

鑄造炉爆発の危険防止に関する研究

報告者	高橋 一英	研究種目名	奨励研究
職名	技術職員	研究期間	令和4年度
参加研究者	なし		

審査区分：2140，課題番号：22H04202

1.はじめに

鑄造実習では、高周波電気炉で鑄鉄材を 1500℃高温域まで加熱溶解している。ごく稀に電気炉坩堝の溶湯に補給材を投入する際、いきなり溶湯が瞬間的に爆発飛散する危険事例が発生している。ひとたび鑄造爆発（爆発規模に関係なく）が起これば、人命事故に繋がる甚大な災害の恐れがある。事前に安全行動の教育訓練を十分に実施し、万が一の水蒸気爆発・火災・火傷などの危険性や安全衛生教育を徹底しても、それだけで 100%未然に危険を回避できないことから、鑄造爆発の根本原因の解明と爆発除去に直結する因子を取除く。

2 研究目的

鑄造実習での鑄造爆発は、主に鑄鉄材の保管状況の悪さから、①水分付着による水蒸気爆発、②鉄の酸化による赤錆腐食（酸化第二鉄_湿潤雰囲気ではヘマタイトは (Fe_2O_3) の水和物 $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ～乾燥雰囲気では Fe_2O_3 に変化）、③鑄造材の予熱や厚さによる急激な温度差の影響、④異物混入などが要因に挙げられる。電気炉坩堝への補給材投入時の爆発を想定して鑄造爆発を未然に防ぐため、1)原因調査、2)坩堝廻り防護壁の対策、3)爆発再現実験、4)鑄造材側の対策、などの複合的な要因も考慮して原因解明と対策を行う。重大爆発事故を未然に防止するため、「①原因解明と②予防安全危険防止策の構築」が研究目的である。

3. 研究方法

3.1 鑄鉄炉爆発再現実験の概要

3.1.1 原因調査

鑄造実習（鑄鉄溶解）環境下での鑄造爆発の要因を調査する。a.鑄鉄材の保管状況（水分付着・錆発生・異物混入）、b.錆による腐食度（表面観察・錆の厚さ）、c.素材の余熱・厚さによる影響、d.塗料・油分などの付着物、e.鑄鉄材の乾燥具合（プロパンガスバーナーによる乾燥有無の比較）について調査する。

3.1.2 坩堝廻り防護壁の対策

鑄造爆発実験に対応できる防護壁を電気炉坩堝の間口周辺に鉄製防護壁を溶接にて製作、設置固定する（図1、図2）。防護壁と安全保護具（鑄造保護メガネ、革手、前掛け、足カバー、安全ヘルメット）と溶接面などで危険回避しながら爆発再現実験を行う。

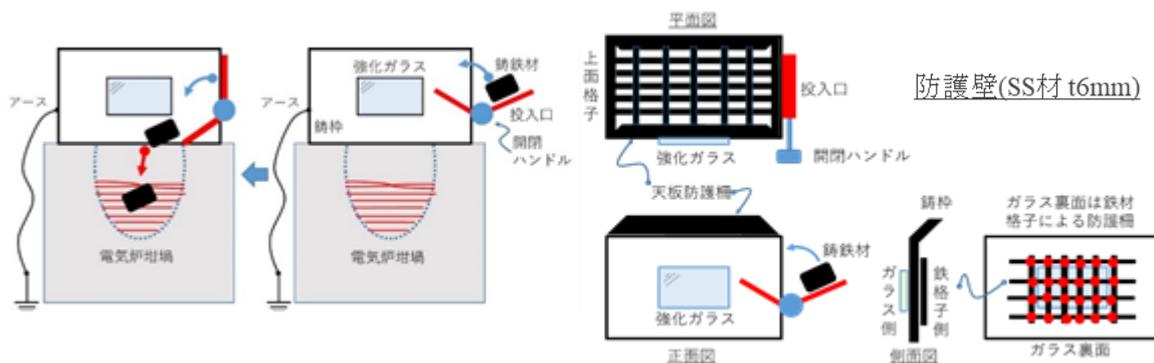


図1 坩堝廻り防護壁の対策1

3.1.3 爆発再現実験（ビデオ撮影）

上記の錆や塗料・油分など種類別に爆発再現実験を行い、爆発の有無を把握する（防護壁強化ガラスをビデオ撮影・観察）。事前に爆発危険性のある疑わしい鋳鉄材や危険因子を取除くことで鋳造作業の安全を担保する。



図2 坩堝廻り防護壁の対策2

3.2 鋳鉄炉爆発再現実験方法

3.2.1 鋳鉄溶解材

A1～A4群（保管状況や試料形状を考慮）に分類，保管期間は経年による錆腐食を重視，保管場所は換気状況や湿度影響からの錆腐食で分類する。

3.2.2 実験項目

①鋳鉄材自体の影響（予熱・厚さ），②付着物による影響（塗料・油分・異物混入），③赤錆の状態に着目する。

3.2.3 鋳鉄溶解材準備

鋳鉄溶解材切断準備（表1）を参考に鋳鉄溶解材を準備する。

表1 鋳鉄溶解材切断準備

No	鋳鉄溶解材準備一覧		鋳鉄溶解材切断 ※分数は現寸を1とする大きさ、-は準備不要						
	保管期間	分類	鋳鉄溶解材 mm	1.予熱乾燥	2.溶解材大きさ（分割）	3.油分	4.塗料	5.異物混入	
1	R3新規	A1	購入溶解材 四角柱 40×75×25	現寸2個					
2	R3実習		鑄込み湯口	現寸2個					
3	20年 以上	A1'	歯車 Φ140	1/2, 1/4 ⇒ 2セット		-	-	-	
4			治具 70×80×80	1/4, 1/8 ⇒ 2セット					
5		A2	卓上万力本体 60×150	現寸2個					現寸共用
6			ノロすくい Φ160 (薄板 t5) ※1	1/4	3/4				
7		A3	四角柱 35×70×70 (ミニ定盤材)	1, 1/2, 1/3 ⇒ 2セット※2					
8			四角柱 40×40×150 (溶解材)	1/2, 1/3 ⇒ 2セット					
9			鉄八角柱 Φ60×80h (溶解材)	1, 1/2 ⇒ 2セット					
10		A4	マイクロメーター部品 130×80	-					現寸

注) ※1_何度も焼きが入り硬く、切断困難 ※2_油付着

3.2.4 鋳鉄炉投入実験

3.2.4.1 赤錆対象

※1.予熱乾燥・2.溶解材大きさ（分割）実験は共用とする。

① 予熱乾燥（図3）

鋳鉄溶解材表面の水分を飛ばすことが目的。

温度条件>予熱なし（室温 20℃）

予熱あり（プロパンガスバーナー炙り⇒熱電対 100℃到達⇒坩堝湯投入 1400℃）。

② 溶解材分割

鋳鉄溶解材分割による大きさ比較⇒坩堝投入。

坩堝投入後の鋳鉄溶解材表面と中心温度の急激な温度差（歪）が及ぼす影響をみる。



図3 予熱乾燥

3.2.4.2 赤錆以外の影響

③ 油分・塗料・異物混入

3.油分付着の鑄鉄溶解材を対象に実験 (A3 群). 4.塗料は, 塗装済部品を対象に実験. 5.異物混入は, 卓上万力の中子に使用する水ガラス残留物の影響をみる.

④ 赤錆粉の直接的影響

赤錆は水蒸気爆発の危険因子である. 特に湿潤雰囲気中でヘマタイト(Fe₂O₃)の水和物 Fe₂O₃・H₂O は非常に危険である. 実験は, 赤錆粉 10g・20g・50g を紙袋に小分け, それを鑄鉄溶解材 (No1 購入溶解材_四角柱) にテープ止めして坩堝湯に個別投入する.

4. 鑄鉄炉爆発再現実験の結果

4.1 赤錆粉の直接的影響

表 2 は爆発再現実験の結果である. 特に爆発が顕著であったのは, 6.赤錆粉の②追加実験である. 赤錆以外の爆発因子を除いた, 錆なしできれいな状態の鑄鉄溶解材 (No1 購入溶解材_四角柱) に接着剤を塗り赤錆粉を大量にまぶし糊付けする. 坩堝湯の中に溶解材ごと一気に沈めることで, 水蒸気爆発を効果的に誘爆させ「赤錆粉の直接的影響」を確認できた.

※なお, 赤錆は金属熱処理の焼き入れに使用する急冷用水槽の底にある赤錆を使用する.

(水槽の赤錆腐食の劣化が激しく, 簡単に表面から赤錆が剥がれ落ちる状態)

表 2 爆発再現実験の結果

爆発実験の結果		○は爆発なし, ×は爆発あり		鑄鉄溶解材切断 ※分数は現寸を1とする大きさ, —は準備不要						
No	保管期間	分類	鑄鉄溶解材 mm	1.予熱乾燥	2.溶解材分割(予熱なし)	3.油分	4.塗料	5.異物混入		
1	R3新規	A1	購入溶解材_四角柱 40×75×25	○	○	—	—	—		
2	R3実習		鑄込み湯口	○	○					
3	20年 以上	A1'	歯車 Φ140	1/2○ 1/4○	1/2○ 1/4○					
4			治具 70×80×80	1/4○ 1/8○	1/4○ 1/8○					
5		A2	卓上万力本体 60×150	○	○				—	共用○
6			ノロすくい Φ160 (薄板 t5) ※1	1/4○	3/4○					
7		A3	四角柱 35×70×70 (ミニ定盤材) ※2	1○ 1/2○ 1/3○	1○ 1/2× 1/3○				共用○	—
8			四角柱 40×40×150 (溶解材)	1/2○ 1/3○	1/2○ 1/3○					
9			鉄_八角柱 Φ60×80h (溶解材)	1/2○ 1/3○	1× 1/2×					
10		A4	マイクロメーター部品 130×80	—	—				—	単○
			6.赤錆粉	①赤錆粉10g, 20g, 50gを紙袋に小分け, それを溶解材No1にテープ止めして坩堝湯に個別投入. ○ ②上記の①が爆発なしのため, 追加実験として溶解材No1に接着剤を塗り赤錆粉をまぶして投入. ※3 ×						
注) ※1_何度も焼きが入り硬く切断困難, ※2_油付着, ※3_No1 購入溶解材_四角柱 40×75×25 ×1個. (結果_①の紙袋では湯の中に沈まず, 湯面上で赤錆の集合粉が燃焼するだけで一気に爆発しない)										

「赤錆粉の直接的影響」を確認するため, 表 2 の“6.赤錆粉”の実験内容について,

①赤錆 10g・20g・50g を紙袋に小分け, それを鑄鉄溶解材 (No1 購入溶解材_四角柱) にテープ止めして坩堝湯に個別投入するが, テープが燃え赤錆紙袋は溶解材から離れ坩堝湯表面上で激しい燃焼炎となる.

②このため, 上記①が爆発なしの激しい燃焼炎となったことから, 水蒸気爆発を誘爆させるための追加実験として, 溶解材 No1 に接着剤を塗り赤錆をまぶして坩堝湯に投入する. その結果激しい水蒸気爆発を確認した.

③なお, 水蒸気爆発誘爆の根拠は次の赤錆の化学式から水和酸化鉄が関与する.

表 2 続き 備考と過去事象

No	備考	過去事象		備考	
		保管場所	爆発有無		
1	赤錆	実習鑄造室		新カリ	
2	赤錆				
3	赤錆				
4	赤錆			軽爆発	旧カリ
5	中子残				
6	赤錆				
7	赤錆/油	実習倉庫		旧カリ	
8	赤錆/油				
9	赤錆				
10	塗料				実習鑄造室

水和酸化鉄_{Fe2O3(H2O)}※1 及びヘマタイト(酸化第二鉄_{Fe2O3})※2 の混合.

※1_水酸化物 (OH⁻ 化合物_危険) オキシ水酸化鉄=水和酸化第二鉄 : Fe₂O₃ · H₂O

オキシ水酸化鉄 FeOOH は組成の上でヘマタイト(Fe₂O₃)の水和物 Fe₂O₃ · H₂O

※2_ヘマタイトは、オキシ水酸化鉄が乾燥雰囲気中で脱水したもの.

4.2 録画ビデオによる総合評価

全ての実験で火花の跳ね具合は、溶解材を坩堝湯に投入する際、危険回避のための爆発防護箱の滑り台の落差が関係している。重量や投入角度(による落下速度の違い)に依っては火花状況に多少の違いがあるが、爆発・火花量・火花強度を見分けることは可能である。

表2の実験結果は爆発なし○ or 爆発あり×に限定される。危険度観点からより詳細な情報を録画ビデオ観察から読取り、火花飛散や予熱有無の比較、爆発・火花状況などを段階的に評価する。火花量と火花強度(火花の太さ)は、大(3点)_中(2点)_小(1点)の3段階で評価する。また、火花飛散点=火花量+火花強度(危険度_Max6)として、評価(危険度_MaxA)は火花飛散点や予熱有無の比較、爆発・火花状況など危険度を総合的に評価する(表3)。

4.3 爆発再現実験の結果

実際に火花飛散や爆発があった事象に焦点をあてる(表3)。

表3 録画ビデオによる評価1

	予熱	火花飛散点	予熱有無の比較	爆発・火花状況	評価
No1	有	火花量(3)+火花強度(3)= 6	有>無	火花(跳ね湯)あり.	A
	無	火花量(2)+火花強度(1)= 3		火花(跳ね湯)あり.	C
No2	有	火花量(1)+火花強度(1)= 2	有<無	火花(跳ね湯)若干.	C
	無	火花量(3)+火花強度(2)= 5		火花(跳ね湯)あり.	A
No3	1/2有	火花量(2)+火花強度(3)= 5	有<無	火花(跳ね湯)あり.	A
	1/2無	火花量(3)+火花強度(3)= 6		火花が広範囲に飛散.	A
	1/4有	火花量(2)+火花強度(2)= 4	有>無	火花(跳ね湯)あり.	B
	1/4無	火花量(1)+火花強度(1)= 2		火花(跳ね湯)若干.	C
No4	1/4有	火花量(3)+火花強度(3)= 6	有=無	火花(跳ね湯)あり.	A
	1/4無	火花量(3)+火花強度(3)= 6		火花(跳ね湯)あり.	A
	1/8有	火花量(2)+火花強度(2)= 4	有<無	火花(跳ね湯)あり.	B
	1/8無	火花量(3)+火花強度(2)= 5		火花(跳ね湯)あり.	A
No5	有	火花量(1)+火花強度(3)= 4	有>無	火花(跳ね湯)あり.	B
	無	火花量(1)+火花強度(2)= 3		火花(跳ね湯)あり.	C
No6	有	火花量(1)+火花強度(1)= 2	有<無	火花(跳ね湯)若干.	C
	無	火花量(1)+火花強度(2)= 3		火花(跳ね湯)若干.	C
No7 油分共用	1有	火花量(2)+火花強度(2)= 4	有>無	激しい燃焼炎	A
	1無	火花量(1)+火花強度(2)= 3		小さい燃焼炎.	B
	1/2有	火花量(1)+火花強度(1)= 2	有<無	火花(跳ね湯)若干.	C
	1/2無	火花量(3)+火花強度(3)= 6		爆発×	A
	1/3有	火花量(1)+火花強度(2)= 3	有>無	火花(跳ね湯)あり.	B
	1/3無	火花量(1)+火花強度(1)= 2		火花(跳ね湯)若干.	C
No8	1/2有	火花量(1)+火花強度(3)= 4	有>無	火花(跳ね湯)あり.	C
	1/2無	火花量(1)+火花強度(1)= 2		火花(跳ね湯)若干.	C
	1/3有	以降、ガスバーナー切れで予熱できない			
	1/3無	火花量(1)+火花強度(1)= 2		火花(跳ね湯)若干.	C
No9	1無	火花量(3)+火花強度(3)= 6		爆発×	A
	1/2無	火花量(3)+火花強度(3)= 6		爆発×	A
No10	無	火花量(2)+火花強度(2)= 4		火花(跳ね湯)あり.	C
		予熱有無の比較(計) →	有6 = 無5		

表 3 続き 録画ビデオによる評価 2

■赤錆粉の直接的影響（最終実験）			
赤錆①	赤錆10g・20g・50gを紙袋に小分けし、それを試料No1にテープ止めて坩堝湯に個別投入。		A
	10g○・20g○・50g○	激しい燃焼炎	
赤錆②	赤錆① 爆発なしのため、追加実験として溶解材No1に接着剤を塗り赤錆をまぶす。大爆発×		A

4.3.1 過去爆発事象の鑄鉄溶解材

過去に軽度の爆発があった No5_卓上万力本体 60×150 は、滑り台幅が狭く引っ掛ったため、投入時に滑り台を使わず直接手で坩堝湯に投入しているので落差影響はない。引っ掛ったことで予熱と同じ乾燥効果があった。結果は評価 C～B ランクの火花（跳ね湯）程度。また、No6_ノロすくい Φ160（薄板 t5）は、以前に軽度の爆発があり要注意であったが、投入時に坩堝入口で引っ掛り 1/3 だけ溶け、そうしている間にノロすくいは加熱され、爆発どころか評価 C ランクの火花（跳ね湯）若干程度である。

4.3.2 火花が広範囲に飛散

No3_歯車Φ140 のサイズ (1/2・1/4) をバーナーで加熱すると表面を熱伝播しながら表面浸透油分が飛ぶ（蒸発）さまが確認できた。また、坩堝湯投入時に 1/2 有は滑り台中間から落下、1/2 無は滑り台上部から落下した。落差や重量の影響で 1/2 無は火花が広範囲に飛散したと考える。

4.3.3 激しい燃焼炎

油分共用テスト品の No7_四角柱 35×70×70（ミニ定盤材）を、バーナーで加熱すると表面を熱伝播しながら表面浸透油分が飛ぶ（蒸発）さまが確認できた（No3・No4・No5 同様）。No7 は火花よりも油分と思われる燃焼炎を多く確認している。その中でも”予熱ありサイズ 1（1 有）”は、油の浸み込み付着による激しい燃焼炎を確認した。

4.3.4 爆発

No7_四角柱”1/2 無”が爆発、あきらかに水分が弾け飛んだ様な音がして水蒸気爆発の様相。No9_”1 無、1/2 無”は爆発。爆発防護箱の外にも勢いよく火花飛散。坩堝湯の中で水蒸気のブクブク音をさせながら爆発の様相。（No9_鉄八角柱は重量があり、滑り台を使わず直接坩堝にそっと投入）

4.3.5 赤錆粉爆発（最終実験）

赤錆①の実験では、溶解材 No1 に赤錆粉の入った紙袋をテープ止めていることから、坩堝湯投入時にテープが湯熱で瞬間蒸発して No1 から紙袋が外れ、湯面上で乾燥状態となり赤錆の集合粉が燃焼する状況である。爆発せずに激しい燃焼炎のみが確認された。

赤錆②の実験では、赤錆①が上記の理由で爆発しなかったことから、追加実験として No1 に接着剤を塗り赤錆粉をまぶす。その結果、赤錆粉は No1 と共に一気に坩堝湯中に沈み込み瞬間大爆発となる。（図 4）



赤錆①_テープ



赤錆②_接着剤

図 4 赤錆粉

5. 考察

表3「録画ビデオによる評価」から、爆発再現実験の結果を参考に溶解材ごとの火花内容および爆発有無を比較する。

5.1 予熱乾燥有無の比較

火花飛散総合点＝火花量＋火花強度から、点数が大きく危険度が高まる優位回数を比較したところ、予熱有6回、無5回と均衡しており、結果からは予熱による爆発回避の影響はない。しかし、赤錆爆発は湿潤・乾燥状態に依存する水蒸気爆発と仮定すれば予熱の否定はできない。赤錆状態を確認する必要がある。

(※溶解材 No8_分割 1/3 の大きさ以降、ガスバーナー切れで予熱なし)

5.2 溶解材分割による大きさ比較

溶解材 No1～No6 まで爆発はない。No7_予熱無は、10、1/2×、1/3○の結果から中間サイズのみが爆発していることで、溶解材表面と中心の温度差は爆発に影響ないと考える。

また、No3_1/2 無(歯車 Φ140)は火花が広範囲に飛散した。これは、外観検査で確認したとおり赤錆強度が顕著であり、他の溶解材よりも重量があることから、No3 が坩堝湯中に赤錆もろとも一気に沈み込み瞬間的に溶融したことで、爆発に近い火花の飛散を生じたと考える。

5.3 油分の影響

油分共用実験の No7_1 有(四角柱 35×70×70_ミニ定盤材)で、激しい燃焼炎を確認した。これは、No7 が実習鑄造室に20年以上も保管され油分の付着浸透が顕著であったからと考える。(※No7_1 有は、表面に赤錆薄膜と5つの面に油付着浸透)

5.4 塗料の影響

No10(マイクロメータ部品 130×80)に若干の火花が確認されたが、ほぼ跳ね湯である。塗料の影響を受ける様な燃焼炎や爆発はなかった。

5.5 異物混入

No5(卓上万力本体 60×150)は火花・跳ね湯の混在が確認されたが、爆発はなく中子残留物の影響はない。

中子の組成：水ガラスと CO₂ 反応による中子硬化の化学式

水ガラス{珪酸ソーダ(=ケイ酸ナトリウム)}+炭酸ガス ⇒中子硬化

$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$

※中子造形は炭酸ガス(CO₂)硬化法で行う。珪砂に10%の水ガラスを添加した造形模型に炭酸ガスを通わせ硬化させる方法。

5.6 最終実験

「赤錆粉の直接的影響」で激しい爆発が確認されたことから爆発に赤錆粉が関与しているのは明白である。爆発の原因は赤錆組成のオキシ水酸化鉄＝水和酸化第二鉄：Fe₂O₃・H₂O が大きく関与していると推測する。水は熱せられて水蒸気となった場合に体積が約1700倍にもなるため、少量の水でも高温の熱源に接触した場合、水の瞬間的な蒸発による体積の増大が起こり、それが瞬間爆発となる。

5.7 危険度

赤錆①②以外は、すべて鑄造実習で使用可能な保管材であることから、爆発等の危険が起り得る。本実験での危険度を総合評価のA判定割合から導く。

溶解材 No1～No10 および赤錆①②の全項目 30 試験体

A判定 13/30→0.433, 危険認定(火花広範囲に飛散・激しい燃焼炎・爆発) 7/30→0.233

赤錆①②を外す 5/30→0.166 本実験の危険度を16%とすると、誘爆させるための爆発再現実験ではあるが、これは10回投入して概ね1回前後は爆発する感触である。また、鑄造実習を例にすると、鑄鉄溶解は

1年に4回実施されるので2年に1度の確率で爆発が起きても不思議ではない。これは鑄造実習の安全としては極めて危険頻度が高い結果となった。

6. まとめ

鑄造実習における予期せぬ鑄造爆発を100%除外するため、鑄鉄炉爆発再現実験を繰り返し爆発原因とその傾向を調べてきた。鑄造爆発を危険回避する対策を以下に述べる。

- ① 赤錆爆発は湿潤条件の環境に依存し、乾燥雰囲気では“水蒸気爆発”は回避できる。予熱有無の比較で予熱の効果が殆ど確認できないのは、すでに赤錆がヘマタイト (Fe_2O_3) 乾燥していたと推測でき、これは通常の乾燥雰囲気での赤錆腐食である。
(ヘマタイトは赤錆の乾燥最終形、実際は空気中の湿気も考慮すれば、気付かぬ程の微小な水和物は爆発寸前に乾燥消滅している)。
急冷用水槽底のオキシ水酸化鉄 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 湿潤条件では水蒸気爆発の危険性大である。このことから、「あきらかに赤錆乾燥状態である」と判断できない場合は、坩堝湯への投入直前の予熱作業は必須かつ有効である。
- ② 火花の跳ね具合は、溶解材を坩堝湯に投入する際、実験から坩堝湯までの落差、重量や投入角度が大きく影響していることが分かった。投入はできるだけ坩堝湯に近づけて、そっと静かに投入することで火花の跳ね具合を最小限に抑えられる。
- ③ 激しい燃焼炎は20年以上も保管された鑄鉄材がある時期に油分の付着浸透を招いたことで生じる。爆発ではなく、ろうそくの炎が燃え上るような油燃焼である。特に飛散するわけではなく坩堝の上方向に広がることに留意すれば、危険回避は十分に予測できる。
- ④ 当然であるが、湿潤的な赤錆腐食や油汚れが酷く(付着浸透)、劣悪な保管材は使用を避け廃棄する。または、予熱乾燥が十分に可能と判断できれば対処する。
- ⑤ 鑄鉄材保管場所の気温や湿度を把握、必要に応じ換気するなど空調管理も大切である。

7. おわりに

爆発再現実験での危険度16%を踏まえ、通常では起こりえない爆発が現状保管材に潜在的にあることが浮き彫りになった。但し、実際の鑄造実習では全ての種類の保管材を使用するわけではなく、限定された良品を使用するため、爆発・火花飛散による危険度も極めて低く、過去に事故が無いことを補足する。

不意の爆発は非常に危険である。ある程度は原因の予想ができたとしても、実際に爆発再現実験から導かれた上記①～⑤の対策を講じなければ鑄造実習の安全を担保することはできない。それを裏付けるための原因と対策を導くことができたことは大きな研究成果である。

以上