

2-3-3 ポリ鉄添加によるガス化炉の安定運用について

流域下水道本部 技術部 北多摩一号水再生センター
(現 流域下水道本部 技術部 北多摩二号水再生センター)

河野 里名

1 はじめに

南多摩水再生センター（以下、「南多摩」という。）では、水処理において発生した汚泥をセンター内にある汚泥処理施設で脱水・焼却している。南多摩の焼却炉は、年間を通じた自燃運転に取り組み、汚泥焼却の補助燃料費を大幅に削減してきた。

しかし、2017年度に稼働を開始したガス化炉方式の焼却炉（以下、「ガス化炉」という。）である2号炉は、稼働当初は脱水ケーキの含水率（以下、「含水率」という。）が高かったために自燃運転が継続できなかった。また、りん溶融による煙道閉塞によって焼却炉が緊急停止することも問題だった。

そこで、含水率の改善とりん溶融防止に効果のあるポリ硫酸第二鉄（以下、「ポリ鉄」という。）の添加を開始したところ、2号炉は安定稼働ができるようになった。

一方で、ポリ鉄添加以降、熱回収炉内部には、ポリ鉄がりと未反応の状態の焼却炉に投入された際に生成する酸化鉄を含む焼却灰が堆積するようになった。同じ堆積物は煙道周辺にも確認されたことから、酸化鉄による煙道閉塞が起こる可能性が生じた。

そこで、過去の運用実績や水質分析結果を参考に、ポリ鉄添加及び余裕率管理の検討を行い、ガス化炉に適した運用方法を見出すことにした。

2 南多摩の焼却炉の概要

2.1 焼却炉の運用状況

南多摩は、多摩市及び稲城市の下水を中心として処理を行う分流式の水再生センターである。1日の処理水量は概ね11万 m^3 、汚泥処理量は、脱水ケーキ換算で約80トン/日である。焼却炉は、流動床炉方式（以下、「流動炉」という）の1号炉、ガス化炉の2号炉があり、通常はどちらか1炉の運用を行っている。

南多摩の焼却炉は、年間を通して補助燃料を使用しない自燃運転に取り組んでいる。自燃運転に必要な含水率は1号炉で76%以下、2号炉で74%以下であり、いずれも他センターに比べて低い含水率が求められる。そこで、南多摩では、脱水性の良い重力濃縮汚泥（以下、「濃縮汚泥」という。）の濃度を保持するとともに、含水率の目標値によって余剰汚泥の割合を調整することで、自燃運転の維持に努めている。

2.2 2号炉焼却フロー

2号炉は、焼却能力110トン/日のガス化炉である。焼却フローを図1に示す。

ガス化炉には、脱水ケーキと脱水ケーキの水分を少なくした乾燥汚泥の2種類の汚泥を投入する。自燃運転時の投入割合は、脱水ケーキが60~70%、乾燥汚泥が30~40%である。ガス化炉では、炉内の空気比を抑えた、不完全燃焼の焼却によってメタンや一酸化炭素などの可燃性ガスを発生させる。その後の熱回収炉では、ガス化炉で発生した可燃性ガスの焼却を行うことによって、炉内温度が上昇して N_2O の分解が進む。また、高温の余熱

は流動空気、乾燥汚泥の生産、バイナリー発電と多方面に用いられている。

2号炉は、水分量の異なる2種類の汚泥を投入することで、炉内温度を保ち、自燃運転を継続する機能がある。しかし、乾燥汚泥の生産は、乾燥空気予熱器で回収された余熱を熱源として用いるため、乾燥汚泥の生産量には限りがあり、含水率の上昇や焼却炉への汚泥投入量が少ないといった炉内温度が低下しやすい状況が続くと、乾燥汚泥は枯渇してしまう。脱水ケーキのみの投入でも焼却は継続できるが、自燃運転はできない。

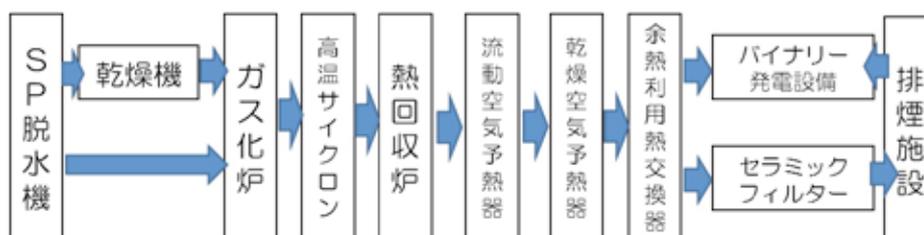


図1 2号炉焼却フロー

2.3 2号炉と自燃運転

自燃運転時の2号炉では、流動炉の1号炉に比べて電力量が43%減、N₂O発生量が86%減と大きなメリットがある。そのため、南多摩では2号炉の稼働を優先させている。

一方、2号炉の自燃運転が停止すると、図2のとおり、補助燃料費の増加だけでなく、乾燥汚泥の投入停止による汚泥処理の停滞、さらには1日のN₂O排出量が3kgから42kgに増加するなど、様々な問題を引き起こす。

そのため、2号炉の自燃運転の確保は、南多摩の焼却炉運用の基本となっている。

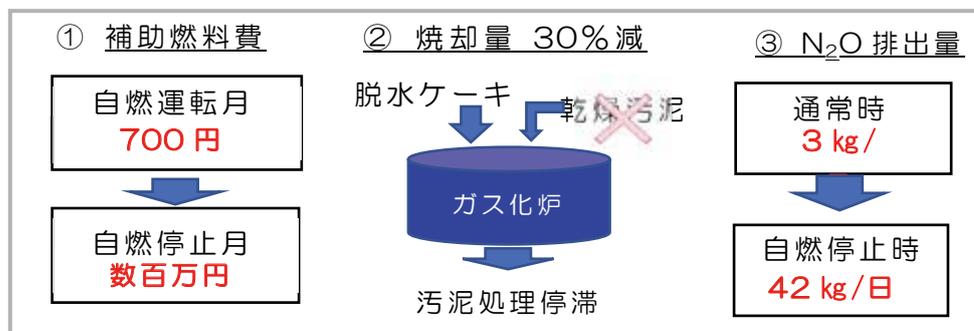


図2 2号炉自燃停止時の影響

3 2号炉稼働当初の問題点

2号炉稼働当初の問題は、自燃運転の停止とりん溶融による煙道閉塞であった。

3.1 2号炉の自燃運転条件

自燃運転停止の要因は、含水率を2号炉の自燃運転基準である74%以下にできないことにあった。

含水率を下げるために、余剰汚泥の引き抜き量の削減や、凝集剤の検討に取り組んだものの、含水率を安定的に下げることが難しく、2号炉の自燃運転は継続できなかった。

含水率が高い時には、脱水性の良い濃縮汚泥の濃度が低い傾向があった。南多摩は濃縮槽が比較的小さく、下部に堆積する汚泥が少ないために、濃縮汚泥濃度が不安定になりやすい。特に水温の高い夏季は、腐敗により汚泥の沈降性が悪くなるため、濃縮汚泥濃度が低く、含水率は高くなり、自燃運転は全くできなかった。

また、図3のように、濃縮槽汚泥界面の高さによって総合放流水のりん濃度は大きく変動する傾向があった。

そのため、PAC添加日数は年間84日と多く、りん処理の面からも濃縮汚泥の沈降性を改善する必要があると考えられた。

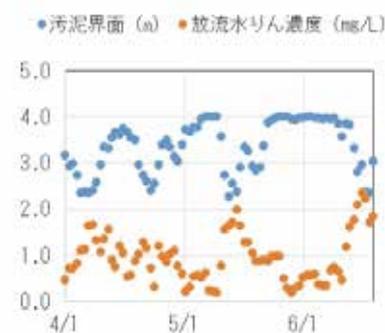


図3 濃縮槽界面とりん濃度

3.2 りんの溶融とポリ鉄添加の経緯

一般的に、脱水ケーキ中のりんは、鉄やカルシウムなどの金属イオンと結合し、高温でも安定した状態にあるとされている。しかし、金属イオンよりもりんが多いときには、りんはナトリウムイオンなどと結合し、高温で溶けやすい低融点のりん化合物（以下、「低融点りん」という。）となる。低融点りんは、850℃以上の焼却炉内で溶けて、煙道等に吸着し、煙道を狭めるほどに堆積すると炉内の空気の流れが滞るようになる。

東京都では、N2O発生抑制の観点から850℃以上の高温焼却を推奨している。一方で、A2O法などりん処理に特化した高度処理系列の導入が進み、汚泥中のりんの割合は上昇している。その結果、降雨による金属イオンの流入が少ない分流式の水再生センターを中心にりん溶融が原因の煙道閉塞が発生するようになってきた。

分流式の南多摩では、通常の流動炉である1号炉において2013年頃から煙道閉塞の兆候が見られていた。一方、稼働前であった2号炉は、清瀬水再生センターのガス化炉ではりんの溶融による煙道閉塞が確認されなかったことと、図4に示すとおり、りん溶融が起こる850℃以上の設備を通過する焼却灰は全体の20%程度であるため、煙道閉塞を起こすほどの溶融はないものと考えられていた。

しかし、稼働を開始すると、熱回収炉と流動空気予熱器に大量のりん溶融物質が発生して、煙道を塞ぎ、2号炉は何度も緊急停止することとなった。

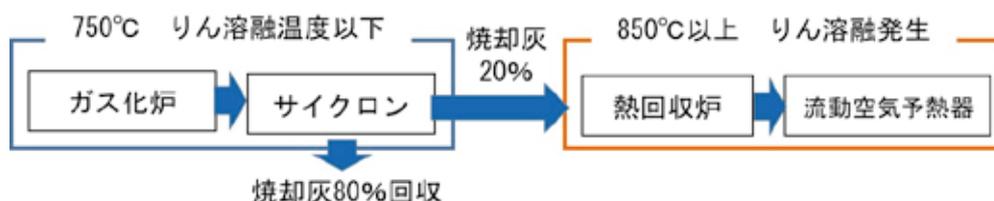


図4 2号炉の温度とりん溶融の関係

そこで、2018年8月から焼却炉の煙道閉塞防止を目的としたポリ鉄の常時添加を開始

した。

南多摩においてポリ鉄添加が可能な箇所は、分配槽（濃縮槽手前）・混合槽（脱水機手前）及び汚泥ホップの3か所である。

ポリ鉄には、りん溶融防止のほかにも、沈降性の悪い汚泥を沈みやすくする汚泥沈降促進効果がある。そこで、ポリ鉄の添加箇所として分配槽を選択し、濃縮槽の汚泥沈降を促進して、含水率を改善することで、2号炉の自然運転の安定化につなげようと考えた。

4 濃縮槽へのポリ鉄添加の効果

4.1 ポリ鉄添加による改善点

ポリ鉄添加前の問題点と添加後の改善効果を図5に示す。

ポリ鉄添加後は、焼却炉の緊急停止の原因であったりん溶融がなくなり、煙道閉塞を回避できるようになった。

含水率は、自然運転条件を下回る73%（年平均）となったことで、特に自然運転の難しかった夏季の自燃率が0%⇒97%に向上し、年間を通して自然運転ができるようになった。

濃縮槽汚泥界面（年平均）は、添加前は濃縮槽高さ4mに対して3.5mで汚泥が越流しやすい状況にあったものの、添加後は2.8mに低下して、汚泥界面が安定した。これにより年間のPAC使用量は90m³から21m³へと大幅に削減された。

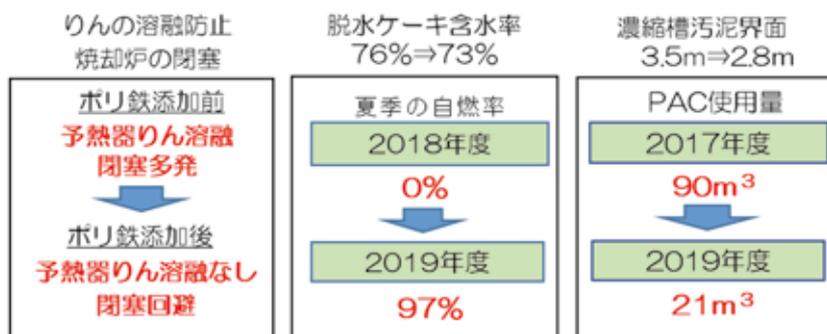


図5 ポリ鉄添加の効果

4.2 余裕率

ポリ鉄添加量は、りん溶融を抑えられる余裕率（閉塞抑制指標）1を目指して調整した。

余裕率は、焼却炉の煙道閉塞を防止するための重要な指標で、りんと結合して高温で安定的な化合物を生成する代表的な4種の金属イオン（鉄（Fe）・マグネシウム（Mg）カルシウム（Ca）アルミニウム（Al））の量と、りんの割合を下記の実験式で求めたものである。

$$\text{余裕率} = \left\{ \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{M(\text{Fe}_2\text{O}_3)} \times 2 + \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{M(\text{Al}_2\text{O}_3)} \times 2 + \frac{\text{CaO}}{M(\text{CaO})} \times \frac{2}{3} + \frac{\text{MgO}}{M(\text{MgO})} \times \frac{2}{3} \right\} / \left\{ \frac{\text{P}_2\text{O}_5}{M(\text{P}_2\text{O}_5)} \times 3 \right\}$$

※M(i) [g/mol]：化合物iの分子量

図-6 左図に示すとおり、南多摩の脱水ケーキ中のりんは、金属イオンと結合したものが主体であるが、りんの割合が多いため、ナトリウムイオンなどと結合した低融点りんが存在する。この汚泥を焼却すると、低融点のりんが高温で溶けて、焼却炉が煙道閉塞しやすい状況になる。

そこで、ポリ鉄を添加し、りんと鉄を反応させることで低融点のりんをなくした余裕率1の状態にすると（図6中図）りんと金属イオンが過不足なく最も安定な状態となる。

しかし、汚泥中のりんの量は、汚泥の引き抜き状況や、降雨によって変化するため、通常は、りん溶融を確実に防止できる余裕率1を超える管理を行う。余裕率1を超えると、残留した鉄イオンが炉内で酸化鉄に変化するが、流動炉では、酸化鉄が焼却炉の緊急停止などの重大な問題を起こすことは少ないとされている。

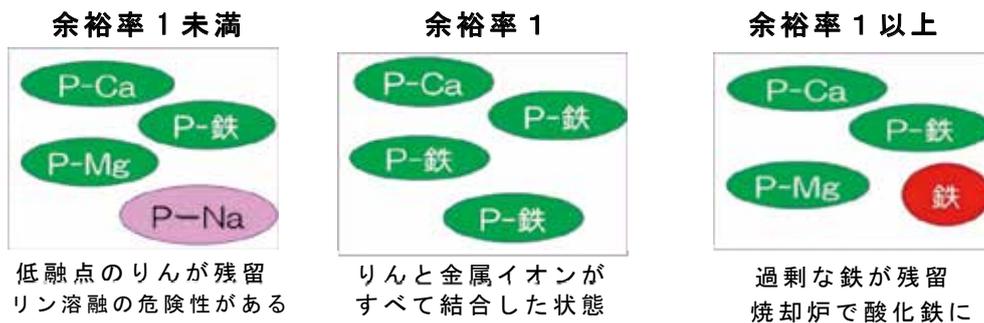


図 6 余裕率と脱水ケーキ中の各成分

4.3 ポリ鉄添加後の課題

ポリ鉄添加後の2号炉は、順調に稼働を続けた。余裕率も概ね1前後で運用することができた。しかし、運用開始から3か月後に点検したところ、熱回収炉に大量の焼却灰が堆積しており、流動空気予熱器への煙道が最大でも20cmしか開いていないことが分かった。

焼却灰の堆積状況は、図7左図のとおりであり、煙道入口部分は堆積が少なかったものの、煙道から斜め上に向かって堆積量が増加していたため、堆積物が崩れた場合はすぐに煙道が埋没する状況にあった。3か月の稼働でこの堆積量では長期運用は行えないため、堆積する焼却灰の量を削減する必要があった。

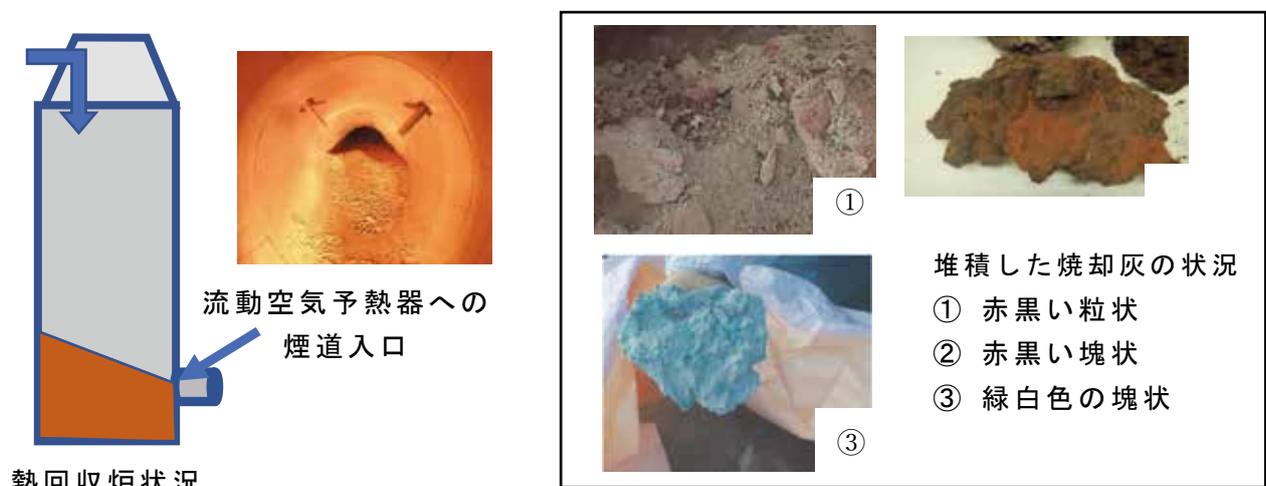


図 7 熱回収炉堆積状況

表 1 熱回収炉の堆積焼却灰の性状

色	堆積量	形状	硬さ	重さ	余裕率	考えられる原因
赤黒	多い	塊・粒形	硬い	重い	1.3	酸化鉄を含む焼却灰
緑白	少ない	塊	柔らかい	軽い	1.0	リンの溶融物

堆積した焼却灰には、表 1 に示すとおり、赤黒いものと緑白色のもの 2 種類あった。堆積量が多かったのは、図 7①②のような赤黒い焼却灰であり、20cm を超える大きな塊から粒状のものまで数多く存在していた。塊状のものは比重が重く、余裕率も 1.3 と高いため、酸化鉄を多く含んでいると考えられた。

緑白色の堆積物は、リンの溶融物質であり、堆積量は少なく、堆積した焼却灰の上部に多く存在していたことから、多くが 2 号炉停止時の温度低下とともに壁面から剥離・落下したものと考えられた。

鉄イオンが過剰な汚泥を焼却した際に生成する酸化鉄を多く含む焼却灰と、鉄イオンなどの金属イオンが不足している汚泥を焼却した際に生成するリン溶融物質という通常は共存しない 2 種類の焼却灰が堆積していたのは、ポリ鉄添加後の攪拌が不足していたためと考えられた。

4.4 酸化鉄の生成

3 か月の短い運用期間で熱回収炉に大量の焼却灰が堆積した理由として、炉内の空気の流速とポリ鉄添加による焼却灰の性状の変化が考えられた。

2 号炉は、焼却炉出口の誘引ファンによって空気を引かれるため、炉内には入口から出口に向かう空気の流れが発生している。流速は流路の広さによって変化し、熱回収炉のように内部が空洞で大型の設備では、流速が低下して焼却灰が落下・堆積しやすいと考えられる。

さらに、ポリ鉄の添加によって比重の重い酸化鉄が生成したことで、焼却灰の堆積量が増加していったと考えられる。

これらのことから、熱回収炉を持つ 2 号炉の長期運用には、ポリ鉄の添加量を減らし、酸化鉄の生成を抑えることが必要であると考えられた。

5 ポリ鉄添加方法の見直しと対策

5.1 ポリ鉄添加と余裕率管理

東京都では、図 8 に示すように、ポリ鉄を多めに添加して焼却灰の余裕率 1 を超える管理を行っている水再生センターが多い。しかし、流速が低下しやすい熱回収炉を持つ 2 号炉では、余裕率 1 以上の管理を行うと、酸化鉄を含む焼却灰の堆積量が増え、煙道を塞ぐ可能性がある。

一方で、2 号炉は、リン溶融が起きる温度となる熱回収炉手前で焼却灰の多くを回収しているため、流動炉に比べてリン溶融による閉塞は起こりにくい。そのため、運用方法に

よっては、余裕率1以下でも長期稼働が可能であると考えられた。

そこで、2号炉に適した余裕率管理を目標として、次の4つの対策を講じた。

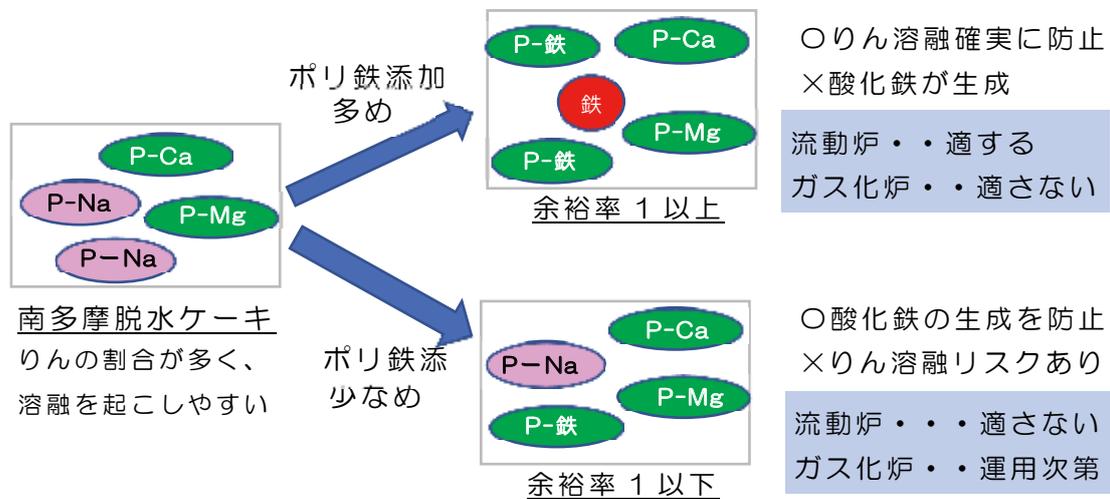


図8 ポリ鉄添加量による生成物の違いと焼却炉への影

5.2 対策1 攪拌効果の見直し

熱回収炉における焼却灰の堆積量の増加は、ポリ鉄添加後の攪拌不足も一因と考えられた。そこで、攪拌効果の見直しを行った。

南多摩のポリ鉄の添加箇所は、濃縮槽手前の分配槽である。2号炉の自然維持には、濃縮汚泥の性状を安定させる必要があるため、添加箇所の変更は難しい。そこで、添加箇所を変えずに、十分に攪拌できる方法がないかを考えた。

分配槽にポリ鉄を添加した後、濃縮槽では汚泥とポリ鉄がしっかりと混ざり合い、滞留時間も比較的長いために、りんとの反応時間を十分に確保できる。(図9)しかし、濃縮槽以降の混合槽は攪拌強度が弱く、脱水機前の攪拌槽は滞留時間が不足しており、十分な効果が出ないと考えられた。そこで、添加したポリ鉄が全量濃縮槽でりんと反応するように添加量を調整することとし、その目安を濃縮槽越流水りん酸性りん濃度とした。

濃縮槽越流水りん酸性りん濃度が目安になるのは、越流水中にりん酸性りんが検出されるときは、図10左図のように、濃縮汚泥中の鉄イオンは全てりんと結合した状態にあり、余ったりん酸性りんが越流水として流出している状況だからである。一方、越流水にりん酸性りんが含まれないときは、図10右図のように、汚泥中でりんより鉄イオンが多い状態であり、汚泥中に残った鉄イオンは焼却炉で酸化鉄に変化する可能性がある。



図9 汚泥処理工程の攪拌効果

図10 濃縮槽でのポリ鉄の反応機

5.3 対策2 熱回収炉温度設定の見直し

熱回収炉で堆積する焼却灰の削減には、ポリ鉄添加量を減らす必要がある。一方、ポリ鉄量を減らすことは、焼却炉でのりん溶融物質の増加につながり、煙道閉塞しやすくなる。そのため、2号炉は、りん溶融物質が増加しても、煙道閉塞や緊急停止を起こさないりん溶融に強い焼却炉を目指す必要があった。

2号炉のりん溶融の多くは、熱回収炉と流動空気予熱器で発生していたが、2号炉の緊急停止の原因は常に流動空気予熱器の閉塞だった。

流動空気予熱器は、余熱を効率的に回収するため、図11のような蜂の巣状の配管構造になっている。配管内には、りんの溶融対策として堆積物を払い落とすチェーンを設置しているが、効果は少なく、配管は付着物により閉塞した。熱回収炉でもりん溶融は起きていたが、流動空気予熱器よりも流路の広い熱回収炉は閉塞することはなかった。

また、流動空気予熱器以降の施設では、りん溶融の発生は少ないことから、2号炉のりん溶融及びりん溶融物質の堆積は850℃以上の設備や煙道で発生すると推測された。

そこで、熱回収炉出口温度を下げて850℃とすることで、後段の流動空気予熱器の温度が850℃を下回るよう運用した。(図12)

この運用でりん溶融は、2号炉の中で唯一850℃以上となる熱回収炉に集中するが、熱回収炉内でのりん溶融物質は壁面上部に付着することが多く、煙道付近には少ない。壁面に付着したりん溶融物質が落下・堆積したとしても、堆積物の合計量(酸化鉄を含む焼却灰+りん溶融物質)が削減されることで、2号炉の長期運用が可能になると考えられた。



図11 流動空気予熱器内部

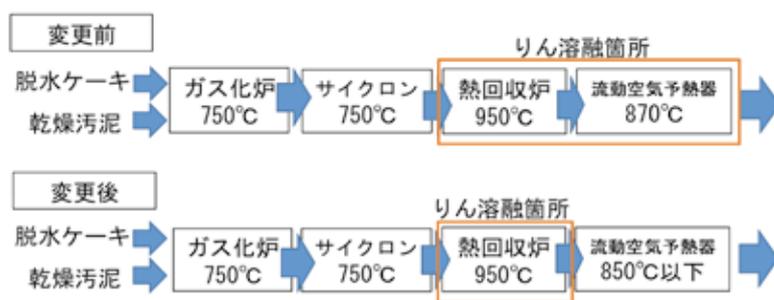


図12 温度設定の変更とりん溶融箇所

5.4

対策3 ポリ鉄添加量の見直し

2020年度より分配槽におけるポリ鉄添加量の見直しを始めた。ポリ鉄添加量は、過去の運用実績等から40L/時を基本とした。

2020年度の5月～10月の余裕率の変化を図13に示す。余裕率は降雨の影響を受けやすく、降雨後はポリ鉄添加に関係なく数値が上昇する。そのため、余裕率は、降雨の影響を受けにくい月中央値を記載した。調査期間における余裕率は、降雨が続いた7月は1.1を超えたが、その他の月は概ね0.9～1.0で推移した。

図14に余裕率別の測定回数を示す(n=53)。余裕率の数値は、0.8～1.2が多くなっていた。余裕率0.8以下が少ないことから、降雨が少ない日でも極端に余裕率が低下することはないことが確認され、40L/時添加は適正と考えられた。

運用期間中の2号炉は、焼却灰発生率の低下や、誘引ファンの出力上昇といった煙道閉塞の傾向を示す数値の変動はほとんどなく、安定運用を続け、4月～10月の7か月連続稼働を実現した。

停止後に熱回収炉内部を確認したところ、以前の3か月運用時よりも堆積物は減少しており、煙道も確保されていた。

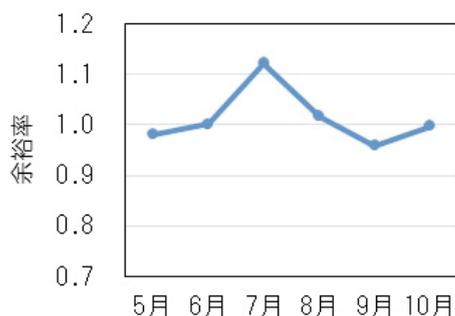


図13 2020年度5月～10月の余裕率

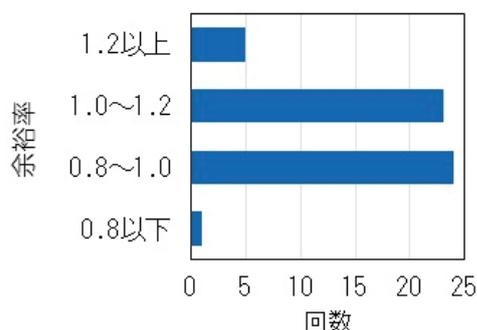


図14 2020年度5月～10月の余裕率別測定回数

5.5 対策4 2号炉に適した余裕率管理の構築

夏季含む7か月連続運用の実績を参考にして、2号炉に適した余裕率管理の構築を目指した。

調査期間は2020年12月～2021年11月である。

南多摩の焼却炉のりんの溶融による煙道閉塞は、降雨による金属イオンの流入が少ない冬季に起こりやすい。そのため2020年度冬季の余裕率は、上半期の運用実績から、降雨が少ない5月・6月の余裕率0.9～1.0を目標とした。一方、閉塞が起こりにくい春以降（2021年度4月～11月）は酸化鉄の生成量の削減につながるよう余裕率の目標を0.8～1.0とした。

調査期間中の分配槽におけるポリ鉄添加量は、冬季が48L/時（脱水ケーキ1トン当たり約0.5L）春以降が32～40L/時（脱水ケーキ1トン当たり約0.4L）であった。

調査期間中のポリ鉄添加量と濃縮槽越流水りん酸性りん濃度の月別の最低値を表2に示す。なお、他の調査等により、本調査の条件での余裕率測定が2回以下の月は、2か月まとめて集計した。

濃縮槽越流水りん酸性りん濃度は不検出の日はなかった。このため、調査期間を通じポリ鉄添加量は濃縮槽で反応できる上限を下回る量だったと考えられた。一方、ポリ鉄添加量が48L/時の12月～3月のりん酸性りん濃度は0.1～0.2mg/Lとほぼ不検出に近い数値であったことから、濃縮槽で反応できるポリ鉄添加量の上限は48L/時であると推定した。

表2 ポリ鉄添加量と濃縮槽越流水のりん酸性りん濃度測定結果

	12月	1月	2月・3月	4月	5月	6月	7月	8月・9月	10月	11月
ポリ鉄添加量 (L/時)	48			40	40→32	32				40
濃縮槽越流水りん酸性りん濃度 (mg/L)	0.2	0.2	0.1	0.8	0.5	1.2	3.5	2.9	2.5	0.2

また、ポリ鉄添加量と余裕率(目標値及び測定値)の結果を表3に示す。

12月～4月の余裕率は、目標値0.9～1.0に対して測定値0.94～1.04となり概ね目標どおりの管理ができた。煙道閉塞の起こりやすい冬季も、焼却灰発生率の低下や誘引ファン

の出力上昇など煙道閉塞の指標となる項目に問題はなく、安定した運用が続いた。

4月からは、ポリ鉄添加量を標準である40L/時とし、降雨量の増加によって、余裕率が上昇してきたGW明けから10月までは添加量を20%減の32L//時とした。その間の余裕率は、ほぼ目標の範囲内である0.83~1.04で推移した。

以上述べてきた4つの対策を行った結果、2号炉は、2020年12月から2021年11月にかけて自燃運転を維持しつつ11か月間稼働することができ、構築した2号炉の余裕率管理が適切であったことが確認できた。

表3 ポリ鉄添加量と余裕率

		12月	1月	2月.3月	4月	5月	6月	7月	8月・9月	10月	11月
ポリ鉄添加量 (L/時)		48	48	48	40	40→32	32	32	32	32	40
余裕率	目標値	0.9~1.0				0.8~1.0					
	測定値	0.94	0.92	1.04	0.95	0.83	0.95	1.04	0.92	0.97	0.95

6 まとめ

本調査の結果、以下のことが確認された。

- ・分配槽へのポリ鉄添加によって、脱水ケーキ含水率の安定化による2号炉の自燃運転の継続と、りん溶融による焼却炉の煙道閉塞防止を実現した。
- ・ポリ鉄の添加後、熱回収炉では焼却灰の堆積量が増加、2号炉の長期運用には焼却灰の堆積を減らす必要があった。
- ・ポリ鉄添加後の攪拌効果を見直し、攪拌不足による酸化鉄の生成を抑制した。
- ・りん溶融が起こる設備の温度管理を見直し、煙道閉塞を起こしやすい流動空気予熱器のりん溶融を抑制した。
- ・2号炉に適した余裕率管理を構築した結果、2号炉は11か月の長期運用を実現した。