

ガスコジェネレーションシステムによる熱供給事業の導入可能性評価に関する研究*

A feasibility evaluation on heat supply project by gas cogeneration system*

内田賢悦**・石黒裕佳子***・加賀屋誠一****

By Ken'etsu UCHIDA**・Yukako ISHIGURO***・Seiichi KAGAYA****

1. はじめに

天然ガスは、その他の化石燃料と比較した場合、二酸化炭素排出量が少ないことから、需要が増大している。また、天然ガスにより電力と熱を供給するガスコジェネシステムは、エネルギーの変換効率も高く、環境問題に急務な対応が求められる現在、その普及が課題となっている。しかしながら、こうした事業を展開することを考えると、事業会社だけでは採算性の問題から、事業化が困難な場合が多い。すなわち、ガスコジェネシステムは、環境問題に対応するためには有望であると認識されているものの、障壁となる採算性の問題がクリアされなければ事業化が困難である。

本研究では、ガスコジェネシステムの事業スキームを構築し、その経済分析手法を提案する。ここで、事業の関係主体は、事業運営会社、ガス会社、自治体、地域住民、金融機関と想定し、それらの適切な費用および利益の分配法を明らかにする。

2. コジェネシステムに関する費用の整理

(1) 分析の仮定

コジェネシステムによって、電力と熱を供給する事業を考える。ガスエンジンにより、電力を発生させ、さらにその過程から発生する廃熱を利用して地域住民に熱供給を行なうと仮定する。さらに、地域の道路にロードヒーティングも敷設する。地域で需要される電力と熱量が供給可能量を超える場合、電力に関しては、電力会社から購入して供給し、熱量に関してはコジェネシステムに含まれるボイラーから得られる熱量を供給するものとする。また、システムによって冷熱の供給も行なうものとする。

(2) ガスエンジンに関するトレードオフの関係

対象地域に存在するコジェネシステムによるサービスの提供先集合を以下で定義する。

$$P = \{f, h, c, o, h, rh\}$$

ここで、 f : 世帯、 h : ホテル、 c : 商業、 o : オフィス、 h : 病院、 rh : ロードヒーティングである。 m ($=1, \dots, 12$) 月に対象地域に存在する供給先 $p \in P$ が必要とする電力を ep_p^m とする。この場合、この地域で m 月に必要となる電力 ep^m は、式(1)で与えられる。

$$ep^m = \sum_{p \in P} ep_p^m \quad (1)$$

一方、対象地域で建設されるコジェネシステムにおけるガスエンジンの月間最高出力電力を ep_{max} とする。ここで ep_{max} は、後述するが、期待値が EP_{max} となるガンベル分布に従うと仮定する。本研究で提案するシステムの建設費、および年間の維持管理費は、それぞれ式(2)、式(3)で与えられるものとする。

$$CC = CC(EP_{max}, p_b, s_{rh}) \quad (2)$$

$$MC = MC(EP_{max}, p_b, s_{rh}, emp) \quad (3)$$

p_b : ボイラーの費用。

s_{rh} : ロードヒーティングの敷設面積。

emp : 事業体の雇用者数。

対象地域で需要される電力は毎月異なるが、この電力量が ep_{max} を超えた場合、事業体は電力会社から電力を購入し、地域に供給することにする。その場合、電力会社から購入する電力とコジェネによって地域に供給する電力の価格差は、事業体の負担となる。ここで、 ep^m と ep_{max} が互いに独立なガンベル分布の期待値となっていることを仮定し、 ep^m および ep_{max} の期待値がそれぞれ EP^m 、 EP_{max} で与えられる場合、 m 月に発生する事業体の負担金の期待値 $L^m = L^m(EP_{max})$ は、式(4)で与えられる。

$$\begin{aligned} L^m(EP_{max}) &= \max\{E[ep^m - ep_{max}], 0\} \cdot \delta p \cdot \Pr(ep^m \geq ep_{max}) \\ &= \max\{EP^m - EP_{max}, 0\} \cdot \delta p \cdot \frac{\exp(\theta \cdot EP^m)}{\exp(\theta \cdot EP^m) + \exp(\theta \cdot EP_{max})} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 θ 、 δp および $\Pr(\cdot)$ はそれぞれ、ワイブル分布の分散パラメータ、単位電力当たりの価格差および確率を示している。したがって、年間の損金の期待値 $L = L(EP_{max})$ は、式(5)で与えられる。

$$L(EP_{max}) = \sum_{m=1}^{12} L^m(EP_{max}) \quad (5)$$

1年間に発生する損金の期待値は、 EP_{max} のみに依存し、毎年同じ値をとるものと仮定する。

*キーワード エネルギー計画、地域環境問題

**正会員 博(工) 北海道大学大学院工学研究科
(札幌市北区北13条西8丁目, Tel 011-706-6211, Fax 011-706-6211)

***学生員 学士 北海道大学大学院工学研究科
(札幌市北区北13条西8丁目, Tel 011-706-6212, Fax 011-706-6211)

****フェロー 学博 北海道大学大学院工学研究科
(札幌市北区北13条西8丁目, Tel 011-706-6210, Fax 011-706-6211)

れる。債務保証は自治体が行うため、事業体は無リスク金利による元利均等返済を行うことができる。

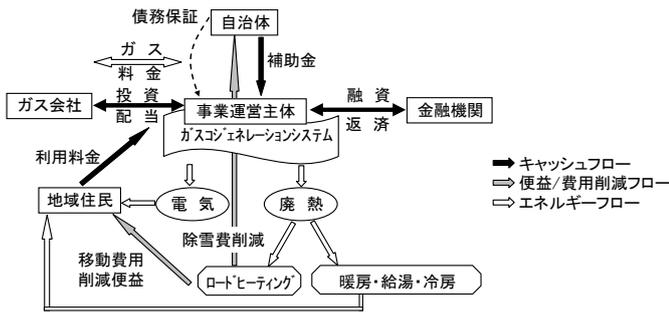


図 2. 事業スキーム

(2) 調達資金の返済方法

図 3 は、建設費の返済方法を示している。システムに関するインフラは、ガス会社の出資と金融機関の借入金によって建設され、その後、事業体は運営期間 n 年間にわたって運営と返済を行うものとする。毎年の金銭と便益のフローは、運営・債務償還期間によって A 期, B 期, C 期, D 期, E 期に分けて考えることにする。はじめに、A 期では、借入金および出資金の元本の返済は行わない。B 期では、金融機関からの借入金のみを返済する。C 期では、借入金を返済すると共に、出資金の返済も行う。D 期では、借入金の返済は終了しており、出資金のみを返済することになる。最後に E 期では事業が終了する。ここで、各期においては、負債が出ることも想定されるが、その場合は政府系金融機関からの融資を受けるものとする。さらに、この借入金に対しても自治体が債務保証することとし、これにより返済には無リスク金利を適用できることを想定する。また、逆に利益が発生することも考えられるが、これは国債等の無リスク金利で運用することとする。

建設	運営・債務償還期間										
0 年目	1	...	n_0	...	n_1	...	n_2	...	n_3	...	n
建設											
	借入金 D の返済										
	出資金 I の返済期間										
	A			B		C		D		E	

図 3. 調達資金の返済方法

(3) 各期の金銭と便益のフローの定式化

各主体のある k 年目における効用関数を図 2 に示したキャッシュフローと便益フロー（以下、単に便益フローと呼ぶ）をもとに定式化する。事業体の k 年目における便益フロー (f_k) は、式(11)で表現される。

$$f_k = x_k + y_k - H - MC - C_D^k - C_I^k - L(EP_{\max}) - i_k \quad (11)$$

where $f_k = 0$.

$$\Rightarrow i_k = x_k + y_k - H - MC - C_D^k - C_I^k - L(EP_{\max}) \quad (12)$$

- x_k : k 年目の自治体による補助金.
- y_k : k 年目の加入者からの料金収入.
- H : 電力会社からのガス購入費用 ($= G \cdot p_g$).
- p_g : ガスの単価.
- MC : 維持管理費 (including employment costs).
- C_D^k : 金融機関からの借入金 $D(1+r)^{n_0}$ に対する k 年目 ($n_0 \leq k \leq n_2$) の返済額 ($n_2 - n_0 + 1$ 年間の元利均等返済額).
- C_I^k : 電力会社からの出資金 $I(1+r)^{n_1}$ に対する k 年目 ($n_1 \leq k \leq n_3$) の返済額 ($n_3 - n_1 + 1$ 年元利均等返済額).
- i_k : k 年目の事業体の当期利益 (または当期損益).
ここで、 f_k は利益を追求しない事業体を想定するため、常に 0 となることに注意が必要である。これによって、後述する事業の目的関数に事業体の効用が影響することはなくなる。また C_f^k および C_c^k は、借入金と出資金の返済期間を考慮して、それぞれ式(13), 式(14)で表される。

$$C_D^k = \begin{cases} \frac{D(1+r)^{n_0} \cdot r(1+r)^{n_2-n_0+1}}{(1+r)^{n_2-n_0+1} - 1} & \text{if } n_0 \leq k \leq n_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$C_I^k = \begin{cases} \frac{I(1+r)^{n_1} r(1+r)^{n_3-n_1+1}}{(1+r)^{n_3-n_1+1} - 1} & \text{if } n_1 \leq k \leq n_3 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

- D : 金融機関からの借入金
 - I : 電力会社からの出資金
- このとき、各主体 (主体 1: 自治体, 主体 2: ガス会社, 主体 3: 加入者) の k 年目の便益フローそれぞれ u_1^k, u_2^k, u_3^k は、それぞれ式(15), 式(16), 式(17)で表される。

$$u_1^k = B_s - x_k + \min(CD^k, 0) \quad (15)$$

$$u_2^k = H \cdot pr + C_I^k + \max(CD^k, 0) \quad (16)$$

$$u_3^k = B_a + B_t + B_h \quad (17)$$

- $B_s = B_s(s_{rh})$: 除雪費削減便益 (削減費用).
- $B_a = B_a(s_{rh})$: 交通事故減少便益.
- $B_t = B_t(s_{rh})$: 旅行時間短縮便益.
- $B_h = EB - y_k$: 光熱費用削減費.
- EB : システム導入前の光熱費の総計.
- pr : ガスの利益率.

ここで CD^k は、正の値をとる場合は電力会社への配当金であり、負の値をとる場合は自治体の債務補償額となり、式(18)に示す関係が成立する。

$$CD^k = \begin{cases} R^n & \text{if } k = n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

where

$$R^k = \sum_{l=1}^k i_l (1+r)^{k-l} \quad (19)$$

式(18)は、 i_k が正となる場合、それは配当用無しリスク金利 (r) (後に示す割引率と同じ値をとるものとする) で運用され、負となる場合、その分、政府系金融機関から無しリスク金利による融資を受けることを示している。

(4) 各主体の全体の目的関数

以上の準備のもと、各主体の事業期間 n 年間通しての便益フローの現在価値をそれぞれ U_1, U_2, U_3 とすると、それぞれ式(20), 式(21), 式(22)で表現することができる。

$$U_1 = \sum_{k=1}^n \frac{u_1^k}{(1+r)^k} \quad (20)$$

$$U_2 = \sum_{k=1}^n \frac{u_2^k}{(1+r)^k} - I \quad (21)$$

$$U_3 = \sum_{k=1}^n \frac{u_3^k}{(1+r)^k} \quad (22)$$

事業者全体の行動は、上記の便益フローの現在価値を用いて、以下に示す最適化問題として定式化する。

$$\max Z = \sum_{i \in \{1,2,3\}} U_i - \sum_{i \in \{1,2,3\}} \delta(U_i) pnl - \delta(R^n) pnl \quad (23)$$

w.i.t. $x_k, y_k, I, D, EP_{\max}, S_{rh}$

s. t.

$$f_k = 0 \quad \forall k \quad (24)$$

$$D - \sum_{k=n_0}^{n_2} \frac{C_D^{k'}}{(1+r)^{k'}} = 0 \quad (25)$$

$$I - \sum_{k=n_1}^{n_3} \frac{C_I^{k'}}{(1+r)^{k'}} = 0 \quad (26)$$

$$D + I = CC \quad (27)$$

$$y_k \leq EB \quad (28)$$

$\delta(x)$: もし $x < 0$ ならば1, それ以外ならば0をとる変数。

pnl : ペナルティ値。

ここで、 CC は事業システムの建設費である。すなわち、事業の建設費は金融機関からの借入金とガス会社からの出資金でまかなわれるが、それぞれの分担量は制御変数として表現されることになる。式(24)は、先述のとおり事業主体が利益を追求しないことを示している。また、式(25), 式(26)はそれぞれ、借入金と出資額に対する返済の制約条件となっている。

4. 札幌でのケーススタディとまとめ

札幌都心部のある街区を対象に、ガスコジェネシステムの導入可能性評価を行なった。街区の面積を参考に、ロードヒーティング、ガスエンジンおよびボイラーの費用を除く建設費を13.6億円と仮定した。システム利用者については、概ね現在その街区に存在する規模を仮定し、特に世帯についてはマンション住民と仮定した。以下にシステム利用者の概要を示す。

表1. システム利用者の概要

利用者	延べ床面積/世帯数
ホテル	18,000 m ²
商業	18,000 m ²
オフィス	18,000 m ²
病院	4,250 m ²
マンション	235 世帯

システム利用者が受容する月別電力および熱量等、計算に必要なデータについては、計算に必要なデータについては標準負荷データを使用した。ここでは詳細は割愛する。また、各システム利用者の年間光熱費は、世帯については20(万円/世帯)、その他については、0.3(万円/m²)と仮定した。事業期間は20年とし、借入金の返済は、事業期間を通して行ない、投資額に対する原本返済は5年目から19年目にかけて行なうものとした。表2, 表3は、それぞれ事業機関を20年と仮定して計算した最適変数および各主体に帰着する純便益の現在価値を示している。

表2. 変数の最適値

変数	補助金 (千円/年)	料金 (千円/年)	投資 (千円)	借入金 (千円)	エンジン (Mw/月)	ロードヒーティ ング (m ²)
最適値	829	291,738	1,309,686	476,875	93	3,670

表3. 帰着純便益 (千円)

主体	自治体	ガス会社	利用者
便益 (千円)	3,700	1,465,950	479,379

計算の結果、総建設費は約18億円となり、その約7割をガス会社が負担する結果となった。一方、純便益の総額は、約19.5億円となり、その約75%がガス会社に帰着する結果となった。自治体に関しては、純便益はほとんどなく、ロードヒーティングで節約される除雪費用分を補助金として支出する結果となった。

謝辞

本研究を進めるに当たり、北海道ガス(株)の新谷一之氏、岸本佳久氏には、有益なご助言とデータ提供を頂いた。ここに記して、深謝いたします。