すなわち、2ケの三方弁①、②を使って温水循環系統から冷水循環系統へ切り換えることによって、実験水槽内へ流入する水の温度をきわめて短時間のうちに高温から低温へ変化させることができ、原子炉停止時の炉心出口温度変化を模擬できる。さらに、関数発生器と電動弁により、実験水槽内へ流入する流量を制御し、ポンプ停止時に生じるゆるやかな流量変化を任意の形で模擬できる。

また、実験水槽は、図3に示すように、幅、奥行、高さとも90 cmであり、可視化のため側面は透明ガラス張りになっている。なお、実験水槽内の4ヶ所のコーナー部には、透明アクリル製の $\frac{1}{4}$ 円弧状の構造物を挿入し、実験領域を直径90 cmの円筒形にしてある。さらに、円筒内部中央には、直径20 cmのU I S模型を取り付けてあり、炉心出口部を模擬した流入口から実験水槽へ流入した水はU I S模型内の仕切板に衝突し、その後、全周にわたる開度5 cmの出口部から放射状に円筒容器内へ噴出される。また、水槽の4側面には、I H Xの吸込み部を模擬した直径5 cmの円形吸込み口を設置しており、U I S模型から噴出された水はこの吸込み口から流出する。

この噴出位置と吸込み位置を取り換えることにより、円筒容器内への流入位置と流出位置をそれぞれ水深方向に変えることができる。なお、今回の実験では円筒容器内の水深を 50 cm とした。また、流量を変化させた場合においても、容器内の水位が変化しないよう、容器以外では自由水面を持たないよう他の系統すべてを密閉にしてある。

3. 実験条件

今回実施した実験ケースは、噴出位置を水深方向の下部、中間部、および上部とし、同様に吸込み位置も同じレベルの下部、中間部、および上部（図3に示す）とした9ケースのプレナム

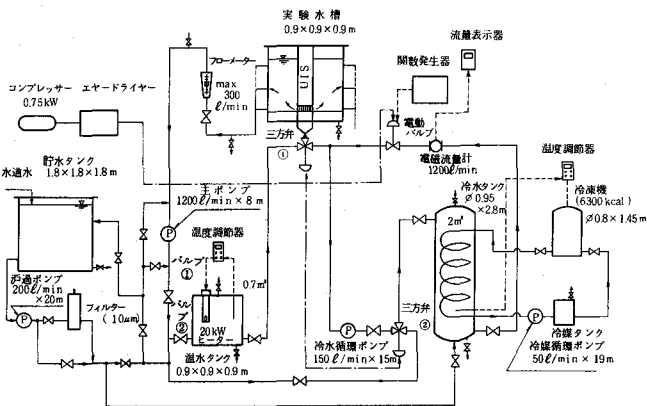
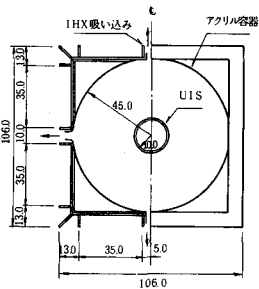
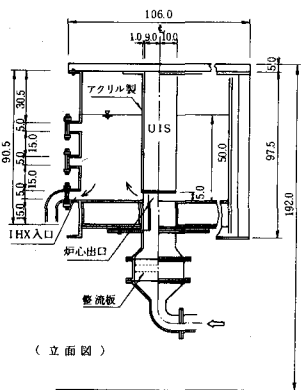


図2. 実験装置の系統図



(平面図)

(單位：元)



(立面图)

図 3. 実験水槽の概略図
(下部流入・下部流出)

型式に対して、定常および熱過渡実験を行なった。

定常実験は、実機の定常運転時の炉心出口部におけるフルード数 (Fr)

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot D}} \dots\dots\dots (1)$$

と一致するように、実験での炉心出口流量を 16 l/sec にして実施した。

また、熱過渡実験は、炉心出口部で定義したリチャードソン数 (Ri)

$$Ri = \frac{\epsilon \cdot g \cdot D}{U^2} \dots\dots\dots (2)$$

の値およびその時間変化を実機と一致させるよう配慮した。

ここで、 U は炉心出口部での平均流速、 g は重力加速度、 D は炉心出口部の直径、 $\epsilon = (\rho_c - \rho_h) / \rho_c$ であり、 ρ_c 、 ρ_h はそれぞれ炉心出口部での冷却材温度の時間変化で示される過渡後の最低および過渡前の最高温度における密度である。

さて、実験における炉心出口部の温度、流量、およびリチャードソン数の時間変化を図4に示す。すなわち、炉心出口温度は約2秒間で高温から低温へ遷移し、また流量は初期の 16 l/sec から約10秒間で約 4 l/sec に遷移する。なお、図中の破線は 16 l/sec の初期流量から冷水系に設置した電磁流量計 (EMF) から得られる冷水系流量曲線へつなぐようにして推定した流量を示す。また、温度差は約 50°C 、密度差は約 1.7% であり、炉心出口部でのリチャードソン数は約10秒間で0から2.4に遷移する。なお、実験は、各ブレンナム型式に対して図4の実験条件が満たされるように設定し、また熱過渡現象の再現性を確認するため、同一のブレンナム型式に対して同一実験条件下で最低2回の実験を行なった。

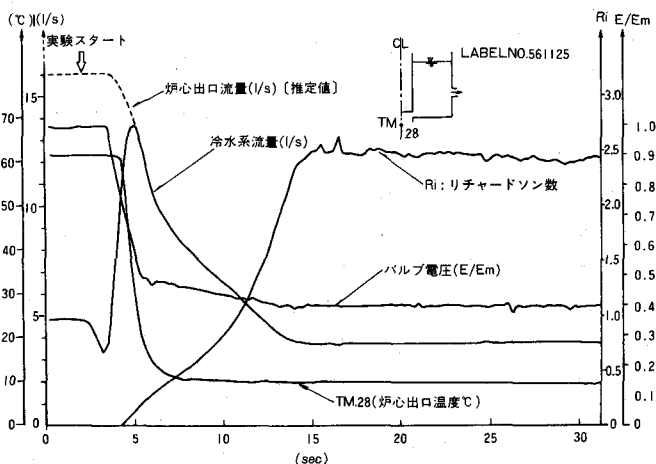


図4. 熱過渡実験における炉心出口過渡条件

4. 計 測 方 法

(1) 流速測定: ブレンナム内の流速測定は、小型プロベラ流速計 (プロベラ直径 5 mm)、超小型正逆プロベラ流速計 (プロベラ直径 3 mm) を用いて行なった。なお、ブレンナム内の流れは大小様々な渦から構成されているため、測定時間は主流方向が明瞭な測点では50秒間、渦が多発し流向が不安定な測点では250秒間とし、その間の時間平均より平均流速およびその分布を求めた。

(2) 流況の可視化: ブレンナム内の流況を可視化するために、水槽側面より時々刻々複雑に変化する流況の写真撮影を行なった。定常実験では、トレーサとして昇温中に生じる小さな気泡を用い、また照明としては幅 1 cm 、長さ 50 cm のスリット光を使用した。得られたネガよりブレンナム内各点での流向を読みとり、5枚以上の異なる流況写真より平均的な流向を求めた。さらに、熱過渡実験では、炉心下部より適時染料を注入し、温度成層界面の挙動を撮影した。これらの写真およびブレンナム内のサーミスターの示す温度変化より、成層界面の上昇変化を求めた。

(3) 温度測定: 熱過渡実験時のブレンナム内温度測定は、20個のサーミスター (時定数: 1.0 秒 、精度: $\pm 0.5^\circ\text{C}$) および6個の熱電対 (時定数: 0.03 秒 、精度: $\pm 1.6^\circ\text{C}$) を用いて実施した。サーミスターは精度が良かったためブレンナム内各点に固定し、主にブレンナム内の平均温度測定用に用いた。一方、熱電対は応答性が良かったため、温度成層界面の位置および界面での温度ゆらぎと温度勾配を測定するために用いており、実験中、成層界面の上昇に応じて 1 cm 毎に6本の熱電対を取り付けた支持棒の高さを変化させ、成層界面内における温度計測を行なった。

5. 実験結果とその考察

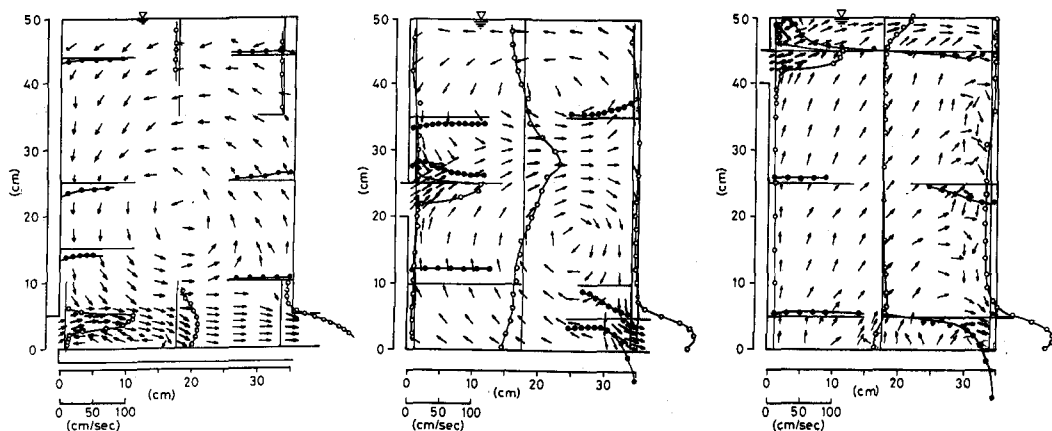
(1) 定常実験

図5は、流出位置を下部とし、流入位置を下部、中間部、および上部に変えたプレナム形式に対する定常時の平均流速分布と平均的な流向を示す。測定断面はU I S模型の中心軸と側壁にある1ヶの吸込み口の中央とで作られる断面である。

すなわち、下部流入の場合(a)では、炉心出口から噴出した水はU I S模型の底部に衝突した後、U I S下部の5 cmの高さをもつ噴出口から水平方向やや上向き放射状にプレナム内へ流入する。そのため、噴出口での水平方向流速は非常にとがった鉛直分布を示し、最大流速は噴出口上端に生じている。噴出直後の流れはその後しだいに下方向きを変化させ、やがてプレナム底面に沿って流れ、吸込み口に達し、一部はそこから流出する。このとき、残りの流体はプレナム側壁に衝突した後、側壁に沿って上昇し、プレナム中央付近に中心をもった大きな循環流を形成する。この循環流は大小様々な渦によって形成され、絶えず複雑に変化する流況を示すが、平均的には吸込み位置にはあまり関係せず、プレナム全体に及ぶ1ヶの大きな渦である。また、噴出口に近いプレナム底面付近には噴出水によって作られたはく離渦が形成され、比較的高流速の逆流域が生じている。このはく離渦は下部流入型式の特徴であり、吸込み高さが中間部および上部の場合に対してもみられた。なお、プレナム水深を上げた場合には、コアンダー効果により底面に沿って流れるような現象は消滅し、主流が直接プレナム側壁にぶつかる流れとなった。

一方、中間部流入の場合(b)には、噴出口から水平方向やや上向き放射状にプレナム内へ噴出した水は、斜め上方の向きで直接プレナム側壁に衝突し、そこから上、下方に分離され、回転方向の異なる明瞭な循環流をプレナム内上、下方に形成する。なお、この場合も下部流入の場合と同様、プレナム内に形成される平均的な流況には吸込み位置の違いによる影響はみられなかった。

さらに、上部流入の場合(c)には、噴出口からの水は高速のまま直接水面に衝突するため、そこで激しく水面を攪拌し、それによって大きな気泡が多数水中へ連行される。実機のF B Rでは、このような気体の連行は炉心の安全上重要な問題となりうるので、極力避ける必要があろう。また、上部流入では、全般に、プレナム底面から水面へ向う上昇流が広範囲に発生しているように見える。そのため、プレナム側壁に沿った下降流と底面からの上昇流によってその境界で多くのせん断渦が観察された。この場合も、プレナム内に形成される平均的な流況は吸込み位置の違いにより影響されにくかった。



(a) 下部流入・下部流出

(b) 中間部流入・下部流出

(c) 上部流入・下部流出

図5. 定常実験における平均流速分布およびフローパターン

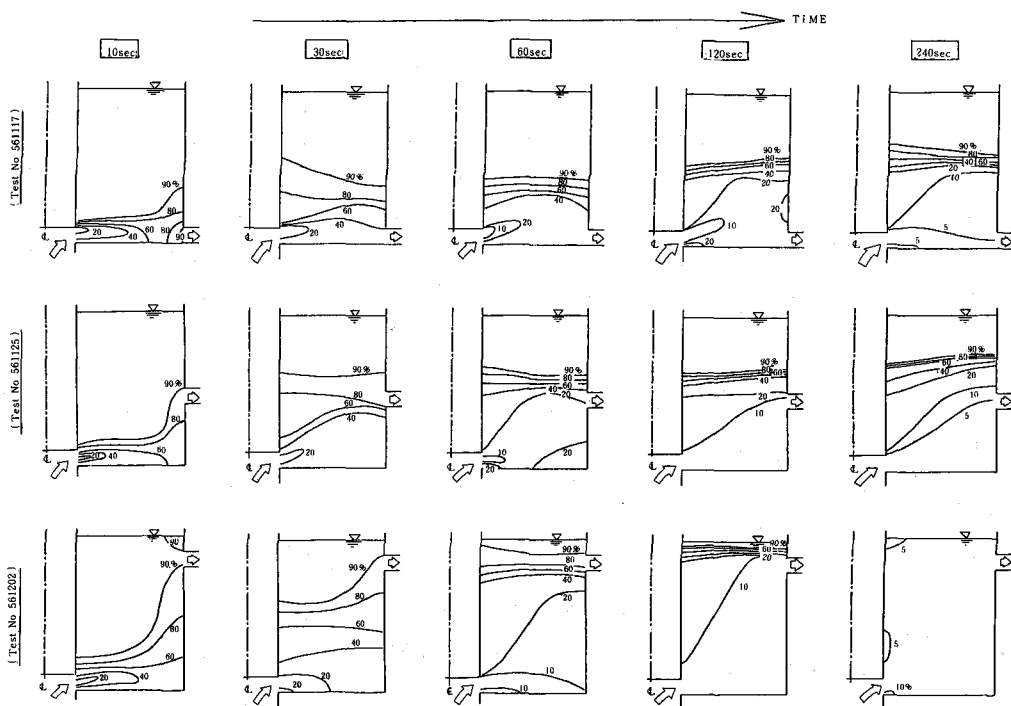


図6. 熱過渡実験における温度分布変化（下部流入の場合）

(2) 熱過渡実験

下部流入型式における過渡後10, 30, 60, 120, 240秒のプレナム内温度分布を吸込み位置が上部, 中間部および下部に対して図6に示す。なお, 時間は実験時間であり, 温度は炉心出口部の最高と最低温度で無次元化した温度を%で表示してある。

その結果, 冷水は初め定常時の流況に従いプレナム底部に沿って流れ, プレナム側壁の下方にぶつかり, その後側壁に沿って上昇するが, 約30秒以降から冷水の上方に徐々に温水が成層化しはじめ, 60秒後には顕著な温度成層界面が形成される。なお, その形成位置は吸込み位置が下部から中間部, 上部となるに従い高位置となっている。さらに, 240秒後には吸込み位置が下部および中間部の場合には成層界面が残存しているが, 上部吸込みの場合には消滅してしまっている。

また, 中間部流入の場合にも同様に成層界面の形成がみられたが, 上部流入の場合にはプレナム内の熱的混合が良好でこのような界面の形成はみられなかった。

とくに, 顕著な成層界面がプレナム水深の中段に形成され, それらが長時間継続する場合（下部流入で下部あるいは中間部流出の形式）, 成層界面近くのサーミスターの温度記録から図7に示すような周期の長い（6～8秒）激しい振動が長時間みられた。

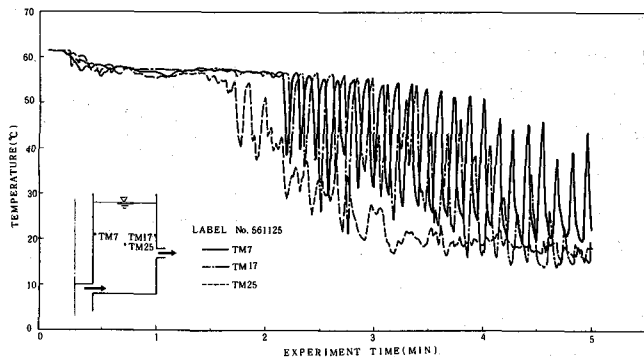


図7. 温度成層界の変動に伴う温度振動

この振動では、UIS側壁面上とプレナム側壁面上に設置したサーミスター（TM7およびTM17）の示す温度変動の振幅は大きく、それらの振幅の位相はほぼ半周期ずれていた。また、その中間位置のサーミスター（TM25）の振幅は比較的小さいものであった。そのため、水槽側面からの観察から、このような温度振動は、1次モードの成層界面のスロッピング（重複波）現象（最大振幅、約5cm）に帰因するものであることがわかる。このような現象が実機で生じれば、原子炉構造材にきわめて大きな温度差を持つ低サイクル熱過渡を与えるものになる。なお、このような現象はリチャードソン数 (2) 式によって支配されるようであり、現在このことに関し、同一プレナム型式に対して実験条件を変えて検討を行なっている。

最後に、成層界面が形成される下部および中間部流入型式に対して、ほぼ成層界面が形成されてしまう過渡後100秒前後での成層界面での鉛直方向温度分布を図8に示す。また、図9には同じく成層界面の形成される位置の時間的な変化を示す。

図8より、界面では冷温水の激しい混合のため多少の温度の高低はみられるが、かなり急峻な鉛直方向の温度分布をもつ成層界面の存在が認められ、界面は徐々に上昇していく様子がわかる。また、図9より、成層界面の上昇および形成位置は吸込み位置に依存しているようである。とくに、下部流入の場合、上部吸込みでは急速に界面が上昇することがわかる。なお、これらの上昇速度についてもリチャードソン数に大きく依存するものと思われ、現在その検討を行なっている。

5. 熱流動解析

図8および9に円筒2次元座標下で行なった熱流動解析から得られた結果を示してあるが、成層界面の形成位置やそこでの温度勾配についてはあまりよい一致はみられなかった。しかし、ここでは示していないが、全般的な流況や温度分布についてはかなりよい一致がみられた。

6. む す び

以上述べたように、原子炉容器内での流動現象についても、ここで述べたように古くから水理学で取り扱われてきた問題が多く含まれており、今後はさらに現象の解明を行なっていく予定である。

なお、本研究は電中研における「タンク型FBRフィージビリティ・スタディ」の一環として三菱との共同研究で実施したものであり、解析は三菱原子力工業㈱が行なったことを付記する。

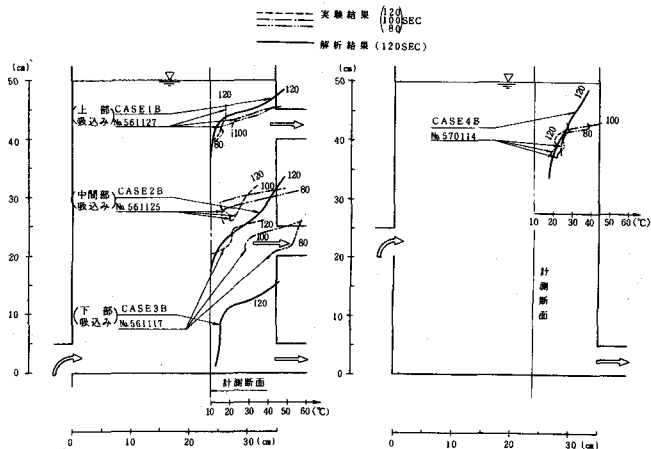


図8. 成層界面での鉛直方向温度分布

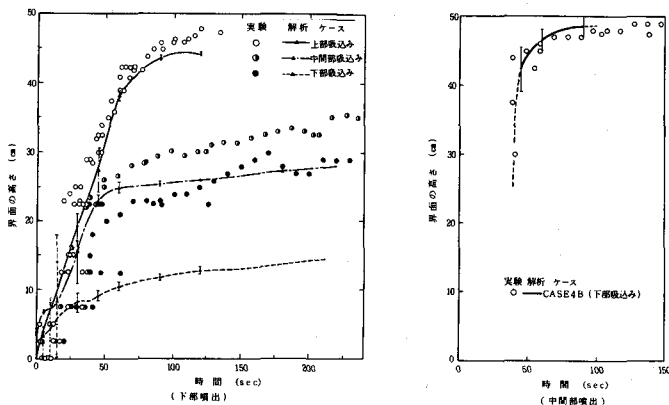


図9. 成層界面形成位置の時間変化