

再処理施設高レベル廃液ガラス固化建屋  
ガラス溶融炉（A系列）の一部損傷について  
（経過報告 その2）

【公開版】

平成22年2月24日

日本原燃株式会社

本書は記載内容のうち、内の記載事項は  
公開制限情報に属するものであり公開できません  
ので削除しております。

日本原燃株式会社

## 目 次

1. はじめに.....	1
2. 件 名 .....	1
3. 発生日時.....	1
4. 発生場所.....	1
5. 発生事象の概要 .....	2
6. 天井レンガの一部損傷に係る調査及び対策.....	3
6. 1 天井レンガの一部損傷が確認されるまでの運転操作状況.....	3
6. 2 かくはん棒（直棒）の観察.....	4
6. 3 炉内詳細観察（天井部）.....	4
6. 4 異物除去作業.....	5
6. 5 確認されていた事実の整理.....	5
6. 6 レンガ損傷時期の推定.....	7
6. 7 天井レンガの一部損傷に対する要因分析.....	8
6. 7. 1 要因分析.....	8
6. 7. 2 調 査.....	8
6. 8 天井レンガの一部損傷に対する対策.....	14
7. かくはん棒の曲がりに係る調査及び対策 .....	15
7. 1 かくはん棒が曲がったことに対する要因分析.....	15
7. 1. 1 要因分析.....	15
7. 1. 2 調 査.....	15
7. 1. 3 推定原因.....	18
7. 2 かくはん棒が曲がったことに対する対策.....	19
8. 今後の原因究明等に必要な作業.....	19
8. 1 今後の原因究明等に必要な作業の内容、目的.....	19
8. 2 今後の原因究明等に必要な作業におけるレンガ損傷の抑制について.....	21
9. 今後実施する原因究明等に係る作業に対する安全性評価 .....	22
9. 1 現時点のガラス溶融炉Aに対する安全性評価.....	22
9. 2 さらにレンガが損傷した場合に対する評価.....	29
9. 2. 1 さらにレンガが損傷した場合の影響評価について.....	29
9. 2. 2 原因究明のための運転に与える影響の評価.....	32
添付資料－1	再処理事業所 構内配置図
添付資料－2	時系列
添付資料－3	かくはん棒の状態観察結果

添付資料－４	ガラス溶融炉内の観察結果
添付資料－５	異物除去作業サンプルの分析結果について
添付資料－６	ガラスレベル調整運転時の流下速度
添付資料－７	A044バッチ直棒によるかくはん操作概略図
添付資料－８	かくはん棒の挿入状況からの炉底部状態の推定
添付資料－９	天井レンガの一部が損傷したことに対する要因分析
添付資料－１０	天井レンガの材料特性について
添付資料－１１	天井レンガ設計の考え方について
添付資料－１２	天井レンガの製造履歴について
添付資料－１３	ガラス溶融炉A運転実績の整理
添付資料－１４	ガラス溶融炉の運転期間について
添付資料－１５	ガラス溶融炉天井レンガの観察結果
添付資料－１６	熱応力解析ケースの選定について
添付資料－１７	熱応力解析における各断面の解析結果
添付資料－１８	曲げ強度試験による評価について
添付資料－１９	通常のかくはん操作における接触の可能性
添付資料－２０	かくはん棒撤去時の状況
添付資料－２１	アンカレンガを損傷させるのに必要な加速度
添付資料－２２	一般産業炉等の調査結果
添付資料－２３	温度勾配とレンガに発生する応力の関係（解析結果）
添付資料－２４	かくはん棒が曲がっていたことに対する要因分析
添付資料－２５	かくはん棒（直棒）の座屈に対する健全性（事前評価）
添付資料－２６	かくはん棒（直棒）２号機の観察結果
添付資料－２７	かくはん棒（直棒）１号機の減肉について
添付資料－２８	かくはん棒使用時の温度履歴
添付資料－２９	パワーマニピュレータによる押し付け力
添付資料－３０	おもり治具の搭載位置について
添付資料－３１	かくはん棒（直棒）の曲がり形状に関する説明図
添付資料－３２	かくはん棒曲がりに対する非弾性解析結果
添付資料－３３	今後の原因究明のための作業の流れ
添付資料－３４	損傷状態におけるレンガ構造の健全性評価
添付資料－３５	ガラス溶融炉底部の健全性について
添付資料－３６	絶縁抵抗測定及び外観観察結果

参考資料

用語集

## 1. はじめに

再処理施設 高レベル廃液ガラス固化建屋 ガラス溶融炉（A系列）において平成20年12月にかくはん棒の曲がりの確認されたことを受け、かくはん操作等を行っている際にガラス溶融炉内部に損傷を与えた可能性が考えられたことから、再処理規則第19条16の2号に該当するものと判断し、平成20年12月11日に国へ報告した。（法令報告）

その後行ったガラス溶融炉内の詳細観察において天井レンガの一部が損傷していることが確認された。

これまでかくはん棒の曲がり及び天井レンガの一部損傷については、原因究明を行ってきたが、最終的な原因調査のためには損傷したレンガの状態及び炉内の詳細観察を行う必要がある。

本報告では、これまでに実施してきた天井レンガの一部損傷に係る原因究明の経過及びかくはん棒の曲がりに係る推定原因並びに各事象の対策を報告する。また、最終的な原因調査のために実施するガラス溶融炉の熱上げ作業、炉内の損傷したレンガの回収作業を行うにあたり、ガラス溶融炉の強度、閉じ込め機能、炉内レンガの健全性、ガラス固化建屋内の放射線しゃへい性能等、必要な評価を行うとともに、高レベル廃液漏えいにより低下していた電気設備の絶縁抵抗の回復状況についても確認した。

なお、今回の報告書提出後に実施する調査の結果を取り纏め、本事象の最終報告をする予定である。

## 2. 件名

再処理施設 高レベル廃液ガラス固化建屋 ガラス溶融炉（A系列）の一部損傷について（経過報告 その2）（平成20年12月11日に報告した際の件名は、「再処理施設 高レベル廃液ガラス固化建屋 ガラス溶融炉（A系列）内におけるかくはん棒の曲がりについて」）

## 3. 発生日時

かくはん棒の曲がり：平成20年12月10日（水）18時頃（確認）

ガラス溶融炉（A系列）の一部損傷：

平成20年12月22日（月）4時頃（確認）

## 4. 発生場所

再処理施設 高レベル廃液ガラス固化建屋 高レベル廃液ガラス固化設備（添付資料－1参照）

## 5. 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や白金族元素が炉底部に堆積したことを示す運転データに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作業（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放射線の影響を考慮し、ガラス溶融炉内のガラスを抜き出すための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。（添付資料－2及び3参照）

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。（添付資料－4参照）

一連のかくはん棒による操作期間及び天井レンガの一部が損傷したと推定される期間において、高レベル廃液ガラス固化廃ガス処理設備及び高レベル廃液ガラス固化建屋換気設備により溶融炉及び固化セル内の負圧は維持されていた。また、高レベル廃液ガラス固化建屋管理区域内に設置されている $\gamma$ 線エリアモニタ、 $\beta$ 線ダストモニタの測定値、並びに高レベル廃液ガラス固化建屋排気モニタ（ $\beta$ 線ダスト）、主排気筒ガスモニタ、主排気筒ダストモニタ（ $\alpha$ 線、 $\beta$ 線）の測定値は通常の変動範囲内であり、異常はなかった。

溶融炉内部の詳細観察は、溶融炉の運転をシャットダウンし、ガラスが十分に冷却された状態で、溶融炉の原料供給器につながる高レベル廃液供給配管を取り外し、供給配管に閉止フランジを取り付けたうえで（ただし、高レベル廃液の漏えいが発生）作業を実施しており、また、負圧の維持や施設内の放射線状況に異常はなかった。

なお、本事象による施設内外への放射線等の影響がないことを確認している。

## 6. 天井レンガの一部損傷に係る調査及び対策

天井レンガの一部損傷に対して、現在までに行った原因究明の状況及びその対策について以下に示す。

### 6. 1 天井レンガの一部損傷が確認されるまでの運転操作状況

ガラス溶融炉については、これまで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、第5ステップ：ガラス溶融炉運転性能確認試験、ガラス固化体取扱運転性能確認試験、処理能力確認試験）を通して以下に示すガラス固化体を製造した。

	A系列	B系列
化学試験	105本 (2004年7月～2005年2月)	97本 (2004年7月～2005年2月)
実機模擬廃液試験	43本 (2005年7月)	19本 (2005年6月～2005年7月)
アクティブ試験	107本 (2007年11月～2008年11月)	

※括弧内は製造期間を示す。

ガラス溶融炉のアクティブ試験は、アクティブ試験第4ステップから開始した（2007年11月）が、溶融ガラスの温度（ガラス温度計温度）が安定せず、炉底部に白金族元素が沈降、ガラス溶融炉底部に堆積し、溶融ガラスの流下性等に影響が生じたため、試験を一旦中断することとし、炉内のガラスを抜き出し、炉底部の堆積物除去作業を行った。

その後、溶融ガラスの温度が安定しなかったことなどに対する原因究明と対策をまとめ、「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」（以下、安定運転条件報告書という）を2008年6月に行い、同年7月からアクティブ試験第5ステップにおいてガラス溶融炉の運転を再開した。

しかしながら、運転開始後1バッチ目の流下においてガラス溶融炉の流下ノズル部がガラスで塞がれ流下停止に至ったことから、再処理規則第19条16の2号に該当するものと判断し、国に報告を行った。（法令報告）その後、流下ノズル部の復旧を行うとともに、「ガラス溶融炉におけるガラスの流下停止について」として原因と対策をまとめ報告し、同年10月に運転を再開した。

再開後の運転では、まず不溶解残渣廃液を含まない廃液を供給してガラス溶融炉の運転を15バッチ（A T - 2 - A 0 0 5 ~ A 0 1 9）、回復運転を4バッチ（A 0 2 0 ~ A 0 2 3）行った後、廃液供給を再開した。

廃液供給再開後、不溶解残渣廃液を含まない廃液を供給して3バッチ（A 0 2 4 ~ A 0 2 6）行い、その後不溶解残渣廃液を含む廃液に切り換えて運転を行った（A 0 2 7 ~）。廃液切り替え後5バッチ目（A 0 3 1）で回復運転に移行するための判断指標に達したことから、回復運転に移行した。

回復運転は以下のステップで実施した。

回復運転方法	バッチ数
①洗浄運転	3バッチ（A 0 3 2 ~ A 0 3 4）
②炉底かくはん（曲棒）	2バッチ（A 0 3 5 ~ A 0 3 6）
③洗浄運転	4バッチ（A 0 3 7 ~ A 0 4 0）
④炉底かくはん（曲棒）	1バッチ（A 0 4 1）
⑤炉底かくはん（直棒）	3バッチ（A 0 4 2 ~ A 0 4 4）

⑤炉底かくはん（直棒）の後、かくはん棒（直棒）の引き抜き作業に移行したが、かくはん棒（直棒）が動かしづらい状態であることが確認されたため、炉内のガラスレベルを低下させて、直棒の観察を行うこととした。

## 6. 2 かくはん棒（直棒）の観察

6. 1で記載のとおり、炉底かくはん（直棒）の後、かくはん棒（直棒）の引き抜き作業を実施した際に、かくはん棒（直棒）が動かしづらい状態であることが確認されたため、ガラスレベル調整運転を行った後、ガラス溶融炉の加熱を停止し、放冷した後に炉内にI T Vカメラを挿入し、かくはん棒（直棒）を観察した。その結果、かくはん棒（直棒）がほぼL字型に曲がっていることが確認された。

観察したかくはん棒（直棒）の状態から、回復運転におけるかくはん操作等を行っている際にガラス溶融炉内部に損傷を与えた可能性が考えられたため、再処理規則第19条16の2号に該当するおそれがあるものと判断し、国に報告を行った。さらに、ガラス溶融炉内の詳細観察を行うこととした。（添付資料-3参照）

## 6. 3 炉内詳細観察（天井部）

溶融炉内の詳細観察を行うため、曲がったかくはん棒（直棒）の切断、撤去作業を行い、ガラス溶融炉内にI T Vカメラを入れて詳細観察を行った結果、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。



損傷していたレンガはアンカレンガと呼ばれるレンガのうちの1個で、当該レンガの途中のダボ部と呼ばれる部位から下が欠落していた。(添付資料-4参照)

冷却されガラス溶融炉内で固まっているガラス面の上には欠落したレンガは確認されなかった。

#### 6. 4 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。(添付資料-5参照)

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。

#### 6. 5 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

##### ① A032～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、A036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。

##### ② A037～A040 模擬ガラスビーズによる洗浄運転

##### ③ A041 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。

##### ④ A042～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し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

（添付資料－7参照）

- ・ 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し込む操作を行った。
- ・ 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。

### 6. 6 レンガ損傷時期の推定

6. 5（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。（添付資料－8参照）

## 6. 7 天井レンガの一部損傷に対する要因分析

### 6. 7. 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。（添付資料－9参照）

- ①設計の観点（材料、構造）（材料の選定が適切であったか、熔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）

### 6. 7. 2 調査

#### 6. 7. 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

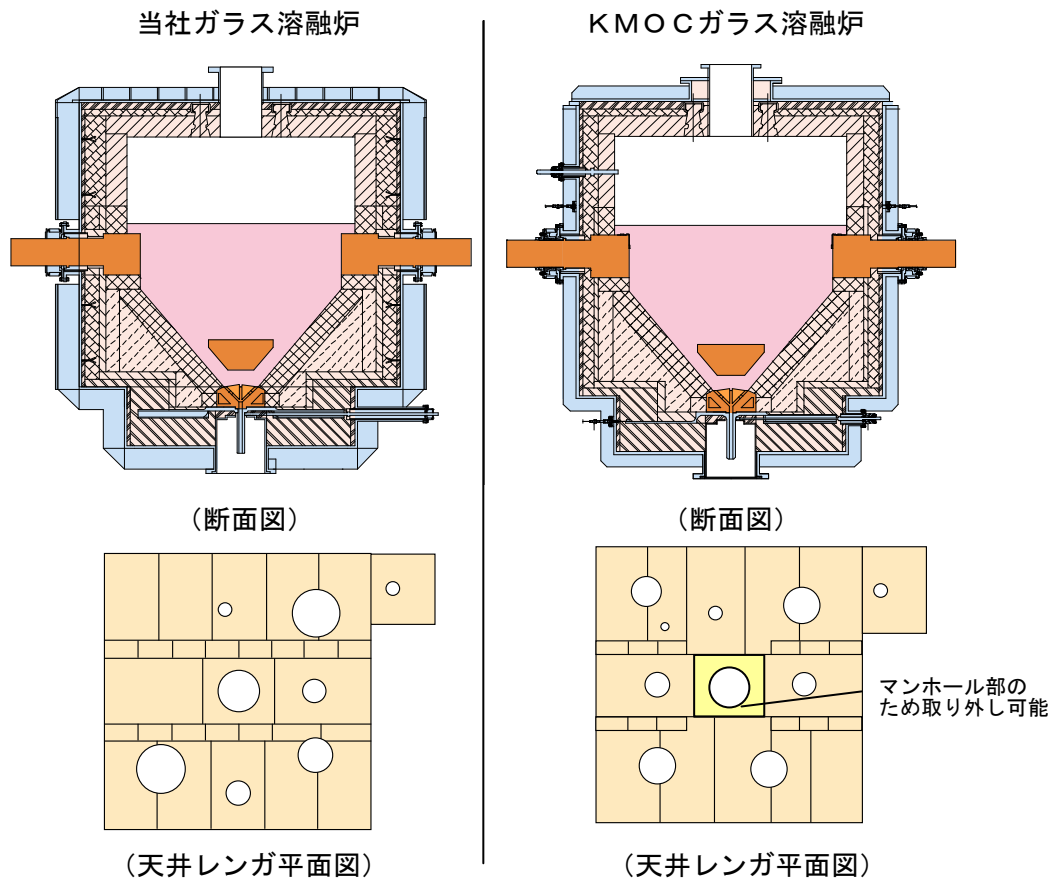
- ・使用環境の調査として、温度、酸濃度等の使用環境を調査
- ・レンガの経年劣化による影響を調査
- ・ガラス熔融炉の温度上昇又は下降時のレンガの温度勾配により局部的に応力が発生した可能性が考えられるため、温度分布解析、熱応力解析を実施

##### 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熔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熔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（KMOC、図1参照）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



KMOC は当社ガラス溶融炉の天井レンガと同様、せり構造、ダボ構造及びアンカレンガによる吊り構造を採用している。ただし、天井にマンホールや予備ノズルを設けているため当社ガラス溶融炉よりも開口が多いなど、天井レンガの構造は若干異なる。

図1 当社ガラス溶融炉とKMOCの比較

## 6. 7. 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。(添付資料-10参照)

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。(添付資料-11参照)

### 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。(添付資料-12参照)

- 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、温度にして1770℃相当)に対して、直接レンガに接する気相部の温度は設計温度 $\square$ ℃を上回っておらず、使用温度には問題なかった。(添付資料-13参照)

#### 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（添付資料－14参照）、レンガの温度上昇・下降により局部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、熔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（添付資料－15参照）、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・下降により局部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熔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。ケース選定の考え方を添付資料－16に示す。

- ・気相温度が高いケース
- ・気相温度が急に变化したケース（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变化したケース（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（ABAQUS）を用いて熱応力解析を実施した。解析モデル及び境界条件を図2に示す。

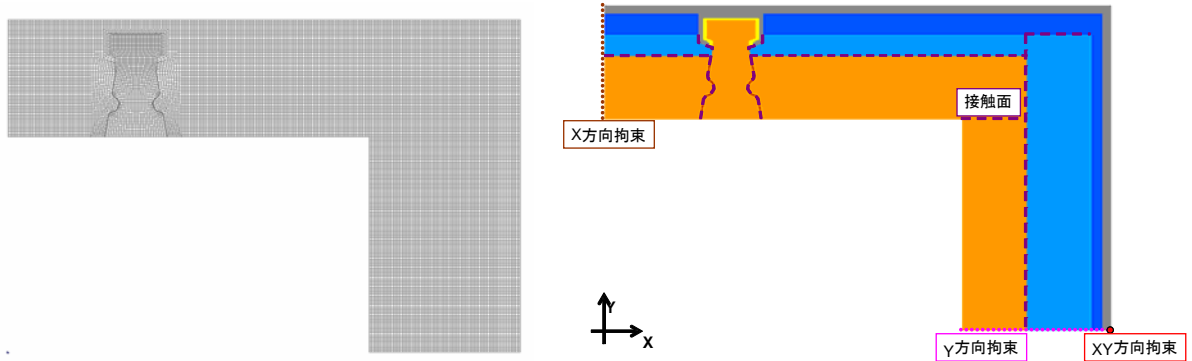


図2 熱応力解析モデル（左）と境界条件（右）

各ケースにおける解析結果を添付資料－17に示す。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。（添付資料－18参照）

次に、高い熱応力を発生させた原因となっている間接加熱装置の温度降下実績について、運転履歴によりその理由を調査した。その結果、熱応力を発生させる間接加熱装置の温度降下は、



化学試験において試験特有の操作を実施したものや、当社のガラス溶融炉特有かつ運転中のインターロックによる停止が原因であったことが分かった。調査結果を表1に示す。

表1 間接加熱装置温度の降下理由

時期	温度降下の理由	回数
化学試験	ガラス溶融炉運転中の電極間の絶縁抵抗を測定するため、間接加熱装置を手動で停止した	6回
化学試験	高模擬廃液供給運転から模擬ビーズ供給運転へ移行させるため、間接加熱装置を手動で停止した	1回
化学試験	間接加熱装置温度を一定に制御するモードとなるべきところが、手動モードとなっていたため、間接加熱装置温度が降下した	1回
アクティブ試験	ガラス液位高高警報が発報したため、間接加熱装置を手動で停止した	3回

以上から、熱応力を発生させる間接加熱装置の温度降下は、化学試験において試験特有の操作を実施したものや、当社のガラス溶融炉特有かつ運転中のインターロックによる停止が原因であったことが分かった。

#### 4) 外力負荷発生 の観点

##### ①かくはん操作時の接触による負荷発生

通常のかくはん操作においては、構造的に天井レンガに接触する可能性はなく、かくはん棒の接触が原因となったとは考えられない。(添付資料-19参照)

##### ②曲がったかくはん棒を引き抜く際の接触による負荷発生

曲がったかくはん棒の形状から、引き抜き時に天井レンガに接触する可能性はあるが、かくはん棒が天井レンガに接触することで発生する応力は小さく、かくはん棒引き抜き時の接触で天井レンガが損傷する可能性は極めて低いことを確認した。

一方、予め亀裂が大きく入っていた状態のアンカレンガに接触した場合であれば損傷に至る可能性があることも確認されたことから、かくはん棒引き抜き時の接触がレンガの損傷の間接的な要因になった可能性はあるが、6.6章に示したとおり、かくはん棒の引き抜き操作を行った時点(A044)では既にレンガが炉底に脱落していた可能性が高く(A042以前)、曲

がったかくはん棒引き抜きによる接触時に天井レンガが損傷したとは考えにくい。

なお、曲がったかくはん棒の切断・撤去時には、天井レンガを損傷しないようスリーブを設置して作業を行っており、切断・撤去時にかくはん棒が天井レンガに接触して天井レンガが損傷したとは考えられない。（添付資料－２０参照）

### ③ガラス溶融炉に関連する作業に伴う負荷発生

アンカレンガを損傷させるのに必要な加速度を評価した結果、 $1000G$ 以上の加速度が必要であることが確認された（添付資料－２１参照）。ガラス溶融炉に関する遠隔作業で $1000G$ を超える加速度を発生させたとは考えられないため、遠隔作業が原因となったとは考えられない。

## 5) 他施設の調査

国内外のガラス溶融炉、一般産業界における炉の調査を行った結果、当社ガラス溶融炉に発生した損傷と同様に、運転に支障が出るほどのレンガの脱落事例は数例が確認されたのみであった。これは、運転開始時などの初期や解体時に脱落したものであり、通常運転で損傷が発生したものではなかった。また、熱応力解析の結果、天井から挿入されている間接加熱装置の温度影響が大きいことが分かったが、当社のガラス溶融炉と同構造であるKMOCを除き、レンガが間接加熱装置等の熱影響を受けやすい構造になっている炉は少なく、その炉の場合、大きく温度を降下させるような運転をしていないことがわかった。（添付資料－２２参照）

また、天井レンガ設計（材料・構造）調査の一環として、KMOCの天井レンガについて、表面状態観察、打音検査、超音波探傷検査等を行い、アンカレンガがダボ部から脱落するような兆候はないことを確認した。KMOC試験では、 $2000$ 年から合計 $280$ 本以上のガラス固化体を製造しており、運転実績は当社ガラス溶融炉を上回っていることから、KMOCの確認結果からは、天井レンガの設計に問題があったことは考えにくいと考えられる。

## 6. 8 天井レンガの一部損傷に対する対策

天井レンガの一部損傷に対する原因究明の結果、現段階においては、天井レンガ損傷の主要因は、過去に実施した間接加熱装置の温度降下時に発

生した熱応力の可能性が高く、当社のガラス溶融炉特有の構造及び運転や、インターロックによる停止の影響が大きかったと推定している。(添付資料-16~18参照)

よって、8章で説明する今後の原因究明等に必要なガラス溶融炉の熱上げ等においては、可能な限り間接加熱装置による温度の降下速度を小さくすることによりレンガに発生する応力を小さくする運転を実施する計画である。温度降下速度は、原因究明として実施した解析における発生応力、及び温度降下速度を低下させた場合の解析による発生応力を比較し、発生応力が十分に小さくなる10℃/10分程度とする。これにより、天井レンガに発生する応力が小さくなり、新たにレンガの損傷が発生する可能性を低く抑えることができる。(添付資料-23参照)

なお、最終的な原因究明結果及び対策については、炉内のガラスを抜き出した後の炉内観察結果を含めて最終報告書にて報告を行う。

## 7. かくはん棒の曲がりに係る調査及び対策

本法令報告の発端となったかくはん棒の曲がりに対して、現在までに行った原因究明の状況及びその対策について以下に示す。

### 7. 1 かくはん棒が曲がったことに対する要因分析

#### 7. 1. 1 要因分析

かくはん棒が曲がったことに対する要因分析を一連のかくはん操作等で確認された事実等をもとに、以下の観点で実施した。(添付資料-24参照)

- ①設計、製造の観点(設計上の強度評価が間違っていたかなど)
- ②使用前の棒の強度低下の観点(使用開始前から既に棒の強度が下がっていたかなど)
- ③使用中の棒の強度低下の観点(ガラス温度が高かったかなど)
- ④荷重、荷重方向といった使用条件の観点(パワーマネジュラータでの荷重が想定以上に作用したか、軸方向ではない方向に荷重が作用したかなど)

#### 7. 1. 2 調査

##### 7. 1. 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、製造の観点

- ・設計強度評価の妥当性確認として、おもり治具を設置した状態での強度評価を実施
  - ・製造の健全性の確認として、かくはん棒及びおもり治具の製作時の試験検査結果を調査
- 2) 使用前の棒の強度低下の観点（使用前の棒の状態）
- ・かくはん棒の変形、傷、腐食の有無を調査
- 3) 使用中の棒の強度低下の観点（使用中の温度など）
- ・温度などの使用条件の調査として、炉内温度、ガラス温度を調査
- 4) 荷重、荷重方向といった使用条件の観点
- ・過荷重となる可能性のある要因、荷重方向が軸方向以外に働く可能性のある要因についての検討

## 7. 1. 2. 2 調査結果

調査の結果を以下に示す。

### 1) 設計、製造の観点

製作時の試験検査の記録等から、かくはん棒（直棒）の材料、寸法、外観に問題がないこと、おもり治具の重量も設計重量どおりであることを確認した。

なお、おもり治具の設計にあたっては、簡易計算による事前評価を行っている。

事前評価では、

- ・かくはん棒（直棒）が全長（4 1 0 7 mm）にわたって  °C になっているものと仮定して保守的な座屈荷重を評価すると 3 7 k g f、また、棒の長さをガラスに浸る部分のみ（ mm）として座屈荷重を評価すると 1 8 1 k g f となった。
- ・実際、かくはん棒は上部のガラス温度よりも低い気相部にあたる部分があることやガラス温度は炉底部に向かって温度勾配があり上部よりも底部の方が温度が低いことから、より大きなヤング率を使用できることなどを考慮し、おもり治具は棒の長さをガラスに浸る部分のみとして評価した結果（1 8 1 k g f）よりもはるかに小さい値である 5 0 k g f で製作すれば棒が座屈することはないと考え、おもり治具を 4 5 k g f で製作した。（添付資料- 2 5 参照）

## 2) 使用前の棒の強度低下の観点 (使用前の棒の状態)

かくはん棒 (直棒) の外観について、A044での使用前に、変形、傷の有無を点検し、異常がないことを確認したうえで使用していることを確認した。(添付資料-26参照)

腐食については、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) (1号機: 149時間、2号機: 61時間) の減肉量の観察を行ったところ一部分に若干の減肉 (直径  mm に対し、長さ約 50 mm にあたり約 2 mm 減肉) が確認されたため (添付資料-27参照)、かくはん棒 (2号機) についても減肉している可能性があり、これが曲がりの要因となった可能性があると考えられる。

今後、かくはん棒 (2号機) についても減肉量の測定を行い、最終報告書の中で使用時間制限に関する評価を行うこととする。

## 3) 使用中の棒の強度低下の観点 (使用中の温度など)

(添付資料-28参照)

かくはん棒 (直棒) の曲がりが発生したA044バッチにおけるガラス温度はかくはん棒使用時の目安としている  °C 以下であり、直前のバッチ (A043) の温度状態と比較しても同程度であることから、使用温度に問題はなかった。

また、曲がりの原因として白金族元素の堆積による局所加熱が挙げられるが、ガラス溶融炉内の温度データ等に異常が確認されていないこと、及びかくはん棒の変形箇所が炉底から離れた位置であることを考慮すると、局所加熱によるものであるとは考えられない。

腐食の影響については、かくはん棒が減肉している可能性があり、これが曲がりの要因となった可能性があると考えられる。

## 4) 荷重、荷重方向といった使用条件の観点

おもり治具を設置した状態で実施したかくはん操作において、予定通りの操作が実施できなかったことから、貫通を補助する手段としてパワーマニピュレータによる押し込みを実施した。この際、パワーマニピュレータで付加できる荷重はパワーマニピュレータの可搬重量である 25 kgf 程度と考え、この荷重をおもり治具の重量 (45 kgf) に加えて付加 ( $45 \text{ kgf} + 25 \text{ kgf} = 70 \text{ kgf}$ ) しても棒径やヤング率などに保守性をもたせて評価しているこ

とから、簡易計算による事前評価の裕度に入り、座屈には至らないと考えていた。

しかしながら、パワーマニピュレータにより付加できる荷重をモックアップ試験により測定した結果、想定した25kgfを上回る約40kgfであることが確認され、かくはん棒（直棒）に実際に掛かっていた荷重がおもり治具の荷重（45kgf）と合計し約85kgfであったと考えられる。（添付資料－29参照）

なお、パワーマニピュレータによる押し込みを実施した際、以下の点を考慮していなかった。

- パワーマニピュレータには荷重計が設置されていないため、正確に押し込み荷重を測れないこと
- おもり治具の評価において実施した直棒の座屈荷重評価では垂直に荷重を付加することを前提としていたが、実際は遠隔操作で垂直に荷重を付加することが難しいこと

また、おもり治具をかくはん棒の上部に設置し下降させた際に、おもり治具は適切に設置されていたものの（添付資料－30参照）、棒が斜めになっていた可能性が高く（添付資料－8参照）、これにより棒にたわみが発生し、座屈荷重が小さくなったことが考えられる。このことから、想定されるかくはん棒の挿入状態をモデル化し、解析により座屈に至る荷重を評価したところ約79kgfで座屈に至ることが確認された。

以上から、おもり治具の重量及びパワーマニピュレータの押し込み荷重を合計した85kgfの荷重は、かくはん棒の座屈荷重を上回っていた可能性が高いと考えられる。（添付資料－31、32参照）

### 7. 1. 3 推定原因

要因分析の結果、かくはん棒（直棒）の曲がり、かくはん棒が斜めになった状態で上部からおもり治具及びパワーマニピュレータで過度の荷重を掛けたことで座屈荷重を超えたものと推定できる。

なお、かくはん棒（直棒）が底部電極中央穴に貫通したことを示す流下ノズルからの流下状況（映像）の変化が、A042の2回目以降については確認されなかった。これは、かくはん棒（直棒）が斜めに挿入され、流下ノズルに挿入されていなかった可能性があることを示している。

## 7. 2 かくはん棒が曲がったことに対する対策

かくはん棒の曲がり、かくはん棒の挿入状態が斜めになっている状況で、上部からの過度の荷重付加が原因で発生したことから、かくはん棒上部からのパワーマニピュレータによる荷重付加を行わないこととする。

なお、かくはん棒の挿入操作の補助としておもり治具を使用することについては、かくはん棒が斜めの状態における座屈荷重に比べて当該おもり治具による荷重は小さいことから、支障は生じない。

## 8. 今後の原因究明等に必要な作業

### 8. 1 今後の原因究明等に必要な作業の内容、目的

本法令報告に係る原因究明等のために今後以下の作業を実施する計画である。各作業の内容、目的を以下に記す。また、各作業時に想定される事象及びそれらに対する対応についても検討した。(添付資料-33参照)

#### ①熱上げ、レンガの回収

- ・天井レンガ一部損傷の原因究明のため、炉底部に落下していると推定されるレンガを回収する。
- ・レンガの回収は、ガラス熔融炉を熱上げし、炉内のガラスを熔融させた上で、ガラス熔融炉上部の開口から専用の治具（レンガ回収治具）を挿入して実施する。
- ・回収したレンガについては、その個数の把握や外観等の観察を可能な限り行い、これまでの原因究明における熱応力による損傷の考え方との整合性などを検証する。

#### 【作業時の想定事象】

- i. 炉内圧力が上昇した場合
  - ・レンガ回収治具挿入のために設置した保守治具入口シャッタの操作を誤るなどして炉内圧力が上昇した場合、圧力上昇が一時的であることを確認するが、継続的に圧力が上昇するなどして作業継続困難な場合はシャットダウンに移行する。
- ii. レンガ回収治具が故障した場合
  - ・レンガ回収治具は4基製作しているため、別のレンガ回収治具に交換してレンガ回収を試みる。
  - ・レンガ回収治具シャフトの変形等によりレンガ回収治具の撤去が困難な場合で、レンガ回収治具を挿入した際の高さから底部電極中央部にレンガが存在しないことが確認できている場合（流路が確保されていることが確認できている場合）は、ガラスの抜き出しを試みる。レンガの存在が否定できない場合及び回収治具の想

定外の損傷等が確認された場合はシャットダウンに移行する。

- iii. レンガが炉底傾斜面に存在するなどして回収できない場合
  - ・ 炉内でレンガ回収治具を傾けて傾斜面のレンガ把持を試みる。
  - ・ レンガが把持できない場合、回収治具を挿入した際の高さから底部電極中央部にレンガが存在しないことを確認したうえで（流路が確保されたことを確認したうえで）、ガラスの抜き出しを試みる。

## ②ガラスの抜き出し

- ・ 炉底部の損傷の有無を確認するため、炉内のガラスの抜き出しを行う。
- ・ 炉内のガラス抜き出しに際しては、流下速度低下が発生した場合の対応として予めかくはん棒（直棒）又は流下補助治具（かくはん棒（直棒）と類似の治具）をガラス熔融炉に設置する。流下補助治具を使用する場合は、負圧維持治具を保守治具入口シャッタ上部に設置する。一方、かくはん棒（直棒）を使用する場合は、一旦ガラス熔融炉を放冷した後に保守治具入口シャッタに替えて原料供給器を復旧し、原料供給上部に設置する。
- ・ かくはん棒（直棒）及び流下補助治具は、使用の都度、減肉状態を確認し5 mm以上の減肉が認められないことを確認したうえで使用することとする。なお、解析により、おもり治具45 kgfの荷重に対して、十分に保守的な評価として長さ約500 mmにわたり約6 mm以上減肉した場合に座屈に至る結果が得られたことから、これに対し更に保守的に減肉5 mmを使用の制限値とした。

### 【作業時の想定事象】

- i. ガラス抜き出しを開始したが流下速度が上昇しない場合
  - ・ 予め手順に定められた制限（流下速度が□□ kg/h未満のまま□□時間が経過してしまう場合）に至った場合には、流下を停止し、シャットダウンに移行する。
- ii. ガラス熔融炉内のガラス抜き出し中に、残留レンガ片等が流路に閉塞し、流下速度が低下した場合
  - ・ 流下を継続できる場合はガラスの抜き出しを継続する。流下速度が大きく低下し流下の継続が困難になった場合には、必要に応じて流下補助治具（又はかくはん棒（直棒））を炉内に挿入し、閉塞解除を試みる。閉塞解除できない場合には、シャットダウンに移行する。



### ③炉内詳細観察

- ・炉内のガラスを抜き出し、放冷した後、炉内の観察を行う。
- ・炉内に残留したガラスにより炉底部の観察が実施できない場合は、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。
- ・炉内観察は、かくはん棒による炉底部損傷の有無を確認するとともに、天井レンガ損傷の原因究明のため、炉内のガラスにより確認できなかった天井以外の他のレンガに損傷等がないことを確認する。

これらの調査の結果、炉底部の損傷が確認された場合や、天井レンガ損傷に対して熱応力の発生以外の要因が考えられる場合は、追加の原因究明を行い、対策を検討するものとする。

## 8. 2 今後の原因究明等に必要な作業におけるレンガ損傷の抑制について

上記作業のうち、ガラス熔融炉の熱上げ及びガラスの抜き出し作業に間接加熱装置を使用する。本作業において、間接加熱装置は、天井レンガへの熱応力発生を抑制するために温度降下速度を抑制する（8. 2章参照）。このため、熱上げ時に、間接加熱装置によるガラスの温度上昇が完了し、電極間通電に移行した後、間接加熱装置を停止する際の温度降下速度は、熱応力発生抑制のための降下速度 $10^{\circ}\text{C}/10$ 分程度以内となるよう運転を行う。なお、本操作は、プログラムに基づき自動で電力降下する手順となっており、過去の運転実績から温度降下速度 $10^{\circ}\text{C}/10$ 分程度以内を確保できるものと考えられる。

また、ガラスの抜き出し作業において、ガラス熔融炉内のガラス液位低下に伴い主電極間による通電が行えなくなるため、間接加熱装置による加熱を実施する。このため、ガラスの抜き出し作業が終了した後、間接加熱装置の停止を行う必要がある。しかし、ガラスの抜き出し終了後の間接加熱装置停止についても、同様にプログラムに基づき電力降下する手順となっており、過去の運転実績から $10^{\circ}\text{C}/10$ 分程度以内の温度降下速度を確保できるものと考えられる。

上記以外で、間接加熱装置起動中に何らかの原因で手動により間接加熱装置を停止する必要がある場合でも、上記プログラムと同程度の電力降下を実施することで、間接加熱装置の温度降下速度 $10^{\circ}\text{C}/10$ 分程度以内を確保できるものと考えられる。（添付資料－23参照）

## 9. 今後実施する原因究明等に係る作業に対する安全性評価

### 9. 1 現時点のガラス溶融炉Aに対する安全性評価

8章で述べた今後の原因究明等を行うために必要な炉内ガラス抜出しのための熱上げ操作が安全に実施できることについて評価を実施した。

評価のポイントは、次のとおりとした。

- (1) ガラス溶融炉の強度及び耐震性
- (2) 高レベル廃液ガラス固化建屋内の放射線しゃへい性能
- (3) ガラス溶融炉の閉じ込めの機能
- (4) かくはん操作によるガラス溶融炉底部及び炉内レンガに対する影響
- (5) ガラス溶融炉側壁及び炉底部レンガの健全性
- (6) 電気設備の絶縁抵抗の回復状況

#### (1) ガラス溶融炉の強度及び耐震性

ガラス溶融炉の天井レンガは、図3に示すアーチ構造の一種である「ジャックアーチ（陸迫：ろくぜり）」と呼ばれる天井構造を取り入れるとともに、クリップアンカにより天井から吊り、さらにダボ構造を組み合わせて構築している。

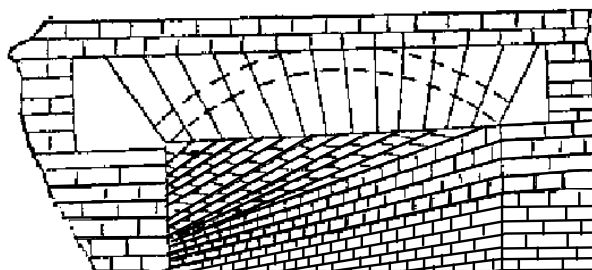


図3 ジャックアーチ（陸迫）※破線は仮想線

アンカレンガが健全な場合には、両側面のほぼ全面で平板レンガの荷重を受けるが、アンカレンガのダボ部より下の部分が損傷している状態では、このアンカレンガが支持すべき平板レンガの荷重はダボ部より上の部分で支持することになるため、荷重を受ける面積が減少することになる。(図4参照)

クリップアンカにより天井から吊られているアンカレンガの一部が落下し、隣接するレンガの荷重支持面積が減少した状態における天井レンガの荷重支持面に発生する圧縮応力を求め、天井レンガの圧縮強度よりもはるかに小さく、アンカレンガの一部が損傷した状態でも十分平板レンガを支持できることを確認した。(添付資料-34参照)

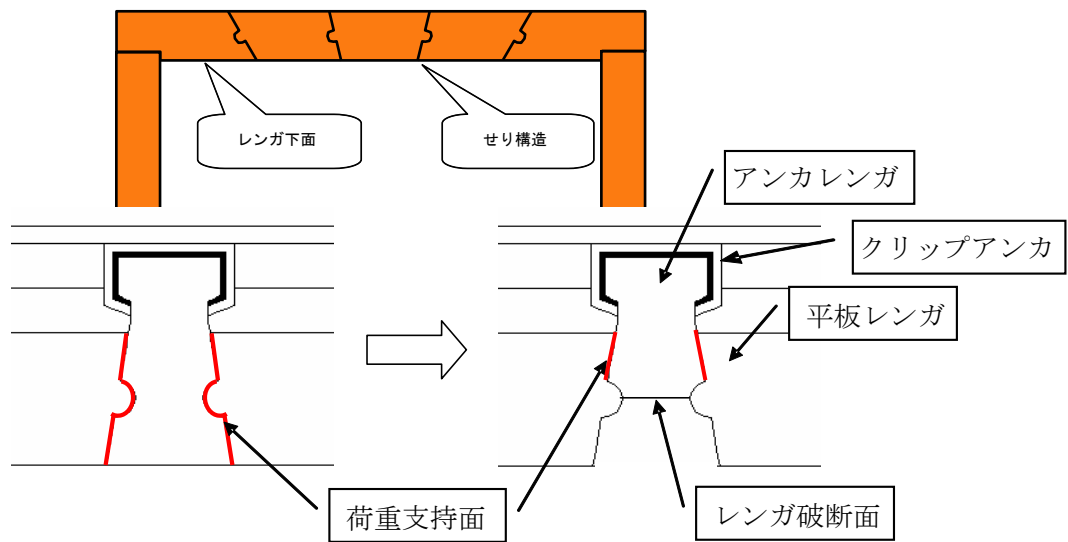
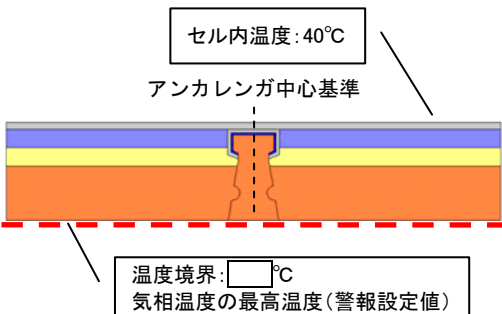
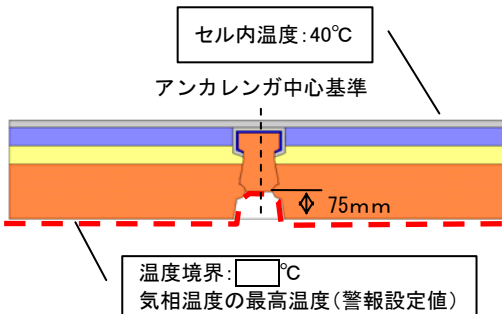
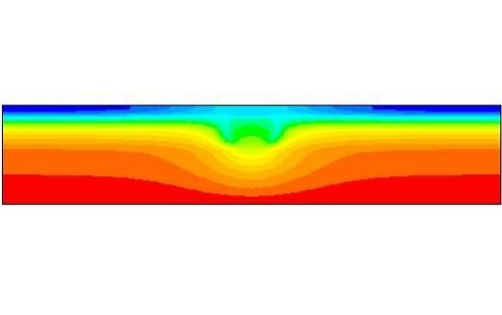
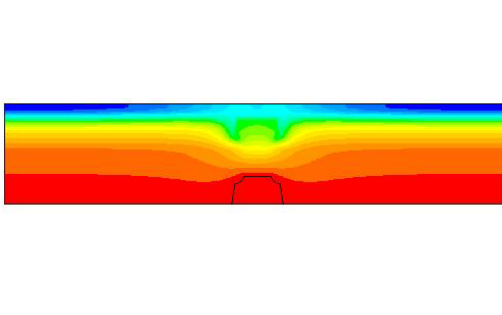
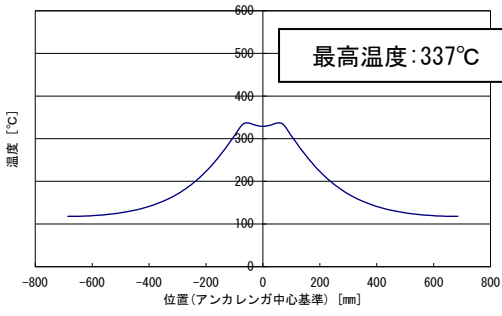
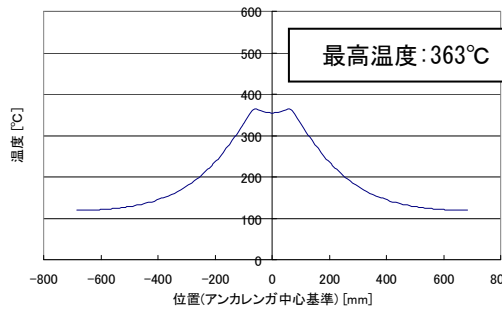


図4 ガラス溶融炉天井レンガの断面図

また、ガラス溶融炉の耐震性評価においては、レンガはケーシングへの付加質量とみなしてガラス溶融炉ケーシングの強度評価を行っている。天井レンガが損傷することにより耐震評価に影響を与える可能性が考えられるものとして、本体ケーシング温度がある。耐震性評価にあたり本体ケーシングの物性値には、最高使用温度400℃の値を用いているが、天井レンガが損傷した場合、天井部のケーシング温度が上昇することが予想されることから、天井レンガの一部が損傷した場合のモデルを作成し、伝熱解析によりケーシング温度の確認を行った。解析結果を表2に示す。

表2 ケーシング温度への影響確認結果

		アンカレンガ 通常状態	現在の損傷状態
解析条件			
	解析結果		
	ケーシング表面温度		

解析の結果、表2に示すとおり、ケーシング最高温度は通常状態の337℃に対し、今回の天井レンガ一部損傷状態では363℃と約20℃上昇する結果となったが、最高使用温度400℃を下回っており、耐震性評価に用いている評価条件を上回ることはないことを確認した。

(2) 高レベル廃液ガラス固化建屋内の放射線しゃへい性能

ガラス溶融炉が設置されている固化セルのしゃへい性能評価では、天井レンガに対して、しゃへい機能を期待していないことから、天井レンガの一部損傷がしゃへい性能評価に影響を与えることはない。

### (3) ガラス溶融炉の閉じ込め機能

ガラス溶融炉は、主にケーシングと耐火レンガで構成され、溶融ガラスが漏れにくい構造であるとともに、高レベル廃液ガラス固化廃ガス処理設備により炉内部を負圧に維持することで閉じ込め機能を確保する設計としている。ガラス溶融炉は、他の溶接された機器と異なり密閉構造ではなく、図5に示すように流下ノズル周りの隙間等から炉内へ空気が流れ込む（インリーク）構造となっている。

ガラス溶融炉は、このインリークも含めて高レベル廃液ガラス固化廃ガス処理設備により負圧が維持されており、天井レンガの一部損傷が、ガラス溶融炉の閉じ込め機能に影響を与えることはない。

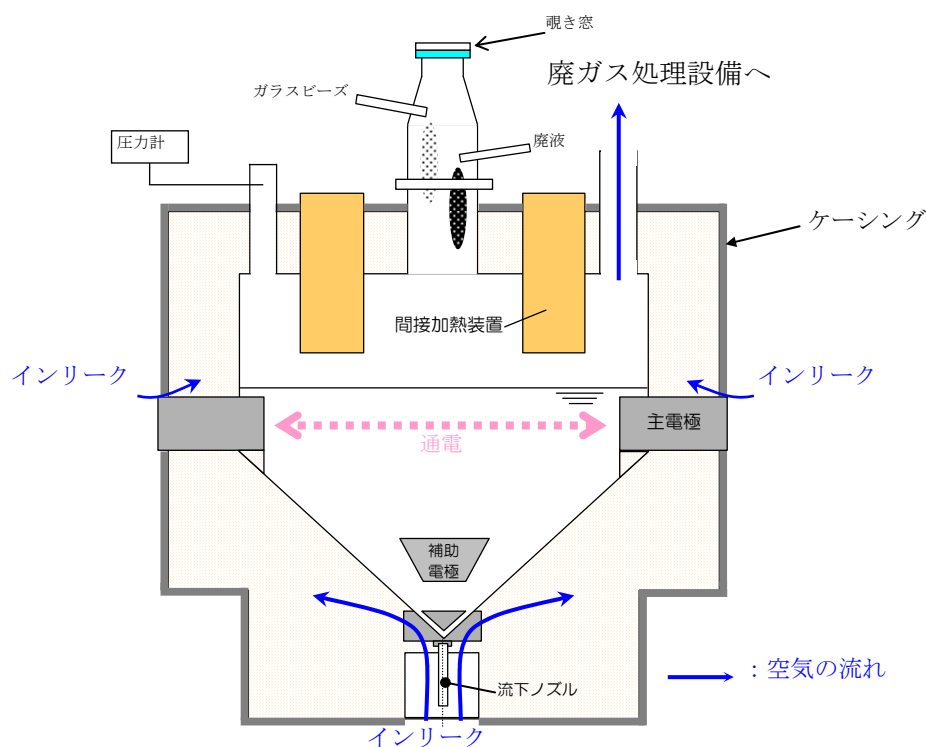


図5 ガラス溶融炉の閉じ込め構造

### (4) かくはん操作によるガラス溶融炉底部及び炉内レンガに対する影響

ガラス溶融炉内でかくはん棒が曲がっており、かくはん操作時にガラス溶融炉の底部を損傷させた可能性が考えられることから、炉底部の評価を実施した。評価は、かくはん操作により荷重がかかった可能性のある炉底傾斜部の耐火レンガ及びガラス溶融炉の底部電極下部に位置するインナーケーシングに対して実施した。評価の結果、おもりに扱具やパワーマニピュレータの荷重を考慮してもインナーケーシング及び炉底部のレンガは損傷

に至らないことを確認した。(添付資料-35参照)なお、炉内観察の結果、損傷したレンガ以外の天井部レンガについては損傷は確認されなかった。

## (5) ガラス熔融炉側壁及び炉底部レンガの健全性

### 1) 側壁レンガの健全性

側壁レンガはせり持ちとアンカ支持構造を組み合わせた構造となっており、仮にレンガ側壁に亀裂が入り貫通した場合でも、側壁レンガの一部がアンカでケーシングと固定されていること、および上下からのレンガで挟まれ、荷重を受けていることからレンガのブロックが熔融炉内部に脱落することは考えられない。

また、間接加熱装置が温度低下したときに側壁レンガに応力集中があるのは図6の段差部であり、ここで損傷が発生する可能性があるが、当該レンガはその上部で天井レンガの段差で支持されており、レンガ接触面には摩擦力が働くことから、横荷重が作用しても内部に脱落するとは考えにくい。

また、アンカレンガ部についても、万一損傷が生じたとしても同様に摩擦抵抗により滑り落ちることはないと考えられる。

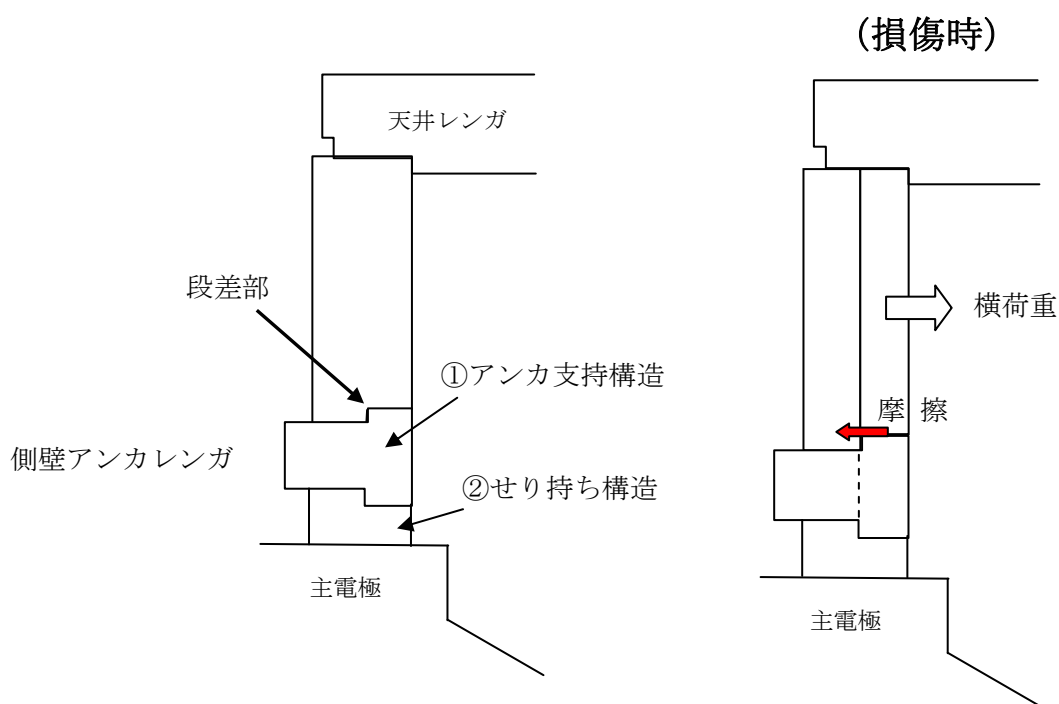


図6 側壁レンガの支持構造

## 2) 炉底部レンガ

炉底傾斜部のレンガ構造は、接液レンガとバックアップレンガにより構成される。

炉の傾斜部に配置された接液レンガについては、炉底から組上げられた構造となっているが、補助電極下部を除いては水平方向の目地ではなく、傾斜面に対し垂直に目地を入れることと、炉内へのせり出しを防止するために、四隅での各面のレンガとせり構造になっている。

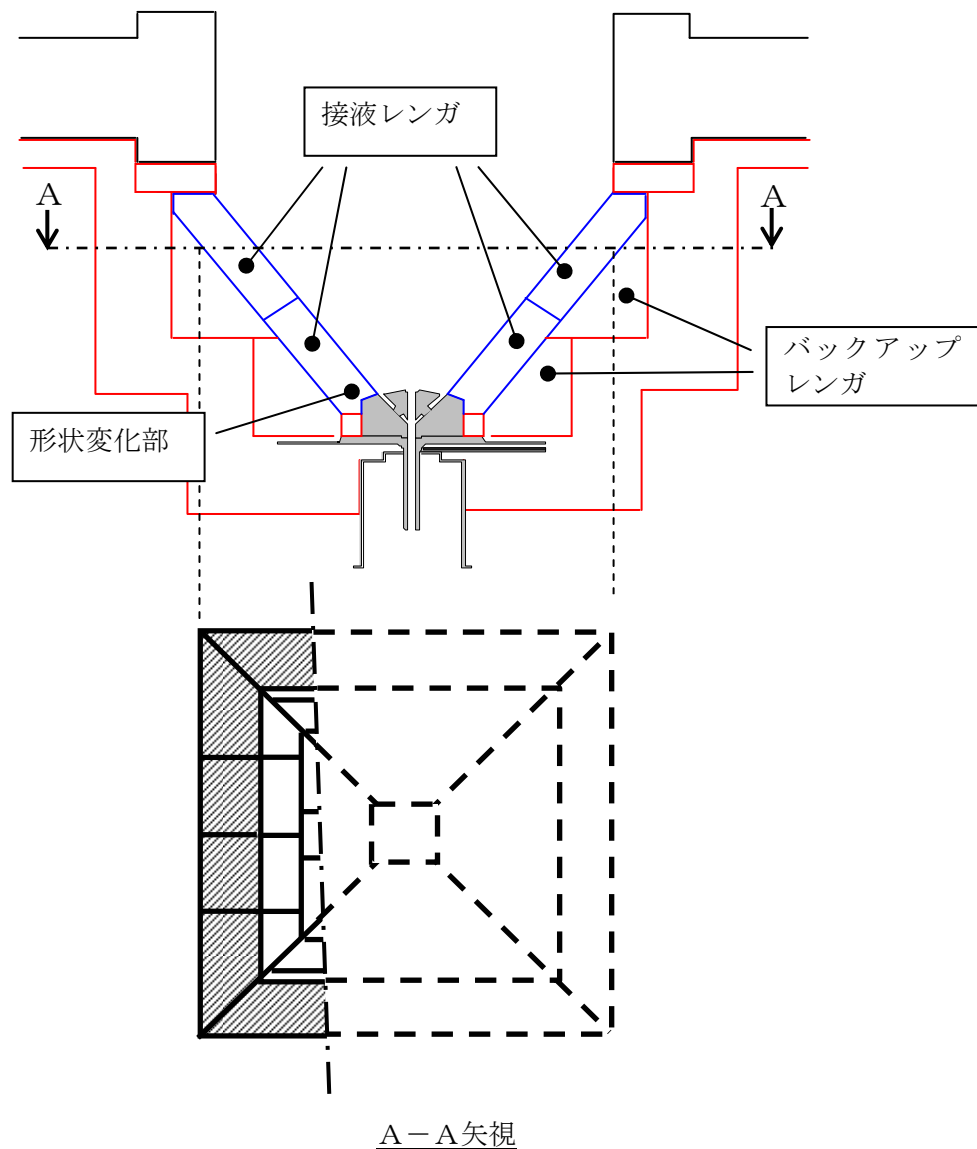


図7 炉底傾斜部耐火物構造

炉底傾斜部はそれ自体、自重によりバックアップレンガに押しつけられる方向に力が働くとともに、傾斜部より上部のレンガの荷重により傾斜面に沿って圧縮による拘束力が働く。

さらに各面はせりにより、隣接するレンガ面の傾斜面に沿った下向きの力により、横方向からの圧縮力が働く。

以上により、レンガに亀裂が生じて、そもそも炉底部のレンガであることと、さらに各方向からの拘束力があることから、直ちに落下に至ることはないと考えられる。

このことから、亀裂の発生によるレンガブロックの脱落の可能性は、非常に小さい。

なお、炉底電極が温度降下したときに炉底部レンガに応力集中が発生するのは、底部電極周辺の形状変化部であり、損傷の可能性はあるが脱落の要因とは考えにくい。

また、炉内の健全性確認については、ガラス抜き出し後の炉内観察において最終的な確認を行う。

#### (6) 電気設備の絶縁抵抗の回復状況

ガラス熔融炉の熱上げ等を行うためには電気設備の絶縁抵抗を回復させることが必要であるため、固化セル内において水による設備の洗浄作業を行った。

この作業は、固化セルにおける高レベル廃液の漏えい事象の発生によりガラス熔融炉の電気設備（ガラス熔融炉の関連機器である金メッキした銅板で構成する電路：以下、ブスパーという）の絶縁抵抗の低下が確認されたことから必要になったものである。

高レベル廃液が付着した機器の洗浄を実施するための洗浄作業は、平成21年12月27日まで行い、その後ブスパーの絶縁抵抗が0.4MΩ以上\*であること等により洗浄効果を確認し作業を終了した。これにより、ブスパーの絶縁抵抗は熱上げを行うために必要な条件を満足する状態に回復した。

なお、絶縁抵抗以外に、洗浄前と洗浄後の状況を、ITVカメラを用いて目視により確認し、付着物が除去されていることを確認するとともに、洗浄部位に有害な傷・へこみ等使用を阻害するような異常がないことを確認した。（添付資料－36参照）

※本基準は、電気設備技術基準第58条の規定「使用電圧が300Vを



超える低圧の電路の電線相互間及び電路と大地間の絶縁抵抗は0.4MΩ以上でなければならない」に基づき設定。

## 9. 2 さらにレンガが損傷した場合に対する評価

### 9. 2. 1 さらにレンガが損傷した場合の影響評価について

今回損傷した天井レンガと同程度の応力が発生したと考えられるアンカレンガが現時点で損傷していないこと、及び6. 7. 2. 2章で記載の曲げ強度試験結果による評価から、今回発生した事象は非常に稀なケースであり、今後同様の事象が発生する可能性は低いと考えられる。さらに、天井レンガの発生応力の低減(7. 8章参照)を行うことにより、その可能性はさらに低くなる。しかしながら、これまでの運転において既に損傷レンガと同程度の熱応力が発生しているレンガについては、損傷には至っていないもののレンガ内部の状態を確認できず、また、今後もインターロックによる想定外の停止は起こる可能性があるため、今後の運転において更に天井レンガが損傷した場合の影響について評価を行った。

以下の①、②に示す天井レンガの組積方法から、平板レンガは落下することはないと、アンカレンガもダボから下の部分を除いては、落下することはないと考えられる。

#### ①いずれかのアンカレンガでダボより下が損傷した場合

ダボより上部のアンカレンガにせり持ち構造部分が残存しており、平板レンガを支持するため、平板レンガが脱落することはない。

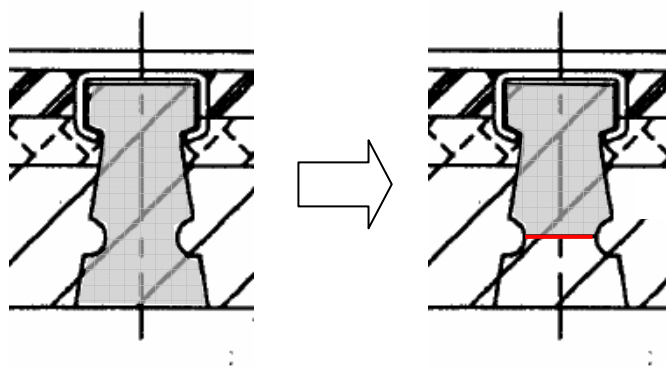


図8 いずれかのアンカレンガでダボより下が損傷した場合

#### ②いずれかのアンカレンガで首部の部分で破断した場合

アンカレンガ首部にも一部応力の集中が確認されたが、首部より下のア

アンカレンガはダボ構造により平板レンガに引っかかっているため下に脱落することはない。また当該アンカレンガに接している平板レンガは、この状態ではアンカレンガで支持されることはないが、当該アンカレンガ以外のアンカレンガおよび隣り合う平板レンガとの間のダボを含むせり持ち構造により支持されるため（図10）、落下することはない。

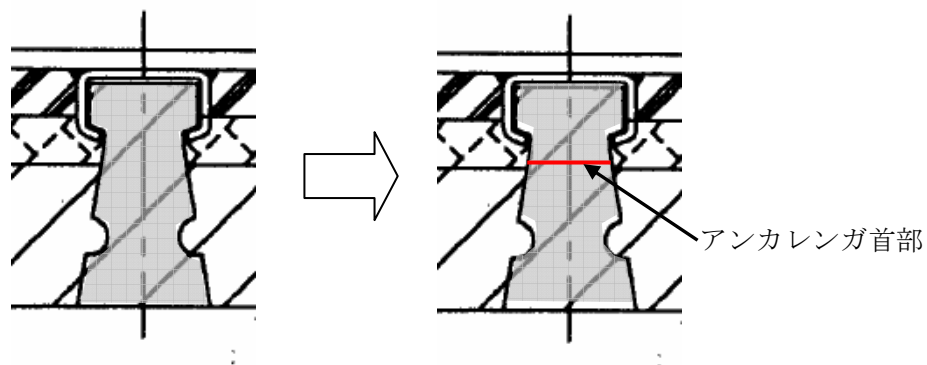


図9 いずれかのアンカレンガで首部の部分で破断した場合

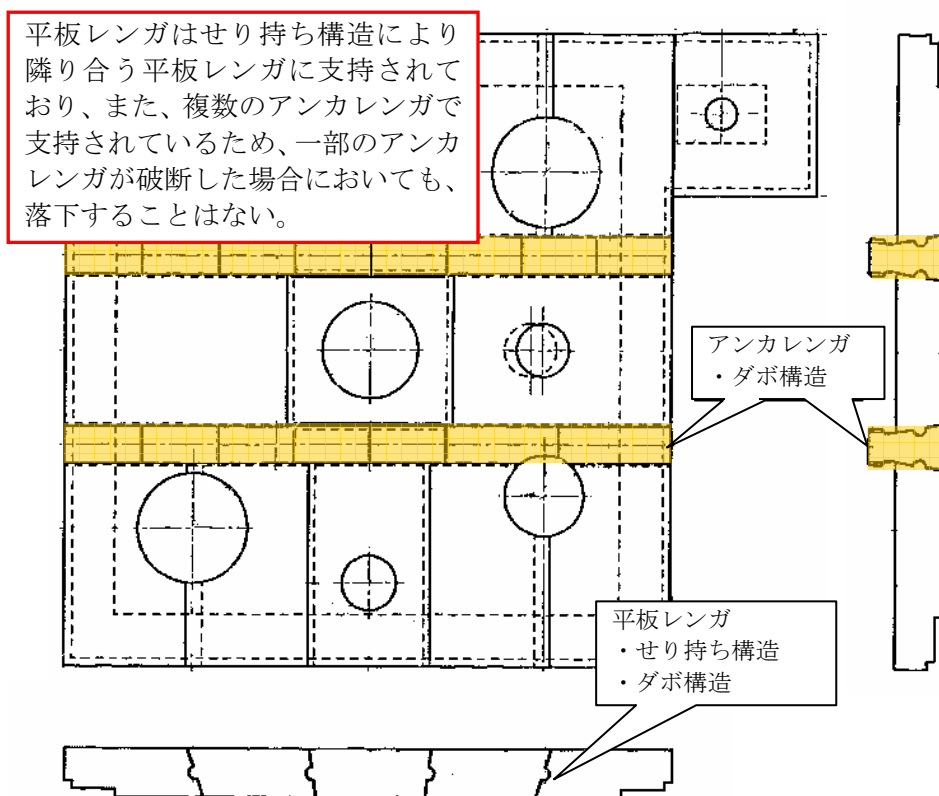


図10 平板レンガの支持構造

上記の構造を考慮すると、熱応力解析の結果応力集中が確認されたレンガについて、仮に亀裂が進展したとしてもその全てが損傷するわけではない。熱応力解析の結果、損傷アンカレンガに見られたような応力集中（図 1 1）が確認されたレンガ（図 1 2）のうち、上記の構造を考慮すると、今後の運転において万一損傷の可能性のある天井レンガは、一部のアンカレンガに限られる。

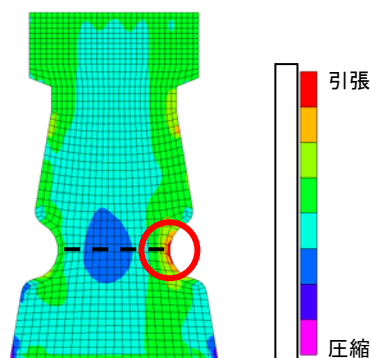


図 1 1 損傷アンカレンガの応力コンター図

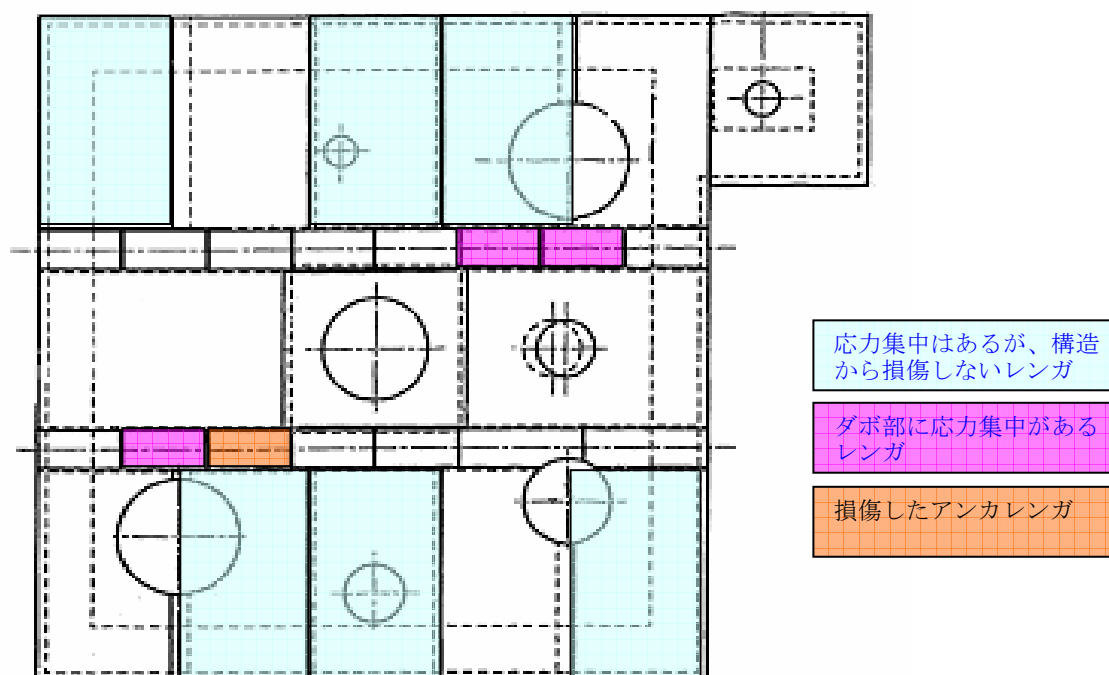


図 1 2 熱応力解析の結果から応力集中が確認されたレンガ

以上から、今後の天井レンガの損傷については限定的であり、安全に影響を与えるものではない。

## 9. 2. 2 原因究明のための運転に与える影響の評価

仮に、インターロック等により間接加熱装置温度が急激に降下するなどして、再び天井レンガが損傷した場合、ガラスの抜き出し作業時の流下速度に影響が生じることが想定される。次回行う一連の作業はガラス熔融炉内の観察を行うことを目的としたものであり、この作業に影響が生じた時点で作業を一旦中断する。流下速度が大きく低下した場合は、その時点で天井レンガの損傷が原因と判断することは困難であるが、流下速度の改善が見られない場合にはガラスの抜き出し作業を中断し、その後の対応について検討を行うものとする。

なお、原因究明のための運転中に間接加熱装置温度が急激に降下するような事象が発生した場合には、ガラス抜き出し作業後に行う炉内健全性の調査において、他の天井レンガに損傷が無いかを I T V カメラを用いて観察する。

以 上