

太平洋セメント株式会社 埼玉工場
自家発電設備 爆発事故調査報告書

2021年11月9日

太平洋セメント株式会社 事故調査委員会

目次

1. 序	
1. 1. はじめに.....	1
1. 2. 事故調査委員会.....	1
1. 2. 1. 委員会の構成.....	1
1. 2. 2. 委員会の経緯.....	2
2. 事故の概要	
2. 1. 発災事業所および発災設備.....	3
2. 2. 発災日時.....	4
2. 3. 気象状況.....	4
2. 4. 被害状況.....	5
2. 4. 1. 人的被害.....	5
2. 4. 2. 近隣への被害.....	5
2. 4. 3. 工場構内の設備被害.....	7
2. 5. 環境への影響.....	9
3. 発災事業所および発災設備の概要	
3. 1. 発災事業所の概要.....	10
3. 2. 発災設備の概要.....	10
4. 事故の発生状況	
4. 1. 事故に至る過程.....	11
4. 1. 1. 事故経緯.....	11
4. 1. 2. 事故発生時の運転体制.....	11
5. 事故の発生原因	
5. 1. ボイラ破損状況と水蒸気爆発について.....	12
5. 1. 1. FBHE 蒸発器管の損傷状況(破断部近傍)と爆発起点の推定..	12
5. 1. 2. 爆発原因の検討.....	13
5. 1. 3. 水蒸気爆発によるボイラ破損の過程.....	14
5. 1. 4. 水蒸気爆発によるボイラ破損の現象まとめ.....	16

5. 2. FBHE 蒸発器管破断部の状況と原因.....	17
5. 2. 1. FBHE 蒸発器管破断の状況.....	17
5. 2. 2. FBHE 蒸発器管の外側が減肉する要因.....	23
5. 2. 3. FBHE 蒸発器管破孔の状況と原因まとめ.....	24
5. 3. FBHE 蒸発器管破孔の兆候が検出出来なかった原因.....	25
5. 3. 1. FBHE 蒸発器管の点検履歴.....	25
5. 3. 2. 破孔の兆候が検出出来なかった原因まとめ.....	31
6. 再発防止対策	
6. 1. 破孔に対する再発防止策.....	32
6. 2. 破孔の兆候が検出出来なかったことに対する再発防止策.....	33
6. 3. 再発防止策まとめ.....	34
7. おわりに.....	35

1. 序

1.1. はじめに

2021年4月26日（月）21時58分頃、埼玉県日高市の太平洋セメント株式会社埼玉工場内自家発電設備において、ボイラの爆発が発生した。

本事故では、飛散物による工場外での火災、建物・車両等への破損ならびに汚損、農作地への汚損が発生した。

太平洋セメントは、本事故の原因究明と再発防止の策定を目的に、6月1日、社外委員2名、社内委員2名で構成される事故調査委員会を設置した。

当委員会は、これまでに4回の委員会を開催し、事故現場を検証し、太平洋セメント埼玉工場より提供された記録類、各種運転データや解析結果、証言等について検証を行い、原因究明と再発防止策について議論を重ねた。その結果、爆発に至る事故の原因を解明し、再発防止策の提言をまとめるに至ったので、本報告書をもって最終報告を行う。

1.2. 事故調査委員会

1.2.1. 委員会の構成

事故調査委員会は、公正な立場から事故に至った事実を明らかにし、次いで、事故原因を究明し、それに基づき、事故の再発防止対策を提言することを目的として、下記の社外有識者2名と社内の安全および生産に関わる2名で構成された。

委員長	石井一洋	横浜国立大学工学研究院	教授
委員	高嶋洋平	三菱重工パワーインダストリー株式会社	ボイラ技術・燃焼設計課長
	菅原知之	太平洋セメント株式会社	埼玉工場長
	宮崎武史	太平洋セメント株式会社	設備部長

オブザーバー

経済産業省関東東北産業保安監督部 電力安全課

1.2.2. 委員会の経緯

第1回委員会 2021年6月1日(火) 太平洋セメント(株) 埼玉工場

- ①事故調査委員会体制の決定
横浜国立大学 石井教授を委員長に選任
- ②事故概要と事故現場の確認
- ③時系列推移の確認
- ④事故発生プロセスおよび事故原因の推定
- ⑤事故原因究明へのアプローチ方法の審議
- ⑥原因究明課題の審議

第2回委員会 2021年7月16日(金) Web開催

- ①事故発生プロセスの特定
- ②事故原因の継続審議
- ③事故原因対策の方向性についての審議
- ④原因究明課題の継続審議

第3回委員会 2021年8月27日(金) Web開催

- ①事故原因の継続審議
- ②事故原因対策の方向性についての審議
- ③原因究明課題の継続審議

第4回委員会 2021年9月17日(金) 太平洋セメント(株) 本社

- ①事故原因の特定
- ②事故原因対策の特定
- ③事故原因の審議および特定
- ④再発防止策の特定

2. 事故の概要

2021年4月26日（月）21時58分頃、埼玉県日高市の太平洋セメント株式会社埼玉工場内自家発電設備において、ボイラが爆発を起こし、ボイラ本体およびその架構、付帯設備は、爆発により広範囲に亘り破損した。

また、飛散物による工場外での火災、建物・車両等への破損ならびに汚損、農作地への汚損が発生した。

2.1. 発災事業所および発災設備

1) 発災事業所

埼玉県日高市原宿 721

太平洋セメント株式会社 埼玉工場

(図1-1、図1-2参照)



工場全景 図1-1



工場概要 図1-2

2) 発災設備

工場北側に設置している自家発電設備のボイラ部分

発電出力 : 50,000 キロワット

ボイラ型式 : 循環流動層式 (以下、CFB) ボイラ

※CFB: Circulating Fluidized Bed/循環流動層

2.2. 発災日時

2021年4月26日(月) 21時58分頃

2.3. 気象状況

天候 : 晴 気温 : 6~7℃ 湿度 : 35%程度

風向 : 北北西 風速 : 1~2m/sec

<気象庁 鳩山観測所データ>

2.4. 被害状況

2.4.1. 人的被害

パチンコ店駐車場に居た方々から以下の申し出があったが、それ以外の被害の申し出は無かった。

腰痛	: 2件	
耳の不調	: 1件	
体調不良	: 1件	合計4名

2.4.2. 近隣への被害

発災施設であるボイラの北側に位置するパチンコ店周辺へのがれき飛散・降灰、および工場南側に位置する建屋・家屋・車両・畑への降灰が工場から南南東方向へ最大5kmの距離に亘って発生した。

(図2-1、図2-2参照)

1) パチンコ店

- ・店舗屋根穴あき、屋上照明設備、屋外駐輪場、監視カメラ、駐車場舗装損傷。
- ・駐車場への飛散物堆積(範囲 約 9,900m²)。
- ・上記の被害により4日間の休業。

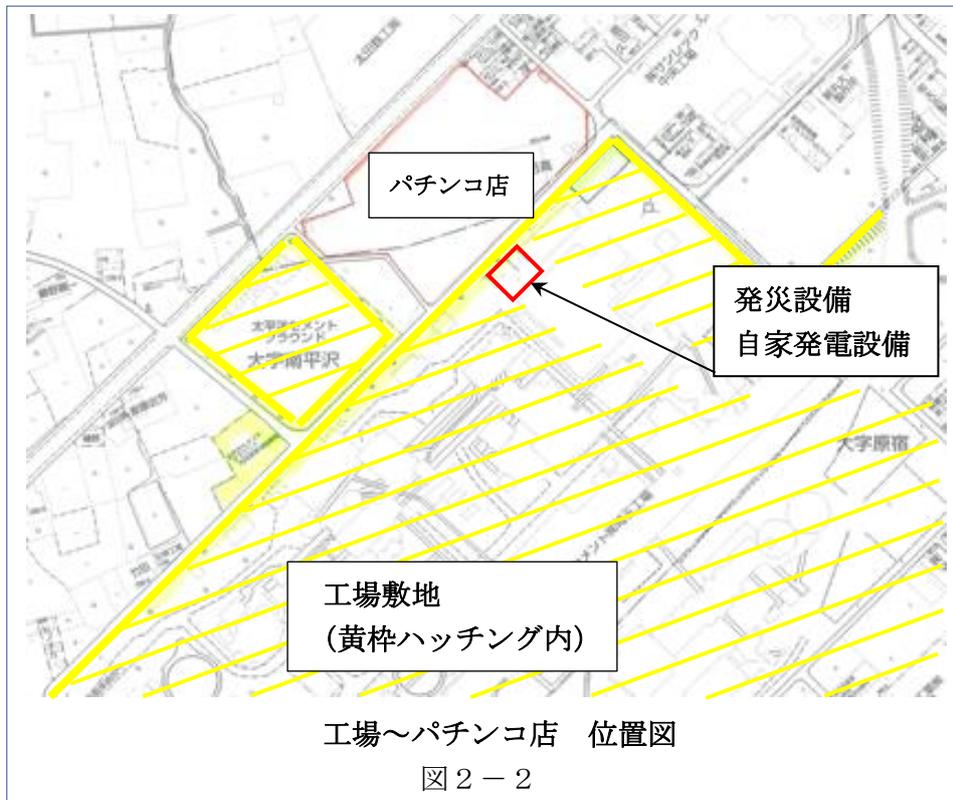
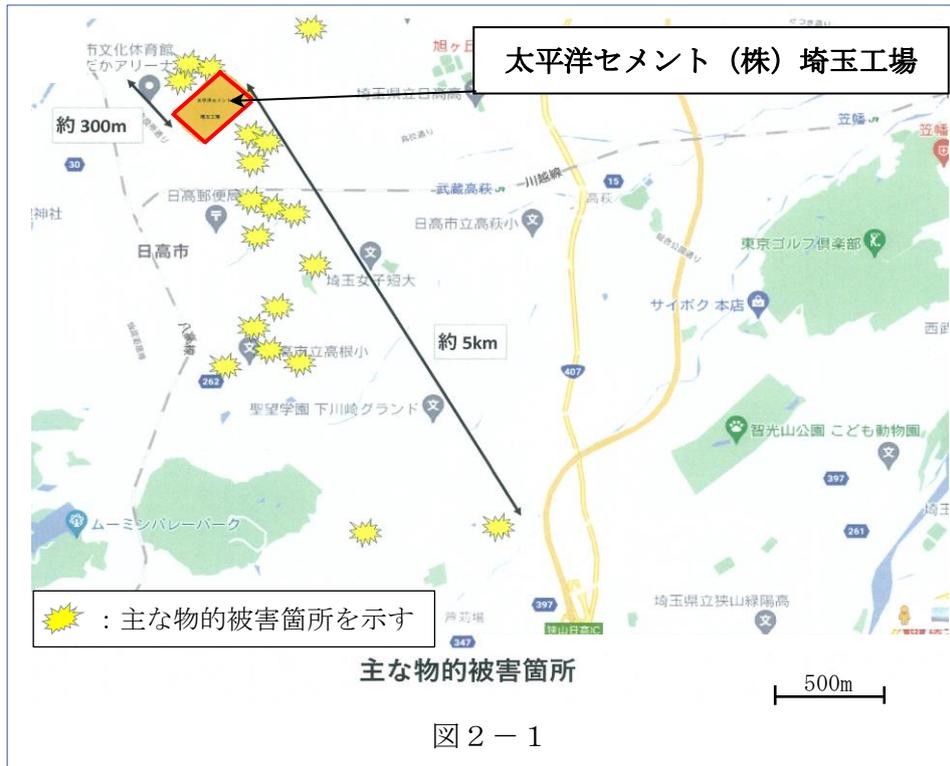
2) パチンコ店駐車中の車両 40台 (スクーター1台含む)

- ・修理不可 : 18台 (1台は爆発飛散物により車体全焼)
- ・修理対応可能 : 21台
- ・洗車対応 : 1台

3) 近隣への降灰

- ・家屋、庭および畑への降灰 : 60件
- ・パチンコ店以外の車両への降灰 : 87台

なお、事故発生後2回にわたり日高市内を対象にチラシを配布し、お詫びと事故の状況説明、ならびに被害に関する情報提供をお願いした。



2.4.3. 工場構内の設備被害

ボイラ火炉および外部熱交換器（FBHE：Fluidized Bed Heat Exchanger、以下FBHE）エア室脱落、火炉および煙道の前壁・後壁・右壁管パネル湾曲変形・ボイラ本体支柱および各階梁変形・その他各所穴あき、脱落、変形等あり。（図2-3、図2-4、図2-5参照）

1) ボイラ本体

- ・火炉および煙道の前壁・後壁・右壁管パネル湾曲変形圧壊
- ・FBHE 変形脱落

2) ボイラ架構

- ・柱および各階梁変形
- ・床の各所穴あき、脱落、変形
- ・一部階段の脱落

外観図（北側から：缶右）

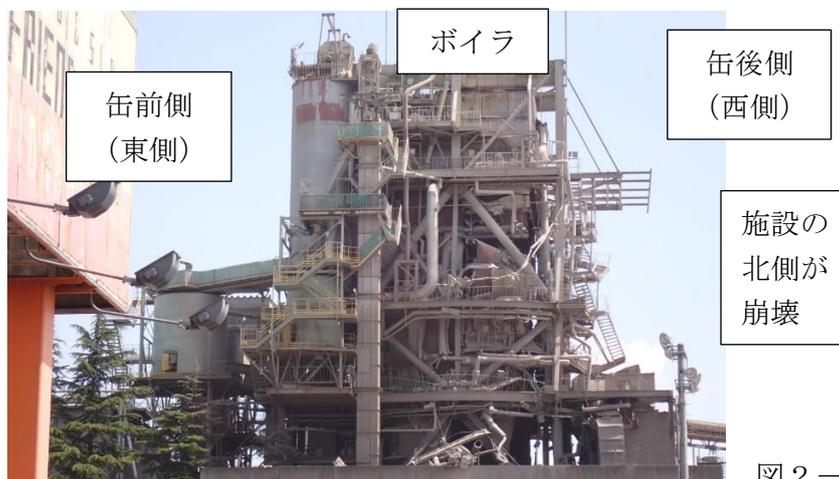


図2-3

外観図（北側近接：缶右）



図2-4

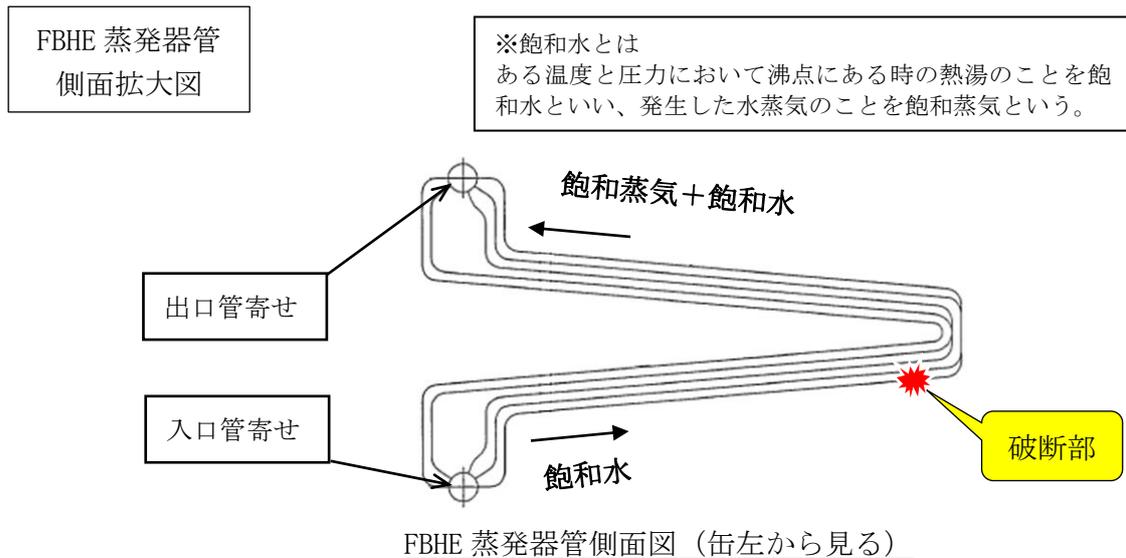
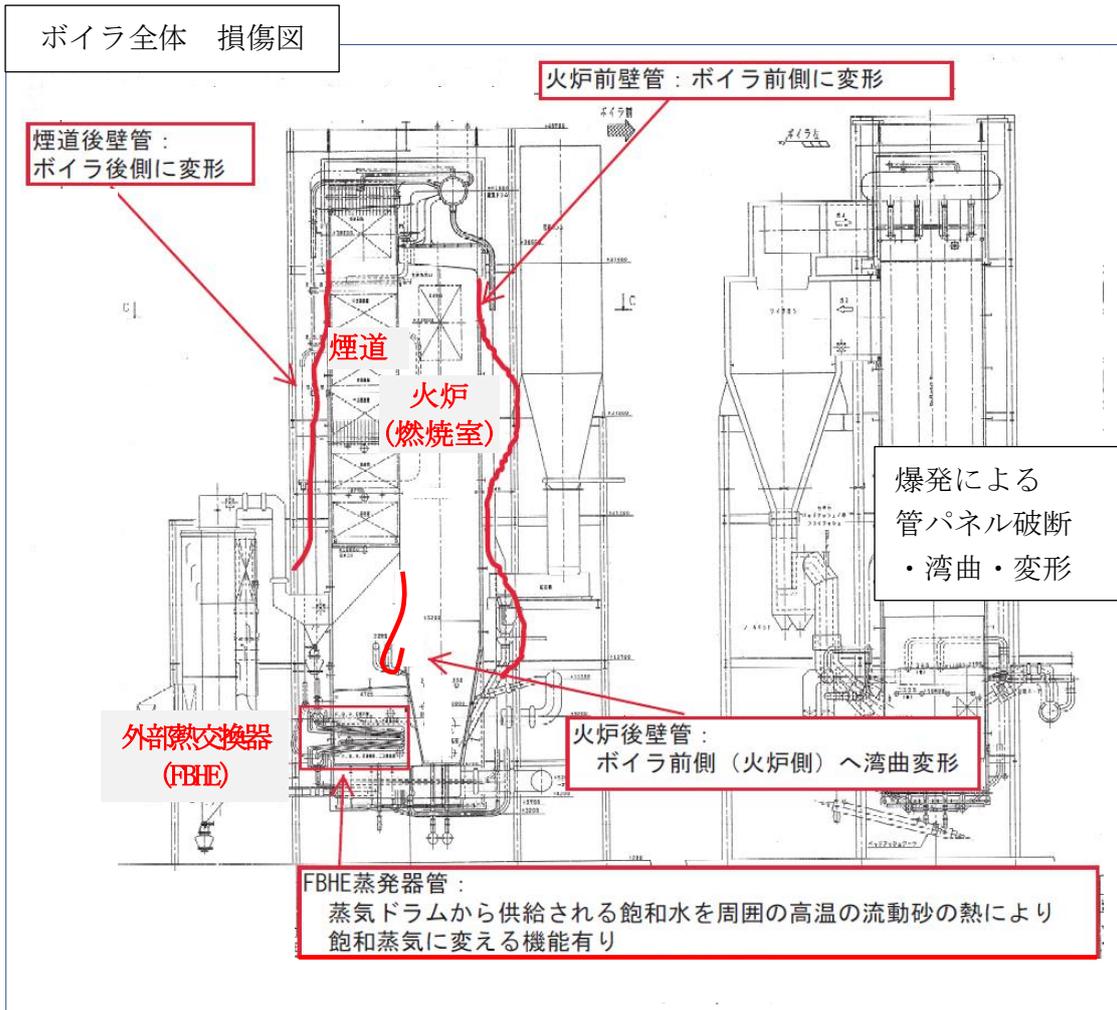


図 2 - 5

2.5. 環境への影響

飛散物にはアスベスト、セメント系物質は含まれておらず、有害物の工場構外への飛散はなかった。

1) 主な飛散物

- ・発電設備の瓦礫（金属片、保温材など）
- ・発電設備の炉材（珪砂、石灰石など）
- ・発電設備の燃料（石炭、木質チップ、RPF など）の燃え殻

※RPF : Refuse derived paper and plastics densified Fuel の略称であり、主に産業系廃棄物のうちマテリアルリサイクルが困難な古紙および廃プラスチック類を主原料とした高品位の固形燃料

3. 発災事業所および発災設備の概要

3.1. 発災事業所の概要

発災事業所である太平洋セメント株式会社埼玉工場は、埼玉県日高市の中心に位置する敷地面積約 28 万 m² の生産工場であり、リサイクル資源（下水汚泥、建設発生土、都市ゴミ、廃プラなど）の有効活用により普通セメント、早強セメント、高炉セメント、固化材の生産を行っている。

3.2. 発災設備の概要

工場北側に設置している自家発電設備のボイラ部分

発電出力 : 50,000 キロワット

ボイラ型式 : 循環流動層式（以下、CFB）ボイラ

※CFB：Circulating Fluidized Bed／循環流動層

蒸発量 : 178t/h

蒸気圧力 : 10.3MPa

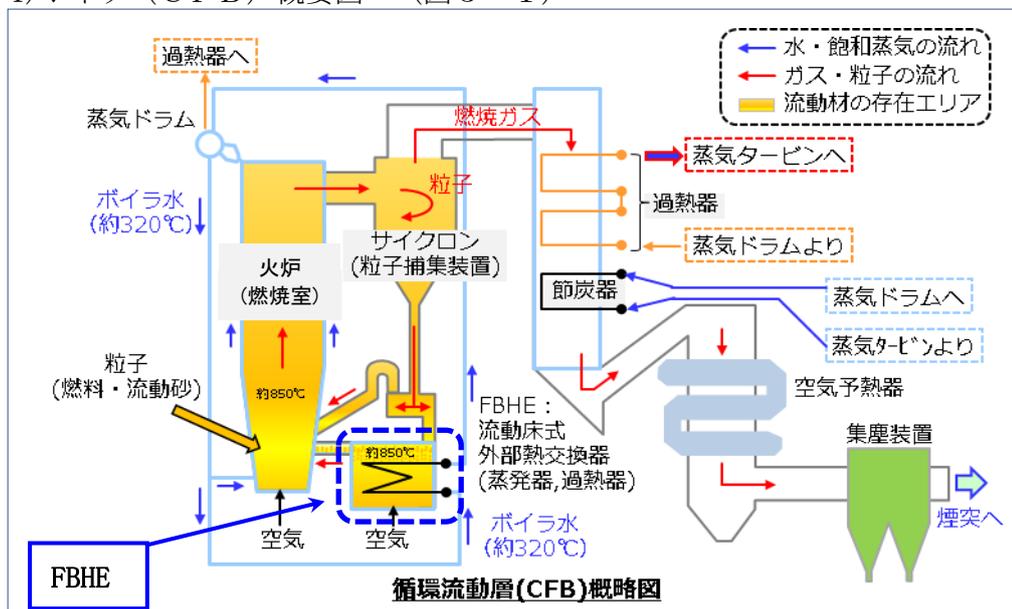
蒸気温度 : 541℃

燃料 : 石炭、木質チップ、RPF など

運転開始年月 : 1996（平成 8）年 4 月

製造メーカ : 三菱重工業株式会社 神戸造船所

1) ボイラ（CFB）概要図（図 3-1）



【FBHE の役割】

FBHE は過熱器管と蒸発器管で構成されており、高温(550～850℃)の流動砂により熱交換を行っている。

サイクロンで捕集された流動砂は、シールポットと呼ばれる分配器により火炉側と FBHE へ振り分けられ、火炉温度をコントロールしている。

FBHE 蒸発器管では、蒸気ドラムから降水した飽和水が流動砂との熱交換により、飽和蒸気まで加熱される。また、FBHE 内は下部からブロー空気により流動砂が流動化された状態になっており、熱交換後の流動砂は FBHE から火炉へオーバーフローし、ボイラ内を循環する構造となっている。

4. 事故の発生状況

4.1. 事故に至る過程

4.1.1. 事故経緯

4月26日 自家発電設備安定運転中（発電出力：50,000キロワット）。

21：58 爆発音とともに、ボイラトリップが発生。

22：00 製造係職場長より、工場関係者へ連絡
（製造課員ならびに上職へ）。

現場確認にて、ボイラ側壁および炉底が損傷していることを発見。また、爆発したボイラに接する工場北側のパチンコ店駐車場で車1台が炎上、その他の車数十台損傷（消防出動）、駐車場および周辺道路への破片物飛散を確認。

22：25 警察車両入場、現場確認。

22：30 消防車両入場、現場確認。

木質チップ輸送ベルトコンベア中間部および先端シュート付近で小火があり消火。

その他工場内での火災発生は無し。

23：15 警察による事情聴取開始。

23：50 消防による事情聴取開始。

4月27日～28日

警察および消防による現場検証実施。

4月28日

現場検証は一旦終了し、以後、断続的に調査実施。

4.1.2. 事故発生時の運転体制

運転員：当社従業員

5直3交代、4名／直（オペレータ2名、パトローラ2名）
セメント製造設備と兼務

協力会社従業員（発生当時従事者）

発電設備従事者 : 2名

セメント製造設備従事者 : 6名

都市ごみ処理設備従事者 : 2名

合計 : 14名

5. 事故の発生原因

5.1. ボイラ破損状況と水蒸気爆発について

5.1.1. FBHE 蒸発器管の損傷状況（破断部近傍）と爆発起点の推定

1) FBHE 蒸発器管の缶右から#4 パネル目最下段管、バンド部二重管付け根付近からの破断が確認された。

2) FBHE 蒸発器管は、破断した#4 パネル目を境に缶左右に変形していた。

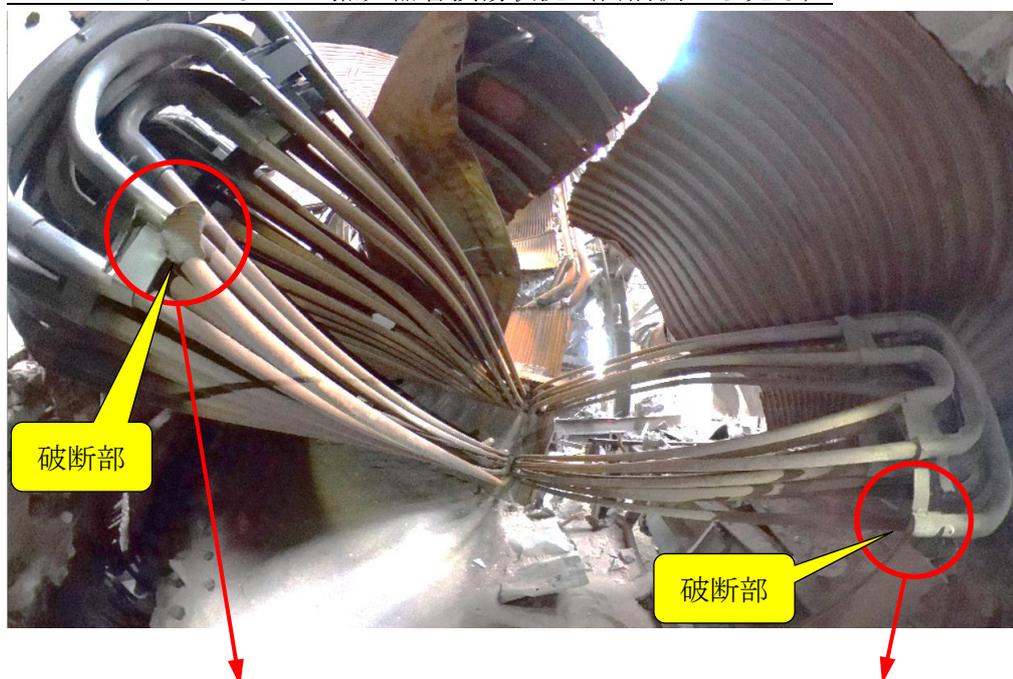
3) 管破断部を目視確認の結果、外面地側（下側）の減肉が確認された。

以上の状況から、#4 パネル目最下段管、バンド部二重管付け根付近の破断が爆発の起点と判断した。

※FBHE (Fluidized Bed Heat Exchanger:流動層式外部熱交換器)

FBHE 蒸発器管の損傷

360° カメラによる FBHE 蒸発器管損傷状況（缶前側から見る）



※技術情報に係る部分は加工しております。



※技術情報に係る部分は加工しております。

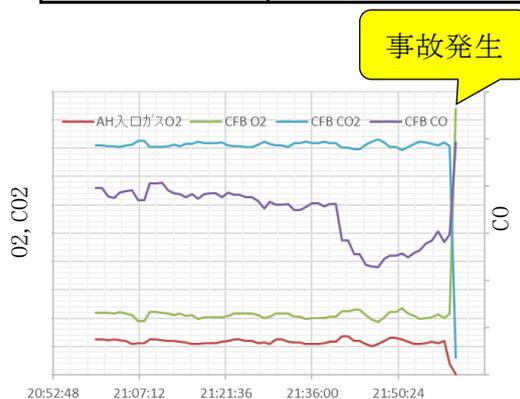
図 5-1-1

5.1.2. 爆発原因の検討

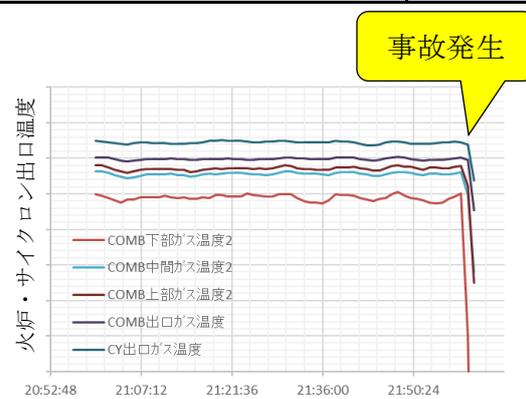
ボイラの爆発原因として、①未燃ガス爆発、②粉塵爆発、③水蒸気爆発の可能性が考えられる。

運転データおよび現地目視調査結果から、爆発原因について検討した。

爆発の可能性について	今回事象の原因となりうるか	可能性
① 未燃ガス爆発	<ul style="list-style-type: none"> ・排ガス分析値(O₂, CO)から未燃ガスの発生はない、燃焼温度も安定 ・爆発現場が煤で汚れていない (炭化水素系のガス爆発では煤が必ず残る) 	なし
② 粉塵爆発	<ul style="list-style-type: none"> ・排ガス分析値(O₂, CO) および燃焼温度から通常の燃焼状態と判断されるため -通常燃焼時以上の可燃性の粉体が存在できない(×燃料) -可燃性の粉塵が高濃度で分散できない(×分散) 	なし
③ 水蒸気爆発	<ul style="list-style-type: none"> ・FBHE 蒸発器管の破孔があるため飽和水が漏洩した可能性がある ・大量の漏水の可能性と大量かつ高温の流動砂の存在がある 	あり

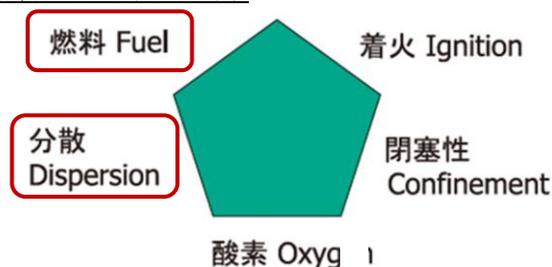


異常事態発生前の運転データ(排ガス)
事故発生までは正常に運転されていた。



異常事態発生前の運転データ(燃焼温度)

図5-1-2 粉塵爆発に必要な5要素



5.1.3. 水蒸気爆発によるボイラ破損の過程

爆発の原因はFBHE 蒸発器管破孔による水蒸気爆発と判断できるが、図5-1-3から、短時間に以下の連鎖した水蒸気爆発が発生したと推測する。

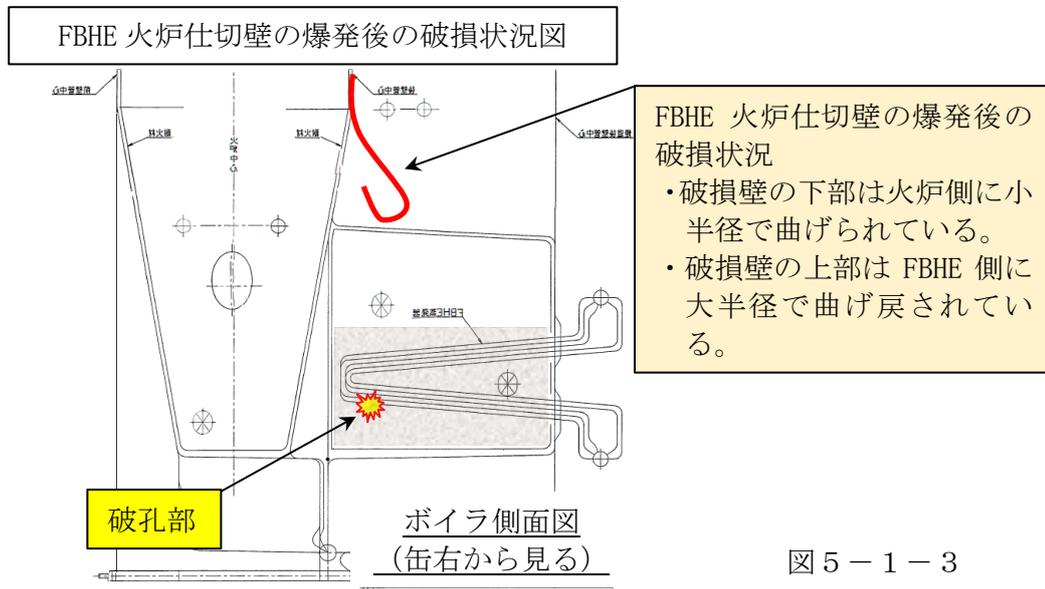


図5-1-3

- ① 減肉によるFBHE 蒸発器管の破孔
- ② FBHE 室の狭い空間で大量かつ高温の流動砂が存在する空間で大量の飽和水が漏洩
- ③ FBHE 室の損傷
漏洩した大量の飽和水が大量の流動砂からの受熱により水蒸気となりFBHE 内の圧力が急上昇し(水蒸気爆発)、以下のFBHE 損傷が発生
 - ・ 火炉/FBHE 仕切壁破断
 - ・ FBHE 右側壁上部破断 等

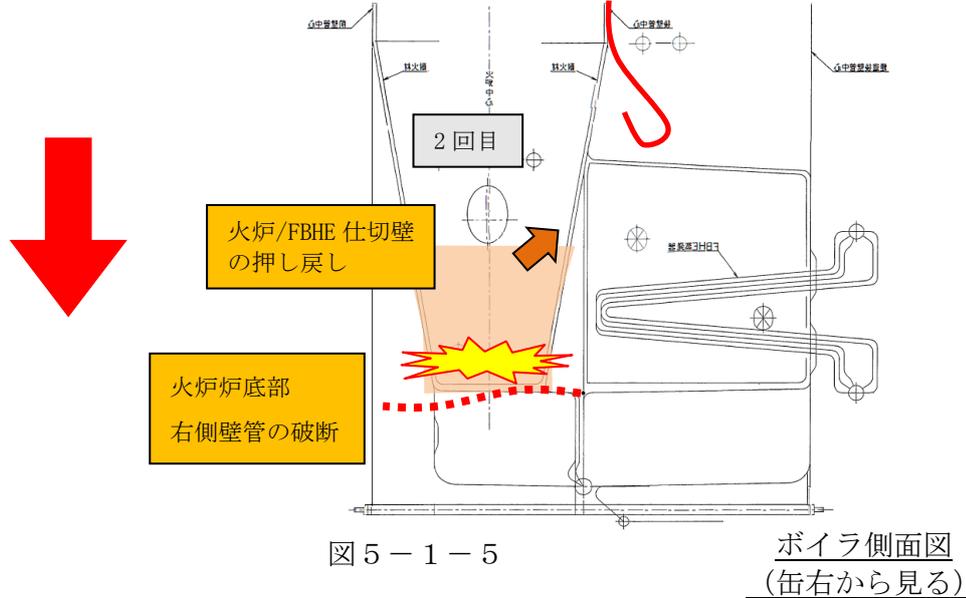


図5-1-4

⑤ 火炉の損傷

火炉側に流入した大量の飽和水が大量の流動砂からの受熱により水蒸気となり圧力が急上昇し（水蒸気爆発）、以下の事象が発生

- ・ 火炉炉底部右側壁管の破断
- ・ その他後部煙道後壁の損傷 等



⑥ 爆発音が一回しか確認されていないことから

瞬時の爆発現象となりボイラ全体の破損に至ったと考察できる。

<水蒸気圧力と機器耐圧の関係>

事象	漏洩水量 推定値	漏洩水流量 推定値	漏水→水蒸気 による最大発 生圧力推定値	構造的破壊に必要な 圧力推定値
③ FBHE の 損傷	101kg	112kg/秒	0.60MPa	0.05MPa (FBHE 右側壁破断)
⑤ 火炉の 損傷	1,421kg	1,586kg/秒	0.64MPa	0.77MPa (火炉炉底部右側 壁管破断) 0.06MPa (火炉前壁変形)

最大発生圧力推定値と、構造的破壊に必要な圧力推定値のオーダーは一致しており、5.1.3.項に示す水蒸気爆発によるボイラ破損の可能性が高いと判断した。

5.1.4. 水蒸気爆発によるボイラ破損の現象まとめ

FBHE 蒸発器管において、減肉部が通常運転時の管内圧に耐えられなくなり、#4 パネルが破孔した。破孔により大量の飽和水が FBHE 室に漏洩し大量の高温流動砂と接触したことで水蒸気となり著しく体積膨張した結果、FBHE 室内の圧力が急上昇し、#4 パネルを破断させるとともに、FBHE 缶右側壁上部及び火炉と FBHE 室の仕切壁を破断させた。

破断により更に大量の飽和水が火炉側下部の大量の高温流動砂に接触し、短時間に連鎖した水蒸気爆発が火炉側でも発生しボイラ全体の破損に至った。

5.2. FBHE 蒸発器管破断部の状況と原因

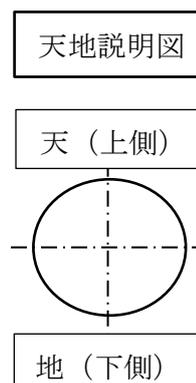
5.2.1. FBHE 蒸発器管破断の状況

1) FBHE 蒸発器管破断部の目視確認結果



図 5 - 2 - 1

- 地側に外面減肉傾向が観られた。
- 缶前側破孔部では二重管も地側に外面減肉が観られた。
- 内面は黒色を呈し、主にマグネタイトで被覆されており、内面腐食による減肉の兆候は観られなかった。



<破断部目視確認のまとめ>

- 目視点検から、地側が外面減肉傾向にあった。
- 缶前側の二重管についても地側に外面減肉が観られた。

<内面／外面の用語説明> 減肉部位と測定方向について

- ・内面減肉 : 天側測定
 ボイラ水のリン酸濃縮による内面の腐食とそのスケールの剥離時に減肉が進行する「エロージョン」「コロージョン」で蒸発器管内面の上段上面側に減肉が現れる。
- ・外面減肉 : 地側測定
 流動砂の下側からのバブリング流動によって蒸発器管外面の下段地側の「エロージョン」が進行する。

2) FBHE 蒸発器管破断部近傍の肉厚測定結果

破断部近傍（#4）の肉厚を測定した結果は以下の通り。

【肉厚測定部説明図】

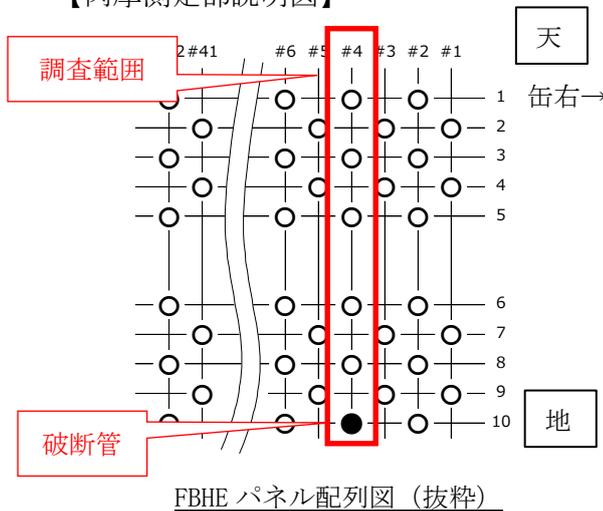
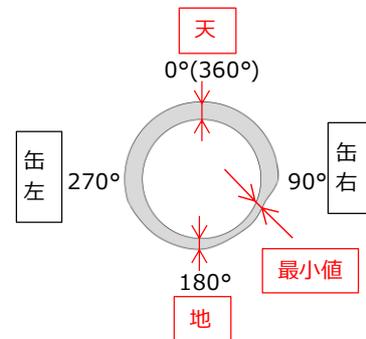


図 5 - 2 - 2



(例) 肉厚測定箇所

図 5 - 2 - 3

【Tsr とは】

Tsr : Thickness shell requirement 最低必要肉厚
 その圧力において計算上、伝熱管が強度を保つために最低必要とされる厚さで、以下計算式により求められ、元厚 5.6mm に対して破孔した管の Tsr は $t=3.88\text{mm}$ となる。

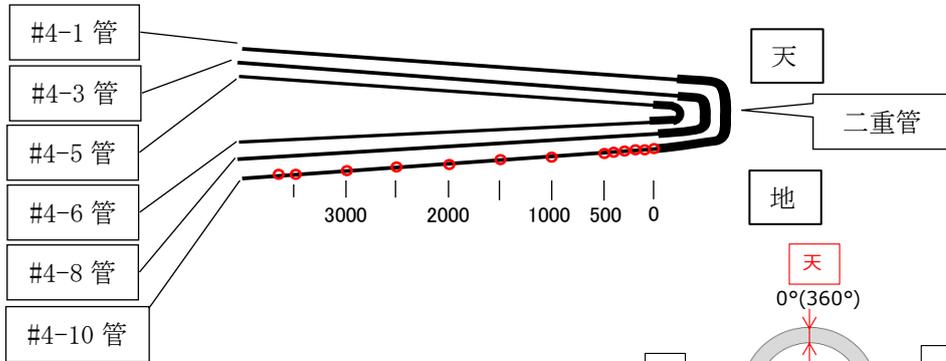
$$t = \frac{Pd}{200S+P} + 0.005d + \alpha$$

- ・ P : 圧力
- ・ d : 管の外径
- ・ S : 許容引張応力
- ・ α : 付け代

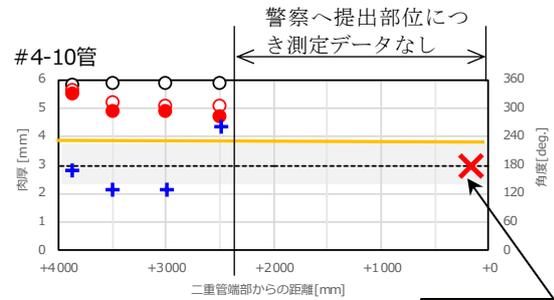
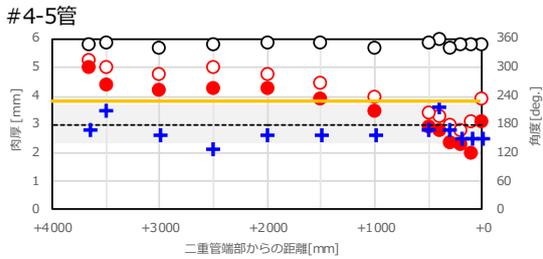
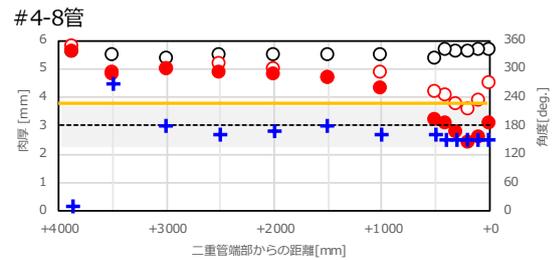
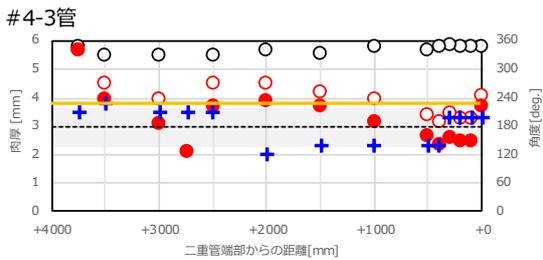
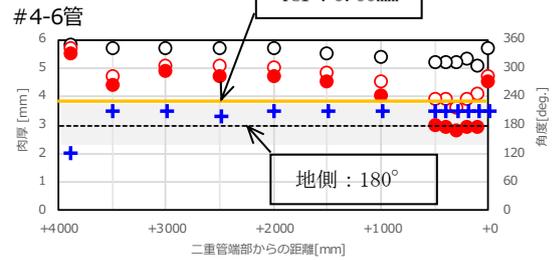
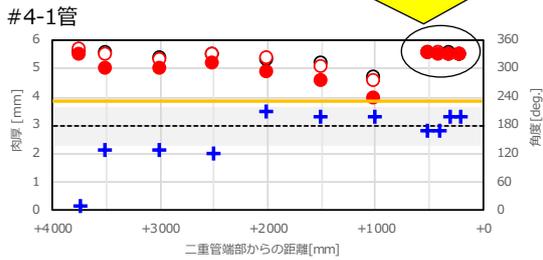
発電用火力設備の技術基準の解釈 12 条
 日本工業規格 JIS B 8201
 「陸用鋼製ボイラ構造」 「6.7.2」 より

【肉厚測定結果】

#4 パネル (缶左から見る)



内面減肉により、2019年に上段1段の缶前側短管取り換え実施。



○ 天(0°) ○ 地(180°) ● 最小値(mm) + 最小値検出方向(°)

破断部

<肉厚測定についての考察>

- ・天側については、元厚 $t=5.6\text{mm}$ (注1) に対し微少な減肉であった。
- ・地側に減肉傾向が確認され、下段の下側 9, 10 段および上段の下側 4, 5 段に多く確認された。
- ・ベンド部二重管の先端から 1,000mm 以内に集中していた。
また、 135° 、 225° (下側斜めの両 45°) 付近に多く確認された。

注1：元厚

製作時の元厚は、設計肉厚+10%程度としており、 $t=5.6\text{mm}$

3) #4 内面ファイバースコープによる確認

内面状況を把握するため、ファイバースコープで#4 パネル全管の内面観察を実施した。

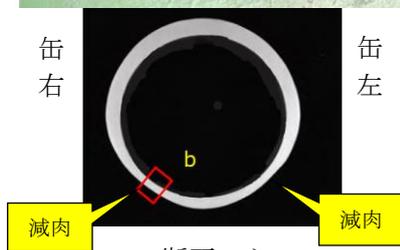
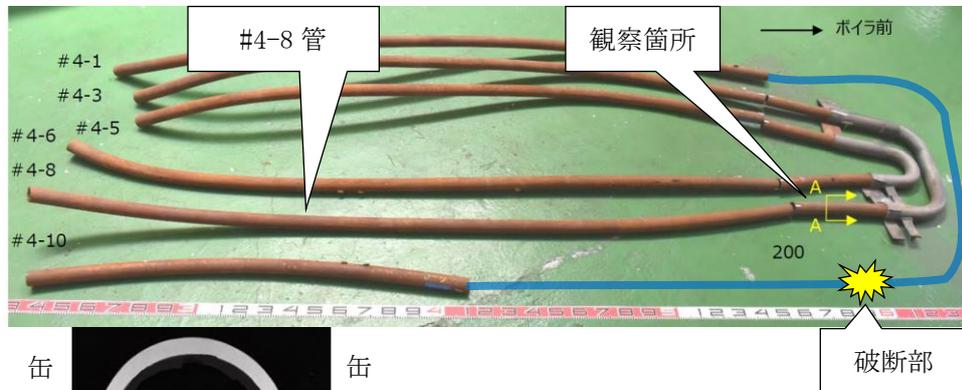
#4 パネル(缶左から見る)



<考察>#4 パネルの内面腐食は確認されなかった。

4) 外面状況—材料調査

破断部近傍の代表位置として、外面減肉が確認される#4-8 管のバンド部から200mm の箇所をサンプルとして選択し、断面マクロおよびマイクロ組織観察を実施した。

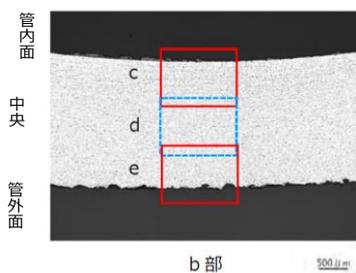


A-A 断面マクロ

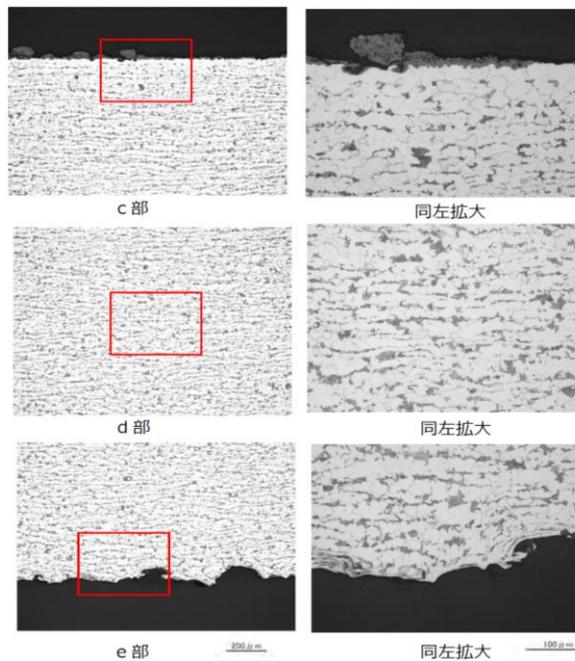
※技術情報に係る部分は加工しております。

- ・地側斜め 45° 近傍に必要最小肉厚 T_{sr} を下回る外面減肉(減肉量 3mm 以上)が確認された。

b 部組織 (c・d・e)



- ・破断部近傍位置の金属組織は健全なフェライト+パーライト組織であり、材料欠陥、クリープ損傷や亀裂等の異常は確認されなかった。



<考察>

- ・地側斜め 45° 近傍に必要最小肉厚 T_{sr} を下回る外面減肉(減肉量 3mm 以上)が確認された。
- ・破断部近傍位置の金属組織は健全なフェライト+パーライト組織であり、材料欠陥、クリープ損傷や亀裂等の異常は確認されなかった。

5) FBHE 蒸発器管外面地側の減肉分布

FBHE 室内での蒸発器管外面地側の減肉分布を下表にまとめた。

<表 5 - 2 - 1 >各パネル最下段の地側肉厚測定値を示す。

Tsr : 3.88mm以下 (単位 : mm)								缶前側隙間	
管No.	缶後側 3500~ 4000	3000	2500	2000	1500	1000	缶前側 0~500		
1							3.2	缶前側隙間 約200mm	
2							4.0		
3	4.5	4.7	4.8	5.0	4.8	3.9	2.7		
4	4.9	4.9	4.8	警察への提出部位			破孔部		
5	4.9	5.1	5.0	4.9	4.7	4.1	2.5		
6							2.8		
7	6.4	5.6		5.3		4.8	3.5		
8	5.6	5.4		5.3		4.9	3.3		
9	5.7	5.3		5.4		5.2	4.7		
10	5.4	5.1		5.1		4.8	3.6		
11	6.0	5.2		5.2		4.9	4.3		
12	5.5	5.3		5.1		4.8	3.8		
13	5.8	5.3		5.3		5.0	4.4		
14	5.4	5.3		5.1		4.7	3.9		
15	5.9	5.5		5.3		5.2	4.7		
16	5.6	5.3		5.1		4.8	4.0		
17	5.7	5.4		5.3		5.1	4.8		
18	5.5	5.3		5.2		4.9	4.3		
19	5.4	5.2		5.3		5.0	4.7		
20	メーカーへの提出部位								
21									
22									
23	5.7	5.3		5.4		5.2	4.8		
24	5.5	5.4		5.2		4.9	4.4		
25	5.8	5.4		5.4		5.1	4.9		
26	5.4	5.3		5.2		4.9	4.4		
27	5.8	5.3		5.3		5.3	4.9		
28	5.4	5.0		5.0		4.7	4.2		
29	5.8	5.4		5.5		5.2	5.0		
30	5.5	5.4		5.4		5.1	4.4		
31	5.5	5.5		5.5		5.3	4.7		
32	5.4	5.5		5.2		5.1	4.4		
33	5.7	5.6		5.3		5.3	4.7		
34	5.5	5.5		5.3		4.8	4.4		
35	5.8	5.5		5.7		4.9	4.5		
36	5.4	5.4		5.3		4.1	4.2		
37	5.3	5.4		5.4		4.9	4.9		



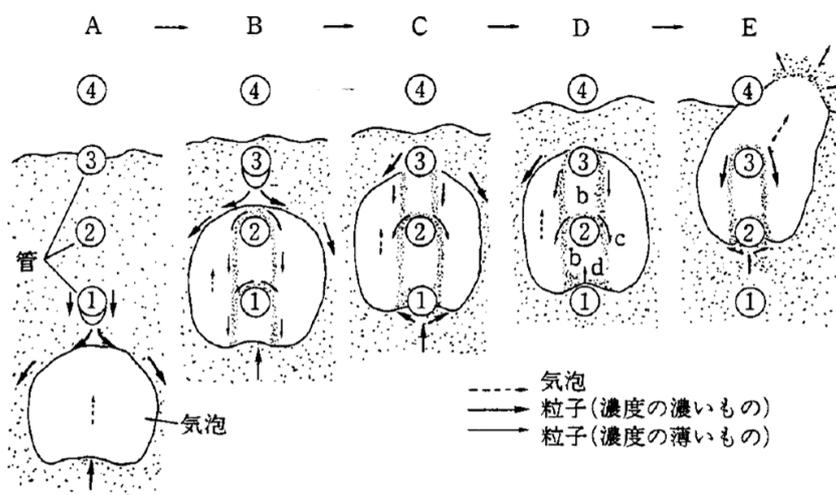
<考察>

- ・表の着色部は、Tsr : 3.88mm 以下を表す。その分布は、FBHE 出口開口部の缶右側付近に集中している。

5.2.2. FBHE 蒸発器管外面地側が減肉する要因

1) 流動砂による FBHE 蒸発器管の外面減肉メカニズム

蒸発器管は常に流動する砂（粒子）に接触し熱交換を行っており、図5-2-4の工程BCにおいてバブリングが上昇する過程で、工程Cにおいて、管①の下面に気泡が当たって横に分かれる際、砂粒子を巻き込み管に当たることで管の下半面の両45°付近を減肉させると考えられる。



< 社団法人 日本粉体工業技術協会 流動層ハンドブック 抜粋 >

図5-2-4

【流動砂について】

ボイラ起動時は、珪砂を初期投入しており、粒子径は $300\sim 600\mu\text{m}$ である。通常運転時において、流動砂は珪砂から燃料の燃え殻（アッシュ）に入れ替わり、その粒子径は $150\sim 300\mu\text{m}$ である。

5.2.3. FBHE 蒸発器管破孔の状況と原因まとめ

破孔部の状況と原因を下表にまとめる。

<表 5-2-2>

破孔部の状況まとめ	原因
<ol style="list-style-type: none"> 1) #1～12 管は地側に外面減肉が確認された。 2) #4 管の隣接管（#3～5,6）が地側の外面減肉量が大きい。 3) 地側の減肉は下段の下側 9,10 段および上段の下側 4,5 段に多く確認された。 4) 外面減肉は管の地側 135°、225°（下側斜め 45°）付近に多く確認された。 5) #1～12 管の地側減肉は二重管から 0～500mm（缶前側）の範囲に集中している。 6) 二重管についても外面減肉が観られた。特に二重管の上部バンド内側の減肉が著しい。 7) #13～37 管の外面減肉は、若干缶前側が減肉傾向を示すが、著しい減肉は確認されない。 8) 内面腐食減肉を示す天側の肉厚について、減肉傾向は無かった。 9) #4 管の内面腐食は確認されない。 10) 破孔部近傍の金属組織に異常は確認されなかった。 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 運転開始後 25 年間経過し、流動砂による外部減肉が経年的に進行した。

5.3. FBHE 蒸発器管破孔の兆候が検出出来なかった原因

今回の事故において「破孔の兆候を検出出来なかった」原因について、以下に検討を行う。

5.3.1. FBHE 蒸発器管の点検履歴

【断面部位測定箇所説明図】

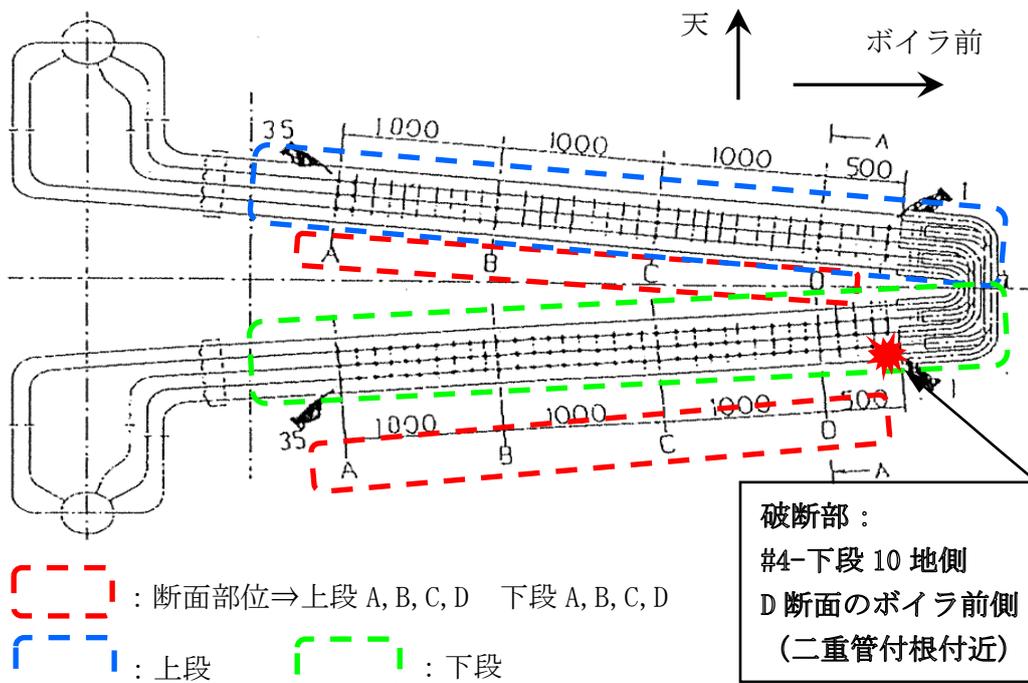


図 5-3-1

【管（パネル配列説明図）】

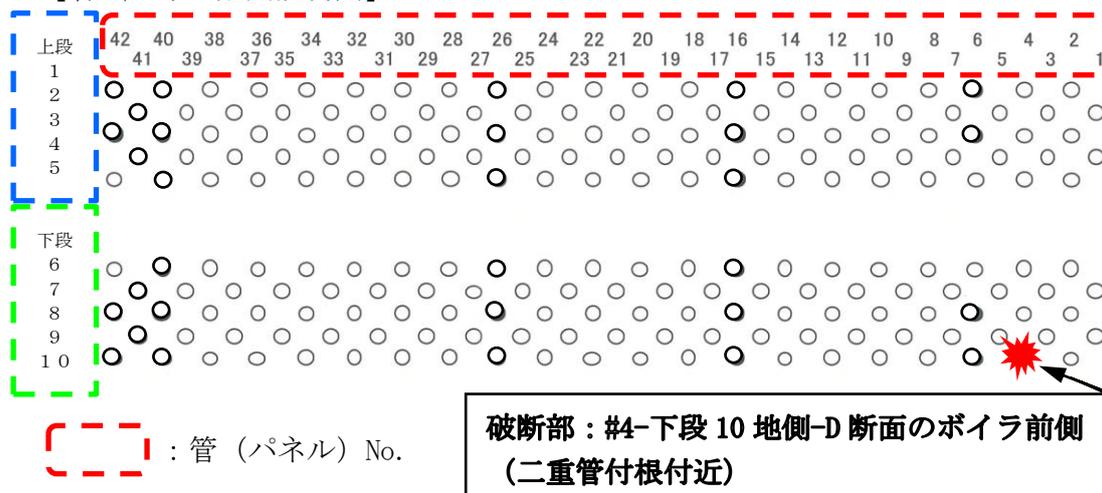


図 5-3-2

1) 点検の実施状況

(1) 法定点検

法定点検（ボイラ定期事業者検査）については、電気事業法に基づきFBHE 蒸発器管の内面腐食による減肉測定と外面減肉点検を2年毎に実施しており、検査内容については適合している。

(2) FBHE 蒸発器管の点検について

- ・ 内面腐食による減肉を確認するための天側からの肉厚測定と外面減肉を確認するための地側点検を毎年の定期点検時実施している。
- ・ 天側からの肉厚測定は毎年実施され、ボイラ管の切替など適切にメンテナンスを行っている。

2) 点検履歴

減肉に係る、点検の履歴を以下に示す。

<表 5 - 3 - 1 > 埼玉工場 点検履歴 (Tsr : 3.88mm)

年月	対象	記事および点検方法	肉厚測定			備考
			代表管	部位	方向	
1996年4月		運用開始				
1997年6月	外面	初回点検 肉厚測定 目視点検	#21, 22, 35 #36, 41, 42	上-1-5-D 下-6-10-B	地	
	内面	初回点検 肉厚測定	#1~42 (全管)	上-1-5-D 下-6-10-B	天	内面減肉の情報に基づく追加点検実施
1998年6月	外面	肉厚測定 目視点検	#21, 22, 35 #36, 41, 42	上-1-5-D 下-6-10-B	地	目視点検で外面変色を発見し、#1~42- 上下 A, B, C, D-天地側を全管追加測定
			追加測定： #1~42	上-1-5-D 下-6-10-D	地	
	内面	肉厚測定	#1~42 (全管)	上-1-5-D 下-6-10-D	天	
1999年6月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#21, 22, 35 36, 41, 42	上-1-5-D 下-6-10-B	天	

年月	対象	記事および点検方法	肉厚測定			備考
			代表管	部位	方向	
2000年5月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#21, 22, 35 36, 41, 42	上-1-5-D 下-6-10-B	天	
2001年5月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#21, 22, 23~42	上-1-5-D 下-6-10-B	天	内面減肉が認められ天側プロテクタを56カ所に試行
2002年6月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#1, 2, 21, 22 35, 36, 41, 42	上-1-5-D 下-6-10-B	天	肉厚4.5mm以下の6本を部分更新
2003年7月	外面	肉厚測定 目視点検	#1, 2, 11, 12, 21, 22, 31, 32, 41, 42	上-1, 2-全	地	地側測定、最小値は#42の4.8mm異常無し
	内面	肉厚測定	#2~40	上-1-全	天	
2004年6月	外面	肉厚測定 目視点検	#1, 2, 11, 12, 21, 22, 31, 32, 41, 42	上-1, 2-全	地	地側測定、最小値は#42の5.0mm異常無し
	内面	肉厚測定	#20, 22, 24 34~36 38~42	上-1, 2-全	天	
2005年1月	外面	肉厚測定 目視点検	#1, 2, 3, 4, #5, 10, 11, #20, 21, 30 #31, 40, 41	上-1, 2- A, C 下-9, 10- A, C	地	他社外面減肉情報により地側測定 最小値は#4管-下段 9段-A断面で5.2mm 異常無し

年月	対象	記事および点検方法	肉厚測定			備考
			代表管	部位	方向	
2005年6月	外面	肉厚測定 目視点検	#1, 2, 11, 12, 21, 22, 31, 32, 41, 42	上-4, 5-全	地	地側測定、最小値は 4.8mm 異常無し
	内面	肉厚測定	#18~25, 27, 30, 34~42	上-1-4-D 下-6-B	天	肉厚 4.5mm 以下の2 本を部分更新
2005年12月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して 異常無き事を確認
2006年6月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して 異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#18~34, 36, 38~42	上-1-3-D 下-6, 7-B	天	肉厚 3.9mm 以下の8 本を経過観察
2006年12月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して 異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#18~34, 36, 38~42	上-1-3-D 下-6, 7-B	天	1年後予測で肉厚 4.0mm 以下となる4 本を部分更新
2007年6月	外面	肉厚測定 目視点検	#18, 20, 22 <u>#36, 38, 40</u>	下-10- C	地	目視点検で管外面減 肉を発見し測定、最 小値 5.3mm 異常無し
	内面	肉厚測定	#19~23, 25~28, 30, 32~34, 38, 42	上-1.2-D	天	最小 4.1mm 1年後予測で肉厚 4.0mm 以下となる9 本を経過観察
2008年6月	外面	2007年 <u>追跡調査</u>	#18, 20, 22 <u>#36, 38, 40</u>	下-10- C	地	<u>最小値 5.3mm で減肉 進行無し</u> <u>減肉進行が無いこと から、以降、目視点 検に変更を決定（検 査会社推奨）</u>
	内面	肉厚測定	#18~42	上-1, 2-D 下-6, 7-B	天	最小 4.0mm

年月	対象	記事および点検方法	肉厚測定			備考
			代表管	部位	方向	
2009年6月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#18~42	上-1, 2-D 下-6, 7-B	天	最小 3.9mm
2010年6月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#18~42	上-1-3-D 下-6, 7-B	天	肉厚 4.4mm 以下の9本を部分更新
2011年6月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#18~38	上-1, 2-D	天	1年後予測で肉厚 3.9mm 以下となる2本を部分更新
2012年6月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#18~42	上-1-3-D	天	1年後予測で肉厚 3.9mm 以下となる3本を部分更新
2013年5月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#18~40	上-1-3-D 下-6, 7-B	天	1年後予測で肉厚 3.9mm 以下となる3本を部分更新
2014年6月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#10~41	上-1-3-D 下-6, 7-B	天	Tsr を下回った8本を部分更新
2015年6月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#10, 13, 15 17, 21, 28	上-1-3-D	天	

年月	対象	記事および点検方法	肉厚測定			備考
			代表管	部位	方向	
2016年6月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#10~41	上-1-3-D 下-6, 7-B	天	
2017年6月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#10~37	上-1-4-D	天	Tsrを下回った3本を部分更新
2018年7月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#10~37	上-1-4-D	天	Tsrを下回った1本を部分更新
2019年6月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#10~37	上-1-4-D	天	Tsrを下回った8本を部分更新
2020年7月	外面	目視点検			地	目視点検を実施して異常無き事を確認
	内面	肉厚測定	#10~40	上-1-3-D	天	1年後予測でTsr以下となる2本を部分更新
2021年4月	管破孔事故発生					

2007年、目視点検により外面減肉が発見され地側から外面減肉を対象とした測定を実施したが、5.3mmで元厚からの減肉は微小であった。

翌2008年に追跡測定を行ったが2007年の肉厚と同数値の5.3mmであった。減肉傾向が確認されなかったことより、以降は目視点検とした。

2009年6月から2020年5月は全管の地側目視点検を実施し、異常が無いことを確認した。

5.3.2. 破孔の兆候が検出出来なかった原因まとめ

FBHE の点検結果から以下に原因をまとめた。

<表5-3-2>

破孔関連の点検内容のまとめ	破孔の兆候を検出出来なかった原因
<p>1) 2005 年 1 月にメーカー経由の他社情報(外面減肉)により上下段の地側肉厚測定実施。メーカーより経過測定推奨。</p> <p>2) 2005 年 6 月に上段地側の地側肉厚測定実施。2005 年 1 月比較で減肉進行無し。</p> <p>3) 2007 年に#20, 36, 38 パネル、10 段地側にエロージョン模様が認められたが、CFB 運開後 11 年間で 0.3mm と軽微な減肉であり、今後も目視点検で可とした。(検査会社推奨)</p> <p>4) 2008 年に 2007 年と同部位を測定するものの減肉の進行は無いことから今後も目視点検で可とした。(検査会社推奨)</p> <p>以降、2009～2020 年の間、毎年 6 月の定期点検時、全管の地側目視点検を実施し、異常が無いことを確認していた。</p>	<p>1) 目視点検で異常を検知出来なかった。</p> <p>(1) 2007, 2008 年肉厚測定部位は今回破孔が発生した近傍でなく高温側(流動砂入口側)であったため、表 5-2-1 の減肉を検知出来なかった。</p> <p>(2) 2007, 2008 年肉厚測定で経年減肉が微小であった。そのため、ほとんど外面減肉は無く、目視点検で減肉状況が判断可能とした。</p> <p>(3) FBHE 内における地側からの点検では、破孔および減肉が発生した 135° および 225° の角度近傍は見えにくかった。</p> <p>(4) 目視点検基準が無かった。</p> <p>(5) BT 担当者(注 1)だけによる目視点検箇所となっていた。</p> <p>(6) 地側減肉に関しては、検査会社でも目視点検を推奨していた。</p>
	<p>2) 社内での情報共有不足</p> <p>(1) 発電担当者会議(注 2)にて、ボイラ全般の点検強化を通達していたが、実施有無の確認がされていなかった。</p>
	<p>3) メーカーとの情報共有不足</p> <p>(1) メーカーとの情報共有が不足していた。</p>

注 1 : BT 担当者 : ボイラ・タービン担当者

注 2 : 太平洋セメント本社が主催する 8 工場+3 発電事業場による会議(毎年開催)

6. 再発防止対策

前項に整理した事故の原因に対して、表にまとめるとともに以下の再発防止対策を提言する。

6.1. 破孔に対する再発防止策

<表 6-1-1 >

破孔に対する再発防止策まとめ	
破孔の原因	再発防止策
1) 運転開始後 25 年間経過し、流動砂による外部減肉が経年的に進行した。	1) 減肉部の対応として、管の部分更新または、地側プロテクタを施工する。

6.2. 破孔の兆候が検出出来なかったことに対する再発防止策

<表 6-2-1>

破孔の兆候を検出出来なかった再発防止策まとめ	
破孔の兆候を検出出来なかった原因	再発防止策
<p>1) 目視点検で異常を検知出来なかった。</p> <p>(1)2007, 2008 年肉厚測定部位は今回破孔が発生した近傍でなく高温側(流動砂入口側)であったため、表 5-2-1 の減肉を検知出来なかった。</p> <p>(2)2007, 2008 年肉厚測定で経年減肉が微小であった。そのため、ほとんど外部減肉はなく、目視点検で減肉状況が判断可能とした。</p> <p>(3)FBHE 内における地側からの点検では、破孔および減肉が発生した 135° および 225° の角度近傍は見えにくかった。</p> <p>(4)目視点検基準がなかった。</p> <p>(5)BT 担当者だけによる目視点検箇所となっていた。</p> <p>(6)地側減肉に関しては、検査会社でも目視点検を推奨していた。</p>	<p>1) 点検方法と体制</p> <p>(1)目視点検ではなく、全管の定期的な地側からの肉厚測定を行う。</p> <p>肉厚測定を行うにあたり、測定位置、測定角度を点検基準で明確化する。</p> <p>(2)BT 担当者の他に実務担当を加えた 2 名体制とする。</p> <p>また、工場長以下、職制にて定期点検の確認、問題点の共有化を行う。</p>
<p>2) 社内での情報共有不足</p> <p>(1)発電担当者会議にて、ボイラ全般の点検強化を通達していたが、実施有無の確認がされていなかった。</p>	<p>2) 社内の情報共有と体制</p> <p>(1)BT 担当だけでなく、工場機械、電気課長にもボイラ・タービンに関する定期的な教育受講を行う。当該事例の内容も追加する。</p> <p>(2)発電担当者会議での指示事項は、進捗状況をチェックできるシステムとし工場設備部長まで確認できる体制とする。</p>
<p>3) メーカーとの情報共有不足</p> <p>(1)メーカーとの情報共有が不足していた。</p>	<p>3) メーカーとの情報共有</p> <p>(1)本社、工場含めてメーカーとの定期的な情報共有化が出来る体制作りを行う。</p>

6.3. 再発防止策まとめ

前項の表 6-1-1、表 6-2-1 に整理した再発防止策を以下の通り提言する。

1) 破孔に対する再発防止策

(1) 減肉部への対応として、管の部分更新または、地側プロテクタを施工する。

2) 破孔の兆候検知に対する再発防止策

(1) 点検方法と体制

①日常点検、定期基準書の見直し

目視点検ではなく、全管の定期的な地側からの肉厚測定を行う。肉厚測定を行うにあたり、測定位置、測定角度を点検基準で明確化する。

②BT 担当者の複数体制化

BT 担当者の他に実務担当を加えた 2 名体制とする。
また、工場長以下、職制にてメーカー設計者点検含めた定期点検の確認、問題点の共有化を行う。

(2) 社内の情報共有と体制

③社内教育の推進

BT 担当だけでなく、工場機械、電気課長にもボイラ・タービンに関する定期的な教育受講を行う。

当該事例を元に、流動砂による FBHE の地側減肉の特徴を教育内容に追加する。

④発電担当者会議の活用

発電担当者会議での指示事項は、進捗状況をチェックできるシステムとし工場設備部長まで確認できる体制とする。

(3) メーカーとの情報共有

⑤メーカーとの情報共有

本社、工場含めてメーカーとの定期的な情報共有化が出来る体制作りを行う。

7. おわりに

事故調査委員会 委員長総括提言

今回の太平洋セメント株式会社埼玉工場の爆発事故は、自家発電設備のボイラ内に設置された外部熱交換器（FBHE）蒸発器管において、定量的な減肉測定が実施されなかったため、FBHE 蒸発器管の外面に流動している高温の流動砂による外面からの減肉が進行し、運転中の管内圧に耐えられなくなり蒸発器管に破孔が生じたことが原因である。これにより破孔した箇所から大量の飽和水が漏洩し、蒸発器管外部の大量の高温流動砂に接触・気化したことで急激な体積膨張が生じて、水蒸気爆発に至ったものである。

この爆発により周辺地域に大きな物的被害を発生させた。また近隣住民に多大な不安と影響を及ぼした事故であった。

本事故調査委員会での調査により、爆発事故の発生メカニズムが解明され、FBHE 蒸発器管破孔の兆候が検出出来なかった原因も明らかとなった。太平洋セメント株式会社により立案された当該事故の再発防止策は、妥当なものであり、今後、これを確実に遂行することにより、安全で安定した工場を再構築するよう願う次第である。

また、本事故調査報告書が火力発電分野における類似構造設備の事故防止のために活用され、火力発電ボイラの安全・安心な操業に向けて、多少なりとも貢献できれば幸いである。

本事故調査を進めるにあたり、貴重なご意見をいただいた事故調査委員会の方々、精力的な調査を実施いただいた関係者の方々、爆発に至る過程および原因調査にて支援をいただいた方々に心から御礼申し上げます。

最後に、本事故調査ならびに事故調査報告書のまとめに際し、大所高所からご指導いただいた、警察ならびに経済産業省関東東北産業保安監督部の方々に厚く御礼申し上げます。

2021年11月5日

太平洋セメント株式会社 事故調査委員会
委員長 石井一洋