

自家発電設備 爆発事故について

いわき大王製紙株式会社

1. 事故の概要、被害状況等

2022年(令和4年)9月6日、6時49分頃に発電設備のボイラーが通常運転中に爆発し、発電設備が緊急停止した。(この直前に給水量-蒸発量の偏差が拡大する様な、漏洩を検知できる事象は確認されなかった)

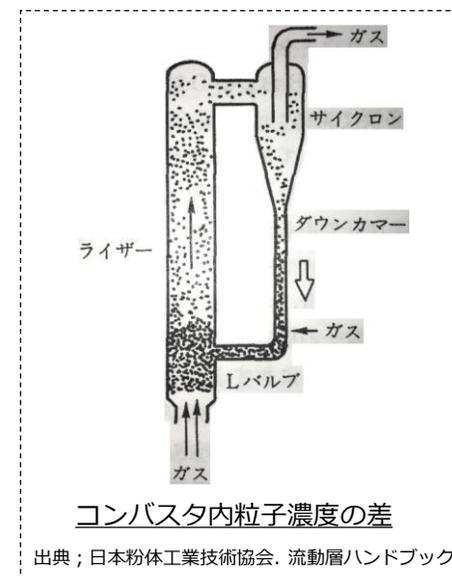
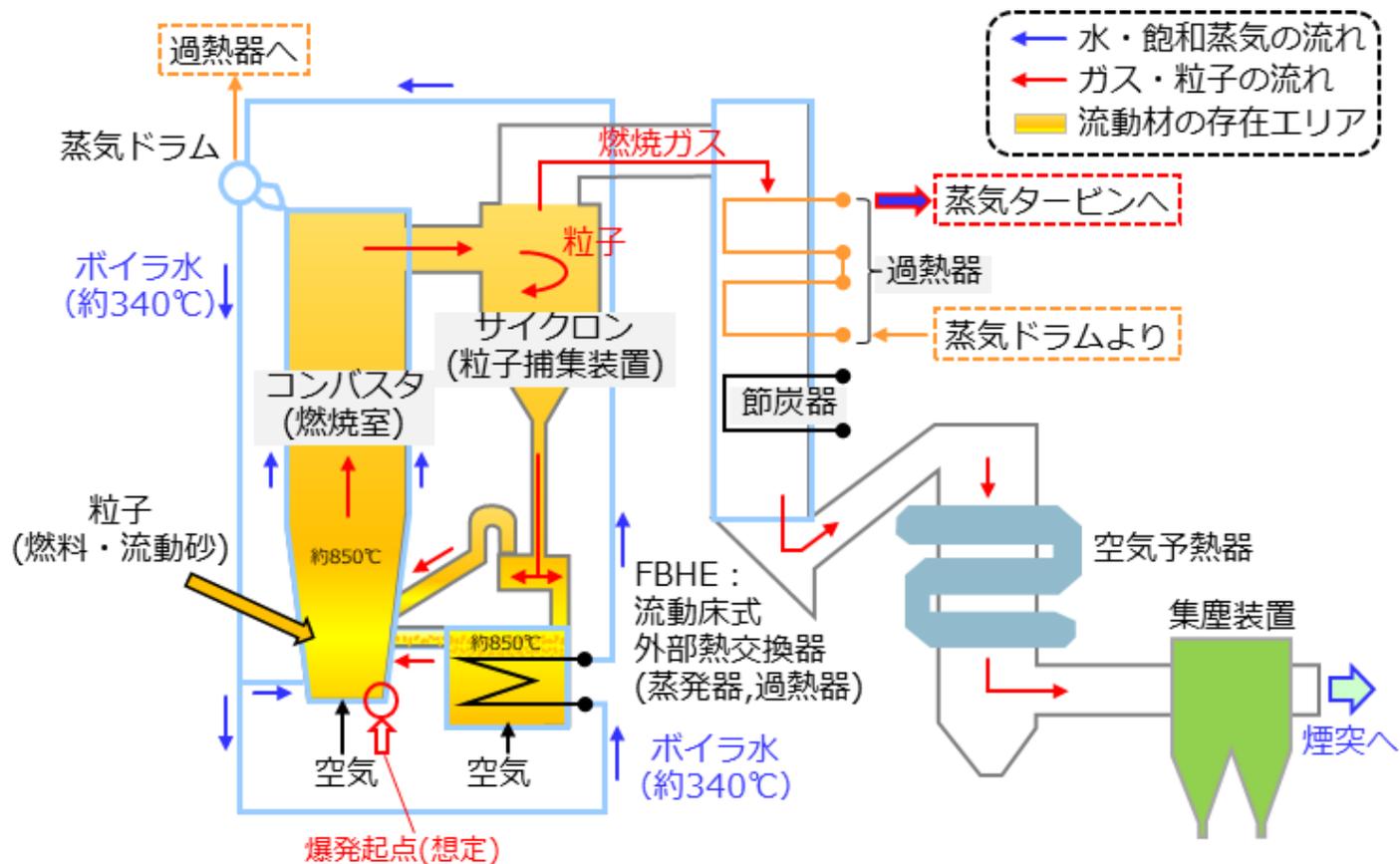
○被害状況

- 人的被害：当該設備周辺で作業をしていた協力会社の作業員 1 名が火傷を負う。
- 近隣被害：砂、灰、耐火材等の一部が工場の北側の市道に飛散
(人、車の通行は無し)。
- 設備被害：ボイラーの火炉(コンバスタ)、ボイラーに付属する熱交換室の全損、他設備等も一部損傷・変形。

○発電設備概要

- 発電出力：33,333kW
- ボイラー型式：循環流動層式(CFB)
- 仕様：蒸発量170t/h、蒸気圧力15.8MPa、蒸気温度548℃(設計最大)
- 燃料：木質チップ、RPF、タイヤチップ、構内廃棄物
- 運転開始年月：2008年(平成20年)10月
- 総運転時間：107,758 hr
- 総発停回数：68回
- 製造業者：三菱重工業(株) (現在 三菱重工パワーインダストリー(株))

<ボイラ概略図>



出典 ; 三菱重工パワーインダストリー様 資料

【循環流動層 (CFB : Circulating Fluidized Bed) ボイラの特徴】

- ・ 燃焼性/熱交換の効率を良くするため、粒子 (主に流動砂) を熱交換媒体として使用。
- ・ その粒子をサイクロン(補集装置)で分離・捕集し、再度コンバスタへ循環させる構造を有している。
(粒子濃度は右図の通り、コンバスタ下部が濃く、上部では比較的薄いという特徴あり)
- ・ 粒子濃度が濃い下部に燃料入れ、燃焼性を確保している。

2. 事故調査委員会の実績と構成

2-1 開催実績

事故発生後に事故調査委員会を発足し、事故の原因究明と再発防止対策について議論を行った。
これまでに6回の委員会を開催した結果、複数の推定原因と推定原因に対する対策をまとめるに至った。

		2022年 9月	10月	11月	12月	2023年 1月	2月	3月	4月	5月	6月
		★ 9/6 事故発生	○ 11/1 第1回 事故調査委員会	○ 11/29 自然災害 WG	○ 12/2 第2回	○ 1/16 第3回	○ 2/15 第4回	○ 3/13 第5回		○ 5/11 第6回	○ 6/5 自然災害WG
現場調査	当局	10/19~10/21 第1回 現場検証	○ 10/27 第2回	○ 11/30 第3回	○ 12/26, 27 第4回	○ 1/11 第5回	○ 1/27 押収 (現場捜査完了)				
	いわき 大王 & MPW -IDS	○ 9/6~9/7 初回調査	○ 県警に同行	現場調査 ※適宜 (第一破口部探索)			○ 1/27 サンプル管搬送 (類似箇所)				
所内調査 MPW-IDS			○ 10/28 3D計測	○ 11/18 3Dデータ 整理	○ 3Dデータ 解析 (変形モデル推定)	○ 1/18 原因推定 (机上検討 ベース)	○ 1/30 サンプル管 受領	○ 3/6 サンプル管 分析完了 (破口原因推定)	○ サンプル管 追加分析完了 4/26 : MPW-IDS 4/26 : いわき大王		
水平展開	いわき 大王	○ 事故後 大王製紙グループ内へ情報共有 (同機種ボイラは無)									
	MPW-IDS	○ 事故後随時 同機種他社へ 口頭でのご説明		○ 11/24 インシデントレポートの発行						○ インシデントレポートの発行	○ 同機種他社への納入品に 関する水平展開のご説明

2. 事故調査委員会の実績と構成

2-2 構成

- ・事故調査委員会委員は、公正かつ客観的な立場から事故原因を究明し、再発防止対策を提言することを目的として、社内委員8名(大王製紙グループ関係者含む)と社外委員4名(メーカー3名、大学教授1名)とし、必要なテーマによっては、メーカーの有識者も含めた構成した。
- ・また、アドバイザーとして経済産業省 関東東北産業保安監督部 電力安全課様もご参加くださった。

委員長

大王製紙(株) 生産本部三島工場 工場長代理

委員 (操業管轄)

いわき大王製紙(株) 工場長

いわき大王製紙(株) 動力部 部長

ダイオ-エンジニアリング(株) 委員 (ホ-イ-建設、メンテナンス管轄)

いわきホ-イ-建設プロジェクト 部長

保全本部 いわき保全部 部長

保全本部 いわき保全部(BT主任技術者) 課長

保全本部 動力保全部 (三島工場) 部長

三菱重工パワーインダストリー(株) 委員 (ホ-イ-メーカー)

サービス推進部リレーションG (原因究明) グループ長

サービス事業部 (警察対応) 事業部長代理

サービス事業部 (全般) シニアPM

その他各テーマに応じ、関係有識者

大王製紙(株) 委員

生産本部 Iエネルギー企画部 部長

社外委員

横浜国立大学工学研究院 教授

事務局

ダイオ-エンジニアリング(株)

いわきホ-イ-建設プロジェクト 部長

課長

社外アドバイザー

経済産業省 関東東北産業保安監督部 東北支部

電力安全課

3. 事故原因の推定

3-1 結論

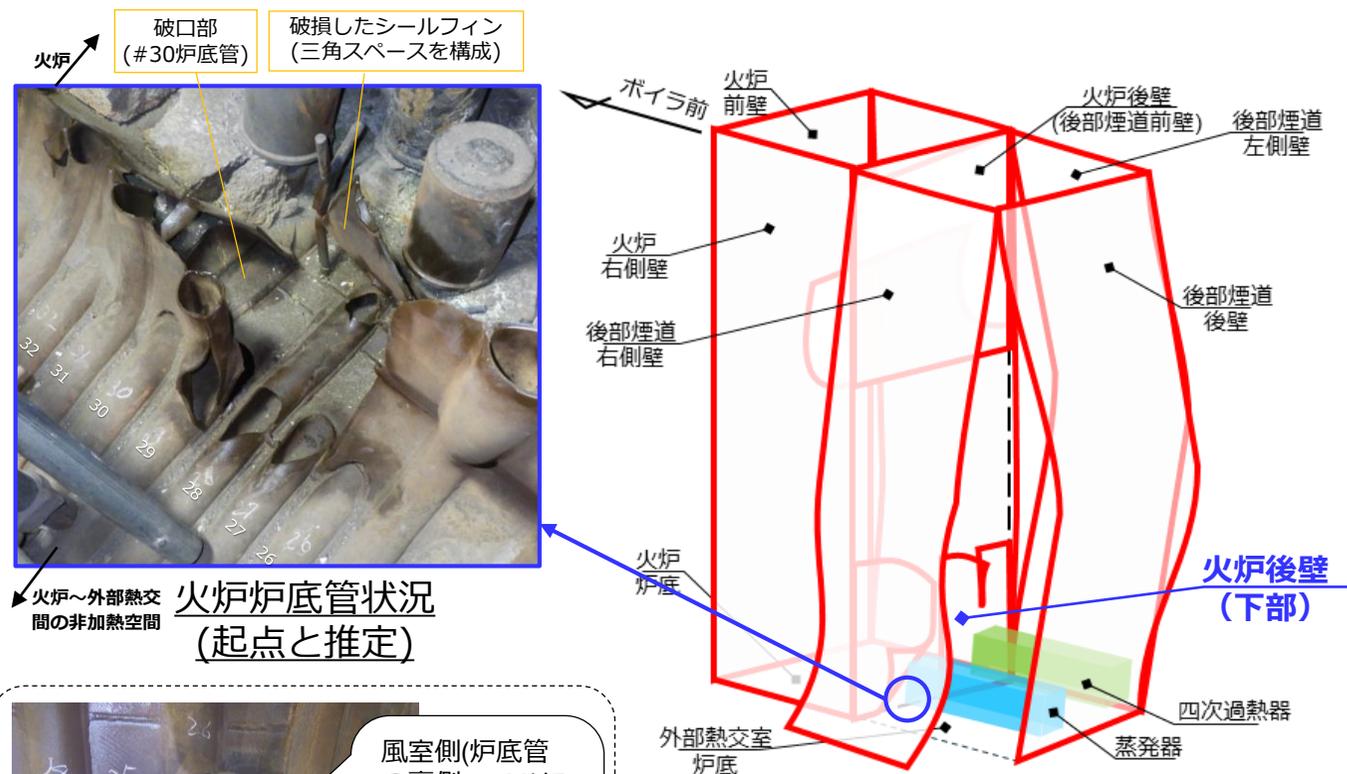
- ・ボイラの爆発原因として、未燃ガス爆発、粉塵爆発、水蒸気爆発の可能性が考えられるが、運転データ及び現地目視調査結果から、当該事故は大量の水が大きな熱容量を持つ流動砂と瞬時に接触することに起因する水蒸気爆発によるものと推定。
- ・設計・施工・運用・保全点検の各視点から水蒸気爆発発生の原因を調査した結果、複数の推定原因を導き出した。
なお、破口部に減肉は見られず、少なくとも前例の爆発事故とは異なる漏洩と判断できた。
- ・第一破口部は当局に押収されており、寸法検査・組織観察・硬さ試験等、様々な視点の調査を当局に要請中である。現状においては、第一破口部の詳細状況が明確になっていないため、複数の推定原因からの絞り込みには至っていない。
- ・本件の再発防止策については、事故調査委員会において検討を行い、管の破口原因以外に管が破口してもボイラが爆発しないような再発防止策についても議論を進め、事故防止ができると評価された。
- ・今後、当局での第一破口部の調査結果が入手できた際には、必要に応じ、改めて事故調査委員会を開催し、原因の特定及び必要な追加対策について協議することとした。
- ・なお、次期案件(いわき大王4号の復旧)に向けては、複数の推定原因に対する再発防止策を適用することとしたい。

※本資料上は「水蒸気爆発：高温の砂に触れた水が爆発の様に急激に気化(体積膨張)したもの」と定義

3-2 現状の把握

1) ボイラ損壊の状況

- ・ 火炉後壁下部が外部熱交室側(ボイラ後側)へ大きく変形・破断しており、その方向に大きな力が作用した様相であり、炉底に近い部分での変形が最も顕著だった。
- ・ 爆発の影響による強制的破断部が大多数の中、内圧によって破口した形態の炉底管の#30(缶左から数えて30本目)を第一破口部と推定。



火炉炉底管状況
(起点と推定)

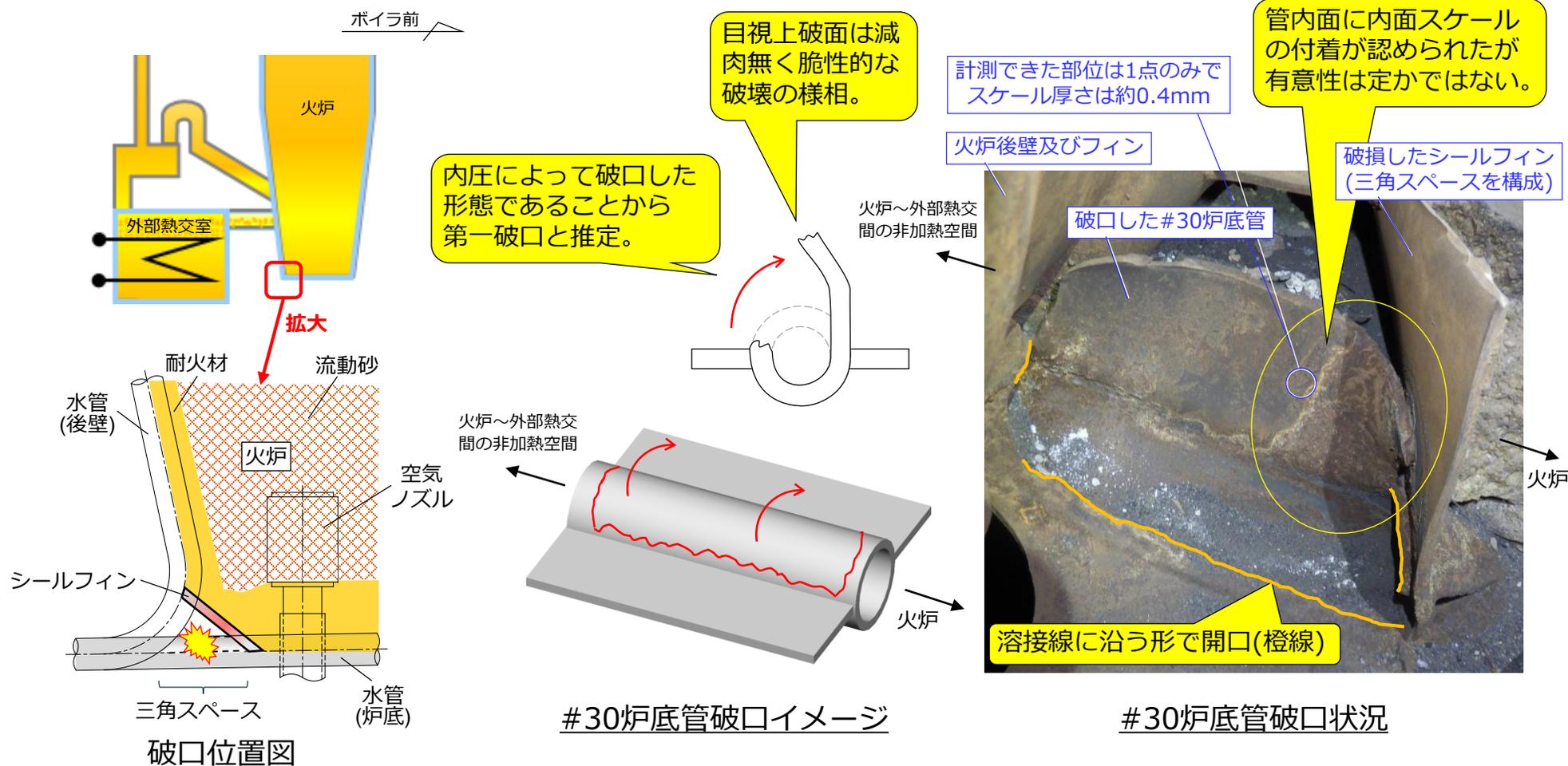
風室側(炉底管の裏側：#26)にも開口を確認。爆発の影響により変形し、破口したと推定。

ボイラ変形状況概略図

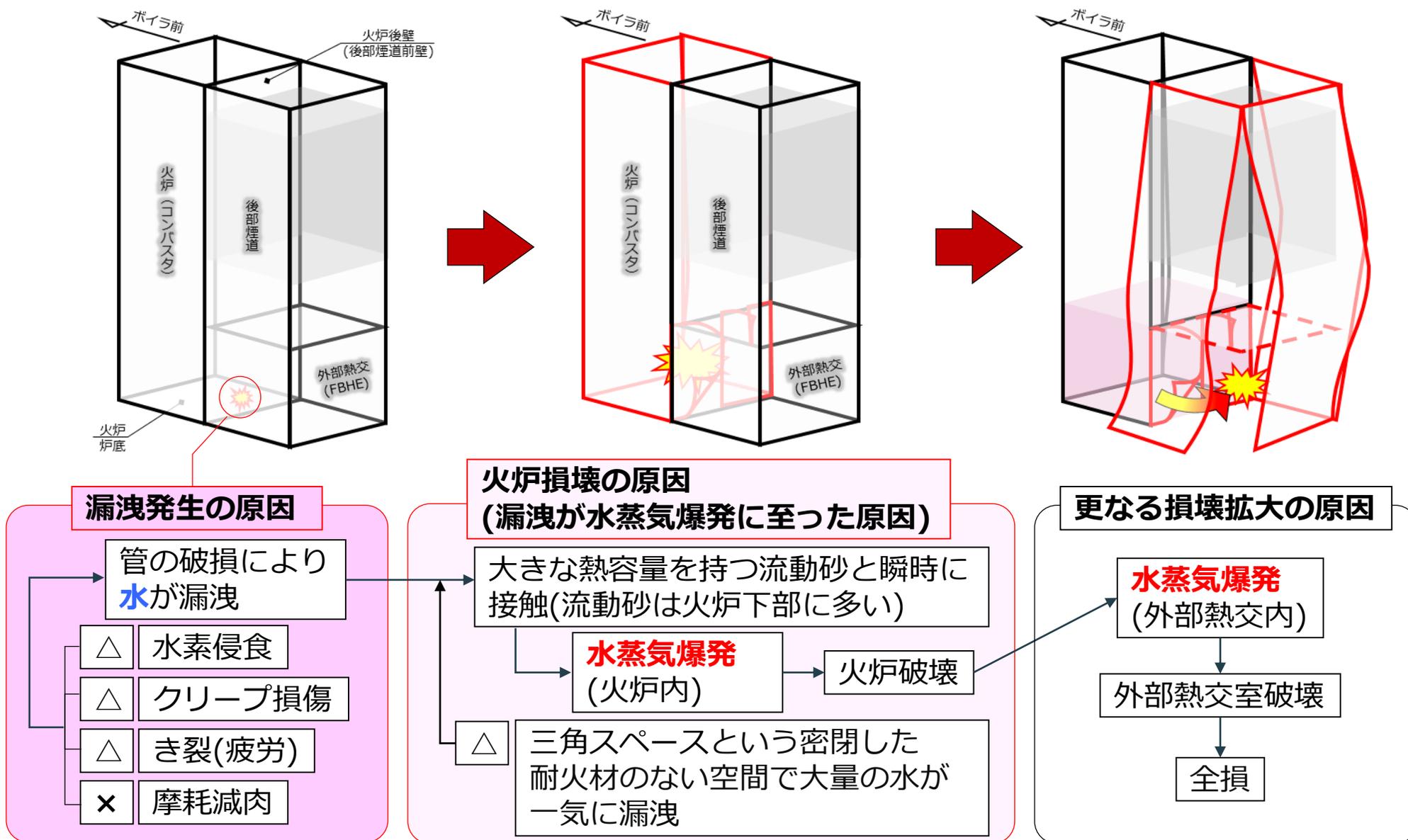


2) 第一破口部(推定)の特徴

- ・ #30の破口部は三角スペースを構成するフィンの溶接部に沿う形で軸方向・周方向に開口。
- ・ 目視上、破面は減肉無く、脆性的な破壊の様相。
- ・ 管内面に内面スケールの付着が認められた。但し、爆発前に付着したものか不明。
- ・ #30の破口部は、シールフィンにより本来は砂もガスも到達しないスペース(三角スペース)内。



3-3 事故発生フロー(推定)



3-4 漏洩発生の原因について

第一破口(#30)の詳細分析が未実施のため原因の特定には至っていないが、設計・施工・運用・保全点検の各視点から事故原因の調査を行った結果、複数の推定原因を導き出した。

当局が押収した第一破口部において、同事故調査委員会で実施した寸法検査・組織観察・硬さ試験等の調査を行うことによって原因を絞り込むこともできると考える。

1) 設計

- ・漏洩部の管は、設計温度・設計圧力に適合した寸法、材質を選定しており問題無かった。
(※対象の技術基準の解釈は平成17年度改訂版)

第五条 (略)…材料は、最高使用温度において材料に及ぼす化学的影響及び物理的影響に対し、安全な化学的成分及び機械的強度を有するものでなければならない

→火技解釈 (第2章 第2条 別表第1) に基づく材料を選定していることを確認。

第六条 (略)…耐圧部分の構造は、最高使用圧力又は最高使用温度において発生する最大の応力に対し安全なものでなければならない。…(略)

→以下の通り、各基準に沿って設計していることを確認。

- ・強度計算 : 火技解釈 (第2章 第3条) に基づき実施。
- ・強度計算に用いる材料許容応力 : 火技解釈 (第2章 第4条 別表第1) を適用。
- ・耐圧部の水圧試験 : 火技解釈 (第2章 第5条) に基づき、最高使用圧力の1.5倍で実施。

<※設計に関する検討は次葉に続く>

3-4 漏洩発生の原因について

1) 設計（続き）

- ・メーカー(三菱重工パワーインダストリー様)にて、当該部のシール性能改善を目的に、三角スペース用のシールフィンを用いた構造を1994年から採用し始めた。
この構造の採用により、溶接線で囲まれた狭隘かつ点検ができない“三角スペース”といった空間が存在する構造となった。（通常の運転では当該部は耐火材で覆われており点検は不要）
- ・事故調査委員会において、この部分にボイラ起動停止時の伸縮による応力(熱応力)やボイラの振動による応力が掛かり、疲労き裂が発生、進展することで蒸発管(水管)が破口したと仮説を立て机上検討を行ったが、高応力発生の可能性は見いだせなかった。
- ・同様の理由で、類似管(#52・#54)の調査や類似箇所全域の非破壊検査を行った。
その結果、懸念された損傷傾向は確認できなかった。

3-4 漏洩発生の原因について

2) 施工

- ・ 火炉 炉底部は缶左右に3つのパートに分れており、それぞれのパートは工場で製作したのちに現地にて手溶接で組み立てられる構造となっている。
現地での溶接は第一破口の#30に近い#28と#29の間、および#53と#54の間であり、現地での耐圧部への直接溶接を極力避ける為に工場で事前に施工したフィン同士を、現地溶接する構造としている。
- ・ いわき大王は、現場調査において、破口が炉底管と炉底フィンとシールフィンの現地溶接境界部を起点として発生しているように見えた為、類似管(#52・#54)の溶接部を分析した。その結果、工場で溶接したフィンと管の溶接部や、現地で溶接したフィンとフィンの溶接部の溶け込み不足やブローホール等が見られたが、硬さや引張試験結果で強度異常は確認されなかった。(試験結果の降伏点を使って計算した最小厚さは2.13mmであり、炉底管には減肉が見られていない状況(約4mm)であることから、現状は十分な強度であることを確認)

第六条 (略)…耐圧部分の構造は、最高使用圧力又は最高使用温度において発生する最大の応力に対し安全なものでなければならない。…(略)

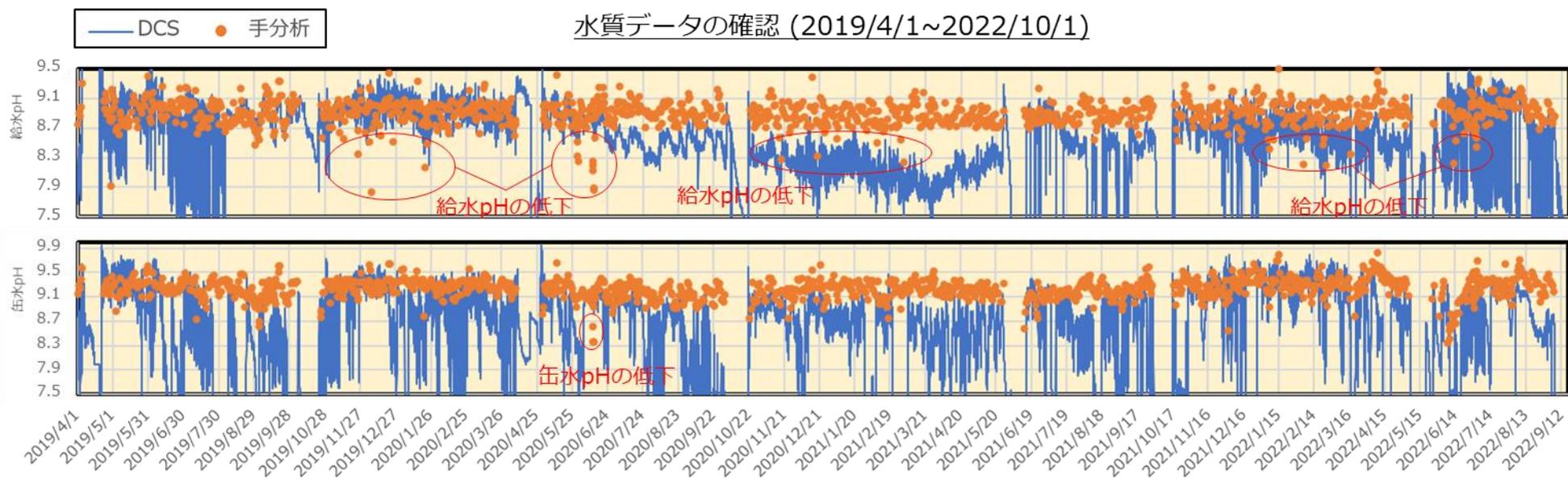
※破口部は、省令でいう耐圧部分であることから、フィンが溶接された“耐圧部分”の健全性が求められる。よって、省令第六条(火技解釈 第2章 第5条)に基づく耐圧部の水圧試験に合格していることで担保できる。(尚、管とフィンの溶接部については溶接自主検査対象外につき、第十章 第七十四条は適用されない)

→火技解釈(第2章 第5条)に基づき、水圧試験を最高使用圧力の1.5倍で実施したことを確認。

3-4 漏洩発生の原因について

3) 運用

- 水質管理は、JIS B 8223の基準値に準じて管理していた。ボイラー給水、缶水のpHは下記グラフの通り基準値8.5を下回る状況があった。
水質悪化による水素侵食による影響を類似部位で分析実施の結果、水素侵食の特徴は確認されなかった。
- いわき大王は、水質管理の面で、ボイラー給水、缶水のpH、電導度を、自社にて1日1回の手分析を実施。
水質データの連続監視計器の指示値は、振れが大きいいため、参考値としていた。
計器の公正は、外注業者にて1回/2か月周期で実施。



3-4 漏洩発生の原因について

4) 保全点検

- ・ 火炉の水管と耐火材のこれまでの保全点検状況
 - ▶ ボイラー稼働翌年の2009年4月より約6か月周期で定期修理を実施。6か月周期は、いわき大王にて運転状況により任意に設定した周期。
 - ▶ 定期修理時の保全点検内容は下記表のとおり。
 - ▶ 定期自主検査の解釈ならびに火力発電所の定期検査指針(火原協)に基づき点検しており問題なかった。
 - ▶ 事故発生4か月前の2022年5月が直近。次の結果であった。

水管：耐火物で覆われていない火炉上部の水管を点検。

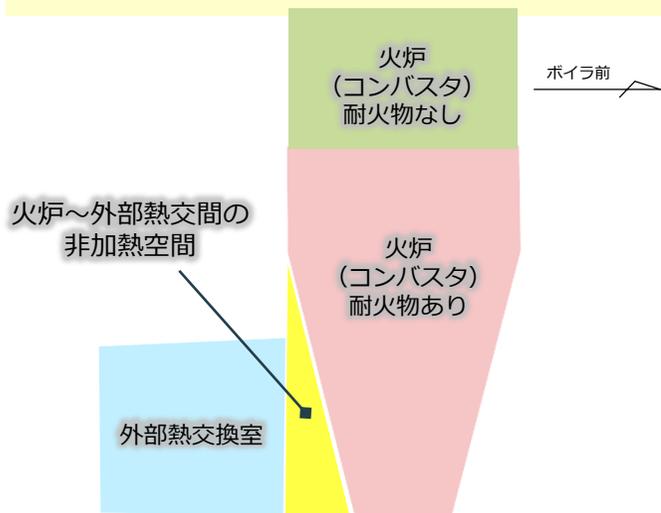
水管は、摩耗しやすい部位は溶射膜で保護し、それ以外は裸管。

溶射膜は、膜厚測定を行い、減膜部は再補修。

裸管は、外観点検及び肉厚測定を行い、管理厚み以下の減肉はなかった。

耐火材：火炉前壁、後壁側の一部に浮き上がり、剥離を確認。部分補修実施。

※火炉の水管と耐火材の保全点検は、いわき大王とメーカー以外の外注業者にて実施。



ボイラー側面概略図

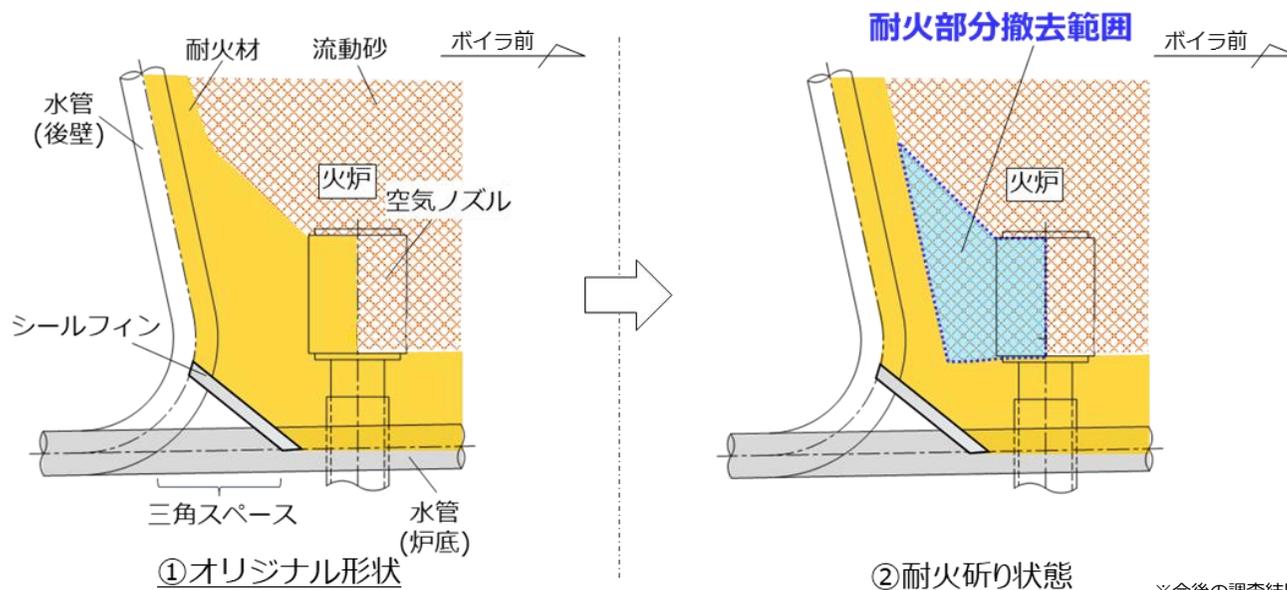
分類	火炉 (コンバスタ)	火炉～外部熱交間の非加熱空間
水管	<ul style="list-style-type: none"> ・ 耐火物で覆われていない水管の溶射膜測定及び再溶射 (耐火物直上及びコーナー部) ・ 耐火物で覆われていない かつ溶射膜がない水管の肉厚測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 目視点検のみ
耐火材	<ul style="list-style-type: none"> ・ 耐火ライニングの目視及び打音点検 不適合時は打ち替え工事実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 耐火ライニングなし

定期修理時の保守管理、点検状況

3-4 漏洩発生の原因について

4) 保全点検（続き）

- 耐火材が設置されている空気ノズル更新の際、耐火材を除去しなければならない構造となっていた。いわき大王の判断でノズルを覆う部分の耐火材の一部を取り外していた。
- 三角スペースが図面に記載がなく、いわき大王はその存在を知らなかった。当初からの仕様を変える際、メーカーに確認しなかった。
- 三角スペース周辺の耐火材が脱落し、水管が露出した場合の影響を評価。入熱が過剰(炉内温度に晒された)となった場合でも、外部からの入熱が増加しただけではクリープ損傷が発生する温度帯には到達せず、破損に至る可能性は低い。
- 炉底管の内面スケールが厚く付着すると、伝熱阻害によりメタル温度が上昇する為、クリープ損傷が発生する可能性はあるが、今回の計測では、有意性は定かではない。



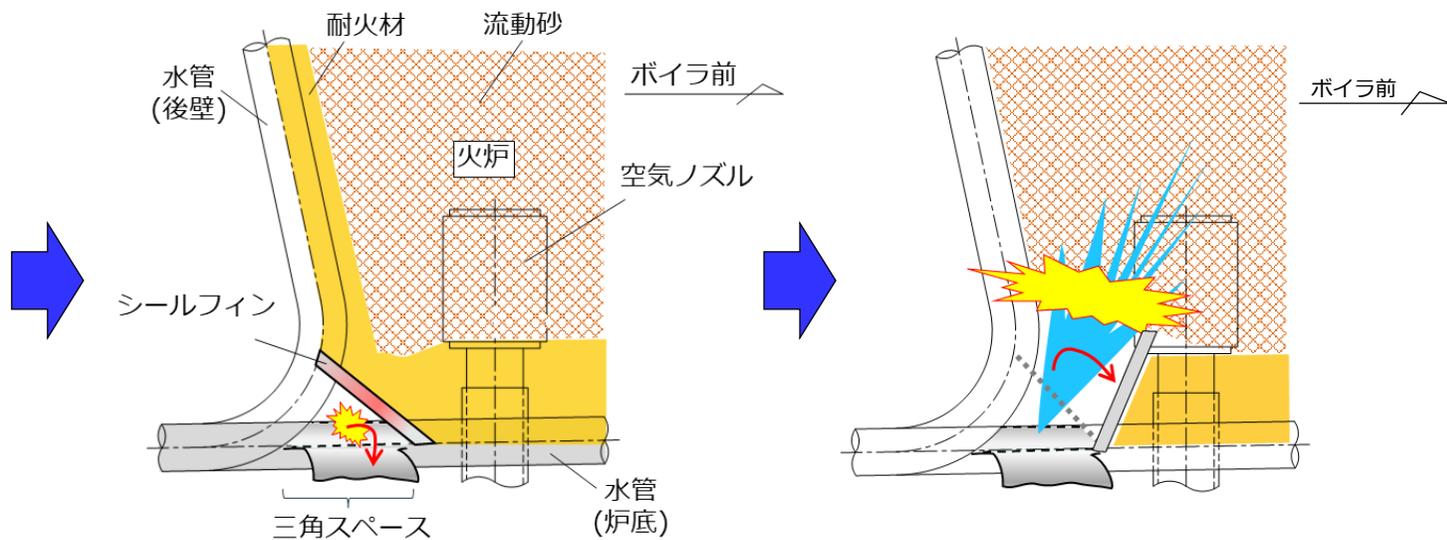
※今後の調査結果によっては内容が変更となる可能性があります

3-5 火炉損壊の原因(漏洩が水蒸気爆発に至った原因)について

- ・ #30破口部の詳細分析は未実施のため、破口の原因は明確になっていないが、当該部の目視での点検結果などから、#30に破口が発生し、三角スペースという空間で一気に大きく開口することで**大量の漏洩水**が発生し、シールフィンを破壊して保有熱量の多い流動材と一気に接触したことで**水蒸気爆発**が発生、ボイラ損壊に至った可能性が高いと考えられた。

以下の事象が単独または複合して発生し得る状況となり**漏洩発生**

- ・ 水素侵食
- ・ クリープ損傷
- ・ き裂 (疲労)

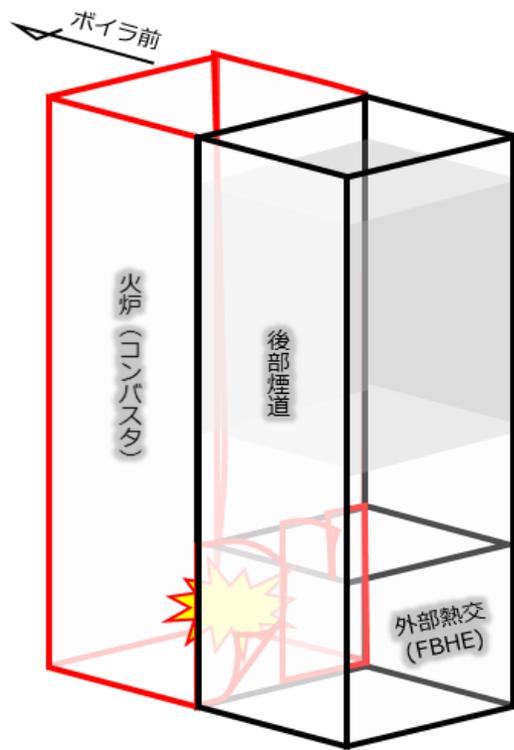


一気に口を開くことのできる漏洩の条件が整い、
“三角スペース”内で破口
(大きく口を開いた為に大量の水が**漏水**)

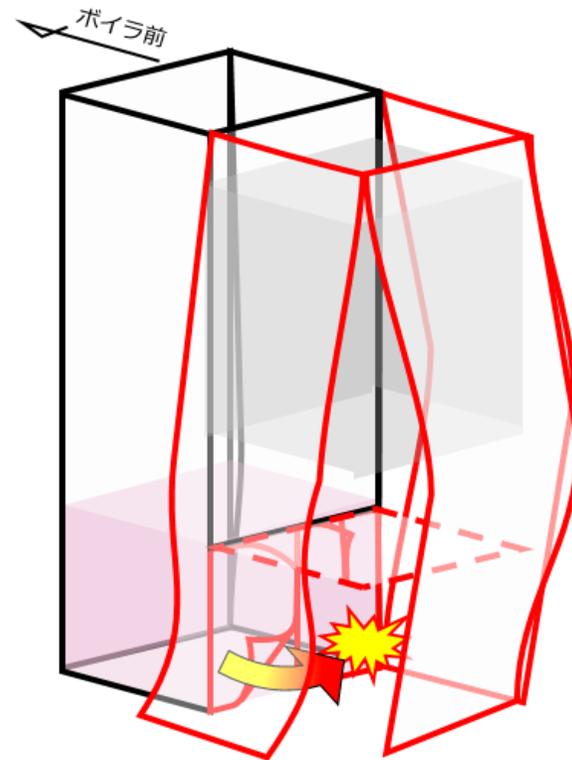
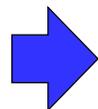
大量の漏洩水がシールフィンを破壊し
保有熱量の多い流動砂と接触した為
火炉側での**水蒸気爆発**が発生し
火炉後壁を破断させた

3-6 更なる損壊拡大の原因について

- ・ 火炉側で発生した**水蒸気爆発**を引き金として破断した、外部熱交室の水管からの**大量の水**が外部熱交室内の流動砂と接触し**水蒸気爆発**が発生、更なる損壊拡大に至った可能性が高いと推定。



火炉側の水蒸気爆発により
外部熱交室の水管を破断させ
二次漏洩が発生



二次漏洩水と外部熱交室内の流動砂との接触により
外部熱交室内での**水蒸気爆発が発生**
(損壊拡大)

4. 他類似(同容量)CFBとの比較について 【前回WGご指摘】

- ・ボイラ基本情報（使用時間、発停回数、燃料など）では異常な数値は確認されなかった。
- ・類似CFBでは耐火の研りは確認されなかった。
- ・いわき大王4号ボイラの缶水pHベース値は、類似CFBに比べ低めの傾向であった。

5. 事故原因の推定及び再発防止対策のまとめ

- ・ボイラの爆発原因として、未燃ガス爆発、粉塵爆発、水蒸気爆発の可能性が考えられるが、運転データ及び現地目視調査結果から、当該事故は大量の水が大きな熱容量を持つ流動砂と瞬時に接触することに起因する水蒸気爆発によるものと推定した。
- ・第一破口部の詳細状況が明確になっておらず、要因の絞り込みには至って無いものの、各種調査で導き出した複数の推定原因に対して、以下を適用することとしたい。

1) 水管の漏洩対策

- ◎ 三角スペース用シールフィンを無くす (結果的に三角スペースも無くなる。)
- ◎ 内面スケール付着抑制 (クリープ損傷リスク回避)
- ◎ pH低下防止 (水素侵食リスク回避)
- ◎ 耐火材除去による水管への熱負荷上昇リスクを発生させない
(水素侵食、クリープ損傷、き裂リスク回避)

2) 万が一、漏洩したとしても水蒸気爆発発生リスクを低減するための対策

- ◎ 大量の水が保有熱量の多い流動材と一気に接触することを防止するために三角スペースを廃止

3) 更なる損壊範囲の拡大防止の対策

- ◎ 外部熱交室周壁の水管構造(水管+耐火材構造)を、非耐圧構造(ケーシング/鉄板+耐火材構造)とする
- ◎ 外部熱交室内の蒸発器の非設置

※2)、3) はボイラーの再建に向けていわき大王がメーカーに要請した対策。

※他案件への水平展開については、別途メーカーから説明。