

天井及び側壁レンガの施工方法について

レンガの施工段階において、レンガ同士が面で均一に接触せず一部だけが接触する（片あたりする）施工であった場合、一部だけが接触する箇所での荷重の集中や、熱膨張を吸収できないといった状態が発生する可能性がある。

ガラス溶融炉の構造において、熱膨張を吸収できない構造という要因に対する評価として、ガラス溶融炉の天井及び側壁レンガの施工方法・施工管理（アンカレンガの支持あたりの均一性確認、スキマの均一性）に対して片あたりの発生等に係る設計上及び施工上の考慮について調査を行った。

1. 設計上の考慮

(1) 片あたりに対する考慮

アンカレンガと平板レンガの間には□mmの目地(モルタル施工)を設けているため、基本的にはガタが無い（片あたり状態にならない）設計としている。

(2) 容器内にレンガを施工する上での寸法的な逃げの考慮

(1)で示した基本的な片あたりに対する考慮に加えて、容器内での耐火レンガの施工段階における片あたり発生防止、スキマ均一性を保つための方法として、以下のとおり、天井レンガ及び側壁レンガのそれぞれに施工設計上の寸法的な逃げが考慮されており、さらに天井レンガと側壁レンガを組み合わせる際にも、その間に目地を設ける設計としている。(図1参照)

○天井部および側壁部は個別に耐火レンガを施工

側壁部：断熱ボード 30B を設置した後、耐火レンガ(AZGS、K-3、CS-5、MRT-70K)を施工する。その後、断熱ボード 30B と耐火レンガとの間にキャストブル(LP135)を流し込む。(キャストブルで寸法を吸収)

天井部：天板に断熱ボードおよびアンカレンガを設置した後、キャストブルを施工し、天井部平板レンガを施工する。アンカレンガと平板レンガとの間および平板レンガ同士の間にはモルタル目地施工する。

○側壁 AZGS と天井 AZGS との当り面には□mmのモルタル目地代を設けている。

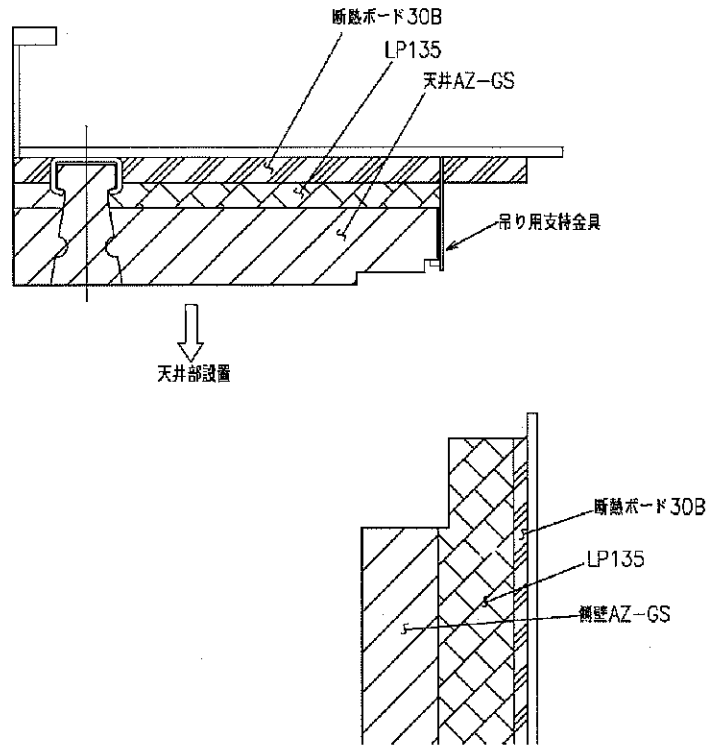


図1 ガラス溶融炉天井部及び側壁部

(3) 目地代の妥当性評価

レンガ間に設けられる目地(モルタル目地施工)について、設定した目地代(□mm)に対する妥当性の評価を行った。

レンガ間にモルタル目地を□mm 設けた場合、以下のとおり、耐火レンガの設計温度□°Cにおけるレンガ熱膨張量は、目地の収縮及びケーシングの熱膨張により十分吸収できるため、モルタル目地代□mm というのは妥当な設定である。

①レンガ膨張量

$$\square \text{ mm} \times \square \% \times \square = \square \text{ mm}$$

天井レンガ長手巾：□mm (※1)

熱膨張率：□% (□°Cにおける膨張率)

実行率：□ (片面加熱を考慮した係数、レンガメーカー実績)

②モルタル目地収縮量

$$\square \text{ mm} \times \square \% \times 4 \text{ 箇所} = \square \text{ mm}$$

目地モルタル代：□mm

目地収縮率：□%

目地施工箇所：4箇所 (※2)

③ケーシング熱膨張量

$$\square \text{ mm} \times 17.3 \times 10^{-6} \text{ mm/mm/}^{\circ}\text{C} \times \square \text{ }^{\circ}\text{C} = \square \text{ mm}$$

ケーシング熱膨張率：17.3×10⁻⁶mm/mm/°C

ケーシング表面温度：□°C

必要熱膨張代（天井レンガ両側）は

$$\text{レンガ熱膨張量} - (\text{モルタル目地収缩量} + \text{ケーシング熱膨張量}) \\ = \square \text{mm} - (\square \text{mm} + \square \text{mm}) = \underline{4.7\text{mm}}$$

したがって、天井レンガ片側の必要熱膨張代は、

$$4.7\text{mm} \div 2 = \underline{2.35\text{mm}}$$

天井レンガの両側には片側 \square mm の熱膨張代が設けてあり（※3）、隙間にセラミックボードがはさまれている。セラミックボードの可縮代すなわち有効熱膨張代は、

$$\square \text{mm} \times \square \% (\text{可縮率}) = \underline{3\text{mm}}$$

となり、天井レンガ片側の必要熱膨張代 2.35mm 以上が確保されている。

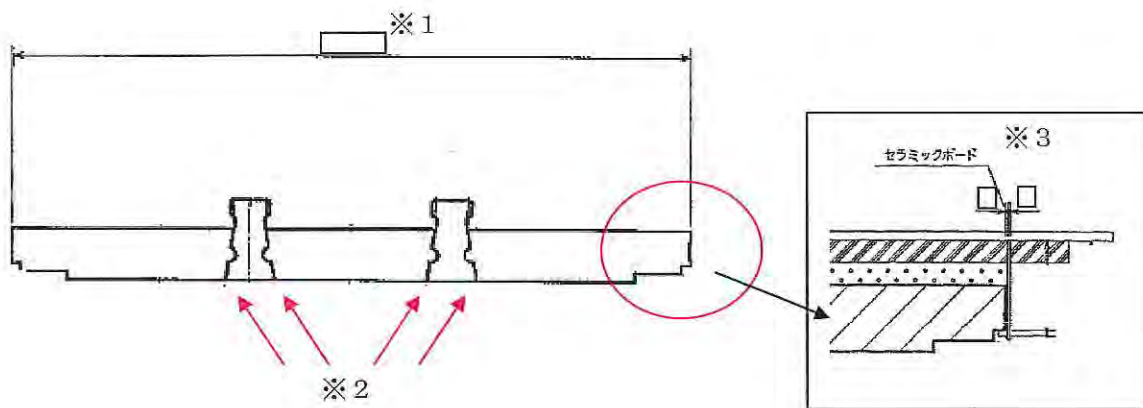


図2 目地代の妥当性評価

2. 施工上の考慮

片あたりの発生等に対する設計上の考慮が施工段階において確実に反映されるように、以下の施工上の管理が行われている。

(1) レンガ製作時における管理

レンガは目地幅が \square mm となるように単品形状を設計しており、レンガ製作時には、目地を含めた寸法の確認を行うため、目地の \square mm を \square mm 厚の厚紙で模擬して仮組みし、寸法を確認している。

(2) 築炉時における施工管理

築炉にあたっては、目地代 \square mm を示した「レンガ図面」及び施工の方法について定めた「築炉要領書」を作成しており、これに基づき作業監督者の下、築炉作業を行っている。

築炉要領書には、以下が記載されており、作業プロセスの中で、スケールにより全ての目地代が約□mm 確保されていることを確認している。

- ・レンガ函面を元に築炉を行うこと
- ・築炉の手順
- ・使用する目地材（モルタル）の種類
- ・目地切れのないこと

3. 評価

以上より、施工段階で片あたり等が発生しにくい方法を採用しており、また、目地の施工に配慮した適切な施工管理が行われていることから、片あたり等が原因で熱膨張を吸収できない構造になっているということは無いと考える。

以 上

ガラス溶融炉に対する外力の影響評価

1. はじめに

炉底かくはん操作等の遠隔操作時に、ガラス溶融炉の外側（ケーシング等）から治具が接触し荷重や衝撃が加わった場合や、負圧維持オリフィス開不良時の操作における振動、第4ステップ終了後のはつり作業時の振動により天井レンガが損傷した可能性も考えられることから、外力の影響について調査を行った。

ガラス溶融炉のケーシング等に外力が加えられた場合、当該外力は天井レンガに直接作用するわけではなく、ケーシング等に与えられた外力が間接的に天井レンガに作用する。外力としては、天井レンガに変位を与える静的荷重と天井レンガに振動を与える衝撃とが考えられる。ただし、静的荷重については天井部は十字にリブが設置（図1参照）され、ケーシング全体の強度が高く、遠隔操作で使用するかくはん棒を想定した100kgの静的荷重がリブ中央部に集中してかかる場合でも変位は最大で 3×10^{-3} mm程度とほとんどなく、この程度の変異は天井レンガ上部の断熱ボード、ファイバーウールといった断熱材に吸収されるため天井レンガへの影響はない。（図2参照）

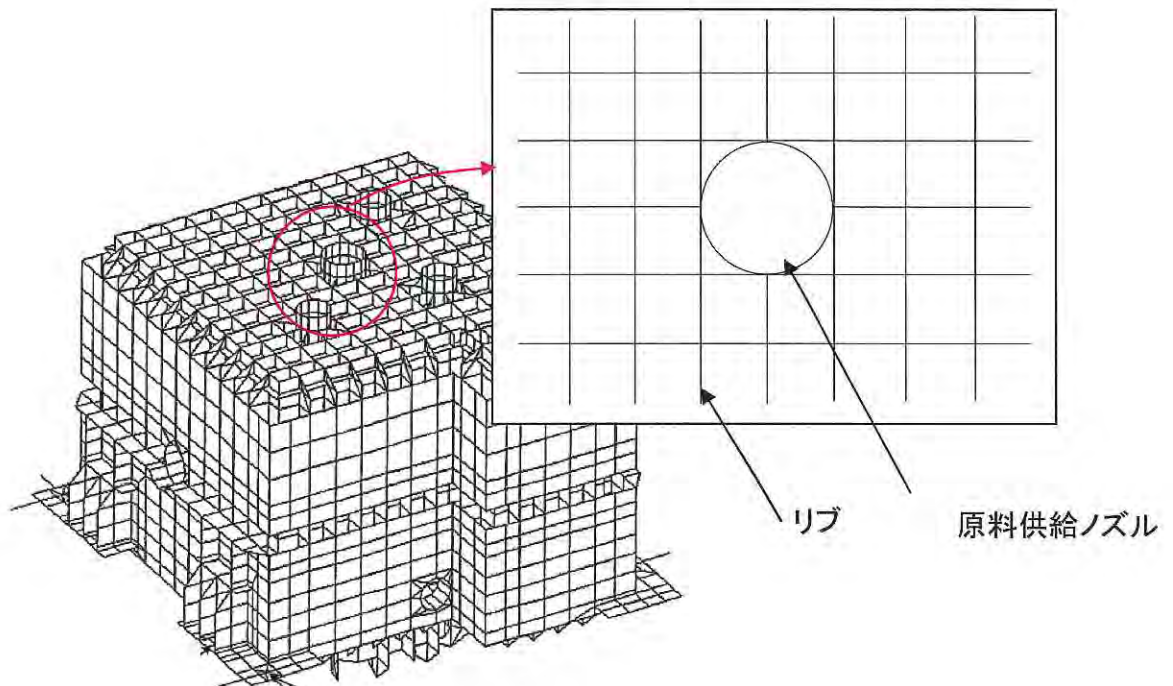


図1 ケーシング構造イメージ図

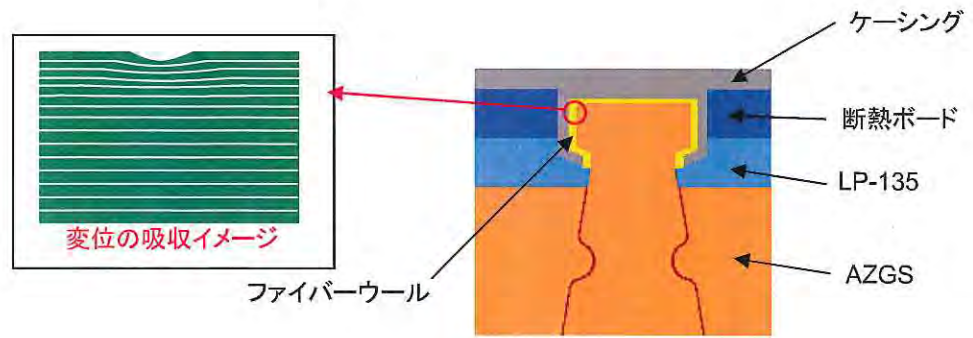


図2 天井レンガの構造（変位の吸収）

一方、ケーシングへの衝撃力に起因する振動の加速度については天井レンガに影響する可能性があることから、ここでは天井レンガを損傷させるために必要な加速度について評価を行った（図3参照）。

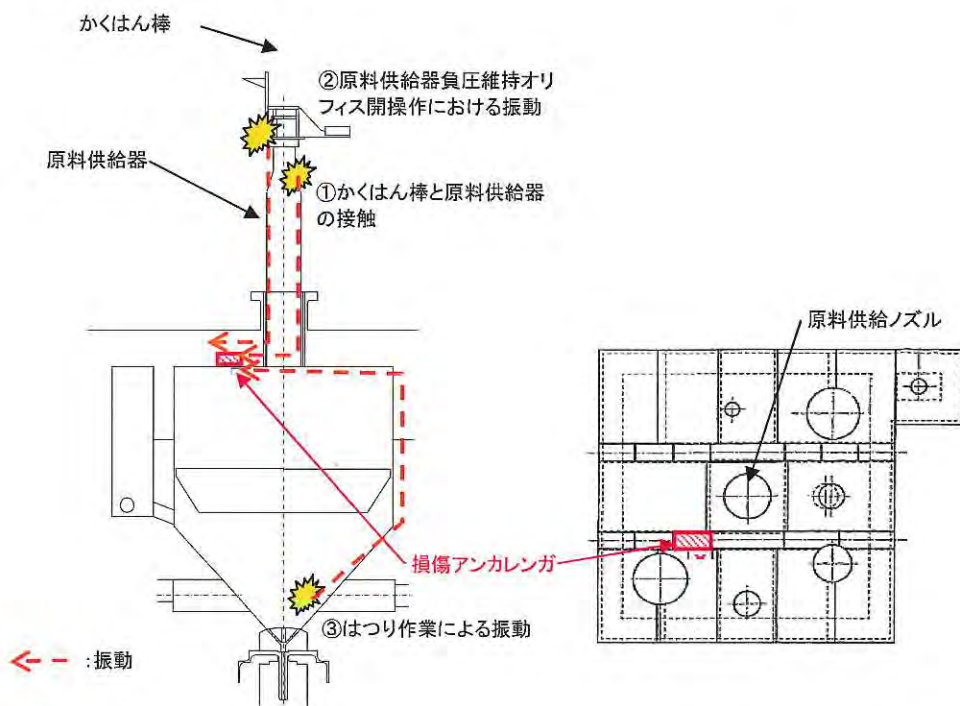


図3 損傷アンカレンガに伝播する振動のイメージ

2. 加速度の評価結果

本検討では、計算を単純化するためアンカレンガとその横の平板レンガがダボ部のみで接触し、ダボ部以外の両者の間で接触がない状態を評価条件として設定し、アンカレンガの横方向の振動により、ダボ部（固定点）周りに生じるモーメントと釣り合う荷重を以下の2通りの破壊モードを想定して求め、各々についてアンカレンガが破壊に至る横方向の加速度を計算した。

- (1) アンカレンガの引張応力が限界値を超えた場合
- (2) アンカレンガの曲げ応力が限界値を超えた場合

横方向の振動の加速度を α とし、図4に示すように、振動が発生した際のダボ部より下側のレンガのモーメントの釣り合いを求める。ダボ部の接触点と落下レンガの重心との距離の横方向を L_1 、縦方向を L_2 とし、落下レンガの質量を m とし、落下レンガのモーメントの釣り合い式をとると、以下の式が得られる。

$$L_2 \times m\alpha = M$$

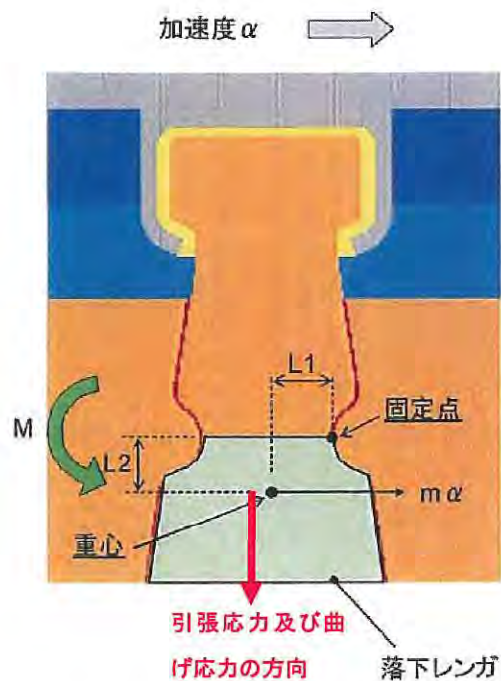


図4 ケーシングが揺れた瞬間の落下レンガのモーメントの釣り合い

2. 1 アンカレンガの引張応力が限界値を超えた場合の計算
アンカレンガダボ部周りのモーメントの釣り合い

$$L_2 \times m\alpha = M (= F \times L_1)$$

F : アンカレンガダボ部が破壊される下向きの力 [N]

アンカレンガダボ部が破壊される下向きの力 F

レンガ曲げ強度試験の平均値 (12.5MPa) の半分がレンガの引張強度とすると、レンガの引張強度は 6.25MPa となり、この応力がアンカレンガダボ部の断面 (断面積 $18565\text{mm}^2=18565 \times 10^{-6}\text{m}^2$) に働くと、レンガが破壊されることとなる。この時のアンカレンガダボ部が破壊される下向きの力は以下の式より求められる。

$$F = \sigma \times A = 6.25 \times 10^6 \times 18565 \times 10^{-6} = 1.16 \times 10^5 [\text{N}]$$

F : アンカレンガダボ部が破壊される下向きの力 [N]

σ : アンカレンガの引張強度 [Pa]

A : アンカレンガダボ部の断面積 [m^2]

アンカレンガダボ部が破壊される下向きの力が発生するために必要な横向きの加速度 α

$$\alpha = (F \times L_1) / (L_2 \times m) = (1.16 \times 10^5 \times 42) / (38.7 \times 6.83) = 1.84 \times 10^4 [\text{m/s}^2]$$

L_1 : ダボ部の接触点と落下レンガの重心との距離 (横方向) [mm]

L_2 : ダボ部の接触点と落下レンガの重心との距離 (縦方向) [mm]

m : アンカレンガダボ部より下側のレンガの質量 [kg]

2. 2 アンカレンガの曲げ応力が限界値を超えた場合の計算
アンカレンガダボ部周りのモーメントの釣り合い

$$L_2 \times m\alpha = M$$

M : アンカレンガダボ部が破壊されるモーメント [$\text{N} \cdot \text{m}$]

アンカレンガダボ部が破壊されるモーメント

レンガ曲げ強度試験の平均値 (12.5MPa) がレンガの曲げ強度とすると、レンガの曲げ強度は 12.5MPa となり、この応力がアンカレンガダボ部の断面に働くと、レンガが破壊されることとなる。この時のアンカレンガダボ部が破壊されるモーメントは以下の式より求められる。

$$M = \sigma_b Z = 12.5 \times 10^6 \times 244439 \times 10^{-9} = 3055.5 [\text{N} \cdot \text{m}]$$

M : アンカレンガダボ部が破壊されるモーメント [$\text{N} \cdot \text{m}$]

σ_b : アンカレンガの曲げ強度 [Pa]

Z : ダボ部の断面係数 [m^3] = $1/6 \times 235 \times 79^2 \times 10^{-9} = 244439 \times 10^{-9}$ [m^3]

アンカレンガダボ部が破壊されるモーメントが発生するために必要な横方向の加速度 α

$$\alpha = M / (L_2 \times m) = 3055.5 / (38.7 \times 10^{-3} \times 6.83) = 1.16 \times 10^4 [m/s^2]$$

L_2 : ダボ部の接触点と落下レンガの重心との距離 (縦方向) [mm]

m : アンカレンガダボ部より下側のレンガの質量 [kg]

2. 3 アンカレンガの破壊に必要な加速度の評価

アンカレンガが破壊する力が発生するために必要な横方向への加速度を算出した結果、下方方向に力が生じると考えた場合は $18400m/s^2$ ($\approx 1880G$)、曲げモーメントが発生すると考えた場合は $11600m/s^2$ ($\approx 1180G$) であることが確認された。上記のいずれの結果もアンカレンガに $1000G$ のオーダーの加速度が必要であることを示している。

3. 遠隔作業による加速度の評価

次に、遠隔作業で発生しうる加速度の評価として、かくはん棒が落下した場合を想定し、ケーシングに $100kg$ の重量物が $10m$ の高さから落下した場合に発生する加速度の概算評価を行った。

ケーシングに質量 m のものが落下することで失われる位置エネルギーが、全てアンカレンガの横方向 (縦方向の運動は無視) の振動に変換される場合を想定する。この場合、以下の式が成り立つ。

$$mgh = \frac{1}{2} MV^2 \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここで、 m は落下物の質量、 g は重力加速度、 h は落下高さ、 v は落下物がケーシングに落下する直前の速度、 M はアンカレンガの質量、 V は落下物によりアンカレンガに発生する横方向の振動の速度である。

静止中のアンカレンガが Δt 秒間で V まで加速された場合を考えると、アンカレンガの加速度 α は、

$$\alpha = \frac{V}{\Delta t} \quad \text{-----} \quad (2)$$

で表されるので、この式を (1) 式に代入すると、

$$mgh = \frac{1}{2} M(\alpha \Delta t)^2 \quad \text{-----} \quad (3)$$

となり、この式を変形すると、

$$\alpha = \frac{1}{\Delta t} \sqrt{2 \frac{m}{M} gh} \quad \text{-----} \quad (4)$$

となることから、落下物の質量 m を $100kg$ 、アンカレンガの質量 M を $20kg$ 、高さを $10m$ 、静止中のアンカレンガの加速時間 Δt をアンカレンガが固定されているケーシングの固有振動数 $20Hz$ より $0.05s$ ($=1/20Hz$) と想定すると、発生する加速度は下式のとおり、約 $64G$ と算出される。

$$\alpha = 626m/s^2 = 63.9G$$

4. ガラス溶融炉に対する外力の影響評価のまとめ

アンカレンガを損傷させるために必要な加速度は 1000G 以上であるのに対し、遠隔作業により発生する加速度を保守的に評価しても 64G 程度であることから、第 5 ステップ等において実施した遠隔作業で発生することが想定される以下の荷重や振動等により天井レンガが損傷した可能性は極めて低いと考える。

- ・ 治具が接触によるケーシングへの荷重や衝撃
- ・ 負圧維持オリフィス開不良時のパワーマニピュレータによる操作における振動
- ・ 第 4 ステップ終了後のはつり作業時の振動

以 上

天井レンガの一部が損傷したことに対する要因分析図

添付資料-9

要素	要因1	要因2	要因3	評価
ガラス溶融炉天井レンガの一部が損傷した	1. 設計時の材料選定が適切ではなかった	1-1 侵食、溶融、変化等によって損傷しやすい材料だった	1-1-1 耐食性が低く、侵食しやすい材料だった	× ・ホウケイ酸ガラスの溶融炉の気相部に使用される材料である。(別添資料:添付資料-10) ・メーカにより、溶融(塩酸18%)溶液や強アルカリ(苛性ソーダ20%溶液)に浸漬し、24時間の溶出試験を行ったが、レンガ成分の溶出は検出されず、酸・アルカリに対する耐食性が確認されている。
		1-2 熱的衝撃により損傷しやすい材料だった	1-2-1 耐熱性が低く、溶融しやすい材料だった	× ・耐火レンガ(気相部)の耐火度はSK35(1770℃)であり、設計温度□℃に対して余裕のある材料である。(別添資料:添付資料-10)
		1-3 熱膨張等により損傷しやすい材料だった	1-3-1 熱膨張に弱い材料だった	× ・気相温度が高い場合で□℃程度(低減が無い状態)になると、設計上の1回の運転サイクルが2週間の熱上げ、200日程度の運転、2週間の熱下げというものであることから、これを考慮した材料選定を行った。 ・メーカカタログによると、□℃-水冷のスポーリング試験(同材質のテストピースによる試験)の結果、25回の熱サイクルでも割れ等は生じない材料であるというを受け、上述した運転サイクルなどに対して十分な強度を有する材料であるという評価を設計段階で行った。
		1-4 炉内の放射線量に耐えられない材料だった	1-4-1 機械強度が小さい材料だった	× ・熱膨張係数評価を行い、必要熱膨張係数以上の有効熱膨張係数が確保されていることを確認した。(添付資料-7) ・アンカレンガにかかる応力(0.062MPa)に対し、3.1MPaの引張り強度を有し、十分余裕のある材料である。(別添資料:添付資料-11)
	2. 設計時の構造が適切ではなかった	2-1 レンガ組構が適切ではなかった	2-1-1 一般に、セラミックスが放射線損傷を受ける量は、 10^{20} n(高速中性子)/cm ² 程度とされており、ガラス溶融炉は5年間運転することで 10^{21} n(高速中性子)/cm ² 程度と推定している(標準燃焼度45000MWD/t、冷却期間4年)。	×
		2-2 熱膨張等により損傷しやすい構造だった	2-2-1 熱膨張を吸収できない構造であった	× ・一般工業炉でも採用されている構成耐火物の一般的な吊り構造であり、レンガの組構には問題ない。(別添資料:添付資料-11) ・天井レンガの組み立てとしては、天板にアンカクリップを固定し、断熱ボード等をくみ上げ、アンカレンガを設置、アンカレンガの間には目地材を塗り、その後固定金具を設置し、その後目地に目地材を入れるといった順序で組み立てを行い、施工段階で片あたりなどが発生しない方法を採用している。(添付資料-7) ・熱膨張係数評価を行い、必要熱膨張係数以上の有効熱膨張係数が確保されていることを確認した。(添付資料-7)
	3. 設計通り製作されていない	3-1 材料が異なっていた	3-1-1 天井レンガ材料の材料確認記録により問題ないことが確認されている。(別添資料:添付資料-12)	×
		3-2 寸法が異なっていた	3-2-1 材料の寸法検査記録により、アンカレンガの長さの問題ないことが確認されている。なお、アンカレンガ単体の寸法については、参考値であるが問題ないことを確認している。(別添資料:添付資料-12)	×
		3-3 築炉が設計どおり行われていなかった	3-3-1 施工段階において、キャスト、断熱ボードが設計通り施工されていること、耐火レンガが設計通り施工されていることを定期的に検査を行い確認している。(添付資料-7) 3-3-2 築炉時の検査記録により問題ないことが確認されている。(別添資料:添付資料-12)	×
	4. 製造時に構造的欠陥があった	4-1 亀裂、内部に巣等の欠陥があった	4-1-1 材料メーカによる外観検査で異常がないことは確認されている。(別添資料:添付資料-12) 4-1-2 打音検査で異常がないことを確認しているが、レンガ内の亀裂・欠陥を完全に否定することは困難である。(別添資料:添付資料-12)	△
		4-2 築炉時に欠陥が発生した	4-2-1 築炉後の炉内点検において、異常がないことが確認されている。(別添資料:添付資料-12)	×
		4-3 輸送時に損傷が発生した	4-3-1 固化セメント層の内部点検の結果、表面の一部が欠損していることが判明し、その部分は補修した。その他のレンガについては異常がないことが確認されている。(別添資料:添付資料-12)	×
	5. レンガが想定外の使用環境になった	5-1 レンガ温度(気相部温度)が想定よりも高かった	5-1-1 耐火レンガ(気相部)の耐火度はSK35(1770℃)であり、化学試験からアクティブ試験を通じて、気相部温度□℃以下に管理されている。(別添資料:添付資料-10、13)	×
		5-2 侵食性の高いガラス成分の揮発量が多かった	5-2-1 炉内観察の結果、天井レンガ表面の劣化が見られなかったこと、及び、仮に腐食が原因であるならば表面から垂直方向に侵食が進展していくはずであり今回のように特定のレンガが内部で横方向の亀裂が発生して損傷するような現象は考えられないことから、侵食性の高いガラス成分による腐食が原因になったとは考えにくい。(別添資料:添付資料-15)	×
		5-3 廃液中の硝酸濃度が高かった	5-3-1 炉内観察の結果、天井レンガ表面の劣化が見られなかったこと、及び、仮に腐食が原因であるならば表面から垂直方向に侵食が進展していくはずであり今回のように特定のレンガが内部で横方向の亀裂が発生して損傷するような現象は考えられないことから、硝酸による腐食が原因になったとは考えにくい。(別添資料:添付資料-15)	×
5-4 放射線量が想定よりも大きくなった		5-4-1 ガラス溶融炉に供給された廃液の平均燃焼度は約38000MWD/tと標準燃焼度(45000MWD/t)より低く、冷却期間も全ての使用済燃料で4年以上であること、アクティブ試験として運転した期間が4~5ヶ月であることから 10^{19} レベルと推測され、 10^{20} レベルに比べかなり小さいことから放射線損傷ではないものと考えられる。	×	
6. レンガに経年劣化が発生した	6-1 設計上想定した使用時間を超えた	6-1-1 運転時間は溶融炉の設計耐用年数を超えておらず、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は観察されていない。(別添資料:添付資料-14) 6-1-2 溶融炉内の詳細観察においてレンガの表面状態に経年劣化は観察されなかった。(別添資料:添付資料-15)	×	
	6-2 アルカリ成分による影響によりレンガが酸化した	6-2-1 KMOC天井レンガの分析結果から、アルカリ成分がレンガに浸透することにより、レンガ表面近傍において、レンガの酸化を引き起こす可能性があるジルコンの分解は確認されたものの、表面よりも深い位置(ガサ部に相当する深さ)のサンプルからは確認されなかったことから、アルカリ成分の影響によるジルコンの分解がレンガ損傷の原因になったとは考えられない。なお、ジルコンの分解と同様にレンガ酸化を引き起こす可能性があるレンガ成分中のアルミナの変質については、分析の結果、起こらないことが確認された。(添付資料-5)	×	
7. レンガに過荷を与える運転を行った	7-1 気相温度が高く、レンガの熱膨張を吸収できなかった	7-1-1 解析結果より、気相温度が□℃程度と高い場合においても発生応力は1.7MPa程度と低い。(添付資料-10)	×	
	7-2 気相温度の昇降時の温度変化により、局所的に応力が集中した	7-2-1 実際の運転を行った際に設計で想定していた熱上げ、熱下げのサイクルとは異なるタイミングで熱下げなどを実施する必要が生じ、その際の熱下げには急激に温度低下を行っているものがあつた。 7-2-2 解析結果より、気相温度が急激に低下する場合において、2.6MPa程度の応力が発生する。(添付資料-10) 7-2-3 炉底かはんやオフィス開操作における外気流入の影響は、レンガ温度にはほとんど影響しないことを解析により確認した。	△	
	7-2-1 気相部温度の昇降・降温速度が速かった	7-2-2 間接加熱装置の昇降・降温速度が速かった	△	
	7-2-2 間接加熱装置の昇降・降温速度が速かった	7-2-3 間接加熱装置の昇降・降温速度が速かった	△	
8. 荷重、衝撃などの外力が加わった	8-1 炉底かはん装置が接触した	8-1-1 炉底かはん時に接触した	×	
	8-1-1 炉底かはん時に接触した	8-1-2 曲がった直棒を引き抜く際に接触した	×	
	8-1-2 曲がった直棒を引き抜く際に接触した	8-1-3 曲がった直棒の切断・撤去時に接触した	×	
	8-1-3 曲がった直棒の切断・撤去時に接触した	8-1-4 炉底かはん装置の設置・撤去時の振動が原料供給ノズルを通じて伝わった	×	
[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	8-2 炉底かはん装置の設置・撤去時の振動が原料供給ノズルを通じて伝わった	8-2-1 炉底かはん装置の設置・撤去時の振動が原料供給ノズルを通じて伝わった	×	
	8-3 自直維持オフィスの開操作の振動が原料供給ノズルを通じて伝わった	8-3-1 自直維持オフィスの開操作の振動が原料供給ノズルを通じて伝わった	×	
	8-4 第4ステップ終了後の炉内作業の振動が接液レンガもしくはケーシングを通じて伝わった	8-4-1 炉底かはん装置の設置・撤去時の振動が原料供給ノズルを通じて伝わった	×	
	8-4-1 炉底かはん装置の設置・撤去時の振動が原料供給ノズルを通じて伝わった	8-4-2 自直維持オフィスの開操作の振動が原料供給ノズルを通じて伝わった	×	

※ 経過報告(その2)からの修正箇所を赤字で示す