

かくはん棒が曲がっていたことに対する要因分析

事実	要因1	要因2	要因3	評価		
炉内で直棒が曲がった	1. 設計・製作時に強度が不足していた	1-1 設計強度計算に誤りがあった(設計)		×	・かくはん棒の座屈に対する簡易計算評価では、45kgのおもり治具を搭載しても座屈することはないと考えていた。(添付資料-25) ・かくはん棒の使用条件を満足している。(添付資料-28)	
			1-2 設計通り製作されていなかった	1-2-1 材料が異なっていた	×	・製作時の試験検査(材料検査)にて問題ないことを確認している。
				1-2-2 径が小さかった	×	・製作時の試験検査(寸法検査)にて問題ないことを確認している。
				1-2-3 許容範囲以上に曲がりがあった	×	・製作時の試験検査(寸法検査)にて問題ないことを確認している。
		1-2-4 許容範囲以上に傾きがあった		×	・製作時の試験検査(寸法検査)にて問題ないことを確認している。	
		1-3 製作段階で傷(強度に影響する程度)が発生した	×	・製作時の試験検査(外観検査)にて問題ないことを確認している。		
		2. 使用前の直棒の機械強度が低下していた	2-1 攪拌棒が変形していた	×	・直棒(2号機)がITVにより確認した限りでは曲がっていないことを確認し、AT-2-A044に使用した。(添付資料-26)	
			2-2 攪拌棒に傷があった	×	・直棒(2号機)にITVにより確認した限りでは大きな傷がないことを確認し、AT-2-A044に使用した。(添付資料-26)	
			2-3 攪拌棒が腐食していた	2-3-1 腐食に弱かった。	△	・直棒(2号機)にITVにより確認した限りでは極端な腐食がないことを確認し、AT-2-A044に使用した。(添付資料-26) ・1号棒をITVで観察した結果、腐食しているようにも見えるため、腐食を加味した評価を今後行う。
	2-3-2 使用時間が設計条件を超えていた	△		・かくはん棒の使用に関して時間制限を設ける等の措置を行っていなかった。(添付資料-28)		
	3. 使用中の使用条件等によって機械強度が低下した	3-1 棒の設計条件の温度に対して溶融炉内の温度が高かった	×	・ガラス温度は、使用条件である□℃程度以下であり、AT-2-A043と同程度だった。(添付資料-28)		
		3-2 ガラス以外の要因で局所的に温度が高い部分が存在した	×	・炉底部温度や底部電極温度等に異常がないことから局所加熱の可能性は低い。 ・局所加熱があったとしても、棒の変形箇所は炉底部から離れた位置であり、該当しない。(添付資料-28)		
		3-3 使用時間が設計条件を超えた	△	・かくはん棒の使用に関して時間制限を設ける等の措置を行っていなかった。(添付資料-28)		
	4. 使用中に荷重が掛かり過ぎた	4-1 想定よりもおもり治具が重かった	×	・実測値を記載した製作図に45kgと記載されていることから、おもり重量は45kgであると考えられる。確認のため、今後固化セル内にておもり重量を実測して確認する。		
		4-2 パワーマネジューラにより想定以上の荷重が掛かった	○	・かくはん棒のパワーマネジューラによるアシスト操作時に、想定していた25kg(可搬荷重)での簡易計算評価では問題ないと考えたが、想定以上の約40kgがかかったことにより、おもり治具の自重45kgとあわせて合計約85kgが掛かり座屈荷重を超えた可能性がある。(添付資料-29)		
	5. 荷重をかけた際の方向が軸方向ではなかった	5-1 棒が斜めに挿入された	5-1-1 クレーン等による棒の位置調整を行った際に原料供給ノズル内配管に接触し、棒が斜めになった	×	・パワーマネジューラによるアシスト操作により、棒の位置を変更した操作など実施しているため、接触の可能性も考えられる。棒の中間位置に横方向荷重が加わった場合、棒のたわみ寸法が増加することとなるが、棒はパワーマネジューラの補助ホイストで吊っているだけであり、横方向の大きな荷重がかかるとは考えにくい。	
			5-1-2 底部電極スリット部で止まり、棒が斜めになった	○	・底部電極スリット部で止まり斜め方向になり、その上、おもり荷重とパワーマネジューラの荷重が掛かったことにより、座屈の可能性ある。(添付資料-31, 32)	
			5-1-3 何らかの炉底堆積物に接触し、棒が斜めになった	△	・炉底部に何らかの堆積物等があり、斜め方向になり、その上、おもり荷重とパワーマネジューラの荷重が掛かったことにより、座屈の可能性ある。 ・何らかの堆積物等としては損傷したレンガが底部に存在した可能性もある。(添付資料-31, 32)	
		5-2 おもり治具やパワーマネジューラによる荷重方向が斜めになった(直棒は真直ぐに挿入)	5-2-1 おもり治具が棒の中心に載っていない	×	・ITV画像によりおもり治具が軸の中心に載っていることを確認した。(添付資料-30)	
			5-2-2 パワーマネジューラの荷重が偏っていた	○	・パワーマネジューラの荷重がおもり治具の端部に掛かり、偏心荷重となった場合、そのたわみと荷重により座屈する可能性がある。(添付資料-31, 32)	

【凡例】
 ○: 要因として考えられる
 △: 要因の可能性は低い、否定できない
 ×: 要因としては考えられない

かくはん棒（直棒）の座屈に対する健全性（事前評価）

両端が回転する条件の柱の座屈荷重 W_{CR} は、

$$W_{CR} = \frac{\pi^2 EI}{\lambda^2}$$

ここに、E はヤング率であり、インコネルの $\square^\circ\text{C}$ でのヤング率として保守的に \square (kgf/mm²) を使用する。

I は柱の断面 2 次モーメントであり、最小の棒径が $\phi \square$ mm より

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi \times \square^4}{64} = \square (\text{mm}^4)$$

λ は「柱の長さ」であり、座屈の変形モードとしては棒の全体が湾曲し、そのたわみ変形が大きくなるモードとしてとらえるため、柱の長さとして保守的に直棒の全長 4107mm をとる。

このときの座屈荷重は、

$$W_{CR} = \frac{\pi^2 \times \square \times \square}{4107^2} = 37(\text{kgf})$$

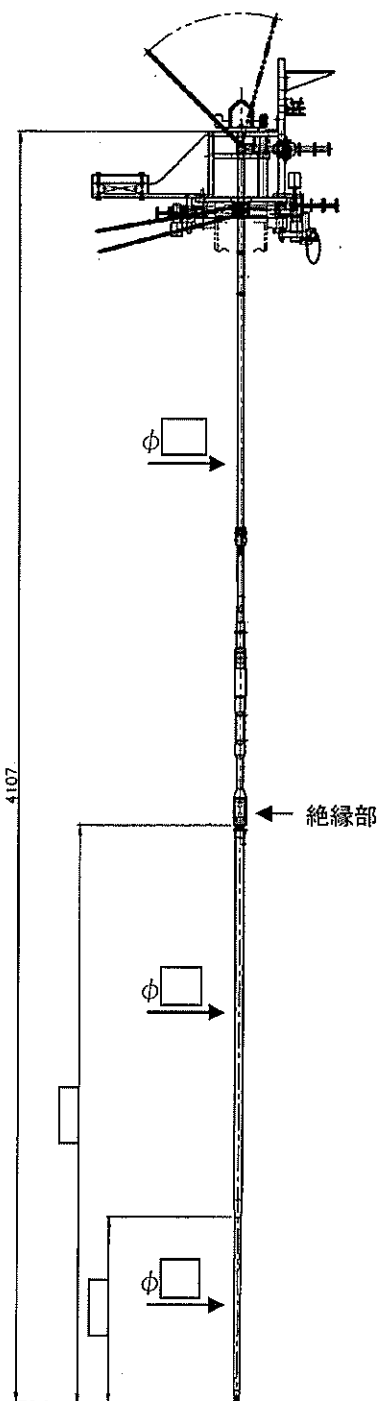
ただし、実際の使用状況として、使用した直棒の熔融ガラス中に入る絶縁部より下方の棒径は $\phi \square$ mm（先端部 \square mm を除く）であり、より座屈に対しては強いこと、中央部より上部は気相部にあり使用温度は比較的低温ヤング率を大きくとれること、操作は衝撃荷重がかからないような準静的状態で行われること、などを考慮すると本計算値よりも大きな荷重に耐えられると考えられる。

そこで、絶縁部より下方が熔融ガラス中に液浸され温度が高く座屈しやすいと仮定し、柱の長さを絶縁部より下方の \square mm をとり、座屈荷重を計算すると、

$$W_{CR} = \frac{\pi^2 \times \square \times \square}{\square^2} = 181(\text{kgf})$$

この結果を踏まえ、おもり治具の重量を 50kg 以下で製作すれば直棒が座屈することはないと考えた。この評価に基づきおもり治具を 45kg で製作した。

また、おもり治具の重量に加え、パワーマニピュレータの可搬荷重 25kg が加わった場合においても上記簡易計算の裕度に含まれるものと考え座屈することはないと考えていた。



以上

かくはん棒（直棒） 2号機の観察結果

1. はじめに

AT-2-A042 バッチ終了後、かくはん棒（直棒） 2号機を折りたたんだ状態で観察したところ、絶縁材より下部が曲がっているように観察されたため、AT-2-A044 のかくはん操作前にかくはん棒（直棒） 2号機を伸ばした状態で変形の有無を確認した。また、あわせて、かくはん棒（直棒） 2号機の状態観察を行い、損傷や腐食の有無を確認した。

2. 観察方法

(1) 変形の有無確認

かくはん棒を折りたたんだ状態では、上部棒と下部棒の連結部に上部棒の荷重による力が働き、必ずしも下部棒が垂直にならないことから、変形の有無の観察には適切でないと考えられるため、直棒を伸ばした状態で壁面に接近させ、外壁面の柱（H型鋼）のエッジ部を基準線として、ITV カメラにより棒の変形の有無を観察した。

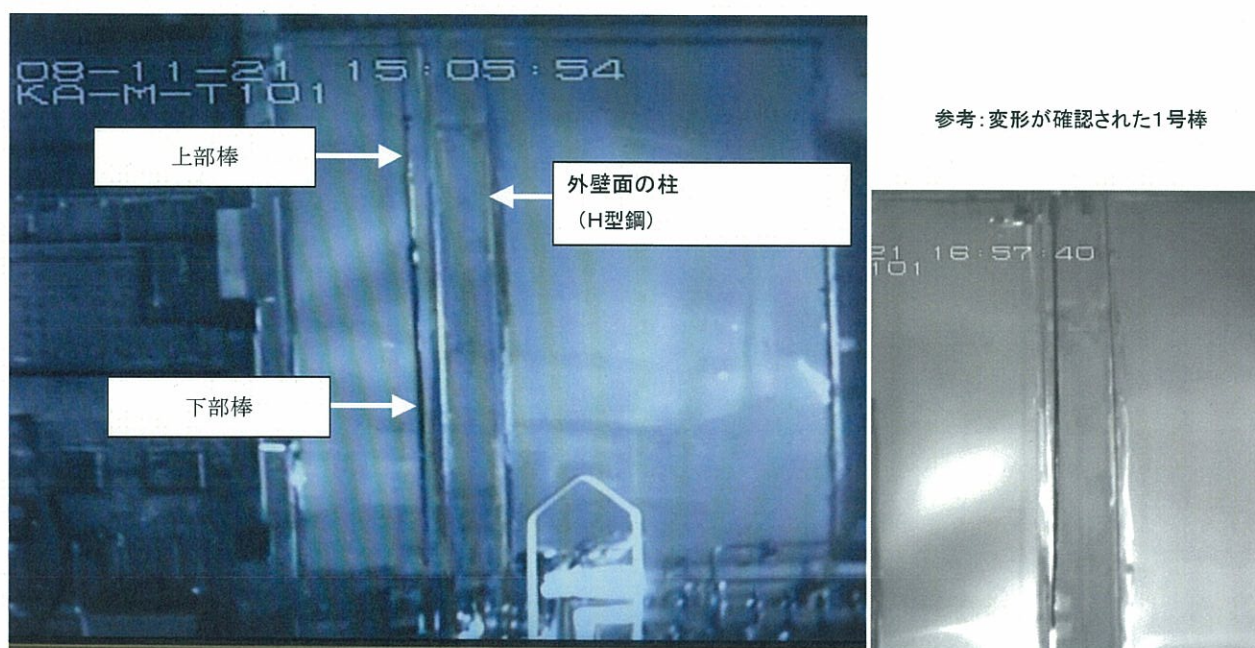
(2) 状態観察

かくはん棒を ITV カメラにより観察した。

3. 観察結果

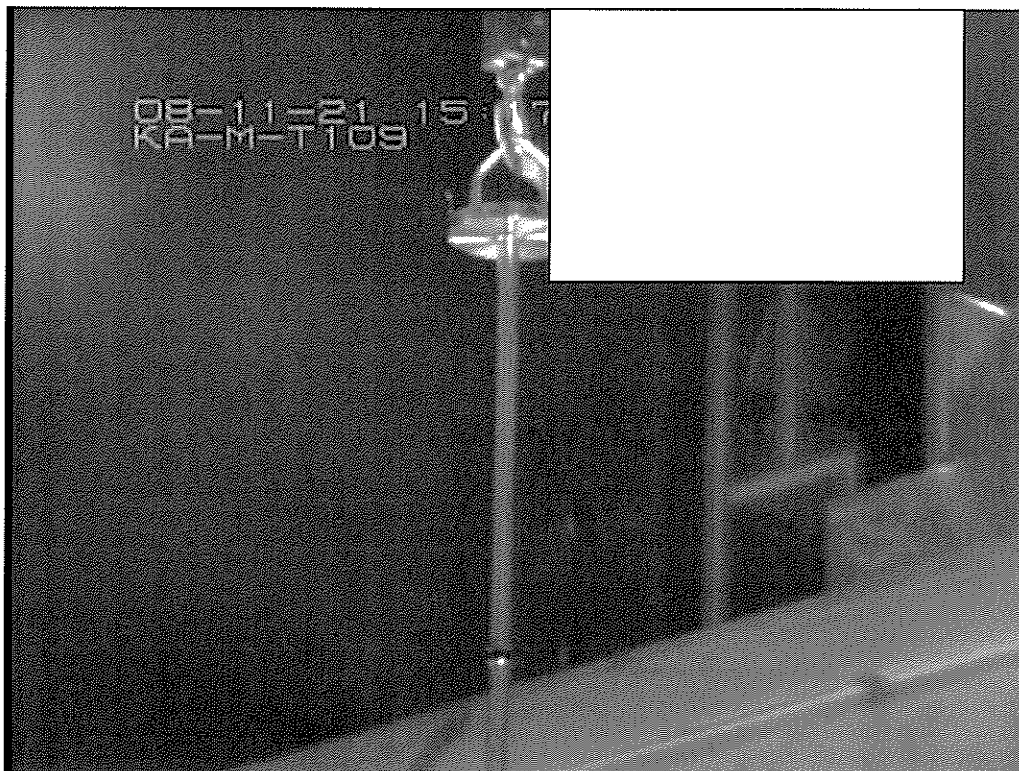
(1) 変形の有無確認

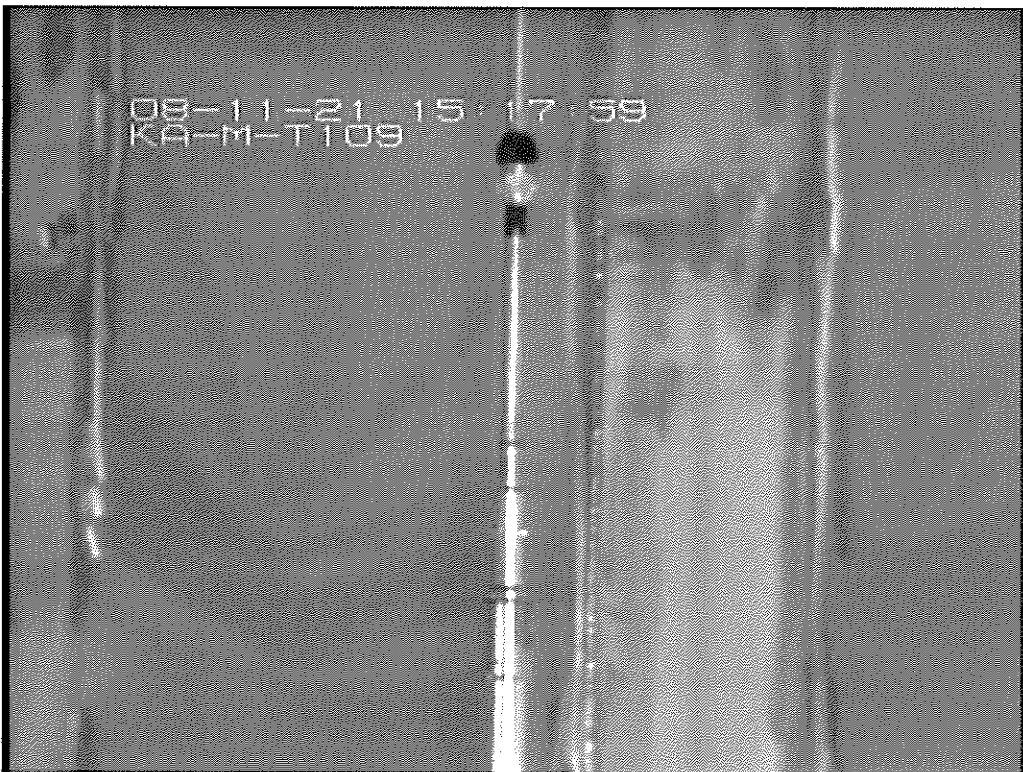
棒の向きを 90° 変えて観察した結果では、棒は全長に渡り、ほぼ基準線である H 型鋼のエッジ部に沿っていることが確認された。



(2) 状態観察

ITV カメラによりかくはん棒の表面を観察したが、損傷や腐食等は確認されなかった。









4. まとめ

かくはん棒（直棒）を伸ばした状態で変形の有無の確認を行った結果、曲がりは認められなかった。また、この時点の ITV カメラによる観察では、かくはん棒（直棒）の表面に損傷や腐食等は確認されなかった。

以上

かくはん棒（直棒）1号機の減肉について

○かくはん棒（直棒（1号機））の減肉量調査

曲がりが発生したかくはん棒（2号機）よりも使用時間が長いかくはん棒（1号機）の減肉量の観察を行った。その結果、図1に示すとおり、若干の減肉が確認された。

減肉量は、直径□mmに対して、約2mm（長さ約50mm）であった。

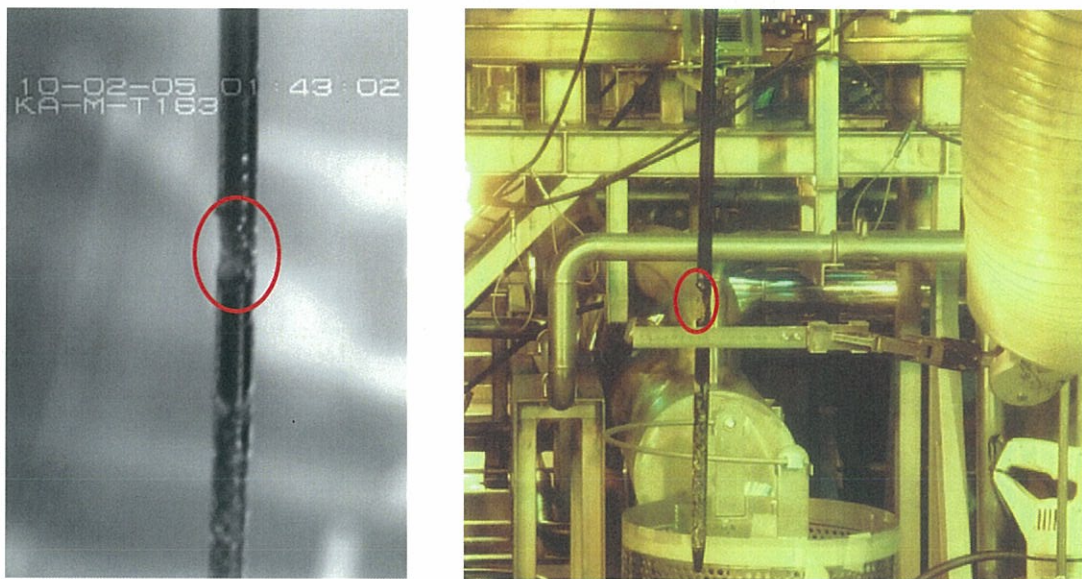


図1 かくはん棒（1号機）調査状況

以上

かくはん棒使用時の温度履歴

AT-2-A044 バッチの直棒による炉底かくはんでは、流下開始時の炉底部の温度を高くし、閉塞している可能性のある物を軟化（劣化）させ押し出しやすくすることを目的として、流下開始時の底部電極温度が□℃以上となるように調整した。但し、かくはん棒の材質はガラス溶融炉内の電極等に使用しているものと耐熱性が同等のインコネル材を使用しており、電極の最高使用温度は□℃（融点は約□℃）としていることから、かくはん棒の使用温度についても□℃程度を上限の目安とした。なお、かくはん棒の使用に関しては、時間制限を設ける等の措置を行っていなかった。

今回曲がりが発生したかくはん棒（直棒）2号機の全温度履歴を図1に、A044 時の温度を表1に示すが、使用温度に特に問題はない。

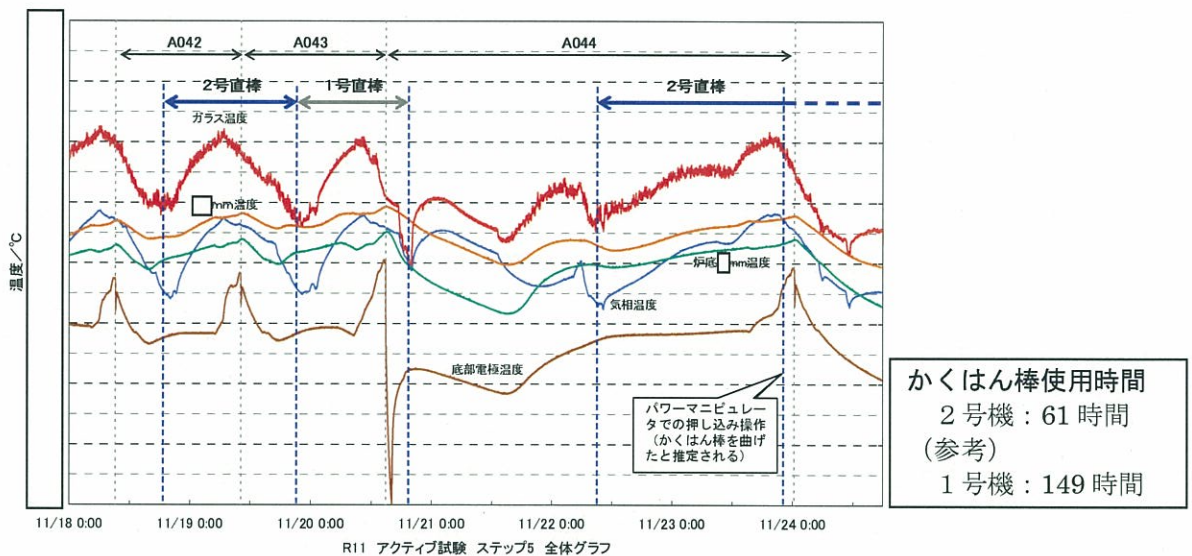


図1 かくはん棒（直棒）2号機使用時の全温度実績

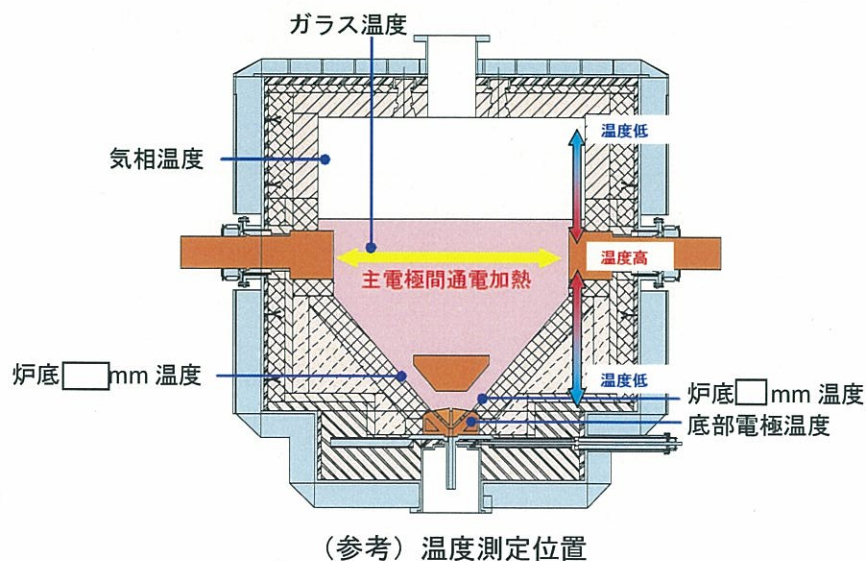
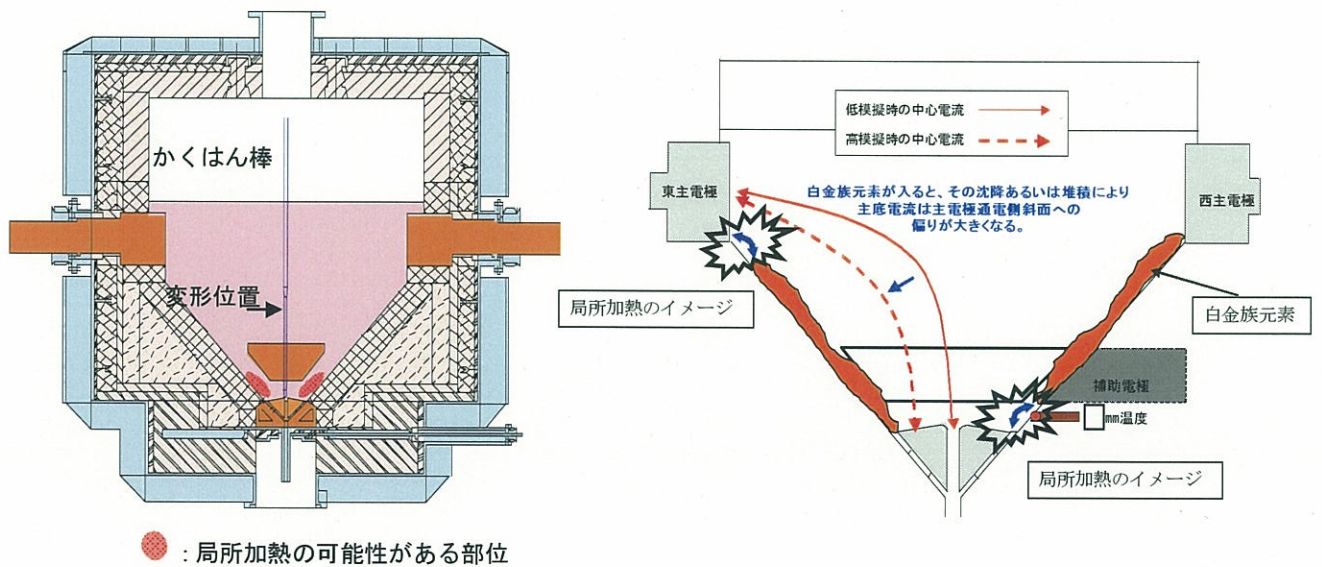


表 1 AT-2-A044 の温度状態

	AT-2-A044		AT-2-A043 (参考)	
	流下開始時	かくはん時 (2 回目)	流下開始時	かくはん時 (2 回目)
時刻	11/23 20:58	11/23 23:28	11/20 9:53	11/20 13:41
ガラス温度	□℃	□℃	□℃	□℃
気相温度	□℃	□℃	□℃	□℃
□mm 温度	□℃	□℃	□℃	□℃
□mm 温度	□℃	□℃	□℃	□℃
底部電極温度	□℃	□℃	□℃	□℃

また、白金族元素等による局所加熱の可能性については、図 1 及び表 1 に示す温度に異常がないことから発生していないと考えられるが、万一発生していたとしても、図 2 に示すとおり、かくはん棒変形位置を考慮すると原因になったとは考えにくい。

図 2 かくはん棒 (直棒) 変形位置と局所加熱の可能性のある位置



以上