

エコクリーンプラザみやざき 焼却溶融施設  
灰溶融設備室における爆発事故調査報告書

平成26年 3月

公益財団法人 宮崎県環境整備公社

## 目 次

1	はじめに	1
2	爆発事故の状況	2
	(1) 事故発生状況	2
	(2) 事故前後の経緯	3
	(3) 被害の状況	3
	(4) 安全対策	5
3	履歴調査	6
	(1) 運転履歴	6
	(2) 整備履歴	6
	(3) 履歴調査の結果	6
4	事故原因の調査	7
	(1) 爆発種類の推察	7
	(2) 水蒸気爆発のメカニズム及び考えられる要因	8
	(3) 事故原因の各種調査内容	11
	(4) 今回の損傷事故前後で認められた事象（各種調査結果）	12
	(5) 水蒸気爆発要因と調査結果まとめ	16
5	水蒸気爆発原因の推定	17
	(1) 今回発生した水蒸気爆発のメカニズム	17
	(2) 水蒸気爆発発生までのフロー	19
6	まとめ	20
	(1) 今回の爆発事故	20
	(2) 再発防止対策	21
	(3) その他	21

## 1 はじめに

平成 25 年 3 月 12 日（火）、エコクリーンプラザみやぎの焼却溶融施設において、灰溶融炉の傾動作業<sup>(※1)</sup>中に 1 号水砕槽コンベヤ周辺で爆発事故が発生した。

事故原因の究明及びその対応策の検討については、まず、プラント運転管理等業務受託者である(株)ひむかエコサービスが行い<sup>(※2)</sup>、その事故原因と対応策の妥当性を確認するため、第三者機関である一般財団法人日本環境衛生センター（以下「日環センター」という。）に事故調査検証業務を委託した。

本報告書は、(株)ひむかエコサービスが作成した「灰溶融設備室爆発事故報告書」、「同報告書質疑回答書」及び日環センターの作成した「灰溶融設備室爆発事故報告書に対する評価書」に基づきとりまとめた。

<sup>(※1)</sup> 傾動作業とは、炉内に滞積したメタルを、炉を傾斜させることにより炉外へ排出させる作業のこと。

<sup>(※2)</sup> (株)ひむかエコサービスの構成員である三菱重工環境・化学エンジニアリング(株)が主体となって事故原因の究明及びその対応策の検討を行った。

## 2 爆発事故の状況

### (1) 事故発生状況

平成 25 年 3 月 12 日（火）19 時 26 分頃、灰溶融炉の傾動作業中に 1 号水砕槽コンベヤ周辺で爆発事故が発生した。この事故により、1 号水砕槽、傾動装置、炉本体架台、出滓ロカバール及び各所配管・歩廊等が破損・損傷した。

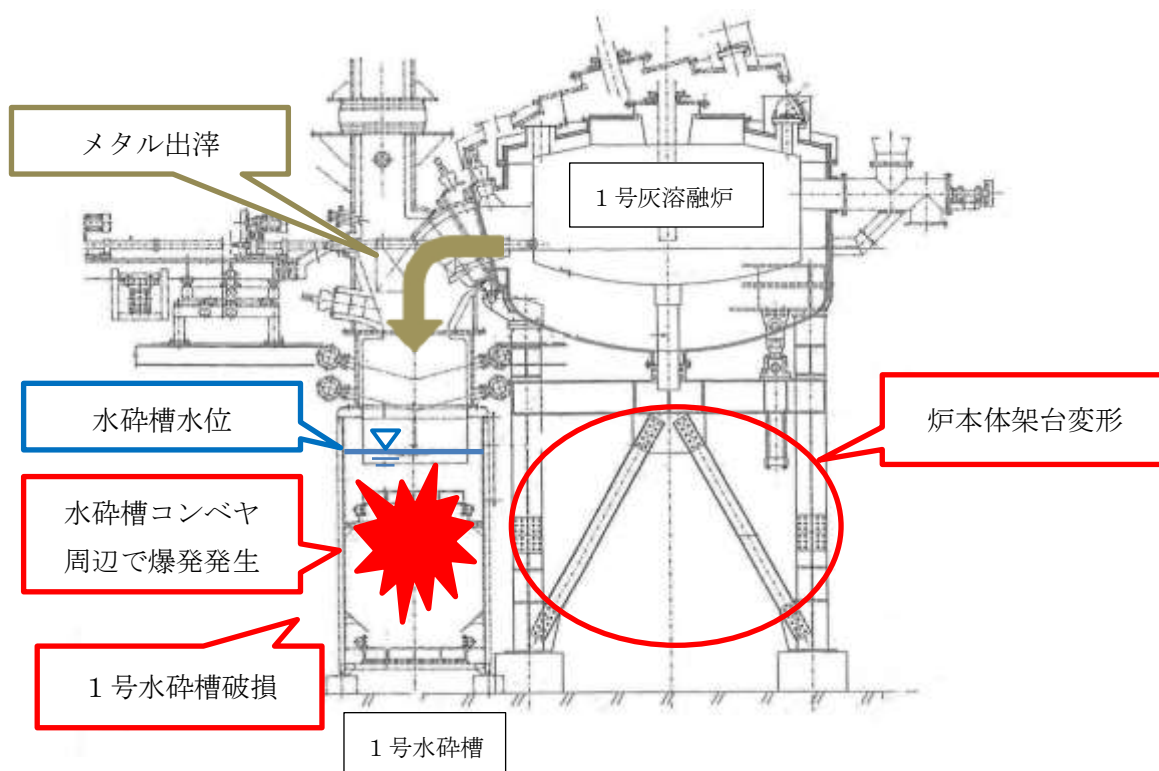


図1 1号灰溶融炉の事故発生概略図

## (2) 事故前後の経緯

平成 25 年 3 月 12 日 (火)

- 9:00 スラグ層計測 (約 100mm)
- 11:00 灰投入開始
- 17:33 灰投入停止
- 17:33 傾動処理 (準備) スタート
- 17:33 No.1 メタル水砕ポンプ起動
- 17:37 傾動開始 0° スラグ出滓
- 18:57 傾動角度 3.8° メタル出滓確認
- 19:26 傾動角度 5.5° **爆発発生**  
プラズマ重故障、水砕槽故障 他 各所異常発生  
傾動復帰
- 19:30 運転員が灰溶融設備室へ駆けつけたところ、室内は水蒸気が立ちこめており、室内に入ることができず、火災発生も確認できなかった。また、運転員全員の安否を確認。
- 19:54 消防署へ通報  
宮崎北警察署及び宮崎市北消防署が現場を調査した。最終的には火災は発生していないことが消防により確認された。

## (3) 被害の状況

### ア 人的被害

爆発発生時、灰溶融設備室内に人は立ち入っておらず、人的被害はなかった。

### イ 設備的被害 (P4 の図 2 を参照)

1 号灰溶融炉は、1 号水砕槽、傾動装置、炉本体架台、出滓口カバー及び各所配管・歩廊等の破損・損傷が発生した。特に損傷が大きかった 1 号水砕槽については、水砕槽水位レベルよりも下の部分での損傷が大きい。

また、2 号灰溶融炉付近では水砕水配管の一部が損傷した。

### ウ 環境影響

灰溶融炉施設における爆発事故に伴い、平成 25 年 3 月調査分の排出源等及び環境モニタリング調査については、予定していた調査に検査項目を追加して実施した。

その結果は、評価基準値を満足していた。



写真 E 2号灰熔融炉付近 水砕水配管の損傷  
(西側から撮影)



写真 D 1号水砕槽損傷(北西側から撮影)



写真 C 1号水砕槽、炉本体架台損傷  
(南西側から撮影)



写真 B 1号水砕槽損傷(南側から撮影)

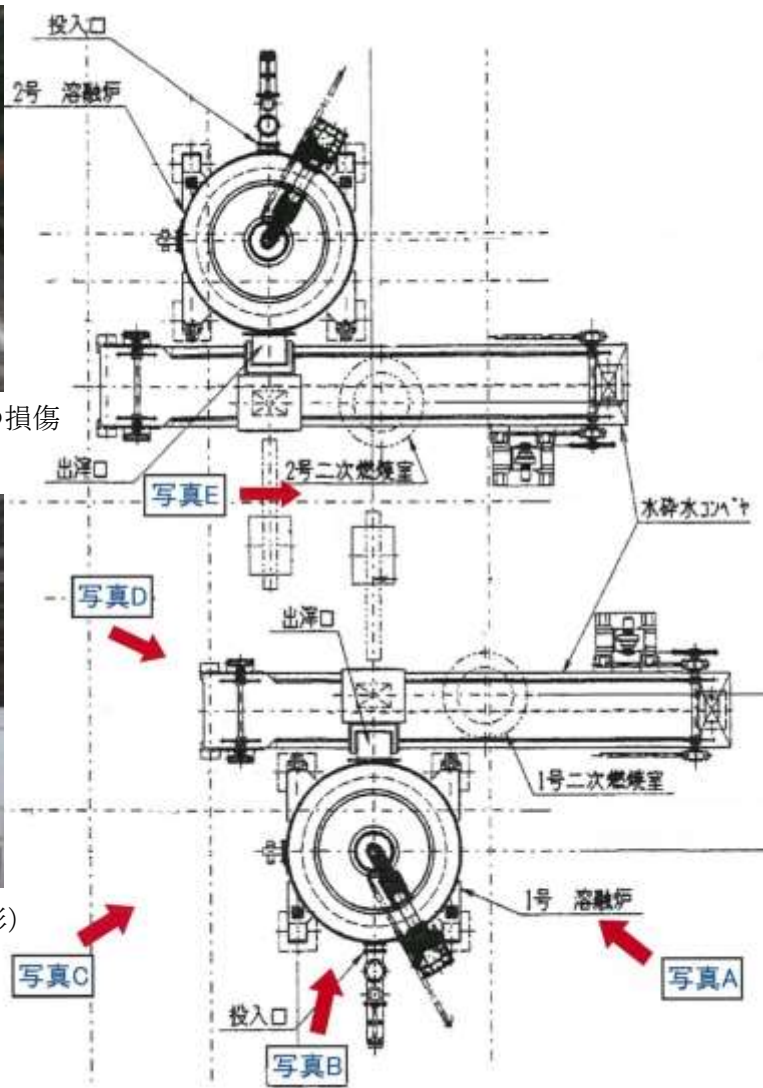


写真 A 1号水砕槽、炉本体架台損傷  
(南東側から撮影)

図 2 灰熔融炉機器損傷状況図

#### (4) 安全対策

今回の爆発事故において、前項のとおり、設備的な破損・損傷が発生したが、炉本体架台の損傷により炉本体が不安定な状況であった。このため、現場の安全を確保するために安全対策工事を行った。

工事内容としては、破損部の撤去や炉本体架台の修復工事を行った。



写真 1 安全対策工事の状況①



写真 2 安全対策工事の状況②

### 3 履歴調査

運転履歴及び整備履歴を調査し、事故原因に繋がる事象がなかったかを調査した。

#### (1) 運転履歴

本灰溶融炉の事故発生までの稼働実績（平成 18 年度から平成 25 年 3 月）は、以下のとおりである。

ア 処理量：1.48～1.77 t / h（公称処理量 1.46 t / h（35 t / 24 h））

イ 負荷率：101～121%<sup>(※3)</sup>（公称処理量に対するアの処理量の割合）

ウ 延べ運転日数：1号炉 / 1,174日、2号炉 / 1,156日

エ 延べ傾動回数：1号炉 / 238回、2号炉 / 240回（4～5日に1回）

事故時の運転及び傾動作業手順はマニュアルに沿って行われていた。

(※3) 溶融炉の運転では電極継足操作、傾動、簡易整備など灰の処理を一時的に停止する作業が必要であることから、本溶融炉は公称処理量（1.46 t / h（35 t / 24 h））に対して余裕を持たせた能力で設計されている。

#### (2) 整備履歴

灰溶融炉本体耐火物については年に1回の全面補修を実施している。また、その他の機器についても適宜補修を実施しながら運転を継続している。

平成 18 年度以降、計画外の大規模な補修を行うことなく、灰の処理に必要な稼働日数が確保されていたことから、必要な整備が実施されていたと考えられる。

#### (3) 履歴調査の結果

履歴調査の結果、過去に小爆発の発生と水砕槽変形の発生が確認された。

ア 平成 20 年 4 月 19 日 1 号炉において小爆発が発生

イ 平成 21 年 7 月 30 日 2 号炉において水砕槽変形が発生

これらの原因としては、アについては傾動時の状況として塊状のメタルの排出が確認されており水砕不良によるもの、イについては傾動中のメタル出滓停止が発生しており、傾動時のメタル出滓量の変動によるものが原因と思われる。

今回の事故は同様の事象（塊状メタルの発生や傾動中のメタル出滓停止）が発生していないこと、また、これらの爆発現象と規模が異なることから、爆発発生メカニズムについても異なると考えられる。



## 4 事故原因の調査

### (1) 爆発種類の推察

爆発の種類としては、一般的に①可燃性ガス等の爆発、②粉じん爆発、③水蒸気爆発が挙げられる。今回の爆発時の運転状況及び機器の損傷状況を調べた結果、爆発が発生したと推定される水砕槽内部や周辺機器には火炎による熱的損傷や燃焼の形跡（煤等の付着）が確認されなかった。このことから、①可燃性ガス等の爆発及び②粉じん爆発の可能性は低いと思われる。

③水蒸気爆発については、高温の熔融液滴と水が接触する状況で発生する現象であり、今回の爆発現象では、以下の事象が確認された。

- ア 爆発現象が発生したのは熔融炉の傾動作業中であり、高温の熔融物と水が接触する環境になっていること。
- イ 機器の損傷状況は、水砕槽水位レベルよりも下の部分で損傷が大きくなっていること。
- ウ 爆発発生後の水砕槽底部滞留メタルの一部において微粒化したメタル（写真3）が確認されており、水蒸気爆発時に生成される特徴的なサンプル形状（写真4）と近い外観状態であること。

以上のことから、水蒸気爆発の可能性が高いと判断される。



写真3 水砕槽底部残留メタル

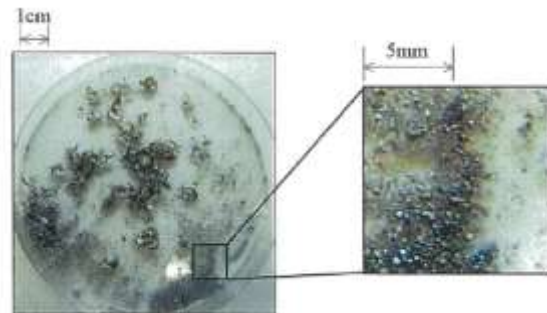


写真4 【参考】水蒸気爆発発生時のサンプル形状 (U-Alloy95)

[U-Alloy95・・・融点：95°C、密度：9.84g/cm<sup>3</sup>の低融点合金。水蒸気爆発試験の模擬物質として使用]

## (2) 水蒸気爆発のメカニズム及び考えられる要因

### ア 水蒸気爆発のメカニズム

蒸気爆発のメカニズム及びトリガリングについては、以下の研究がなされている。

(出典：筑波大学 熱流体制御研究所)

#### ■蒸気爆発のメカニズム

蒸気爆発という現象を明らかにするためには、まず、その発生手順を明らかにする必要があります。さまざまな研究者がこの現象を観察し、大まかには右図のような手順で起こっているということが明らかとなりました。

(1) まず初めに、高温のドロドロ溶けた金属Aと冷たい水Bが何らかの原因で接触します。

(2) すると、溶けた金属は水の中で細かく分裂し、その分裂した塊（**熔融液滴**といいます）1つ1つが蒸気の膜で覆われます（この現象は「**Premixing（粗混合）**」と呼ばれています。）。この蒸気の膜は断熱材と同じ効果をもっており、熔融液滴は熱をもったままの状態となります。

(3) 熔融液滴周りの蒸気の膜が何らかの要因で壊れ、液状の熔融液滴と水が直接接触した場合（溶けた液体状の金属と水が接触するので「**Liquid-liquid contact（液-液接触）**」といいます）、熔融液滴は更に細かく分裂し（この現象は「**Atomization（微粒化）**」と呼ばれています。）、水と直接接触する面積が更に増えます。そして、断熱材の役割を果たしていた蒸気の膜がなくなったので、急速に熱が移動し、水が蒸発することによって蒸気が発生します。蒸気の体積は水の体積よりもかなり大きいので、発生した蒸気が水を急激に押しつけようとします。この現象によって、圧力波が発生します。

(4) この圧力波が水中を伝播し、周りにある熔融液滴の蒸気膜を壊し始めます。そして、(3)の現象がおきます。この(3)、(4)が水の中で連鎖していき、最後は大きな圧力波を発生させ、爆発的な現象となります。

この4つの段階で、(3)の段階は蒸気爆発を起こすか起こさないかを決める段階であり、「**Triggering（トリガリング）**」と呼ばれています。つまり、このトリガリングを明らかにすることによって、蒸気爆発の発生条件を調べることができるのです。

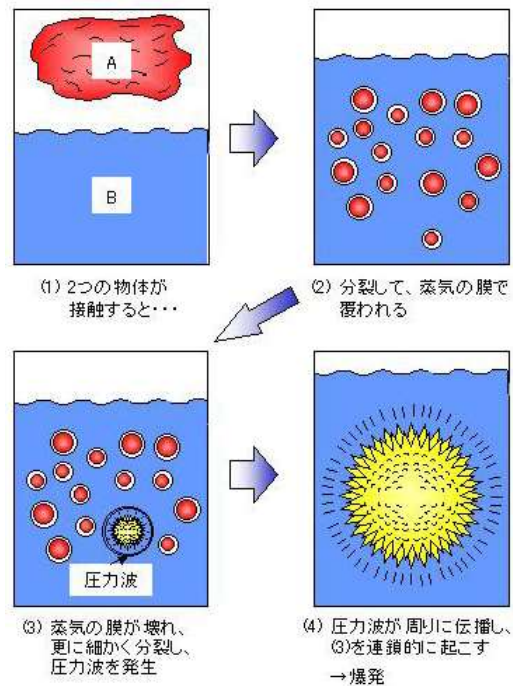


図1 蒸気爆発に至るまでの過程

■トリガリング

次に、トリガリングを詳しく見てみることにします。下図には粗混合から液滴の微粒化までの流れが示してあります。

(1) 初め、熔融金属が粗混合して、熔融液滴の周りに蒸気の膜ができたとします。

ここで、蒸気の膜が起こす挙動は3つに分類できます (図中 (I))

- ◆蒸気の膜が壊れる場合は次の段階に進みます。
- ◆蒸気の膜が安定な場合、または激しい沸騰を起こすだけの場合では液滴が冷やされるだけとなり、爆発は起こりません。

(2) つぎに、高温物体と水の接触が起こります。このとき、接触のパターンで2つに分類できます (図中 (II))

- ◆液状の金属と水が接触した場合は次の段階に進みます。
- ◆固体上 (原文のまま) の金属と水が接触した場合には、ただの金属の塊を冷やす状態となり、爆発は起こりません。

(3) 高温液滴と水が液-液接触を起こした場合、液滴の状態は2つに分類できます (図中 (III))

- ◆高温液滴が不安定な状態である場合、液滴が細かく分裂する微粒化を起こします。
- ◆高温液滴が安定な状態の場合、そのまま冷却されて、液滴が固体となり、爆発は起こりません。

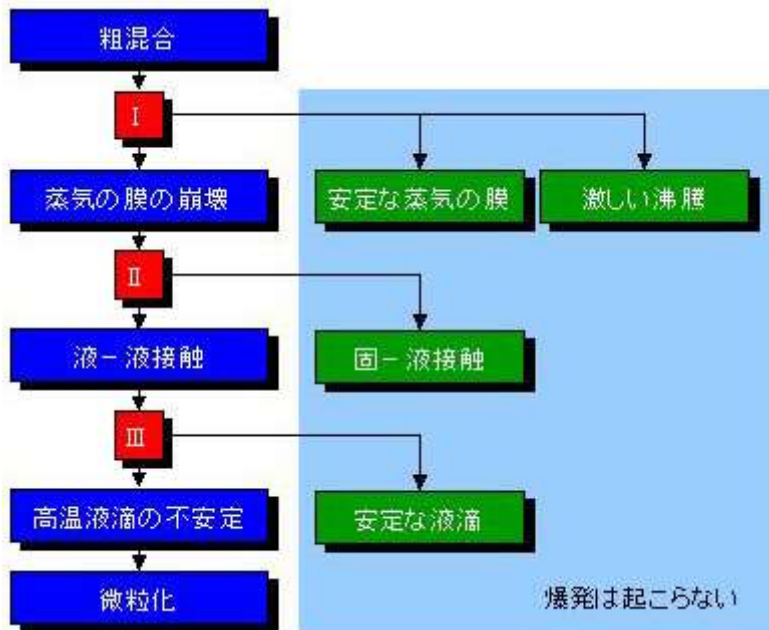


図2 粗混合→微粒化の流れ

## イ 考えられる要因

考えられる要因は、以下のとおりである。

### (ア) 温度

水蒸気爆発では、蒸気膜が壊れる際の高温の熔融液滴が「液状」である必要があることから、高温の熔融液滴の温度が融点に対して十分高い温度である必要がある。【要因 1】

また、低温側の水についても水温が低いほど蒸気膜が不安定となり崩壊しやすくなる。【要因 2】

### (イ) 粘度

水蒸気爆発では、高温の熔融液滴の微粒化が発生する必要がある。微粒化は、前述のとおり、高温の熔融液滴が不安定な場合に発生し、粘度が低い場合には液滴が不安定な状態となるため微粒化が発生しやすくなる。【要因 3】

### (ウ) 塩類

文献<sup>(※4)</sup>によると、低温側の水に塩類を添加すると、蒸気膜が崩壊しやすくなることが報告されている。【要因 4】

また、過去の水蒸気爆発事例として、製紙工場や化学工場において熔融塩と水による水蒸気爆発の事例がある。灰熔融炉では投入灰中に塩類が存在し、炉内で熔融状態となることから熔融塩の水蒸気爆発が発生し得る環境であることから、熔融塩の水蒸気爆発がトリガーとなってメタルの水蒸気爆発に繋がる可能性がある。【要因 5】

(※4)「塩類添加による蒸気膜崩壊および蒸気爆発の促進効果（新井崇洋、古谷正裕）」

### (エ) その他

水蒸気爆発のトリガリングの一つに「蒸気膜の崩壊」があるが、水流やその他機械的要素により、蒸気膜が崩壊する可能性がある。水砕槽内では、水砕水噴霧ノズルによる水流、水槽内のスラグ搬送用スクレーパコンベヤの動作等がある。【要因 6】

### (3) 事故原因の各種調査内容

(2) の「イ 考えられる要因」に沿って、(株)ひむかエコサービスで各種調査した内容を下記に示す。

要素	水蒸気爆発要因	調査内容
温度	<b>【要因 1】</b> 傾動時の熔融温度が熔融物(出滓メタル)の融点よりも十分高い	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 熔融物の温度                竣工以降の灰熔融炉(2炉)の運転状況及び傾動時の運転データから熔融物温度を調査。</li> <li>・ 熔融メタルの融点計測                爆発現象発生時の各所の熔融メタルに関して成分分析及び融点計測を実施。</li> <li>・ 傾動時の熔融物温度の推定                プラズマ電力が高い場合には、炉内の熔融物温度も高くなることから、過去の傾動時のプラズマ電力と比較。</li> </ul>
	<b>【要因 2】</b> 水砕水温度の低下	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水砕水の温度                水砕水温度の過去の運転実績と爆発現象発生時の運転データを整理し、比較。</li> </ul>
粘度	<b>【要因 3】</b> 熔融物の粘度が低いことによる微粒化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 熔融メタルの粘度計測を実施</li> </ul>
塩類	<b>【全般】</b> 投入灰中の Cl 濃度が高く、塩類が平成 23、24 年度よりも増加	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 投入灰の性状調査                塩類の影響度評価のために、熔融対象物である「混合灰」、「炉内残留灰」、「焼却灰」、「熔融用飛灰」の成分分析を蛍光 X 線分析装置にて実施。</li> </ul>
	<b>【要因 4】</b> 水砕水塩濃度が高濃度化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水砕水の塩濃度計測記録の確認</li> </ul>
	<b>【要因 5】</b> 熔融塩による水蒸気爆発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 爆発現象発生時の炉内残留未熔融灰の分析</li> <li>・ <math>\text{CaCl}_2</math> (塩化カルシウム) の高温粘度計測</li> <li>・ 未熔融灰中塩類の蒸発についての調査</li> </ul>
その他	<b>【要因 6】</b> 水流やその他機械的要素	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水砕槽内の水砕水噴霧ノズルによる水流、スラグ搬送用スクレーパコンベアの動作等を調査</li> </ul>
	<b>【要因 7】</b> 焼却灰計量機の誤差	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 爆発現象発生後の焼却灰計量機と飛灰計量機の詳細点検の確認</li> </ul>

#### (4) 今回の損傷事故前後で認められた事象（各種調査結果）

本項については、「(3) 事故原因の各種調査内容」に沿って、(株)ひむかエコサービスが取りまとめた報告書から要点をまとめると以下のとおりとなる。

##### ア 温度

###### (ア) 【要因1】に関する調査結果

###### a 溶融物の温度

今回の傾動前のスラグ温度(灰投入量と投入電力から計算される出滓スラグ温度)は約1400℃であり、竣工以降低下傾向となっていた。

###### b 溶融メタルの融点計測

溶融メタルの融点計測結果では1500℃以上(一部のサンプルで1320℃)と高い融点を示すものがあつた。

###### c 傾動時の溶融物温度の推定

(a) 傾動時のプラズマ電力は過去の運転実績と比較しても大幅に高い状況ではなかつた。

(b) 爆発時の溶融物温度は、過去の運転実績と比べ特に高いとは言えない。

###### (イ) 【要因2】に関する調査結果

###### a 水砕水の温度

水砕水温度は47℃前後であり、過去の運転実績(37～56℃)とほぼ同等の温度となっていた。

##### イ 粘度

###### (ア) 【要因3】に関する調査結果

###### a 溶融メタルの粘度計測

(a) 溶融メタルの粘度計測を実施した結果、メタルピット内メタルにて1550℃で約9P<sup>(※5)</sup>であり、粘度が低いとは言えない結果だつた。

(b) しかしながら、今回計測したメタルよりも粘度が低い測定値(他プラント)があること、鉄類の高温粘度(文献値:純鉄(4.2～5.3cP<sup>(※5)</sup>[1600℃])、酸化鉄(5～8cP[1600℃])に対して大幅に高いことから、爆発現象発生後に酸化が進行した、または、溶融メタル内の不純物の影響で粘度が高めになった可能性がある。

(※5) 粘度の単位: 1P(ポアズ) = 100cP(センチポアズ)

ウ 塩類

(ア)【全般】に関する調査結果

a 投入灰の性状調査

(a) 表1の投入灰の成分分析結果から、爆発現象発生時は平成23、24年度と比較して灰性状が大きく変化しており、焼却灰においてはSiO<sub>2</sub>が約1/2に減少、CaO、Clが約2倍に増加し、飛灰においてはSiO<sub>2</sub>が約1/2に減少、Clが約2倍に増加していた。本変化に伴い、混合灰（溶融対象混合物）においてもSiO<sub>2</sub>が1/3～1/2に減少、Clが約2倍に増加、CaOもやや増加していたことから、溶融炉に投入される塩類が平成23、24年度と比較して大幅に増加していたものと判断される。

表1 投入灰の成分分析結果 単位 (%)

		平成23年度	平成24年度	事故発生時①	事故発生時②	比較結果
SiO <sub>2</sub> (二酸化ケイ素)	焼却灰	38.4	42.4	22.3	—	約1/2
	飛灰	17.4	13.7	6.5	—	約1/2
	混合灰	24.9	31.3	9.6	15.5	1/3～1/2
CaO (酸化カルシウム)	焼却灰	27.3	24.2	43.5	—	約2倍
	飛灰	20.0	23.5	17.5	—	やや減少
	混合灰	22.3	26.3	30.6	29.4	やや増加
Cl (塩素)	焼却灰	1.4	1.2	3.2	—	約2倍
	飛灰	17.1	18.0	34.0	—	約2倍
	混合灰	10.9	6.1	23.2	18.5	約2倍

なお、焼却灰、飛灰のCl濃度は平成25年5月10日以降では平成23、24年度と同程度となっていることから、爆発現象発生時は特に灰中の塩濃度が高い状況であったものと考えられる。

(b) また、灰性状について他プラントとの比較を実施した結果、爆発現象発生時の灰性状は、大きく異なっていた。

(イ)【要因4】に関する調査結果

a 水砕水の塩濃度計測記録

水砕水中の塩化物イオン濃度の調査結果から、爆発現象発生時の水砕水中の塩化物イオン濃度は、過去の当施設での計測結果の中で最も高い値(45,000mg/l)であったものの他施設ではより高濃度(110,000mg/l)の事例があった。

(ウ) 【要因 5】に関する検討・調査結果

a 爆発現象発生時の炉内残留未熔融灰の分析

(a) 爆発現象発生時に塩類含有の未熔融灰が残留しており、熔融塩が出滓された可能性がある。

(b) 傾動時のプラズマ電圧の変動は平成 25 年 3 月 12 日のみ大きく、爆発現象発生時には傾動中に未熔融灰が電極下部のプラズマ周辺に到来していたものと考えられる。

b  $\text{CaCl}_2$  の高温粘度計測

(a) 爆発現象発生時の計算スラグ温度：約  $1400^\circ\text{C}$  に対し、 $\text{CaCl}_2$  の融点は  $772^\circ\text{C}$  であることから、爆発現象発生時の  $\text{CaCl}_2$  は融点に対して十分高い温度となっていたと考えられ、【要因 1】を満たす状態であったと考えられる。

(b)  $\text{CaCl}_2$  の高温粘性は  $850^\circ\text{C}$  以上にて  $1\text{cP}$  以下と推定されることから、純鉄等よりも低い粘度であり、【要因 3】を満たす状態であったと考えられる。

c 未熔融灰中塩類の蒸発

(a) 熔融炉に投入される塩類が規定以上に増加していた場合、塩類の蒸発時間が不足していた可能性がある。このため、未熔融灰中の塩類の蒸発について検討した結果、灰中塩類 ( $\text{CaCl}_2$ ) が計画値を大きく上回る場合には、爆発現象発生時の塩類 ( $\text{CaCl}_2$ ) が残留し得ることが示された。このことから現状の運転条件では、Cl 濃度が計画条件であれば蒸発時間は確保されている。

(b) 爆発発生時の灰投入量及び灰中 Cl 濃度、塩類の必要蒸発時間から爆発現象が発生した傾動角度  $5.5^\circ$  (傾動開始後、約 110 分) の時点では計算上でも炉内に塩類が残留し得ると考えられる。

エ その他

(ア) 【要因 6】に関する調査結果

a 水砕槽内の水砕水噴霧ノズルによる水流、スラグ搬送用スクレーパコンベアの動作

(a) これらの機械的要素は、蒸気膜が崩壊する要因の一つと考えられる。

(b) しかしながら、過去の傾動 (1 号炉/238 回、2 号炉/240 回) においても同じ条件であることから、本事象が水蒸気爆発の主要因となる可能性は低いと判断する。



(イ) 【要因 7】に関する調査結果

a 焼却灰計量機と飛灰計量機の詳細点検

- (a) 爆発現象発生後、平成 25 年 5 月 13 日に焼却灰計量機と飛灰計量機の詳細点検を調査した結果、焼却灰計量機にて約-66%、飛灰計量機にて約+10%の計量誤差が確認された。
- (b) ただし、熔融炉運転時には、今回傾動開始時含め、定期的に焼却灰計量機のゼロ点調整を実施しており、誤差の補正を行っている。
- (c) 本計量誤差と爆発現象の因果関係を調査したところ、各種運転データより爆発現象発生時には焼却灰計量機と飛灰計量機の誤差が発生していなかったと判断される。

(ウ) ごみ質変化に関する調査結果

- a 「ウ 塩類 (ア) 【全般】に関する調査結果」より、投入灰の Cl 濃度が上昇していたことから、ごみ質変化を調査した。事故直近では、処理していたと思われるごみピット底付近のごみにおいて高濃度の Cl 濃度は見られず、投入灰中の Cl 濃度上昇要因の特定には至らなかった。
- b しかしながら、これまでの分析履歴としてごみ中の Cl 濃度の変動は大きく、当日の処理ごみ中にも Cl 濃度が高濃度のごみが混在していた可能性がある。
- c 当該施設において塩類濃度を大幅に上昇させ得る設備はない。

## (5) 水蒸気爆発要因と調査結果まとめ

各種調査結果について(株)ひむかエコサービスがまとめた内容は下記のとおりである。

### 4. 4. 1. 水蒸気爆発要因と調査結果 (まとめ)

4. 2項、4. 3項より、水蒸気爆発の要因を整理すると以下の通りです。

表2 水蒸気爆発要因と調査結果 (まとめ)

要素	水蒸気爆発要因	調査結果
温度	【要因1】 傾動時の熔融温度が熔融物（出滓メタル）の融点よりも十分高い	傾動時の熔融温度は若干高めではあるが過去の運転実績範囲内。 出滓メタルの融点計測結果では1320℃及び1500℃以上の融点を確認されており、傾動前定常運転時の計算スラグ温度（1400℃）よりも高いものがあるため、出滓が不安定になりやすい状況であったと思われる。
	【要因2】 水砕水温度の低下	過去の運転実績範囲内であり、爆発現象発生時には特異な温度ではない。
粘度	【要因3】 熔融物の粘度が低いことによる微粒化	熔融メタルの高温粘度計測では、容易に微粒化することが想定される低い粘度ではなかったが、爆発発生後の水砕槽底部残留メタルの一部において微粒化されたメタルが確認されている。
塩類	【全般】 投入灰中のCl濃度が高く、塩類が平成23、24年度よりも増加	爆発現象発生時にはSiO <sub>2</sub> の低下、Cl、CaOの増加が見られ、塩類が増加。Cl濃度は本施設におけるこれまでの測定実績、他施設の実績に比し、大幅に高濃度。
	【要因4】 水砕水塩濃度が高度化	爆発現象発生時の水砕水塩濃度は本施設における過去の測定結果中でも最も高い。 他プラント実績ではさらに高い水砕水塩濃度での運転実績有。
	【要因5】 熔融塩による水蒸気爆発	爆発現象が発生した傾動角度:5.5°で炉内に未熔融灰が残留していたことからメタル出滓時に熔融塩が出滓された可能性有。 熔融塩等は融点・粘度の面から水蒸気爆発が発生する可能性有。
その他	【要因6】 水流やその他機械的要素	過去の運転実績においても常に発生している事象であり、今回の爆発現象発生時の特異現象ではない。
	【要因7】 焼却灰計量機の誤差	各種運転データからは爆発現象前に誤差が発生していた可能性は低い。

## 5 水蒸気爆発原因の推定

### (1) 今回発生した水蒸気爆発のメカニズム

(株)ひむかエコサービスは今回発生した水蒸気爆発のメカニズムについて次のように説明している。

水蒸気爆発の前提条件としては、以下の4つが必要となります。

- A 高温の液体と低温の液体が存在し、爆発を起こすには十分なエネルギーが存在している。
- B 高温液体の周りの蒸気膜が崩壊する。
- C 高温液体の温度が融点よりも十分に高温であり、高温液体と低温液体が直接、液—液接触する状態になる。
- D 高温液体が微粒化し、接触面積が増大する。

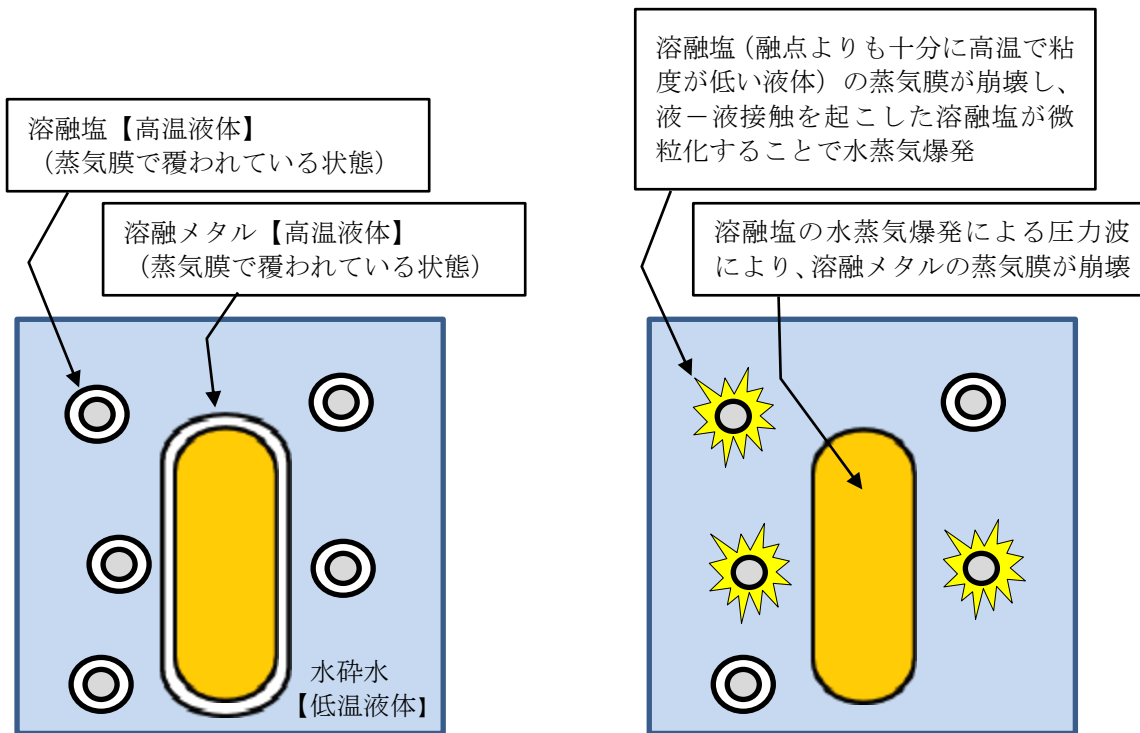
今回のケースでは以下の状態であったと判断されます。

- ① Aは成立。高温の液体（熔融メタル）、低温の液体（水砕水）。
- ② Bは通常の運転時は崩壊しにくいと考えられる。
- ③ 通常の運転では蒸気膜が崩壊しにくいと考えられるため、直接液—液接触しにくいものと推定される。しかし、今回、熔融炉内の残留灰の分析から、塩類が比較的高濃度で検出されている。塩類が存在する場合には、融点よりも十分に高温の液体（熔融塩）が存在することになり、後述するように、外部からの影響因子となりCの条件が成立する可能性がある。
- ④ 熔融メタルの粘度計測の結果は比較的高い結果であった。しかし、分析サンプル数が限られていることから低粘度のメタルが存在していた可能性を否定できないこと、塩化カルシウム等の熔融塩類の粘度は低いことからDの条件が成立する可能性がある。

以上より、想定されるメカニズムは以下の通りとなります。

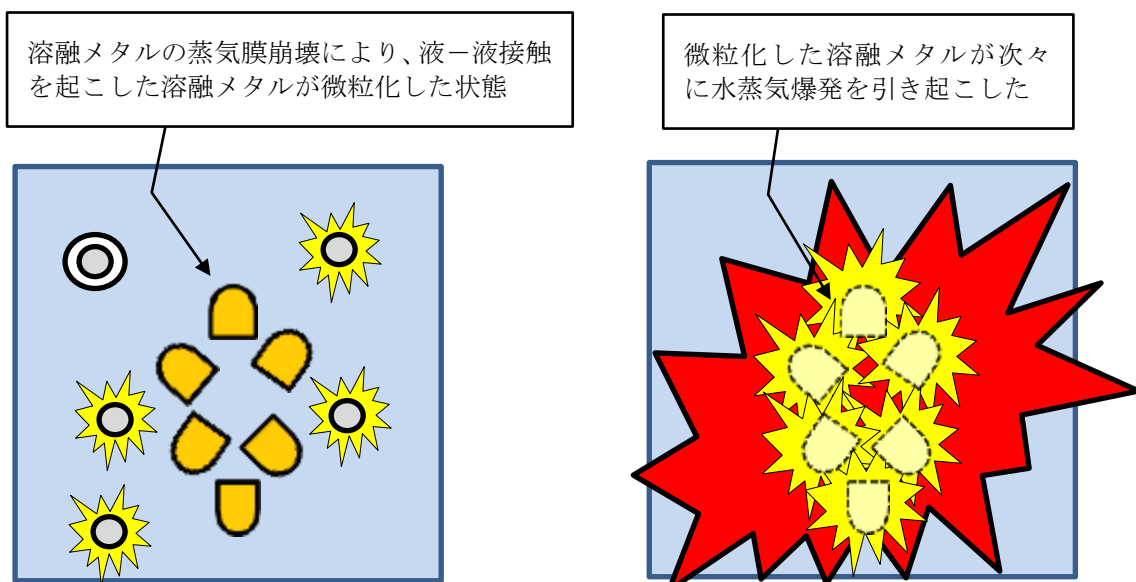
高温の液体（熔融メタル）と、低温の液体（水砕水）が混合する系で、自律的な水蒸気爆発が生じにくい状態でも、外部から圧力等が与えられると水蒸気爆発に至るといった報告例もあります。本来自律的な爆発の可能性の小さい熔融メタル—水砕水の系に、熔融塩の高温液体が共存、水蒸気爆発し、外部からの圧力に相当する影響を系全体に与えた可能性があります。

(株)ひむかエコサービスが想定した前ページの水蒸気爆発のメカニズムをわかりやすく図式化すると以下のとおりとなる。



①水砕水に溶融塩と溶融メタルが共存

②微粒化した溶融塩の水蒸気爆発



③溶融メタルの微粒化

④溶融メタルの水蒸気爆発

## (2) 水蒸気爆発発生までのフロー

各種調査結果から今回の水蒸気爆発発生までのフローを図3に示す。

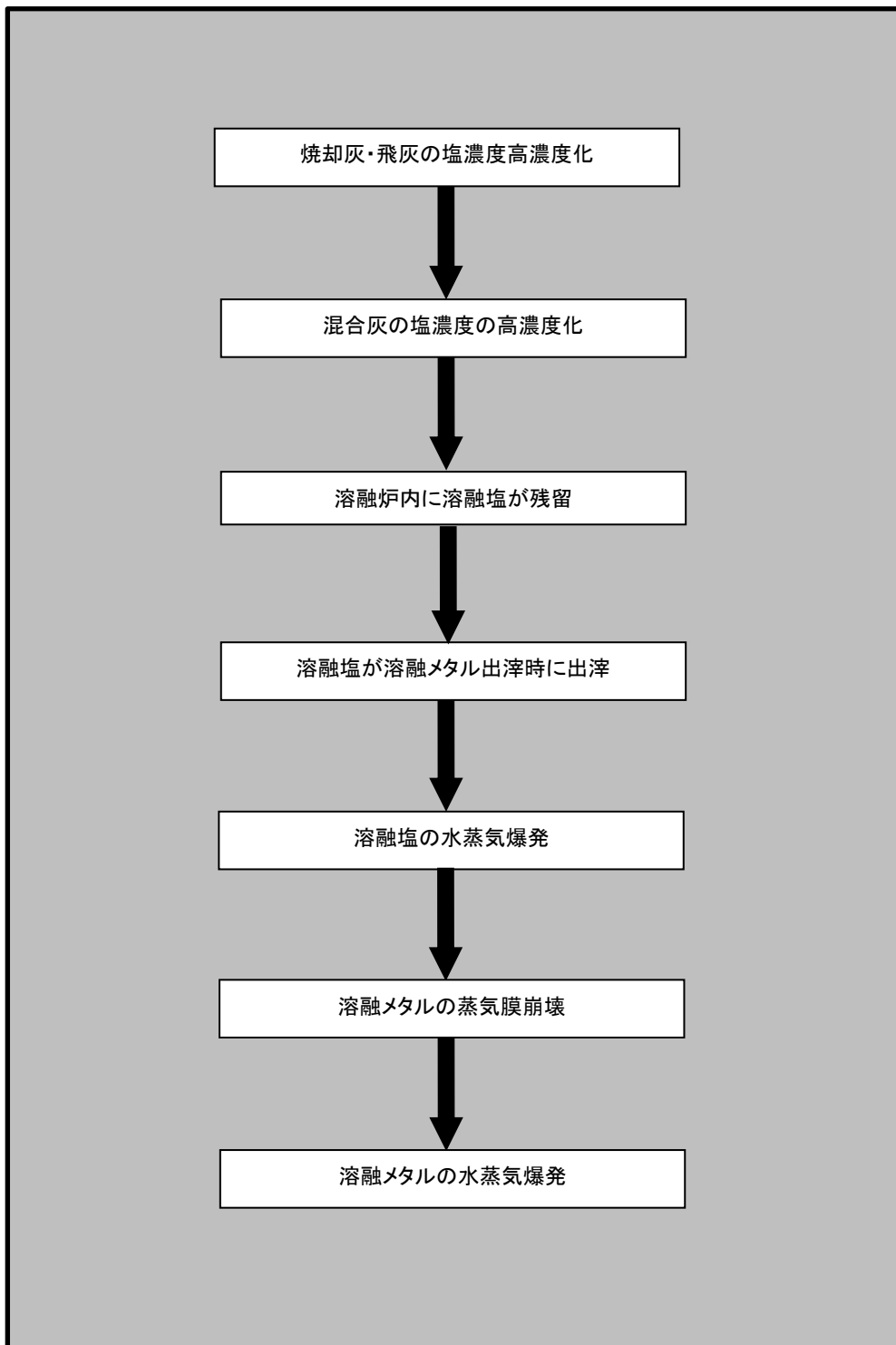


図3 水蒸気爆発発生までのフロー

## 6 まとめ

### (1) 今回の爆発事故

今回の爆発事故は下記のことから「水蒸気爆発」と判断される。

- ア 爆発現象が発生したのは溶融炉の傾動作業中であり、高温の溶融物と水が接触する環境になっていること。
- イ 機器の損傷状況は、水砕槽水位レベルよりも下の部分で損傷が大きくなっていること。
- ウ 爆発発生後の水砕槽底部滞留メタルの一部において微粒化したメタルが確認されたこと。

その水蒸気爆発の発生原因は下記のとおりと考えられる。

- ア 溶融対象物中の塩類が高濃度化したことによって、塩類が十分に揮散されなかったため、溶融炉内に溶融塩が残留した。
- イ 傾動時に溶融炉内に残留した溶融塩が、溶融メタル出滓時に出滓した。
- ウ 水砕槽内で溶融塩の水蒸気爆発が発生した。
- エ ウの爆発圧力波の影響で溶融メタルの蒸気膜が崩壊し、溶融メタルの水蒸気爆発が発生した。

溶融炉内に溶融塩が残留した要因については下記のことを考えられる。

- ア 溶融対象物中の塩濃度が高くなっていたこと。  
爆発現象発生時の溶融対象物（焼却灰、飛灰）の塩濃度が、平成 23 年度及び平成 24 年度の分析値の 2 倍程度に上昇していた。
- イ 焼却灰と飛灰の混合が不十分であったこと。  
事故当時の溶融対象物の塩濃度にバラツキが認められ、そのバラツキにより、溶融炉内で溶けムラが生じ、傾動時の溶融対象物（焼却灰、飛灰）の溶融状態が不完全になりやすい状態であった。
- ウ 保温時間を確保せず傾動前に投入した灰が溶けきらないまま傾動を開始したこと。  
傾動前の保温時間は、メタルの出滓を安定させるため短縮しており、事故当日もマニュアルどおり灰投入停止直後に傾動を開始している。そのため、投入された溶融対象物（焼却灰、飛灰）中の塩類が排出ガスへ揮散できず溶融塩としてスラグやメタルとともに出滓した。

上記のイ、ウの要因は、溶融対象物中の塩濃度が経時的に変動することを詳細に把握していなかったことによる。

## **(2) 再発防止対策**

今回の爆発事故は、溶融対象物中の塩類が高濃度化したことが原因と考えられる。水蒸気爆発の再発を防止するためには、溶融対象物中の塩濃度を低減する必要がある。溶融対象物は、焼却灰と飛灰であるが、飛灰の塩濃度は焼却灰の 10 倍程度と高い。このため、溶融は焼却灰の単独処理とし、飛灰については溶融以外の処理を検討する。

## **(3) その他**

より安全・安定的な溶融炉の運転を行うため、「傾動時の溶融炉内状況の安定化」、「水砕水塩濃度の低減化」などの設備面及び運転管理面からの対策についても検討する。