



アクティブ試験における ガラス溶融炉の運転改善



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。

ガラス溶融炉で発生したトラブル事象



- ①ガラス温度が安定した状態が維持できない(2007年11月～12月)
- ②事象①の影響により白金族元素が炉底部に沈降、堆積した(2007年11月～12月)
- ③初期のアクティブ試験の多くのバッチでYPが発生した(2007年11月～12月)
- ④流下ガラスによる流下ノズル閉塞(2008年7月)
- ⑤かくはん棒の曲がり(2008年12月)
- ⑥天井レンガ落下(2008年12月)
- ⑦高レベル廃液の漏えい(2009年1、2、10月)
- ⑧不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した(2008年10月)
- ⑨接液レンガによる流下ノズル閉塞(2012年1月)

ガラス溶融炉で発生したトラブル事象の分類整理

日本原燃株式会社



事象	原因の分類	対策の分類	具体的な改善内容
①ガラス温度が安定した状態が維持できない ③初期のアクティブ試験の多くのバッチでYPが発生した	KMOC試験、化学試験で用いた模擬廃液と実廃液の化学組成(硫黄等)が異なった	運転方法の改善	・実廃液を想定した模擬廃液でKMOC試験を実施し、安定運転を確認
	廃液組成(硫黄、DBP、FINE等)によって、仮焼層形成が大きく異なった	運転方法の改善	・調整液添加によって、廃液濃度、イエローフェーズ成分濃度を調整 ・KMOC試験で廃液組成(FINE、DBP)や廃液供給速度をパラメータとした試験を実施し、安定運転範囲を確認
	ガラス温度監視に必要な温度計が少なく、炉内温度変化を把握できなかった	設備の改善	・ガラス温度計を実機に追加(2点⇒5点)
	電力制御が経験に頼るところが多く、未知の廃液に対して対応できなかった	運転方法の改善	・KMOC試験で運転習熟を行うと共に、熱バランス計算プログラムを開発し、電力調整支援ツールとして使用

3

高レベル廃液組成の影響評価

日本原燃株式会社



- 六ヶ所再処理工場では、セラミックメルターで高レベル濃縮廃液、不溶解残渣廃液、アルカリ濃縮廃液を同時に処理する世界初のプロセスであったが、運転影響等について事前検討が不足。
- アクティブ試験第4ステップで処理した廃液には設計では想定していなかった分析廃液からの硫黄、DBP等の微量元素が含まれていたことを確認
- それ以降のKMOC試験では実際に処理するアクティブ試験の廃液組成をもとに模擬廃液を調整し、運転特性を確認
- KMOCでは、DBPによる運転影響が大きいことを確認
- FINEについては、実FINEの分析結果より模擬FINE組成等を設定し、運転特性を確認

表 アクティブ試験及び模擬ガラス固化体の化学組成比較 (データ整理)

		アクティブ試験 (平均濃度)	設計	高レベル廃液	
				高燃焼度	低燃焼度
核分裂生成物酸化物	Na ₂ O	(wt%)			
	廃棄物含有率	(wt%)			
	Nd ₂ O ₃	(wt%)			
	SrO	(wt%)			
	Y ₂ O ₃	(wt%)			
	ZrO ₂	(wt%)			
	MoO ₃	(wt%)			
	Tc ₂ O ₇ ^{※1}	(wt%)			
	RuO ₂	(wt%)			
	Rh ₂ O ₃	(wt%)			
	PdO	(wt%)			
	TeO ₂	(wt%)			
	BaO	(wt%)			
	La ₂ O ₃	(wt%)			
	CeO ₂ ^{※2}	(wt%)			
	Pr ₆ O ₁₁	(wt%)			
	Sm ₂ O ₃	(wt%)			
	Cs ₂ O	(wt%)			
工程添加物	Gd ₂ O ₃	(wt%)			
	UO ₃	(wt%)			
	PuO ₂	(wt%)			
アクチノイド酸化物	Np ₂ O ₃	(wt%)			
	Fe ₂ O ₃	(wt%)			
	Cr ₂ O ₃	(wt%)			
腐食生成物等	NiO	(wt%)			
	P ₂ O ₅	(wt%)			
白金族元素	RuO ₂	(wt%)			
	Rh ₂ O ₃	(wt%)			
	PdO	(wt%)			
Na ₂ O(廃液)		(wt%)			
Na ₂ O(ガラスビーズ)		(wt%)			

※1: 模擬廃液ではTc₂O₇をMnO₂で代替している。

※2: 模擬廃液ではアクチノイドの代替をCeとしているため模擬廃液中の含有率が高くなっている。

- 模擬廃液に対して+20%以上の差があるもの
- 模擬廃液に対して-20%以上の差があるもの

4

ガラス溶融炉で発生したトラブル事象の分類整理

日本原燃株式会社



事象	原因の分類	対策の分類	具体的な改善内容
②事象①の影響により白金族元素が炉底部に沈降、堆積し、流下が不調となった	遠隔操作のため、回復運転による回復が不十分なため、その後の運転が悪化した	運転方法の改善	<ul style="list-style-type: none"> 回復運転への移行判断フロー、回復運転フローなどを定めた 定期洗浄運転により、炉内白金族保有量が増加する前に白金族を定期的に抜き出す
		設備の改善	<ul style="list-style-type: none"> 模擬ビーズによる洗浄運転から、模擬廃液と原料ビーズによる運転に変更し、仮焼層消滅による急激な白金族沈降を抑制
	遠隔操作のため、攪拌作業開始までに時間を要し、その間に運転が悪化した	運転方法の改善	<ul style="list-style-type: none"> 炉底攪拌を実施する前に、洗浄運転を実施し、炉内白金族をできるだけ抜き出す手順に変更（回復運転フローに反映）
	ガラス溶融炉の保持運転時に炉内が悪化した	運転方法の改善	<ul style="list-style-type: none"> ガラス溶融炉の状態に応じた保持運転フローを定めた
	炉内温度が安定しない、炉底温度が高いなどの炉内状況のため、白金族の沈降・堆積が促進した	運転方法の改善	<ul style="list-style-type: none"> ガラス温度、炉底温度①の運転管理目標を設定した
	流下ノズルの加熱性が低下していたため、炉底部温度を高めて運転した	設備の改善	<ul style="list-style-type: none"> 流下ノズルの加熱性を確保（電力上昇、高周波加熱コイル交換） 流下ノズル根元に断熱材を設置し、加熱性を向上

5

ガラス溶融炉で発生したトラブル事象の分類整理

日本原燃株式会社

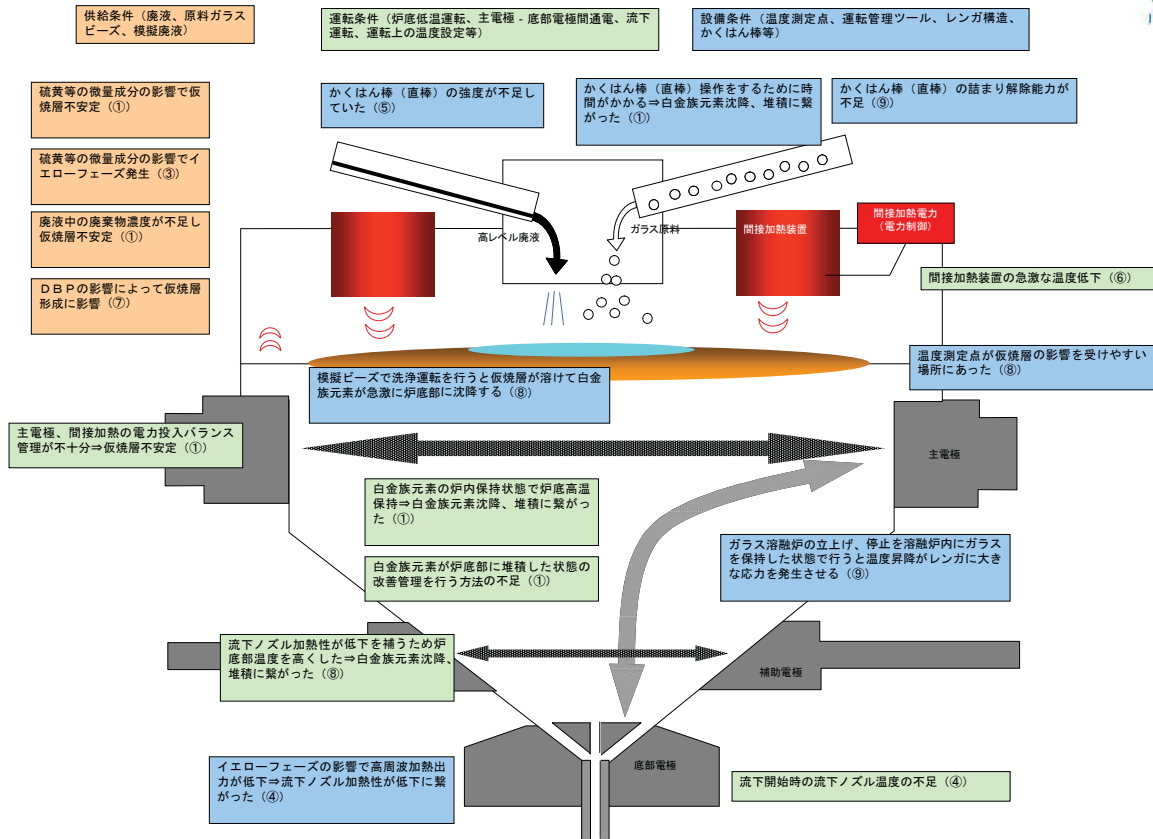


事象	原因の分類	対策の分類	具体的な改善内容
④流下ガラスによる流下ノズル閉塞	運転管理の不足	運転管理ポイントの追加	<ul style="list-style-type: none"> 流下ノズル全段加熱開始時のノズル温度監視
⑤かくはん棒の曲がり	非正常作業手順の悪さ	非正常作業手順の改善	<ul style="list-style-type: none"> かくはん棒使用時に過度の荷重をかけない
⑥天井レンガ損傷	試験操作手順の悪さ（化学試験）	運転管理ポイントの追加	<ul style="list-style-type: none"> 間接加熱装置の温度降下速度の管理（他のレンガに亀裂が発生している可能性が否定できないため更なる損傷を緩和する策）
⑦高レベル廃液の漏えい	非正常作業手順の悪さ	非正常作業手順の改善	<ul style="list-style-type: none"> 運転停止時の貯槽液位管理 閉止フランジ部の締め付け管理
⑧不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した	運転方法の悪さ 運転管理の不足	運転方法の改善 設備改善	<ul style="list-style-type: none"> 定期的な洗浄運転の実施 洗浄運転方法の改良 ガラス温度計の追加 ガラス温度の管理方法の改善 追加した温度計の指示値を踏まえたガラス温度の管理実施
⑨接液レンガによる流下ノズル閉塞	運転管理の不足	運転管理ポイントの追加 非正常作業治具の改良	<ul style="list-style-type: none"> 運転停止時にドレンアウト実施を原則とする管理 直棒の改良（流下性低下時の対応）

6

ガラス固化設備のアクティブ試験で発生したトラブルの分類評価

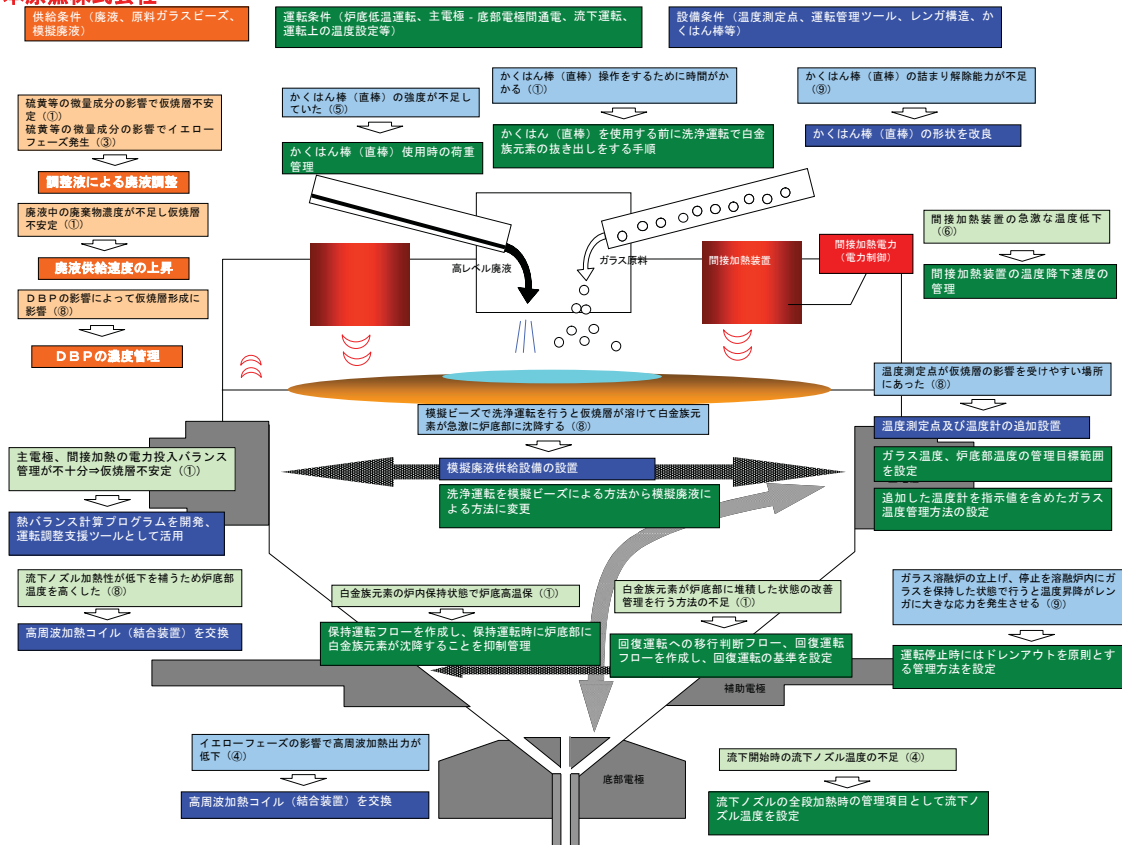
日本原燃株式会社



7

ガラス固化設備のアクティブ試験で発生したトラブルの対策分類評価

日本原燃株式会社



8

ガラス溶融炉の運転方法の改善

日本原燃株式会社

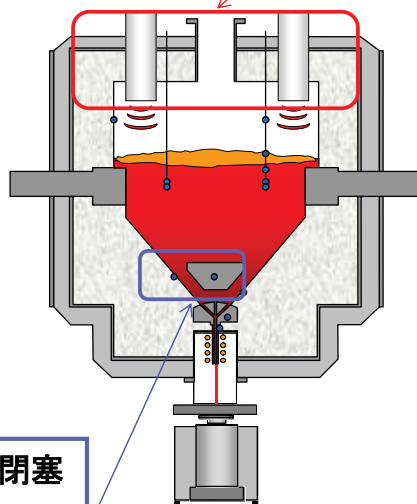


立上げ

運転

停止

⑥天井レンガ落下(参考-1参照)
間接加熱のヒータ温度降下速度を
10°C/10分程度以内として管理

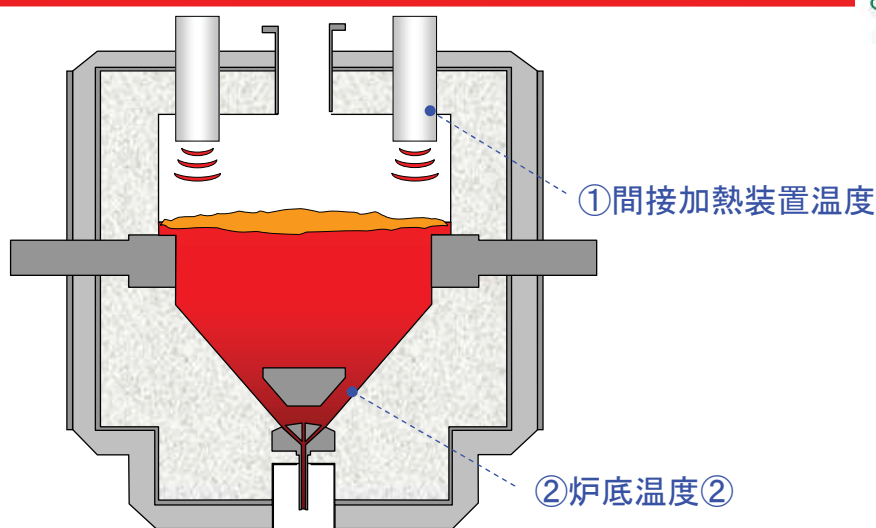


⑨接液レンガによるノズル閉塞
(参考-2参照)
炉底温度②昇温速度を15°C/h
程度以内として管理

9

(補足)レンガ損傷防止対策について

日本原燃株式会社



	天井レンガ	接液レンガ
目的	レンガ片による流下阻害を防止するためにレンガ損傷を抑制	
監視箇所	①間接加熱装置温度	②炉底温度②
運転目標	-10°C/10分以内(常時)	(立上げ)+15°C/h以内 (停止)-25°C/h以内
根拠	損傷確率0.1%以下	運転実績・レンガ強度

10

ガラス溶融炉の運転方法の改善

日本原燃株式会社



立上げ

運転

停止

①ガラス温度が安定した状態が維持できない
調整液添加による廃液調整

①ガラス温度が安定した状態が維持できない
熱バランス計算プログラムの運転への適用(温度予測による管理)

⑥天井レンガ落下
天井レンガの損傷により流下性低下した場合のレンガ回収作業を手順化

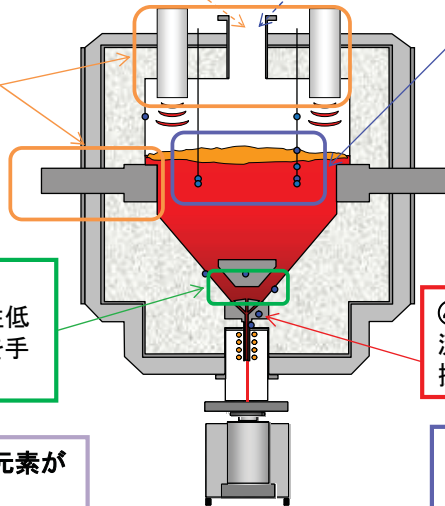
②事象①の影響により白金族元素が炉底部に沈降、堆積した
洗浄運転への移行判断フロー、保持運転フローの整備

⑧不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した
洗浄運転方法の改良(模擬ガラスビーズから模擬廃液へ変更)

⑧不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した
追加した温度計の指示値を踏まえたガラス温度の管理実施(事象①の改善に加えて実施)

④流下ガラスによる流下ノズル閉塞
流下ノズル温度計指示値を用いた流下操作開始条件の管理

⑧不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した
定期的な洗浄運転の実施



11

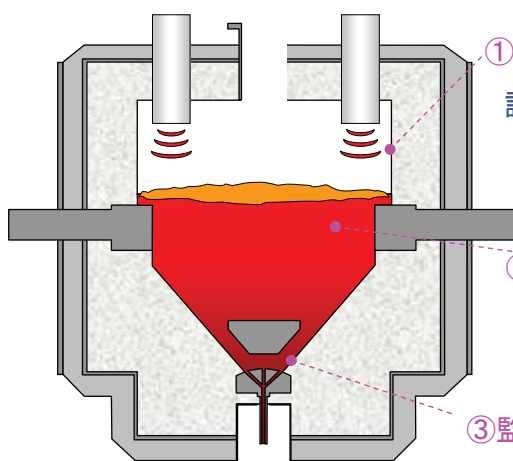
(補足)運転中の炉内温度管理

日本原燃株式会社



監視系

調整系



①監視: 気相温度

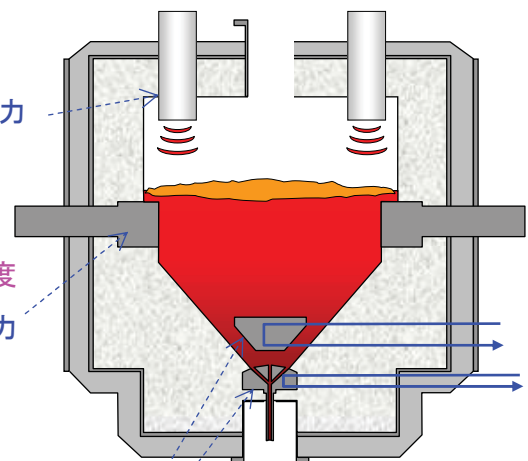
調整: 間接加熱電力

②監視: ガラス温度

調整: 主電極電力

③監視: 炉底温度①

調整: 底部、補助電極冷却空気流量



	炉上部		炉底部
目的	安定運転		白金族元素の沈降防止
監視箇所	①気相温度	②ガラス温度	③炉底温度①
目標	□~□℃程度	1200℃程度	バッチ平均□℃以下
調整方法	間接加熱電力	主電極電力	底部&補助電極冷却流量

2

(補足)溶融炉熱バランス計算(MELCAP)について

日本原燃株式会社

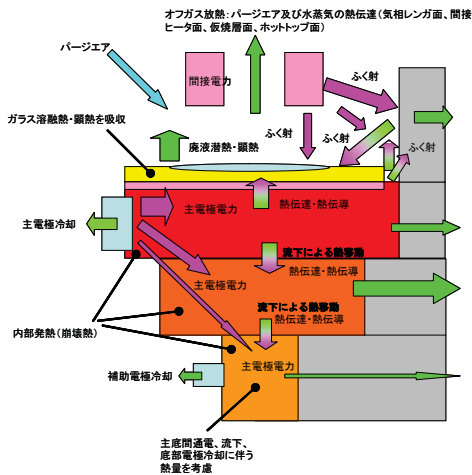


ガラス溶融炉の運転では、主電極・間接加熱電力の変更による炉内温度への影響を予測するために熱バランス計算(MELCAP)を利用している。

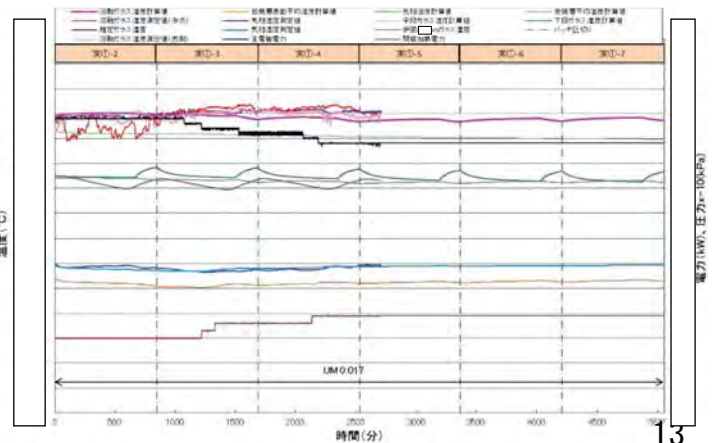
MELCAPとは

- ・ 仮焼層を中心としたガラス溶融炉の状態変化を計算するため、熱収支モデルと物質収支モデルを組み合わせた非定常計算モデル
- ・ 廃液供給条件や電力条件の変動に伴う、ガラス温度、気相温度及び仮焼層状態(温度、厚み、仮焼層面積割合など)の変化を評価

計算モデル



計算例



13

ガラス溶融炉の運転方法の改善

日本原燃株式会社

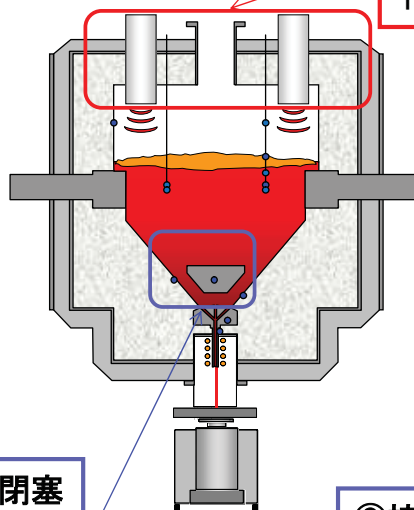


立上げ

運転

停止

⑥天井レンガ落下(参考-1参照)
間接加熱のヒータ温度降下速度を
10°C/10分程度以内として管理



⑨接液レンガによるノズル閉塞
(参考-2参照)
炉底温度②降下速度を25°C/h
程度以内として管理

⑨接液レンガによる流下ノズル閉塞
運転停止時にドレンアウト実施を
原則とする管理

14

トラブル事象に対する対策の運転フェーズでの整理

日本原燃株式会社



事象	立上げ	運転	停止
①ガラス温度が安定した状態が維持できない	—	・調整液添加による廃液調整 ・熱バランス計算プログラムの運転への適用(温度予測による管理)	—
②事象①の影響により白金族元素が炉底部に沈降、堆積した	—	・洗浄運転への移行判断フロー、保持運転フローの整備	—
④流下ガラスによる流下ノズル閉塞	—	・流下ノズル温度計指示値を用いた流下操作開始条件の管理	—
⑤かくはん棒の曲がり	—	—	—
⑥天井レンガ損傷	間接加熱のヒータ温度降下速度を10℃/10分程度以内として管理	・天井レンガの損傷により流下性低下した場合のレンガ回収作業を手順化	間接加熱のヒータ温度降下速度を10℃/10分程度以内として管理
⑦高レベル廃液の漏えい	—	—	—
⑧不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した	—	・追加した温度計の指示値を踏まえたガラス温度の管理実施(①の改善に加えて実施) ・洗浄運転方法の改良 ・定期的な洗浄運転の実施	—
⑨接液レンガによる流下ノズル閉塞	炉底温度②昇温速度を15℃/h程度以内として管理	—	炉底温度②温度昇温速度を15℃/h程度以内として管理 運転停止時にドレンアウト実施を原則とする管理

15

トラブル事象に対する対策の運転フェーズでの整理

日本原燃株式会社



調整液添加による廃液調整

①に対して左記対策を実施し、他の事象を受けた変更はない

(①の対策)

・熱バランス計算プログラムの運転への適用(温度予測による管理)

(⑧の対策)

・追加した温度計の指示値を踏まえたガラス温度の管理実施(①の改善に加えて実施)

左記2つの対策は、ガラス溶融炉の運転フェーズでの炉内温度管理という点で同類。

①の対策として温度予測管理を導入し、⑧の対策で温度測定点を追加し、仮焼層の影響を受けにくい測定点の温度実測値を予測管理に適用し、管理精度向上を図ることとした。

⇒2つの対策の方向性は一致している。

(①の対策)

・洗浄運転への移行判断フロー、保持運転フローの整備

(⑧の対策)

・洗浄運転方法の改良(模擬ガラスビーズから模擬廃液へ変更)
・定期的な洗浄運転の実施

左記2つの対策は、ガラス溶融炉の運転フェーズでの白金族管理という点で同類。

①の対策として白金族元素が炉底部に沈降・堆積した場合の対応フローなどを導入し、⑧の対策で運転時に白金族元素が炉底部に沈降・堆積する可能性を下げるために炉内の白金族元素の保有量管理の向上を図ることとした。

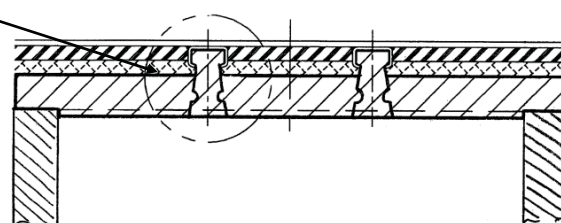
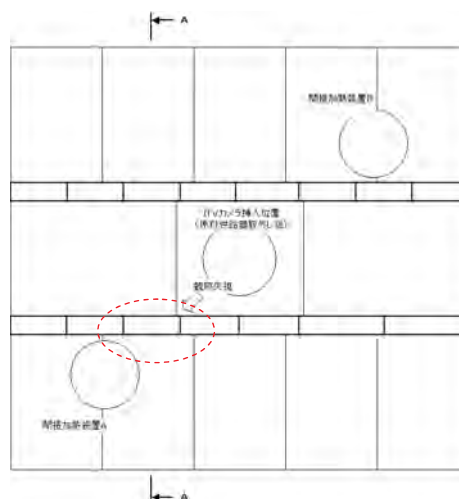
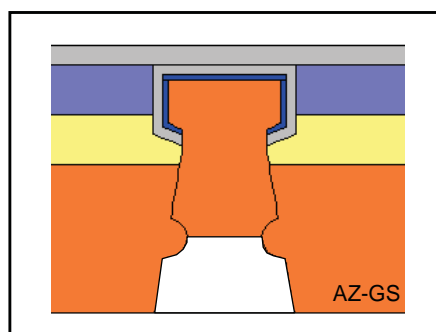
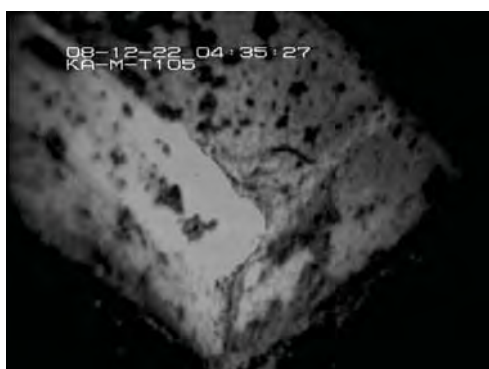
⇒2つの対策の方向性は一致している。

16

参考－1 天井レンガの落下

17

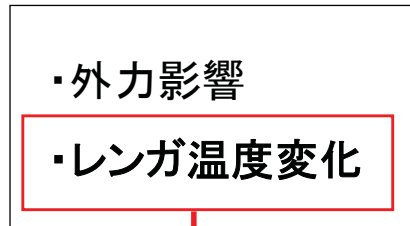
天井アンカレンガの落下(2008年12月22日)



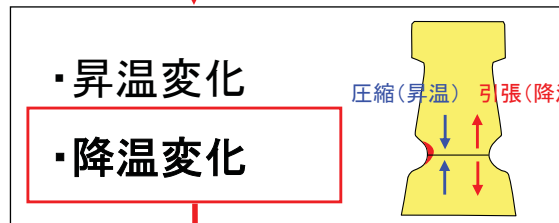
(断面A-A)
天井レンガ断面図

18

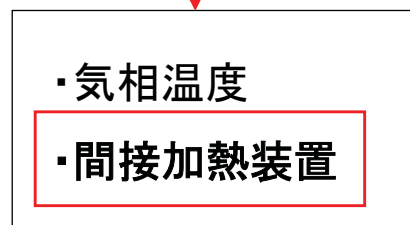
落下原因究明フロー



遠隔作業による振動や炉底攪拌装置による影響を検討したが、外力により損傷する可能性は低い

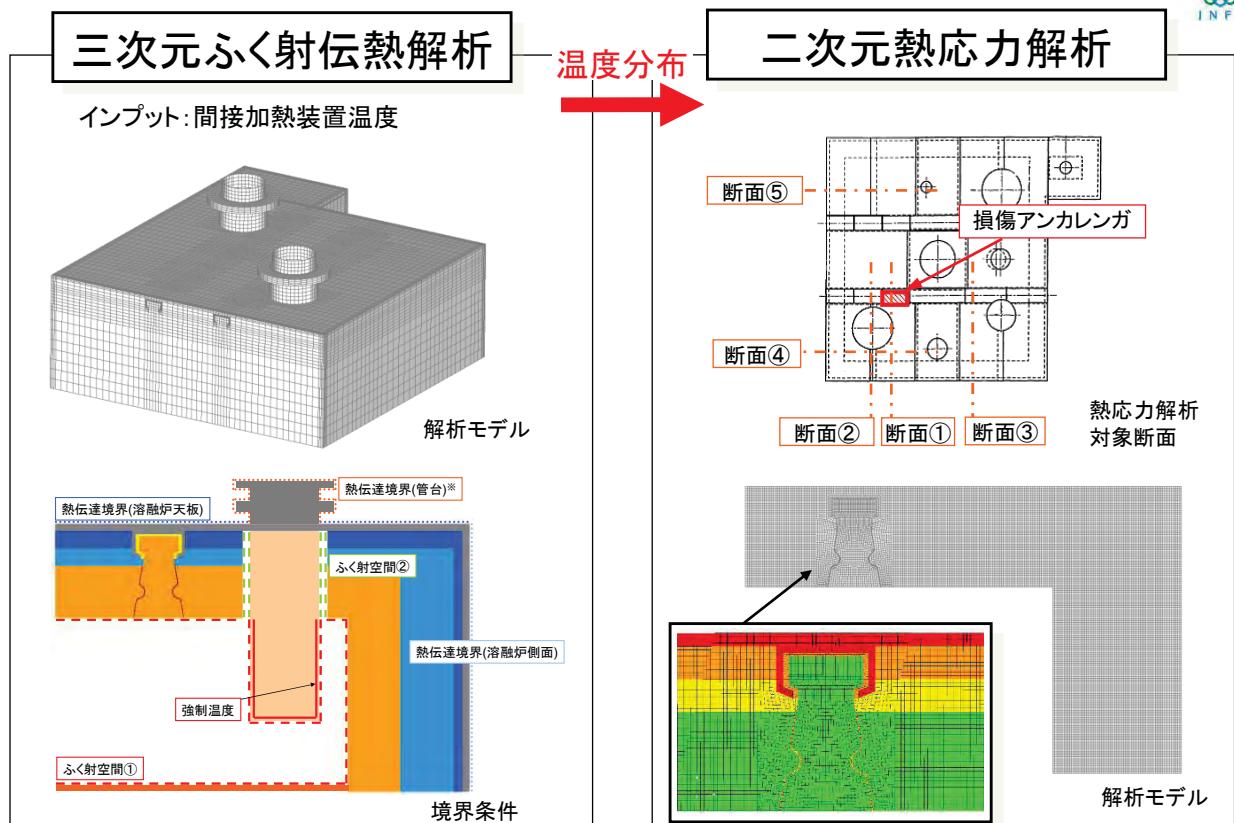


昇温変化により圧縮応力が発生することを確認。レンガの圧縮強度は引張強度の10倍以上ある



熱応力解析により、間接加熱装置のふく射入熱変化が当該アンカレンガに大きな応力を発生させることを確認

熱応力解析フロー



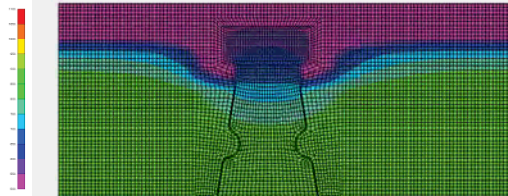
熱応力解析結果

日本原燃株式会社

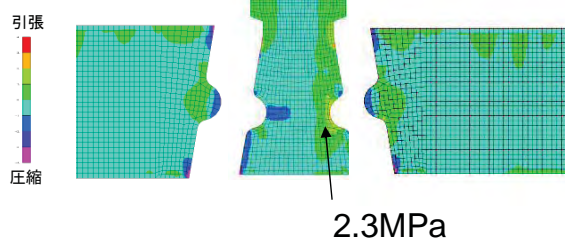


気相温度降下 (実績最大降下速度)

温度分布

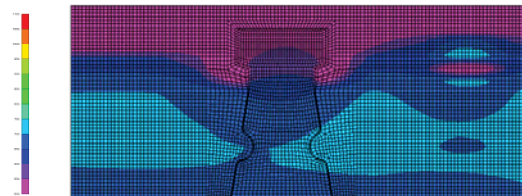


応力分布

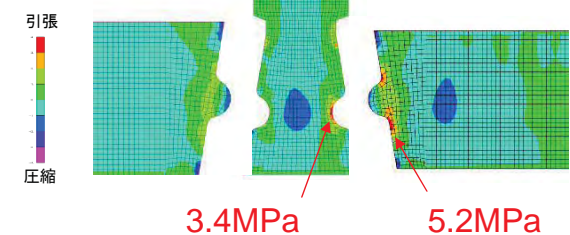


間接加熱温度降下 (実績最大降下速度)

温度分布



応力分布



発生応力の評価(ワイブル分布について)

日本原燃株式会社



耐火物など脆性材料の試験データは金属材料に比べてバラツキが大きく、これらの変動を考慮に入れる必要がある。これは、耐火物などの破壊が材料中に存在する欠陥や空隙を起点として発生し、強度値が材料の平均的な性質ではなく材料中に含まれる最大欠陥に支配されるためと考えられる。よって、耐火物を含む脆性材料の強度や寿命は、確定値とみなすべき量ではなく統計的な量として考えて、一般に、ワイブル分布と呼ばれる手法によってその分布を記述することがある。

ワイブル分布とは：物体の強度を統計的に記述するために1939年にW.ワイブル(Waloddi Weibull: スウェーデンの技術者)によって提案された確率分布で、脆性材料の強度を統計的に記述する場合などに広く利用されている。当初は、鎖の破断する現象を説明するため、鎖を引っ張る場合において最も弱い輪が破壊することにより鎖全体が破壊したとする最弱リンクモデルと呼ばれる理論を提案したものである。耐火物については特に定めた規格はないが、ファインセラミックスについてはJIS R1625「ファインセラミックスの強さデータのワイブル統計解析法」に定められている。

発生応力の評価(ワイブル分布の作成)

日本原燃株式会社



曲げ強度試験

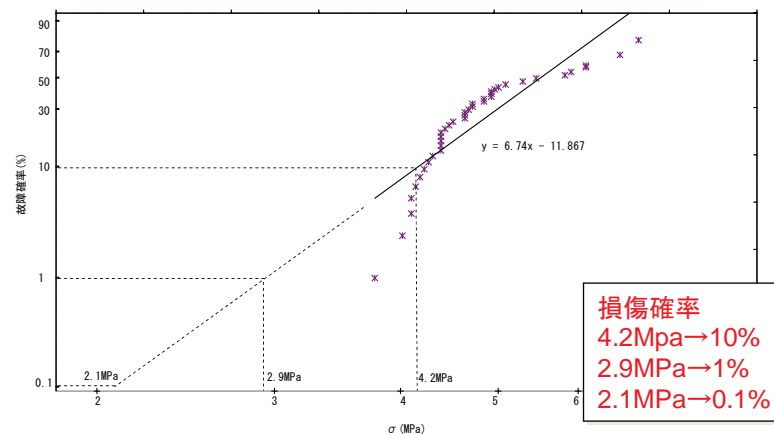
試験装置: 熱間曲げ試験装置

サンプル: AZ-GSレンガ片 (25mmx25mmx120mm)

試験温度: 600°C

試験点数: 70点 (ワイブル分布作成には39点を使用)

ワイブル分布(アンカレンガ)



23

アンカレンガ落下原因のまとめ

日本原燃株式会社



初期亀裂

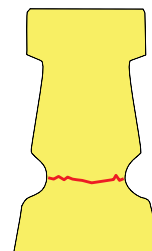
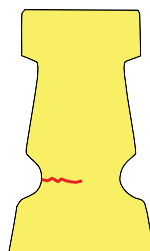
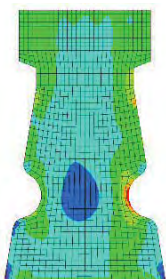
- ・化学試験初期に間接加熱装置の温度変化(降下)に3.4MPaの熱応力が発生
- ・3.4MPaは2.9%程度の損傷確率に相当し、当該アンカレンガの強度はそれ以下だったため初期亀裂が発生

亀裂進展

- ・化学試験及びアクティブ試験を通して間接加熱装置の温度変化(降下)を繰返し受け当該部の亀裂が進展

破断・脱落

- ・アクティブ試験において、最終的に自重を支えられなところまで亀裂が進展し、破断・脱落



3.4MPa → 損傷確率2.9%

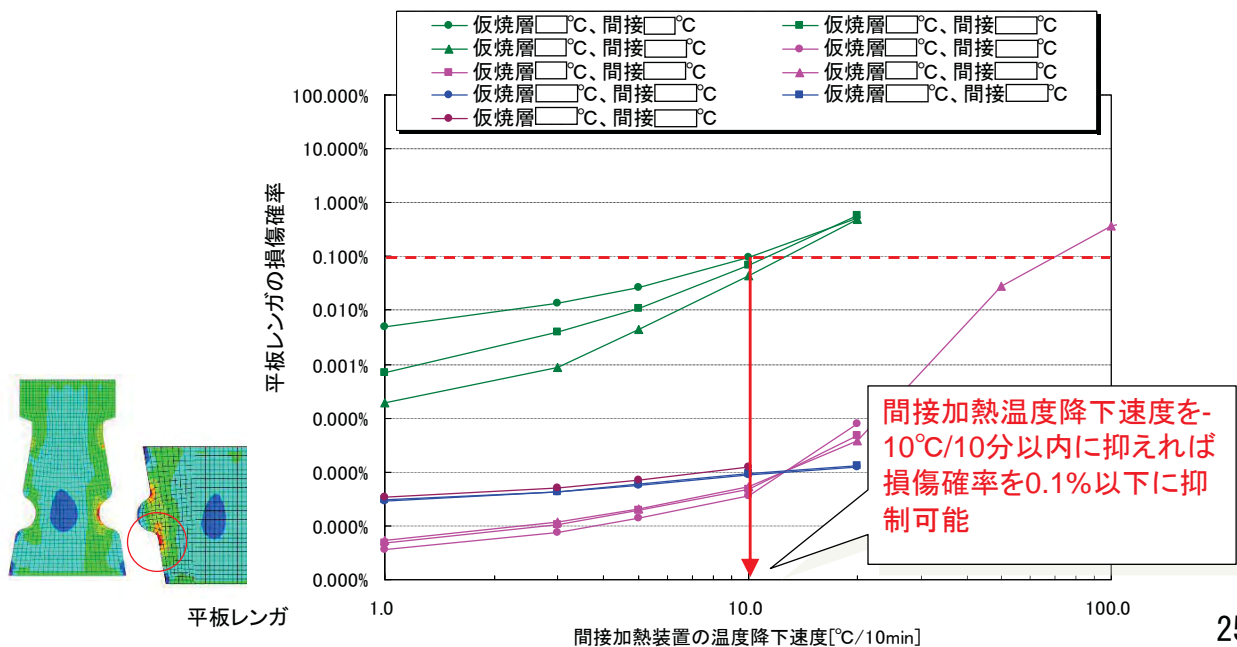
24

落下抑制対策

日本原燃株式会社



- 耐火物の強度は確率分布であるため、損傷確率をゼロにすることはできない
- 天井レンガの損傷を可能な限り抑制するために最も高い熱応力が生じる損傷アンカレンガに隣接した平板レンガの損傷確率を0.1%以下に抑えることを目標とした



25

日本原燃株式会社

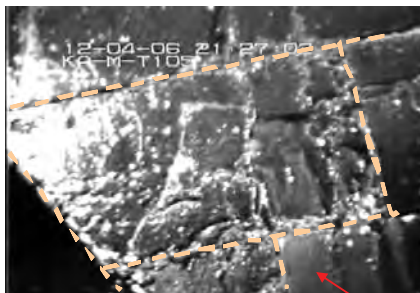


参考－2 接液レンガの損傷

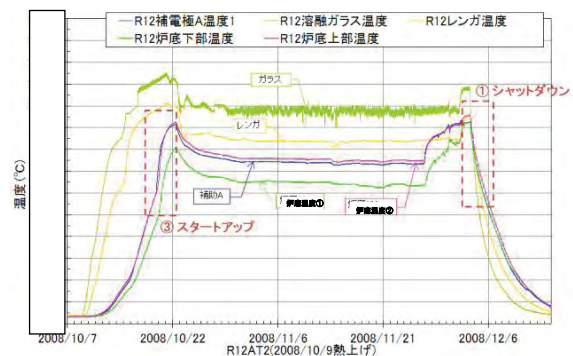
26

接液レンガ片による流下ノズルの閉塞

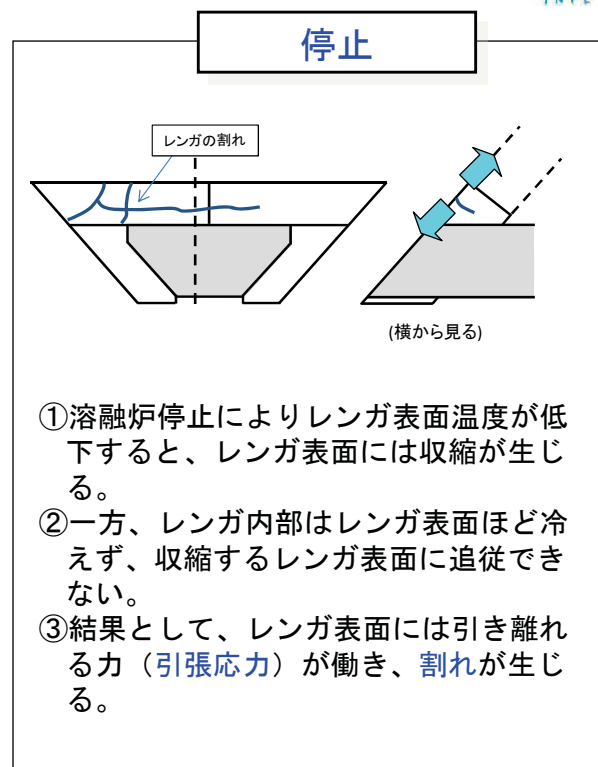
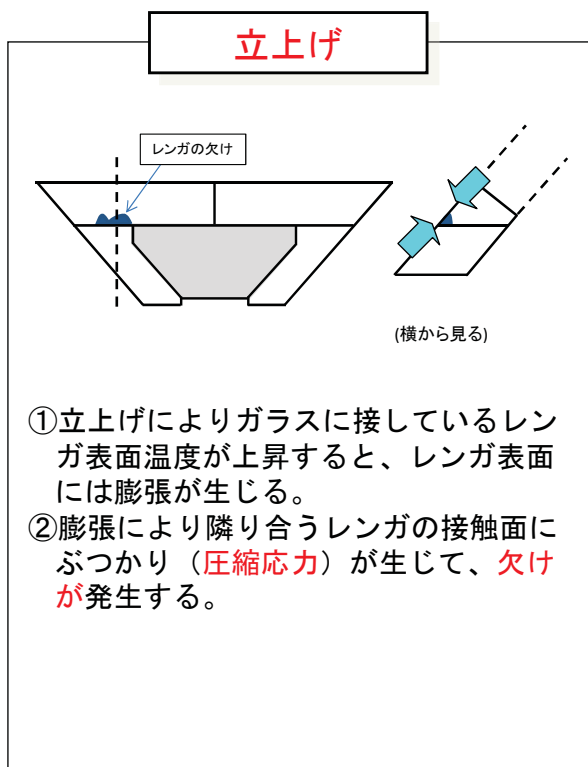
- ・ ガラス溶融炉B事前確認試験において接液レンガ片による流下ノズルの閉塞により運転停止
- ・ 炉内観察の結果、補助電極まわりの接液レンガに多数の亀裂が進展していることを確認
- ・ 補助電極上部高さの炉底温度②に着目したところ、立上げ(熱上げ・スタートアップ)及び停止(ドレンアウト・シャットダウン)で大きい温度変化があることを確認



補助電極

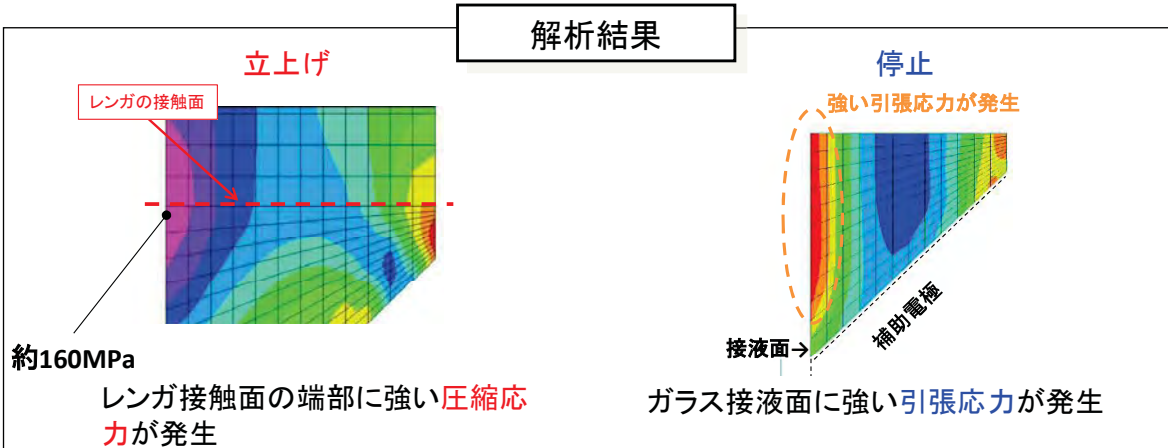
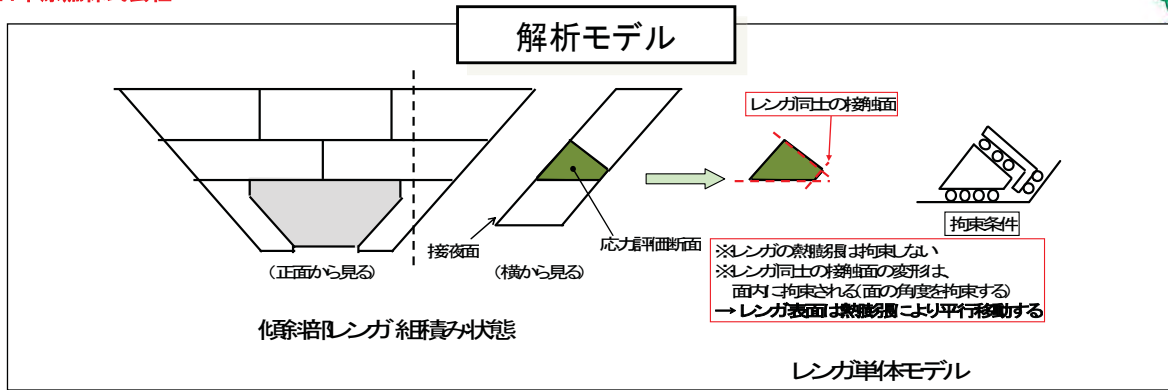


割れ・欠けの想定メカニズム



熱応力解析

日本原燃株式会社



29

損傷抑制対策

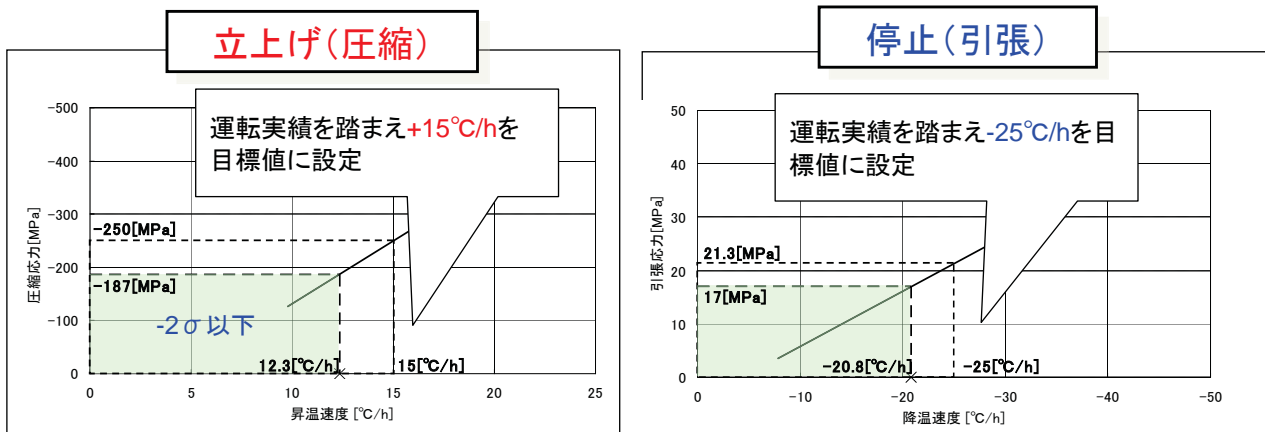
日本原燃株式会社



接液レンガの強度(ばらつき考慮)と運転実績を踏まえて炉底温度②の温度変化率の目標値を設定

【接液レンガ強度データ】

- ◆圧縮強度: 287 ± 100 MPa (41点の平均値、 2σ)
- ◆曲げ強度: 48.2 ± 14.1 MPa (6点の平均値、 2σ)
- ⇒引張応力に換算すると 24.1 ± 7.1 MPa (曲げ強度の1/2と設定)



・温度変化を抑制しても損傷確率をゼロにはできないことから、立ち上げ後に確認流下(直棒を設置した状態での流下)を実施し、レンガ片の発生を確認することにした

30

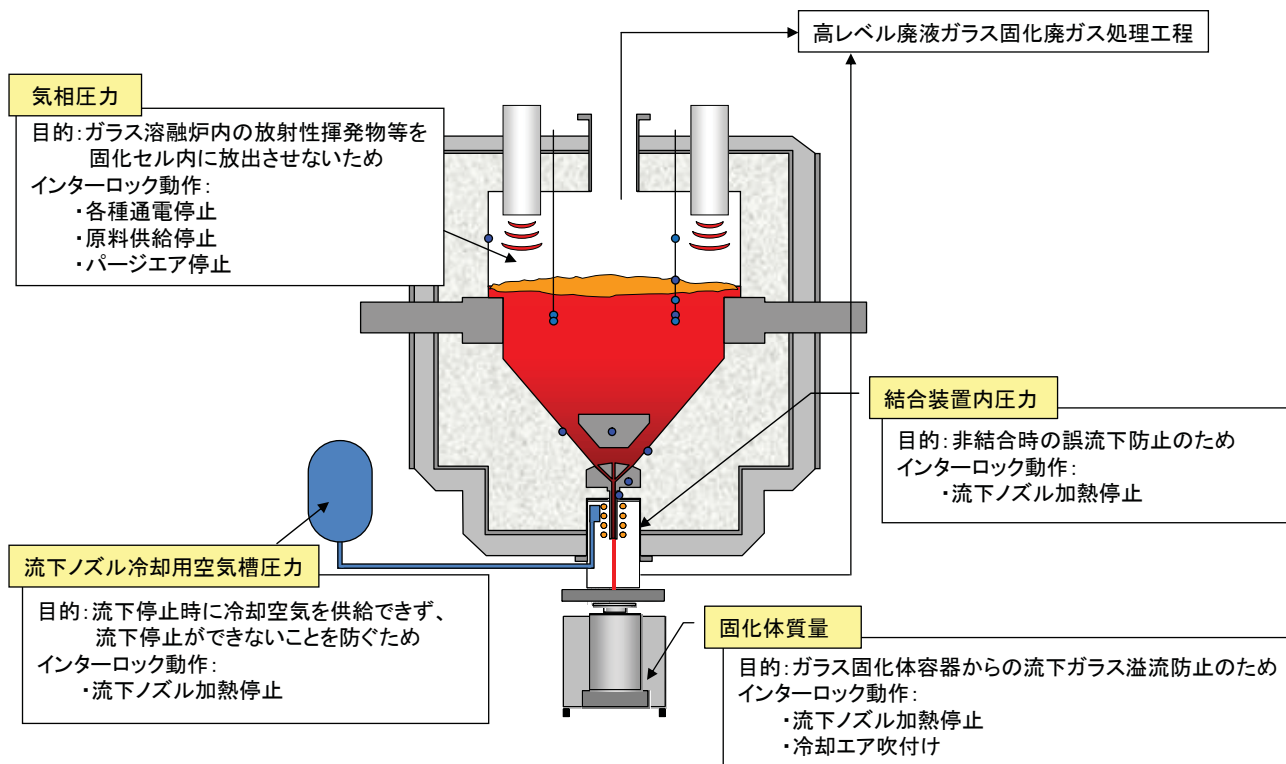
参考－３

ガラス溶融炉の安全系インターロックの考え方について

31

ガラス溶融炉の安全系のインターロックの考え方について

日本原燃株式会社



32