

# 災害調査報告書

合金鉄工場における高温物死亡災害

(要約版)

労働安全衛生総合研究所

## 1. はじめに

合金鉄工場において、電気製錬炉により溶解作業を終えた合金溶湯を炉から取鍋に移し、溶湯を鑄型に分注する装置へ取鍋を運んで所定の位置にセットする作業中、突然取鍋内から溶湯が噴き出した。

災害発生現場周辺には4名の作業員がいたが、取鍋の直近にてセット作業を担当していた被災者1名が噴き出した溶湯を浴びて全身熱傷を負い、死亡した。他の3名は取鍋から離れていたため無事だった。

## 2. 発生状況

合金鉄工場において、電気製錬炉を用いた原料の溶解と成分調整の工程を終了し、溶湯を鑄型に流し込んで製品とする作業を始めていた。電気製錬炉内の溶湯を運搬用の取鍋に移し入れた後、その取鍋を天井クレーンによって鑄銑機（鑄型に分注する装置）へと移動させた。そして、被災者が所定の位置に取鍋をセットする作業中、突然取鍋内の合金が噴出し、半径約6m、高さ約6mの範囲に飛散した。（図1）

取鍋から約2mの地点に被災者がいたため、飛散した溶湯を浴びて全身熱傷を負い焼死した。発生現場周辺には、被災者のほかに3名の作業員がいたが、取鍋から離れていたため無事であった。

溶湯の噴出に続いて各所で小火災が発生したが、工場内に設置してあった消火器などによりすみやかに消し止められた。

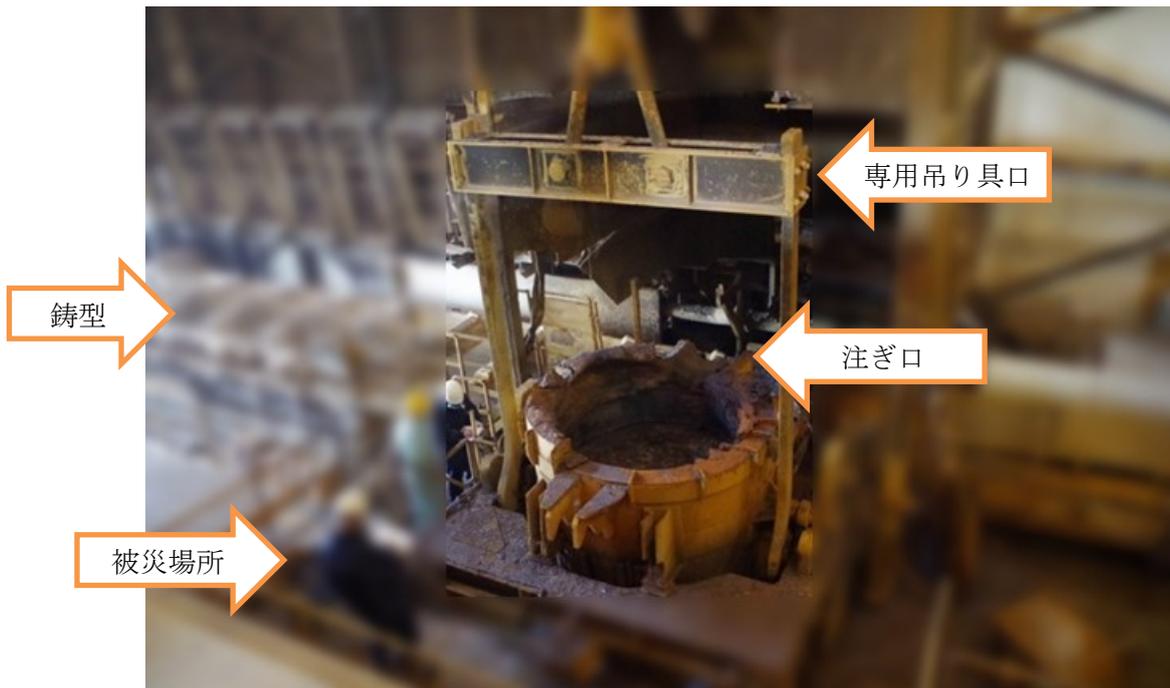


図1 取鍋のセット状況

### 3. 調査結果

#### 3.1 災害が起きた製造設備

##### 3.1.1 合金鉄の製造フロー

製造工程には製錬工程と造塊工程がある。

###### 〈製錬工程〉

- ・ 主な原料は、鉱石とコークスである。輸入した鉱石はクラッシャーで大きさを調整して貯蔵しておく、これを計量して電気炉内に装填する。
- ・ 次に、電気炉を運転して昇温し、溶解させる。
- ・ 表面に浮いたスラグを除去し、取鍋に溶湯を移して造塊工程に運搬する。
- ・ 純度がほぼ 100%であり、不純物が少ない製品を製造する場合には、電気炉外での製錬工程が追加される。

###### 〈造塊工程〉

- ・ 運搬された取鍋を傾注装置にセットする。同装置により取鍋を傾け、溶湯をメタル樋に流し込む。
- ・ メタル樋を通った溶湯は鋳型内に流し込まれる。
- ・ 鋳機では、鋳型内に一定量が流し込まれるように、鋳型が順次移動する。
- ・ 鋳型を自然放冷後、鋳型からインゴットを取り出し、鋳物品移動台車に移す。
- ・ 出荷場において検査がなされ、製品となる。

##### 3.1.2 製造設備の耐熱材料の補修、鋳込樋の作製

製造設備は高温の溶湯を取り扱うため、耐熱性の高い材料（耐火レンガ）が使用されているが、溶湯との接触により耐熱材料が損耗する。損耗による形状の変化が問題にならないければ、耐熱材料を厚くすることにより損耗への対処が可能である。ところが、取鍋の注ぎ口や樋などのような形状の変化をきらう箇所、あるいは、溶湯との接触時間が長い箇所では、耐熱材料の部分的な損耗が問題となる。そこで、設備全体の耐熱材料の交換とは別に損耗状況を目視で点検し、問題となる箇所については耐熱材の補修を行ったり、鋳込樋や注ぎ口については製品製造の都度、崩して新たに作製したりしていた。

その方法は、損耗箇所の付着物やスラグ、使用済みの炭酸カルシウムを除去した後、炭酸カルシウムと薬剤を添加した水とを混練してペースト状にしたものを塗り付けて損耗箇所に圧着し、乾燥させるものである。

なお、本件事故以前に溶湯の小規模の噴出があり、炭酸カルシウムがその原因と考えられたため、炭酸カルシウムが取鍋内に入ることを避けるよう技術部門から指示が出ていた。

##### 3.1.3 使用済みの耐熱補修材の再利用

鋳込樋や注ぎ口に使用済みの耐熱補修材（炭酸カルシウムは約 3 割）は、合金鉄の原料を含んでいる。そこで、作業標準ではこれを回収しておき、次の製錬工程において原料の一部として再利用することとしていた。

ところが、他班ではスラグと再利用のメタルのみを溶湯を注ぎ入れる前に取鍋底部に敷いていたのに対し、事故を起こした班の前の班では、取鍋底部の損耗を減らす効果と収率向上の効果があるとして、使用済みの耐熱補修材を底部に敷く材料に加えていた。

## 3.2 災害に至るまでの経過

- ・ 発災の約 8 時間前、取鍋を傾けた際に溶湯がこぼれないように取鍋の注ぎ口周囲に土手状の隆起を作った。
- ・ 同約 7 時間前、鑄込樋と注ぎ口に使用済みの耐熱補修材の残骸、および、スラグを取鍋底部に合計約 450 kg（推定）投入した。その後、原料を当該電気炉内に装填して、溶解作業を開始した。
- ・ 同約 5 時間前、当該電気炉での作業を前班から引き継いだ。
- ・ 同約 4 時間前：電気炉から溶湯を取鍋に移し、続いて 1 回目のタップ作業（溶湯を鑄型に流し入れる作業）を開始した。同作業は、約 30 分で終了した。
- ・ 同 30 分前、電気炉での溶解工程を終えたので当該班の 2 回目のタップ作業を開始した。まず、電気炉を油圧シリンダーにより傾け、溶湯を取鍋に移した。約 10 分後、表面に浮いたスラグを取鍋からあふれ出させて、取鍋への注湯を終了した。
- ・ 同 20 分前、天井クレーンを使用して取鍋を吊り上げ、注ぎ口の向きを被災者が手動で所定の方向に直した後、除滓場に移動させ、クレーンの補巻で取鍋を傾けた。そして被災者が先端をレーキ状にした手工具を使用し、手動で表面に残っているスラグをかき落とした。
- ・ 同 4 分前、取鍋の方向を直し、天井クレーンにより鑄銑機の所定位置へ移動させた。移動中、被災者は抜き取ったピンを所定の位置に戻すため、いったん現場を離れた。
- ・ 発災時刻、被災者が移動を終えた取鍋に近付き、取鍋を固定する作業を開始してまもなく、取鍋内の溶湯が突然噴き上がった。
- ・ 噴出した溶湯は約 3 t であり、半径約 6 m、高さ約 6 m の範囲に飛散した。被災者は取鍋から約 2 m の地点におり、飛散した溶湯を浴びた。

## 3.3 採取試料の成分分析

### 3.3.1 半定量分析

エネルギー分散型 X 線分析装置を使い成分分析（元素分析）を実施した。この分析装置では、 ${}^6\text{C}$  から  ${}^{92}\text{U}$  までの元素を検出できる。測定結果の要点は以下の通りである。試料①～⑥の採取場所を **図 1** に示す。試料⑦と⑧は合金を除去した後の取り鍋底部、試料⑨は事故品とは別の取鍋の底部から採取した。

- ・ 炉外から採取した試料はマンガン（Mn）を主に含む合金であり、カルシウム（Ca）を微量含むが、部位によっては酸素（O）を含む酸化物の合金と推定される。
- ・ 試料①は酸化カルシウムと推定される。マンガン等も微量に含む。
- ・ 試料②から⑨はマンガンを主に含む合金と推定される。
- ・ 試料中の白いものはカルシウムと推定される。
- ・ 炭素（C）の含有は確認できなかった。
- ・ 事業場の測定では、炭素（C）が 0.2 % 程度、カルシウム（Ca）が 0.01 % 未満であり、他の成分については本 EDX 測定結果と同様であるが、炭素とカルシウムについては異なる傾向を示すことがわかった。本 EDX 測定では軽元素の炭素の定量が難しいことが原因である。詳細な定量のため、別の元素分析手法で測定を行った。結果を 4.3.2 節に示す。

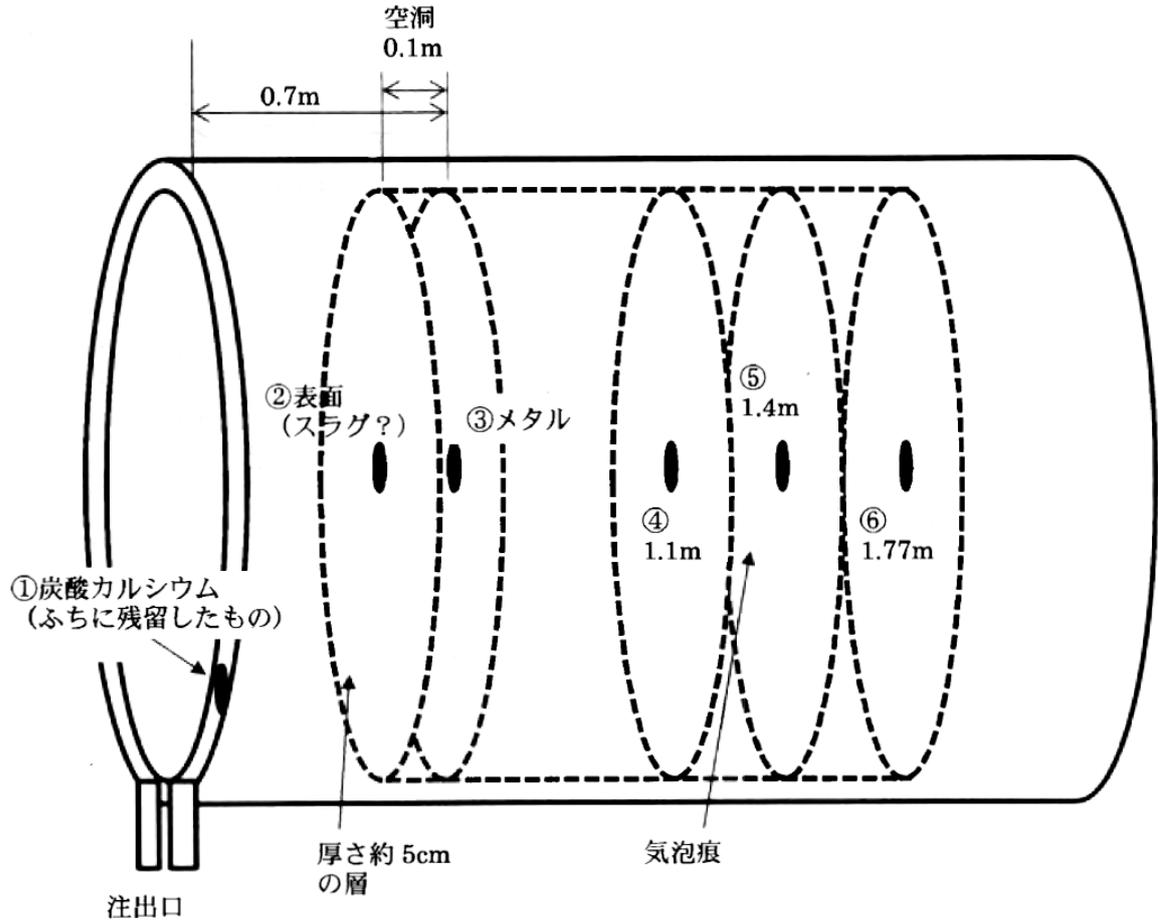


図 1 試料採取場所（図は横倒しにしており，実際には左が上）

### 3.3.2 定量分析

炭素 (C) とカルシウム (Ca) の成分を含めた成分の定量のため，詳細な測定を外部機関に依頼した。得られた結果を表 1 に示す。測定は，C と S は燃焼-赤外線吸収法，Si は二酸化けい素重量法，他の 5 元素は ICP 法の 3 種類の分析手法で行った。

得られた結果より，炭素が 0.2 %，カルシウムは 0.01 %未満であり，事業場による測定結果にほぼ等しいことがわかった。

表1 金属元素の定量分析結果 (単位%)

元 素	試料③	試料④
C	0.25	0.21
Si	1.52	1.51
P	0.05	0.06
S	0.006	0.007
Fe	8.02	7.74
Ca	0.01 未満	0.01 未満
Al	0.01 未満	0.01 未満
Mn	90.1	90.4

### 3.4 炭酸カルシウムに関する調査

炭酸カルシウムについて販売会社が作成した安全データシートの内容を次に示す。

#### 3.4.1 主な化学的性質, 物理的性質

- ・ 名称：炭酸カルシウム, Calcium carbonate
- ・ CAS No. 471-34-1
- ・ 臭気：無臭
- ・ 分解温度：825 °C
- ・ 眼に対する重篤な損傷・眼刺激性：GHS 区分 2A
- ・ 化学式：CaCO<sub>3</sub>
- ・ 分子量：100.09
- ・ 融点, 沸点：825 °Cで分解
- ・ 皮膚腐食性・刺激性：GHS 区分 2
- ・ 物理的性状：白色の粉末
- ・ 可燃性の有無：不燃性

#### 3.4.2 安定性と反応性

- ・ 通常取扱条件では安定である。
- ・ 希塩酸などの酸との混触により分解反応が起こり、二酸化炭素を発生しながら溶解する。
- ・ 825°C以上に加熱すると次の熱分解反応が起こり、腐食性を有する酸化カルシウムと二酸化炭素ガスを生成する。



#### 3.4.3 取り扱い上の注意

- ・ 粉じんが発生しないように取り扱い、必要に応じて局所排気装置または全体換気を使用する。取り扱い後はよく手を洗う。
- ・ 湿気, 水, 高温物との接触を避ける。
- ・ 直射日光や高温高湿を避け、できるだけ乾燥した冷暗所に密閉して保管する。
- ・ 容器の材質には、ポリエチレン, ポリプロピレン, ガラスなどが使用できる。

### 3.5 炭酸カルシウムと溶湯の接触による熱分解反応

溶湯の温度は約 1400 °Cであって炭酸カルシウムの分解温度 825 °Cよりも高いため、溶湯と接触すると炭酸カルシウムは熱分解を起こして二酸化炭素が生成する。そこで、この二酸化炭素の発生に伴う溶湯の噴出の可能性について、再現実験が行なわれた。その要点は次のようにまとめられる。

- ・ 炭酸カルシウムの塊あるいは粉だけの場合では溶湯との接触面のみで穏やかに熱分解反応が進むた

め、溶湯の飛散は起きない。ガスの発生速度が遅いためとみられる。

- ・ 炭酸カルシウムの上にスラグを被せるとガスが噴出する。炭酸カルシウムの量が増えれば、噴出の激しさは増し、噴出時間も長くなった。短時間かつ広範囲に熱分解反応が起こるためとみられる。凝固物には筋状の空洞が生じる。
- ・ スラグのほかにシリコンマンガンを加えると、ガスの噴出がさらに激しい。凝固物には筋状の空洞がある。シリコンマンガンは熱伝導性が良く、溶湯の高熱が効率よく伝わったためとみられる。
- ・ 炭酸カルシウムを酸化マグネシウムに置き換えると、ガスの噴出は抑止される。

これらの再現実験の現象は、事故現場の採取物にある筋状の空洞や事故後に実施した採取試料の成分分析の結果と一致し、さらに事故以前から当該電気炉において溶湯の噴き上げ現象があったことと事故のロットの 2 回前に使用後の炭酸カルシウムを取鍋の底部に投入していたとの証言があることから、炭酸カルシウムの熱分解反応によって二酸化炭素ガスが急速に発生した可能性は十分に考えられる。

### 3.6 その他の要因による溶湯飛散の可能性

#### 3.6.1 水分と溶湯の接触による水蒸気爆発

金属溶湯を取り扱う作業現場における水蒸気爆発の事例は数多いが、本件では金属原料の溶解工程を終え原料の投入をしていないこと、関係する装置は耐熱材料のみが使用され冷却水を用いていないこと、取鍋は事故の直前にも使用していて残留水はないこと、事故の 4 日前から降雨がなく原料は濡れていないこと、といった点から、水蒸気爆発が発生するだけの水分が溶湯と接触する可能性はほとんど考えられない。

#### 3.6.2 取鍋内への落下物

約 3t の溶湯が落下物によって飛散するためには、その落下物が相応の質量と速度を有している必要がある。ところが、直上の天井クレーンや天井などに欠落した部品などは発見されず、また事故後の炉内凝固物の調査でも痕跡が確認されていないことから、高所からの落下物の可能性は極めて低いと考えられる。また、取鍋周辺での棚落ちや肌落ちによる落下物では、落差がない上に量が限られるので多量の溶湯を高さ 6 m にまで飛散させることは不可能である。

#### 3.6.3 取鍋付近でのガス爆発

何らかの要因により取鍋付近に可燃性の混合ガスが存在したとすれば、溶湯の高熱が着火源となってガス爆発が起こることは想定可能である。ただし、可燃性の混合ガスの下方にある溶湯がそのガス爆発に伴って飛散する可能性はほとんどない。

#### 3.6.4 取鍋内での化学反応による爆発

溶解する原料中に異物（反応性物質など）があったとすると、これが投入された直後であるならば爆発や異常反応、密閉物の破裂の発生を想定できるが、本件では原料の投入工程をすでに終了して、鑄型へ注ぎ入れる直前の段階であり、取鍋内全体が溶けて均質な状態になっているから、その可能性はほとんど考えられない。

## 4. 本災害の事故の経緯と事故原因

### 4.1 事故の経緯

製造設備に使用されている耐熱材料の補修を繰り返した結果、補修部に使用していた炭酸カルシウムの塊がはがれて落下し、スラグ類と組み合わせさせて取鍋内の底部に堆積した。さらに、前班の作業において、取鍋の底部に敷いた材料約 450 kg 中に耐熱材料の残骸が含まれていて、残骸中の炭酸カルシウムがスラグにより覆われる形になり、炭酸カルシウムと溶湯の直接接触が遅れた。

この結果、2 回目のタップ作業で取鍋に電気製錬炉から溶湯を移して約 30 分が経過した時、覆っていたスラグが溶融して崩れたため、多量の炭酸カルシウムが高温の溶湯と短時間で広範囲に接触した。この接触により炭酸カルシウムの熱分解反応が起き、多量に生成した二酸化炭素の噴出に伴って溶湯が上方に噴出したと考えられる。

### 4.2 災害の発生原因

- ・ 炭酸カルシウムは不燃性ではあるものの、溶湯の温度よりも低い温度で熱分解反応が起こり、二酸化炭素を生成したことが直接原因である。事実、事故以前にも少量の溶湯が噴き出ることが時々あったという。
- ・ 補修部に使用した炭酸カルシウムは、耐熱材料と一体化しないので、補修部からはがれて落下した。そして、取鍋内の底部に堆積したと考えられる。
- ・ 前の班の作業にて耐熱材料の残骸が取鍋底部に投入されていた。
- ・ 炭酸カルシウムの熱分解反応は吸熱反応であるので、少量がゆっくりと熱分解するのであれば、熱分解反応の結果、生成する二酸化炭素の量もゆっくりである。ところが、耐熱材料の耐熱性を向上させようとスラグとともに底部に投入したことにより、溶湯と炭酸カルシウムの接触が遅れたと考えられる。その結果、多量の炭酸カルシウムが高温の溶湯と短時間で広範囲に接触したと推定される。
- ・ 電気炉での溶解作業、および、鑄型への注湯作業は機械化が進んでいたが、溶湯が入っている取鍋の移動と所定位置へのセット作業、および、溶湯表面に浮いたスラグの除去作業は人手に頼っており、作業員が取鍋に接近する必要があった。

## 5. 再発防止対策

本災害では、耐熱材料の補修材料として使用済みの炭酸カルシウムが短時間で急速に熱分解反応を起こし、多量の二酸化炭素が生成された。そして、この発生ガスが外部に逃げる際に溶湯の噴出を誘発したと考えられる。については、この事故の発生メカニズムを断ち切り、同種災害の再発を防止する対策として、以下があげられる。

### (1) 熱分解反応を起こさない材料を使用する

金属溶湯の温度に達しても熱分解反応を起こさない材料を補修材料として使用する。酸化マグネシウムは、炭酸カルシウムと比べて高価ではあるが、不燃性であって、融点は 2850 °C と溶湯の温度よりも十分に高く、その代替物質のひとつと考えられる。なお、本物質を溶湯と接触させた実験では、ガスの発生は認められていない。

### (2) 炭酸カルシウムを落下させない、投入しない

補修材料の強度と付着性を改善し、補修材料の剥離・落下を防ぐ。このことにより、万一、剥離した場合でも破片が大きくなりやすく、破片の除去や痕跡の確認がしやすいと思われる。故意の投入は厳禁である。

**(3) 炭酸カルシウムを多量に堆積させない**

炭酸カルシウムの剥離落下が避けられなければ、落下堆積した炭酸カルシウムを定期的に除去し、堆積量を少量に保つこととする。

**(4) 作業場所の安全を確保する**

防護壁などを設置することにより、作業場所へ飛散してくる溶湯を遮断する。  
また、作業場所から近いところに避難場所を確保し、日頃から避難訓練を行うこととする。

**(5) 耐熱服、耐熱手袋などの防護具を着用する**

本件災害のような多量の溶湯の噴出には適用できないが、少量の噴出は事故以前から時々起きていることから、それらによる労働災害を軽減・防止するため、耐熱服や耐熱手袋などの防護具を着用することとする。

**(6) 高温物を原因とする災害のリスク評価及びリスク低減措置を実施する**

本件災害とは異なるメカニズムによる労働災害が多く発生している。それら災害のリスク評価を行い、そのリスク評価の結果を関係作業者に周知することとする。万一当該作業に許容できないリスクがあると認められた場合には、作業を遠隔操作で行うことや装置・用具の改善などによるリスク低減措置を検討し、それを確実に実施することとする。