

兵庫西汚泥溶融処理設備での 高濃度クロム含有下水汚泥溶融システムと運転状況

Melting System to Process Sewage-sludge Containing High Concentration Chromium and Operating Situation in Hyogo-Nishi Sewage Sludge Melting Treatment Facility



坂井義広*
Yoshihiro Sakai



石井 豊**
Yutaka Ishii



曲健太郎***
Kentarou Magari



芦田直行***
Naoyuki Ashida



吉田成希*
Shigeki Yoshida

当社は、兵庫西流域下水汚泥広域処理場の汚泥溶融設備の1系列目（全体2系列）を完成させ、2010年4月より本格稼働を開始している。同設備で処理する下水汚泥は高濃度のクロムを含有しているため、生成スラグからの六価クロム溶出を抑えるプロセスが必要となる。まず循環流動焼却炉で燃焼に必要な空気量を絞った抑制燃焼を行い、六価クロムの発生を抑えた焼却灰を生成する。これを巡回灰溶融炉で高温溶融したのちに急冷し、クロムをスラグ中に封じ込める。スラグは、最終的には道路用溶融スラグ細骨材として再利用が可能となる。

ここでは高濃度クロム含有下水汚泥焼却溶融システムと運転状況について紹介する。

Kobelco-Eco Solutions has completed the first-line of the sludge melting treatment facilities in Hyogo-Nishi Sewage sludge treatment plant and started operation since April 2010. Due to high concentration of chromium in the sewage sludge, Melting-process for leaching-out control of hexavalent chromium is required. Pyrolysis combustion of low-air-ratio is adopted in circulating fluidized bed incinerator to prevent producing hexavalent chromium in incinerated ash. And by quenching after at high melting temperature in swirl flow ash melting furnace, chromium is shut in slag safely. Slag can be reused as molten slag fine aggregate for road construction. We introduce melting system to process sewage sludge containing high concentration chromium and operating conditions.

Key Words :

下 水 汚 泥	Sewage sludge
六 価 ク ロ ム	Hexavalent chromium
抑 制 燃 焼	Pyrolysis combustion
溶 融 ス ラ グ	Melting slag
旋 回 灰 溶 融 炉	Swirl flow ash melting furnace

【セールスポイント】

- ・熱分解炉での抑制燃焼により六価クロムの生成を抑制できる。
- ・塩基度の適正な管理および、溶融炉での高温溶融、急冷によりスラグからの六価クロムの溶出を抑制できる。
- ・オンラインで焼却灰の性状を管理することで、効率良く安全なスラグの生成ができる。

まえがき

下水汚泥中には重金属が含まれている場合があり、処理方法によっては、生成物からの溶出が問題となる。特に、汚泥に高濃度のクロムが含有されている場合、通常の焼却処理を行うと有毒な六価クロムへ酸化されてしまう。当社が実施した実験の結果、焼却に必要な空気を絞った抑制燃焼により、クロムの酸化を抑え、焼却灰からの六価クロム溶出量が低減できることを確認した。しかし、「土壤の汚染に係る環境基準」の溶出量基準を満足することはできなかった。そこで、重金属類をスラグ中に封じ込め可能な溶融処理方法を検討した。

現在、兵庫西流域下水汚泥広域処理場で処理されているような10 000 ppmを超える高濃度クロム含有汚泥の処理は国内で類を見ず、コークスを利用した強還元雰囲気下で下水汚泥を直接溶融する方式が採用されていた。一方当社は実証実験を重ね、焼却灰を酸化雰囲気下で溶融したスラグでも、クロムを安定的にスラグ中に封じ込めることが可能な処理プロセスの開発に成功した。各種実証実験を通じて、溶融過程におけるクロムの挙動に関して得られた知見を以下に示す。¹⁾

- ・溶融温度の違いにより、スラグ中のクロムの化合物形態は変化する。
- ・灰中に六価クロムが含まれていてもその大部分は、酸化雰囲気化でも高温にすることで、三価クロムへ還元される。

表1 設備概要

処理量	145 WSt/d × 2 系列 (33 DSt/d : 含水率77 %の標準汚泥として)
処理方式	循環流動焼却炉 (抑制燃焼) + 旋回灰溶融炉
排ガス処理設備	サイクロン式およびろ過式集塵 + 洗煙処理 + 触媒脱硝
使用燃料	都市ガス
排ガス基準値 (※)	ばいじん : 0.008 g/m ³ _N 以下 硫黄酸化物 : 11 ppm 以下 窒素酸化物 : 30 ppm 以下 塩化水素 : 3 ppm 以下 ダイオキシン類 : 0.1 ng-TEQ/m ³ _N 以下
溶融スラグ管理基準	一般廃棄物, 下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグ JIS A 5032
操業開始日	4号溶融設備 : 2010年4月1日 5号溶融設備 : 2011年4月1日 (予定)

※排ガス基準値は酸素濃度12 %換算値

- ・灰の塩基度 (灰組成のうち酸化カルシウムと二酸化ケイ素の重量比で示される指標) を1以下に調整し、溶融温度を1 400 °C以上、かつその温度から急冷することで、溶融スラグからの六価クロムの溶出を抑制できる。
- ・灰中の全クロム濃度を50 000 mg/kg以下に抑えることで、溶融スラグの安定出滓が可能となる。

現在、兵庫県姫路市にある兵庫西流域下水汚泥広域処理場において、当処理プロセスを用いた溶融設備の操業を開始し、安定した運転操業を達成できている。

1. 設備概要

1.1 処理プロセス

本溶融設備の概要を表1に、処理フローを図1に4号溶融設備の全景を写真1に示す。当処理プロセスは、煩雑な操作をすることなく、前述の六価クロムの溶出抑制条件を容易かつ安定して満たせるように設計されている。以下に各工程の特長を紹介する。

1.1.1 汚泥供給

当処理場は、広域汚泥処理場であるため、周辺処理場より、含水率や塩基度など性状の異なる汚泥やし渣・沈砂が搬入される。前述のとおり、溶融スラグの塩基度を1以下に調整することが重要であるが、その際、各汚泥の性状が一定でないことが問題となる。処理する汚泥の性状、特に塩基度の変動幅が大きくなることで、塩基度の調整が困難になることが想定された。そこで、当処理場で処理される汚泥を塩基度の高いもの、中程度のもの、低いもの、およびし渣・沈砂の4種類に分類し、それぞれ熱分解炉へ定量供給することで、変動幅の縮小を図った。



写真1 4号溶融設備全景

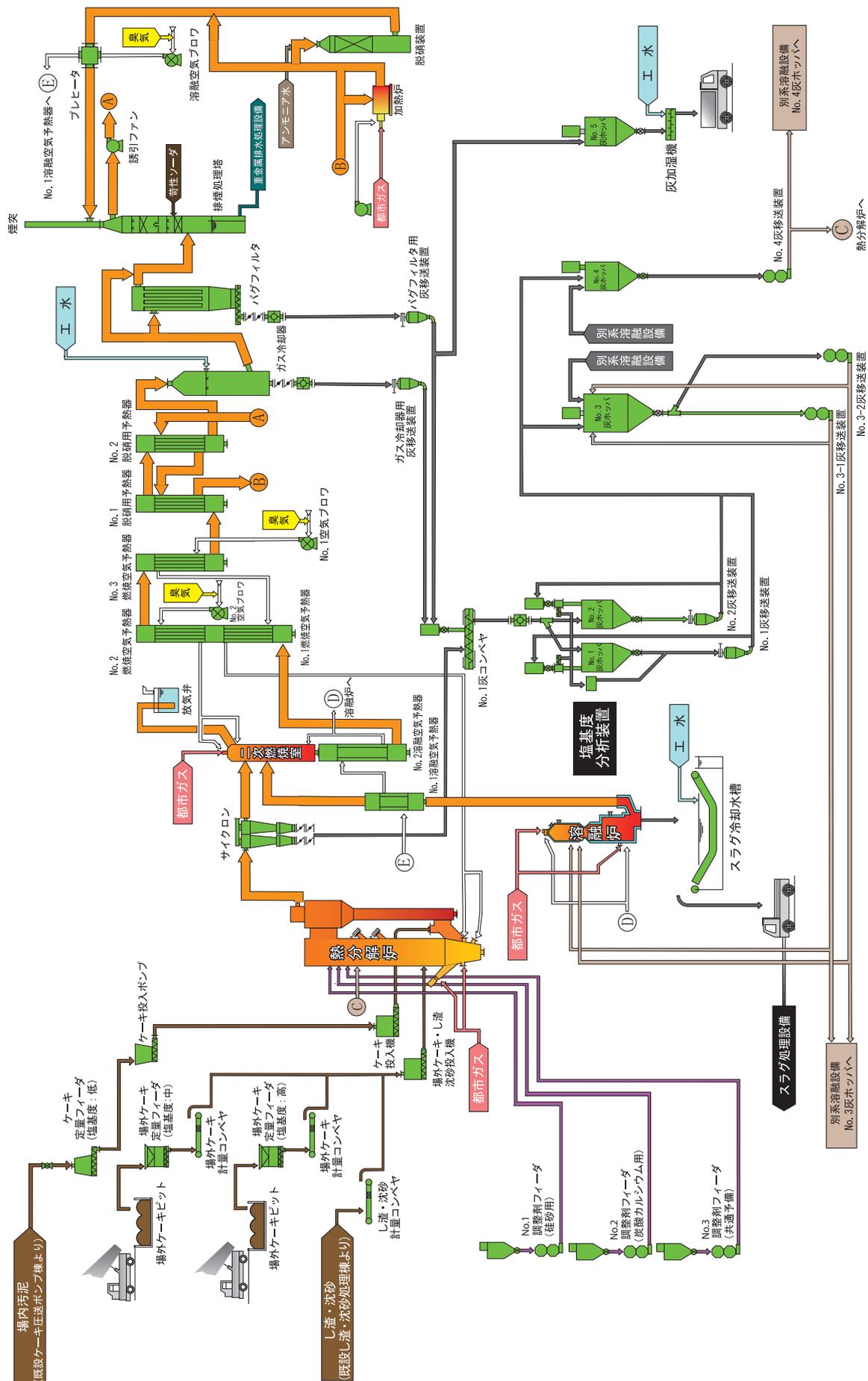


図 1 処理フロー図

1.1.2 抑制燃焼

汚泥を灰化するために熱分解炉で焼却処理を行う。熱分解炉では、六価クロムの発生を抑えるため、抑制燃焼（空気比1以下）により焼却処理する。安定した抑制燃焼をおこなうため熱分解炉は、循環流動焼却方式を採用した。循環流動焼却炉は、高温の流動砂を高速で循環させることにより、炉内温度を均一かつ高温に保持できる。この流動砂の循環が、抑制燃焼時に発生する砂層温度の低下を防ぎ、安定した抑制燃焼を可能にしている。

1.1.3 塩基度調整

塩基度調整剤は熱分解炉へ空気移送により投入され、焼却灰の塩基度調整が行われる。循環流動焼却炉内は攪拌混合性がよいため、焼却灰と塩基度調整剤を効率よく均一に混合させることができる。

1.1.4 完全燃焼

熱分解炉で生成された抑制燃焼灰は、後段のサイクロンで約9割が捕集される。未燃ガスを含む排ガスは、さらに後段の二次燃焼室へ導かれる。二次燃焼室では、完全燃焼に必要な燃焼空気を投入することで、炉内温度を850℃以上に維持し、シアンやダイオキシン類等の有害物質を酸化分解する。

1.1.5 排ガス処理

二次燃焼室から排出された排ガスは、熱回収設備で廃熱を回収したのち、排ガス処理設備へと導かれる。廃熱回収は輻射式熱交換器、多管式熱交換器で行われ、熱分解炉、二次燃焼室、および溶融炉に投入される各燃焼空気の予熱や、脱硝効率を上げるための再加熱に利用される。

排ガス処理設備は、バグフィルタ、排煙処理塔、脱硝装置で構成されている。それぞれ、ばいじん、硫黄酸化物、塩化水素、窒素酸化物を、表1に示す基準値以下まで除去したのち煙突より排出される。

1.1.6 塩基度管理システム

サイクロンおよびバグフィルタで捕集された焼却灰は、灰ホッパーで一旦貯留される。当社は、その貯留過程において塩基度分析装置により焼却灰の塩基度やクロム濃度等をオンラインで測定・管理可能なシステムを構築した。従来は、スラグの出滓状況の目視による推測や、分析業者による溶融スラグの分析により塩基度を把握していた。目視確認の場合は、定量的な把握が難しく、分析の場合は結果を得るまでに時間を要するため、管理基準を超過した場合は、的確かつ迅速な対応が困難であった。しかし、このシステムにより、六価クロムの溶出抑制条件を満足している焼却灰は溶融炉へ、満足していな

い焼却灰は熱分解炉へ返送し、再度塩基度調整を行うことが可能となった。また、測定結果をもって、熱分解炉へ投入している塩基度調整剤の投入量も調整が可能である。なお、塩基度分析装置の詳細は後述する。

1.1.7 灰溶融

溶融炉の形式は、立形旋回灰溶融炉である。焼却灰は水分や可燃分がほとんど変化しない均質な性状であるため、汚泥溶融方式と比較して炉内温度制御が容易で、良質なスラグが得られるという特長を有している。燃料は温室効果ガスの排出量が少ない都市ガスを採用した。

焼却灰は溶融炉側面から空気移送により炉内へ投入される。炉内へ吹き込まれた焼却灰は、壁面に形成されているスラグ層で捕捉され溶融し、壁面を伝って出滓口まで流れ落ちる。

前述のとおり、溶融スラグからの六価クロム溶出抑制には、1400℃以上での溶融が必要であり、適切な温度管理が求められる。そのため、炉内の温度監視装置として、耐火物内に埋め込んだ熱電対の計測結果から炉内温度の推定が可能なFMセンサーおよび、直接炉内温度を計測できる放射温度計を設置した。

さらに、溶融スラグを急冷するため、溶融炉出滓口の直下にスラグ冷却水槽を設置している。溶融炉出滓口より水槽内に落下したスラグはここで急冷され、フライトコンベヤによりスラグコンテナへ搬出される。また、出滓口は水封されており、外気の炉内への流入を防いでいる。これにより、出滓口付近の温度低下の防止が可能となっている。

溶融炉から排出される溶融排ガスは、二次燃焼室へ導かれ熱分解炉からの排ガスと合流し、後段の排ガス処理設備へ排出される。

1.1.8 スラグ処理

スラグコンテナへ搬出されたスラグは、スラグ処理設備へ搬送される。スラグ処理設備は、破碎機、磨砕機、搬送コンベヤ、スラグバンカ等で構成されている。溶融スラグは粒度調整および磨砕処理を経て、製品スラグとなる。

1.2 塩基度分析装置の概要

前述のとおり、溶融スラグからの六価クロム溶出を抑制するためには、焼却灰の塩基度を1以下に管理する必要がある。また、燃料消費量の削減や耐火物の保護といった経済性、旋回溶融炉の安定出滓を考慮し全クロム濃度を50000 mg/Ash kg以下に抑える必要がある。

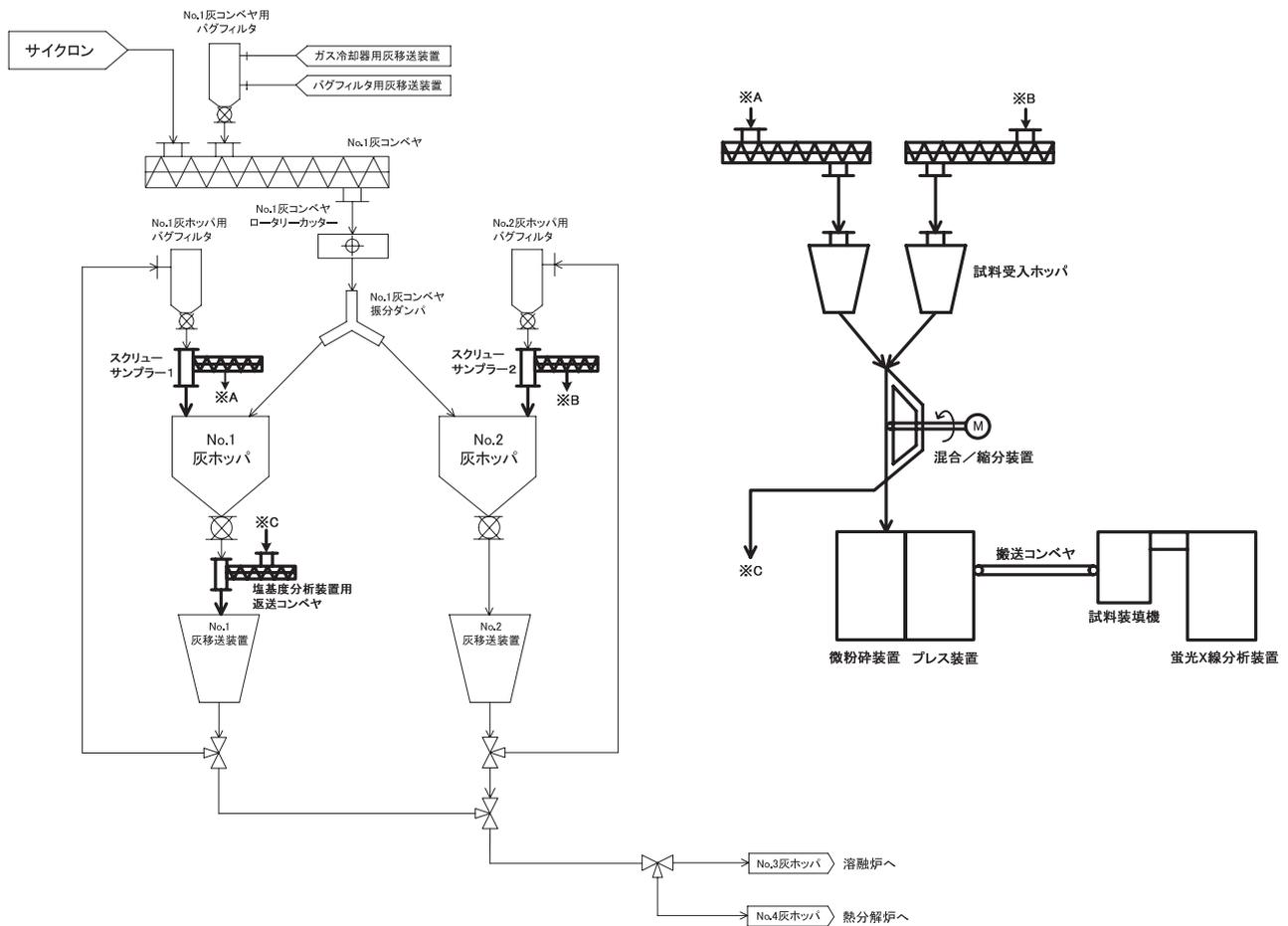


図2 分析・搬送設備フロー

従って、焼却灰の塩基度と全クロム濃度の分析を行い、その数値管理を行うことが重要となるが、試料のサンプリング、前処理および分析作業は非常に煩雑であるとともに熟練度を要する。

本設備では、運転員の負荷軽減と連続かつ安定的に分析結果を得ることを目的として、一連の作業を全自動で行えるオンライン型の前処理装置および蛍光 X 線分析装置（以下、塩基度分析装置）を導入した。

焼却灰の分析・搬送設備フローを図2に示す。

サイクロン・ガス冷却器・バグフィルタで回収された焼却灰は No.1 灰ホッパに貯留される。貯留された焼却灰は、No.1 灰移送装置により No.1 灰ホッパへ移送される。これは焼却灰を循環させ、性状を均質化することを目的としている。

その間、塩基度分析装置により焼却灰のサンプリング・分析を行い、性状監視を行う。ここで分析結果が判定基準を満足していなければ、熱分解炉への塩基度調整剤の投入量を変化させることにより調整が可能となっている。

No.1 灰ホッパが満杯になれば最終分析を行い、分析結果が判定基準を満足していれば No.3 灰ホッパへ移送し、溶融炉で焼却灰をスラグ化する。分析結果が判定基準を満足していなければ No.4 灰ホッパへ移送、熱分解炉への再投入により焼却灰の塩基度を再調整する。一方で、No.1 灰移送装置が No.3, 4 灰ホッパへ焼却灰を移送している間、No.1 灰コンベヤ振分ダンパを No.2 側に切り換え、No.2 灰ホッパ側で分析を継続することにより、連続分析を可能としている。これら一連の工程は中央監視制御装置で制御している。

次に塩基度分析装置の工程の説明を行う。前処理装置外観、塩基度分析装置外観写真を写真2, 3に示す。

焼却灰のサンプリングはスクリーサンプラーにより行われる。サンプリングされた焼却灰は試料受入ホッパにいったん貯留されたのち、混合/縮分装置へと送られる。混合/縮分装置では攪拌混合が行われ、均質化が図られたのち、縮分が行われる。縮分された焼却灰は前処理装置へ送られ、整形プレス

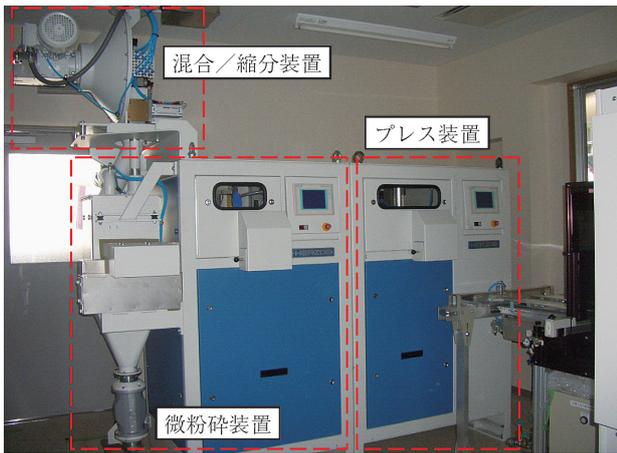


写真2 前処理装置外観

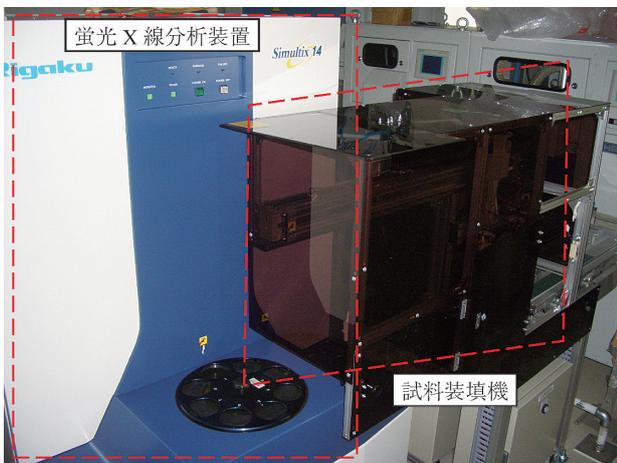


写真3 蛍光 X 線分析装置外観

され分析試料となる。分析試料は、搬送コンベヤ、試料装填機を介して蛍光 X 線分析装置へと送られ分析が行われる。分析が完了すると結果が中央監視制御装置へ送信される。また、分析が完了すると分析試料は、試料装填機、搬送コンベヤを介して前処理設備へと返送される。

2. 実負荷運転の実績

2.1 汚泥処理量および稼働率

2010年4月より操業開始した4号溶融設備における9月までの約6か月間の処理実績を表2に示す。計画処理量4 339 DSton に対して実績処理量は4 379 DSton と計画量を上回っており、順調に脱水汚泥を処理できている。

また、運転実績を表3に示す。計画汚泥投入時間とは、定期修繕等を除く9月末までの焼却運転を予定していた時間を示す。汚泥投入時間は、熱分解炉へ汚泥を投入していた時間を示す。汚泥投入時間を計画汚泥投入時間で除した設備稼働率は99 % とな

表2 4—9月間の処理実績

項目	単位	4—9月の累計計画値	4—9月の累計実績値
場内汚泥	DSton	3 357	3 061
場外汚泥（塩基度：高）	DSton	483	739
場外汚泥（塩基度：中）	DSton	318	392
し渣・沈砂	DSton	181	187
合計	DSton	4 339	4 379

※ DSton とは固形物量を表している。

表3 4—9月間の運転実績

項目	単位	4—9月の累計値
計画汚泥投入時間	h	3 292
汚泥投入時間	h	3 262
汚泥投入停止時間	h	30
設備稼働率	%	99.1



写真4 製品スラグ

り、初期トラブルが少なく安定操業ができています。

2.2 製品スラグの品質

製品スラグの外観を写真4に示す。本設備で生成されたスラグは1週間毎に品質確認を行いながら、最終的に1か月分を1ロットとして品質管理を行っている。製品スラグの分析結果を表4に示す。操業開始以降8月までの全てのロットにおいて溶出量試験および含有量試験とも基準値以下であり、問題ないことを確認した。この結果により、前述の六価クロムの溶出抑制条件で重要な焼却灰の塩基度管理、溶融炉の温度管理等が適切であることが確認された。

2.3 排ガス性状

2010年4月の操業開始以降に煙突出口で測定した

表4 製品スラグ分析結果

項目			基準値	4月分	5月分	6月分	7月分	8月分
有害物質の溶出量	カドミウム	mg/L	0.01以下	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満
	鉛	mg/L	0.01以下	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満
	六価クロム	mg/L	0.05以下	0.01未満	0.01未満	0.01未満	0.01未満	0.01未満
	ひ素	mg/L	0.01以下	0.002未満	0.002未満	0.002未満	0.002未満	0.002未満
	総水銀	mg/L	0.0005以下	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満
	セレン	mg/L	0.01以下	0.002未満	0.002未満	0.002未満	0.002未満	0.002未満
	ふっ素	mg/L	0.8以下	0.2未満	0.2未満	0.2未満	0.2未満	0.2未満
	ほう素	mg/L	1以下	0.2未満	0.2未満	0.2未満	0.2未満	0.2未満
有害物質の含有量	カドミウム	mg/kg	150以下	5未満	5未満	5未満	5未満	5未満
	鉛	mg/kg	150以下	96	39	37	63	98
	六価クロム	mg/kg	250以下	5未満	5未満	5未満	5未満	5未満
	ひ素	mg/kg	150以下	5未満	5未満	5未満	5未満	5未満
	総水銀	mg/kg	15以下	0.1未満	0.1未満	0.1未満	0.1未満	0.1未満
	セレン	mg/kg	150以下	5未満	5未満	5未満	5未満	5未満
	ふっ素	mg/kg	4 000以下	65	24	16	10未満	34
	ほう素	mg/kg	4 000以下	10未満	10未満	10未満	10未満	10未満

※9月は溶融運転を行っていないためスラグ分析データはなし。

表5 排ガス性状

項目	基準値	測定値
ばいじん	g/m ³ _N	0.008以下
硫黄酸化物	ppm	11以下
塩化水素	ppm	3以下
窒素酸化物	ppm	30以下
ダイオキシン類	ng-TEQ/m ³ _N	0.1以下

※表中の数値は全て酸素濃度12%換算値

排ガス性状を表5に示す。全ての項目で基準値を満足していることが確認された。

むすび

前述のとおり、4号溶融設備は、2010年4月からの操業開始以降、順調に操業を継続している。また、生成された溶融スラグからの六価クロムの溶出も抑制できており、当社が実証実験等を行って得た知見を、実処理設備での操業に反映できていること

を確認した。

2011年4月からは、現在試運転中である5号溶融設備も操業開始予定である。今後も、これまでに得られた知見や4号溶融設備の運転実績にもとづき、クロムを高濃度に含有している汚泥の安全かつ安定処理に貢献できるよう努めていきたい。

最後に、本工事を遂行するにあたり、多大なご助言、ご協力をいただきました兵庫県中播磨県民局姫路土木事務所流域下水道課、兵庫県県土整備部土木局下水道課、(財)兵庫県まちづくり技術センターの関係各位には、深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 高橋正光ほか：高クロム含有汚泥の溶融処理におけるクロムの挙動，第44回下水道研究発表会講演集，平成19年度，P.835-837

*水処理事業部 技術部 汚泥焼却室 **経営企画部 ***水処理事業部 技術部 電気計装室