

日本の環境装置産業による環境負荷低減効果について（廃棄物処理編）

一般社団法人 日本産業機械工業会
環境装置部会 環境負荷低減効果調査委員会

1. 国内における廃棄物焼却の余熱利用・廃棄物発電の変遷

わが国では、限られた土地と公衆衛生への配慮から、20世紀半ば以降はごみの焼却処理が強く進められてきた。焼却により減容化や無害化、再資源化が可能となることから、現在日本で排出されるごみの約8割が焼却処分されている。

ごみを焼却する際に発生する高温の排ガスは集じん機や排風機等機器の損傷を防ぐため冷却した後に、煙突から放出する。しかし、熱をそのまま捨てるのではなく発電や温水供給等として利用する熱回収施設が全国に700カ所以上整備されている。

国内の廃棄物焼却施設は自治体の人口推移に合わせて統廃合等が進められており、日本全体の処理能力としては減少の途にあるが、熱回収施設が全体に占める割合や発電能力は増加傾向にある（図1）。

日本の熱回収施設における発電は古くは1960年代に遡る。日本における廃棄物焼却プラントメーカーによる技術開発が行われる中で、発電効率向上も目標に据えられ、改良が重ねられてきた（図2）。現在では発電効率が25%を越える施設も登場してきており、今後の更なる効率改善が期待されている。

さらに、熱回収施設による発電（廃棄物発電）は燃料となるごみに再生可能な生物資源が含まれていることから、日本ではバイオマス発電の一つとして再生可能エネルギーに認められている。

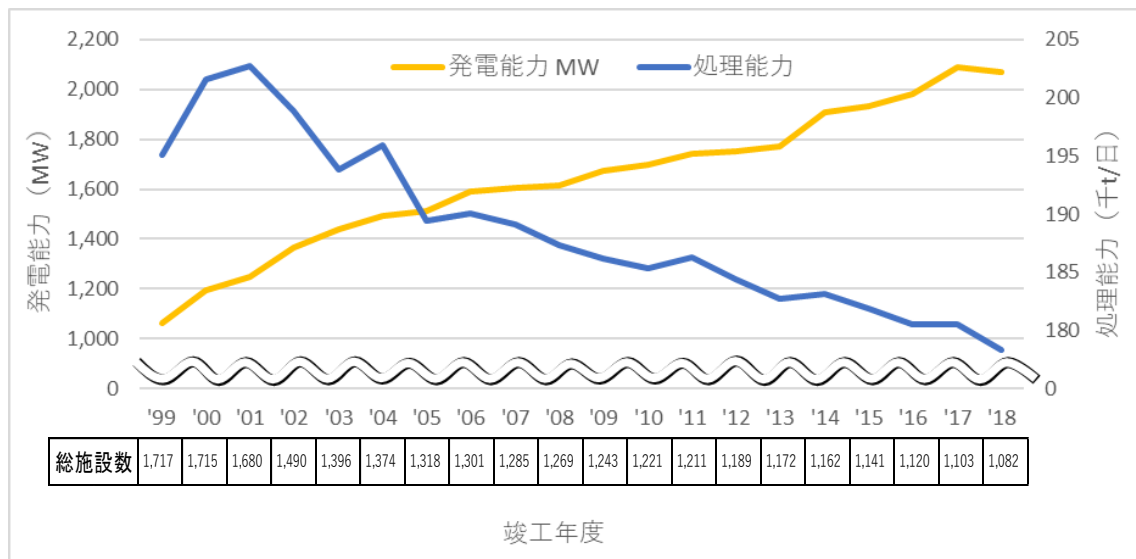


図1. 廃棄物発電施設の推移（出典：環境省「日本の廃棄物処理」）

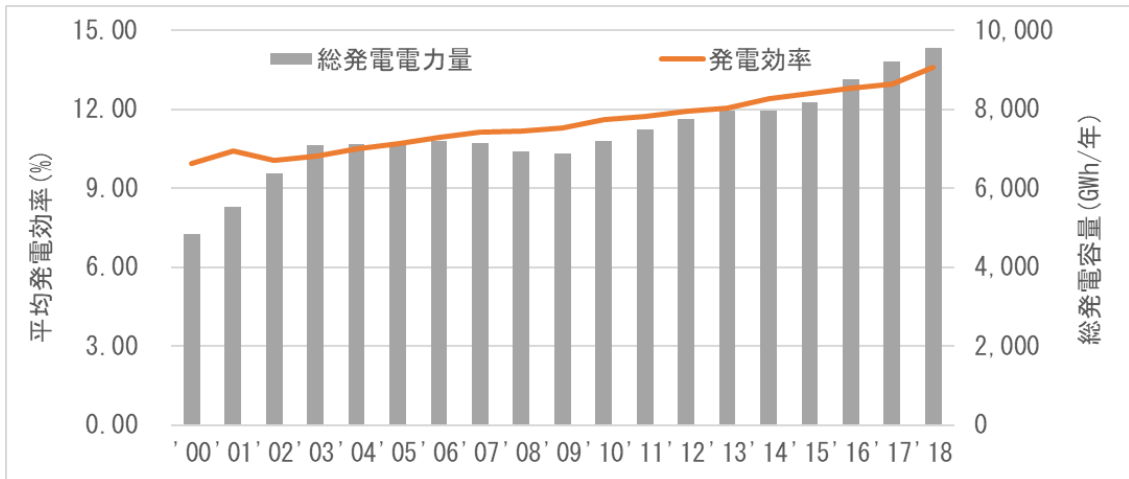


図2. 日本における廃棄物発電の推移（出典：環境省「日本の廃棄物処理」）

2. 廃棄物発電技術の温室効果ガス削減効果

発展途上国を中心に廃棄物を直接埋立てる処理方法が現在でも広く見られる。埋立てられたごみに含まれる有機分は微生物の力により次第に分解し、温室効果ガスの一つであるメタンガス（CH₄）を大気中に排出するため、環境への影響が指摘されている。



そこで、ごみに含まれる有機分の安定化を行う中間処理が先進国中心に行われている。その一つとして、わが国で普及している焼却処理も温室効果ガス低減に貢献している。

例として、埋立てを行っている地域で、1日1,000トンのごみを処理出来るごみ焼却処理施設を導入し、年間稼働日数300日、20年間稼働させた場合に削減できる温室効果ガスについて試算した例を以下に示す。検討にあたり、「二国間クレジット制度（JCM）案件組成調査 最終報告書「ホーチミン市における統合型廃棄物発電」」をモデルにして算出した（算出根拠は巻末参照）。

まず従来の埋立て処理ではCH₄がどの程度生成されるかを計算する。1年目は二酸化炭素換算で7万トン/年あまりだったのが、20年目になると26万トン/年にもなり、20年間を通して431万トンの二酸化炭素に相当するCH₄が大気中に放出されることになる（表1）。

表1. 1,000トン/日を年間300日埋立てた際に毎年発生するメタンCH₄量（CO₂換算）¹⁾

年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
tco2/年	69,403	117,478	151,158	175,097	192,420	205,226	214,931	222,486	228,533	233,508
年	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
tco2/年	237,708	241,333	244,523	247,374	249,954	252,310	254,479	256,485	258,349	260,085
合計(20年間)										
tco2										4,312,840

一方で、ごみ焼却施設の運転立上げには化石燃料（軽油）が必要となるほか、ごみを焼却すると、化石由来のプラスチックなどから二酸化炭素等の温室効果ガスが発生する。1,000（トン/日）のごみを焼却処理することで次の①と②、③に示すとおり、年間で13万トン余りの温室効果ガスが発生することになる。

① 化石燃料消費による二酸化炭素排出量²⁾

$$\begin{aligned} & \text{化石燃料の消費量} \times \text{化石燃料の発熱量} \times \text{化石燃料のCO}_2\text{排出係数} \\ & = 200(\text{トン/年}) \times 43(\text{GJ/トン}) \times 0.0728(\text{tCO}_2/\text{GJ}) = 626(\text{tCO}_2/\text{年}) \end{aligned}$$

② 化石由来廃棄物の焼却による二酸化炭素排出量³⁾

$$\begin{aligned} & \text{ごみ量} \times \text{焼却効率} \times \text{化石由来炭素の割合} \\ & = 300,000(\text{トン/年}) \times 0.9 \times 0.13 \times 44/12(\text{tCO}_2/\text{t}) = 125,643(\text{tCO}_2/\text{年}) \end{aligned}$$

③ 排気ガス中に含まれるその他の温室効果ガス⁴⁾

$$\begin{aligned} & \text{ごみ量} \times (\text{N}_2\text{Oの排出係数} \times \text{地球温暖化係数} + \text{CH}_4\text{の排出係数} \times \text{地球温暖化係数}) \\ & = 300,000(\text{トン/年}) \times (0.0000605 \times 265 + 0.00000242 \times 28)(\text{tCO}_2/\text{トン}) = 4,812(\text{tCO}_2/\text{年}) \end{aligned}$$

④ ごみ焼却で発生する温室効果ガス（二酸化炭素換算）

$$= \text{①} + \text{②} + \text{③} = 131,081(\text{tCO}_2/\text{年})$$

また、ごみ焼却発電を平均発電効率25%で行って石炭火力発電の代替となったとして、年間で6万7千トンのCO₂の排出抑制が可能となる。

⑤ ごみ焼却発電による発電量（送電端）⁵⁾

$$\begin{aligned} & \text{ごみ量} \times \text{ごみ発熱量} \times \text{発電効率} - \text{所内電力} \\ & = 300,000(\text{トン/年}) \times 1,000(\text{kg/トン}) \times 7,536(\text{kJ/kg}) \div 3,600(\text{kJ/kWh}) \times 0.25 - 33,000(\text{MWh/年}) \\ & = 124,005(\text{MWh/年}) \end{aligned}$$

⑥ 石炭火力発電を代替して削減できる二酸化炭素量⁶⁾

$$\begin{aligned} & \text{ごみ焼却発電による発電量} \times \text{系統電力の排出係数} = \text{CO}_2\text{削減量} \\ & = 124,005(\text{MWh/年}) \times 0.5408 \times (\text{tCO}_2/\text{MWh}) = 67,062(\text{tCO}_2/\text{年}) \end{aligned}$$

したがって、発電も含めてごみ焼却処理を全体で評価すると1,000トン/日のごみを埋立てから焼却に切替えることで、温室効果ガス（二酸化炭素換算）の発生は年間で約6万5千トン弱となる。

● ごみ焼却発電で発生する温室効果ガス（二酸化炭素換算）

$$\begin{aligned} & \text{ごみ焼却で発生する温室効果ガス} - \text{石炭火力発電を代替して削減できる二酸化炭素量} \\ & = \text{④}131,081(\text{tCO}_2/\text{年}) - \text{⑥}67,062(\text{tCO}_2/\text{年}) = 64,019(\text{tCO}_2/\text{年}) \end{aligned}$$

これを埋立て処分が発生するメタンガス（二酸化炭素換算）と比べると1年目は僅かながら（表2、図3）、2年目以降は温室効果ガス削減効果が大きくなり、20年間全体で見ると二酸化炭素換算で300万トンの温室効果ガス削減が可能となる（図4）。

このように現在埋立て処分が行われている地域で廃棄物発電プラントを導入することは地球温暖化対策にとって有用であり、可能な限り早期の導入が望ましいと考えらる。

表2. ごみ発電による温室効果ガス削減効果（単位：tCO₂/年）

年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
埋立て発生するCH ₄	69,403	117,478	151,158	175,097	192,420	205,226	214,931	222,486	228,533	233,508
廃棄物発電で発生する温室効果ガス	64,019	64,019	64,019	64,019	64,019	64,019	64,019	64,019	64,019	64,019
廃棄物発電による温室効果ガス削減効果	5,383	53,458	87,139	111,078	128,400	141,207	150,912	158,466	164,514	169,489

年	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
埋立て発生するCH ₄	237,708	241,333	244,523	247,374	249,954	252,310	254,479	256,485	258,349	260,085
廃棄物発電で発生する温室効果ガス	64,019	64,019	64,019	64,019	64,019	64,019	64,019	64,019	64,019	64,019
廃棄物発電による温室効果ガス削減効果	173,688	177,314	180,504	183,355	185,934	188,291	190,460	192,466	194,329	196,066

	合計
埋立て発生するCH ₄	4,312,840
廃棄物発電で発生する温室効果ガス	1,280,387
ごみ発電による温室効果ガス削減効果	3,032,453

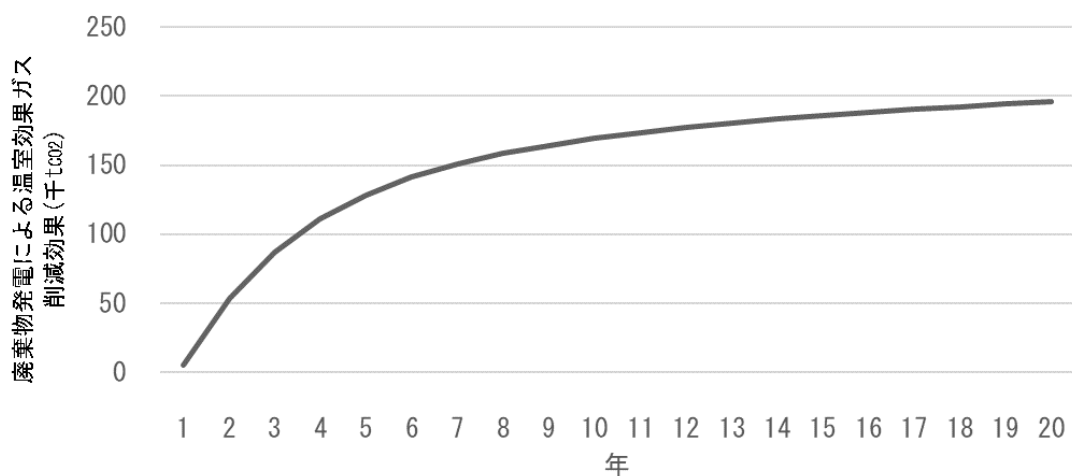


図3. 廃棄物発電による温室効果ガス削減効果

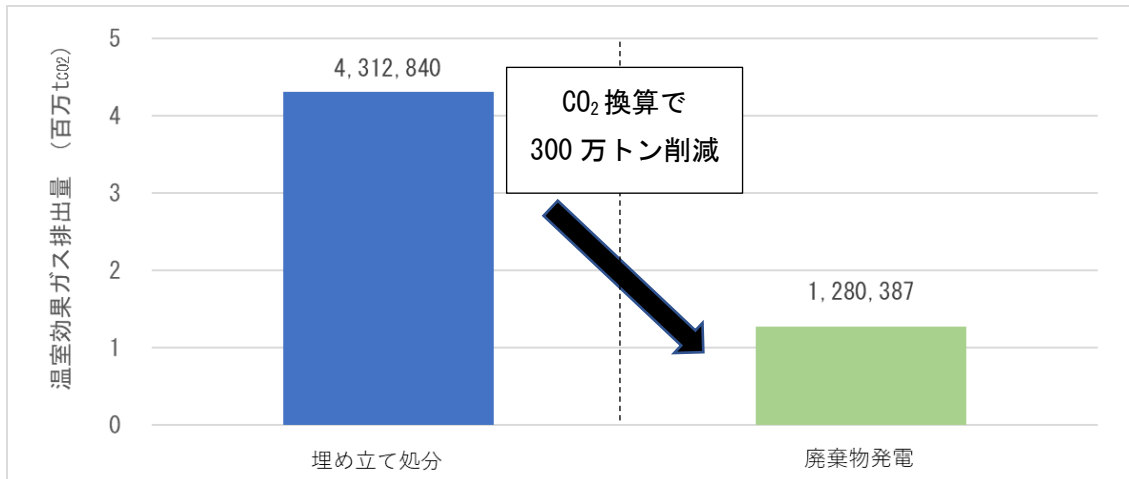


図4. 廃棄物の埋立て処分から焼却・廃棄物発電への代替効果（30万t/年、20年間稼働）

ごみ発電技術を、現在も埋立てが広く行われている東南アジア諸国連合（ASEAN）各国の主要都市圏で適用した場合に、このモデルケースに基づいてどの程度温室効果ガス削減効果が期待されるかを単純比例で試算すると表3のとおりとなる。

表 3. ASEAN 諸国の人口 100 万人を超える都市圏の都市ごみ排出量、温室効果ガス削減量⁸⁾

国名	都市圏	人口 (万人)	都市ごみ排出量 (千トン/年)	温室効果ガス削減量 (千トンCO ₂ /20年)
インドネシア	ジャカルタ	3,176	11,592	93,742
	バンドン	586	2,139	17,296
	スラバヤ	498	1,816	14,684
	メダン	405	1,476	11,939
	ジョグジャカルタ	185	673	5,446
	スマラン	167	610	4,929
	マカッサル	156	569	4,604
	パレンバン	145	529	4,280
	スラカルタ	134	489	3,955
	デンパサール	133	485	3,926
	バタム島	132	482	3,896
	プカンバル	119	434	3,512
	チルボン	117	427	3,453
	マラン	114	416	3,365
フィリピン	マニラ	2,425	8,849	71,561
	セブ	263	958	7,748
	ダバオ	230	840	6,789
	ジェネラル・サントス	166	606	4,900
タイ	バンコク	1,565	5,710	46,178
ベトナム	ホーチミン	1,038	3,789	30,637
	ハノイ	779	2,842	22,978
	ハイフォン	115	420	3,394
	ダナン	101	369	2,981
マレーシア	クアラルンプール	759	2,770	22,403
	ジョホールバル	177	646	5,224
	ペナン	142	518	4,191
ミャンマー	ヤンゴン	543	1,982	16,027
	マンダレー	143	522	4,221
カンボジア	プノンペン	192	699	5,652
ラオス	ビエンチャン	108	394	3,188

人口出典：Demographia World Urban Areas 13th Annual Edition: 2017:04

<http://www.demographia.com/db-worldua.pdf>

3. 廃棄物発電技術の海外への展開

日本の廃棄物焼却技術は海外にも既に数多く進出している。1970年代から現在に至るまで国内焼却施設メーカーは延べ10ヶ国以上の廃棄物焼却施設建設プロジェクトに参加してきた。海外の焼却施設でも発電能力を有した熱回収施設の需要は多く、メーカー各社が関わった件数は現在も増加の一途にある。

今回、日本の廃棄物焼却施設のプラントエンジニアリングメーカーが主に進出しているアジア地域（東アジアや東南アジア）での熱回収施設の建設推移を図5に示す。

日本で焼却施設を建設する際は概ね施設メーカーが代表企業となり、設計から調達、施工までを一貫して取り組むことが多いのに対し、海外でのプロジェクトでは別の代表企業に対し、焼却炉とボイラのみを納めるなど、分業体制となっている場合も多くある。

図6に日本企業による東南アジア、東アジアでの廃棄物発電プラントの実績を示す。

その多くは中国に集中し、次いで台湾、シンガポール、韓国と続く。

現地での廃棄物焼却でごみの減量化のみならず、熱回収施設の発電により、埋立て処分場から発生するメタンガスの抑制や石炭火力発電所の代替効果をもたらす温室効果ガス削減に貢献している。

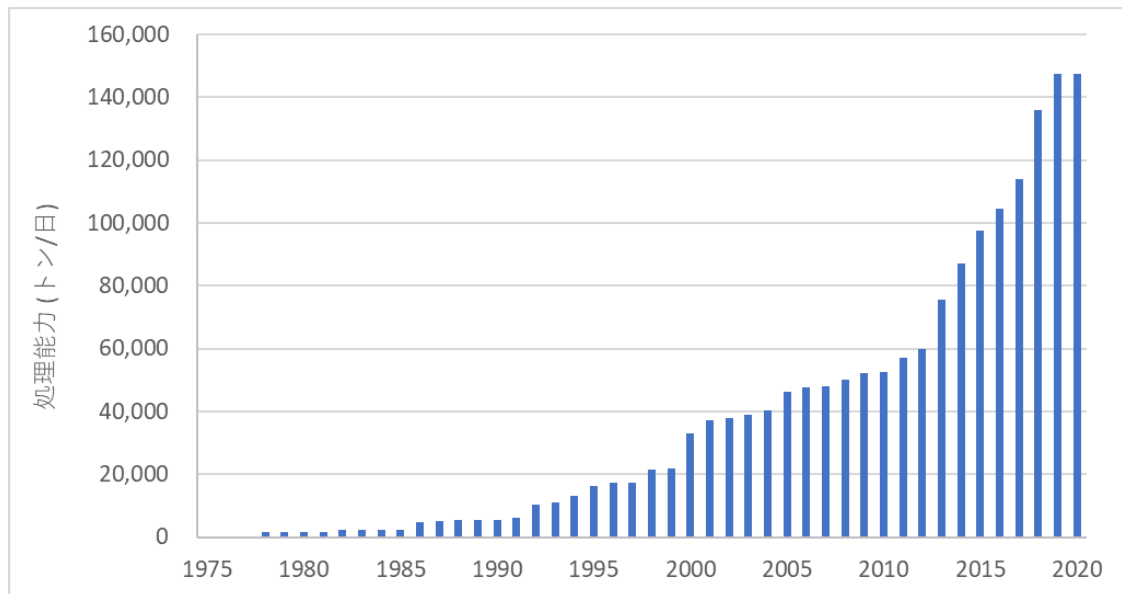


図 5. 日本企業による東アジア・東南アジアでの熱回収施設の建設推移(累計)
(環境負荷低減効果調査委員会 海外ごみ焼却発電プラント実績調査より)

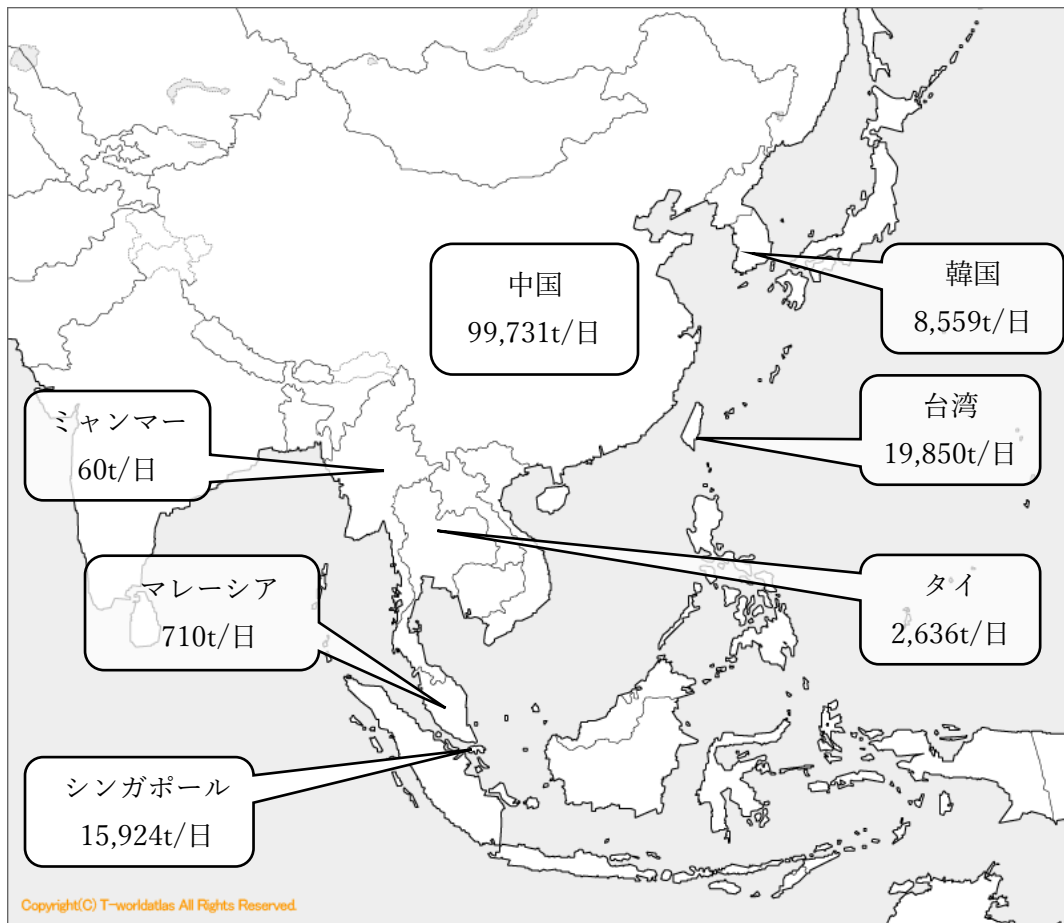


図6. 日本企業による東南アジア、東アジアでの廃棄物発電プラントの実績
 (2017年12月時点、環境負荷低減効果調査委員会 海外廃棄物発電プラント実績調査より)

<温室効果ガスの計算根拠>

参考資料：

- ・ 二国間クレジット制度（JCM）案件組成調査 最終報告書
「ホーチミン市における統合型廃棄物発電」（以下、ホーチミン報告書）
http://gec.jp/jcm/jp/projects/14ps_vie_02/
- ・ 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書（以下、AR5）
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

1) 表1. 1,000トン/日を埋立てた際に毎年発生するメタンCH₄量（二酸化炭素換算）
計算式はホーチミン報告書II-109より以下を使用した。

$$RE_{CH_4,SWDS,p} = \Phi_p \times (1 - f_p) \times GWP_{CH_4} \times (1 - OX) \times \frac{16}{12} \times F \times DOC_{f,p} \times MCF_p \times \sum_{x=1}^p \sum_j W_{j,x} \times DOC_j \times e^{-kj(p-x)} \times (1 - e^{-kj})$$

項目	数値	根拠
RE _{CH₄,SWDS,p}	期間pに埋立て処分された廃棄物から発生するメタン	
Φ _p	不確実性に関する調整係数	0.85 ホーチミン報告書II-111
f _p	期間中にSDWS（廃棄物処理場）において発生するメタンの内、回収されフレア、燃焼及び他の方法で利用される割合	0 報告書に記載ないため「0」とする
GWP _{CH₄}	メタンの温暖化係数	28 AR5
OX	酸化分解性有機炭素の分解される割合	0.1 ホーチミン報告書II-111
16/12	メタン/炭素比	1.33 16:CH ₄ 分子量, 12:C原子量
F	LFG(埋立処分場ガス)中のCH ₄ の割合	0.5 ホーチミン報告書II-111
DOC _{f,p}	期間中に分解性有機炭素の分解される割合	0.5 ホーチミン報告書II-111
MCF _p	メタン補正係数	1 ホーチミン報告書II-111
W _{j,x}	埋立回避された廃棄物jの重量(t/p)の合計	300,000 1000(t/日) × 300(日/年)
x	廃棄物の処分場での在留年数	1~20 ホーチミン報告書II-111
p	メタン排出量を計算する期間	20 ホーチミン報告書II-111

また、このモデルケースでのごみの物理組成を以下のとおりと設定し、計算を行った。

項目		DOC_j	k_j
	対象ごみの物理組成	分解性有機炭素の割合	廃棄物の分解速度
単位	%湿ベース	%	/年
厨芥(食品廃棄物)	60	15	0.40
紙(紙類)	3	40	0.07
プラスチック	20		0.17
繊維(布)	10	24	0.07
木材(木)	2	43	0.04
無機物	5		0.17
根拠	設定値	設定値	ホーチミン報告書Ⅱ-111

2) 化石燃料消費による二酸化炭素排出量

計算式はホーチミン報告書Ⅱ-110 より以下を使用した。

$$PE_{FC,p} = FC_p \times NCV_p \times EF_{CO_2,p}$$

項目		単位	数値	根拠
FC_p	期間 p の化石燃料の消費量	t/年	200	ホーチミン報告書Ⅱ-65 (121t) を基に 1000/600 倍 年 2 回消費 (100t/回 × 2 回/年)
NCV_p	期間 p の化石燃料の真発熱量	GJ/t	43	ホーチミン報告書Ⅱ-112
$EF_{CO_2,p}$	期間 p の化石燃料の CO ₂ 排出係数	t _{CO2} /GJ	0.0728	ホーチミン報告書Ⅱ-112
$PE_{FC,p}$	①化石燃料消費による 二酸化炭素排出量	t _{CO2} /年	626	

3) 化石由来廃棄物の焼却による二酸化炭素排出量
 計算式はホーチミン報告書Ⅱ-110より以下を使用した。

$$PE_{COM_CO2,p} = EFF_{COM,p} \times \frac{44}{12} \times \sum_j Q_{j,p} \times FCC_{j,p} \times FFC_{j,p}$$

項目		単位	数値	根拠
$EFF_{COM,p}$	期間 p の焼却炉の焼却効率		0.9	ホーチミン報告書 Ⅱ-115
44/12	CO ₂ /C	t _{CO2} /t	44/12	44:CO ₂ 分子量, 12:C原子量
$Q_{j,p}$	期間 p に焼却される廃棄物種類 j の重量 (t)			次表による
$FCC_{j,p}$	期間 p に焼却される廃棄物種類 j 中の総炭素量 (tC/t)			次表による
$FFC_{j,p}$	期間 p に焼却される廃棄物種類 j 中の化石由来炭素の割合			次表による
	ごみ量	t/日	1,000	設定値
	年間ごみ量	t/年	300,000	1,000 (t/日) × 300 (日/年)
	廃棄物中の化石由来炭素割合		0.13	次表による
$PE_{COM_CO2,p}$	②化石由来廃棄物の焼却による 二酸化炭素排出量	t _{CO2} /年	125,643	

また、このモデルケースで設定したごみの物理組成を基に廃棄物中の化石由来炭素割合の計算を行った。

項目	対象ごみの物理組成 (湿ベース)	対象ごみの含水率	対象ごみの物理組成 (乾ベース)	$FCC_{j,p}$ 総炭素量	$FFC_{j,p}$ 化石由来炭素割合	廃棄物中の化石由来炭素割合
	単位	%	%	%	%	
厨芥 (食品廃棄物)	60	70	18.00	50		0.13
紙 (紙類)	3	45	1.65	50	5	
プラスチック	20	35	13.00	85	100	
繊維 (布)	10	45	5.50	50	50	
木材 (木)	2	25	1.50	54		
無機物	5	10	4.50	5	100	
根拠	設定値	設定値	※1	ホーチミン 報告書 II-112	ホーチミン 報告書 II-112	※2

※1：対象ごみの物理組成 \times (100-対象ごみの含水率)/100

※2： \sum 対象ごみの物理組成(乾ベース) \times 総炭素量 \times 化石由来炭素割合/ 10^6

以上より、廃棄物全体の化石由来炭素割合が算出されたことから

$\sum_j Q_{j,p} \times FCC_{j,p} \times FFC_{j,p} = 300,000$ (t/年) $\times 0.13$ として計算を行った。

4) 排気ガス中に含まれるその他の温室効果ガス

計算式はホーチミン報告書Ⅱ-110より以下を使用した。

$$PE_{COMCH_4N_2O,p} = Q_{wasete,p} \times (EF_{N_2O} \times GWP_{N_2O} + EF_{CH_4} \times GWP_{CH_4})$$

項目	単位	数値	根拠	
	焼却される廃棄物の重量	t/日	1000	設定値
$Q_{wasete,p}$	期間 p に焼却される廃棄物の重量	t/年	300,000	1000*300
EF_{N_2O}	廃棄物焼却の N ₂ O 排出係数	t _{N₂O} /t _{廃棄物}	0.0000605	ホーチミン 報告書 Ⅱ-113
GWP_{N_2O}	N ₂ O の温暖化係数	t _{CO₂} / t _{N₂O}	265	AR5
EF_{CH_4}	廃棄物焼却の CH ₄ の排出係数	t _{CH₄} /t _{廃棄物}	0.000000242	ホーチミン 報告書 Ⅱ-113
GWP_{CH_4}	CH ₄ の温暖化係数	t _{CO₂} / t _{CH₄}	28	AR5
$PE_{COMCH_4N_2O,p}$	③排気ガス中に含まれる その他の温室効果ガス	t _{CO₂} /年	5,628	

5) ごみ焼却発電による発電量（送電端）

計算式は環境省「日本の廃棄物処理」平成27年度版より以下を使用し計算を行った。

また、このモデルケースでの所内電力消費量について設定し、計算を行った。

$$\text{発電効率}[\%] = \frac{3,600[\text{kJ/kWh}] \times \text{総発電量}[\text{kWh/年}]}{1,000[\text{kg/t}] \times \text{ごみ焼却量}[\text{t/年}] \times \text{ごみ発熱量}[\text{kJ/kg}]} \times 100$$

●発電電力量

項目	単位	数値	根拠
ごみ焼却量	t/日	1,000	設定値
ごみ焼却量年間	t/年	300,000	1,000(t/日) × 300(日/年)
ごみ発熱量（低位発熱量）	kcal/kg	1,800	設定値
ごみ発熱量（低位発熱量）	kJ/kg	7,536	1,800(kcal/kg) × 4.1868(kJ/kcal)
重量変換	kg/t	1,000	
発電効率		0.25	設定値
電力量・熱量変換	kJ/kWh	3,600	
総発電量	kWh/年	157,005,000	前述式
総発電量	MWh/年	157,005	1/1000

●所内電力消費量

項目	単位	数値	根拠
単位ごみ量当たりの 所内電力消費量	kWh/t	110	設定値
所内電力消費量	kWh/年	33,000,000	単位ごみ量当たりの所内電力 × 年間ごみ量
所内電力消費量	MWh/年	33,000	1/1000

6) 石炭火力発電を代替して削減できる二酸化炭素量
 計算式はホーチミン報告書Ⅱ-109より以下を使用した。

$$RE_{elec,p} = PEC_p \times EF_{grid}$$

項目		単位	数値	根拠
PEC _p	ごみ焼却発電による発電量（送電端）	MWh/年	124,005	
EF _{grid}	系統電力の排出係数	t _{CO2} /MWh	0.5408	ホーチミン報告書Ⅱ-112
RE _{elec,p}	石炭火力発電を代替して削減できる二酸化炭素量	t _{CO2} /年	67,062	

7) ASEAN 各国の主要都市人口と都市ごみ排出量、温室効果ガス削減量

ごみ発電による温室効果ガス削減効果の計算から、年間 30 万トンのごみの焼却および廃棄物発電を 20 年間行うことで 3,032 千トンの温室効果ガス削減効果が算出された。

この数字を基に各都市のごみ量で単純比例計算を行った。

$$\text{各都市のごみ量 (kg/年)} = \text{各都市の人口 (人)} \times 1\text{kg/人} \cdot \text{日} \times 365 \text{日/年} \times 0.8$$

なお、ごみ量の算出には各都市の人口に対して、一人当たりのごみ排出量を 1kg/人・日と設定した。

また、「平成 27 年度 日本の廃棄物処理」より、わが国のごみ総排出量が 43,981 千トン/年、焼却処理量（直接焼却+焼却処理以外の中間処理を経た）が 34,813 千トン/年であることから、焼却率は 79%と算出される。この数字を各都市の焼却率の目標値と設定とし、ごみ量の 8 割を焼却対象とした計算を行った。