

追補資料. 脱水乾燥システムの火災事故について

1. 概要

2023年10月6日1:30頃に、脱水乾燥システム（平成28年度採択B-DASH・脱水乾燥システムによる下水汚泥の肥料化、燃料化技術実証事業）にて火災事故が発生した。技術概要、原因、対策について以下に示す。

脱水乾燥システムの概要

本技術は、機内二液調質型遠心脱水機と円環式気流乾燥機を組み合わせることで、下水汚泥の脱水・乾燥処理を一体的に行い、利用用途に合わせて含水率が調整された乾燥汚泥を排出可能な技術である。本技術を導入することにより、コスト（建設費年価＋維持管理費）の削減や省エネルギー化を図り、下水道事業経営の健全化に貢献すること、並びに中小規模処理場における汚泥の肥料化、燃料化の有効利用の用途拡大を図り、循環型社会の構築に貢献することが可能である。

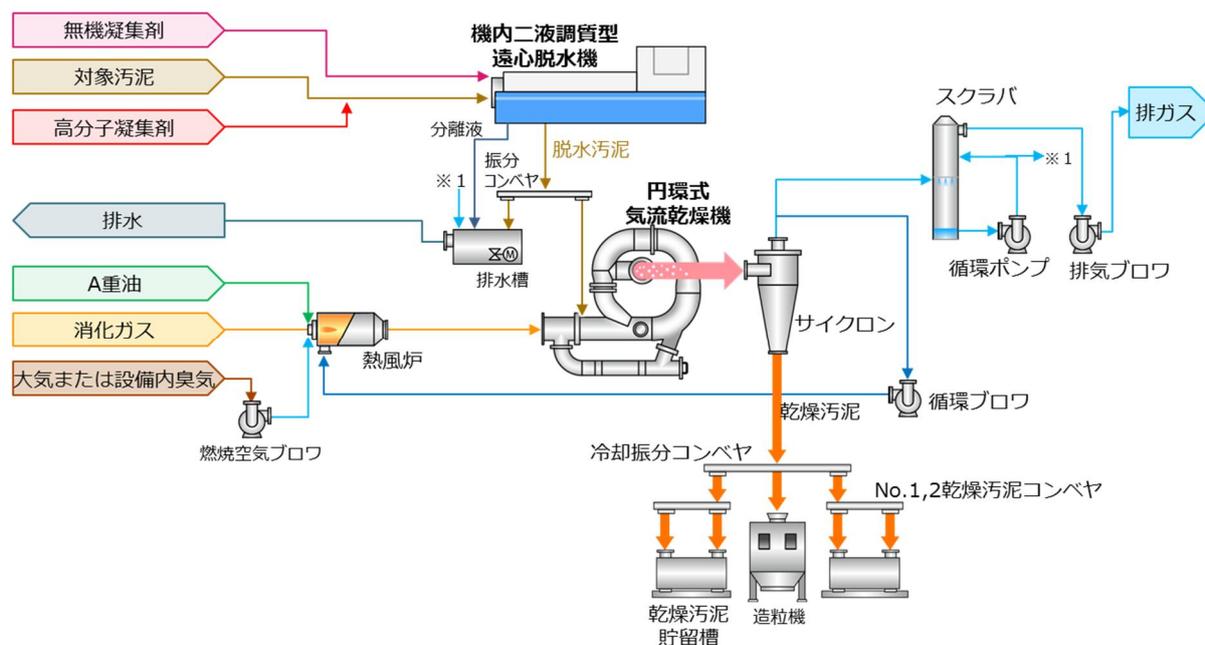


図1 脱水乾燥システムの概要

火災に至った原因・メカニズム

- ① 同システムにおける乾燥排ガスの循環ラインに設置されていたキャンパス製（耐熱加工の布製）フレキが経年的な摩耗により穴が空き、適正な循環風量が維持できなくなった。
- ② 適正な循環風量が維持できないまま乾燥運転を継続し、乾燥機内で流動不良に陥った汚泥が堆積した。
- ③ 堆積した汚泥に熱風が当たり続けて発火、後段に飛び火し、循環系統のフレキの焼損等を引き起こした。

再発防止策

- ① 今回摩耗したと推察されるフレキの代わりに、耐摩耗性に優れた金属製フレキに交換
- ② 循環風量の低下を検知した場合に軽故障（アラーム発報）や重故障（停止）を発報するよう改良
- ③ 運転管理項目の見直し

詳細は2.以降に示す。

2. 火災事故までの経緯

火災事故当日までの経緯を以下に示す。また、図 2 に火災箇所を記述した実証システムの概要図を示す。

(事故前に確認されていた状態)

9月中旬 循環ブロワ吐出配管部(図2中D)での乾燥排ガス漏れを確認^{注1)}

10月2日 乾燥排ガス温度異常高(図2中A)が発報。

乾燥機(図2中E)廻りで焦げ臭を確認

10月4日 循環ブロワ(図2中C)軸封部及び吐出配管部(図2中D)での乾燥排ガス漏れを確認^{注2)}

10月5日 乾排ガス温度異常高(図2中A)が発報

注1) この時点では漏洩ガス量も少なく、大事には至っていないと判断し、運転継続。

注2) この時点では数日程度の運転は可能と判断し、週末の設備停止時(10月7日)に補修の必要性があると判断。

(火災当日10月6日)

00:44 乾燥排ガス温度高(図2中A)が発報

01:01 熱風炉温度異常高(図2中B)により停止、手動にて排気ブロワ類、循環ブロワをマニュアル運転

02:14 現場確認の結果、循環ブロワ(図2中C)軸封部、吐出配管(図2中D)より出火確認
消防署殿へ通報

02:24 消防署殿到着。

02:31 放水活動開始。

04:00 循環ブロワ軸封部(図2中C)、吐出配管(図2中D)の消火完了

05:00 サイクロン後段の排気ライン配管(図2中F)にて配管の赤熱を確認し、水冷作業開始

06:30 消火確認

09:00 現場検証

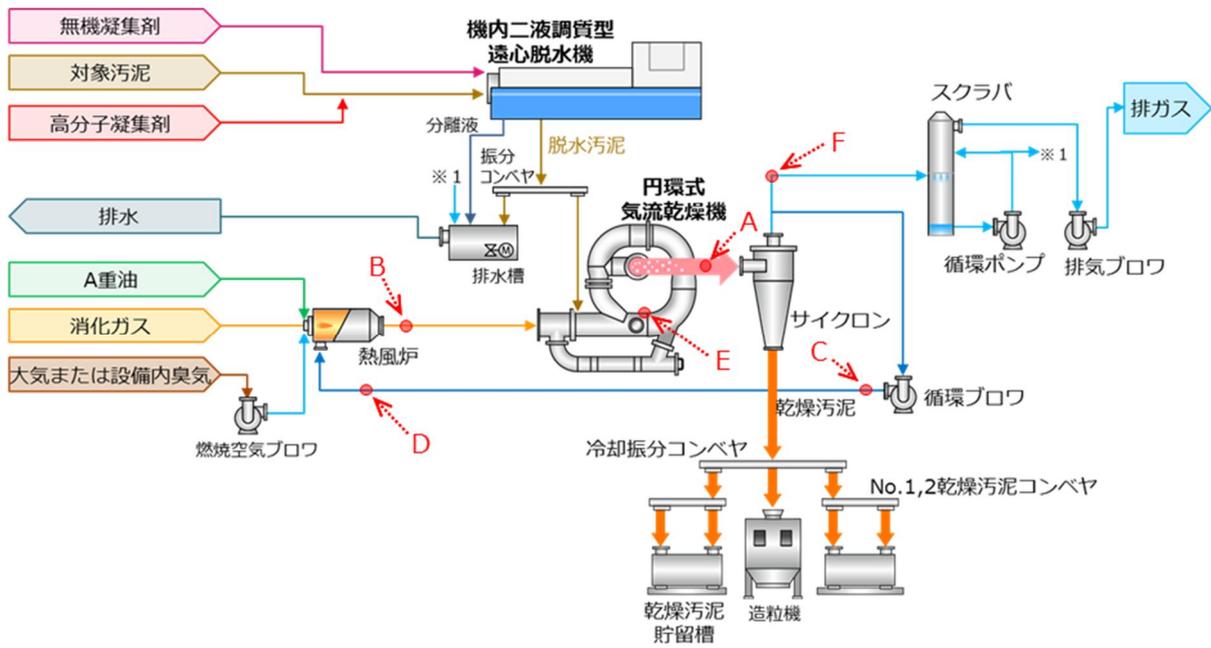


図2 実証システム概要図における火災事故箇所

3. 事故直後の状況

10月6日PMに火災事故で外観上確認された損耗箇所を以下に示す。

- ① 循環ブロワ軸封部（図2中C）での煤付着
- ② 循環ブロワ吐出配管（図2中D）での焦げ、煤付着
- ③ サイクロン後段の排気ライン（図2中F）保温の変色

（1）循環ブロワ軸封部（図2中C）での煤付着

図3に循環ブロワ軸封部（図2中C）の写真を示す。軸封部は事故前より排ガスの漏れが確認されており、以前より煤が付着した状態になっていた。今回同箇所から火炎が認められたことから、未燃状態であった循環ガスが外気と接触することで発火し、火炎が確認されたと考察された。



図3 循環ブロワ軸封部

(2) 循環ブロワ吐出配管 (図2中D) での焦げ、煤付着

図4に循環ブロワ吐出配管 (図2中D) の写真を示す。火災時は同箇所より火炎が確認された。出火のメカニズムについては(1)同様と考察した。



図4 循環ブロワ吐出配管

(3) サイクロン後段の排気ライン (図2中F) 保温の変色

図5にサイクロン後段の排気ライン (図2中F) の写真を示す。事故当時は配管内部の温度により加熱され、保温外装材が赤熱していた状況であった。



図5 サイクロン後段の排気ライン

4. 現場検証結果

(1) 現場検証結果概要

10月6日の現場検証結果を以下に示す。

表1 現場検証結果（表中と図中の整理番号は同じ）

整理番号	箇所	結果
①	振分コンベア点検口	コンベア内部が脱水汚泥にて閉塞 →(2) 詳細1) に示す
②	乾燥機内部	内容物は100L程度の脱水汚泥が溜まっていた。熱風が当たっている箇所の汚泥は炭化（一部灰化）した状態であった。 →(2) 詳細2) に示す
③	サイクロン	目視範囲では乾燥汚泥は認められなかった。 ただし、高温のガスが溜まっていたため、換気した。
④	冷却コンベア	乾燥汚泥はほとんど認められなかった。
⑤	乾燥汚泥貯留槽	貯留されている乾燥汚泥には異常は認められなかった。
⑥	循環ブロワ吐出配管	保温を外した結果、フレキが焼失していた。 →(2) 詳細3) に示す
⑦	排ガスライン	フランジを取り外し、内部確認を行った結果、内部で乾燥汚泥が燃焼・灰化したものが堆積（0.5L程度）していた。 →(2) 詳細4) に示す
⑧	循環ブロワ内部	点検口を取り外し、内部確認を行った結果、下部に炭化した汚泥が付着していたが、ケーシング（羽根を囲うケース）やインペラ（羽根車）に目立った影響は認められなかった。 →(2) 詳細5) に示す

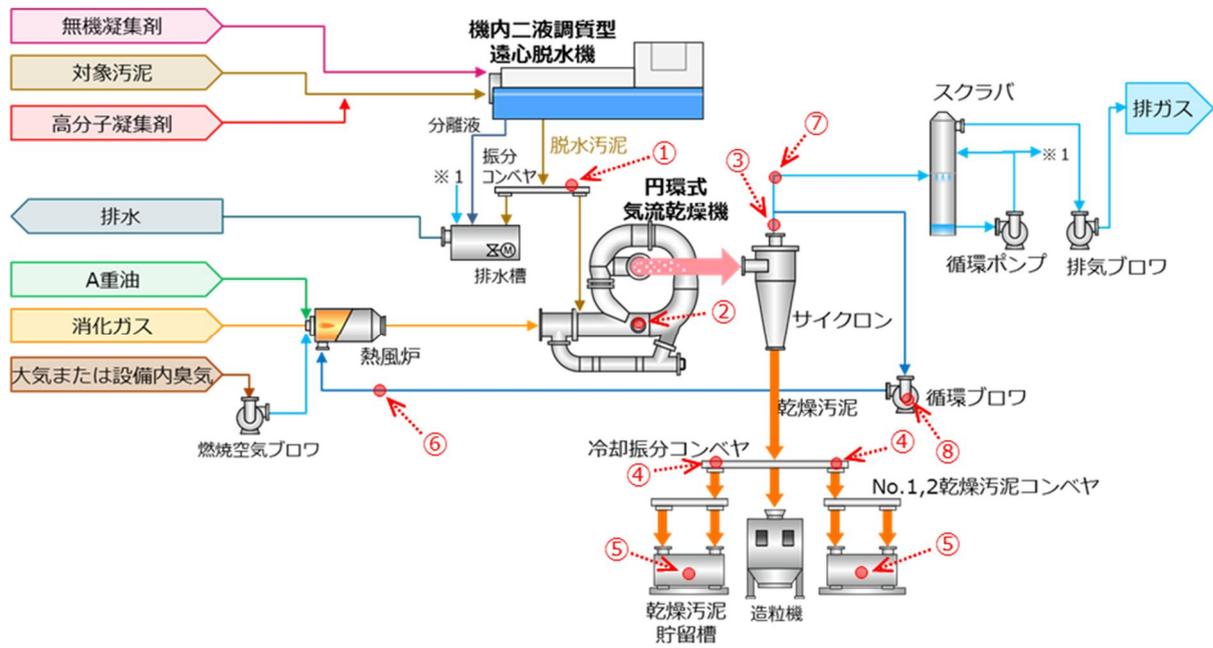


図6 実証システム概要図における点検箇所

(2) 詳細確認結果

1) 振分コンベア内部

図7に振り分けコンベア内部の写真を示す。乾燥機投入部から1,000 mm程度の範囲で脱水汚泥が充填された状態であった。



図7 振り分けコンベア内部

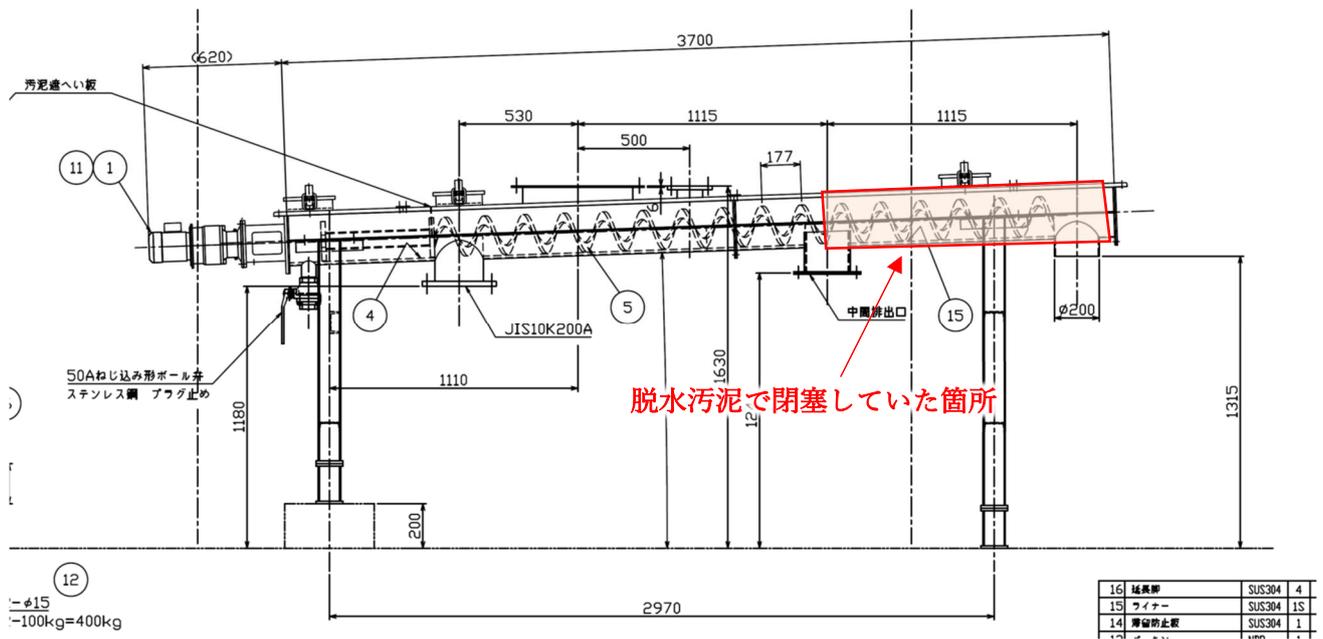


図8 振り分けコンベア内部での汚泥充填状況



図 10 乾燥機内より排出された脱水汚泥



図 11 乾燥機内より排出された脱水汚泥の内、炭化していたもの

3) 循環ブロワ吐出配管

図 12 に出火箇所であった循環ブロワ吐出配管の保温を外した箇所の写真を示す。同箇所に設置されていたフレキは既に焼失していた。また、フレキは耐熱キャンパス仕様（使用温度 150℃、最高使用温度 250℃程度）を採用していた。



図 12 循環ブロワ吐出配管 出火場所の保温を外した際の状況

4) 排ガスライン

図13に排ガスラインの保温剤を取り外したエルボ部分とその内容物の写真を示す。内容物は完全に灰化した汚泥であり、管内で燃焼していたと考えられる。なお、本乾燥汚泥はサイクロンで捕集されずに排気ラインに堆積した汚泥と考えられるが、その量は微量であった。通常の状態でも当該配管内には乾燥汚泥が堆積する場合もあることから、排ガスラインへの汚泥の蓄積は異常状態に起因するものではないと考察した。



図13 排ガスライン 保温材を取り外した際の状況



図 14 排ガスライン 配管内の状況

5) 循環ブロワ内部

図 15 に循環ブロワ内部の状況を示す。下部や点検口の嵌め合い部に炭化した汚泥が付着していたが、ケーシングやインペラに目立った影響は認められなかった。下部に堆積しているものは殆どが乾燥物であり、通常運転時に堆積したものと推察された。

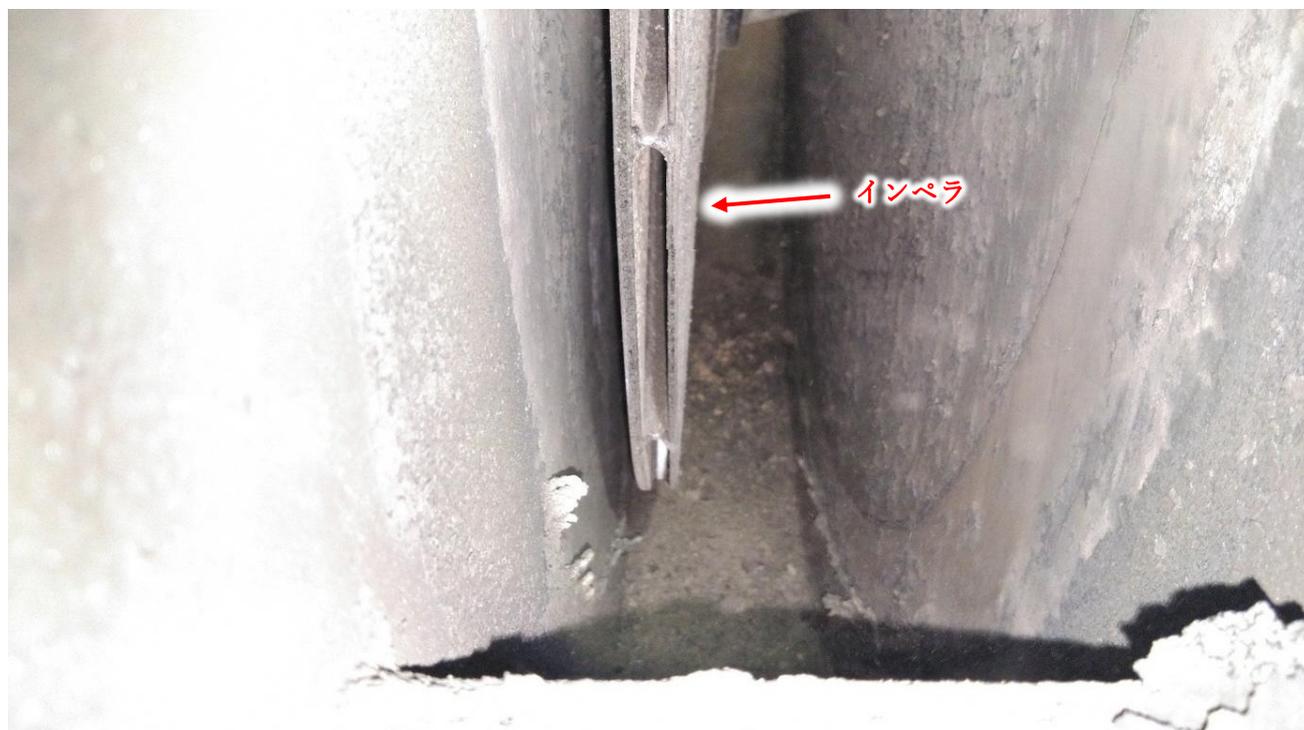


図 15 循環ブロワ（ケーシング内部 下部）

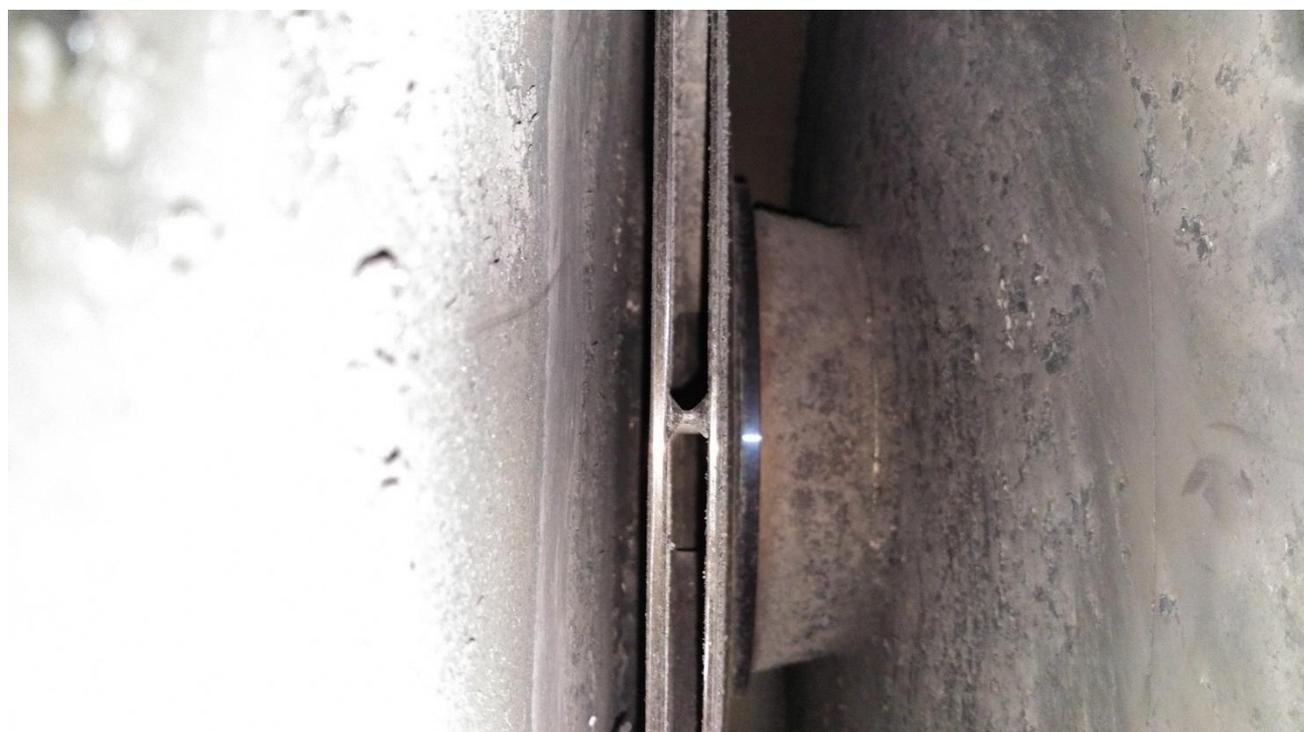


図 16 循環ブロワ（ケーシング内部 上中部）

5. 機器・計装品動作確認結果

(1) 確認結果概要

機内の状況確認及び内容物の除去を行ったうえで、機器や計装品の損耗状況の確認を実施した。表2に主な点検箇所とその結果を示す。

表2 現場検証結果（表中と図中の整理番号は同じ）

整理番号	箇所	結果
①	振分コンベア	正逆共に異常なし。 運転時の電流値は0.66A（定格1.11A）で異常なし
②	脱水汚泥監視カメラ	異常なし
③	熱風炉出口温度計	異常なし
④	乾燥機出口温度計	異常なし
⑤	乾燥機圧力計	異常なし
⑥	熱風炉圧力計	異常なし
⑦	サイクロン廻り温度計	異常なし
⑧	サイクロン圧力計	異常なし
⑨	乾燥汚泥排出機	動作に異常なし。 運転時の電流値1.57A（定格2.15A）であり、異常なし
⑩	循環ガス流量計	異常なし
⑪	循環ブロワ吸込み温度計	異常なし
⑫	外気取り込み弁	動作確認の結果、動作不良があった。 分解確認の結果、弁体の一部に欠損があった。 メーカーにて確認を要する。
⑬	循環ブロワ	10Hz程度の低負荷での運転確認はできたが、詳細はメーカー立会の元実施する必要があると判断された。
⑭	循環ブロワ吐出圧力計	異常なし
⑮	冷却振分コンベア	正逆共に異常なし。 運転時の電流値2.50A（定格3.74A）であり、異常なし

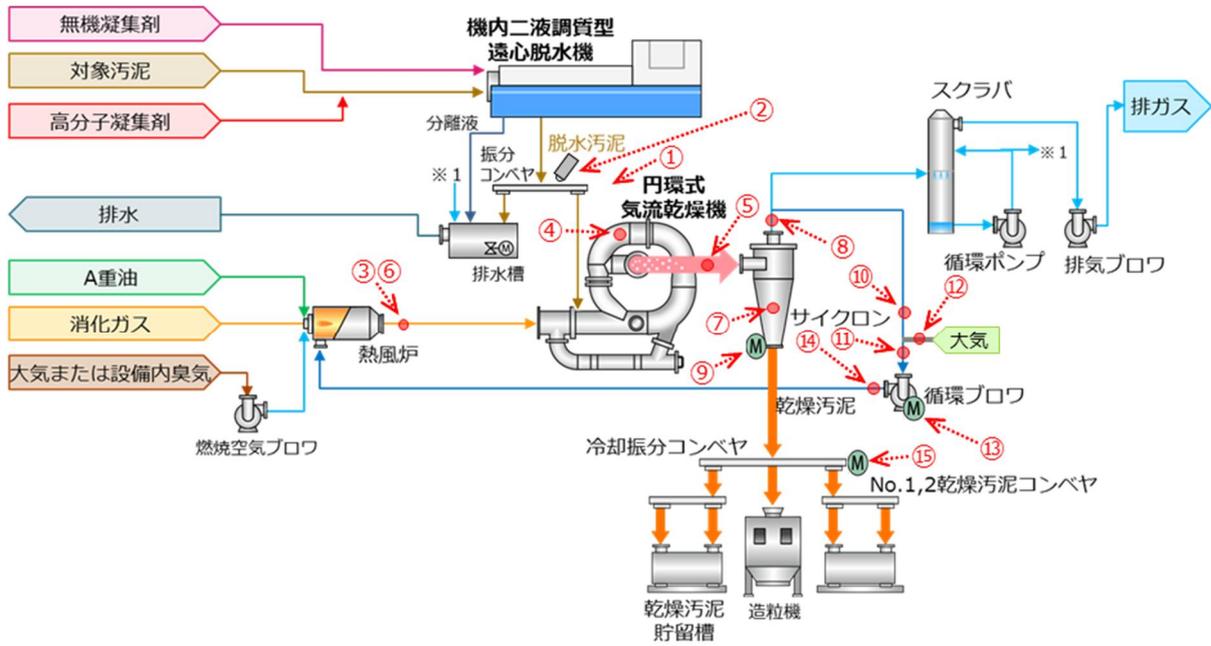


図 17 実証システム概要図における点検箇所

6. 事故原因の考察について

(1) 事故直前の状況について

事故前の 2023 年 10 月 2 日からの運転において以下のような事象が確認されていた。

- ・ 熱風炉吐出圧力が低かった。通常 5.5kPa に対し、3.0～3.5kPa 程度（9 月中から断続的）
- ・ 運転時にも関わらず乾燥機出口温度異常高の発報、周辺で焦げ臭が確認（10/2 から断続的）
- ・ 循環ブロワ吐出配管に循環ガス漏れが確認されていた（10/4 確認）

これらの事象から、以下の 2 つの想定される要因により熱風風量が低下し、それにより乾燥不良が生じていたと推察された。

想定要因①：循環ブロワの能力低下

想定要因②：循環ガス漏れによる実風量低下

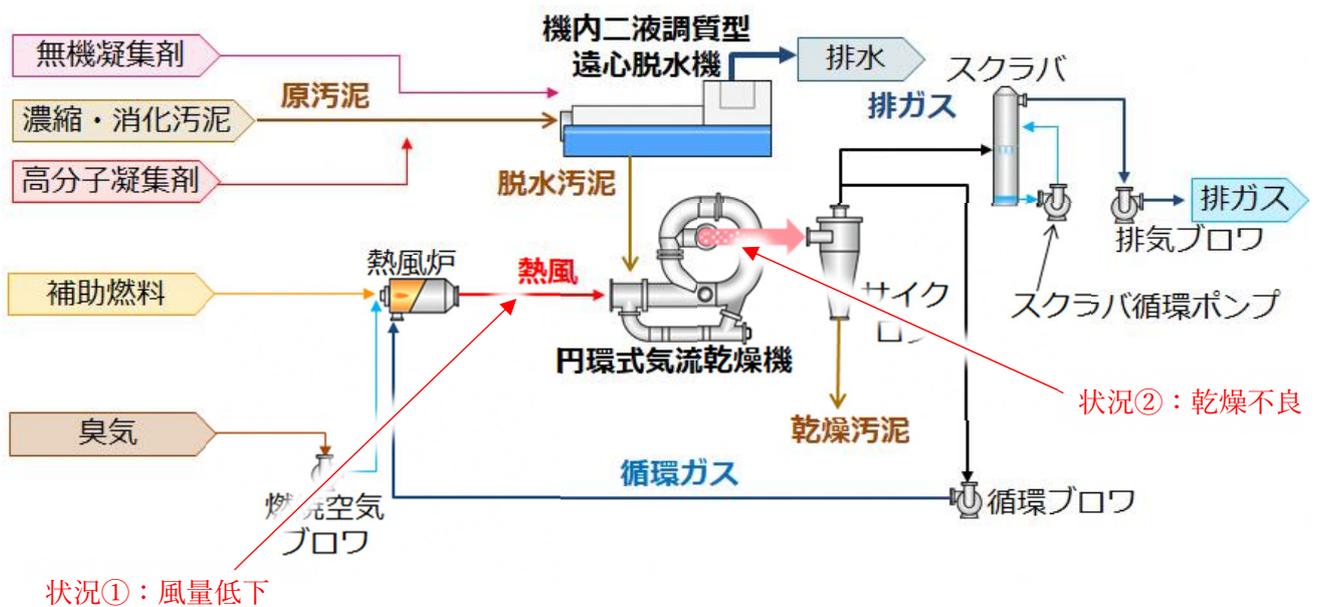


図 18 2023 年 10 月 2 日以降の運転状況予測

2) 設備内の状況

乾燥機内に滞留し熱風で発火した汚泥や炭化した汚泥が気流に乗って乾燥機から排出され、循環ラインにおいてはフレキ部での発火に、排気ラインではエルボに乾燥物が溜まり、管内で発熱したと考察された。

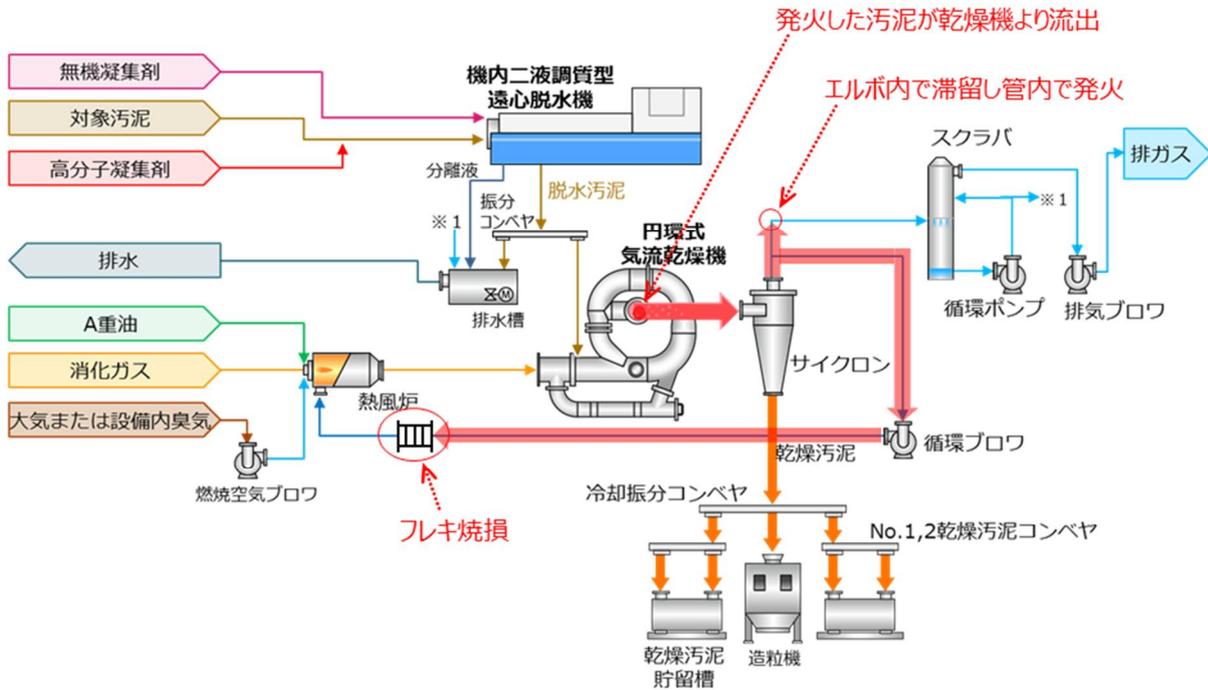


図 20 火災発生までの過程

7. 乾燥風量低下要因の特定について

今回の事故の引き金となった乾燥風量の低下については、上述したように以下の2つの要因が考察された。これらを特定するための調査方法を以下に示す。

想定要因①：循環ブロワの能力低下

想定要因②：循環ガス漏れによる実風量低下

(1) 調査方法

今回焼損したフレキシ部を撤去し、鋼管で別途製作したダミー配管を設置。そのうえで、循環ブロワを冷間（加熱を行わない常温）で稼働し、この時に熱風炉出口圧力を測定する。

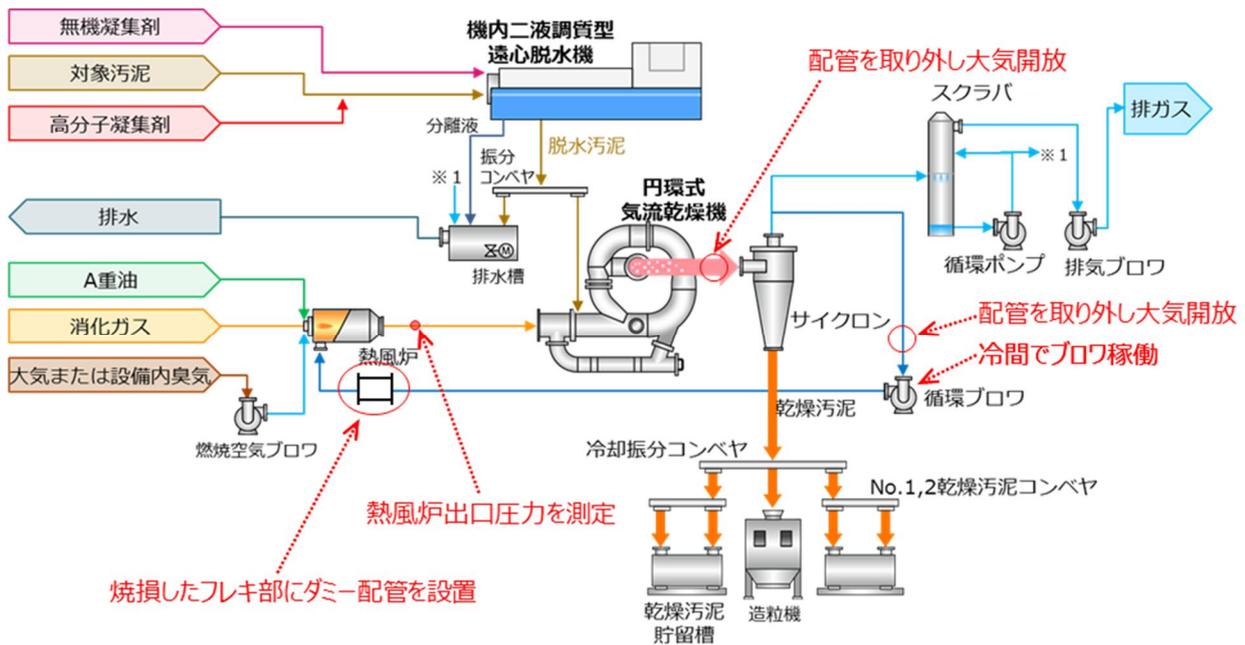


図 21 事故原因の特定 調査方法

(2) 検証結果

表3に循環ブロワ周波数及び熱風炉出口圧力の関係を示す。また、比較として運転時と起動時（冷間）のデータも示す。

表3 検証結果（循環ブロワ周波数と熱風炉出口圧力の関係）

	今回調査 (冷間時)	事故直前 (運転時)	正常時	
			(運転時)	(冷間時)
循環ブロワ入口温度 (°C)	20	120	100~120	20~30
熱風炉出口圧力 [kPa]				
循環ブロワ 周波数 (Hz)	30	4.06		
	35	5.57		
	40	7.32		
	42	8.13		6~7 程度
	45		3.0~3.5 程度	5.5~6.5 程度

事故直前の熱風炉出口圧力は3.0~3.5kPa程度であったが、今回の調査で焼損したフレキに替えてダミー管を設置して運転したところ、温度条件が同等である正常時（冷間時）と同程度の圧力であり、設計風量が維持されていることが確認された。

以上より、乾燥機内の熱風風量の低下は、想定要因①の循環ブロワの能力低下ではなく、想定要因②の循環ガス漏れによる実風量低下によるものと推察された。これは、乾燥汚泥が滞留していた状況から、同箇所のフレキが気流及び気流中のダストによる摩耗が原因で穴が空き、乾燥排ガスの一部が漏れたことによると考えられる。

8. 火災事故の再発防止対策について

(1) フレキの仕様について

表 4、表 5 に脱水乾燥システム内で使用されている 3 種類のフレキについて、仕様の比較、材質・価格・施工性等の評価、断面図、および該当フレキのイメージ写真を示す。フレキは円筒形であり、断面図はフレキ外側方向からフレキの内部が示されたものである。

仕様①と比較し、②は補強布で構成されるフレキ本体内部に断熱材及び保護スリーブが設置されており、耐熱性、耐摩耗性にも優れている。また、③はフレキ本体が SUS316L（標準的なステンレス鋼である SUS304 よりも耐食性の高いステンレス鋼）で構成され、かつ保護スリーブが設置されており、最も耐熱性に優れている。また、フレキの素材そのものが金属製であることから今回のようにフレキ自体が発火するリスクも低いと考えられる。

表 4 脱水乾燥システムにおいて使用されているフレキの仕様比較①

	①キャンバスフレキ※損傷品	②保護付きキャンバスフレキ※焼損しなかった仕様	③金属フレキ※焼損しなかった仕様
風洞の 主要な素材	シリコンシート PTFEシート	SUSメッシュ入りガラスクロス PTFEシート 鉄板 (SUS304)	鉄板 (SUS304)
構造概要	積層シート(1.7mmt)の単層構造	外気側より 積層シート(4.7mmt)、SUS綿入り断熱材、 断熱材保護スリーブ の3層構造	外気側より 金属ベローズ、ベローズ保護スリーブ の2層構造
最高耐熱温度	250℃	250℃	600℃
常用耐熱温度	150℃	215℃	400℃
耐圧	10kPa	12kPa	14kPa
断熱要否	不要 ※キャンバスが高温になるため	不要 ※キャンバスが高温になるため	必要
耐熱性評価	△ 配管内部ガスとキャンバスが直接接触 →ガス温度=キャンバス暴露温度 →常時120℃程度となり良好な状態とは言えない	○ 配管内部ガスとキャンバスの間に断熱材 →外気温≒キャンバス暴露温度 →常時30℃となり良好な状態	◎ 配管内部ガスとベローズが直接接触 →ガス温度=ベローズ暴露温度 →高温耐熱仕様のため問題なし
耐摩耗性評価	△ 厚み1.7mmのシートのみ →粉塵がキャンバスに直接接触 →キャンバスが摩耗していく可能性が高い	◎ インナースリーブおよび断熱材にて摩耗から保護 →粉塵がキャンバス直接接触しない →キャンバスが摩耗して行く可能性は極めて低い →さらにキャンバス厚みが①の2.7倍	◎ インナースリーブがベローズを摩耗から保護 →ベローズが摩耗していく可能性は極めて低い →さらに素材①②に比べて非常に摩耗に強い
価格評価	◎ 安価	○ ①と③の間	△ 高価
施工性評価	◎ 軽くて柔らかいため施工性が良い	◎ 軽くて柔らかいため施工性が良い	△ 重くて硬いため、①②と比較して施工性が悪い
総合評価	△ 安価ではあるが性能不足	◎ 価格・性能・施工性のすべてにおいて適度	○ 高性能ではあるが価格および施工性に難あり

表5 脱水乾燥システムにおいて使用されているフレキの仕様比較②

	①キャンパスフレキ※損傷品	②保護付きキャンパスフレキ※焼損しなかった仕様	③金属フレキ※焼損しなかった仕様																																																																																																																							
断面図	<table border="1"> <tr><td>7</td><td>補強布</td><td>G.C.</td><td>2</td><td>t2</td></tr> <tr><td>6</td><td>パッキン</td><td>T/#1374相当</td><td>2</td><td>t3.2</td></tr> <tr><td>5</td><td>セットボルト, ナット</td><td>SS400</td><td>4</td><td>M12</td></tr> <tr><td>4</td><td>ブacket</td><td>SUS304</td><td>8</td><td>R6</td></tr> <tr><td>3</td><td>リング</td><td>SUS304</td><td>1</td><td>φ4</td></tr> <tr><td>2</td><td>フランジ</td><td>SUS304</td><td>2</td><td>R9</td></tr> <tr><td>1</td><td>ボディ</td><td>上記</td><td>1</td><td>t1.7</td></tr> </table>	7	補強布	G.C.	2	t2	6	パッキン	T/#1374相当	2	t3.2	5	セットボルト, ナット	SS400	4	M12	4	ブacket	SUS304	8	R6	3	リング	SUS304	1	φ4	2	フランジ	SUS304	2	R9	1	ボディ	上記	1	t1.7	<table border="1"> <tr><td>9</td><td>パッキン</td><td>ゴム製ガラスクロス</td><td>2</td><td>付属品</td><td>t3</td></tr> <tr><td>8</td><td>皿小ネジ, ナット, SW</td><td>SUS304</td><td>6SETS</td><td></td><td>M5×25L</td></tr> <tr><td>7</td><td>セットボルト, ナット</td><td>SS400</td><td>3SETS</td><td></td><td>M12</td></tr> <tr><td>6</td><td>補強布</td><td>ゴム製ガラスクロス</td><td>2</td><td></td><td>t1.5</td></tr> <tr><td>5</td><td>断熱材</td><td>グラスフェルト SUS織入ガラスクロス</td><td>1SET</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>押さえ板</td><td>SUS304</td><td>1</td><td></td><td>t3</td></tr> <tr><td>3</td><td>スリーブ</td><td>SUS304</td><td>1</td><td></td><td>t3</td></tr> <tr><td>2</td><td>フランジ</td><td>SUS304</td><td>2</td><td></td><td>t9</td></tr> <tr><td>1</td><td>ボディ</td><td>別記</td><td>1SET</td><td></td><td>4PLY</td></tr> </table>	9	パッキン	ゴム製ガラスクロス	2	付属品	t3	8	皿小ネジ, ナット, SW	SUS304	6SETS		M5×25L	7	セットボルト, ナット	SS400	3SETS		M12	6	補強布	ゴム製ガラスクロス	2		t1.5	5	断熱材	グラスフェルト SUS織入ガラスクロス	1SET			4	押さえ板	SUS304	1		t3	3	スリーブ	SUS304	1		t3	2	フランジ	SUS304	2		t9	1	ボディ	別記	1SET		4PLY	<table border="1"> <tr><td>6</td><td>セットボルト&ナット</td><td>SS400 ユニクロ</td><td>4 SET</td><td>M12</td></tr> <tr><td>5</td><td>ホルダー</td><td>SUS304</td><td>8</td><td>φ4</td></tr> <tr><td>4</td><td>スリーブ</td><td>SUS304</td><td>1</td><td>φ1.5</td></tr> <tr><td>3</td><td>フランジ</td><td>SUS304</td><td>2</td><td>400A-JIS5K F. F.</td></tr> <tr><td>2</td><td>端管</td><td>SUS304</td><td>2</td><td>φ4</td></tr> <tr><td>1</td><td>ベローズ</td><td>SUS316L</td><td>1</td><td>φ0.5</td></tr> </table>	6	セットボルト&ナット	SS400 ユニクロ	4 SET	M12	5	ホルダー	SUS304	8	φ4	4	スリーブ	SUS304	1	φ1.5	3	フランジ	SUS304	2	400A-JIS5K F. F.	2	端管	SUS304	2	φ4	1	ベローズ	SUS316L	1	φ0.5
7	補強布	G.C.	2	t2																																																																																																																						
6	パッキン	T/#1374相当	2	t3.2																																																																																																																						
5	セットボルト, ナット	SS400	4	M12																																																																																																																						
4	ブacket	SUS304	8	R6																																																																																																																						
3	リング	SUS304	1	φ4																																																																																																																						
2	フランジ	SUS304	2	R9																																																																																																																						
1	ボディ	上記	1	t1.7																																																																																																																						
9	パッキン	ゴム製ガラスクロス	2	付属品	t3																																																																																																																					
8	皿小ネジ, ナット, SW	SUS304	6SETS		M5×25L																																																																																																																					
7	セットボルト, ナット	SS400	3SETS		M12																																																																																																																					
6	補強布	ゴム製ガラスクロス	2		t1.5																																																																																																																					
5	断熱材	グラスフェルト SUS織入ガラスクロス	1SET																																																																																																																							
4	押さえ板	SUS304	1		t3																																																																																																																					
3	スリーブ	SUS304	1		t3																																																																																																																					
2	フランジ	SUS304	2		t9																																																																																																																					
1	ボディ	別記	1SET		4PLY																																																																																																																					
6	セットボルト&ナット	SS400 ユニクロ	4 SET	M12																																																																																																																						
5	ホルダー	SUS304	8	φ4																																																																																																																						
4	スリーブ	SUS304	1	φ1.5																																																																																																																						
3	フランジ	SUS304	2	400A-JIS5K F. F.																																																																																																																						
2	端管	SUS304	2	φ4																																																																																																																						
1	ベローズ	SUS316L	1	φ0.5																																																																																																																						
断面詳細																																																																																																																										
イメージ写真	<p>空調資材.comより https://www.kuchosizai.com/goods/</p>	<p>株式会社三和テック ホームページより http://www.sanwatech.jp/about/detail/</p>	<p>株式会社エーアンドエー・マテリアル ホームページより https://www.aa-material.co.jp/products/ip/joint/metallic/metal_expansion.html</p>																																																																																																																							

(3) フレキの状況について

今回焼損が認められた乾燥排ガスの循環系統（乾燥機～サイクロン～循環ブロウ～熱風炉）に設置された仕様①及び②のフレキの状況について、本実証研究とB処理場における実証設備の状況の調査結果を表6に示す。

表6 各箇所のフレキの仕様と状況

設置箇所	フレキ種類	鹿沼市（稼働7年）	B処理場（稼働4ヶ月）
サイクロン～循環B （-2kPa、100～120℃）	仕様①		
	仕様②	異常無し	異常無し
循環B～熱風炉 （+8kPa、120～130℃）	仕様①	今回焼損	
	仕様②		異常無し
熱風炉～乾燥機 （+6kPa、400～500℃）	仕様①	仕様③を設置。	
	仕様②		
乾燥機～サイクロン （-2kPa、100～120℃）	仕様①	仕様③を設置。	
	仕様②		

ただし、仕様①：キャンバスフレキ、仕様②：保護付きキャンバスフレキ、仕様③：金属フレキ

以上より、仕様①については本実証研究にのみ使用されており、循環ブロウ～熱風炉に設置された今回の火災箇所のみ問題が認められ、仕様②については設置場所に因らず問題は認められなかった。



図22 本実証の仕様②保護付きキャンバスフレキ



図 23 B 処理場の仕様②保護付きキャンバスフレキ

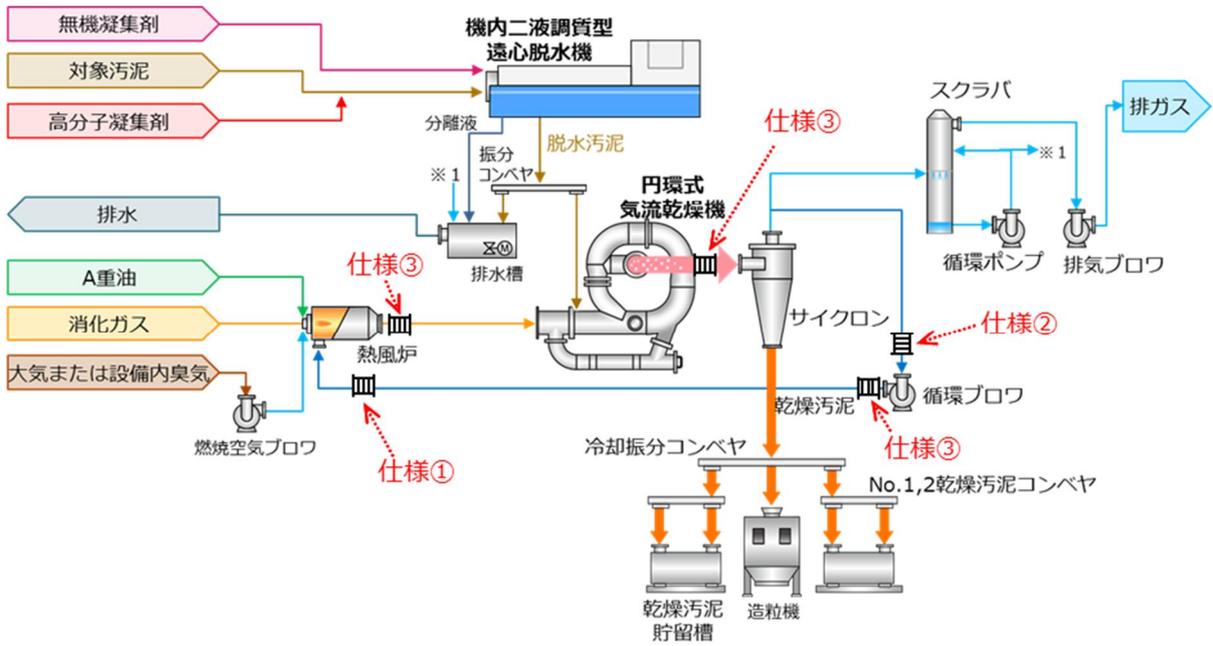


図 24 B-DASH 実証設備（鹿沼市）フレキ調査箇所

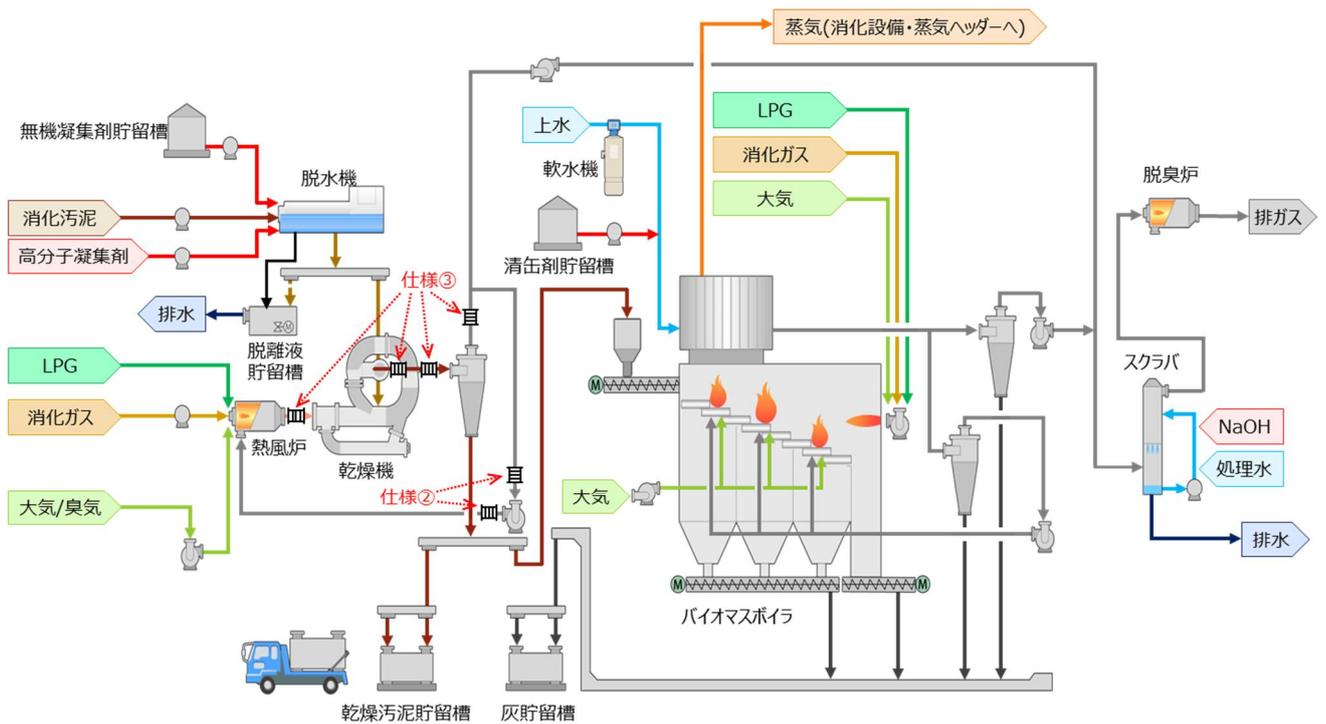


図 25 B-DASH 実証設備（B 処理場）フレキ調査箇所

(4) 再発防止対策および火災防止対策の水平展開について

以下の対策を実施し、火災の再発を防止する。

1) 設備仕様上の対策

【本実証研究における実証設備について】

- ・仕様①のキャンバスフレキについては耐摩耗性及びフレキそのものが発火しないことを考慮して仕様③のメタルフレキに変更する。
- ・サイクロン～循環ブロワ間に設置された仕様②については異常なし。一方で、火災事故時に高温下に晒された可能性が高いことから、念のため仕様③に変更する。

【他の設備（本実証設備以外の設備）について】

- ・仕様①のキャンバスフレキは採用せず、仕様②または仕様③を採用する。

2) 運転制御上の対策（全案件共通）

- ・循環ガスが減少した場合に強制的に乾燥機を停止する制御を追加し、乾燥不良が発生し、乾燥機内に汚泥が蓄積する前に乾燥機を自動で停止させる。概念図を図 26 に示す。

3) 点検整備上の対策（全案件共通）

- ・『下水道維持管理指針』（公益社団法人日本下水道協会）に記載されている項目およびガイドラインで示した項目（ガイドライン pp.127-128）に追加して、「伸縮継手のガス漏洩確認」「接続部のガス漏洩確認」を重点的に実施し、ガス漏れや異常高温の異常が確認された場合は直ちに乾燥機を停止することとする。

※本対策はガイドライン本編の正誤表にて反映した。

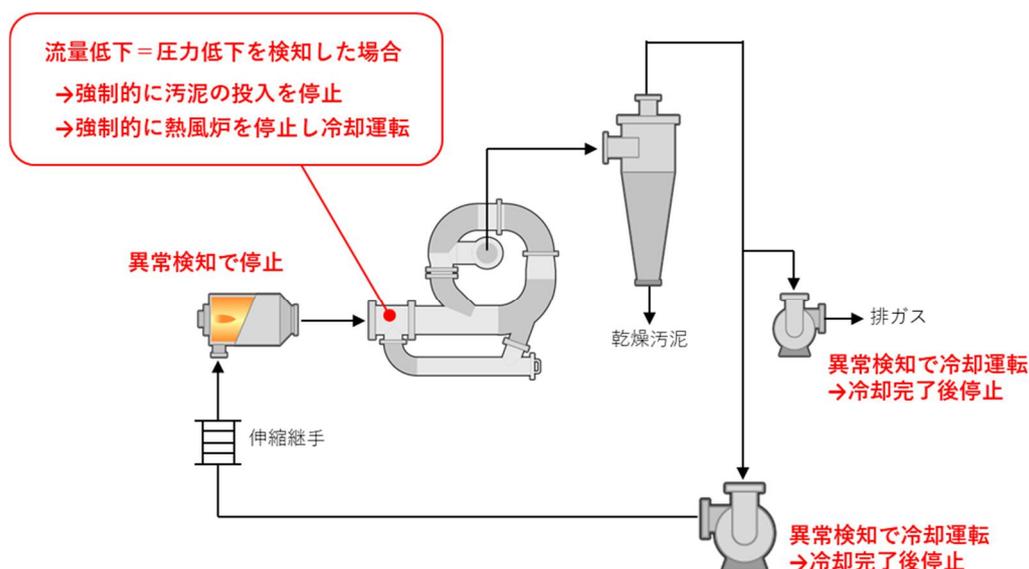


図 26 循環ガス流量低下時の自動停止イメージ図