

[研究報告]

ごみ焼却施設の余熱利用に関する
試算システムの作成Development of the computing system on utilization
of thermal energy for M. S. W. incineration

秋月 祐司* 藤吉 秀昭*

Hiroshi AKIZUKI and Hideaki FUJIYOSHI

1. はじめに

近年、地球規模の環境問題に対する関心の高まりから、ごみ焼却施設においてもごみの持つ膨大な熱エネルギーを無駄に大気中に放散せず有効に利用する事への要求が高まりつつある。余熱利用の例としては、浴場や温水プールの併設、場内の電力を賄うための発電から、地域冷暖房、農漁業への熱供給などの実施例があり、ごみ焼却施設はエネルギー回収施設としての期待が高まってきた。

このような背景から新規にごみ焼却施設を建設するに当たっては、焼却機能や公害防止機能だけでなく、余熱利用の用途や規模が重要な検討課題となってきた。

一般にごみ発生量は、施設竣工後も経年的に増加して行くものであり、利用可能な熱量は年とともに変化する。このため余熱利用計画を立案するに当たっては竣工後の経過年数に対応した利用可能な回収熱量に基づいてさまざまなケーススタディを行い、その施設に最も適した余熱利用の方式や規模を選択する必要がある。

しかし、余熱の利用形態は蒸気や温水など様々であり、またごみの燃焼にともなう発生熱量と回収利用可能な熱量の計算は非常に複雑であり、ごみ焼却量や余熱利用形態に合わせてさまざまなケーススタディを行うことは大変な作業を必要とする。

そこで筆者らは燃焼計算に基づく物質収支、熱収支から回収利用可能な熱量の算出、並びに発電量と余熱熱量の算出がパソコンで容易に行えるシステムを作成したので報告する。また、適当な規模のごみ焼却施設を想定し

た、このシステムの利用例を併せて報告する。

2. システムの概要

ごみの焼却にともなう発生する熱量は、焼却量とごみ質によって一義的に決定される。しかし、そのうち利用できる熱量は熱エネルギーの回収方法によって差があり、また複数の設備による熱回収を同時に行う場合もある。したがってごみ焼却施設の余熱利用を考える上ではさまざまな熱利用形態に対応できる施設モデルを設定しなければならない。

また、最近では発電を計画する施設が多くなっているが、余熱利用として発電だけを計画する施設はむしろ少なく、他の余熱利用と組み合わせて発電を計画する施設が多い。この場合、可能な発電量だけでなく、必要な電力を発電した上でさらにどの程度の余剰熱量が利用可能か、あるいは逆に一定の余剰熱量を確保した上でどれだけの発電能力があるかを施設竣工後の各年度において把握しなければならない。

余熱利用、とりわけ発電と場外余熱利用を同時に計画する場合には、ごみ質と焼却量を計画の範囲内で変化させながら、場内で必要とする電力量、可能発電量、場内外で利用できる余剰熱量の関係を、十分に吟味することが重要である。この場合、蒸気の条件やタービンの形式にフィードバックをかけ、場外余熱利用施設の規模、経済性、メンテナンスの容易性なども考慮しながら最適な計画とする必要があるが、そのためには、さまざまな余熱利用条件における複雑で膨大な計算が必要となる。

本システムは、余熱利用の計画段階におけるこのような計算をきわめて容易かつ短時間で行うことを主眼に設計されている。システムは市販の表計算ソフト（ロータス1-2-3）上のワークシートとなっており、図-1

* (財) 日本環境衛生センター 東日本支局環境工学部
Department of Environmental Engineering, East
Branch, Japan Environmental Sanitation Center

に示すような画面上で左半分即ちごみ質、燃焼条件、焼却条件、余熱利用条件を入力すれば直ちに計算結果が画面の右半分に表示される。

本システムの大きな特徴は以下の2点である。

- ① 条件入力後自動計算により結果が得られるようにするため、繰り返し計算を避けたこと。
- ② 低位発熱量を入力すれば燃焼計算に必要な元素組成等の条件は内部で計算されるなど、入力条件をで

きるだけ簡略化したこと。

したがって、細かな部分では条件の設定や計算をかなり簡略化してある。しかし、本システムの利用目的は焼却施設建設の計画段階における様々なケーススタディを行うことであり、この目的のためには十分な計算精度を有している。さらに、あまり詳細な条件設定をしなくても利用可能熱量が容易に算出できることは非常に有利である。

ごみ質		計算結果	
低位発熱量	1,800 kcal/kg	蒸気発生量	11,425 kg/h
燃焼条件		内蒸気使用量	500 kg/h・炉
一次空気温度	150℃	最大可能発電量	1,050 kW
炉内水噴霧度	1,000 kg/h	内必要電力	667 kW
炉出口ガス温度	900℃	実際発電量	629 kW
焼却条件		余熱(TG排気)	0 Mcal/h
焼却量	80 t/日・炉	余熱(減圧蒸気)	2,302 Mcal/h
処理時間	24 h/日	合計余熱	2,302 Mcal/h
運転炉数	2 炉	白防必要熱量	2,689 Mcal/h
ボイラ出口ガス温度	350℃	空加回収熱量	2,309 Mcal/h
ガス冷却室出口温度	350℃		
空気加熱器出口温度	200℃		
余熱利用条件			
空気予熱(1:SAH, 2:GAH)	1		
蒸気(1:飽和, 2:過熱)	2		
タービン(1:背圧, 2:復本)	2		

図-1 ワークシート画面

2-1 施設モデル

熱エネルギーの回収方法としてはボイラ(全ボイラ, 半ボイラ, 煙道ボイラ), 空気加熱器, 温水熱交換器など様々であるが, 本システムでは様々なタイプの熱エネルギー回収方法に対応するため図-2に示すような施設モデルを用いた。

これによればたとえ炉出口温度とボイラ出口温度を同一とすることでボイラ無しの施設, ボイラ出口温度よりガス冷却室出口温度を低くすることで半ボイラ方式の施設, また両者を同一とすることで全ボイラ方式の施設となるなどさまざまなエネルギー回収方法をシミュレートすることができる。

なお, このモデルでは集じん器より下流の低温部に設置する煙道ボイラや温水熱交換器には対応できない

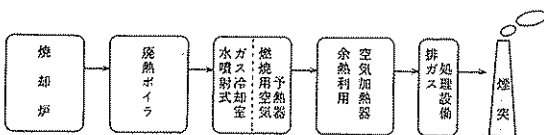


図-2 施設モデル

が, 最近ではダイオキシン対策から集じん器入口のガス温度を200℃以下で設計することが多く, 集じん器以降での多量の熱回収は難しいため, ここでは対象としなかった。

2-2 余熱利用モデル

1) 蒸気として回収する場合

熱エネルギー回収方法としてボイラを用いる場合, 取り出す蒸気の温度や圧力は施設によって様々であるが, ここでは計算条件の入力を簡略化するため, 飽和蒸気の場合180℃, 10.2 at及び過熱蒸気の場合260℃, 20 atとした。最近では高効率発電のため蒸気条件が高圧化する傾向にあるが最も一般的と考えられる値とした。また, 蒸気条件の固定化は余熱利用の可能性の目安としては問題ないものと思われる。

燃焼用空気の加熱方法としては蒸気による場合とガス式熱交換器による場合があるが, 本システムではどちらかを選択できる。ただし, ガス式熱交換器は図-2に示すように水噴射式ガス冷却室との組合せとしてモデル化されているため, 全ボイラ施設ではガス式熱交換器を選択することはできない。

発電を行う場合、蒸気タービンの形式には復水タービン、背圧タービン、抽気タービンがあるが、抽気タービンを採用するケースは少ないため本システムでは復水タービンと背圧タービンのどちらかを選択することとした。タービン入口及び出口の蒸気条件もまた設計段階では施設毎に異なる条件が用いられるがここでは各々のタービン形式によって統一条件を用いた。

統一した蒸気条件を表-1に示す。なお、発電以外に利用できる蒸気は減圧弁によって減圧された低圧蒸気としてモデル化されており、背圧タービンの場合はタービン排気と同一条件の1.3at、復水タービンの場合は3atのそれぞれ飽和蒸気とした。

表-1 タービン蒸気条件

タービン入口		タービン出口	
飽和蒸気	170℃, 8.1at	背圧タービン	1.3at
過熱蒸気	250℃, 19at	復水タービン	0.3at

2) 温水で回収する場合

排ガスの熱エネルギーを温水として取り出す方法としては排ガスダクト内に直接温水熱交換器を設置する方法と空気加熱器で空気を加熱し、その空気ダクトに温水熱交換器を設置し間接的に加熱する方法がある。最近では温水熱交換器の排ガスによる腐食を防止するため後者の方式を採用する例が多く、また加熱空気を循環使用せず排ガスに混合することで白煙防止を行うことも多くなってきた。このような多様なパターンに対応するため、本システムにおいても間接加熱式のモデルとした。

3) その他の熱利用

今後計画される施設はダイオキシン対策として排ガス温度を低く設計するため、排ガス中の水蒸気の凝縮による白煙の発生がこれまで以上に顕著になるものと考えられる。これを防止あるいは抑制するためには高温空気を排ガス中に混入する方法が一般的であるが、本システムでは白煙防止に必要な熱量を概算し、示すことで余熱利用に対する一応の目安を与えることとした。

2-3 物質収支及び熱収支

ごみ質として入力するのは、低位発熱量のみであるが、燃焼計算に必要な変量、すなわち三成分や元素組成は、当センターにおける平成2年度のごみ質分析結果から回帰式により適切に設定される。発熱量と各変量との関係を表-2に示す。また、焼却炉、ボイラ、ガス冷却

室及び余熱利用空気加熱器における物質収支及び熱収支、並びに発電容量の計算式は表-3に示すとおりである。

表-2 低位発熱量と三成分・元素組成

変 量	計 算 式
三成分	
水分 (%)	83.8-0.0177×低位発熱量
可燃分 (%)	11.2+0.0158×低位発熱量
灰分 (%)	100-(水分+可燃分)
元素組成	
炭素 (%)	0.5542×可燃分
水素 (%)	0.0795×可燃分
窒素 (%)	0.541
酸素 (%)	可燃分-(炭素+水素+窒素+硫黄+塩素)
硫酸 (%)	0.017
塩素 (%)	0.295

注) 窒素, 硫黄, 塩素については可燃分との相関がないため定数とした。

2-4 使用方法

本システムの使用方法は図-3に示すフローにしたがって、熱利用形態や発電の有無を選定し、各々に必要な条件を設定(入力)する。

発電を行う場合には所内必要電力量を参考にしながら可能発電量の範囲内で実際発電量を設定する。これにより、発電を行った上でさらに利用できる余剰熱量が表示される。余剰熱量が不足する場合はさらに実際発電量を調整する必要がある。

温水利用の場合は、ガス冷却室出口ガス温度によって回収可能熱量は大きく異なる。しかしあまりこれを高くすることは現実的でないので適切に設定することが重要である。

計算はこれらの条件を変更するたびに自動的に行われ、計算結果のうち、主なものは同一画面上に表示されるので、焼却量を変化させながら利用可能熱量や発電量を求めて行く。

3. システムの使用例

A市では焼却対象ごみの発生量が毎年3%ずつ増加しており、新焼却処理施設の竣工7年後には日平均処理量が160tに達すると見積もっている。そこで新焼却処理施設を80t/24h×3炉の構成とし、余熱利用としては発電の他場内給湯及び空調、また住民から要望の強い温水プールと熱帯植物園の建設を検討している。これら発電以外に必要な熱量は表-4に示すとおり、場内利用300Mcal/h、場外利用2,000Mcal/hである。なお、計画ごみ質は低質ごみ1,200kcal/kg、基準ごみ1,800kcal/kg、高質ごみ2,700kcal/kgとする。

表-3 物質収支・熱収支

項 目		記 号	計 算 式	単 位
焼 却 炉 内	理論空気量	Va0	$\{8.89C+26.7(H-0.8)+3.33S\} / 100 \times \text{焼却量}$	m ³ /h
	理論乾きガス量	Vtg1	$0.79Va0+(1.867C+0.7S+0.8N) / 100 \times \text{焼却量}$	m ³ /h
	炉出口水蒸気量	Vw1	$(11.2H+1.244\text{水分}) / 100 \times \text{焼却量} + 1.244\text{炉内噴霧水量}$	m ³ /h
	ごみ持ち込み熱量	Qmw	低位発熱量×焼却利用/1,000	Mcal/h
	炉内噴霧水蒸発潜熱	Qe1	炉内噴霧水量×586/1,000	Mcal/h
	炉内発生熱量	Q0	Qmw-Qe1	Mcal/h
	一次空気量	Val	Va0×1.5	m ³ /h
	一次空気持ち込み熱量	Qa1	Val×(Ca1×一次空気温度-Ca0×20)	Mcal/h
	炉出口ガス保有熱量	Qg1	(Q0+Qa1)×0.95	Mcal/h
	炉出口理論乾きガス保有熱量	Qtg1	Cg1×Vg1×炉出口ガス温度	Mcal/h
炉出口水蒸気保有熱量	Qw1	Cw1×Vw1×炉出口ガス温度	Mcal/h	
二次空気量	Va2	$\{Qg1-(Qtg1+Qw1)\} / (Ca2 \times \text{炉出口ガス温度} - Ca0 \times 20)$	m ³ /h	
過剰空気量	Va3	(Val-Va0)+Va2	m ³ /h	
炉出口湿りガス量	Vwg1	Vtg1+Vw1+Va3	m ³ /h	
注) C, H, N, O, S: ごみ中の炭素, 水素, 窒素, 酸素, 硫黄 Ca0, Ca1, Ca2, Cg1, Cw1: 20℃の空気, 一次空気温度の空気, 炉出口温度の空気, 同理論乾きガス, 同水蒸気の平均定圧比熱				
ボ イ ラ	ボイラ出口温度	Tb	入力値	℃
	ボイラ出口ガス保有熱量	Qg2	$(Vg1 \times Cg2 + Vw1 \times Cw2 + Va3 \times Ca4) \times Tb / 1,000$	Mcal/h
	ボイラ吸収熱量	Qb	Qg1-Qg2	Mcal/h
	発生蒸気エンタルピ	Es1	過熱蒸気の場合: 699.7, 飽和蒸気の場合: 663.1	kcal/kg
	蒸気発生量	Ws1	Qb/(Es1-ボイラ給水温度)	kg/h
	蒸気式空気予熱器使用蒸気量	Wsa1	Qa1/(Es1-ボイラ給水温度)×1,000	kg/h
利用可能蒸気量	Ws2	Ws1-Wsa1-プラント使用蒸気量	kg/h	
注) Cg2, Cw2, Ca4: ボイラ出口温度(Tb)における理論乾きガス, 水蒸気, 過剰空気の平均定圧比熱				
ガ ス 冷 却 室	ガス式空気予熱器回収熱量	Qgah	Qa1	Mcal/h
	GC 出口ガス温度	Tgc	入力値	℃
	GC 出口理論乾きガス熱量	Qtg2	Vtg1×Cg3×Tgc	Mcal/h
	同 過 剰 空 気 熱 量	Qa2	Va3×Ca5×Tgc	Mcal/h
	同 水 蒸 気 ① 熱 量	Qw2	Vw1×Cw3×Tgc	Mcal/h
	水 噴 射 量	Wgc	$\{Qg2-Qgah-(Qtg2+Qa2+Qw2)\} / (586+Cw3) \times Tgc - Cw4 \times 20$	kg/h
	出口水蒸気熱量	Qw3	1.244×Wgc×Cw3×Tgc+Qw2	Mcal/h
	出口水蒸気量	Vw2	Vw1+1.244×Wgc	m ³ /h
GC 出口ガス熱量	Qg3	Qtg2+Qa2+Qw3	Mcal/h	
GC 出口湿りガス量	Vwg2	Vwg1+1.244×Wgc	m ³ /h	
注) Cg3, Cw3, Ca5: ガス冷却室出口温度における理論乾きガス, 水蒸気, 過剰空気の平均定圧比熱				
空 気 加 熱 器	空気加熱器出口ガス温度	Tah2	入力値	℃
	空気加熱器理論ガス熱量	Qtg3	Vtg1×Cg4×Tah2	Mcal/h
	同 過 剰 空 気 熱 量	Qa3	Va3×Ca6×Tah2	m ³ /h
	同 水 蒸 気 熱 量	Qw4	Vw2×Cw4×Tah2	m ³ /h
空気加熱器吸収熱量	Qah2	Qg3-(Qtg3+Qa3+Qw4)	Mcal/h	
注) Cg4, Cw4, Ca6: 空気予熱器室出口温度における理論乾きガス, 水蒸気, 過剰空気の平均定圧比熱				
タービン発電機	タービン入口蒸気エンタルピ	Eti	過熱蒸気の場合: 695, 飽和蒸気の場合: 600	kcal/kg
	タービン排気蒸気エンタルピ	Eto	過熱蒸気で復水式の場合: 530, 背圧式の場合: 579 飽和蒸気で復水式の場合: 536, 背圧式の場合: 585	kcal/kg
	タービン有効効率	ηe	0.75	-
	発電機機械効率	ηg	0.90	-
	蒸気消費率	Sr	860/{ηe×ηg×(Eti-Eto)}	kg/kWh
	最大可能発電量	Pmax	Ws2/Sr	kW
	実際発電量	Pr	入力値	kW
	発電用蒸気使用量	Wsp	Pr×Sr	kg/h
	余剰高圧蒸気量	Ws3	Ws2-Wsp	kg/h
	同保有熱量	Qs1	Ws3×Es2	Mcal/h
タービン排気熱量	Qs2	復水の場合: 0, 背圧の場合: Wsp×Eto	Mcal/h	
利用可能余熱量	Qst	Qs1+Qs2	Mcal/h	
注) Es2: 復水式の場合 651, 背圧式の場合 Eto と同値				

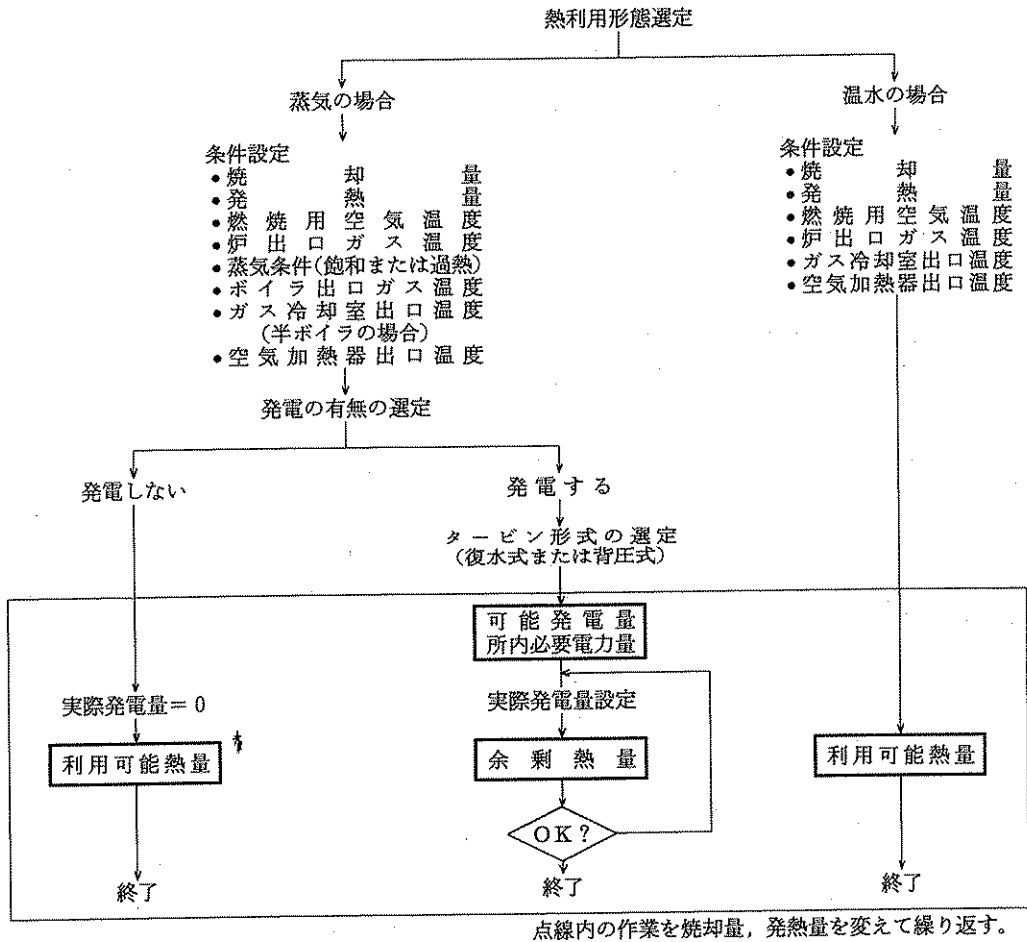


図-3 利用可能熱量の算出手順

表-4 余熱利用条件

内 容		規 模	単 位 熱 量	必 要 熱 量
場内利用	給 湯	10 m ³ / 8 h	55 Mcal / m ³	68.75 Mcal / h
	冷 暖 房	1,000 m ²	0.2 Mcal / m ² · h	200 Mcal / h
小 計		268.75 Mcal / h → 300 Mcal / h		
場外利用	温水プール(大人用)	25 m × 6 コース(12 m)	2 Mcal / m ² · h	600 Mcal / h
	温水プール(子供用)	15 m × 15 m	2 Mcal / m ² · h	450 Mcal / h
	プール用温水シャワー	30 m ³ / 8 h	55 Mcal / m ³	206.25 Mcal / h
	風 呂 給 湯	20 m ³ / 8 h	55 Mcal / m ³	137.5 Mcal / h
	熱 帯 植 物 園	1,000 m ²	0.45 Mcal / m ² · h	450 Mcal / h
	場外施設管理棟冷暖房	300 m ²	0.2 Mcal / m ² · h	60 Mcal / h
小 計		1,903.75 Mcal / h → 2,000 Mcal / h		
合 計		2,300 Mcal / h		

このような条件のもとで本システムを用いて新焼却処理施設の可能発電量と利用可能な余剰熱量について試算を行った。なお、燃焼条件は表-5に示すとおりである。ボイラ出口温度が350℃とやや高いが、これは白煙防止用の空気を余熱利用空気加熱器で加熱するためである。

発電と場外熱供給は両立するか、また、タービン形式は背圧式と復水式のどちらが有利かを検討するため次のようなケーススタディを行った。なお、目標発電量は消費電力の変動時に逆送をしないようプラント必要電力の90%とし、不足分を買電で賄うこととした。

表-5 計 算 条 件

条 件	低質ごみ	基準ごみ	高質ごみ
低位発熱量 (kcal/kg)	1,200	1,800	2,700
一次空気温度 (°C)	200	150	100
炉内水噴霧量 (kg/h)	0	1,000	3,000
炉出口温度 (°C)	900	900	900
焼却量 (t/日・炉)	55~80		
処理時間 (h)	24		
運転炉数 (炉)	7年目まで: 2 それ以降: 3		
ボイラ出口温度 (°C)	350	350	350
ガス冷却室出口温度 (°C)	350	350	350
空気加熱器出口温度 (°C)	200	200	200
空気予熱蒸	SAH	SAH	SAH
蒸	過熱蒸気	過熱蒸気	過熱蒸気

<ケース1 背圧タービンを採用した場合>

本システムでは背圧タービンの場合、発電以外に利用できる蒸気の条件はタービン排気蒸気と同一としているため、最大可能発電量の範囲内で実際発電量を変化させても余剰熱量は変わらない。したがって、ここでは実際発電量を最大可能発電量として試算した。その試算結果を図-4及び図-5に示す。

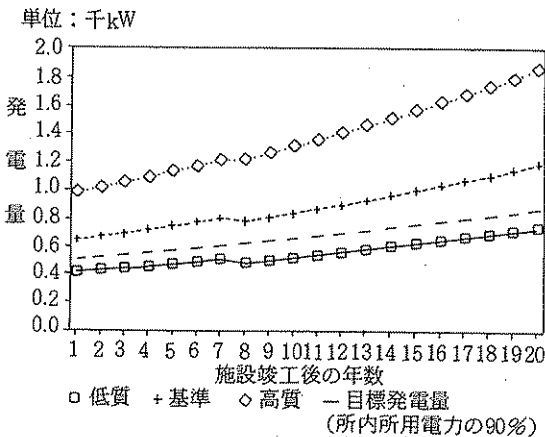


図-4 最大可能発電量 (背圧タービンの場合)

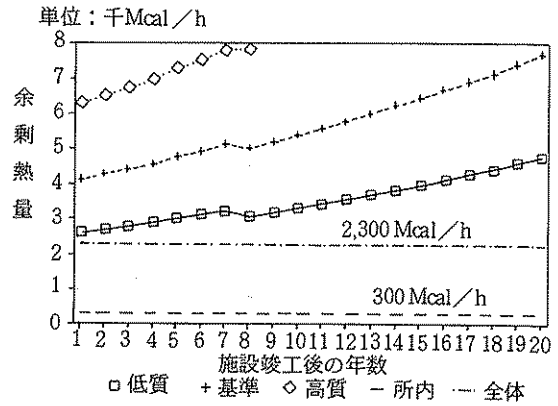


図-5 余剰熱量 (背圧タービンで最大可能発電量を発電した場合)

低質ごみでは最大可能発電量は稼働後年数を経て焼却量が増加しても目標発電量に達しないことがわかった。基準ごみ以上では竣工当初から目標発電量を発電できる。また、発電以外の余熱利用に関しては、ごみ質を問わず、竣工当初からすべての余熱利用施設に対し熱供給を行うことができる。

<ケース2 復水タービンを採用した場合>

復水タービンの場合はタービン排気蒸気の熱が利用できないため、同じ蒸気発生量でも発電量によって余剰熱量は大きく異なる。

試算の結果、どのようなごみ質においても竣工当初から最大可能発電量は目標発電量を上回り、また発電量を抑制した場合には必要な2,300 Mcal/hの余剰熱量を確保することが可能であることがわかった。しかし、目標発電量を発電しながら2,300 Mcal/hの余剰熱量を同時に確保することはごみ質やごみ量によっては困難である。そこで余剰熱量として2,300 Mcal/hを確保した上で可能な発電量を試算した結果を図-6に、また、目標発電量を発電した上で確保できる余剰熱量を試算した結果を図-7に示す。

低質ごみの場合、余剰熱量を2,300 Mcal/h確保すると可能な発電量は目標発電量の半分程度となってしまふ。さらに、発電機は定格出力に対してあまり少量の発電はできず、安定した運転ができるのは定格出力の20%程度からと思われる。本計画においては目標発電量から考えて、発電機の定格出力は900 kW程度になるため、発電量が約180 kW以下の場合には発電ができない。したがってこの場合は竣工当初の3年間は発電ができない。また、基準ごみの場合も竣工当初の5年間は目標発電量の発電ができない。

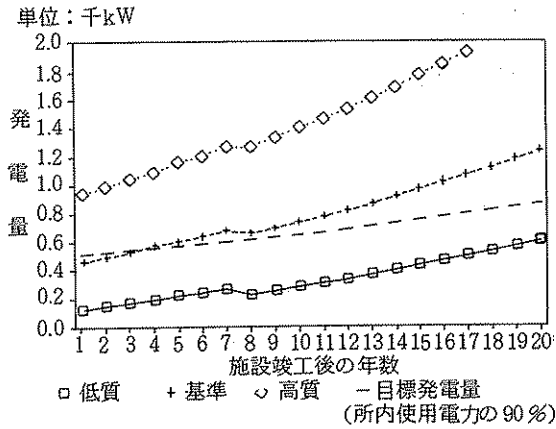


図-6 最大可能発電量

(復水タービンで余剰熱量を2,300Mcal/h確保した場合)

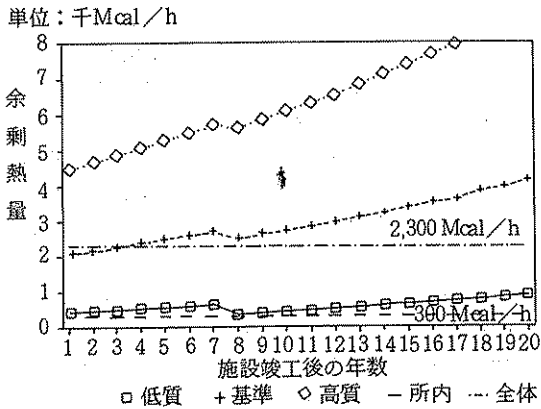


図-7 余剰熱量

(復水タービンで場内使用電力の90%を発電した場合)

一方、目標発電量を発電した場合の余剰熱量は低質ごみの場合、概ね場内利用分程度しか確保できない。

また、基準ごみにおいても竣工当初の2年間は余剰熱量が不足する。

本計画の場合、場外で利用する熱量が大きいため、いずれのタービン形式を採用しても低質ごみにおいては発電と余熱利用を両立することはできないことがわかった。背圧タービンの場合は十分な余剰熱量が得られるが、発電量に限界がある。一方、復水タービンの

場合は、発電と余剰熱量の一方だけであれば低質ごみでも要求に応じることができるが、一方の要求を満たした場合は他方はかなり犠牲になる。ごみ質の変動や焼却量の変化及び発電量と余剰熱量の関係を総合的に考えた場合、本計画には背圧タービンの方がやや適していると考えられる。

4. まとめ

ごみ焼却施設の余熱利用に関する試算システムを作成し、適当な規模のごみ焼却施設について竣工後から20年後までの各年度における余熱利用の形態と規模について試算を行った。

本システムは、ごみの発熱量と焼却量から利用可能な熱量、最大可能発電量、並びに実際の発電量を可能量以内に設定したとき利用できる余剰熱量等を容易にかつ即座に計算できるように設計されたものである。したがって、細部の条件設定や計算に至っては簡略化を図った部分もあるため、計算の精度においては、焼却施設建設の際に行われる設計計算に較べるべくもない。しかし、焼却施設建設の計画段階にあっては、様々なケーススタディを行った上でその施設に最も適した余熱利用計画を策定していくことが必要であり、簡便性は何よりも重要である。また、本システムの計算精度はこの段階のケーススタディにおいては十分な精度を持っているものと思われる。

5. 参考文献

- 1) 廃棄物処理施設(ごみ処理施設)の標準設計方法に関する調査報告書;昭和56年, (財)全国都市清掃会議
- 2) 中小施設における蒸気利用技術調査報告書;昭和61年, 厚生省生活環境局水道環境部
- 3) 基本蒸気タービン;山中廣中, 1976, 海文堂
- 4) 塩月隼人, 楠 幸二, ごみ焼却発電における適正出力規模算定についての考察;1991年, 第1回廃棄物学会研究発表会講演論文集
- 5) ごみ処理施設構造指針解説;昭和62年, (財)全国都市清掃会議
- 6) ごみ焼却炉における熱利用の手引;昭和58年, (財)全国都市清掃会議