

東京都 23 区の地域熱供給における生ごみバイオガス化設備の導入

Investigation of Installing Devices for Garbage Biogasification in District Heating and Cooling System in 23 wards of Tokyo

伊藤 永里子* 湯浅 和博**

Eriko Ito Kazuhiro Yuasa

keywords : Garbage, Biogasification, District Heating and Cooling System

生ごみ、バイオガス化、地域熱供給

1. はじめに

地域熱供給（以下、DHC）において再生可能エネルギー・未利用エネルギー（以下、再エネ等）の利用を促進することは、脱炭素社会の実現のために重要な手法の一つである。天候や立地条件の制約を受けず、安定した回収量を確保できる生ごみは、DHCでの利用に最適な再エネ等の一つである。都市部での生ごみ等の活用に関する既往研究としては、永井らの研究 1)–2)があり、大規模建築物や DHC 導入地区において生ごみや紙ごみを活用するモデルを提案している。

本研究では、熱供給事業者を対象として DHC における再エネ等の利用に関する実態調査を行い、DHC における再エネ等の導入状況および生ごみバイオガス化設備（以下、生ごみ BS）導入における課題の把握を目的とした。また、東京都 23 区の DHC を対象として生ごみ BS による発電量・排熱回収量を算定し、生ごみ BS の導入可能性を明らかにすることも目的とした。

2. 生ごみバイオガス化設備の概要

本研究で検討する生ごみ BS を図 1 に示す。生ごみを収集後、メタン発酵槽にてメタン発酵を行う。メタン発酵によって生成されたバイオガスを、ガスエンジン CGS に投入する。得られた電力と排熱は、プラント内の電力需要や販売熱の一部として使用される。DHC においては、メタン発酵関連設備（メタン発酵槽等）、バイオガスを燃料とするガスエンジン CGS を設置することを想定する。

3. DHC における再エネ等の利用に関する実態調査

3.1 調査概要

表 1 に調査概要を示す。熱供給事業便覧令和 4 年度版等に掲載のある熱供給事業者 76 事業者（136 地域）を対象として郵送によるアンケート調査を実施し、33 事業者（65 地域）から回答を得た。主な調査項目は、再エネ等の導入状況、検討開始の理由、検討段階での課題、未検討の理由、生ごみ BS の導入状況、検討段階で想定される課題、導入する生ごみ BS の概要である。

3.2 調査結果

(1) 再エネ等に関する調査結果

図 2 に再エネ等の導入に関する調査結果を示す。(a) 導入状況について、「導入済/導入予定」の割合が最も大きいのはビル排熱であるが、20%に満たない。次いで、ごみ焼却排熱、変電所排熱の順に続く。「検討の結果非導入」が最も大きいものは太陽光である。また、全ての再エネ等で「未検討」の割合が 80%以上である。(b) 検討段階での課題について、太陽光、河川水、海水、

ごみ焼却排熱では「初期費用・維持管理費用が高額」が最も多い。太陽熱、下水では「再エネ等の利用可能性が不安定」が最多である。(c) 検討開始の理由について、太陽光、河川水、海水、ビル排熱、木質バイオマスでは「事業者側での省エネ機運の高まり」が最も多い。太陽熱では「お客さま側での省エネ機運の高まり」が、ごみ焼却排熱では「再エネ等の供給元が近隣に存在」が最多である。(d) 未検討の理由について、太陽光と太陽熱では「プラントや屋根等のスペースに余裕がなく、設備の設置ができない」が 50%以上を占めている。太陽光と太陽熱以外の再エネ等では「近隣に再エネ等の供給元がない」の割合が最も大きい。以上より、プラント等のスペース不足や恵まれない立地条件によって、再エネ等導入の検討ができていないと言える。また、省エネ機運の醸成や近隣の供給元（清掃工場等）によって再エネ等導入の検討が進むものの、コストや再エネ等の利用可能性の不安定さが導入の障壁になっていることが分かる。特に、太陽光は「検討の結果非導入」の割合が大きく、その傾向が強いと言える。

(2) 生ごみ BS に関する調査結果

表 2 に生ごみ BS 導入予定または検討中の事業者に対する調査結果を示す。導入の検討を実施したのは 2 事業者（5 地域）であり、事業者 A（1 地域）が導入予定、事業者 B（4 地域）が検

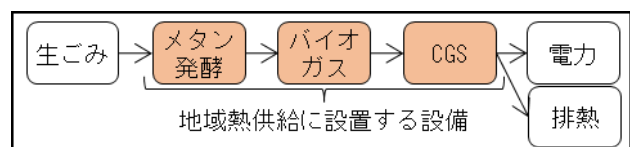


図 1 検討する生ごみバイオガス化設備

表 1 調査概要

調査期間	2023年10月31日から2023年11月17日
調査対象	熱供給事業便覧令和4年度版掲載の熱供給事業者 東京都環境局ホームページ掲載の熱供給事業者 (総数76事業者/136地域)
調査方法	郵送によるアンケート調査 (回答総数33事業者/65地域)
調査項目	①再生可能エネルギー・未利用エネルギーの 導入状況、検討開始の理由、検討段階での 課題、未検討の理由等 ②生ごみバイオガス化の導入状況、検討段階で 想定される課題、検討開始の理由、検討段階 での課題、導入システムの概要等 ③年間販売量、設備更新の概要、プラントの 空きスペース面積等

*東京科学大学 環境・社会理工学院 修士課程
*Graduate Student, Institute of Science Tokyo

**東京科学大学 環境・社会理工学院 准教授・工博
**Associate Prof, Institute of Science Tokyo, Dr. Eng.

討中である。事業者 A では、供給先建物から 5t/日未満の生ごみを収集し、トラックや台車等を用いてメタン発酵槽まで運搬する。生成したバイオガスをボイラー2基で専焼し、排熱を需要家への熱供給に使用する。メタン発酵促進のためのメタン発酵槽の加温には、専用配管で集めた厨房排水を熱源水とした、水熱源ヒートポンプを利用する。なお、事業者 A は新築建築物への生ごみ BS の導入を予定している。事業者 A、B の検討段階での課題は、「初期費用が高額」(2件)、「維持管理費用が高額」(1件)、「生ごみのみの収集が困難」(1件)である。また、都市部での導入時は悪臭対策も課題になるとの意見も挙げられた。

生ごみ BS の導入の検討を実施していない 31 事業者 (60 地域) を対象に、生ごみ BS 導入の検討段階で想定される課題と最も懸念される課題を調査し、その結果を図 3 に示す。想定される課題は、「生ごみの収集・搬送が困難」が 20% (28 件)、「メタン発酵関連設備の設置場所が不足」が 20% (28 件) と最も大きく、次いで「初期費用・維持管理費用が高額」が 18% (26 件) である。その中で最も懸念される課題は、「メタン発酵関連設備の設置場所が不足」が 25% (10 件) と最も大きく、次いで「初期費用・維持管理費用が高額」が 18% (7 件)、「関係者間の合意形成が困難」が 15% (6 件) となる。高額なコストと生ごみ収集等の難しさは、表 2 における検討段階での課題と共通しており、生ごみ BS の導入状況に関わらず、多くの事業者が懸念していることが分かる。また、プラント等のスペース不足は、既存 DHC において大きな課題となり得ることが言える。

4. 東京都 23 区の DHC への導入可能性

4.1 発電量・排熱回収量の算定

(1) 生ごみ収集範囲の設定

本研究では表 3 のように、生ごみ収集範囲を Case1~Case4 の 4 つに分けて設定する。Case1 では DHC プラントの設置されている建物 (以下、プラント設置建物) から生ごみを収集し、Case2 ではプラント設置建物に加えて熱供給を受けている建物からも収集する。Case3 では熱供給の有無に関わらず、営業地域内の全ての建物を生ごみの収集対象とし、Case4 では DHC プラントを中心として 500m×500m の範囲内にある全ての建物を収集対象とする。図 4 に、虎ノ門四丁目城山地域 (以下、T 地域) での表 3 に基づく生ごみの収集範囲を示す。

(2) 発電量・排熱回収量の算定方法

表 4 に生ごみ BS による発電量・排熱回収量の算定方法を、表 5 に発電量・排熱回収量の算定式を示す。各 Case に含まれる建物を調査し、各建物の主要用途と用途ごとの延床面積を調査した。その後、表 5 の (1) 式に従って用途ごとのバイオガス発生量を求めた。建物用途別生ごみ発生原単位は表 6 を参照した。得られたバイオガス発生量を用いて、表 5 の (2) および (3) 式からそれぞれ発電量および排熱回収量を求めた。用途ごとの発電量、排熱回収量の算定を繰り返すことによって、一つの建物における発電量、排熱回収量を求めた。以上を各 Case に含まれる全建物について実施し、各 Case における発電量、排熱回収量を算定した。表 6 に建物用途別生ごみ発生量を示す。生ごみ発生原単位が最も大きい建物用途は飲食で、15.8kg/m²・年となる。次いでホテルが 7.2kg/m²・年、物販が 6.3kg/m²・年である。

4.2 東京都 23 区の DHC での Case2 における算定結果

東京都 23 区の DHC を対象とした Case2 の発電量・排熱回収量の算定結果を図 5 に示す。発電量、排熱回収量は丸の内周辺がそれぞれ 1.2GWh/年、6.5TJ/年と最も大きい。次いで、東

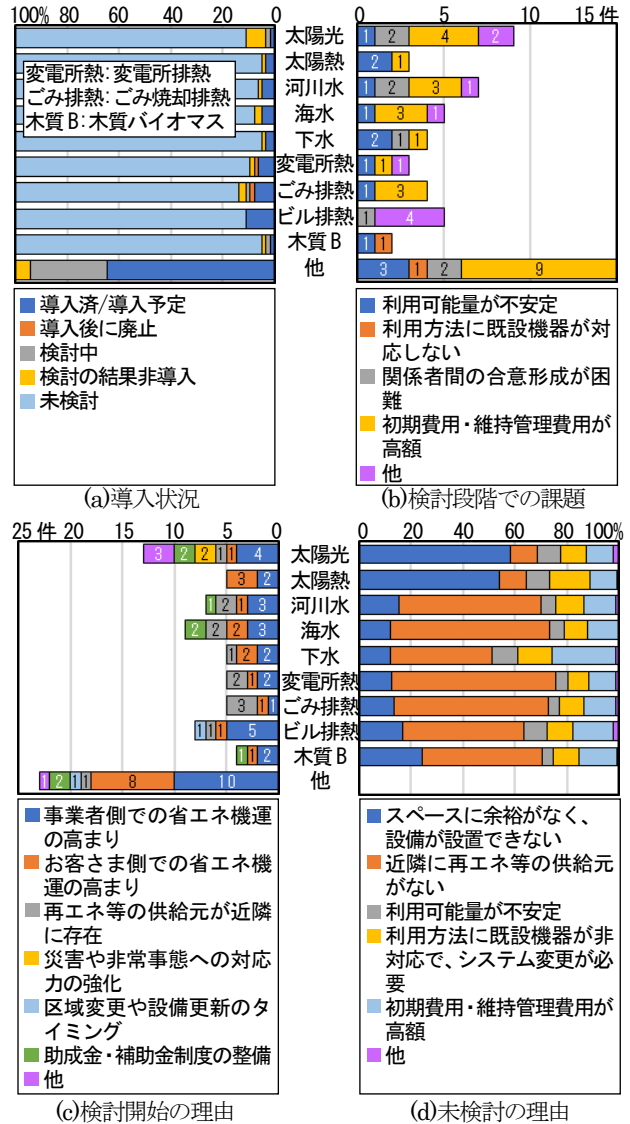


図 2 再エネ等の導入に関する調査結果

表 2 生ごみ BS 導入予定/検討中の事業者に対する調査結果

		事業者 A (1地域)	事業者 B (4地域)
生ごみ	収集量	5t/日未満	
	収集範囲	供給先建物 (プラント設置建物含む)	
	搬送方法	トラック・台車等の利用	
バイオガス	燃焼方法	専焼	
	利用設備	ボイラー2基	
	熱利用	お客さまへの熱供給	
	発酵槽	ヒートポンプ利用	
検討段階での課題	加温方法	(熱源水: 厨房排水)	
	課題	初期費用が高額	初期費用が高額
	解決方法	街全体でのコスト負担	
課題	課題	生ごみのみの収集が困難	維持管理費用が高額
	解決方法	衛生的な搬送経路の確保 (専用配管の設置等)	

備考: 都市部への導入時は悪臭対策が課題になるとの意見もあり

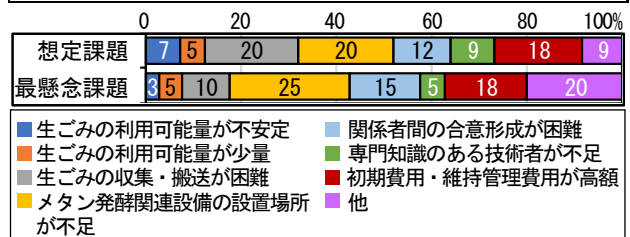


図 3 生ごみ BS 導入の検討段階で想定される課題

京臨海副都心が1.1GWh/年、6.0TJ/年、新宿新都心が1.1GWh/年、5.7TJ/年となる。また、生ごみ収集量は丸の内周辺で13.5t/日、東京臨海副都心で12.4t/日、新宿新都心で11.8t/日である。これら3地域のCase2に含まれる建物の棟数と延床面積を表7に示す。丸の内周辺には、延床面積10万㎡以上の事務所ビル12棟を含む38棟の建物がある。東京臨海副都心には、飲食店が入居する建物2棟、ホテルが入居する建物4棟を含む、合計18棟の建物がある。新宿新都心には、延床面積10万㎡以上の事務所ビル9棟、ホテルが入居する建物4棟を含む、合計21棟の建物がある。これら3地域は、大規模事務所ビルや、生ごみ発生原単位の大きい飲食店、ホテルを多く含むため、多量の生ごみを確保できたと考えられる。発電量がプラント電力消費量に占める割合は品川八潮団地が最も大きく12.9%、排熱回収量が温熱販売量に占める割合は豊洲六丁目が最も大きく6.0%である。東京都23区全DHCの合計は、発電量が12.9GWh/年(2.8%)、排熱回収量が69.6TJ/年(1.4%)である。

4.3 生ごみ収集範囲拡大の可能性

T地域を対象として生ごみ収集範囲を拡大した場合の算定結果を図6に示す。Case2では、発電量が0.1GWh/年(1.2%)、排熱回収量が0.3TJ/年(0.9%)である。Case3では、発電量が0.1GWh/年(1.7%)、排熱回収量が0.4TJ/年(1.2%)となり、Case2の1.4倍である。Case4では、発電量が0.6GWh/年(12.4%)、排熱回収量が3.2TJ/年(9.0%)となり、Case2の10.5倍である。表8にT地域におけるCaseごとの

表3 生ごみ収集範囲の設定

Case 1	プラント設置建物
Case 2	プラント設置建物 一般需要家建物
Case 3	プラント設置建物 一般需要家建物 営業地域内建物
Case 4	プラント設置建物 一般需要家建物 営業地域内建物 営業地域外建物(*)

*1: プラントを中心として500m×500mの範囲内にある建物



表4 発電量・排熱回収量の算定方法

- ① 各Caseに含まれる建物を調査する
- ② 各建物の主要用途および各用途の延床面積を調査する
- ③ (1)式から各用途のバイオガス発生量を求める
- ④ (2)式から各用途の発電量を求める
- ⑤ (3)式から各用途の排熱回収量を求める
- ⑥ ③~⑤を一つの建物の全ての用途について繰り返す
- ⑦ Caseに含まれる全ての建物の発電量および排熱回収量を足し合わせる

表5 発電量・排熱回収量の算定式

$$Vw = (Ww \times A \times Rr) \div 1000 \times P \quad \dots (1)$$

$$Ee = Vw \times c \times v \times e \div 3.6 \div 1000 \quad \dots (2)$$

$$Eh = Vw \times c \times v \times Rh \div 1000 \quad \dots (3)$$

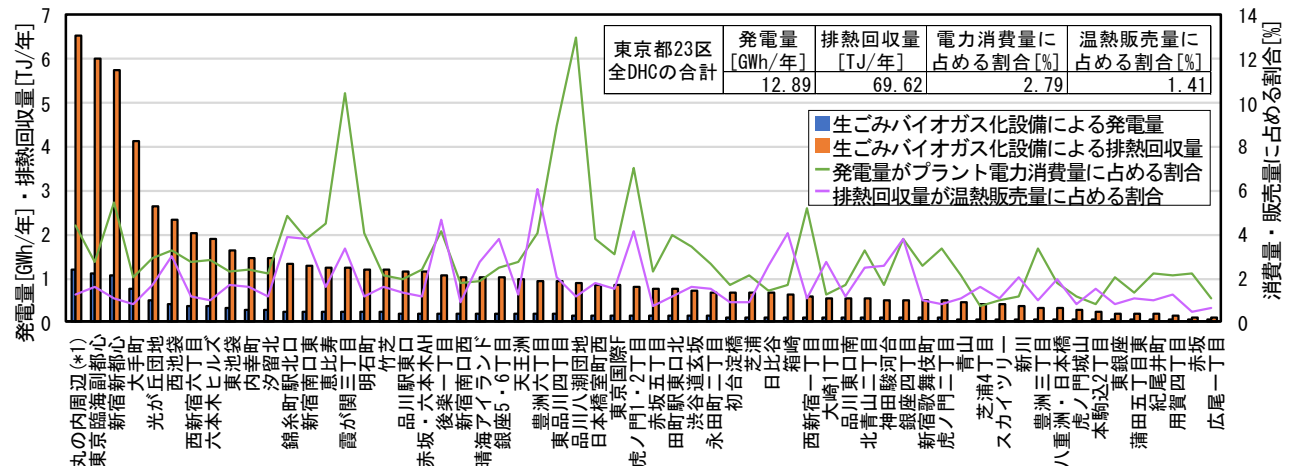
Vw	バイオガス発生量 [Nm ³ /年]	Ee	発電量 [MWh/年]
Ww	建物用途別生ごみ発生原単位 [kg/(m ² または人)・年]	Eh	排熱回収量 [GJ/年]
A	各用途の延床面積 [m ²] または乗降客数 [人]	c	メタン濃度 (55%)
Rr	レンタル比 (*1)	v	メタン発熱量 (35.8MJ/Nm ³)
P	バイオガス発生原単位 (150Nm ³ /t)	e	発電効率 (30%)
		Rh	熱回収率 (45%)

*1: 駅舎1.0、駅舎以外0.7

表6 建物用途別生ごみ発生量

建物用途	廃棄物発生量 (*1) [kg/m ² ・日]	可燃ごみ発生量 (*2) [kg/m ² ・年]	可燃ごみ中の生ごみの割合 (*3) [%]	生ごみ発生原単位 [kg/m ² ・年]
住宅	0.030	8.06	30.58	2.46
事務所	0.040	10.95	16.98	1.86
物販	0.080	21.90	28.89	6.33
飲食	0.200	54.75	28.89	15.82
ホテル	0.060	16.43	43.53	7.15
工場	0.030	8.21	7.91	0.65
倉庫	0.030	8.21	23.20	1.91
病院	0.080	21.90	17.52	3.84
福祉	0.080	21.90	22.92	5.02
学校	0.030	8.21	19.04	1.56
文化	0.030	8.21	22.92	1.88
会議	0.018	4.79	22.92	1.10
駐車場	0.005	1.37	22.92	0.31
駅舎 (*4)	0.005	1.37	33.19	0.45

*1: 各区再利用対象物・廃棄物保管場所等設置届作成要領および東京都統計年鑑(令和3年)
 *2: 可燃ごみの割合を75%に設定
 *3: 千代田清掃事務所再利用計画図書集計表および中央区・港区事業用大規模建築物等データファイル(令和4年度版)
 *4: 各量の単位(割合を除く)は[kg/乗降客数・(日または年)]



*1: 丸の内一丁目、有楽町および丸の内二丁目は温熱一体運用のため、丸の内周辺として3地域をまとめて算定す

図5 東京都23区の地域熱供給への生ごみバイオガス化設備導入による発電量・排熱回収量の算定(Case2)

建物棟数と延床面積を示す。Case3 から Case4 にかけて、住宅や事務所の棟数および延床面積が増加している。また、営業地域外建物には、生ごみ発生原単位の大きいホテルや事務所用途が約 16 万㎡の建物も含まれており、これらの建物から多量の生ごみ発生が見込まれる。営業地域外建物に生ごみ発生原単位の大きい用途（飲食、ホテル等）や大規模建築物が含まれる場合は、生ごみ収集対象として積極的に検討するべきであると言える。

5. メタン発酵槽と生ごみの加温に必要な熱量の算定

生ごみ BS においては、メタン発酵を促進するためにメタン発酵槽と生ごみの加温が必要となる。そのため、メタン発酵槽と生ごみの加温に必要な熱量（以下、加温に必要な熱量）を算定した。なお、図 5 における排熱回収量は、加温に必要な熱量を加味したものではない。表 9 に加温に必要な熱量の算定式を、表 10 に加温に必要な熱量の算定に関わる設定条件を示す。表 9 の

(5)、(6) 式に表 10 の数値を代入し、メタン発酵槽の加温に必要な熱量と生ごみの加温に必要な熱量を得る。両者を (4) 式に従って足し合わせて、加温に必要な熱量を算定する。算定結果を表 11 に示す。発酵温度によって加温に必要な熱量は異なるが、中温発酵 (37℃) では 781.7GJ/年、高温発酵 (55℃) では 1485.3GJ/年となる。なお、東京都 23 区の DHC における平均排熱回収量は図 5 から算出し、1160.4GJ/年となった。中温発酵の場合は、CGS 排熱 (1160.4GJ/年) で加温に必要な熱量 (781.7GJ/年) を賄うことも可能である。しかし、加温に使用する温水は 37℃、需要家への熱供給に使用する温水は実態調査結果から約 54℃であるため、両者には大きな温度差があると言える。そのため、需要家に供給した温水の還り (実態調査結果から約 44℃) を用いて、メタン発酵槽と生ごみを加温することが望ましいと考えられる。

6. まとめ

1) DHC における再エネ等の利用に関する実態調査結果の分析により、再エネ等の導入を妨げる理由や生ごみ BS 導入の課題、導入予定の生ごみ BS を明らかにした。

2) 東京都 23 区の DHC を対象に生ごみ収集量を推定し、生ごみ BS による発電量、排熱回収量を算定した。

3) 虎ノ門四丁目城山地域において生ごみ収集範囲を拡大した場合の発電量、排熱回収量の算定を行い、生ごみの収集対象として検討すべき建築物を提案した。

4) メタン発酵槽と生ごみの加温に必要な熱量を算定し、加温に必要な熱量を賄うのに望ましい温水の使用方法を提案した。

参考文献

- 永井猛：都心部における都市型バイオマスエネルギー利用システム (UBES) 導入のための研究, 都市計画論文集, 47 巻 3 号, 2012 年 10 月, p.931-936
- 永井猛, 細野英之, 鈴木陽一：都心部における都市型バイオマスエネルギー利用システム導入のための研究 (第 1 報), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2012.3 巻 H-79, 2012 年 8 月, p.2865-2868
- 東京都環境局 Web 「高輪ゲートウェイ駅地域冷暖房区域 計画概要書」(2023 年 12 月参照)
- 地域熱供給 (地域冷暖房) 実例集—まちづくりと熱の有効利用— (2020 年 6 月)
- 環境省 Web 「廃棄物系バイオマス利活用導入マニュアル (平成 29 年 3 月)」(2023 年 9 月参照)
- 熱供給事業便覧令和 4 年度版
- 東京都環境局 Web 「地域エネルギー供給実績報告書」(2023 年 11 月参照)
- 前川孝昭, 中野和弘, 山沢新吾, 鈴木貞之：熱収支解析にもとづく二相式メタン発酵槽内壁面の境界熱伝達率の算出, 農業施設, 21 巻 1 号, 1990 年 7 月, p.31-36
- 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 Web 「バイオマスエネルギー地域自立システムの導入要件・技術指針 (第 6 版) 実践編 メタン発酵系バイオマス (第二部)」(2024 年 9 月参照)

謝辞

実態調査では熱供給事業者の皆様にご多大なるご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

表 7 3 地域の建物棟数と延床面積(Case2)

		丸の内 周辺	東京臨海 副都心	新宿 新都心
当該用途 を含む 建築物の 棟数 [棟]	事務所	32	9	16
	うち10万㎡以上	12	3	9
	物販	1	2	0
	うち10万㎡以上	0	0	0
	飲食	1	2	0
	うち10万㎡以上	0	0	0
	ホテル	2	4	4
	うち10万㎡以上	0	1	2
その他	2	5	1	
合計棟数 [棟]		38	18	21
延床面積 [万㎡]		331	180	222

表 8

Case ごとの棟数と延床面積

		住宅	事務所 (*1)	他 (*2)
棟数 [棟]	Case1	0	1	0
	Case2	1	2	0
	Case3	1	7	0
	Case4	35	32	8
延床 面積 [千㎡]	Case1	0	106	0
	Case2	21	147	0
	Case3	21	224	0
	Case4	191	772	216

*1: Case4は約16万㎡の建物を含む
*2: ホテル、文化施設等

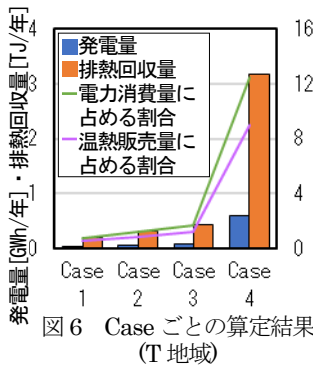


図 6 Case ごとの算定結果 (T 地域)

表 9 加温に必要な熱量の算定式

加温に必要な熱量 [GJ/日]	=	メタン発酵槽の加温に必要な熱量 [GJ/日] +	...	(4)
		生ごみの加温に必要な熱量 [GJ/日]		
メタン発酵槽の加温に必要な熱量 [GJ/日]	=	(発酵温度 [°C] - プラント内温度 [°C]) × メタン発酵槽表面積 [㎡] × 放出熱量 [kJ/㎡・h・°C] × 24 [h] ÷ 10 ⁶	...	(5)
生ごみの加温に必要な熱量 [GJ/日]	=	(発酵温度 [°C] - 原料温度 [°C]) × 生ごみの比熱 [kJ/kg・°C] × 生ごみ投入量 [t/日] × 1000 ÷ 10 ⁶	...	(6)

表 10 加温に必要な熱量の算定に関わる設定条件

温度	発酵温度 [°C]	37 (中温) 55 (高温)	投入 原料	乾燥ごみの比熱 [kJ/kg・°C] (*3)	1.26
	プラント内温度 [°C] (*1)	17		水の比熱 [kJ/kg・°C] (*3)	4.19
	原料温度 [°C] (*1)	17		水分量 [%]	80
発メ 酵タ 槽内	底面の半径 [m]	5		生ごみの比熱 [kJ/kg・°C]	3.60
	高さ [m]	10		生ごみ投入量 [t/日] (*4)	2.39
	表面積 [㎡]	471.24			
	放出熱量 [kJ/㎡・h・°C] (*2)	8.71			

*1: 東京における深さ10mの地温 (環境省HP)
*2: メタン発酵槽の総括伝熱係数 (2.08 [kcal/㎡・h・°C]) (前川ら⁸⁾)に4.19 [kJ/kcal]を乗じた
*3: 七尾市ごみ処理施設整備基本計画 資料編 余熱利用計画の検討 (平成30年3月)
*4: 東京都23区の各DHCでの平均生ごみ発生量

表 11 加温に必要な熱量の算定結果

	中温発酵 (37℃)	高温発酵 (55℃)
メタン発酵槽の加温に必要な熱量 [GJ/日]	1.97	3.74
生ごみの加温に必要な熱量 [GJ/日]	0.17	0.33
加温に必要な熱量 [GJ/日]	2.14	4.07
加温に必要な熱量 [GJ/年]	781.71	1485.25
各DHCでの平均排熱回収量 [GJ/年]	1160.40	