

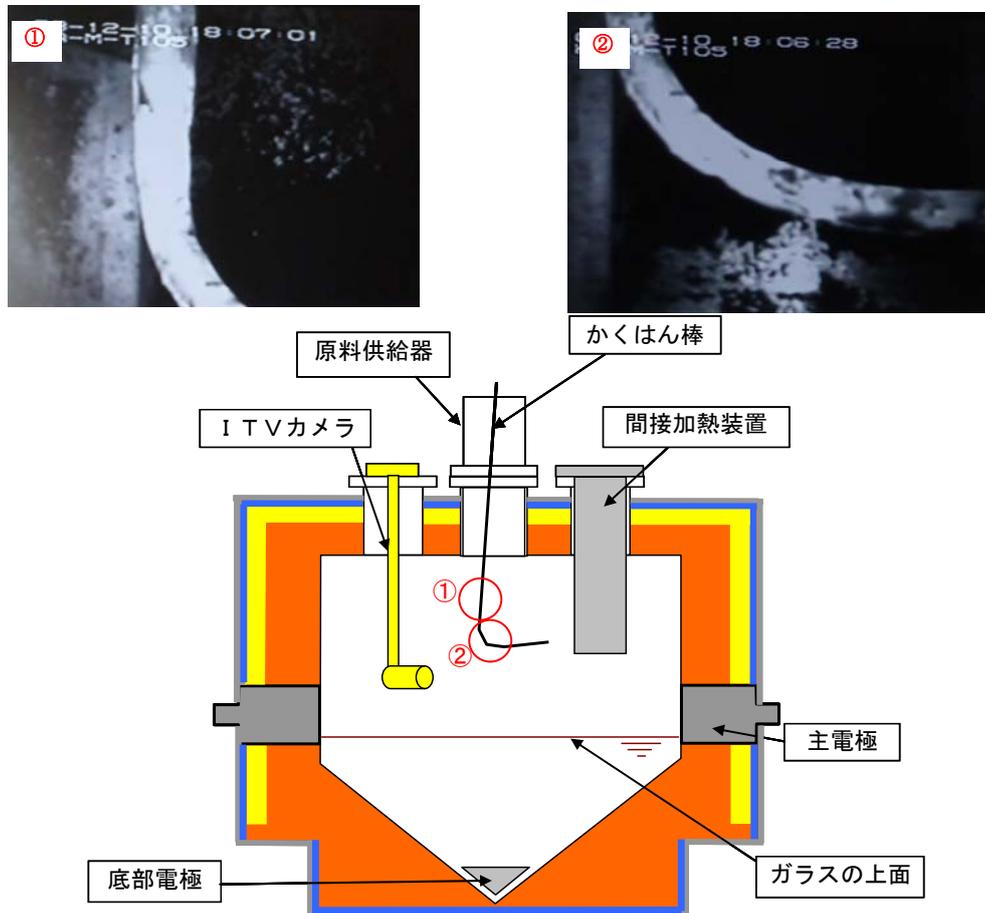
天井レンガの一部損傷事象の原因究明及び対策の検討

1. 発生事象の概要

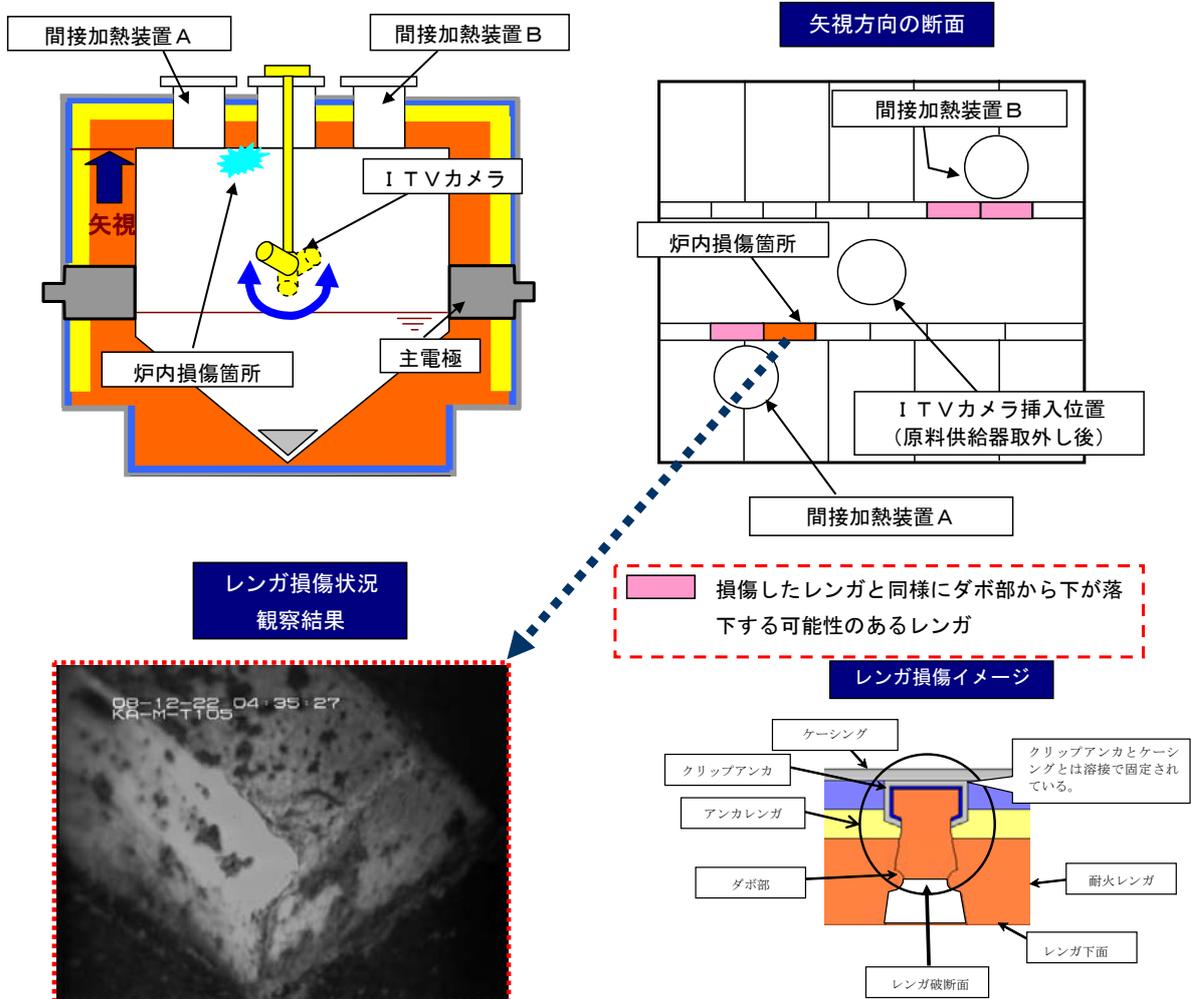
高レベル廃液ガラス固化建屋のガラス溶融炉（A系列）における運転性能確認試験実施中に、流下ノズルからの流下速度の低下及び白金族元素が炉底部に堆積したことを示す運転データの変化が見られたことから、試験開始前に設定した手順に従い、かくはん棒を用いて炉底部のかくはん操作（炉底部に堆積したと考えられる白金族元素を強制的に流下ノズルから流下させる操作）を実施していた。かくはん棒による操作が終わり、かくはん棒をガラス溶融炉から引き抜く作業に移行したが、かくはん棒の引き抜き動作がしづらい状況が確認されたため、引き抜き作業を取り止めた。

かくはん棒の引き抜き動作がしづらい状況になった原因を確認するため、ガラス溶融炉にI T Vカメラを挿入しかくはん棒の状態を観察することとした。そのため、I T Vカメラの稼動範囲確保やI T Vカメラへの放射線の影響を考慮し、ガラス溶融炉内のガラスレベルを下げることを目的として、ガラスを抜き出す運転であるガラスレベル調整運転を行った。その後、ガラス溶融炉の加熱を停止、放冷した後、ガラス溶融炉内にI T Vカメラを挿入し、かくはん棒の状態を観察した。

その結果、12月10日18時頃、かくはん棒が曲がっていることを確認した。



その後、炉内の損傷の有無を確認するため、ガラス溶融炉内部を詳細観察したところ、12月22日4時頃、ガラス溶融炉天井レンガの一部が損傷していることが確認された。

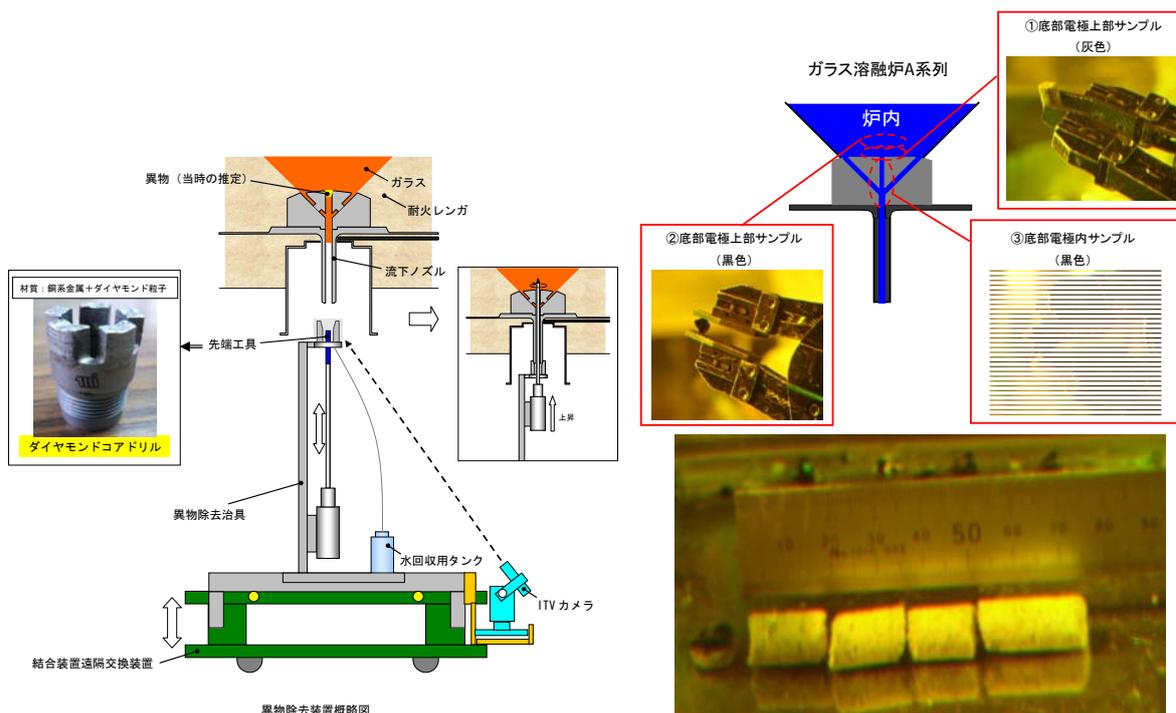


## 2. 異物除去作業

ガラスレベル調整運転の4バッチ目において、流下ガラスの流下速度が著しく低下したことから、ガラス溶融炉内の残りのガラスを抜き出し炉底部の観察を行うための準備作業として、流下ガラスの流路を確保することを目的に、異物除去作業を実施した。

異物除去作業において、使用したドリルで底部電極上部から採取された試料の中に灰色の物質が確認された。

採取された物質を分析した結果、灰色の物質は、天井レンガの一部であることが確認された。



①底部電極上部で採取された灰色サンプル

①底部電極上部サンプル(灰色)の分析結果

	実測値	参考値	
	①底部電極上部 サンプル (灰色) wt%	耐火レンガ (接液部) wt%	耐火レンガ (気相部) wt%
Na <sub>2</sub> O	検出下限値未満	0.5 (0.009)	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (※)	48.9 (1.000)	58.0 (1.000)	70.0 (1.000)
SiO <sub>2</sub> (※)	5.8 (0.118)	1.5 (0.026)	9.8 (0.140)
CaO	検出下限値未満	0.5 (0.009)	—
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	検出下限値未満	6.0 (0.103)	0.5 (0.007)
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	検出下限値未満	27.3 (0.471)	—
ZrO <sub>2</sub>	11.7 (0.239)	—	19.5 (0.279)
MgO	検出下限値未満	6.0 (0.103)	—
TiO <sub>2</sub>	検出下限値未満	0.1 (0.002)	—

②底部電極上部サンプル(黒色)及び③底部電極内サンプル(黒色)の分析結果

	実測値		参考値
	②底部電極上部 サンプル (黒色) wt%	③底部電極内 サンプル(黒色) wt%	最終パッチガラス 組成 (計算値) wt%
Li	2.6	2.8	3.0
B	14.4	14.4	14.4
Na	10.9	9.6	10.0
Al (※)	4.9	5.6	5.0
Si (※)	33.5	36.5	48.2
Ca	2.7	2.7	3.0
Fe	0.8	0.8	0.8
Ni	0.2	0.2	0.4
Cr	検出下限値未満	0.3	0.05
Zn	2.7	2.8	3.0
Zr	1.3	1.6	1.8
Mo	1.1	1.1	1.2

### 3. 確認されていた事実の整理

A032バッチ以降の回復運転において、かくはん棒を用いた運転を行っていることから、A032バッチ以降でどのような検討や運転を行ってきたかについて、事実の整理を行った。

#### (1) A032以降の回復運転における状況

##### ①A032～A036 洗浄運転及び炉底かくはん(曲棒)

- ・A032で回復運転に移行し、A034までの3バッチの洗浄運転実施後、A035より炉底かくはん(曲棒)を行っていたところ、A0

36において負圧維持オリフィスの開動作不調が発生したため洗浄運転に変更した。

②A037～A040 模擬ガラスビーズによる洗浄運転

③A041 炉底かくはん（曲棒）

- ・負圧維持オリフィスを交換（約14日間気相部を高温保持）し、炉底かくはん（曲棒）運転へ復帰した。

④A042～A044 炉底かくはん（直棒）

- ・直棒（2号機<sup>※1</sup>及び1号機）を使用した流下ノズル貫通操作ができなかった。（A042、A043）

※1：アクティブ試験第4ステップから使用していた直棒（1号機）から棒の太さを一部太くするなどの改良を行った直棒

- ・直棒（2号機）におもり治具を設置してかくはん操作を実施した。（A044）

⑤A045～A048 炉内ガラスレベル低下

- ・4バッチ目（A048）の流下ガラスの流下速度が著しく低下した。それまでの流下においても流下速度が遅くなる状態が確認されているが、ガラスレベル調整運転4バッチ目は極端に遅いものであった。（添付資料-6参照）4バッチ目の流下時点で、かくはん棒（直棒）を観察するためのITVカメラを挿入できるレベルまでガラスの抜き出しができていたため、この時点でガラスレベル調整運転を終了した。

(2) A042～A044におけるかくはん棒（直棒）によるかくはん操作について

直棒によるかくはん操作を実施した際に確認された事実を以下に示す。

①A042 かくはん棒（直棒）によるかくはん操作

- ・アクティブ試験第4ステップから使用していたかくはん棒（直棒（1号機））から棒の太さを一部太くするなどの改良を行ったかくはん棒（直棒（2号機））を使用し降下させたところ、一度は底部電極上面より約100mm上部で停止したが、再度、上昇・下降操作を試みたところ、流下ノズルまで貫通させることができた。その後、かくはん棒（直棒（2号機））で白金族元素の抜き出しを促進するために底部電極中央穴周辺のかくはん（以下、清掃操作という。）を行い、再度、流下ノズルまで貫通させる操作を実施したところ、底部電極中央穴に挿入することができなかった。

②A042からA043への移行にあたって

- ・A042で行った清掃操作によってかくはん棒（直棒（2号機））が変形した可能性があると考え、A043ではかくはん棒（直棒（1号機））

を使用することとした。

③A043 かくはん棒（直棒）によるかくはん操作

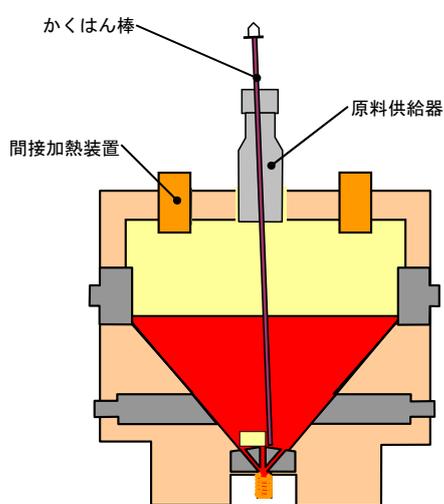
- ・かくはん棒（直棒（1号機））での操作を行ったが、A042同様に底部電極中央穴に挿入できなかった。

④A043からA044への移行にあたって

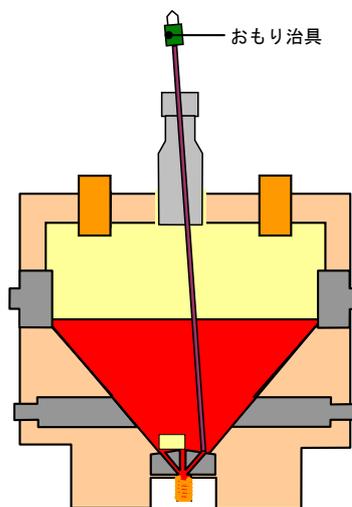
- ・かくはん棒（直棒）を底部電極中央穴に挿入できない原因として、かくはん棒（直棒）が湾曲していることが考えられたため、かくはん棒（直棒）の外観確認を行い、真っ直ぐであることが確認されたかくはん棒（直棒（2号機））を使用して再度操作を行うこととした。（1号機は多少の湾曲が確認された。）
- ・さらに、かくはん棒（直棒）を底部電極中央穴に挿入できない原因として、白金族元素等の沈降により炉底部のガラス粘性が高くなっている可能性が考えられたことから、粘性による抵抗よりも強い力で押込むことにより底部電極中央穴への挿入が可能になると考え、直棒の上部におもり治具を設置してかくはん（貫通）操作を行うこととした。

⑤A044 かくはん棒（直棒）によるかくはん操作

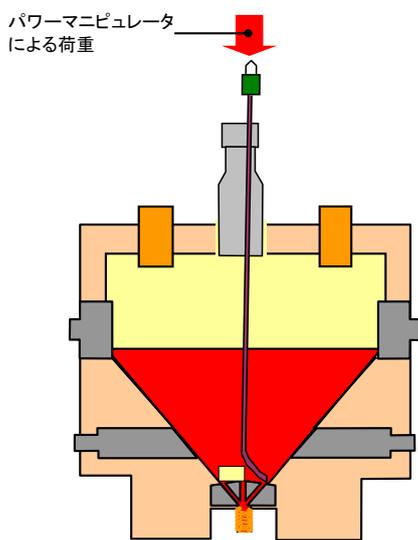
- ・かくはん棒（直棒）上部のマーキング位置から、かくはん棒（直棒（2号機））におもり治具を設置したことにより、かくはん棒（直棒）の先端が底部電極中央穴に入った位置まで下降したものと推定した。その後、おもり治具を上下させてもそれ以上深く挿入することが出来なかったため、白金族元素等の沈降により炉底部のガラス粘性が高くなっているのであれば、さらに力を加えれば直棒が挿入できると考え、貫通力を補助するためにおもり治具の上からパワーマニピュレータで押込む操作を行った。
- ・押し込み操作によりかくはん棒（直棒）が降下した。しかし、かくはん棒（直棒）が底部電極中央穴に貫通した場合は、流下ノズルからの流下状況（映像）に変化が見られるが、その変化がなかった。
- ・A044の流下後、かくはん棒をガラス熔融炉から引き抜く作業に移行したが、かくはん棒の引き抜き動作がしづらい状況が確認されたため、引き抜き作業を取り止めた。



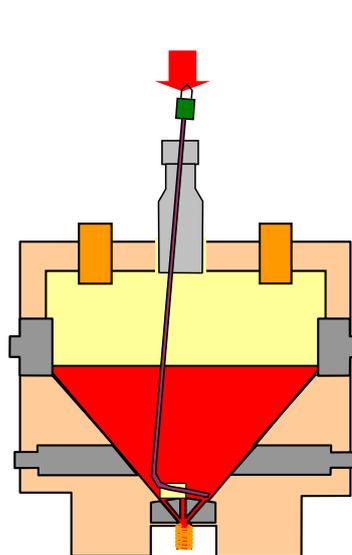
①かくはん棒(直棒)の挿入  
かくはん棒(直棒)を底部電極中央穴に挿入しようとしたが、挿入できなかった。



②おもり治具の設置  
貫通力を増加させるために、かくはん棒上部におもり治具を設置して挿入操作を行った。直棒上部のマーキング位置の状態から先端が底部電極中央穴に入った位置まで降下したものと推定した。しかし、実際はかくはん棒が斜めに設置された(鉛直に設置されなかった)状態になっていた。



③パワーマニピュレータによる加重  
おもり治具を上下させてもそれ以上かくはん棒を挿入することができなかったため、おもり治具の上からパワーマニピュレータで荷重をかけた。このときかくはん棒が鉛直に設置されていないため、偏心荷重がかくはん棒にかかり変形し始めた。



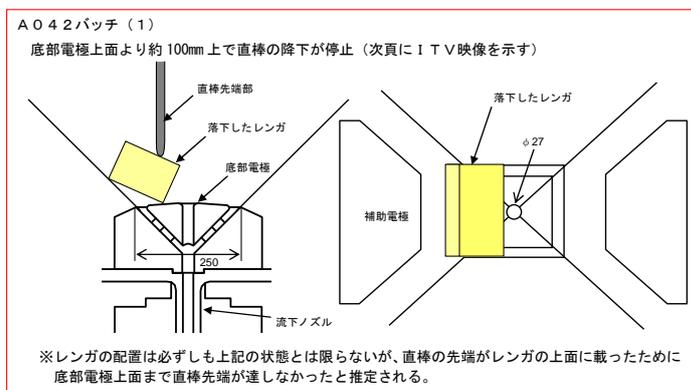
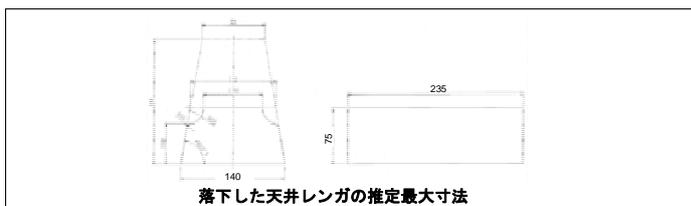
④かくはん棒の曲がり  
さらにパワーマニピュレータで荷重をかけてかくはん棒を押し込んだことにより、最終的にかくはん棒がL字形に変形した。A044の流下後、かくはん棒の引き抜き作業に移行したが、かくはん棒の引き抜き動作がしづらい状況が確認された。

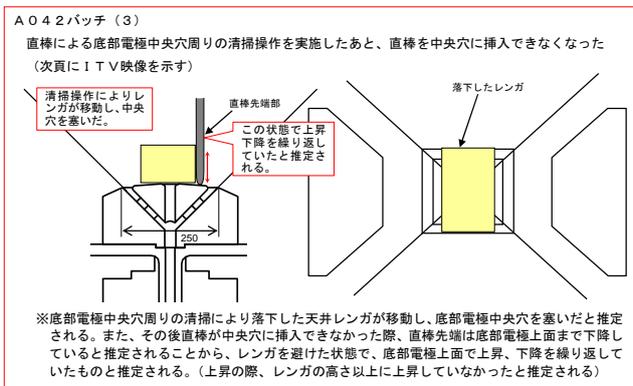
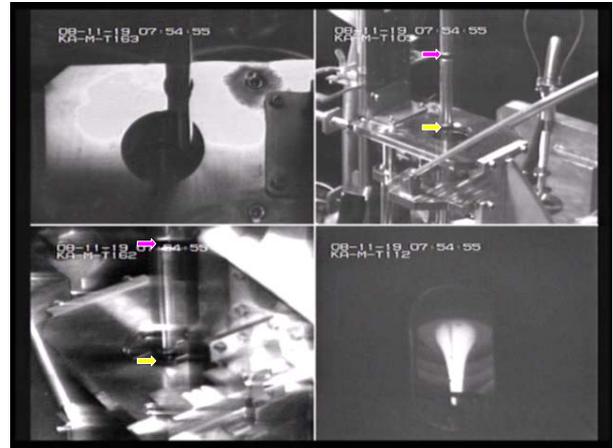
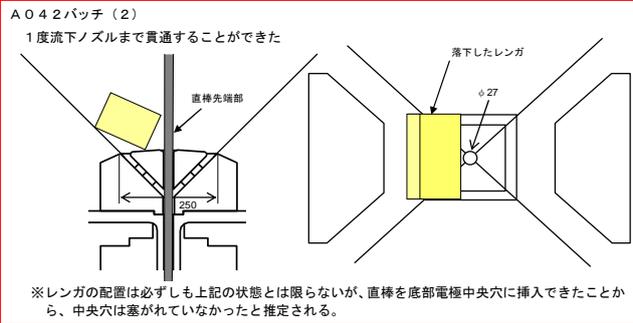
#### 4. レンガ損傷時期の推定

3 (2) で記載のとおり、A042の炉底かくはん（直棒）において、以下の状況が確認されている。

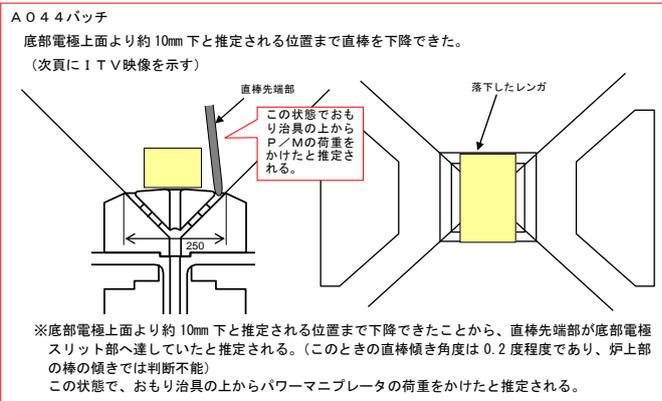
- ①一度かくはん棒は底部電極上面より約100mm上部で停止した
- ②再度挿入を試みたところ、流下ノズルまで貫通させることができた
- ③清掃操作を行った後、再び底部電極中央穴の貫通操作を行ったときには挿入できなかった

以上の事実をふまえると、この時点で炉底にレンガが存在していたと考えた場合、①ではかくはん棒がレンガと干渉し、③では底部電極上の清掃操作でレンガが底部電極中央穴上に移動したと推定でき、確認された事実の説明がつく。このことから、天井レンガの一部損傷については、A042もしくはそれ以前に発生した可能性が高いと考えられる。





A043バッチ  
1度も直棒を底部電極中央穴に挿入することができなかった。  
※A042バッチ(3)と同様の状態と推定される。

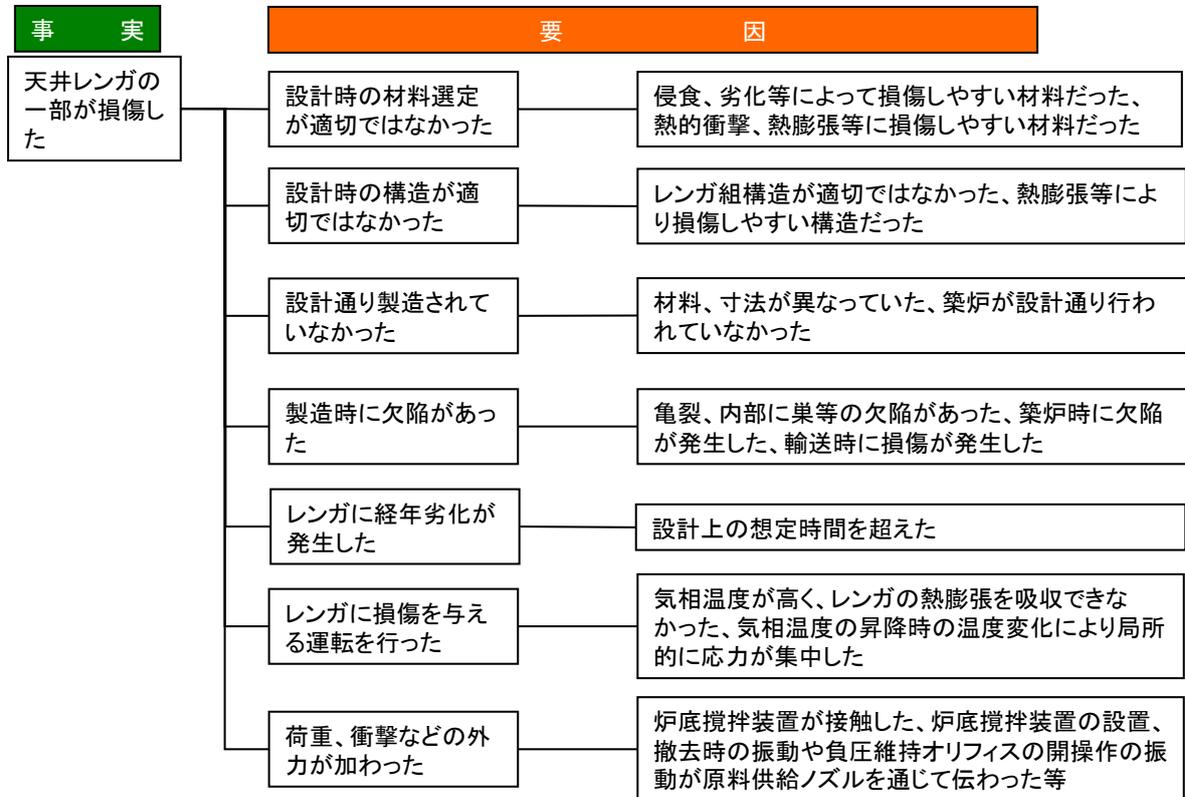


## 5. 天井レンガの一部損傷に対する要因分析

### 5. 1 要因分析

天井レンガの一部が損傷したことに対する要因分析を以下の観点で実施した。

- ①設計の観点（材料、構造）（材料の選定が適切であったか、溶融炉のレンガ組積構造が適切であったかなど）
- ②製造の観点（設計通り製造されていたか、製造、組み立て、運搬、据付時に欠陥の発生がなかったかなど）
- ③使用環境の観点（レンガ温度の使用条件を上回って使用していないかなど）
- ④外力負荷発生の観点（遠隔操作などによりレンガに過度の荷重を与えなかったかなど）



### 5. 2 調 査

#### 5. 2. 1 調査内容

要因分析を行うにあたり、以下の調査を行った。

##### 1) 設計の観点

- ・天井レンガ設計の妥当性確認として、レンガ材料の選定、レンガ組積構造の妥当性について確認

## 2) 製造の観点

- ・天井レンガの製造履歴の確認として、レンガの製造、加工、築炉、輸送、補修等の履歴を整理し、製造時に欠陥が発生した可能性の有無について確認

## 3) 使用環境の観点

- ・使用環境の調査として、温度、酸濃度等の使用環境を調査
- ・レンガの経年劣化による影響を調査
- ・ガラス溶融炉の温度上昇又は下降時のレンガの温度勾配により局部的に応力が発生した可能性が考えられるため、温度分布解析、熱応力解析を実施

## 4) 外力負荷発生の観点

- ・外力負荷発生の調査として、かくはん棒引き抜き時の天井レンガへの影響調査及びガラス溶融炉に関連する遠隔操作、炉底かくはん操作等によるガラス溶融炉に対する外力評価を調査

## 5) 他施設の調査

- ・国内外のガラス溶融炉や、一般産業界の耐火レンガで構成される炉について調査を行い、原因究明に繋がる同様の損傷事例の有無等を調査する。
- ・茨城県東海村に設置されている当社ガラス溶融炉と同規模のモックアップ設備の天井レンガについて、一部当社ガラス溶融炉と違いがあるものの、天井レンガの設計（材料、構造）や経年劣化による影響調査の一環として、表面状態観察、打音検査、超音波探傷検査等を実施

### 5. 2. 2 調査状況

天井レンガ損傷に係る原因究明については、今後実施するレンガの回収、炉内観察の結果を踏まえ、対策も含めて最終的な原因調査結果として最終報告書にて報告するが、これまでの原因調査の状況を以下に示す。

#### 1) 設計の観点

材料選定時のデータ等に基づき、ガラス溶融炉としての使用環境における耐食性、耐熱性を考慮して材料を選定していることを確認した。

また、レンガ組積構造も一般産業で用いられるせり構造、ダボ構造を用いた構造であり、熱膨張などの吸収代も十分であることを確認した。

## 2) 製造の観点

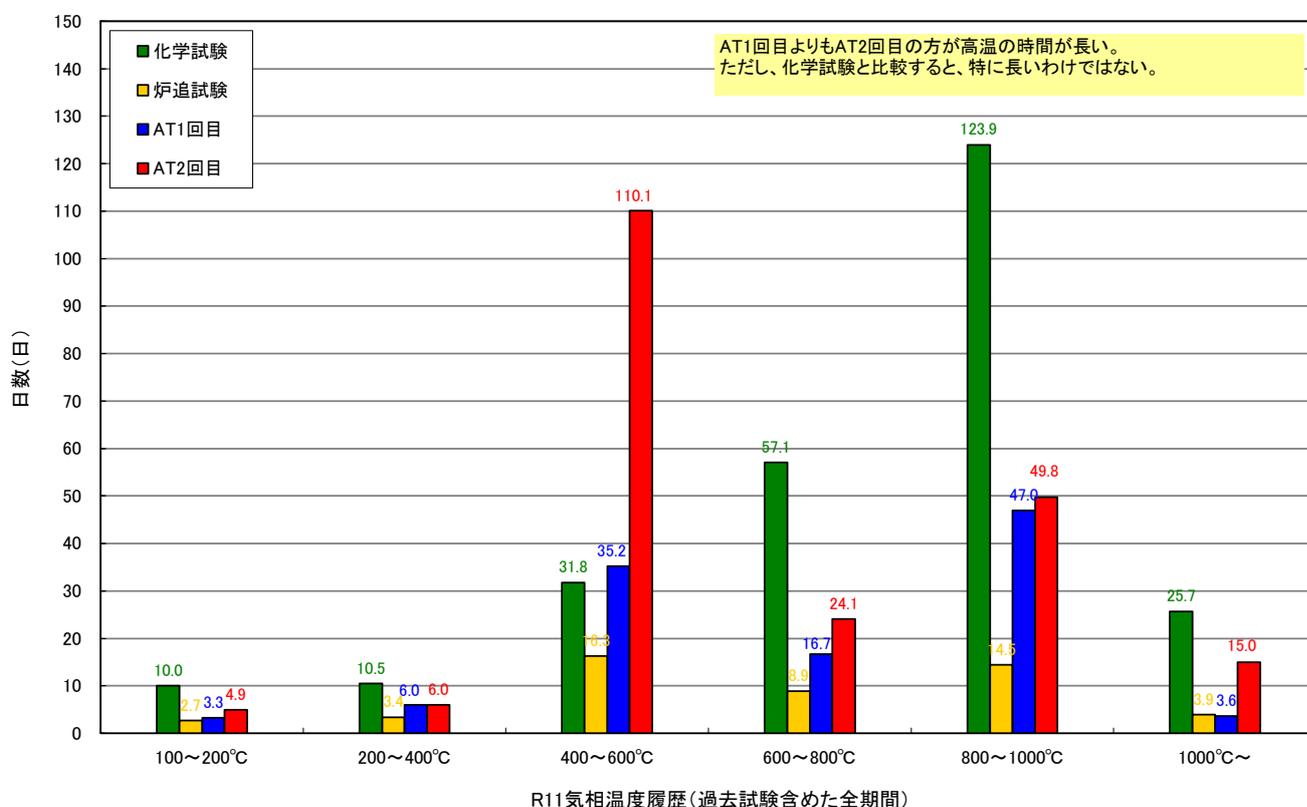
以下に示す製造記録等から製造時の検査結果等に問題がないことを確認した。

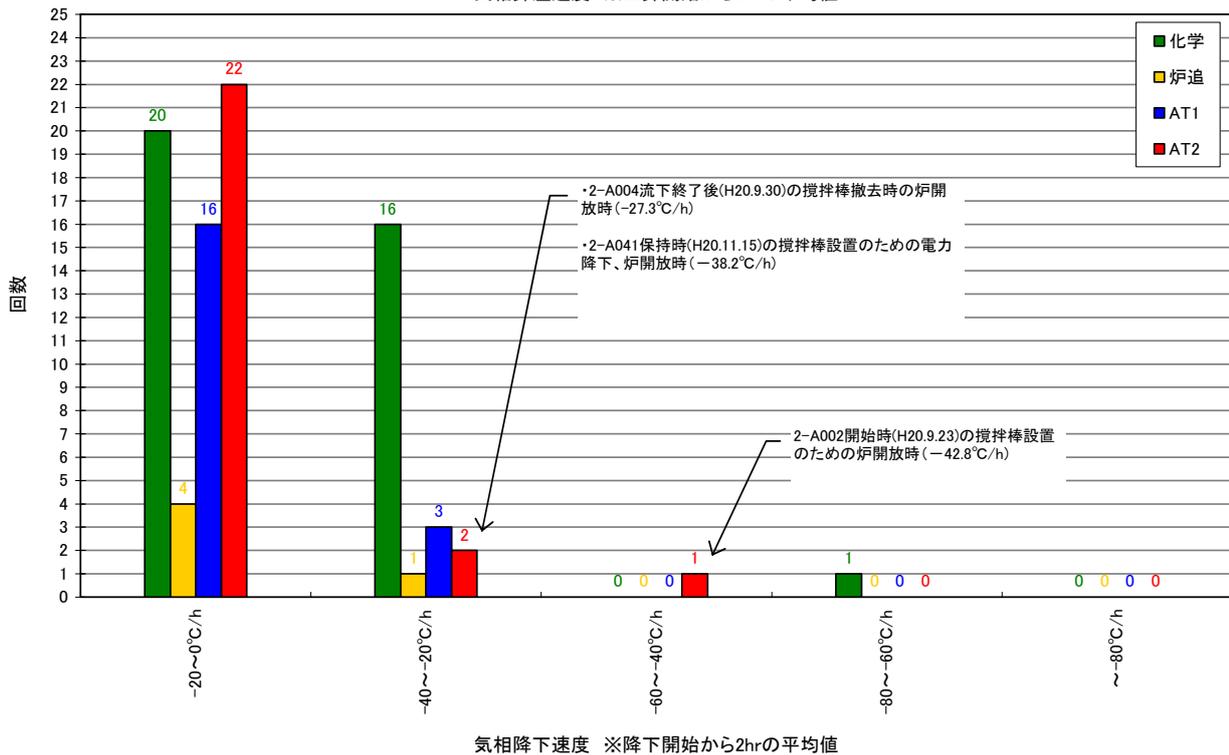
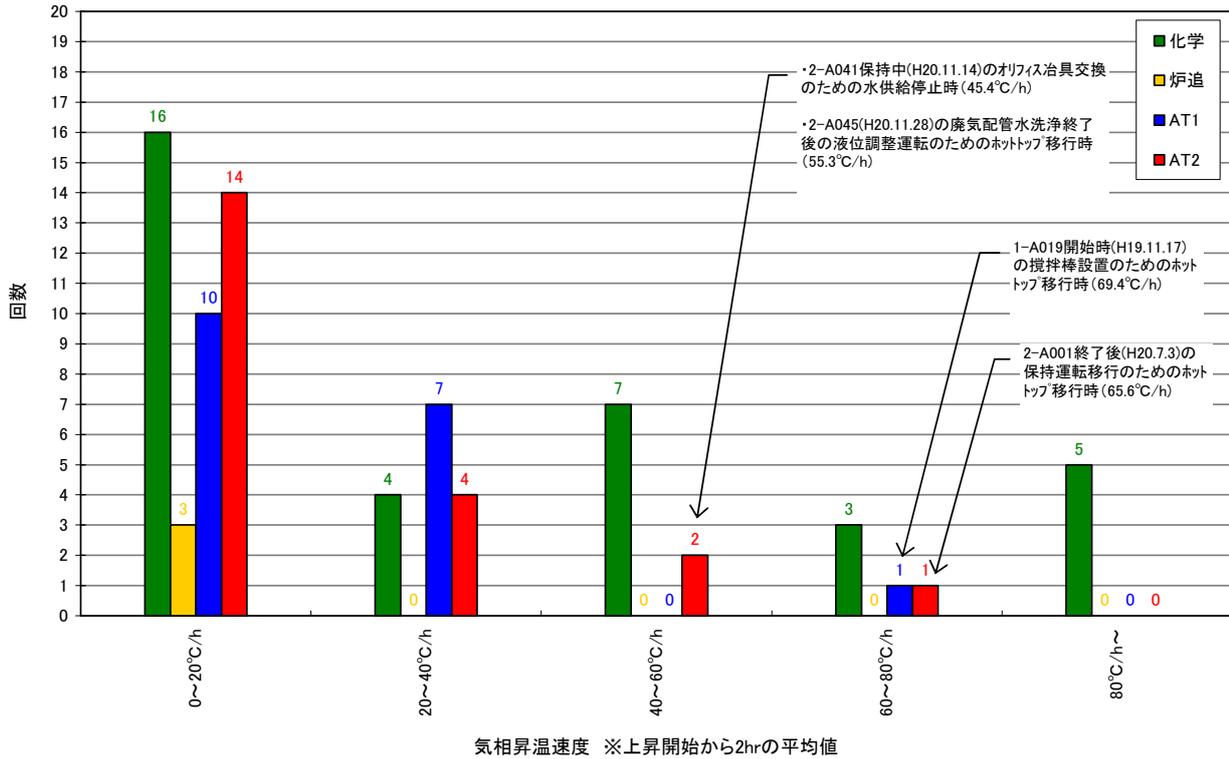
- ①材料製造段階：外観検査、寸法検査、重量測定
- ②築炉段階：材料検査、外観検査、寸法検査、据付外観検査、内部確認検査
- ③輸送：輸送中に設置した加速度計の記録確認、内部検査記録

## 3) 使用環境の観点

### ①ガラス溶融炉運転時の温度履歴調査

ガラス溶融炉Aについて過去実施したコールド試験（化学試験、実機模擬廃液試験）、アクティブ試験（第4ステップ（2007年11月～）、第5ステップ（2008年10月～））を対象として、ガラス溶融炉運転時の温度履歴を調査した。





その結果、天井レンガの耐火度 SK35 (JIS R2204「耐火れんがの耐火度の試験方法」に定める耐火度であり、直接レンガに接する気相部の温度は設計温度を上回っておらず、使用温度には問題なかった。

## ②経年劣化による影響

腐食速度等を保守的に見積もり設定した溶融炉の設計耐用年数に対し、実際の運転期間は設計耐用年数を超えていないものの、レンガの温度上昇・下降により局所的に高い応力が発生するような運転方法によっては経年劣化を加速することが考えられる。しかし、溶融炉内の詳細観察において、ITVにより確認した範囲においてはレンガの表面状態に経年劣化が確認できないこと、天井レンガよりも経年劣化しやすい主電極においても経年劣化の影響が確認されていないことから、経年劣化による影響がレンガ損傷の主要因であるとは考えにくい。

なお、実機と同等の運転方法で運転を継続してきたKMOCの天井レンガには外観検査、打音検査及び超音波探傷試験により表面及び内部に大きな損傷が存在していないことが確認されている。

## ③熱応力解析

レンガの温度上昇・下降により局所的に高い応力が発生した可能性があるため、以下のケースにおける熱応力解析を行った。解析ケースは、天井レンガに影響を及ぼす温度履歴について、コールド試験も含めたガラス溶融炉の全運転データの中から、予備解析により影響を評価して選定した。選定したケースを以下に示す。

- ・気相温度が高いケース
- ・気相温度が急に変化したケース（降温）
- ・間接加熱装置温度が高いケース
- ・間接加熱装置温度が急に変化したケース（降温）

また、間接加熱装置の影響を確認するため以下のケースについても解析を実施した。

- ・間接加熱装置からの距離が異なるケース（レンガ位置の影響）

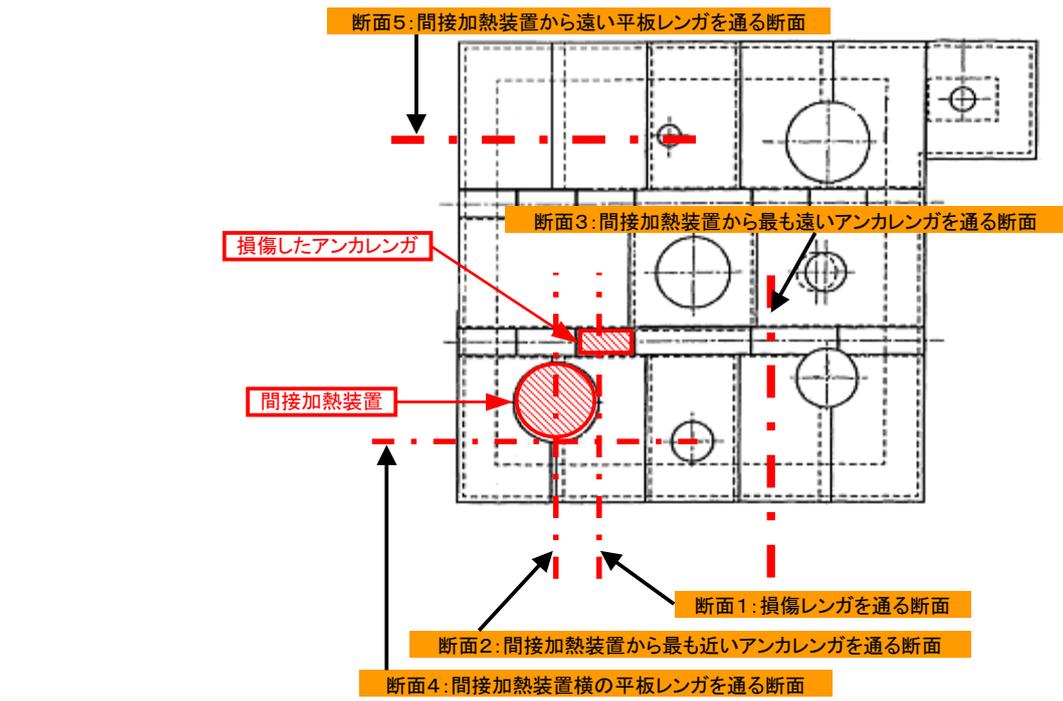
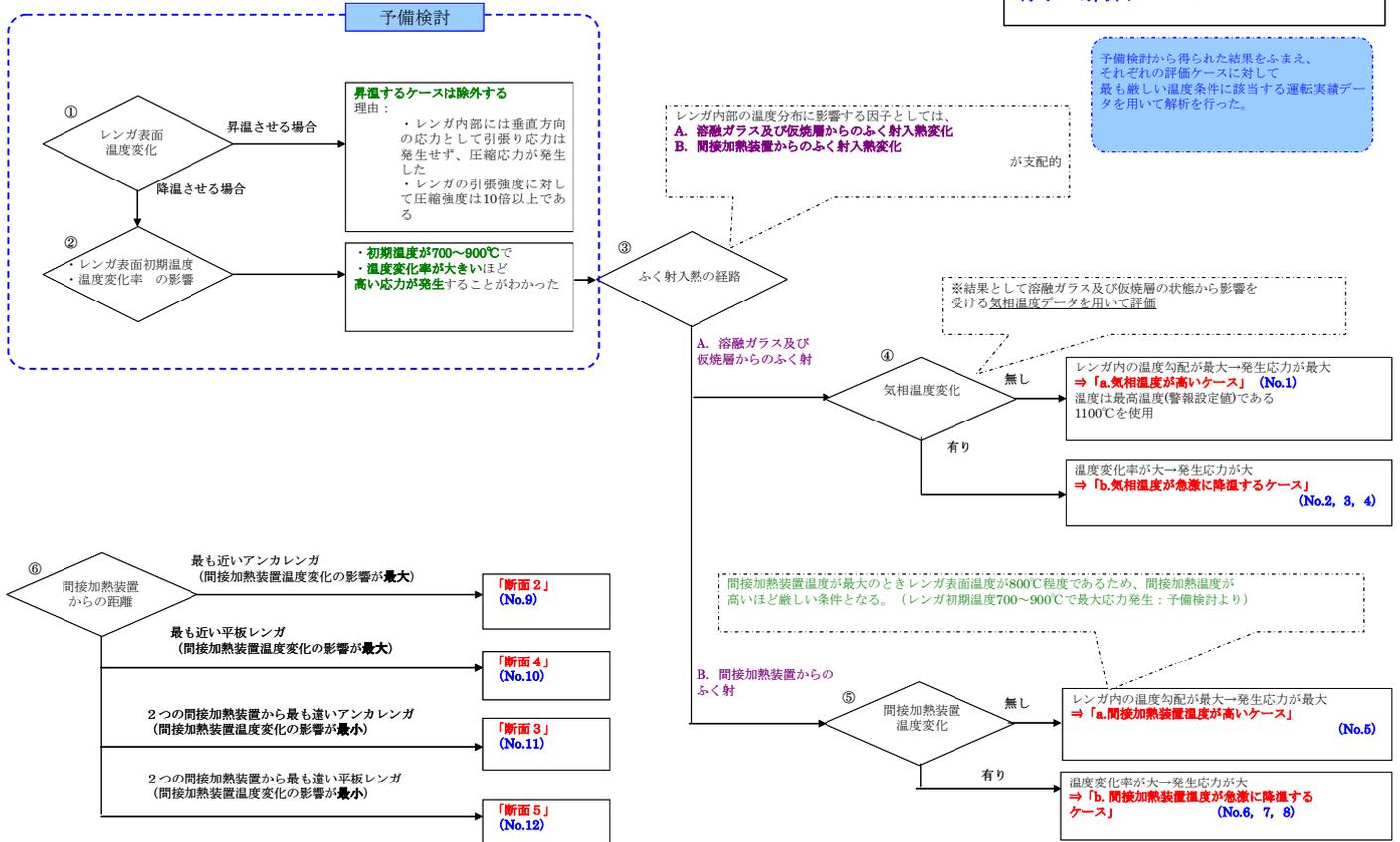
なお、アクティブ試験時の炉底かくはん、オリフィス交換時等において、気相部へ外部空気が流入することで天井レンガに熱応力が発生した可能性も考えられたが、空気が流入した場合でも損傷箇所の温度は大きく変わらないことを解析で確認したため、熱応力解析のケースからは除外した。

天井レンガ周辺の温度環境の変化がレンガにもたらす影響を確

認するため、天井レンガ周辺のモデルを作成し、汎用コード（A B A Q U S）を用いて熱応力解析を実施した。

赤字：評価ケース  
青字：解析ケースNo.

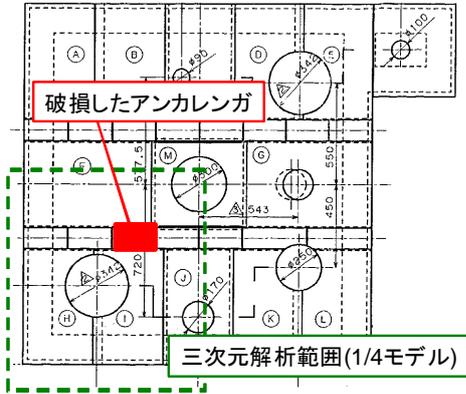
予備検討から得られた結果をふまえ、それぞれの評価ケースに対して最も厳しい温度条件に該当する運転実績データを用いて解析を行った。



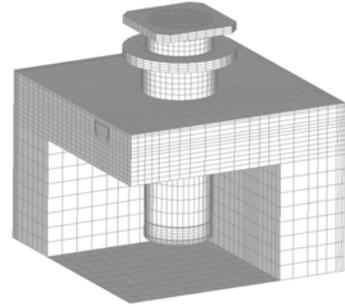
熱応力解析を実施した断面 説明図

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）

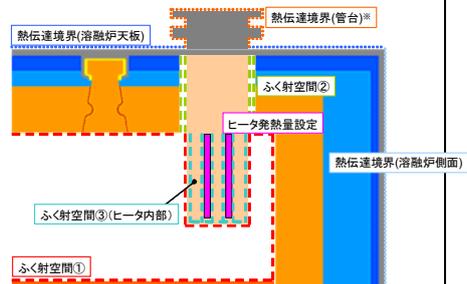
溶融炉の運転実績（間接加熱装置温度）にあうように発熱量を調整し、間接加熱装置表面温度を求める。



解析モデル

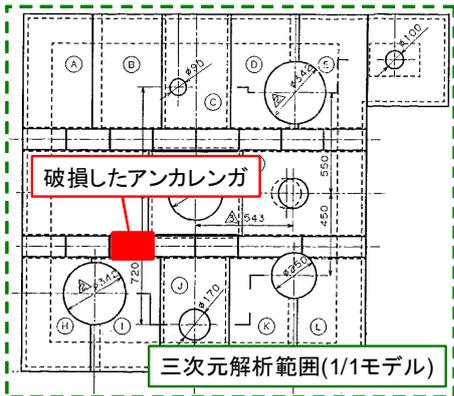


境界条件

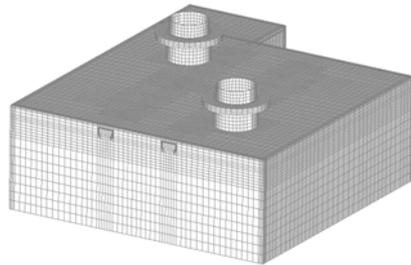


② 三次元ふく射伝熱解析モデル（天井 1/1、間接加熱装置表面のみ）

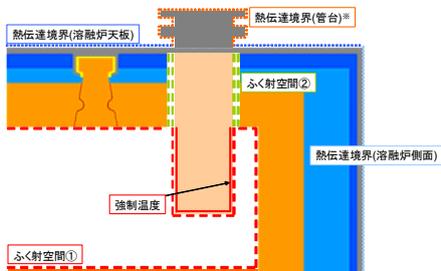
- ①で求めた間接加熱装置表面温度を入力とし、天井全体の温度分布を求める。
- 気相温度を貼り付け、天井全体の温度分布を求める。

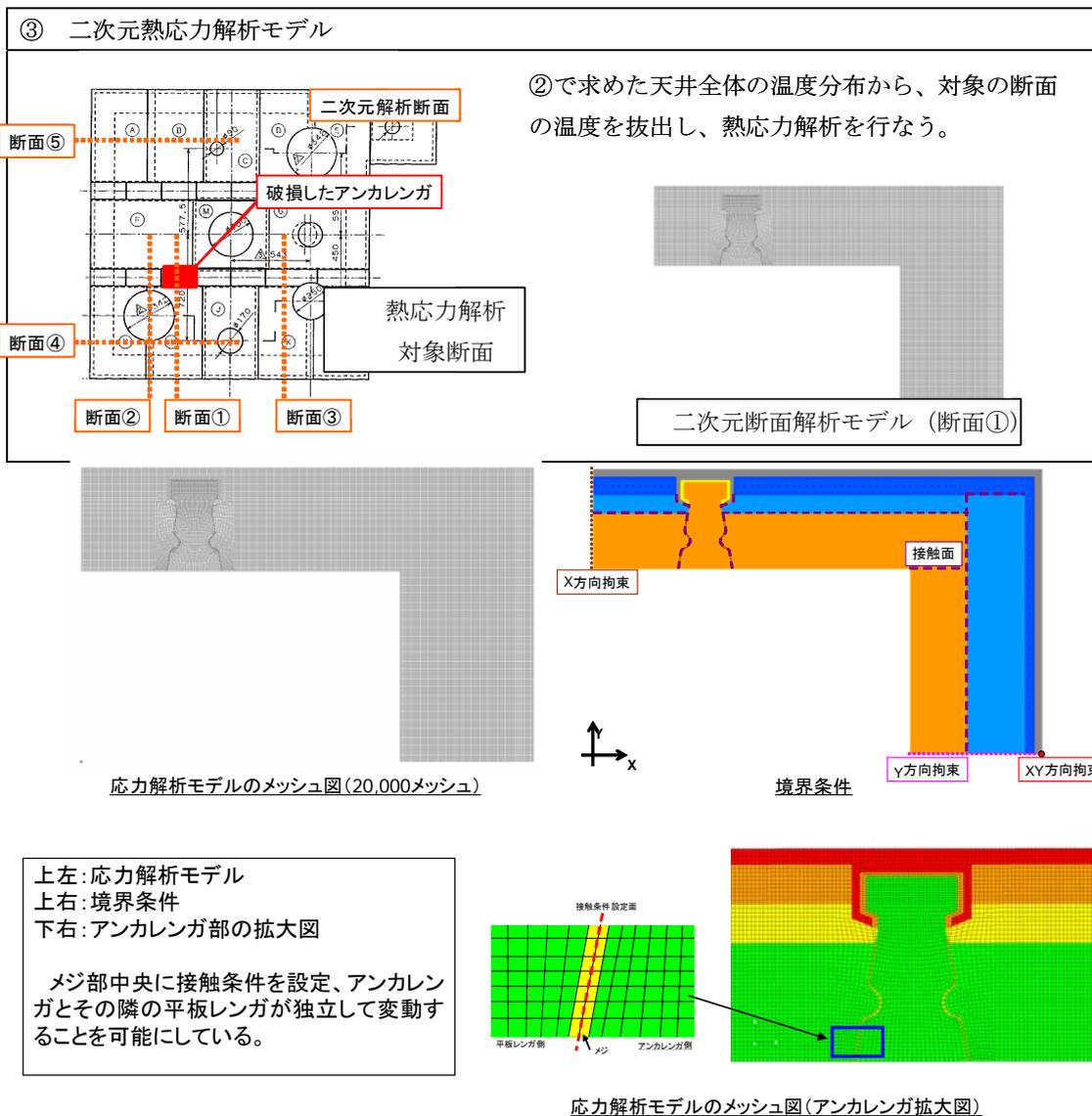


解析モデル



境界条件





解析の結果、損傷したアンカレンガにおいては、間接加熱装置温度が急に変化したケース（降温）の場合に最も大きな応力（3.4 MPa）が発生することが確認された。また、最大応力発生部位は、ダボ部であることが確認された。

次に、損傷したレンガと同一の材料で試験片を作成して曲げ強度試験を行い、耐火物技術協会の研究論文等をもとに曲げ強度を引張強度に換算した結果、4.5～9 MPa という引張強度を得た。耐火物は、金属のようにある一定の許容応力をもっているものではなく、その強度に非常に大きな広がりをもっているものであり、本試験結果を統計的に考えた場合、熱応力解析結果で確認された3.4 MPa という応力でレンガに損傷が発生する可能性があること

が分かった。また、間接加熱装置の降温の繰り返しのに伴いレンガの損傷が繰り返し発生し、最終的に脱落に至ったと考えられる。

天井レンガ損傷の原因究明として天井レンガの強度評価を行うため、天井レンガと同一材料であるAZ-GSIに対して曲げ強度試験を実施した。

本結果を、同じく原因究明として実施している天井レンガの熱応力解析結果と照らし合わせ、天井レンガ損傷に関する評価を実施する。

(1) 使用機器等

AZ-GSレンガ片(25mmx25mmx120mm)

熱間曲げ試験装置

(2) 試験条件

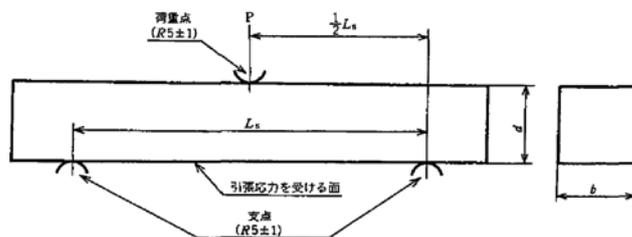
試験温度 600°C(熱応力解析における応力発生箇所の温度とした)

試験点数 70点

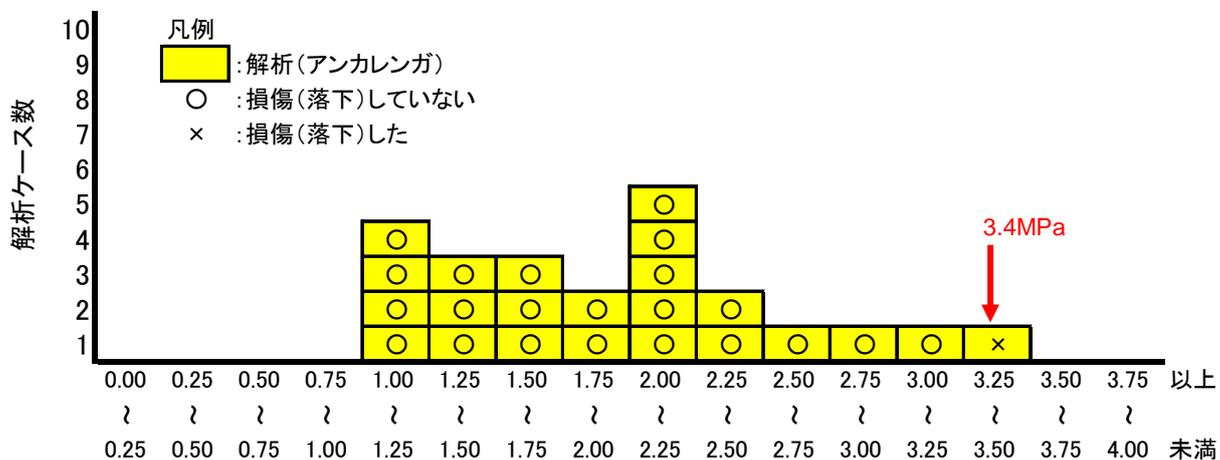
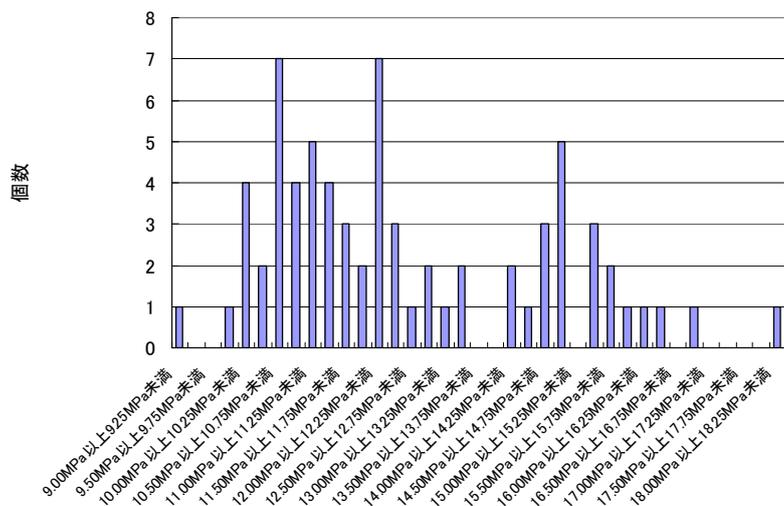
(3) 試験方法

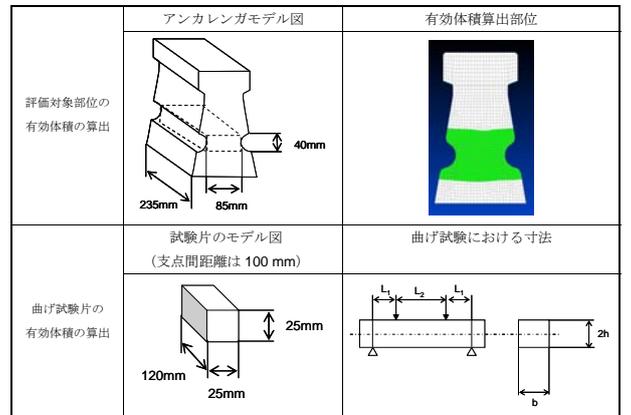
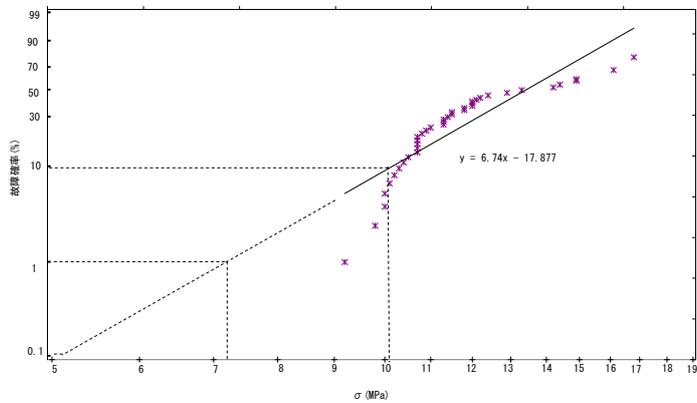
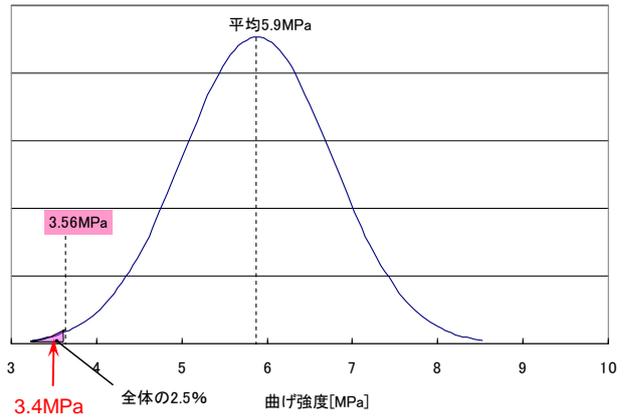
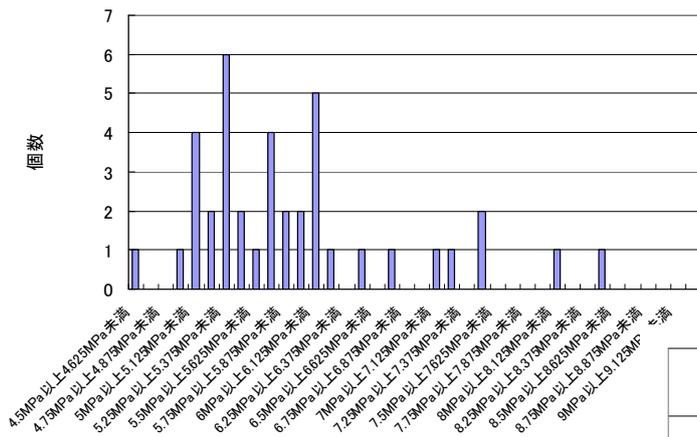
i) 試験用のAZ-GSレンガ片を曲げ試験装置を有する電気炉内に入れ、試験条件温度になるよう加熱する。

ii) 加熱したレンガ片に対して荷重をかけ、レンガ片が破壊するまでに示した最大荷重を記録する。



- $L_s$ : 支点間距離 125±2 mm又は $L_s \geq 4d$ を満たす所要寸法
- $R$ : 支点及び荷重点の先端の曲率半径 5±1 mm
- $d$ : 試験片の厚さ寸法 25±1 mm又は $d \leq b$ を満たす所要寸法
- $b$ : 試験片の幅寸法(mm)
- $L_t$ : 試験片の全長  $L_t \geq 1.2 L_s$  (mm)





破壊原因とその試験片数

破壊原因	試験片数
内部亀裂	39
エッジ亀裂	15
表面亀裂	5
原因不明	11

