

天井レンガの一部が損傷したことに対する要因分析

事実	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、劣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。(添付資料-10) ・メーカより、強酸(濃硫酸)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。(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	1-2-2 熱衝撃に弱い材料だった	× ・メーカカタログによると、□℃水冷のスポーリング試験の結果、25回の熱サイクルでも割れ等は生じない材料である。
		1-4 炉内の放射線量に耐えられない材料だった	1-3-1 機械強度が小さい材料だった	× ・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。(添付資料-11)
	2. 設計時の構造が適切ではなかった	2-1 レンガ組積が適切ではなかった		× ・一般工業炉でも採用されている焼成耐火物の一般的な吊り構造であり、レンガの組積には問題ない。(添付資料-11)
		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	× ・熱膨張代評価を行い、必要熱膨張代以上の有効熱膨張代が確保されていることを確認した。(添付資料-11)
	3. 設計通り製作されていなかった	3-1 材料が異なっていた		× ・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。(添付資料-12)
		3-2 寸法が異なっていた		× ・材料の寸法検査記録により、アンカレンガ一列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、参考値ではあるが問題ないことを確認している。(添付資料-12)
		3-3 築炉時設計どおり行われていなかった		× ・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。(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		△ ・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。(添付資料-12) ・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。(添付資料-12)
		4-2 築炉時に欠陥が発生した		× ・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。(添付資料-12)
		4-3 輸送時に損傷が発生した		× ・固化セル据付後の内部点検の結果、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。(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		× ・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。(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		× ・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、仮に腐食が要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。(添付資料-15)
		5-3 廃液中の硝酸濃度が高かった		× ・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、仮に腐食が要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。(添付資料-15)
		5-4 放射線量が想定よりも大きくなった		× ・ガラス溶融炉に供給された廃液の平均燃焼度は約3800MWD/ℓと標準燃焼度(4500MWD/ℓ)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 ¹⁰ レベルと推測され、10 ¹⁰ 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越えた		× ・運転時間は溶融炉の設計耐用年数を越えておらず、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。(添付資料-14) ・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。(添付資料-15)
	7. レンガに損傷を与える運転を行った	7-1 気相部温度が高く、レンガの熱膨張を吸収できなかった		× ・解析結果より、気相部温度が□℃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-17)
		7-2 気相部温度の昇降時の温度変化により、局部的に応力が集中した	7-2-1 気相部温度の昇温・降温速度が速かった	△ ・解析結果より、気相部温度が急激に降温する場合において、2.6MPa程度の応力が発生する。(添付資料-17) ・炉底かく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ないことを解析により確認した。
			7-2-2 間接加熱装置の昇温・降温速度が速かった	△ ・解析結果より、間接加熱装置管壁温度が急激に降温する場合において、3.4MPaの応力が発生する。(添付資料-17) ・また解析の結果、アンカレンガに関しては当該損傷部位において最も応力が高くなること分かった。(添付資料-17) ・曲げ強度試験結果による評価を行った結果、熱応力解析の結果確認された集中応力によって、少ない確率ではあるが損傷に至る可能性があることが確認された。(添付資料-18)
		8. 荷重、衝撃などの外力が加わった	8-1 炉底かくはん装置が接触した	8-1-1 炉底かくはん時に接触した
	8-2 炉底かくはん装置の設置・撤去時の振動が原料供給ノズルを通じて伝わった		8-1-2 曲がった直棒を引き抜く際に接触した	× ・A04バッチの最初直棒挿入時に、底部電極上約100mmで挿入が止まっており、この時点でレンガが炉底部に落下していた可能性が高いため、引き抜き時は考えにくい。(添付資料-8) ・棒の変形形状から棒引き抜き時に該当レンガと接触した可能性が考えられるが、クレーンの定格荷重から、変形したかくはん棒が接触することによりアンカレンガに発生する応力は0.25MPa程度であり、曲げ試験で取得した曲げ応力14.4MPa(800℃における値)程度に対して十分小さく、変形したかくはん棒による応力はレンガが破損に至るような荷重ではない。
			8-1-3 曲がった直棒の切断・撤去時に接触した	× ・A04バッチの最初直棒挿入時に、底部電極上約100mmで挿入が止まっており、この時点でレンガが炉底部に落下していた可能性が高いため、撤去時は考えにくい。(添付資料-8) ・切断、撤去時は、原料供給器を取り外し、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・撤去時に損傷した可能性はない。(添付資料-20)
	8-3 負圧維持オリフスの開操作の振動が原料供給ノズルを通じて伝わった		× レンガの引張強度6.25MPaを生じさせるケーシングの振動を机上検討したところ、1000Gオーダーの加速度が必要ことが分かった。このような振動がガラス溶融炉に生じたとは考えにくい。(添付資料-21)	
8-4 第4ステップ終了後のはつり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		× レンガの引張強度6.25MPaを生じさせるケーシングの振動を机上検討したところ、1000Gオーダーの加速度が必要ことが分かった。このような振動がガラス溶融炉に生じたとは考えにくい。(添付資料-21)		

【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

天井レンガの材料特性について

1. はじめに

ガラス溶融炉の天井レンガには、耐火レンガ（AZ-GS）が採用されていることから、当該レンガの材料特性を整理すると共に、一般産業において、どのような用途に利用されているのかについて調査した。

2. 耐火レンガ（AZ-GS）選定理由

一般的に、ガラス溶融炉の気相部分は耐熱性、耐スポーリング¹性、耐クリープ性が要求され、アルミナージルコン質、ジルコン質、高アルミナ質（ムライト質を含む）、珪石質、アルミナージルコニア－シリカ質が使用される。また、使用する耐火レンガの選定は、製造するガラスの種類によっても異なり、ガラス溶融炉の気相部には、ジルコン質や高アルミナ質（ムライト質を含む）を選定することが一般的である。

ただし、アルカリを含み使用環境が厳しい場合は、アルミナージルコン質、純ジルコン質が使用される。純ジルコン質レンガはアルカリに対する耐食性は強いが耐スポーリング性が悪いため、使用する温度条件等に制約を受ける。最終的には、前述の耐火レンガの中から、使用環境、使用実績、コストを考慮して使用する耐火レンガを決定する。

高レベル廃液ガラス固化施設におけるガラス溶融炉の場合、先行施設での選定を踏襲しており、アルミナージルコン質耐火レンガ、ムライト質耐火レンガ、粘土質耐火レンガ、シリカ質耐火レンガの中から以下の観点に基づき、アルミナージルコン質耐火レンガである耐火レンガ（AZ-GS）を選定している。

- ①耐スポーリング性に優れている
- ②飛散ガラスによる侵食を受けにくい
- ③機械的強度（圧縮）が大きい
- ④最高使用温度が高い

3. 耐火レンガ（AZ-GS）の材料特性

耐火レンガ（AZ-GS）の化学成分、耐熱性をそれぞれ表－1及び表－2に示す。また耐火レンガ（AZ-GS）の耐熱性には直接影響しないが、参考としてかさ比重も併記した。

- 溶融炉耐火物の主化学成分：表－1 参照
- 溶融炉耐火物の耐熱性：表－2 参照
- 溶融炉耐火物のかさ比重：表－3 参照

¹ スポーリング：耐火物が熱衝撃、急な温度勾配の影響または結晶転移のための膨張差などによってき裂またははく離する現象。発生原因により熱的・機械的・構造的スポーリングに分けられる。

表－1 溶融炉耐火物の主化学成分表 (wt%)

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ZrO ₂	Fe ₂ O ₃
耐火レンガ (AZ-GS)	70.7	9.8	19.5	0.5

表－2 溶融炉耐火物の耐熱性

	耐熱性
耐火レンガ (AZ-GS)	耐火度 35SK (1770°C) 以上

表－3 溶融炉耐火物のかさ比重 (g/cm³)

	かさ比重
耐火レンガ (AZ-GS)	3.3

※模擬ガラス : 2.7g/cm³

以 上

天井レンガ設計の考え方について

1. 設計の考え方

ケーシングの耐震強度の観点から、各面のレンガ質量が各面のケーシングにかかる構造である必要があること、及び脱落防止の観点から安定した天井構造とすることが望まれたことから、レンガを天板（天井ケーシング）に固定する吊り天井構造を採用することとした。

これは、焼成耐火物の一般的な吊り天井構造で、所定形状の周囲及び必要ピッチ間に長いアンカレンガをアンカメタルで支持固定し、その間にレンガを組み周囲を金属等で押さえる方法である。

また、固定するにあたっては、一般工業炉で採用されている天井レンガ固定方法を参考として、金属製のクリップアンカで一部のレンガを天板に固定し、その他のレンガはクリップアンカで固定したアンカレンガに「迫り」及び「ダボ」で支えられて脱落しない構造とした。

2. アンカレンガ及び平板レンガの構造強度評価

2. 1 アンカレンガの構造強度

アンカレンガだけで天井レンガ全体の重量を支えていると仮定した場合、アンカレンガには天井レンガ全体の重量分の引っ張り力がかかることになり、ダボ部断面に発生する応力（ダボ部分の巾が最小なので、この断面に発生する応力が最大となる）は、0.062 (MPa) となり、レンガの引張り強度 3.1 (MPa) に対して無視しうるほど小さく、強度は十分である。

また、中央の平板レンガを受けているアンカレンガ支持面にかかる圧縮応力は 0.019 (MPa) となり、レンガの圧縮強度 81 (MPa) に対してはるかに小さく、こちらも強度上の問題はない。

2. 2 平板レンガの構造強度

平板レンガは等分布荷重を受ける 4 辺を単純支持された平板と見なすことができるが、ここではさらに保守的に考えて、等分布荷重を受ける両端を単純支持されたはりと考えて構造強度を評価した。支持スパンの長い中央レンガ列について評価すると発生する最大曲げ応力は、0.064 (MPa) となり、レンガの曲げ強度 12.4 (MPa) よりも十分小さく、構造強度上の問題はない。

一方、平板レンガにはアンカレンガによる支持面に圧縮応力が発生するが、その値はアンカレンガに発生する応力と同じ値であり、すでに述べたようにこれも問題ない。

3. 熱膨張代の評価

築炉メーカーの社内基準「膨張代計算要領」を用い、耐火レンガ（気相部）の熱膨張代を評価した。

耐火レンガ（気相部）の設計温度は□℃であり、その時のレンガ膨張量に、モルタル目地収縮量及びケーシング熱膨張量を考慮した必要熱膨張代（天井レンガ片側）は 2.35mm となる。天井レンガ片側の有効熱膨張代は 3mm であり、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。

4. まとめ

以上より、溶融炉のレンガ組積構造は、一般産業で実績のある構造を採用しており、また、レンガの構造強度、熱膨張などの吸収代も十分であることが確認されているため、溶融炉のレンガ組積構造は適切であると判断した。

以 上

天井レンガの製造履歴について

1. はじめに

損傷したアンカレンガの製作段階から現在に至るまでの製造に関する履歴を調査した。

2. 製造からアクティブ試験までの経緯

ガラス溶融炉（A系列）の製作、搬入、据付までの実績工程を図1に示す。ガラス溶融炉の気相部に使用されている耐火レンガは、レンガメーカーがレンガ製作を行い、築炉メーカーがレンガメーカーの工場では仮組み確認を含む自主検査を行った後、元請メーカーの工場に搬入し、築炉を実施した。

築炉の過程でレンガの使用前検査（材料検査、据付・外観検査）を受検した後、溶融炉本体と天板の接合、付属品の取り付け等を行い、再処理事業所のモックアップ試験設備に出荷した。

モックアップ試験設備での据付性、遠隔保守性の確認の後、固化セルに搬入して据付を行い、電気、計装、配管等の接続工事、通水作動試験、化学試験を経て現在のアクティブ試験に至っている。

3. 材料製造段階

(1)製造経過

天井部の予備ノズル用の開口径を変更したため、この部分のレンガを再製作したが、再製作品の開口部周辺にき裂が認められたため廃棄し、再々製作を行った。

(2)試験検査

記録確認を含む元請メーカーの自主検査として、外観検査、仮組みでの寸法検査、重量測定を実施した。なお、再々製作品についても、同様な検査を単品で実施した。

4. 築炉段階

(1)築炉経過

天板にアンカレンガを保持するアンカクリップを溶接した後、断熱ボードの施工、開口部の耐火レンガの設置、アンカレンガの設置、キャストブルの施工及び乾燥、残りの天井部レンガ及び周囲支持金具の設置等を経て、溶融炉の天井部の施工が完了し、使用前検査（材料検査、据付・外観検査）終了後、溶融炉本体に溶接にて固定した。

(2)試験検査

築炉工程の進捗に伴い、元請メーカの自主検査及び記録確認を含む当社の立会検査として、材料確認、外観検査、寸法検査、据付外観検査、内部確認検査を実施した。

5. モックアップ試験設備への輸送

(1)輸送経過

元請メーカの工場から構内岸壁まではトレーラで、六ヶ所の港までは船便で、港からモックアップ試験設備まではトレーラにより輸送した。輸送中の溶融炉にかかる加速度を1Gと想定し、レンガの健全性に支障のないことを計算により確認している。なお、溶融炉に取付けた加速度計の値は1Gを下回っていた。

(2)内部確認

モックアップ試験設備に設置した後、内部確認を行い、異常のないことを確認した。

6. 固化セルへの輸送、据付

(1)高レベル廃液ガラス固化建屋への輸送

モックアップ試験設備での据付性、遠隔保守性の確認の後、養生を行ってトレーラにより高レベル廃液ガラス固化建屋へ搬送した。

(2)固化セルへの輸送

トレーラで搬入したガラス溶融炉をクレーンで吊り上げ、台車へ搭載した。台車上の溶融炉を別のクレーンで吊り上げ、固化セル内に仮置きした。仮置きした溶融炉を固化セルクレーンで吊り上げて搬送し、溶融炉架台上に据付けた。

(3)内部確認

固化セルに据付後、内部確認を行ったところ、天井部の耐火レンガ表面が一部欠損していることが確認された。欠損した原因調査を実施した結果、以下の事項を確認した。なお、この欠損は、今回損傷が発生したアンカレンガとは別のレンガで確認された。また、欠損部以外のレンガについては外観検査・打音検査により異常がないことを確認している。

- a. 欠損したレンガは、レンガメーカでの製作時に表面に欠陥が認められたため、水ガラスを含む充填材を充填した後、バーナーで乾燥させて表面を仕上げる補修処置を行ったものであり、モックアップ試験設備での保管中に水分の影響により充填材が軟化し、補修部分が欠損したと考えられる。

b. このレンガ以外に補修処置を行ったレンガはない。

この欠損が発生したレンガの補修については、充填剤が吸湿・軟化しないよう、充填剤乾燥時の加熱方法を改善し、補修を実施した。なお、改善した補修方法については補修方法のモックアップ試験によりその効果を確認している。

補修後、補修部分の外観検査・打音検査により、割れのないこと、十分乾燥していることから健全性が確認できた。

7. まとめ

損傷したアンカレンガの製作段階から現在に至るまでの製造に関する履歴を調査した結果、以下のことを確認した。

- ①損傷したアンカレンガについては、製造、築炉、輸送、据付の段階において、損傷に結びつくような異常は認められない。
- ②据付時点で別のレンガ表面に発生した欠損の原因は、製造時の補修処置に起因するものであり、損傷したアンカレンガについては、製造時に補修処置を施していないこと、外観検査及び打音検査により健全性を確認していることから、据付時に発生した欠損と同じ原因により損傷が発生したものではない。

以 上

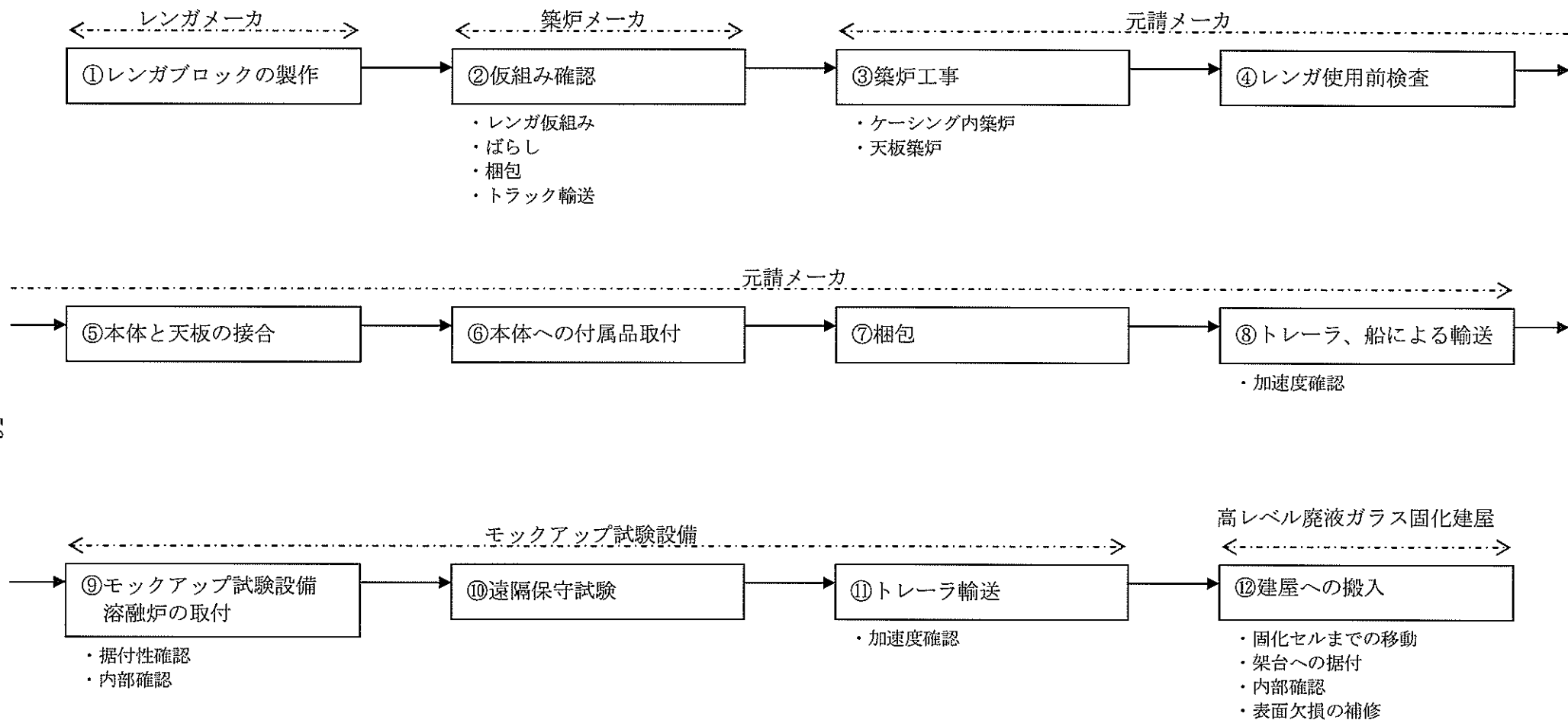


図1 ガラス溶融炉の製作、輸送、搬入、据付の実績フロー