西部スラッジセンターにおける消石灰使用量削減に関する調査

１．目的

西部スラッジセンター焼却施設では、高分子系汚泥の焼却において焼却灰からの重金属溶出の抑制及び焼却灰の粒度調整のため、現在は脱水汚泥に粉体消石灰添加（前添加）後、乾燥・焼却している。

平成 28 年度「CO_2 排出量ゼロに向けた焼却システムに関する調査」(調査研究報告書第 34 号)において、消石灰添加位置に関する検討を行った中の机上試験にて、焼却灰（乾灰）への消石灰溶液添加（後添加）が焼却灰（湿灰）からの重金属溶出抑制において有効であるという結果が得られた。

そこで平成 30 年度において、実設備における消石灰添加方式を変更し、消石灰使用量の削減を目的とした調査を行った。

２．背景

１）消石灰添加に関する経緯

①汚泥脱水方式の変化

平成 12 年頃までは、各水再生プラザにて凝集剤として塩化第二鉄と消石灰を用いた加圧脱水機で個別処理された脱水汚泥（消石灰系汚泥）をダンプで輸送し、西部スラッジセンターにて焼却していた。

平成 12 年頃以降は、西部スラッジセンターにて高分子凝集剤を用いた遠心脱水機で集中処理した脱水汚泥（高分子系汚泥）を同じ西部スラッジセンター内で焼却している。

②汚泥焼却の変化（脱水汚泥性状の変化）

消石灰系汚泥から高分子系汚泥への脱水汚泥性状の変化に伴い、平成 7 年度に札幌市が高分子系汚泥の焼却灰からのひ素の溶出を抑える方法を机上試験で調査している。この結果を以下に示す。

土壌汚染対策法における土壌環境基準 0.01mg/L をクリアするためには、 ・ 消石灰は、脱水汚泥に添加する。 ・ 脱水汚泥への添加率は DS（乾燥固形物：Dry solids）比 20%以上とする。

③消石灰添加設備の設置

焼却灰からのひ素溶出抑制のため、以下のとおり各系において消石灰添加設備を設置することとなった。

- ５系　　：運転開始時（平成 12 年）に消石灰添加設備を設置
- ３，４系　：５系運転開始と同時に消石灰添加設備を増設
- １，２系　：平成 15 年に消石灰添加設備を増設

２）焼却灰からのひ素の溶出について

平成７年度の札幌市の調査において、以下の条件で消石灰を添加することが、焼却灰からのひ素の溶出に対し有効であることが確認されている。

①脱水汚泥への添加（前添加）

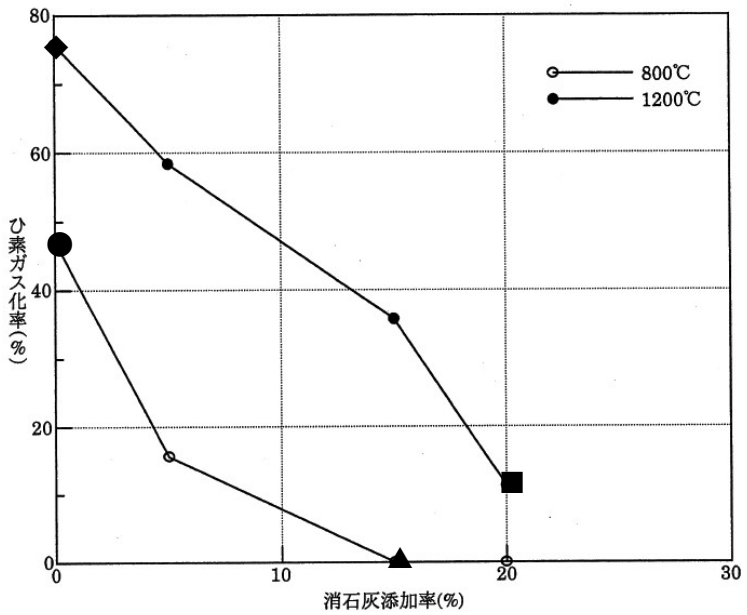
→ 添加率 20%-DS で土壌環境基準値 0.01 mg/L を下回った。

②焼却灰への添加（後添加）

→ 添加率５%-DS 以上で土壌環境基準値 0.01 mg/L を下回った。

３）焼却時のひ素のガス化について

次に、平成 7 年度の札幌市の調査では、焼却時のひ素のガス化についても試験を行っており、**図－１**にその際の脱水汚泥への消石灰添加率と、ガス炉（実験炉）での焼却時のひ素ガス化率の関係を示した（調査報告抜粋）。



図－１　消石灰添加率とひ素ガス化率

実験結果は、下記のとおりであった。

①消石灰無添加の場合、800℃焼却で約 50%のひ素ガス化率（●）、1,200℃焼却で約 75%のひ素ガス化率（◆）となった。

②どちらの温度でも消石灰添加率を上げるにつれてひ素ガス化率は減少した。

③800℃では消石灰添加率 15%-DS でひ素ガス化率は０%となった（▲）。

④1,200℃では消石灰添加率 20%-DS でひ素ガス化率は約 10%となった（■）。

ただし、本実験においては脱水汚泥・焼却灰のひ素含有濃度を分析しており、

＜焼却排ガスのひ素含有濃度＝脱水汚泥ひ素含有濃度－焼却灰ひ素含有濃度＞

として算出されているため、実設備における冷却脱硫塔及び電気集塵機の排水のひ素含有濃度は考慮されていない。そのため、**図－１**のひ素ガス化率は、実設備では排水中に含まれるひ素を含んだものとなっており、これによって実設備での排気筒出口排ガス中のひ素の濃度を推測するこ

とができなかった。

前途の調査以降も、ひ素の挙動を把握するための検討を実施してきているが、実焼却設備のインプット【脱水汚泥・燃焼空気】とアウトプット【排ガス・焼却灰・排水】をそれぞれ直接分析し、収支を取った実績はない。

実焼却設備における脱水汚泥に含まれているひ素は、焼却過程により焼却灰の中に残るもの、ガス化して排ガスに移行するもの、排ガス処理設備からの排水に移行するものに分かれる。そのため、脱水汚泥・焼却灰・排ガス・排水槽排水のひ素含有濃度を測定（燃焼空気は定量下限値以下であることが予想されるため実施しない）しないと、実焼却設備の収支を知ることができない。

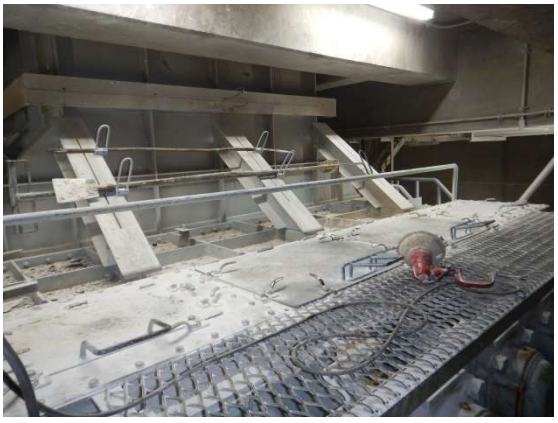
なお、現在の消石灰添加率については、これまで行ってきた様々な調査結果等から、脱水汚泥に前添加 13%-DS 以上を管理基準としている。

４）平成 28 年度調査において得られた知見

過去に行ってきた脱水汚泥への消石灰添加の経緯等を示してきたが、平成 28 年度の調査では消石灰添加位置に関する検討を行った。

現状の脱水汚泥への消石灰添加は、消石灰サイロから一軸偏心ねじ式ポンプにて切り出し、空気移送して脱水ケーキバンカ切出部に添加（前添加）されているが、消石灰に流動性を与えるための空気を併用している。この問題点として、消石灰の微細粉末の室内への飛散による作業環境の悪化や周辺機器への悪影響などが懸念されるため、添加量の低減を目指している。消石灰供給ポンプ周辺を**写真－１**、脱水ケーキバンカ周辺を**写真－２**に示した。

写真―１　消石灰供給ポンプ周辺



写真―２　脱水ケーキバンカ周辺

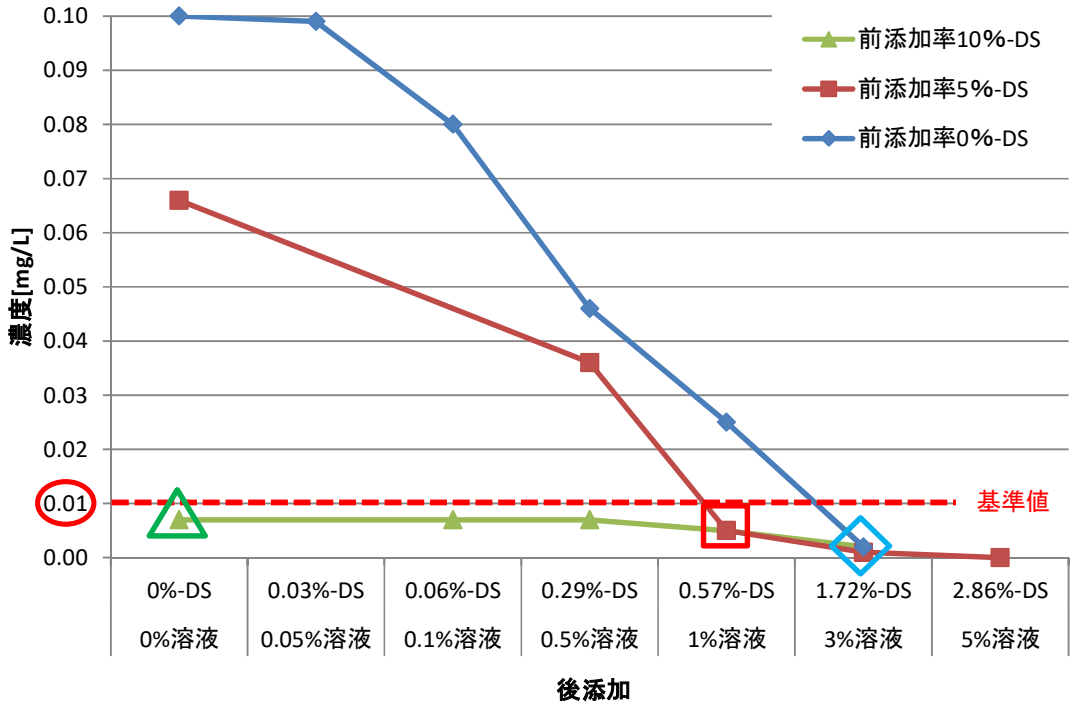
添加量の低減により作業環境改善等に寄与する反面、ひ素等の溶出量の増加といったリスクが考えられたため、焼却灰を灰出設備へ移送するアッシュコンベヤ下部で、炉内負圧維持及び灰冷却のため処理水を充填して水封を行っているが、この処理水を消石灰溶液に変更した場合（後添加）の二段階添加方式を検討した。

焼却灰（乾灰）への消石灰溶液添加（後添加）による重金属溶出抑制効果を確認するため、消石灰の前添加率を通常の 13%-DS 以上から 10，５，０%-DS と減少させ、得られた焼却灰（乾灰）での机上試験を札幌市下水道河川局事業推進部処理施設課水質管理係へ依頼した。

【水質管理係での試験概要】

消石灰前添加 10，５，０%-DS での焼却灰（乾灰）200 g に対し、各種濃度の消石灰溶液 500 mL を添加（後添加）した焼却灰について溶出試験等を行った。

この結果のうち、環境庁告示 46 号に定められるひ素の土壌溶出試験の結果を**図－２**に示す。



図－２　環境庁告示 46 号に定められるひ素の土壌溶出試験結果

ここで、**図－２**中の１%消石灰溶液時の机上試験条件を例に挙げると、

・１%消石灰溶液 500 mL での消石灰量：500×1/100＝5 g

・このときの脱水汚泥可燃分 77.1%-dry より、

汚泥の固形物量(DS)は 200÷(1－77.1/100)＝873.4 g

→消石灰添加率(%-DS)＝5÷873.4×100≒0.57%-DS となる。

各前添加率でのひ素の溶出試験結果は以下のとおりであった。

前添加　10%-DS＋後添加　　０%-DS で基準値（0.01 mg/L）を下回った。（**図－２**中△）

前添加　５%-DS＋後添加 0.57%-DS で基準値（0.01 mg/L）を下回った。（**図－２**中□）

前添加　０%-DS＋後添加 1.72%-DS で基準値（0.01 mg/L）を下回った。（**図－２**中◇）

なお、セレンは全条件において基準値（0.01 mg/L）を下回った。

上記の机上試験において、通常の消石灰添加率 13%-DS 以上と比較し、少ない消石灰添加率で重金属溶出抑制効果を確認できた。

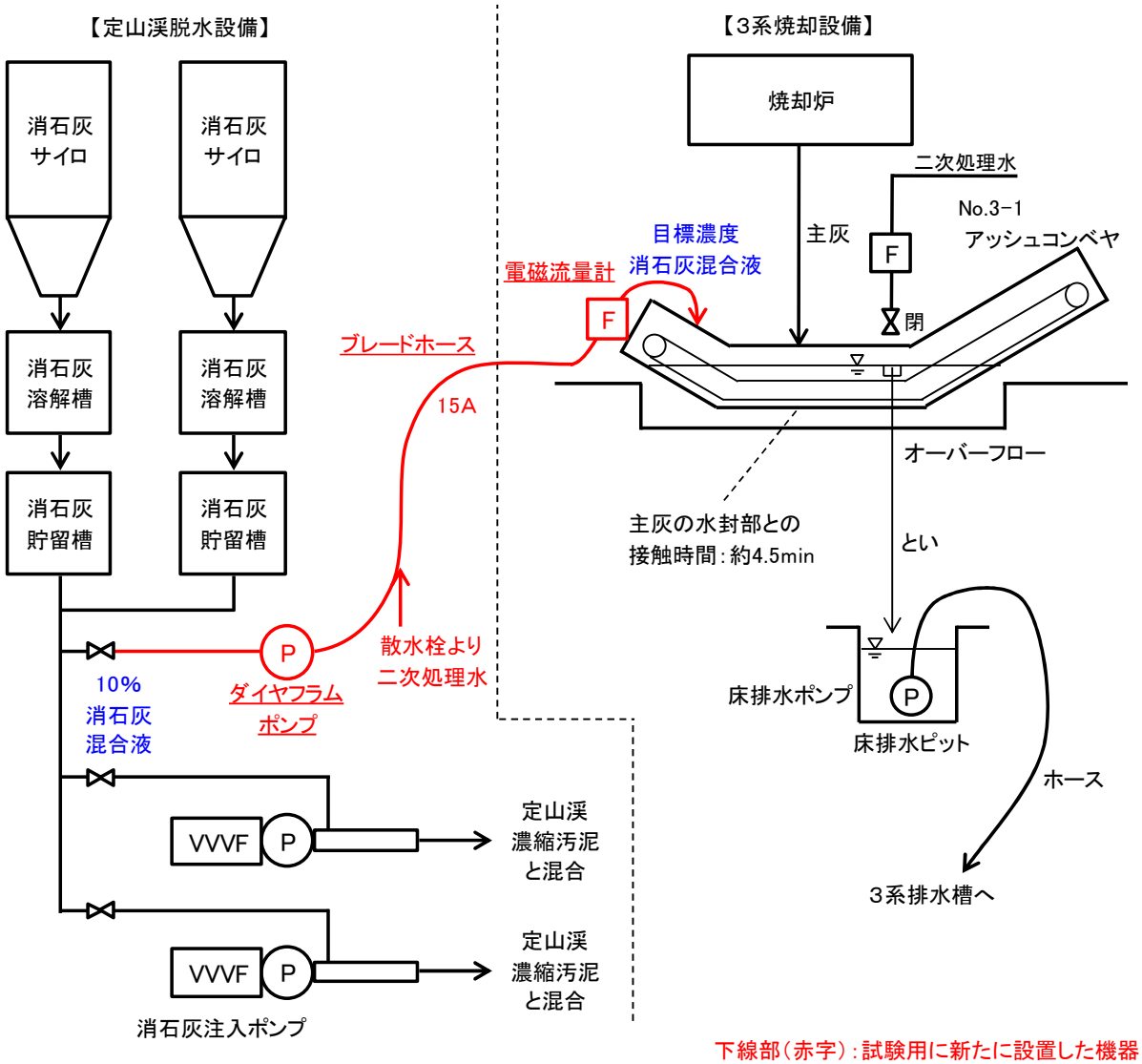
３．調査内容

１）調査方法

①試験設備

（ア）平成 28 年度「CO_2排出量ゼロに向けた焼却システムに関する調査」において行った机上試験を実設備で再現するため、西部スラッジセンター焼却施設の３系焼却設備で試験を行った。

（イ）焼却灰（乾灰）への消石灰溶液添加（後添加）を再現するため、後添加用消石灰溶液は西部スラッジセンター内にある、定山渓脱水設備の消石灰混合液を使用し、アッシュコンベヤ（湿式フライトコンベヤ）補給水（二次処理水）で希釈後アッシュコンベヤ水封部へ供給した。試験設備の概要を**図－３**に示した。



図－３　試験設備概要

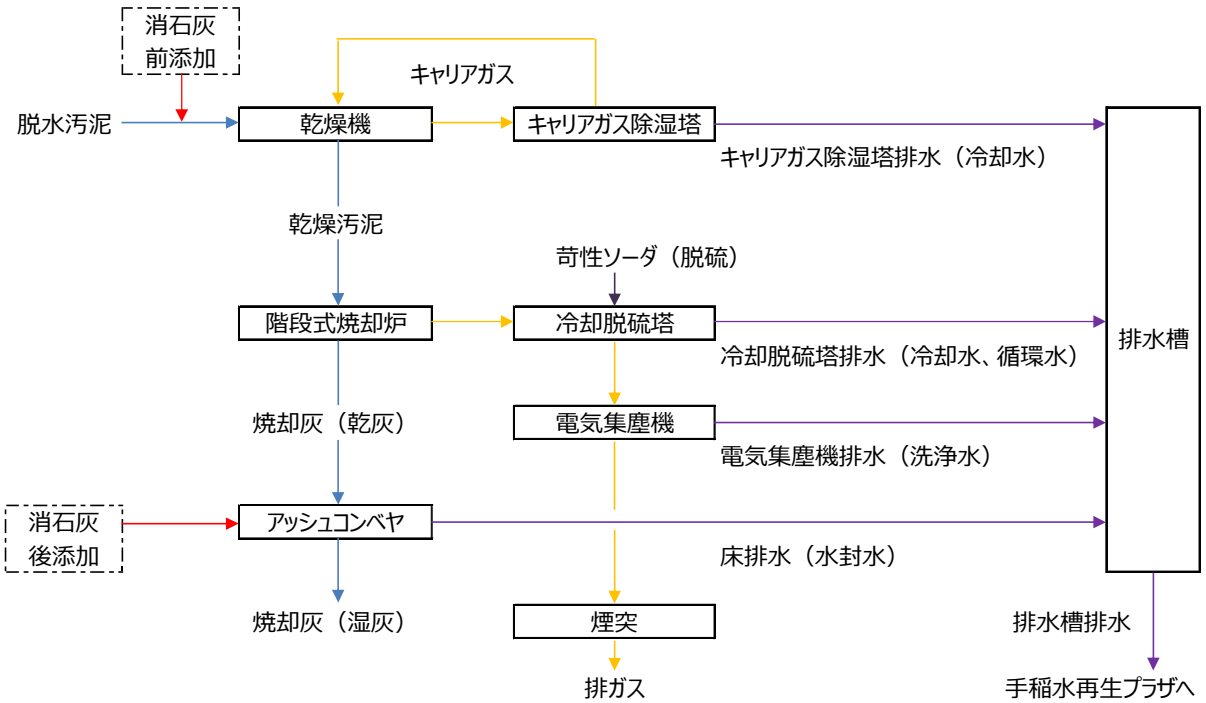
定山渓脱水設備内の、消石灰注入ポンプの予備スペースにダイヤフラムポンプユニットを設置し、そこから３系の No. ３－１アッシュコンベヤまでホースを敷設した。途中、定山渓脱水設備内の散水栓からのホースをこれに接続した。

これによって定山渓脱水設備の 10%消石灰混合液と散水栓からの二次処理水を混合・希釈し目標の濃度とし、No. 3－1アッシュコンベヤ水封部へ供給した。また、この試験中は No. 3－1アッシュコンベヤへの既設給水ラインはバルブを閉とし、供給を止めた。

試験設備のダイヤフラムポンプユニットを**写真－3**、電磁流量計を**写真－4**に示した。また、実設備での消石灰の前添加、後添加を含めた設備フロー概略を**図－4**に示した。

写真—3　ダイヤフラムポンプユニット

写真—4　電磁流量計



図－4　実設備での消石灰の前添加、後添加を含めた設備フロー概略

②調査及び検証項目

（ア）焼却灰からの重金属溶出について調査し机上試験との比較検証をした。

（イ）ひ素の収支について、脱水汚泥・焼却灰・排ガス・排水槽排水のひ素含有濃度を調査し検証した。

（ウ）消石灰添加率条件別の消石灰使用量を検証した。

（エ）各所排水の pH 値を調査し手稲水再生プラザ（手稲下水処理場）への影響の有無を検証した。

（オ）焼却炉の燃焼状態を監視し、焼却灰及び排ガスの性状変化等について検証した。

（カ）消石灰添加率と冷却脱硫塔での苛性ソーダ使用量の関係について検証した。

（キ）薬品費用を比較検証した。

（ク）機器への影響（磨耗・腐食等）を検証した。

（ケ）消石灰後添加用装置について検証した。

（コ）最適な条件（消石灰添加量）を検証した。

２）調査期間

消石灰添加方式変更による機器への影響を検証するため、３系焼却設備の定期整備前の平成 30 年 9 月中旬から 10 月下旬までを実機による試験期間とした。

３）調査条件

脱水汚泥条件としては含水率 76%、可燃分 82%-DS を固定値とし、３系焼却設備にて定格処理（100 t/日）時に行った。また、消石灰添加率の変更は計 10 回（10Run）行った。

平成 28 年度調査で実施した机上試験の結果を基に、本調査における実設備での調査条件を**表－１**に示した。各 Run の名称は試験条件に従い、以下のとおりである。

・各 Run の名称：『Run（前添加率[%-DS]）－（後添加率[%-DS]）』

表－１　調査条件

＜脱水汚泥条件＞ 処理量：100 t/日 含水率：76% 可燃分：82%		単位	現状	条件									
				Run 10-0.0	Run 10-0.2	Run 10-0.5	Run 10-0.7	Run 10-0.9	Run 5-0.9	Run 5-0.7	Run 5-0.5	Run 5-0.2	Run 5-0.0
消石灰溶液濃度（後添加）		%	-	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0	1.5	1.0	0.5	0.0
消石灰添加率	前添加	%-DS	13.0	10.0					5.0				
	後添加		0	0.0	0.2	0.5	0.7	0.9	0.9	0.7	0.5	0.2	0.0
	合計		13.0	10.0	10.2	10.5	10.7	10.9	5.9	5.7	5.5	5.2	5.0
消石灰添加量	前添加	t/日	3.12	2.40					1.20				
	後添加		0	0.00	0.05	0.11	0.16	0.22	0.22	0.16	0.11	0.05	0.00
	合計		3.12	2.40	2.45	2.51	2.56	2.62	1.42	1.36	1.31	1.25	1.20

ここで、各 Run を連続して実施するにあたり、条件変更から焼却炉等の状態が安定し、サンプリングを行うまでの時間の概算を次のようにした。

①前添加率を変更する場合（現状→10%-DS、10→５%-DS の場合）

焼却炉へ投入する乾燥ケーキピット内の乾燥汚泥の、入れ替わり時間は約２日であるため、前添加率を変更する場合の条件変更から安定状態となるまでの所要時間は２日以上とした。

②後添加率を変更する場合（①以外の場合）

まず、No. ３－１アッシュコンベヤの水封部の消石灰混合液が入れ替わる時間を考える。機器図より水封部の体積は約 9.36 ㎥であり、現状での No. ３－１アッシュコンベヤへの給水量は、約 30 ㎥/日である。これらより水封部の消石灰混合液が入れ替わる時間を求めると 9.36÷(30÷24)≒7.5 hr となった。よって、7.5 hr 以上の移行期間を取る必要がある。

一方で、消石灰混合液のホース輸送におけるホースの閉塞リスクを考慮し、後添加率を変更する場合の条件変更からサンプリングまでの所要時間は約１日とした。

また、消石灰の前添加率を通常の 13%-DS 以上から下げることによって単位乾燥汚泥あたりの発熱量が上がり、炉出口温度や火格子温度が上昇することが考えられるため、一次燃焼空気を適正に入れるなど、各温度が上昇しすぎないよう燃焼調整を行った。

なお、試験期間中に発生した焼却灰は、全量セメント工場へ搬出した。

４）分析項目

試料のサンプリング・分析の詳細は**表－２**のとおりとした。

表－２　サンプリング条件及び分析項目

	試料	検体数	ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ	分析	項目	備考
①	脱水汚泥	11	公社	札幌市	ひ素含有濃度	
②	焼却灰 (湿灰)	11	公社	札幌市	ひ素含有濃度 ひ素溶出濃度 セレン溶出濃度	
③	排ガス	10	分析業者	分析業者	ひ素含有濃度	
④	排水槽排水	11	公社	札幌市	ひ素含有濃度 pH	
⑤	キャリアガス 除湿塔排水	11	公社	札幌市	pH	
⑥	冷却脱硫塔 排水	11	公社	札幌市	pH	
⑦	電気集塵機 排水	11	公社	札幌市	pH	
⑧	床排水	11	公社	札幌市	pH	No. ３－１ ｱｯｼｭｺﾝﾍﾞﾔ ｵｰﾊﾞｰﾌﾛｰ水 流入箇所

5）**評価項目**

調査結果の評価項目および予想される影響因子を**表－３**にまとめた。

表－３　評価項目及び予想される影響因子

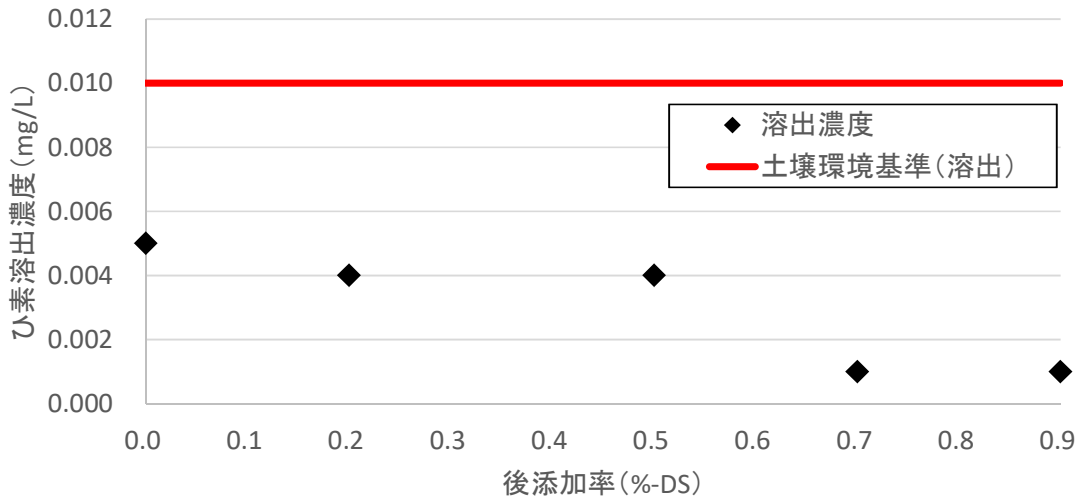
評価項目	予想される影響因子	根拠資料	備考
消石灰使用量	・消石灰 前添加率 ・消石灰 後添加率	日報データ	
苛性ソーダ使用量	・消石灰 前添加率	日報データ	平成 28 年度調査より 前添加率を下げると 増加傾向
焼却灰(湿灰) ・ひ素溶出濃度 ・セレン溶出濃度	・消石灰 前添加率 ・消石灰 後添加率	分析結果	溶出基準値 0.01 mg/L
排水槽排水 ひ素含有濃度	・消石灰 前添加率 ・消石灰 後添加率	分析結果	排出基準値（参考値） 0.1 mg/L
各所排水 pH ・ｷｬﾘｱｶﾞｽ除湿塔排水 ・冷却脱硫塔排水 ・電気集塵機排水 ・床排水 ・排水槽排水	・消石灰 前添加率 ・消石灰 後添加率	分析結果	
No. ３－１ｱｯｼｭｺﾝﾍﾞﾔ ・板厚 ・目視点検	・消石灰 後添加率	測定・点検結果	平成 29、30 年度の 定期整備時に調査

４．結果及び考察

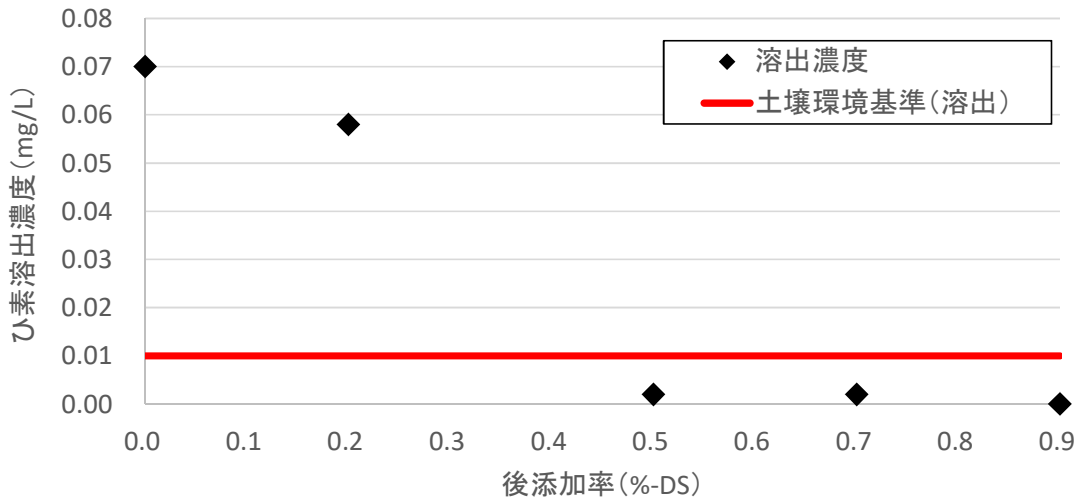
１）焼却灰からの重金属溶出及び机上試験との比較について

①焼却灰のひ素溶出量

各条件でのひ素の溶出量の結果を**図－５、６**に示す。



図－５　ひ素溶出量（前添加 10%-DS）



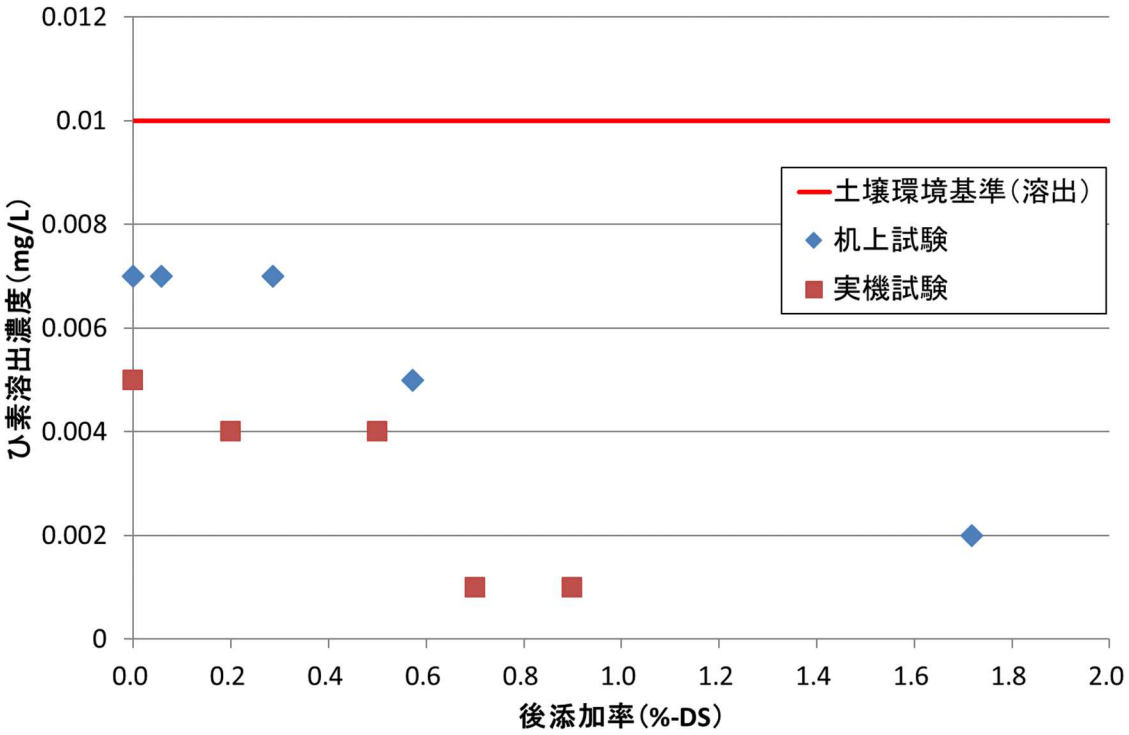
図－６　ひ素溶出量（前添加５%-DS）

前添加率 10%-DS、５%-DS いずれも、後添加率の上昇に伴い、ひ素溶出量が低下する傾向がみられた。前添加率 10%-DS では後添加率０%-DS でも土壌環境基準 0.01 mg/L を下回った。前添加率５%-DS では後添加率 0.5%-DS 以上で土壌環境基準 0.01 mg/L を下回った。

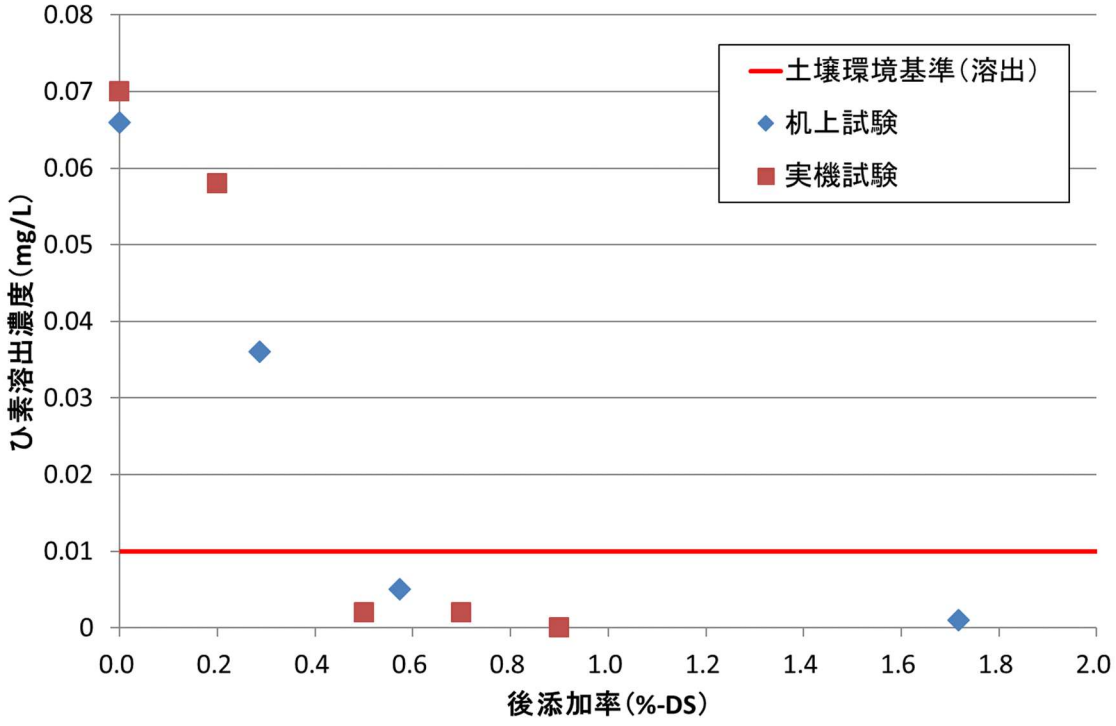
なお、試験前後の通常状態（前添加率 13%-DS 以上、後添加率０%-DS）では各々0.006 mg/L、定量下限値以下といずれも土壌環境基準 0.01 mg/L を下回っていた。

②机上試験と実設備でのひ素溶出試験の比較

焼却灰からのひ素の溶出量について**図－２**で示した平成 28 年度調査での机上試験の結果と今回の実機試験の結果を、消石灰の前添加率別に整理したものを**図－７、８**に示した。



図－７　ひ素溶出量（前添加 10%-DS）



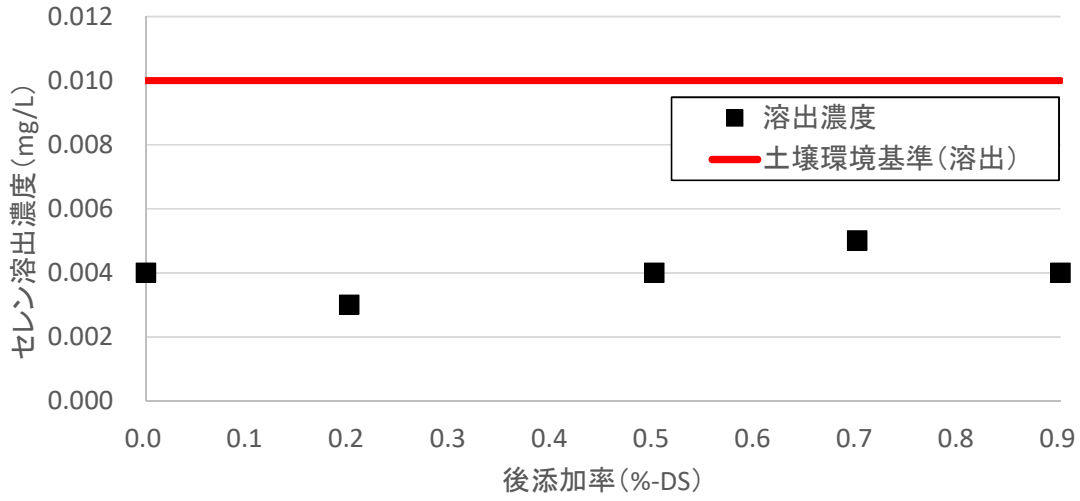
図－８　ひ素溶出量（前添加５%-DS）

前添加率 10%-DS、５%-DS いずれも、机上試験と実機試験の結果がほぼ同様の傾向となった。両者に共通して見られる傾向として次のようなことが考えられる。

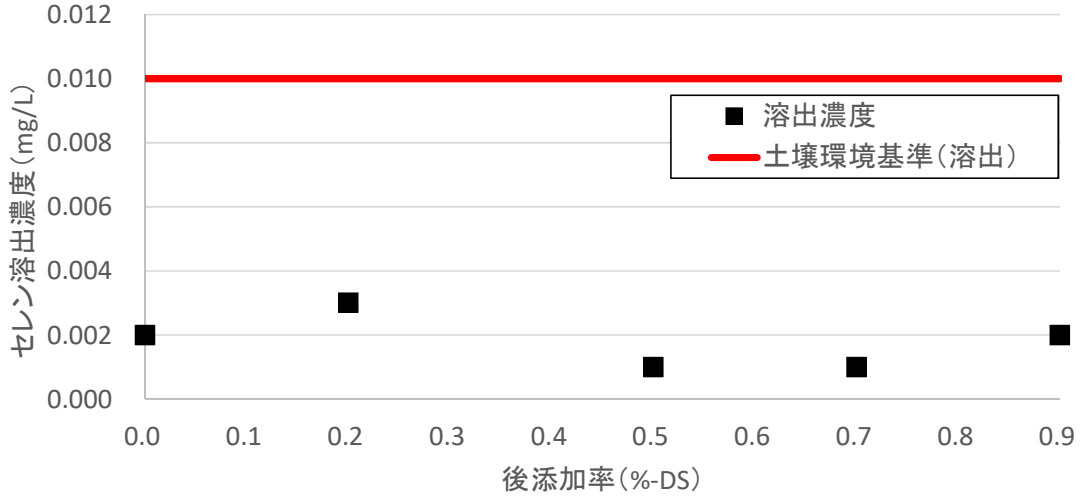
（ア）後添加率の上昇に伴い、ひ素溶出量が低下する傾向が見られた。
（イ）前添加率 10%-DS では後添加率０%-DS でも土壌環境基準 0.01 mg/L を下回った。
（ウ）前添加率５%-DS では後添加率 0.5%-DS 以上で土壌環境基準 0.01 mg/L を下回った。

③焼却灰のセレン溶出量

各条件でのセレンの溶出濃度の結果を**図－９、10** に示した。



図－９　セレン溶出濃度（前添加 10%-DS）



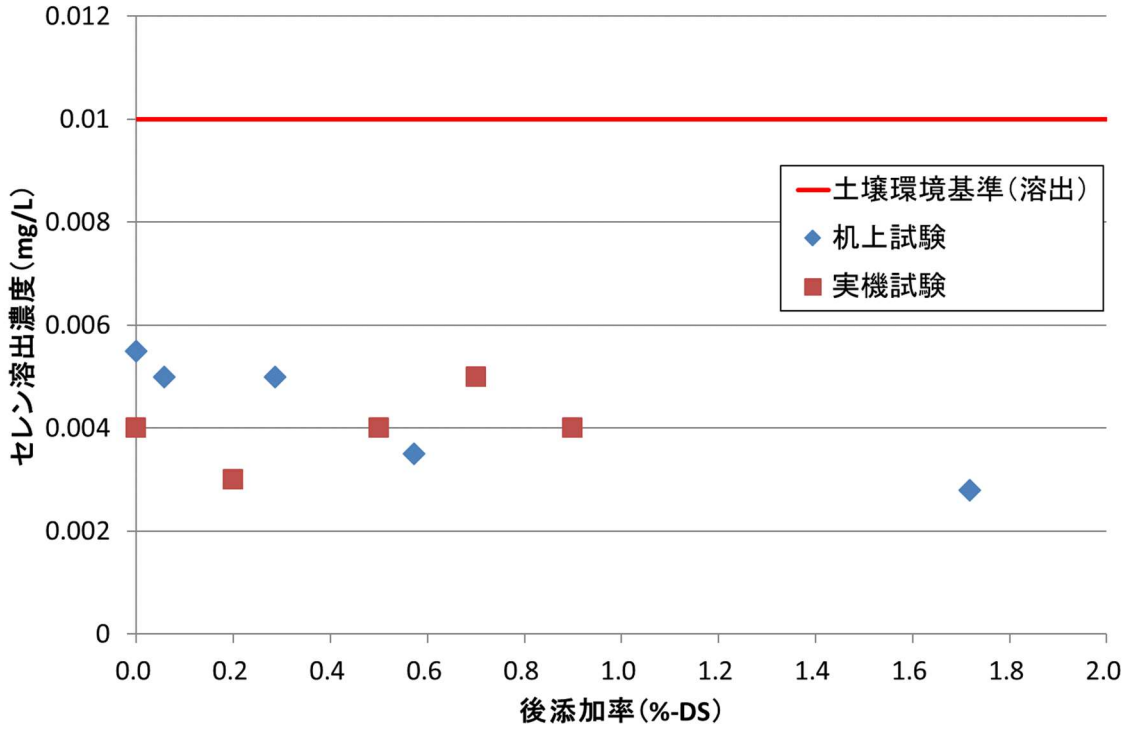
図－10　セレン溶出濃度（前添加５%-DS）

前添加率 10%-DS、５%-DS いずれの後添加率においても、土壌環境基準 0.01 mg/L を下回った。また、前添加率５%-DS の方がセレン溶出濃度が低い結果となった。

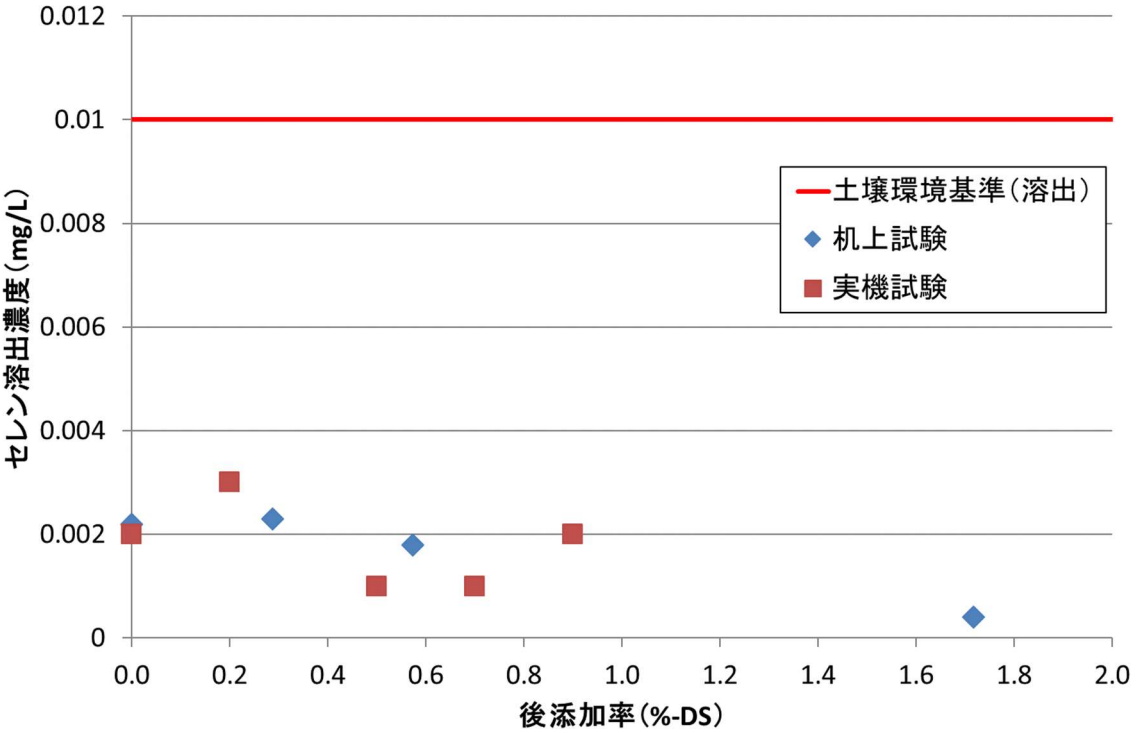
なお、試験前後の通常状態（前添加率 13%-DS 以上、後添加率０%-DS）では各々0.004 mg/L、0.002 mg/L といずれも土壌環境基準 0.01 mg/L を下回っていた。

④机上試験と実設備でのセレン溶出試験の比較

焼却灰からのセレンの溶出量について、平成 28 年度調査での机上試験の結果と今回の実機試験の結果を、消石灰の前添加率別に整理して**図－11、12** に示した。



図－11　セレン溶出量（前添加 10%-DS）



図－12　セレン溶出量（前添加５%-DS）

セレンについても机上試験と実機試験の結果がほぼ同様の傾向となった。両者に共通して見られる傾向として次のようなことが考えられる。

①前添加率 10%-DS、５%-DS いずれの後添加率においても、土壌環境基準 0.01 mg/L を下回った。

②前添加率５%-DS の方が 10%-DS に比べセレン溶出濃度が低かった（この理由については不明）。

２）ひ素の収支について

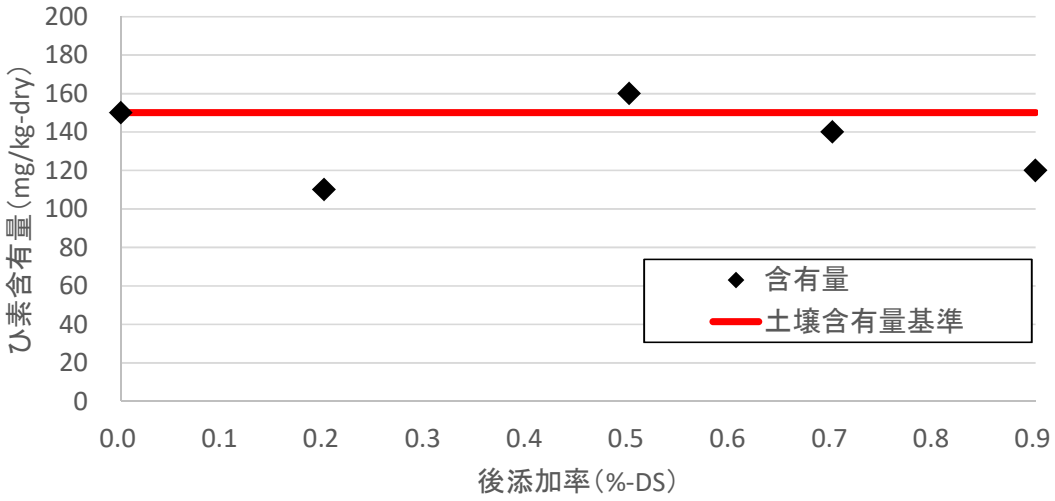
①ひ素含有濃度測定

実焼却設備のインプット【脱水汚泥・燃焼空気】とアウトプット【排ガス・焼却灰・排水】のひ素の収支を確認するため、脱水汚泥・焼却灰・排ガス・排水槽排水のひ素含有濃度を測定した。なお、インプットである燃焼空気は定量下限値以下であることが予想されるため測定は行わなかった。

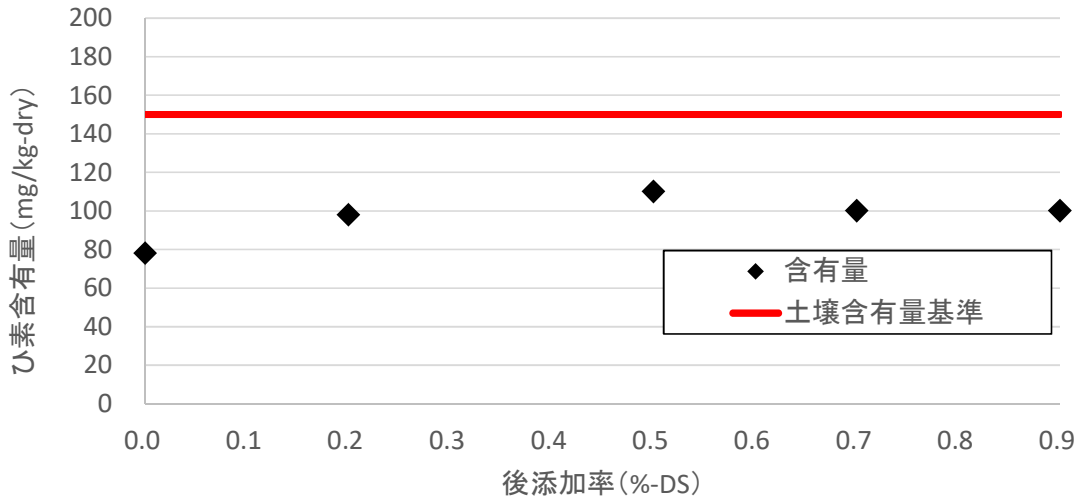
表－２に示したとおり、収支計算の際には脱水汚泥・焼却灰・排水槽排水のひ素含有濃度は札幌市での分析結果を、排ガスのひ素含有濃度は分析業者の分析結果を用いた。また、絶対量を算出するために必要な脱水汚泥焼却量、焼却灰発生量、各含水率、排水返送量は月報データを使用した。

②焼却灰のひ素含有量

各条件での焼却灰のひ素含有量の結果を**図－13、14** に示す。



図－13　焼却灰のひ素含有量（前添加 10%-DS）



図－14　焼却灰のひ素含有量（前添加５%-DS）

前添加率 10%-DS、５%-DS それぞれでは、ばらつきが大きい結果となった。

前添加率ごとの比較では、前添加率 10%-DS の方が前添加率５%-DS と比べ、ひ素含有量が高い結果となっており、土壌含有量基準 150 mg/kg-dry を超えた条件もあった。

ここで、焼却灰中のひ素含有量については次のように考えられる。**図－13、14** より、後添加率によるひ素含有量の傾向がみられないため、試験前後の通常状態（前添加率 13%-DS 以上、後添加率０%-DS）での分析結果及び Run10、Run５中の後添加率０%-DS でのひ素含有量・溶出量の結果（**図－５、６、13、14** の抜粋）を、分析実施順に**表－４**にまとめた。

表－４　後添加率０%-DS での各条件のひ素含有量・溶出量

Run	消石灰前添加率	ひ素含有量	ひ素溶出量
Run13-0.0	13%-DS 以上	88 mg/kg-dry	0.006 mg/L
Run10-0.0	10%-DS	150 mg/kg-dry	0.005 mg/L
Run 5-0.0	5%-DS	78 mg/kg-dry	0.07 mg/L
Run13-0.0	13%-DS 以上	110 mg/kg-dry	定量下限値以下

当初、消石灰の前添加率と焼却灰中のひ素含有量の関係について、以下の相反する傾向をそれぞれ予想していた。

（ア）消石灰の前添加率が高い方がひ素の溶出量が低い、つまり溶出を抑える傾向があるため、その分ひ素含有量は高くなる傾向となる。

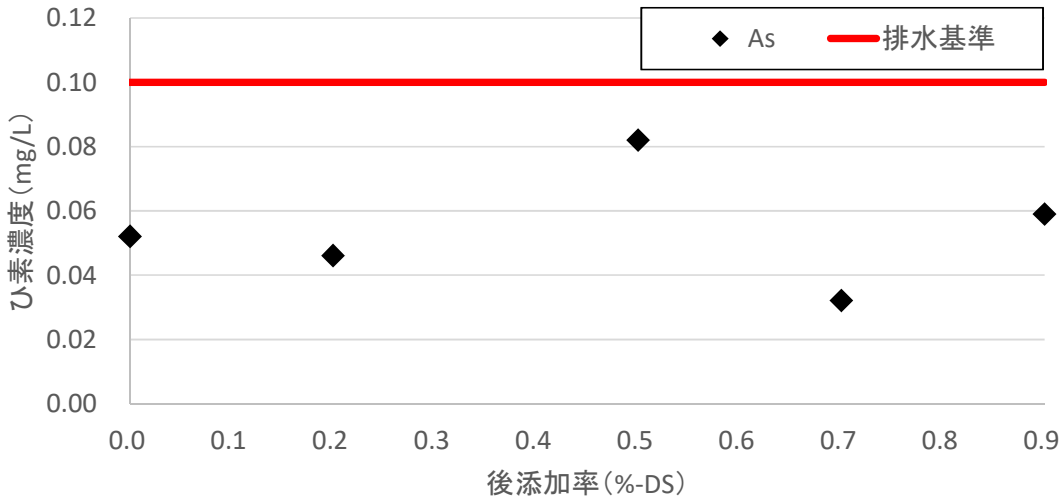
（イ）消石灰の前添加率が高い方が焼却灰に占める消石灰（ひ素含まない）が多いため、単位焼却灰あたりのひ素含有量は低くなる傾向となる。

上記の予想に対し、**表－４**より、溶出量の結果は概ね予想どおりとなったが、これに対し含有量は顕著な傾向が得られなかった。

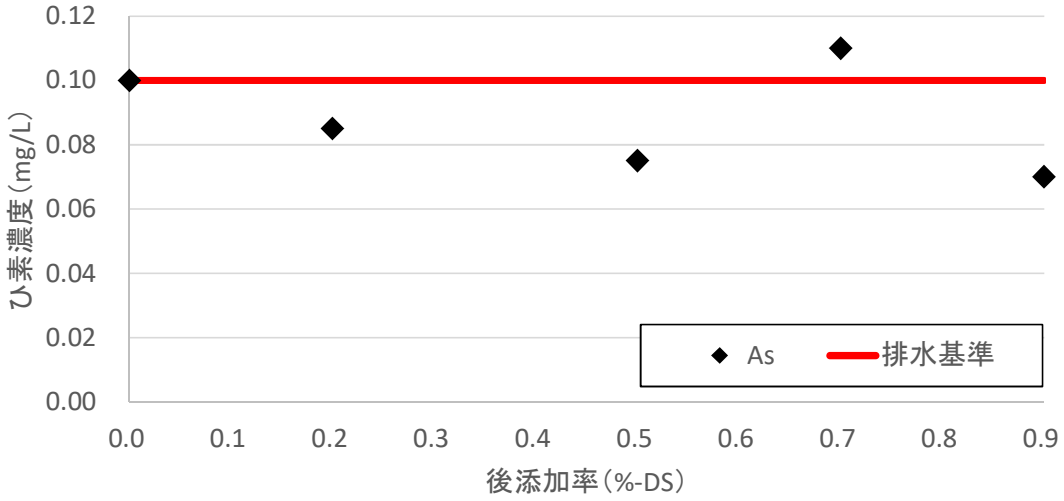
この原因としては、脱水汚泥中のひ素含有量の振れをはじめ、サンプリング精度、分析誤差等、サンプル数が少ないことが考えられる。サンプル数が増えれば傾向が見えてくる可能性が考えられる。

③排水槽のひ素含有濃度

各条件での排水槽のひ素濃度の結果を**図－15、16** に示した。



図－15　排水槽のひ素濃度（前添加 10%-DS）



図－16　排水槽のひ素濃度（前添加５%-DS）

前添加率 10%-DS、５%-DS それぞれでは、ばらつきが大きい結果となった。

前添加率ごとの比較では、前添加率５%-DS の方が前添加率 10%-DS と比べ、ひ素濃度が高い結果となっており、排出基準値 0.10 mg/L（参考値）を超えた条件もあった。

なお、試験前後の通常状態（前添加率 13%-DS 以上、後添加率０%-DS）では 0.031 mg/L、0.040 mg/L といずれも排出基準値 0.10 mg/L（参考値）を下回っていた。

④月報データ

実機試験期間の脱水汚泥焼却量、焼却灰発生量、各含水率、排水返送量の月報データを**表－５**に示した。

表－５　月報データ

項目		単位	８月	９月	10 月
脱水汚泥	処理量	t /月	3, 118. 51	2, 999. 36	2, 767. 77
	含水率	%	75. 9	76. 6	76. 6
	固形物量	d s-kg/日	24, 244	23, 395	20, 892
焼却灰	発生量	t /月	371. 55	284. 37	305. 29
	含水率	%	36. 6	34. 8	36. 4
	固形物量	d s-kg/日	7, 600	6, 180	6, 263
排水量		m^3/月	143, 772	128, 641	108, 167
		m^3/日	4, 638	4, 288	3, 489

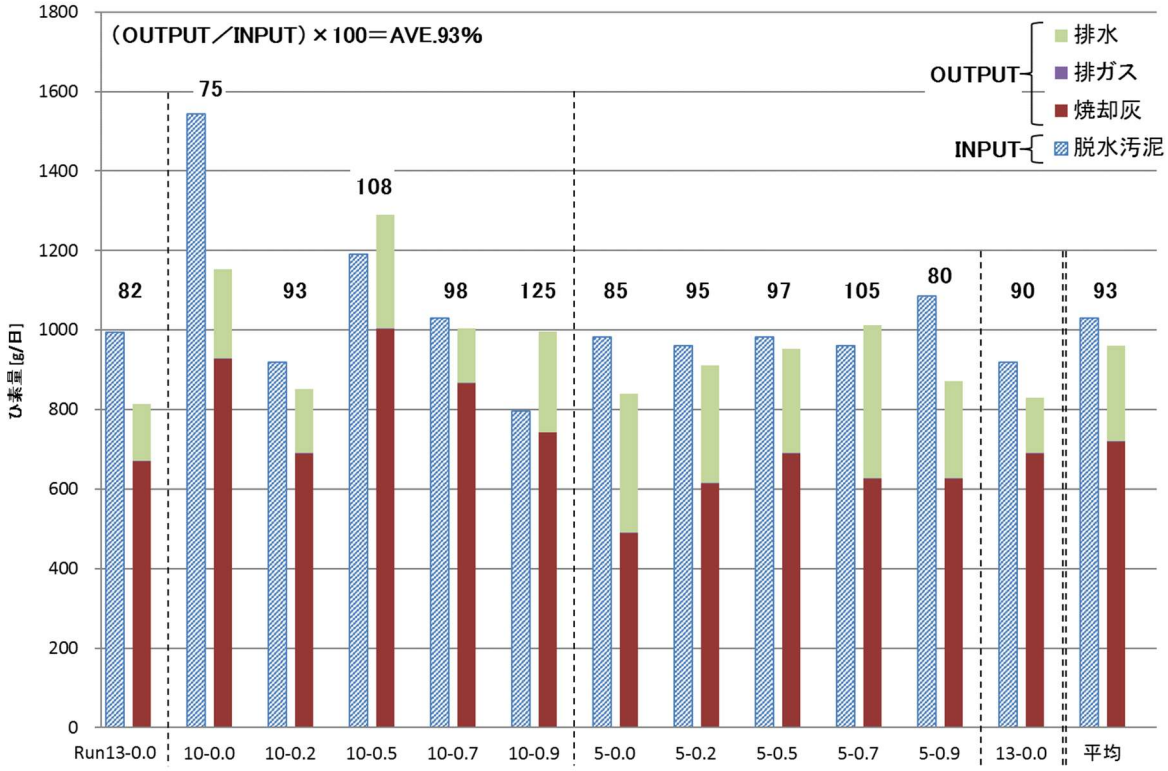
※排水量の月量は３系排水返送水量単独の流量計が無いため、３・４系排水返送水の月量を 1/2 とした。

⑤ひ素の収支まとめ

以上のデータを使用し、各条件での調査結果及びひ素の収支を**表－６に、**ひ素の収支をグラフにしたものを**図－17** に示した。なお、排ガス分析の結果は定量下限値以下となっていたが、定量下限値として全体収支に含めている。その場合でも、排ガス中のひ素の収支全体に占める割合が１％未満となっていた。

表－６　各条件での調査結果及びひ素の収支

サンプリング日			単位	8月23日	9月18日	10月3日	10月1日	9月28日	9月25日	10月17日	10月15日	10月12日	10月9日	10月5日	10月22日	平均
消石灰添加率	前添加		%-DS	13	10	10	10	10	10	5	5	5	5	5	13	
	後添加		%-DS	0.0	0.0	0.2	0.5	0.7	0.9	0.0	0.2	0.5	0.7	0.9	0.0	
Run			－	13-0.0	10-0.0	10-0.2	10-0.5	10-0.7	10-0.9	5-0.0	5-0.2	5-0.5	5-0.7	5-0.9	13-0.0	
INPUT	脱水汚泥		mg/kg-dry	41	66	44	57	44	34	47	46	47	46	52	44	－
			g/日	**994**	**1,544**	**919**	**1,191**	**1,029**	**795**	**982**	**961**	**982**	**961**	**1,086**	**919**	**1,030**
			%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	－
OUTPUT	焼却灰		mg/kg-dry	88	150	110	160	140	120	78	98	110	100	100	110	－
			g/日	**669**	**927**	**689**	**1,002**	**865**	**742**	**489**	**614**	**689**	**626**	**626**	**689**	**719**
			INPUTに対する割合%	67	60	75	84	84	93	50	64	70	65	58	75	－
			OUTPUT内での割合%	82	81	81	78	86	74	58	67	72	62	72	83	－
	排ガス	分析日	－	－	9月21日	－	－	9月28日	－	－	－	10月11日	－	10月5日	10月24日	－
		1回目	g/hr	－	0.11	－	－	<0.05	－	－	－	<0.05	－	<0.05	<0.05	－
		2回目		－	<0.05	－	－	<0.05	－	－	－	<0.05	－	<0.05	<0.05	－
		1回目	g/日	－	3	－	－	<1.2	－	－	－	<1.2	－	<1.2	<1.2	－
		2回目		－	<1.2	－	－	<1.2	－	－	－	<1.2	－	<1.2	<1.2	－
		まとめ		**1.2**	**1.2**	**1.2**	**1.2**	**1.2**	**1.2**	**1.2**	**1.2**	**1.2**	**1.2**	**1.2**	**1.2**	**1**
			INPUTに対する割合%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	－
			OUTPUT内での割合%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	－
	排水		mg/L	0.031	0.052	0.046	0.082	0.032	0.059	0.1	0.085	0.075	0.11	0.07	0.04	－
			g/日	**143.8**	**223.0**	**160.5**	**286.1**	**137.2**	**253.0**	**348.9**	**296.6**	**261.7**	**383.8**	**244.2**	**139.6**	**240**
			INPUTに対する割合%	14	14	17	24	13	32	36	31	27	40	22	15	－
			OUTPUT内での割合%	18	19	19	22	14	25	42	33	27	38	28	17	－
収支	（OUTPUT/INPUT）×100			**82**	**75**	**93**	**108**	**98**	**125**	**85**	**95**	**97**	**105**	**80**	**90**	**93**



図－17　各条件でのひ素収支

各条件での（アウトプット／インプット）の割合は平均約 93%と収支が取れた結果となった。また、アウトプット内での割合では約 75%が焼却灰、約 25%が排水であった。

よって、実設備でのひ素の挙動は、脱水汚泥に含まれているひ素のうち、排ガスとして大気中に放散される割合は極めて低く、約 75%が焼却灰、約 25%が排水へ移行していることがわかった。

また、この結果と**図－１**の比較結果を**図－18** に示した。

図―１のグラフの縦軸の「ひ素ガス化率」は、実設備における排水中に含まれるひ素を含んだものとなっており、今回の分析では排水と排ガス中のひ素を合わせたものに該当する。さらに、今回の分析で排ガス中のひ素はほぼゼロと想定したので、

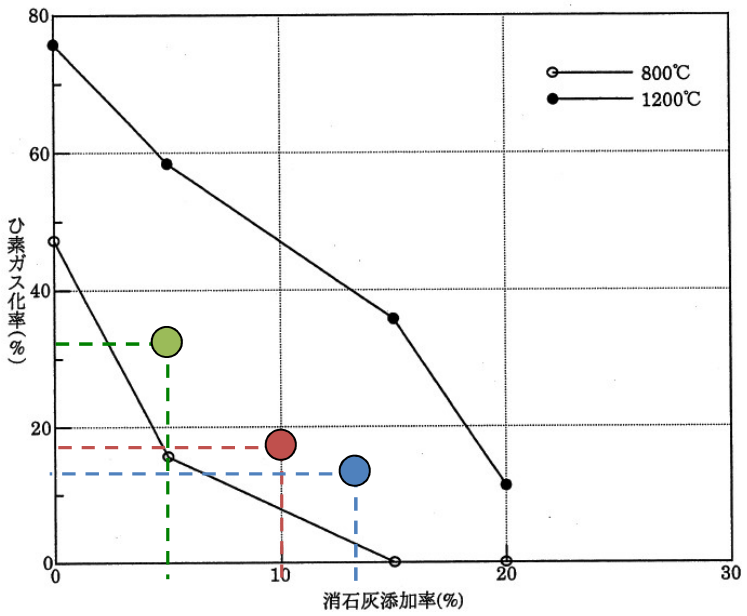
＜**図－１**の縦軸：ひ素ガス化率≒今回の分析の排水中のひ素の割合＞

ということができる。

今回の分析結果を**図－１**にプロットすると、実験炉の温度 800℃と 1200℃での結果の間に位置し、炉内最高温度が約 1000℃である実設備と**図－１**の実験の結果で整合が取れたものとなった。

H7 調査報告	＜分析値＞ 汚泥	－	＜分析値＞ 焼却灰	＝	＜計算値＞ 排ガス	≒
今回分析結果	＜分析値＞ 汚泥	－	＜分析値＞ 焼却灰	＝	＜分析値＞ 排ガス ≒0	＋ ＜分析値＞ 排水

		脱水汚泥	－	焼却灰	＝	排水	≒
消石灰前添加率	13%-DS	100	－	83	＝	17	
	10%-DS	100	－	80	＝	20	
	5%-DS	100	－	66	＝	34	
	平均	100	－	76	＝	24	



図－18　図－１と今回の結果の比較

３）消石灰使用量について

消石灰の使用量のうち、前添加の実績使用量は３系消石灰サイロ重量の変化より算出した。各条件での日平均の消石灰使用量を**表－７**にまとめた。

表－７　前添加の消石灰使用量

Run	試験工程			消石灰前添加率	消石灰使用量
通常運転	9/1	～	9/14 15:00	13%-DS 以上	3.08 t/日
Run10-○	9/14 17:00	～	10/3 9:00	10%-DS	2.32 t/日
Run5-○	10/3 11:00	～	10/17 9:00	5%-DS	1.30 t/日
通常運転	10/17 11:00	～	10/24	13%-DS 以上	3.11 t/日
参考※	10/25	～	10/31	18%-DS	3.90 t/日

※【試験期間外】再生土製造用焼却灰の作製のため消石灰 18%添加実施

後添加の使用量はダイヤフラムポンプで輸送した定山渓脱水設備の 10%消石灰混合液の量から算出した。なお、算出結果と定山渓脱水設備の消石灰サイロ重量の変化が合致していることを確認した。

各条件での平均の消石灰使用量を**表－８**に示した。

表－８　後添加の消石灰使用量

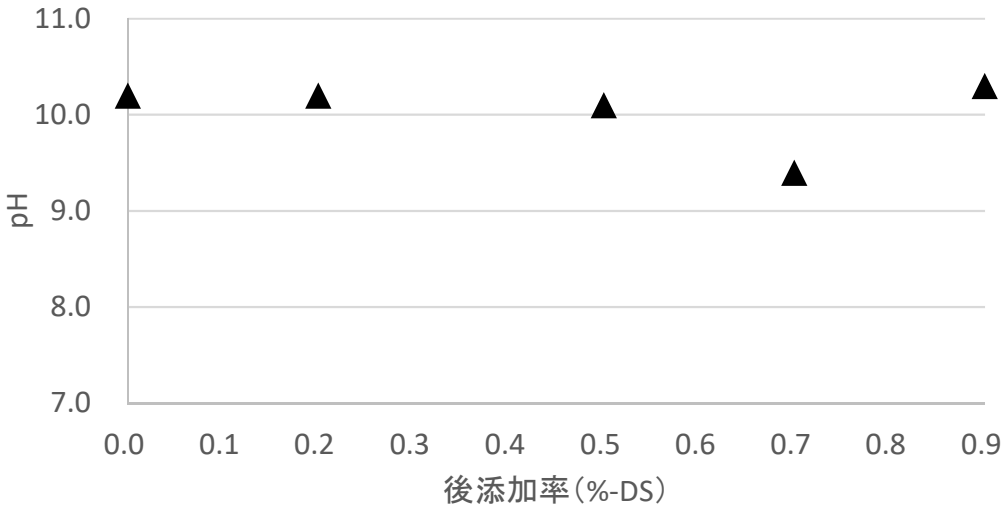
Run	消石灰後添加率	ダイヤフラムポンプ ストローク	消石灰使用量
通常運転	0%-DS	0%	0 t/日
Run○-0.2	0.2%-DS	8%	0.05 t/日
Run○-0.5	0.5%-DS	14%	0.11 t/日
Run○-0.7	0.7%-DS	19%	0.16 t/日
Run○-0.9	0.9%-DS	25%	0.22 t/日

４）手稲水再生プラザへの影響

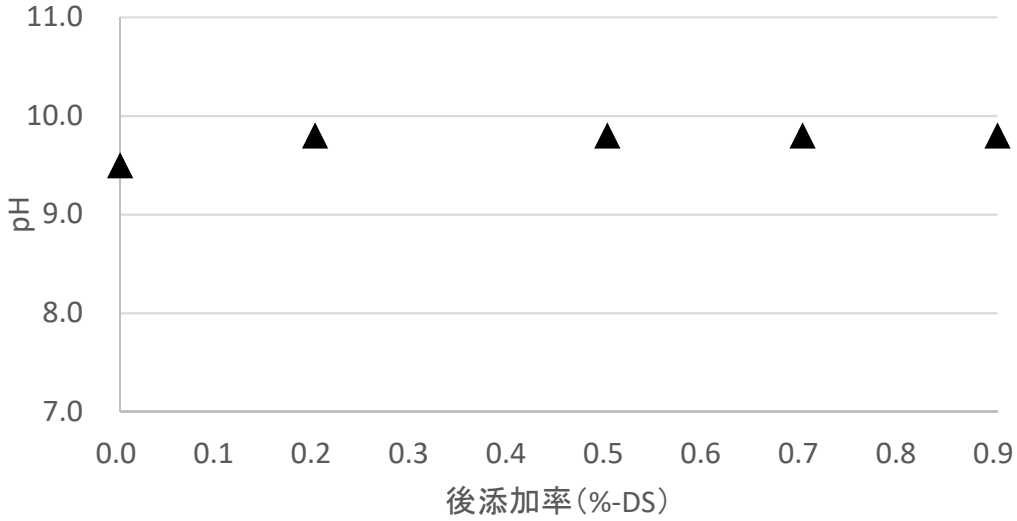
西部スラッジセンターの排水は手稲水再生プラザへ返送しているため、試験による影響を確認するために各試験条件での各所排水の pH を測定した。

①キャリアガス除湿塔排水の pH

各条件でのキャリアガス除湿塔排水の pH の結果を**図－19、20** に示した。



図－19　キャリアガス除湿塔排水 pH（前添加 10%-DS）



図－20　キャリアガス除湿塔排水 pH（前添加５%-DS）

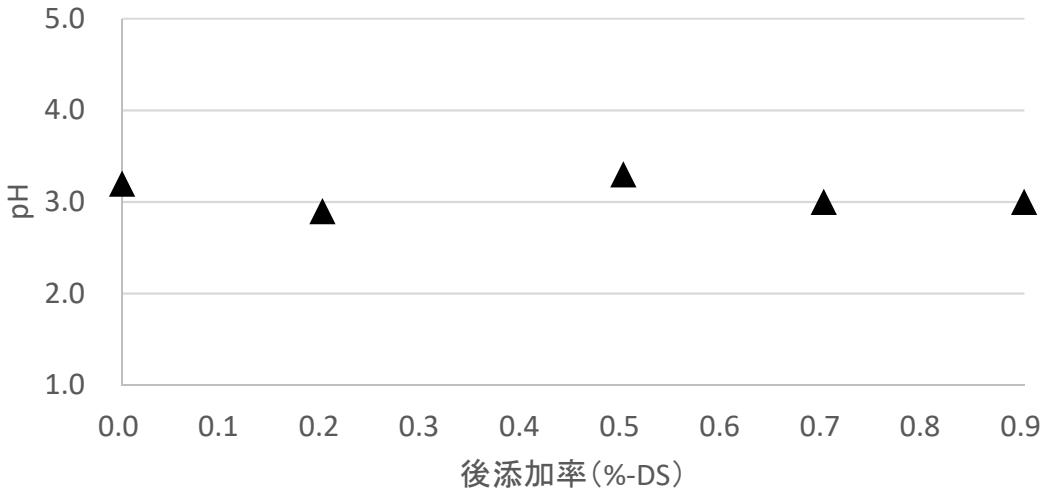
上記に加え、試験前後の通常状態（前添加率 13%-DS 以上、後添加率０%-DS）では各々pH＝10.2、10.1 であった。

前添加率 10%-DS、５%-DS それぞれで後添加率による pH の変化はほぼなかった。これは、キャリアガス除湿塔排水が脱水汚泥の乾燥工程で発生するキャリアガスの影響を受ける、つまり前添加率のみの影響を受けるためである。

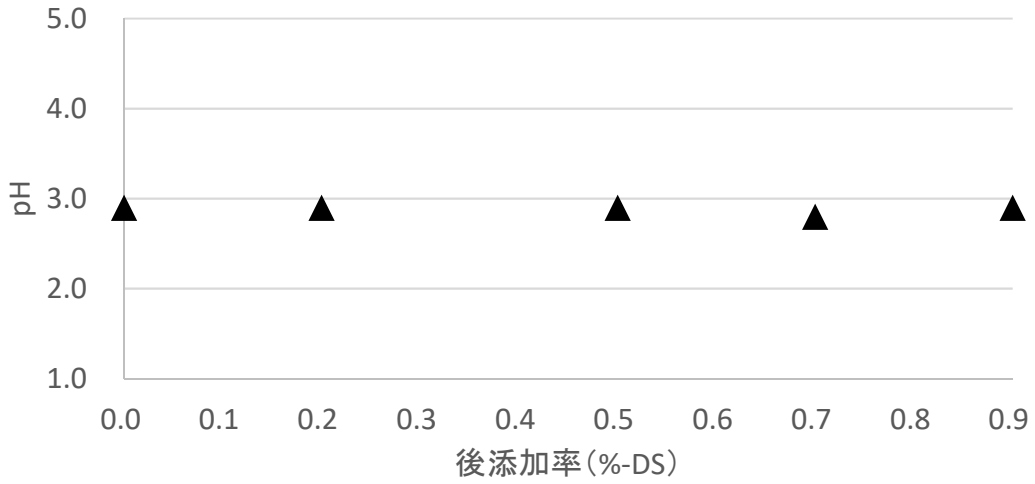
前添加率ごとの比較を行うと、前添加率が高いほどキャリアガス除湿塔排水 pH が高い傾向がみられた。これは前添加率が高いことで、キャリアガス中へ飛散する消石灰が多いことによる影響が考えられる。

②冷却脱硫塔排水の pH

各条件での冷却脱硫塔排水の pH の結果を**図－21、22** に示した。



図－21　冷却脱硫塔排水 pH（前添加 10%-DS）



図－22　冷却脱硫塔排水 pH（前添加５%-DS）

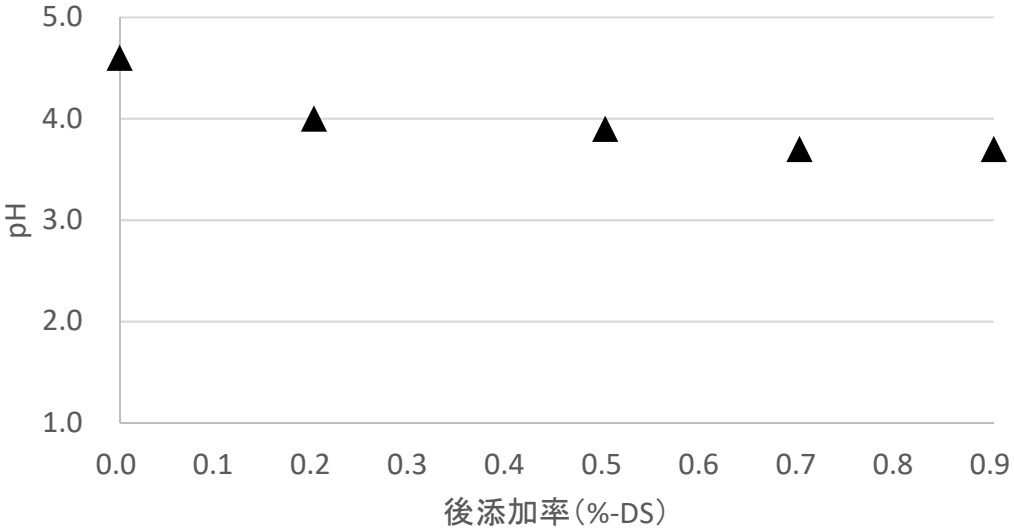
上記に加え、試験前後の通常状態（前添加率 13%-DS 以上、後添加率０%-DS）では各々pH＝2.7、3.1 であった。

前添加率 10%-DS、５%-DS それぞれで後添加率による pH の変化はほぼなかった。これは、冷却脱硫塔排水が脱水汚泥の焼却工程で発生する排ガスの影響を受ける、つまり前添加率のみの影響を受けるためである。

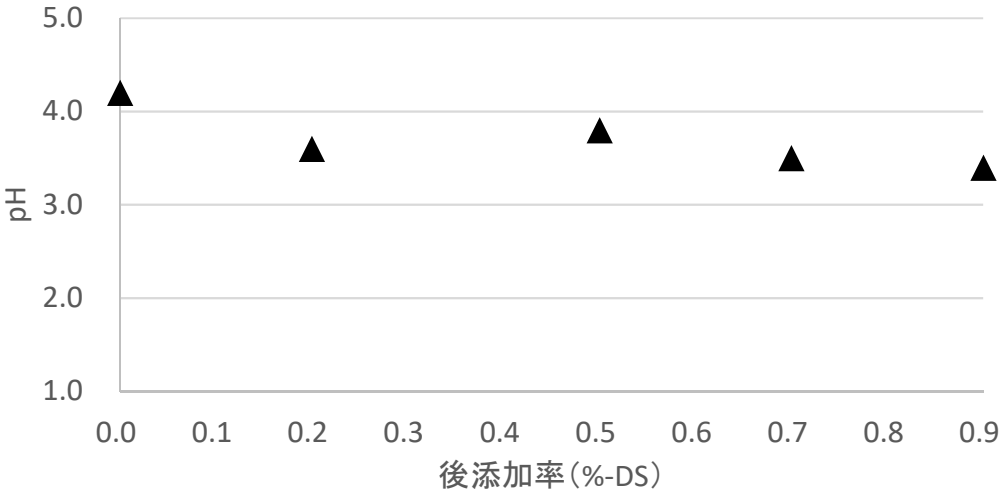
前添加率ごとの比較でも、冷却脱硫塔排水 pH に明らかな差はみられなかった。

③電気集塵機排水の pH

各条件での電気集塵機排水の pH の結果を**図－23、24** に示した。



図－23　電気集塵機排水 pH（前添加 10%-DS）



図－24　電気集塵機排水 pH（前添加５%-DS）

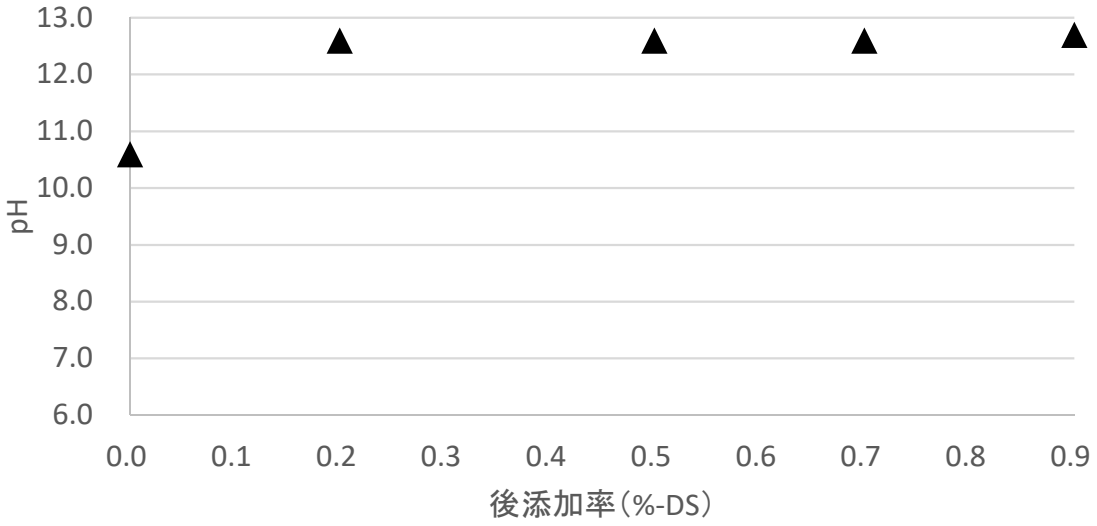
上記に加え、試験前後の通常状態（前添加率 13%-DS 以上、後添加率０%-DS）では各々pH＝3.9、6.4 であった。

前添加率 10%-DS、５%-DS それぞれで後添加率による pH の変化はほぼなかった。これは、冷却脱硫塔排水と同様、前添加率のみの影響を受けるためである。

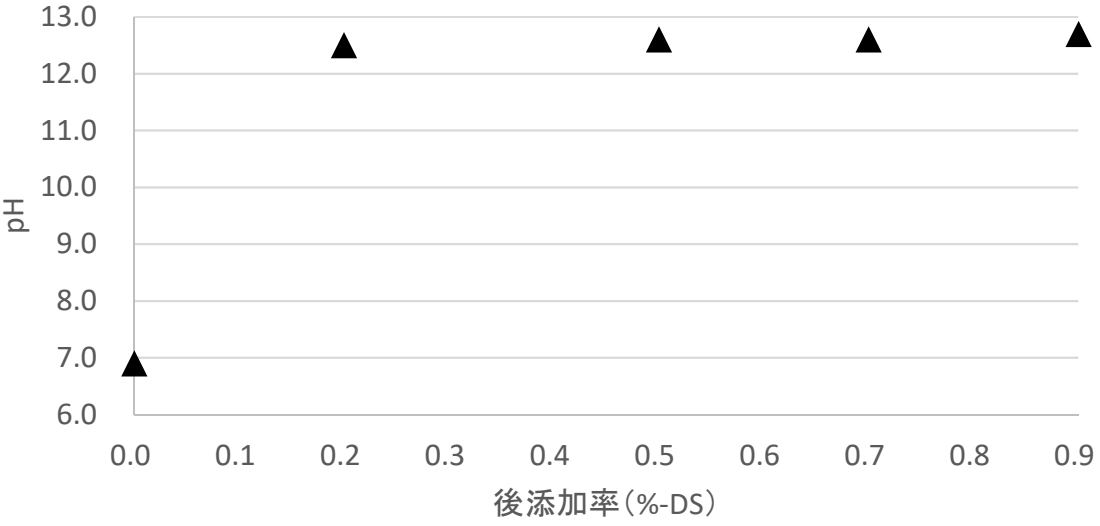
前添加率ごとの比較でも、電気集塵機排水 pH に明らかな差はみられなかった。

④床排水の pH

各条件での床排水の pH の結果を**図－25、26** に示した。



図－25　床排水 pH（前添加 10%-DS）



図－26　床排水 pH（前添加 5%-DS）

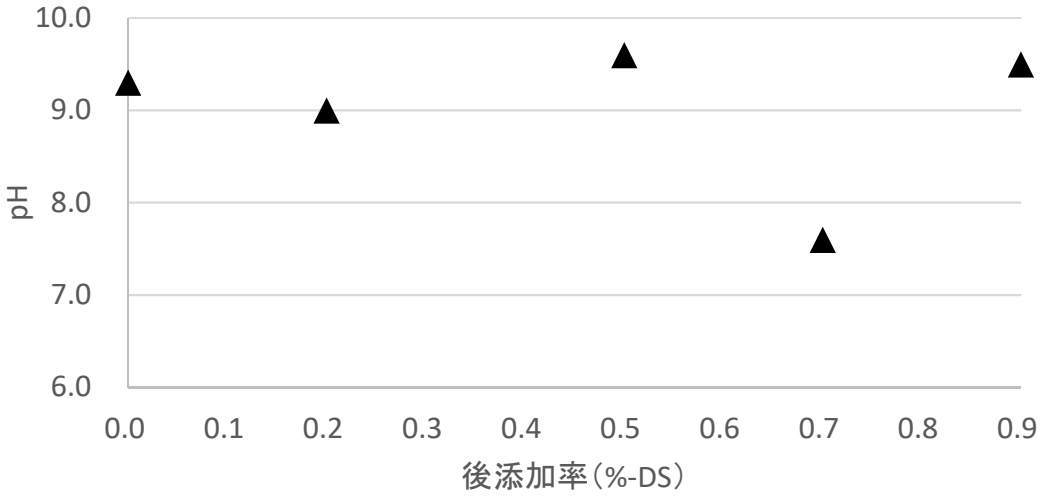
上記に加え、試験前後の通常状態（前添加率 13%-DS 以上、後添加率０%-DS）では各々pH＝11.9、12.3 であった。

前添加率 10%-DS、５%-DS それぞれでは後添加率０%-DS のときに他と比較し pH が低い結果となった。これは、No.３－１アッシュコンベヤの水封槽に消石灰が添加されていないためだと考えられる。

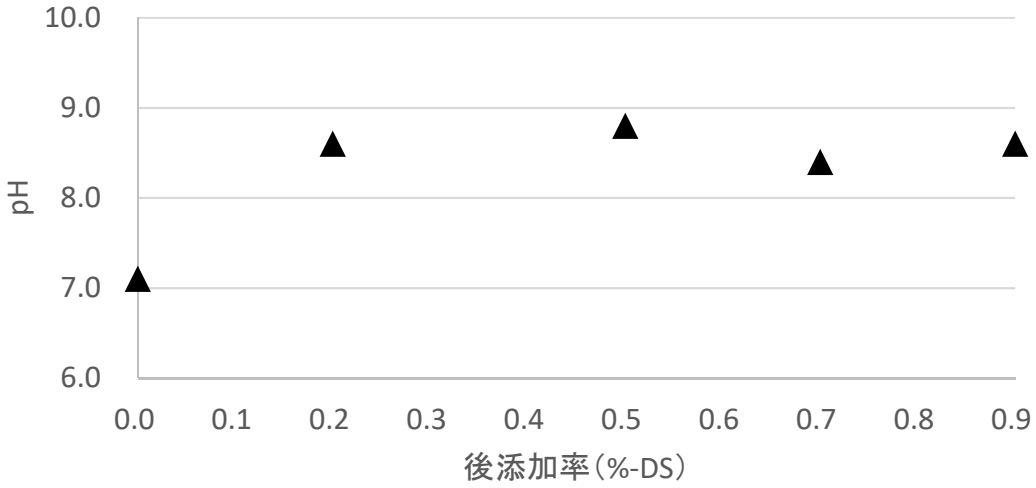
前添加率ごとの比較では、床排水の pH に明らかな差はみられなかった。

⑤排水槽排水の pH

各条件での排水槽排水の pH の結果を**図－27、28** に示した。



図－27　排水槽排水 pH（前添加 10%-DS）



図－28　排水槽排水 pH（前添加５%-DS）

上記に加え、試験前後の通常状態（前添加率 13%-DS 以上、後添加率０%-DS）では各々pH＝9.3、9.4 であった。この結果は今回の試験期間外の値と比較しても同程度の値であることを確認している。

前添加率 10%-DS、５%-DS それぞれでは、ばらつきが大きい結果となった。

前添加率ごとの比較を行うと、前添加率が高いほど排水槽排水 pH が高い傾向がみられた。これは全排水のうち占める割合が大きいキャリアガス除湿塔排水の影響が考えられる。

西部スラッジセンターから手稲水再生プラザへ返送している排水はこの排水槽排水に該当する。

上記の結果より、試験による排水槽排水への影響は小さいと考えられる。

５）焼却灰及び排ガスの性状変化等について

消石灰の前添加率を下げるにつれて、焼却灰の粒径が大きくなり、排ガス窒素酸化物（NOx）濃度が高めとなる傾向がみられた。

この傾向は平成 28 年度調査において、消石灰の前添加率０％-DS で運転を行った際には、より顕著にみられた。このときの結果については以下のとおりである。

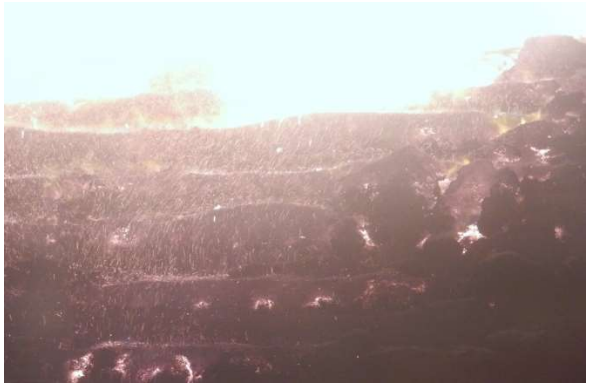
通常運転（前添加率 13%-DS 以上）時は 10mm 以下の焼却灰（赤茶色）に 100mm 程度の塊（黒色）が所々混ざっているような性状であった。これに対し、前添加率０％-DS 時の焼却灰は塊のものが多く、500mm 近い塊になっているものも存在した。ただし、塊のものを割って内部を確認したが、未燃分は確認されなかった。これについては消石灰添加率が下がることで炉投入汚泥あたりの可燃分が占める割合が増えるため発熱量が上がり、局所的に溶融状態となったためであると考察した。

また、前添加率０％-DS 運転時は通常運転時と比較し、排ガス窒素酸化物（NOx）濃度が高めで不安定であった。これは上記に示したように、炉内の焼却灰が塊となって層厚が不均一となることで空気の吹き抜けが起こり、燃焼状態が不安定となっていたためであると推測された。

通常状態（前添加率 13%-DS 以上）と、前添加率０％-DS での炉内および焼却灰の様子を**写真－５～７**に示した。

写真－５　前添加率０％-DS 時の炉内の様子

写真－６　前添加率０％-DS 時の焼却灰



写真－７　通常運転（前添加率 13%-DS 以上）時の炉内の様子

今回の試験により、消石灰の前添加率は５％-DS でも運転可能であると考えられる。

しかし一方で、消石灰の前添加率は 13%-DS の方がより安定的な運転となることと、焼却灰の大きな塊は焼却灰の土木資材への利用には不向きであり、場合によっては解砕機等が必要となることから、前添加率は 10%-DS 程度の方が望ましいとも考えられる。

６）苛性ソーダ使用量について

苛性ソーダは、燃焼排ガス中の硫黄酸化物（SOx）を中和反応で吸収するために使用される。よって焼却される脱水汚泥の性状、ひいては消石灰の前添加率の影響を受ける。

試験前後を含めた９、10 月の日平均の苛性ソーダ使用量を**表－９**に示した。

表－９　苛性ソーダ使用量

Run	試験工程			消石灰前添加率	苛性ソーダ 平均使用量
通常運転	9/1	～	9/14 15:00	13%-DS 以上	114 L/日
Run10-○	9/14 17:00	～	10/3 9:00	10%-DS	213 L/日
Run5-○	10/3 11:00	～	10/17 9:00	5%-DS	232 L/日
通常運転	10/17 11:00	～	10/24	13%-DS 以上	129 L/日
参考※	10/25	～	10/31	18%-DS	50 L/日

※【試験期間外】再生土製造用焼却灰の作製のため消石灰 18%添加実施

消石灰の前添加率が低いほど、苛性ソーダ使用量が多い傾向がみられ、試験前後の通常の前添加率 13%-DS 以上では平均 114～129 L/日であった苛性ソーダ使用量が、前添加率５％-DS では約２倍の平均 232 L/日であった。

これは燃焼排ガス中の硫黄酸化物（SOx）の吸収反応剤として使用されている苛性ソーダの役割を、消石灰が一部担っているためだと考えられる。

７）薬品費用の比較

①消石灰費用算出

消石灰の使用量は脱水汚泥の固形物量（含水率）等によって変化するので、今回の試験条件である含水率 76%、可燃分 82%-DS で定格処理（100 t/日）時として試算を行った。また、焼却灰からのひ素、セレンの溶出基準（土壌環境基準 0.01 mg/L）を満たす条件での比較を行った。

上記の条件での費用比較を**表－10** に示した。

表－10　消石灰費用

前添加率	前添加量	後添加率	後添加量	年間費用	費用差 (13%-DS 比較)
13%-DS	3.12 ton/日	0%-DS	0 ton/日	3,912 万円/年	(基準)
10%-DS	2.40 ton/日	0%-DS	0 ton/日	3,010 万円/年	－902 万円/年
5%-DS	1.20 ton/日	0.5%-DS	0.11 ton/日	1,643 万円/年	－2,269 万円/年

※年間稼働日数は 330 日とした。
※消石灰の単価は 38.0 円/kg とした。

②苛性ソーダ費用算出

西部スラッジセンターでは濃度 49%の苛性ソーダ溶液を受け入れ、２倍に希釈したものを使用している。月報上の苛性ソーダ使用量は固形物量として算出しており、その算出式を**式－１**に示した。

苛性ソーダ使用量[kg/日]
＝苛性ソーダ使用量 Q[L/日]×24[h]×1/2×濃度[%]×比重÷純度[%]
＝Q×1/2×49/100×1.525÷(97/100)　　（**式－１**）

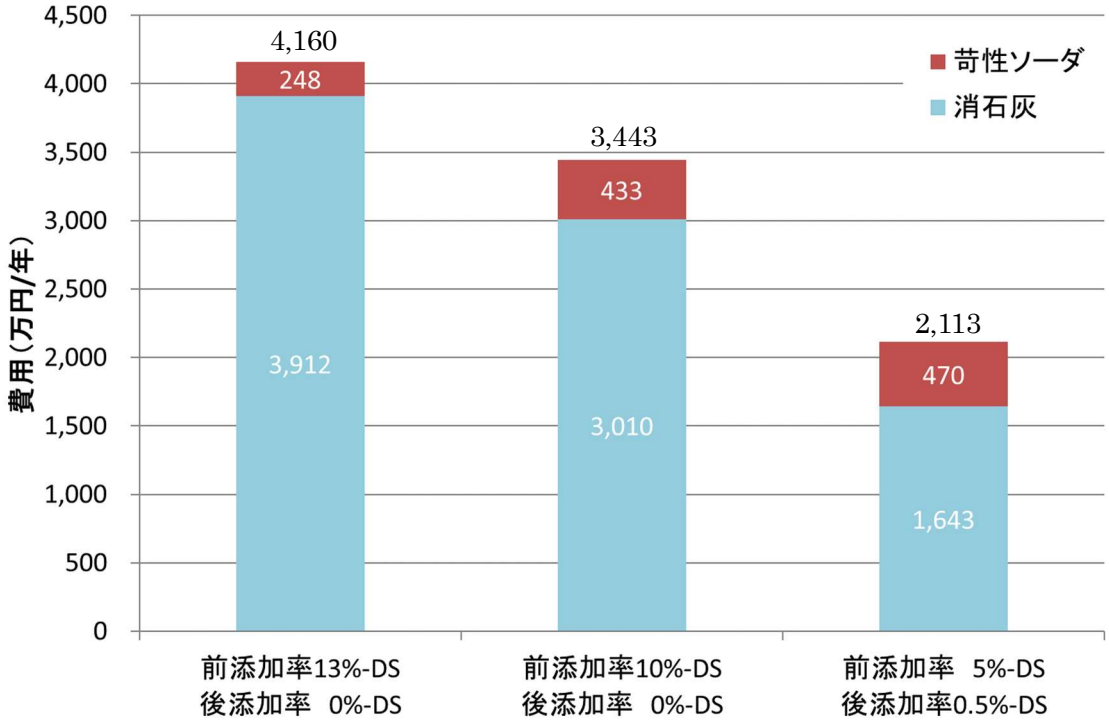
表－８に示した９、10 月の試験期間（消石灰前添加率 10%-DS、５%-DS）及びその前後（消石灰前添加率 13%-DS）の苛性ソーダ使用量から求めた費用比較を**表－11** に示した。

表－11　苛性ソーダ費用

消石灰 前添加率	苛性ソーダ 使用量		苛性ソーダ 年間費用	費用差 (13%-DS 比較)
13%-DS	122 L/日	47 kg/日	248 万円/年	(基準)
10%-DS	213 L/日	82 kg/日	433 万円/年	＋185 万円/年
5%-DS	232 L/日	89 kg/日	470 万円/年	＋222 万円/年

※年間稼働日数は 330 日とした。
※苛性ソーダの単価は 160 円/kg とした。

表－10、11 の結果をグラフにしたものを**図－29 に示した。**



図－29　各条件での費用比較

消石灰の前添加率を下げることで、苛性ソーダの費用は上がるが、それ以上に消石灰の費用が下がるため、全体としての費用は下がる結果となった。

通常運転である前添加率 13%-DS、後添加率０%-DS で年間 4,160 万円である消石灰と苛性ソーダの合計費用が、前添加率 10%-DS、後添加率０%-DS では年間 3,443 万円（約 20%減）に、前添加率５%-DS、後添加率 0.5%-DS で年間 2,113 万円（約 50%減）になるという試算になった。

８）機器への影響（アッシュコンベヤ）

試験前後の No. ３－１アッシュコンベヤ（湿式フライトコンベヤ）の調査・比較を行った。調査結果は以下のとおりである。

①水中部は試験前から焼却灰の層に覆われており、試験後も変化は無かった。
②水上部は試験前からきれいで、試験後も変化は無かった。
③ケーシングの板厚はほぼ変化は無かった。
④フライト、チェーンのうち、灰やレール面と接触していない部分（プレートやスプロケット側面など）で焼却灰・消石灰の固い層が成長していた。試験前のコンベヤチェーンを**写真－８**、試験後のコンベヤチェーンを**写真－９**に示した。

写真－８　コンベヤチェーン（試験前）

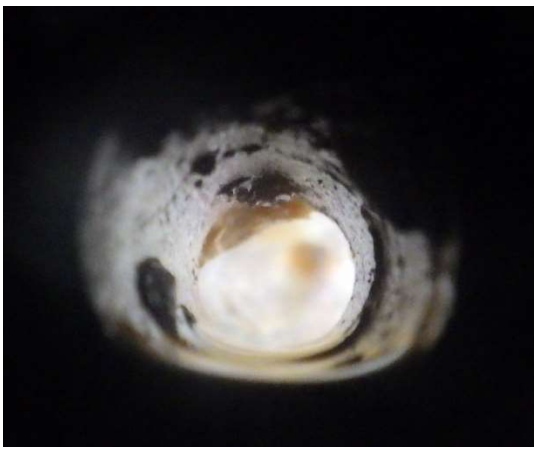
写真－９　コンベヤチェーン（試験後）

試験中コンベヤは問題なく運転していた。しかし、上記のような影響もみられたため、１ヶ月程度の短期間試験では機械設備への影響を判断するのは難しい。

９）消石灰後添加用装置（試験装置）について

後添加用消石灰として、西部スラッジセンター内にある定山渓脱水設備の 10%消石灰混合液を使用した。その方法は、定山渓脱水設備内に設置したダイヤフラムポンプで 10%消石灰混合液を途中、二次処理水と混合・希釈しながら定山渓脱水設備から３系の No. ３－１アッシュコンベヤ水封部へ全長約 130mをホースにて輸送するというものであった。

試験期間中において、消石灰およびその析出物でホースが閉塞する事象がたびたび発生した。ホース内部状況を**写真－10**、ホース内堆積物を**写真－11** に示した。



写真－10　ホース内部状況

写真－11　ホース内堆積物

消石灰の後添加を実機ベースで考える場合、消石灰混合液の長距離の輸送は閉塞のリスクが高いため望ましくない。

定山渓脱水設備のように消石灰サイロ、溶解槽、貯留槽を縦に配置し、これらをアッシュコンベヤの近傍に設置し、定量ポンプからアッシュコンベヤへの輸送距離をなるべく短くする対応が必要であると考えられる。

10）消石灰添加に関する最適な条件（消石灰添加量）

焼却灰からの重金属溶出の土壌環境基準値0.01mg/Lを満足する、消石灰前添加率10%及び５%における消石灰後添加率が最も少ない２条件について、**表－12** で各調査結果の比較を行い消石灰添加に関する最適な条件（消石灰添加量）を検討した。

表－12　消石灰添加に関する最適な条件（消石灰添加量）の検討

		条件①	条件②	備考
		前添加率 10%-DS 後添加率　0％-DS	前添加率５%-DS 後添加率 0.5%-DS	
焼却灰からの重金属溶出		○	○	ひ素、セレン
焼却側の安定的な運転		○	△	焼却灰、排ガス性状
薬品費	消石灰	○ (減少)	◎ (大幅減少)	
	苛性ソーダ	△ (増加)	△ (増加)	
	まとめ	○ (約 20%減少)	◎ (約 50%減少)	
設備面	アッシュコンベヤへの影響	○ (変化なし)	△ (固着の懸念あり)	長期間でみた影響が懸念される
	後添加用設備の機器費、維持費	○ (なし)	△ (新規増加)	消石灰サイロ 溶解槽、貯留槽 注入ポンプ
	灰解砕機の追加の可能性	○ (なし)	△ (新規増加)	焼却灰の巨大化対策
手稲水再生プラザへの影響	排水槽排水のひ素濃度	共に排出基準値 0.1mg/L（参考値）を下回っていたが、 その他の条件も含めばらつきが大きいため、判断は難しい。		
	排水槽排水のpH	多少のばらつきはあるが 共に通常条件と同程度の pH＝９前後であった。		
総合評価		○	△ (課題あり)	

条件①では、運転や設備面への影響が小さく、消石灰使用量の減少により薬品費が約 20%削減できることが見込まれる。

条件②では、焼却灰の巨大化による焼却側の安定的な運転への悪影響の可能性及び灰解砕機の追加が必要と考えられる。また、後添加をすることによる追加機器の発生、長期間でみたアッシュコンベヤへの影響が懸念されることが課題として挙げられる。一方で、消石灰使用量の減少により薬品費が約 50%削減可能と見込まれる。

５.まとめ

１）机上試験と実機試験でのひ素・セレンの溶出の比較

実設備における消石灰添加方式の変更による、消石灰添加量及び焼却灰からの重金属溶出についての試験においても、机上試験とほぼ同様の傾向となる結果が得られた。焼却灰からのひ素及びセレン溶出の土壌環境基準 0.01mg/L を下回る、消石灰前添加率 10%及び５%における消石灰後添加率が最も少ない条件は以下の２通りであった。

・前添加率 10%-DS、後添加率０%-DS

・前添加率５%- DS、後添加率 0.5%-DS

２）焼却時のひ素の収支

脱水汚泥に含まれているひ素のうち、排ガスとして大気中に放散される割合は極めて低く、約 75%が焼却灰、約 25%が排ガス処理設備の排水へ移行していると考えられる。

３）手稲水再生プラザへの影響

排水槽から手稲水再生プラザへ返送している排水の pH は、ばらつきが見られたものの通常運転時と同程度であったが、ひ素濃度は排出基準値 0.10mg/L（参考値）を超過した条件があり、測定結果にもばらつきがあったため、手稲水再生プラザへの影響を判断するのは難しい。

４）焼却運転や機器への影響

消石灰の前添加率を下げるのにつれて、焼却灰の粒径が大きくなり、排ガス窒素酸化物（NOｘ）濃度が高めとなる傾向がみられた。また、冷却脱硫塔での苛性ソーダ使用量も増加する傾向がみられた。

消石灰の後添加により、アッシュコンベヤのチェーン等に消石灰の固着がみられたが、短期間の試験では機器への影響を判断するのは難しい。

５）消石灰使用量削減について

消石灰添加方式の変更により消石灰の前添加率を下げることで、苛性ソーダの費用は上がるが、それ以上に消石灰の費用が下がるため、薬品費としては年間最大で約 2,000 万円（約 50%）と大幅に削減されることが見込まれる。一方、焼却運転や設備面、手稲水再生プラザへの影響及び新たな設備の追加が今後の検討課題である。