

### 熱応力解析における各断面の解析結果

本添付資料は、経過報告（その2）で行った熱応力解析（別添資料：添付資料－17）について、解析条件を整理し、より詳細に記載したものである。  
追加で解析を行ったものではないため、解析条件及び解析結果は前回の報告より変更はない。

天井レンガ周辺の温度環境変化に対するレンガの影響を確認するため、図1に示すフローにて、図2、図3のモデルに基づき、各条件において発生する応力を解析により求めた。伝熱解析及び熱応力解析には汎用有限解析コードABAQUS（Ver. 6.8-2）を使用した。

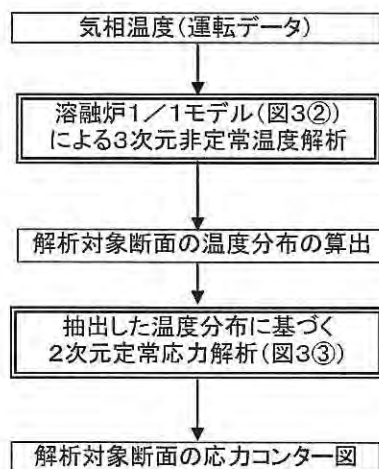
気相温度が急激に変化する条件では、ガラス溶融炉の天井1/1モデル（図3②）を用いて、レンガ表面に気相温度を強制的に与え、初期の気相温度における天井レンガ内の温度分布が気相温度の変化によってどのように変化していくか伝熱解析を行っている。実際には気相温度と天井レンガの間には熱伝達があり、レンガの温度変化率は小さくなると考えられるため、本解析は安全側となっている。

一方、間接加熱装置温度が急激に変化する条件では、ふく射伝熱解析を行うためには間接加熱装置保護管表面温度をインプットする必要があるが、実機において間接加熱装置保護管表面温度の測定は行っていない。間接加熱装置温度は間接加熱装置内部の温度計で測定していることから、天井1/4モデル（図3①）を作成し、温度計位置の温度が運転実績とあうように間接加熱装置ヒータの発熱量を調整し、間接加熱装置保護管表面温度を求めている。その後、天井1/1モデル（図3②）の間接加熱装置保護管表面に天井1/4モデルで求めた温度を強制的に与え、初期の間接加熱装置ならびにガラス液面温度における天上レンガ内の温度分布が、間接加熱装置の温度降下によって、間接加熱装置からのふく射入熱が低下することでどのように変化するかといったふく射環境下での伝熱解析を行っている。

熱応力解析にあたっては、上記の天井1/1モデルで得られた各時間における温度分布を二次元モデル（図3③）に与えてレンガ内部の応力を求めている。アンカレンガと平板レンガの境界には実機と同様に設計寸法□mmのメジを設定している。メジ部中央に接触条件を設定することで、実現象と同様にアンカレンガと平板レンガが独立して変動することを可能にしている。

レンガ等の物性値については、主にカタログ値を使用しているが、AZGSレンガのヤング率、AZGSレンガ及び間接加熱装置保護管のふく射率については、試験を実施し、得られた0.9をインプットとした。

気相温度が急激に変化する条件



間接加熱装置温度が急激に変化する条件

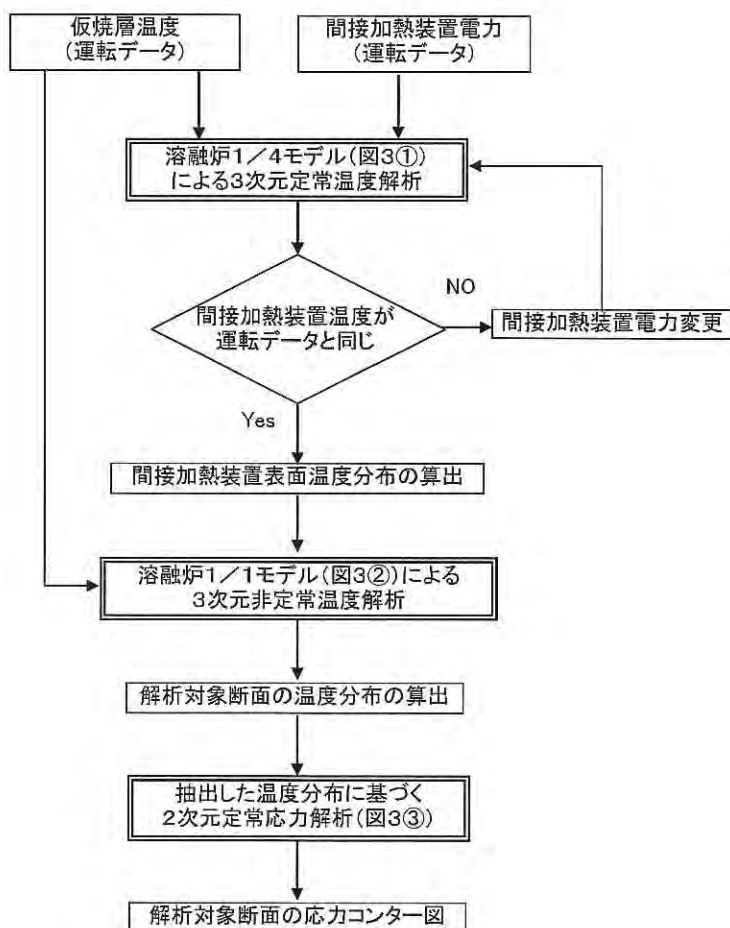


図1 熱応力解析フロー

※ 次頁以降、解析条件・結果は、経過報告(その2)から変更はない。

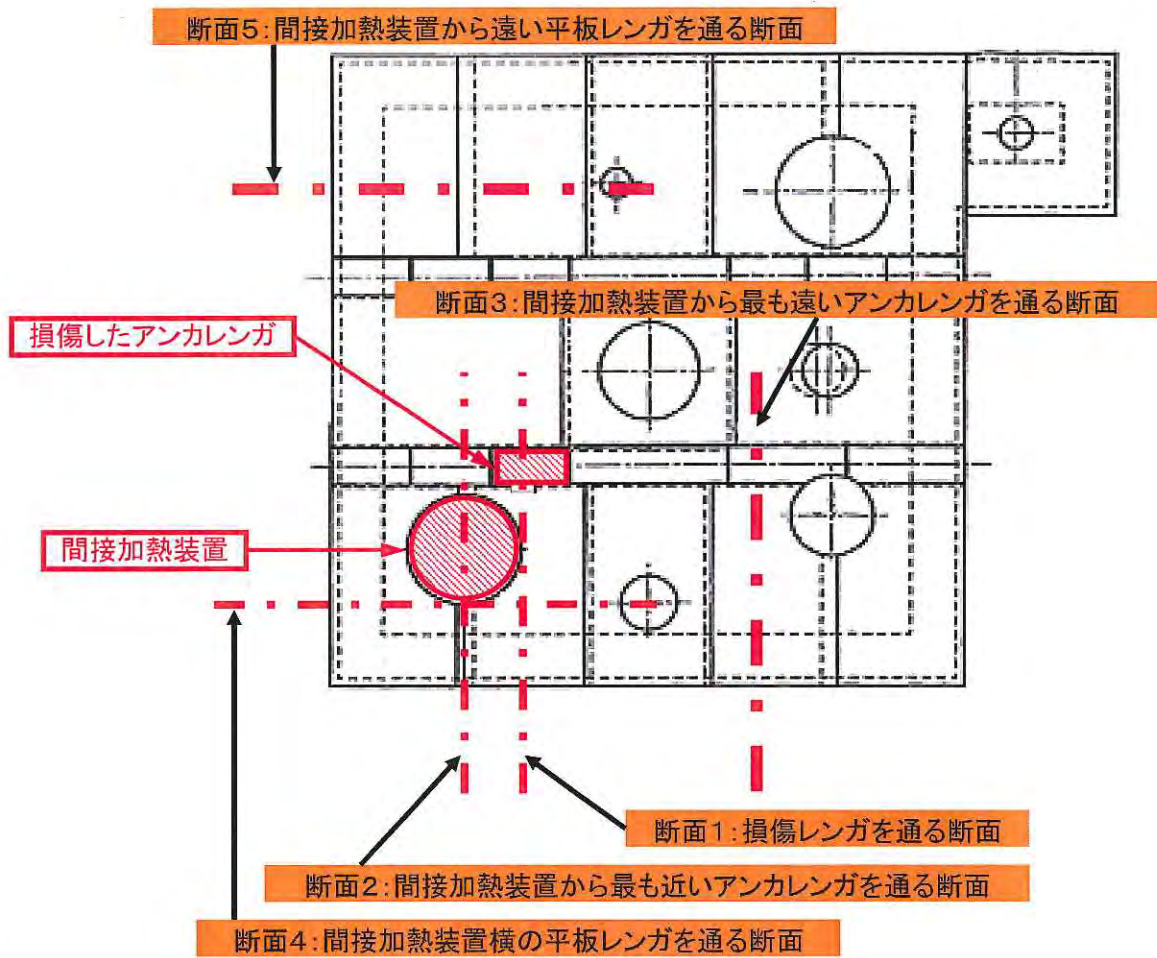
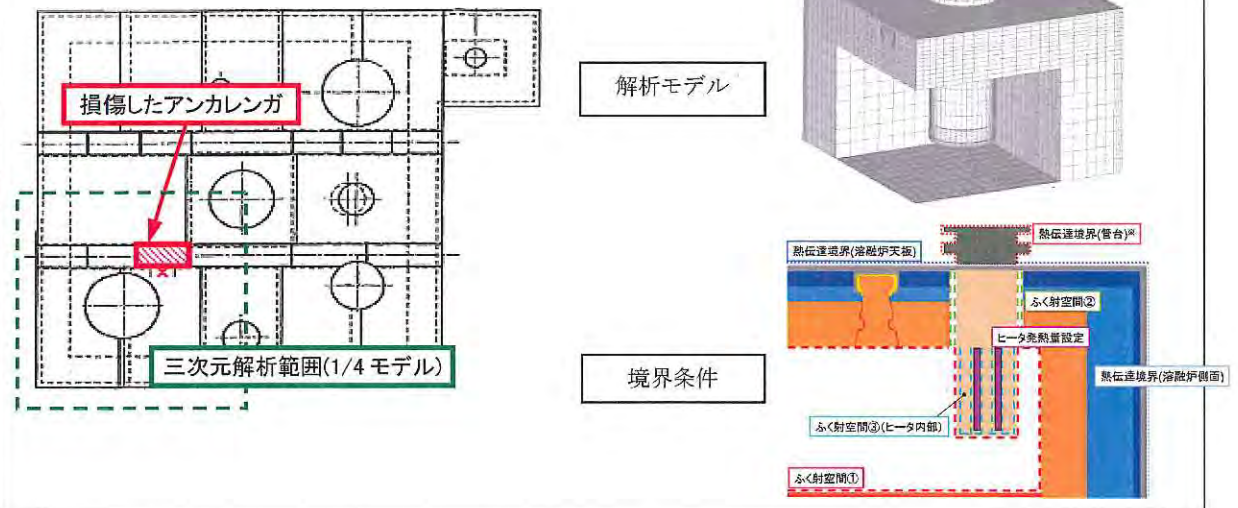


図2 解析対象断面図

① 三次元ふく射伝熱解析モデル（天井 1/4、間接加熱装置詳細モデル化）

ガラス溶融炉の運転実績（間接加熱装置温度）にあうように発熱量を調整し、間接加熱装置表面温度を求める。



② 三次元ふく射伝熱解析モデル（天井 1/1、間接加熱装置表面のみ）

- ①で求めた間接加熱装置表面温度を入力とし、天井全体の温度分布を求める。
- 気相温度を貼り付け、天井全体の温度分布を求める。

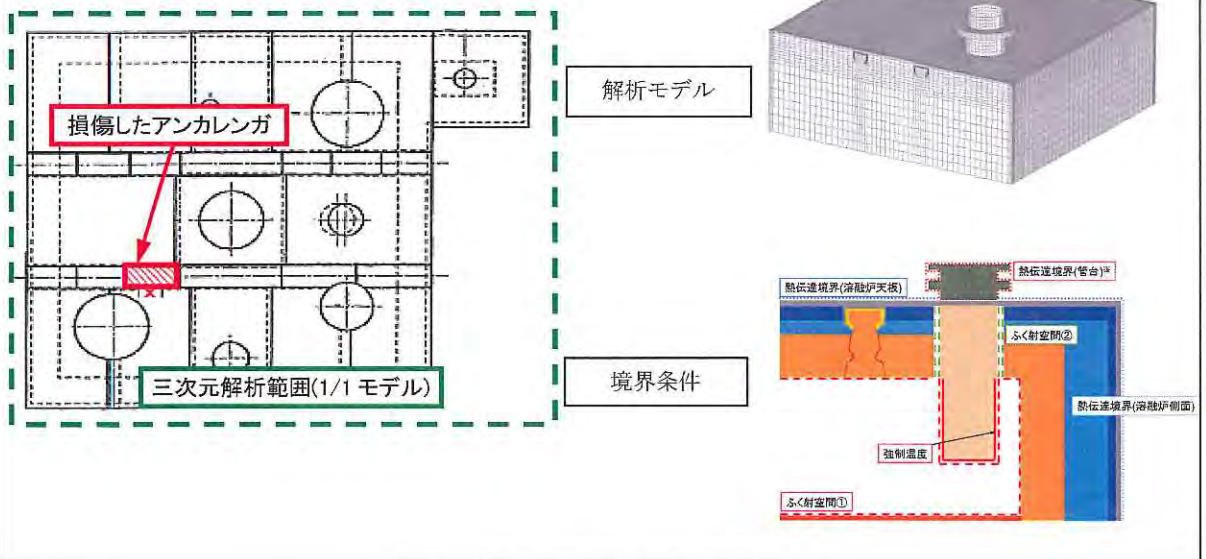
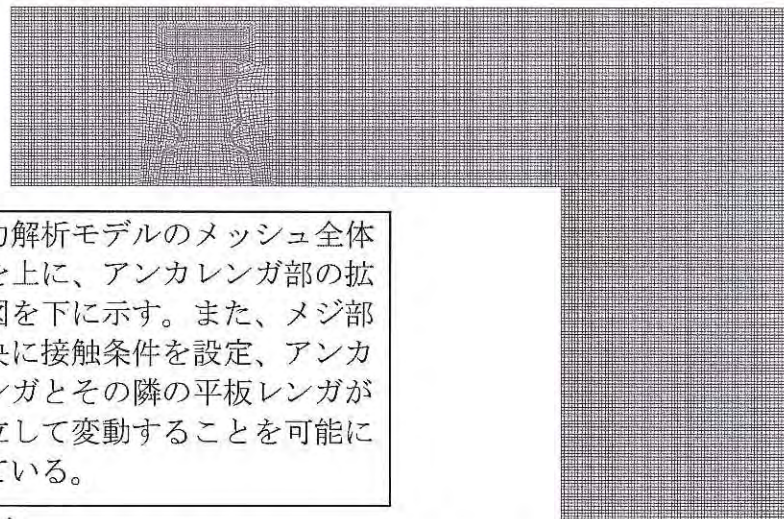
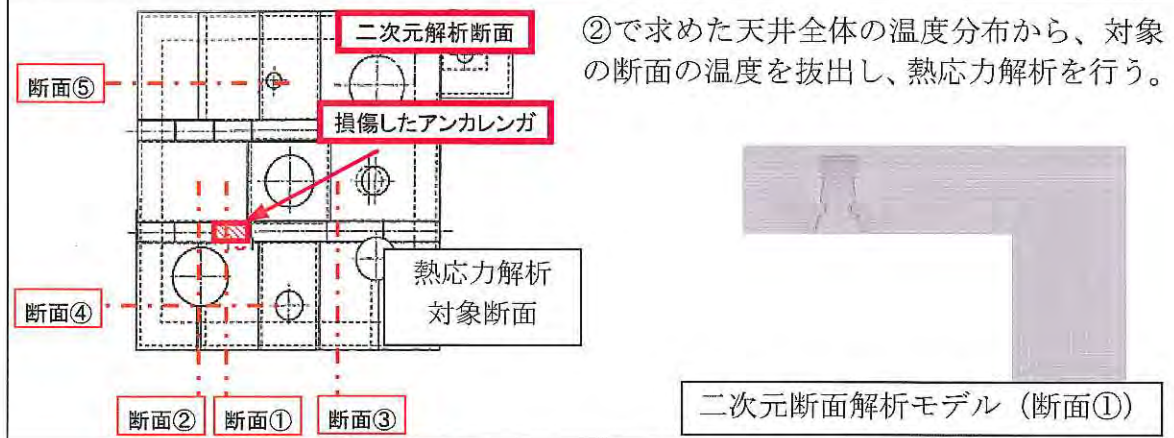
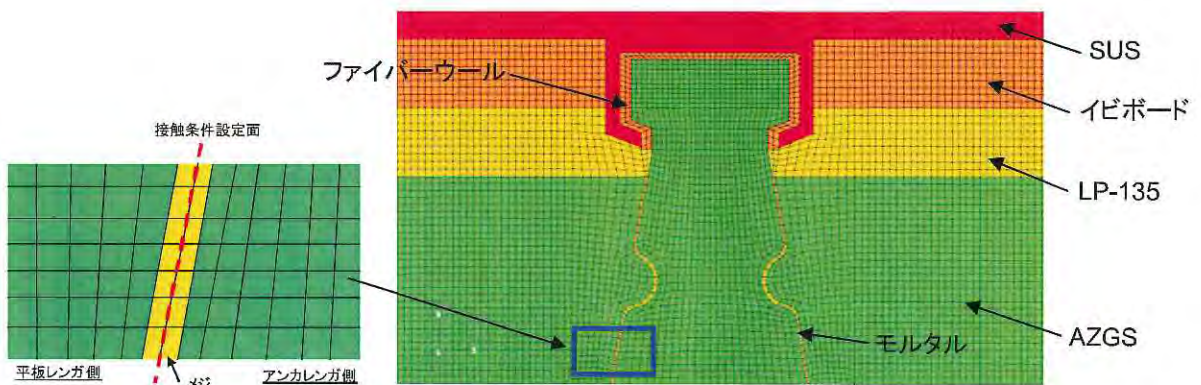


図3 天井レンガ解析モデル（1）

③ 二次元熱応力解析モデル



応力解析モデルのメッシュ図 (20,000 メッシュ)



応力解析モデルのメッシュ図 (アンカレンガ拡大図)

図3 天井レンガ解析モデル (2)

表 1, 2に解析条件を示す。それぞれの断面における各条件下での応力（天井レンガ面に垂直な方向）は表 3～7のとおりであり、間接加熱装置の近傍と遠方では装置により近い方が応力が高く、また同じ断面においては間接加熱装置温度が急激に降下する条件下において、降下温度勾配が最大の時に最も応力が高くなる結果となった。

表 1 実績による熱応力解析条件（気相温度）

No.	選定理由	断面	時期	初期温度 °C	温度変化率 °C/60min
1	温度が高い条件	断面 1	—	<input type="text"/>	(一定)
2	降温	断面 1	化学試験	<input type="text"/>	-55
3	温度勾配最大	断面 1	化学試験	<input type="text"/>	-68
4	初期温度最低	断面 1	化学試験	<input type="text"/>	-40

表 2 実績による熱応力解析条件（間接加熱装置温度）

No.	選定理由	断面	時期	初期温度 °C	温度変化率 °C/10min
5	温度が高い条件	断面 1	化学試験	<input type="text"/>	(一定)
6	降温	断面 1	化学試験	<input type="text"/>	-142
7	温度勾配最大	断面 1	化学試験	<input type="text"/>	-249
8	初期温度最低	断面 1	アクティブ試験	<input type="text"/>	-150
9	温度勾配最大	断面 2	化学試験	<input type="text"/>	-249
10	温度勾配最大	断面 4	化学試験	<input type="text"/>	-249
11	温度勾配最大	断面 3	化学試験	<input type="text"/>	-249
12	降温	断面 5	化学試験	<input type="text"/>	-207

(1) 間接加熱装置近傍部

表3 損傷レンガ部

対象断面	条件概要	最大発生応力[MPa]		
		アンカレンガ	右平板レンガ	
断面1	気相温度が高い条件( <input type="text"/> °C)[ケース No.1]	1.7	<1.0	
	気相温度が急激に変化する条件	降温[ケース No.2]	1.6	1.3
		温度勾配最大[ケース No.3]	2.3	2.3
		初期温度最低[ケース No.4]	1.5	<1.0
	間接加熱装置温度が急激に降下する条件	温度が高い条件( <input type="text"/> °C)[ケース No.5]	1.10	<1.0
		降温[ケース No.6]	1.2	2.3
		温度勾配最大[ケース No.7]	3.4	5.2
		初期温度最低[ケース No.8]	1.9	4.5

表4 アンカレンガ部(間接加熱装置に最も近いアンカレンガ)

対象断面	条件概要	最大発生応力[MPa]	
		アンカレンガ	左平板レンガ
断面2	間接加熱装置温度が急激に降下する条件 [ケース No.9]	3.80*	—*

※ 間接加熱装置の穴を通る2次元断面での応力解析ができない(穴部の周囲で熱ひずみが伝わらない)ため、穴部にレンガを詰めた仮想的なモデルで応力解析を実施。このためこの値は参考値とする。

表5 平板レンガ部(間接加熱装置に最も近い平板レンガ)

対象断面	条件概要	最大発生応力[MPa]	
		左メジ部凹側	右メジ部凹側
断面4	間接加熱装置温度が急激に降下する条件 [ケース No.10]	4.2	2.6

(2) 間接加熱装置遠方部

表6 アンカレンガ部(間接加熱装置から最も遠いアンカレンガ)

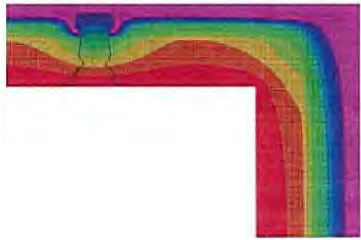

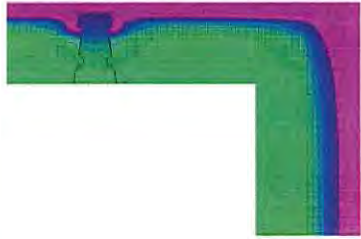

対象断面	条件概要	最大発生応力[MPa]	
		アンカレンガ	右平板レンガ
断面3	間接加熱装置温度が急激に降下する条件 [ケース No.11]	2.1	2.3

表7 平板レンガ部(間接加熱装置から最も遠い平板レンガ)

対象断面	条件概要	最大発生応力[MPa]	
		左メジ部凹側	右メジ部凹側
断面5	間接加熱装置温度が急激に降下する条件 [ケース No.12]	2.0	2.4

※ [ ] 内の解析条件ケース No. は別添資料：添付資料-16のケース番号を示す。

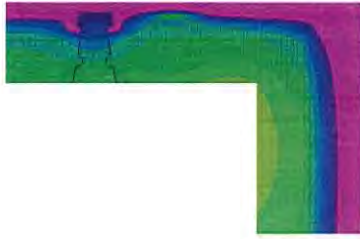

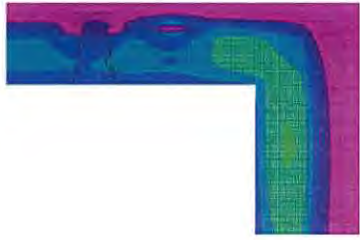

断面1における損傷レンガの温度コンター図 (1/2)

対象断面	条件概要			対象断面	条件概要		
断面1	ケース No.1 気相温度温度が高い条件 (気相温度 <input type="text"/> °C一定)			断面1	ケース No.2 気相温度が急激に 低下する条件 (気相温度初期 温度 <input type="text"/> °C)	CT (降温)	
断面1	ケース No.3 気相温度が急激に 低下する条件 (気相温度初期 温度 <input type="text"/> °C)	CT (温度勾配最大)		断面1	ケース No.4 気相温度が急激に 低下する条件 (気相温度初期 温度 <input type="text"/> °C)	CT (初期温度最低)	

※全て最大応力が確認された時点の温度分布


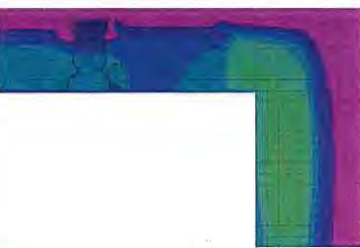





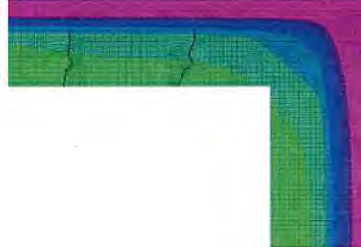


断面1における損傷レンガの温度コンター図 (2/2)

対象断面	条件概要			対象断面	条件概要		
断面1	ケース No.5 間接加熱装置温度が高い条件 (気相温度 <input type="text"/> °C一定)			断面1	ケース No.6 間接加熱装置温度が急激に降下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)		
断面1	ケース No.7 間接加熱装置温度が急激に降下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (温度勾配最大)		断面1	ケース No.8 間接加熱装置温度が急激に降下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)	AT (初期温度最低)	


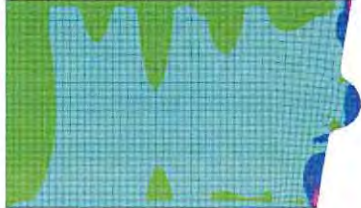






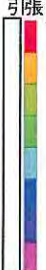
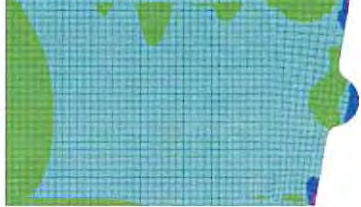
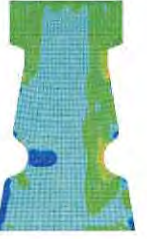

※全て最大応力が確認された時点の温度分布

断面1以外の断面における温度コンター図



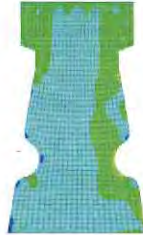
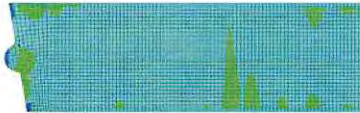

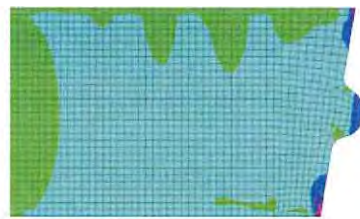



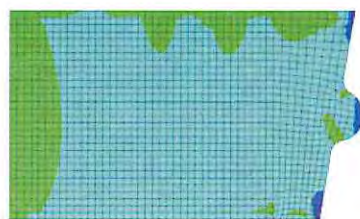


対象断面	条件概要			対象断面	条件概要				
断面2	ケース No.9 間接加熱装置温度が急激に低下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (温度勾配最大)			断面3	ケース No.10 間接加熱装置温度が急激に低下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (温度勾配最大)		
断面4	ケース No.11 間接加熱装置温度が急激に低下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (温度勾配最大)			断面5	ケース No.12 間接加熱装置温度が急激に低下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (温度勾配最大)		

※全て最大応力が確認された時点の温度分布

断面1における損傷レンガの応力コンター図 (1/3)

対象断面	条件概要			損傷レンガ左の平板レンガ	損傷レンガ	損傷レンガ右の平板レンガ
断面1	ケース No.1 気相温度温度が高い条件 (気相温度 <input type="text"/> °C一定)		引張  圧縮			
	ケース No.2 気相温度が急激に降下する条件 (気相温度初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (降温)	引張  圧縮			
	ケース No.3 気相温度が急激に降下する条件 (気相温度初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (温度勾配最大)	引張  圧縮			

断面 1 における損傷レンガの応力コンター図 (2/3)

対象断面	条件概要			損傷レンガ左の平板レンガ	損傷レンガ	損傷レンガ右の平板レンガ
断面 1	ケース No.4 気相温度が急激に低下する条件 (気相温度初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (初期温度最低)	 <p>引張 圧縮</p>			
	ケース No.5 間接加熱装置温度が高い条件 (気相温度 <input type="text"/> °C一定)		 <p>引張 圧縮</p>			
	ケース No.6 間接加熱装置温度が急激に低下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (降温)	 <p>引張 圧縮</p>			

断面1における損傷レンガの応力コンター図 (3/3)

対象断面	条件概要			損傷レンガ左の平板レンガ	損傷レンガ	損傷レンガ右の平板レンガ
断面1	ケース No.7 間接加熱装置温度が急激に低下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (温度勾配最大)	引張  圧縮			
		AT (初期温度最低)	引張  圧縮			

断面1以外の断面における応力コンター図 (1/2)

対象断面	条件概要			アンカレンガレンガ左の平板レンガ	損傷レンガ	アンカレンガ右の平板レンガ
断面2	ケース No.9 間接加熱装置温度が急激に低下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (温度勾配最大)	引張  圧縮			<p>断面2の応力解析において、間接加熱装置の穴を通る2次元断面での応力解析ができない(穴部の周縁で熱ひずりが生じやすい)ため、穴部レンガを詰めた3次元静的モデルで応力解析を実施。このためこの値は参考値とする。</p>

断面 1 以外の断面における応力コンター図 (2/2)

対象断面	条件概要			アンカレンガレンガ左の平板レンガ	損傷レンガ	アンカレンガ右の平板レンガ
断面 3	ケース No.10 間接加熱装置温度が急激に低下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (温度勾配最大)	引張  圧縮			

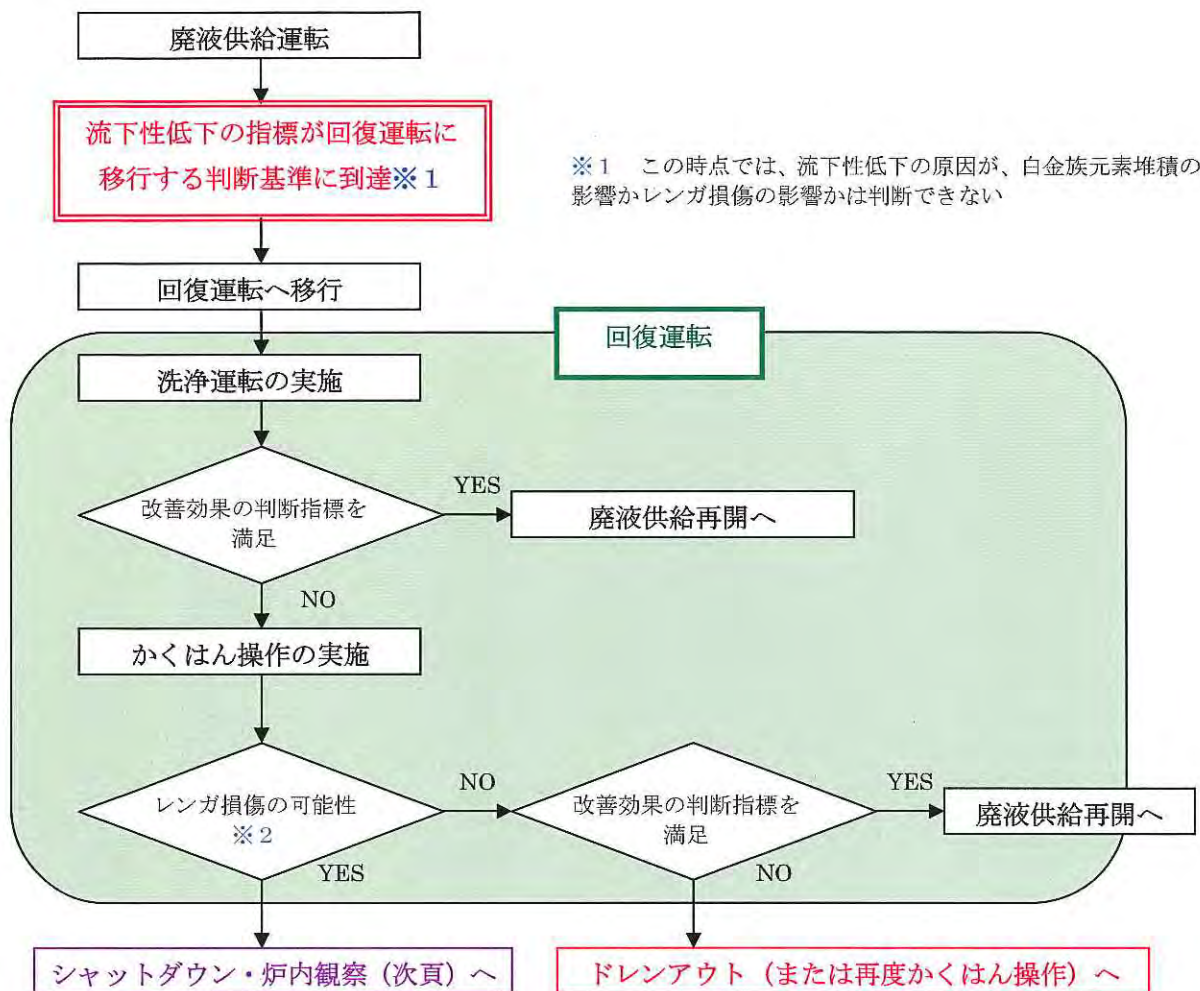
対象断面	条件概要			左の平板レンガ	中央平板レンガ	右の平板レンガ
断面 4	ケース No.11 間接加熱装置温度が急激に低下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (温度勾配最大)	引張  圧縮			
断面 5	ケース No.12 間接加熱装置温度が急激に低下する条件 (間接加熱初期温度 <input type="text"/> °C ガラス液面初期温度 <input type="text"/> °C)	CT (初期温度最高)	引張  圧縮			

## 今後の運転におけるレンガ一部損傷に対する対応フロー

間接加熱装置のヒータ温度降下速度を制御することにより、レンガが損傷する可能性を低減することが可能であるが、ガラス溶融炉内の負圧に係るインターロックの作動や電源異常等による計画外の間接加熱装置の加熱停止は起こる可能性があり、その際に天井レンガが損傷する可能性は否定できない。

レンガが損傷した場合には、今回の天井レンガ損傷事象で見られたように、その影響は溶融ガラス流下性の低下として現れる可能性がある。溶融ガラス流下性の低下が見られた場合の対応としては、平成20年6月11日に報告した「再処理施設高レベル廃液ガラス固化設備の安定運転条件検討結果報告」で示す対応手順に従い対応していくこととなるが、その対応の中で溶融ガラス流下性の低下が損傷したレンガによる影響であると推定された場合には、レンガの回収作業を行うこととする。

具体的には、次図のとおり、今後の運転においてレンガの損傷事象に対応していくこととする。



※1 この時点では、流下性低下の原因が、白金族元素堆積の影響かレンガ損傷の影響かは判断できない

※2

直棒挿入時に、

① 底部電極中央穴に挿入できない

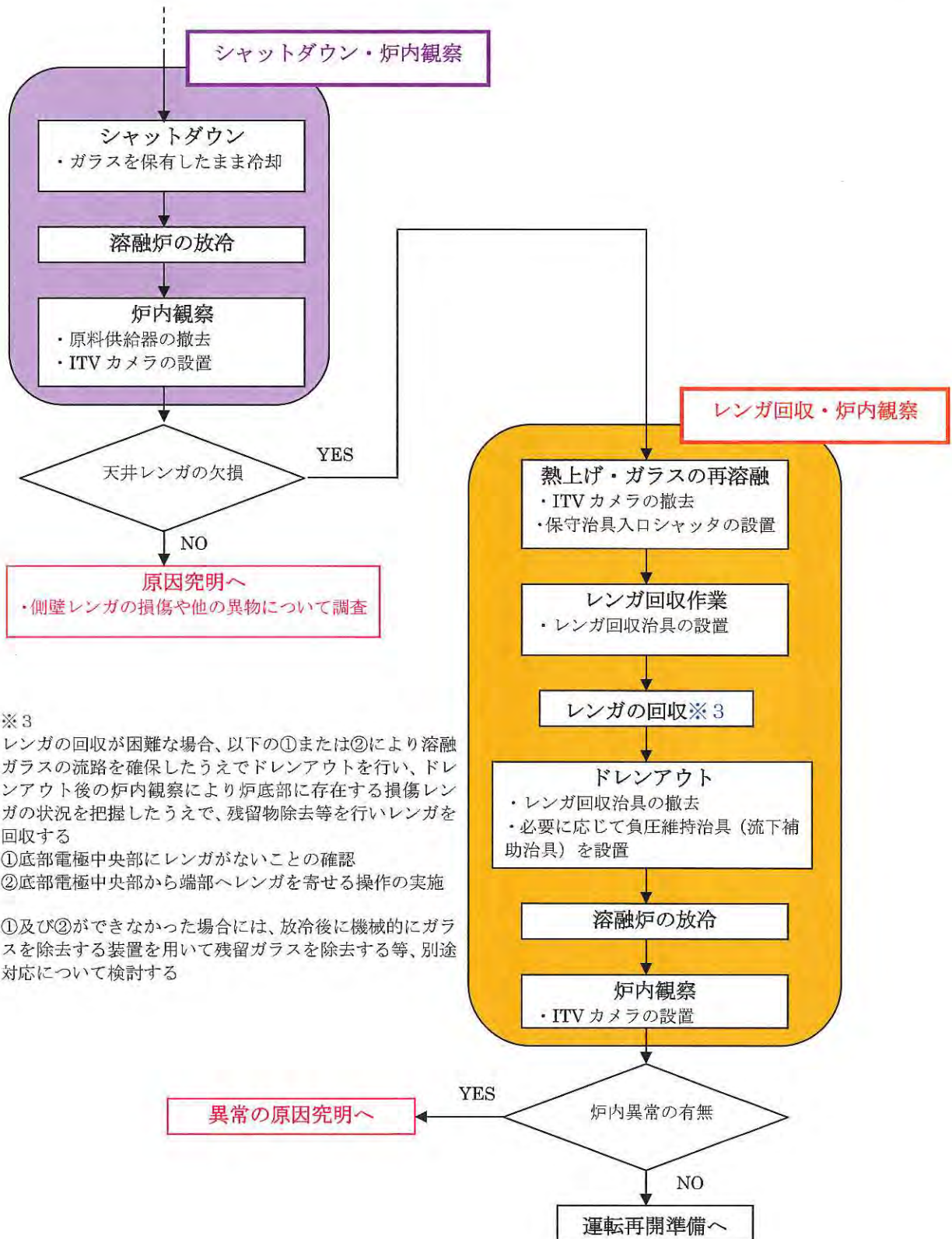
② 底部電極上面高さより高い位置で直棒の降下が止まる

場合、または、曲棒操作時に

③ 引っ掛かりがある

場合には、レンガ損傷の可能性ありと考え（ただし、①の場合にはかくはん棒を取り出し、真直度確認を実施）、さらに、炉内温度、抵抗及び流下映像等の運転・監視データ等を確認したうえで総合的にレンガ損傷の可能性があるかを判断する。





※3

レンガの回収が困難な場合、以下の①または②により溶融ガラスの流路を確保したうえでドレンアウトを行い、ドレンアウト後の炉内観察により炉底部に存在する損傷レンガの状況を把握したうえで、残留物除去等を行いレンガを回収する

①底部電極中央部にレンガがないことの確認

②底部電極中央部から端部へレンガを寄せる操作の実施

①及び②ができなかった場合には、放冷後に機械的にガラスを除去する装置を用いて残留ガラスを除去する等、別途対応について検討する