

ガスエンジンコージェネレーションシステムの評価

—省エネルギー効果,経済性効果,環境負荷低減効果の考察—

阿部 幸介, 高良 伸治, 川端 裕二, 奥本 和史 (同志社大学大学院機械工学専攻)

稲岡 恭二, 千田 二郎, 千田 衛 (同志社大学工学部)

Kosuke Abe, Shinji Takara, Yuji Kawabata, Kazushi Okumoto

Kyoji Inaoka, Jiro Senda, Mamoru Senda

Department of Mechanical Engineering, Doshisha Univ.

Cogeneration systems have lately attracted considerable attention from the viewpoint of environment such as the depletion of fossil fuel resources or the global warming due to exhaust gases. In the Energy Conversion Reserch Center of Doshisha University (Kokikan), a cogeneration system consisting of gas engine and absorption refrigerator is operating to supply the electricity, air conditioning and heating. In this paper an assessment on the cogeneration system in Kokikan was conducted based on the measured data of temperature and flow rate for the effects of saving energy, economy and environmental load.

Key Words: Cogeneration system, Heat quantity, Exergy, Efficiency, CO₂ emission, Crude oil equivalent

1. 緒言

近年, 熱機関から出る排熱を回収し, 電力と熱を併給することが出来るコージェネレーションシステム(以下 CGS)が注目されている. CGS では, 排熱を二次エネルギーとして利用する事によって燃料の節約になり CO₂の排出も削減する事ができるため, 地球環境保全の立場から有効な省エネルギー設備であると言える. しかし, 電力需要と熱需要は施設によって異なり, 最適なシステム運用をしなければならない. 同志社大学エネルギー変換研究センター(光喜館)にはガスエンジンと吸収式冷凍機からなる CGS が導入されている. そこで, 本研究では光喜館における CGS の省エネルギー効果, 経済性効果, 環境負荷低減効果についての評価を行った.

2. コージェネレーションシステム

同志社大学エネルギー変換研究センター(光喜館)のコージェネレーションシステムを Fig.1 に示す.

- ① Electric generator
- ② Gas engine
- ③ Heat recovery boiler
- ④ Absorption refrigerator
- ⑤ RCP-gas pack
- ⑥ Cooling tower
- ⑦ Heat exchanger for exhaust heat recovery
- ⑧ Heat exchanger for radiation

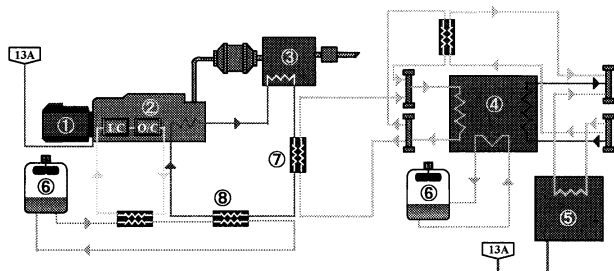


Fig.1 Cogeneration system

光喜館では都市ガスを燃料とするガスエンジンで電力を供給し, その排熱を館内の冷暖房に利用している. ガスエンジン②のシリンダーを冷却したジャケット水は排ガス温水ボイラー③で排気ガスによってさらに加熱される. この一次側システムで得られた温水は排熱回収用熱交換器⑦で吸収式冷凍機側

の温水に熱交換される. この二次側システムの温水で吸収式冷凍機④を稼働し冷房用冷水を供給する. また, 冬季は吸収式冷凍機を止めて熱交換器によって暖房用温水を供給している. また, 光喜館ではこの CGS とは別に吸収式温水器(RCP-gas pack)⑤を都市ガスで稼働し冷, 温水を供給している. なお, ガスエンジン, 吸収式冷凍機, RCP-gas pack の仕様を Table.1,2 に示す.

3. 計測方法

本研究はヤンマーエネルギーシステム株式会社のオンサイト監視システムを使用し, 一次側と二次側の各要素機器の入口, 出口における冷, 温水の温度, 流量を計測している. 温度の計測には測温抵抗体を用い, 流量の計測にはフローゲージを用いた.

Table.1 Functional specification of CGS

Gas engine		
Maximum output	kW	200
Fuel		City gas 13A
Fuel consumption	m ³ N/h	58.4
Heat recovery boiler		
Type	Through flow type	
Recovery heat quantity	MJ/h	377.6
Exhaust gas	Flow volume	m ³ N/h 671
	Temperature	°C 592
Hot water	Flow volume	m ³ /h 30
	Temperature (inlet) °C	88.9
Absorption refrigerator *		
Refrigerate capacity	kW	160
Chilled water	Flow volume	l/min 460
	Temperature (inlet) °C	12
	Temperature (outlet) °C	7
Heat source	Flow volume	l/min 930
	Temperature (inlet) °C	88
	Temperature (outlet) °C	83

* Absorption refrigerator Solution : LiBr
Refrigerant : water

Table.2 Functional specification of RCP-gas pack

RCP-gas pack		
Refrigerator		
Refrigerate capacity	kW	278.9
Fuel		City gas 13A
Fuel consumption	m ³ N/h	22.1
Chilled water Flow volume	l/min	400
Temperature (inlet)	°C	17
Temperature (outlet)	°C	7
Water heater		
Heat capacity	kW	230.9
Fuel		City gas 13A
Fuel consumption	m ³ N/h	22.4
Hot water Flow volume	l/min	400
Temperature (inlet)	°C	51.7
Temperature (outlet)	°C	60.0

4.評価方法

本研究でエネルギーバランスや効率を求める際に、熱量 Q とエクセルギー E を用いる。熱量は温度差に流量と比熱をかけた以下の式で算出する。

$$Q = C_p F (T_2 - T_1) \quad (1)$$

エクセルギーとは、与えられた系より取り出し得る最大の仕事量と定義されている。一般に化石燃料はそれが持つ化学エネルギーを燃焼させて高温の熱となり、この熱エネルギーで熱機関を駆動し、電気エネルギーや機械エネルギーを取り出す。最後には常温の熱となり外界に捨てられる。このように高温の熱はエンジンを駆動できる程のエネルギーを持つが、常温となった熱は何も生み出さない。すなわち熱量が同じでも高温の熱と低温の熱の価値は同じではない。

また、仕事は全て熱に変わるが熱はすべて仕事に変わらず、熱量から取り出せる最大の仕事量は熱量にカルノー機関の効率をかけた値である。よってエクセルギー E はカルノーサイクルの熱効率に熱量 Q をかけた形で定義される。

$$E = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (2)$$

式 (1) , (2) よりエクセルギーについて次式が成り立つ。

$$E_2 - E_1 = C_p F \left[(T_2 - T_1) - T_0 \ln \frac{T_2}{T_1} \right] \quad (3)$$

5.館内の需要と供給

まず光喜館内の電力、及び熱の需要とガスエンジンコージェネレーションシステムの供給量を月ごとに平均して求めた結果を Fig.2 に示す。図左側は発電量と排熱を回収した熱量合計すなわち供給量を示し、図右側は使用電力と供給熱量すなわち館内の需要を示す。光喜館の CGS によって供給できる電力、熱は共に需要を上回っている。電力に関しては大学内に逆流という形で余った電力も利用している。一方、熱に関しては夏季と冬季の熱需要は冷暖房のため大きい事が分かるが、いずれの場合も光喜館 CGS で回収できる熱量より小さい。すなわち回収しても利用できなかった分は余剰熱として外界へ放熱しているというのが現状である。この事から

光喜館では CGS の性能を最大限利用できていないと言える。さらに、光喜館では CGS とは別に吸収式冷温水器を都市ガスによって稼働しているため、これも CGS の性能を利用しきれない原因となっている。ここで Fig.3 に CGS で供給された熱量と吸収式冷温水器(RCP-gas pack)で供給された熱量を示す。

次に電力に対する熱量の割合である熱電比を求め、Fig.4 に示す。なお、熱電比についても発電量における回収熱量の割合と光喜館の電力需要における熱需要の割合を示した。発電量と回収熱量の比と電力需要と熱需要の比が等しければ回収した熱を有効に利用できるはずだが、光喜館では Fig.4 に示すように電力需要と熱需要の比が発電量と回収熱量の比に比べ小さく、電力需要に対する熱需要の割合が少ないことが分かる。

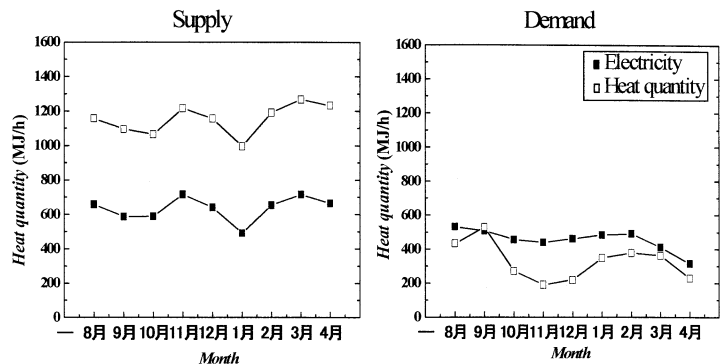


Fig.2 Supply and demand in KOKIKAN

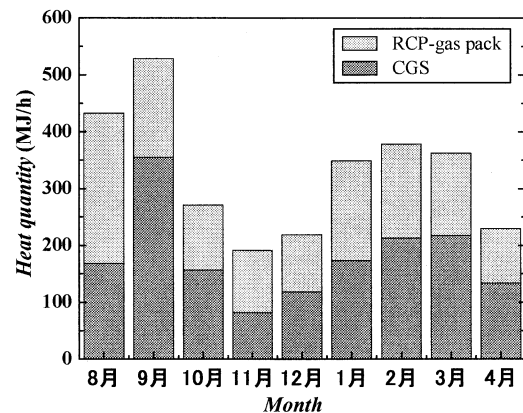


Fig.3 Heat supply by absorption refrigerator and RCPgas pack

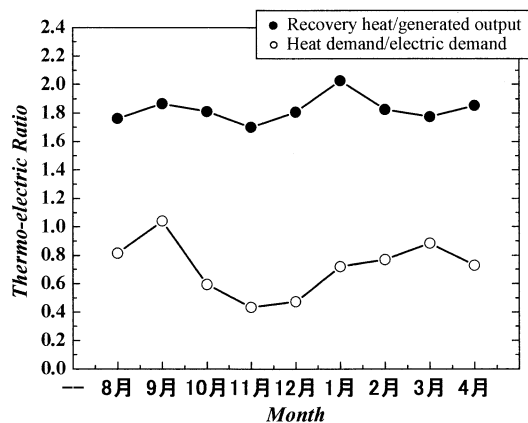


Fig4. Thermo-electric ratio

6.省エネルギー効果、経済性効果、環境負荷低減効果の評価

光喜館の CGS による効果をエネルギー効率、経済、環境の三つの視点から評価する。データを一ヶ月ごとにまとめ、CGS を導入しない場合と比較する。また CGS については吸収式冷温水器を稼働せず、全熱需要を CGS の排熱で賄ったと仮定した場合の結果も載せる。なお、経済面での評価に使用するガス料金及び電気料金を Table.3 に示し、環境面の評価に使用する CO₂ 排出係数及び原油換算係数⁽¹⁾を Table.4, 5 に示す。なお Table.4,5 の power generation については、上段に火力発電平均を、下段に原子力発電等含めた昼間平均を示す。

エネルギー効率については総合熱効率とエクセルギー効率について、それぞれ発電量と全ての回収熱量を考慮した場合と、発電量と一次側系統から吸収式冷凍機の二次側系統へ実際に供給した場合の二つで評価した。

結果を Fig.5 に示す。上記の 2 パターンについて総合熱効率を実線、エクセルギー効率を点線で示す。全ての回収熱量を考慮した場合は、どの月においても総合熱効率は約 85%と一定の値であった。しかし、それをエクセルギーで評価すると約 40%程度となっている。このことから 85%回収できていても実際仕事として取り出せるエネルギーは半分程度の 40%だという事が分かる。また、二次側系統に与えられ、実際に供給された熱量を考慮した場合は、一番熱需要の多い 9 月でも総合熱効率は約 55%となっており、エクセルギー効率では約 35%である。この事からも光喜館の熱需要は少なく回収できた熱量を有効に使いきれていないと言える。さらにエクセルギー効率約 35%に対して発電効率は約 30%であったため、実際仕事として利用できる熱は少なく、エクセルギー効率は発電効率に大きく依存すると言える。

次に、熱量とエクセルギーのサンキー線図を Fig.6, 7 に示す。ここでは最も熱需要の多かった 9 月のデータで比較する。なお、シリンダー冷却によって熱を受け取ったジャケット水を Jacket water1。その後排ガス温水ボイラーでさらに加熱されたジャケット水を Jacket water2 として示した。これを見ても回収できるエネルギーの割合が大きく違っているのが分かる。Fig.6 から回収熱量の合計は燃料発生熱量に対して 55.5%で、その内 18.1%を館内で冷房に利用しているのに対し、エクセルギーに基づく評価では、それぞれ 9.6%と 4.2%であることが分かる。また、熱量ベースでは無視できる程小さかった燃焼や伝熱における不可逆過程でのエクセルギー損失が大きい事も分かる。

Table.3 Cost of fuels

	Summer	Winter
City gas (yen/m ³ N) (City gas13A)	66	63
Electricity cost (yen/kW)	16	15

Table.4 CO₂emission coefficient

CO ₂ emission coefficient	(kg/m ³)	(kg/kWh)
City gas 13A	2.14	
power generation		0.65 0.38

Table.5 Crude oil equivalent

Crude oil equivalent	(l/m ³)	(l/kWh)
City gas 13A	1.19	
power generation		0.265 0.265

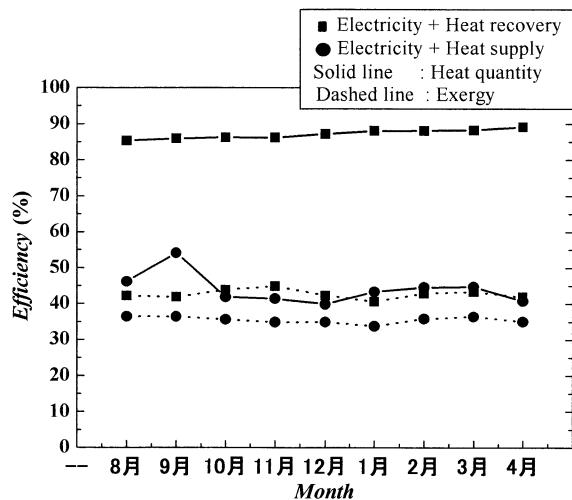


Fig.5 Efficiency

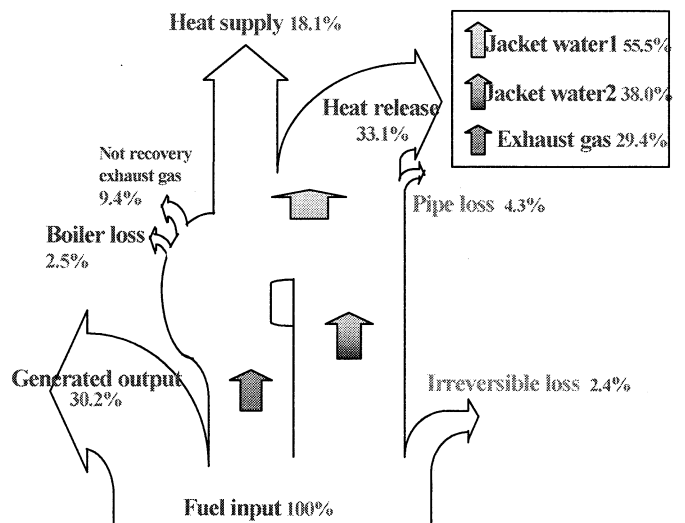


Fig.6 Sankey diagram of Heat quantity

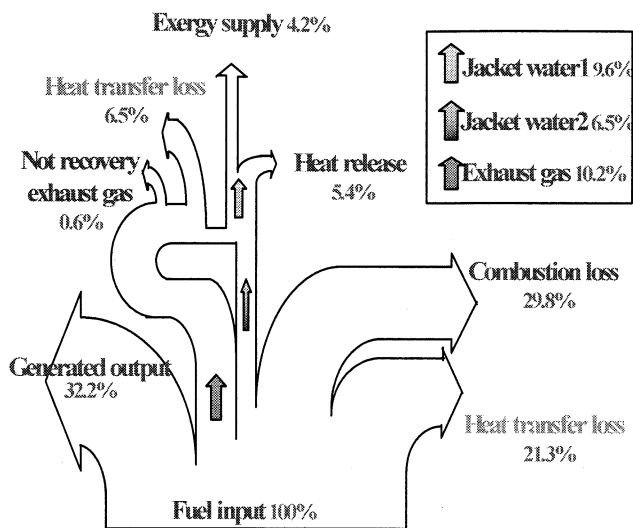


Fig.7 Sankey diagram of Exergy

次に電力とガス料金，CO₂ 排出量，原油換算使用量についての検討結果について述べる。

まず経済性効果の計算結果を Fig.8 に示す。ここで CGS 稼動時は，CGS 用ガスエンジンに要する燃料消費量と吸収式冷温水器に要する燃料消費量に対する料金に，不足する電力の発電所からの買電分を加えて算出した。なお，余った場合は大学内に逆流しているので売電したものとした。(これを図では■：CGS で示す)。また，光喜館の全熱需要を CGS で供給したと仮定した場合については，吸収式冷凍機の最大出力以内の熱需要は吸収式冷凍機で供給したと仮定した(図では▲：CGS*で示す)。CGS を稼動しない場合は電力需要を全て発電所で発電し，熱需要を全て吸収式冷温水器で供給したと仮定した(図では○：Without CGS で示す)。

得られた結果を見ると，経済面においては比較的熱需要が多かった 9 月と 2 月を除く月では CGS を稼動しない方がコストが低く，経済性においては有効とは言えない結果となった。しかし，吸収式冷温水器で供給している熱量を含めた館内全体の熱需要を全て CGS 温水で賅ったと仮定した場合においては，ほとんどの月で CGS は有効となっている。また，この結果から 10 月の熱需要を全て CGS で供給した場合 (CGS*) が利益が出る場合と出ない場合の境目だと分かる。この時の全熱需要が Fig.3 より約 270(MJ/h)だったので，約 270(MJ/h)以上の熱需要がある時光喜館の CGS は経済的に有効になると考えられる。

次に環境負荷に与える効果の計算結果を Fig9, 10 に示す。環境負荷については CO₂ 排出量と原油換算使用量で評価した。Fig.9 の左図は電力について火力発電の CO₂ 排出係数を用いた場合，右図は原子力発電等含めた昼間の平均の値を用いた場合の総 CO₂ 排出量を示す。CO₂ 排出量については電力需要を火力発電で供給する場合，全ての月で CGS は有効で，最も熱需要の多い 9 月で CO₂ 排出量を最大約 20%削減出来るという結果となった。館内の熱需要を CGS 排熱で全て賅えばさらに CO₂ 排出量を削減出来る。しかし，全ての発電所の昼間平均での CO₂ 排出係数を用いた場合，全ての月で有効とは言えない結果となった。

原油換算使用量について，Fig.10 では燃料消費量を ■ で示し，その月の燃料消費量を原油換算したものと売電した電力を原油換算したものの差を □ で示す。これを見るとどの月でも原油を約 40 (l/h)以上削減でき，一番燃料消費量の多かつ

た 8 月では都市ガスを約 58 (m³/h)使用する事で原油を約 60(l/h)削減できたと考えられる。

以上の事を踏まえると，経済性については光喜館の CGS は館内の熱需要が小さいため，それ程有効とは言えず最低でも 270(MJ/h)以上の熱需要が必要であると考えられる。また，CGS ではガスエンジンに都市ガスを燃料としているため火力発電の場合と比較すると CO₂ 排出量の削減には有効であり，原油は約 40(l/h)以上削減出来る結果となった。

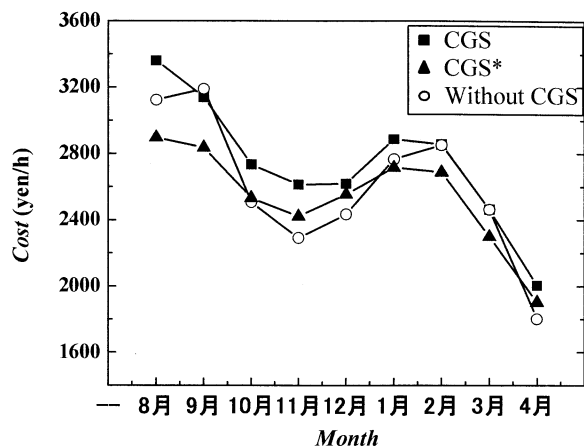


Fig.8 Cost

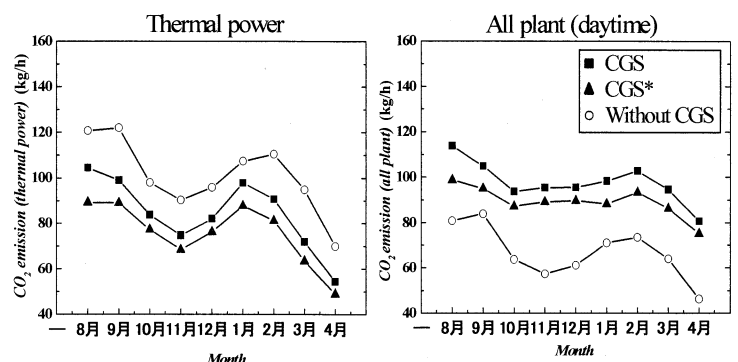


Fig.9 CO₂emission

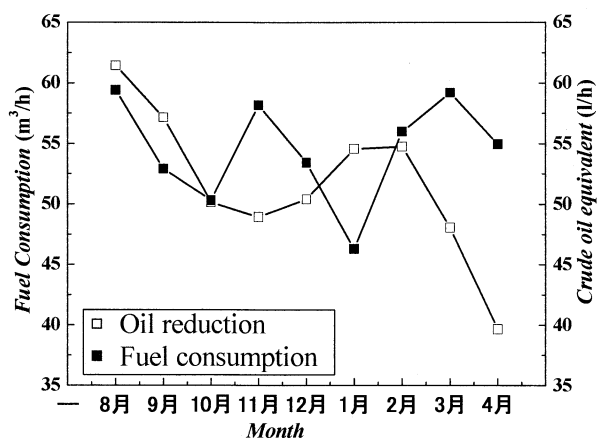


Fig.10 Oil reduction

7.省エネルギー率

省エネルギー効果を導入設備の熱効率から、次式で与えられる省エネルギー率⁽²⁾を求めて評価した。

$$Q_0 = \frac{P_e}{\eta_0} + \frac{P_h}{\eta_b} \quad (4)$$

$$Q_{cg} = \frac{P_e}{\eta_e} = \frac{P_e + P_h}{\eta_{cg}} \quad (5)$$

ここで、 Q_0 :CGSを導入しない時のエネルギー消費量、

Q_{cg} :CGS導入後のエネルギー消費量

省エネルギー率

$$= \frac{Q_0 - Q_{cg}}{Q_0} = 1 - \frac{\eta_0 \cdot \eta_b}{\eta_e \cdot \eta_b + \eta_0 \cdot (\eta_{cg} - \eta_e)} \quad (6)$$

P_e :電力需要, P_h :熱需要, η_0 :発電効率, η_b ボイラ効率, η_e :CGSの発電効率, η_{cg} :CGSの総合熱効率

これを回収熱量の全てを利用した場合と実際に供給された熱量の場合について月別に算出し、その結果を Fig.11 に示す。なお、CGS 導入前の電力供給は商用電力で発電効率(受電端)は 35.12%とし、導入前のボイラ効率を 90%とした。

この結果を見ると、回収熱量を全て利用出来れば省エネルギー率は 30%以上になると考えられるが、現状では一番熱需要の多い 9 月でも 10%程度となっていて、また熱需要の小さい月では省エネルギー率はわずかではあるが負の値となっていることが分かる。また 10 月はちょうど正と負の境目になっており、省エネルギーを達成するには Fig.3 に示すこの時の熱需要 160(MJ/h)以上の熱需要が最低でも必要であると考えられる。

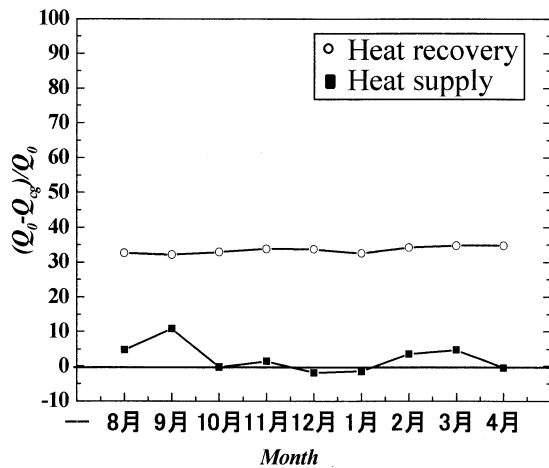


Fig.11 Energy-saving rate

8.CGSの発電負荷を変化させた場合の省エネルギー効果、経済性効果、環境負荷低減効果の評価

発電負荷と燃料消費量、排熱回収熱量の関係を調べ、そのデータを基に発電負荷を変化させた場合のエネルギー効率、料金、CO₂排出量、原油換算使用量を算出し、それぞれ Fig.12~15 に示す。図の中の記号は前述 6. と同じ(■:CGS稼働, ▲:全熱需要をCGSで供給と仮定, ○:CGS稼働しない場合)であり、また原油換算については、■:燃料消費量, □:その月の燃料消費量を原油換算したものと売電した

電力を原油換算したものの差とした。なおここでは最も熱需要の多かった 9 月における電力需要、熱需要で算出した結果を示した。

Fig.12 に示した総合熱効率については回収熱量合計と実際に供給した熱量で評価した。全ての回収熱量を考慮したものでは効率は発電負荷を上げるにつれて良くなった。これは発電負荷を上げるにつれて発電効率は向上する。また、燃料消費量は増えるがその分回収熱量も増えるため回収効率はほぼ一定となり、総合的に効率が向上すると考えられる。しかし、実際に供給されている熱量は少なく、また発電負荷には因らないため、実際に利用した熱量の場合の総合熱効率は発電負荷に伴い低下していく。

経済面(Fig.13)では発電負荷を上げた方が良いという結果となった。これは発電量を増やせば逆潮流する分の電力が増え、その分削減できるコストが燃料消費量のコスト増加を上回るからだと考えられる。

Fig.14 に示した環境負荷の CO₂ 排出量においては火力発電平均と原子力等全ての発電の昼間の平均での CO₂ 排出係数を用いた結果は異なる傾向となった。発電量を増やせば逆潮流分の CO₂ を削減でき、その削減量が燃料消費量増加における CO₂ 排出量の増加よりも大きい火力平均(CO₂ 排出係数 0.65)では発電負荷を上げた方が良いという結果となった。一方、全ての発電の昼間の平均(CO₂ 排出係数 0.38)では、逆に発電負荷を上げれば CO₂ 排出量が増えるという結果となった。なお原油換算使用量については発電負荷を変えても原油削減量はあまり変わらないが、都市ガスを用いることにより原油を約 55(l/h)削減出来ると考えられる。

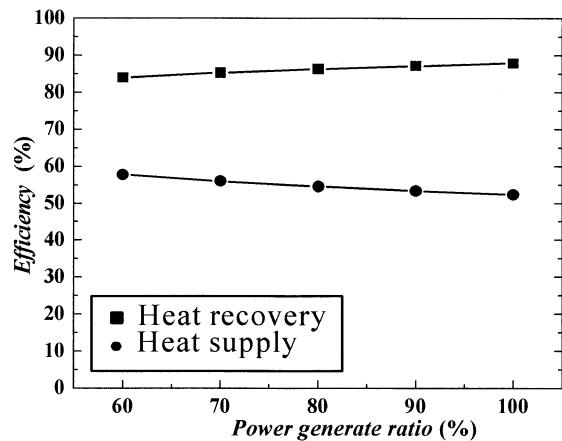


Fig.12 Calculation result of Efficiency

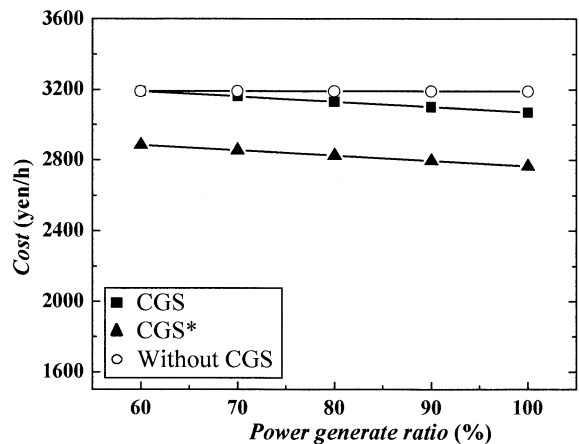


Fig.13 Calculation result of Cost

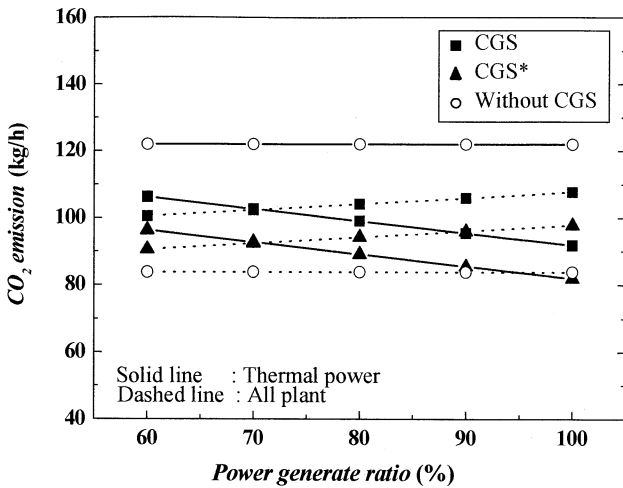


Fig.14 Calculation result of CO₂emission

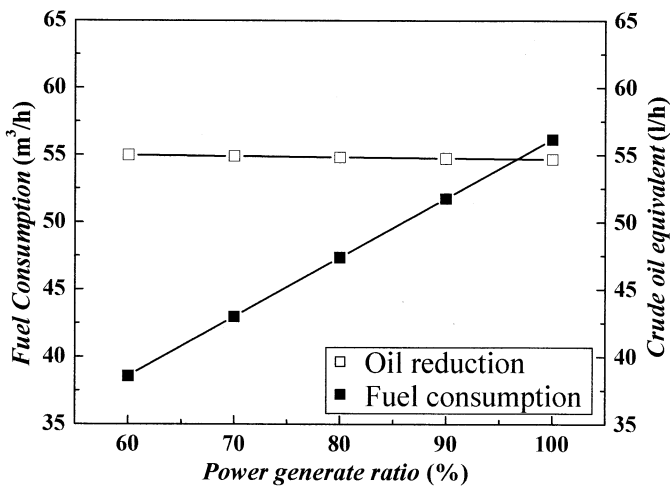


Fig.15 Calculation result of oil reduction

参考文献

- (1)「コージェネレーションの基礎と応用」藤井 照重
編著 コロナ社 2003年 P.286
- (2)「コージェネレーションの基礎と応用」藤井 照重
編著 コロナ社 2003年 P.283

9.まとめ

- (1)光喜館の CGS は総合熱効率が約 85%あるにもかかわらず、熱需要が少ないため、電力需要に対する熱需要の割合を表す熱電比が非常に小さい。
- (2)経済面においては現状の熱需要ではあまり有効とは言えず、270(MJ/h)以上の熱需要が必要である。また、環境面については火力発電と比べれば有効と言え、最大で約 20% CO₂ を削減できる。またどの月においても原油を約 40(l/h)以上削減出来ると考えられる。
- (3)エクセルギーで評価すると熱需要が少ないため、エクセルギー効率は現状では発電効率に大きく依存している。また燃焼や伝熱による不可逆過程での損失が大きい。
- (4)省エネルギー率は熱需要が大きかった 9 月が最も高い値となった。また省エネルギー性を達成するには、少なくとも 160(MJ/h)以上の熱需要が必要である。
- (5)多少エネルギー効率は低下するが、発電負荷を上げた方が、経済面、環境面で有効である。