

熱収支計算モデルを用いた汚泥焼却炉高温燃焼化の検討

中日本建設コンサルタント株式会社 岡田阿礼

1. はじめに

平成17年2月の「京都議定書」の発効、平成20年3月に閣議決定された「京都議定書目標達成計画」の策定に伴い、下水道事業においても、温室効果ガス排出量の削減が強く求められている。温室効果ガスの種類及び発生源となる人間活動は、表-1のように整理される。

下水道事業で対象となる温室効果ガスは、表-1のうち、CO₂、CH₄、N₂Oの3種類である¹⁾が、このうち、N₂Oの温暖化効果はCO₂の310倍と大きく、下水の生物処理工程及び下水汚泥の焼却工程で多く排出される。特に、流動焼却炉における下水汚泥の通常燃焼(燃焼温度が850℃に達しない状態)のN₂O排出係数は、一般廃棄物や紙・木くず、廃油、廃プラスチック類の焼却、他の焼却方式による下水汚泥の焼却、及びその他の汚泥の焼却のうち最も高くなっている²⁾³⁾。下水道事業では流動焼却炉の採用が圧倒的に多く⁴⁾、流動焼却炉での下水汚泥焼却におけるN₂O排出抑制対策が、温室効果ガス削減のための全国的な課題となっている。

焼却工程のN₂O排出量は、燃焼温度の上昇に伴い低くなることから分かっており⁵⁾、流動焼却炉においては、850℃以上の高温燃焼により、排出係数は通常燃焼の約57%に減少する³⁾。本稿では、A市の下水汚泥焼却炉(流動焼却炉)の高温燃焼化による削減効果の算定を行うことを目的に、実測データに基づく熱収支計算モデルを作成し、熱収支計算モデルを用いたシミュレーションを行った事例を示す。このシミュレーション結果により、温室効果ガス削減量の推定と同時に、汚泥焼却施設の設備能力の決定を行うことが可能になった。

表-1 温室効果ガスの種類と人為的な発生源

ガスの種類	地球温暖化係数	人為的な発生源	主な対策
二酸化炭素(CO ₂)	エネルギー起源	産業、民生、運輸部門などにおける燃料の燃焼に伴うものが全体の9割以上を占め、温暖化への影響が大きい。	エネルギー利用効率の向上やライフスタイルの見直しなど
	非エネルギー起源	セメント製造、生石灰製造などの工業プロセスから主に発生する。	エコセメントの普及など
メタン(CH ₄)	21	稲作、家畜の腸内発酵などの農業部門から出るものが半分を占め、廃棄物の埋立も2~3割を占める。	飼料の改良、糞尿の処理方法の改善、埋立量の削減など
一酸化二窒素(N ₂ O)	310	燃料の燃焼に伴うものが半分以上を占めるが、工業プロセスや農業からの排出もある。	高温焼却、触媒の改良など
ハイドロフルオロカーボン(HFC)	140~11,700	エアゾール製品の噴射剤、カーエアコンや冷蔵庫の媒体、断熱発泡剤などに使用される。	回収、再利用、破壊の推進 代替物質・技術への転換等
パーフルオロカーボン(PFC)	6,500~9,200	半導体等製造用や電子部品などの不活性液体などとして使用される。	製造プロセスでの回収等 代替物質・技術への転換等
六フッ化硫黄(SF ₆)	23,900	変電設備に封入される電気絶縁ガスや半導体等製造用などとして使用される。	(絶縁ガス) 機器点検時・廃棄時の回収・再利用・破壊等 (半導体) 製造プロセスでの回収等 代替物質・技術への転換等

(出典) 下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き¹⁾

表-2 下水道温暖化防止計画における温室効果ガスの主な排出の区分

2. 下水道事業における温室効果ガス排出量

下水道事業における温室効果ガス排出源は、主に①化石燃料・電力等エネルギーの使用に伴う排出、②処理プロセスからの排出、③上水・工業用水・薬品の使用に伴う排出である。下水道温暖化防止計画における温室効果ガスの主な排出の区分を表-2に示す。

対象とする活動	温室効果ガスの種類			備考		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O			
電気、燃料等のエネルギー消費に伴う排出	a)他人から供給された電気の使用	○	-	-	可能な限り処理施設別に算定	
	b)他人から供給された熱の使用	(-)	-	-	電気、燃料起因の熱	
	c)燃料の燃焼、燃料の使用	重油、灯油、軽油等	○	△	△	
		LPG、LNG、都市ガス等	○	△	△	
		一般炭、コークス等	○	△	△	
	木炭、木材等	-	△	△		
d)自動車の走行	-	○	○		CO ₂ はc)項で算定	
施設の運転に伴う処理プロセスからの排出	下水の処理	-	○	○		
	下水汚泥の処理処分	焼却	-	○	○	
		埋立処分	-	○	-	
		その他(堆肥、燃料化等)	-	※	※	
上水、工業用水、薬品類の消費に伴う排出	※	-	-			
下水道資源の有効利用に伴う排出量の削減	※	-	-		効果分を差し引く	

注) 表中の記号は、○:対象、-:該当なし、(-):通常の下水道事業においては該当なし、△:燃料を燃焼する機関の形式により対象の有無、排出係数が異なる、※:対象(ただし、算定・報告・公表制度では対象外)

(出典) 下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き¹⁾

表-2 をもとに、ポンプ場施設、水処理施設及び汚泥処理施設等、主要な下水道施設における電力、化石燃料、上水・工水・薬品、自動車の走行距離、下水処理量、汚泥焼却量を調査し、排出源毎の排出係数を乗じて、CO₂、CH₄、N₂O の排出量を算定する。さらに、各物質の排出量に各々の地球温暖化係数を乗じて CO₂ 換算し、これを合計して、温室効果ガスの総排出量 (t-CO₂/年) とする。

(2) 下水道事業における温室効果ガス総排出量

A市における下水道事業全体の温室効果ガス排出量を算定した結果を図-1 に示す。A市下水道事業の温室効果ガス排出量は、温室効果ガス算定の基準年度である平成2年度を100%とし、平成7年頃まで増加傾向となっていたが、その後減少し、平成12年度以降、平成20年度まで、ほぼ平成2年度と同水準で推移している。排出量の内訳は、汚泥処理に係る排出(汚泥の焼却及び汚泥処理の電力使用)の割合が最も多く、次いで電力の使用(水処理)、下水の処理となっている。

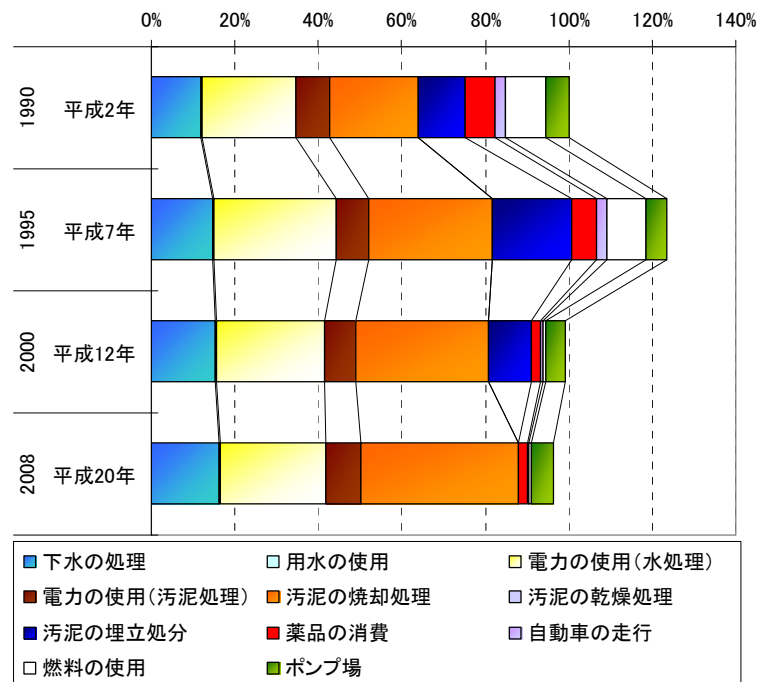


図-1 温室効果ガス排出量の推移

A市では、平成7年度まで市内2箇所の水処理施設において、回転乾燥焼却炉等による汚泥の焼却処理を行ってきたが、平成8年度以降、集約処理に移行した。現在は、1箇所の汚泥処理施設で、市内の全水処理施設で発生する汚泥を脱水し、全量を流動焼却炉にて焼却している。平成8年度以降の排出量の減少には、集約処理による削減効果が現れている。しかし、平成20年度現在、A市の下水道事業における温室効果ガス総排出量のうち、汚泥処理部門の占める割合は50%に及んでおり、汚泥処理における一層の削減が求められている。汚泥処理部門の排出量は、78%が汚泥焼却工程からの排出であり、焼却炉のN₂Oの発生量抑制対策を実施することにより、温室効果ガスの排出量を大きく削減できると考えられる。

(3) 流動焼却炉における温室効果ガス削減対策

前述のとおり、流動焼却炉のN₂O排出量の削減対策は高温燃焼化であり、燃焼温度850℃以上を達成することが必要とされている。一方、実際の焼却炉で高温運転を行う際は、脱水ケーキの含水率が高い、可燃分が少ない、あるいは投入量が少ない場合などに、都市ガス等の補助燃料により熱量を補う必要がある。補助燃料は通常、化石燃料由来の資源であることから、温室効果ガス削減効果を算定する上で、補助燃料使用量を把握することが不可欠である。

また、現状、通常燃焼(850℃未満)で運用している施設において、高温運転を実施するためには、空気温度・排ガス温度等が、既存設備の能力の範囲内でコントロール可能かを検討しなければならない。

そこで本稿では、対象施設の実測データに基づいた熱収支計算モデルを作成し、補助燃料使用量、

燃焼用空気量、白煙防止ブロウ空気量等を算定した。このモデルにより、焼却汚泥(脱水ケーキ)の統計的特徴を反映したシミュレーションが可能となり、高温燃焼を実施した場合の必要設備能力、補助燃料の増加量を定量的に求めることができた。

表-3 対象施設の諸元

処理開始年月	平成7年11月
汚泥受入方式	圧送式、含水率95.7%(平成20年度)
処理能力 (日最大)	(計画)40t-DS/日・基×4基
	(現有)40t-DS/日・基×4基
処理方式	(汚泥濃縮設備)遠心濃縮機
	(汚泥脱水設備)高効率型ベルトプレス脱水機
最終処分方法	埋立(加湿灰)、セメント原料

3. 実測データに基づく熱収支計算モデルの作成

本稿で対象とした汚泥焼却施設の諸元を表-3に示す。また、焼却設備のフローと主要な管理項目を図-2に示す。

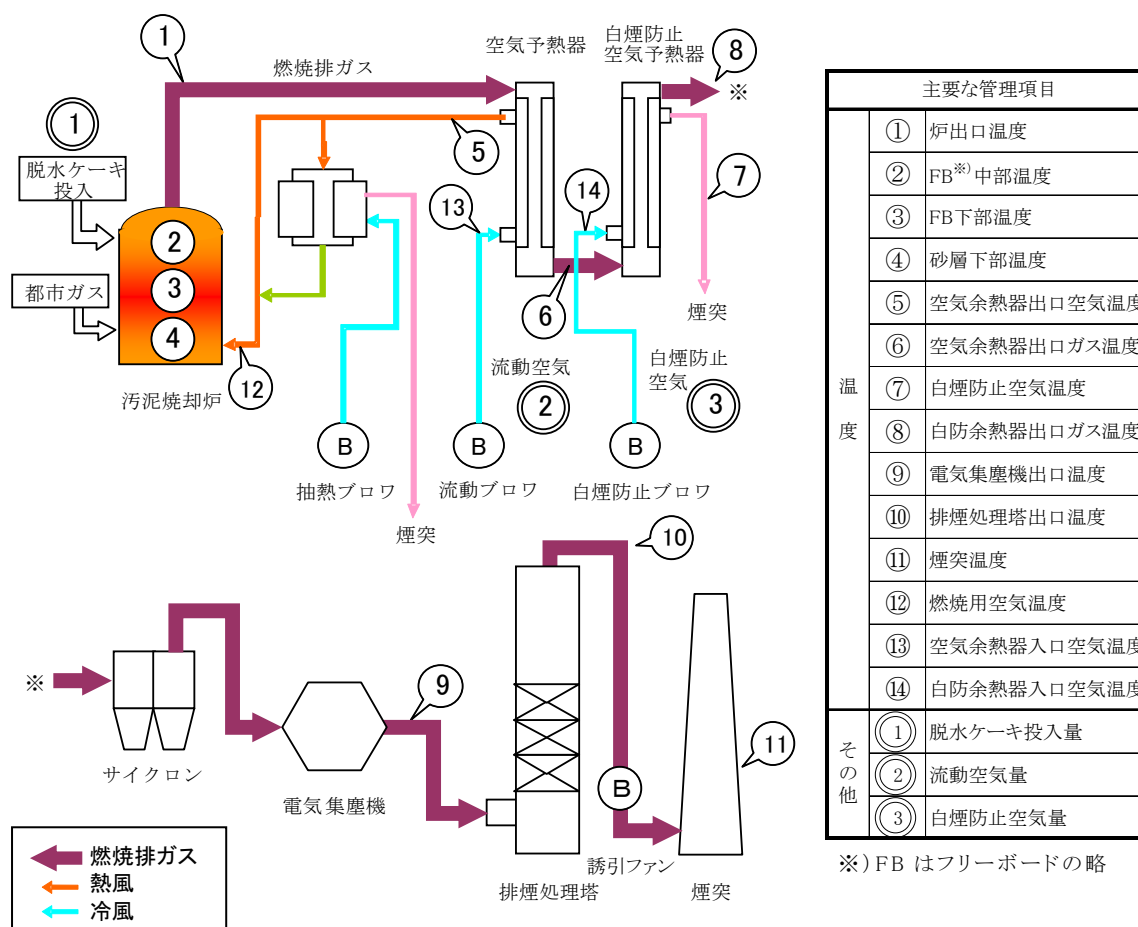


図-2 焼却工程における温度及び主要な管理項目

焼却炉の運転では、燃焼排ガス温度をはじめ、燃焼工程の各段階における運転温度が重要な管理指標となる。温度の他には、脱水ケーキ投入量(炉への可燃分の供給)、流動空気量(燃焼に必要な空気の供給、珪砂の流動)、白煙防止空気量(排ガスの冷却、白煙防止空気温度の制御)等の項目が重要である。

3-1. 脱水ケーキ性状の設定

脱水ケーキ性状は、焼却炉の熱収支計算を行う上で基本となる重要な値である。本稿では、対象施設での実測データをもとに、以下のように設定する。

(1)組成

平成 20 年 5 月から平成 21 年 2 月にかけて実施した脱水ケーキ組成分析結果(計 20 サンプル)をもとに、脱水ケーキ組成を表-4 のように算定した。ここで、低位発熱量は、設定した脱水ケーキ組成より求めた計算値である。

表-4 実測データを基にした脱水ケーキ組成の設定

低位発熱量 kcal/kg-VTS	脱水ケーキ組成(VTS%)						
	合計	炭素分	水素分	酸素分	硫黄分	窒素分	塩素分
4,825	100.00	50.90	7.65	35.40	0.57	5.40	0.08

(2)含水率及び可燃分

平成 18 年 3 月から平成 22 年 2 月までの脱水ケーキ測定結果(445 サンプル)をもとに、平均気温に対する含水率をプロットしたところ、含水率と平均気温の相関は弱く、ばらつきが多いことが分かった。

可燃分と平均気温の間にはわずかに相関がみられ、冬季に高く、夏季に低くなる傾向にあることが分かった。可燃分と平均気温の関係を図-3 に示す。

次に、全データを気温 17℃以上のデータ(夏季)と 17℃未満のデータ(冬季)に区分したところ、夏季について 218 個、冬季について 227 個となり、1 年を半期に区分することができた。夏季、冬季別の可燃分データについて、度数分布をグラフの面積が 1 となるように基準化した確率密度(正規分布)を図-4 に示す。図-4 より、可燃分は夏季と冬季で異なる分布を持っていることが明らかである。含水率と可燃分のデータを、夏季・冬季に区分して平均値及び標準偏差を算定した結果を表-5 に示す。

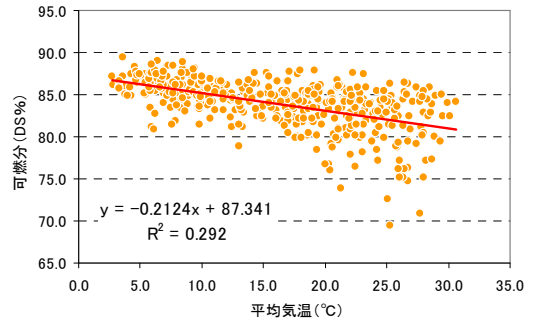


図-3 平均気温と可燃分の関係

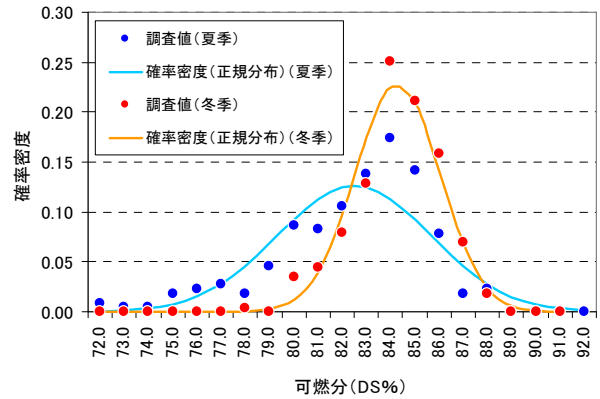


図-4 可燃分の確率密度分布

3-2.制御温度の設定

連続高温運転の熱収支計算に用いるため、①空気予熱器及び②白煙防止予熱器(以下、白防予熱器という)について、出口温度を変数とした回帰分析を行った。これらの温度設定は、目標とする燃焼温度における予熱器やブロワ設備等の容量を確認するために必要となる。

回帰式は、①については、説明変数を炉出口温度とし、目的変数を空気予熱器出口空気温度とした。②については、説明変数を白防予熱器出口空気温度をとし、目的変数を白防予熱器出口ガス温度とした。

①の回帰分析の結果を図-5 に示す。図-5 より、回帰式の寄与率 R² は 0.81 と、高い相関が得られた。②についても、R²=0.73 の相関が得られた。

表-5 季節変動を考慮した含水率・可燃分の設定

項目	含水率		可燃分	
	夏季	冬季	夏季	冬季
平均値	73.52	73.99	82.48	85.28
標準偏差	1.067	0.999	3.156	1.758

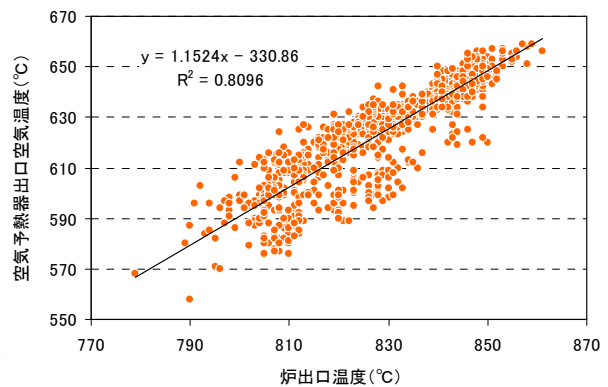


図-5 空気予熱器出口空気温度の回帰分析

3-3. 実測データに基づく熱収支計算

熱収支計算は、脱水ケーキ性状、投入量、炉出口ガス温度等を与条件として、入熱と出熱の釣り合い計算により燃焼空気温度、排ガス量、予熱器の熱交換量、補助燃料使用量等が算定される。

熱収支計算に用いる入力データ及び出力データを表-6に示す。ここで、入熱と出熱の釣り合いをとるための制御変数を燃焼用空気温度とする。

また、表-6の入力データ No.1~10 項目のデータの組をサンプルと呼ぶ。

汚泥組成、投入量及び炉出口ガス温度を一定としたとき、熱収支に最も影響を与えるのは含水率、可燃分であり、これら変動することによって算定結果が左右される。そこで、含水率及び可燃分については、統計的に求めた平均値と標準偏差による実測データの分布を使用することにより、対象施設における脱水ケーキ性状の変動を熱収支計算に反映させる。その手順を図-6に示す。

ここで、含水率及び可燃分の入力データは、表-5の平均値と標準偏差をもつ正規分布確率密度から、モンテカルロ法を用いて作成する。エクセル上で熱収支計算に必要な含水率と可燃分のデータ個数に対応する数の乱数(0~1)を発生させ、表-5の分布を持つ正規累積分布の逆関数を入力データとする。

これにより、対象施設における脱水ケーキの統計的特徴を反映した含水率及び可燃分のデータ群が作成できる。本稿では、含水率・可燃分の異なるサンプルを10組作成した。

その他の入力データのうち、No.1~2の汚泥組成、低位発熱量には、表-4の設定値を用いた。No.3~5、No.8~10については、平成21年11月から平成22年2月までの期間に実施された焼却炉の排ガス測定日の常時測定データ(毎正時)を用いた。ただし、投入量及び空気量は1時間の積算値である。常時測定データのサンプル数は272個であった。

熱収支計算の結果として、表-6のNo.11~21までの出力データ群が得られる。計算結果のうち、白煙防止ブロウ空気量(以下、白防ブロウ空気量という)を図-7に示す。

図-7より、計算値は実績値の変動を反映しており、対象施設に適合したシミュレーションが可能

表-6 熱収支計算モデルの入力及び出力データ

入力データ			出力データ		
No.	名称	単位	No.	名称	単位
1	脱水ケーキ組成	VTS%	11	湿り排ガス量	Nm ³ /h
2	低位発熱量(VTS基準)	kcal/kg-VTS	12	燃焼用空気量	Nm ³ /h
3	脱水ケーキ投入量	kg/h	13	燃焼用空気温度	℃
4	空気比	—	14	空気余熱器出口ガス温度	℃
5	炉出口温度	℃	15	空気余熱器熱交換量	kcal/h
6	含水率	%	16	白防余熱器出口ガス温度	℃
7	可燃分	DS%	17	白防余熱器熱交換量	kcal/h
8	白防予熱器入口空気温度	℃	18	白防ブロウ空気量	Nm ³ /h
9	空気予熱器出口空気温度	℃	19	煙突混合ガス量	Nm ³ /h
10	白防予熱器出口空気温度	℃	20	煙突温度	℃
			21	補助燃料使用量	Nm ³ /h

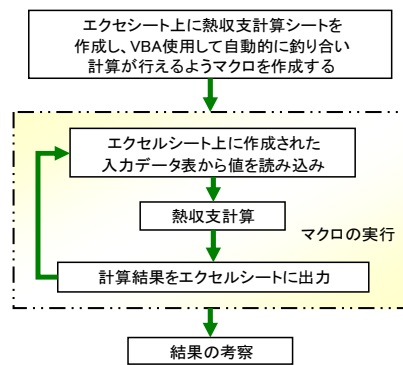


図-6 熱収支計算のながれ

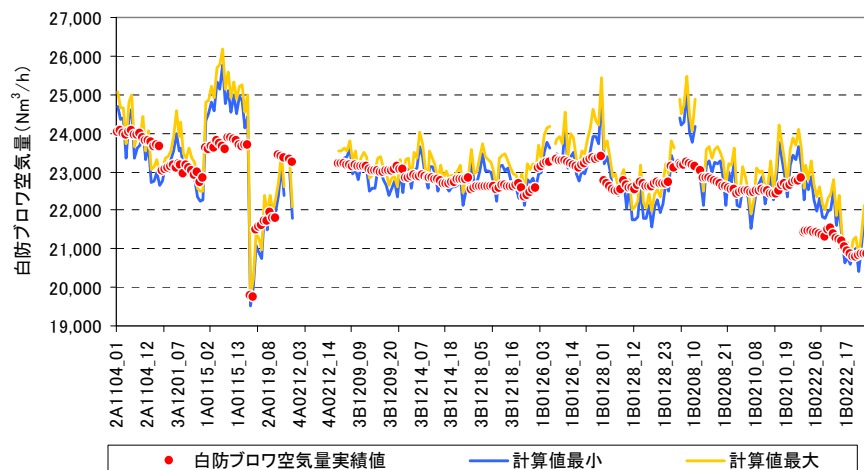


図-7 実測データ(N=272)による計算結果

な熱収支計算モデルが作成できた。

4. 年間運転モデルによる熱収支計算

対象施設の実績値をもとに、焼却炉の1年間の運転条件を設定した年間運転モデルを作成し、表-7に示す。年間運転モデルには、脱水ケーキ投入量及び焼却炉稼働基数の季節変動を考慮した。また、対象施設の現状の運転状態と、高温燃焼導入後と比較するため、炉出口温度 830℃（現状ケース）と 850℃（高温燃焼ケース）について計算する。入力データ項目は前章と同様、表-6によるが、項目のうち、No.8~10の温度データについては、「3-2.制御温度の設定」を基に、表-8のように設定する。

なお、排ガス中の N_2O 濃度の低減には、空気比管理が重要であることが知られている⁵⁾。ここでは、対象施設で実施した燃焼空気量の試験結果より、目標空気比を1.3とした。ただし、流動空気量が過小となると、珪砂の流動に支障が出る。そこで、対象施設の運転実績より、最小流動空気量を $8,200Nm^3/h$ とし、それ以下となる場合は、空気比を増加させて最小流動空気量を確保するよう入力データを作成した。

含水率と可燃分については、前章のモンテカルロ法を用いて夏季184個、冬季181個の計365個のデータを発生させた。以上より、脱水ケーキ投入量、含水率、可燃分の季節変動を加味し、365個の入力サンプルの組を作成した。入力サンプルの組は、炉出口温度830℃と850℃について各10組ずつ作成した。

5. シミュレーション結果の検討

シミュレーション結果より、現状ケースと高温燃焼ケースについて、補助燃料使用量の平均値を比較したものを表-9に示す。さらに、表-7の月別稼働時間及び表-9の補助燃料の増加量より、年間の補助燃料増加量を算定した結果を表-10に示す。この結果、対象施設における補助燃料の増加量は年間 $115,900Nm^3$ と推計され、補

表-9 補助燃料使用量の平均値

項目	補助燃料使用平均量(Nm^3/h)	
	2基運転時	3基運転時
高温燃焼ケース	19.13	39.88
現状ケース	14.56	31.98
高温燃焼による増加	4.57	7.9

表-7 年間運転モデルの設定

季	月	日数	時間	日平均投入量	運転基数	1基当り日投入量	時間当り投入量	稼働率	保温時間	稼働時間		
		日/月	h/月	t/日	基	t/日・基	t/h・基	%	h/月	h/月		
夏季	5	31	744	293	3	98	4.65	87.5	279	1,953		
	6	30	720	293	3	98	4.65	87.5	270	1,890		
	7	31	744	293	2	147	6.10	100	0	1,488		
	8	31	744	293	2	147	6.10	100	0	1,488		
	9	30	720	293	2	147	6.10	100	0	1,440		
	10	31	744	293	2	147	6.10	100	0	1,488		
冬季	11	30	720	311	2	156	6.50	100	0	1,440		
	12	31	744	311	2	156	6.50	100	0	1,488		
	1	31	744	311	2	156	6.50	100	0	1,488		
	2	28	672	311	2	156	6.50	100	0	1,344		
	3	31	744	311	3	104	4.65	92.9	158	2,074		
	4	30	720	311	3	104	4.65	92.9	153	2,007		
年間計		365	8,760	-	-	-	-	-	860	19,588		
									平成20年度焼却設備実績(h/年)		221	19,197

表-8 制御温度の設定

項目	炉出口温度	白防予熱器出口空気温度	空気予熱器出口空気温度		白防予熱器出口ガス温度	
			推計値	設計値	推計値	設計値
現状ケース	830	275	625.632	630	304.464	304.5
高温燃焼ケース	850	275	648.68	650	304.464	304.5

回帰式	係数	定数項
空気予熱器回帰式	1.1524	-330.86
白防予熱器回帰式	0.9792	35.184

表-10 補助燃料増加量の算定

季	月	稼働時間	補助燃料増加分	補助燃料増加量
		h・基/月	Nm^3/h ・基	$Nm^3/月$
夏季	5	1,953	7.90	15,429
	6	1,890	7.90	14,931
	7	1,488	4.57	6,800
	8	1,488	4.57	6,800
	9	1,440	4.57	6,581
	10	1,488	4.57	6,800
冬季	11	1,440	4.57	6,581
	12	1,488	4.57	6,800
	1	1,488	4.57	6,800
	2	1,344	4.57	6,142
	3	2,074	7.90	16,385
	4	2,007	7.90	15,855
年間計		19,588	-	115,904

助燃料の増加分に相当する使用料金は、年間で約 7,000 千円となる試算となった。

次に、図-8 に、燃焼用空気量と白防ブロワ空気量のシミュレーション結果を示す。燃焼用空気量は、高温燃焼によって大きく変化しないことが分かった。白防ブロワ空気量については、830℃の現状ケースに対し、約 5%増加する結果となった。

このことにより、燃焼用空気を供給する流動ブロワ設備については、現況の設備能力で対応できることが分かった。一方、白防ブロワ設備については、白防ブロワ空気量が増加することにより、現況の設備能力の範囲を超えたため、設備更新が必要であることが明らかになった。

さらに、白防ブロワ空気量計算結果の最大値：26,950Nm³/h より、高温焼却時の設備能力の設計値を 27,000Nm³/h とした。

最後に、焼却炉の運転条件を考慮した高温焼却化による削減効果を図-9 に示す。高温燃焼化による削減量は、現状ケース（830℃燃焼）を 100%としたとき、28.4%の削減となった。

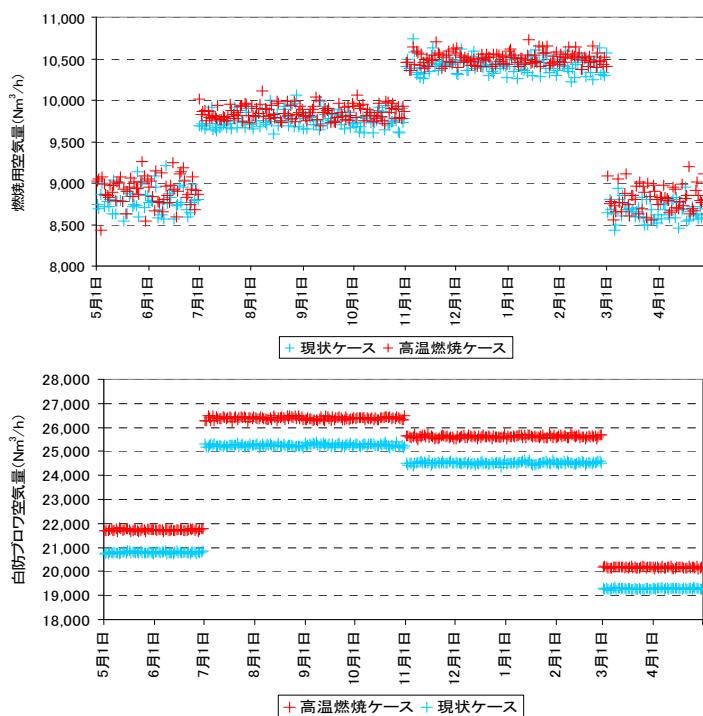


図-8 高温燃焼化シミュレーション結果

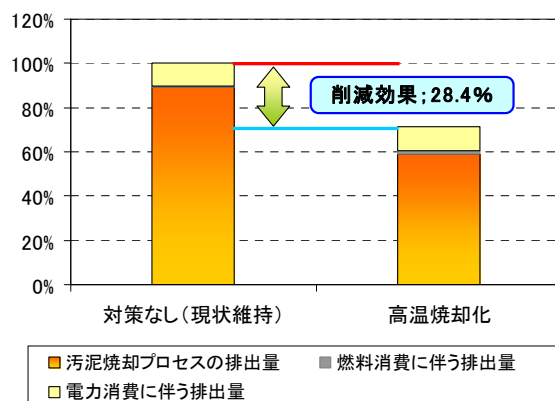


図-9 高温焼却による削減効果

6. おわりに

本稿で示したモデルの特徴は、焼却炉の主要な管理項目について、対象施設における統計的な変動を加味したシミュレーションが可能な点にある。温室効果ガス削減計画の策定には、削減量と同時に、対策を講じることによる増加量を推定することが必要であり、また、削減計画の対象となる施設について、既存設備の改築等、具体的な対策を示すことが求められる。本論文はそのための手法のひとつであり、今後は、このようなシミュレーションモデルを他事例に応用したいと考えている。

<参考文献>

- 1) 下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き, 国交省都市・地域整備局下水道部, H21年3月
- 2) 地球温暖化対策の推進に関する法律施行令第三条三号, H20年6月13日改定
- 3) 温室効果ガス算定排出量等の報告等に関する命令(算定省令), H18年3月
- 4) 下水道施設計画・設計指針と解説-2009年版-, 日本下水道協会
- 5) 平成6年度環境庁委託業務結果報告書 温室効果ガス排出量推計手法調査報告書 -排出濃度の測定法-, 大気汚染研究協会, H7年3月