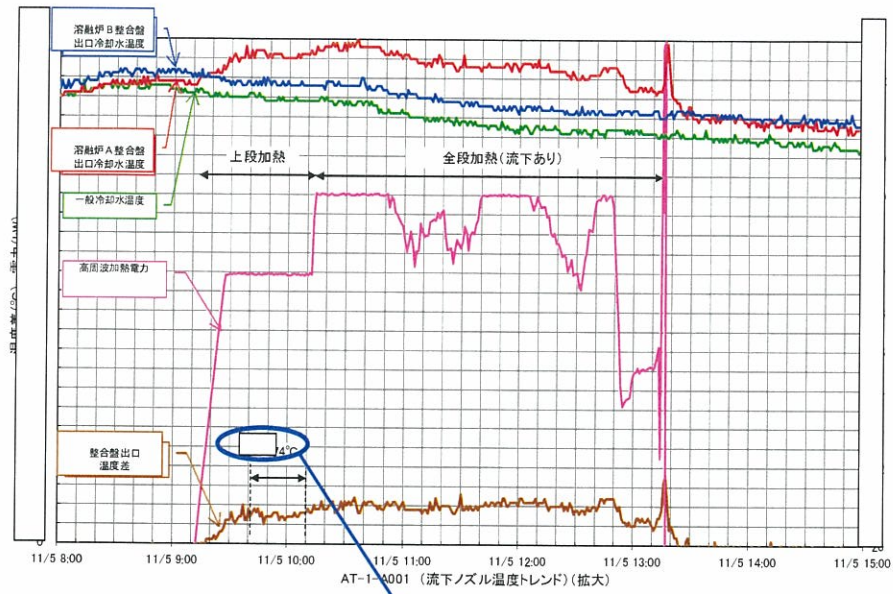


「流下ノズルの温度が低い」に対する要因分析図

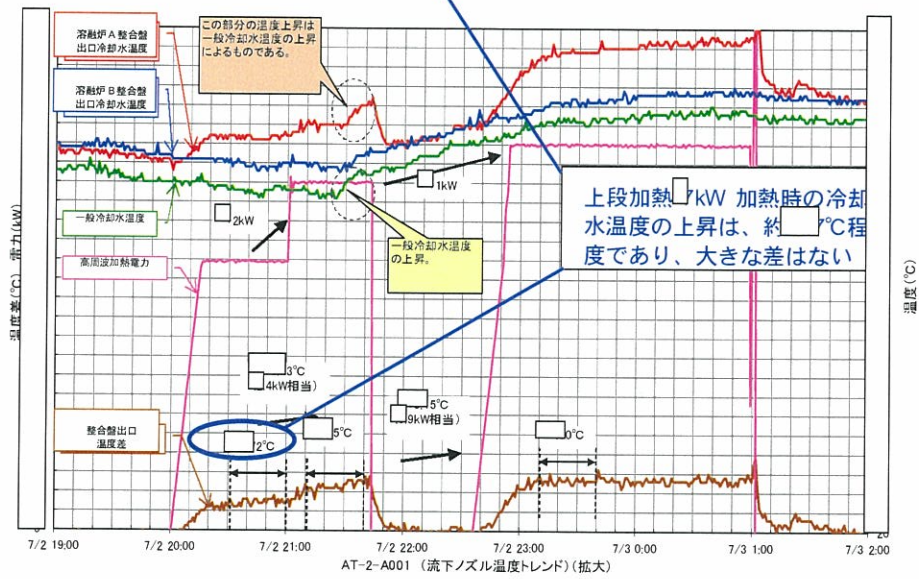
添付資料-18

事実	要因1	要因2	要因3	調査データ				調査	評価				
				ATデータ	コールド試験データ	観察	分析			解析	試験		
添付資料-12※ 流下ガラスの温度が低い。 (流下ノズル温度計の温度が低い)	流下ノズル加熱量の低下	高周波加熱能力の低下	高周波電源印加不調	○	○			○	・高周波加熱時のオシロスコープにより出力波形を測定し、電圧値が健全であることを確認している。(添付資料-18 図-1) ・高周波加熱時の制御盤冷却水の温度変化にも過去試験と大きな相違がない。(添付資料-18 図-2)	・要因とは考えられない	×		
			短絡等のバスの発生	○				○	・高周波加熱時のインピーダンスの値は、前回の試験とほぼ同程度の値である。(添付資料-18 表-1) ・絶縁抵抗測定を行った結果、前回(H19.2.19)の測定値 □Ωと同等の □MΩであり、有意な劣化はなかった。(添付資料-18 表-2)	・要因とは考えられない	×		
			ノズルの偏芯				○	○	○	・ノズルの偏芯がある場合においても、加熱能力が低下しないことを解析により確認している。(添付資料-18 図-3) ・実規模試験装置を用いた加熱試験により、流下ノズル偏芯は流下ノズルの加熱性に影響がなく、流下ノズル温度のバラツキもないことを確認した。(添付資料-18 図-4)	・要因とは考えられない	×	
			ノズル周りへの付着物				○	○	○	・流下ノズルと高周波加熱コイルの間に付着物があることを確認した。(添付資料-5(2/2)) ・付着物が付着してもインピーダンスの変化がない。(添付資料-18 表-1) ・ガラス等の付着物による高周波加熱への影響を解析により評価した結果、ノズル加熱には影響ないことを確認した。(添付資料-18 図-5)	・要因とは考えられない	×	
			監視制御盤出力指令が故障してあり、加熱されていない	○						○	・計測機器の出力命令通りの電力が現場の高周波電源盤にて出力されていた。(添付資料-18 図-1)	・要因とは考えられない	×
	流下ノズルの放射量の増加	底部電極の温度が低い	上段加熱時間が短い						○	・今回運転(AT-2-A001)の流下開始時の底部電極温度は□℃であり、前回A002~005パッチと同じであることから要因とは考えにくい。(添付資料-31)	・要因とは考えられない	×	
									○	・前回運転のパッチ(AT-1-A001)と今回運転(AT-2-A001)の上段加熱時間は1時間であり、変わりはない。(添付資料-31)	・要因とは考えられない	×	
		高周波加熱コイルへのふく射放射量の増加	高周波加熱コイルへの低粘性流体等の付着物					○	○	○	・化学試験終了後にコイル表面の光沢は失われており、さらに、今回の結合装置取り外し時には低粘性流体等の付着物が確認されていることから、化学試験終了時よりも高周波加熱コイルへのふく射放射量は増加していると考えられる。(添付資料-18 図-6) ・実際のふく射率は計測できないことから、数値流体解析によって高周波加熱コイル全体のふく射率の流下ノズル加熱性能への影響を評価した。 ・高周波加熱コイル表面のふく射率を0.1~0.5に変化させた感度解析を行った結果、ふく射率が増加すると流下ノズル下端外側の温度及び流下ノズル温度計温度が低くなることが判った。(添付資料-18 表-3)	・要因の一つと考えられる	△*
				結合装置内負圧の増加によるインリークエア量の増加(結合装置へのインリークエア量:増加)	○					○	・炉内圧力、結合装置内圧力は一定であったことから、要因ではない。(添付資料-12 図-2)	・要因とは考えられない	×
				結合装置内負圧制御弁開度が大きく、インリークエア量が増加	○					○	・アクティブ試験後とほぼ同程度の値であるが、アクティブ試験開始時に比べると大きい。(添付資料-12 図-3)MV値(弁開度)の流下ノズル冷却への影響を数値流体解析によって評価したが、影響は小さいことを確認した。(添付資料-18 表-6)	・要因とは考えられない	×
		流下ノズル上部の冷却空気量の増加(結合装置へのインリークエア量:一定)	結合装置内の付着物による空気流路の変化により、流下ノズル上部を冷却する空気量が増加					○		○	・高周波加熱コイル表面付近に付着物を確認した。(添付資料-5(2/2)) ・高周波加熱コイル表面付近付着物の影響を数値流体解析によって評価したが、付着物によって流路が変化し、流下ノズルを冷却する空気量が増加することによって、流下ノズル加熱性が低下するという事はなかった。(添付資料-18 表-5)	・要因とは考えられない	×
				ガラス溶融炉へのリークエア量の増加による放射量の増加	○					○	・結合面隙間から結合装置内へ流入した空気は、高レベル廃液ガラス固化廃ガス処理設備へ排気される他に、結合装置上部から溶融炉への流出する経路が存在する。(添付資料-18 図-7) ・AT-2-A001における炉内圧力の調整に伴う結合装置内圧調整弁開度の変動から、ガラス溶融炉へのリーク量を算定したところ、結合装置排出量の約30%(□Nm ³ /h)であった。(添付資料-18 図-8) ・溶融炉へのリークエア量は計測できないことから、数値流体解析によって溶融炉へのリークエア量の流下ノズル加熱性能への影響を評価した。 ・溶融炉へのリークエア量を結合装置排出量の0~30%として変化させた場合の感度解析を行った結果、リーク量の増加に伴い、流下ノズル温度計温度が低下することが判った。(添付資料-18 表-4)	・要因の一つと考えられる ※但し、高周波加熱コイルへのガラス等の付着物に比べて影響は小さく、主要な要因ではない。	△*
		結合装置の結合時期が遅く、冷却されやすい。						○	○	・アクティブ試験以降は全パッチが結合状態での流下であった。 ・前回運転(AT-1-A001)と今回運転(AT-2-A001)では、結合のタイミングが異なるが、上段加熱時に流下ノズル温度計温度はほぼ同程度となっていることから、影響ないといえる。(添付資料-18 図-9)	・要因とは考えられない	×	
		結合装置内の空気温度が低く、冷却されやすい	セル内温度が低い					○		○	・セル内温度の設計値 □℃に対して、今回の試験では □℃程度であった。(添付資料-12 図-3) ・セル内温度の流下ノズル冷却への影響を数値流体解析によって評価した結果、ほとんど影響ないことを確認した。(添付資料-18 表-7)	・要因とは考えられない	×
		空気、水などが吹き付けられ冷却された	流下ノズルへの冷却エアの吹き付け					○		○	・現場確認によって、冷却エア流量が「0」であることを確認している。	・要因とは考えられない	×
	高周波加熱コイル冷却水の吹き付け					○		○	・流下ノズル下部の観察の結果、液垂れ等はないことを確認した。(添付資料-5(2/2)) ・インピーダンスの変化がないことを確認している。(添付資料-18 表-1)	・要因とは考えられない	×		
流下ノズル温度を管理の条件としていない								○	・モックアップ試験及び化学試験の知見から、流下開始条件を「底部電極温度の設定値到達」と「上段加熱時間1時間」と設定し、運転手順書に定めている。このため、流下ノズル温度は管理の条件となっていない。	・要因の一つと考えられる	○		

*: 要因のひとつと考えられるが、解析結果に対する裏証が出現しないため、「△」とした。



(AT-1-A001)



(AT-2-A001)

図-2 高周波整合盤出口冷却水温度と入口温度の比較 (AT-1-A001/AT-2-A001)

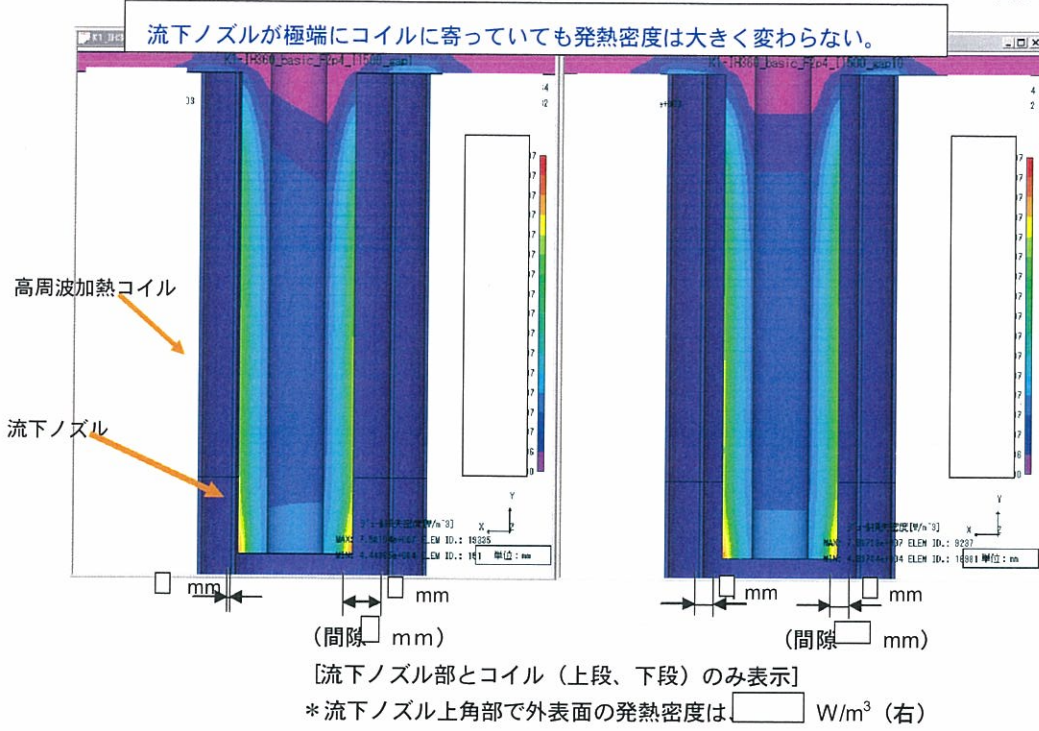


図-3 ノズル偏芯時の加熱性評価(垂直断面上の発熱密度コンター図(W/m³))

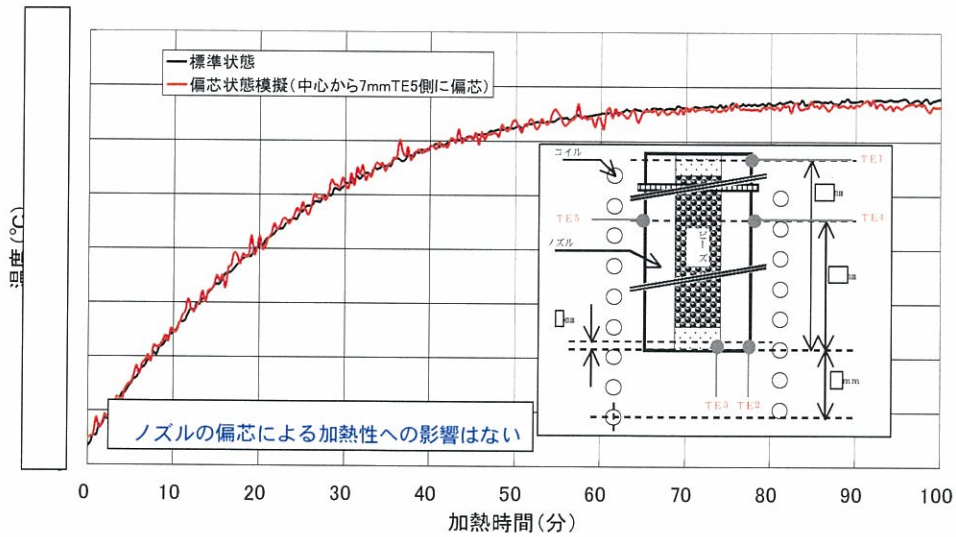


図-4 実規模試験装置を用いた偏芯の影響確認

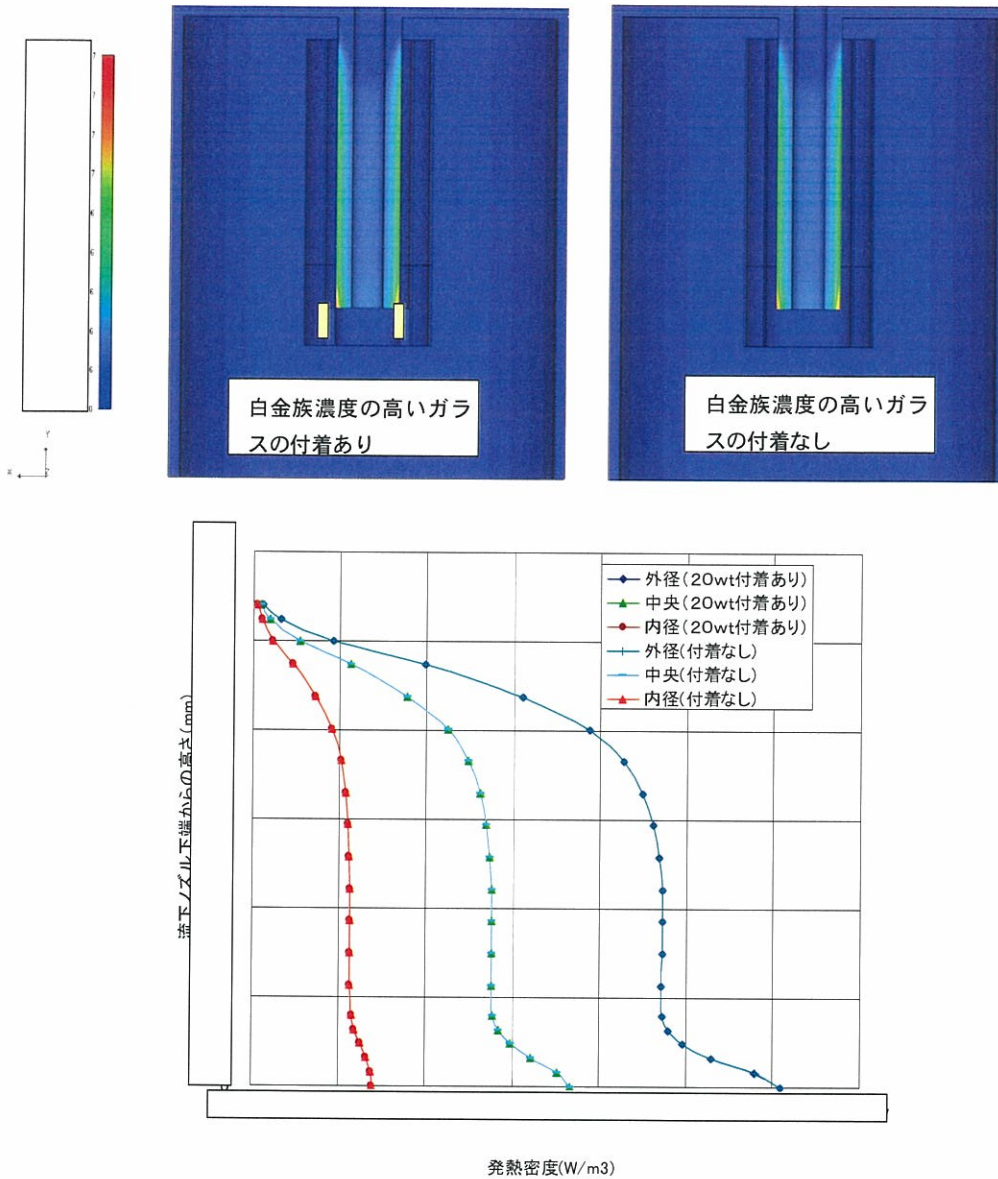
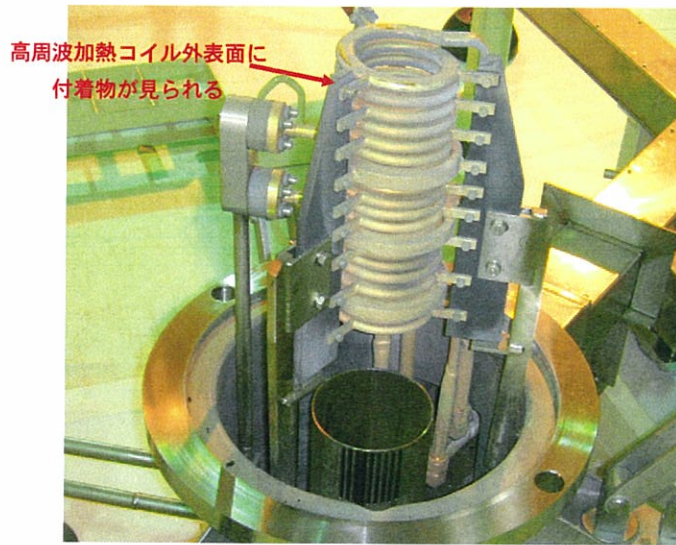
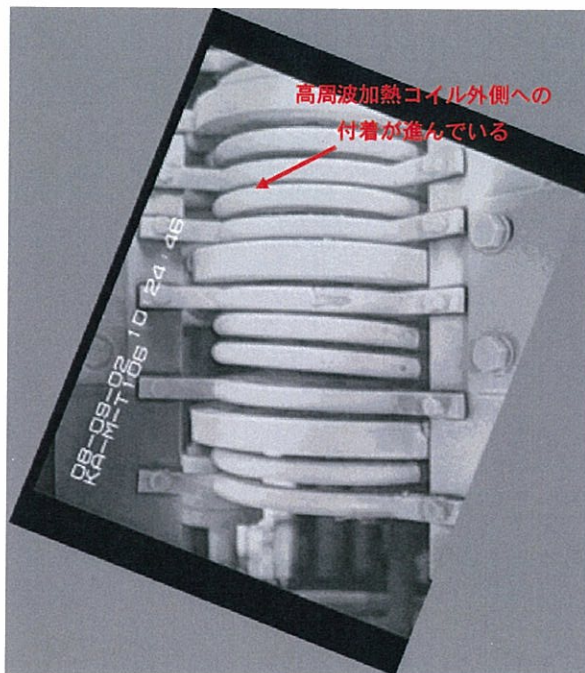


図-5 ノズル先端に白金族元素 20wt%のガラス付着物がある場合とない場合の発熱密度分布

・今回の流下試験におけるガラス等の分析結果から、高周波加熱による加熱性能に影響を及ぼしやすいと考えられる白金族濃度 20wt%ガラスを付着部として採用
 ・径方向の各部位（流下ノズルの内側・中心・外側）に対して白金族元素濃度 20%のガラス付着物がある場合とない場合の発熱密度分布は変わらない。



(化学試験終了後)



(今回結合装置取り外し後)

図- 6 結合装置取り外し写真

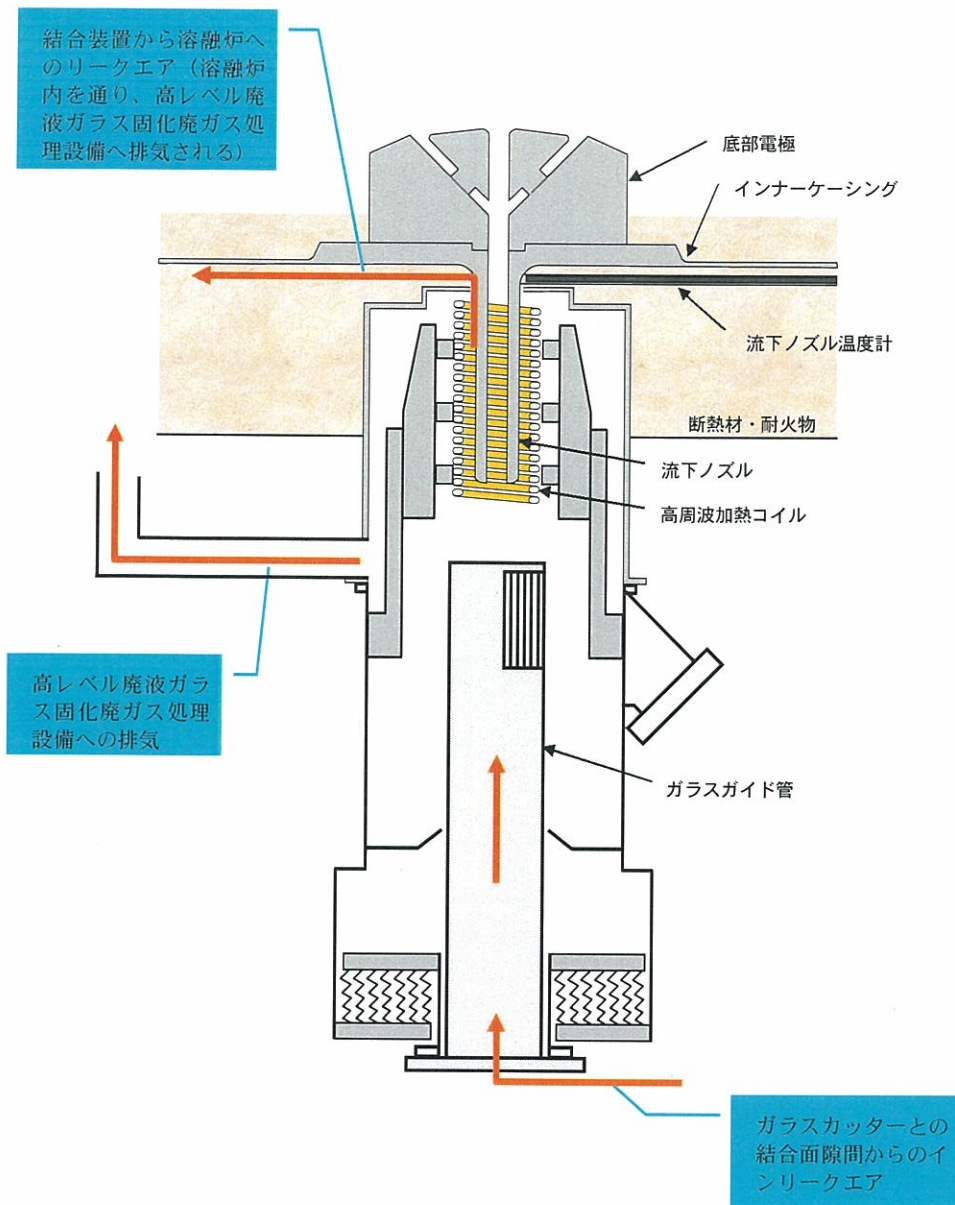
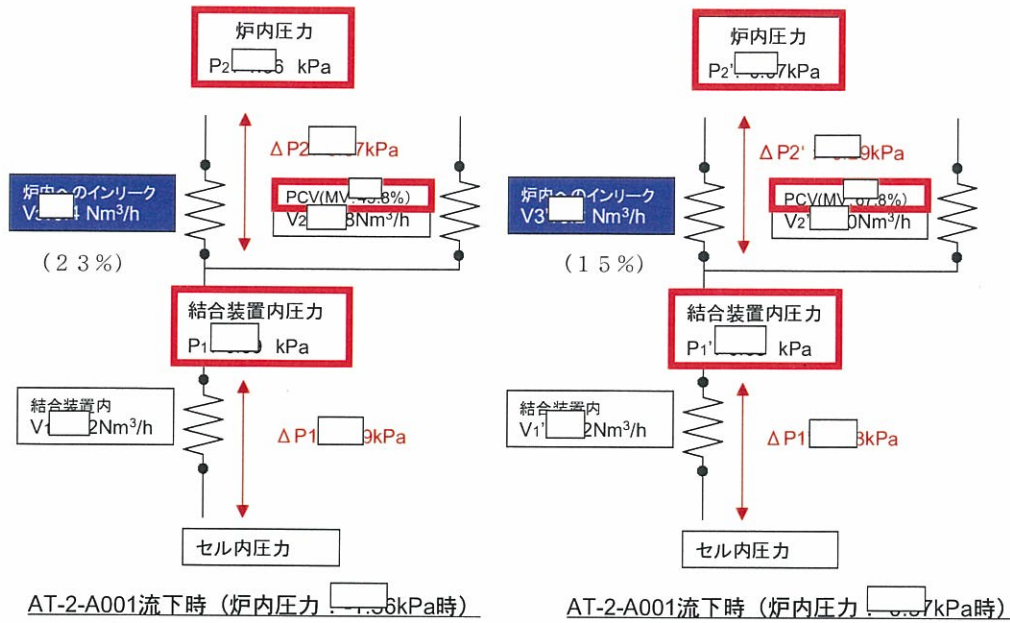


図-7 結合装置まわりの空気の流れ



[] : 計測値

7月2日のガラス流下時の炉内圧力と結合装置内圧力調整弁の弁開度の変動からガラス溶融炉内へのインリーク量を算出した。インリーク量は結合装置内排出量の約30% (2.3%を切り上げ)であった。

図-8 溶融炉へのリークエア量の推定

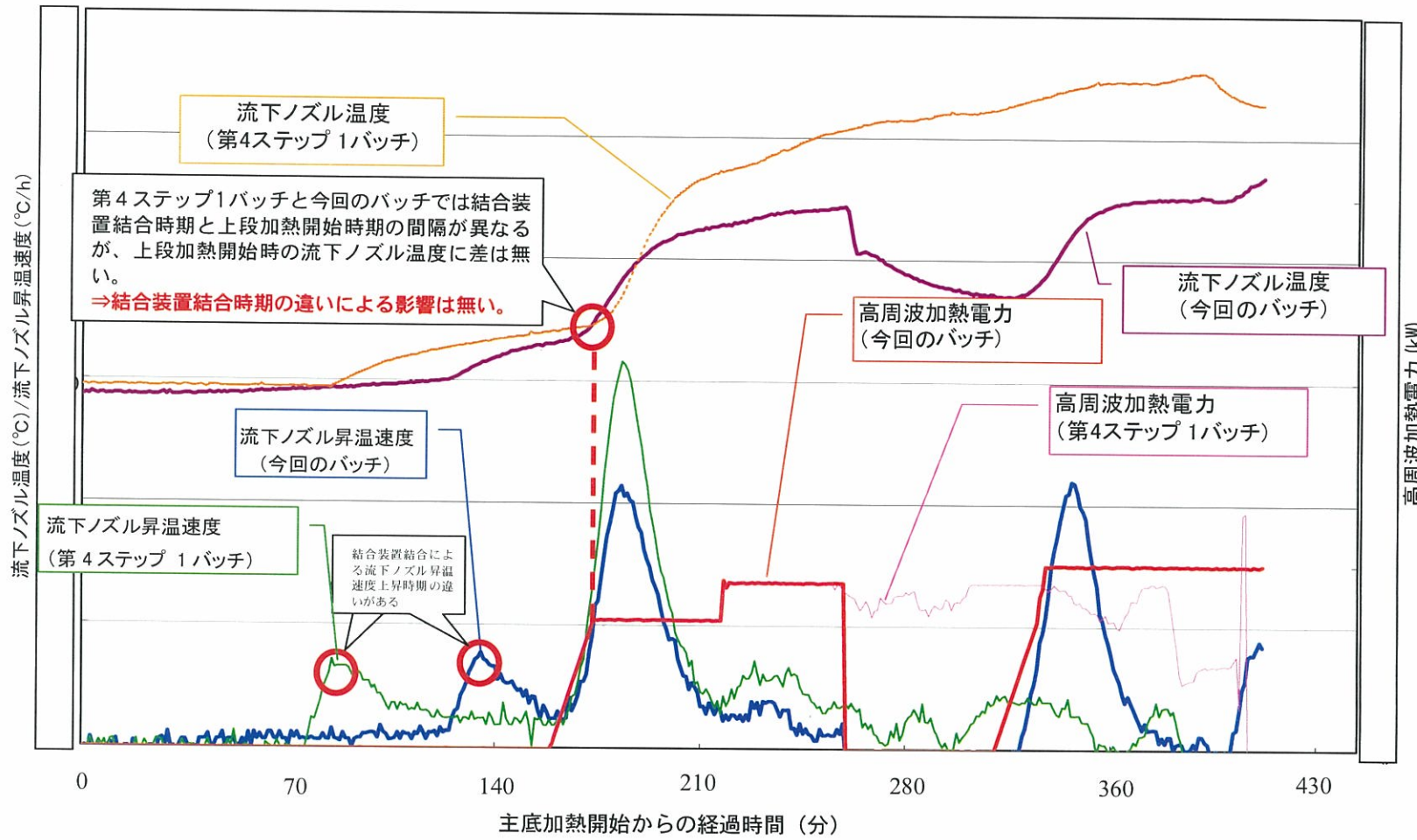


図-9 結合装置結合時期と上段加熱開始時の流下ノズル温度の関係

表-1 高周波インピーダンスの変化

	電力(kW)	電圧(V)	電流(A)	インピーダンス(Ω)	備考
2007/11/18 (第4ステップ時)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	過去試験流下時の高周波加熱装置のインピーダンスと現在のインピーダンスに大きな相違は無いため、高周波加熱コイル冷却水の吹き付けによる冷却及びガラス付着による加熱能力の低下はないと判断する。
2008/4/18 (第4ステップ後)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
2008/7/2 (今回運転時)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
2008/7/3 (調査時)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	

表-2 高周波加熱コイル絶縁抵抗測定結果

測定日		H19年2月19日 (第4ステップ前)	H20年7月3日 (調査時)	評価	備考
絶縁抵抗 (Ω)	上段コイル 端子台	1	<input type="text"/> M	前回と今回の絶縁抵抗値に有意な劣化は見られない。	1,2,3,4 端子は上段コイル、下段コイルを經由してつながっている
		2	<input type="text"/> M		
	下段コイル 端子台	3	<input type="text"/> M		
		4	<input type="text"/> M		

表-3 高周波コイルふく射率の結合装置内温度分布への影響評価

高周波コイル表面のふく射率	ケース 1	ケース 2	ケース 3
解析条件	【共通条件】 ・インナーケーシング上部温度: <input type="text"/> °C ・コイル温度: <input type="text"/> °C ・実効加熱電力: <input type="text"/> kW ・流下ノズル表面ふく射率 <input type="text"/> 【解析条件】 ・高周波コイル表面ふく射率: パラメータ ・溶融炉へのリークエア: なし ・コイル下端付着物: なし ・MV 値 (空気流量): 46% (<input type="text"/> Nm ³ /h) ・セル内温度: <input type="text"/> °C		
温度評価位置			
流下ノズル外側温度			
流下ノズル下端外側温度	<input type="text"/> °C	<input type="text"/> °C (-68°C)	<input type="text"/> °C (-104°C)
ノズル温度計位置	<input type="text"/> °C	<input type="text"/> °C (-20°C)	<input type="text"/> °C (-31°C)

- ・ 高周波加熱コイルのふく射率をケース 1 からケース 3 まで変えると、流下ノズルの最高温度は最大 150°C 程度低下する。下端部外側においても 100°C 程度低下する。
- ・ 流下ノズル温度計位置においても 30°C 程度低下する。

(注) 過去の工場試験結果などからの類推によって、初期状態のコイル表面のふく射率は 0.1 に相当する。また、ノズル温度計位置の温度は、アクティブ試験の初期と比べると今回の流下停止時は ~ °C 低下していることからふく射率 0.5 までを考慮した。

表-4 溶融炉へのリークエアの結合装置内温度分布への影響評価

	ケース0	ケース1	ケース2	ケース3
MV 値 (空気流量)	<input type="text"/> Nm ³ /h			
溶融炉へのリークエア量	0Nm ³ /h (0%)	<input type="text"/> Nm ³ /h (10%)	<input type="text"/> Nm ³ /h (20%)	<input type="text"/> Nm ³ /h (30%)
解析条件	<p>【共通条件】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・インナーケーシング上部温度: <input type="text"/> °C ・コイル温度: <input type="text"/> °C ・実効加熱電力: <input type="text"/> kW ・流下ノズル表面ふく射率: <input type="text"/> <p>【解析条件】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高周波コイル表面ふく射率: 0.1 ・溶融炉へのリークエア: パラメータ ・コイル下端付着物: なし ・MV 値(空気流量): 46% (<input type="text"/> Nm³/h) ・セル内温度: <input type="text"/> °C 			
温度評価位置				
流下ノズル外側温度				
流下ノズル下端外側温度	<input type="text"/> °C	<input type="text"/> °C (-2°C)	<input type="text"/> °C (-2°C)	<input type="text"/> °C (-3°C)
ノズル温度計位置	<input type="text"/> °C	<input type="text"/> °C (-26°C)	<input type="text"/> °C (-33°C)	<input type="text"/> °C (-36°C)

- ・ 結合装置排出量 (空気流量) の 30% までが溶融炉へのエアリーク量と仮定した場合でも流下ノズル下端の温度への影響はない。
- ・ 流下ノズル温度計位置の温度への影響は大きく、10% から 30% まで増加させた場合、約 10°C 程度低くなる傾向にある。

(注) 流下停止が発生した AT-2-A001 において、気相圧力を調整した際の結合装置からの排気流量の変動よりガラス溶融炉へのエアリーク量を算定し、上記エアリーク流量の変動幅を検討した。

表-5 高周波加熱コイル付着物（付着形状）の結合装置内温度分布への影響評価

	ケース0	ケース1	ケース2	ケース3
	標準条件	下段3段に付着物	下段3段コイル間及び下端板状付着物	下段3段のふく射率が異なる
モデル図				
解析条件	<p>【共通条件】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・インナーケーシング上部温度: <input type="text"/> °C ・コイル温度: <input type="text"/> °C <p>【解析条件】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高周波コイル表面ふく射率: 0.1 ・溶融炉へのリークエア: なし ・コイル下端付着物: あり ・実効加熱電力: <input type="text"/> kW ・流下ノズル表面ふく射率: <input type="text"/> ・MV 値 (空気流量): 46% (<input type="text"/> Nm³/h) ・セル内温度: <input type="text"/> °C 			
温度評価位置	<p>ふく射率の影響をみるため、溶融炉温度分布解析結果に基づいて、流下ノズルの加熱性を評価するモデルとして主加熱開始前の流下ノズル上端周辺=インナーケーシング温度として設定した。</p>			
流下ノズル外側温度分布				
流下ノズル下端外側温度	<input type="text"/> °C	<input type="text"/> °C (-37°C)	<input type="text"/> °C (-37°C)	<input type="text"/> °C (-37°C)
ノズル温度計位置	<input type="text"/> °C	<input type="text"/> °C (+6°C)	<input type="text"/> °C (+6°C)	<input type="text"/> °C (-1°C)
<ul style="list-style-type: none"> ・付着物による流下ノズル温度計の温度については、コイル間に付着がないときは影響ないが、コイル間に付着があるときは流速が低下して温度が上昇する。 ・付着物によって流下ノズル下端の温度は低下する。その原因は、付着物によって、コイル表面のふく射率が変わったため、ノズル表面からの放熱量が増加したためである。 				
<p>(注) 結合装置下部からの観察結果から、流下ノズル下端より下方に位置する加熱コイル（3段）に低粘性流体と思われる付着物が確認されたため、ケース1はコイル間に付着物がある場合、ケース2はさらに板状に付着した場合、ケース3はコイル間に付着物がない場合を想定した。</p>				

表-6 MV値(弁開度)及びセル内温度の結合装置内温度分布への影響評価

	ケース0	ケース1 (AT-2-A001相当)	ケース2	ケース3
セル内温度	<input type="text"/> °C		<input type="text"/> °C	
MV値 (空気流量)	22% (<input type="text"/> Nm ³ /h)	46% (<input type="text"/> Nm ³ /h)	22% (<input type="text"/> Nm ³ /h)	46% (<input type="text"/> Nm ³ /h)
熔融炉への流出量	0Nm ³ /h			
解析条件	【共通条件】 ・インナーケーシング上部温度: <input type="text"/> °C ・コイル温度: <input type="text"/> °C 【解析条件】 ・高周波コイル表面ふく射率:0.1 ・熔融炉へのリークエア:なし ・コイル下端付着物:なし ・実効加熱電力: <input type="text"/> kW ・流下ノズル表面ふく射率 <input type="text"/> ・MV値(空気流量):パラメータ ・セル内温度:パラメータ			
温度評価位置				
流下ノズル 外側温度				
流下ノズル 下端外側温度	<input type="text"/> °C	<input type="text"/> °C (-3°C)	<input type="text"/> °C (-)	<input type="text"/> °C (-3°C)
ノズル温度計位置	<input type="text"/> °C	<input type="text"/> °C (-1°C)	<input type="text"/> °C (-)	<input type="text"/> °C (-1°C)

- ・ MV値(弁開度)及びセル内温度による流下ノズル温度計の温度への影響はほとんど影響ない。
- ・ MV値(弁開度)及びセル内温度による流下ノズル温度計位置の温度への影響はほとんど影響ない。

(注) 今回の流下試験時のMV値(弁開度)を最大として、空気流量をパラメータとした場合の上向き(Z軸方向)のコイル下の流速を評価した。

数値流体解析による流下ガラス挙動評価について

1. はじめに

アクティブ試験において流下ガラスにみられた偏流現象について、数値流体解析（CFDコード）によって流下ガラスの挙動を検討した。本資料では得られた解析結果およびその評価についてまとめる。

2. 解析目的

流量が十分大きいときはノズル中心に軸対称の噴流が形成されるが、流下初期の低流量時には、ノズルの一方に偏った内壁に沿う流れが形成される。この際、図-1に示すティーポット効果^[1,2]によって、さらにノズル外側へ偏った流れになる可能性がある。

本検討では数値流体解析によってこのような流体挙動を再現し、各パラメータ（流量、ガラス粘性など）の影響を明らかにするとともに、流下ガラス噴流のノズル中心からの偏りを評価する。

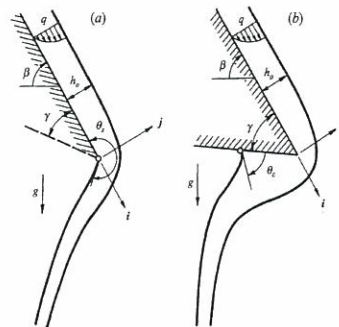


FIGURE 1. A two-dimensional viscous film falling from the lip of an inclined plate to form an unsupported liquid sheet, or curtain: (a) contact line pinned; (b) contact line free to migrate.

図-1 ティーポット効果の概念図

3. 解析手法

(1) 手法概要

- VOF（Volume of Fluid）法による熔融ガラスと周囲空気間の界面追跡
- 平面二次元定常計算
- FLUENT6.3

(2) 熔融ガラスの物性値

使用した物性を表-1に示す。

表-1 熔融ガラス物性

物性	単位	ガラス温度900℃	ガラス温度1200℃
密度	kg/m ³	<input type="text"/>	<input type="text"/>
粘性係数	Pa·s	<input type="text"/>	<input type="text"/>
表面張力 ^[1]	N/m	0.3	
接触角 ^[3]	deg	70	

(3) 解析モデル

実機流下ノズルの形状を反映した解析メッシュ（図-2）を作成し、表1に示した物性値を用いて溶融ガラスの流下挙動の計算を実施した。計算パラメータは流量、動粘度（ガラス温度）とした。

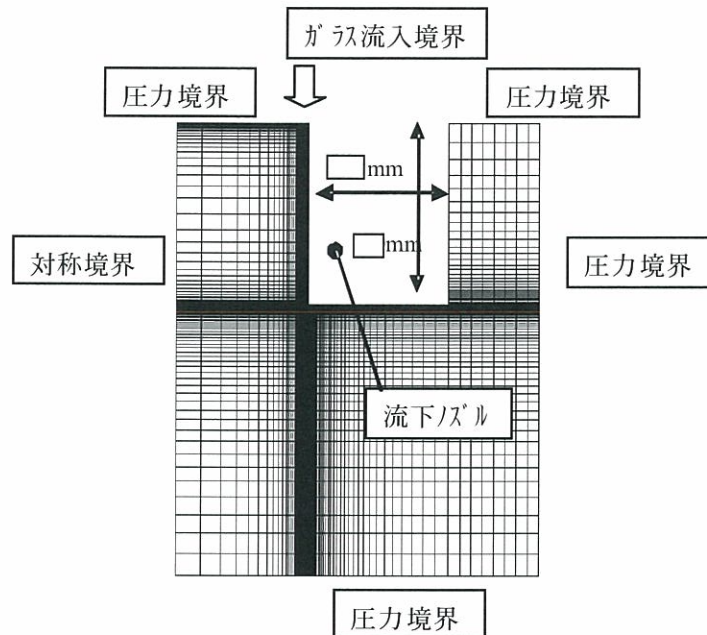
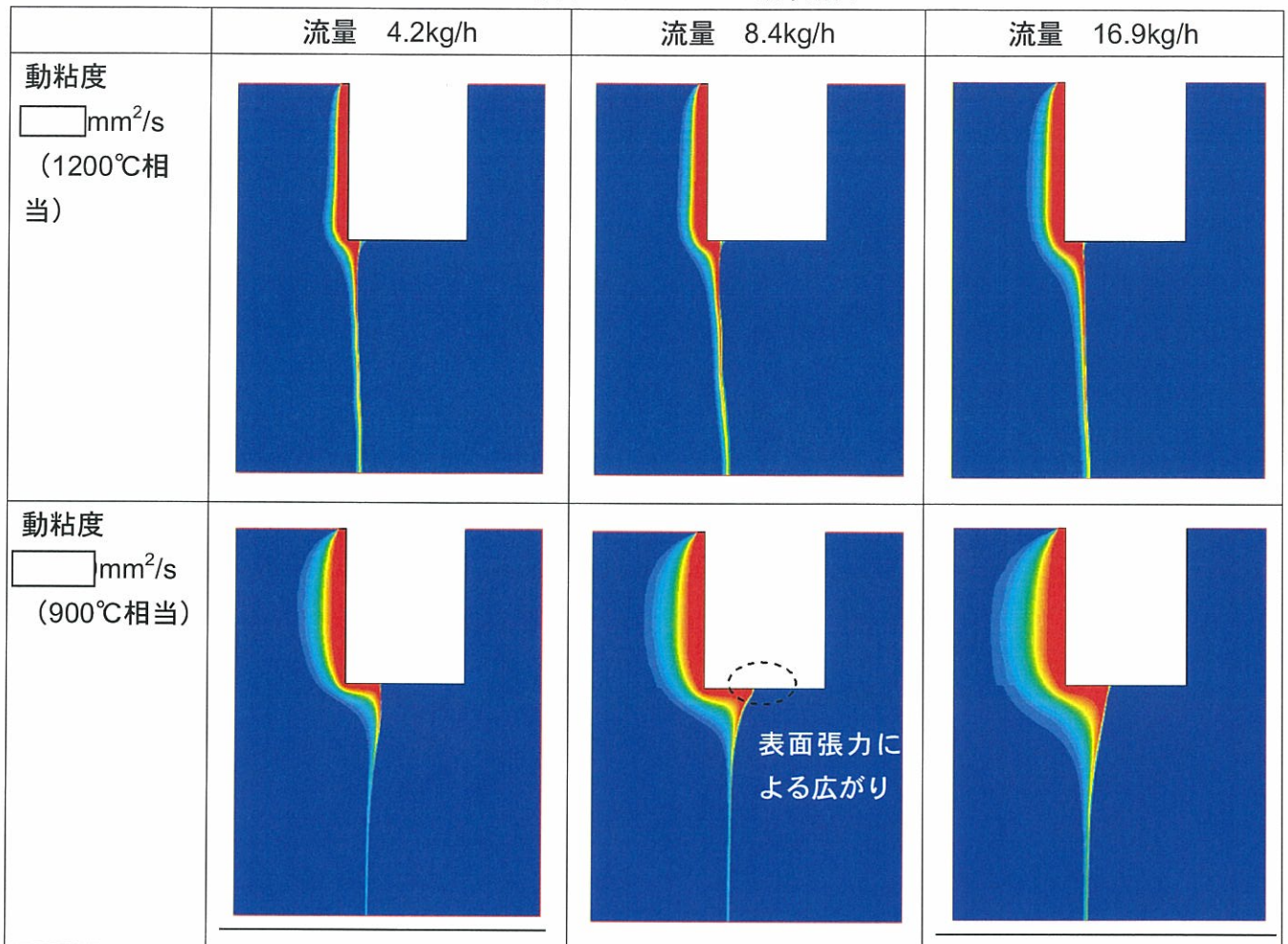


図-2 ガラス溶融流下ノズルの解析メッシュ

4. 解析結果

表-2に解析結果を示す。動粘度が小さい（ガラス温度が高い）場合、動粘度が大きい（ガラス温度が低い）場合に比べて、壁面上を流下するガラスの流速が速く薄い液膜が形成され、慣性力が大きいため、壁面下端のエッジ部分近くで壁から離脱して自由流下液膜となる。一方、動粘度が大きい場合、壁面下端で液膜はすぐに離脱せず、下端に沿って表面張力により広がっていく傾向がみられる。今回の計算範囲では、ノズル下端の中央付近まで溶融ガラスが広がり、そこから流下液膜を形成している。また動粘度が大きい場合には自由流下液膜は相対的に細くなり、流下速度はやや速くなる傾向にある。

表-2 溶融ガラスによる解析結果



5. まとめ

- ・ 数値流体解析により流下ノズル出口の偏流を再現できた。
- ・ 流量が大きいほうが、ティーポット現象によりわずかながら偏流は大きい。
- ・ 粘性が大きいと流速が小さくなり、表面張力の効果が相対的に大きくなるため、ノズル下端を沿う流れにより偏流は顕著になる。

参考文献

- [1] Guererro, H. N., et al., Computer Modeling of a Glass Stream Departing from a Pour Spout Knife Edge, *Proc. of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, FEDSM99-7778, (1999).
- [2] Kistler, S. F., et al., The teapot effect: sheet-forming flows with deflection, wetting and hysteresis, *J. of Fluid Mech.*, vol. 263, (1994).
- [3] Pech, J., et al., Wetting, interfacial interactions and sticking in glass/steel systems, *Materials Science and Engineering A* 384, (2004).
- [4] 村田・三宅, 水力学, 理工学社, (1979).

以上