

H-2 環境負荷低減のための産業転換促進手法に関する研究

(2) 未利用エネルギー供給技術の普及に及ぼす経済的誘導施策の効果に関する研究

独立行政法人 産業技術総合研究所

ライフサイクルアセスメント研究センター	副センター長	匂坂 正幸
	地域環境研究チーム長	八木田 浩史
	地域環境研究チーム	玄地 裕

平成12-14年度合計予算額 13,402 千円

(うち、平成14年度予算額 3,994 千円)

[要旨] 未利用エネルギーの導入促進を図るためには、省エネルギー、CO₂ 排出量削減等の技術的な側面だけでなく、それに伴うコストの評価が不可欠であり、導入によるコスト上昇が大きい場合には何らかの経済的誘導施策が必要である。本研究では、未利用エネルギーの導入に際して経済的誘導施策がなされた場合に、その効果を省エネルギー及び CO₂ 削減に対する費用対効果のかたちで明らかにするため、都市におけるエネルギー需給構造モデルを構築した。モデル中に、補助金、炭素税等の経済的誘導施策を金額の形で入れることによってその効果を推定することができる。

従来の都市熱供給システムに、下水熱、ごみ焼却熱等の未利用エネルギーを導入した際のエネルギー需給構造に関して、建物構成の異なる 10 地域を特定し需給構造最適化のスタディを行った。その結果、事務所の割合がほとんどを占める地域では、ごみ焼却熱による熱供給の導入が CO₂ 削減に有効であることが明らかになった。一方、住宅が大部分を占める地域では、熱供給配管敷設費用が大きいため未利用熱の導入がなされないことが明らかになった。

未利用排熱を活用するガスタービンコジェネレーションを適用したときの評価を行った。実際の建屋（産業技術総合研究所つくば西事業所）を対象として最適化モデルによる導入効果の評価を行い、発電効率 30% の再生サイクルガスタービンを導入したとき、従来と同等のコストで CO₂ 排出量を 7.5% 削減できること、発電効率 20% のシングルサイクルガスタービンを導入したとき、従来システムより CO₂ 排出量は増加するもののコストは 6.1% 削減できることが明らかになった。

さらに、マイクロガスタービンコジェネレーションを導入する場合について、従来型の系統電力と吸収冷温水機による供給システムとの評価をおこなった結果、複数の種類の建屋間で熱の融通を図ることによって、従来システムのおよそ 12% の省エネルギーになること、ESCO 事業としての補助金対象にすべきことを明らかにした。

[キーワード] 都市、需給構造、下水熱、ごみ焼却熱、最適化モデル

1. はじめに

民生用あるいは産業用に未利用エネルギー導入を図るうえでネックとなるのは、利用に際してインフラの整備が必要であり、そのために莫大な費用がかかることである。従って、未利用熱利

用技術を普及させるためには経済的な誘導施策が不可欠である。

これまで、未利用エネルギーの活用による省エネルギー促進など技術面の検討はなされてきたが、いまひとつ導入量が伸びていないのが現状である。

その要因として考えられることに、未利用エネルギーを活用する場合、熱を需要家に供給する際の設備及びユーティリティのコストが明らかになっていないこと、また、未利用エネルギーの存在する場所から需要地までの配管等のインフラを整備しようとする配管敷設に多くの制約があり、二酸化炭素排出量を抑制することの費用対効果が明らかになっていないことなどがあげられる。

2. 研究目的

本研究は未利用熱を導入する際の経済を評価するため、地域のエネルギー需給構造を検討する際の基本となるコスト最小化モデルを構築することを目的とする。東京都の中の特定地域を選定し、この地域にすでに導入されているエネルギー供給システムに新たに未利用エネルギーを導入する場合を想定し、未利用エネルギー導入の可能性をCO₂削減効果と所要コストの関係から明らかにする手法、また、上記のモデルを基に工学的最適化手法を用い、インフラの整備、維持、管理を含めた二酸化炭素排出量抑制量及びそれらのコストの推定を行う手法を開発する。

さらに、中小規模ビル、住宅への導入に際しての評価手法をおこなうために、需要の季節的・時間的变化に適合したシステムの最適運転方法及び建物間の熱融通方式によるCO₂削減量、コストを予測する手法を開発する。

3. 研究方法

まず、未利用エネルギーの賦存量がどの程度あるかを、東京都を例にとり、下水熱及びごみ焼却排熱量について調査した。一方、未利用エネルギーも含めた多種類のエネルギーシステムを対象とする需給構造最適化モデルを開発し、これを基に、これらの未利用エネルギーが利用可能と思われる地域を10地域選定し、地域内の建物構成（事務所が主あるいは住宅が主）の相違する地域についてCO₂削減率とそれに伴うコスト増加を制約条件に、未利用エネルギー導入量をケーススタディにより求めた。CO₂削減率とコストの結果より未利用エネルギー導入の費用対効果を求めた。

さらに、地域の中にコジェネレーションが導入されるケースについては、排熱量の有効利用によってCO₂削減率あるいはコスト削減率が最大になるような運転方法及び設置対象建屋種類の選定指針を提示することのできるモデルを構築した。

これらのモデルでは、いずれもコスト制約の中に補助金あるいは炭素税などの経済的誘導施策を金銭データとして入力することができ、そのときの未利用エネルギー導入への効果を見ることができる。

4. 結果・考察

4. 1 未利用エネルギーの調査結果

東京都の下水道熱及びごみ焼却熱の利用可能量について調査した。図1に東京の主な下水処理場12ヶ所について利用可能熱量を示す。利用可能熱量は、利用温度差を5℃として年間の下水流量¹⁾に温度差を乗じて求めた。下水温度は、図2に示すように季節によって変化するが、冬季

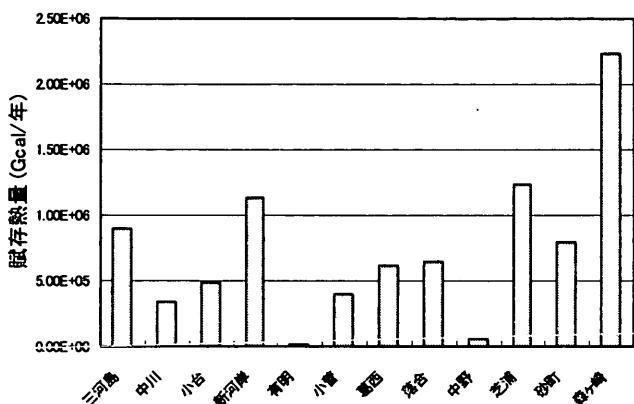


図1 東京都の下水熱利用可能量

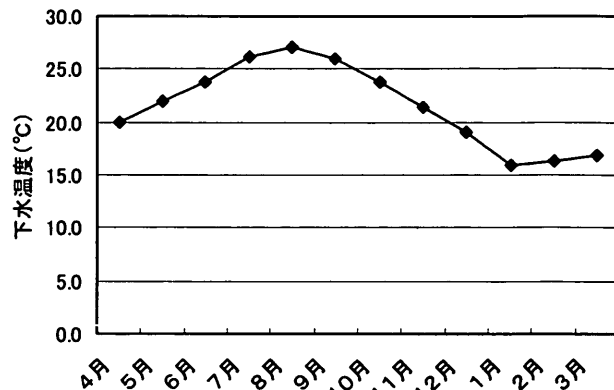


図2 下水温度の季節変化

は16~17℃であり冬季の暖房用熱源水として十分利用可能である。また、夏季は26~27℃であり、夏季の冷房用熱シンクとして機能するのに十分である。

図3に東京都区内にある清掃工場^{2,3)}について焼却熱のうちの利用可能熱量を示す。ごみの焼却熱のうち実際に蒸気として利用可能な熱量は、70~83%程度であり²⁾、ここでは75%と見積った。利用可能熱量は、大部分が40~50万Gcal/year程度であるが、新江東、港、板橋

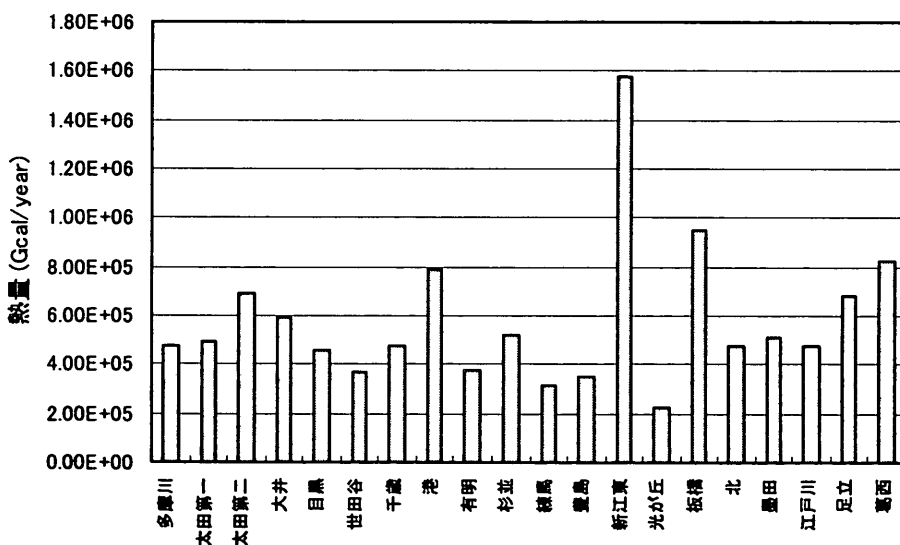


図3 東京都のごみ焼却熱利用可能量

などの新しいプラントでは熱量が大きく、80 万 Gcal/year 以上である。

4.2 エネルギー需給構造

未利用エネルギーの導入が期待される地域を特定し、エネルギー需給構造を解明する。この場合未利用エネルギーが単独で導入されることはなく、既存のエネルギーシステムとの共存によって、最も経済的な需給構造が決まる。

(1) エネルギーシステム

導入すべきエネルギーシステムを表1に示す。システムは、広域供給及び個別供給を考え、それぞれ新・未利用及び従来システムがあり表に示す供給システムが導入できるものとした。表2にこれらの供給システムの発電効率、熱効率を示す。

表1 エネルギーシステム

		供給システム
広域供給システム	新・未利用エネルギー	・ガスエンジン CGS 地域冷暖房 ・下水熱利用地域冷暖房 ・ゴミ焼却場排熱利用地域冷暖房
	従来システム	・従来型地域冷暖房 ・ビル用集中冷暖房
個別供給システム	新・未利用エネルギー	・太陽光発電システム ・太陽熱温水器
	従来システム	・ガス給湯器 ・パッケージエアコン ・石油ファンヒーター
電力		・系統電力

表2 システム機器の条件

対象システム		導入量 単位	熱回収率	冷房	暖房	給湯	一般電力	熱損失割合 $1-\gamma-\eta$
			γ	COP	COP	COP	発電効率 η	
地域冷暖房	ガスエンジンCGS	[MW]	0.45	1.04	1.04	0.85	0.30	0.25
	従来型(都市ガス)地冷	[MW]	0.90	1.04	1.04	0.85		0.10
	下水熱源ヒートポンプ	[MW]	1.00	3.05	3.35			0
	ゴミ焼却場排熱利用	[MW]	0.90	1.04	1.04	0.85		0.10
ビル集中冷暖房	ビル用集中(都市ガス)冷暖房	[MW]	0.90	1.04	1.04	0.85		0.10
自家発電	3kw級太陽光発電(PV)	[MW]					0.60	
給湯供給	4.9Mcal級太陽熱温水器	[MW]				0.85		
	ガス給湯器	[MW]				0.85		
冷暖房	パッケージエアコン	[MW]		3.05	3.35			
暖房	石油ファンヒーター	[MW]			0.90			
一般電力	系統電力	[MW]					1.00	

(2) モデルの概要

本モデルは、選択した地域の冷熱、温熱、給湯、一般電力の需要を充たすように、表1のシステムについてコスト最適化を行うものである。目的関数はシステムのイニシャルコストとランニングコストの合計とした。システムの設備容量は、余裕率を考慮してピーク需要の1.25倍とした。

目的関数：

$$\text{minimize} \left(\sum_i c_{1i} \times 1.25 \cdot \max(x_{i,j}) + \sum_{i,j} c_{2i,j} \cdot x_{i,j} \right)$$

制約条件：

現状値の推定(Business As Usual: BAU)の CO₂ 排出量から、1~30%削減した量を上限値 A として制約条件とした。

$$\sum_{i,j} CO_{2i,j} \cdot x_{i,j} \leq A \text{ (const)}$$

(3) 需給構造のケーススタディ

東京都区内の地域において未利用エネルギーを利用した冷暖房が導入される可能性のある 10 地域を選定し、CO₂ 排出量を現状(BAU)の需給構造下での値から 1~30% 削減する場合についてそれぞれコスト最小となる需給構造についてケーススタディをおこなった。図 4 にそれぞれの地域の建屋別述べ床面積の構成を示す。事務所ビルが 100% の江東区台場から、住宅が 90% を占める足立区舎人まで地域によって建物構成が相違する。

床面積に建物別のエネルギー原単位を乗じることによって、建物の冷暖房・給湯・一般電力エネルギー需要量を各地域ごとに求めた。その結果を図 5 に示す。事務所地区は冷房、一般電力の需要が高く、住宅地区では暖房、給湯の需要が相対的に大きく、冷房需要が小さい。これらの地域ごとの特徴を踏まえながら以下のケーススタディを行った。

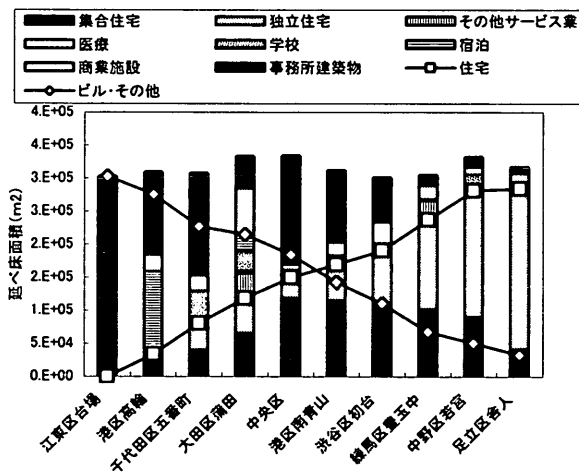


図 4 モデル地区の建物用途別床面積構成

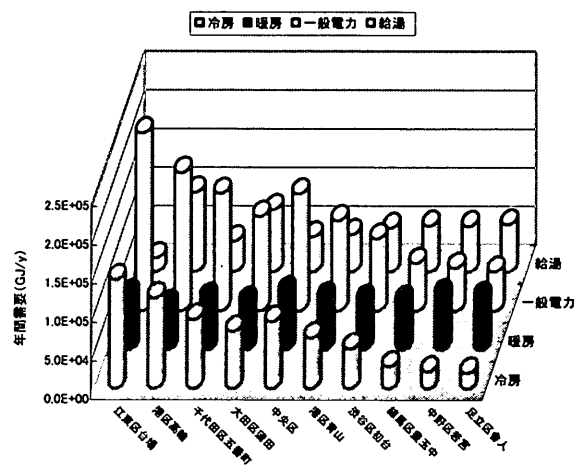


図 5 建物用途別年間需要量

① 事務所ビル 100% の地域

すでにビル集中冷暖房が導入されている地域に未利用熱を導入する場合について、事務所ビル 100% 地区での需給構造のケーススタディを行った結果を図 6 に示す。この地域では未利用熱のうち、ごみ焼却排熱は CO2 削減率の低い間は導入されないが、削減率 16% 以上ではビル集中冷暖房やパッケージエアコンに取って代わって導入され、削減率が高くなるにつれてその導入量が増加する。それとともに運転コストは小さくなるが、プラントコストの上昇が大きく、熱供給最小コストは上昇する。28% 削減のとき導入量は 18 MW (1.4×10^5 Gcal/y) となり、熱供給コストは 24 億円となった。一方、下水熱は導入されなかった。その理由はごみ焼却排熱の価格はほとんどゼロであるのに対して、下水熱を利用する場合はヒートポンプで使用する電力コストがかかるためであると考えられる。

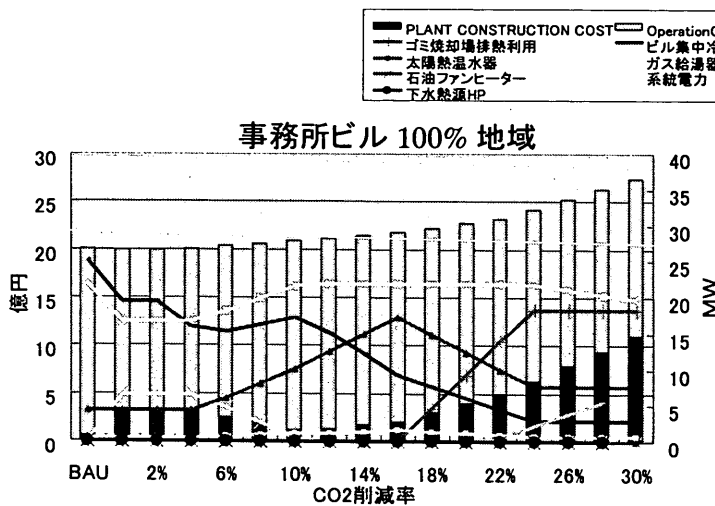


図 6 CO2 削減時の需給構造と供給コスト (事務所ビル 100% の地域)

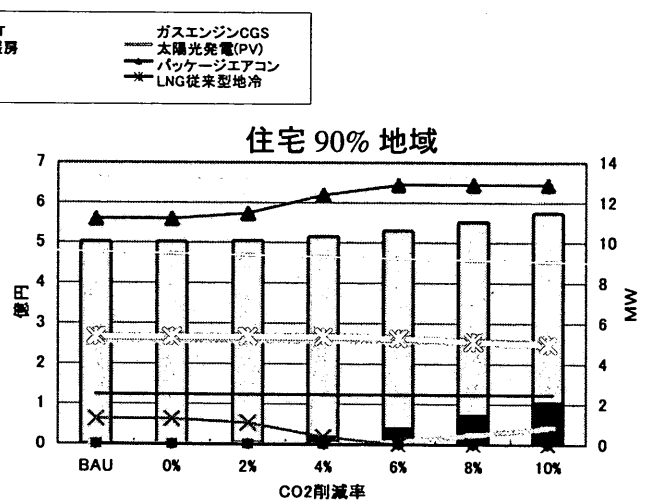


図 7 CO2 削減時の需給構造と供給コスト (住宅 90% の地域)

② 住宅 90% の地域

住宅 90% の地域について需給構造のケーススタディを行った結果を図 7 に示す。この地域では現実的なコストの範囲での CO2 削減率は 10% までである。この削減率を達成するのにごみ焼却廃熱、下水熱のいずれも導入されなかった。その理由は、住宅地域にはこれまで集中冷暖房という考え方がなかったため、未利用熱を使って集中冷暖房を行おうとする場合には新たに屋内配管を敷設する必要があり、その費用が支配的になったものと考えられる。

(3) CO2 削減費用

建物構成は相違するが合計延床面積がおよそ 350,000 m² の地域について、単位 CO2 を削減するための費用を算定した。CO2 削減費用は、BAU での運用費からその削減率での運用費までの費用増加額を、BAU からの CO2 削減量で割った値である。図 8 に、熱需要の大きさと、CO2 削減率を変数に、CO2 削減費用を算定した結果を示す。

同じ CO2 削減率の場合、熱需要量の大きい方が CO2 削減費用が安価であること、特にゼロ円以下となる右下の領域では、直ちに入れ替えを行うべき地域であることが示唆された。

CO₂ 排出を抑制する政策のひとつに炭素税がある。仮に、その額が 30,000 円/ton-CO₂ の場合、図 8 の実線より右下の範囲が経済性に優れ、20% 以上の CO₂ 排出量削減できる現実的な範囲であると考えられる。このように、例えば炭素税の導入といった経済的誘導施策が実施されるならば未利用エネルギーの導入が促進されるであろうことが示された。

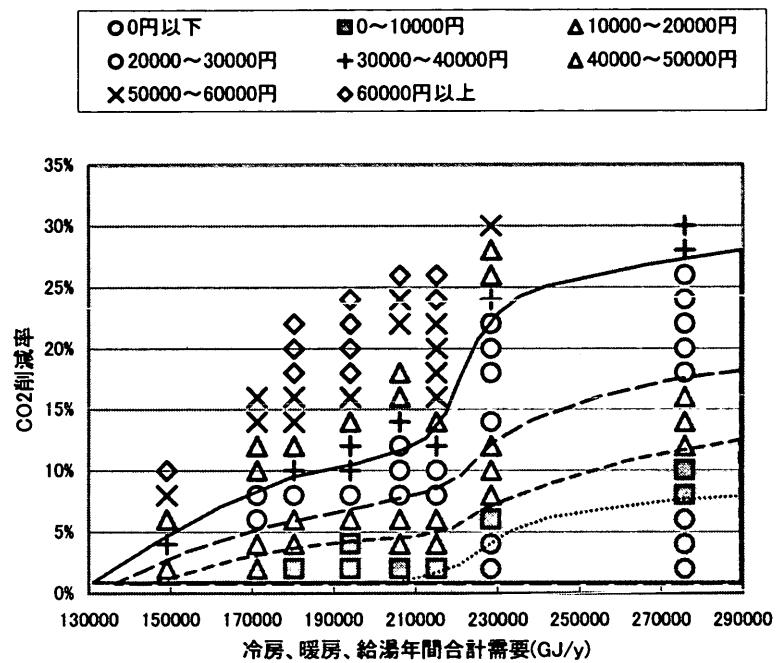


図 8 CO₂ 削減費用

4. 3 ガスタービンコジェネレーションシステムの導入

ガスタービン発電の排熱をコジェネレーションとして利用するシステムはすでに広くおこなわれているが、電力と熱の季節的・時間的な需要量の変化に応じて発生熱を無駄に捨てることなくガスタービン発電容量を制御することによって省エネルギーあるいはコストの削減を図ることができる。運転容量最適化モデルを作成し、これを用いて CO₂ 排出量最小のときのコストを予測した。

表 3 建屋の電力・熱需要

		電力 kWh/h	温熱 Mcal/h	冷熱 Mcal/h
1月	最大	1350	2600	0
	最小	600	700	0
8月	最大	1420	380	2700
	最小	800	380	100
10月	最大	1410	380	0
	最小	600	380	0

(1) 建屋及びエネルギー需要の測定

ガスタービンコジェネレーションを、産総研西事業所に適用した場合の省エネ、CO₂ 削減、コスト削減効果をモデルを用いて評価した。建屋の総延べ床面積は、45,000 m²、電力及び冷温熱需要は 1

時間ごとのエネルギーセンターでの実測データを用いた。季節別最大・最小需要量を表3に示す。実測値より、時刻ごとの熱電比を求めた結果を図9に示す。ここでは参考のため一般のオフィスビルでの値も示した。図より、オフィスビルでは熱電比 0.5~1.5 であるのに対して、産総研の建屋では熱電比 1~2.5 であった。これはガスタービンコジェネレーションの熱電比 2 に近く、導入によって排熱の有効利用による省エネルギー、低コストを図ることができるものと思われる。

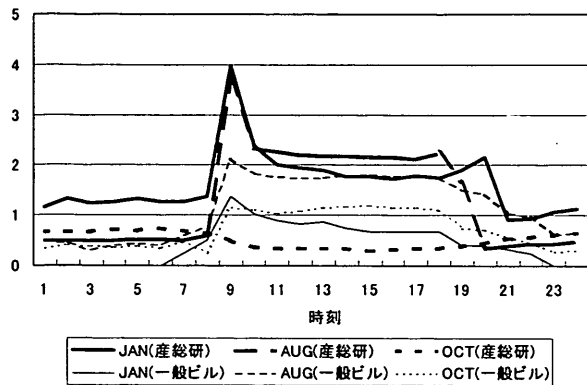


図9 各月の時間帯別熱電比

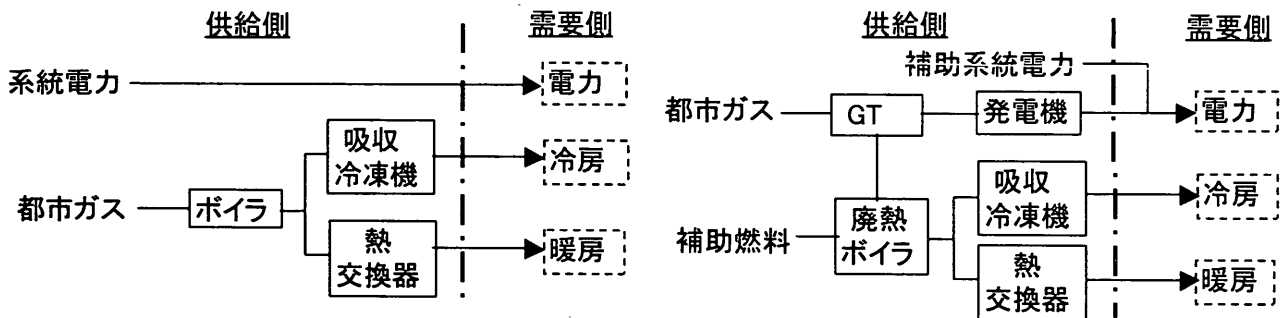


図10 従来型、ガスタービンコジェネレーションシステム

この建屋には図10左側に示すように、現在灯油ボイラと蒸気吸収冷凍機を熱源とする集中冷暖房が設置されており、電力は系統電力より供給されている。集中冷暖房を、同図右側に示すガスタービンコジェネレーションシステムで代替した場合の比較評価を行う。このシステムは、電力をGTで発電した電力と系統電力より供給し、冷暖房用の熱をガスタービン排熱、排熱回収ボイラ、補助ボイラ、蒸気吸収冷凍機より構成される熱源機器より供給する。

(2) シミュレーション

① シミュレーションモデルの概要

各月の平日におけるエネルギー需要量の平均値をその月の代表日と定め、時間帯別の需要量を系統電流億、ガスタービン (GT) 発電電力、排熱回収ボイラ、補助ボイラ、蒸気吸収冷凍機でまかなうものとした。この制約条件のもとで最小化する目的関数は、年間の CO2 排出量及び年間コストとした。即ち、

$$\sum X(i,j,k) \times C(k) \rightarrow \text{minimize}$$

i: 時刻、 j: 季節、 k: エネルギー種、 l: 機器

ここで、X はエネルギー消費量を表し、C(k) はエネルギー種別の CO2 排出原単位で

ある。ガスタービンの運転方法として、排熱により燃焼空気の余熱を行って発電効率を向上させる再生サイクルと行わないシンプルサイクルの2種類の方式を考慮した。

② シミュレーションの条件

本研究では、東京電力の時間帯別の電源構成⁴⁾と発電プラント別CO₂排出原単位⁵⁾を考慮した時間帯別CO₂排出原単位を用いた(図11)。電源構成は夜間から朝方にかけて原子力発電の占める割合が大きいのに対し、昼間は石油、ガスによる火力発電の割合が大きい。そのため、深夜の時間帯に比べ、昼間の時間帯におけるCO₂排出原単位は大きくなる。また、都市ガスのCO₂排出原単位は0.220kg-CO₂/Mcal (NIRE.Ver.3 付属データより)を用いた。エネルギー費は、電力17円/kWh、都市ガス5円/Mcalを用いた。電力需要の時間的变化により、ガスタービンが部分負荷運転になる時間帯が生じる。部分負荷運転によりガスタービン発電効率は図12に示すように変化する⁶⁾。シミュレーションでは、ガスタービンが高効率で運転されるように複数台分割設置すること

とした。シンプルサイクルにおいては、300~1500kW、発電効率は19~24%、排熱回収率はいずれのときも55%とした。再生サイクルにおいては、発電効率25%、30%とし、排熱回収率はそれぞれ50%、42%とした。

(3) シミュレーション結果

① ガスタービン単機容量の選定

図13に発電効率30%の時のGT一台の容量とCO₂排出

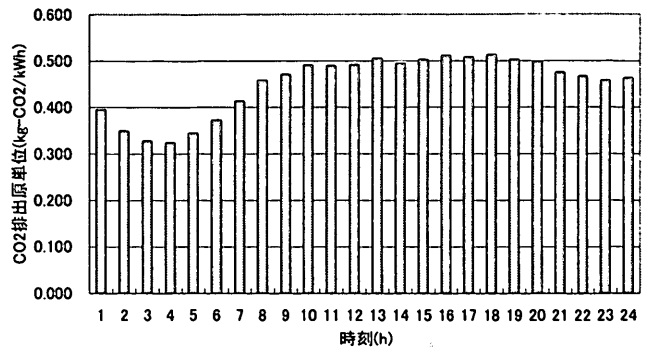


図11 電力時間帯別CO₂排出原単位

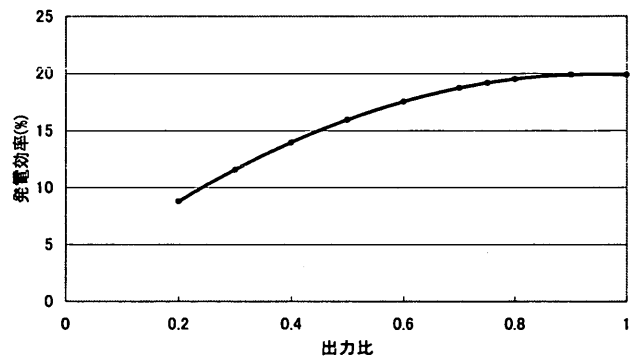


図12 ガスタービン部分負荷効率

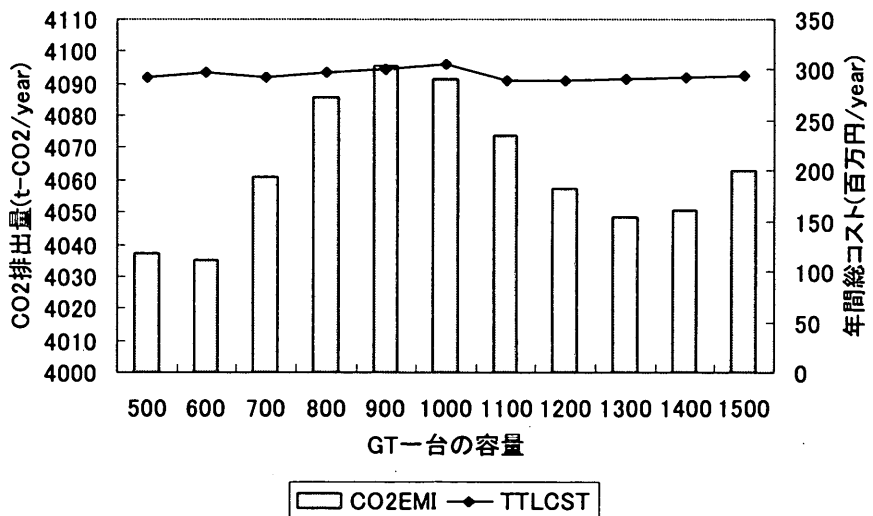


図13 ガスタービン容量別CO₂排出量及びコスト

量及び全コストの関係を示す。900kW までが GT 2 台導入しており、1000kW 以上が1台導入となった。600kW GT 2 台の場合が CO2 排出量は最も低くなった。900kW GT を2台設置する場合は CO2 排出量が最も高くなったが、これは2台目の GT が50% 程度の負荷で運転される時間帯が生じるためである。1000kW GT 1台導入の場合も CO2 排出量は高くなった。このようにエネルギー需要に見合った台数を導入することで GT の高負荷運転範囲を増加させ、CO2 排出量の削減が可能であった。

② CO2 排出量、コスト

次に、CO2 削減効果の最も大きかった 600 kW ガスタービンが導入される場合について発電効率 20% のシンプルサイクル、25%、30% の再生サイクルガスを導入したときの CO2 排出量及び供給総コストを計算し従来型システムと比較した。シミュレーションは CO2 排出量最小ケースとコスト最小化ケースの2通りについて行った。図14に CO2 排出量最小化、図15

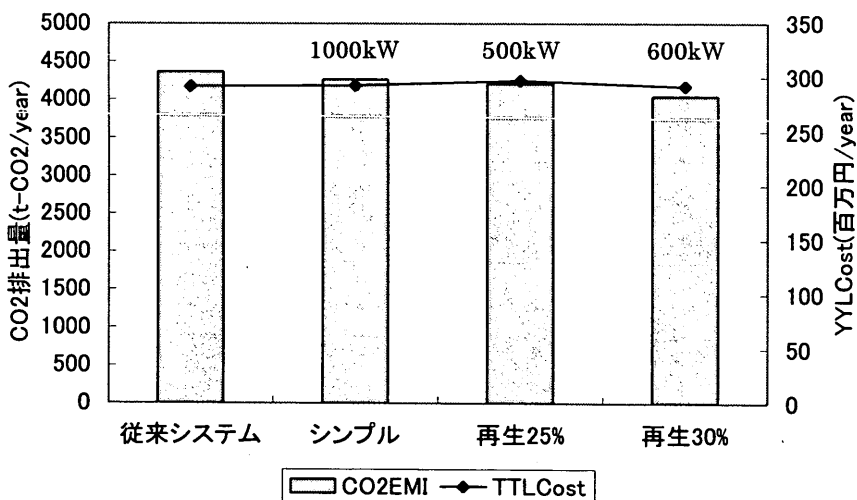


図14 CO2 排出量最小化時の削減効果

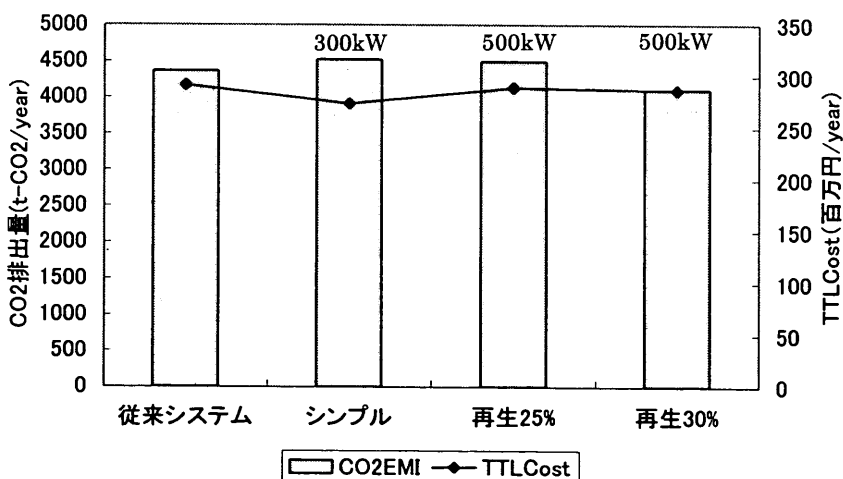


図15 総コスト最小化時の削減効果

にコスト最小化の各結果を示す。

CO₂ 排出量最小化の場合、シンプルサイクル GT では 1000kW 1台を導入するのが最も CO₂ 排出量が低く、従来型の 2.1% の削減、コストは同等となった。再生サイクル GT では発電効率 25% では、500kW 2台を導入するのが最も CO₂ 排出量が低く、従来型の 3.6% の削減、コスト 2.2% の削減となった。発電効率 30% では、600kW 2台を導入するのが最も CO₂ 排出量が低く、従来型の 7.5% の削減、コストはほぼ同等となった。総コスト最小の場合は、シンプルサイクルのときが最もコストが低く、従来型の 6% の削減となり、CO₂ 排出量は 3.8% 増加する。このとき GT は 300kW 3台が導入される。再生サイクル GT では発電効率 25%、30% のいずれの場合も 500kW GT 2台が導入され、発電効率 30% ではコスト 2% 削減、CO₂ 排出量 6.1% 削減となった。

③ 電力・熱供給構成

発電効率 30% のガスタービンを導入した場合の、従来システムからの CO₂ 排出量削減率が最大(7.5%)となったときの、電力供給構成と熱エネルギー供給構成を図 16 に示す。

電力供給構成を見ると、昼間から午後にかけてはガスタービンでの発電が支配的である。これは、先に示したように、この時間帯は系統電力の CO₂ 発生原単位が高いため、系統電力よりも GT 発電が選択されたことによる。一方、未明から明け方にかけては系統電力の CO₂ 原単位が低いためガスタービン発電をとめて系統電力からの供給が選択される。

熱供給構成を見ると、ガスタービンの排熱による供給量がかなりの部分を占めていることが示されている。その結果、補助熱による供給量が少なくなり、補助燃料からの CO₂ 排出量が少なくなり、コストも低減される。

CO₂ 最小化は、時間帯ごとに CO₂ 発生原単位の小さい発電方式を選択しようとする同時に、排熱の利用を促進して一日の補助熱の使用量を少なくしようとするような最適化計算がおこなわれて決定される。

(4) ペイバックタイム

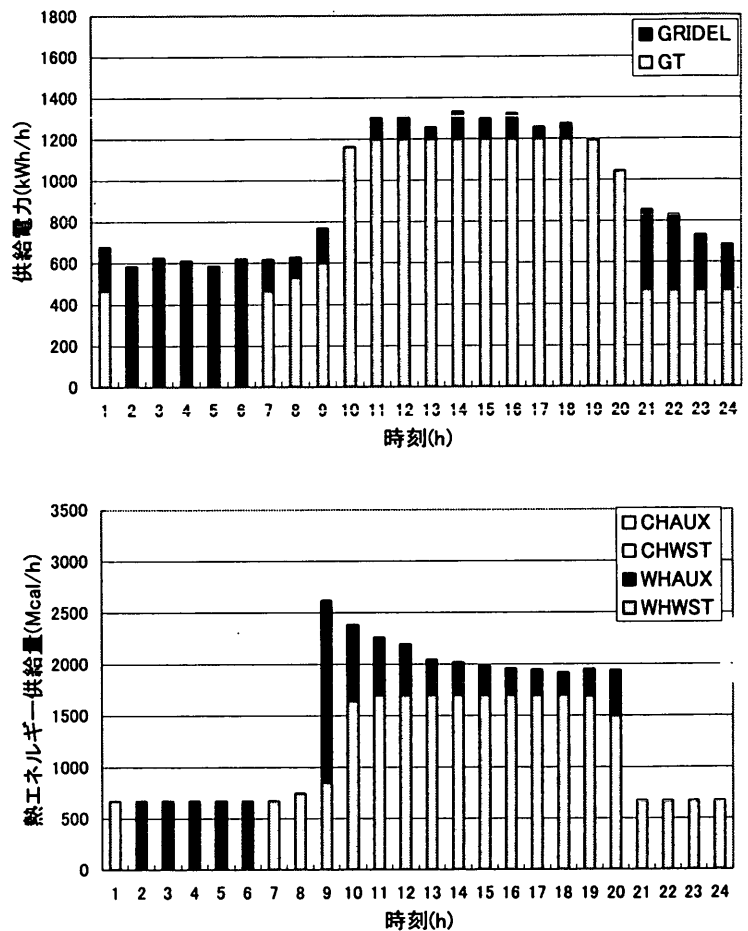


図 16 CO₂ 排出量削減率最大 (7.5%) のときの電力、熱の供給構成 (1月)

産総研建屋の場合に GT-CGS を導入したときの総コストの累積を従来型の熱電供給システムと比較して、ペイバックタイムを評価した。ここで、ペイバックタイムというのは、省エネルギーのために導入した設備の費用を、省エネルギーによって得られた年間利益で割った値であり、設備費が何年で回収できるかを表す。ガスタービンコジェネレーションシステムでは、環境を優先する CO₂ 排出量最小化運転と経済性を優先する総コスト最小化運転の場合の 2 通りについて見た。図 17 に結果を示す。

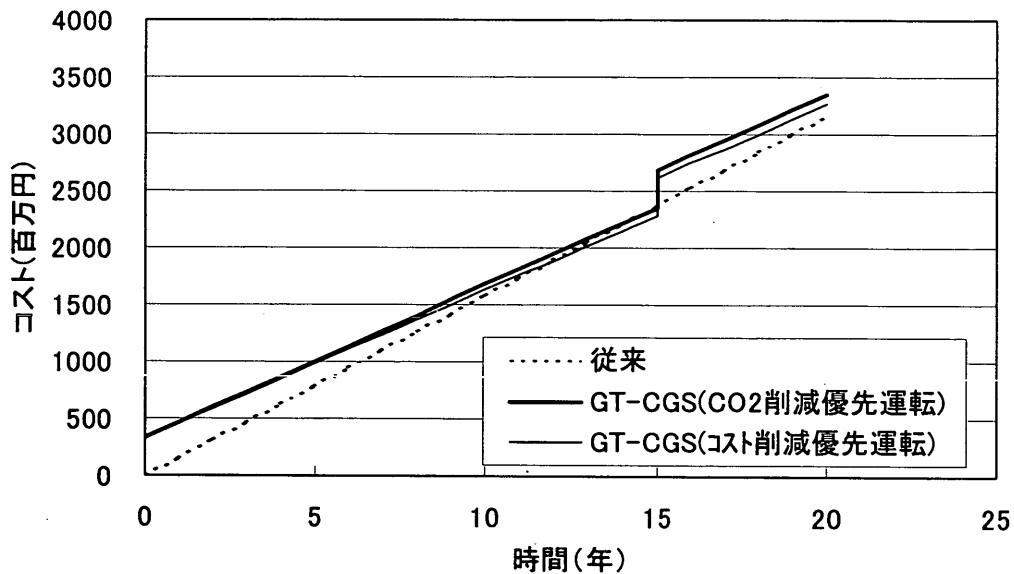


図17 コストペイバックタイム

GT-CGS の従来型熱電供給システムを基準としたペイバックタイムは GT-CGS の従来型熱電供給システムを基準としたペイバックタイムは両曲線の交点となる。その結果、年間 CO₂ 排出量最小化ケースでは、従来型システムに対するペイバックタイムは 14 年となった。耐用年数は 15 年としており、それより短い年数で回収でき、かつ従来システムより CO₂ 排出量を 7.5% 削減できることを考えると GT-CGS は積極的に導入すべき技術と考えられる。一方、年間総コスト最小化ケースであれば、ペイバックタイムは 11 年とさらに短くなり、CO₂ 排出量削減率は 5.8% と低めではあるが、コストを重視する場合 ガスタービンコジェネレーションは十分導入できる。

このことから、CO₂ の削減量を貨幣価値に換算して便益として計上するような経済的なシステムが可能だとすれば、上記のペイバックタイム 14 年はさらに短縮され、ガスタービンコジェネレーションの導入が促進されることが予想される。

(5) 他の建物との比較

発電効率 30%のGTを用いたコジェネレーションを産総研西事業所建屋と一般オフィスビルに適用したときの導入効果を比較した。結果を図 1.8 に示す。従来システムと比較して産総研西事業所建屋では、最大 CO₂ 排出量削減率が 7.5%であるのに対し、一般オフィスビルでは 3.8% と低いことが示された。このときの総コストは、産総研建屋では従来システムとほぼ同等であるが、一般オフィスビルでは 3.3% 総コスト増大となる。これは、OA 機器からの発熱量が多いため、暖房

需要が少なく、ガスタービンでの発電の代わりに系統電力が導入されるためと考えられる。また、最大総コスト削減率は、産総研建屋では1.6%、一般オフィスビルではほぼ従来システムと同等となる事が分った。このことから、ガスタービンコジェネレーションは、一般オフィスビルのような年間を通じて熱電比の低い需要形態を持つ建て屋よりも、産総研建屋のような熱電比がガスタービンの熱電比に近い需要形態を持つ建て屋への導入がより高い効果を得られることが示された。

4. 4 建屋間の熱融通

産総研建屋とオフィスビルの例に見られたように、建屋単独でコジェネレーションを導入すると、建屋間でCO₂の削減率、総コストの削減率に差が生じるだけでなく、従来システムより却ってCO₂排出量、総コストが増加する場合がある。これは、建屋の相違により熱需要が時間的、季節的に相違することに起因するものであり、建屋間で熱の融通を行えるようにすることによってCO₂排出量、総コストの低減が図れるものと予想される。ここでは、都市部にごく普通に存在する集合住宅とスーパーマーケットを例にとってマイクロガスタービンコジェネレーションの導入を考え、熱の融通がある場合とない場合についてCO₂削減率とコスト削減率を従来型システムと比較して、熱融通の効果を明らかにする。

(1) 対象建屋

選定した建屋及マイクロガスタービンコジェネレーション(MGT-CGS)の設置方式を図19に示す。建屋は延床面積12,000 m²の集合住宅、3,000 m²のスーパーマーケットである。マイクロガスタービンをそれぞれの建屋に個別に設置する場合及び共有に設置して両建屋間で熱を融通する場合について、熱融通が省エネルギー性に及ぼす効果について比較する。

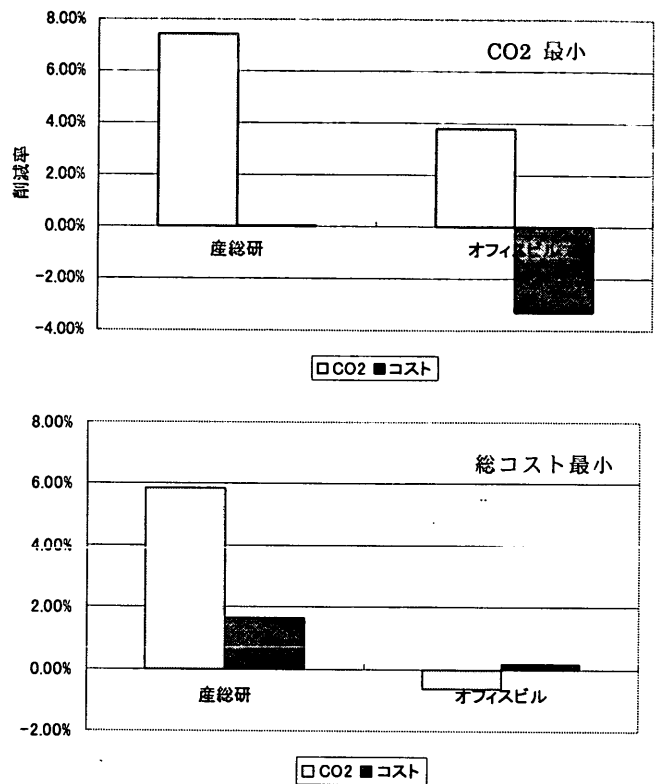


図18 建屋の相違による削減率の違い

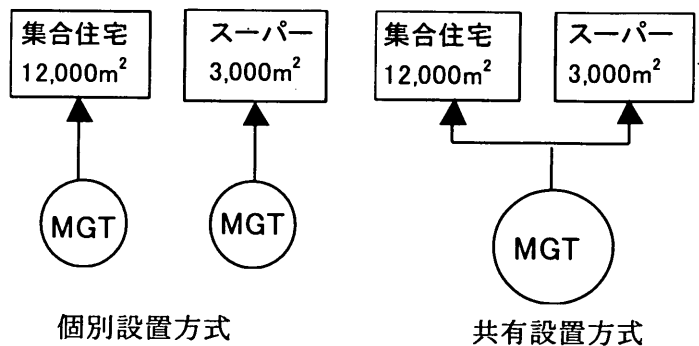


図19 設置対象建屋

図20に集合住宅とスーパーマーケットの熱需要⁷⁾を満たすため熱源機器へ供給する熱の所要量を示す。集合住宅では冬季の温熱需要が大きく、夏季の冷熱需要は小さい。一方、スーパーマーケットでは夏季の冷熱需要が大きく、冬季の温熱需要が小さいのが特徴的である。そのため、冬季は集合住宅では熱が不足し、スーパーマーケットでは余剰となる。夏季は、ちょうどその逆となり、集合住宅で熱が余剰となり、スーパーマーケットでは不足する。熱が不足する場合は補助燃料が必要であり、熱が余剰となる時は熱を廃棄することになり、いずれもエネルギーの削減の面からは好ましくない。

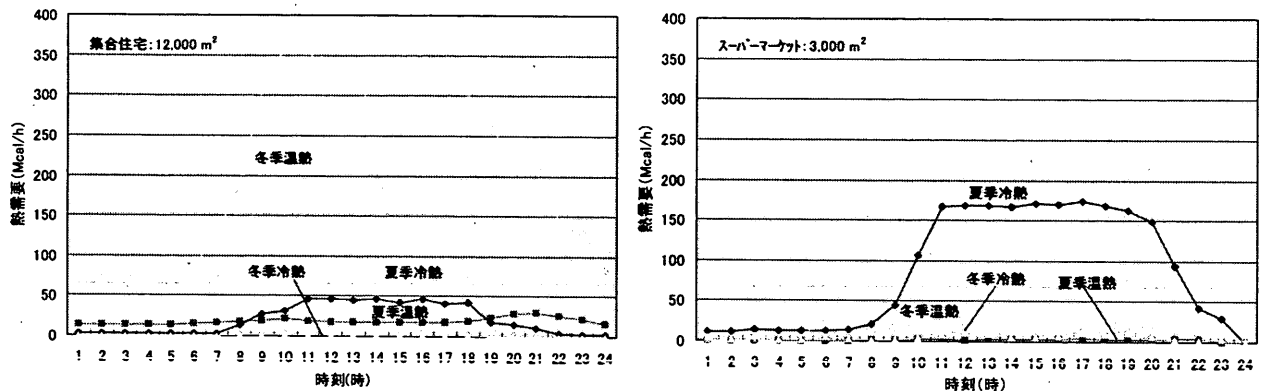


図20 熱需要を満たすための所要熱量

集合住宅とスーパーマーケットを合計した電力及び熱の需要量を表4に示す。マイクロガスタービンコジェネシシステムの構成機器の数ならびに単機容量を表5に示す。このシステムでは、電力をマイクロガスタービン及び補助系統電力で供給し、タービン排熱から温水ボイラによって回収した温水によって暖房及び温水吸収冷凍機を駆動して冷房需要をまかなう。

表4 熱電需要量

	需要量
最大電力需要	300 kW
最大暖房需要	310 Mcal/h
最大冷房需要	220 Mcal/h

表5 MGT・CGS 熱源機器

機器	容量
MGT	75kW × 3
温水ボイラ	240Mcal/h × 2
冷凍機	90USRT × 1

(2) シミュレーション

① シミュレーションの概要

シミュレーションでは、下記の式で表す発電に必要な一次エネルギー量と補助熱量の合計量を、各時間での熱需要がGT排熱及び補助熱によって満足されるという制約のもとで最小とする電力量 E_{mgt} 、 E_{grd} を決定する方法によった。

$$\sum_i \left(\sum_j 0.86E_{mgt}(i,j)/\eta_{mgt}(i,j) + 0.86E_{grd}(i)/\eta_{grd} + H_{aux}(i) \right) \rightarrow \text{minimum}$$

ここで、 i : 時刻、 j : 複数台の何台目のガスタービンが運転されているかを表す添え字、 E_{mgt} 、 E_{grd} は、それぞれマイクロガスタービン及び系統電力による電力供給量、 η は発電効率を表す変数である。

② シミュレーションの条件

本研究では、マイクロガスタービンは 75kW のものを電力需要^{8, 9)}に応じて複数台運転するものとし、定格負荷での発電効率は 28%、部分負荷率と発電効率の低下割合は前述のガスタービンのものを用い、また系統電力の発電効率は 35% 一定(2,450kca/kWh)として一次エネルギー換算をおこなった。排熱ボイラの熱効率は 85%、温水吸収式冷凍機の COP は 0.65 である。補助熱が必要なときは、排熱ボイラに設置した燃焼器によって熱を供給することができるものとし、その際の熱効率も 85% とする。これらの値を用いることで、熱供給のための一次エネルギーをもとめた。

コストの最小化は行わないものとし、一次エネルギー使用量の最小化のみを計算することができる。

(3) シミュレーション結果

① 電力供給のシミュレーション結果

集合住宅とスーパーマーケットに MGT-CGS を個別に設置したときと共有で設置場合について、システムへの全一次エネルギー投入量が最小となるときのマイクロガスタービン発電容量 E_{mgt} と系統電力による供給量 E_{grd} の供給形態を計算した。図 2 1 に共有で設置する場合の結果を示す。夏季、冬季はほとんど全日 MGT による供給が行われる。昼間 8~18 時の間には 3 台の MGT が運転され、一部分系統電力との併用がなされる。中間期は MGT の運転は 1 台に抑えられ、残りは系統より供給される。

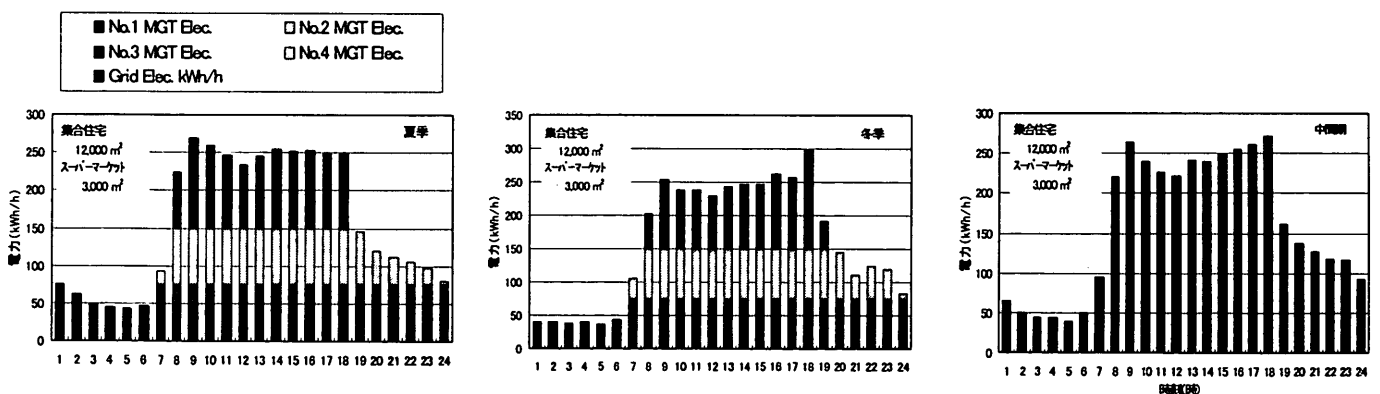


図 2 1 共有設置の場合の電力供給形態

② 建屋単独に導入した場合の建屋種類による省エネ効果の相違

MGT-CGS を集合住宅、スーパーマーケットそれぞれに個々に導入した場合の、従来型エネルギーシステムに対する省エネルギー性について比較評価した。その結果を図 2 2 に示す。いず

れの建屋においても導入による省エネルギー効果は認められるが、建屋によって省エネルギー率に大きな差が見られ、集合住宅においては、スーパーマーケットの3%に対して、8%の省エネルギー率となっている。集合住宅、スーパーマーケットそれぞれへの一次エネルギー供給量の合計で見ると、従来型システムと比較して、5.7%の省エネルギー率となった。

② 建屋に共有で導入した場合の省エネルギー効果

次に MGT-CGS を建屋に個別に設置する場合と共有に設置する場合について、同様に省エネルギー性を評価した。その結果を図 2 3 に示す。

個別に設置する場合は、前述のように従来型システムに比べて MGT-CGS は 5.7% の省エネルギーとなり一応の効果が認められる。これに対して共有に設置する場合は、建物間で熱の融通ができるようになるため、ガスタービン排熱の有効利用が図られる結果となり、従来型システムに比べて 12.2% の一次エネルギーの削減が可能である。

③ 熱融通の有無による熱供給形態の相違

集合住宅とスーパーマーケットにそれぞれ個別に MGT-CGS を導入した際のそれぞれの建屋における熱の供給が何で行われるかを計算した。その結果を図 2 4 に示す。各建屋の所要熱量に対して MGT の排熱でまかなった熱量、余剰となり廃棄した熱量及び排熱が不足して補助燃料によってまかなった熱量のそれぞれについて示した。集合住宅では、ガスタービンの排熱による熱供給が行われているが、冬季には昼間の時間帯に補助熱が多量に投入されている。また、スーパーマーケットにおいて夏季の夜間の時間帯に電力需要が少ないため MGT の運転が行われず、補助熱が投入されている。

建屋に共有に設置したときの熱供給の状況を図 2 5 に示した。図 2 4 と比較すると、建屋間で MGT-CGS を共有することによって、個別に設置したときの冬季の集合住宅に見られたような昼間の補助熱及び夏季のスーパーマーケットへの夜間の補助熱が不要となり、年間の補助熱の削減が可能になることがわかる。その結果、図 2 3 で示したように MGT-CGS を建屋個別に設置した場合の省エネルギー率が従来型熱電供給システムに比べ 5.7% であったのに対して共有設置で

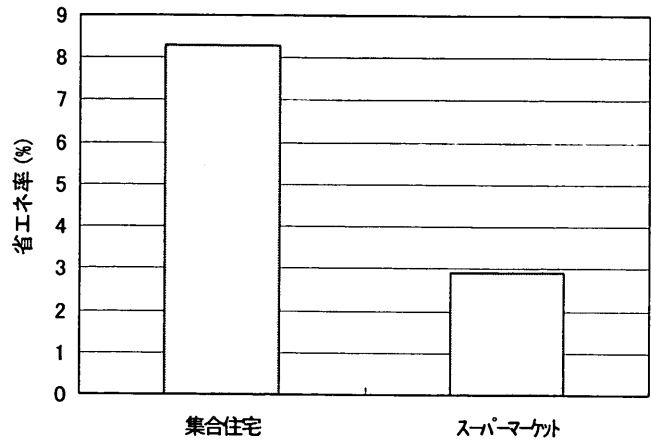


図 2 2 個別設置時の省エネルギー率

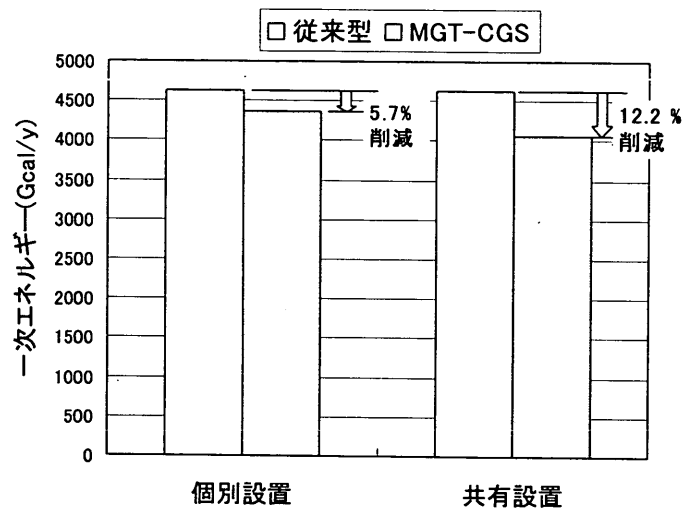


図 2 3 一次エネルギー消費量の比較

は年間 12.2 % と大幅な省エネルギー率となった。

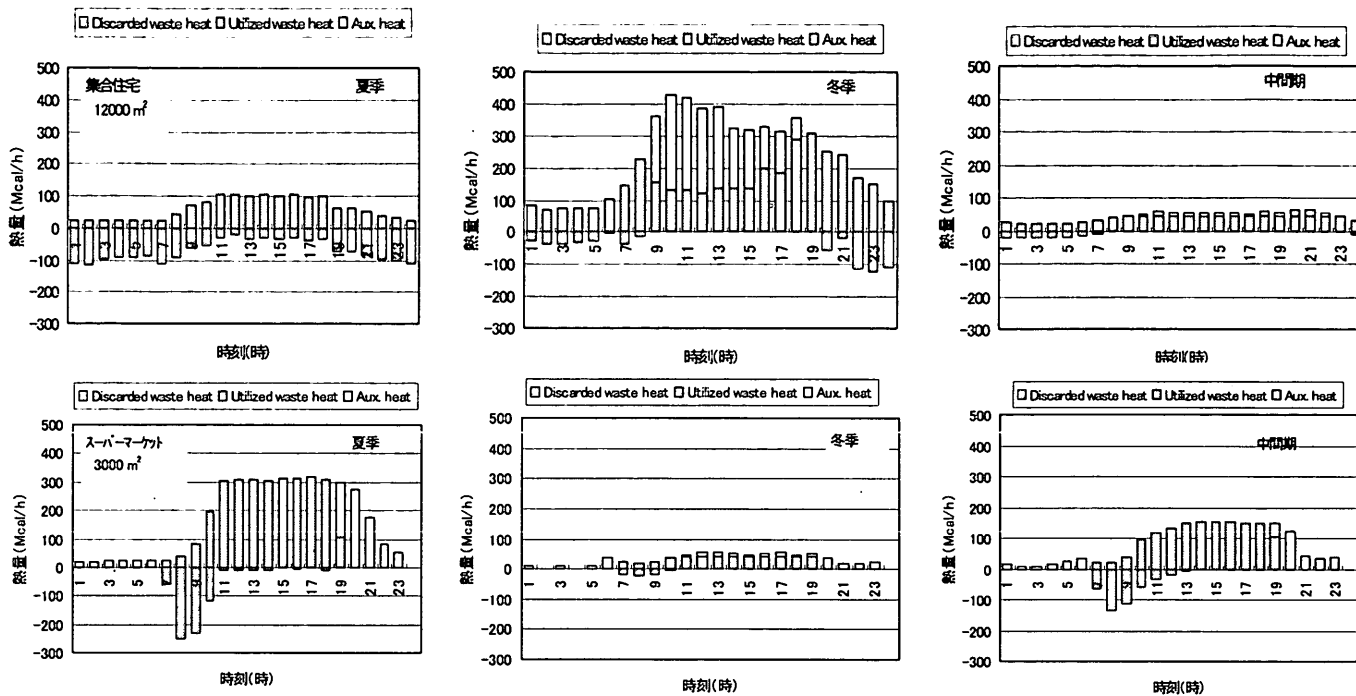


図 2 4 MGT-CGS 個別設置時の熱供給形態

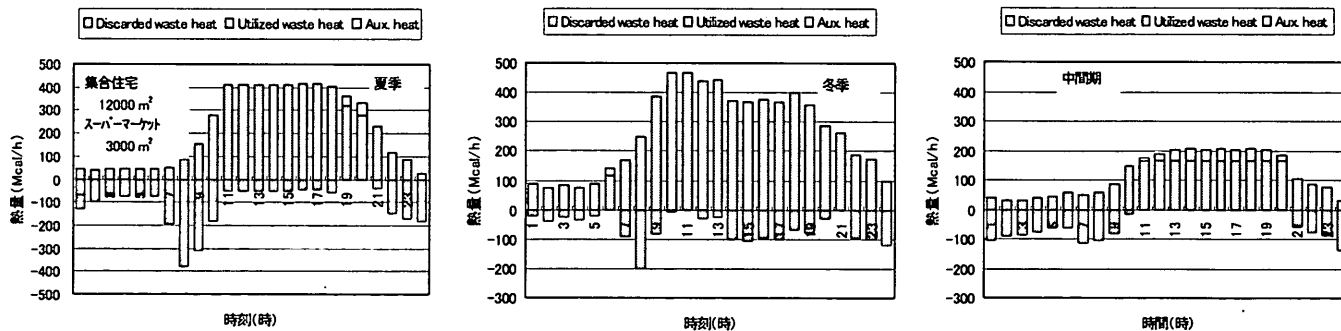


図 2 5 MGT-CGS 共有設置時の熱供給形態

(3) コスト

① 省エネルギーによるコスト削減

延べ床面積が 12,000m² の集合住宅、3,000m² のスーパーマーケットに共有で MGT-CGS を導入したときの運転コストをシミュレーションから得られた所要エネルギー量にもとづいて計算した。結果を表 6 に示す。運転費として都市ガス料金、電力料金及びメンテナンス費を計上した。MGT-CGS の運転費と従来型意システムの運転費の差額は、960 万円/年であった。

表 6 運転コストの比較

			マイクロガスタービン コージェネレーションシステム			系統電力 + ガス吸収冷凍機	
			都市ガス Mcal/d	系統電力 kWh/d	補助燃料 Mcal/d	都市ガス Mcal/d	系統電力 kWh/d
運転に伴う エネルギー	月間 使用量	8月	10626.1	432.7	96.2	3309.4	3824.6
		1月	10860.6	359.4	26.9	6313.6	3824.6
		5月	5076.7	2184.6	333.6	2091.7	3824.6
運転費用	都市ガス	使用量 Gcal/y	2918.7			1242.6	
		単価 ¥/Mcal	3.8			3.8	
		価格 k¥/y	11,091			4,722	
		最大契約 Mcal/h	1031			550	
		m3/h	104			55	
	基本料金 k¥/M・m3/h	1.00			1.00		
	価格 k¥/y	1,248	12,339		660	5,382	
	電気	使用量 MWh/y	464.5			1376.9	
		単価 ¥/kWh	17			17	
		価格 k¥/y	7,897			23,407	
最大契約 Mcal/h		236			355		
基本料金 k¥/kW		1.46			1.46		
価格 k¥/y	4132	12,029		6220	29,626		
メンテナンス費の増加		¥/kWh	1				
		¥/y	1,046			0	
運転費合計		k¥/y	25,414			35,008	
差額(節約額)		k¥/y	9,594				

② システムのキャッシュフロー分析

MGT-CGS への投資効果を明らかにするため、キャッシュフロー分析を行った。設備投資額は表 7 に示すように、総額 5,890 万円であり、従来システムを代替することによる節約額は前述の通り、年間 960 万円である。

MGT-CGS への投資の正味現在価値 (NPV : net present value) を求めた。NPV は下記により定義される。

$$NPV = \sum (I_n / (1 + r)^n) - I_0$$

式中、 $I_n (n = 1, 2, \dots)$: 年間収入額、 I_0 : 初期投資額、 r : 割引率、 n : 経過年数を表す。

図 2 6 に割引率を 5% としたときの NPV の年次変化を示す。NPV は年数の経過とともに増加し、7.5 年経過した時点でマイナスからプラスに転じ、15 年後にはおよそ 4,000 万円となる。設備のコストペイバックタイムは 7.5 年である。ガスタービンコージェネレーションを単独建屋に導入したときのペイバックタイムは 14 年であったのに対して、熱需要形態の異なる 2 種類の建

表 7 MGT-CGS 設備コスト

		価格(工事費込み)
MGT	75kW × 3	33,750 k¥
温水ボイラ	240Mcal/h × 2	4,480 "
冷凍機	90USRT × 1	20,680 "
システムコスト		58,910 k¥

屋で共有して導入する場合にはペイバックタイムの大幅な短縮が可能であることが示唆された。

次に、設備の使用期間を 15 年と定め、割引率を変化させたときの NPV を図 27 に示す。15 年後の累積割引収入額（式の右辺第 1 項）がちょうど投資額に等しくなる（ $n=15$ としたとき、 $NPV=0$ となる）割引率が 14% である。このことは、MGT-CGS による熱電供給事業を事業化する場合、事業者が内部留保金のために利益を 14% 割引いても 15 年後には投資額をペイバックできることを示している。このときの割引率を内部利益率と言う。事業化する場合の資本コスト（金利、株主への配当等）は通常 7~8% であり、内部利益率 14% はこれを上回る。

このようなエネルギー供給事業は、ESCO 事業として成り立つので、経済産業省の地域省エネルギー普及促進事業などの ESCO 事業支援策の導入が効果的であると思われる。

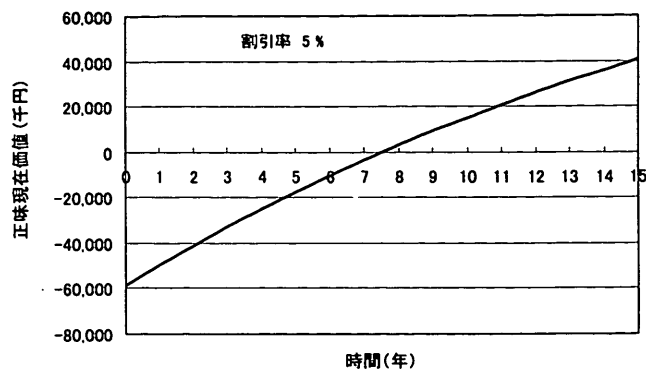


図 26 MGT-CGS 設備のペイバックタイム

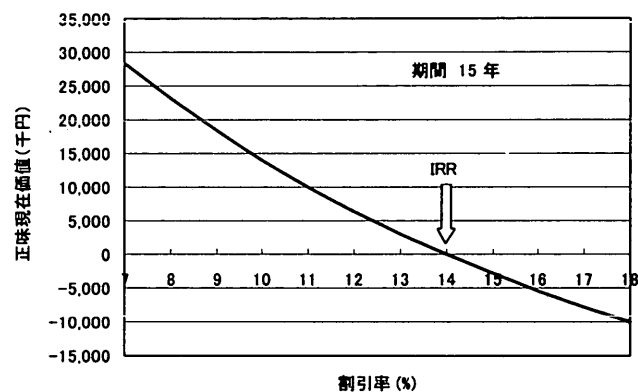


図 27 事業の内部利益率

4. 4 未利用エネルギー導入に際しての制約

(1) 事業主体が異なるための制約

事業主体や開発時期が異なるため、隣接する 2 つの地区でまったく異なる地域熱供給が稼動する。最近の例では、品川インターシティの第 1 期工事、第 2 期工事がある。それぞれに熱を供給するエリアの大きさが異なっているケースがほとんどで、そのため冷温水の供給圧力が違っており、ごく近くに隣接しているにも拘わらず相互に熱の融通ができないという問題がある。すでに見てきたように、建屋間で熱の融通を図ることによって省エネルギーが促進され、かつ未利用エネルギーの導入が効果的になると考えられるのであるが、現状では上記のような制約がある。

(2) 法的な側面

東京都で再開発を実施する場合、国の法律に「熱供給事業法」、東京都の指導要綱「東京都地域冷暖房推進に関する指導要綱」がある。表 8 は、これらを比較した表である。

表8 法律・条例の比較

	熱供給事業法	東京都地域冷暖房推進に関する指導要綱
目的	【第1条】(目的) ・熱供給事業の消費者の保護 ・熱供給事業の健全な発達及び熱供給施設の工事・維持・運用の規制	【第7条】(環境保全等への配慮) ・地域熱供給事業計画の立案の際、環境への負荷の低減及びエネルギーの有効利用に務める
事業のネットワーク化	記述なし	【第10条】(地域冷暖房施設相互の接続) ・事業計画立案者は、事業計画予定区域周辺の地域冷暖房施設と供給熱媒体を融通することが望ましい場合、相互間接続ができるように計画する。
未利用エネルギーの活用	記述なし	【第3条2】(未利用エネルギー活用地域冷暖房促進地域) 地域熱供給を導入することが省エネルギーを図る上で効率的であり、かつ、ごみ焼却など未利用エネルギーの熱源から1kmの区域を未利用エネルギー活用地域冷暖房促進地域(以下、「促進地域」という。)とする。 【第11条】(未利用エネルギーの活用) ・促進地域では、未利用エネルギーの積極的な導入に努める。 ・未利用エネルギーが存する地域の施設の所有者は、その活用に協力する。
事業の変更	【第7条】(供給区域等の変更) ・熱供給事業者が、供給区域や熱供給施設を変更する場合、経済産業大臣の許可を受けなくてはならない。	【第31条】(事業計画の作成) ・事業計画を変更しようとする場合、事前に知事と協議しなくてはならない。

国の法律と自治体の条例の間には相違があり、例えば東京都の条例では第10条で熱供給媒体の融通を図ることを推奨しているが、熱供給事業法では第7条では、供給区域の変更には許可が必要という制約がある。また、東京都の条例では未利用エネルギーの活用を促進する指導が行われているが、国の法律では特に謳っていない。このような制約が、未利用熱の導入あるいは地域間での熱の融通といった省エネルギー策が今ひとつ伸びない要因になっているものと考えられる。

5. 本研究によって得られた成果

東京都の中の延べ床面積 300,000~350,000 m² 程度の大きさの面積を有する地域で、エネルギー使用に伴う CO₂ 排出量及び供給コスト並びに未利用エネルギー導入量の関係を明らかにできるエネルギー需給構造モデルを開発した。事務所ビルが建屋のほとんどを占める江東区台場では、CO₂ 削減率 16% 以上でごみ焼却排熱が導入されることが知られた。一方、大部分が住宅である足立区舎人では、現実的なコスト上昇範囲では未利用熱の導入がなされないことがわかり、配管設備などのインフラ整備に何らかの経済的誘導策が必要であることが示唆された。

また、分散型発電の排熱を利用するコージェネレーションを建屋に導入したときの CO₂ 排出量最小化、コスト最小化のシミュレーションモデルを作成し、例として産総研西事業所に適用した結果、従来型の集中冷暖房方式に比較して、最大 CO₂ 削減率 7.5%、最大コスト削減率 6.1% が達成できることが知られた。

さらに、熱需要パターンが季節・時間によって相違する2つの建屋の間でコージェネレーションを共有し、運転時に熱の融通を図ることによって、それぞれの建屋に個別に導入する場合に比べ

て大幅な省エネルギー 12.2% が達成できることが知られた。熱の融通による経済性も高く、投資効果が高いことが明らかになった。

6. 引用文献

- 1) 東京都下水道局：平成9年度 水質管理年報
- 2) 東京都清掃局：清掃工場余熱利用推進化調査報告書（その1）（1991）
- 3) 東京都清掃局：清掃のあらまし（1999）
- 4) 東京電力ホームページ <http://www.tepco.co.jp/>
- 5) 電力中央研究所：発電プラントの温暖化影響分析報告書（1992）
- 6) メーカー各社の平均値
- 7) 東京都清掃局：清掃工場余熱利用推進化調査報告書（その2）（1992）
- 8) 住環境計画研究所：家庭の省エネルギー診断のためのモニターアンケート調査報告書（1999）
- 9) 東京都環境保全局：都におけるエネルギー需給構造調査報告書

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<学術誌（査読あり）>

- ① 八木田浩史、玄地 裕、近藤康彦、匂坂正幸、稲葉 敦、日本エネルギー学会誌、vol.80(9),pp.843-853 (2001) 「ゴミからのエネルギー供給システムに関する考察・ROSEモデルによる地域への電力供給可能性の評価」
- ② 嵐 紀夫、玄地 裕、八木田 浩史、稲葉 敦：日本エネルギー学会誌、vol.81(12), pp.1078-1088 (2002) 「マイクロガスタービン導入時の省エネルギー及び環境影響評価」

(2) 口頭発表

- ① 佐々木 智代、玄地 裕、嵐 紀夫、稲葉 敦：エネルギー・資源学会 第20回 研究発表会(2001) 「既存都市への応用を考慮した最適エネルギー供給モデルの開発」
- ② 清水 恒明、嵐 紀夫、玄地 裕、稲葉 敦、北林 興二：エネルギー・資源学会 第21回 研究発表会 (2002) 「GT-CCS 導入時の CO2 排出量、コスト削減可能性の評価」
- ③ Yutaka Genchi、The 5th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies(2002) “Assessment of CO2 emission reduction potential by using an optimization model for regional energy supply system”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

東京都環境局地球環境部にて、本研究成果であるコジェネレーションシステム導入の省エネルギー効果、費用対効果の結果について紹介した。東京都は、現在、われわれの検討結果も加味して、温暖化ガス排出削減対策を立案中である。