

研究指導 石光 真 教授

スーパーごみ発電の費用便益分析

穴澤 拓也

1. はじめに

2018年7月に閣議決定された第5次エネルギー基本計画[1]において、「再生可能エネルギーの主力電源化」が挙げられており、再生可能エネルギー(以下再エネ)由来の電源構成比率を2030年に22~24%まで引き上げる目標が掲げられている。ごみ発電はバイオマス成分だけでなくプラスチックなどの化石燃料由来のものも併せて焼却されるため全てを再エネと考えることはできない。しかし、ごみ発電も部分的なバイオマス発電として再エネに位置付けられており、再エネ利用促進、循環型社会の実現に向けて重要な役割を担う。

さらに、政府は発電効率の高いごみ発電施設の導入促進のため、施設規模ごとに発電効率の交付要件を設定し、その発電効率を満足すれば1/3を交付するメニュー[2]や、期間中(2018~2022)に整備されたごみ焼却施設の発電効率の平均値を21%とする目標[3]を掲げるなど、発電効率の高いごみ発電の導入が望まれている。

本研究では、高効率ごみ発電の一策として考えられる既存のサイクルにガスタービン(以下GT)を複合したスーパーごみ発電の経済性を評価することを試みた。

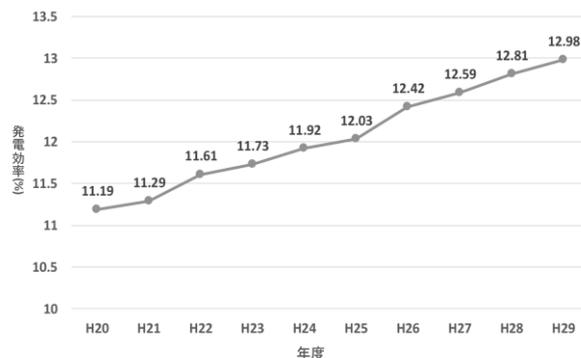
また、本研究の「ごみ」とは一般廃棄物のことを指す。

2. ごみ発電における発電効率の現状

かつて、ごみ発電施設での発電においてはごみ燃焼の際に発生する塩化水素等が設備へ付着することにより高温腐食が発生し、その蒸気温度を上げることが出来なかった。そのため、発電効率も約10~15%程度と低かった。しかし、現在は技術開発が進んだことによって4MPa,400℃の蒸気条件で運転することが可能となっており、環境省も高効率発電を行うにあたっての前提条件[2]としている。

現在のごみ焼却施設における発電施設の総発電効率の推移を見ると、ごみ発電における発電効率は順調に上昇し続けていることがわかる(図1)。しかし、それでも総発電効率は約13%と高い水準にあるとは言えず、今後さらに高効率な発電システムの導入を促進する必要があるだろう。

図 1 ごみ焼却施設における発電施設の総発電効率の推移



環境省(2019)[4]より穴澤作成

3. スーパーごみ発電について

3.1 スーパーごみ発電とは

ごみ発電施設において一般的に用いられているサイクルにGTを組み合わせた複合システムであり、ボイラより発生した蒸気を併設されたGTの排ガスによって400℃程度まで再過熱することによって高効率な発電を行うシステムである。

ごみ焼却炉のボイラと排熱回収ボイラより発生した蒸気を独立過熱器においてGTの高温排ガスと熱交換し、蒸気温度を上げて蒸気タービン(以下ST)へ導く。排熱回収ボイラを出たGT排ガスはまだ有効な熱エネルギーを有しているため、給水加熱器に導き熱回収を行い、加熱された給水はごみ焼却炉ボイラと排熱回収ボイラへ戻り再び蒸気となる。

スーパーごみ発電は発電効率25~30%を有し、既存のごみ発電施設に追設することも可能である。

3.2 スーパーごみ発電の現状

国内事例4施設の能力を示す(表1)。国内でのスーパーごみ発電実施施設数は4施設である。全ての施設で発電効率が20%以上と、高水準の発電効率を有している。しかし、そのすべての施設がGT燃料価格の高騰による赤字を背景に廃止済みまたは廃止決定済みである。

表 1 スーパーごみ発電の国内事例

	高崎市	堺市	北九州市	千葉市
施設規模	450t/d	460t/d	810t/d	405t/d
蒸気タービン出力	10,500kw	12,400kw	29,300kw	12,150kw
ガスタービン出力	17,500kw	4,100kw	7,040kw	9,000kw
最大発電出力	25,000kw	16,500kw	36,340kw	18,000kw
発電効率	29.30%	21.10%	26.00%	26.50%

杉野ら(2004)[5]より穴澤作成

また、福島県内においては、ふくしまあぶくまクリーンセンターが低炭素化技術の技術調査としてプラントメーカーに対するアンケートを行った[6]。しかし、4MPa,400℃ボイラへの信頼性とスーパーごみ発電の費用対効果面のリスクから4MPa,400℃ボイラの適用を考えると、導入には至らなかった。

4. 先行研究

吉葉(2012)[7]は、スーパーごみ発電は高効率ではあるもののGT発電に用いる燃料費が必要となるうえ、蒸気再過熱前の蒸気条件は従来レベルと大差なく、複合システム化とGT排ガスによる過熱蒸気のリパワリングを組み合わせたシステムイノベーションの魅力にとどめざるをえないと結論付けた。

鈴木(2014)[8]は、高効率な発電を行えるごみ発電のシステムとしてスーパーごみ発電を挙げたものの、その費用対効果の低さとメンテナンスが大きく増えることから国内での実施施設が4か所にとどまり、導入が促進されなかったとしている。

5. 研究目的と新規性

先行研究において、スーパーごみ発電についてその蒸気条件と費用対効果の低さを指摘しているが、スーパーごみ発電の費用対効果を定量的に分析している先行研究をみとめることはできなかった。

よって、本研究の目的をスーパーごみ発電の費用便益比を明らかにし、現在の高効率発電の主流である4MPa,400℃ボイラごみ発電の費用便益比と比較することでその経済的効率性を評価することとする。そしてこれを本研究の新規性とする。

6. 分析方法とデータ

6.1 分析方法

分析に用いる指標は費用便益比(Cost Benefit Ratio, B/C)である。費用便益比とは、事業に要する総費用と事業による総便益の比率であり、その値が1.0以上であればその事業は妥当なものと評価される。

分析方法の手順は以下の通りである。まず、費用便益比を求めるにあたり、分析を行う3ケースを設定する。ケース1を通常のごみ処理計画とし、費用が建

設費+維持管理費、便益がごみ処理委託費+売電収益とする。ケース2を発電所としての計画とし、費用が建設費+維持管理費、便益が売電収益とする。ケース3を費用が発電設備分の建設費と発電設備分の維持管理費、便益が売電収益とする。ケース3においては、建設費、整備補修費、人件費、用役費に1/4を乗じて費用を算出する[9]。

ごみ発電施設建設に要する年数を1年とし、ごみ発電施設の耐用年数が20年、固定価格買取制度の買取期間が20年であることから分析年数を21年とする。また、国土交通省(2018)[10]より、社会的割引率を4%とする。費用と便益を現在価値化したのち累計し、得られた総便益を総費用で割ることで費用便益比を算出する。

現在価値化の換算係数は以下の通りである。

$$\cdot(1+r)^{-(j-1)^1}$$

6.2 試算条件

スーパーごみ発電システムを導入したごみ発電施設と4MPa,400℃ボイラごみ発電施設の費用便益分析を行うため、試算に用いる検討施設の前提条件を設定する。

- ① 検討施設の施設規模を600(t/d)とする。
- ② 検討施設の稼働日数を280(d/y)とする。
- ③ ごみの年間処理量(t/y)=280(d/y)×600(t/d)より、168,000(t/y)とする。
- ④ 炉形式は全連続式ストーカ方式とし、スーパーごみ発電の場合焼却炉ボイラ発生蒸気条件は3MPa,300℃、再過熱後蒸気を3MPa,400℃とする。復水器形式は空冷復水式(60℃)、タービン形式は抽気復水タービン、白煙対策ありとする。
- ⑤ 検討施設のスーパーごみ発電設備はGT発電機、独立過熱器、排熱回収ボイラ、給水加熱器より構成されるものとする。
- ⑥ 排熱回収ボイラの蒸気発生条件は3MPa,飽和蒸気とし、蒸発量は10,000(kg/h)とする。
- ⑦ GTは昼夜連続運転とする。
- ⑧ 気候条件による出力の低下は考慮しない。

6.3 分析データ

費用便益分析を行うにあたり必要な諸数値を以下の通り設定する。

ごみ低位発熱量は8,800(kJ/kg)とする[2]。

ごみ組成は可燃分49.856%、水分43.32%、灰分6.824%とする[11]。

ごみバイオマス比率を50%とする[12]。

GT出力8,060kw、発電端効率34.3%、使用燃料は都市ガス13A、都市ガス消費量は2,179(m³/h)とする[13]。

¹ rは社会的割引率、jは換算該当年数である。

基準となるスーパーごみ発電の設備費用は24億223万円、発電出力9,000kwとする[14].

ごみtonあたり建設費は4,000万円とする[9].

用役費は1,917(円/t)とする[15].

都市ガス13A単価は50.3円(円/m³)とする[16].

建設費に対する整備補修費の割合は0.02とする[17].

バイオマス分売電単価17(円/kwh)とする[18].

非バイオマス分売電単価7.7(円/kwh)とする[19].

ごみ処理委託費30,000(円/t)とする (想定値).

●費用データ

イニシャルコストとランニングコストを以下に示す.

また、蒸気条件により建設費に顕著な差は無い[9]ため、スーパーごみ発電設備部分以外の建設費は同額とする.

・建設費(円)=40,000,000×600=24,000,000,000

・スーパーごみ発電設備費用(円)

= $(2,452,230,000/9,000) \times 8,060$

=2,196,108,200

・人件費(円/y), [9]より,

= $704.15 \times \text{施設規模}t/d^{0.3658} \times 10,000$

=73,099,248

・用役費(円/y)=1,917×168,000

=322,056,000

・スーパーごみ発電施設整備補修費(円/y)

= $(\text{建設費}+\text{スーパーごみ発電設備費用}) \times 0.02$

=523,922,164

・4MPa,400°Cボイラごみ発電施設整備補修費(円

/y)

= $24,000,000,000 \times 0.02$

=480,000,000

・都市ガス13A購入費(円/y)

= $2,179 \times 24 \times 280 \times 50.3$

=736,536,864

●便益データ

発電効率、発電出力を求めるにあたり、タクマ環境技術研究会(2011)[11]、中久保ら(2016)[20]、日本機械学会(2002)[21]を参考に算定式表2を作成した。それについて(表2)に示す。計算に用いるごみ投入量は2,500(kg/h)、燃料低位発熱量は40.6(MJ/Nm³)、燃料消費量は2,086(Nm³/h)である。

また、売電収益を求めるにあたり、作成した式により求められた発電出力を用いる。

算定式より、スーパーごみ発電施設の発電効率は25.75%、出力は15,750kwとなり、GTの発電効率と出力を合わせると発電効率28.11%、出力23,810kwとなった。4MPa,400°Cボイラごみ発電施設の発電効率は19.61%、出力は11,994kwとなった。売電収益は環境省(2013)[22]の式を用いて求める。また、スーパーごみ発電施設におけるバイオマス分発電量にあたって必要な数値は算定式より用いる。

・スーパーごみ発電ST発電量(kwh/y)

= $15,750 \times 24 \times 280$

=105,840,000

・スーパーごみ発電バイオマス売電収益(円/y)

= $105,840,000 \times 0.5 \times ((2,994-611)/(3,231-251)) \times$

17

=719,410,107

・スーパーごみ発電非バイオマス売電収益(円/y)

= $((105,840,000-719,410,114/17)+54,163,200) \times 7.7$

=906,174,176

・4MPa,400°Cボイラごみ発電ST発電量(kwh/y)

= $11,994 \times 24 \times 280$

=80,599,680

・4MPa,400°Cボイラごみ発電売電収益(円/y)

= $(0.5 \times 80,599,680 \times 17) + (0.5 \times 80,599,680 \times 7.7)$

=995,406,048

・ごみ処理委託費(円/y)

= $30,000 \times 168,000$

=5,040,000,000

以上で費用と便益のデータを算出した。

7. 費用便益分析の分析結果とまとめ

費用便益比の分析結果を(表3)に示す。

表 3 費用便益比の分析結果

	スーパーごみ発電施設	4MPa,400°Cボイラごみ発電施設
ケース1(B/C)	1.86	2.28
ケース2(B/C)	0.45	0.38
ケース3(B/C)	1.03	1.51

分析結果より穴澤作成

費用便益比はケース1、ケース3の二つのケースにおいて4MPa,400ボイラごみ発電施設の方が効率的だという結果が出た。しかし、ケース1、ケース3はスーパーごみ発電施設も費用便益比が1.0を上回っている。ケース2においては、両施設とも費用便益比が1.0以下であるが、スーパーごみ発電施設のほうが効率的だという結果が求められた。

結果より、スーパーごみ発電施設はケース1のようにごみ焼却施設が持っているごみ処理委託費(便益)を計上すると4MPa,400°Cボイラごみ発電施設より効率性は劣るものの効率性を持つということと、ケース2のように建設費および維持管理費を売電収益で賄い収入を得る発電所の形態は成り立たないことが分かった。ケース3のように発電設備に寄与している費用と発電による便益の費用便益比は1.03となっており、妥当だと評価される。しかし、今回の分析においては都市ガスの価格を固定して試算をしており、現在の費用便益比ではわずかに都市ガス単価が上昇すると費用便益比が1.0を下回ることになる。GTを回すと赤字になるという理由でGTを回さないとしても、初期投資は返ってこない。

4MPa,400°Cボイラごみ発電施設の費用便益比は

ケース1, ケース3ともにスーパーごみ発電を上回っており, 高効率なごみ発電施設の整備においてスーパーごみ発電ではなく4MPa,400°Cボイラが採用されていることと整合的である。

化石燃料を必要とせず, 発電所というケース2以外で費用便益比がスーパーごみ発電を上回っている4MPa,400°Cボイラごみ発電を行ったほうが経済効率的である。しかし, 発電効率はスーパーごみ発電施設の方が優れており, さらなる発電効率向上技術の開発が必要だろう。

8. 今後の研究課題

この研究には, 今後に残された研究課題が存在する。

第一に, 都市ガスの価格を現在の価格で固定して分析している点である。都市ガスの原料である天然ガスの価格は原油価格と連動して動いており, 予測が難しい。この採算性を見通しの困難さもスーパーごみ発電の費用対効果におけるリスクと考えられる。

第二に, ごみ処理委託費は想定値を用いて試算したが, ごみ処理委託費は実際には民間ごみ処理業者に処理してもらうことになるため, 運搬にかかる費用など地域特性に左右される点である。

第三に, CO₂削減量やGTを用いた災害時のエネルギー供給等の外部経済効果を評価していない点である。

以上の三点を考慮し分析することで, さらに精密な分析ができるだろう。

参考文献

- [1] 経済産業省・資源エネルギー庁「第5次エネルギー基本計画」(2018)
<https://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001.html>
- [2] 環境省「高効率ごみ発電施設整備マニュアル」(2018)
http://www.env.go.jp/recycle/misc/he-wge_facil/
- [3] 環境省「廃棄物処理施設整備計画」(2018)
<http://www.env.go.jp/press/105612.html>
- [4] 環境省「日本の廃棄物処理 平成29年度版」(2019)
https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h29/index.html
- [5] 村野昭人・鈴木武「廃棄物からエネルギーを回収する技術の調査」(2004)『国土技術政策総合研究所資料』第197号, pp1-15
- [6] 福島市「福島市あぶくまクリーンセンター焼却工場再整備事業基本構想(参考資料)」(2018)
- [7] 吉葉正行「廃棄物処理プラント材料の開発動向-エネルギー供給拠点としての機能と課題」(2012)『電機製鋼』第83巻1号 pp.43-52
- [8] 鈴木良典「廃棄物発電の現状と課題」(2014)『国会国立図書館レファレンス』Vol. 64No5, pp41-54
- [9] 株式会社三菱総合研究所「平成24年度廃棄物処理の3R化・低炭素化改革支援事業委託業務

- 報告書」(2013)
- [10] 国土交通省・道路局・都市局「費用便益分析マニュアル」(2018)
- [11] タクマ環境技術研究会(編)「ごみ焼却技術絵とき基本用語(改訂3版)」(2011)
- [12] タクマ環境技術研究会(編)「基礎からわかるごみ焼却技術 Waste Burning Technology」(2017)
- [13] 川崎重工株式会社「コジェネレーションシステム|ガスタービン」
https://www.khi.co.jp/energy/gas_turbines/cogeneration.html
- [14] 千葉市・環境局資源環境部「庁議付議事案調査」(2016)
- [15] 吉崎匡広・劉小鳳・北海道大学廃棄物処分工学研究室「一般廃棄物全連続式焼却施設の物質収支・エネルギー収支・コスト分析」(2012)
- [16] 東京ガス「ガス料金表」
<https://eee.tokyo-gas.co.jp/service/gas/charge/list.html>
- [17] 松藤俊彦(著)「都市ごみ処理システムの分析・計画評価-マテリアルフロー・LCA 評価プログラム-」(2005)
- [18] 経済産業省・資源エネルギー庁「固定価格買取制度」
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/fit_kakaku.html
- [19] JET テクノリサーチ株式会社「平成25年度廃棄物発電の高度化及び売電支援事業委託業務報告書」(2014)
- [20] 中久保豊彦・小林緑「地方都市・農村域における汚泥処理機能の統合化による温室効果ガス排出削減効果の解析-群馬県を対象としたケーススタディ-」(2016)『土木学会論文集 G(環境)』,Vol72, No6, pp45-56
- [21] 一般社団法人日本機械学会(編)「熱力学」(2002)
- [22] 環境省「廃棄物処理施設における固定価格買取制度(FIT)ガイドブック」(2013)

表 2 算定式

プロセス	項目	算定式	備考
焼却炉	入熱量	ごみ発熱量[MJ/h]=ごみ投入量[kg/h]×ごみ低位発熱量[MJ/kg] 焼用空気保有熱量[MJ/h]=焼却用空気量[Nm ³ /h]×空気平均比熱[kJ/Nm ³ /°C]×(空気温度-基準温度)[°C]/10 ³	空気温度:150°C,基準温度20°C
	出熱量	焼用ガス保有熱量[MJ/h]:入熱量=出熱量より算出 焼却灰保有熱量[MJ/h]=焼却灰量[kg/h]×灰平均比熱[kJ/kg/°C]×(焼却灰温度-基準温度)[°C]/10 ³	焼却灰温度:850°C
		焼却炉放散熱量[MJ/h]=入熱量[MJ/h]×ストーカ炉の放散熱率[-]	放散熱率:0.030
	係数	焼用空気量[Nm ³ /h]=焼用空気必要量[Nm ³ /kg]×ごみ投入量[kg/h] 焼用空気必要量[Nm ³ /kg]=0.367×低位発熱量[MJ/kg]+1.21 空気平均比熱[kJ/Nm ³ /°C]=1.30 灰平均比熱[kJ/kg/°C]=0.84	空気比:1.8
ボイラ	入熱量	焼用ガス保有熱量[MJ/h]:焼却炉の出熱より入力 ボイラ給水保有熱量[MJ/h]=給水量[kg/h]×給水温度の比エンタルピー-[kJ/kg]/10 ³	611(145°C)
	出熱量	蒸気保有熱量[MJ/h]=蒸気量[kg/h]×蒸気の比エンタルピー-[kJ/kg]/10 ³ 排ガス保有熱量[MJ/h]=湿りガス量[Nm ³ /kg]×ガス平均比熱[kJ/Nm ³ /°C]×(湿りガス温度-基準温度)[°C]/10 ³ ボイラ放散熱量[MJ/h]=焼用ガス保有熱量[MJ/h]×ボイラ放散熱率[-]	2994(3MPa,300°C),3214(4MPa,400°C) 湿りガス温度:220°C 放散熱率:0.015
	連立式	入熱量=出熱量[MJ/h],給水量=蒸気量[MJ/h]	
	係数	湿りガス量[Nm ³ /h]=湿りガス量発生量[Nm ³ /h]×ごみ投入量[kg/h] 湿りガス量発生量[Nm ³ /kg]*=0.339×低位発熱量[MJ/kg]+2.35 ガス平均比熱[kJ/Nm ³ /°C]=1.38	空気比:1.8
独立過熱器	入熱量	ガスタービン排ガス保有熱量[MJ/h]=燃料低位発熱量[MJ/Nm ³]×燃料消費量[Nm ³ /h]×(1-ガスタービン発電効率[-]) 排熱回収ボイラ蒸気保有熱量[MJ/h]=10,000[kg/h]×蒸気の比エンタルピー-[kJ/kg]/10 ³ 蒸気保有熱量[MJ/h]:ボイラの出熱量より入力	発電効率:[0.343] 2803(3MPa,飽和蒸気)
	出熱量	再過熱後蒸気保有熱量[MJ/h]=(ボイラ蒸気量+排熱回収ボイラ蒸気量)[kg/h]×蒸気の比エンタルピー/10 ³ ガスタービン排ガス持出保有熱量[MJ/h]:入熱量=出熱量[MJ/h]より算出	3231(3MPa,400°C)
		ガスタービン排ガス持出保有熱量[MJ/h]:独立過熱器の出熱より入力	
排熱回収ボイラ	入熱量	ガスタービン排ガス持出保有熱量[MJ/h]:独立過熱器の出熱より入力 ボイラ給水保有熱量[MJ/h]=10,000[kg/h]×給水の比エンタルピー-[kJ/kg]/10 ³	611(145°C)
	出熱量	蒸気保有熱量[MJ/h]=10,000[kg/h]×蒸気の比エンタルピー-[kJ/kg]/10 ³ ガスタービン排ガス持出保有熱量[MJ/h]:入熱量=出熱量[MJ/h]より算出	2803(3MPa,飽和蒸気)
空気予熱器	入熱量	仕向蒸気保有熱量[MJ/h]=仕向蒸気量[kg/h]×蒸気の比エンタルピー-[kJ/kg]/10 ³	
	出熱量	焼用空気保有熱量[MJ/h]:焼却炉の入熱より入力 ドレン保有熱量[MJ/h]=ドレン量[kg/h]×ドレンの比エンタルピー-[kJ/kg]/10 ³	1038(240°C)
	連立式	入熱量=出熱量[MJ/h],仕向蒸気量=ドレン量[kg/h]	
白煙防止用再加熱器	入熱量	仕向蒸気保有熱量[MJ/h]=仕向蒸気量[kg/h]×蒸気の比エンタルピー-[kJ/kg]/10 ³	
	出熱量	排ガス再加熱用熱量[MJ/h]=湿りガス量[Nm ³ /h]×ガス平均比熱[kJ/Nm ³ /°C]×(再過熱後温度-再加熱前温度)[°C]/10 ³ ドレン保有熱量[MJ/h]=ドレン量[kg/h]×ドレンの比エンタルピー-[kJ/kg]/10 ³	再過熱後温度:180°C再加熱前温度80°C 1038(240°C)
	連立式	入熱量=出熱量[MJ/h],仕向蒸気量=ドレン量[kg/h]	
復水タンク ・給水加熱器・ 脱気器	入熱量	加温抽気保有熱量[MJ/h]=仕向抽気量[kg/h]×蒸気の比エンタルピー-[kJ/kg]/10 ³ 飽和水の保有熱量[MJ/h]=飽和水量[kg/h]×飽和水の比エンタルピー-[kJ/kg]/10 ³ Σドレン保有熱量[MJ/h]:空気予熱器,再加熱器の出熱より入力 ガスタービン排ガス保有熱量[MJ/h]:排熱回収ボイラの出熱より入力	251(60°C)
	出熱量	給水加熱器前給水保有熱量[MJ/h]:ボイラの入熱より入力	
	連立式	入熱量=出熱量[MJ/h],仕向抽気量+飽和水量+Σドレン量=ボイラ給水量[kg/h]+排熱回収ボイラ給水量[kg/h]に基づき算定	
蒸気タービン	蒸気量	発電仕向蒸気量=飽和水量=(ボイラ給水量+排熱回収ボイラ給水量)-(加温用抽気量+Σドレン量)[kg/h] 発電量[MJ/h]=発電仕向蒸気量[kg/h]×(蒸気の比エンタルピー-湿り蒸気の比エンタルピー)-[kJ/kg]×タービン段効率[-]	3MPa,300°C:2279(60°C) 4MPa,400°C:2231(60°C)
	出熱量	復水器大気放散熱量[MJ/h]=発電仕向蒸気量[kg/h]×蒸気の比エンタルピー-[kJ/kg]/10 ³ -発電量[MJ/h] -飽和水の保有熱量[MJ/h]	タービン段効率:0.85

タクマ環境技術研究会(2011)[11], 中久保ら(2016)[20], 日本機械学会(2002)[21]より穴澤作成