

B-53 都市圏の資源・エネルギー循環と都市構造に係わる温暖化防止対策技術に関する研究

(1) 都市内分散型エネルギー需給技術の温暖化抑制効果と都市環境影響に関する研究

② 未来型小規模エネルギー供給技術に関する研究

研究代表者 資源環境技術総合研究所

エネルギー資源部 エネルギー評価研究室 匂坂正幸

(稲葉 敦)

通商産業省 工業技術院 資源環境技術総合研究所

エネルギー資源部 エネルギー評価研究室 小林光雄、八木田浩史、近藤康彦、松野康也、
玄地 裕

平成9～11年度合計予算額 11,491千円

(平成11年度3,787千円)

[要旨]

新エネルギーシステムの予備的なLCA評価を行った。燃料電池システムについては建設、運用に伴うCO₂排出量を算出した。その結果、200kW級リン酸型燃料電池発電システムを1基建設するのに排出されるCO₂量は 4.86×10^4 kgであり、電極起因のCO₂がその2割程度、改質器と触媒起因のCO₂が1割程度になった。リン酸形燃料電池のライフタイムにおいて排出されるCO₂量のうち、燃料消費に起因するCO₂排出量が圧倒的に大きく、全体の99.6%を占める。燃料電池の寿命を30年間とした場合、単位発電力量あたりのCO₂排出量は、0.554 kg-CO₂/kWhとなる。

また、太陽熱給湯システムのライフサイクルインベントリ分析の予備的調査を実施した。エネルギー採算性を示すエネルギー・ペイバック・タイム(EPT)は4年未満となった。また、CO₂排出原単位は家庭用システムで13.8(g-C/Mcal)、業務用システムで11.4(g-C/Mcal)となり、従来の給湯用エネルギー源の主流である都市ガスやLPG、灯油等と比較して単位エネルギー量あたりのCO₂排出量が小さいことが示された。

さらに、都市におけるエネルギー消費量の低減を図るため、品川駅を中心とする半径およそ2km以内の地区を選定し、新エネルギーシステムとして住宅には太陽熱、太陽光発電、燃料電池を導入し、地域冷暖房には燃料電池、ガスタービン、ガスエンジン、ディーゼル発電コジェネレーション、ごみ発電廃熱及び下水熱を導入することを想定した際のエネルギー使用量、CO₂排出量の削減率を算出するケーススタディーおよびコストの検討を行った。その結果、都市部でのCO₂排出量では新エネルギーシステムの導入によって、10%程度削減可能であることが推測された。また、選定地区全体で、あるCO₂の排出量制約のもとで供給コストを最小にするためのエネルギー供給最適化モデルを作成し、各システム導入量の最適構成とコスト、CO₂排出量の関係を求めた結果、新エネルギーシステムの導入により、同一のCO₂排出量レベルで、供給コストをおよそ20%低減できること、CO₂排出量を削減する際の削減率とエネルギー供給コストの関係が明らかになった。

[キーワード] 都市、太陽エネルギー、燃料電池、LCA、コスト

1. 序

都市で消費される大量のエネルギーは、他地域で大規模かつ集中的に生産されものを輸送することで賄われて来た。しかし、今後さらに増大するエネルギー需要を効率的に満たし、かつ温暖化ガスの排出量を削減するためには、従来のエネルギー供給体系ではなく、昼夜の人口の差に起因するエネルギー需要の激しい日変動に対応したエネルギー供給形態を構築することが必要と考えられる。特に人が多く集まり活動する都市部では、民生部門でのエネルギー消費量が多く、都市部での CO₂ 排出への寄与が大きい。その排出削減のためには民生用エネルギー供給システムでのエネルギー消費の低減が重要である。

本研究では、都市内で利用可能な自然エネルギー技術、未利用エネルギー、新エネルギーを調査し、その導入による CO₂ の排出抑制量を推定する。

更にコストを考慮し、エネルギー消費量の低減と低コストを両立させ得るシステムの選定が望まれる。本研究では、まず分散型エネルギーシステムの LCA 評価を行い、同システムの環境調和性を評価した。さらに、いくつかの用途別地域を抽出し、自然エネルギー、分散型電源、未利用エネルギーを導入した場合の省エネルギー達成度およびコスト低減の可能性をケーススタディーにより評価、検討した。都市を構築するインフラストラクチュアは既存設備の寿命とともに順次更新されている。未利用の小規模エネルギー供給技術を活用するための明確な指針を緊急に整備する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、都市の分散型エネルギー供給技術の利用を温暖化抑制効果の観点から LCA 手法を用いて評価し、都市の多様なエネルギー需要に適合させる方策を明らかにすることを目的とする。また、都市での民生用エネルギー供給におけるエネルギー消費量の削減に向け、下水熱、ごみ発電熱、太陽熱等の未利用エネルギー、自然エネルギー、新エネルギーを導入した場合のシステム的な CO₂ 排出抑制効果をコスト面も含めて検討し、新世紀にふさわしい環境を配慮した都市民生エネルギーシステム構築、評価のため、必要なモデルの開発とその精緻化を目的とする。

3. 研究方法、結果・考察

3. 1 LCA 手法による燃料電池発電システムの評価

燃料電池発電システムは、高効率かつクリーンな発電システムとして注目され開発されている。しかし、製造時・メンテナンス時に投入されるエネルギーおよび素材量が大きいと考えられ、発電効率のみで既存の発電システムとの優位性を比較するのではなく、ライフサイクルアセスメントの観点から、既存の発電システムと比較する必要がある。

(1) 燃料電池システムの建設および運転条件に関するデータ

本研究では、現在世界で生産の主流になっている 200 kW 級リン酸形燃料電池を調査対象にした。システムの作製・建設に消費される電力は、全て工場外部から購入するものとし、購入する電力の発電構成は、日本の電力構成により比例配分した。

200 kW 級リン酸形燃料電池システムにおける、1 kWh の発電の際に消費される燃料は、文献¹⁾に示されている 100 kW 級リン酸形燃料電池システムの定格運転時のエネルギーバランスより推算

した。そして、リン酸形燃料電池システムの一年間の総発電時間を8000時間(約11ヶ月)とし、残りの時間を保守・点検に当てるものと仮定した。リン酸形燃料電池システム運転開始時の発電効率は、40.8%とした。電池電圧は、1000時間当たり0.25%低下するものとし、それにもとづき発電効率も、運転初期の効率に対し1000時間当たり0.25%劣化するものとした。リン酸形燃料電池の電極は、電池電圧が5年で10%低下するので、5年毎に交換するものとした。以上より、リン酸形燃料電池発電システムでは5年間を一サイクルと考え、電極新設後5年間における燃料電池の年間発電量、燃料消費量を計算した。リン酸形燃料電池本体中の電極の製造に必要な素材と消費されるエネルギーの詳細は、得ることができなかったため、カーボンと、消費電力のみを考慮した。ここで、電極製造に消費される電力は、燃料電池システム全体を建設する際に消費される電力の8割であると仮定した。

燃料の改質に用いる触媒は5年、改質器本体は15年で交換するものとした。改質触媒は、アルミナの重量が全重量の大半を占めると考えられる。従って、改質触媒の製造では、アルミナのみを考慮し、他の成分は無視した。また、改質器本体の製造の際に消費されるエネルギーに関するデータは得られなかったため、用いる素材の製造に消費されるエネルギーのみを考慮した。

(2) CO₂排出量の算出方法と素材製造に係わるCO₂排出原単位

資源環境技術総合研究所で開発したLCAソフトウェア「NIRE-LCA ver.2」を用い、燃料電池発電システムの建設および運用にともなうCO₂排出量の算出を行った²⁾。

わが国は、原材料の大半を海外からの輸入に頼っている。本研究では、海外での採掘などのプロセスは考慮しなかった。なお、LNGの液化工程は、輸送するために液化を行うので考慮した。液化工程に必要なエネルギーおよびCO₂排出量には、文献値³⁾⁴⁾を用いた。

(3) CO₂排出量の算出結果

200kW級リン酸型燃料電池発電システムを1基建設するのに排出されるCO₂量は、合計48600kgであり、そのうち電極起因のCO₂排出が8640kgで全体の18%、改質器が3820kgで全体の7.9%、触媒が860kgで全体の1.8%となっている。

200kW級リン酸形燃料電池システムで消費される都市ガスの燃焼に起因して排出されるCO₂量は、年間 8.49×10^5 kg-CO₂となる。燃料電池発電システムの耐用年数を30年とし、その間に必要な電極、触媒、改質器の交換に伴うCO₂排出量、燃料消費に起因するCO₂排出量、総発電量をまとめると、表1のようになる。リン酸形燃料電池のライフタイムにおいて排出されるCO₂量のうち、燃料消費に起因するCO₂排出量が圧倒的に大きく、全体の99.6%を占める。また、燃料電池の30年間におけるCO₂排出量の合計を総発電量で割り、単位発電量あたりのCO₂排出量を求めると、0.554 kg-CO₂/kWhとなった。

(4) 既存火力発電システムとリン酸形燃料電池発電システムの発電量あたりのCO₂排出量の比較

リン酸形燃料電池発電システムと既存の火力発電システムとの単位発電量あたりのCO₂排出量の比較を行った。既存の火力発電システムの建設時および運転時に排出されるCO₂量は、文献⁵⁾の値を用いた。そして、火力発電所の耐用年数を30年とし、発電所建設時に排出されるCO₂総量と30年間での運用に伴うCO₂排出量の合計値を、30年間での送電端発電量で除することにより、発電量あたりのCO₂排出量を求めた。ただし、燃料電池はオンサイトで発電できる特長があるため送電ロスは無視できるものと仮定し、大型火力発電所の送電ロス率は5.2%とした。そして

表1 200kW級燃料電池発電システムのライフタイムでのCO₂排出量

	CO ₂ 排出量	総発電電力量	備考
システム建設	4.86x10 ¹ kg-CO ₂		
電極	4.32x10 ¹ kg-CO ₂		30年で5回交換
触媒	4.3x10 ² kg-CO ₂		30年で5回交換
改質器	3.82x10 ² kg-CO ₂		30年で1回交換
燃料消費	2.55x10 ⁷ kg-CO ₂		
合計	2.56x10 ⁷ kg-CO ₂		
総発電電力量		4.614x10 ⁷ kWh	
CO ₂ 排出原単位	0.554 kg-CO ₂ /kWh		

表2 発電電力あたりのCO₂排出量の比較

発電方式	単位電力量あたりのCO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /kWh)
リン酸型燃料電池	0.554
石炭火力発電	0.967
石油火力発電	0.797
LNG火力発電	0.583

送電を考慮した上でのCO₂排出原単位を計算した。結果を表2に示す。リン酸形燃料電池のライフタイムにおける単位発電電力量当たりのCO₂排出量は、他の火力発電と比べて小さく、石油火力発電の約30%、石炭火力発電所の約40%分小さくなっている。

3.2 LCAによる太陽エネルギー利用技術の評価

(1) 太陽熱給湯システム

太陽熱を利用するエネルギー技術には様々な形態があるが、ここでは、家庭用・業務用それぞれのソーラーシステムをモデルとし、太陽熱給湯システムのライフサイクルインベントリ分析の予備的調査を実施した。

試算結果は表3の通りであり、エネルギー採算性を示すエネルギー・ペイバック・タイム(EPT)は4年未満となった。また、CO₂排出原単位は家庭用システムで13.8(g-C/Mcal)、業務用システムで11.4(g-C/Mcal)となり、従来の給湯用エネルギー源の主流である都市ガスやLPG、灯油等と比較して単位エネルギー量あたりのCO₂排出量が小さいことが示された。

表3 ソーラーシステムのEPTおよびCO₂排出原単位

	家庭用 ソーラー システム	業務用 ソーラー システム	都市ガス	LPG	灯油
EPT [Years]	3.8	3.0	—	—	—
CO ₂ 排出原単位 [g-C/Mcal]	13.8	11.4	56.4	68.3	77.48

(2) 太陽光発電システム

都市域にて有効な小規模エネルギー供給技術として上述のソーラーシステムその他、太陽光発電システムが挙げられる。太陽光発電システムに関してはニューサンシャイン計画の一環としてライフサイクル評価も実施されており、その結果は中間評価にも盛り込まれている。

表4に、住宅用太陽光発電システムのEPTおよびCO₂排出原単位の試算結果を示すが、ソーラーシステム同様、エネルギー採算性が確保されており、CO₂排出原単位も既存電力と比較して数分の一であることが示されている。

表4 住宅用太陽光発電システムのEPTおよびCO₂排出原単位
(年間発電量=1,160[kWh/kWp/y])

太陽電池セル	多結晶シリコン			アモルファスシリコン		
	10MW	30MW	100MW	10MW	30MW	100MW
年産規模						
屋根置き						
EPT [Years]	2.4	2.2	1.5	2.1	1.6	1.1
CO ₂ 排出原単位 [g-C/kWh]	20.1	18.8	13.5	15.6	12.0	8.0
建材一体型						
EPT [Years]	2.1	1.9	1.2	1.6	1.2	0.7
CO ₂ 排出原単位 [g-C/kWh]	17.0	15.7	10.7	11.4	8.6	5.2

出所：「太陽光発電評価の調査研究」(NEDO, 1997.3)

3.3 都市地域への未利用熱等導入に伴うCO₂削減

3.3.1 対象地域

CO₂削減効果を具体的に求めるため、表5に示すような品川駅を中心とする半径約2kmの地区を選定した。清掃工場が近くにある地区(V)、下水処理場が近くにある地区(IV)ではこれらの未利用熱を用いた地域冷暖房を行い、上記いずれよりもはなれた地域ではコジェネレーション地域冷暖房(I~III)を行うことを想定した。

熱供給事業性が成り立つためにある程度以上の熱負荷のあることが必要であり、地区内の対象エリアである各丁目での熱負荷が30,000 Gcal/y以上の所を、CGS地区では総床面積が100 ha前後となるように、地域冷暖房地区では、熱源からの距離が余り離れない地域を選定した。また、これらの地区I~V内及び地区VIにある住宅については、地域熱供給の対象とはせず、自然エネルギー、分散型電源を単独で導入するものとした。エネルギー供給に際しては熱電比、熱負荷の値が重要であり、それらについても表中に示す。各エリアの用途別床面積は、東京都土地利用現況調査データを用いた。エネルギー需要は、用途別延べ床面積に年間エネルギー需要原単位⁷⁾を乗ずることにより算出した。

3.3.2 対象地区でのエネルギー需給の解析

1) 戸建住宅への太陽熱給湯器導入の効果

戸建住宅の給湯を行うために太陽熱温水器を導入する。一年間のうち、夏の4ヶ月間は太陽熱温水器で全給湯需要をまかなうことができ、その他の月も給湯需要の60%以上を供給できる。耐用年数は15年とした。給湯用の都市ガスの消費量が大幅に減少し、戸建住宅一戸での全エネルギー

表5 選定地域

	対象 地区		対象エリア	地区の特性		
				総延床面積 (ha)	熱電比	熱 負 荷 (Gcal/h)
コジェネレーション 対象地区	I	品川区 ①	東五反田 1,5 丁目 西五反田 2,3 丁目	118.9	1.54	21.0
	II	品川区 ②	北品川 3,4,5 丁目 大崎 1 丁目	88.8	1.46	21.0
	III	港 区 ③	白金台 1,2,3,4,5 丁目	83.8	1.60	16.0
地域冷暖房 対象地区	IV	下水熱利用地区	高輪 1,2,3,4 丁目	179.1	2.32	35.8
	V	ごみ焼却熱利用地区	東品川 2,3,4 丁目	109.5	1.26	18.1
住宅	I ~ V 地区 及び VI 地区		戸建住宅	142.4		
			集合住宅	301.7		

ギーは太陽熱給湯器の導入によっておよそ 11.9 % 削減できる。

3.3.3 戸建住宅への太陽光発電導入の効果

戸建住宅の一般電気と冷暖房用エアコン用電気の供給を行うために太陽光発電を導入する。太陽光発電は戸建住宅一戸に容量 3 kW のものを設置する。

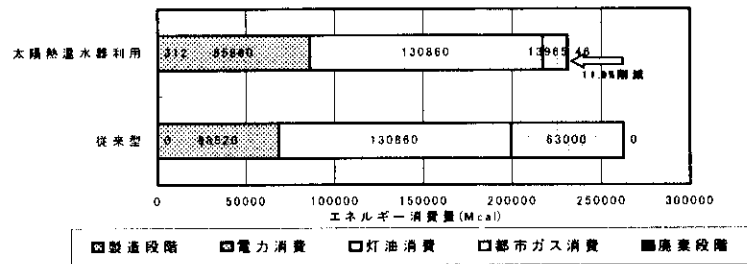


図1 戸建住宅への太陽熱温水器導入省エネ性

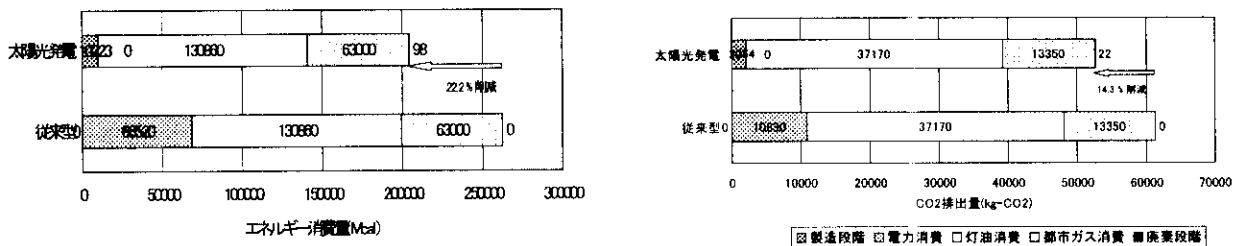


図2 戸建住宅への太陽光発電導入時の省エネ性率とCO₂削減率

製造段階でのエネルギー消費が発生するが、運用時の電力消費が大幅に減少し、戸建住宅一戸の全消費エネルギーは従来型と比べて 22.2 % の省エネルギーになる。CO₂ 排出量は、電力消費が減分だけ減少し、削減率は 14.3 % であった。昼間の余剰電力の売電による CO₂ 発生量の減少は考慮していない。

3.3.4 集合住宅への燃料電池の導入

集合住宅に対して、一般電力用を燃料電池で発電した電気でまかない、その廃熱で、夏季は吸収冷凍器を運転し、給湯及び冬季の暖房をまかなうエネルギーシステムを導入する。燃料電池発電設備は、集合住宅1棟(1棟に90戸、一戸の床面積45.8m²)に、1基設置するものとした。燃料電池の発電容量は、電力使用量の最大値が46.85kWであったので、50kWのものを設置し、電気需要量に応じて発電する電従運転とした。耐用年数は30年とした。

燃料電池発電導入の際には、燃料である都市ガスの使用量は増加するが、系統電力の消費をゼロにすることができるので、集合住宅1棟での全消費エネルギーは従来型と比較して、27.1%削減することが可能である。CO₂に関しては、一次エネルギーあたりのCO₂排出原単位が、電力よりも都市ガスの方が大きいため、全体の削減率は消費エネルギーの削減率ほどには大きくなく、およそ15%となった。

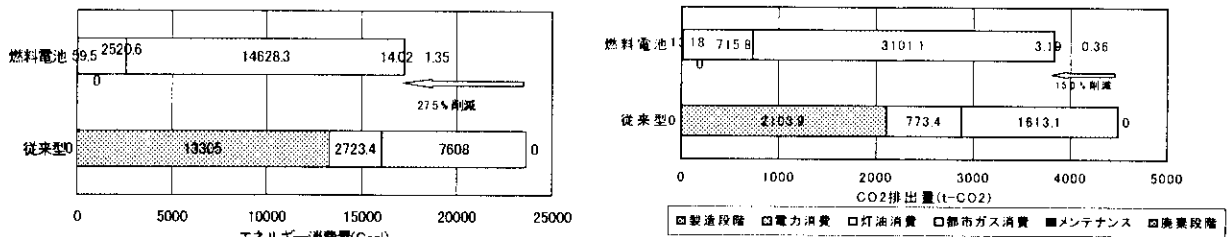


図3 集合住宅への燃料電池導入時の省エネ率とCO₂削減率

3.3.5 地域へのコージェネレーション導入の効果

表6に示した地区にコージェネレーションシステム(CGS)を導入した場合のエネルギー需給ケーススタディーを行う。ケーススタディーで導入する発電設備及びその性能を表2に示す。

表6 CGS 発電設備性能

	発電効率 (%)	廃熱回収率 (%)	総合効率 (%)	熱電比
GT	25	50	75	2.00
DE	35	40	75	1.14
GE	30	45	75	1.50
PAFC	40	40	80	1.00

品川区①地区にガスタービン(GT)、ディーゼル発電(DE)、ガスエンジン(GE)及びりん酸型燃料電池(PAFC)を導入したときの省エネルギー性について考察する。図4にそれぞれのCGS毎に発電容量を最大容量の10~100%の間で変化させた場合の、従来方式からのエネルギー削減率及びCO₂削減率を示す。PAFCは現

時点では1~5MW級の実証プラントが稼働している段階にあり、大容量の実用化はかなり先であるが、ここでは実用化を想定して検討した。

エネルギー削減率は、燃料電池の場合がもっとも大きく、次いでディーゼル発電、ガスエンジンの順に省エネ効果大きい。ガスタービンは30%以上の容量導入すると省エネ率省エネ率は却って低下する。これは、ガスタービン発電の熱電比が大きいため、導入容量を一定の量以上になると廃熱が余り、その熱は有効に使われることなく廃棄しなければならないためである。CO₂の削減率は、ガスを燃料とするPAFC、GE、GTでは熱電比の大ききの順に小さくなる。PAFCでは最大15%、GEでは40%導入時に最大値を示し4.5%の削減が可能であった。ディーゼルエン

ジンは軽油を燃料としたため、導入容量が大きいほど CO₂ が増加する結果となった

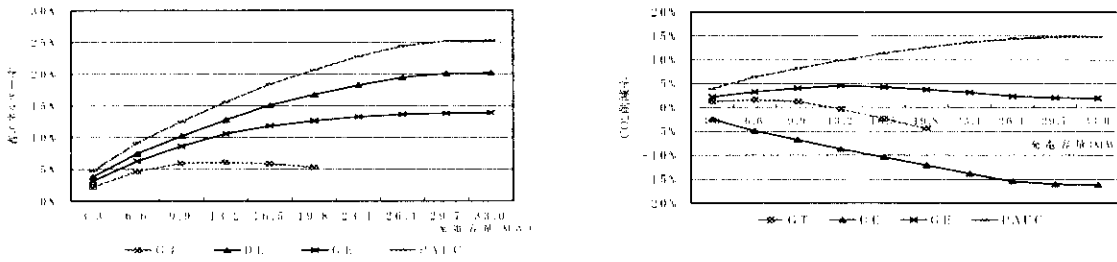


図4 品川区①地区への CGS 導入時の 省エネ性、CO₂ 削減量

3.3.6 地域冷暖房へのごみ焼却廃熱導入の効果

表 5 に示した東品川 2,3,4 丁目に、大井清掃工場のごみ焼却廃熱を導入した地域冷暖房を行う場合を想定する。図 5 に 20 年間のエネルギー消費量及び CO₂ 排出量を比較した。廃熱の導入量は、地区での熱需要量をちょうどまかなえる量とした。

ごみ焼却廃熱の導入によって、従来システムでのボイラ用ガスの消費量をなくすことができ、この地区でのエネルギー消費量を 26.2% 削減することが可能である。地区での CO₂ 排出量はガスの使用量が減ることにより、34.2% の削減が可能となる。

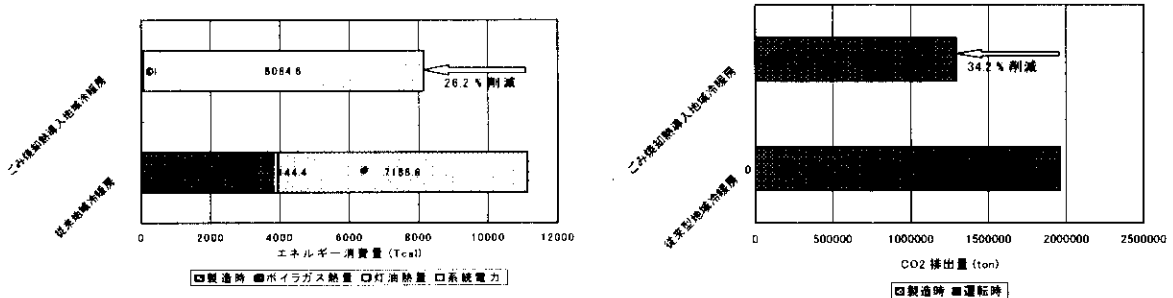


図5 東品川地区地域冷暖房へのごみ焼却熱導入時の省エネ性、CO₂ 削減効果

3.3.7 地域冷暖房への下水熱導入の効果

高輪 1,2,3,4 丁目に、芝浦下水処理場の下水熱を導入した地域冷暖房を行う場合を想定する。図 6 に 20 年間のエネルギー消費量及び CO₂ 排出量を比較した。下水熱の導入量は、月々の冷熱と温熱の大きい方をまかなえる量とした。

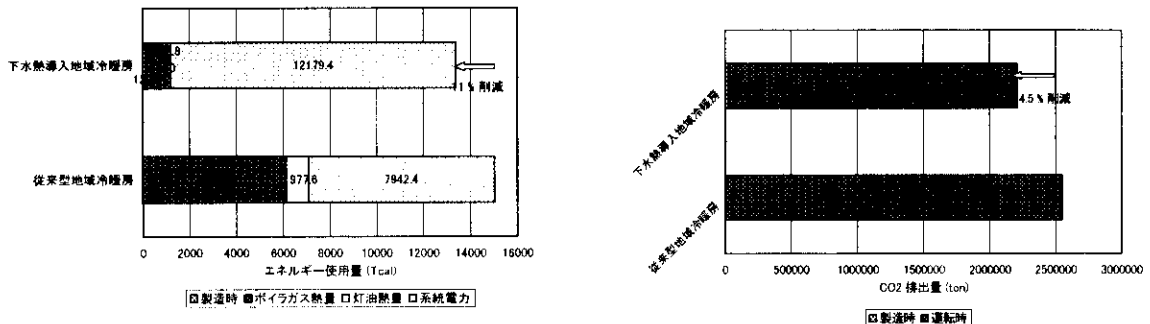


図6 高輪地区地域冷暖房への下水熱導入時の省エネ性、CO₂ 削減効果

下水熱の導入によって、従来型の温熱供給に使用されていたボイラ用ガスの消費量が大幅に減少するが、水熱源ヒートポンプ駆動用に電力消費量が増加するため、総合するとエネルギー消費量の削減率はごみ廃熱利用の場合より低く 11 % となる。地区での CO₂ 排出量は、電力消費量の増加よりもガスの消費量の削減効果が大きく、全体で 14.5 % の削減率となる。

3.3.8 対象地域全体での CO₂ 削減効果

対象とした地区すべてをあわせた広域地域（I～V地区地域熱供給＋I～V, VI地区住宅）での新エネルギーシステム導入の効果を見る。対象地区全域の従来技術での総 CO₂ 排出量は、前述の各地区での排出量を合計した 761,550 ton であり、この値で各地区の CO₂ 削減量を除することによって新エネルギーシステムを導入した対象地区全域を想定したとき CO₂ 削減率を求めることができる。図 7 に結果を示す⁶⁾。

地域熱供給では、ごみ焼却廃熱、下水熱の利用が CO₂ の削減に効果的であり、これとコジェネレーションをあわせた CO₂ 削減率は 8.3 % となる。住宅では、集合住宅へ分散型電源を、戸建住宅へ太陽熱温水、太陽光発電をそれぞれ 50 % 導入した場合、対象地域全体をあわせた CO₂ 削減率はおおよそ 2.7 % であり、すべてを合計すると新エネルギーシステムの導入によって、11 % の CO₂ 削減となる。

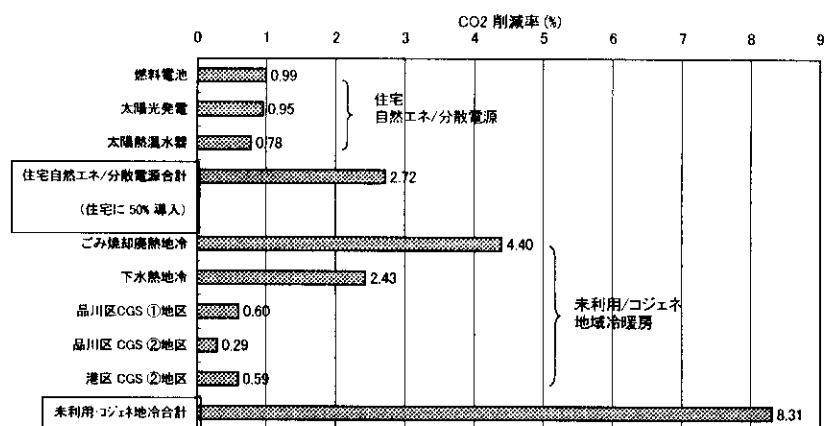


図 7 対象地区全体での CO₂ 削減効果

3. 4 都市地域への未利用エネルギー導入によるコスト試算

3.4.1 対象地区の設定とエネルギー需要の推定

対象地区は、表 7 に示す品川駅周辺の品川区、港区に亘る各町丁目を選定した。地区全体の建屋合計延べ床面積は 930 ha である。対象地区全体を地域と呼ぶことにする。対象地域のエネルギー需要総量の推定は下記の通り行なった。東京都土地利用現況調査データ⁷⁾をもとに官公庁、教育文化、厚生医療、事務所、商業、宿泊、スポーツ、戸建住宅、集合住宅、計 9 施設について施設ごとの延べ床面積を町丁目単位で算出し、建物用途別のエネルギー需要原単位（「建築の光熱水原単位」早稲田大学出版⁸⁾）を用い、月別、年間のエネルギー需要量（一般電力、冷房用、暖房用、給湯用）を算出した。図 1 に算出結果を示す。

この地域には、未利用エネルギーとして大井清掃工場からのごみ焼却熱、及び芝浦下水処理場

の下水熱を適用できるものとした。

表7 選定地区

区	町丁目
品川 区	東五反田 1,2,3,4,5 丁目
	西五反田 1,2,3 丁目
	北品川 1,2,3,4,5, 丁目
	大崎 1 丁目
	東品川 2,3,4 丁目
	南品川 1,2,3,4,5,6 丁目
	北品川 1,2,3,4,5,6 丁目
港区	高輪 1,2,3,4 丁目
	白金台 1,2,3,4,5,6 丁目
	白金 1,2,3,4,5,6 丁目
	港南 1,2,3,4 丁目

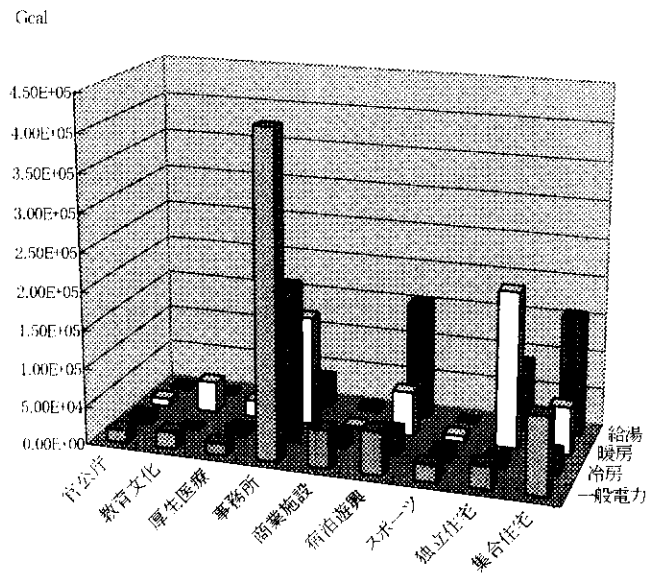


図8 地区全体の建屋別熱需要

3.4.2 エネルギー供給システム

地域へのエネルギー供給システムの構成を図9に示す。地域内のエネルギー需要は住宅、事務所ほかの建屋での冷・温熱及び電力である。これに対する供給システムは図に示すように、地域冷暖房とパッケージエアコン及び個々のエネルギー供給設備とし、10種類を想定した。地域冷暖房は、従来型の地域冷暖房のほかに、下水熱源地域冷暖房、ごみ焼却熱源地域冷暖房、及びコジェネレーション地域冷暖房を導入し、住宅用には、太陽光発電、太陽熱温水器、ガス給湯器、石油ファンヒーターを併用するものとした。

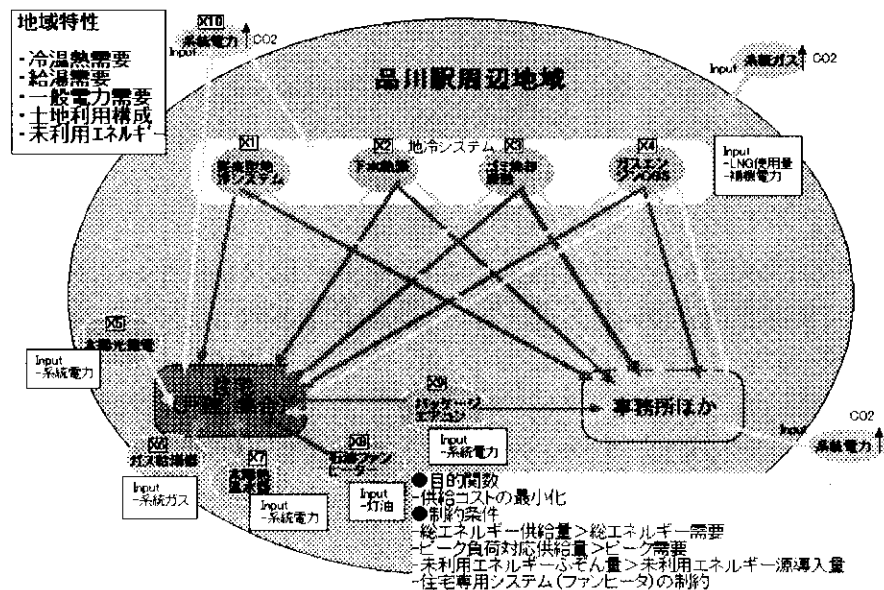


図9 エネルギー供給システムの構成

3.4.3 対象地区でのエネルギー需給の最適化

(1) エネルギー供給コスト

対象システムの種類と導入規模による設備のコスト、運転時のエネルギーコストを表8に従って計算し、設備コストと運転コストの和である総コストが最小⁹⁾となるように供給システムの最適構成を求めた。

表8 供給システムのコスト計算マトリックス

対象システム	導入量 x_j	投入エネルギー					システムコスト
		電力	燃料	廃熱	未利用熱	自然エネ	
CGS地冷	GE	X_1 [Mw]	●	●			●
	GT	X_2 [Mw]	●	●			●
	PAFC	X_3 [Mw]	●	●			●
地冷	LNG(従来型)	X_4 [Mcal/h]	●	●			●
	下水熱源ヒートポンプ	X_5 [Mcal/h]	●			●	●
	ゴミ焼却場排熱	X_6 [Mcal/h]	●		●		●
自家発電	太陽光発電(PV)	X_7 [Mw]				●	●
温水器	太陽熱温水器	X_8 [Mcal/h]	●			●	●
	ガス給湯器	X_9 [Mcal/h]	●	●			●
冷暖房	パッケージエアコン	X_{10} [Mw]	●				●
暖房	石油ファンヒータ	X_{11} [Mcal/h]	●	●			●
系統電源	石油ファンヒータ	X_{12} [Mw]	●	●			●
コスト原単位	燃料コスト原単位						総コスト
	運転コスト原単位						
	システムコスト原単位						

(2) エネルギー需給バランス

システムの導入量を計算するためのエネルギー需給マトリックスを表9に示す。一年間を、夏季、冬季、中間期3月及び中間期11月に4区分し、10種類のエネルギーシステムで地域の熱需要量を満たすという制約条件のもとでそれぞれのシステムの導入量を求めた。

表9 エネルギー需給マトリックス

○ 夏季8月需給バランス											※:ピーク負荷対応 夏季需要	
● Cool	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	導入量	Cool
● Heat	831.885	0.580	0.807	0.580	0.000	0.000	0.000	860.000	0.000	0.000	$\begin{pmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	224,241.607
● HW	7.852	0.005	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	1,798.143
● Ele	257.940	0.180	0.000	0.180	0.000	0.850	0.850	0.000	0.000	0.000	$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	69,529.930
	1.000	0.000	0.000	0.000	0.800	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	197.977
											$\times 10$	
○ 冬季1月需給バランス											冬季需要	
● Cool	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	導入量	Cool
● Heat	10.555	0.007	0.008	0.007	0.000	0.000	0.000	11.163	0.000	0.000	$\begin{pmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	4,575.418
● HW	944.298	0.859	1.014	0.859	0.000	0.000	0.000	848.837	0.900	0.000	$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	347,931.191
● Ele	283.291	0.198	0.000	0.198	0.000	0.850	0.850	0.000	0.000	0.000	$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	122,800.046
	1.000	0.000	0.000	0.000	0.800	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	174.038
											$\times 10$	
○ 中間季5月需給バランス											中間季1需要	
● Cool	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	導入量	Cool
● Heat	356.130	0.248	0.260	0.248	0.000	0.000	0.000	754.651	0.000	0.000	$\begin{pmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	49,418.119
● HW	58.489	0.041	0.063	0.041	0.000	0.000	0.000	105.349	0.900	0.000	$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	6,898.739
● Ele	690.655	0.482	0.000	0.482	0.000	0.850	0.850	0.000	0.000	0.000	$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	95,838.176
	1.000	0.000	0.000	0.000	0.900	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	179.094
											$\times 10$	
○ 中間季11月需給バランス											中間季2需要	
● Cool	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	導入量	Cool
● Heat	53.229	0.037	0.039	0.037	0.000	0.000	0.000	67.965	0.000	0.000	$\begin{pmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	13,915.136
● HW	729.775	0.509	0.783	0.509	0.000	0.000	0.000	792.035	0.900	0.000	$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	162,161.522
● Ele	422.962	0.295	0.000	0.295	0.000	0.850	0.850	0.000	0.000	0.000	$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	110,571.078
	1.000	0.000	0.000	0.000	0.900	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$	192.130
											$\times 10$	

(3) 未利用エネルギー導入の効果

同一のCO₂ 排出量のもとで、新・未利用エネルギーを導入したときのコスト低減効果を調べた。表10に従来型システムと、新・未利用エネルギー導入システムの構成を示す¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。

表10 システムの構成機器

	従来型システム	新・未利用エネルギー活用システム
広域供給システム	従来型地域冷暖房システム (燃料：都市ガス)	コージェネレーションシステム 下水熱利用地域冷暖房システム ゴミ焼却熱地域冷暖房システム
個別供給システム	ガス給湯器 パッケージエアコン 石油ファンヒーター	太陽光発電システム 太陽熱温水器

図10に結果を示す。新エネルギー・未利用エネルギーの導入によって、およそ20%のコスト低減となることが示された。

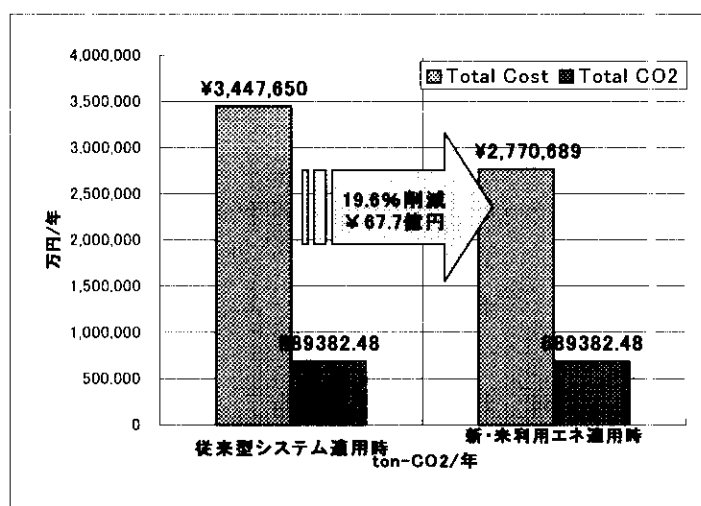


図10 従来型、新・未利用エネルギー適用のコスト比較

(4) システム構成の最適化によるCO₂ 排出量の削減

CO₂ 排出量を削減するのに、エネルギー供給コストが最小になるように供給システムの構成を最適化する。図11に新・未利用エネルギーを導入した際のCO₂削減量に応じた各システムの導入量構成を示す。

CO₂削減に際しては、各供給システムの導入量構成の変化及び各供給システム相互間の供給負荷比率の変化により対応する。このケースでは、従来型地域冷暖房はコスト及びCO₂排出量において有利な他の供給システム(下水熱、ごみ廃熱等)に取って代わられ、導入されない。電力に関しては、コージェネの導入量が多いが、CO₂削減レベルが高くなるにつれて系統電力の増加が見られる。さらに削減レベルを高くすると太陽光発電が導入されるようになる。

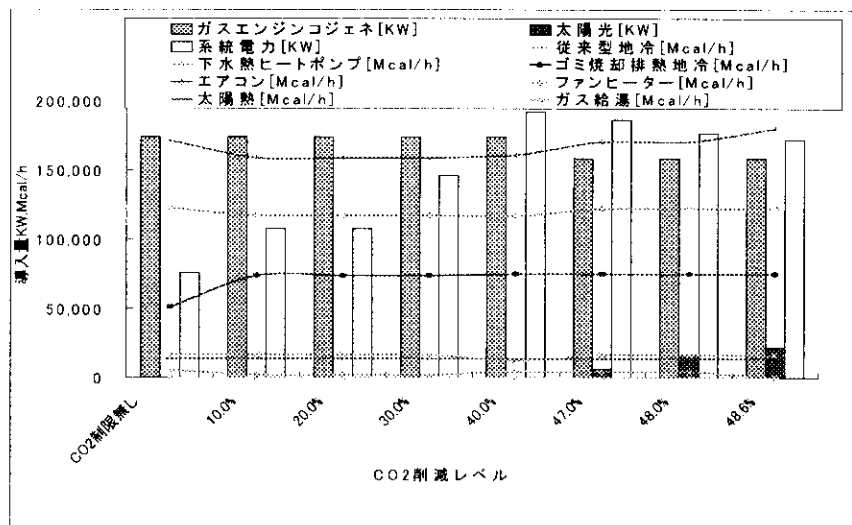


図 1.1 新・未利用エネルギー導入時の CO₂ 削減

(5) CO₂ 削減量と供給コスト

品川駅周辺地域でのエネルギー供給に伴う CO₂ 排出量とコストの関係を図 1.2 に示す。従来システム、新・未利用エネルギーシステムのいずれにおいても、地域での CO₂ 排出量を削減していくとコストが徐々に上昇し、ある排出量以下に下げようとする急激に上昇する。

このことより、CO₂ 削減量には適正值が存在することが示唆される。

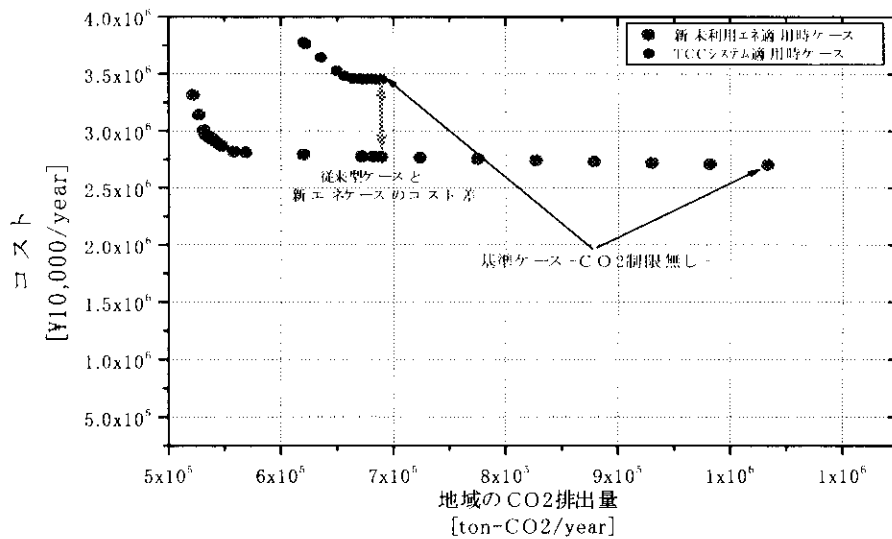


図 1.2 CO₂ 削減量とコスト

4. 本研究より得られた成果

燃料電池、太陽熱利用温水供給技術について、技術単独での評価としてライフサイクルインベントリ分析を実施した。これらの技術は、CO₂ 排出抑制の観点からは有効であることが明らかである。特に燃料電池は、電気の供給だけでも従来の石炭・石油の火力発電所に比較して CO₂ 排出抑

制効果があり、LNG火力発電所とほぼ同等のCO₂排出原単位と見ることが出来る。また、太陽熱利用温水供給技術は、熱量換算では太陽光発電に相当するCO₂排出原単位となるが、熱需要に合致することが利用の条件となると思われる。

民生用エネルギー供給システムの最適構成によって一定のCO₂排出レベルを最小コストで達成できる。その際、CO₂削減量に応じて、民生用エネルギー供給最小コストが上昇する様子を東京の一地域について明らかにした。

以上のことから、未利用エネルギー、自然エネルギー、燃料電池を中心とした分散エネルギー源による都市エネルギー供給は、排出CO₂量、コスト両面から優位性を持つ可能性が得られた。今後、インフラの整備、維持、管理、資産価値を含めた検討、法的制約との整合性、CO₂削減の経済的価値、行政の誘導策などについて研究を進め、実際の導入により近づけた検討が必要である。

5. 参考文献

- 1) 酒井 博、黒田健一、吉岡 浩、千田仁人、リン酸形燃料電池の開発状況、信学技報
- 2) 小林光雄、稲葉敦、中山哲男、日本エネルギー学会誌、73、1057 (1994)
- 3) 内山洋司、山本博巳、電力中央研究所報告 Y90015 (1991)
- 4) 内山洋司、山本博巳、電力中央研究所報告 Y91005 (1992)
- 5) 田原聖隆、小島紀徳、稲葉敦、化学工学論文集、23 (1)、88 (1997)
- 6) 原清信：都市における未利用・新エネルギー活用システムのライフサイクル評価、修士論文 (1999.3)
- 7) 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
- 8) 尾島俊雄：建築の光熱水原単位、早稲田大学出版 (1995)
- 9) GAMS Development Corp. : RELEASE 2.25 GAMS USER' S GUIDE (1992)
- 10) 日本技術経済センター：コジェネレーションシステム実践講座・応用編
- 11) 日本経済研究所：エネルギー技術に関する経済性の国際評価
- 12) 日本エネルギー経済研究所：新エネルギーの将来コストと導入量の見通し (1998)

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

- ① 稲葉 敦：IEA PVPS Task1 Workshop (1997)
「EPT and CO₂ payback time by LCA」
- ② 大矢仁史、遠藤茂寿、小林光雄、稲葉 敦：Int'l Energy Workshop(1997)
「The structure of energy consumption in the Japanese household sector」
- ③ 稲葉 敦：資環研第12回研究講演会 (1997)
「LCA手法を用いたCO₂排出抑制技術の評価」
- ④ 原 清信、石原慶一、嵐 紀夫、稲葉 敦：エネルギー・資源学会第18回研究発表会(1999)
「都市への未利用エネルギー、コジェネ適用時の環境影響評価」
- ⑤ 斎藤晃太郎、嵐 紀夫、稲葉 敦：エネルギー・資源学会第18回研究発表会(1999)
「工場排熱を利用した地域冷暖房の評価」

- ⑥ 斎藤晃太郎,嵐 紀夫,玄地 裕,匂坂正幸,稲葉 敦:エネルギー・資源学会第19回研究発表会(2000)
「民生用エネルギーシステムの最適組み合わせにおけるCO₂削減ポテンシャル評価」
- ⑦ 玄地 裕,匂坂正幸,稲葉 敦,斎藤晃太郎,嵐 紀夫:エネルギー・資源学会第19回研究発表会(2000)
「民生用エネルギーCO₂排出削減ポテンシャル評価」

(2) 論文発表

- ① 松野康也,堤 敦司,吉田邦夫: *Int'l J. Hydrogen Energy* : 22,6,615-620(1997)
「Improvement in electrode performance of three-phase fluidised bed electrodes for an alkaline fuel cell cathode」
- ② 匂坂正幸,稲葉 敦: *Proc. 4th Int'l Confe. GHG Control Tech.* : 4,781-784(1998)
「GHG emission by liquefaction and transportation of LNG」
- ③ 匂坂正幸,稲葉 敦: *Proc. 5th Int'l Symp. Env. Issues & Waste Manag. In Energy & Mineral Production*5,155-159(1998)
「Quantitative estimates of GHG emission from coal mines in Japan」
- ④ 稲葉 敦,近藤康彦,松本成司,大矢仁史,八木田浩史,小林光雄,匂坂正幸: *金属* : 69,7,588-622
「我が国のエネルギー需給の将来展望」
- ⑤ 嵐 紀夫,稲葉 敦: *日本エネルギー学会誌* : 79,877,446-453(2000)
「下水熱利用地域冷暖房と空気熱利用地域冷暖房の投入エネルギー解析」