

省エネルギーの実現を目指す大学キャンパスにおけるコージェネレーションシステムの導入最適化に関する研究

2007 年度

三瀬 農士

目次

本論文主要記号表

第1章 序論	2
1-1 研究背景	2
1-2 本研究の目的	2
1-3 本論文の構成	2
第2章 従来の研究および本研究における検討項目	2
2-1 エネルギー需要に関する従来の研究	2
2-1-1 我が国におけるエネルギー需要実態	2
2-1-2 民生用エネルギー需要に関する従来の研究	2
2-2 エネルギー利用システムに関する従来の研究	2
2-2-1 我が国におけるエネルギー利用実態	2
2-2-2 エネルギー利用システムに関する従来の研究	2
2-3 大学を対象としたエネルギー利用に関する従来の研究	2
2-4 本研究における検討項目	2
第3章 慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス(SFC)のエネルギー需要実態	2
3-1 エネルギー需要調査の目的	2
3-2 建物および設備情報	2
3-2-1 建物	2
3-2-2 受電および発電設備	2
3-2-3 空調設備	2
3-3 電力および空調用ガス消費量の調査結果	2
3-3-1 日電力消費原単位	2
3-3-2 空調用日ガス消費原単位	2
3-3-3 月別一次エネルギー消費量および消費原単位	2
3-3-4 月別・時刻別電力消費量	2
3-4 電力および冷暖房需要の推定	2
3-4-1 空調システム別の電力およびガス消費量	2
3-4-2 冷暖房需要の推定	2
3-4-3 年間の時刻別電力および冷暖房需要	2
3-4-4 建物用途別冷暖房需要	2
3-4-5 空調システム別冷暖房需要	2

第4章 SFCにおける現状 CGS の省エネルギー性および環境性評価	2
4-1 CGS 評価の目的	2
4-2 CGS に関する計測項目	2
4-3 現状 CGS の省エネルギー性評価.....	2
4-3-1 商用系統電力と CGS 発電電力の比較.....	2
4-3-2 排熱利用による一次エネルギー消費量の削減効果.....	2
4-3-3 CGS の省エネルギー性評価	2
4-4 現状 CGS の環境性評価	2
4-5 CGS の熱効率解析	2
第5章 エネルギー利用システムのシミュレーション	2
5-1 SFC におけるエネルギー利用システムの現状	2
5-2 SFC におけるエネルギー利用システムの検討	2
5-3 シミュレーションで用いた基礎情報	2
5-3-1 エネルギー需要.....	2
5-3-2 商用系統電力の電源構成および環境負荷の原単位.....	2
5-3-3 要素機器の性能特性.....	2
5-4 評価関数	2
5-5 シミュレーションの再現性の検証	2
第6章 SFC における排熱優先利用システムの評価	2
6-1 排熱優先利用システムのシミュレーション	2
6-2 シミュレーションにおける検討システム	2
6-3 現状 CGS を対象とした排熱優先利用システムの検証.....	2
6-4 排熱優先利用システムを導入したエネルギー利用システムの評価.....	2
6-4-1 CGS の運転シミュレーション	2
6-4-2 一次エネルギー消費量の評価	2
6-4-3 二酸化炭素排出量の評価.....	2
6-4-4 日最大受電電力の評価.....	2
6-4-5 需要と供給のエネルギーバランス	2
第7章 SFC から矢上キャンパスへの電力託送システムの評価	2
7-1 電力託送システムのシミュレーション	2
7-2 シミュレーションにおける検討システム	2
7-3 電力託送システムを導入したエネルギー利用システムの評価.....	2
7-3-1 CGS の運転シミュレーション	2

7-3-2 CGS の熱効率解析	2
7-3-3 一次エネルギー消費量の評価	2
7-3-4 二酸化炭素排出量の評価	2
7-3-5 日最大受電電力の評価	2

第 8 章 結論2

謝辞

文献

参考論文一覧

本論文主要記号表

記号

c_p	: 定圧比熱 [J/(g·K)]
er	: 二酸化炭素排出原単位 [kg-CO ₂ /kWh, kg-CO ₂ /m ³]
E	: エクセルギー [J]
h	: 比エンタルピー [J/kg]
hr	: 一次エネルギー消費原単位 [J/Wh]
LF	: 負荷率 [-, %]
m	: 質量 [kg]
P	: 電力 [W]
q_m	: 質量流量 [kg/s]
Q	: 熱量 [J, J/h]
R	: 相関係数 [-]
s	: 比エントロピー [J/(kg·K)]
t	: 時刻 [h]
t	: 温度 [°C]
T	: 温度 [K]
V	: 体積 [m ³]
W	: 電力量 [Wh]
η	: 熱効率 [-]

添字

0	: 周囲環境条件
a/c	: 空調 (冷暖房)
base	: ベース電力
CO ₂	: 二酸化炭素
cln	: 冷房
dmn	: エネルギー需要
dt	: 昼間時間帯
exh	: 排熱
grd	: 商用系統電力
hsw	: 熱源水
htn	: 暖房

nt : 夜間時間帯
prm : 一次エネルギー
pwr : 電力
rtd : 定格値
trn : 電力託送

略語

AC : absorption chiller (吸収式冷凍機)
AHC : gas-fired absorption heater chiller (ガス焚吸収式冷温水発生機)
AHU : air handling unit (エアハンドリングユニット*1)
BLR : boiler (ボイラー)
CGS : cogeneration system (コージェネレーションシステム)
CHP : combined heat and power (熱電併給)
COP : coefficient of performance (成績係数)
FCU : fan coil unit (ファンコイルユニット*2)
GE : gas engine (ガスエンジン)
HEX : heat exchanger (熱交換器)
HHV : higher heating value (高位発熱量)
LHV : lower heating value (低位発熱量)
PAC : packaged air conditioner (パッケージエアコン)
PV : photovoltaic system (太陽光発電システム)
SFC : Keio University Shonan Fujisawa Campus (慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス)
VC : vapor compression heat pump chiller (蒸気圧縮式ヒートポンプチラー)

*1 冷温水コイル、加湿器、ドレンパン、送風機、エアフィルターを一体に組込んだ比較的大容量の空気調和機。厳密な温湿度を要求される空調にも用いられる。

*2 一体のケーシングの中にコイル、送風機、空気ろ過器等を組込んだもので、コイルに冷・温水を送り、送風機により室内に冷・温風を送り出す装置。

第1章 序論

1-1 研究背景

現在、化石燃料資源の枯渇、温室効果ガスによる地球温暖化等、地球規模のエネルギー・環境問題が深刻化している。特に、地球温暖化問題は、早急に解決しなければならない問題の一つであり、1997年に開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）においては、温室効果ガスの具体的な削減目標が批准された。ここで、日本は、2008年から2012年までの期間において、温室効果ガスを1990年比で6%削減することを約束している。

これらのエネルギー・環境問題は、20世紀半ば頃から急速に伸び続けている産業活動の発展に伴う、一次エネルギー消費の増大に起因するものであると考えられる。従って、これら諸問題を解決するためには、一次エネルギー消費を低減することが最優先課題となる。我が国に目を向けると、1973年の第一次オイルショック、1978年の第二次オイルショックの経験から、1979年に、エネルギーの使用の合理化に関する法律（省エネ法）が制定された。この省エネ法は、国民経済の健全な発展のために、工場および事業所における、燃料資源の効率的な利用を目的としたものである。その後、地球環境問題への意識が高まる中、特に、COP3で批准された温室効果ガス削減目標への対応が求められるようになり、1998年に省エネ法が大幅に改正され、庁舎、事務所、病院、学校、ホテル、商業施設等、あらゆる事業場が省エネ法の対象となった。このような省エネルギー推進の流れを受けて、我が国の産業用エネルギー消費は、1970年代のオイルショック以降、ほぼ横ばいとなっている。一方で、民生用エネルギー消費は現在も伸び続けており、早急な省エネルギー対策が求められている。

また、2006年に発表された、新・国家エネルギー戦略においては、太陽光、バイオマス等の自然エネルギーの利用促進、原子力発電の有効利用等により、石油依存度を2030年までに、40%を下回る水準に引下げることが目標としている。これは、産油国である中東地域における政治的な不安定要素等から、安定的なエネルギー供給体制の確立を急務とすることも背景にある。我が国の電力供給において、石油火力発電所は、主に、ピーク供給用として昼間時間帯に稼働しているが、近年においては、特に夏期昼間におけるピーク電力需要の増大により、石油火力発電所の電力負荷は増大している。よって、商用系統電力のピーク電力負荷を低減させることは、石油依存度の低減のために効果的な方法の一つとなる。

省エネルギーおよび商用系統電力の負荷平準化を実現するためには、エネルギー利用システムの最適化を検討することが必要となる。中でも、コージェネレーションシステム（CGS）は、排熱を有効利用できる特性から、省エネルギーへの大きな貢献が期待されている。我が国において、CGSの導入件数は1980年代後半から増加し始め、特に、1990年頃のバブル経済時期においては、経済性および危機管理性の視点から数多く導入され、現在も導入容量が増大している。自然エネルギーを利用した電源の安定性確保、商用系統の電力負荷平準化、電源の分散化による危機管理体制の強化等の視点を考慮すると、今後さらに、CGSの担う役割は大きくなる。しかしながら、実使用条件下においては、エネルギー需要の熱電比およびその時間的な変動のために、CGSを含むエネルギー利用システムの効果的な導入および運用方法の確立は容易ではなく、CGSの潜在的な省エネルギー効果を最大限に発揮するシステム環境が構築されていない状況にある。

1-2 本研究の目的

このような背景を鑑み、著者を含む研究グループでは、低環境負荷型社会の構築を目的として、クラスター型エネルギーマネジメントシステム（CEMS）の概念を提案し、CGSを含むエネルギー利用システムの最適化に関する研究を行っている。CEMSとは、情報通信技術等を適用しながら、複数の設備、建物、地域等を有機的に連携し、需要と供給の最適な組合せ（クラスター）形成により、供給システムが高効率に作動できるシステム環境を実現するためのエネルギーマネジメントシステムである。CEMSは、資源エネルギー庁がまとめた「省エネルギー技術戦略（2007年4月）」の中で、省エネルギー型情報生活空間創生技術（民生分野）の一つとして取上げられており、今後の有効な省エネルギー技術として注目され始めている。

本研究では、CEMSを具現化するための基礎研究としての位置付けも含め、民生用施設の一例として慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス（SFC）を取上げ、熱エネルギー有効利用の視点から、最適なエネルギー利用システムの提案を行うことを目的とする。大学施設には、様々な用途の建物が存在し、そのエネルギー需要実態は、学科、学部、キャンパス毎に、また、その立地条件により異なるため、供給システムの最適化も複雑である。また、大学施設の省エネルギー対策は、一般の事務所建物等に比べて遅れているとされ、教育機関としての社会的責任からも、2-3節で紹介するように、近年、大学施設を対象としたエネルギー需要および供給システムの最適化に関する研究が注目され始めている。

本研究では、まず、SFCにおける電力およびガス消費量に関する実態調査を基に、機器の効率特性等を用いることで、最終的に人間が利用する段階での電力および熱需要を求める。次に、この電力および熱需要のエクセルギーに見合った、最適な供給システムの構築に関する検討を行う。例えば、冷房需要を賄うために、排熱利用の温水吸収式冷凍機を用いた場合、必要な熱源水温度は90℃程度であり、そのエクセルギーは、化石燃料を新たに消費する必要のない大きさである。よって、エクセルギーの小さい熱需要に対しては、自然エネルギー、CGS排熱等の熱源を最大限に有効利用することで、化石燃料資源の消費量を削減することが可能となる。また、我が国においては、ピーク電力需要は夏期昼間に発生し、その要因の大部分が冷房用電力であるが、CGS排熱により冷房需要を賄うことで、ピーク電力需要の削減効果も期待できる。本研究では、これらの効果について、定量的な評価を行う。

さらに、供給システムの高効率運用を実現するためには、複数のシステム、建物および需要家間において、電力および熱エネルギーを相互利用するシステム環境の構築が必要である。本研究では、複数の建物に冷温水を供給しているSFCの中央熱源方式空調システムにおいて、CGS排熱を最大限に有効利用した場合の、省エネルギー性および環境性に関する評価を行う。また、CGS発電電力を複数の需要家に供給した場合における、CGS運転負荷率の改善効果を検証するために、SFCに設置されたCGSの発電電力を他のキャンパスへ託送する、電力託送システムについても検討する。これらの検討を基に、供給システムの高効率運転を実現するためのシステム環境構築について、効果的な提案を行うことを目的とする。そして、今後の持続的な化石燃料資源の利用と、エネルギーの安定供給を実現するための最適なエネルギー利用システムの構築について、有益な基盤研究となることを目標とする。

1-3 本論文の構成

本論文は全8章で構成され、第2章においては、民生用建物を対象とした、エネルギー需要およびエネルギー利用システムに関する従来の研究を紹介すると共に、本研究における検討項目を示す。第3章では、SFCにおけるエネルギー需要実態に関する調査結果と、建物用途別・時刻別エネルギー需要の推定方法を示す。また、第4章では、SFCにおけるCGSの運転状況の調査結果を基に、CGSの省エネルギー性および環境性を評価し、その導入および運用の改善点について検討する。これらの実態調査を基に、第5章以降では、CGSを含むエネルギー利用システムの最適化に関する検討を、計算シミュレーションにより行う。第5章では、まず、計算シミュレーションの概要を説明する。そして、第6章では、SFCの空調システムにおいて、CGS排熱を最大限に有効利用する排熱優先利用システムについて、省エネルギー性、環境性および商用系統電力の負荷平準化の視点から評価する。次に、第7章では、SFCに設置された大型CGSの余剰電力を、慶應義塾大学矢上キャンパスへ託送する、電力託送システムの評価を行う。最後に、第8章に結論をまとめる。

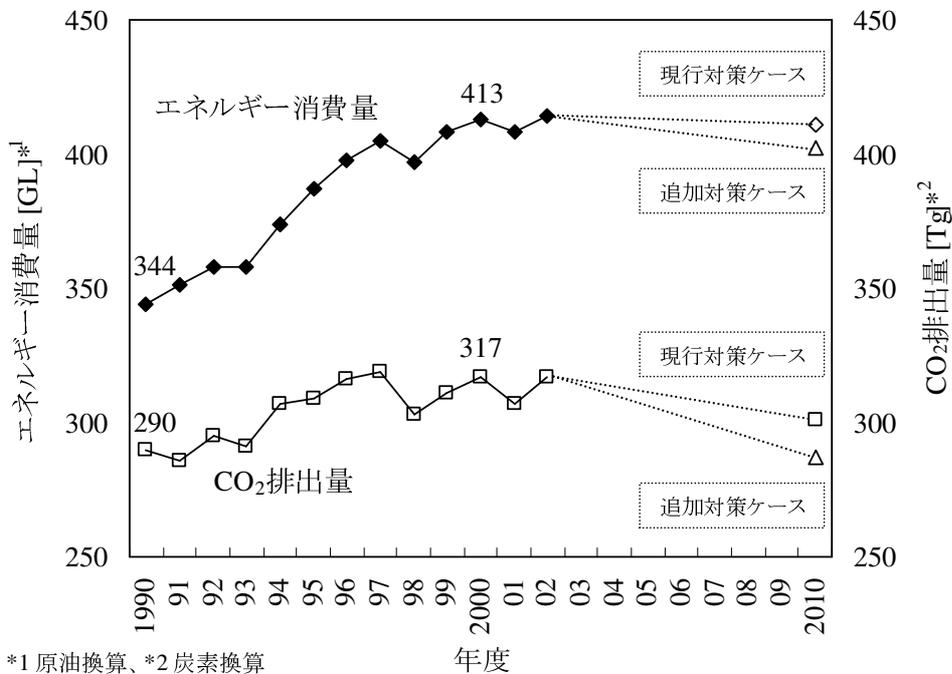
第2章 従来の研究および本研究における検討項目

2-1 エネルギー需要に関する従来の研究

2-1-1 我が国におけるエネルギー需要実態

化石燃料資源の枯渇および温室効果ガスによる地球温暖化等、地球規模のエネルギー・環境問題が深刻化しているが、これらの問題は、産業の発展に伴うエネルギー消費の増大に起因していると言える。近年では、先進国のエネルギー消費に加え、中国・インド・韓国を中心とした、アジアの発展途上国におけるエネルギー消費の伸びは著しく、特に、これらの発展途上国においては、今後の経済成長に伴う産業活動により、さらにエネルギー消費が増大することが予想される。我が国に目を向けると、戦後の急激な経済成長に伴い、エネルギー消費は増加の一途を辿っており、アメリカ、中国、ロシアに次ぐエネルギー消費大国となっている。

今後、エネルギー消費に起因する地球規模の諸問題の解決のためには、国境を越えた横断的な協力が必要となる。特に、我が国は、さらなる省エネルギー対策の実施と共に、省エネルギー先進国として、蓄積された省エネルギー技術を、今後の経済成長が見込まれる発展途上国に積極的に提供していくことが求められる。従って、本研究では、まず、エネルギー消費大国である日本において、エネルギー需要構造を分析し、さらなる省エネルギー対策を検討することを課題とする。ここで、我が国のエネルギー消費と二酸化炭素排出量の実績と見通しは、図 2-1（文献 [1]）のようになっている。



*1 原油換算、*2 炭素換算
 注) 現行および追加対策ケースの見通しは、2004年6月および7月における、総合資源エネルギー調査会資料による。

図 2-1 我が国におけるエネルギー消費量および CO₂ 排出量の実績と見通し^[1]

図 2-1 より、2000 年度における我が国のエネルギー消費量は 413 GL であり、1990 年度における 344 GL と比較して、20 % の増加となっている。また、2000 年度における我が国の二酸化炭素排出量は 317 Tg であり、1990 年度の 290 Tg と比較して、9 % の増加となっている。COP3 では、我が国は、2008 - 2012 年の期間において、二酸化炭素排出量を 1990 年比で 6 % 削減することが義務付けられているが、2000 年度の時点においては、目標値の到達には程遠い状況である。2008 年までに残された期間は短いものの、今後の持続的な二酸化炭素排出量の削減のためにも、さらなる省エネルギー対策の強化が必要である。ここで、我が国における需要部門別のエネルギー消費は図 2-2 (文献 [2]) のようになる。

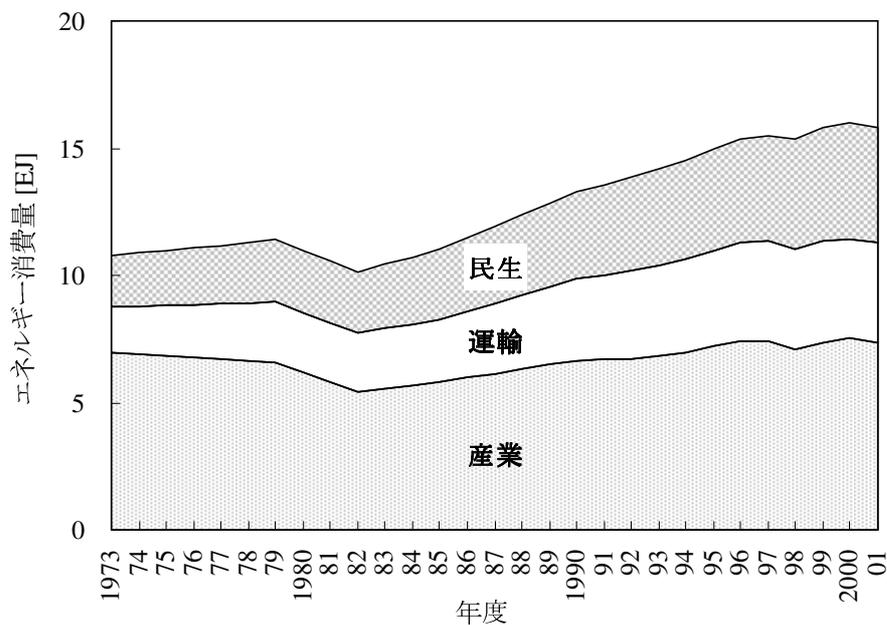


図 2-2 我が国におけるエネルギー消費量 (需要部門別) の推移^[2]

図 2-2 において、産業用エネルギー消費は、1973 年の第一次オイルショックおよびそれに伴う原油価格の高騰の影響を受け、1980 年代前半までは減少傾向にある。しかし、その後は、バブル経済の影響もあり増大傾向となるが、2000 年度におけるエネルギー消費は、1973 年度とほぼ同じ水準を維持している。一方で、民生および運輸部門においては、1973 年の第一次オイルショック以降もエネルギー消費は伸び続け、2000 年度におけるエネルギー消費は、1973 年度と比較して、民生部門で 2.3 倍、運輸部門で 2.2 倍となっている。そこで、これらの部門においては特に、省エネルギー対策を実施し、エネルギー消費の増加を抑制することが急務である。

本研究においては、民生部門を対象として、発電、空調および給湯設備等を含むエネルギー利用システムを最適化することで、省エネルギーを実現することを目的としている。ここで、発電、空調および給湯設備のシステム構成を検討する際において、エネルギー需要に関する情報が十分でない場合、需要と供給の間に時間および量的なアンバランスが生じ、エネルギー有効利用が実現されない問題を指摘することができる。さらに、導入する設備容量を最適化するためには、計算シミュレーション等による事前の十分な検討が必要となるが、その際、時刻別のエネルギー需

要は必要不可欠な情報である。よって、エネルギー利用システムの最適化により省エネルギーを実現するためには、まず、エネルギー需要実態について、調査・研究を行うことが最優先課題である。以下に、民生用建物のエネルギー需要に関する過去の研究について紹介する。

2-1-2 民生用エネルギー需要に関する従来の研究

1) 尾島ら^[3]の研究

1955年から1995年までの期間において、首都圏を中心とした業務、商業、娯楽、医療、宿泊、教育、文化、地下街および住居の9種類の民生用建物に関して、エネルギー・水消費の原単位を、年・月・時刻別に求め、統計的なデータ処理を行っている。ここで、原単位とは、建物の単位延べ面積あたりの用途別エネルギー・水消費量を建物種別および使用用途別に整理した値である。エネルギー消費原単位は、電力、ガスおよび石油の消費量を使用用途別に分類し、一次エネルギーに換算した数値を基に求めている。また、使用用途を、冷熱用、温熱用および一般電力に分類している。冷熱用は冷熱源機器が使用するエネルギー消費量、温熱用は暖房・給湯用の温熱源機器が使用するエネルギー消費量である。一般電力は、総電力の内、熱源機器が使用する以外の電力消費量とし、照明、コンセントおよび一般動力の電力消費量としている。従って、冷熱用、温熱用および一般電力の合計値が各種建物の総エネルギー消費原単位となる。

2) 相良ら^[4]の研究

名古屋地区の事務所建物を対象とし、1978年から1984年までの期間において、エネルギー消費量の調査を行った。事務所建物を官公庁建物と一般建物に分類し、そのエネルギー消費構造の差異を分析する共に、各種建物・設備の一般特性と年間の一次エネルギー消費量原単位との重回帰分析を行っている。修正年間空調機運転時間、コンピュータ等の特殊な設備の電力負荷を代表するその他用電力負荷、建物全体の電力負荷を代表する三相トランス容量、の3つを独立変数とした重回帰分析により、建物の一次エネルギー消費量原単位の再現性が向上することを示した。ここで、年間の最低月原単位を基準として、それを上回る部分を冷暖房用エネルギー消費量、そして、下回る部分を、年間を通しての固定的なエネルギー消費量とし、それぞれ、変動原単位およびベース原単位と定義している。

3) 片山ら^[5]の研究

九州地域の4都市の事務所ビルを対象として、1983年から1984年における調査で得られた電力、ガスおよび石油の月間使用量に基づいて、エネルギー消費量の分析を行った。各種エネルギー消費量に関する特性を、官公庁、自社ビルおよび貸しビルの建物種別に比較すると共に、冷暖房用消費エネルギー種別により、各建物を8つの空調タイプに分類している。そして、複数の建物・設備特性を独立変数とした重回帰分析により、基本・冷房用・暖房用・総エネルギー消費量の予測精度が向上することを示した。ここで、基本エネルギー消費量とは、照明・衛生・給湯・輸送・換気ファン用の、年間を通じて変動の少ないエネルギー消費量としている。また、年間変動するエネルギー消費量を、冷暖房用エネルギー消費量としている。

4) 大橋ら^[6]の研究

1976年から1985年までの期間における、事務所建物を対象としたエネルギー消費量の調査を基に、空調用エネルギー消費量と外気温との関係を明らかにした。また、冷房用・暖房用・ベース一次エネルギー消費量を従属変数、建物仕様、空調用熱源機器、契約電力等を独立変数とした重回帰分析により、建物のエネルギー管理を行う際の基礎情報となる簡略式を提供している。ここで、ベース一次エネルギー消費量とは、照明、コンセント、衛生、輸送、換気ファン等、年間を通して変動の少ない消費分とし、それ以外の変動する分を、冷暖房用一次エネルギー消費量としている。

5) Scottら^[7]の研究

アメリカの4都市を対象として、地球温暖化により平均気温が上昇した場合の年間冷暖房エネルギー消費量の変化を、日射と湿度が、減少または増大する両ケースについて、DOE2モデルを用いて計算した。地球温暖化が、エネルギー消費量の変化に与える影響は、冷房用と暖房用とで、また、場所によって異なるという結果を示している。また、冷暖房エネルギー消費を削減するためには、建物の高効率化が共通して有効であるものの、地域により異なる冷暖房需要特性に応じて、より詳細な検討が必要であるとしている。

6) 赤林ら^[8]の研究

新潟市における、事務所、店舗、宿泊施設、医療施設、文化施設、教育施設等の合計72件を対象として、エネルギー消費量および熱源設備に関する実態調査を実施し、熱源設備の容量、冷暖房期間および全負荷運転相当時間を明らかにした。そして、調査結果を基に、新潟市における建物用途別設備容量原単位および建物用途別平均全負荷運転相当時間を求めている。また、機器効率を用いて、電力、冷暖房および給湯の二次エネルギー消費量を時刻別に推定し、建物用途別二次エネルギー年間需要原単位を導き出している。

7) Belzerら^[9]の研究

アメリカの商業建物を対象として、地球温暖化による気温上昇が、エネルギー消費に与える影響を分析し、2030年におけるエネルギー消費量の予測を行った。結果として、気温上昇による、冷房用エネルギー消費の増大よりも、暖房用エネルギー消費の削減効果が大きくなるため、地球温暖化により、エネルギー消費は減少するとしている。

8) 陳ら^{[10], [11]}の研究

福岡市と北九州市の事務所、店舗、学校、病院、ホテル、会館およびスポーツ施設からなる7種類の建物833件を対象として、エネルギー消費特性および空調設備容量の実態を調査した。そして、熱源機器・空調方式別の冷暖房シェアを建物用途別に求め、さらに、事務所については、竣工年別に熱源機器の冷暖房シェアを求めている。また、建物用途別に冷温熱源容量と延べ面積との関係を求め、年間総エネルギー・月別エネルギー消費原単位を導き出している。

また、最小月の空調用エネルギー消費量を求めることにより、電力、ガス、油等の月別消費量から、各月の空調用エネルギー消費量を推定する新たな方法を提案し、福岡市と北九州市における各種業務施設の空調用エネルギー消費量を月別に推定している。

9) 辻ら^[12]の研究

近畿地方の民生用電力および都市ガス、全国の家庭用電力に関するエネルギー需要情報を基に、エネルギー需要の気温依存性を利用して、空調および給湯需要を導き出し、その月変動特性と冷暖房度日との関係を明らかにした。また、冷暖房時それぞれの限界温度を月毎に可変のパラメーターとした修正冷暖房度日を用いることにより、エネルギー需要と修正冷暖房度日の相関が強くなることを示した。

10) 三浦ら^[13]の研究

東北地方の庁舎建物 280 件を対象として、エネルギー消費を削減する指針を検討する目的で、エネルギー消費の実態および特性を明らかにした。ここで、建物の断熱性能に大きな影響を与える壁および窓ガラスの断熱状況、冷暖房熱源方式および能力等も同時に調査し、地域（県）・規模（延べ面積）・竣工年代別に、これらの特性を分析している。そして、最終的に、単位延べ面積あたりの総エネルギー消費量、暖房・冷房・給湯・電力用エネルギー消費量を、地域（県）・規模（延べ面積）・竣工年代別に求め、東北地方における庁舎建物に関するエネルギー消費特性を統計的に分析している。

11) Al-Rabghi ら^[14]の研究

サウジアラビアの太陽エネルギー研究所を対象として、電力消費量、室温、気温、日射等のデータを計測し、シミュレーションプログラム DOE2.5 を用いて、冷房用電力消費量を求める方法について検討した。サウジアラビアでは、電力駆動の蒸気圧縮式ヒートポンプチラーによる冷房が主流であり、夏期においては、電力消費量の約 60 %が空調用として利用され、また、電力消費量の年増大率は世界中で最も大きいと報告している。

12) 伊香賀ら^[15]の研究

1990 年産業連関表を利用して、建築設備関連資材の CO₂、NO_x、SO_x、エネルギー原単位を、国内分/海外分、消費支出分/固定資本形成分、生産段階分/流通段階分別に分析した。また、事務所ビル規模別工事実績統計および建設部門産業連関表を利用して、実用的な LCA 手法に利用するための、電気・空調・衛生・昇降機設備の LCCO₂、LCNO_x、LCSO_x、LCE 原単位を示した。

13) 三由ら^[16]の研究

地方自治体が保有する庁舎、学校、保育所・幼稚園、福祉施設、上下水道、清掃工場等の施設の運用時における、「省エネ・省資源管理システム」の構築状況および方法を調査した。それを基に、同システムが複数の施設および管轄部署で活用される場合における、構築と運用方法の課題を検討している。

14) Yik ら^[17]の研究

香港の商業建物を対象として、建物のエネルギー消費効率を評価することを目的として、電力消費量と気候因子の相関を、単回帰分析を用いて調べた。気候因子としては、月平均気温、湿度、全天日射量を検討した。結果として、月平均気温の自乗値が、電力消費量との相関が最も強くなり、一方で、湿度および全天日射量に関しては、電力消費量との相関は強くないことを示している。また、電力消費量は、断熱の種類等、建物特性によっても変化するため、建物特性毎に、電力消費量と気温の相関を求めることが必要であるとしている。

15) Valor ら^[18]の研究

スペインの4都市を対象として、気象変動が電力市場に与える影響を分析するために、地理的条件、平日と休日の違い等を考慮しながら、電力需要と気温の関係を明らかにした。気温が1℃上昇した場合の電力需要の増加幅は、夏期よりも冬期の方が大きいことが、近年においては、夏期における増加幅が、年々、大きくなっていることを示している。また、冷房度日および暖房度日を独立変数として用いることにより、電力需要の再現性が向上することを、回帰分析により明らかにしている。

16) Hwang^[19]の研究

台湾電力により電力供給を受ける、商業、住宅および工業施設を対象として、気温感応度を用いた、空調用電力消費量のマネジメントシステムについて検討した。気温感応度は、需要家毎に、統計的多項回帰法により求めた。計測値と比較しながら、気温感応度による空調用電力消費量の予測値を検証した結果、再現性が良好であることを確認した。この研究に基づいて、台湾電力では、商業および住宅用に、冷房用エネルギー貯蔵および空調機器制御を行い、ピーク電力負荷を低減するマネジメントプログラムを推進している。

17) 高草木^[20]の研究

東京都および横浜市の、エネルギー源が電力だけの事務所ビル6件を対象として、月別の電力・水使用量の実態を調査し、既存建物における過去の実績から、管理基準値（当該建物の諸事情・特性に対する標準的な電力使用量）を簡易に求める方法を提案している。具体的には、電力使用量を目的変数として、その変動要因となる、水使用量、OA化傾向値、電力使用量の月変動パターンおよび月平均気温を説明変数とした重回帰分析を行い、それぞれの変動要因の影響の程度を解析している。

18) 岩渕ら^[21, 22]の研究

関西地域のビジネスホテル2室を対象として、自動計測システムにより、テレビ、冷蔵庫、電気ポット、照明、空調機器等の時刻別電力消費量を、春期、夏期および冬期において計測した。時刻別電力消費量は、ビジネスホテルにおけるライフスタイルの特徴である二山型の分布を示し、また、冷蔵庫および空調機器の消費電力増加に起因して、夏期の電力消費量がその他期に比べて、

2倍近く大きくなることを示している。

19) 早川ら^[23]の研究

全国91棟の業務用建築物について、1997年から1999年におけるエネルギー消費実績値、竣工年度、階数等の建物属性、そして、熱源種別、電力依存率等の空調設備の属性を解析し、エネルギー消費に直接関わる床面積である有効面積を基準として、エネルギー消費原単位を明らかにした。また、レーダーチャートおよびクラスター分析により、有効面積基準エネルギー消費原単位を、電力依存率および有効面積率を基準として5つのグループに分類することで、エネルギー管理を行う際の評価指標を提案している。

20) 山口ら^[24]の研究

建物の特性を反映した電力・熱需要を得ることを目的として、建物内のエネルギー消費機器を細分化し、機器種類別に設置台数、機器仕様および使われ方をモデル化する人員行動モデルの開発を行った。このモデルは、居住者一人一人の行動を確立的にシミュレートすると共に、居住者の行動とエネルギー消費機器の使用の関係を明確に定義することで、エネルギー消費機器から生じる電力・熱負荷を定量化するものである。このように、人員行動モデルと電力・熱需要モデルを接続することにより、気象条件、人員の行動、電力・熱需要削減手法の採否の要因と、電力・熱需要の関係を明確に記述することが可能になるとしている。

21) 韓ら^[25]の研究

首都圏における売場面積1万m²以上の総合スーパーマーケット10件を対象として、エネルギー消費の実態調査を行った。さらに、床用途別のエネルギー消費特性を明らかにすることで、他の総合スーパーマーケットのエネルギー需要量を予測する方法を提案している。具体的には、まず、調査した総合スーパーマーケットにおいて、単位延床面積あたりの時刻別電力、冷暖房および給湯需要を、食品売場、家電売場、レストラン、プレイランド、駐車場、作業場等の11床用途別に求める。そして、他のスーパーマーケットへ適用する際、床用途別の延床面積毎に、これら単位延床面積あたりのエネルギー需要量を乗じることで、スーパーマーケット全体のエネルギー需要量を推定している。また、従来のように、スーパーマーケット全体の単位延床面積あたりのエネルギー需要を用いた推定方法に比べ、韓らの提案する方法の推定精度が高くなることが検証されている。

22) Moral-Carcedo ら^[26]の研究

スペインを対象として、気温変動が電力需要の変動に与える影響を、非線形LSTRモデルを用いて分析した。同モデルを用いることにより、気温変動による電力需要の変動特性を明らかにし、また、冷房度日および暖房度日を求める際の基準温度を、適切に決定することが可能になるとしている。

23) 鳴海ら^[27]の研究

大阪府域の3地域における時刻別電力供給データを基に、気温の変化が地域の電力消費に及ぼす影響を検討することを目的として、電力消費に関する気温感応度の解析を行った。ここで、電力消費に関する気温感応度とは、気温1°Cの上昇に伴って増加または減少する電力消費量のことであり、ヒートアイランド対策を行う際の基礎情報、または、その効果の検証をするために必要な指標となる。これにより、業務用途、住宅用途および業務・住宅用途混在の3地域について、気温変化に伴う電力消費構造の変化に関する地域特性を明確化している。

24) 横山ら^[28]の研究

2000年産業連関表を用いた分析により、2000年時における各種資材およびサービスのエネルギー消費量・二酸化炭素排出量原単位を求め、建築物の環境影響評価のためのデータベースを作成すると共に、建築業における特徴、過去の原単位からの推移等を明らかにした。

25) 小松ら^[29]の研究

地域熱供給を受けている東京都内の中規模賃貸事務所ビルを対象として、電力使用量、地域熱供給施設からの冷水および蒸気使用量の月毎の計測データを基に、エネルギー管理をする際の基礎情報の提供を目的として、建物の冷水および蒸気使用量に影響を与える要因分析を行った。要因分析としては、冷水および蒸気使用量を目的変数として、その変動要因である電力使用量および月平均気温を説明変数とした、重回帰分析を用いている。

26) 二浦尾ら^[30]の研究

大阪府域の事務所建物、ホテル、病院および商業建物を対象として、空調・給湯用として主要なエネルギー源である、電力およびガスに関して、その消費量と気温との関係を分析し、都市域の気温変化が業務建物におけるエネルギー消費に及ぼす影響を定量化した。この際、気温1°Cの変化によって変動する、電力、ガス等のエネルギー消費を、エネルギー消費に関する気温感応度として、定量化を行っている。さらに、大阪市を対象として、都心と郊外の時刻別気温差を考慮した分析も行っている。

27) 平野ら^[31]の研究

東京都における事務所ビルおよび住宅を対象として、エネルギー消費に関する気温感応度の各種算定手法について、その特性および適用性を明らかにし、また、信頼性および妥当性を確認するために、各手法の相互比較を行った。これにより、従来の手法を、気候条件や土地利用形態が異なる他の都市や街区へ適用する際に生じる、誤差要因を明らかにしている。

2-2 エネルギー利用システムに関する従来の研究

2-2-1 我が国におけるエネルギー利用実態

現代の経済および産業活動を維持するためには、石油、石炭、天然ガス、ウラン等の一次エネルギー資源の安定供給は必要不可欠である。しかしながら、我が国のエネルギー自給率は低く、2001年において、原子力を含まない場合は5%^[32]、原子力を含む場合は20%^[32]となっている。

特に、石油に関しては、その多くを中東に依存しているが、政治的な不安定要素もあり、今後の安定供給が懸念される。従って、危機管理の視点からも、複数の一次エネルギー資源をバランス良く組合せたエネルギー利用システムを構築すると共に、自然エネルギー、CGS 排熱等の効果的な取込みにより、一次エネルギー資源の消費量を削減することが急務である。

1999 年度における、我が国全体の最終需要に占める電力の割合は 45 %^[33] となっており、発電効率を考慮すると、一次エネルギー資源の大部分が、電力に変換されて利用されていることになる。よって、一次エネルギー資源の持続的な利用を検討する上で、電力供給の最適化は欠かせない要素である。ここで、我が国における商用系統電源構成（文献 [34]）および CGS の設備容量（文献 [35]）を図 2-3 に示す。図 2-3 において、2005 年度における商用系統電源（水力、原子力および火力）の発電設備容量は、合計で 276 GW となり、1980 年度の 125 GW に比べて、2.2 倍となっている。その中でも、火力発電の占める割合は大きく、2005 年度においては 166 GW と、商用系統電源の発電設備容量 276 GW の 60 % を占める。火力発電は、主に昼間時間帯において、ピーク供給用として稼動するため、図 2-3 に示す火力発電設備の増大は、ピーク電力需要が著しく増大していることを表している。このような状況の中、CGS は、1990 年頃のバブル経済期以降、ピーク電力の削減、経済性および危機管理性の観点から、導入容量が増大し続け、2005 年度における設備容量は 9 GW となっている。これは、2005 年度における商用系統電源の発電設備容量 276 MW に対して 3 % 程度であり、商用系統電源に対する CGS の導入比率は小さいのが現状である。

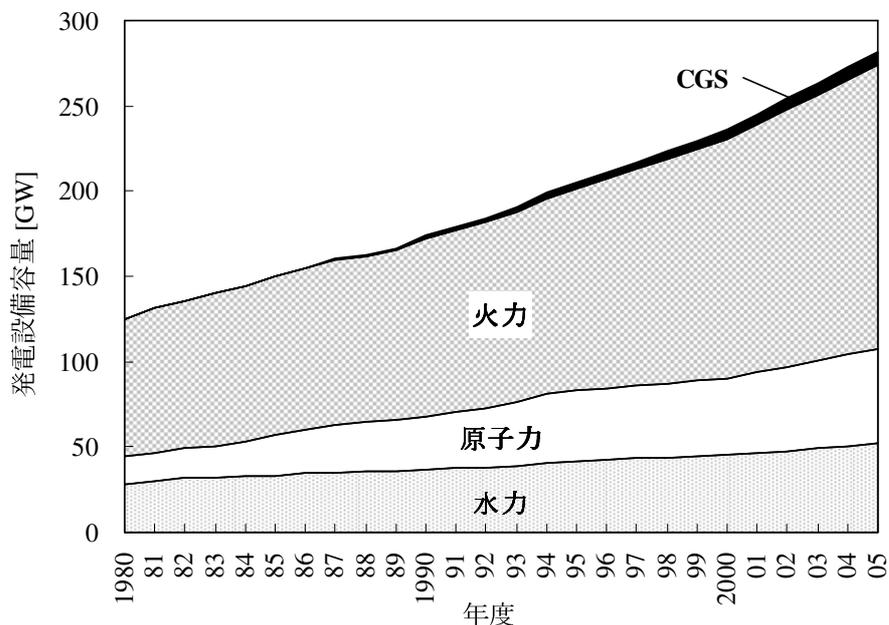


図 2-3 我が国における商用系統電源構成^[34]および CGS の設備容量^[35]

また、我が国における電力の年負荷率（文献 [36]）および電力化率（文献 [37]）を図 2-4 に示す。ここで、年負荷率とは、1 年間の最大電力需要に対する、1 年間の平均電力需要の比率を表し、また、電力化率とは、全エネルギー消費に対する、電気エネルギーの比率を表す。図 2-4 より、年負荷率は、1969 年度に最大 69 % となっているが、その後は、減少し続け、1994 年度には、最

小55%となっている。その後、年負荷率は増大傾向にあり、2003年度には61%にまで上昇している。2003年度における年負荷率の増大は、事故による原発停止のために、需要家が自主的に、夏期の最大電力需要を抑えたことが要因となっている。しかしながら、全体的には、電力の年負荷率は減少傾向にあり、これは、夏期昼間に発生する、1年間の最大電力需要が増大し続けていることを意味している。一方、年負荷率とは逆に、電力化率は増大し続けており、1970年度の26%に対して、2001年度は41%となっており、全エネルギー消費に占める電気エネルギーの割合が増大し続けていることが確認できる。

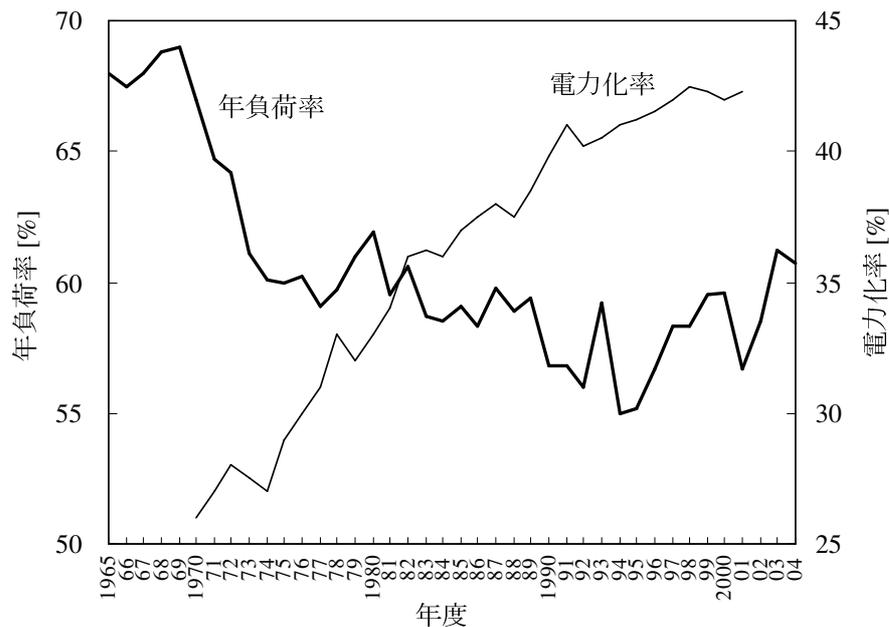


図 2-4 我が国における電力の年負荷率^[36]および電力化率^[37]

図 2-3 および図 2-4 より、電力化率の高いエネルギー利用システムの普及により、特に、夏期昼間における電力需要が増大し、商用系統電源の設備容量を増大させていると言える。その結果、1年間の最大電力需要と平均電力需要の差が大きくなり、商用系統電源の年負荷率を低下させていると考えられる。電力は利便性の高いエネルギーであるが、電力に大きく依存したエネルギー利用は、設備の有効利用および危機管理の面から、最適なシステムとは言い難い。

また、図 2-5 (文献 [38]) に示す我が国の業務部門における用途別エネルギー消費の割合を見ると、電力により供給される動力・照明用エネルギー消費の割合は、1965年度の14%から、2004年度においては35%に増大していることが確認できる。これは、図 2-4 に示す電力化率の増大傾向と同様である。一方で、冷房、暖房および給湯用エネルギー消費の割合は減少している。これは、従来、石油やガスにより供給されていた、冷房、暖房および給湯用エネルギーが、電力駆動のヒートポンプ機器による供給に移行していることが、原因の一つとして考えることができる。冷房、暖房および給湯に必要な温度レベルは数十度と低いため、自然エネルギー、CGS 排熱等の熱源を取込むことが可能である。しかしながら、利便性の高い電力で、冷房、暖房および給湯を賄うシステムに依存した場合、これら熱源の利用可能範囲は小さくなる。

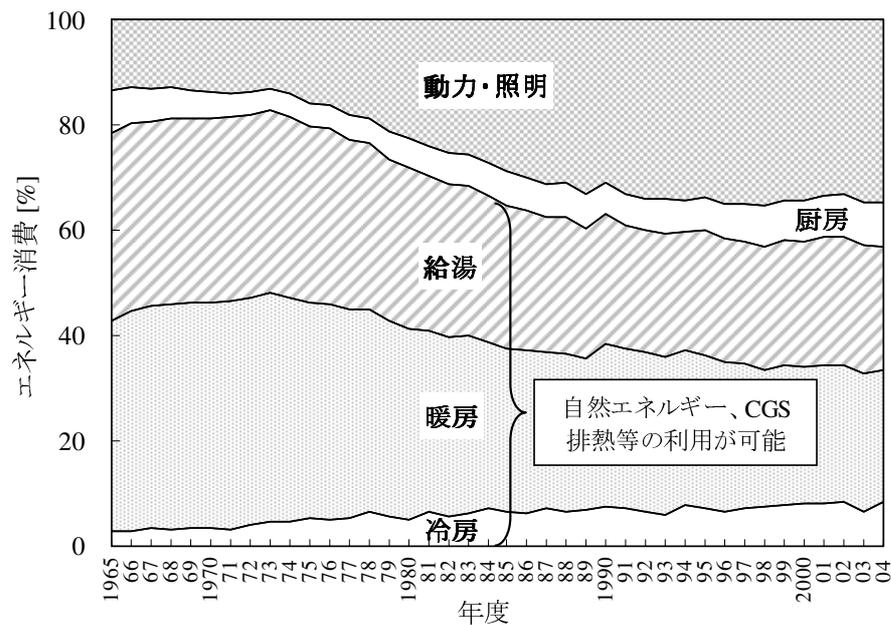


図 2-5 我が国の業務部門における用途別エネルギー消費の割合^[38]と自然エネルギーおよびCGS 排熱の利用可能性

商用系統電源の設備容量を最小化し、年負荷率を高めるために有効なシステムの一つとして、分散電源が挙げられる。その中でも、CGS は、排熱利用による省エネルギーへの大きな貢献が期待されている。しかしながら、上述した通り、電力化率の大きいシステムにおいては、CGS 排熱の利用可能範囲が小さくなり、CGS の省エネルギー性を最大限に発揮することができなくなる。よって、CGS の効果的な導入により、エネルギー利用システムの環境性を高めるためには、CGS の電力利用による、商用系統電源のピーク電力負荷の平準化効果と共に、排熱を最大限に利用するための需要構造を構築することが必要である。このような背景から、本研究では、エネルギー需要を考慮しながら、CGS を中心としたエネルギー利用システムの最適化に関する検討を行う。

2-2-2 エネルギー利用システムに関する従来の研究

1) 海野ら^[39]の研究

ガスタービン CGS を導入した地域冷暖房システムにおいて、電力逆潮による有効性をシミュレーションにより検討した。シミュレーションでは、住宅、業務および商業の地域用途や、その規模等をパラメーターとしたケーススタディーを行い、各システムを、資源性、経済性および環境性の3側面から定量的に評価している。結果として、上記システムを採用した場合、資源性を評価する一次熱効率および一次エクセルギー効率共に高くなった。経済性については、経常費最小となる最適発電容量が地域規模毎に存在し、規模の増大に伴い、その容量は大きくなることが分かった。また、環境性に関しては、発電容量の増大に伴う CO₂ 排出量の低減は僅かなものの、NO_x および SO_x 排出量は大幅に低減できることを示した。

2) 市川ら^[40]の研究

ガスタービン CGS を都市内に導入し、電力託送を行った場合の省エネルギー性をシミュレーションにより検討した。シミュレーションでは、業務、商業、宿泊、医療、住宅等の組合せにより、熱電比分布を基に5地区を設定し、3 MW 級ガスタービンおよびガスエンジンを導入した場合の、電力およびガス消費量を計算した。結果として、業務施設中心地区と住宅中心地区との間で電力託送を行った場合、CGS の有効利用が可能としている。また、業務地区と住宅地区の間において、熱供給パイプラインによる熱託送の可能性についても言及している。

3) 大西ら^[41]の研究

地域冷暖房システム内に設置された CGS について、排熱を地域冷暖房の熱源として有効利用し、その余剰電力を、浄水場および下水処理場に託送するシステムの有効性を、シミュレーションにより検討した。浄水場および下水処理場を電力託送先として選定した理由としては、自治体が保有する諸施設の中でも電力消費量が大きく、また、一般の建物に比べて、年間を通した変動幅が小さいため、安定した託送電力量を確保できるためとしている。シミュレーションでは、各施設のエネルギー消費実態に関する調査結果を基に、電力託送システムによる一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量の削減効果を求め、結果として、一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量共に、10 %近い削減効果が期待できることを示している。

4) 加藤ら^[42]の研究

太陽光発電システム (PV) および CGS の CO₂ 削減効果を評価する際に、商用系統電力の電源構成およびその CO₂ 排出原単位が及ぼす影響を、シミュレーションにより明らかにした。シミュレーションでは、2010 年を対象とした電源計画モデルにおいて、PV および CGS を商用系統電力の代替設備と位置づけ、商用系統側の発電コスト最小化を目的関数とした場合の、エネルギーシステム全体の CO₂ 削減量を算定した。結果として、PV および CGS が、LNG コンバインド以外の電源の代替として導入される場合において、CO₂ 削減効果が高くなることを示した。

5) 見目ら^[43]の研究

太陽光・熱システムと CGS とを組合せた太陽光・熱/CGS ハイブリッドシステムの都市部民生施設への導入を検討するために、その導入による年間コストおよび一次エネルギー消費量削減効果を、動的計画法により求めた。建物容積率が 1,000 % のホテル (熱電比 : 1.4) にハイブリッドシステムを導入し、太陽光を発電に利用せず全て熱利用とした場合、コストおよび一次エネルギー消費量共に削減される結果を示した。一方、同一のシステムを病院 (熱電比 : 0.8) に導入した場合、一次エネルギー消費量は削減されるが、その削減量はホテルより小さく、また、コストは高くなるとしている。

6) 見目ら^[44]の研究

中規模廃棄物処理施設に設置された廃棄物発電システムで生じた余剰電力を、大学、病院、福祉関連の集合住宅等に託送するシステムを想定し、廃棄物焼却施設運用上の制約条件や電力託送

上の制約を考慮して、経済的な廃棄物発電システムの運用を動的計画法により決定し、電力託送先に適した需要家形態を明らかにした。結果として、託送先需要家の年間電力需要が、廃棄物発電システムの売電可能量の約70%以上となった場合に、電力託送システムが経済的になり、また、託送先需要家として病院と集合住宅とを組合せた場合に、最も経済的になることを示している。

7) 辻ら^[45, 46]の研究

業務施設および住宅で構成される都市部のある特定地域（数 km 単位）を対象として、エネルギー供給全般を担う地域特定型の総合エネルギーサービスの導入を想定し、最適なエネルギー供給システムの導入比率を決定する多目的最適化モデルを開発した。モデルにおいては、経済性、省エネルギー性およびCO₂排出量の複合的な評価指標を用いている。また、地域冷暖房システムを想定して、熱源機器、ポンプおよび配管ネットワークの最適化モデルも開発している。このモデルを用いて、コスト最小化を目的関数に設定し、省エネルギー性またはCO₂排出量削減を制約条件とした場合において、最適なエネルギー供給システム代替案と、ガスエンジン、ガスタービン、燃料電池、太陽光等の、最適な分散電源構成比を示している。

8) 村岡ら^[47]の研究

需要成長の不確実性の下、大規模電源と分散電源を選択肢とする電源計画において、リアルオプションの考え方と、リスクを評価するための効用関数を用いることにより、コスト最小化とリスクマネジメントをバランスさせる方法について検討した。一例として、大規模電源および分散電源に対する投資の意思決定段階にリスク回避型効用関数を用いると、分散電源の価格に不確実性がある場合に、分散電源を小さい容量で段階的に投入する方法が選択されることを、シミュレーションにより示している。

9) 岡村ら^[48]の研究

CGS と太陽熱利用システムとのハイブリッドシステムについて、病院に導入した場合の、CO₂削減量および経済性を比較検討し、これら評価関数が最小となる設備容量および運用時間を求めた。最適化手法としては、機器のON/OFFおよび運転台数を表す整数変数を含んだ混合整数線形計画法を用いている。最適化の結果、ハイブリッドシステムを導入することにより、約43%のCO₂削減が期待でき、同時に、システムを導入するための限界費用を定量的に示している。

10) Hida ら^[49]の研究

Unified Modeling Language (UML)を用いて、都市における低環境負荷型エネルギー利用システムの最適化を支援するオブジェクト指向モデルの開発を行った。モデルは、複数の建物、設備、地域をネットワーク化し、電力および熱エネルギーの相互利用により、環境負荷を低減し、導入設備を最小化することを目的としている。このモデルを、事務所、住宅、ホテル、病院等の複数の建物用途で構成される地域に適用し、エネルギーセンターで発生する電力および熱エネルギーを複数の建物で融通した場合、融通しない場合に比べて、12%の一次エネルギー削減効果と、4%の二酸化炭素削減効果が期待できることを示している。

11) 木方ら^[50]の研究

CGSを導入する場合としない場合について、燃料調達から設備建設・運用時までのエネルギーフローに基づくCO₂排出量の評価をシミュレーションにより行い、CO₂排出量において優位性が得られるCGSの性能について考察した。シミュレーションの結果として、CGSを導入せず、商用系統電力および蒸気圧縮式ヒートポンプを利用したシステムのCO₂排出量が最も少なくなるとしている。また、原子力、水力発電等、CO₂排出量の少ない電源で構成される商用系統電力と比較した場合、CGSの優位性を高めるには、排熱利用よりも、発電効率を向上させる方が有効であると結論付けている。

12) 小田ら^[51]の研究

系統電源と需要家の機器構成を一つのモデルで表現し、エネルギーコストを最小化するようなエネルギー技術の普及可能性と、CO₂削減に配慮した技術構成を、シミュレーションにより中長期間で評価した。結果として、日本全体のエネルギーコストを削減するためには、CGSによるピーク電力負荷低減、電動式給湯ヒートポンプによるボトム電力の上昇により、商用系統電力の負荷平準化を進めることが必要としている。一方で、電動式給湯ヒートポンプの導入により、商用系統のベース電源として石炭火力が増設された場合、CO₂排出量が増大する可能性があることを指摘している。

13) 山口ら^[52]の研究

2棟の事務所ビルを連系し、片方の建物に設置したCGSから得られる電力および蒸気を、他方の建物に融通するシステムを提案し、各建物に個別にCGSを設置するシステムとの省エネルギー性および経済性の違いを、シミュレーションにより明らかにした。結果として、2棟の事務所ビルを連系することにより、CGSの高負荷運転が可能となり、省エネルギー性および経済性共に改善されることを示した。また、複数の建物間連系を実現するためには、建物群を集約することによりCGS排熱を有効利用し、電力を他の建物に託送するシステムが理想であるとしている。

2-3 大学を対象としたエネルギー利用に関する従来の研究

民生用建物の一つとして大学施設が挙げられる。大学は、事務所、講義室、研究室、図書館・情報系建物、厚生棟等、様々な建物用途の集合体であり、エネルギー需要特性は建物用途毎に異なる。さらに、学科、学部、キャンパスの立地条件によっても、エネルギー需要特性は大きく変動する。従って、エネルギー利用システムは、それらの需要特性に応じて最適化することが必要となる。本節では、以下に、大学を対象としたエネルギー利用に関する従来の研究をまとめた。

1) Atharら^[53]の研究

アメリカのテキサスA&M大学を対象として、15 MWのガスタービンコンバインドサイクルCGSの最適運転方法について検討した。エネルギー最適化プログラム(EOP)を用いて、同CGSの最適運転モードを検証した結果、現状の運転モードと比較して、74万ドルの年間経費が削減可

能になるとしている。また、37.4 MW のガスタービンを増設することにより、さらに、470 万ドルの年間経費が削減可能となり、その場合、設備投資額は 3.8 年で回収できるとしている。

2) Spakovsky ら^[54]の研究

スイスのローザンヌ大学を対象として、7 MW のガスタービン CGS の経済性最適化運転を実現するための数学モデルについて検討した。経済性最適化のモデルとして、線形計画法 (MILP) を用い、時刻別の電力および熱需要を基に、商用系統電力からの買電、商用系統電力への売電、燃料等の価格を考慮しながら、CGS のオン・オフ運転をモデリングしている。また、今後の MILP の問題点として、蓄熱槽を導入した場合の蓄熱および放熱特性が、CGS の運転に与える影響等を挙げている。

3) Bidini ら^[55]の研究

イタリアのペルージャ大学を対象として、1 MW CGS の性能特性を、実際の電力および熱需要を基に解析した。CGS の排熱利用効率は、気温に影響を受ける熱需要に応じて、大きく変化することを示した。また、経済性については、初期投資コストが大きく影響して、同種の CGS の平均的な回収年限よりも長くなるとしている。ここで、吸収式冷凍機を採用した場合においては、発電出力が大きくなるため、吸収式冷凍機の投資分を考慮しても、回収年限を現状よりも短縮できるとしている。

4) 伊永ら^[56]の研究

徳島大学を対象として、電気、ガスおよび A 重油の消費特性、また、これらの消費に伴う二酸化炭素排出量を、それぞれ学部別に求めた。二酸化炭素排出量を学部別に分析した結果、医学部および工学部が大きいことを示している。同時に、エネルギー種別では、電力消費によるものが大きく、その中でも、空調用および待機時消費電力の割合が大きいことを示している。さらに、照明用電力消費量に関して、省エネルギー対策として、高効率ランプおよび照明制御を行った場合、約 46 % の照明用電力消費量が削減可能になるとしている。

5) Dettenkofer ら^[57]の研究

ドイツのフライブルク大学病院を対象として、European Eco-Management and Audit Scheme (EMAS) が、病院における環境保全の改善手段として適用可能かどうかを検討した。まず、同大学における、化石燃料資源、水、紙等の消費量データを基に、CO₂、NO_x、SO_x、水、その他固体等の自然環境への排出量を求めた。そして、同法の適用により、省エネルギー、節水等の効果以外に、病院の環境管理体制、環境的安全性、公衆イメージ等の改善が可能になるとしている。

6) Stefano^[58]の研究

オーストラリアのメルボルン大学を対象として、部屋を 11 用途に分類し、現状の 1.2 m 蛍光灯と、代替案となる 4 種類の省エネルギー型照明の比較を行った。4 種類の代替案を採用した場合、現状の 1.2 m 蛍光灯に対して、それぞれ、14 %、21 %、24 % および 65 % の省エネルギー効果が期

待できることを示した。そして、65%の省エネルギー効果をもたらす代替案を採用した場合は、大学の電力消費による二酸化炭素排出量を約10%削減できるとしている。また、経済性分析では、電気料金が安いこと、代替案の初期投資が大きいこと等の理由から、ほとんどの代替案が有効でないとしている。

7) Bidini ら^[59]の研究

イタリアのペルージャ大学を対象として、天然ガスを燃料としたCGSの導入による、二酸化炭素排出量の削減効果について、同一地域における他の施設と比較しながら、検討を行った。結果として、高効率CGSを導入した場合、20%以上の削減効果が期待できるとしている。

8) Nagayoshi ら^[60]の研究

湘南工科大学を対象として、商用系統に連系された100kWのPVに、345kWhのバッテリーを備えた設備による、ピーク電力需要の削減効果を検証した。ピーク電力需要は14時頃に発生するのに対して、PVの発電出力は12時頃にピークとなり、両者には2時間のずれが生じる。ここで、PVをバッテリーと組合せて利用することにより、ピーク電力の発生する期間において、昼間のピーク電力需要が7%削減可能であることを、実測を基に示している。

9) 伊香賀ら^[61]の研究

都市型キャンパスである、明治大学リバティタワーを対象として、高効率設備の導入や、設備の保守・更新への対応等の工夫により、竣工後の運用改善を通して、環境配慮型建築を実現した。自然換気制御、空調インバーター制御、Hf型照明器具、エスカレーターの人感センサー制御、駐車場換気ファンのインバーター制御、水蓄熱式ヒートポンプ冷凍機により、約40%の一次エネルギー消費量の削減効果が期待できるとしている。

10) 蜂巢ら^[62]、早川ら^[63]の研究

都市型キャンパスである日本大学理工学部駿河台校舎を対象に、将来の改修や建替え時の計画等に反映させることを目的として、省エネルギー計画、二酸化炭素排出量の削減および経済性を検討した。省エネルギー対策として、年間を通してほぼ一定となる照明用電力消費量については、人感センサーの設置やHf型照明器具への変更等が有効であるとしている。また、契約電力の問題としては、電力需要がピークとなる夏期昼間において、ターボ冷凍機の電力消費量が契約電力値の維持に大きな障害になりつつあると指摘している。

11) Luz-Silveira ら^[64]の研究

アメリカのサンディエゴ州立大学を対象として、機器更新時における、ガスタービンCGSの最適導入を目的として、熱力学の第1および第2法則による評価・解析を行った。減価償却期間および10年間の最大省エネルギー量に基づいた機器選定と、エクセルギー経済性解析に基づいた機器選定において、選定される最適機器が異なるという結果を示している。

12) 李ら^[65]の研究

九州大学を対象として、各学部、事務局および図書館の電力およびガス消費特性を調査し、これを基に、各建物用途のエネルギー消費原単位を推定した。また、講義室および研究室をモデル建物として、建物方位、断熱性能、窓種類・面積、庇形態等を変化させた場合の年間熱負荷係数（PAL）計算を行い、建物外被計画による省エネルギー効果として、断熱材と、過大な窓面積を避けることが基本要件であるとしている。さらに、空調システムに関する省エネルギー効果について、空調エネルギー消費係数（CEC/AC）で評価した結果、負荷変動の大きい建物の場合は、ファンのインバーター制御、ポンプの台数・絞制御が有効であると結論付けている。

13) Gomez-Amo ら^[66]の研究

スペインのバレンシア大学を対象として、照明の最適制御および太陽光発電システムの導入による、省エネルギー効果、二酸化炭素削減効果および経済性を評価した。結果として、照明の最適制御により約35%の電力消費量の削減効果があり、また、それに伴う照明の発熱量の抑制効果により、空調用エネルギー消費量を10%削減できることを示した。太陽光発電による効果も含めると、年間で4.49 t-CO₂の二酸化炭素削減効果があり、制御およびシステム導入のための初期投資は、9年間で回収できると見積もっている。

14) 高田ら^[67]の研究

広島大学を対象として、キャンパス内の福利施設の水・ガス使用量を調査し、各季節の日・時刻変動の実態を明らかにした。結果として、食堂および理容室においては、水使用量とガス使用量の間強い相関があることを示した。また、施設内各店舗の来客者数等の基礎データと、水・ガス使用量との関連分析を行った結果、正の相関があることを示している。

15) Barelli ら^[68]の研究

イタリアのペルージャ大学を対象として、建物のエネルギー診断法を提案した。まず、大学を地理的要素により6つに分類し、また、教室、事務所および研究室の用途毎に分類することにより、それぞれの利用係数を決定した。次に、学生、職員および研究者毎に、単位面積あたりのエネルギー消費指標および利用者指標を定義した。これらを基に、建物の築年数および状態を考慮した上で、年間の熱エネルギー消費解析を行い、一部の建物において断熱の改善が必要であることを示した。

16) 東ら^[69]の研究

九州大学を対象として、福岡市郊外へのキャンパス移転を契機に、エネルギー供給システムの最適化に関する検討を行った。移転先の新キャンパスにおいて、現段階で計画されている空調システムの仕様を基に、中央供給方式と個別分散型方式、電気式とガス式の比較をシミュレーションにより行い、空調用エネルギー消費特性およびランニングコストに関する比較検討を行った。中央供給方式と個別分散型方式の比較では、エネルギー消費量およびランニングコスト共に、中央供給方式の方が2倍近く大きくなり、また、電気式とガス式の比較では、エネルギー消費量は

ガス式が、ランニングコストは電気式の方が大きくなると結論付けている。一方で、中央供給方式は、省エネルギー対策がしやすく、また、適切な運用管理の実現性が容易であるとの見解を示した上で、これらの対策の検討については今後の課題としている。

17) 松崎ら^[70]の研究

慶應義塾大学を対象として、放射エクセルギーの概念を用いて、地域の熱環境を総合的に評価する方法を検討した。サーモグラフィで土地被覆の表面温度を、気温計で環境温度を測定し、これらの温度差から放射エクセルギーを計算している。これにより、夏期昼間の高温化に寄与する土地と、冷却効果を有する土地を特定し、地域全体のエクセルギー収支を定量的に評価することを可能とした。

18) Nayak ら^[71]の研究

アメリカのメリーランド大学を対象として、10,000 tの冷凍能力を有する 27 MW のガスタービンコンバインドサイクル CHP プラントのモデリングについて検討した。市販のソフトウェアを使用して、夏期におけるガスタービン発電出力増大のための吸気冷却と、節炭器を用いた冷却システムをモデリングし、それらの省エネルギーおよび省コスト効果を、定量的に分析している。

19) Colella ら^[72]の研究

アメリカのスタンフォード大学を対象として、ネットワーク化された 200 kW 燃料電池 CGS の経済性および環境性を、シミュレーションにより検討した。シミュレーションでは、燃料電池 CGS の設置数および場所を変化させながら、数々のシナリオについて検討した。結果として、ピーク電力需要の 68 %の容量となる、84 セットの燃料電池 CGS を導入した場合において、コスト削減効果が最も大きくなり、同時に、環境性も高くなるとしている。また、設置場所としては、継続的に大きい電力需要が見込まれる研究室に設置した場合に、経済性が高くなるとしている。

20) 岡田ら^[73]の研究

熊本大学を対象として、専門家（施設部）とユーザー（学生）という異なる視点を持つ参加主体による大学施設整備目標策定のために、エネルギー利用に関する項目を含んだ、様々な整備項目の明確化と、その重要度を求める手法の構築について検討した。結果として、ユーザーは、大学生活での快適な活動環境のための整備を最も重要視し、一方、専門家は、ユニバーサルデザインの導入に関する技術提供を最も重要視していることを明らかにした。

21) 早川ら^[74]の研究

日本大学を対象として、理工学部駿河台校舎に大量の個別分散型冷暖房機を導入した場合の、停止忘れという問題点に注目し、その解決策として、中央からの一斉一旦停止を行うことを検討した。ここで、一斉一旦停止後、利用者が引続き利用する場合は、利用者自身が運転を再開することができることとし、端末での自由な運転と、中央からの一斉一旦停止操作を融合させていることから、ハイブリッド運転方式と呼んでいる。この運転方式により、同校舎の電力消費量の約

5%を削減することが可能になると結論付けている。

22) 千田^[75]の研究

同志社大学のエネルギー変換研究センターに導入されているCGSについて、計測データを基に、省エネルギー性、環境性および経済性に関する評価を行った。省エネルギー性について、排熱を全て有効利用した場合、CGSのエネルギー負荷の熱電比は1.8と高い値となるものの、実際には1.0であり、省エネルギー効果を高めるためには、排熱の有効利用が必要であると指摘している。また、CGSの経済性は高く、特に、商用系統の火力発電と比較した場合においては、大きなCO₂削減効果も期待できるとしている。さらに、環境性と経済性の両面を高めるためには、総合熱効率は少し低下するものの、CGSの電力負荷を大きくすることが有効であるとしている。

23) Barelli ら^[76]の研究

イタリアのペルージャ大学を対象として、CGSのエネルギー変換効率を最適化するための、診断的な方法論について検討した。最適化プロセスは、ニューラルネットワークおよびファジー理論をベースとした、モジュールアーキテクチャーにより構成され、異なるシステムへの適用性を向上させている。これにより、異常状態の存在を明らかにし、システム故障と計装誤動作間における要因を局在化することが可能になるとしている。また、モジュール健全状態の評価と、潜在的な故障についての分類を行っている。

24) 浅野ら^[77]の研究

名古屋大学東山キャンパスを対象として、キャンパス全体および各建物の電力消費量の実態調査を行い、建物用途別の電力消費量を算定した。これより、電力消費量に占めるベース電力の割合が大きいことを確認し、その削減策の一つとして、夜間および休日におけるパソコンや情報ネットワーク機器等の待機電力の削減効果を検討した。結果として、電源オフやプラグを抜くこと等の対策により、工学系の事務室において約6%、研究棟全体において約1%の削減可能性があることを示している。

25) 早川ら^[78]の研究

豊橋技術科学大学を対象に、商用系統電力へのピーク電力負荷低減と、排熱の有効利用による高効率な空調システムの実現を目的として、実需要を基に、CGSの導入効果をシミュレーションにより検討した。その結果、コストが最小になるようにDSS (Daily Start and Stop) 運転を行うことで、一次エネルギー消費量を約15%、コストを約5%削減できる可能性があることを示した。

26) Pavlas ら^[79]の研究

病院および隣接する大学施設を対象として、現状のCGSに、再生可能エネルギーを後から取込む代替システムについて検討した。代替システムとしては、バイオマスを燃料とした発電および熱供給システムの増設を検討し、また、全ての代替システムは、現状設備を最大限に利用することが制約条件として与えられている。燃料の価格や、自然エネルギー利用に対する国の支援等を

考慮しながら、代替システムを検討した結果、経済性を高めるためには、バイオマスを燃料としたボイラー、二酸化炭素排出量を最小化するためには、バイオマスを燃料としたCGSを増設するシステムが、それぞれ、有効であるとしている。

27) 謝ら^[80]の研究

山口大学を対象として、総電力消費量から空調用電力と非空調用電力を分離する方法を提案した。実測値を基に、電力消費量と気温との関係を明らかにした上で、気温低下に伴い増大する電力消費量を暖房用、気温上昇に伴い増大する電力消費量を冷房用として扱うことで、総電力消費量から空調用電力を特定し、それ以外の部分を非空調用電力としている。このように空調用電力を総電力消費量から分離することにより、電力ピークカット対策や、空調システムの最適化を検討する上で有用な基礎データの提供を可能としている。

2-4 本研究における検討項目

上述の通り、エネルギー利用システムに関して、需要と供給の両側から、様々な研究がなされている。しかし、それらの多くは、エネルギー需要のみに関する研究、または、供給システムのみに関する研究であり、最終利用形態におけるエネルギー需要と供給システムとの最適な組合せについて、検討している例は少ない。なお、本研究では、最終利用形態におけるエネルギー需要を、電力およびガス消費量等ではなく、最終的に人間が利用する段階での電力、冷暖房、給湯等のエネルギー需要として捉えている。

また、著者を含む研究グループでは、1-2 節で説明した、クラスター型エネルギーマネジメントシステム（CEMS）を導入し、エネルギー利用システムの省エネルギー性および環境性向上についての検討を行っている。本研究では、CEMSを実現するための基礎研究としての位置付けも含め、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスを一例として、エネルギー利用システムの最適化に関する検討を行う。以下に、本研究における検討項目を示す。

- ① 需要のエクセルギーに見合った供給システムの構築
- ② 複数のシステム・建物・需要家間におけるエネルギーの相互利用
- ③ 需要家単位での環境負荷の総量評価
- ④ 商用系統の電源構成と協調した分散電源の導入

①に関しては、まず、電力およびガス消費量等の実態調査を基に、機器の効率特性等を用いて、最終利用形態におけるエネルギー需要を求め、次に、需要のエクセルギーに見合った要素機器導入および供給システムの構築を検討するものである。例えば、電気式空調機器の消費電力は、電力需要として扱われる場合が多いが、最終利用形態では、エクセルギーの小さい冷暖房需要に変換される。従って、電力需要の中から、空調用電力需要を分離し、冷暖房需要として扱うことで、自然エネルギー、CGS 排熱等、エクセルギーの小さい熱源の利用可能範囲とすることができる。

このように、エネルギー需要のエクセルギーに見合った供給システムを構築することで、化石燃料資源の消費量を低減することが期待できる。

②に関しては、電力および熱エネルギーを、単一のシステム、建物および需要家のみにおいて利用するのではなく、複数のシステム、建物および需要家間で相互利用することである。例えば、空調用熱源としてCGSの排熱利用を検討する際、複数の部屋および建物に熱エネルギーを供給できる中央熱源方式空調システムを最適に構築することで、排熱を最大限に利用することが可能となる。同時に、CGSの発電電力を他の需要家へ託送することで、CGSの電力負荷率を高め、結果として、CGSの発電効率を向上することが可能となる。このように、複数の建物、需要家等でエネルギー利用を行うことで、供給システムの高効率運用を実現するためのシステム環境を構築することが期待される。

③に関しては、発電および空調設備等を評価する際、要素機器単体の効率を評価するのではなく、それらを複合的に組合せた上で、需要家単位における環境負荷の総量を評価するものである。例えば、CGSを評価する際、CGS総合熱効率が用いられる場合があるが、これは、発電効率と熱利用効率の単純和であり、電力と熱エネルギーのエクセルギーの違いを適切に表現することができない。また、電気式ヒートポンプ機器を評価する際のCOPは、分母が二次エネルギー換算値であるため、ガス焚吸収式冷温水発生機のCOP等と、同軸での評価ができない。よって、同軸でのシステム評価を可能とするために、一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量の総量を評価指標として用いる。

④に関しては、ある需要家において、商用系統電力を利用するか、CGS等の分散電源を導入するか、という選択は現実的に大きな課題であり、多くの場合、両者の選択は、経済性指標により比較検討されながら決定される。一方で、エネルギー供給の安定化、危機管理等の観点から、商用系統電力における電源構成の最適化と、石油依存度の低減が求められている。そのために、複数の分散電源の協調的な導入により、商用系統電力の負荷平準化を実現することが、有効な方法の一つとして考えられる。本研究では、商用系統電力の負荷平準化を評価指標として取入れ、商用系統電力と分散電源の協調を考慮した、エネルギー利用システムについての検討を行う。

第3章 慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス(SFC)のエネルギー需要実態

3-1 エネルギー需要調査の目的

本研究は、低環境負荷型のエネルギー利用システムを構築することを目的としている。エネルギー利用システムを検討する際、その構成要素である、CGS、空調用熱源機器等の要素機器の特性を把握した上で、それらを複合的に組合せ、システム全体の環境負荷を評価することが重要である。ここで、システム全体の環境負荷は、電力、冷暖房、給湯等のエネルギー需要を賄うために、各要素機器が消費する一次エネルギーにより生じるものである。実際の運転状況下においては、要素機器の熱効率特性は、季節および時刻別に大きく変化するエネルギー需要に応じて、複雑に変化することが予想できる。従って、要素機器の複合体であるエネルギー利用システムの環境負荷について、異なる要素機器の組合せを計算シミュレーションにより評価するためには、まず、エネルギー需要に関する情報を適切に把握することが必要となる。

本研究では、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス（SFC）を一例として取上げ、2004年11月1日から2005年10月31日の期間における電力およびガス消費量の調査を行った。そして、これを基に、季節および時刻別に、電力およびガス消費量を空調システム別に推定し、さらに、部分負荷特性および気温依存性を考慮した熱源機器効率を用いることにより、時刻別の電力および冷暖房需要を推定する。また、他の大学施設への適用を視野に入れ、事務所、講義室、図書館・情報系および研究室の建物用途別にも、エネルギー需要を推定する。

3-2 建物および設備情報

3-2-1 建物

SFCは神奈川県藤沢市に位置し、1990年、総合政策および環境情報学部として開設された郊外型キャンパスである。その後、1994年に大学院政策・メディア研究科、2001年に看護医療学部、そして、2005年に大学院健康マネジメント研究科を開設した。現在、約5,000人の学生と200人の教職員が在籍している。

ここで、SFCの建物および主要機器配置を図3-1に示す。建物のほとんどが1990-1992年の間に竣工されたものである。また、図中の黒線は、中央熱源方式（ガス）空調システムの配管網であり、本館地下に設置されている熱源機器から各建物に冷温水が供給されている。なお、SFCには、図3-1に示す大学の他、中学・高校、情報基盤センターおよび看護医療学部が隣接している。中学・高校および情報基盤センターに関しては、SFCと受電ポイントおよび配電系統が同じであるが、空調システムは、それぞれ、別系統となっている。

また、表3-1に、SFCの建物一覧表から得た情報を基に作成した、SFCの建物情報を示す。SFCは森に囲まれ、周辺は事務所・店舗等が少なく、住宅も疎らな場所である。本館および研究棟A-Eは5階建てであるが、全体的に階数は少なく、キャンパス全体の容積率は約21%である。

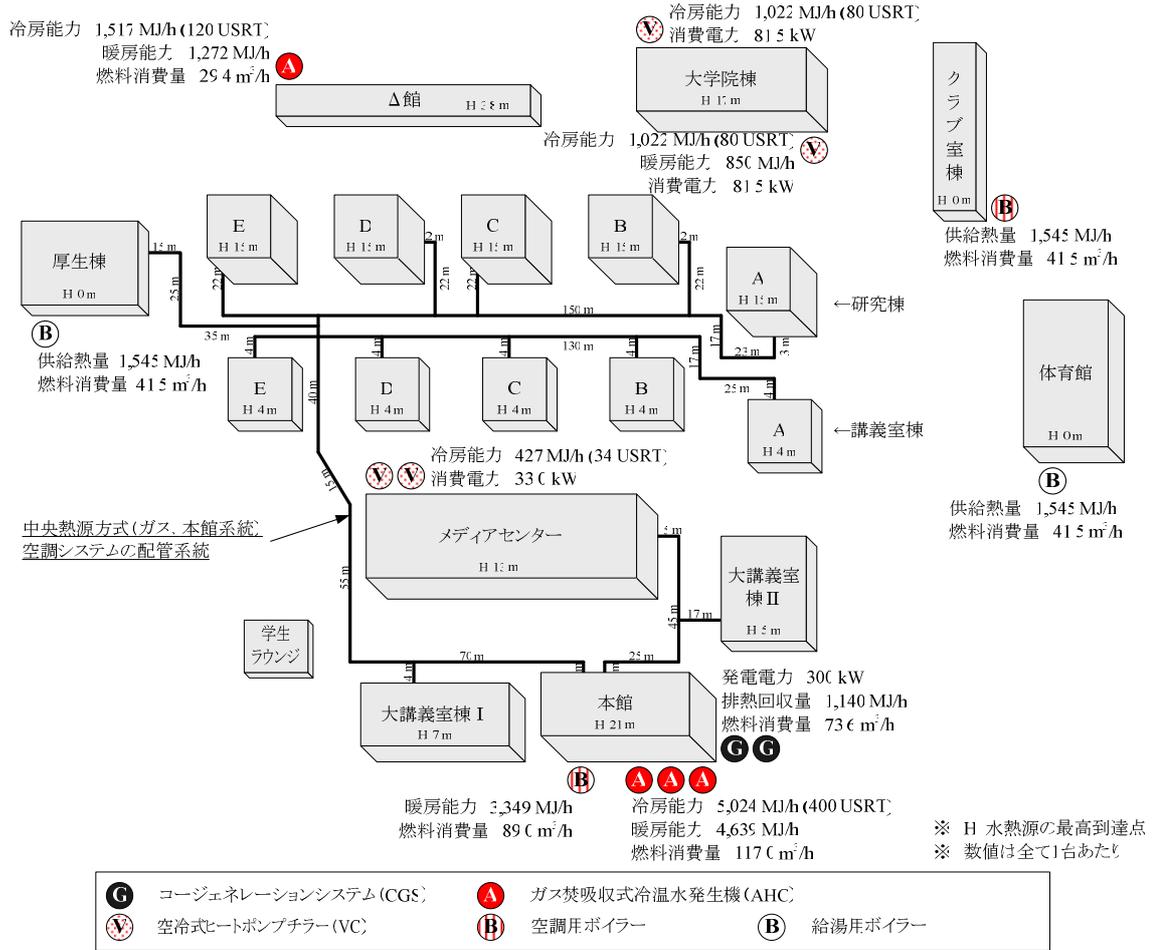


図 3-1 SFC の建物および主要機器配置図

表 3-1 SFC の建物情報

建物名称	構造	階数		竣工年	延べ面積 [m ²]
		地上	地下		
大学					
本館	RC・S	5	1	1990	4,972
講義室棟 A-E	RC	2	0	1990, 1991	837 - 899
大講義室棟 I	SRC	3	1	1990	3,004
大講義室棟 II	RC・S	2	0	1992	2,225
研究棟 A	RC	5	0	1991	2,270
研究棟 B, C	RC	5	0	1990	4,871
研究棟 D, E	RC	5	0	1990	4,871
メディアセンター	RC	4	1	1991	7,066
大学院棟	RC	4	0	1994	3,671
Δ館	S	2	0	2000	2,532
厚生棟	RC	2	1	1990	3,549
体育館	RC・S	3	0	1991	4,001
クラブ室棟	RC	2	0	1991	1,057
小計					48,378
中学・高校					13,260
その他 (含: 情報基盤センター)					4,029
SFC 合計					65,667

3-2-2 受電および発電設備

商用系統からの受電電力、本館地下に設置されているガスエンジン CGS および Δ (デルタ) 館に設置されている燃料電池 CGS の発電電力により、SFC の電力需要を賄ってきたが、Δ 館の燃料電池 CGS は 2005 年 3 月末日をもって運用を終了した。表 3-2 に、SFC の設備仕様書から得た情報を基に作成した、SFC の受電および発電設備の概要を示す。受電電力は隣接する中学・高校および情報基盤センターに供給されるが、看護医療学部は受電ポイントが別である。また、ガスエンジン CGS は、年間を通して平日および土曜日の 8 時 - 20 時 30 分の時間帯で定格運転している。ガスエンジンの排熱は、夏期は温水吸収式冷凍機に投入され冷水として、冬期は熱交換器を介し温水として、それぞれ、中央熱源方式 (ガス) 空調システムの熱源として利用されている。

表 3-2 SFC の受電および発電設備の定格値

受電設備	電圧：6,600 V、契約電力：2,200 kW
ガスエンジン CGS (本館)	導入時期：2000 年 7 月 容量：300 kW×2 台 燃料消費量：73.6 m ³ /h (都市ガス 13A) ×2 台 発電効率 (HHV 基準/発電端)：0.32 発電効率 (HHV 基準/送電端)：0.29 (冬期)、0.28 (夏期) 6,600 V - 37.9 A×2 台 - 4 P - 50 Hz - 0.8 Pf
熱交換器	温水供給熱量：2,280 MJ/h×1 台、熱利用効率：0.34 (HHV 基準)
温水吸収式冷凍機	冷水供給熱量：1,520 MJ/h×1 台、熱利用効率：0.22 (HHV 基準)
燃料電池 CGS (Δ 館)	導入時期：2000 年 7 月 容量：100 kW×1 台 燃料消費量：22.0 m ³ /h (都市ガス 13A)、排熱回収量：419 MJ/h 210 V - 50 Hz ⇒2005 年 3 月末日で運用停止

3-2-3 空調設備

SFC に導入されている空調設備の定格値情報を、表 3-3 に示す。なお、表 3-3 は、SFC の空調設備仕様書から得た情報を基に作成したものであるが、より詳細な情報を付録 1 に示す。SFC の空調システムは、表 3-3 に示す通り、中央熱源方式 (ガス)、中央熱源方式 (電気) および個別熱源方式に大別できる。中央熱源方式 (ガス) の熱源機器としては、本館地下に吸収式冷温水発生機および空調用ボイラーがあり、図 3-1 の太い黒線で示す配管経路に沿って、6 月 16 日 - 11 月 15 日の期間は冷水、11 月 16 日 - 6 月 15 日の期間は温水を供給している。運転時間は平日および土曜日の 9 - 20 時である。一方、Δ 館の吸収式冷温水発生機は、Δ 館のみへ供給しており、OA 機器の冷却が主目的であるため 24 時間運転している。中央熱源方式 (電気) においては、メディアセンターおよび大学院棟に、それぞれ、空冷式ヒートポンプチラーが設置され、24 時間稼働している。個別熱源方式では、各建物に多くのパッケージエアコンが導入されているが、特に、メディアセンターおよび研究棟 A - E においては、その導入容量が大きい。

表 3-3 SFC の空調設備の定格値

機器名称	台数	冷房能力 [MJ/h]	暖房能力 [MJ/h]	消費電力 [kW]	ガス消費量 [m ³ /h]
中央熱源方式 (ガス、本館)					
導入時期：1990年3月					
吸収式冷温水発生機	3	5,024	4,639	72.0	117.0
空調用ボイラー	1	—	3,349	14.9	89.0
冷温水循環ポンプ	—	—	—	164.0	—
AHU* ¹ / FCU* ²	—	—	—	254.4	—
中央熱源方式 (ガス、△館)					
導入時期：2000年6月					
吸収式冷温水発生機	1	1,517	1,272	8.7	29.4* ³
補機 (冷却塔、ポンプ類)	—	—	—	37.7	—
AHU / FCU	—	—	—	12.4	—
中央熱源方式 (電気、メディアセンター)					
導入時期：1991年3月					
空冷式ヒートポンプチラー	2	427	—	33.0	—
補機 (ポンプ類)	—	—	—	7.4	—
AHU / FCU	—	—	—	130.4	—
中央熱源方式 (電気、大学院棟)					
導入時期：1994年3月					
空冷式ヒートポンプチラー	2	1,022	—	81.5	—
補機 (ポンプ類)	—	—	—	11.0	—
AHU / FCU	—	—	—	72.1	—
個別熱源方式 (電気、SFC 全体)					
パッケージエアコン	—	4,068	3,092	452.2	—

*1 エアハンドリングユニット、*2 ファンコイルユニット、*3 燃料電池の排熱投入時の値
注) 台数の欄に入力がある項目に関しては、数値は全て1台あたり

3-3 電力および空調用ガス消費量の調査結果

3-3-1 日電力消費原単位

2004年11月1日から2005年10月31日までの365日間における、単位延べ面積あたりの1日の電力消費量(日電力消費原単位)の調査結果を図3-2に示す。ここで求めた1日の電力消費量は、受電電力量とCGS発電電力量の合計である。なお、CGS発電電力量の一部は、ガスエンジン本体の補機動力の他、温水吸収式冷凍機の補機動力、ガスエンジンの排熱から製造した冷温水を搬送するためのポンプ動力およびCGS室の給排気ファンの動力として消費される。また、延べ面積には、SFCと受電ポイントおよび配電系統が同じである中学・高校および情報基盤センターの延べ面積も含んだ数値、65,667 m²を用いた。気温計は、本館5階の機械室内の外気取込用ダクト内に設置されており、その位置は外壁から室内方向へ約1mの所である。本研究で用いたSFCの主な計測項目を表3-4に示す。

表 3-4 エネルギー消費に関する計測項目

項目	単位	計測周期	計測方法
気温	°C	1時間	自動
受電電力	kW	1時間	自動
受電電力量	kWh	1日	手動
発電電力量 (ガスエンジン CGS)	kWh	1時間 / 1日	自動 / 手動
発電電力量 (燃料電池 CGS)	kWh	1日	手動
ガス消費量 (ガスエンジン CGS)	m ³	1時間 / 1日	自動 / 手動
ガス消費量 (燃料電池 CGS)	m ³	1日	手動
ガス消費量 (空調用)	m ³	1日	手動
ガス消費量 (給湯・調理用)	m ³	1ヶ月	手動

図 3-2 の横軸は、1 日 24 時間の平均気温（日平均気温）を表している。図 3-2 を見ると、夏期は 6 月および 7 月、冬期は 12 月および 1 月の日電力消費原単位が大きくなっているのが分かる。また、同じ日平均気温上でも、日電力消費原単位のばらつきが大きい。これは、平日と土曜および休日の電力消費量の違いが原因である。

ここで、土曜および休日（日曜、祭日等）を除き、平日のみについて日電力消費原単位と日平均気温の相関を求めた（図 3-3）。また、図 3-3 に示す各回帰直線の一次相関式、有効範囲および相関係数(R)を表 3-5 に示す。図 3-3 のデータ数は 94 点であり、1 年間全 365 点のデータの中から、下記に示す平日以外のデータを除いたものである。

【平日以外】

- ・土曜、日曜、祭日
- ・正月休暇
- ・春期休暇
- ・ゴールデンウィーク期間
- ・夏期休暇
- ・中間期（4、10 月）の全データ（需要の変動量が小さく、日平均気温に対する変化の傾向が現れないため）
- ・6 月 1 - 15 日（この期間の冷房は電気式空調のみに偏るため）

表 3-5 日電力消費原単位と日平均気温の相関（平日）

期間	一次相関式	有効範囲 [°C]	R
2004 年 11 月 - 2005 年 1 月 [冬期]	$y = -6.15x + 630$	8.5 - 20	- 0.70
2005 年 5 月 - 2005 年 7 月 [夏期]	$y = 17.5x + 185$	17 - 30	0.94

y: 日電力消費原単位 [Wh/(m²・日)]、x: 日平均気温 [°C]、R: 相関係数

相関係数は、冬期が-0.70、夏期は 0.94 であり、特に夏期は強い相関を示している。また、図 3-3 から、年間の日電力消費原単位のピークは夏期に発生していることが分かる。このように、日電力消費原単位と日平均気温の相関を求めることにより、ある日平均気温における日電力消費原単位の予測が可能になり、設備の導入および運用計画において、有効な情報を得ることができる。

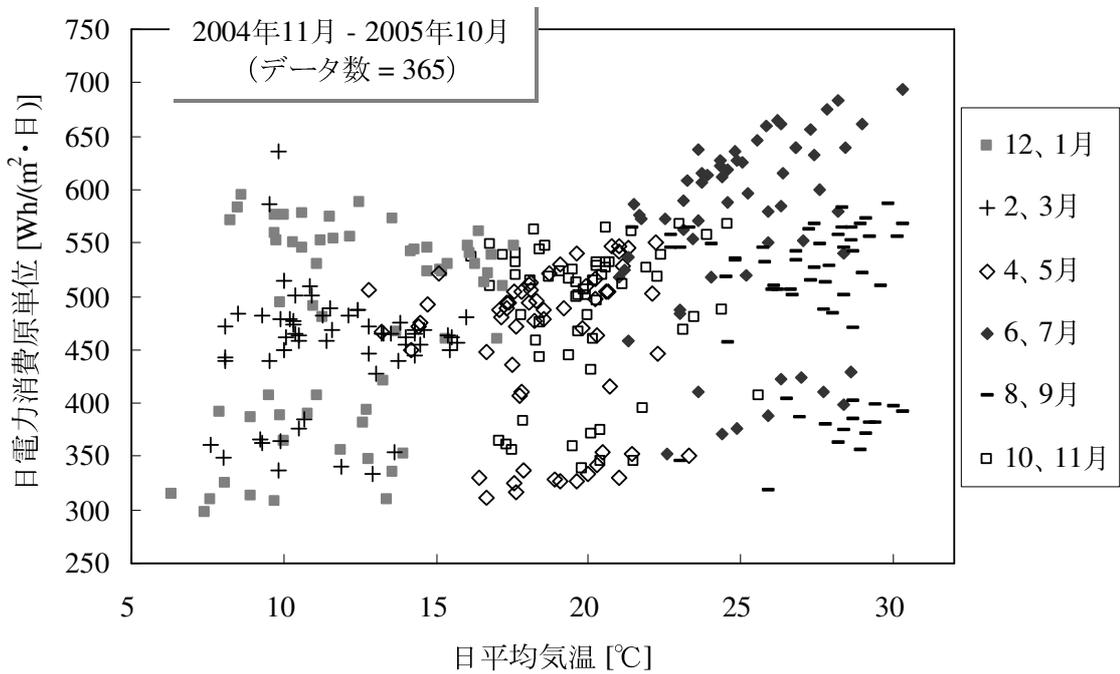


図 3-2 日電力消費原単位と日平均気温の関係 (1年間)

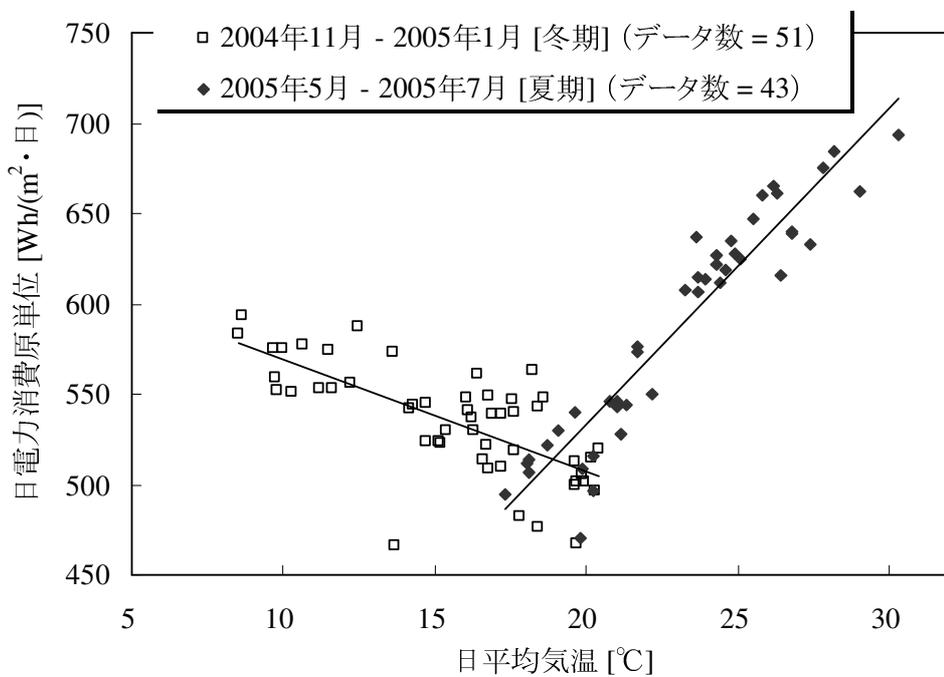


図 3-3 日電力消費原単位と日平均気温の関係 (平日)

3-3-2 空調用日ガス消費原単位

2004年11月1日から2005年10月31日までの365日間における、単位延べ面積あたりの1日の空調用ガス消費量（空調用日ガス消費原単位）の調査結果を図3-4に示す。

ここで、空調用日ガス消費原単位は、空調用ガス消費量の計測値に、ガスの高位発熱量 (h_{HHV}) である 46.0 MJ/Nm^3 を乗じ、SFCの延べ面積である $48,378 \text{ m}^2$ で除したものである。空調用ガス消費量は、本館およびΔ館に設置されている吸収式冷温水発生機および空調用ボイラーのガス消費量の合計値であり、両者とも、運転監視員により1日毎に計測されている。前節と同じデータ選別を行い、同じ期間の平日について、空調用日ガス消費原単位と日平均気温との関係を求めた(図3-5)。また、図3-5に示す各回帰直線の一次相関式、有効範囲および相関係数(R)を表3-6に示す。

表 3-6 空調用日ガス消費原単位と日平均気温の相関（平日）

期間	一次相関式	有効範囲 [°C]	R
2004年11月 - 2005年1月 [冬期]	$y = -0.0618x + 1.32$	8.5 - 20	- 0.93
2005年5月 - 2005年7月 [夏期]	$y = 0.137x - 2.51$	17 - 30	0.94

y: 空調用日ガス消費原単位 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{日})$]、x: 日平均気温 [°C]、R: 相関係数

図3-5を見ると、夏期のピーク値は冬期に比べて約2倍となっているが、これは、大阪府域の事務所に関する二浦尾ら^[30]の調査結果と似た特性を示している。また、空調用熱源機器のガス消費量が日平均気温と強い相関を有することは十分予想できることであるが、相関係数は、冬期が-0.93、夏期は0.94と、強い相関を示すことを定量的に確認できた。

なお、図3-5の回帰直線は、日平均気温が約19°Cで交わっているが、二浦尾ら^[30]の調査結果では16-17°C近辺で交わっている。これは、本研究で使用した気温計が、機械室内の外気取込用ダクト内に設置されているためであると考えられる。本研究で計測した日平均気温と気象庁発表の藤沢市辻堂における日平均気温^[81]を比較したところ、両者の変動特性は同様であるが、本研究の方が一様に約2°C高い数値を示すことを確認した。従って、気象庁発表の日平均気温を用いた場合、図3-5の回帰直線の交点が約17°Cになり、二浦尾ら^[30]の事務所に関する結果と一致することになる。

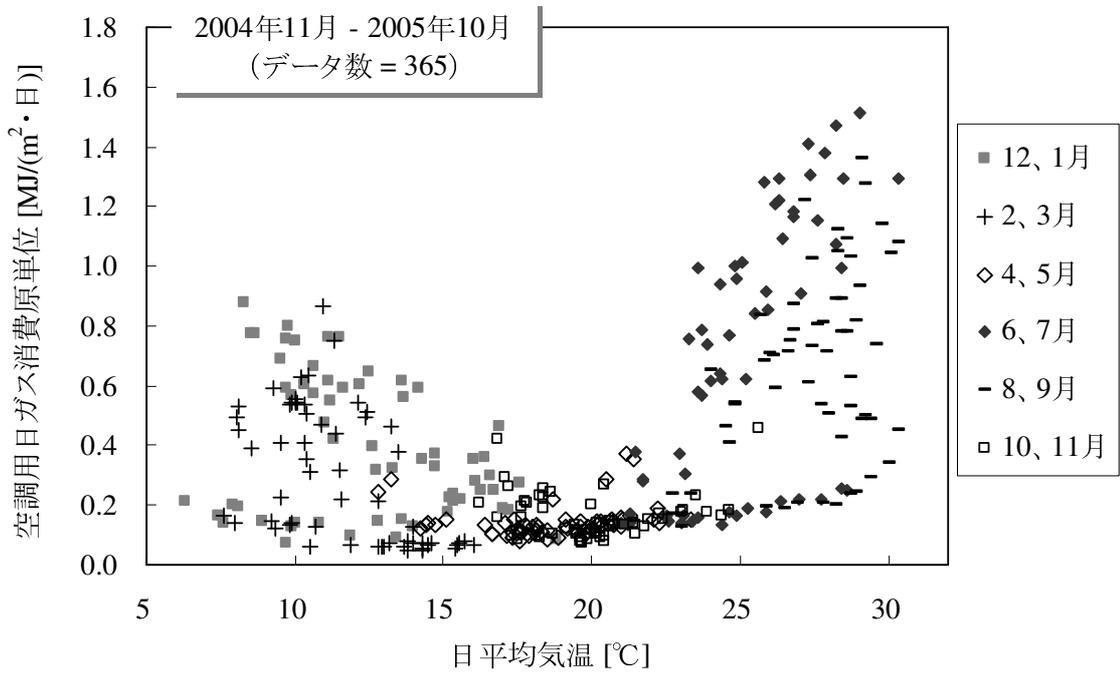


図 3-4 空調用日ガス消費原単位と日平均気温の関係 (1年間)

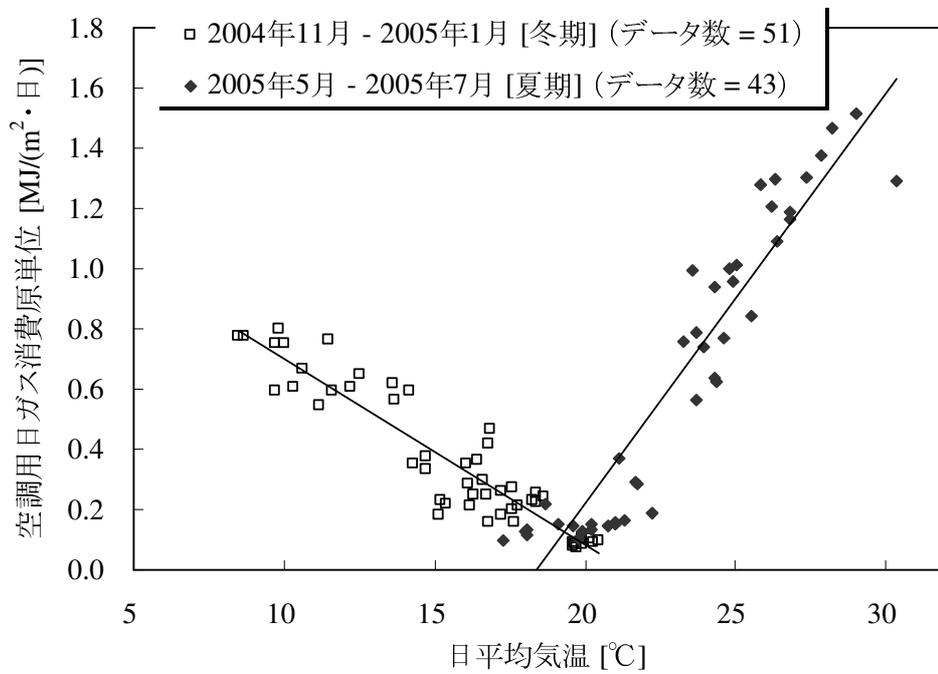


図 3-5 空調用日ガス消費原単位と日平均気温の関係 (平日)

3-3-3 月別一次エネルギー消費量および消費原単位

2004年11月から2005年10月までの1年間における、SFC全体の月別一次エネルギー消費量(Q_{pm})を図3-6に示す。なお、電力およびガス消費量を一次エネルギーに換算する際、昼間時間帯における電力の一次エネルギー消費原単位は、 $10.1 \text{ MJ/kWh}^{[82]}$ を、夜間時間帯における電力の一次エネルギー消費原単位は、 $9.31 \text{ MJ/kWh}^{[82]}$ を、ガスの高位発熱量は、 46.0 MJ/Nm^3 を用いた。

図3-6に示す1年間において、SFC全体の一次エネルギー消費量は、 129 TJ であった。エネルギー種別に見ると、受電電力が最も大きく、昼間と夜間を合わせて、SFC全体の一次エネルギー消費量の71%を賅うことになる。また、CGSは昼間時間帯のみの運転であるが、ガス(CGS)はSFC全体の一次エネルギー消費量の23%を賅っている。月別に見ると、冬期は1月、夏期は7月をピークとして、特に受電電力の変動が大きい。CGSは年間を通して定格運転されているため、月変動はそれ程大きくない。また、ガス(空調用)消費の気温依存性が強いことは予測できることであるが、冬期および夏期においては大きくなり、中間期は小さくなることが確認できる。ガス(給湯・調理用)消費量は、SFC全体の一次エネルギー消費量の1%程度と小さい。ここで、大学施設の特徴として、春期休暇(2、3月)および夏期休暇(8、9月)において、一次エネルギー消費量が前月に比べて落ち込むことが挙げられる。従って、設備の導入計画の際には、設備容量が過剰にならないように注意する必要がある。

また、汎用性を高める観点から、一次エネルギー消費量を原単位で管理することが重要となる。ここで、SFCの月別一次エネルギー消費原単位を図3-7に示すと共に、数値情報を付録2に示す。一次エネルギー消費原単位は、一次エネルギー消費量の合計を延べ面積(m^2)で除した数値である。延べ面積としては、受電電力およびガス(CGS)の一次エネルギー消費原単位を計算する場合は、SFCと受電ポイントおよび配電系統が同じである中学・高校および情報基盤センターの延べ面積も含んだ数値である $65,667 \text{ m}^2$ を用いた。一方、ガス(空調用)およびガス(給湯・調理用)の一次エネルギー消費原単位を計算する場合は、SFCの延べ面積である $48,378 \text{ m}^2$ を用いた。また、図3-7には、一次エネルギー消費原単位の気温依存性を確認するために、SFCの月平均気温(t_0)を示した。冬期における一次エネルギー消費原単位は、11月から1月にかけて t_0 の低下に比例して増大するが、春期休暇となる2および3月は、急に減少する。一方、夏期においても、5月から7月にかけて t_0 の上昇に比例して、一次エネルギー消費原単位は増大するが、夏期休暇となる8および9月は、急に減少することが確認できる。

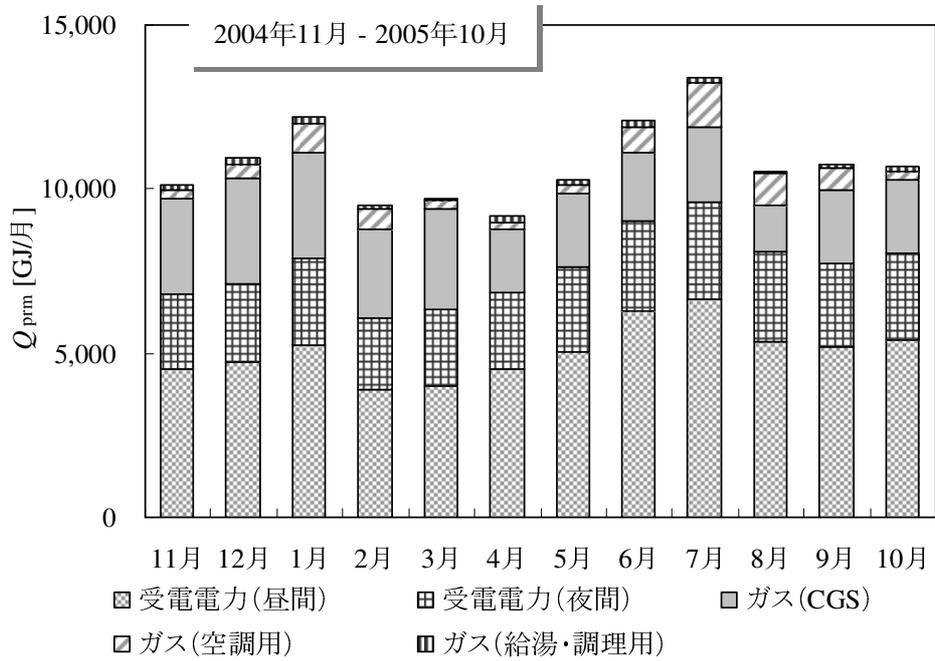


図 3-6 SFC 全体の月別一次エネルギー消費量

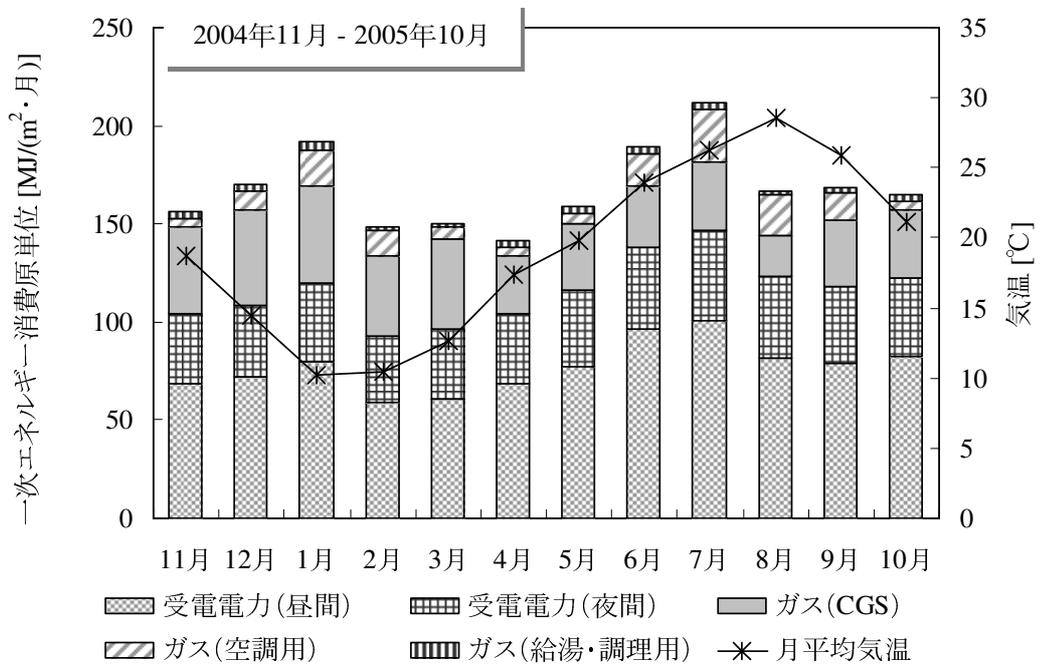


図 3-7 SFC の月別一次エネルギー消費原単位

3-3-4 月別・時刻別電力消費量

CGS等の分散電源の導入を検討する上で、導入対象となる構内全体の時刻別電力消費量は、分散電源の最適な容量選定のために不可欠な要素である。ここで、2004年11月から2005年10月までの1年間において、SFC全体の電力消費量の平日平均を、月別・時刻別にまとめたものを図3-8に示す。図3-8の縦軸であるSFC全体の電力消費量は、商用系統からの受電電力量(W_{grd})と補機動力を除いたCGS送電電力量(W_{CGS})の合計となる。また、図3-8に示す W_{grd} と W_{CGS} の合計値は、各月の平日8日間の実測値を平均したものである。

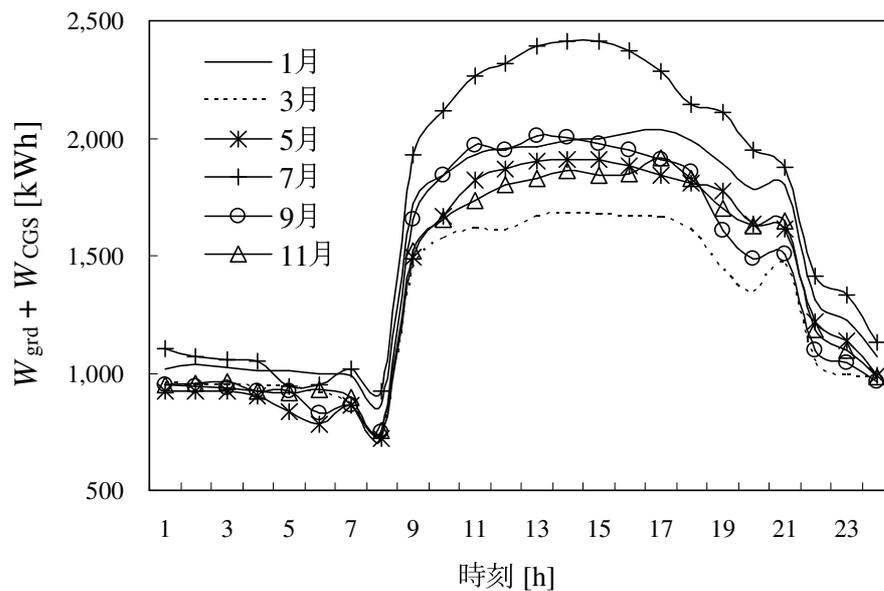


図 3-8 SFC の月別・時刻別電力消費量 (平日平均)

図 3-8 より、SFC の電力消費量は、夜間は季節を問わずほぼ一定となるが、授業の開始時間となる 9 時頃から急激に上昇する。その後、14 時ごろにピークとなった後は、21 時までなだらかに減少し、22 時に大きく減少する。月別に見ると、冬期 1 月の電力消費量よりも、夏期 7 月の電力消費量が大きくなることが確認できる。これは、冷房需要が主要因であると考えられ、パッケージエアコン等の電気式空調機器が多く導入された場合、気温の上昇に応じて、夏期昼間の電力消費量が大きく上昇することが予測できる。一方、冬期の電力消費量は、夏期よりも小さいが、これは、OA 化が進行しているメディアセンターや研究棟における、OA 機器の発熱が影響しているためであると推測することができる。

商用系統電力の電源構成および自構内の受電設備は、夏期のピーク電力消費量に合わせて計画・設計されるため、ピーク電力消費量の増大は、過剰な設備導入および系統電源の負荷率低下につながると考えられる。このような事態を回避するためには、各需要家において、夏期昼間の電力消費量を低減することが求められる。そのためには、分散電源の導入による、商用系統からの受電電力の低減と同時に、排熱の有効利用による空調用電力消費量の低減を、十分に検討する必要があると言える。

3-4 電力および冷暖房需要の推定

3-4-1 空調システム別の電力およびガス消費量

CGS等の発電設備および空調設備の導入を検討する際には、時刻別の電力および冷暖房需要情報が必要である。特に、冷暖房需要は季節および時刻別の変動が大きいいため、熱源機器の容量選定が部分負荷運転時間に与える影響は大きい。本研究においては、電力およびガス消費量の計測データを基に、熱源機器の効率を用いて、最終利用形態における電力および冷暖房需要を、時刻別に推定する方法を提案している。

しかし、SFCにおいては、表3-4に示す通り、受電電力、発電電力量（ガスエンジンCGS）およびガス消費量（ガスエンジンCGS）のみが1時間毎に計測される他は1日毎の計測である。よって、まず、下記に示す方法により、各空調システムの電力およびガス消費量を時刻別に推定した。なお、下記②から④の電力消費量について、一例として、7月平日における推定結果を図3-9に示す。

① 中央熱源方式（ガス）のガス消費量： $Q_{\text{gas,AHC}}$

$Q_{\text{gas,AHC}}$ は、本館の吸収式冷温水発生機および空調用ボイラーのガス消費量と Δ 館の吸収式冷温水発生機のガス消費量を合計したものであるが、これらは1日毎にしか計測されていない。よって、まず、運転時間内において、時刻別に計測されている冷温水の行きと還りの温度差を求め、次に、1日のガス消費量をこの温度差に比例配分することにより、時刻別のガス消費量を推定した。なお、中央熱源方式（ガス）空調システムの冷温水供給ポンプは4台設置されているが、流量および運転台数共に計測データが記録されていないため、流量は1日中一定であると仮定している。

② ベース電力消費量： W_{base}

W_{base} は、給排気ファン、換気ファン、照明、コンセント、衛生、輸送等の電力消費量の合計であり、気温の変化に関係なく、年間を通してその時刻変動特性はほぼ一定であると考えられる。実際には、まず、4月平日において平均気温が 15°C 以上かつ 20°C 未満、かつ、空調用ガス消費量が0となる日におけるSFC全体の時刻別電力消費量のパターンを求めた。そして、蔵書の保管、OA機器の冷却等、気温の変化にあまり影響を受けない空調用電力消費量を季節別に設定し、この電力消費量を上記の4月平日のパターンから除いたものを W_{base} とした。

③ 中央熱源方式（ガス）の電力消費量： W_{AHC} 、 W_{AHC}'

W_{AHC} は、ガス燃吸収式冷温水発生機および空調用ボイラー（冷却塔、ポンプ等の補機を含む）の電力消費量、 W_{AHC}' はエアハンドリングユニットおよびファンコイルユニット（AHU/FCU）の電力消費量である。これらは、まず、①で求めた $Q_{\text{gas,AHC}}$ の定格ガス消費量に対する割合を負荷率として時刻別に設定し、次に、この負荷率を、吸収式冷温水発生機および空調用ボイラー（冷却塔、ポンプ等の補機を含む）の定格電力消費量と、AHU/FCUの定格電力消費量に、それぞれ乗じることにより求めた。

④ 中央熱源方式（電気）の電力消費量： W_{VC} 、 W_{VC}' 、個別熱源方式の電力消費量： W_{PAC}

W_{VC} は空冷式ヒートポンプチラーの電力消費量、 W_{VC}' はAHU/FCUの電力消費量、そして、 W_{PAC} はパッケージエアコンの電力消費量である。これらの時刻別電力消費量は、SFC全体の時

刻別電力消費量から上記②および③の時刻別電力消費量を除いた分となる。さらに、実際に導入されている熱源機器の定格電力消費量の比率および表 3-7 に示す熱源機器の期間別運転時間パターンを考慮し、中央熱源方式（電気）と個別熱源方式の電力消費量に振り分けた。

表 3-7 熱源機器の期間別の運転時間パターン

	暖房期間 (11月16日 - 6月15日)		冷房期間 (6月16日 - 11月15日)	
	昼間 (8 - 21時)	夜間 (21 - 8時)	昼間 (8 - 21時)	夜間 (21 - 8時)
【吸収式冷温水発生機】				
本館	H	×	C	×
Δ館	C/H	C/H	C	C
【空冷式ヒートポンプチャラー】				
メディアセンター	C	C	C	C
大学院棟	C	C	C	C
【パッケージエアコン】				
本館	H	×	C	×
講義室棟 A - E	H	×	C	×
大講義室棟 II	H	×	C	×
研究棟 A - E	H	H	C	C
メディアセンター	H	H	C	C
大学院棟	H	H	C	C
Δ館	H	H	C	C
厚生棟	H	×	C	×
体育館	H	×	C	×

H：暖房運転、C：冷房運転、×：停止

このように、気温により変動する部分を空調用、変動しない部分を空調用以外のエネルギー消費量とする方法については、辻ら^[12]によって報告されている。電力およびガス消費量から冷暖房需要を求める際、電気式空調機器の電力消費量が、冷暖房ではなく電力需要に含まれる場合があるが、この方法では、冷暖房需要を気温と関連づけることにより、人間の行動パターンに反しない冷暖房需要を推定することができる。さらに、陳ら^[11]は、気温により変動しない冷暖房需要にも着目し、電力需要と分けることにより、推定を行っている。本研究では、陳ら^[11]と同様の手法を用いている。

3-4-2 冷暖房需要の推定

前節で求めた時刻別電力およびガス消費量は、熱源機器の消費量であり、最終利用形態での冷暖房需要を表しているものではない。また、それらは、熱源機器の種類により変動するため、一般化することは容易でない。本研究では、熱源機器の時刻別電力およびガス消費量を基に、熱源機器効率の特性を用いて、最終利用形態での冷暖房需要を推定する方法を提案している。以下に、空調システム別に冷暖房需要の推定方法を説明し、一例として、7月平日における冷房需要の推定結果を図 3-10 に示す。

- ① 中央熱源方式（ガス）の冷暖房需要： $Q_{a/c,dmn,AHC}$

$Q_{a/c,dmn,AHC}$ は、式 (3-1)より求められる。

$$Q_{a/c,dmn,AHC} = Q_{gas,AHC} COP_{AHC} + Q_{exh,CGS} \quad (3-1)$$

ここで、 COP_{AHC} は、ガス焚吸収式冷温水発生機の成績係数であり、図 3-11 に示す部分負荷特性^[83]により、ガス消費量基準の負荷率 (LF_{AHC}) に応じて時刻別に決定される。また、 $Q_{exh,CGS}$ は、ガスエンジンの排熱を熱源として、熱交換器 (冬期) または温水吸収式冷凍機 (夏期) を介して製造される、温水または冷水の熱量である。

② 中央熱源方式 (電気) の冷房需要: $Q_{a/c,dmn,VC}$

$Q_{a/c,dmn,VC}$ は、式 (3-2)より求められる。なお、式 (3-2)の右辺の係数 3.6 は、定義式 $1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ}$ による、電力から熱への換算を表している。

$$Q_{a/c,dmn,VC} = 3.6 W_{VC} COP_{VC} \quad (3-2)$$

COP_{VC} は、空冷式ヒートポンプチラーの成績係数を表し、図 3-11 に示す部分負荷特性^[83]および図 3-12 に示す気温依存性を用いて、電力消費量基準の負荷率 (LF_{VC}) および気温 (t_0) の 2 変数により、時刻別に決定される。図 3-12 において、 t_0 が 20°C の場合、 t_0 が 35°C の場合の $COP_{VC,rd}$ (定格値) に比べて、 COP_{VC} は 1.52 倍となる。これは、冷凍サイクルの作動流体である冷媒の蒸発と凝縮の温度差が小さくなることにより、理論 COP が高くなったためである。一方、製造する冷水熱量が一定と仮定した場合、 t_0 が 20°C の場合は、 t_0 が 35°C の場合に比べて、電力消費量は $1/1.52$ 倍 (約 66%) と小さくなるが、これは、圧縮機の部分負荷運転を意味している。図 3-11 より、 LF_{VC} が 66% の場合、 LF_{VC} が 100% の場合の $COP_{VC,rd}$ (定格値) に比べて、 COP_{VC} は 0.98 倍となる。

これより、 t_0 が 20°C かつ製造する冷水熱量が一定の場合の COP_{VC} は、 $COP_{VC,rd}$ (定格値) を、 t_0 の影響を考慮して 1.52 倍し、さらに、 LF_{VC} の影響を考慮して 0.98 倍したものとなる。一方で、製造する冷水熱量が一定でない場合、さらに LF_{VC} が変化するが、電力消費量が計測されていれば、より正確に LF_{VC} を決定することができる。

③ 個別熱源方式の冷暖房需要: $Q_{a/c,dmn,PAC}$

$Q_{a/c,dmn,PAC}$ は、式 (3-3)より求められる。

$$Q_{a/c,dmn,PAC} = 3.6 W_{PAC} COP_{PAC} \quad (3-3)$$

COP_{PAC} は、パッケージエアコンの成績係数を表し、電力消費量基準の負荷率 (LF_{PAC}) および t_0 の 2 変数により、時刻別に決定される。ここで、 COP_{PAC} の部分負荷特性を図 3-11 に、気温依存性を図 3-12 に示す。図 3-11 に示す COP_{PAC} の部分負荷特性は、古賀ら^[84]の研究グループによって作成されたものである。なお、 LF_{PAC} および t_0 から決定される COP_{PAC} の算出方法は COP_{VC} と同様である。

図 3-12 は、冷凍サイクルにおける理論 COP の気温依存性を示している。空冷式ヒートポンプチラーの理論 COP は、冷水供給温度を 7℃ に固定し、気温が変化した場合の値を、CYCLE_D プログラム^[85]を用いて計算した。また、パッケージエアコンの理論 COP は、暖房時および冷房時の室内温度をそれぞれ、20℃ および 27℃ に固定し、室外温度（気温）が変化した場合の値を、CYCLE_D^[85]プログラムを用いて古賀ら^[84]の研究グループが計算したものを使用した。

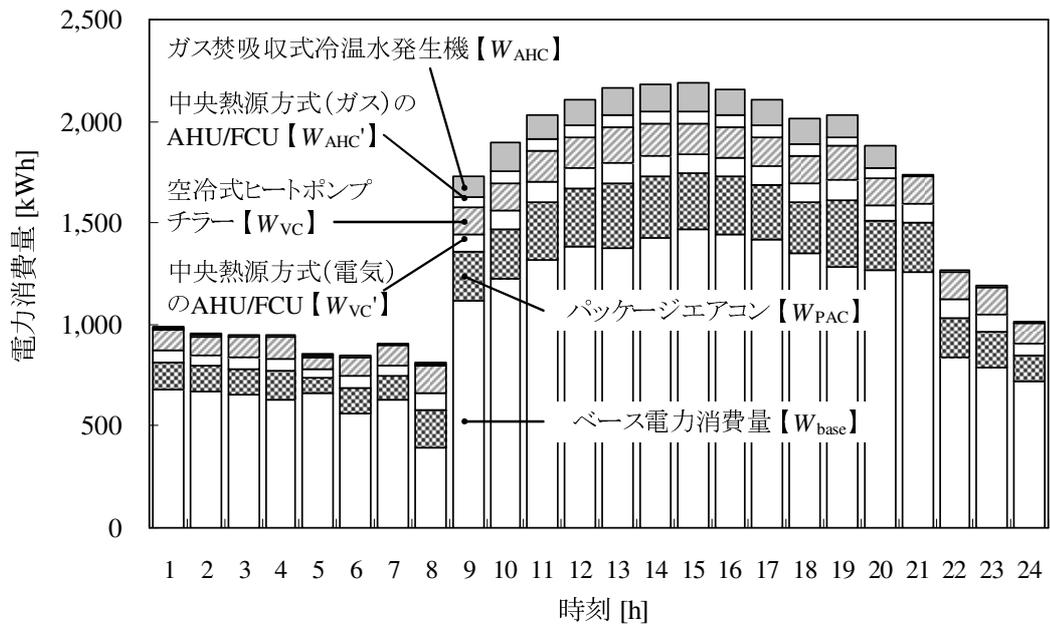


図 3-9 時刻別電力消費量の推定結果 (7月の平日平均)

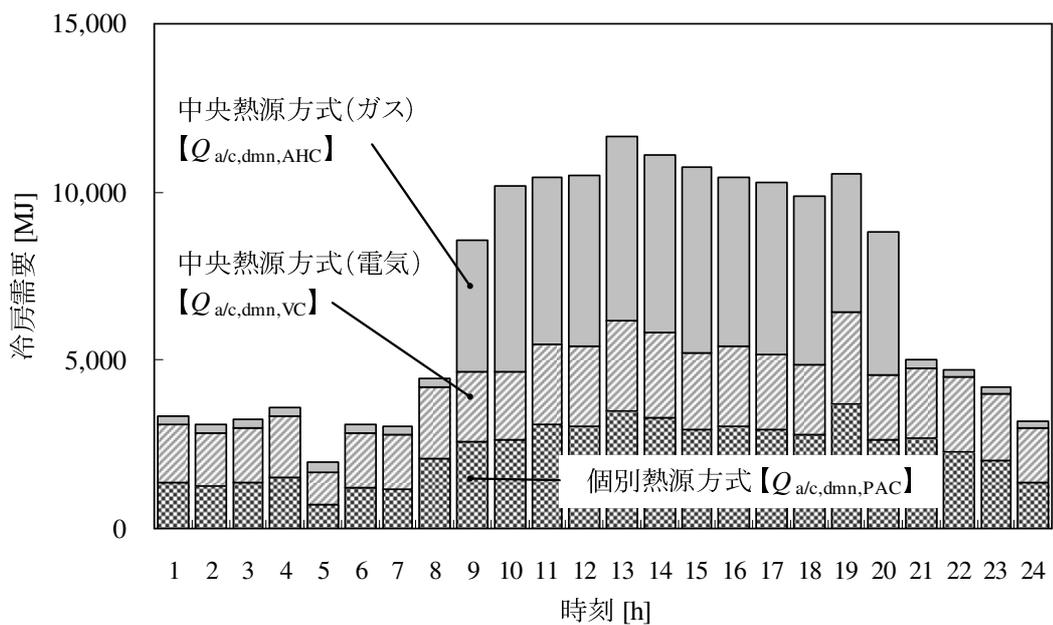


図 3-10 時刻別冷房需要の推定結果 (7月の平日平均)

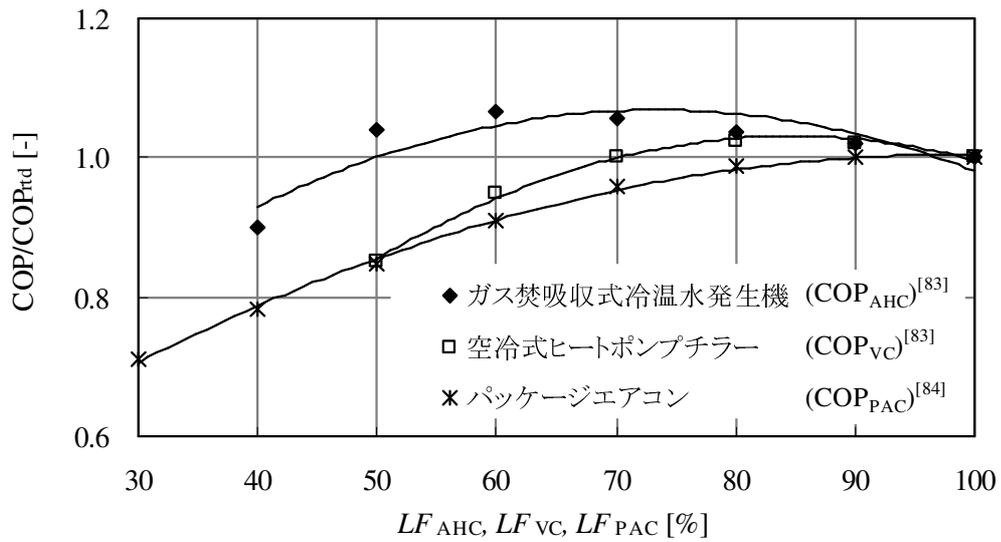


図 3-11 熱源機器効率の部分負荷特性

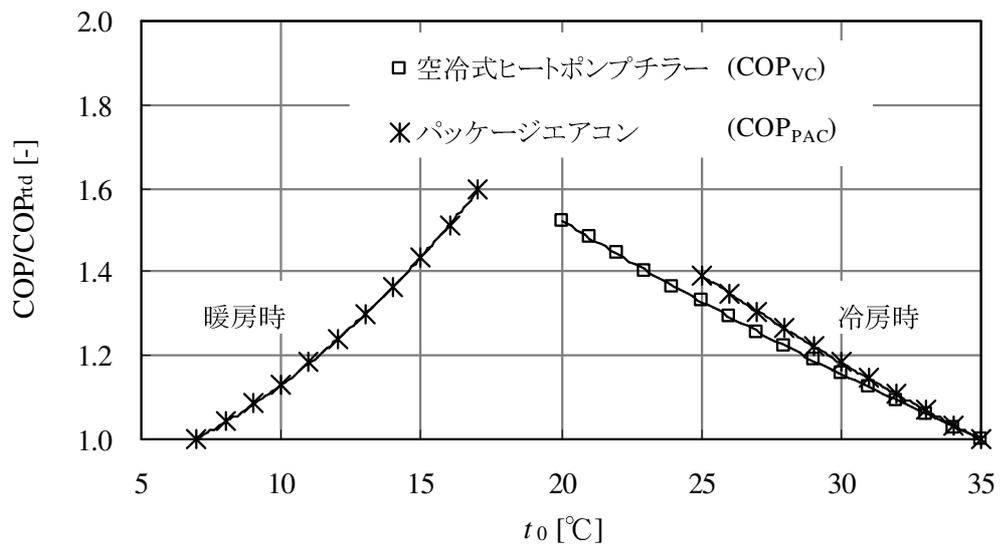


図 3-12 熱源機器効率の気温依存性^[85]

3-4-3 年間の時刻別電力および冷暖房需要

前節の方法により、2004年11月から2005年10月までの144日(12日/月)の計測データを基に、単位面積あたりの時刻別電力および冷暖房需要を求めた。ここで、電力需要の平日平均を図3-13に、冷暖房需要の平日平均をそれぞれ、図3-14および図3-15に示す。また、これらの数値情報と、土曜日および日曜日に関する平均需要の数値情報を、付録3-11に示す。

図3-13の時刻別電力需要は、図3-9のベース電力消費量(W_{base})に相当するが、年間を通して、時刻変動特性の変化が小さい。一方、図3-14の冷房需要は、特に、7月の10-19時において大きな値を示しているが、それ以外はそれほど大きくならない。また、図3-15の暖房需要は、1月および2月の9-20時において大きくなっているが、それ以外は大きくない。これらは、SFCにおける空調設備の高負荷運転時間が、年間を通して短いことを示している。

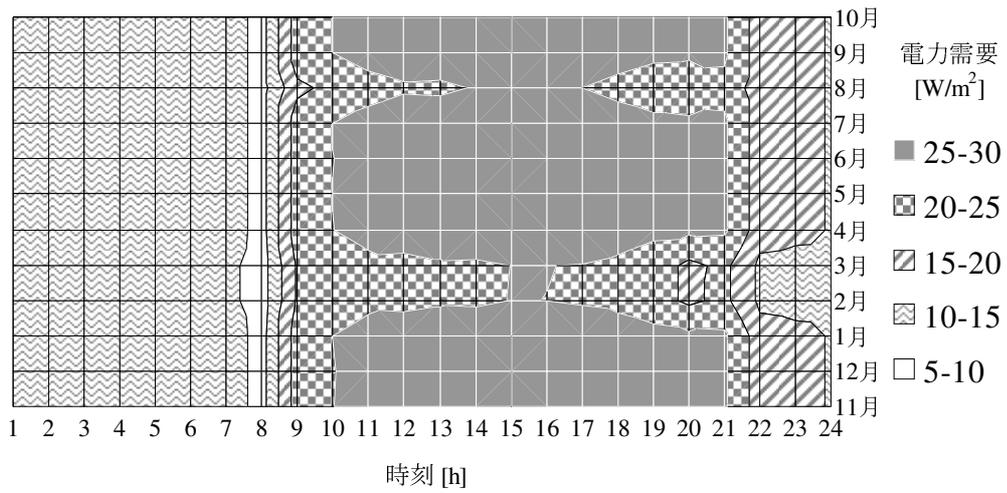


図 3-13 SFC における時刻別電力需要の推定結果 (平日平均)

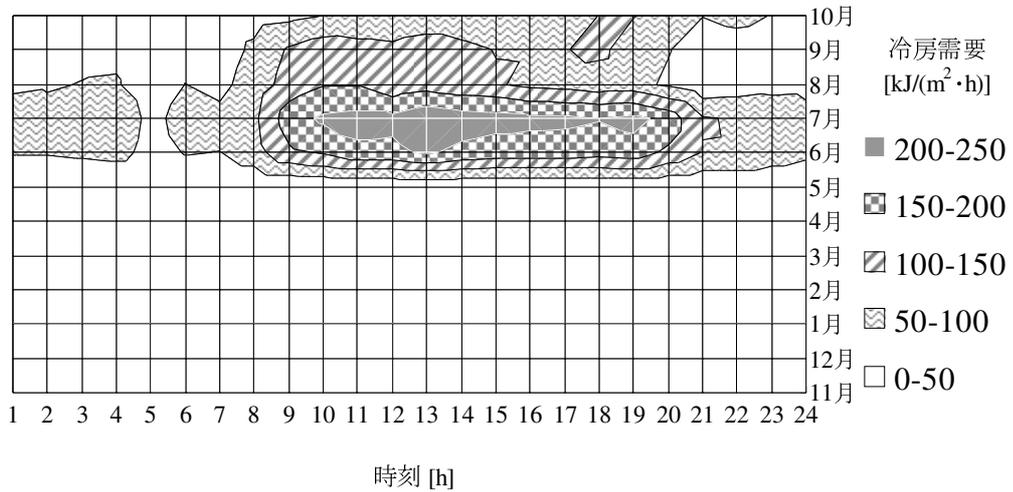


図 3-14 SFC における時刻別冷房需要の推定結果 (平日平均)

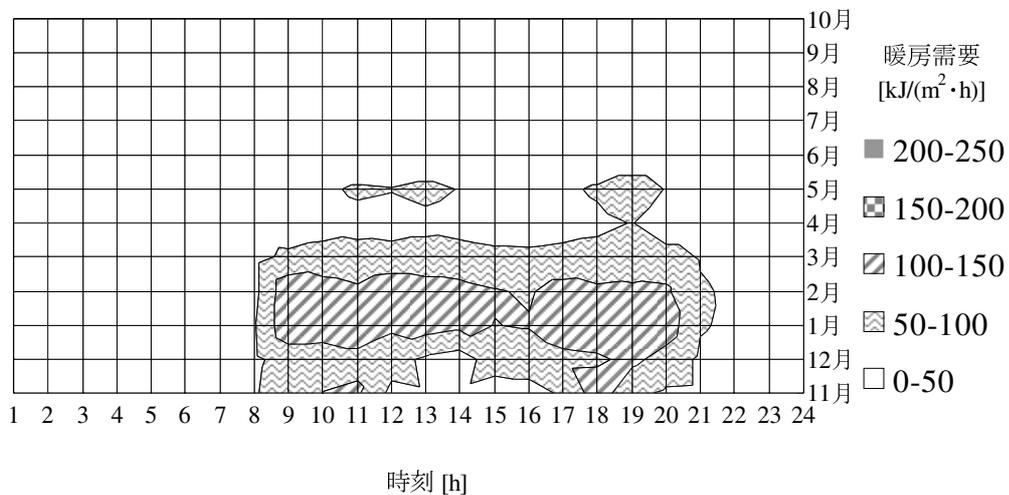


図 3-15 SFC における時刻別暖房需要の推定結果 (平日平均)

3-4-4 建物用途別冷暖房需要

SFCは容積率が小さい郊外型の大学キャンパスであり、高層の都市型大学キャンパスとは異なるエネルギー需要形態を有することが予想できる。特に、SFCのように、本館の熱源機器から他の建物へ冷温水を供給する中央熱源方式空調システムでは、圧力および熱損失が冷暖房需要の発生場所により大きく変動すると考えられる。従って、設備設計の際には、冷暖房需要を建物別に把握することが必要である。

SFCにおいては、Δ館の中央熱源方式（ガス）、メディアセンターおよび大学院棟の中央熱源方式（電気）の空調システムは、それぞれ個別建物への供給であるため、前節で推定した冷暖房需要をそれぞれ個別建物の冷暖房需要として扱うことができる。一方、本館系統の中央熱源方式（ガス）空調システムでは、本館に設置された熱源機器で製造した冷温水を各建物に供給するため、前節で推定した冷暖房需要を建物別に振り分けなければならない。ここで、前節の方法により推定した冷暖房需要を、実際に各建物に導入されているAHU/FCUの定格冷暖房能力（図3-16参照）により比例配分して、各建物における冷暖房需要を推定した。なお、本館系統の中央熱源方式（ガス）空調システムにおける冷暖房需要を求める際は、冷温水の搬送に伴う熱損失を5%として計算した。また、個別熱源方式であるパッケージエアコンの冷暖房需要に関しては、実際に導入されている機器の定格電力消費量（図3-16参照）および表3-7に示す熱源機器の期間別運転時間パターンを考慮して建物別に求めた。

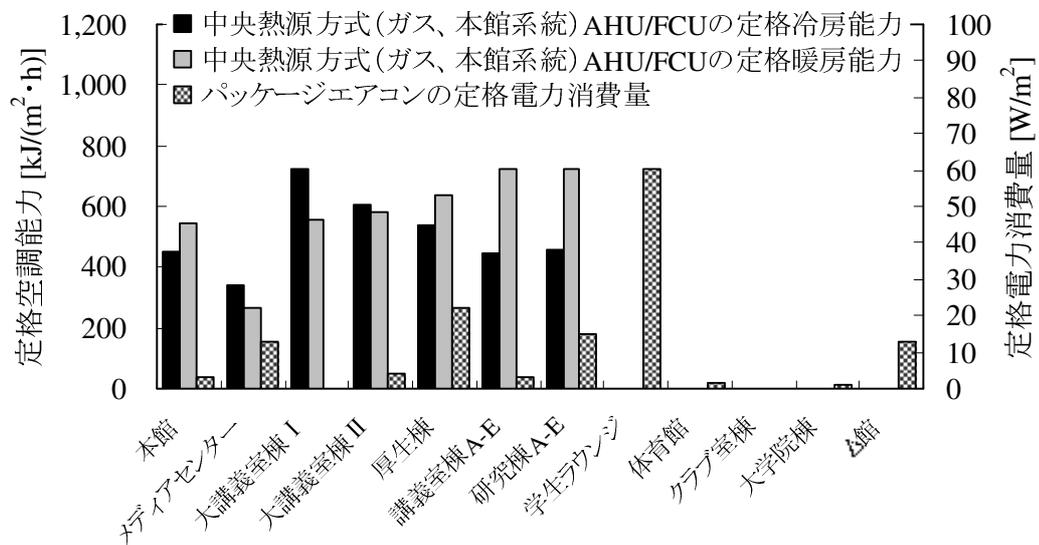
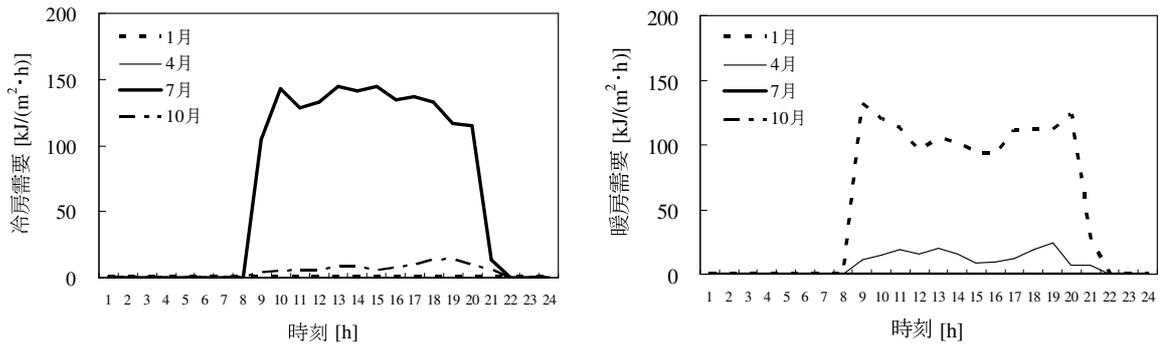
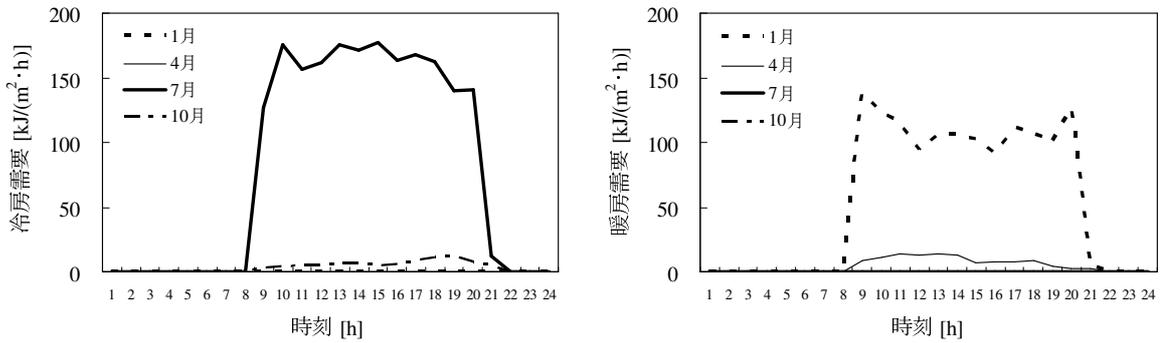


図 3-16 建物別の定格電力消費量および定格冷暖房能力（昼間）

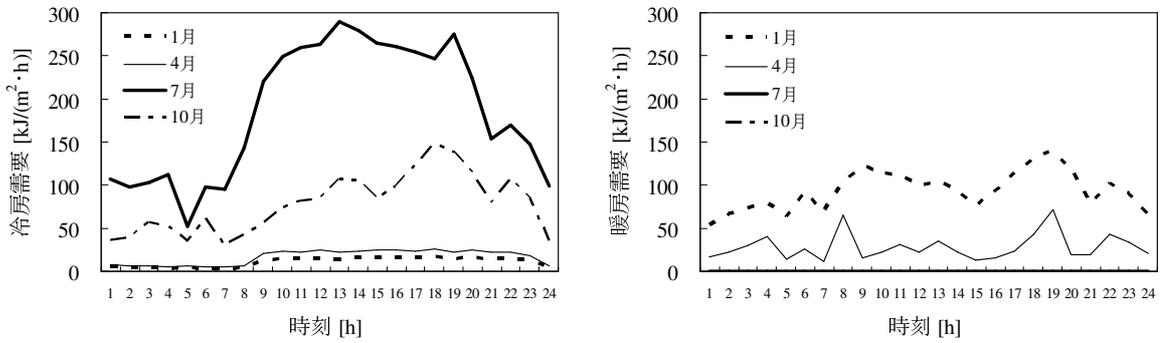
ここで、建物用途別に推定した冷暖房需要を図3-17(a)-(d)に示す。図中の縦軸は単位面積あたりの冷暖房需要である。建物用途は一般的な名称であり、事務所は本館、講義室は講義室棟A-E、大講義室棟Iおよび大講義室棟IIの平均、図書館・情報系はメディアセンター、研究室は研究棟A-Eを示している。SFCのメディアセンターは、従来の図書館としての機能の他、オンラインデータベース、電子ジャーナルおよび電子ブックの導入により、情報の発信源としての役割も担っている。また、地下には、撮影・映像・音響スタジオがある。



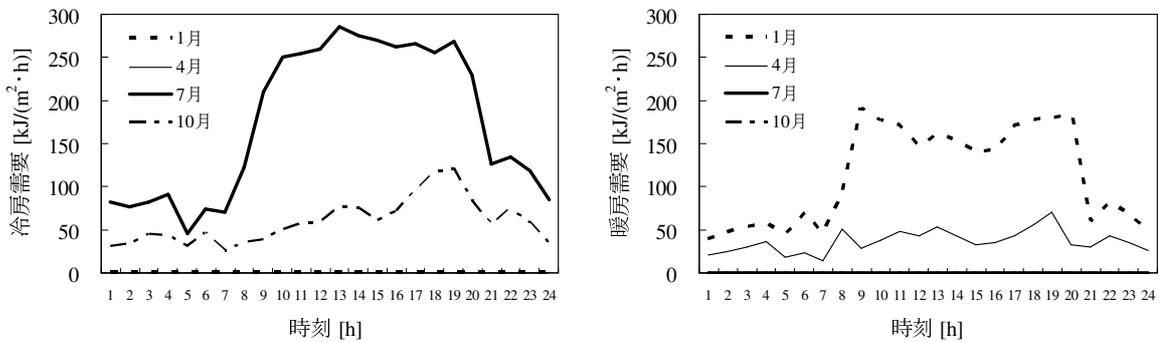
(a) 事務所 (延べ面積 : 4,972 m²)



(b) 講義室 (延べ面積 : 9,517 m²)



(c) 図書館・情報系 (延べ面積 : 7,066 m²)



(d) 研究室 (延べ面積 : 12,012 m²)

図 3-17 SFCにおける建物用途別冷暖房需要の推定結果 (平日平均)

図 3-17 を見ると、事務所および講義室に関しては、冷房需要は夏期昼間、暖房需要は冬期昼間においてのみ大きくなるが、夜間は全く発生しない。また、中間期における冷暖房需要は小さくなる。一方、図書館・情報系および研究室に関しては、中間期および夜間においても冷暖房需要が発生している。これは、図書館・情報系では、蔵書の保管および OA 機器の冷却、研究室では、夜間研究を行う学生用の空調および OA 機器の冷却が要因となっているためであると考えられる。また、これら2種類の建物においては、暖房需要に対する冷房需要の増加幅が大きくなっているが、これは、OA 機器の発熱が原因であると推測できる。

3-4-5 空調システム別冷暖房需要

SFC の空調システムは、表 3-3 に示す通り、中央熱源方式（ガス）、中央熱源方式（電気）および個別熱源方式空調システムに大別することができる。中央熱源方式（ガス）空調システムの熱源機器であるガス焚吸収式冷温水発生機に関しては、一般的にガス消費量が測定されている場合が多く、計測されたガス消費量を基に、機械効率、冷温水の搬送に伴う圧力および熱損失等を考慮して、冷暖房需要を推定することが可能である。また、ガス焚吸収式冷温水発生機により製造される冷温水の流量および往・還温度についても、計測されている場合が多く、この計測データからも冷暖房需要の推定が可能となる。一方で、電力に関しては、商用系統からの受電電力、CGS 発電電力等は、需要家毎に計測されるのが一般的であるが、中央熱源方式（電気）の熱源機器である空冷式ヒートポンプチラーの電力消費量が個別に計測されることは少なく、また、部屋単位で設置される、個別熱源方式のパッケージエアコンの電力消費量を、個別に計測することは困難である。さらに、個別熱源方式においては、設置された空間に直接冷温熱エネルギーを供給するため、その空間の冷暖房需要を計測することも非常に困難な状況となる。

しかしながら、エクセルギーの小さい空調用熱源として、排熱等の熱源を有効利用するためには、これらの空調システムの違いによらず、最終利用形態の冷暖房需要を把握することが不可欠となる。ここで、本節における冷暖房需要の推定を基に、空調システム別の冷暖房需要の推定結果を図 3-18 に示す。図 3-18 の縦軸である冷暖房需要は、冷房と暖房需要の和である。なお、中央熱源方式（ガス）の冷暖房需要は、本館系統と Δ 館の合計を示している。

図 3-18 において、現状では、ガスエンジン排熱利用は、中央熱源方式（ガス）空調システムのみ限定されている。従って、同空調システムの冷暖房需要が減少する中間期（4、5、10、11月）においては、ガスエンジン排熱の利用率が減少し、CGS の省エネルギー性を十分に発揮することができない状況となる。一方で、同時期において、中央熱源方式（電気）および個別熱源方式空調システムでは、冷暖房需要が発生していることが確認できる。よって、ガスエンジン排熱を、中央熱源方式（電気）および個別熱源方式空調システムにおける冷暖房需要の熱源として利用できれば、特に中間期において、ガスエンジン排熱の利用率向上が期待できる。

さらに、ガスエンジン排熱利用の検討には、時刻別の冷暖房需要情報が必要であるが、図 3-19 (a)および(b)に、4月および10月代表日における、空調システム別・時刻別冷暖房需要の推定結果を示す。図 3-19 から、現状問題となっている中間期における排熱利用率の低下を、空調システム間での排熱の融通により、改善できる可能性があることを確認できる。

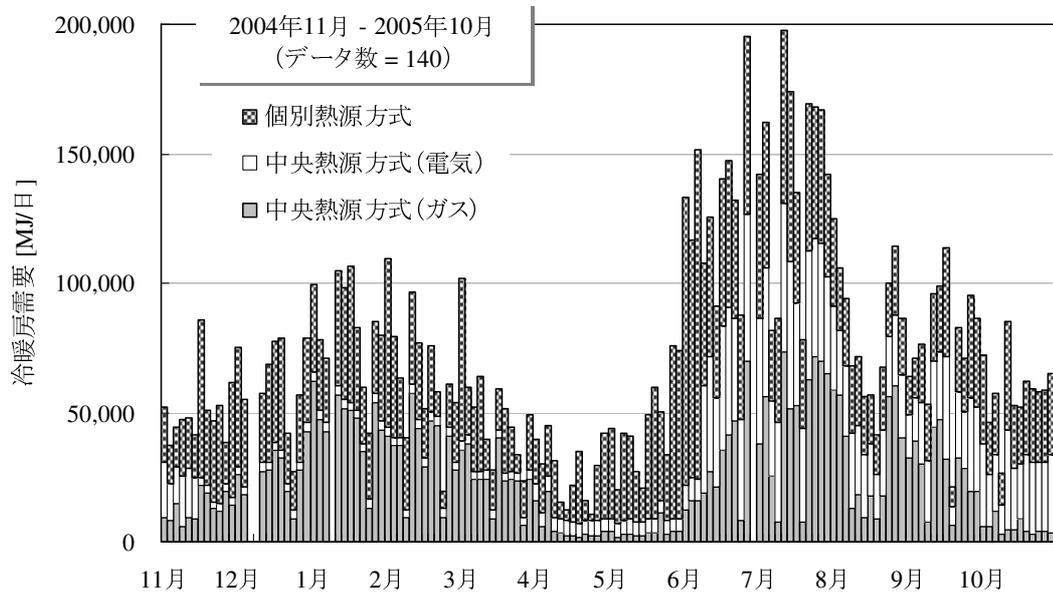
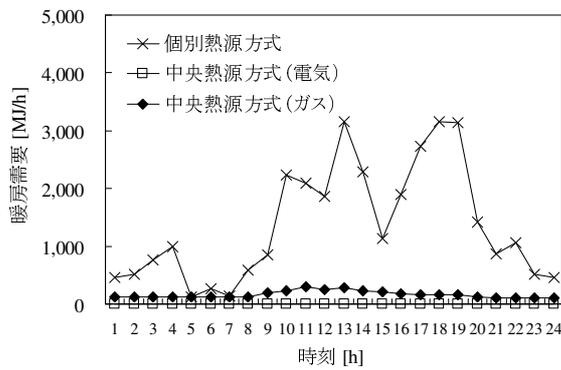
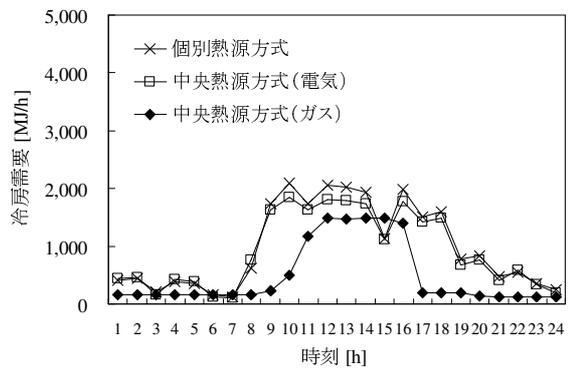


図 3-18 SFC における空調システム別冷暖房需要の推定結果



(a) 4月代表日の暖房需要



(b) 10月代表日の冷房需要

図 3-19 SFC における空調システム別・時刻別冷暖房需要の推定結果

第4章 SFC における現状 CGS の省エネルギー性および環境性評価

4-1 CGS 評価の目的

エネルギーの大量消費による化石燃料資源の枯渇および地球温暖化問題への取組みとして、各需要家レベルにおいて、省エネルギー対策の実施を早急に行う必要がある。省エネルギー対策をエネルギー供給側から検討した場合、有効なシステムの一つとして、CGS が挙げられる。我が国において、CGS の導入件数は 1980 年代後半から増加し始めたが、特に、1990 年頃のバブル経済時期においては、経済性および危機管理性の視点から数多く導入された。しかし、経済性を優先して導入された場合においては、省エネルギー性および環境性を最大限に発揮するための検討が十分にされているとは限らない。また、経済性に関しても、電力およびガス料金の設定により、その評価は流動的である。今後、バブル経済時期に導入された多くの設備が更新時期に突入していくことを考慮すると、省エネルギー性および環境性の視点も重視し、改めてその導入方法を検討する時期に来ていると言える。

このような背景を鑑み、本研究では、CGS 等のエネルギー供給設備について、省エネルギー性および環境性の視点から、実需要に基づいた効果的な導入および運用に関する検討を行っている。その一例として、大学キャンパスである SFC を取上げ、前章において、エネルギー需要実態を調査した。SFC は 1990 年に設立されたが、設立当時、CGS は導入されていなかった。その後、構内の建物増設等に伴い、電力需要が伸び続け、特に、夏期において、電力のピーク負荷を商用系統電力に大きく依存するようになった。このような状況を回避するため、その後の 2000 年に、商用系統電力のピーク負荷低減を目的として CGS が導入され、現在でも特高回避として役立っている。

本章では、SFC に実際に導入されている CGS について、2004 年 11 月から 2005 年 10 月の期間、運転データを時刻別に計測した。この計測結果を基に、現状の CGS の運用実態を、省エネルギー性および環境性の視点から定量的に評価する。そして、現状の問題点を明らかにした上で、次章以降において、CGS を含めたエネルギー利用システムの効果的な導入に関する検討を行う。

4-2 CGS に関する計測項目

SFC の電力需要は、商用系統からの受電電力および本館地下に設置されているガスエンジン CGS（定格 300 kW×2 台）の発電電力により賄われている。商用系統電力は 6,600 V の高圧で受電しており、契約電力は 2,200 kW である。SFC および隣接施設を含めた電力需要のピークは夏期に約 2,800 kW となるが、CGS 導入により、商用系統電力のピーク負荷は 2,200 kW 以下に抑えられている。また、CGS は、年間を通して平日および土曜日の 8 時 - 20 時 30 分の時間帯で定格運転され、部分負荷運転になる時間帯は年間を通して存在しない。

ここで、図 4-1 に CGS システムフロー図を示す。本研究では、CGS の範囲を、図 4-1 に示す通り、原動機（ガスエンジン）、熱交換器および温水吸収式冷凍機を含んだシステムとしている。ガスエンジン排熱は、冬期は熱交換器により 57.5℃ の温水、夏期は温水吸収式冷凍機に投入され

7°Cの冷水として、中央熱源方式(ガス、本館系統)空調システムの熱源として利用されている。また、CGS発電電力は定格600kWであるが、その内、冬期:約60kW、中間期:約50kW、夏期:約80kWのCGS補機動力を差引いた電力が、送電電力として、需要側に供給される。ここで、SFCのCGS仕様書から得た情報をまとめた、CGS補機動力の定格値を表4-1に示す。表4-1の内、温水吸収式冷凍機冷却水ポンプは、夏期において、冷水を製造する場合にのみ必要となる。冷温水ポンプは、ガスエンジン排熱を熱源として製造した冷温水を供給するためのものである。また、本研究では、吸気および排気ファンもCGSの補機動力として扱っている。

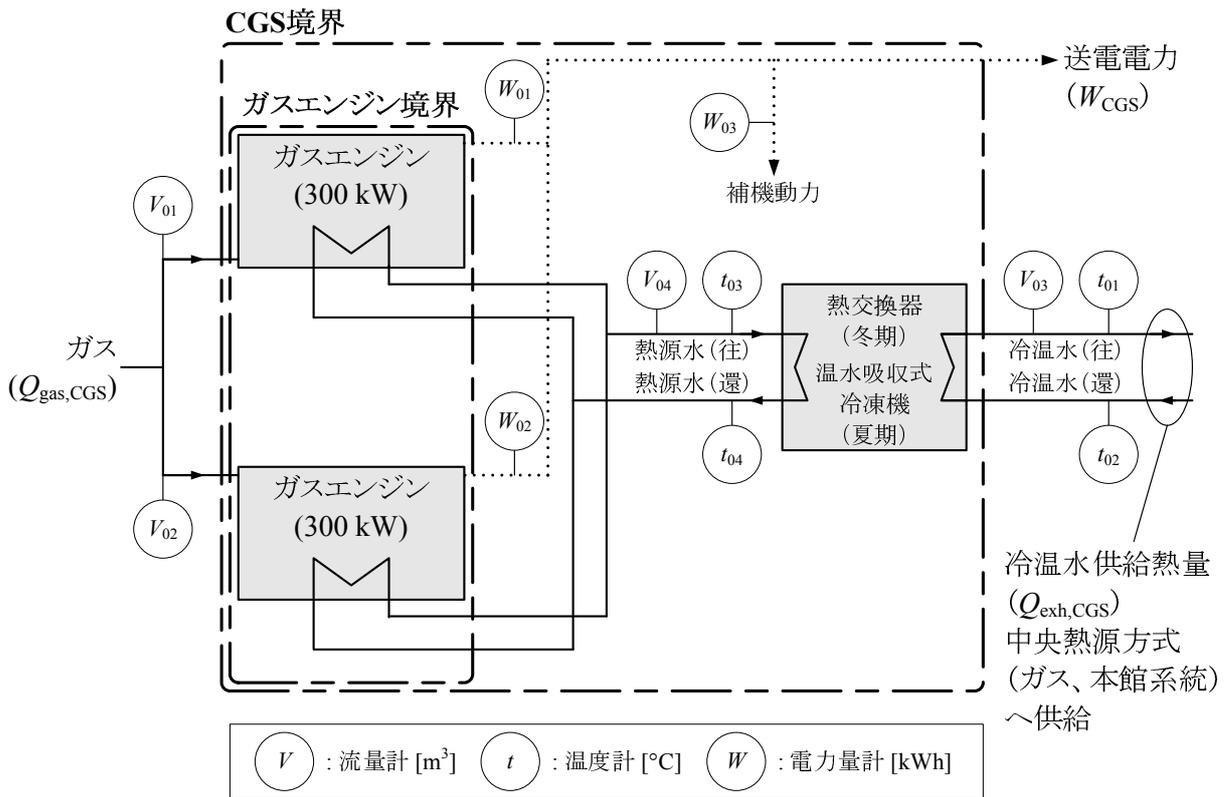


図 4-1 SFCにおけるCGSシステムフロー

表 4-1 CGS 補機動力の定格値

項目	台数	補機動力	補機動力(合計)
		[kW/1台]	[kW]
ジャケット冷却水ポンプ	2	5.5	11.0
クーラー冷却水ポンプ	2	2.2	4.4
冷却塔冷却水ポンプ	2	5.5	11.0
温水吸収式冷凍機冷却水ポンプ	1	18.5	18.5
冷温水ポンプ	1	7.5	7.5
汚水用水中ポンプ	1	0.75	0.75
ガス圧縮機	2	1.5	3.0
吸気ファン	2	5.5	11.0
排気ファン	2	5.5	11.0
合計			78.2

新規建物にCGSを導入する場合、電力および熱需要は推定により求めなければならないため、設計と運用段階の需要の相違を考慮に入れて、CGSの導入を検討する必要がある^{[86], [87], [88], [89]}。一方、既設のCGSを更新する場合は、計測データにより運転状況を把握して、更新の際の有益な情報として活用することが可能である。ここで、SFCのCGSに関する計測項目を表4-2に示す。表4-2のCGSに関する計測項目の計器記号は、図4-1の記号に一致する。本研究では、表4-2に示す計測データを、調査期間内の144日間（各月の平日8日間、土曜2日間、日曜2日間）において、1時間毎に取得した。

表 4-2 SFC の CGS に関する計測項目

項目	計器記号	単位	計測周期	計測方法
発電電力量	W_{01} / W_{02}	kWh	1時間	自動
補機動力	W_{03}	kWh	1時間	自動
ガス消費量	V_{01} / V_{02}	Nm^3	1時間	自動
冷温水流量	V_{03}	m^3	1時間	自動
冷温水温度	往： t_{01} / 還： t_{02}	$^{\circ}\text{C}$	1時間	自動
熱源水流量	V_{04}	m^3	1時間	自動
熱源水温度	往： t_{03} / 還： t_{04}	$^{\circ}\text{C}$	1時間	自動

4-3 現状CGSの省エネルギー性評価

4-3-1 商用系統電力とCGS発電電力の比較

CGSの省エネルギー性を評価するためには、CGSが運転されない場合と運転された場合の、一次エネルギー消費量を比較する必要がある。ここでは、まず、商用系統電力とCGS発電電力に関して、電力を発生させるために消費する一次エネルギー消費量を比較する。ここで、調査期間内のデータ破損3日分を除く141日間における、商用系統からの受電電力量および補機動力を除いたCGS送電電力量の1時間毎の計測値を、1日毎に集計したものを図4-2に示す。

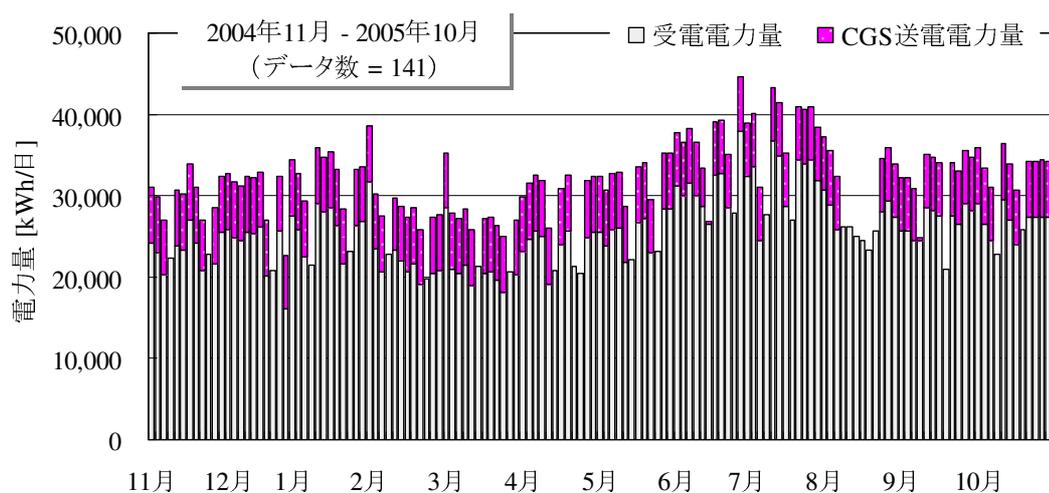


図 4-2 SFC の受電電力量およびCGS送電電力量

図4-2より、141日間において、約18%の電力がCGS送電電力により賄われていたことが分

かる。以下に、CGS送電電力を発生させるために消費したガスの一次エネルギーと、同量の電力を商用系統から受電した場合に系統側で消費する一次エネルギーの差 ($\Delta Q_{\text{prm,pwr}}$) を式 (4-1)より求め、調査期間中の144日間における、1日毎の $\Delta Q_{\text{prm,pwr}}$ の計算結果を図4-3に示す。

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{prm,pwr}} &= Q_{\text{gas,CGS}} - hr_{\text{grd,dt}} W_{\text{CGS}} \\ &= h_{\text{HHV}} (V_{01} + V_{02}) - hr_{\text{grd,dt}} (W_{01} + W_{02} - W_{03}) \end{aligned} \tag{4-1}$$

ここで、 $Q_{\text{gas,CGS}}$ はCGSガス消費量の一次エネルギー換算値、 $hr_{\text{grd,dt}}$ は昼間時間帯における、商用系統電力の一次エネルギー消費原単位 (HHV基準、受電端)、 W_{CGS} はCGSの送電電力量、 h_{HHV} はガスの高位発熱量を表す。また、 V_{01} および V_{02} はCGSのガス消費量 (図4-1参照)、 W_{01} 、 W_{02} および W_{03} はCGSの発電電力量および補機動力 (図4-1参照)を表している。なお、SFCのCGSは昼間時間帯のみ運転されており、 $hr_{\text{grd,dt}}$ の値は10.1 MJ/kWh (HHV基準、受電端)^[82]を用いた。また、 h_{HHV} は46.0 MJ/Nm³を用いた。

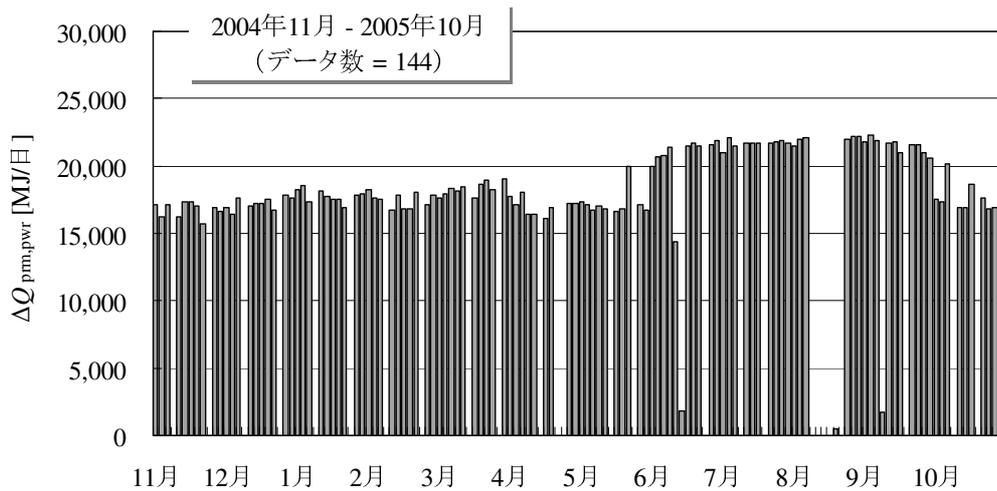


図4-3 商用系統電力と比較した場合のCGS一次エネルギー消費量の増加

図4-3より、SFCの電力需要を全て商用系統電力で賄った場合に対して、CGSを運転した場合、一次エネルギー消費量は、冬期および中間期においては約15,000 MJ/日 (約20%)、夏期においては約20,000 MJ/日 (約30%)、増加する結果となった。これは、SFCに導入されているCGSの発電効率は、表3-2に示す通り0.29 (HHV基準、送電端)であり、商用系統の発電効率平均10.1 MJ/kWh^[82] (=0.36, HHV基準、受電端)に比べて低いためである。発電効率のみの比較では、現状のCGSよりも商用系統の方が優位であるが、以下に、排熱利用による省エネルギー効果についても検討する。また、最新の大型ミラーサイクルガスエンジンCGSでは、発電効率が0.4 (HHV基準)に達するものもあり、高効率CGSの導入による省エネルギー効果についても検討する必要がある。

4-3-2 排熱利用による一次エネルギー消費量の削減効果

CGSの省エネルギー性を評価するためには、商用系統電力と比較した場合の一次エネルギー消費量の増減と共に、ガスエンジンの排熱利用によるガス燃吸収式冷温水発生機のガス消費量および補機動力の削減効果を考慮する必要がある。ここで、調査期間内の144日間について、中央熱源方式（ガス、本館系統）空調システムにおいて製造された冷温水熱量を図4-4に示す。なお、図4-4は、ガスエンジン排熱により製造された冷温水熱量は、1時間毎の計測データを1日毎に集計したものであるが、ガス燃吸収式冷温水発生機により製造された冷温水熱量は、ガス消費量の1日毎の計測データに、機器の定格熱効率（冬期：0.85、夏期：0.93）を乗じて求めたものである。

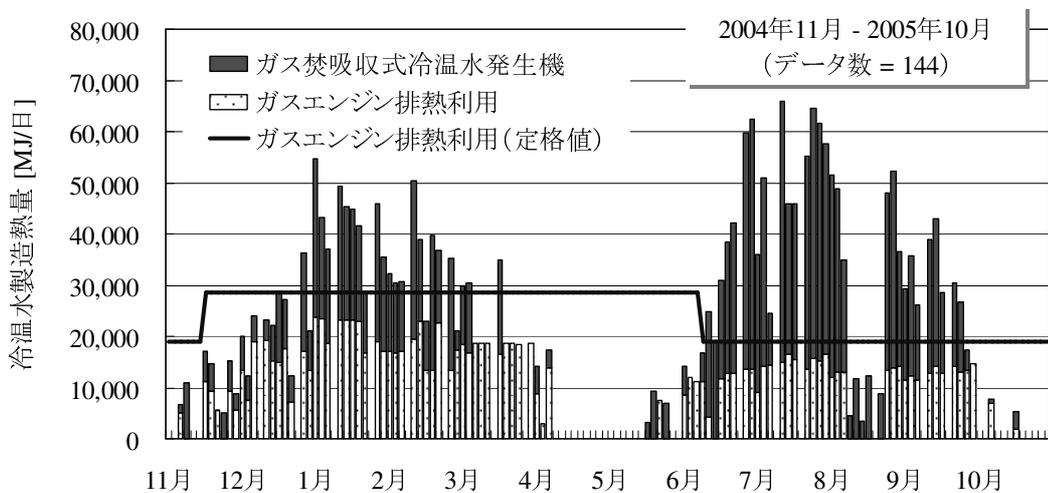


図 4-4 中央熱源方式空調システムにおける冷温水の製造状況

図4-4より、ガスエンジン排熱利用によるガス消費量の削減率は約46%であった。ここで、ガスエンジン排熱利用による、ガス燃吸収式冷温水発生機の一次エネルギー消費の削減量 ($\Delta Q_{\text{prm,exh}}$) を式(4-2)より1日毎に求め、その結果を図4-5に示す。

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{prm,exh}} &= -Q_{\text{exh,CGS}} / \text{COP}_{\text{AHC}} - hr_{\text{grd,dt}} \Delta W_{\text{AHC}} \quad (4-2) \\ &= -c_p V_{03} |t_{01} - t_{02}| / \text{COP}_{\text{AHC}} - hr_{\text{grd,dt}} \Delta W_{\text{AHC}} \end{aligned}$$

ここで、 $Q_{\text{exh,CGS}}$ はガスエンジン排熱を熱源として製造される冷温水熱量、 COP_{AHC} はガス燃吸収式冷温水発生機の成績係数、 ΔW_{AHC} はガスエンジン排熱利用により削減される、ガス燃吸収式冷温水発生機の補機動力、 c_p は水の定圧比熱、 V_{03} はCGS排熱により生成される冷温水流量(図4-1参照、冷温水の密度を 1 g/cm^3 として計算)、 t_{01} および t_{02} はガスエンジン排熱により製造される冷温水の往・還温度(図4-1参照)を表している。また、 COP_{AHC} としては、SFCに導入されているガス燃吸収式冷温水発生機の定格熱効率、冬期：0.85、夏期：0.93を用いた。

図4-5より、一次エネルギー消費量の削減効果は、夏期よりも冬期の方が大きくなっているこ

とが分かる。これは、夏期の冷水よりも冬期の温水の方が、ガスエンジンの排熱利用率が高く、製造される熱量が大きいためである。一方で、冷暖房需要のない中間期においては、 $\Delta Q_{\text{prm,exh}}$ は0になる。SFCの場合は、ガスエンジン排熱の利用先が中央熱源方式（ガス、本館系統）空調システムにおける冷暖房需要に限定されているため、 $\Delta Q_{\text{prm,exh}}$ は冷暖房需要に応じて、季節毎に大きく変動することが定量的に確認できた。

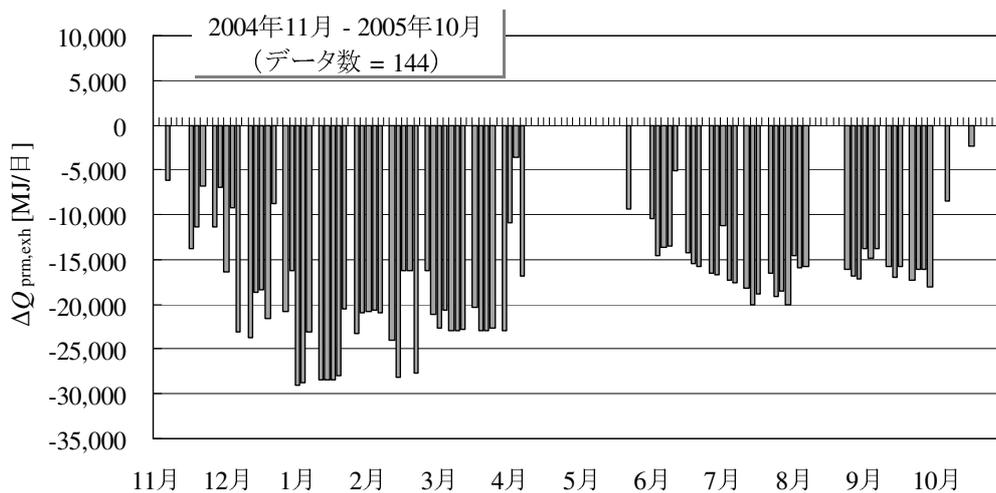


図 4-5 ガスエンジン排熱利用によるガス焚吸収式冷温水発生機の一次エネルギー消費量の削減効果

4-3-3 CGSの省エネルギー性評価

CGSの省エネルギー性を、CGS運転により増減するSFC全体の一次エネルギー消費量(ΔQ_{prm})により評価する。 ΔQ_{prm} は、前節で求めた $\Delta Q_{\text{prm,pwr}}$ および $\Delta Q_{\text{prm,exh}}$ を用いて、式(4-3)より求めることができる。

$$\Delta Q_{\text{prm}} = \Delta Q_{\text{prm,pwr}} + \Delta Q_{\text{prm,exh}} \quad (4-3)$$

ΔQ_{prm} は、SFCの電力需要を全て商用系統電力、中央熱源方式（ガス、本館系統）空調システムの熱需要を全てガス焚吸収式冷温水発生機により賄った場合の、SFC全体の一次エネルギー消費量を基準として、CGSを運転した場合の、SFC全体の一次エネルギー消費量の増減を表す。ここで、 ΔQ_{prm} の計算結果を図4-6に示す。

図4-6より、調査期間内の144日間において、CGS運転により、602 GJの一次エネルギー消費量が増加する結果となった。これを、1年間365日分に換算すると、1,526 GJとなり、現状のSFC全体の1年間の一次エネルギー消費量に対して、1%の増加となる。CGSの省エネルギー性は、発電効率および排熱利用率に大きく依存するため、排熱利用が中央熱源方式（ガス、本館系統）空調システムに限定されているSFCの場合、その省エネルギー性を向上する余地があると言える。

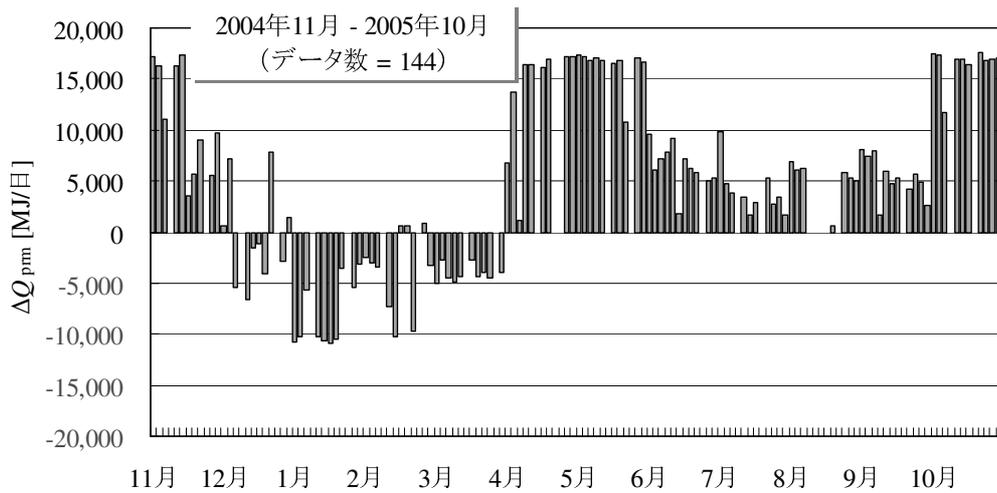


図 4-6 CGS (300 kW×2 台) 運転による SFC 全体の一次エネルギー消費量の増減

4-4 現状 CGS の環境性評価

CGS の環境性を、CGS 運転により増減する SFC 全体の二酸化炭素排出量 (Δm_{CO_2}) により評価する。 Δm_{CO_2} は、 ΔQ_{prn} と同様に、商用系統からの受電電力と比較した場合の、CGS 発電により増減する二酸化炭素排出量 ($\Delta m_{CO_2,pwr}$) と、ガスエンジン排熱利用による二酸化炭素排出の削減量 ($\Delta m_{CO_2,exh}$) により、式 (4-4) - (4-6) から求めることができる。

$$\Delta m_{CO_2,pwr} = m_{gas,CGS} - er_{grd,dt} W_{CGS} \tag{4-4}$$

$$\Delta m_{CO_2,exh} = - (er_{gas} Q_{exh,CGS}) / (h_{HHV} COP_{AHC}) - er_{grd,dt} \Delta W_{AHC} \tag{4-5}$$

$$\Delta m_{CO_2} = \Delta m_{CO_2,pwr} + \Delta m_{CO_2,exh} \tag{4-6}$$

ここで、 $m_{gas,CGS}$ は CGS ガス消費による二酸化炭素排出量、 $er_{grd,dt}$ は昼間時間帯における、商用系統電力の二酸化炭素排出原単位、 er_{gas} はガスの二酸化炭素排出原単位を表している。なお、SFC は東京電力管内であるため、 $er_{grd,dt}$ の値として、東京電力の平均値である $0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[90]}$ を用いた。また、 er_{gas} は $2.28 \text{ kg-CO}_2/\text{Nm}^3^{[91]}$ を用いた。

これより、 Δm_{CO_2} は、SFC の電力需要を全て商用系統電力、中央熱源方式 (ガス、本館系統) 空調システムの熱需要を全てガス焚吸収式冷温水発生機により賄った場合の、SFC 全体の二酸化炭素排出量を基準として、CGS を運転した場合の、SFC 全体の二酸化炭素排出量の増減を表す。ここで、 Δm_{CO_2} の計算結果を図 4-7 に示す。

図 4-7 より、調査期間内の 144 日間において、CGS 運転により、 128 t-CO_2 の二酸化炭素排出量が増加する結果となった。これを、1 年間 365 日分に換算すると、 325 t-CO_2 となり、現状の SFC 全体の 1 年間の二酸化炭素排出量に対して、6 % の増加となる。この計算結果より、現状のシステムにおいては、CGS の導入による二酸化炭素排出量の削減効果は、発揮できていない状況にあると言える。

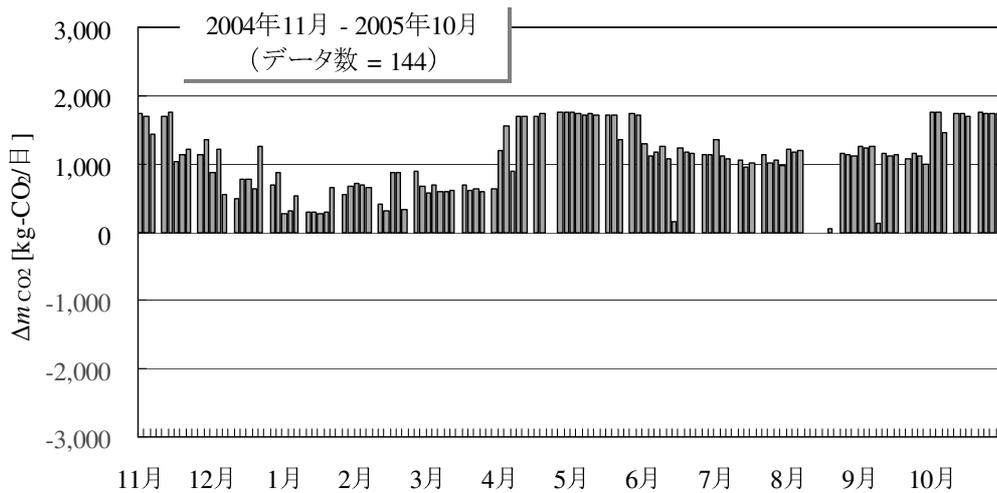


図 4-7 CGS (300 kW×2 台) 運転による SFC 全体の二酸化炭素排出量の増減

4-5 CGS の熱効率解析

本節では、CGS 発電効率および CGS 熱利用効率を用いて、SFC における CGS の運転状況を分析する。電主熱従運転の場合、CGS 発電効率は、導入時の最適容量選択次第で年間を通して定格点での運転が可能となる。一方、CGS 熱利用効率は、電力需要との時間的な不一致、熱需要の季節変動および排熱の搬送に伴う場所的な制約等の要因により、その変動が大きくなる場合がある。例えば、SFC のような大学施設において、ガスエンジン排熱の利用先が中央熱源方式空調システムに限定されている場合、CGS 熱利用効率は、季節変動の大きい冷暖房需要に依存して変動する。従って、熱効率を用いて CGS を評価する場合には、年間を通じた分析が必要である。本研究では、CGS 発電効率 (送電端、 $\eta_{CGS,pwr}$) および CGS 熱利用効率 ($\eta_{CGS,exh}$) を、図 4-1 に示す CGS 境界および記号を用いて、式 (4-7) および式 (4-8) により定義した。

$$\eta_{CGS,pwr} = 3.6 W_{CGS} / Q_{gas,CGS} \tag{4-7}$$

$$= 3.6 (W_{01} + W_{02} - W_{03}) / h_{HHV} (V_{01} + V_{02})$$

ここで、 W_{CGS} は CGS の送電電力量、 $Q_{gas,CGS}$ は CGS ガス消費量の一次エネルギー換算値、 W_{01} 、 W_{02} 、 W_{03} は CGS の発電電力量および補機動力、 h_{HHV} はガスの高位発熱量、 V_{01} 、 V_{02} は CGS のガス消費量である。なお、式 (4-7) の右辺の係数 3.6 は、定義式 $1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ}$ による、電力から熱への二次エネルギー換算を表している。

$$\eta_{CGS,exh} = Q_{exh,CGS} / Q_{gas,CGS} \tag{4-8}$$

$$= c_p V_{03} |t_{01} - t_{02}| / h_{HHV} (V_{01} + V_{02})$$

ここで、 $Q_{exh,CGS}$ はガスエンジン排熱により製造される冷温水熱量、 c_p は水の定圧比熱、 V_{03} はガスエンジン排熱により生成される冷温水流量 (冷温水の密度を 1 g/cm^3 として計算)、 t_{01} 、 t_{02} はガ

スエンジンの排熱により製造される冷温水の往・還温度である。

また、参考として、ガスエンジン発電効率（発電端、 $\eta_{GE,pwr}$ ）およびガスエンジン熱回収効率（ $\eta_{GE,exh}$ ）を、図 4-1 に示すガスエンジン境界および記号を用いて、式 (4-9) および式 (4-10) により定義した。

$$\begin{aligned}\eta_{GE,pwr} &= 3.6 W_{GE} / Q_{gas,CGS} \\ &= 3.6 (W_{01} + W_{02}) / h_{HHV} (V_{01} + V_{02})\end{aligned}\quad (4-9)$$

$$\begin{aligned}\eta_{GE,exh} &= Q_{exh,GE} / Q_{gas,CGS} \\ &= c_p V_{04} |t_{03} - t_{04}| / h_{HHV} (V_{01} + V_{02})\end{aligned}\quad (4-10)$$

ここで、 W_{GE} はガスエンジンの発電電力量、 $Q_{exh,GE}$ はガスエンジン排熱回収量、 V_{04} はガスエンジン排熱の回収媒体である温水流量（温水の密度を 1 g/cm^3 として計算）、 t_{03} 、 t_{04} はガスエンジン排熱の回収媒体である温水の往・還温度である。

ここで、計測データを取得した 144 日間の内、CGS が運転されていた平日の 114 日間について、 $\eta_{CGS,pwr}$ および $\eta_{GE,pwr}$ の日平均値を図 4-8 に、 $\eta_{CGS,exh}$ および $\eta_{GE,exh}$ の日平均値を図 4-9 に示す。

図 4-8 より、 $\eta_{GE,pwr}$ は、年間を通して、定格値である 0.32 近傍を維持し、また、 $\eta_{CGS,pwr}$ も、定格値である 0.29（冬期）および 0.28（夏期）近傍での運転となっている。 $\eta_{GE,pwr}$ と $\eta_{CGS,pwr}$ の差は、CGS の補機動力の影響を表している。夏期においては、ガスエンジン排熱を熱源として冷水を製造する温水吸収式冷凍機用の冷却塔およびポンプ動力分が補機動力として増加するため、両者の差は大きくなる。排熱利用の無い中間期においては、冷温水製造用の補機動力が不要となるため、両者の差は小さくなる。

一方で、図 4-9 に示す $\eta_{CGS,exh}$ および $\eta_{GE,exh}$ の日平均値は、季節により大きく変動していることが確認できる。これは、現状システムにおいて、ガスエンジン排熱の利用先が中央熱源方式（ガス、本館系統）空調システムに限定されているため、 $\eta_{CGS,exh}$ および $\eta_{GE,exh}$ は季節依存性の強い冷暖房需要に大きく影響を受けるためである。図 4-9 において、 $\eta_{CGS,exh}$ の冬期および夏期平均値は、それぞれ、0.21 および 0.15 となり、定格値である 0.34 および 0.22 よりも小さくなる。また、 $\eta_{CGS,exh}$ が最も高くなる時期でも、定格値に達する日はほとんどない。これは、図 4-9 に示した $\eta_{CGS,exh}$ が日平均値であり、冷暖房需要がピークとなる冬期および夏期の 1 日の中でも、 $\eta_{CGS,exh}$ は時刻毎に大きく変動していることを示している。なお、図 4-9 の両者の差は、冬期は、温水を製造するための熱交換器における熱損失、夏期は、冷水を製造するための温水吸収式冷凍機における熱損失を表している。

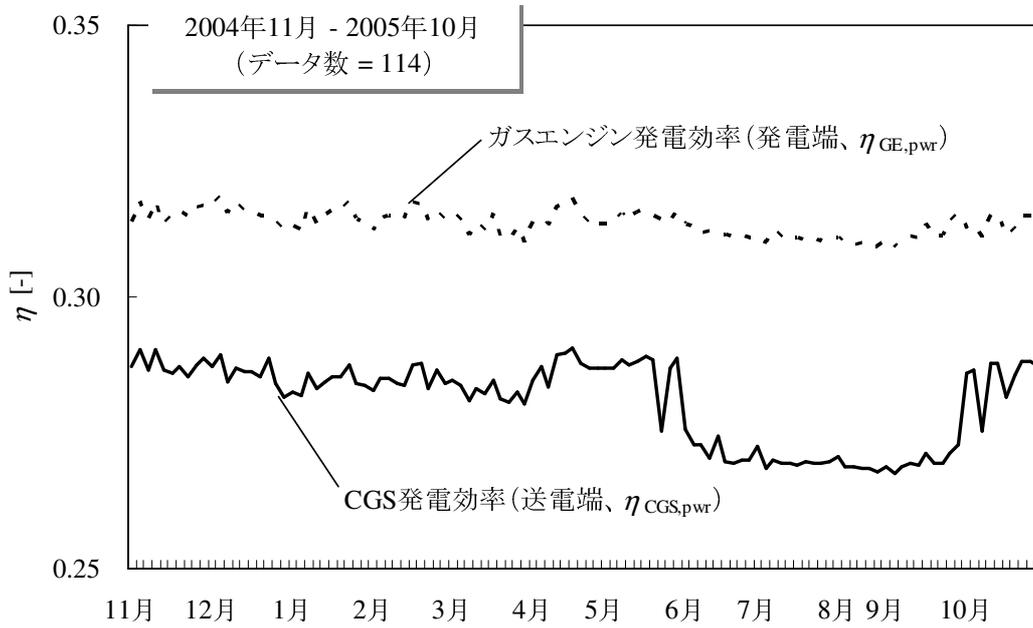


図 4-8 CGS 発電効率およびガスエンジン発電効率の季節変動

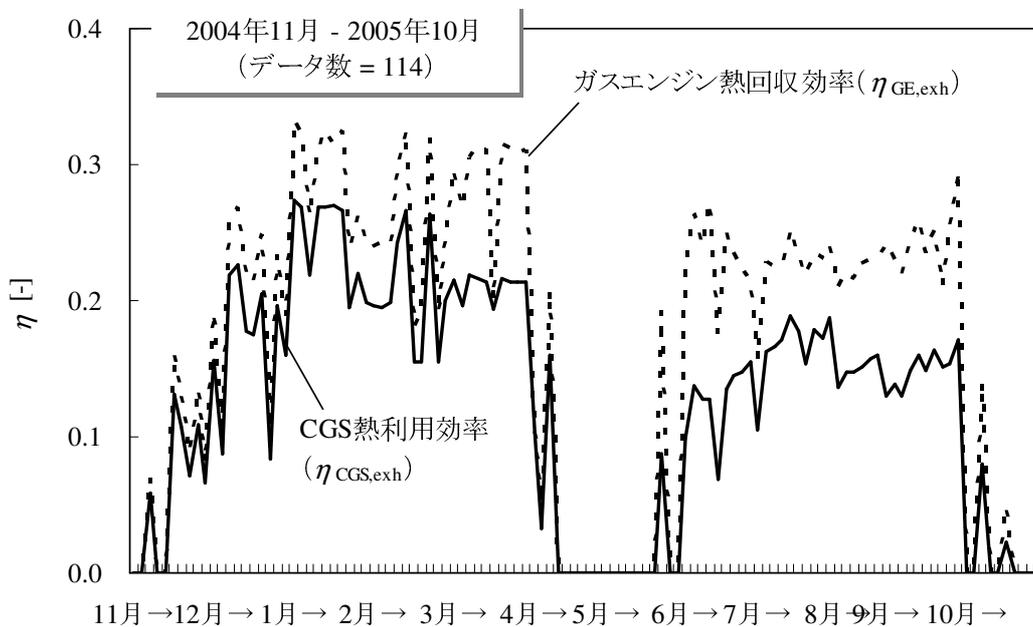


図 4-9 CGS 熱利用効率およびガスエンジン熱回収効率の季節変動

上述した熱効率解析により、CGSの年間を通した運転状況を定量的に確認することができた。一方で、本研究では、CGSの省エネルギー性に関する評価として、構内全体の一次エネルギー消費量による総量評価を用いている。よって、ここで、SFC全体の一次エネルギー消費量とCGS熱効率の関係を求め、CGS熱効率がSFC全体の省エネルギー性に与える影響を分析する。図4-10は、CGS運転によるSFC全体の一次エネルギー消費量の増減(ΔQ_{prm} 、図4-6参照)と $\eta_{\text{CGS,exh}}$ との関係を示したものである。なお、 $\eta_{\text{CGS,pwr}}$ は年間を通してほぼ一定であるため、ここでは、CGSの熱効率として、季節変動の大きい $\eta_{\text{CGS,exh}}$ を用いた。

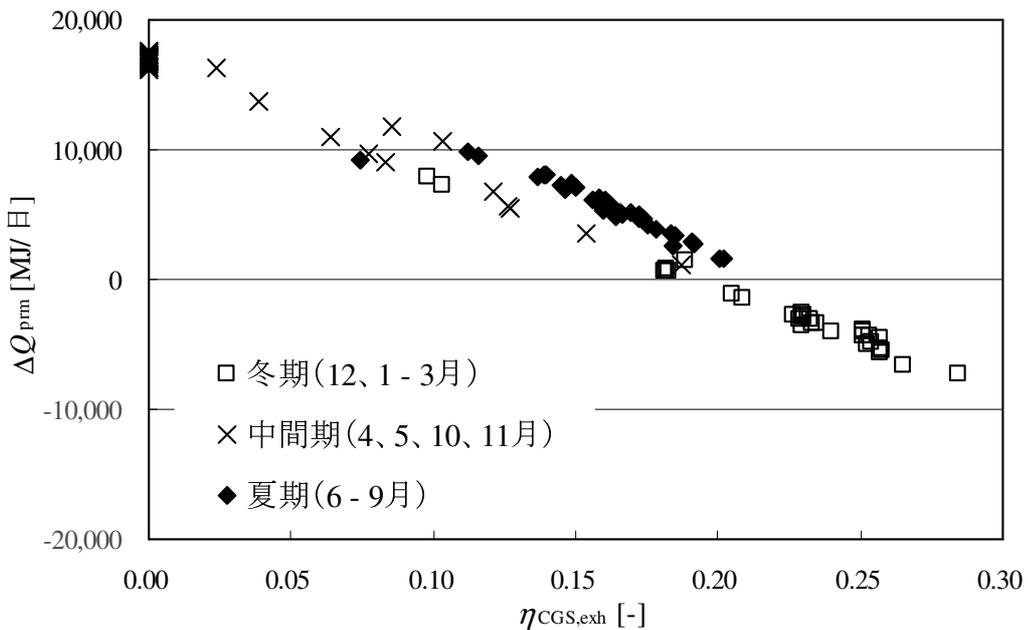


図 4-10 CGS (300 kW×2 台) 運転による SFC 全体の一次エネルギー消費量の増減と CGS 熱利用効率の関係

図 4-10 より、 ΔQ_{prm} は $\eta_{\text{CGS,exh}}$ に大きく依存しており、CGS の省エネルギー性は、排熱利用に強く関係していることが確認できる。冬期 (12、1 - 3 月) においては、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ が 0.18 以上の領域において ΔQ_{prm} が負の値となり、CGS 導入による省エネルギー性の向上が確認できる。一方、中間期 (4、5、10、11 月) および夏期 (6-9 月) においては、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ が 0.2 よりも大きくなる領域はなく、CGS 導入による省エネルギー性が発揮できていない結果となっている。なお、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ が 0.2 の時、 ΔQ_{prm} は冬期よりも夏期の方が大きくなるが、これは、夏期においては、温水吸収式冷凍機を駆動するための補機動力の増加により発電効率 (送電端) が低下するため、CGS の省エネルギー性を高めるために、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ の向上で補わなければならないためである。

第5章 エネルギー利用システムのシミュレーション

5-1 SFC におけるエネルギー利用システムの現状

前章においては、SFC における 1 年間のエネルギー需要調査を基に、現状 CGS の省エネルギー性および環境性を定量的に評価した。その結果、現状では、中間期における排熱利用の問題等から、CGS 導入による一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量の削減効果は、十分に発揮されていないことを確認した。この問題は、1990 年頃に SFC の建築および空調設備設計が完了し、その後の 2000 年に CGS が導入された結果、ガスエンジン排熱を最大限に有効利用する空調設備の検討ができなかったためであると考えられる。

SFC の空調システムは、中央熱源方式（ガス）、中央熱源方式（電気）、個別熱源方式に大別できる。ここで、SFC の CGS は、空調設備よりも後に導入されたため、ガスエンジン排熱の利用先は、中央熱源方式（ガス）空調システムのみに限定される結果となった。このような状況下においては、ガスエンジン排熱を最大限に利用することができない。例えば、空調設備設計において、使い勝手の良いパッケージエアコン等の個別熱源方式が優先的に多く導入された場合、建物間での冷温熱エネルギーの融通ができなくなる。その結果、冷暖房需要の小さい中間期においては、ガスエンジンの排熱を大気に放出する一方で、質の高いエネルギーである電力により冷暖房を行うといった、熱エネルギーの無駄が生じる状況になることがある。

このような CGS の導入に関する問題は、SFC のみでなく、一般的な問題として指摘することができる。CGS の導入件数は 1980 年代後半から増加し始め、特に、1990 年頃のバブル経済時期においては、経済性および危機管理性の視点から数多く導入された。その結果、CGS の省エネルギー性および環境性を最大限に発揮する導入方法に関して、十分な検討を行う時間の確保が困難であったと考えられる。今後、バブル経済時期に導入された多くの設備が更新時期に突入することを考慮すると、省エネルギー性および環境性の視点も重視し、改めて、その導入方法を検討する時期に来ていると言える。

5-2 SFC におけるエネルギー利用システムの検討

本研究では、CGS を含むエネルギー利用システムの環境負荷低減を実現するために、下記の 2 つのシステムを、シミュレーションにより検討する。

1. 排熱優先利用システム：

SFC における空調システムの熱源として、CGS 排熱を最大限に利用するシステム。

2. 電力託送システム：

SFC に設置された CGS の発電電力を、矢上キャンパスに託送するシステム。

排熱優先利用システムでは、SFC の空調システムにおいて、排熱利用の拡張による環境負荷の削減効果を検証するために、ガスエンジン排熱を、現状の中央熱源方式（ガス）空調システムのみから、中央熱源方式（電気）および個別熱源方式により賄われている冷暖房需要分も含め、SFC

全体の冷暖房需要の熱源として最大限に有効利用するシステムを検討する。ここで、排熱優先利用システムを実現するためには、SFCの空調システムを全て中央熱源方式で構築する必要がある。中央熱源方式空調システムでは、ある場所に設置された熱源機器で製造した冷温水を、冷温水循環ポンプにより配管網に沿って各建物に供給するが、熱源機器・建物配置、配管網等により、冷温水循環ポンプの動力は大きく変化し、また、冷暖房需要が発生する時間および場所的な不確実性のために、ポンプ動力の最小化問題は複雑となる。よって、中央熱源方式空調システムを構築する際には、時刻および建物別の冷暖房需要を基に、熱源機器・建物配置、配管網等の最適設計を行うことが必要であるが、本研究では、熱エネルギー有効利用の視点から、まず、CGSの潜在的な環境負荷低減効果について検討することを目的としている。

電力託送システムにおいては、SFCに設置されたCGSの余剰発電電力を、矢上キャンパスへ託送するシステムを検討する。CGSを単一建物に設置し、その建物内の電力需要に対してのみ電力供給を行う場合、CGSの発電容量および運転負荷率は、その建物の電力需要に制限される。これに対し、異なる電力需要特性を持つ複数の建物に対して、CGSの発電電力を供給することで、CGSの運転自由度が向上し、発電容量の最適化および運転負荷率の改善が期待される。一般的に、CGSの発電効率は、発電容量が増大するにつれ、また、負荷率が高くなるほど、高くなる。

電力託送に関しては、1995年4月に31年ぶりに電気事業法が改正され、また、その後の1999年5月に、2000年3月からは、特別高圧で受電する需要家を対象に、電力小売自由化が認められることが取決められた。その後、2003年6月に再び電気事業法が改正され、2004年4月からは契約電力500kW以上の高圧で受電する需要家、2005年4月からは高圧で受電する全ての需要家を対象に、電力小売自由化が認められると共に、中立機関の設置により、送配電部門の公平性および透明性の確保が取決められている。このような背景から、今後は、エネルギー利用システムの検討を行う際に、電力託送を考慮に入れる必要があると考えられる。

5-3 シミュレーションで用いた基礎情報

5-3-1 エネルギー需要

CGS、空調設備等、要素機器の効率は、エネルギー需要に応じて変動する。特に、部分負荷運転時においては、定格運転時に比べて、効率が低下する状況も発生し得る。よって、最適な機器容量は、エネルギー需要の変動に起因する、機器の部分負荷特性を考慮して決定しなければならない。そのためには、まず、時刻別のエネルギー需要情報が不可欠である。特に、CGSの導入を検討する場合においては、その効率が需要の熱電比により大きく変動するため、時刻別の電力および熱需要に関する情報が必要となる。以下に、エネルギー利用システムのシミュレーションを行う際に入力情報として用いた、エネルギー需要について述べる。

1. 慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス (SFC)

SFCのエネルギー需要に関しては、第3章において明らかにしたが、本項においては、エネルギー利用システムのシミュレーションを行う際に基礎データとして用いる、時刻別電力および冷暖房需要についてまとめる。なお、給湯需要に関しては、そのガス消費量が調理用と一緒に計測されているため分離が困難であることと、図3-6に示す通り、給湯および調理用ガス消費量の一

次エネルギー換算値は、SFC全体の1%程度であるため、本シミュレーションでは検討しない。

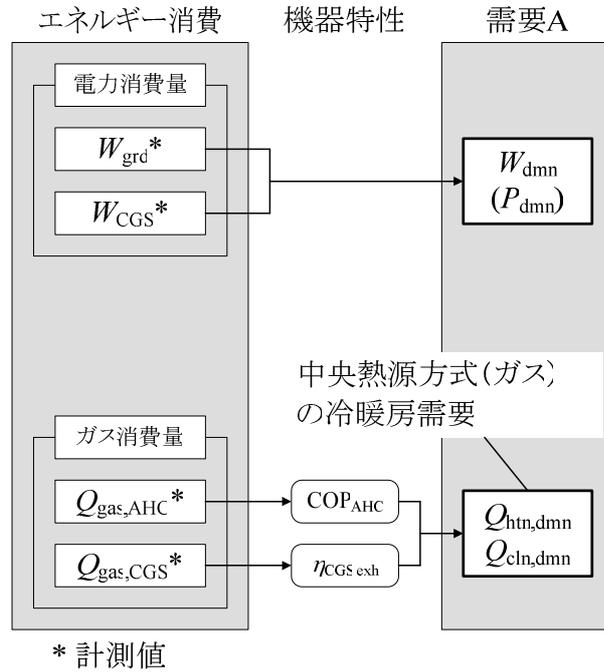
ここで、本研究では、電力、冷暖房等の、最終利用形態におけるエネルギー需要のエクセルギーに見合った供給システムの構築が、環境負荷の低減効果へ与える影響を検証するために、図5-1(a)および(b)に示す2通りの方法により、SFCの電力(W_{dnn} [kWh]または P_{dnn} [kW])および冷暖房需要($Q_{cln,dnn}$ [MJ/h]、 $Q_{htn,dnn}$ [MJ/h])を求める。

図5-1(a)は、SFCの現状設備における電力および冷暖房需要を、計測値から直接推定する方法であり、以下、この方法で推定されたエネルギー需要を「需要A」と呼ぶ。この方法においては、電力需要(W_{dnn})は、商用系統電力からの受電電力(W_{grd})および補機動力を除いたCGS送電電力(W_{CGS})の合計となる。一方、冷暖房需要($Q_{cln,dnn}$ 、 $Q_{htn,dnn}$)は、ガス焚吸収式冷温水発生機(AHC)のガス消費量($Q_{gas,AHC}$)およびCOP(COP_{AHC})、ならびに、CGSのガス消費量($Q_{gas,CGS}$)およびCGS熱利用効率($\eta_{CGS,exh}$)を用いて求めた熱量から、配管損失を差引いた熱量となる。

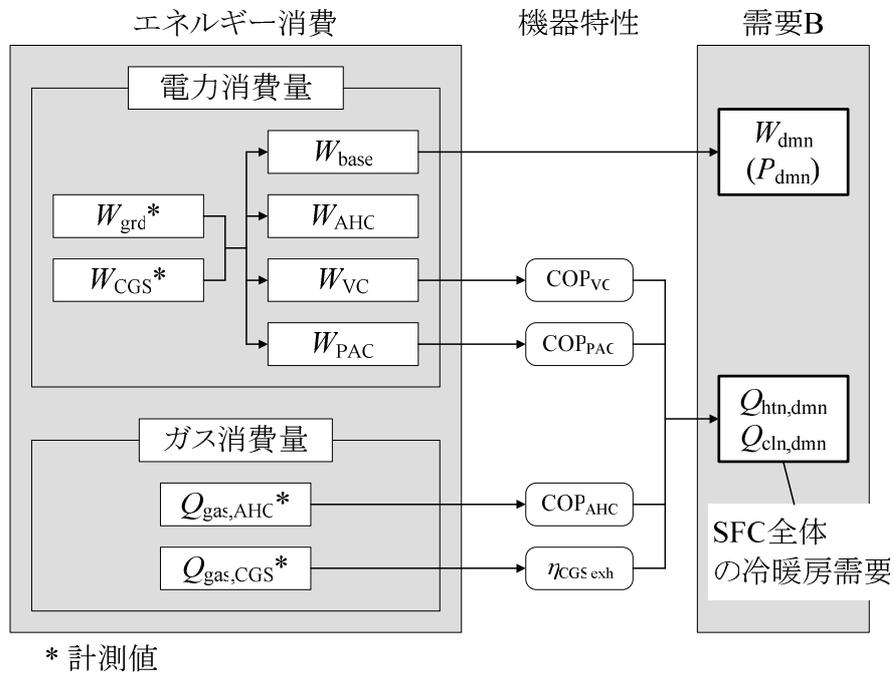
一方、図5-1(b)は、エネルギーの最終利用形態における電力および冷暖房需要を、計測値を基に、機器効率特性による電力から熱エネルギーへの変換等を用いて推定する方法であり、以下、この方法で推定されたエネルギー需要を「需要B」と呼ぶ。この方法においては、電力需要(W_{dnn})は、照明、コンセント、一般動力等のベース電力需要(W_{base})のみとなる。一方、蒸気圧縮式ヒートポンプチラー(VC)およびパッケージエアコン(PAC)の空調用電力消費量(W_{VC} 、 W_{PAC})は W_{dnn} から分離され、それぞれのCOP(COP_{VC} 、 COP_{PAC})を用いて、 $Q_{cln,dnn}$ または $Q_{htn,dnn}$ に変換される。なお、3-4節で求めた電力および冷暖房需要は、図5-1(b)に示す方法で求めた需要Bに該当する。

図5-1(b)に示す需要Bのように、SFC全体の電力消費量から、季節による変化の小さい W_{base} と、主に気温に依存して季節により大きく変動する W_{VC} および W_{PAC} を分離し、 W_{VC} および W_{PAC} を冷暖房需要として扱うことで、電力、ガス等のエネルギー消費量ではなく、最終利用形態におけるエネルギー需要を求めることができる。この方法により、最終利用形態における冷暖房需要を求めることで、自然エネルギー、排熱等の有効利用可能範囲を適切に把握することが可能となり、需要のエクセルギーに見合った、最適な供給システムの選定が可能となる。

ここで、上述した2通りの方法により推定した、SFCの時刻別電力需要、冷房需要および暖房需要をそれぞれ、図5-2、図5-3および図5-4に示す。これらの図は全て、左側の(a)、(c)、(e)および(g)が需要Aを、右側の(b)、(d)、(f)および(h)が需要Bを表している。図5-2の時刻別電力需要より、需要Aは、VCおよびPACの空調用電力消費量を含むため、季節変動が大きく、7月に最大となる。一方で、需要Bにおいては、季節により変化するVCおよびPACの空調用電力消費量が含まれないため、電力需要の季節変動は小さい。また、図5-3の時刻別冷房需要および図5-4の時刻別暖房需要においては、需要Aよりも需要Bの方が大きくなる。これは、需要Aが中央熱源方式(ガス)のみの冷暖房需要であるのに対して、需要Bは、VCおよびPACにより供給される分も含めた、SFC全体の冷暖房需要を表しているためである。ここで、需要Aおよび需要Bをそれぞれ、144日(12日/月)について求め、シミュレーションの入力データとして扱う。

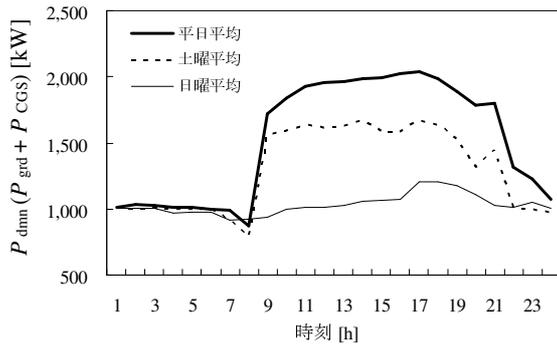


(a) 需要 A

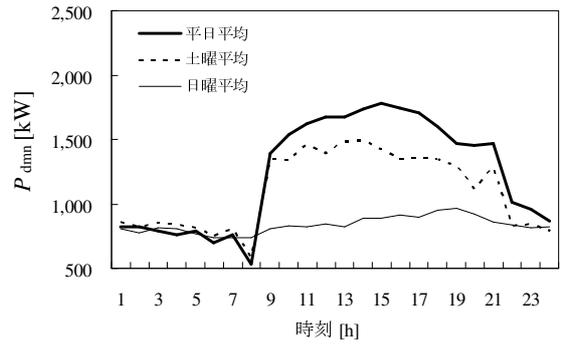


(b) 需要 B

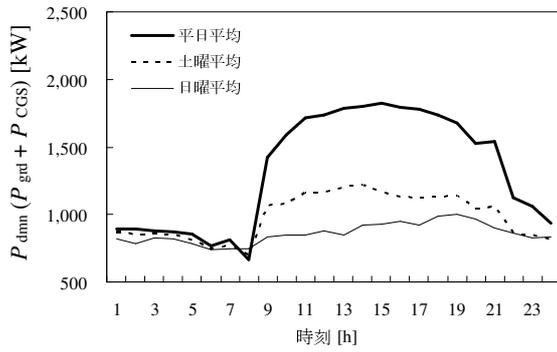
図 5-1 SFCにおける電力および冷暖房需要の推定方法



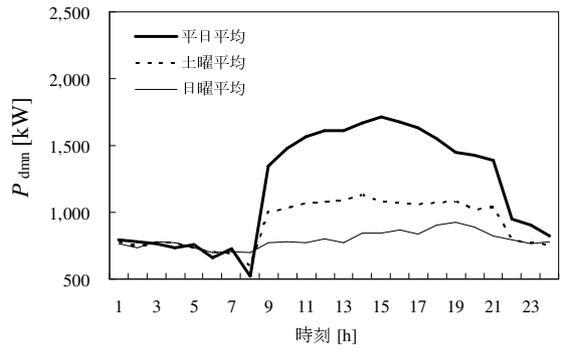
(a) 1月の電力需要 (需要A)



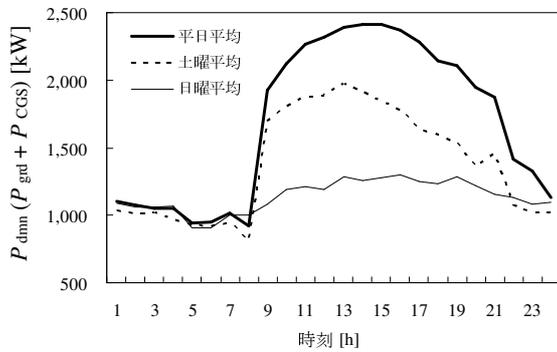
(b) 1月の電力需要 (需要B)



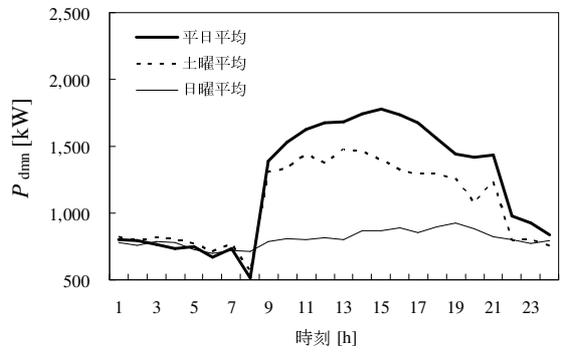
(c) 4月の電力需要 (需要A)



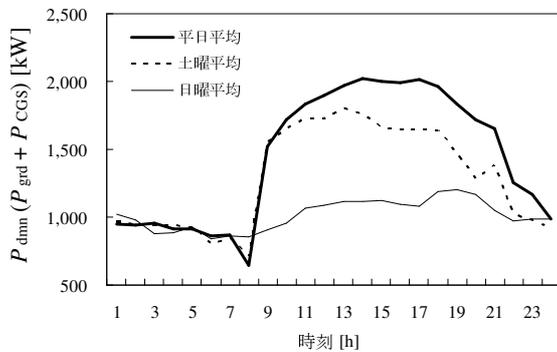
(d) 4月の電力需要 (需要B)



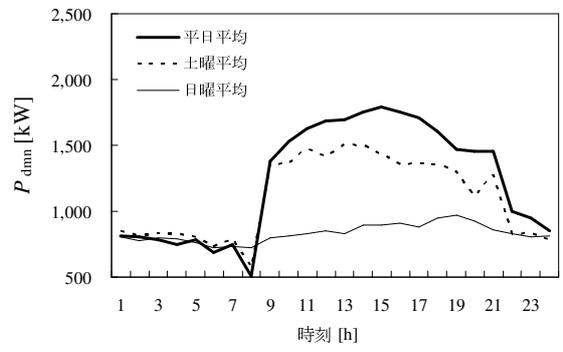
(e) 7月の電力需要 (需要A)



(f) 7月の電力需要 (需要B)

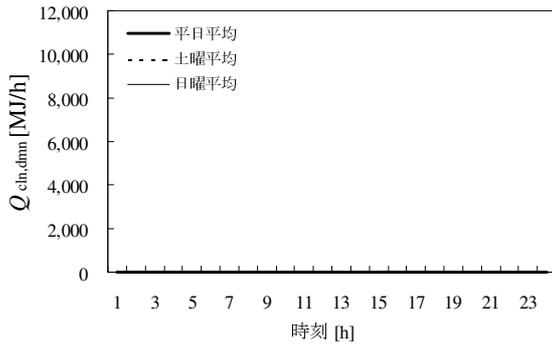


(g) 10月の電力需要 (需要A)

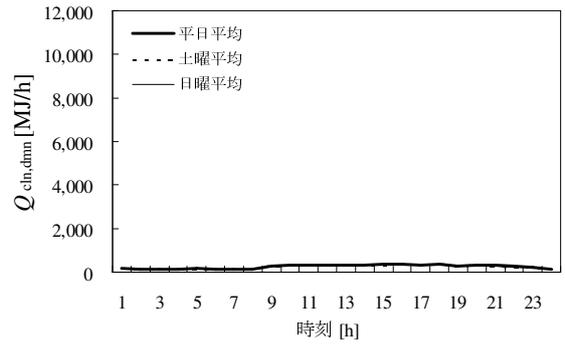


(h) 10月の電力需要 (需要B)

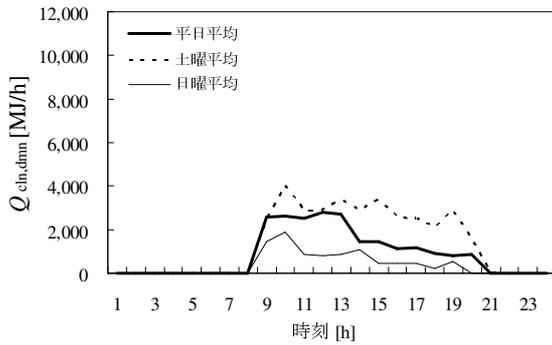
図 5-2 SFC の時刻別電力需要



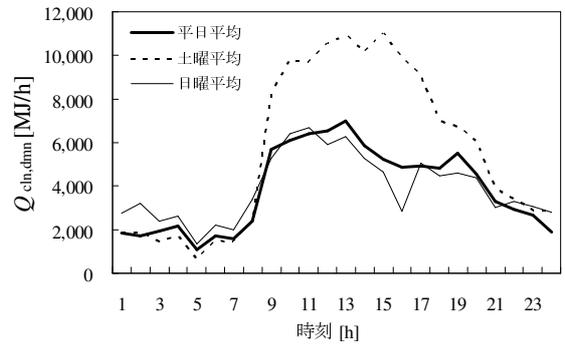
(a) 4月の冷房需要 (需要 A)



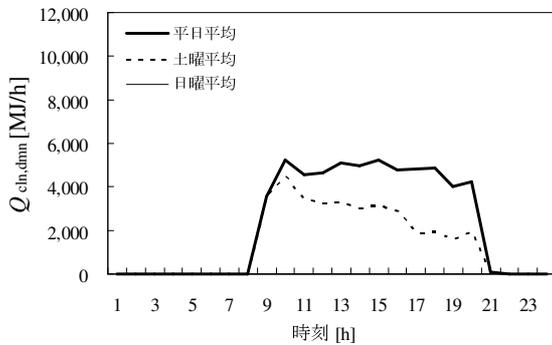
(b) 4月の冷房需要 (需要 B)



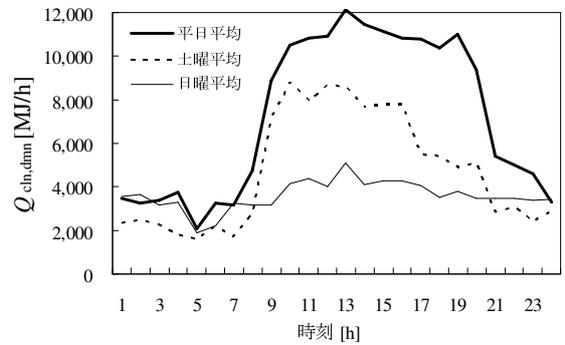
(c) 6月の冷房需要 (需要 A)



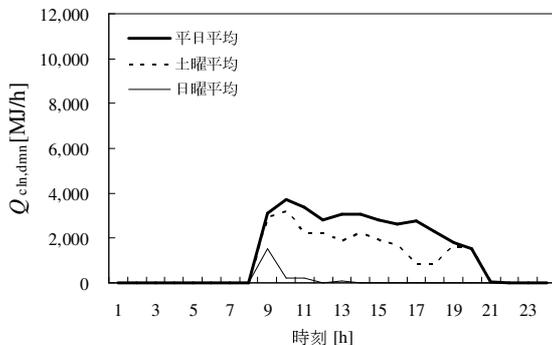
(d) 6月の冷房需要 (需要 B)



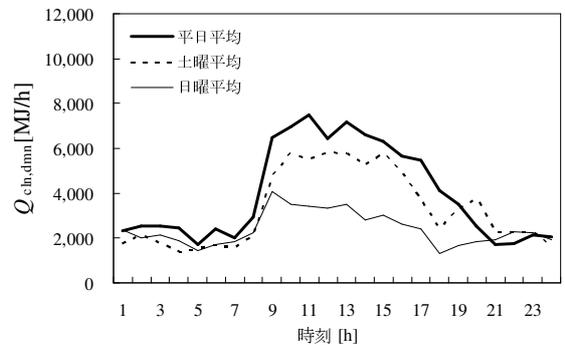
(e) 7月の冷房需要 (需要 A)



(f) 7月の冷房需要 (需要 B)

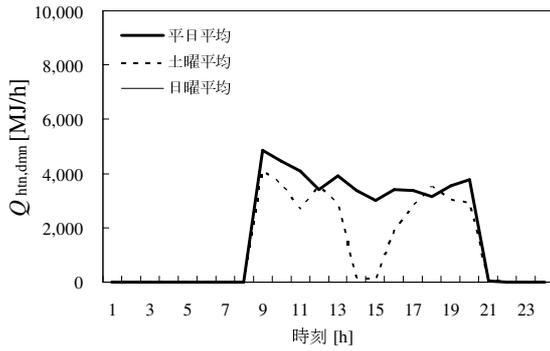


(g) 8月の冷房需要 (需要 A)

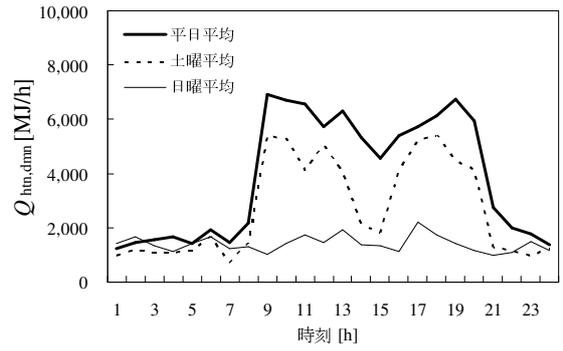


(h) 8月の冷房需要 (需要 B)

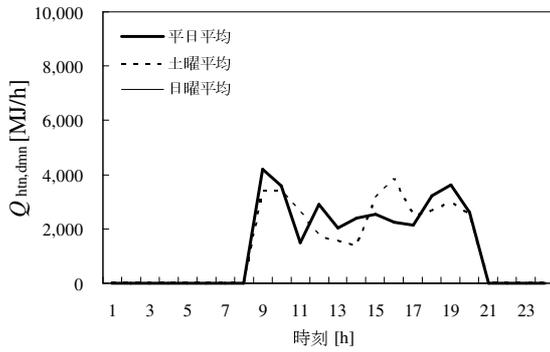
図 5-3 SFC の時刻別冷房需要



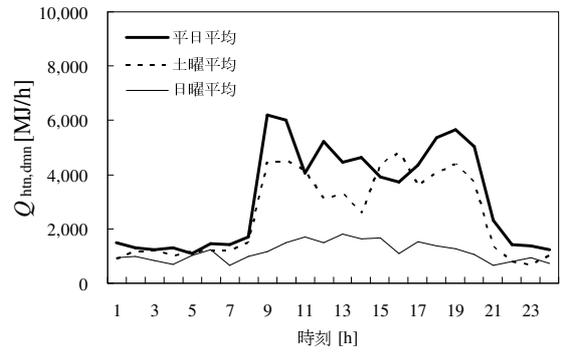
(a) 1月の暖房需要 (需要 A)



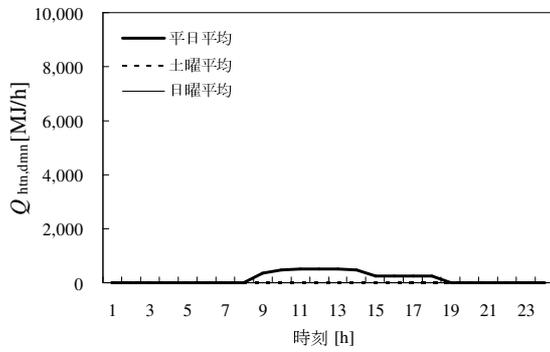
(b) 1月の暖房需要 (需要 B)



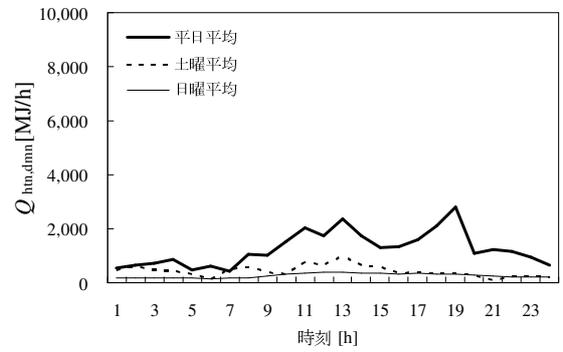
(c) 2月の暖房需要 (需要 A)



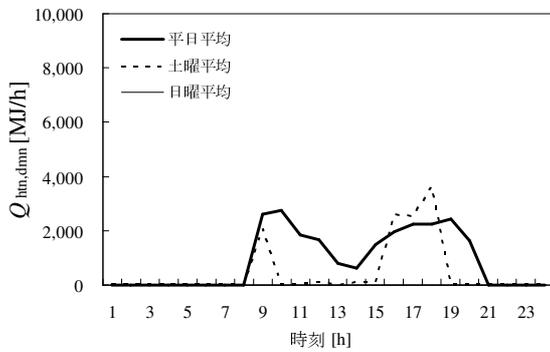
(d) 2月の暖房需要 (需要 B)



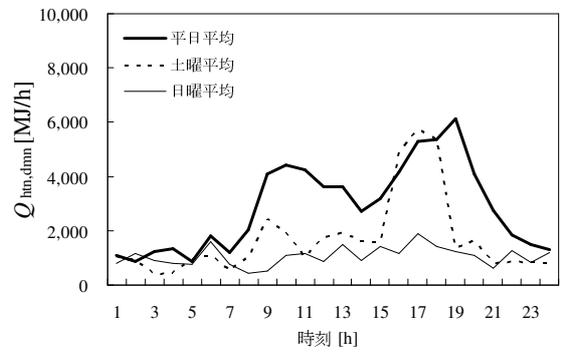
(e) 4月の暖房需要 (需要 A)



(f) 4月の暖房需要 (需要 B)



(g) 12月の暖房需要 (需要 A)



(h) 12月の暖房需要 (需要 B)

図 5-4 SFC の時刻別暖房需要

2. 慶應義塾大学矢上キャンパス

シミュレーションでは、矢上キャンパスは、SFC に設置された CGS の電力託送先として検討し、電力託送により影響を受ける部分は、商用系統からの受電電力のみとする。よって、矢上キャンパスにおける時刻別のエネルギー需要としては、商用系統からの受電電力 (W_{grd}) のみを扱う。ここで、矢上キャンパスの時刻別受電電力の計測データを図 5-5 に示す。図 5-5 に示す W_{grd} は、2004 年 11 月から 2005 年 10 月までの各月における、平日の平均値を表している。

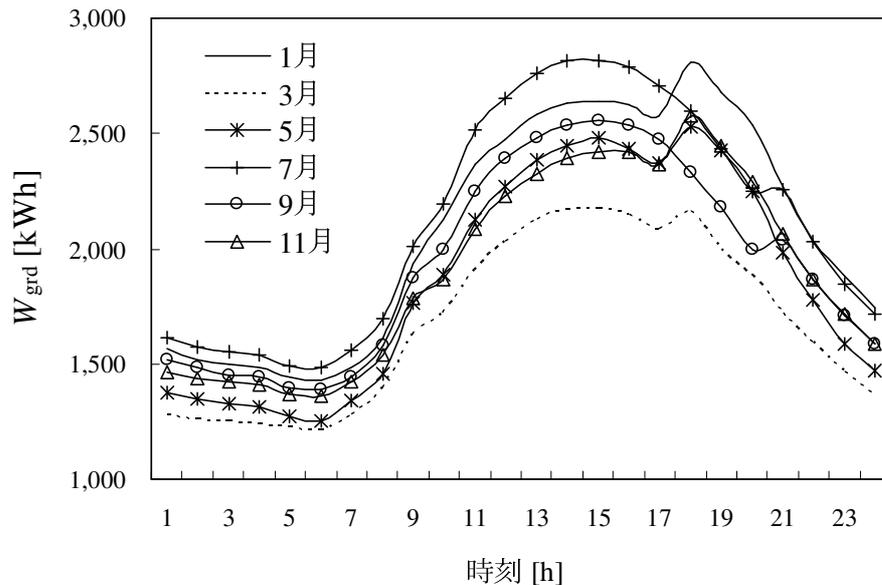


図 5-5 矢上キャンパスの時刻別受電電力 (平日平均)

図 5-5 において、矢上キャンパスの W_{grd} は、いずれの月においても、図 3-8 の SFC 全体の電力消費量 ($W_{\text{grd}} + W_{\text{CGS}}$) よりもピーク電力需要が大きく、電力託送先として十分な電力需要を有する。なお、矢上キャンパスの契約電力は 3,400 kW であり、特別高圧 (22,000 V) での受電となっている。また、矢上キャンパスでは、午前中から電力需要がピークとなる 14 時頃にかけて、急激に電力需要が増大しており、商用系統電力のピーク供給用電源である石油火力への大きな負荷を避けるためにも、電力託送先として適切であると考えられる。

5-3-2 商用系統電力の電源構成および環境負荷の原単位

商用系統電力の電源構成は、図 5-6 に示す通り、ベース供給用電源である原子力、石炭および一般水力、ミドル供給用である LNG、LPG およびその他ガス、そして、ピーク供給用である石油および揚水式水力に大別することができる。この内、ピーク供給用電源は昼間のみ、ミドル供給用電源は、その多くが昼間に運転される。そして、ベース供給用電源は、1 日を通して、ほぼ一定の出力で運転されている。また、時間帯別に見ると、夜間はベース供給用電源の構成比率が約 50 - 70 % と高いが、昼間は、ベース供給用電源が約 40 %、ミドルおよびピーク供給用電源がそれぞれ、約 30 % の電力を供給することになる。なお、図 5-6 は、文献 [92] を基に作成したものである。

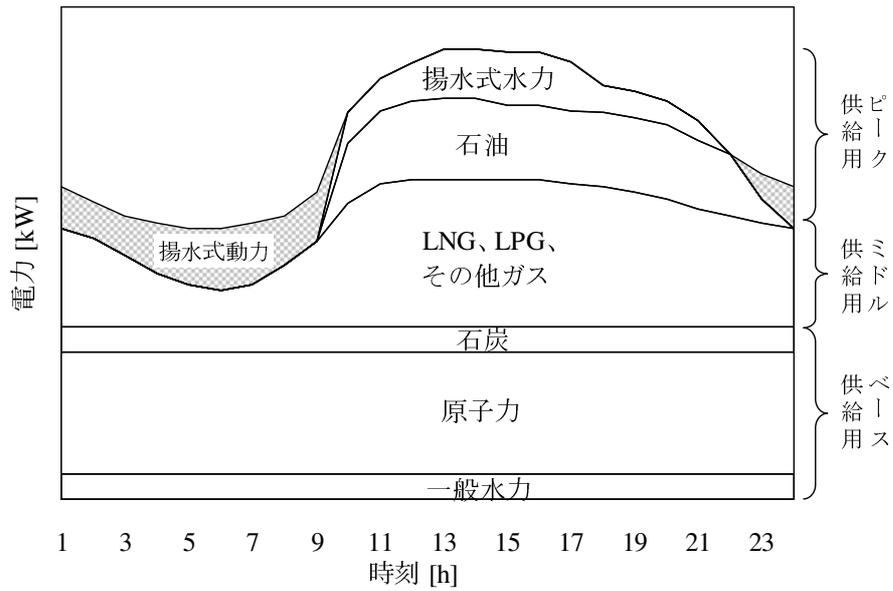


図 5-6 商用系統電力の時刻別電源構成^[92]

マクロ的な視点から環境負荷低減を実現するためには、一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量の少ない原子力発電を有効利用しつつ、これら環境負荷の大きい石油火力発電の負荷を低減することが有効であると考えられる。従って、分散電源を導入する際、その役割を石油火力発電の代替として捉え、夜間はその運転を停止し、昼間のみ運転する方式が有効であると考えられる。また、分散電源の中でも CGS については、発電電力のみでなく、その排熱を空調等に利用することによっても、ピーク電力負荷の低減が可能となる。このように、商用系統電力の電源構成と協調しながら分散電源を導入することで、商用系統電力のピーク電力負荷を平準化し、LNG コンバインド等、高効率発電所の運転構成比率を高めることが可能になると考える。また、図 5-6 より、昼間時間帯のピーク電力を賄うために、揚水式水力が稼働しているが、この揚水式動力として、夜間時間帯において火力発電所が稼働していることが分かる。よって、昼間時間帯のピーク電力負荷を、分散電源により低減することができれば、夜間時間帯における火力発電所の稼働を抑えることも期待できる。

本研究のシミュレーションでは、商用系統からの受電電力 (W_{grd} [kWh]) を、一次エネルギー消費量 (Q_{prm} [MJ]) および二酸化炭素排出量 (m_{CO_2} [kg-CO₂]) に換算する際に、表 5-1 および表 5-2 に示す、一次エネルギー消費原単位 (hr_{grd} [MJ/kWh]) および二酸化炭素排出原単位 (er_{grd} [kg-CO₂/kWh]) を、それぞれ用いる。ここで、表 5-1 中の、昼間時間帯における商用系統電力の一次エネルギー消費原単位 ($hr_{\text{grd,dt}}$) は、10.1 MJ/kWh であるが、これを効率に換算すると、約 36% となる。この数値は、おおよそ、ピーク供給用電源である火力発電所の効率と等しくなる。

また、表 5-1 および表 5-2 には、ガス消費量 (V_{gas} [Nm³]) を一次エネルギー消費量 (Q_{prm} [MJ]) および二酸化炭素排出量 (m_{CO_2} [kg-CO₂]) に換算するための、高位発熱量 (h_{HHV} [MJ/Nm³]) および二酸化炭素排出原単位 (er_{gas} [kg-CO₂/Nm³]) も、それぞれ示した。

表 5-1 一次エネルギー消費原単位および高位発熱量

項目	単位		
商用系統電力	hr_{grd}		
全日平均	(hr_{grd})	MJ/kWh	9.83 ^[82]
夜間時間帯	$(hr_{\text{grd,nt}})$	MJ/kWh	9.31 ^[82]
昼間時間帯	$(hr_{\text{grd,dt}})$	MJ/kWh	10.1 ^[82]
ガス	h_{HHV}	MJ/Nm ³ (HHV)	46.0

表 5-2 二酸化炭素排出原単位

項目	単位		
商用系統電力	er_{grd}		
東京電力平均		kg-CO ₂ /kWh	0.368 ^[90]
石油火力		kg-CO ₂ /kWh	0.704 ^[93]
LNG 火力		kg-CO ₂ /kWh	0.478 ^[93]
LNG コンバインド		kg-CO ₂ /kWh	0.408 ^[93]
原子力		kg-CO ₂ /kWh	0.00 ^[93]
ガス	er_{gas}	kg-CO ₂ /Nm ³	2.28 ^[91]

5-3-3 要素機器の性能特性

1. コージェネレーションシステム (CGS)

シミュレーションでは、表 5-3 に示す CGS の導入を検討する。表 5-3 において、635 kW から 5,100 kW までの CGS は、現状機器である 300 kW の CGS の代替として新たに導入する機器であり、1,400 kW の CGS 以外は全て、ミラーサイクル方式の高効率ガスエンジンを採用している。なお、表 5-3 に示す仕様は、文献 [94] およびメーカーカタログを基に計算したものである。

表 5-3 CGS の定格値および部分負荷特性^[94]

$P_{\text{CGS,rd}}$ [kW]	$Q_{\text{gas,CGS}}^{*1}$ [MJ/h]	定格値			
		$\eta_{\text{CGS,pwr}}^{*2}$ [-]		$\eta_{\text{CGS,exh}}^{*3}$ [-]	
		暖房 / 冷房		暖房 / 冷房	
300 ^{*4}	3,389	0.29 / 0.28		0.32 / 0.21	
635 ^{*5}	6,485	0.34 / 0.33		0.30 / 0.30	
1,400	13,668	0.35 / 0.34		0.28 / 0.27	
2,550 ^{*5}	22,571	0.39 / 0.38		0.33 / 0.25	
3,800 ^{*5}	33,266	0.39 / 0.38		0.33 / 0.25	
4,450 ^{*5}	38,956	0.39 / 0.38		0.33 / 0.25	
5,100 ^{*5}	44,647	0.39 / 0.38		0.33 / 0.25	

$P_{\text{CGS,rd}}$ [kW]	部分負荷特性					
	$\eta / \eta_{\text{rd}} = a LF_{\text{CGS}}^2 + b LF_{\text{CGS}} + c$					
	$\eta_{\text{CGS,pwr}}$ [-]			$\eta_{\text{CGS,exh}}$ [-]		
	a	b	c	a	b	c
300 ^{*4}	- 0.304	0.783	0.521	- 0.150	- 0.0997	1.25
635 ^{*5}	- 0.304	0.669	0.635	0.157	- 0.660	1.50
1,400	- 0.176	0.554	0.622	- 0.199	0.412	0.787
2,550 ^{*5}	- 0.299	0.660	0.639	0.123	- 0.611	1.49
3,800 ^{*5}	- 0.299	0.660	0.639	0.123	- 0.611	1.49
4,450 ^{*5}	- 0.299	0.660	0.639	0.123	- 0.611	1.49
5,100 ^{*5}	- 0.299	0.660	0.639	0.123	- 0.611	1.49

*1 HHV 基準、*2 送電端基準、*3 冷温水供給熱量基準、*4 SFC の現状機器、

*5 ミラーサイクルガスエンジン

ここで、 $P_{CGS,rd}$ は CGS の定格発電容量、 $Q_{gas,CGS}$ は CGS ガス消費量の一次エネルギー換算値 (HHV 基準)、 $\eta_{CGS,pwr}$ は CGS 発電効率 (送電端)、 $\eta_{CGS,exh}$ は CGS 熱利用効率、 η/η_{rd} は定格効率に対する部分負荷効率の比、 LF_{CGS} は電力負荷率 [-]を表す。CGS の補機動力としては、SFC における計測データを参考にして、冬期は発電電力の 4 %、夏期は発電電力の 7 %と設定した。この補機動力には、ガスエンジン本体の補機に加えて、冷温水を供給するための冷却塔およびポンプ、吸・排気ファン等、表 4-1 に示す全ての補機が含まれている。ここで、 $\eta_{CGS,pwr}$ および $\eta_{CGS,exh}$ は、図 5-7 に示す CGS システムフローにおいて、式 (5-1)および(5-2)により、それぞれ求めることができる。なお、式 (5-1)の右辺の係数 3.6 は、1 kWh = 3.6 MJ による、電力から熱への二次エネルギー換算を表している。また、図 5-8 に示す $\eta_{CGS,pwr}$ および $\eta_{CGS,exh}$ の部分負荷特性より、 $\eta_{CGS,pwr}$ は低負荷になるにつれて小さくなるが、 $\eta_{CGS,exh}$ は低負荷になるにつれて大きくなるのが分かる。

$$\eta_{CGS,pwr} = 3.6 W_{CGS} / Q_{gas,CGS} \tag{5-1}$$

$$\eta_{CGS,exh} = Q_{exh,CGS} / Q_{gas,CGS} \tag{5-2}$$

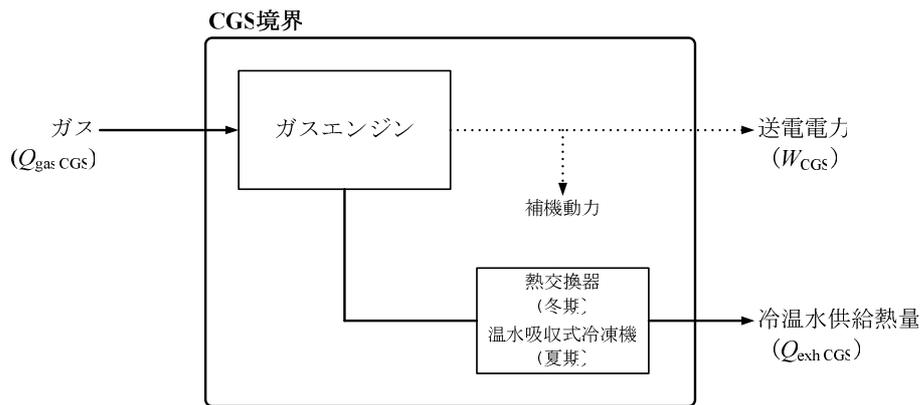


図 5-7 CGS システムフロー

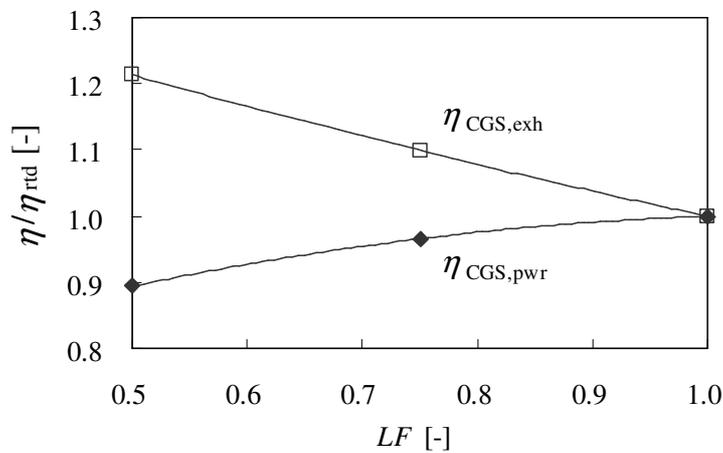


図 5-8 CGS 発電効率および熱利用効率の部分負荷特性^[94]

2. ガス焚吸収式冷温水発生機 (AHC)

シミュレーションでは、熱エネルギー有効利用の視点から、ガスエンジン排熱を優先的に利用するが、ガスエンジン排熱で賄えない分は、表 5-4 に示す AHC により冷温熱エネルギーを供給する。なお、AHC に関しては、容量の違いが、SFC 全体の一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量の計算結果に与える影響が小さいため、表 5-4 に示す機器のみを用いた。表 5-4 に示した情報は、定格値はメーカーカタログを、COP_{AHC} の部分負荷特性は文献 [83]を参考にした。

表 5-4 AHC の定格値および部分負荷特性

定格値			
	Q_{AHC} [MJ/h]	$Q_{gas,AHC}$ *3 [MJ/h]	COP _{AHC} [-]
暖房	3,349	3,899	0.86
冷房	5,064	3,899	1.3
部分負荷特性 ^[83]			
暖房 / 冷房*1	COP / COP _{rd} = - 1.24 LF _{AHC} ² + 1.82 LF _{AHC} + 0.401		
冷房*2	COP / COP _{rd} = 0.226 LF _{AHC} ² - 0.702 LF _{AHC} + 1.47		

*1 インバーター制御無し、*2 インバーター制御有り、*3 HHV 基準

ここで、 Q_{AHC} は AHC の冷暖房能力、 $Q_{gas,AHC}$ は AHC のガス消費量の一次エネルギー換算値 (HHV 基準)、COP_{AHC} は AHC の COP、COP / COP_{rd} は定格 COP に対する部分負荷 COP の比、LF_{AHC} はガス消費量基準の負荷率 [-]を表す。なお、COP_{AHC} は式 (5-3)により求めることができる。

$$COP_{AHC} = Q_{AHC} / Q_{gas,AHC} \tag{5-3}$$

また、COP_{AHC} の部分負荷特性を図 5-9 に示す。図 5-9 において、AHC が冷凍機として作動する冷房運転時において、吸収液ポンプのインバーター制御を採用している場合、COP_{AHC} は、低負荷領域において大きくなる。一方、インバーター制御が採用されていない場合は、暖房運転時と同様の部分負荷特性となる。

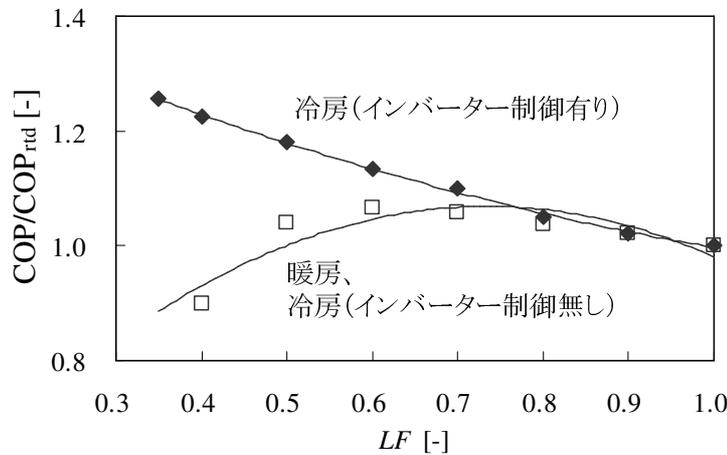


図 5-9 AHC の COP に関する部分負荷特性^[83]

3. 蒸気圧縮式ヒートポンプチラー (VC)

ガス式空調機器と電気式空調機器を導入した場合の、エネルギー利用システムの環境負荷を比較するために、空調用熱源機器として、前述した AHC と共に、表 5-5 に示す VC も検討した。なお、VC に関しても AHC と同様に、容量の違いが、SFC 全体の環境負荷に与える影響が小さいため、表 5-5 に示す機器のみを用いた。表 5-5 に示した情報は、定格値はメーカーカタログを、 COP_{VC} の部分負荷特性は文献 [83] を、 COP_{VC} の気温依存性は文献 [85] に示す CYCLE_D プログラムを用いて計算した。

なお、VC は、複数のモジュールによる連結運転方式となっているが、表 5-5 は、モジュール単体の定格値を表している。また、表 5-5 に示す VC の定格暖房能力は、メーカーカタログによるもので、気温：7℃、製造する温水温度：45℃における値である。一方、SFC の中央熱源方式（ガス、本館系統）空調システムの場合は、製造する温水温度：57.5℃である。よって、表 5-5 に示す VC を SFC に導入する場合は、製造する温水と気温との温度差の増大による、定格 COP の低下を考慮した。一方、冷房能力に関しては、製造する冷水の往温度が SFC と同じであったため、メーカーカタログをそのまま使用した。

表 5-5 VC の定格値、部分負荷特性および気温依存性

定格値			
	Q_{VC} [MJ/h]	W_{VC} [kW]	COP_{VC} [-]
暖房	425	30	3.9
冷房	382	30	3.5
部分負荷特性 ^[83]			
暖房 / 冷房	$COP / COP_{rd} = -1.47 LF_{VC}^2 + 2.49 LF_{VC} - 0.021$		
気温依存性 ^[85]			
暖房	$COP / COP_{rd} = 0.000504 t_0^2 + 0.00930 t_0 + 0.911$		
冷房	$COP / COP_{rd} = 0.000370 t_0^2 - 0.0552 t_0 + 2.48$		

ここで、 Q_{VC} は VC の冷暖房能力、 W_{VC} は VC の圧縮機動力、 COP_{VC} は VC の COP、 COP / COP_{rd} は定格 COP に対する部分負荷 COP の比、 LF_{VC} は圧縮機の電力消費量基準の負荷率 [-]、 t_0 は気温を表す。なお、 COP_{VC} は式 (5-4) により求めることができる。

$$COP_{VC} = Q_{VC} / 3.6 W_{VC} \quad (5-4)$$

なお、式 (5-4) の右辺の係数 3.6 は、1 kWh = 3.6 MJ による、電力から熱への二次エネルギー換算を表している。また、 COP_{VC} の部分負荷特性を図 5-10 (a) に、気温依存性を図 5-10 (b) に示す。シミュレーションでは、時刻毎に VC の負荷率および気温を求め、これら 2 変数を基に、図 5-10 (a) および (b) の特性を用いて、 COP_{VC} を決定する。

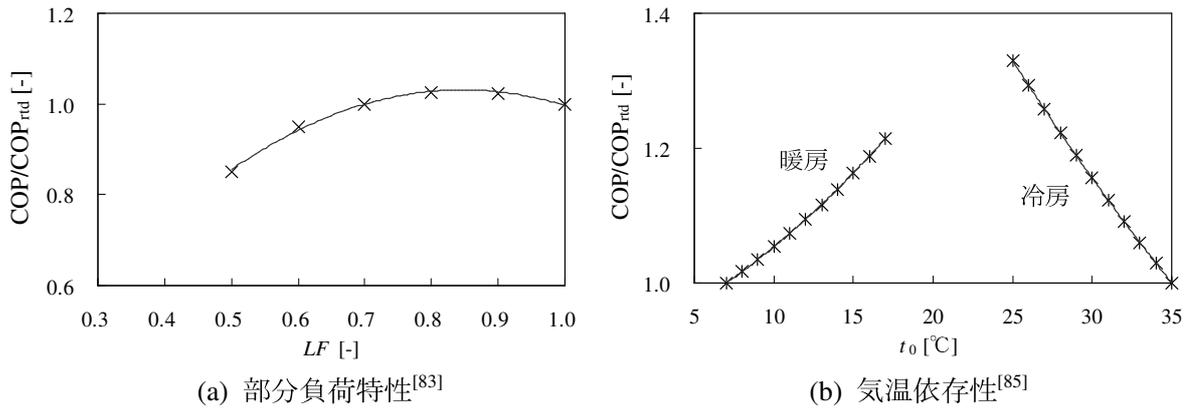


図 5-10 VC の COP に関する部分負荷特性および気温依存性

5-4 評価関数

エネルギー利用システムを評価する際、省エネルギー性、環境性、危機管理性、経済性等、様々な評価関数が存在する。ここで、経済性を重視すると、省エネルギー性や環境性が軽視され、逆に、省エネルギー性や環境性を重視すると、経済性が軽視される状況になることが少なくない。本研究では、地球規模のエネルギー・環境問題の解決を目的としているため、省エネルギー性および環境性を評価関数として、エネルギー利用システムの評価を行う。また、商用系統電力と分散電源の協調運転による、マクロ的な視点からの最適化を検討するための指標として、新たに、商用系統電力の負荷平準化を評価関数として用いる。具体的には、省エネルギー性は一次エネルギー消費量、環境性は二酸化炭素排出量、商用系統電力の負荷平準化は日最大受電電力を求めることにより評価する。

ここで、本研究では、CGS 総合効率、COP 等の、要素機器の効率ではなく、一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量の、1 年間の総量による評価を行う。総量評価を行う理由は、要素機器の高性能化が、必ずしもシステム全体の省エネルギー性の向上に貢献するとは限らない場合があるため、要素機器の効率では、システム全体の評価が行えないためである。例えば、CGS の効率として、総合熱効率が用いられる場合があるが、これは、CGS 発電効率と熱利用効率の単純和であり、電気と熱エネルギーのエクセルギーの違いを適切に反映することができない。また、電気式ヒートポンプ機器の効率として用いられる COP に関しては、入力エネルギーである分母が二次エネルギーで計算されているため、CGS、AHC 等のガス消費機器と、等しい評価ができない。

さらに、マクロ的な視点から環境負荷の低減を実現するためには、商用系統電力と分散電源の協調運転が必要である。本研究では、これらの協調運転を、日最大受電電力により評価する。日最大受電電力は、1 日の中で、商用系統からの受電電力の最大値であり、さらに、1 年間を通しての、日最大受電電力の最大値を求めることにより、商用系統の電源構成への影響を定量的に把握することが可能となる。つまり、日最大受電電力が大きい場合は、商用系統のピーク供給用電源である石油火力への負荷を増大させ、小さい場合は、ミドル供給用電源である LNG コンバインド、ベース供給用電源である原子力発電の高効率・高負荷運転につながると考えることができる。

ここで、評価関数である、一次エネルギー消費量、二酸化炭素排出量および日最大受電電力は、

以下に示す式により求める。

1. 一次エネルギー消費量

需要家全体の1年間の一次エネルギー消費量 (Q_{prm}) は、式 (5-5)により求める。

$$Q_{\text{prm}} = \sum_{t=1}^{8760} hr_{\text{grd},t} W_{\text{grd},t} + h_{\text{HHV}} V_{\text{gas}} \quad (5-5)$$

ここで、 $hr_{\text{grd},t}$ は、時刻 t における商用系統電力の一次エネルギー消費原単位、 $W_{\text{grd},t}$ は、時刻 t における商用系統からの受電電力量、 h_{HHV} は、ガスの高位発熱量、 V_{gas} は、ガス消費量を表す。なお、 $hr_{\text{grd},t}$ に関しては、商用系統の電源構成に応じて、表 5-1 の値を基に時間帯別に設定し、 h_{HHV} は、表 5-1 の値を用いた。また、シミュレーションでは、1時間毎に計算される $W_{\text{grd},t}$ および V_{gas} を基に、8760時間の値に積算することにより、1年間の一次エネルギー消費量を求める。

2. 二酸化炭素排出量

需要家全体の1年間の二酸化炭素排出量 (m_{CO_2}) は、式 (5-6)により求める。

$$m_{\text{CO}_2} = \sum_{t=1}^{8760} er_{\text{grd},t} W_{\text{grd},t} + er_{\text{gas}} V_{\text{gas}} \quad (5-6)$$

ここで、 $er_{\text{grd},t}$ は、時刻 t における商用系統電力の二酸化炭素排出原単位、 er_{gas} は、ガスの二酸化炭素排出原単位を表す。なお、 $er_{\text{grd},t}$ に関しては、商用系統の電源構成に応じて、表 5-2 の値を基に時間帯別に設定し、 er_{gas} は、表 5-2 の値を用いた。

3. 日最大受電電力

需要家における受電電力 (P_{grd}) は、式 (5-7)により求める。

$$P_{\text{grd}} = P_{\text{AHC}} + P_{\text{VC}} + P_{\text{PAC}} + P_{\text{base}} - P_{\text{CGS}} \quad (5-7)$$

ここで、 P_{AHC} 、 P_{VC} および P_{PAC} は、それぞれ、AHC、VC および PAC の消費電力、 P_{base} は、照明、コンセント、一般動力等のベース電力需要、 P_{CGS} は、CGS の送電電力を表す。式 (5-7)より、 P_{grd} および P_{CGS} により、需要家全ての電力需要を賄うことになる。また、 P_{AHC} 、 P_{VC} および P_{PAC} の空調用消費電力は、ガスエンジン排熱利用による空調用電力消費量の削減分を考慮して求める。

5-5 シミュレーションの再現性の検証

本節では、一次エネルギー消費量 (Q_{prm})、CGS 発電効率 ($\eta_{\text{CGS,pwr}}$) および CGS 熱利用効率 ($\eta_{\text{CGS,exh}}$) を指標として、実測とシミュレーションで求めた数値の比較を行うことにより、シミュレーションの再現性に関する検証を行う。ここで、 Q_{prm} の実測値は、商用系統からの受電電力およびガス消費量に関する計測データを基に、式 (5-5)により求める。また、 $\eta_{\text{CGS,pwr}}$ の実測値は、図 4-8 に示した $\eta_{\text{CGS,pwr}}$ を、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ の実測値は、図 4-9 に示した $\eta_{\text{CGS,exh}}$ を表す。一方、シミュレ

ーションにおいては、図 5-1 (a)に示す方法で求めた需要 A を入力データとして、現状と同じ CGS および AHC の運転をシミュレーションし、商用系統からの受電電力およびガス消費量と、CGS の運転状況を 1 時間毎に計算することで、 Q_{prm} 、 $\eta_{CGS,pwr}$ および $\eta_{CGS,exh}$ を求める。なお、シミュレーションにおける CGS の運転方式は、現状と同様、電主熱従運転としている。

まず、図 5-11 に、SFC 全体の Q_{prm} について、受電電力、ガス (CGS) およびガス (空調用) の 1 年間の実測値より求めた Q_{prm} と、シミュレーションにより求めた Q_{prm} の比較を示す。図 5-11 において、実測値より求めた Q_{prm} は 127.4 TJ/年、シミュレーションにより求めた Q_{prm} は 126.7 TJ/年となった。シミュレーションにより求めた Q_{prm} の、実測値に対する誤差は 0.7 TJ/年 (0.5 %) と小さい。これより、本研究で用いるシミュレーションは、実際の CGS および AHC の運転状況を適切に再現し、妥当な計算結果を導くことができると言える。

また、図 5-12 に、実測とシミュレーションにより求めた、 $\eta_{CGS,pwr}$ の比較を示す。実測した期間において、300 kW×2 台の CGS は年間を通して定格運転していたが、計測機器の精度の問題もあり、実測の $\eta_{CGS,pwr}$ は、シミュレーションで求めた $\eta_{CGS,pwr}$ に比べて、日変動が大きくなる。シミュレーションにより求めた $\eta_{CGS,pwr}$ の、実測値に対する誤差は、10 月において最大 -4.2 % となるものの、誤差の年間平均値は 0.6 % と小さく、実際の CGS の運転状況を適切に再現できている。

図 5-13 には、実測とシミュレーションにより求めた、 $\eta_{CGS,exh}$ の比較を示す。シミュレーションにより求めた $\eta_{CGS,exh}$ は、6-9 月の夏期において、実測値よりも高くなるものの、実測値に対する誤差の年間平均値は 8.6 % と、実測を比較的良好に再現できていると言える。なお、実測の $\eta_{CGS,exh}$ は、6-9 月の夏期において、シミュレーションで求めた $\eta_{CGS,exh}$ よりも低くなるが、これは、中央熱源方式 (ガス、本館系統) 空調システムにおける熱源機器の制御において、CGS 排熱の優先利用が最適に行われていないことを表している。

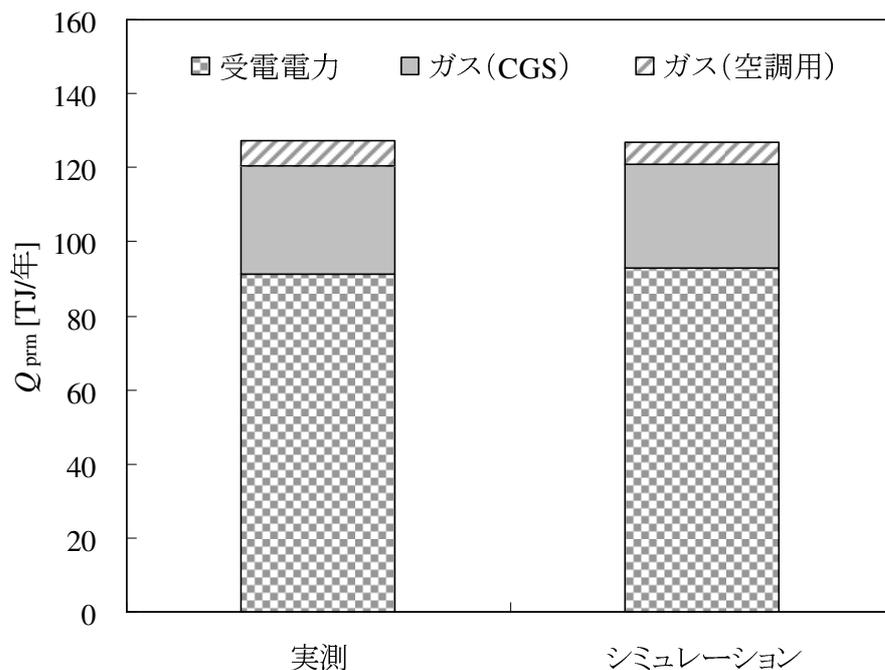


図 5-11 実測およびシミュレーションによる SFC 全体の一次エネルギー消費量の比較

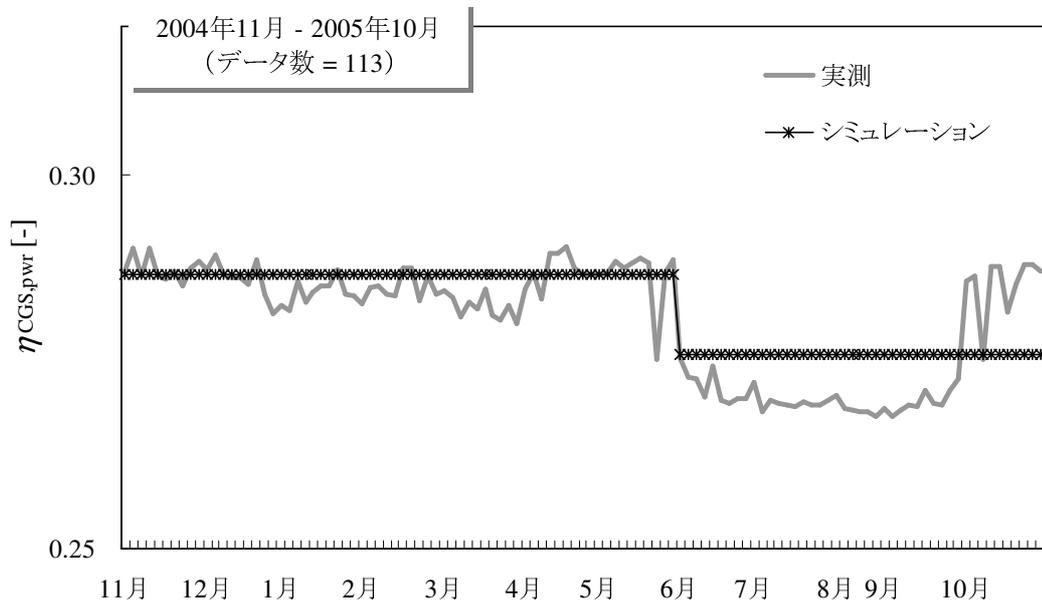


図 5-12 実測およびシミュレーションによる CGS 発電効率の比較

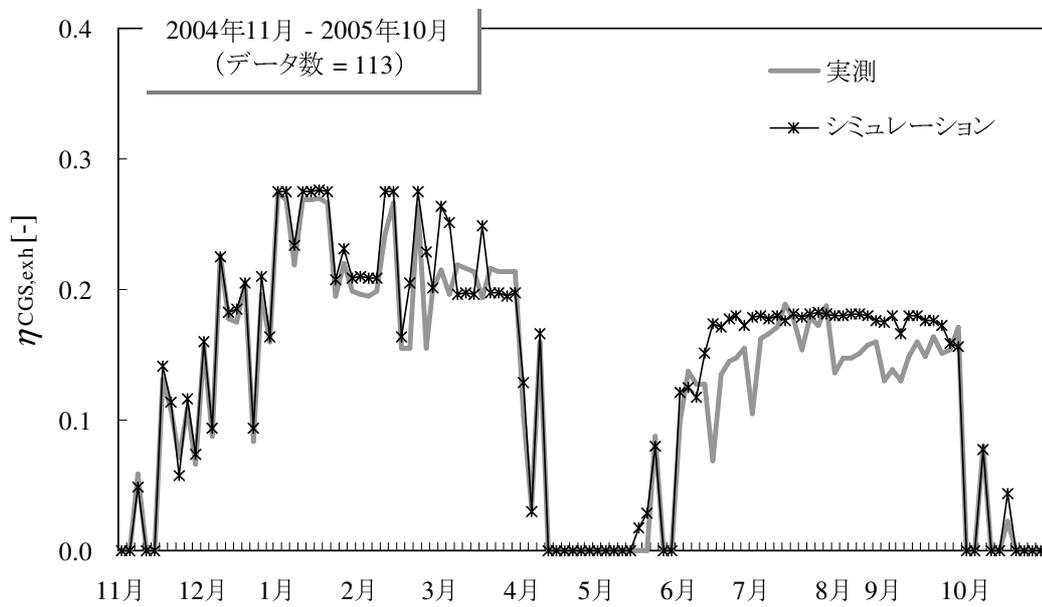


図 5-13 実測およびシミュレーションによる CGS 熱利用効率の比較

第6章 SFCにおける排熱優先利用システムの評価

6-1 排熱優先利用システムのシミュレーション

本章では、SFCの空調システムにおいて、ガスエンジン排熱の利用先を、現状の中央熱源方式（ガス）空調システムのみから、中央熱源方式（電気）および個別熱源方式も含めたSFC全体の空調システムに拡張する、排熱優先利用システムを検討する。ここで、図6-1に、SFCにおける排熱優先利用システムの概略図を示す。

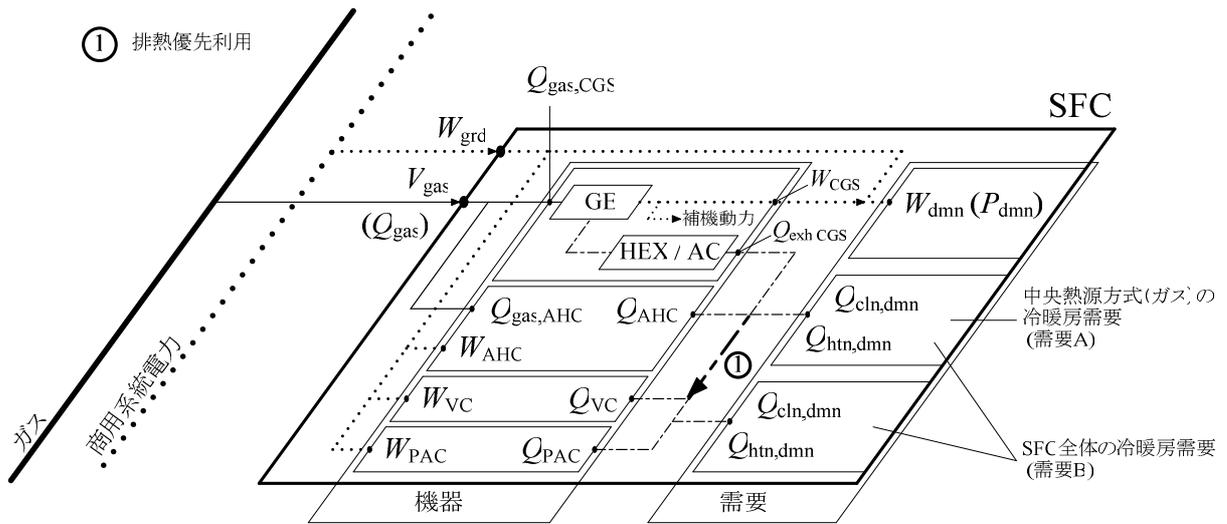


図 6-1 SFCにおける排熱優先利用システムの概略図

図6-1において、中央熱源方式（ガス）空調システムの冷暖房需要は、図5-1(a)に示す需要A、SFC全体の冷暖房需要は、図5-1(b)に示す需要Bとして表すことができる。また、SFC全体の電力消費量は、電力需要 (W_{dmn})、AHCの電力消費量 (W_{AHC})、VCの電力消費量 (W_{VC}) およびPACの電力消費量 (W_{PAC}) の合計となる。これらの電力消費量は、式(6-1)に示す通り、商用系統からの受電電力量 (W_{grd}) および補機動力を除いたCGS送電電力量 (W_{CGS}) により賄われる。

$$W_{grd} + W_{CGS} = W_{AHC} + W_{VC} + W_{PAC} + W_{dmn} \tag{6-1}$$

ここで、 W_{CGS} は、式(6-2)により表すことができる。

$$W_{CGS} = Q_{gas,CGS} \eta_{CGS,pwr} / 3.6 \tag{6-2}$$

ここで、 $Q_{gas,CGS}$ は、HHV基準のCGS投入熱量、 $\eta_{CGS,pwr}$ は、CGS発電効率である。なお、式(6-2)の右辺の係数3.6は、1 kWh = 3.6 MJによる、電力から熱への二次エネルギー換算を表している。シミュレーションでは、 W_{CGS} 、 $Q_{gas,CGS}$ および $\eta_{CGS,pwr}$ は、表5-3に示す定格値および部分負荷特性を用いた。

CGSは、SFCの電力需要に合わせて運転され、その排熱 ($Q_{\text{exh,CGS}}$) は、空調用熱源として利用される。ここで、SFC全体の冷暖房需要 ($Q_{\text{cln,dmn}}$ 、 $Q_{\text{htn,dmn}}$) に対しては、式(6-3)に示す通り、ガスエンジン排熱を優先的に利用し、不足分を、AHC、VCおよびPACで製造する冷温熱エネルギー (Q_{AHC} 、 Q_{VC} および Q_{PAC}) で供給する。なお、式(6-3)では、 $Q_{\text{cln,dmn}}$ のみの関係式を示しているが、 $Q_{\text{htn,dmn}}$ についても、同じ式で表すことができる。

$$Q_{\text{cln,dmn}} = Q_{\text{exh,CGS}} + Q_{\text{AHC}} + Q_{\text{VC}} + Q_{\text{PAC}} \quad (6-3)$$

ここで、 $Q_{\text{exh,CGS}}$ 、 Q_{AHC} 、 Q_{VC} および Q_{PAC} は、それぞれ、以下の式により表すことができる。

$$Q_{\text{exh,CGS}} = Q_{\text{gas,CGS}} \eta_{\text{CGS,exh}} \quad (6-4)$$

$$Q_{\text{AHC}} = Q_{\text{gas,AHC}} \text{COP}_{\text{AHC}} \quad (6-5)$$

$$Q_{\text{VC}} = 3.6 W_{\text{VC}} \text{COP}_{\text{VC}} \quad (6-6)$$

$$Q_{\text{PAC}} = 3.6 W_{\text{PAC}} \text{COP}_{\text{PAC}} \quad (6-7)$$

ここで、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ は CGS 熱利用効率、 $Q_{\text{gas,AHC}}$ は HHV 基準の AHC 投入熱量、 COP_{AHC} は AHC の COP、 COP_{VC} は VC の COP、 COP_{PAC} は PAC の COP を表す。定格値および性能特性に関しては、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ は表 5-3、 COP_{AHC} は表 5-4、 COP_{VC} は表 5-5、 COP_{PAC} は図 3-11 および図 3-12 を用いた。なお、PAC に関しては、現状のエネルギー需要を推定するために、図 3-11 および図 3-12 の性能特性を用いて、電力消費量から冷温熱エネルギーを計算したが、シミュレーションにおいては、設置台数が多くなることと、その特性が VC とほぼ同じであることの原因から、検討しない。

CGS の導入目的として、商用システムのピーク供給用電源の代替とすることを想定しているため、CGS の運転時間は、ピーク供給用電源が主に稼動する昼間時間帯の 8 - 22 時とした。なお、本章においては、排熱優先利用システムの効果を確認することが主目的であるため、新規に導入を検討する CGS の運転形態については全て、1 台による電主熱従運転とした。そして、CGS が運転可能な最低電力負荷率は 30 % とした。また、排熱優先利用システムを構築するためには、SFC の空調システムを全て、中央熱源方式としなければならない。そのため、排熱優先利用システムにおいては、冷温水循環ポンプおよびファン (AHU および FCU) 動力が増大する。シミュレーションでは、これらの動力を、表 3-3 に示す定格値を基に、供給する冷温熱エネルギーに応じて求めた。

シミュレーションにおいては、これらの計算を、エネルギー実需要に基づいて 1 時間毎に行い、電力およびガス消費量を計算する。そして、これらの消費量に、一次エネルギー消費原単位および二酸化炭素排出原単位を乗じることで、最終的に、1 年間の一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量を求める。

6-2 シミュレーションにおける検討システム

シミュレーションでは、表 6-1 に示す各システムについて、一次エネルギー消費量、二酸化炭素排出量および日最大受電電力を求め、排熱優先利用システムの評価を行う。

表 6-1 排熱優先利用システムに関するシミュレーションにおける検討システム

システム	エネルギー需要	CGS	排熱優先利用	空調用熱源機器
現状	需要 A	300 kW×2		AHC、VC、PAC
0 kW (AHC)	需要 A	-	-	AHC
0 kW (VC)	需要 A	-	-	VC
CGS 更新	需要 A	635 - 3,800 kW×1		AHC
排熱優先利用 (AHC)	需要 B	635 - 3,800 kW×1	○	AHC
排熱優先利用 (VC)	需要 B	635 - 3,800 kW×1	○	VC

- 現状 : エネルギー需要、CGS、空調システムおよび空調用熱源機器の全ては現状のままとし、一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量は、シミュレーションではなく、計測値から求める。
- 0 kW (AHC) : CGS を導入せず、全ての電力需要を商用系統電力、全ての冷暖房需要を表 5-4 に示す AHC で賄うシステム。
- 0 kW (VC) : CGS を導入せず、全ての電力需要を商用系統電力、全ての冷暖房需要を表 5-5 に示す VC で賄うシステム。
- CGS 更新 : 表 5-3 に示す 635 kW、1,400 kW、2,550 kW および 3,800 kW の CGS の内 1 台を、現状の CGS の代替として導入するが、排熱利用先は、現状と同じ中央熱源方式(ガス)空調システムのみとするシステム。
- 排熱優先利用 (AHC) : 表 5-3 に示す 635 kW、1,400 kW、2,550 kW および 3,800 kW の CGS の内 1 台を、現状の CGS の代替として導入し、排熱を SFC 全体の空調システムで最大限に利用する排熱優先利用システム。排熱で賄えない冷暖房需要は、表 5-4 に示す AHC で賄う。
- 排熱優先利用 (VC) : 表 5-3 に示す 635 kW、1,400 kW、2,550 kW および 3,800 kW の CGS の内 1 台を、現状の CGS の代替として導入し、排熱を SFC 全体の空調システムで最大限に利用する排熱優先利用システム。排熱で賄えない冷暖房需要は、表 5-5 に示す VC で賄う。

ここで、CGS 更新システムにおいては、図 5-1 (a)に示す推定方法により求めた需要 A を、入力データとして用いる。CGS 更新システムでは、ガスエンジン排熱を利用する空調システムが、中央熱源方式(ガス)のみに限定されており、需要 A の冷暖房需要は、中央熱源方式(ガス)空調システムの冷暖房需要を表す。一方、排熱優先利用システムでは、図 5-1 (b)に示す推定方法により求めた需要 B を、入力データとして用いる。排熱優先利用システムでは、ガスエンジン排熱を、SFC 全体の空調システムで最大限に利用することを想定しており、需要 B の冷暖房需要は、中央熱源方式(ガス)空調システムに加え、中央熱源方式(電気)および個別熱源方式も含めた、SFC 全体の空調システムにおける冷暖房需要を表す。

6-3 現状 CGS を対象とした排熱優先利用システムの検証

本節では、SFCに導入されている現状のCGS(300kW×2台)のみを対象として、表6-1に示す排熱優先利用(AHC)システムのみでの評価を行うことにより、排熱優先利用の効果を分析する。

まず、年間を通じたCGS熱利用効率($\eta_{CGS,exh}$)の解析により、排熱優先利用(AHC)システムにおける、ガスエンジン排熱の有効利用について分析する。次に、省エネルギー性に関しては、図4-6に示した、CGS(300kW×2台)運転によるSFC全体の一次エネルギー消費量の増減、環境性に関しては、図4-7に示した、CGS(300kW×2台)運転によるSFC全体の二酸化炭素排出量の増減と、それぞれ比較することで、同じCGSが運転されている条件下での、排熱優先利用(AHC)システムを相対的に評価する。さらに、排熱優先利用(AHC)システムにおける、商用系統電力の負荷平準化効果を評価するために、日最大受電電力の削減効果についても分析する。

1. 熱効率解析

現状SFCに導入されているCGS(300kW×2台)を運転し、ガスエンジン排熱の利用先を中央熱源方式(ガス)空調システムに限定した場合(現状)と、ガスエンジン排熱をSFC全体の空調システムで最大限に有効利用した場合(排熱優先利用(AHC))それぞれの、CGS熱利用効率($\eta_{CGS,exh}$)の日平均値を、平日113日間について求めたものを、図6-2に示す。

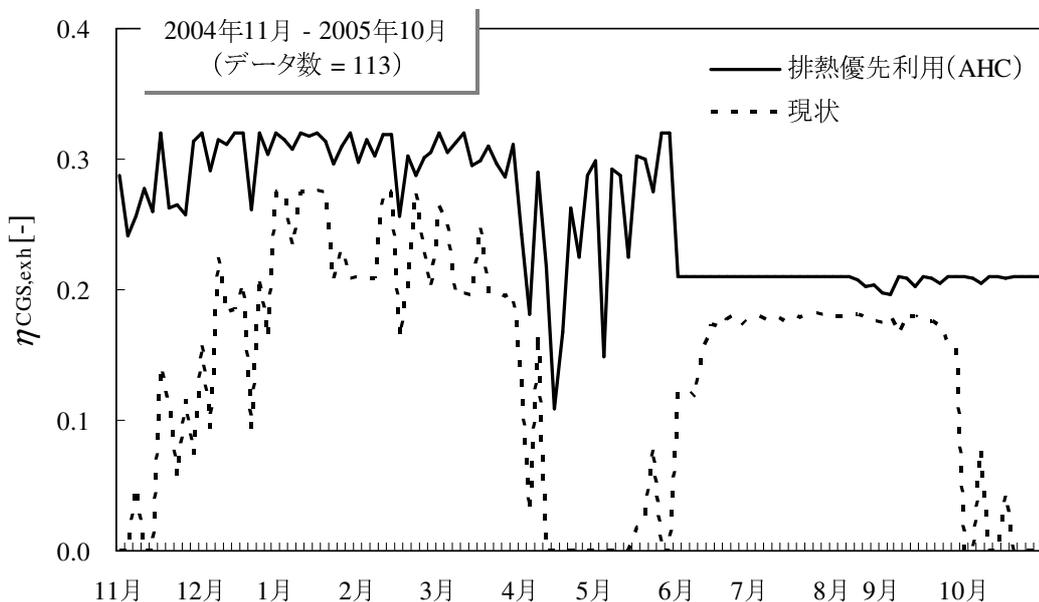


図 6-2 現状および排熱優先利用 (AHC) システムにおける CGS (300 kW×2 台) 熱利用効率の季節変動

図 6-2 の現状システムの $\eta_{CGS,exh}$ は、シミュレーションにより求めたものであるが、図 4-9 に示す $\eta_{CGS,exh}$ の実測値にほぼ一致する。現状システムにおいては、中間期における $\eta_{CGS,exh}$ の低下が問題となっていたが、排熱優先利用 (AHC) システムにおいては、中間期において、 $\eta_{CGS,exh}$ が大き

く改善されていることが分かる。また、冬期および夏期においては、排熱優先利用（AHC）システムの場合、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ の定格値（冬期：0.34、夏期：0.22）近傍での運転時間が長くなることが確認できる。この結果より、排熱優先利用システムにおいては、ガスエンジンの排熱を有効利用できることが確認できた。

2. 一次エネルギー消費量

排熱優先利用（AHC）システムにおいて、CGSを導入しない場合のSFC全体の一次エネルギー消費量（ Q_{prm} ）に対して、現状のCGS（300 kW×2台）を運転した場合の Q_{prm} の増減（ ΔQ_{prm} ）を図6-3に示す。図6-3は縦軸が ΔQ_{prm} であり、縦軸の数値が負の場合、CGS運転によりSFC全体の一次エネルギー消費量が削減されることを示す。なお、昼間時間帯における商用系統電力の一次エネルギー消費原単位は、表5-1より10.1 MJ/kWh^[82]を用いた。

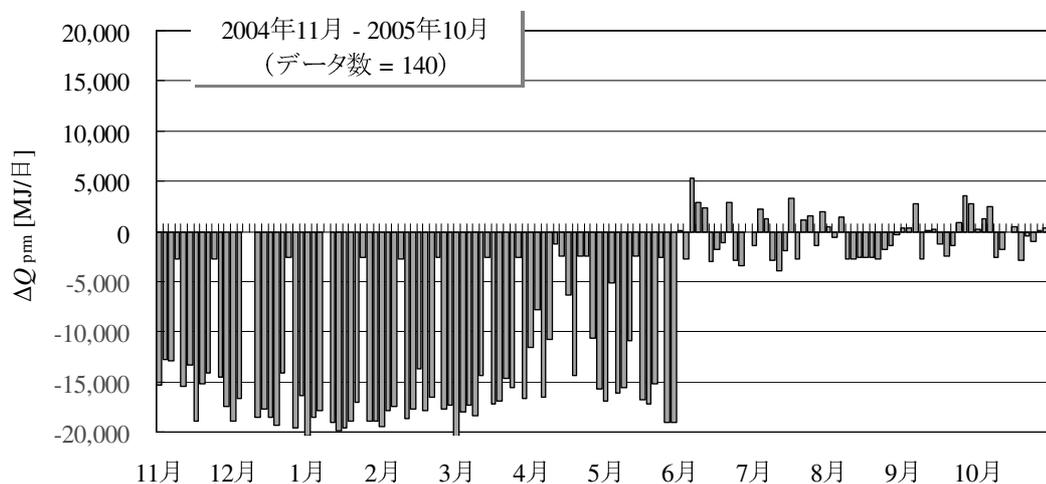


図 6-3 排熱優先利用（AHC）システムにおけるCGS（300 kW×2台）運転によるSFC全体の一次エネルギー消費量の増減

図6-3より、データ破損4日分を除く調査期間内の140日間において、CGS運転により、1,149 GJの一次エネルギー消費量の削減が期待できる結果となった。この数値を、1年間365日分に換算すると、2,996 GJ/年となり、SFC全体の1年間の一次エネルギー消費量の2%を削減できる試算となる。現状システムの場合、図4-6に示す通り、CGS運転により一次エネルギー消費量は1%増加したが、空調システムにおいて排熱を最大限に有効利用することにより、省エネルギー性を改善できることが確認できた。なお、夏期においては、CGS運転による省エネルギー効果は小さいが、これは、排熱優先利用（AHC）システムにおいてCGSを導入しない場合は、冷暖房需要を全て、表5-4に示す最新型のAHCで賄うとし、一方で、CGSを導入した場合は、その排熱を、現状の温水吸収式冷凍機により冷熱エネルギーに変換して供給しているためである。最新型AHCの場合、夏期において吸収式冷凍機として動作する場合、吸収液ポンプのインバーター制御により、部分負荷運転時に熱効率が向上する特性を有するが、現状の温水吸収式冷凍機では、インバーター制御がされていないため、部分負荷時において、効率は低下する。よって、この問題は、

吸収式冷凍機単体の効率向上により解決できることが期待できる。

3. 二酸化炭素排出量

排熱優先利用（AHC）システムにおいて、CGSを導入しない場合のSFC全体の二酸化炭素排出量（ m_{CO_2} ）に対して、現状のCGS（300 kW×2台）を運転した場合の m_{CO_2} の増減（ Δm_{CO_2} ）を図6-4に示す。図6-4は縦軸が Δm_{CO_2} であり、縦軸の数値が負の場合、CGS運転によりSFC全体の二酸化炭素排出量が削減されることを示している。なお、SFCは東京電力管内であるため、二酸化炭素排出原単位は、表5-2より0.368 kg-CO₂/kWh^[90]を用いた。

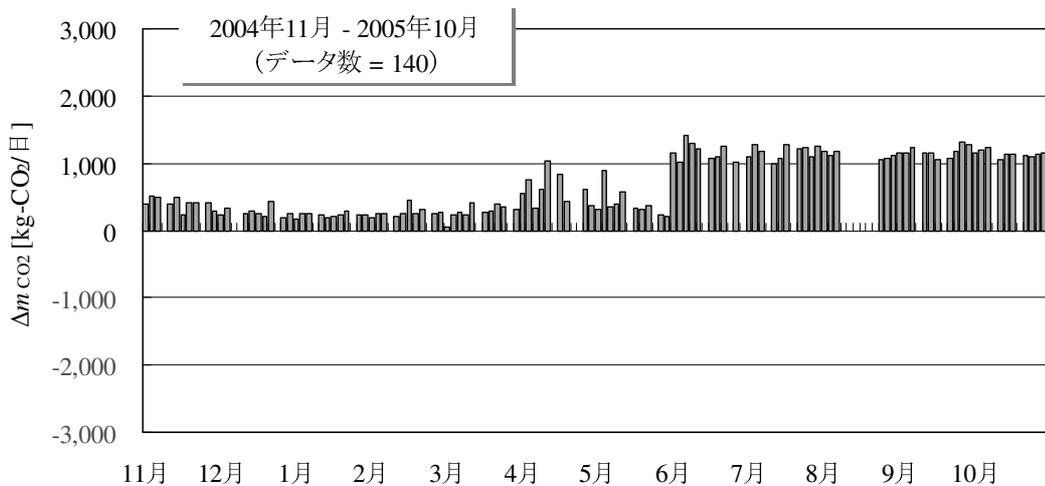


図 6-4 排熱優先利用（AHC）システムにおける CGS（300 kW×2 台）運転による SFC 全体の二酸化炭素排出量の増減

図 6-4 より、調査期間内の 140 日間において、CGS 運転により、76 t-CO₂ の二酸化炭素排出量が増加する結果となった。この数値を、1 年間 365 日分に換算すると、198 t-CO₂/年となり、SFC 全体の 1 年間の二酸化炭素排出量に対して、4 % の増加となる。図 4-7 に示す現状システムと比べた場合においては、排熱優先利用システムの採用により、二酸化炭素排出量が低減できているものの、現状の CGS（300 kW×2 台）では、十分な削減効果が発揮できない状況である。

4. 日最大受電電力

ここでは、CGS 導入による商用系統電力の負荷平準化効果を、商用系統からの日最大受電電力（ P_{grd} ）により評価する。図 6-5 は、排熱優先利用（AHC）および現状システムにおける、1 日 24 時間の最大受電電力である、日最大 P_{grd} を示したものである。両システム共に、同じ 300 kW×2 台の CGS が導入されているが、排熱優先利用（AHC）システムにおいては、SFC の全冷暖房需要を、ガスエンジン排熱と AHC で賄っている。なお、図 6-5 は、調査を実施した 144 日間の内、SFC において CGS が実際に運転された平日の 113 日における日最大 P_{grd} を表し、現状システムの日最大 P_{grd} は、計測値より求めたものである。

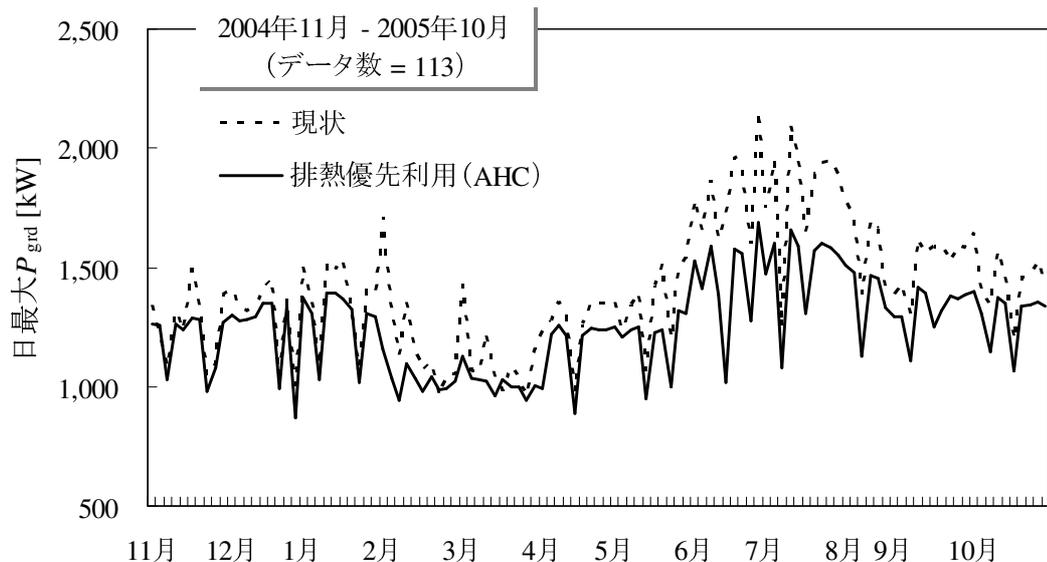


図 6-5 現状および排熱優先利用 (AHC) システムにおける CGS (300 kW×2 台) 運転条件下での日最大受電電力の季節変動

図 6-5 において、排熱優先利用 (AHC) システムにおける日最大 P_{grd} の削減効果は、特に、夏期において大きくなることが確認できる。現状システムにおいては、日最大 P_{grd} は、6 月 28 日に最大値 2,158 kW を記録した。一方、排熱優先利用 (AHC) システムの場合、同日の日最大 P_{grd} は、1,686 kW となり、472 kW の削減効果が期待できる。この日最大 P_{grd} の削減効果には、ガスエンジン排熱利用の拡張による電力消費量の削減効果に加え、排熱優先利用 (AHC) システムにおける空調用熱源機器として、AHC を導入していることによる削減効果も含まれている。AHC を導入した場合、ポンプ、冷却塔等、AHC の補機用電力消費量が必要となるものの、VC、PAC 等の電気式空調機器に比べて、電力消費量は小さくなる。この結果より、排熱優先利用 (AHC) システムは、商用系統電力のピーク電力負荷の平準化という視点からも、有効なシステムであると言える。

6-4 排熱優先利用システムを導入したエネルギー利用システムの評価

6-4-1 CGS の運転シミュレーション

エネルギー利用システムの省エネルギー性および環境性は、CGS の性能および運転状況に大きく左右される。ここで、CGS の性能は、実際の電力および熱負荷の変動に応じて、季節および時刻により異なる特性を示す。よって、エネルギー利用システムを評価するためには、まず、エネルギー実需用に基づいて、CGS の電力および熱負荷を、季節および時刻別に求めることが必要となる。本項では、表 6-1 に示す検討システムの内、CGS 更新および排熱優先利用 (AHC) システムについて、また、CGS は 635 kW および 2,550 kW の 2 種類について、電力および空調用熱負荷曲線により、CGS の運転状況を比較・分析する。

図 6-6 および図 6-7 は 1 月代表日、図 6-8 および図 6-9 は 4 月代表日、そして、図 6-10 および図 6-11 は 7 月代表日における、635 kW および 2,550 kW の 2 種類の CGS を運転した場合の、

電力および空調用熱負荷曲線を、それぞれ表している。なお、図 6-6 - 図 6-11 は全て、左側の図が電力負荷曲線、右側の図が空調用熱負荷曲線を示している。左側の電力負荷曲線の図では、CGS は、電力需要に応じて電主熱従運転を行い、CGS 送電電力で賄えない分の電力需要は、商用系統からの受電電力により賄っている。一方、右側の空調用熱負荷曲線の図では、凡例の電力およびガスの熱量は、空調用熱源機器（AHC または VC）が消費する電力およびガスの一次エネルギー換算値を表し、凡例の CGS 排熱は、一次エネルギー消費量ではなく、空調用として利用される排熱の熱量を表す。つまり、CGS 排熱分が凡そ、空調用一次エネルギー消費の削減量となる。なお、左側と右側の図は、縦軸の単位が異なるが、例えば、昼間時間帯においては、左側の図の縦軸に、 $10.1 \text{ MJ/kWh}^{[82]}$ を乗じた値が、右側の図の縦軸と等しくなる。

1. 冬期（1月）代表日における CGS の運転

図 6-6 および図 6-7 は、それぞれ、1 月代表日における、635 kW および 2,550 kW CGS を運転した場合の、電力および空調用熱負荷曲線を表している。また、両図共に、(a) は CGS 更新システム、(b) は排熱優先利用（AHC）システムを表している。

図 6-6 (a) の CGS 更新システムにおいて、635 kW の CGS を導入した場合、CGS は全時間定格運転となり、その排熱も全て、空調用熱源として有効利用されていることが分かる。また、図 6-6 (b) の排熱優先利用（AHC）システムにおいても、同様に、CGS は全時間定格運転となり、排熱も全て有効利用されている。排熱優先利用（AHC）システムにおいては、CGS 排熱を最大限に有効利用するために、SFC の空調システムを全て、中央熱源方式（ガス）としているため、昼間時間帯のピーク電力需要は CGS 更新システムよりも小さくなる分、空調用ガス消費量が大きくなる。

一方で、2,550 kW の CGS を導入する、図 6-7 (a) の CGS 更新システムにおいては、CGS は部分負荷運転となるが、CGS 排熱により全ての空調用熱需要が賄われており、空調用電力およびガス消費量は 0 になる。また、図 6-7 (b) の排熱優先利用（AHC）システムにおいては、さらに、CGS の電力負荷率が低下する一方で、排熱利用量は CGS 更新システムよりも大きくなることを確認できる。これは、排熱優先利用（AHC）システムにおいては、従来、電力需要として扱われている空調用電力消費量を冷暖房需要に変換した結果、排熱の利用先が拡張されたためである。このように、最終利用形態における冷暖房需要を求めることで、CGS 排熱の有効利用量を適切に把握することができる。

2. 中間期（4月）代表日における CGS の運転

図 6-8 および図 6-9 は、それぞれ、4 月代表日における、635 kW および 2,550 kW CGS を運転した場合の、電力および空調用熱負荷曲線を表している。また、両図共に、(a) は CGS 更新システム、(b) は排熱優先利用（AHC）システムを表している。

図 6-8 (a) の CGS 更新システムにおいて、635 kW の CGS を導入した場合、CGS は全時間定格運転となるが、その排熱利用が中央熱源方式（ガス）空調システムに限定されているため、同空調システムの冷暖房需要が無い 4 月代表日においては、排熱は全く利用されない。一方で、図 6-8 (b) の排熱優先利用（AHC）システムにおいては、排熱利用先を SFC 全体の空調システムに拡張しているため、排熱が有効利用されていることが確認できる。

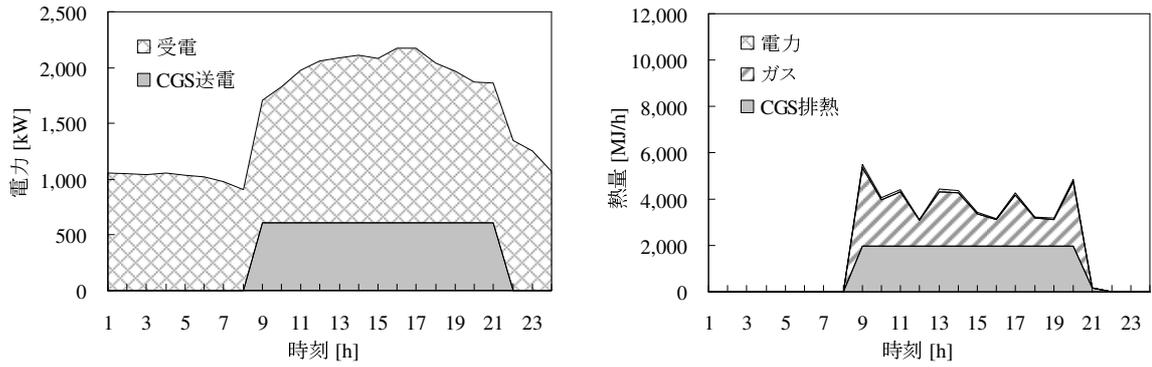
同様に、2,550 kW の CGS を導入する、図 6-9 (a)の CGS 更新システムにおいては、CGS は部分負荷運転となり、排熱が全く利用されていないことが分かる。一方で、図 6-9 (b)の排熱優先利用 (AHC) システムにおいては、さらに、CGS の負荷率が低下するが、排熱利用先の拡張により、排熱は有効利用されていることが確認できる。一般的な CGS の問題点として、熱需要の小さい中間期における、排熱利用量の低下が挙げられるが、排熱優先利用 (AHC) システムを採用することにより、中間期においても、排熱を有効利用することが可能となる。

3. 夏期 (7月) 代表日における CGS の運転

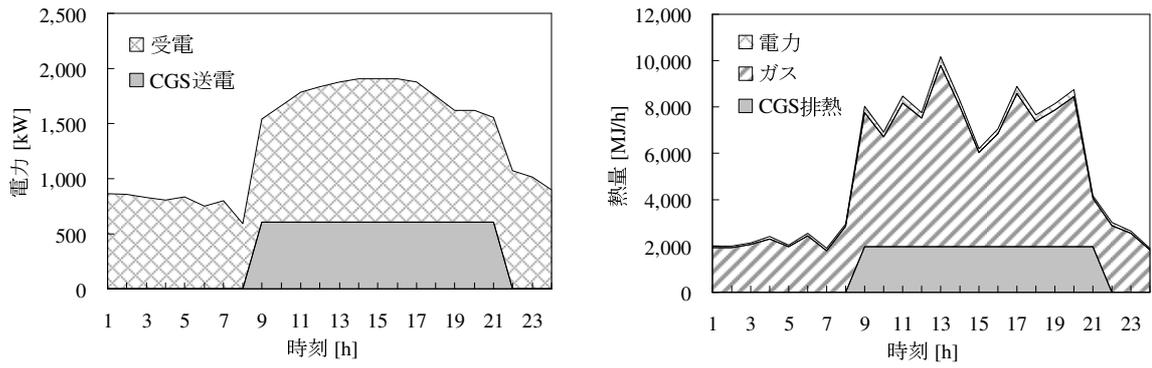
図 6-10 および図 6-11 は、それぞれ、7月代表日における、635 kW および 2,550 kW CGS を運転した場合の、電力および空調用熱負荷曲線を表している。また、両図共に、(a)は CGS 更新システム、(b)は排熱優先利用 (AHC) システムを表している。

図 6-10 (a)および(b)より、635 kW の CGS を導入した場合は、CGS 更新および排熱優先利用 (AHC) システム共に、CGS は1日を通して定格運転となる。一方で、2,550 kW の CGS を運転した場合、図 6-11 (a)の CGS 更新システムにおいては、CGS の定格運転時間帯は長くなるが、図 6-11 (b)の排熱優先利用 (AHC) システムにおいては、CGS は1日を通して部分負荷運転となる。部分負荷運転となる理由は、排熱優先利用システム (AHC) においては、空調用熱源機器を全て AHC としているため、CGS 更新システムに比べて、空調用電力消費量が低減されるためである。また、CGS が部分負荷運転となった結果、排熱利用量も減少していることが確認できる。このように、排熱優先利用 (AHC) システムにおいて大型の CGS を導入した場合、CGS 更新システムに比べて、CGS の負荷率が低下することが予想できる。

CGS の運転状況は以上の通りであるが、代表日における CGS 単体の運転状況だけでは、エネルギー利用システムの省エネルギー性および環境性を総合的に評価することはできない。総合的に評価するためには、CGS 単体の運転状況だけでなく、CGS 運転により影響を受ける、空調用熱源機器の性能も含めて、年間を通したシステム全体の評価が必要となる。また、排熱優先利用 (AHC) システムにおいては、SFC の全空調システムを中央熱源方式とするため、CGS を停止する夜間時間帯の冷暖房需要を全て、AHC で賄うことになる。この結果、夜間時間帯に限っては、ガスエンジンの排熱を有効利用できず、また、空調用に投入するエネルギーとして、環境負荷の小さい原子力、水力等のベース供給用電源を有効利用できないため、排熱優先利用 (AHC) システムの環境負荷が増加することが予想できる。よって、総合的な評価のためには、商用系統の電源構成を考慮することも必要となる。これらの点を総合的に踏まえて、以下に、1年間を通した一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量の総量により、エネルギー利用システムの評価を行う。

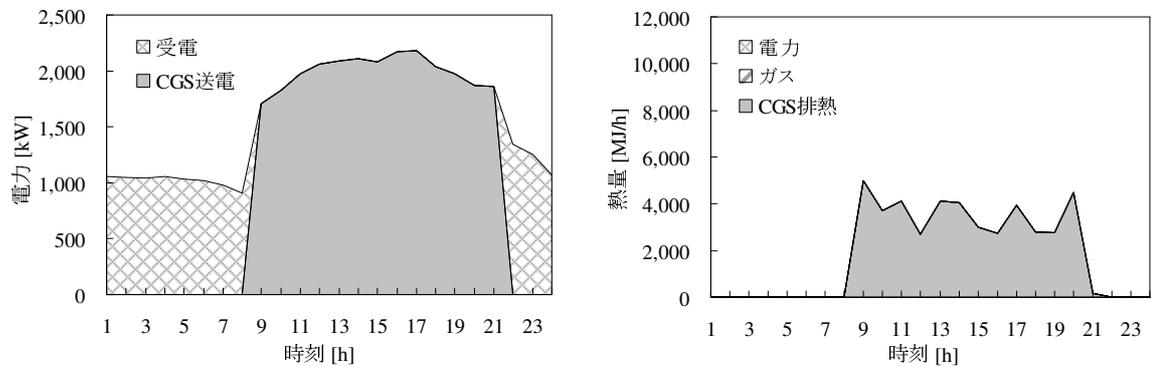


(a) CGS 更新システム (需要 A)

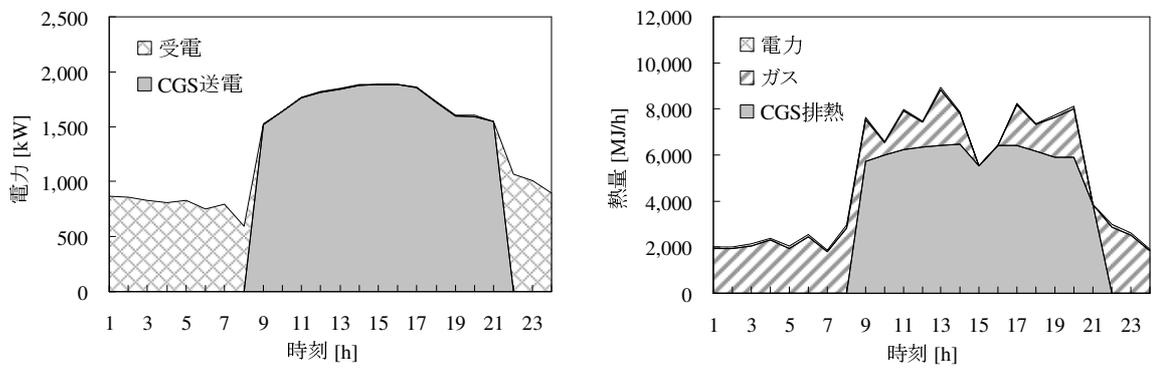


(b) 排熱優先利用 (AHC) システム (需要 B)

図 6-6 1月代表日における 635 kW CGS の電力および空調用熱負荷曲線

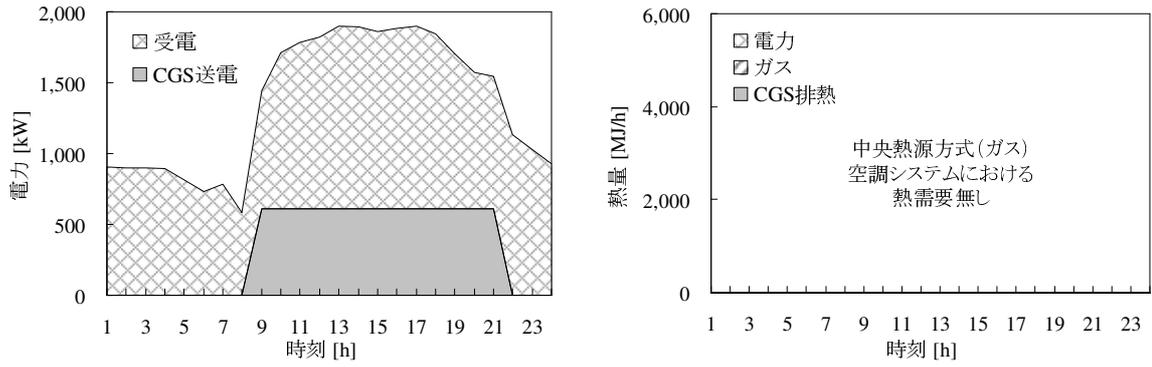


(a) CGS 更新システム (需要 A)

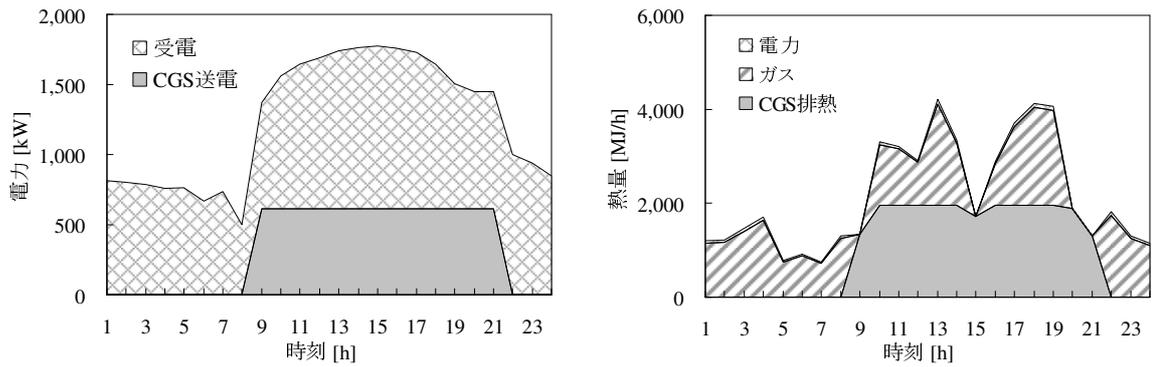


(b) 排熱優先利用 (AHC) システム (需要 B)

図 6-7 1月代表日における 2,550 kW CGS の電力および空調用熱負荷曲線

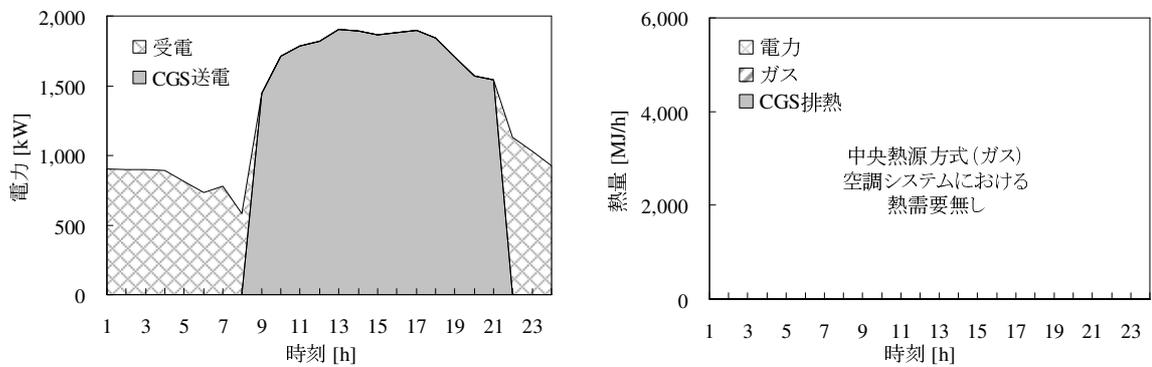


(a) CGS 更新システム (需要 A)

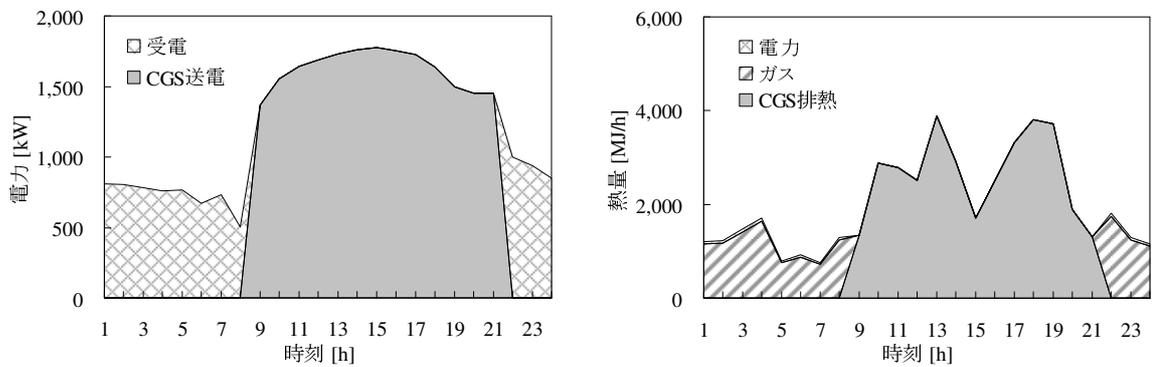


(b) 排熱優先利用 (AHC) システム (需要 B)

図 6-8 4月代表日における 635 kW CGS の電力および空調用熱負荷曲線

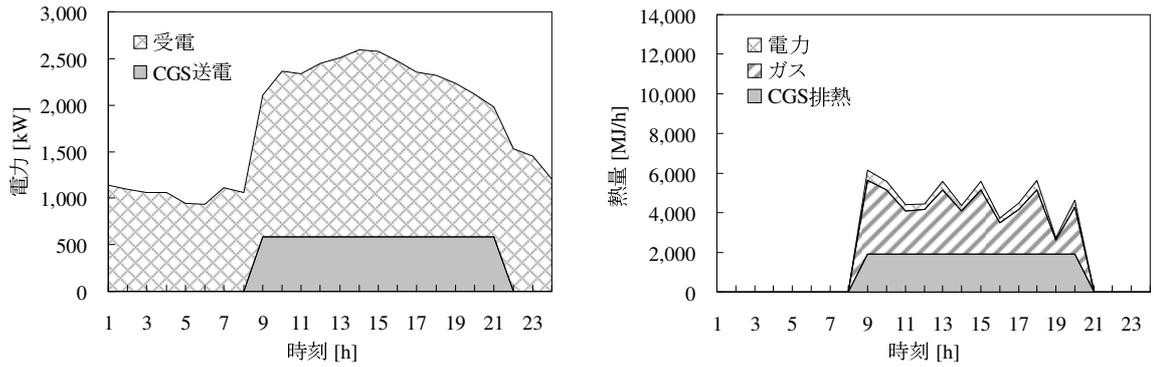


(a) CGS 更新システム (需要 A)

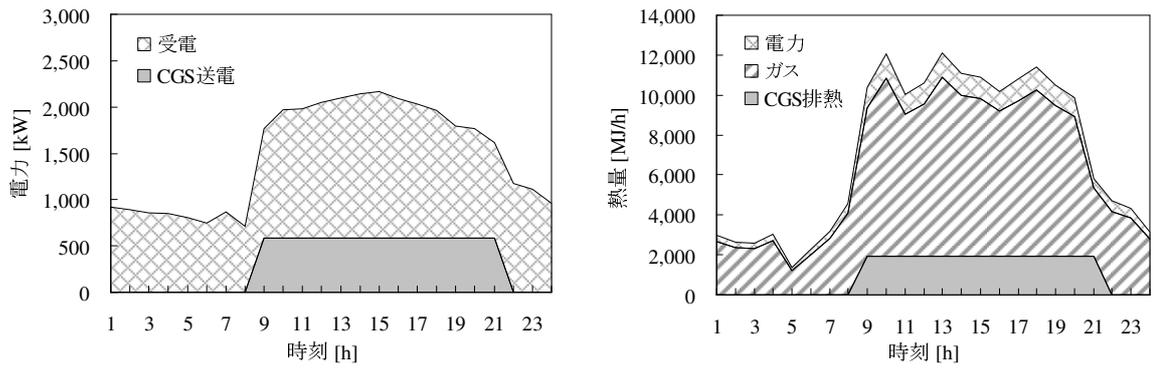


(b) 排熱優先利用 (AHC) システム (需要 B)

図 6-9 4月代表日における 2,550 kW CGS の電力および空調用熱負荷曲線

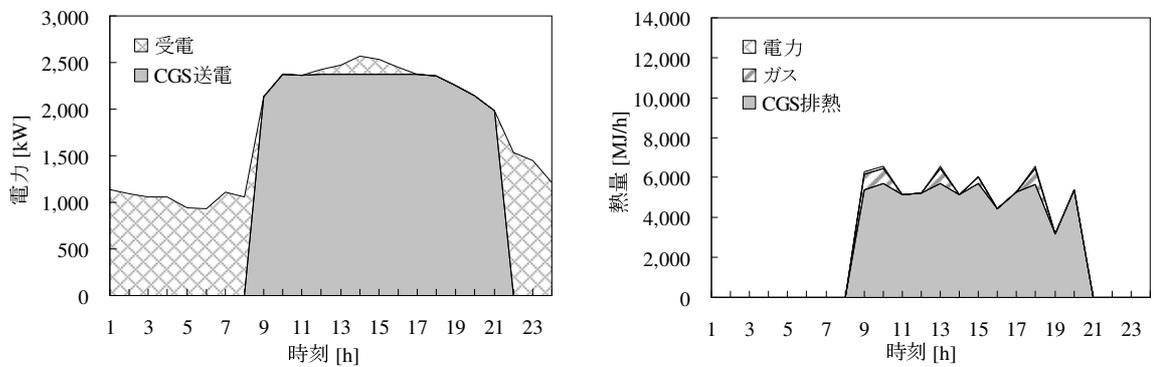


(a) CGS 更新システム (需要 A)

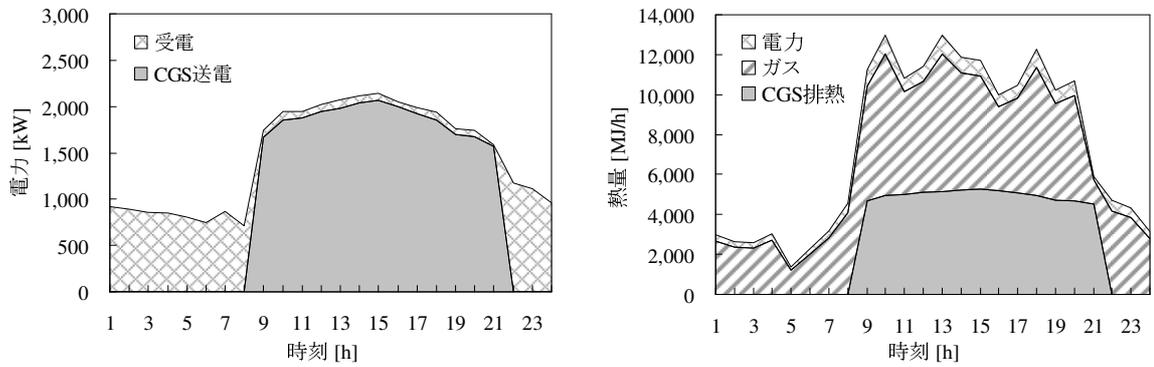


(b) 排熱優先利用 (AHC) システム (需要 B)

図 6-10 7月代表日における 635 kW CGS の電力および空調用熱負荷曲線



(a) CGS 更新システム (需要 A)



(b) 排熱優先利用 (AHC) システム (需要 B)

図 6-11 7月代表日における 2,550 kW CGS の電力および空調用熱負荷曲線

6-4-2 一次エネルギー消費量の評価

表 6-1 に示す、現状、0 kW (AHC)、0 kW (VC)、CGS 更新、排熱優先利用 (AHC) および排熱優先利用 (VC) システムについて、SFC 全体の 1 年間の一次エネルギー消費量 (Q_{prm}) をシミュレーションにより求め、省エネルギー性の比較および評価を行う。

ここで、 Q_{prm} は、式 (5-5) により求めることができる。式 (5-5) において、商用系統からの受電電力 (W_{grd} [kWh]) を一次エネルギー消費量 (Q_{prm} [MJ]) に換算する際、一次エネルギー消費原単位 (hr_{grd} [MJ/kWh]) を用いる。よって、受電電力に関する一次エネルギー消費原単位は、商用系統の電源構成を適切に反映していなければならない。本研究では、商用系統電力の一次エネルギー消費原単位として、資源エネルギー庁の省エネ法より、昼間時間帯は 10.1 MJ/kWh^[82]を、夜間時間帯は 9.31 MJ/kWh^[82]を、それぞれ用いる。一方で、将来においては、高効率発電の構成比率の増大により、商用系統電力の一次エネルギー消費原単位が小さくなることが予想される。よって、時間軸を考慮したエネルギー利用システムの最適化を検討するために、昼間時間帯における一次エネルギー消費原単位を 9.00 MJ/kWh および 8.00 MJ/kWh とした場合の評価も行う。なお、夜間時間帯における一次エネルギー消費原単位に関しては、図 5-6 より、ベース供給用電源の占める割合が多く、将来においてもその構成比が大きく変化することはないと仮定し、全て 9.31 MJ/kWh^[82]を用いた。ここで、3 通りの一次エネルギー消費原単位を使用した場合における、計測値を基に計算した現状の Q_{prm} を、評価基準値として表 6-2 に示す。

表 6-2 現状の SFC 全体の一次エネルギー消費量

$hr_{\text{grd,dt}}$ [MJ/kWh]	$hr_{\text{grd,nt}}$ [MJ/kWh]	Q_{prm} [TJ/年]
10.1 ^[82]	9.31 ^[82]	127
9.00	9.31 ^[82]	121
8.00	9.31 ^[82]	115

表 6-2 において、昼間時間帯における一次エネルギー消費原単位 ($hr_{\text{grd,dt}}$) が 10.1 MJ/kWh の場合、 Q_{prm} は 127 TJ/年となる。一方、同じ条件の計算でも、 $hr_{\text{grd,dt}}$ を 8.00 MJ/kWh とした場合、 Q_{prm} は 115 TJ/年となり、 $hr_{\text{grd,dt}}$ が 10.1 MJ/kWh の場合と比べて 9 % 減となる。このように、SFC 全体の一次エネルギー消費量は、商用系統の電源構成に大きく影響を受けるため、エネルギー利用システムを評価する際は、商用系統の電源構成を適切に反映することが重要となる。

次に、 Q_{prm} の計算結果を、図 6-12、図 6-13 および図 6-14 に示す。図 6-12、図 6-13 および図 6-14 は、 $hr_{\text{grd,dt}}$ をそれぞれ、10.1 MJ/kWh、9.00 MJ/kWh および 8.00 MJ/kWh とした場合の Q_{prm} を表している。また、図 6-12 (a)、図 6-13 (a) および図 6-14 (a) は、各システムにおける CGS の定格発電容量 ($P_{\text{CGS,rd}}$) の比較を示し、図 6-12 (b)、図 6-13 (b) および図 6-14 (b) は、表 6-1 に示すシステム間の比較を示している。

1. $hr_{\text{grd,dt}} = 10.1 \text{ MJ/kWh}^{[82]}$ 、 $hr_{\text{grd,nt}} = 9.31 \text{ MJ/kWh}^{[82]}$

図 6-12 (a) において、排熱優先利用 (AHC) および排熱優先利用 (VC) システムの Q_{prm} は、CGS 更新システムに比べて低減されていることが分かる。また、いずれのケースについても、2,550

kW の CGS を導入した場合に、 Q_{prm} が最小となる。3,800 kW の CGS を導入した場合は、電力需要に対して発電容量が過剰となり、部分負荷運転時間が長くなるため、 Q_{prm} の削減効果は 1,400 kW の CGS と同等となる。

図 6-12 (b)に示すシステムの比較においては、排熱優先利用 (AHC) および排熱優先利用 (VC) システムを採用した場合において、 Q_{prm} の削減効果は同等に大きく、現状システムの Q_{prm} に対して、それぞれ、13 %および 14 %の削減効果が期待できる結果となった。

2. $hr_{\text{grd,dt}} = 9.00 \text{ MJ/kWh}$ 、 $hr_{\text{grd,nt}} = 9.31 \text{ MJ/kWh}$ ^[82]

図 6-13 (a)において、排熱優先利用 (AHC) および排熱優先利用 (VC) システムの Q_{prm} は、CGS 更新システムに比べて低減されていることが分かる。また、いずれのケースについても、2,550 kW の CGS を導入した場合に、 Q_{prm} が最小となる。CGS 更新システムにおいては、3,800 kW CGS の発電効率および熱利用効率は、635 kW CGS よりも高いものの、 Q_{prm} は 3,800 kW CGS の方が大きくなる結果となった。これは、上述した通り、部分負荷運転の影響によるものである。

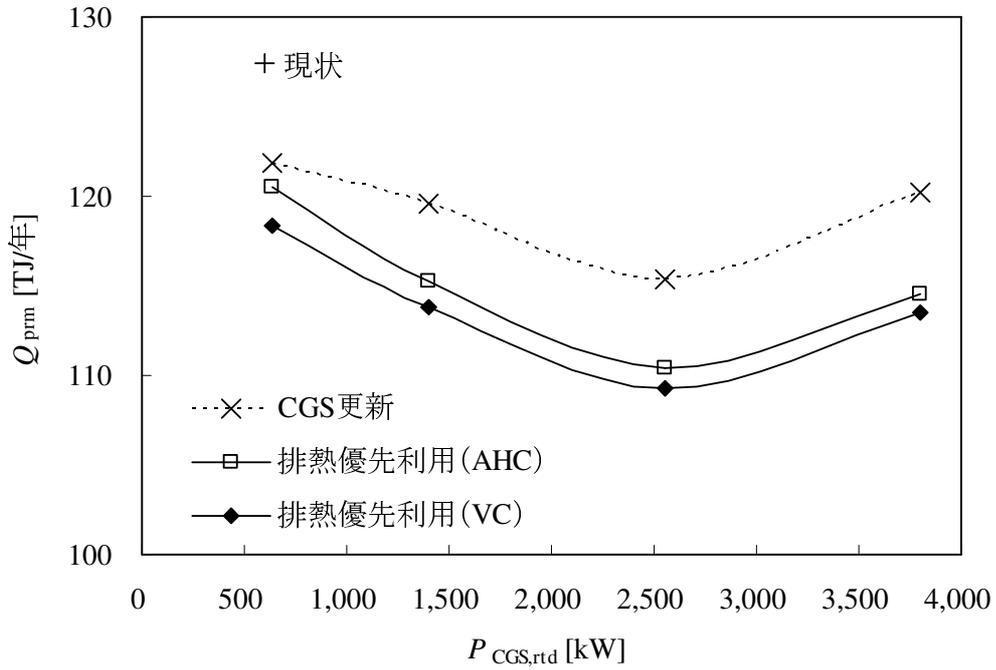
図 6-13 (b)のシステムの比較においては、排熱優先利用 (AHC) および排熱優先利用 (VC) システムを採用した場合において、 Q_{prm} の削減効果は同等に大きく、現状システムの Q_{prm} に対して、それぞれ、10 %および 11 %の削減効果が期待できる結果となった。

3. $hr_{\text{grd,dt}} = 8.00 \text{ MJ/kWh}$ 、 $hr_{\text{grd,nt}} = 9.31 \text{ MJ/kWh}$ ^[82]

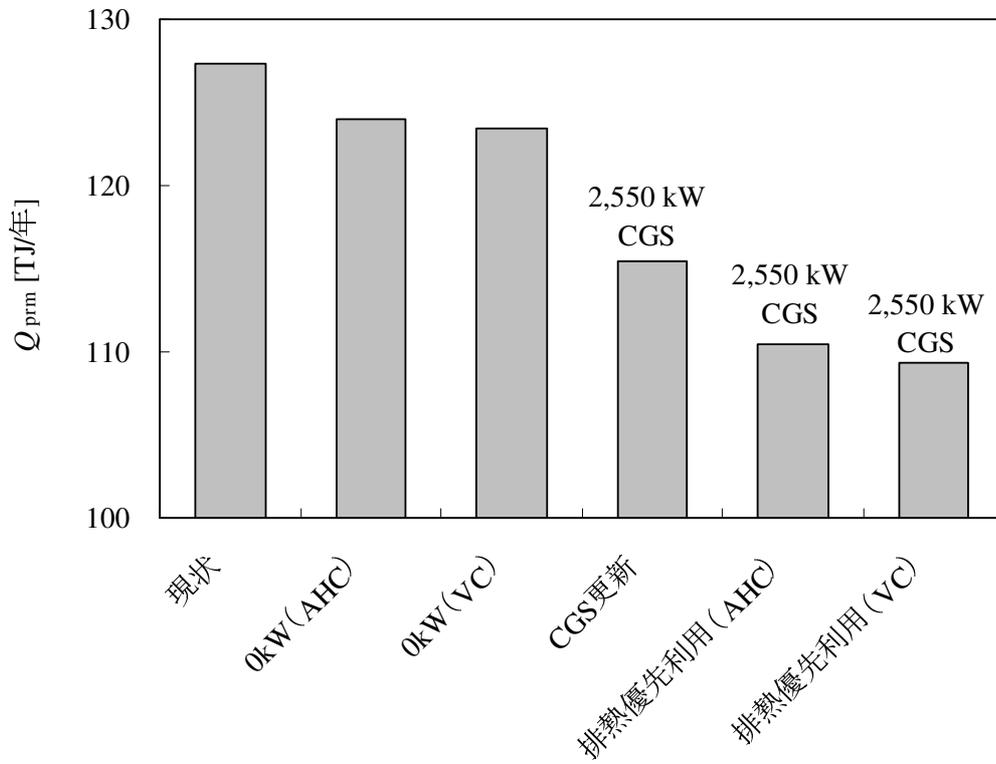
図 6-14 (a)において、排熱優先利用 (AHC) および排熱優先利用 (VC) システムの Q_{prm} は、CGS 更新システムに比べて低減され、また、2,550 kW の CGS を導入した場合に、削減効果が大きくなる。一方で、CGS 更新システムにおいては、635 kW の CGS を導入した場合に、 Q_{prm} が最小となる。

図 6-14 (b)のシステムの比較においては、0 kW (VC) および排熱優先利用 (VC) システムを採用した場合において、 Q_{prm} の削減効果は同等に大きくなり、現状システムの Q_{prm} に対して、共に、8 %の削減効果が期待できる結果となった。これは、 $hr_{\text{grd,dt}}$ が 8.00 MJ/kWh と、商用系統電力の一次エネルギー消費原単位が小さい場合においては、その電力を消費して作動する VC の省エネルギー性が向上するためである。また、図 6-12 と図 6-14 の比較より、いずれのシステムにおいても、 $hr_{\text{grd,dt}}$ が 8.00 MJ/kWh の場合における Q_{prm} は、 $hr_{\text{grd,dt}}$ が 10.1 MJ/kWh の場合よりも低減されていることが確認できる。

これらの結果より、空調システムにおいてガスエンジン排熱を最大限に利用する、排熱優先利用システムを採用した場合、省エネルギー性が向上可能であることが確認できた。また、商用系統電力の一次エネルギー消費原単位が小さくなるにつれて、いずれのシステムにおいても、省エネルギー性が高くなる結果となった。よって、SFC 全体の省エネルギー性向上のためには、自構内においては、排熱の有効利用を検討すると共に、マクロ的な視点からは、商用系統電力の発電効率の向上が必要となる。そのためには、CGS 等の分散電源の協調的な導入により、商用系統電力のピーク電力負荷を平準化することで、商用系統電源の高負荷・高効率運転を実現することが不可欠であると言える。



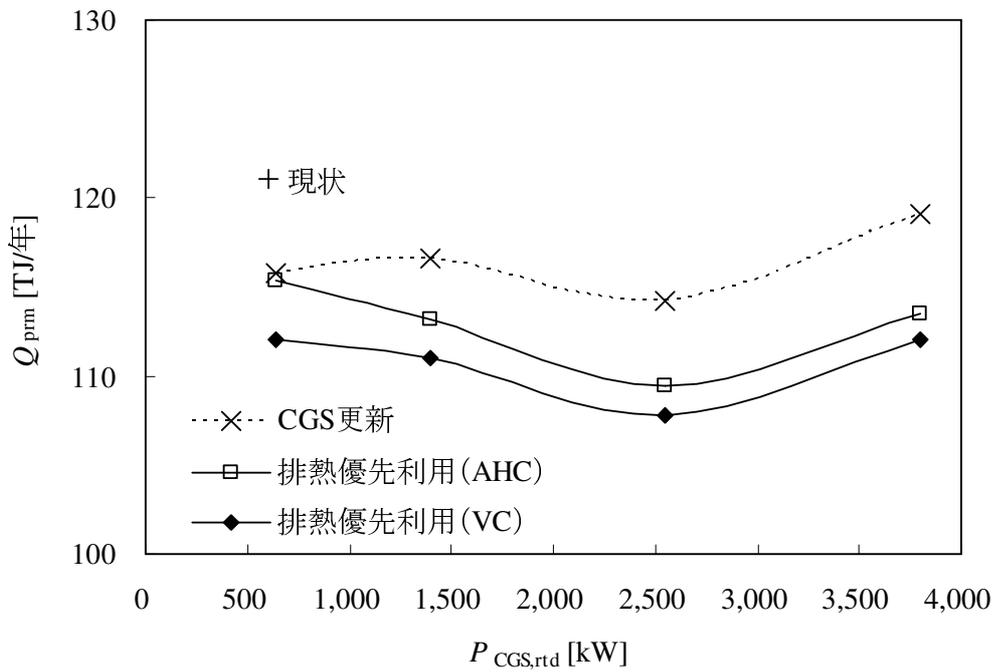
(a) CGS の比較



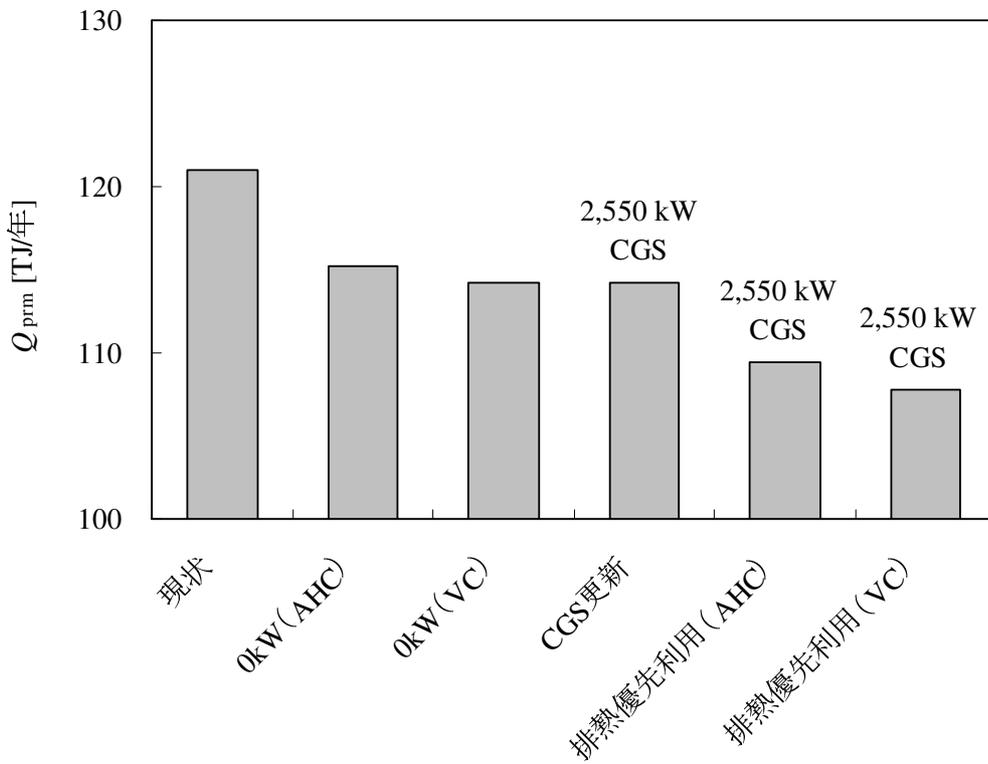
(b) システムの比較

図 6-12 SFC 全体の一次エネルギー消費量の推定結果

【 $hr_{grd,dt} = 10.1 \text{ MJ/kWh}^{[82]}$ 、 $hr_{grd,nt} = 9.31 \text{ MJ/kWh}^{[82]}$ 】



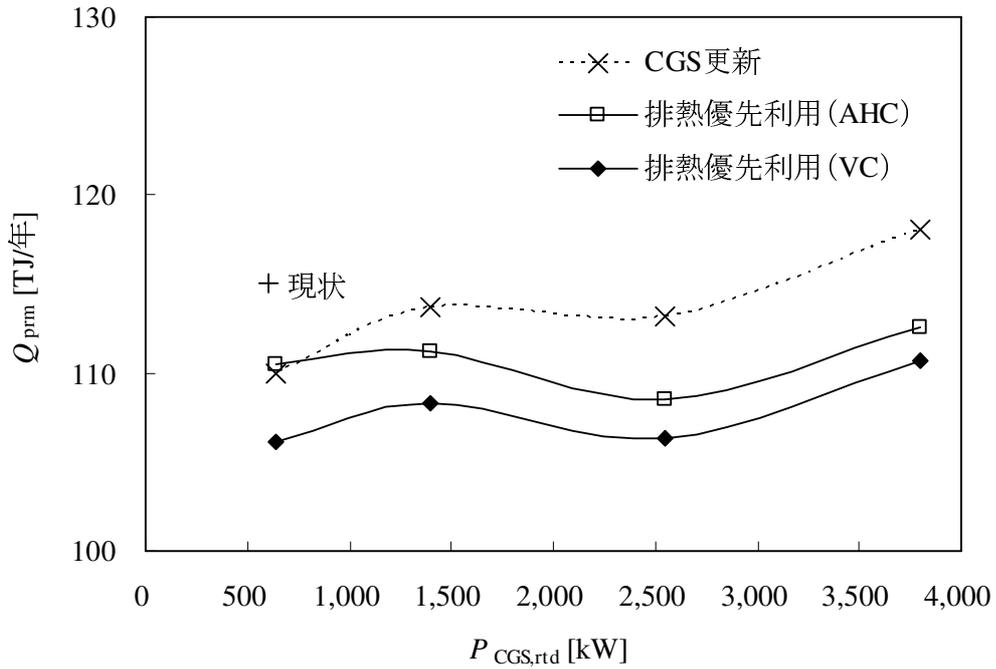
(a) CGS の比較



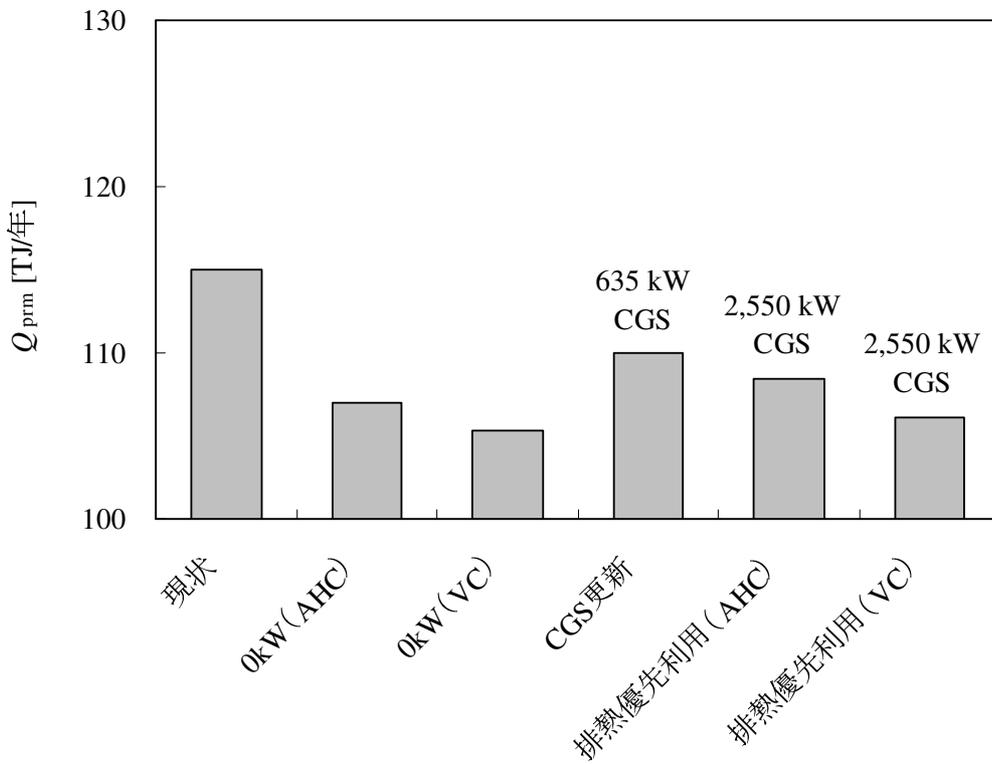
(b) システムの比較

図 6-13 SFC 全体の一次エネルギー消費量の推定結果

$[hr_{grd,dt} = 9.00 \text{ MJ/kWh}, hr_{grd,nt} = 9.31 \text{ MJ/kWh}^{[82]}]$



(a) CGS の比較



(b) システムの比較

図 6-14 SFC 全体の一次エネルギー消費量の推定結果

$[hr_{grd,dt} = 8.00 \text{ MJ/kWh}, hr_{grd,nt} = 9.31 \text{ MJ/kWh}^{[82]}]$

6-4-3 二酸化炭素排出量の評価

表 6-1 に示す、現状、0 kW (AHC)、0 kW (VC)、CGS 更新、排熱優先利用 (AHC) および排熱優先利用 (VC) システムについて、SFC 全体の 1 年間の二酸化炭素排出量 (m_{CO_2}) をシミュレーションにより求め、環境性の比較および評価を行う。

ここで、 m_{CO_2} は、式 (5-6) により求めることができる。式 (5-6) において、商用系統からの受電電力 (W_{grd} [kWh]) を二酸化炭素排出量 (m_{CO_2} [kg-CO₂]) に換算する際、二酸化炭素排出原単位 (er_{grd} [kg-CO₂/kWh]) を用いる。よって、受電電力に関する二酸化炭素排出原単位は、商用系統の電源構成を適切に反映していなければならない。ここで、商用系統電力の二酸化炭素排出原単位として、昼間時間帯の数値 ($er_{grd,d}$) および夜間時間帯の数値 ($er_{grd,nt}$) 共に、環境省が公表している東京電力平均値 0.368 kg-CO₂/kWh^[90] を用いる。また、この原単位を用いて、計測値を基に計算した現状の m_{CO_2} を、評価基準値として表 6-3 に示す。

表 6-3 現状の SFC 全体の二酸化炭素排出量

$er_{grd,d}$ [kg-CO ₂ /kWh]	$er_{grd,nt}$ [kg-CO ₂ /kWh]	m_{CO_2} [t-CO ₂ /年]
0.368 ^[90]	0.368 ^[90]	5,220

ここで、商用系統電力の一次エネルギー消費原単位に関しては、表 5-1 に示す資源エネルギー庁の省エネ法で定める数値は、昼間および夜間時間帯別の数値を公表しており、また、原子力発電の一次エネルギー消費原単位を 9 MJ/kWh^[95] として扱うことから、表 5-1 の数値は、図 5-6 の時刻別電源構成を適切に反映していると言える。一方で、表 6-3 に示す二酸化炭素排出原単位に関しては、昼間および夜間時間帯共に同一の平均値を扱っているが、実際は、表 5-2 に示す通り、石油火力と原子力の二酸化炭素排出原単位は大きく異なるため、図 5-6 の時刻別電源構成を適切に反映しているとは言い難い。ここで、CGS の導入最適化を検討する場合においては、電源構成を考慮することが重要であり、本研究では、CGS 導入により削減される商用系統の二酸化炭素排出量として、石油火力および LNG コンバインドを対象とした場合の評価も行う。

次に、 m_{CO_2} の計算結果を、図 6-15、図 6-16 および図 6-17 に示す。図 6-15 は、 $er_{grd,d}$ および $er_{grd,nt}$ 共に、0.368 kg-CO₂/kWh^[90] を用いた場合の結果を示し、また、図 6-16 および図 6-17 は、CGS 導入により削減される商用系統電力の二酸化炭素排出量として、石油火力および LNG コンバインドを想定した場合の結果を表す。また、図 6-15 (a)、図 6-16 (a) および図 6-17 (a) は、各システムにおける CGS の定格発電容量 ($P_{CGS,rd}$) の比較を示し、図 6-15 (b)、図 6-16 (b) および図 6-17 (b) は、表 6-1 に示すシステム間の比較を示している。

1. $er_{grd,d} = 0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[90]}$ 、 $er_{grd,nt} = 0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[90]}$

図 6-15 (a) において、いずれの CGS を導入した場合でも、排熱優先利用 (VC) システムの m_{CO_2} が最小となる。また、いずれのシステムについても、635 kW の CGS を導入した場合に、 m_{CO_2} が最小となる。そして、導入する CGS の容量が大きくなるにつれて、 m_{CO_2} が増加する結果となった。

図 6-15 (b)に示すシステムの比較においては、0 kW (VC) システムの m_{CO_2} が最小となり、現状システムの m_{CO_2} に対して、11 %の削減効果が期待できる結果となった。また、CGS を導入する場合は、排熱優先利用 (VC) システムに 635 kW の CGS を導入した場合に m_{CO_2} が最小となり、現状システムと比較して、9 %の削減効果が期待できる。

2. CGS 導入により石油火力 ($er_{grd} = 0.704 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[93]}$) 分が削減される場合

図 6-16 (a)において、いずれの CGS を導入した場合でも、排熱優先利用 (VC) システムの m_{CO_2} が最小となる。また、いずれのシステムについても、2,550 kW の CGS を導入した場合に、 m_{CO_2} が最小となる。

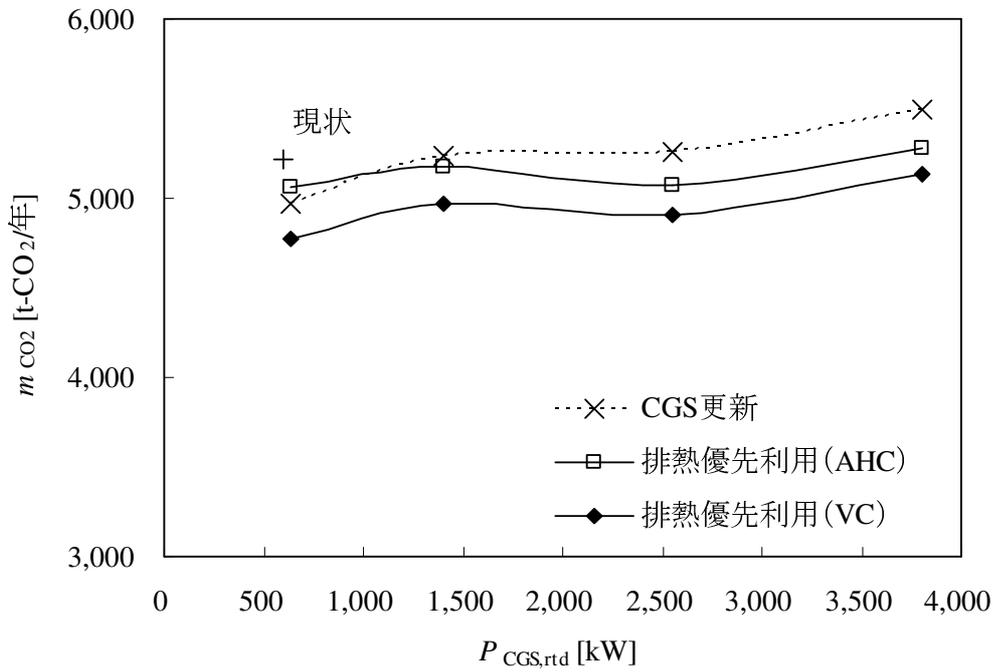
図 6-16 (b)のシステムの比較においては、CGS を導入するシステムである、CGS 更新、排熱優先利用 (AHC) および排熱優先利用 (VC) システムにおける m_{CO_2} の削減効果は大きく、2,550 kW の CGS を導入した場合、現状システムに対する m_{CO_2} の削減効果はそれぞれ、32 %、33 %および 36 %となることが期待できる。

3. CGS 導入により LNG コンバインド ($er_{grd} = 0.408 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[93]}$) 分が削減される場合

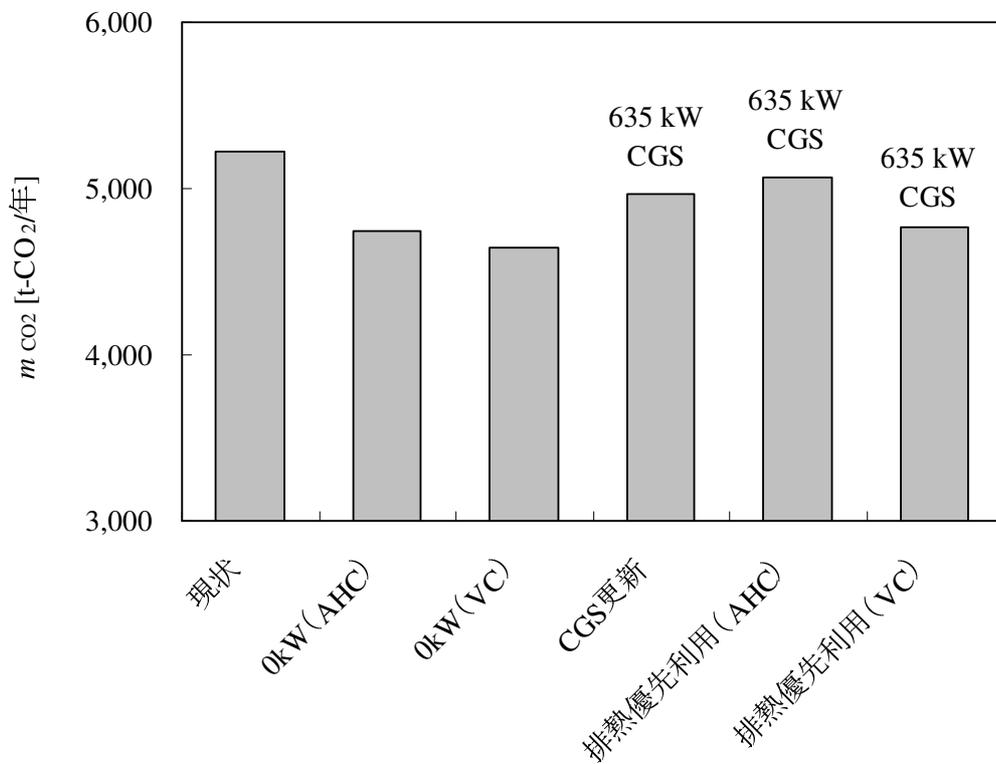
図 6-17 (a)においては、いずれの CGS を導入した場合でも、排熱優先利用 (VC) システムの m_{CO_2} が最小となる。また、CGS の導入による m_{CO_2} の大きな削減効果は見られず、図 6-15 (a)に示す結果と同様の傾向を示すことが確認できた。

図 6-17 (b)のシステムの比較においては、0 kW (VC) および排熱優先利用 (VC) システムを採用した場合において、 m_{CO_2} の削減効果は同等に大きくなり、現状システムの m_{CO_2} に対して、それぞれ、11 %および 10 %の削減効果が期待できる結果となった。これは、商用系統電源である LNG コンバインドの二酸化炭素排出原単位が小さく、その電力を消費して作動する VC を導入したシステムの環境性が向上するためである。また、図 6-16 と図 6-17 の比較より、いずれのシステムにおいても、CGS 導入により商用系統の石油火力分が削減されるとした場合において、 m_{CO_2} の低減効果が大きいことが確認できる。

これらの結果より、商用系統電力の二酸化炭素排出原単位として、全時間帯の平均値である $0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[90]}$ を用いて評価した場合、CGS の導入による環境性の向上は期待できない結果となった。一方で、CGS 導入により、商用系統における石油火力発電の稼働が抑制される場合においては、二酸化炭素排出量の大きな削減効果が期待できる。よって、一次エネルギー消費量に関する結果と同様に、マクロ的な視点から環境負荷の低減を検討するためには、CGS 等の分散電源の協調的な導入により、石油火力のピーク電力負荷を低減し、商用系統電力のピーク電力負荷を平準化することが必要であると言える。



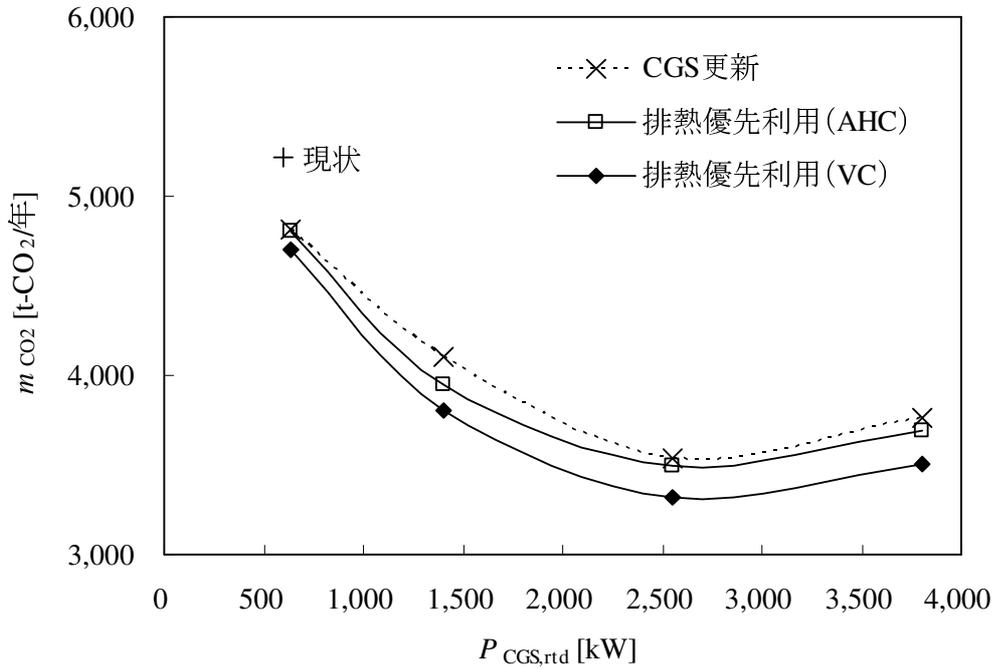
(a) CGS の比較



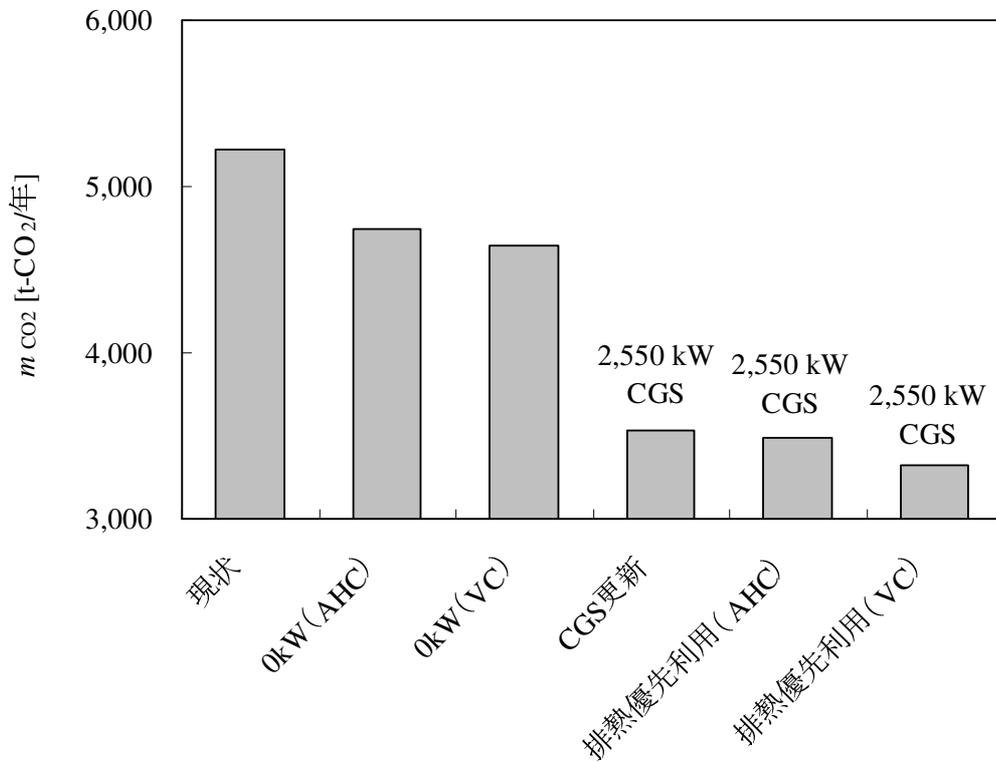
(b) システムの比較

図 6-15 SFC 全体の二酸化炭素排出量の推定結果

$[er_{grd,dt} = 0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[90]}, er_{grd,nt} = 0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[90]}]$

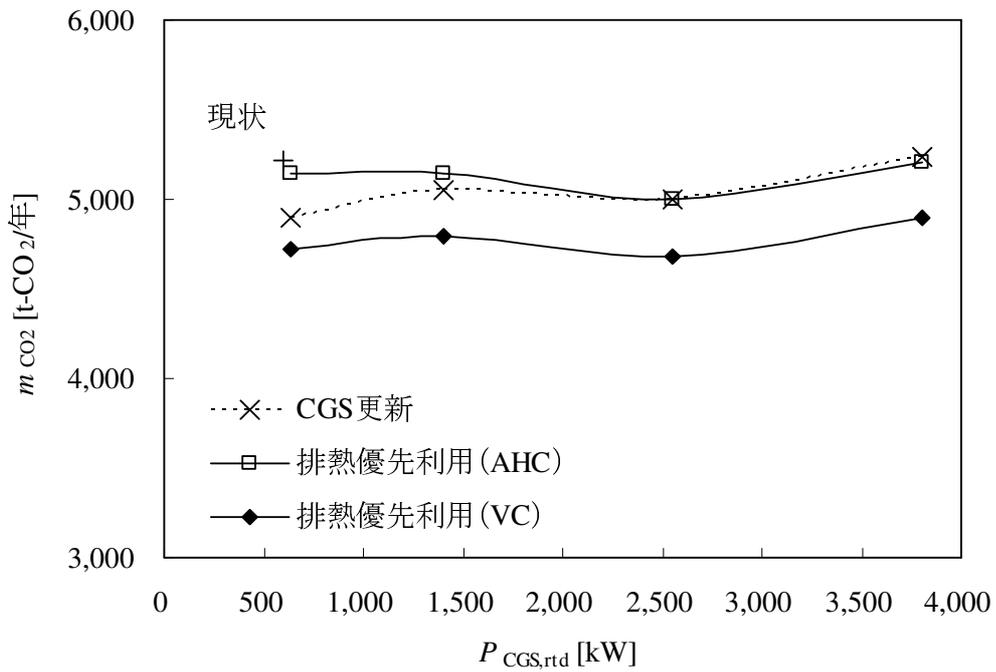


(a) CGS の比較

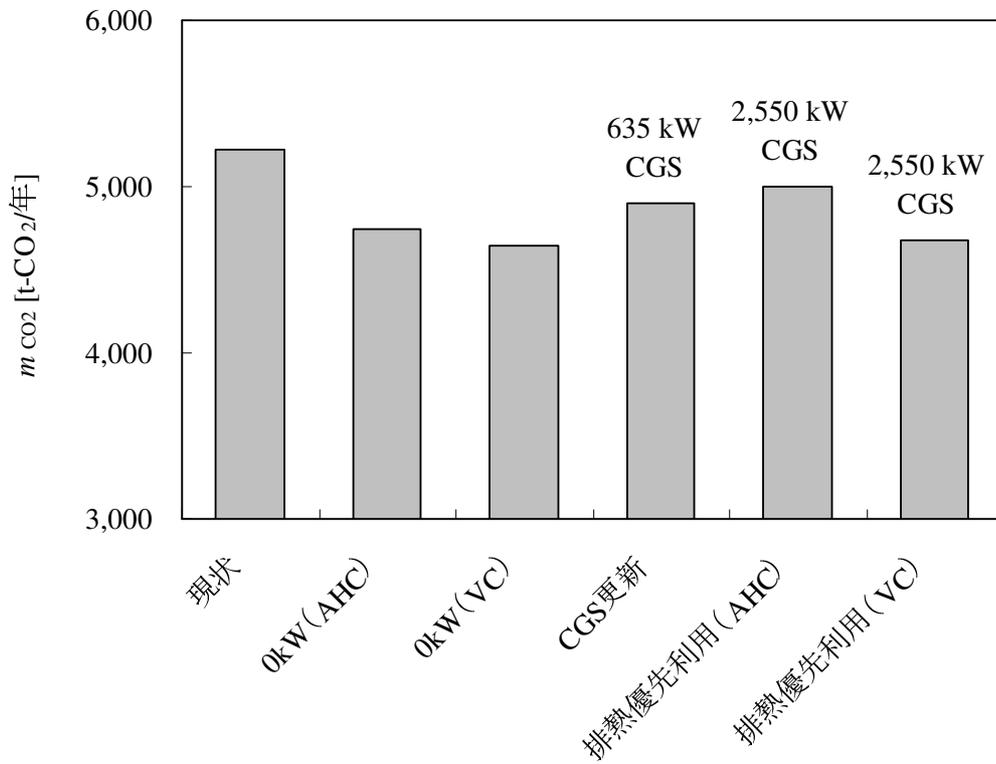


(b) システムの比較

図 6-16 SFC 全体の二酸化炭素排出量の推定結果
 【CGS 導入により石油火力 ($er_{grd} = 0.704 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[93]}$) 分が削減される場合】



(a) CGS の比較



(b) システムの比較

図 6-17 SFC 全体の二酸化炭素排出量の推定結果

【CGS 導入により LNG コンバインド ($er_{grd} = 0.408 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[93]}$) 分が削減される場合】

6-4-4 日最大受電電力の評価

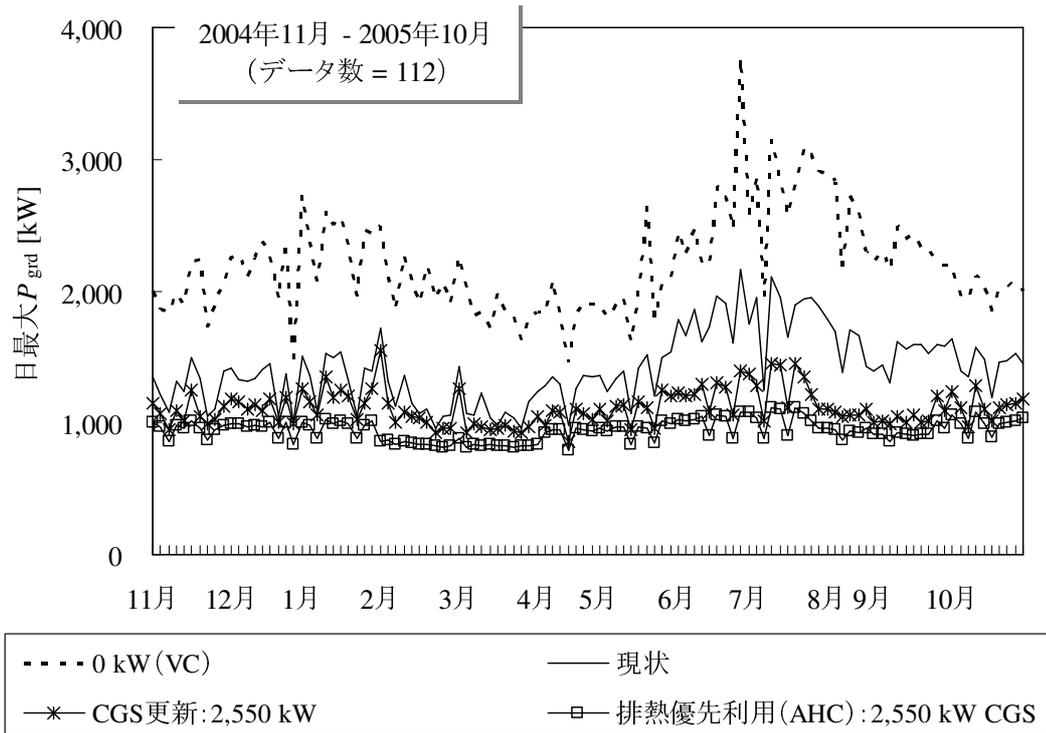
CGSの導入目的の一つとして、商用系統電源のピーク電力負荷の平準化が挙げられる。ここで、2-2-1項で述べた通り、夏期昼間に発生するピーク電力需要の増大に応じて、商用系統電源の最大電力負荷は、年々増大し続けている一方で、年負荷率は低下しているのが現状である。また、商用系統電源は、ピーク電力需要に合わせて、その構成および運転計画が決められるため、ピーク電力需要を商用系統に大きく依存した場合、今後も、大型発電所を増設し続けなければならない状況となることが予想できる。大型発電所の増設は、建設にかかるコストおよび期間、用地確保等を考えると、容易に実現できるものではない。また、危機管理の面からも、商用系統電源への過剰な負担は回避しなければならないと考える。

さらに、前項における考察から、SFC全体の一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量を低減するためには、自構内におけるシステムの最適化だけでなく、商用系統における電源構成の最適化が必要であることが分かった。この電源構成の最適化を実現するために、複数の分散電源の協調運転により、ピーク供給用電源である石油火力への負荷を低減し、LNGコンバインド等、高効率発電の構成比率を高めることが、有効な方法の一つとして考えられる。

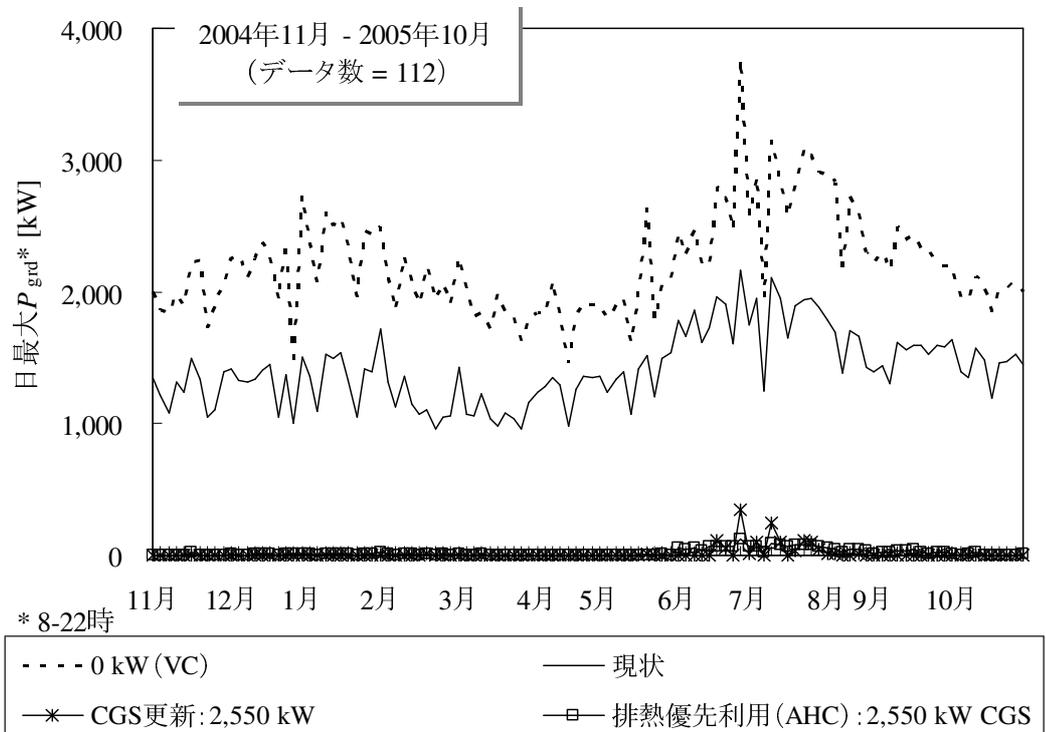
このような背景を鑑み、本研究においては、1日の受電電力の最大値である、日最大受電電力(P_{grd})を用いて、CGSの負荷平準化効果を定量的に評価することを提案している。ここで、図6-18(a)および(b)に、0kW(VC)、現状、CGS更新および排熱優先利用(AHC)システムそれぞれについて、1年間を通じた、SFCの日最大 P_{grd} の推定結果を示す。なお、図6-18(a)は、1日24時間の最大 P_{grd} を、図6-18(b)は、CGSが運転する8-22時の最大 P_{grd} を示している。

図6-18(a)において、現状システムの P_{grd} は実際の計測データを表しているが、日最大 P_{grd} は、6月28日の13時に、最大値2,158kWを記録した。6月28日は、日平均気温が30.3℃、日最大 P_{grd} を記録した13時の気温が34.0℃と、6月としては記録的な猛暑となった。ここで、CGSを導入しないで、SFCの冷暖房需要を全て電気式のVCで賄うシステム(0kW(VC))を採用した場合、同日の日最大 P_{grd} は、3,765kWに達することが予測される。これに対し、2,550kWのCGSを導入した場合、日最大 P_{grd} の年間最大値は、CGS更新システムでは1,549kW、排熱優先利用(AHC)システムでは1,114kWと、0kW(VC)に比べて、大きく低減することができる。なお、2,550kWのCGSを導入した場合の日最大 P_{grd} は、CGSが運転されない夜間時間帯(22-8時)に発生する。

図6-18(b)は、CGSが運転される昼間時間帯(8-22時)での日最大 P_{grd} を示しているが、現状および0kW(VC)に関しては、図6-18(a)と同じ結果となる。これに対し、2,550kWのCGSを導入した場合、CGS更新および排熱優先利用(AHC)システム共に、日最大 P_{grd} は年間を通してほぼ0kWとなり、日最大 P_{grd} の年間最大値は、CGS更新システムでは349kW、排熱優先利用(AHC)システムでは126kWと小さい。0kW(VC)に比べて、排熱優先利用(AHC)システムに2,550kWのCGS(送電端出力:2,370kW)を導入した場合、日最大 P_{grd} の削減効果は約3,600kWとなることを確認した。この内、2,370kWはCGS発電(送電端)による削減効果、1,230kWはCGS排熱利用による削減効果である。昼間時間帯における日最大 P_{grd} の低減効果は、商用系統における電源構成の最適化にとって重要であるが、CGS排熱を空調用熱源として有効利用することにより、ピーク電力需要を削減することが可能となる。



(a) 日最大受電電力 (0 - 24 時)



(b) 日最大受電電力 (8 - 22 時)

図 6-18 1年間を通じた SFC の日最大受電電力の推定結果

6-4-5 需要と供給のエネルギーバランス

冷暖房、給湯需要等に必要熱エネルギーは数十度レベルであり、そのエクセルギーは小さい。このような、エクセルギーの小さい需要に対しては、自然エネルギー、排熱等の熱源が利用可能である。本研究では、これら熱源の利用可能範囲を明らかにするために、電力と熱エネルギーのエクセルギーの違いを考慮しながら、最終利用形態におけるエネルギー需要を求めている。例えば、VC、PAC等の電力消費量は、最終利用形態では、エクセルギーの小さい冷暖房需要に変換されるため、電力需要ではなく冷暖房需要として扱うことで、自然エネルギー、排熱等の利用可能範囲が拡張される。本項においては、まず、SFCにおける、空調用投入エネルギーの熱量およびエクセルギー解析により、エクセルギー有効利用の視点から、CGS排熱利用の有効性について検討する。次に、排熱優先利用システムを採用した場合において、CGS排熱の有効利用による、一次エネルギー消費量の削減効果を、SFCにおける需要と供給のエネルギーバランスにより分析する。

SFCの空調用に投入されるエネルギーは、電力、ガスおよびCGS排熱の3種類である。ここで、これらの熱量は、電力およびガスは一次エネルギー換算、CGS排熱は、空調用に供給される冷温水の保有する熱量により求めることができる。一方で、これら電力、ガスおよびCGS排熱のエクセルギー (E_{pwr} 、 E_{gas} 、 $E_{\text{CGS,exh}}$) は、それぞれ、式(6-8)-(6-10)より求めることができる。

$$E_{\text{pwr}} = 0.975 Q_{\text{pwr,prm}} \quad (6-8)$$

$$E_{\text{gas}} = 0.95 Q_{\text{gas,prm}} \quad (6-9)$$

$$E_{\text{CGS,exh}} = q_{m,\text{hsw}} \{ (h_{T=365.15} - h_{T=356.15}) - T_0 (s_{T=365.15} - s_{T=356.15}) \} \quad (6-10)$$

ここで、 $Q_{\text{pwr,prm}}$ は、電力の一次エネルギー換算値、 $Q_{\text{gas,prm}}$ は、ガスの一次エネルギー換算値、 $q_{m,\text{hsw}}$ は、CGS排熱により冷却または加熱される冷温水の質量流量、 T_0 は、周囲環境温度である。また、温度365.15 K (92 °C) および356.15 K (83 °C) は、それぞれ、熱交換器または温水吸収式冷凍機入口における、CGS排熱を熱源として製造される冷温水の行きおよび還り温度を表している。

ここで、SFCにおいて、1年間に投入された空調用エネルギーの熱量 (Q_{alc}) およびエクセルギー (E_{alc}) を、図6-19および図6-20に示す。図6-19および図6-20は、それぞれ、CGS更新および排熱優先利用(AHC)システムを表し、両図の(a)は熱量解析、(b)はエクセルギー解析を示している。また、CGSについては、1,400 kW、2,550 kW および3,800 kWの3種類を対象とした。

図6-19(a)に示すCGS更新システムの熱量解析においては、CGSを導入しないで、空調需要を全て電気式機器VCで賄う0 kW (VC) システムの Q_{alc} が最も小さく、CGS更新システムの Q_{alc} は大きくなる。一方で、図6-19(b)のエクセルギー解析においては、CGS更新システムの E_{alc} が0 kW (VC) システムよりも小さく、中でも、CGSの容量が大きくなるにつれて、 E_{alc} が小さくなっていることが分かる。

図6-20に示す排熱優先利用(AHC)システムにおいても、(a)の熱量解析では、0 kW (VC) システムの Q_{alc} が最も小さくなるが、(b)のエクセルギー解析では、CGSを導入する排熱優先利用

(AHC) システムの $E_{a/c}$ が小さく、また、CGS の容量が大きくなるにつれて、 $E_{a/c}$ が小さくなる事が分かる。さらに、CGS 排熱利用による $E_{a/c}$ の削減量は、図 6-20 に示す排熱優先利用 (AHC) システムの方が、図 6-19 に示す CGS 更新システムよりも大きい。 $E_{a/c}$ を削減することで、エクセルギーの大きい化石燃料資源の消費量を削減することが可能となる。なお、図 6-19 と図 6-20 の比較より、 $Q_{a/c}$ および $E_{a/c}$ 共に、図 6-20 の排熱優先利用 (AHC) システムの方が大きくなっている。これは、図 6-19 に示す CGS 更新システムの空調用投入エネルギーが、中央熱源方式 (ガス) 空調システムに限定されている一方で、排熱優先利用 (AHC) システムの空調用投入エネルギーは、中央熱源方式 (電気) および個別熱源方式空調システムも含めた、SFC 全体の空調システムを対象としているためである。

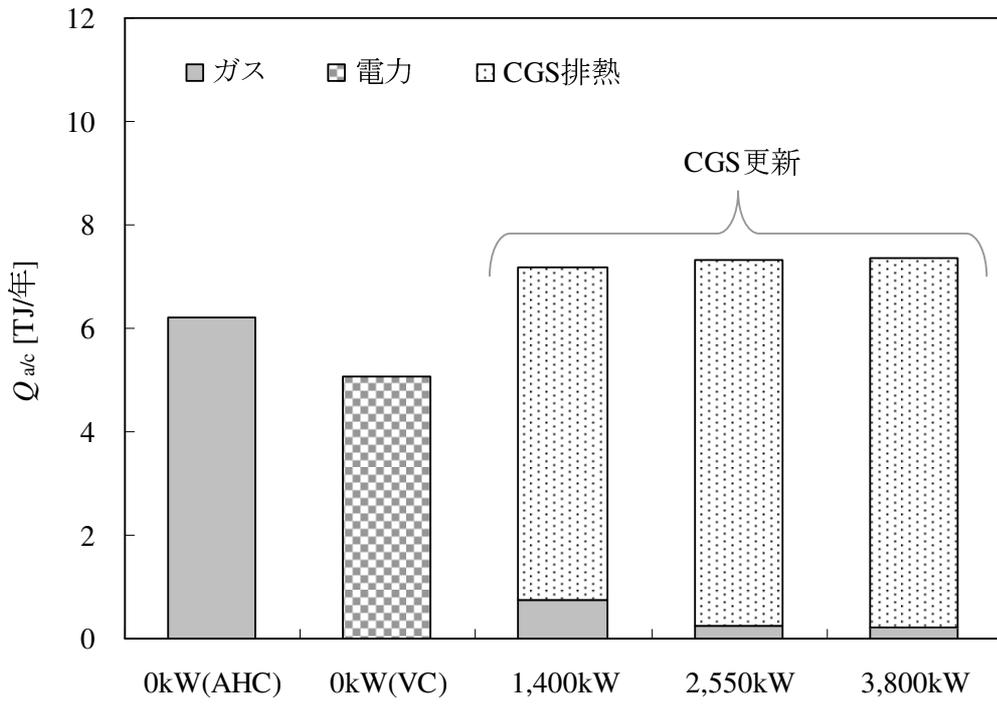
さらに、空調用に投入されるエネルギーだけでなく、電力需要に投入されるエネルギーも含めた、SFC 全体における需要と供給のエネルギーバランスを、図 6-21 および図 6-22 に示す。ここで、図 6-21 は、CGS を導入しない場合のエネルギーバランスであり、また、図 6-22 は、2,550 kW の CGS を導入した場合のエネルギーバランスである。図 6-22 (b) の排熱優先利用 (AHC) システムにおけるエネルギー需要は、図 5-1 (b) に示す需要 B を用いるが、それ以外は、CGS 排熱利用先が中央熱源方式 (ガス) 空調システムに限定されているため、図 5-1 (a) に示す需要 A を用いる。なお、両図の電力需要は、1 kWh = 3.6 MJ により、二次エネルギーに換算したものである。

図 6-21 (a) に示す 0 kW (AHC) は、CGS を導入しないで、SFC の中央熱源方式空調システムにおける冷暖房需要を全て、ガス焚吸収式冷温水発生機 (AHC) で賄うシステムである。また、図 6-21 (b) に示す 0 kW (VC) は、同じく CGS を導入しないで、SFC の中央熱源方式空調システムにおける冷暖房需要を全て、蒸気圧縮式ヒートポンプチラー (VC) で賄うシステムである。両システム共に、エクセルギーの小さい冷暖房に対して、エクセルギーの大きい電力またはガスによりエネルギーを供給するシステムである。図 6-21 (a) に示す 0 kW (AHC) システムを採用した場合の SFC 全体の一次エネルギー消費量 ($Q_{p/m}$) は 124 TJ/年、図 6-21 (b) に示す 0 kW (VC) システムを採用した場合の SFC 全体の $Q_{p/m}$ は 123 TJ/年となる。両者の差は、AHC と VC の機器効率の差を反映しているが、需要 A の冷暖房需要は、現状の中央熱源方式 (ガス) 空調システムにおける冷暖房需要に限定されているため 7 TJ/年と小さく、SFC 全体の $Q_{p/m}$ から見ると、空調機器の違いによる $Q_{p/m}$ の削減効果は小さい。

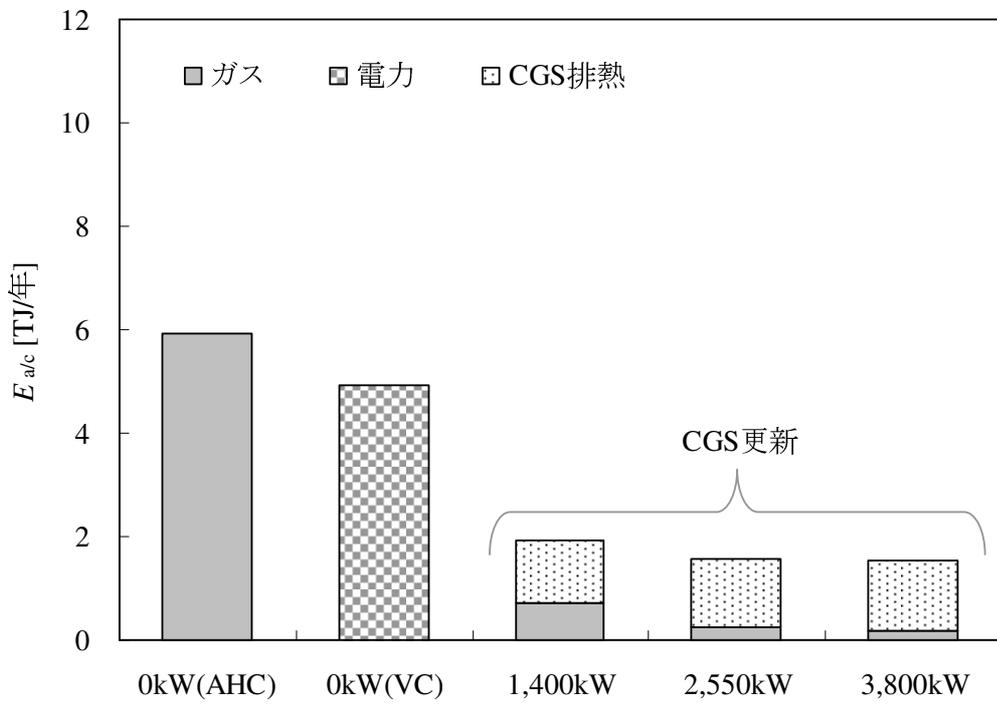
また、図 6-22 (a) は、CGS 更新システムに 2,550 kW の CGS を導入した場合、そして、図 6-22 (b) は、排熱優先利用 (AHC) システムに 2,550 kW の CGS を導入した場合のエネルギーバランスを表している。図 6-22 (a) において、CGS 排熱利用は中央熱源方式 (ガス) 空調システムに限定されているが、CGS 排熱利用により $Q_{p/m}$ は 7 TJ/年削減され、SFC 全体の $Q_{p/m}$ は 115 TJ/年となる。一方、図 6-22 (b) を見ると、CGS 排熱利用が、現状の中央熱源方式 (ガス) 空調システムのみから、SFC 全体の冷暖房需要に拡張されるため、CGS 排熱利用による $Q_{p/m}$ の削減効果は 16 TJ/年と大きくなり、SFC 全体の $Q_{p/m}$ は 110 TJ/年にまで低減される結果となった。このように、エクセルギーの小さい冷暖房需要に対しては、エクセルギーの小さい CGS 排熱を最大限に利用することで、エクセルギーの大きい化石燃料資源の消費量が削減され、その結果、SFC 全体の一次エネルギー消費量を低減することが可能となる。さらに、排熱優先利用 (AHC) システムを採用することで、CGS 排熱の利用量が增大し、さらなる一次エネルギー消費量の削減効果が期待できる結果となっ

た。

一方で、図 6-22 (b)の排熱優先利用 (AHC) システムにおけるガス (CGS) 消費量は 63 TJ/年となり、図 6-22 (a)の CGS 更新システムにおけるガス (CGS) 消費量 70 TJ/年に比べて、7 TJ/年だけ減少していることが確認できる。これは、図 6-22 (b)の排熱優先利用 (AHC) システムにおいては、SFC の空調システムを全て、中央熱源方式 (ガス) で構築するために、VC および PAC の空調用電力消費量が低減された結果、CGS の電力負荷率が低下するためである。CGS の電力負荷率の低下は、部分負荷特性により、CGS 発電効率が低下することを意味する。このように、CGS によるエネルギー供給を SFC のみに限定した場合、排熱を最大限に有効利用したとしても、エネルギー需要の熱電比のために、CGS が高効率で運転されない状況になる場合がある。従って、排熱は CGS を設置した需要家において最大限に有効利用すると共に、電力を他の需要家に託送することで、CGS の熱電負荷比を最適化し、CGS のさらなる高効率運転環境を実現することが必要であると考えられる。次章においては、SFC に設置された CGS の発電電力を他キャンパスに託送する、電力託送システムの効果について検討する。

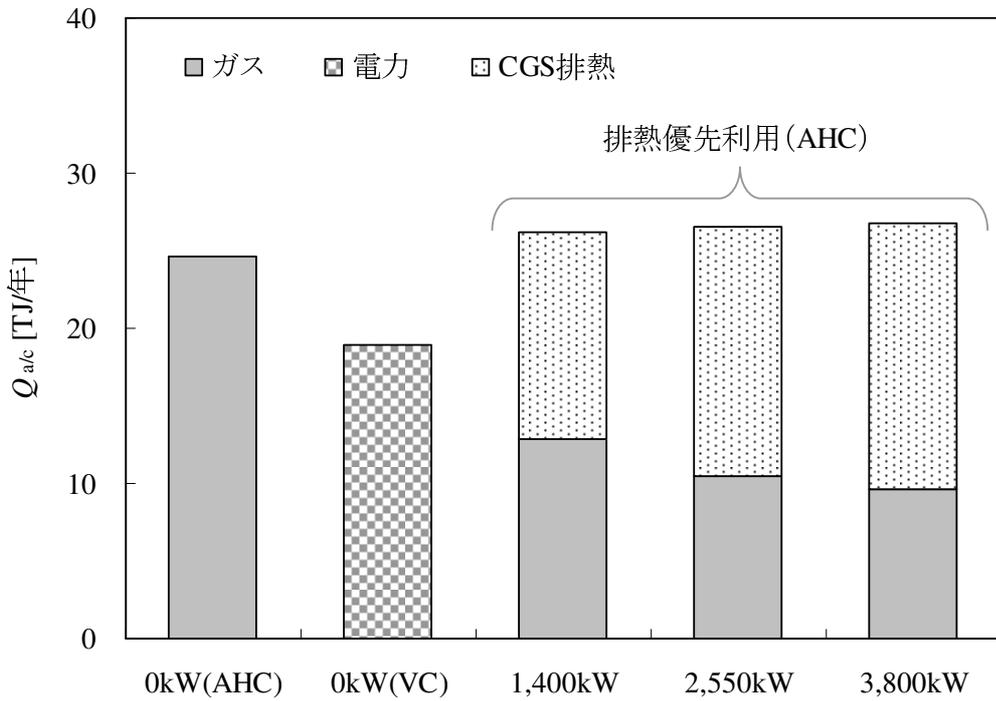


(a) 熱量解析

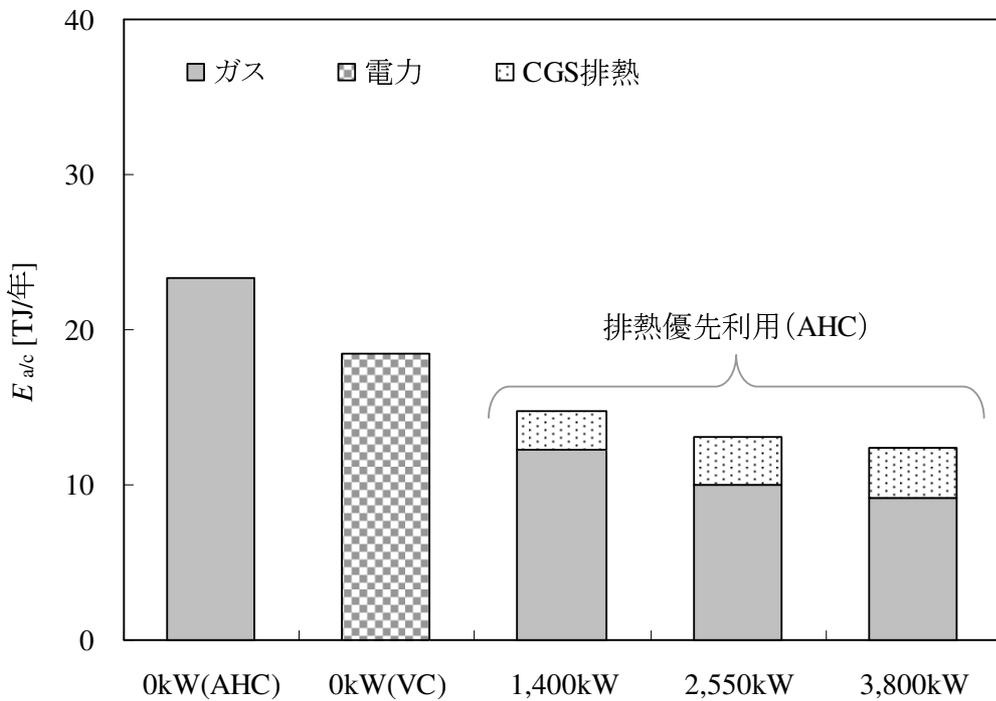


(b) エクセルギー解析

図 6-19 SFC における空調用投入エネルギーの熱量およびエクセルギー解析 (CGS 更新システム)

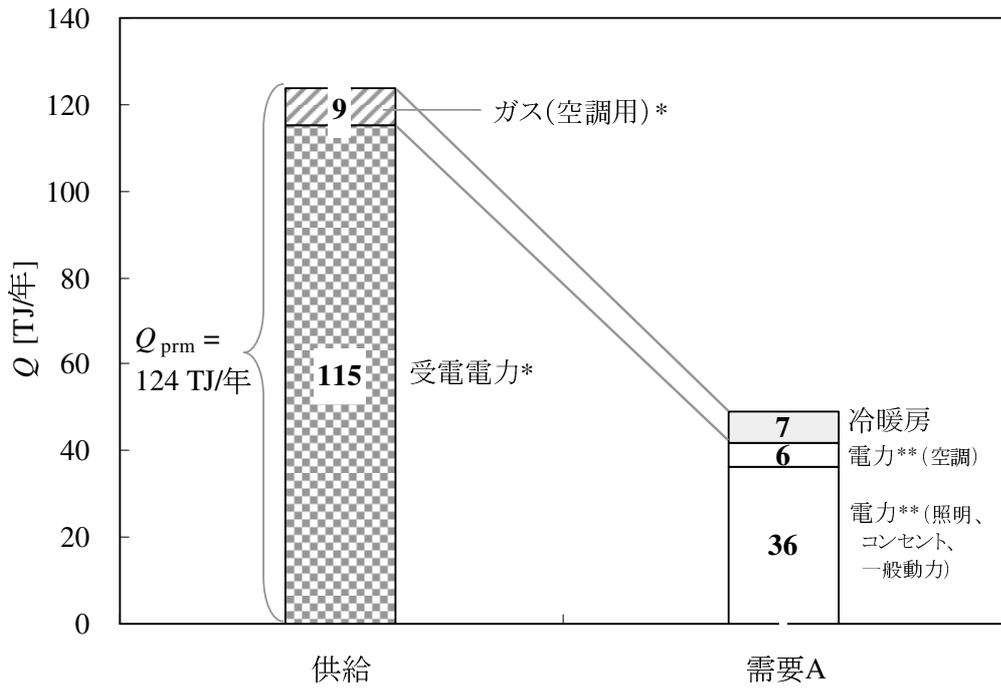


(a) 熱量解析



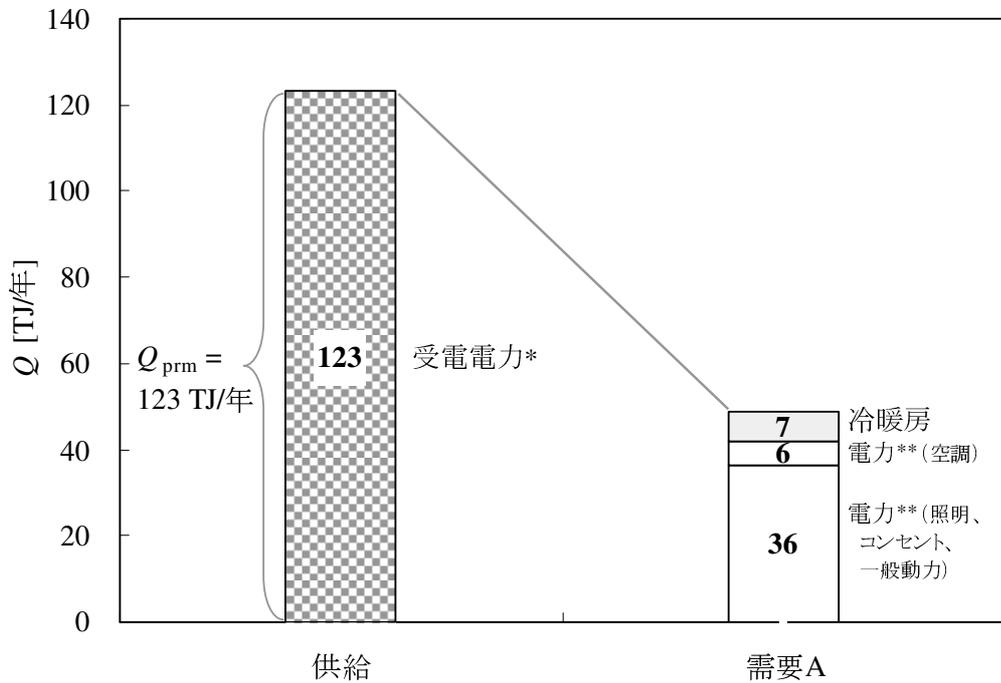
(b) エクセルギー解析

図 6-20 SFC における空調用投入エネルギーの熱量およびエクセルギー解析 (排熱優先利用 (AHC) システム)



* 一次エネルギー換算、** 1 kWh = 3.6 MJによる二次エネルギー換算

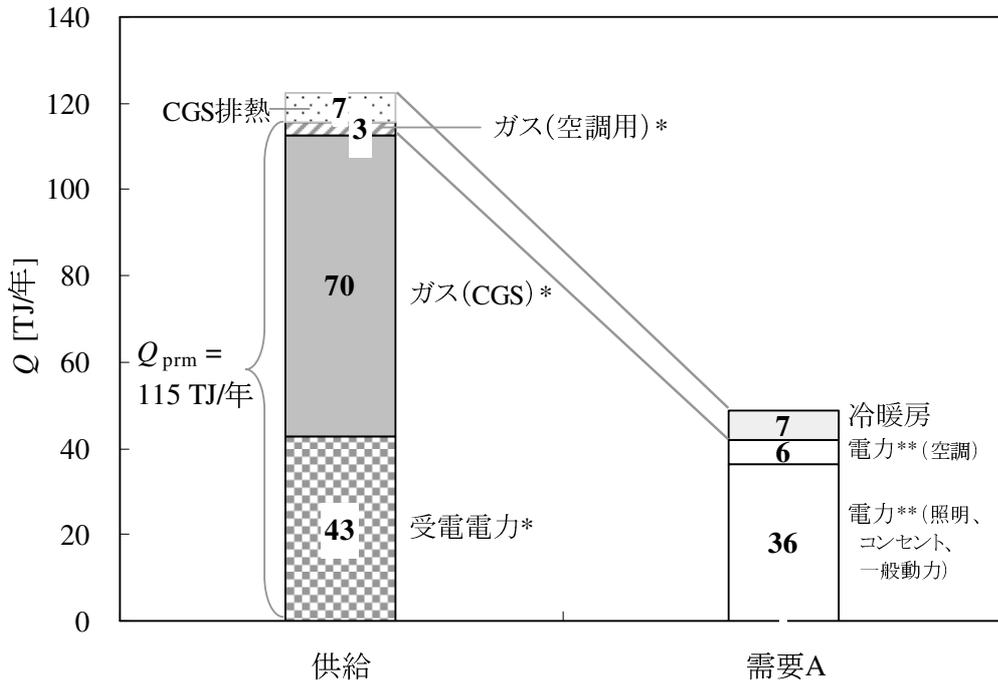
(a) 0 kW (AHC)



* 一次エネルギー換算、** 1 kWh = 3.6 MJによる二次エネルギー換算

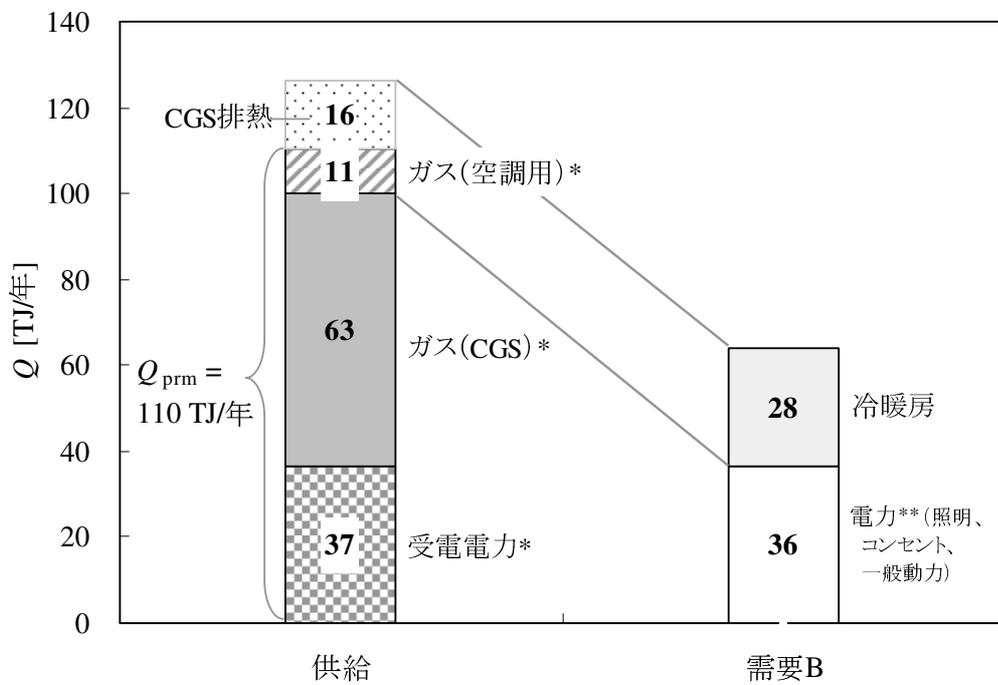
(b) 0 kW (VC)

図 6-21 SFCにおける需要と供給のエネルギーバランス (CGS 無し)



* 一次エネルギー換算、** 1 kWh = 3.6 MJによる二次エネルギー換算

(a) CGS 更新システム



* 一次エネルギー換算、** 1 kWh = 3.6 MJによる二次エネルギー換算

(b) 排熱優先利用 (AHC) システム

図 6-22 SFCにおける需要と供給のエネルギーバランス (2,550 kW CGS)

合計となる。

$P_{CGS,rd}$ が P_{SFC} より小さい場合、式 (7-1) に示す通り、 P_{SFC} は、商用系統からの受電電力 (P_{grd}) および補機動力を除いた CGS 送電電力 (P_{CGS}) により賄われる。一方で、 $P_{CGS,rd}$ が P_{SFC} よりも大きい場合は、式 (7-2) に示す通り、 P_{SFC} は、 P_{CGS} から、矢上キャンパスへの託送電力 (P_{trn}) を除いた電力により賄われる。

$$P_{CGS,rd} < P_{SFC}$$

$$P_{grd} + P_{CGS} = P_{SFC} \tag{7-1}$$

$$P_{CGS,rd} > P_{SFC}$$

$$P_{CGS} - P_{trn} = P_{SFC} \tag{7-2}$$

一方、矢上キャンパスの消費電力 (P_{yagami}) は、式 (7-3) に示す通り、商用系統からの受電電力 (P_{grd}) および SFC からの託送電力 (P_{trn}) により賄われる。なお、式 (7-3) に示す矢上キャンパスの P_{yagami} は、AHC、VC、PAC 等の空調用熱源機器の消費電力も含めた、矢上キャンパスの消費電力を表している。

$$P_{grd} + P_{trn} = P_{yagami} \tag{7-3}$$

式 (7-3) において、 P_{yagami} を一定とした場合、 P_{trn} に応じて、矢上キャンパスの P_{grd} は低減されることになる。

このように、電力託送を行うことで、CGS の電力負荷率が上昇し、その結果、発電効率および省エネルギー性の向上が期待される。なお、電力託送に伴う送電損失は 3 % に設定し、その他、CGS の運転条件等は、6-1 節と同じとした。

7-2 シミュレーションにおける検討システム

シミュレーションでは、表 7-1 に示す各システムについて、SFC および矢上キャンパスにおける、合計一次エネルギー消費量、二酸化炭素排出量および日最大受電電力を求め、電力託送システムの評価を行う。

表 7-1 電力託送システムに関するシミュレーションにおける検討システム

システム	SFC			矢上キャンパスへの 電力託送
	エネルギー需要	CGS	排熱優先利用	
現状	需要 A	300 kW×2		
0 kW (VC)	需要 A	-	-	-
CGS 更新	需要 A	1,400 - 5,100 kW×1		
排熱優先利用	需要 B	1,400 - 5,100 kW×1	○	
電力託送	需要 A	1,400 - 5,100 kW×1		○
排熱優先利用+電力託送	需要 B	1,400 - 5,100 kW×1	○	○

- 現状 : エネルギー需要、CGS、空調システムおよび空調用熱源機器の全ては現状のままとし、一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量は、シミュレーションではなく、SFC および矢上キャンパスの計測値から求める。
- 0 kW (VC) : SFC において、CGS を導入せず、全ての電力需要を商用系統電力、全ての冷暖房需要を表 5-5 に示す VC で賄うシステム。矢上キャンパスへの電力託送は行わない。
- CGS 更新 : SFC において、表 5-3 に示す 1,400 kW、2,550 kW、3,800 kW、4,450 kW および 5,100 kW の CGS の内 1 台を、現状の CGS の代替として導入し、排熱利用先は、現状と同じ中央熱源方式 (ガス) 空調システムのみとするシステム。矢上キャンパスへの電力託送は行わない。
- 排熱優先利用 : SFC において、表 5-3 に示す 1,400 kW、2,550 kW、3,800 kW、4,450 kW および 5,100 kW の CGS の内 1 台を、現状の CGS の代替として導入し、排熱を SFC 全体の空調システムで最大限に利用するシステム。矢上キャンパスへの電力託送は行わない。
- 電力託送 : SFC において、表 5-3 に示す 1,400 kW、2,550 kW、3,800 kW、4,450 kW および 5,100 kW の CGS の内 1 台を、現状の CGS の代替として導入し、排熱利用先は、現状と同じ中央熱源方式 (ガス) 空調システムのみとするシステム。CGS の余剰電力は、矢上キャンパスへ託送する。
- 排熱優先利用+電力託送 : SFC において、表 5-3 に示す 1,400 kW、2,550 kW、3,800 kW、4,450 kW および 5,100 kW の CGS の内 1 台を、現状の CGS の代替として導入し、排熱を SFC 全体の空調システムで最大限に利用するシステム。CGS の余剰電力は、矢上キャンパスへ託送する。

本章におけるシミュレーションでは、ある需要家に設置された CGS の発電電力を、自構内のみで供給する場合と、他の需要家にも託送する場合における、エネルギー利用システムの省エネルギー性および環境性を、比較・評価することを主目的としている。よって、矢上キャンパスは、電力託送先としてのみ検討し、矢上キャンパス内でのシステムの最適化に関する検討は行っていない。また、表 7-1 において、排熱優先利用システムは前章で検討したが、電力託送システムとの比較を行うために、本章においても評価の対象とする。

7-3 電力託送システムを導入したエネルギー利用システムの評価

7-3-1 CGS の運転シミュレーション

本項では、表 7-1 に示す検討システムの内、CGS 更新、排熱優先利用、電力託送および排熱優先利用+電力託送システムについて、4,450 kW の CGS を運転した場合の、SFC 構内における CGS の電力負荷と、矢上キャンパスへの託送電力量により、CGS の運転状況を比較・分析する。

図 7-2 は 1 月代表日、図 7-3 は 4 月代表日、図 7-4 は 7 月代表日における、4,450 kW の CGS

を運転した場合の、電力負荷および託送電力曲線を、それぞれ表している。なお、図 7-2 - 図 7-4 は全て、左側の図が SFC 構内における電力負荷曲線、右側の図が矢上キャンパスにおける託送電力曲線を示している。なお、本章においては、電力託送システムの有効性の検討を目的としており、排熱利用に関しては、前章で考察したため省略する。

1. 冬期（1月）代表日における CGS の運転

図 7-2 は、1 月代表日において、4,450 kW CGS を運転した場合の、電力負荷および託送電力曲線を表している。図 7-2 (a), (b), (c) および (d) は、それぞれ、CGS 更新、排熱優先利用、電力託送および排熱優先利用+電力託送システムの場合を、また、左側の図は SFC における電力負荷、右側の図は矢上キャンパスにおける託送電力量を示している。

電力託送を行わない図 7-2 (a) および (b) においては、4,450 kW の CGS は、SFC の電力需要に対して過剰容量となるため、1 日を通して部分負荷運転となる。一方で、電力託送を行う図 7-2 (c) および (d) においては、電力需要がピークとなる昼間時間帯においては、4,450 kW CGS は定格運転となる。特に、図 7-2 (d) の排熱優先利用+電力託送システムの場合は、SFC における排熱拡張による空調用電力消費量の低減効果により、図 7-2 (c) の電力託送システムに比べて、矢上キャンパスへの電力託送量が大きくなる。

2. 中間期（4月）代表日における CGS の運転

図 7-3 は、4 月代表日において、4,450 kW CGS を運転した場合の、電力負荷および託送電力曲線を表している。図 7-3 (a), (b), (c) および (d) は、それぞれ、CGS 更新、排熱優先利用、電力託送および排熱優先利用+電力託送システムの場合を、また、左側の図は SFC における電力負荷、右側の図は矢上キャンパスにおける託送電力量を示している。

電力託送を行わない図 7-3 (a) および (b) においては、4,450 kW の CGS は、SFC の電力需要に対して過剰容量となるため、さらに、中間期における電力需要の低下から、1 日を通して部分負荷運転となる。一方で、電力託送を行う図 7-3 (c) および (d) においては、電力需要がピークとなる昼間時間帯においては、4,450 kW CGS は定格運転となる。大型の CGS を導入した場合、中間期においては、電力需要の低下による CGS の電力負荷率の低下が問題となるが、電力託送を行うことにより、中間期においても、CGS の電力負荷率を向上することが可能となる。

3. 夏期（7月）代表日における CGS の運転

図 7-4 は、7 月代表日において、4,450 kW CGS を運転した場合の、電力負荷および託送電力曲線を表している。図 7-4 (a), (b), (c) および (d) は、それぞれ、CGS 更新、排熱優先利用、電力託送および排熱優先利用+電力託送システムの場合を、また、左側の図は SFC における電力負荷、右側の図は矢上キャンパスにおける託送電力量を示している。

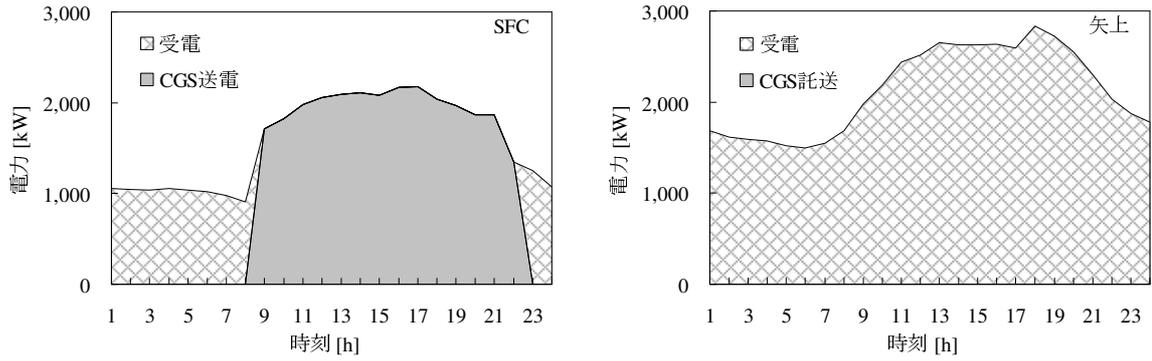
電力託送を行わない図 7-4 (a) および (b) においては、4,450 kW の CGS は、1 日を通して部分負荷運転となる。一方で、電力託送を行う図 7-4 (c) および (d) においては、電力需要がピークとなる昼間時間帯においては、4,450 kW CGS は定格運転となる。特に、図 7-4 (d) の排熱優先利用+電力託送システムにおいては、SFC における排熱拡張による空調用電力消費量の低減効果により、矢

上キャンパスへの電力託送量が大きくなっていることが確認できる。電力需要は、7月にピークとなるが、ガスエンジン排熱利用による空調用電力消費量の削減効果と、電力託送による複数キャンパス間での電力利用により、商用系統電力へのピーク電力負荷を低減することが可能となる。

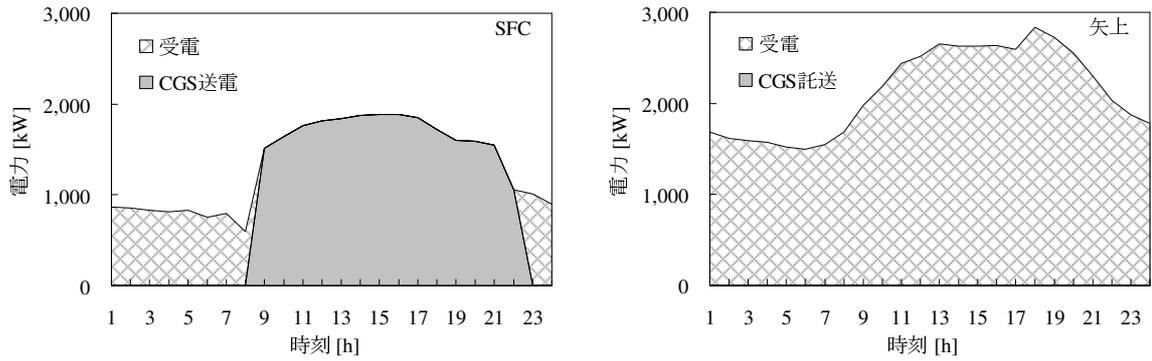
以上の考察により、電力託送を行うことで、大型のCGSを導入した場合においても、1年間を通して、高負荷運転が可能となることが確認できた。一般的に、CGSは、大型になるにつれて、また、負荷率が高くなるにつれて、発電効率が高くなる。よって、託送システムを採用することにより、大型CGSの発電効率が高まり、その結果、CGSの省エネルギー性が向上することが期待できる。また、熱需要の大きい需要家にCGSを設置し、電力需要の大きい需要家に託送することで、CGSの熱電負荷比を改善することが可能となる。そのためには、CGSを設置する需要家においては特に、排熱を有効利用する空調システムの構築が不可欠となる。

現在、夏期昼間時間帯における、電力需要のピークが問題となっており、猛暑時には、電力不足が生じる場合もある。商用系統電力にこのピーク電力需要を大きく依存することは、危機管理の視点から、最適なシステムとは言い難い。ここで、商用系統電力と協調しながらCGSを効果的に導入し、その排熱利用による、空調用電力消費量の削減効果も含めて、商用系統電力への電力負荷を低減することが、理想的なシステムの一つと考える。さらに、CGSの電力を複数の需要家に託送することで、商用系統電力の負荷平準化効果を高めることが可能になると考える。

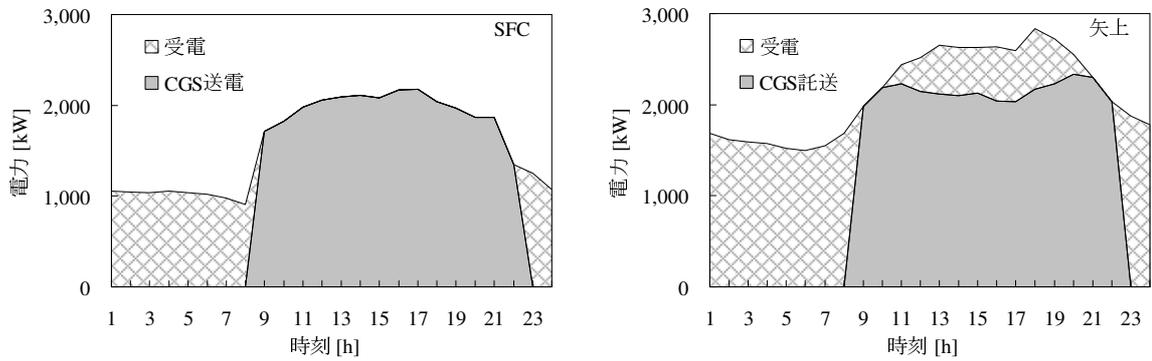
以下、電力託送による効果を定量的に把握するために、まず、電力託送システムを採用した場合の、CGS発電効率および熱利用効率の改善効果を分析する。次に、1年間を通じた、SFCおよび矢上キャンパスの、一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量の総量により、エネルギー利用システムの評価を行うと共に、日最大受電電力により、商用系統電力の負荷平準化効果についても評価する。



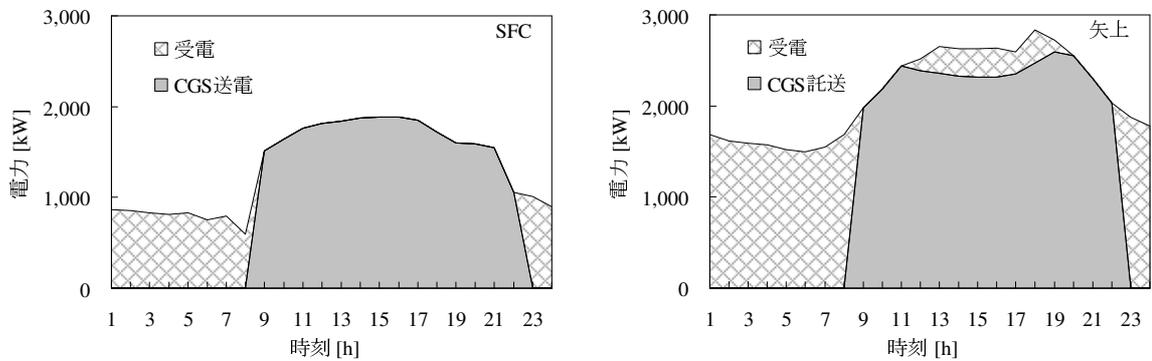
(a) CGS 更新システム



(b) 排熱優先利用システム

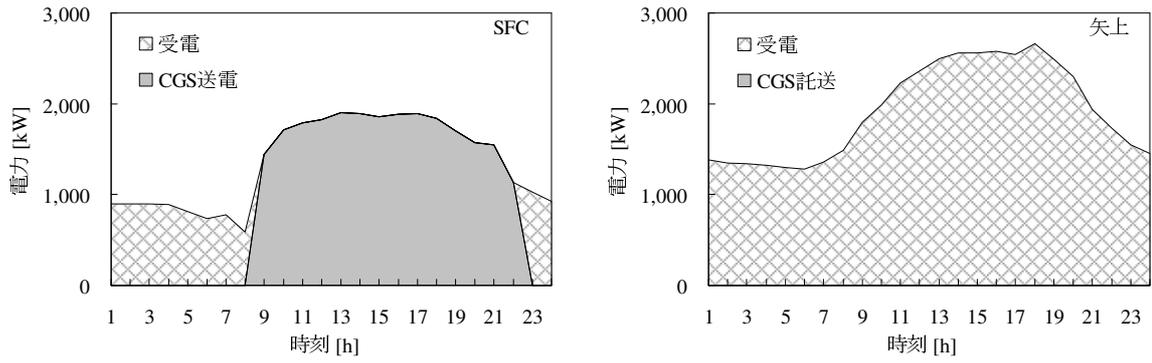


(c) 電力託送システム

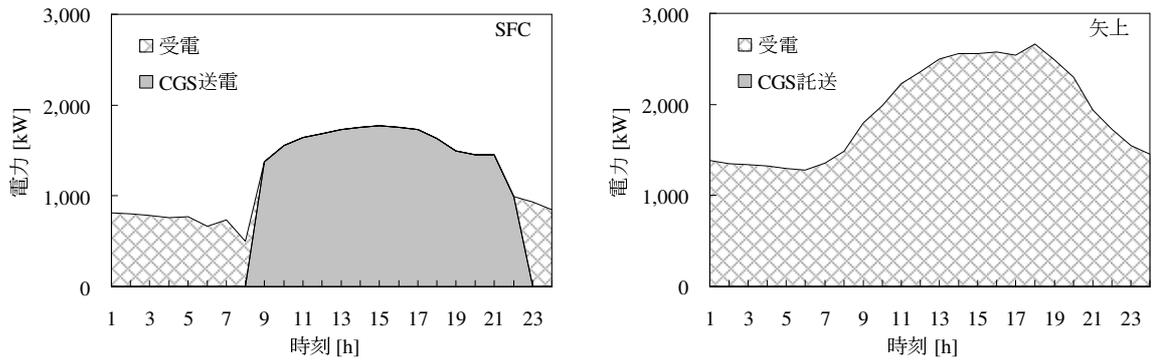


(d) 排熱優先利用+電力託送システム

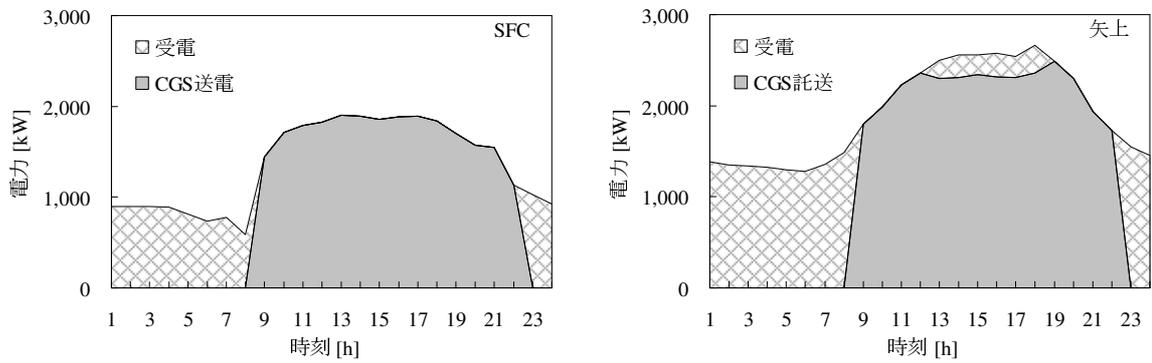
図 7-2 1月代表日における 4,450 kW CGS の電力負荷および託送電力曲線



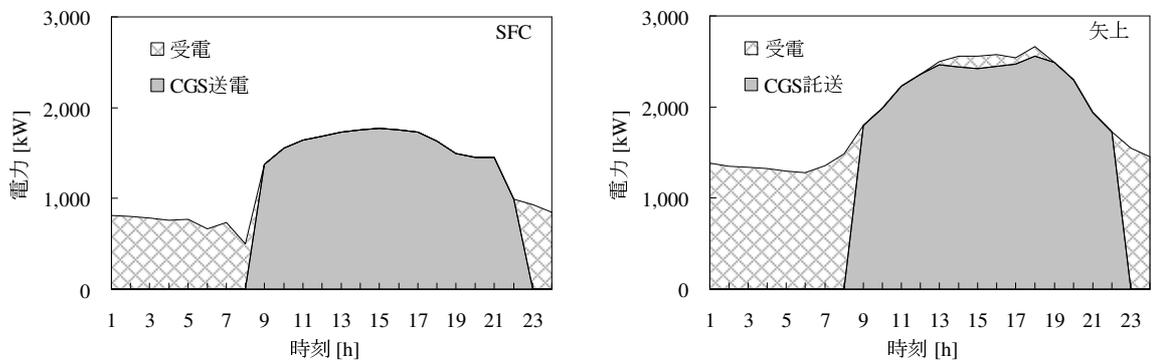
(a) CGS 更新システム



(b) 排熱優先利用システム

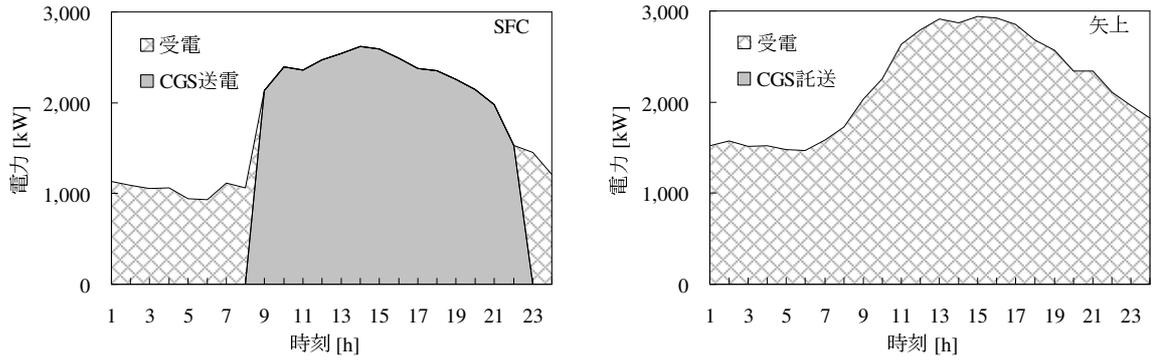


(c) 電力託送システム

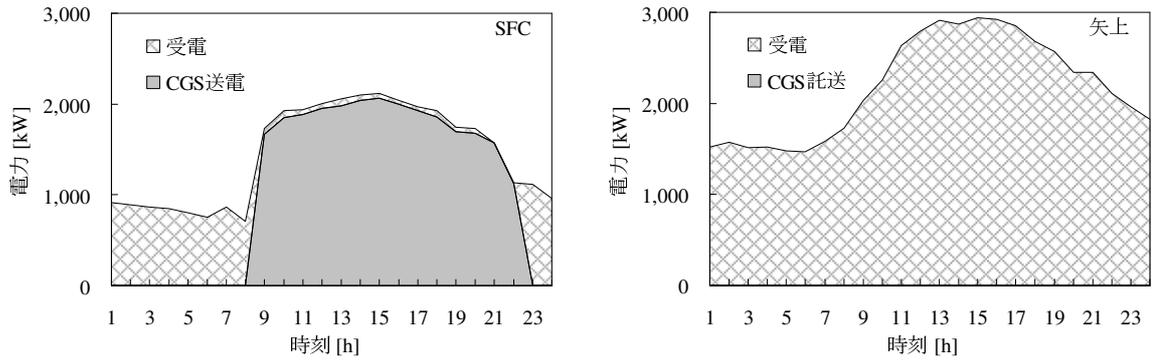


(d) 排熱優先利用+電力託送システム

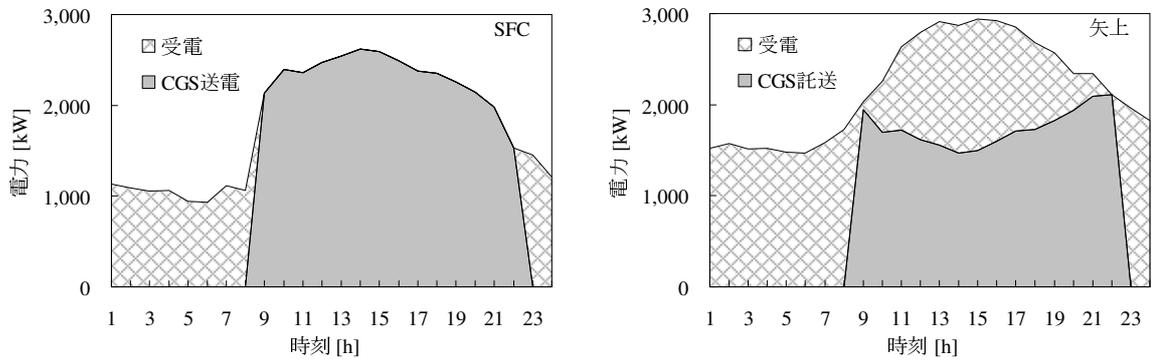
図 7-3 4月代表日における 4,450 kW CGS の電力負荷および託送電力曲線



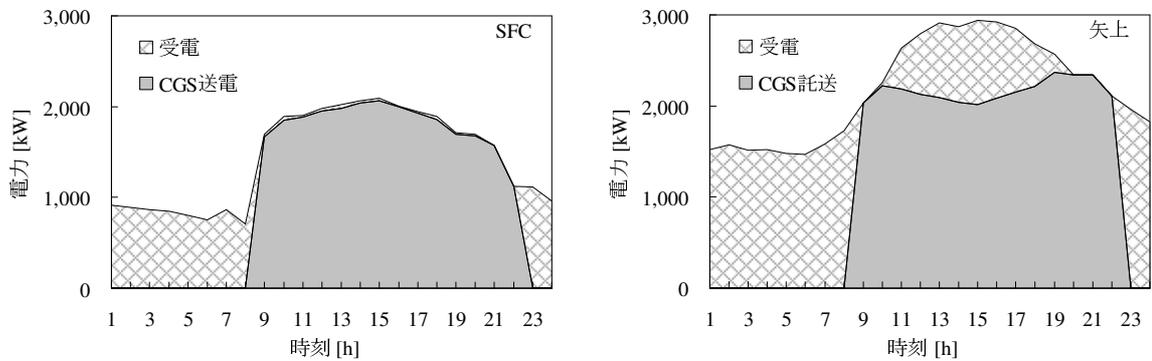
(a) CGS 更新システム



(b) 排熱優先利用システム



(c) 電力託送システム



(d) 排熱優先利用+電力託送システム

図 7-4 7月代表日における 4,450 kW CGS の電力負荷および託送電力曲線

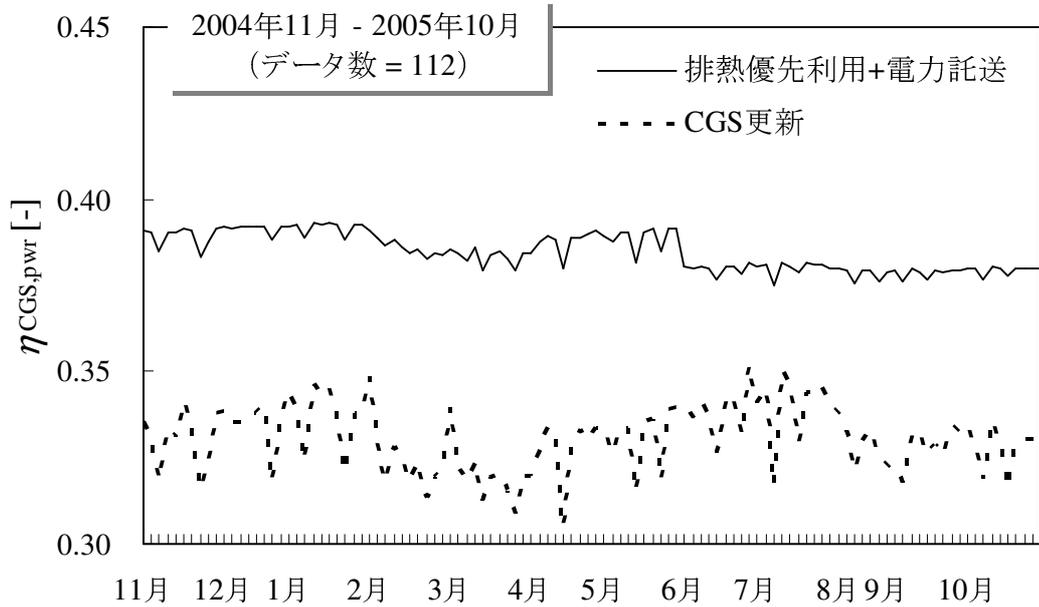
7-3-2 CGS の熱効率解析

本項では、表 7-1 に示す検討システムの内、排熱優先利用+電力託送システムについて、4,450 kW の CGS を運転した場合の、CGS 発電効率 ($\eta_{\text{CGS,pwr}}$) および熱利用効率 ($\eta_{\text{CGS,exh}}$) を、CGS 更新システムと比較することにより、排熱優先利用と電力託送を組合せたシステムの有効性を分析する。なお、 $\eta_{\text{CGS,pwr}}$ は式 (5-1) により、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ は式 (5-2) により求めることができる。ここで、各システムにおいて、4,450 kW の CGS を運転した場合の、 $\eta_{\text{CGS,pwr}}$ の日平均値を図 7-5 (a) に、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ の日平均値を図 7-5 (b) に、それぞれ示す。なお、これらの日平均値は、CGS が運転されている平日の 112 日間について求められたものである。

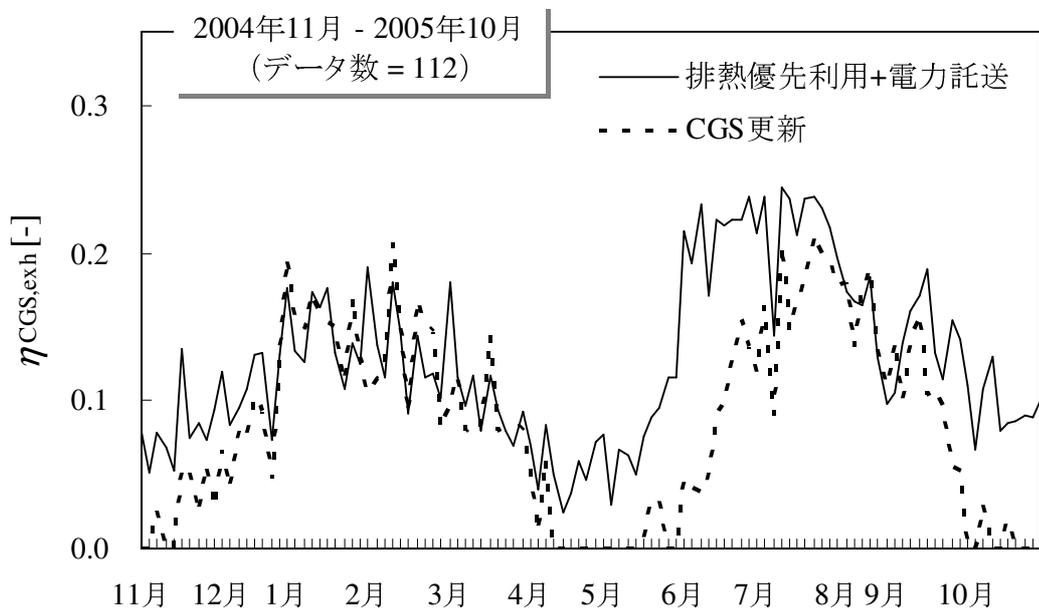
図 7-5 (a) は、4,450 kW の CGS に関する、 $\eta_{\text{CGS,pwr}}$ の日平均値の季節変動を示している。ここで、4,450 kW CGS について、 $\eta_{\text{CGS,pwr}}$ の定格値は、表 5-3 より、暖房時は 0.39、冷房時は 0.38 となる。なお、両者の差は、冷房時に排熱を熱源として作動する、温水吸収式冷凍機の補機動力によるものである。図 7-5 (a) より、排熱優先利用も電力託送も行わない CGS 更新システムにおいては、 $\eta_{\text{CGS,pwr}}$ は、年間を通して、0.35 を下回っており、定格効率よりも低い状態で運転されていることが確認できる。これは、CGS の電力供給先が、SFC 構内の電力需要のみであるため、4,450 kW の CGS では、容量が過剰となり、年間を通して、CGS が部分負荷運転となるためである。一方で、排熱優先利用+電力託送システムにおいては、 $\eta_{\text{CGS,pwr}}$ は、年間を通して、暖房時 0.39、冷房時 0.38 の定格効率に近い状態で運転されていることが確認できる。これは、電力託送システムにより、CGS の電力供給先を、SFC 構内と矢上キャンパスに拡張した結果、CGS の電力負荷率が定格点に近づくためである。このように、電力託送システムにより、複数の需要家間で CGS の電力を利用することにより、大型 CGS の高負荷・高効率運転が実現可能となる。

図 7-5 (b) は、4,450 kW の CGS に関する、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ の日平均値の季節変動を示している。ここで、4,450 kW CGS について、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ の定格値は、表 5-3 より、暖房時は 0.33、冷房時は 0.25 となる。なお、両者の差は、暖房時における熱交換器と、冷房時における温水吸収式冷凍機の、ガスエンジン排熱から冷温水への変換効率の差を表している。図 7-5 (b) より、排熱優先利用+電力託送システムにおいては、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ は、特に、熱需要の小さい中間期において、改善されていることが確認できる。これは、SFC の空調システムにおいて、排熱利用先を、現状の中央熱源方式 (ガス) 空調システムのみから、SFC 全体の空調システムに拡張したためである。なお、 $\eta_{\text{CGS,exh}}$ の一般的な特性として、図 5-8 に示す通り、部分負荷になるにつれて、高くなるという特徴がある。しかし、図 7-5 (b) では、CGS が部分負荷運転となる CGS 更新システムの $\eta_{\text{CGS,exh}}$ の方が小さくなっている。これは、図 5-8 の特性が、排熱で製造された冷温水が全量利用された場合のものであるのに対して、図 7-5 (b) の $\eta_{\text{CGS,exh}}$ は、式 (5-2) より、実際に利用される冷温水熱量 ($Q_{\text{exh,CGS}}$) を用いて決定されるため、部分負荷時においても、 $Q_{\text{exh,CGS}}$ が小さい場合は低くなるためである。

この結果より、SFC の空調システムにおいて、ガスエンジン排熱を最大限に有効利用する排熱優先利用システムと、CGS 発電電力の供給先を、SFC と矢上キャンパスに拡張する電力託送システムを組合せた、排熱優先利用+電力託送システムを採用した場合、CGS の運転自由度が向上し、機器効率の向上が可能になることが確認できた。このように、要素機器の有効性を高めるためには、需要、建物、キャンパス等をクラスター化し、機器が最適に運転できる需要を構築するアプローチが必要である。



(a) CGS 発電効率



(b) CGS 熱利用効率

図 7-5 排熱優先利用+電力託送システムにおける 4,450 kW CGS の熱効率解析

7-3-3 一次エネルギー消費量の評価

表 7-1 に示す、現状、0 kW (VC)、CGS 更新、排熱優先利用、電力託送および排熱優先利用+電力託送システムについて、SFC および矢上キャンパスにおける 1 年間の合計一次エネルギー消費量 (Q_{prm}) をシミュレーションにより求め、省エネルギー性の比較および評価を行う。

ここで、 Q_{prm} は、式 (5-5) により求めることができる。式 (5-5) において、商用系統からの受電電力に関する一次エネルギー消費原単位は、6-4-2 項で述べた理由から 3 種類に設定し、それぞれ、表 7-2 に示す値を用いた。なお、夜間時間帯における一次エネルギー消費原単位は全て、9.31 MJ/kWh^[82]を用いた。また、3 種類の電源構成それぞれの場合における、計測値を基に計算した現状の Q_{prm} を、評価基準値として表 7-2 に示す。

表 7-2 現状の SFC および矢上キャンパスの合計一次エネルギー消費量

$hr_{grd,dt}$ [MJ/kWh]	$hr_{grd,nt}$ [MJ/kWh]	Q_{prm} [TJ/年]
10.1 ^[82]	9.31 ^[82]	331
9.00	9.31 ^[82]	314
8.00	9.31 ^[82]	297

表 7-2 において、昼間時間帯における一次エネルギー消費原単位 ($hr_{grd,dt}$) が 10.1 MJ/kWh の場合、SFC および矢上キャンパスの Q_{prm} は 331 TJ/年となる。一方、同じ条件の計算でも、 $hr_{grd,dt}$ を 8.00 MJ/kWh とした場合、 Q_{prm} は 297 TJ/年となり、 $hr_{grd,dt}$ が 10.1 MJ/kWh の場合と比べて 10 % 減となる。このように、 Q_{prm} は商用系統の電源構成に大きく影響を受けるため、エネルギー利用システムを評価する際には、電源構成を考慮する必要がある。

次に、SFC および矢上キャンパスの Q_{prm} に関する計算結果を、図 7-6、図 7-7 および図 7-8 に示す。図 7-6、図 7-7 および図 7-8 は、 $hr_{grd,dt}$ をそれぞれ、10.1 MJ/kWh、9.00 MJ/kWh および 8.00 MJ/kWh とした場合の Q_{prm} を表している。また、図 7-6 (a)、図 7-7 (a) および図 7-8 (a) は、各システムにおける CGS の定格発電容量 ($P_{CGS,rd}$) の比較を示し、図 7-6 (b)、図 7-7 (b) および図 7-8 (b) は、表 7-1 に示すシステム間の比較を示している。

1. $hr_{grd,dt} = 10.1 \text{ MJ/kWh}^{[82]}$ 、 $hr_{grd,nt} = 9.31 \text{ MJ/kWh}^{[82]}$

図 7-6 (a) において、3,800 kW、4,450 kW および 5,100 kW の大型 CGS を導入した場合、CGS 更新および排熱優先利用システムにおいては、 Q_{prm} が増大することが確認できる。一方で、電力託送および排熱優先利用+電力託送システムにおいては、これらの大型 CGS を導入した場合に、 Q_{prm} が大きく低減されていることが確認できる。特に、SFC の空調システムでの排熱優先利用システムと、矢上キャンパスへの電力託送システムを組合せた排熱優先利用+電力託送システムを採用した場合、 Q_{prm} の削減効果は大きくなる。

図 7-6 (b) に示すシステムの比較において、 $hr_{grd,dt}$ が 10.1 MJ/kWh の場合においては、電力託送による省エネルギー効果は大きく、現状システムの Q_{prm} と比較して、電力託送システムの Q_{prm} は 6 %、排熱優先利用+電力託送システムの Q_{prm} は 8 %、それぞれ、削減できる結果となった。

2. $hr_{\text{grd,dt}} = 9.00 \text{ MJ/kWh}$ 、 $hr_{\text{grd,nt}} = 9.31 \text{ MJ/kWh}$ ^[82]

図 7-7 (a)において、 $hr_{\text{grd,dt}}$ を 9.00 MJ/kWh に設定した場合は、電力託送システムのみ省エネルギー効果は小さいものの、排熱優先利用+電力託送システムの省エネルギー効果は大きいことが確認できる。一方、CGS の導入容量の比較では、 $hr_{\text{grd,dt}}$ を 10.1 MJ/kWh に設定した図 7-6 (a)とは異なり、小さい容量の CGS を導入した方が、 Q_{prm} の低減効果は大きくなる。また、図 7-6 (a)とは異なり、電力託送システムよりも、排熱優先利用システムの省エネルギー効果が大きくなっていることが確認できる。

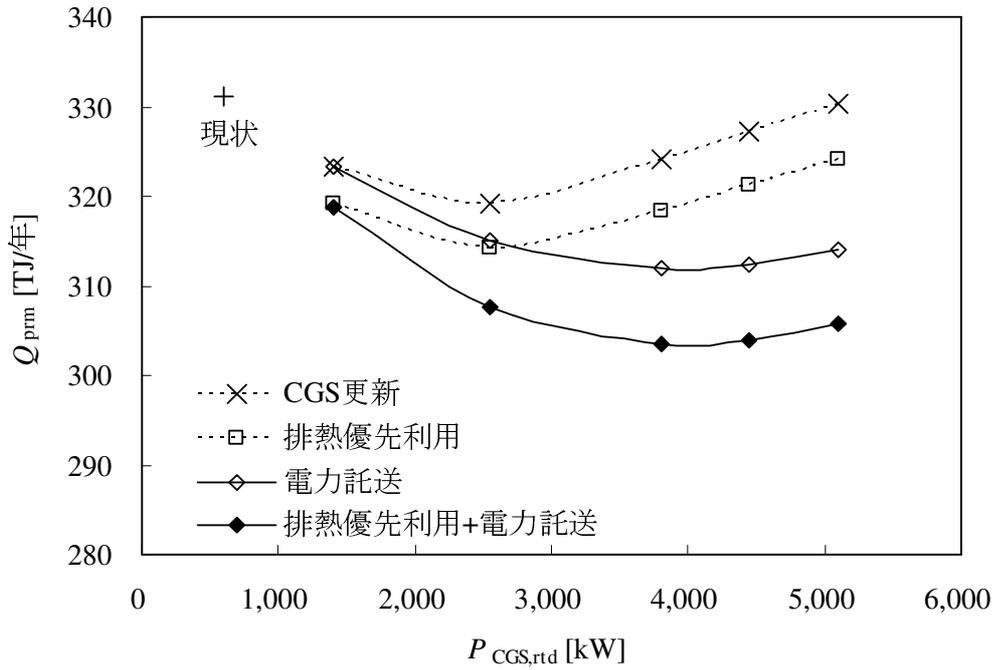
図 7-7 (b)のシステムの比較においては、排熱優先利用および排熱優先利用+電力託送システムを採用した場合において、 Q_{prm} の削減効果は同程度に大きく、現状システムの Q_{prm} に対して、それぞれ、4%および5%の削減効果が期待できる結果となった。

3. $hr_{\text{grd,dt}} = 8.00 \text{ MJ/kWh}$ 、 $hr_{\text{grd,nt}} = 9.31 \text{ MJ/kWh}$ ^[82]

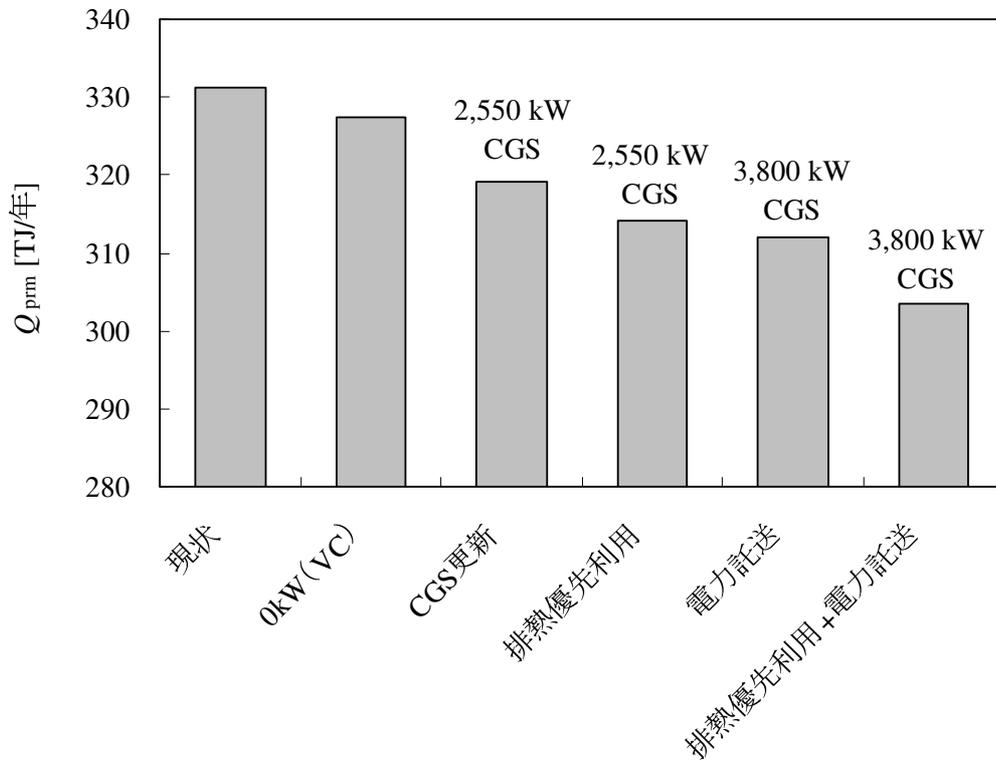
図 7-8 (a)において、 $hr_{\text{grd,dt}}$ を 8.00 MJ/kWh に設定した場合は、排熱優先利用および排熱優先利用+電力託送システムの省エネルギー効果が、同等に大きいことが確認できる。そして、これらのシステムにおいては、2,550 kW の CGS を導入した場合に、 Q_{prm} が最小となる。一方で、 $hr_{\text{grd,dt}}$ を 10.1 MJ/kWh および 9.00 MJ/kWh に設定した場合とは異なり、電力託送システムの Q_{prm} が、最大となることが分かった。これは、商用系統電力の一次エネルギー消費原単位が小さい場合は、単なる電力託送だけでは、CGS の省エネルギー性は高くないことを表している。なお、8.00 MJ/kWh を発電効率（送電端、HHV）に換算すると、0.45 となる。

図 7-8 (b)のシステムの比較においては、CGS を導入しない 0 kW (VC) システムの Q_{prm} が最小となり、現状システムの Q_{prm} に対して、約 3%の削減効果が期待できる結果となった。これより、SFC および矢上キャンパスにおいて、CGS 導入により省エネルギーが達成できる $hr_{\text{grd,dt}}$ の範囲は、8.00 MJ/kWh から 9.00 MJ/kWh の間に存在することが明らかになった。よって、CGS の導入を検討する際の情報として、商用系統電力の一次エネルギー消費量を考慮し、電源構成に応じて、CGS の導入最適化を検討する必要があると言える。

これらの結果より、昼間時間帯における商用系統電源の一次エネルギー消費原単位が大きい（発電効率が低い）場合、大型の高効率 CGS を導入して、電力を託送するシステムが、省エネルギーにとって有効であると言える。一方、商用系統電源の一次エネルギー消費原単位が小さい（発電効率が高い）場合、排熱優先利用と電力託送を合わせ、かつ、大型でない CGS を導入すれば、省エネルギー性が高くなることが分かった。また、商用系統電力の発電効率が向上するにつれて、いずれのシステムにおいても、一次エネルギー消費量が小さくなる結果となった。よって、SFC および矢上キャンパスにおける省エネルギー性向上のためには、マクロ的な視点からは、商用系統電力の発電効率の向上が必要となる。そのためには、CGS 等の分散電源の協調的な導入により、ピーク供給用電源である石油火力の負荷を低減し、商用系統における高効率発電の構成比率を高めることが不可欠であると言える。



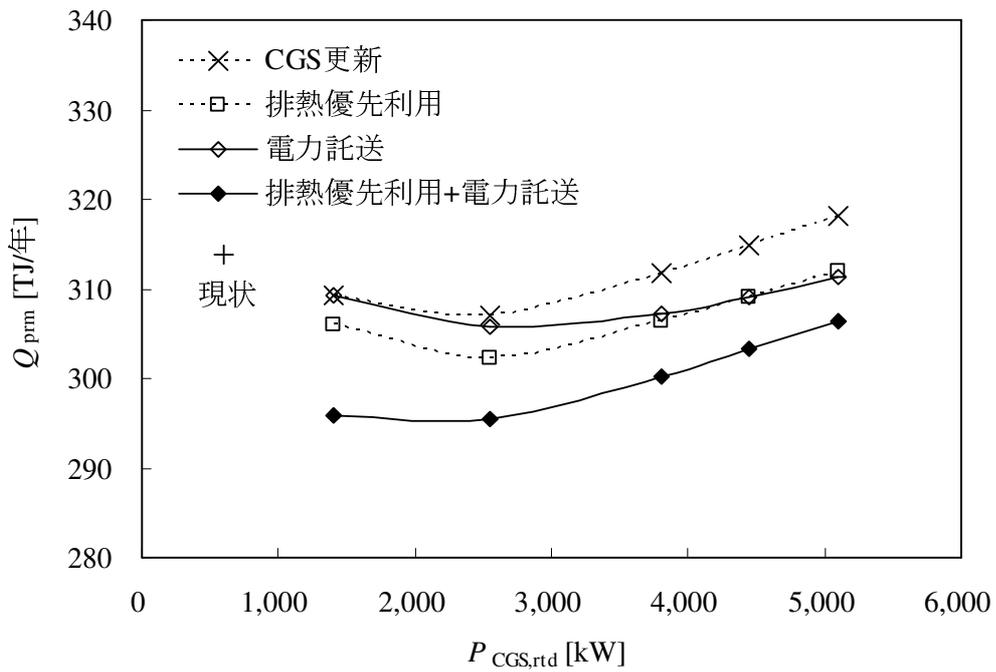
(a) CGS の比較



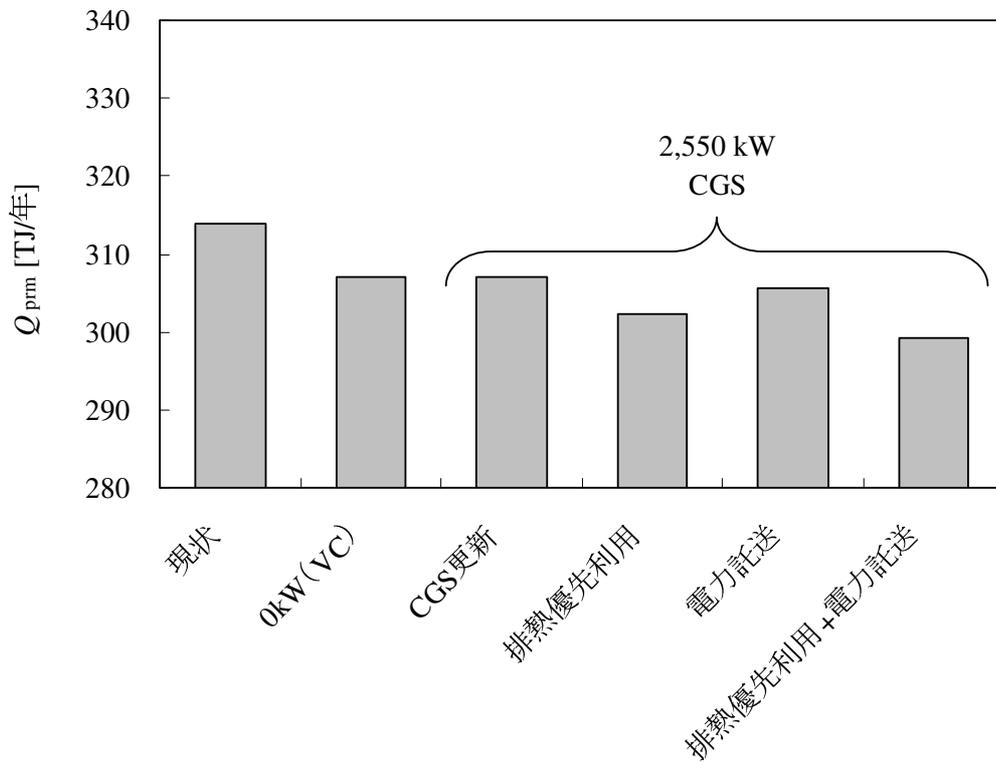
(b) システムの比較

図 7-6 SFC および矢上キャンパスの合計一次エネルギー消費量の推定結果

$$\left[h_{r,grd,dt} = 10.1 \text{ MJ/kWh}^{[82]}, h_{r,grd,nt} = 9.31 \text{ MJ/kWh}^{[82]} \right]$$



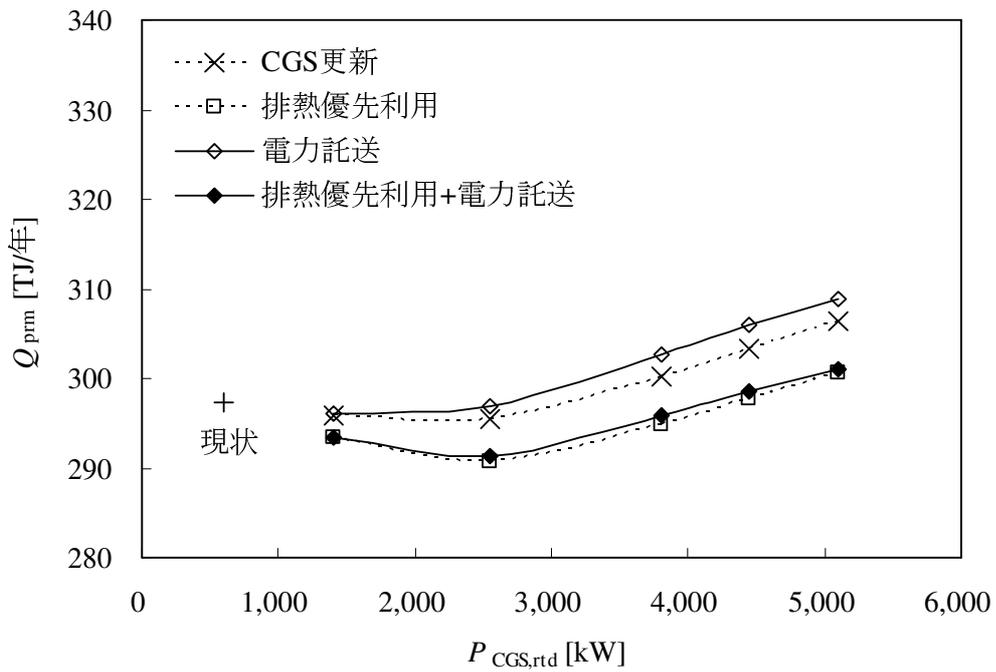
(a) CGS の比較



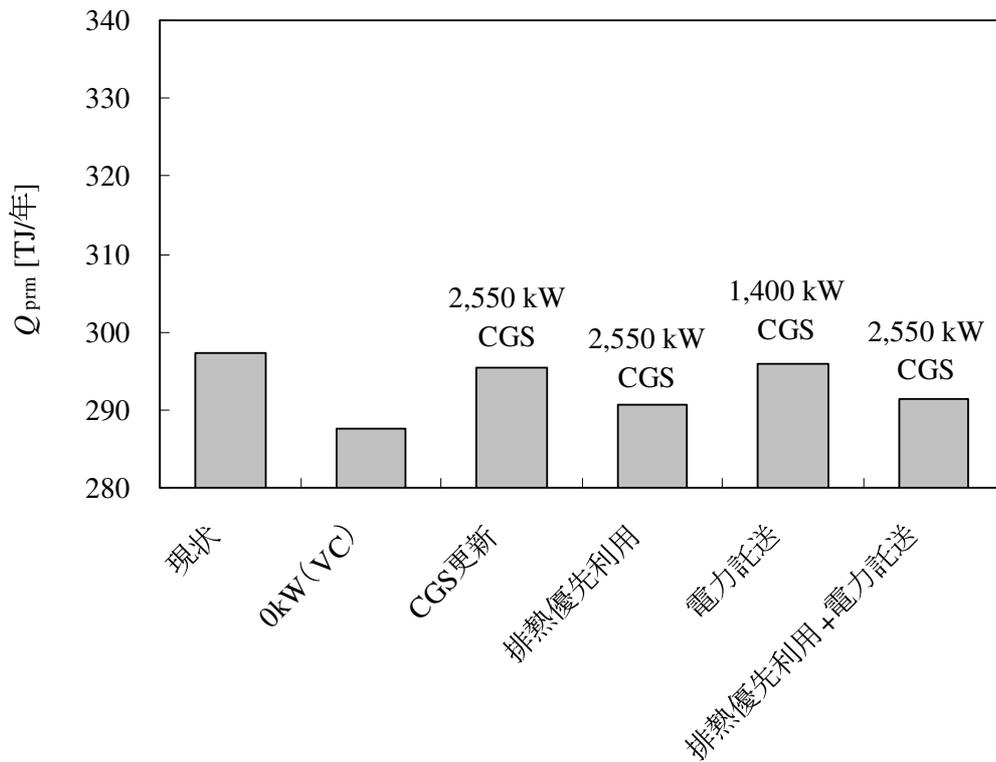
(b) システムの比較

図 7-7 SFC および矢上キャンパスの合計一次エネルギー消費量の推定結果

$[hr_{grd,dt} = 9.00 \text{ MJ/kWh}, hr_{grd,nt} = 9.31 \text{ MJ/kWh}]^{[82]}$



(a) CGS の比較



(b) システムの比較

図 7-8 SFC および矢上キャンパスの合計一次エネルギー消費量の推定結果

$$[hr_{grd,dt} = 8.00 \text{ MJ/kWh}, hr_{grd,nt} = 9.31 \text{ MJ/kWh}^{[82]}]$$

7-3-4 二酸化炭素排出量の評価

表 7-1 に示す、現状、0 kW (VC)、CGS 更新、排熱優先利用、電力託送および排熱優先利用+電力託送システムについて、SFC および矢上キャンパスにおける 1 年間の合計二酸化炭素排出量 (m_{CO_2}) をシミュレーションにより求め、環境性の比較および評価を行う。

ここで、 m_{CO_2} は、式 (5-6) により求めることができる。式 (5-6) において、商用系統からの受電電力 (W_{grd} [kWh]) を二酸化炭素排出量 (m_{CO_2} [kg-CO₂]) に換算する際、二酸化炭素排出原単位 (er_{grd} [kg-CO₂/kWh]) を用いる。よって、受電電力に関する二酸化炭素排出原単位は、商用系統の電源構成を適切に反映していなければならない。ここで、商用系統電力の二酸化炭素排出原単位として、昼間時間帯の数値 ($er_{grd,dt}$) および夜間時間帯の数値 ($er_{grd,nt}$) 共に、環境省が公表している東京電力平均値 0.368 kg-CO₂/kWh^[90] を用いる。また、この原単位を用いて、計測値を基に計算した現状の m_{CO_2} を、評価基準値として表 7-3 に示す。

表 7-3 現状の SFC および矢上キャンパスの合計二酸化炭素排出量

$er_{grd,dt}$ [kg-CO ₂ /kWh]	$er_{grd,nt}$ [kg-CO ₂ /kWh]	m_{CO_2} [t-CO ₂ /年]
0.368 ^[90]	0.368 ^[90]	13,465

表 7-3 に示す二酸化炭素排出原単位に関しては、昼間および夜間時間帯共に同一の平均値を扱っているが、実際は、表 5-2 に示す通り、石油火力と原子力の二酸化炭素排出原単位は大きく異なるため、図 5-6 の時刻別電源構成を適切に反映しているとは言い難い。よって、6-4-3 項で述べた通り、本研究では、CGS 導入により削減される商用系統の二酸化炭素排出量として、石油火力および LNG コンバインドを対象とした場合の評価も行う。

次に、 m_{CO_2} の計算結果を、図 7-9、図 7-10 および図 7-11 に示す。図 7-9 は、 $er_{grd,dt}$ および $er_{grd,nt}$ 共に、0.368 kg-CO₂/kWh^[90] を用いた場合の結果を示し、また、図 7-10 および図 7-11 は、CGS 導入により削減される商用系統電力の二酸化炭素排出量として、石油火力および LNG コンバインドを想定した場合の結果を表す。また、図 7-9 (a)、図 7-10 (a) および図 7-11 (a) は、各システムにおける CGS の定格発電容量 ($P_{CGS,rd}$) の比較を示し、図 7-9 (b)、図 7-10 (b) および図 7-11 (b) は、表 7-1 に示すシステム間の比較を示している。

1. $er_{grd,dt} = 0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[90]}$ 、 $er_{grd,nt} = 0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[90]}$

図 7-9 (a) において、システムの比較をすると、排熱優先利用システムの m_{CO_2} が最も小さく、そして、電力託送システムの m_{CO_2} が最も大きくなる。また、いずれのシステムにおいても、CGS の導入容量が大きくなるにつれて m_{CO_2} は増大し、全体的に、CGS 導入による m_{CO_2} の削減効果は発揮できていない状況となっている。

図 7-9 (b) に示すシステムの比較より、0 kW (VC) システムを採用した場合に m_{CO_2} が最小となり、現状システムに対して 4% の削減効果が期待できる結果となった。一方で、CGS 更新、排熱優先利用、電力託送および排熱優先利用+電力託送システムにおいて、1,400 kW または 2,550 kW の CGS を導入した場合は、 m_{CO_2} は現状システムとほぼ同量となる結果となった。

2. CGS 導入により石油火力 ($er_{\text{grd}} = 0.704 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[93]}$) 分が削減される場合

図 7-10 (a)においては、電力託送および排熱優先利用+電力託送システムを採用した場合、 m_{CO_2} が大きく低減可能であることが確認できる。また、これら電力託送を行うシステムにおいては、容量の大きい CGS を導入した場合、 m_{CO_2} の大きな削減効果が期待できる。一方で、電力託送を行わない CGS 更新および排熱優先利用システムにおいては、容量の大きい CGS を導入した場合に m_{CO_2} が増大する結果となった。

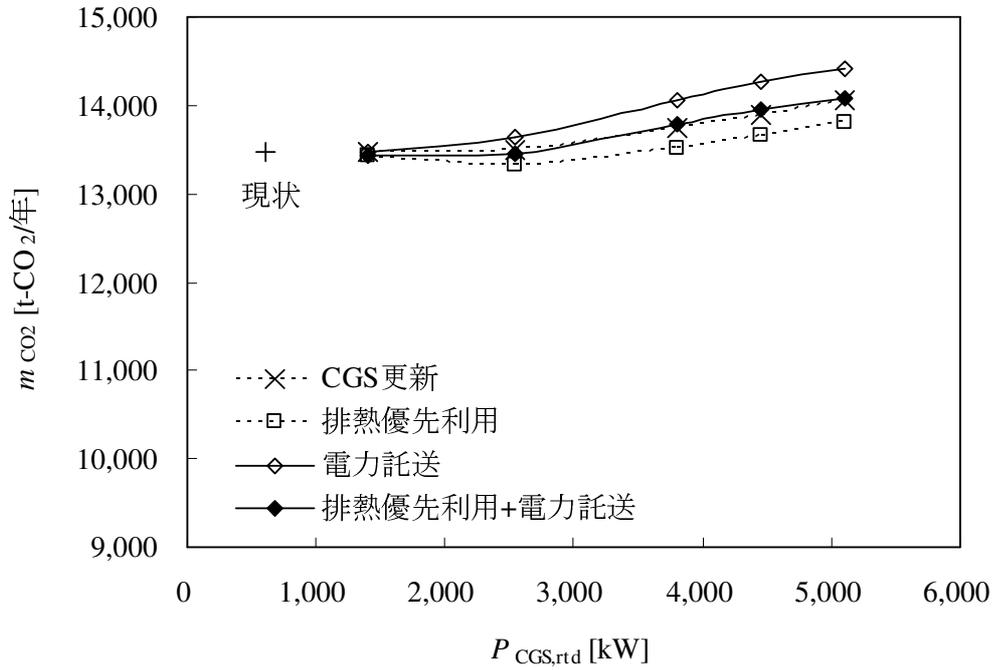
図 7-10 (b)のシステムの比較においては、CGS を導入する、CGS 更新、排熱優先利用、電力託送および排熱優先利用+電力託送システムのいずれも、現状システムに比べて m_{CO_2} が低減できる結果となった。その中でも、電力託送および排熱優先利用+電力託送システムを採用した場合の削減効果は大きく、それぞれ、28 %および 30 %の削減効果が期待できる結果となった。

3. CGS 導入により LNG コンバインド ($er_{\text{grd}} = 0.408 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[93]}$) 分が削減される場合

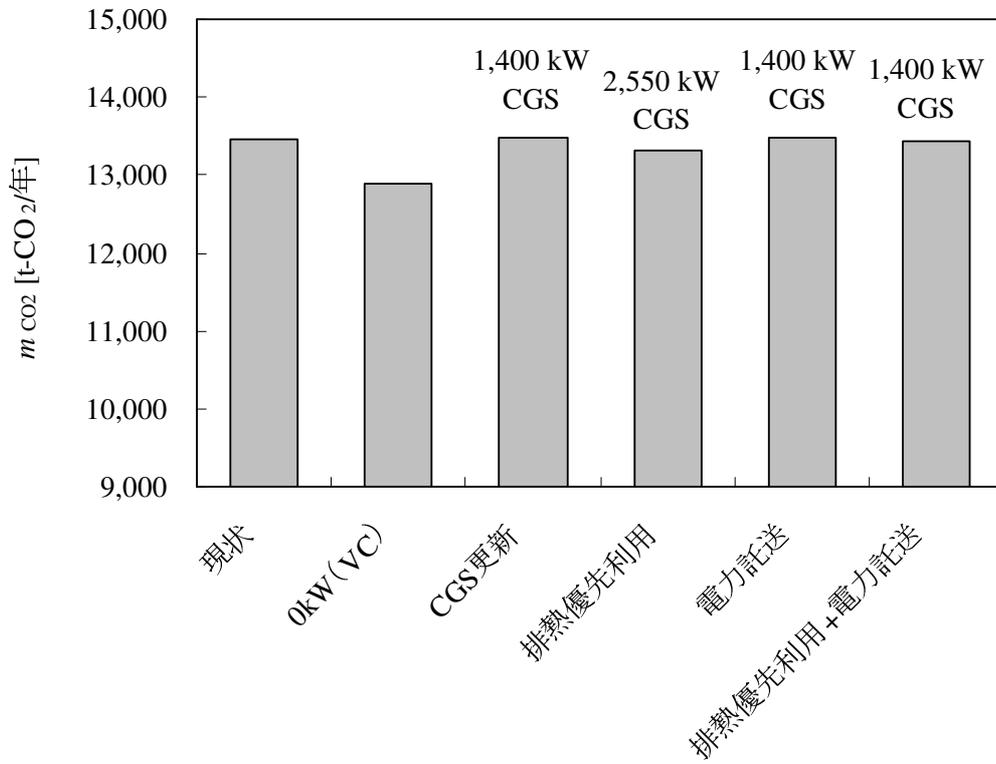
図 7-11 (a)においては、いずれのシステムを採用しても、 m_{CO_2} はほぼ等しくなることが確認できる。また、3,800 kW、4,450 kW および 5,100 kW の大型 CGS を導入した場合、 m_{CO_2} は増大傾向となることが分かる。

図 7-11 (b)のシステムの比較においては、0 kW (VC) システムの m_{CO_2} が最小となり、現状システムの m_{CO_2} に対して、4 %の削減効果が期待できる結果となった。これは、商用系統電源である LNG コンバインドの二酸化炭素排出原単位が小さく、その電力を消費して作動する VC を導入したシステムの環境性が向上するためである。また、CGS 更新、排熱優先利用、電力託送および排熱優先利用+電力託送システムにおいて、2,550 kW の CGS を導入した場合は、 m_{CO_2} は現状システムとほぼ同量となる結果となった。この傾向は、図 7-9 (b)に示す結果と同様である。また、図 7-10 と図 7-11 の比較より、いずれのシステムにおいても、CGS 導入により削減される二酸化炭素排出量が石油火力分とした場合において、 m_{CO_2} が大きく低減されていることが確認できる。これより、システムの環境性評価は、商用系統の電源構成に大きく影響を受けると言える。

これらの結果より、商用系統電力の二酸化炭素排出原単位として、全時間帯の平均値である $0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[90]}$ を用いて評価した場合、CGS の導入による二酸化炭素排出量の削減効果は期待できない結果となった。一方で、商用系統電力の電源構成別に CGS 導入を評価した場合、CGS 導入により石油火力の稼動が抑制される場合においては、電力託送を行うことにより、二酸化炭素排出量の大きな削減効果が期待できる結果となった。また、CGS 導入により LNG コンバインドの稼動が抑制される場合は、CGS 導入による二酸化炭素排出量の削減効果は期待できない結果となった。よって、一次エネルギー消費量に関する結果と同様に、マクロ的な視点から環境負荷の低減を検討するためには、分散電源の協調的な導入により商用系統電力の負荷平準化を推進し、ピーク供給用として稼動する石油火力の電力負荷を低減することが、効果的な方法の一つとして検討する必要があると考える。



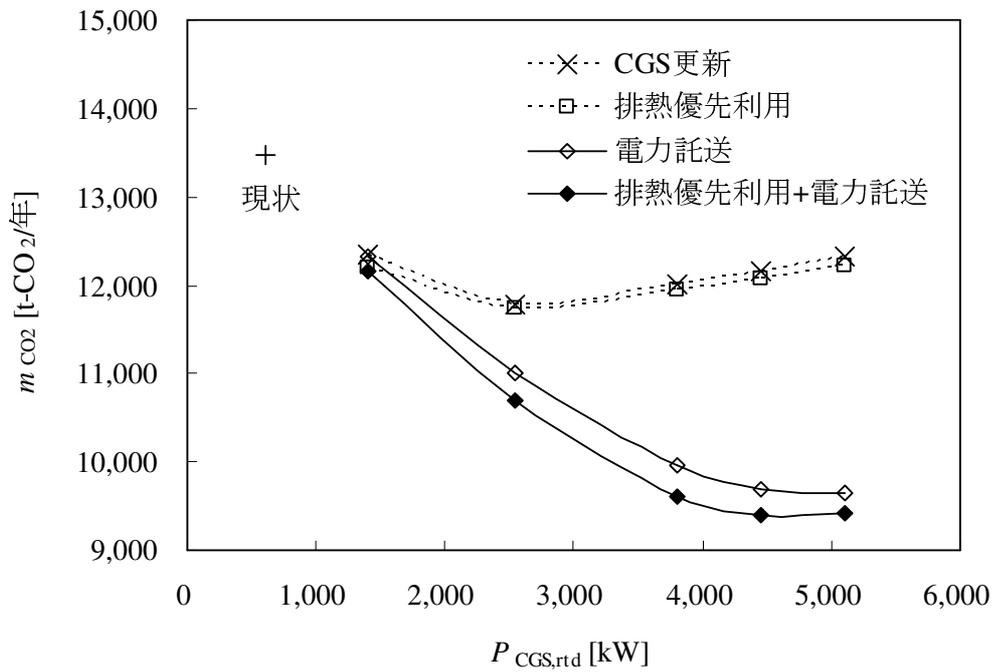
(a) CGS の比較



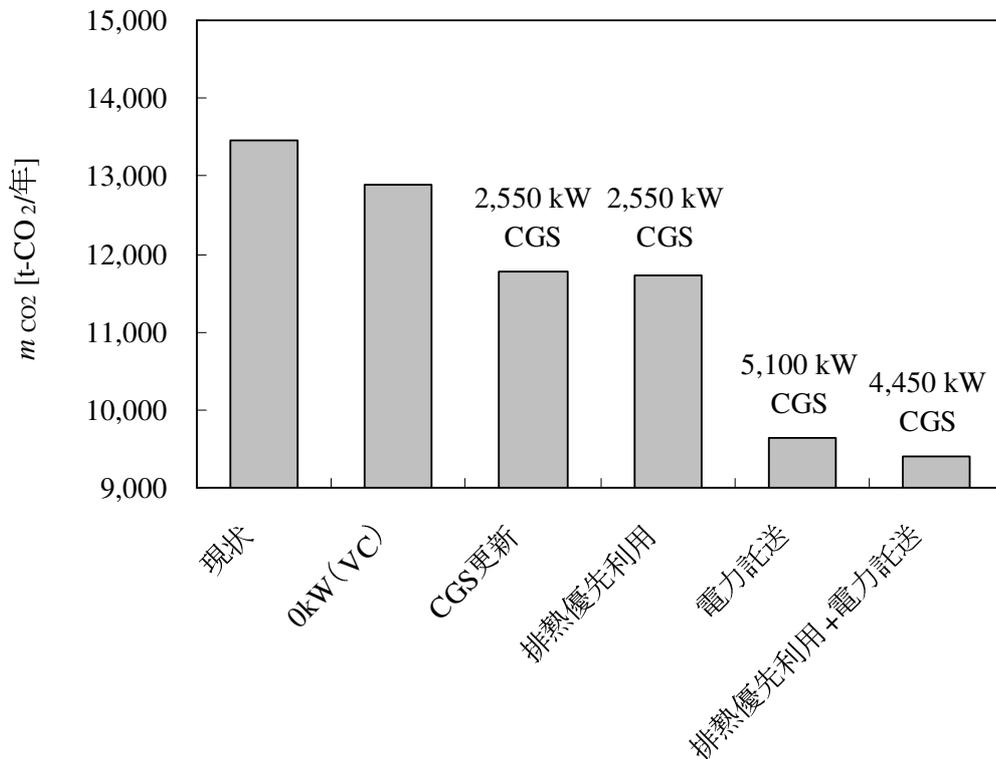
(b) システムの比較

図 7-9 SFC および矢上キャンパスの合計二酸化炭素排出量の推定結果

$$[er_{grd,dt} = 0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[90]}, er_{grd,nt} = 0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[90]}]$$

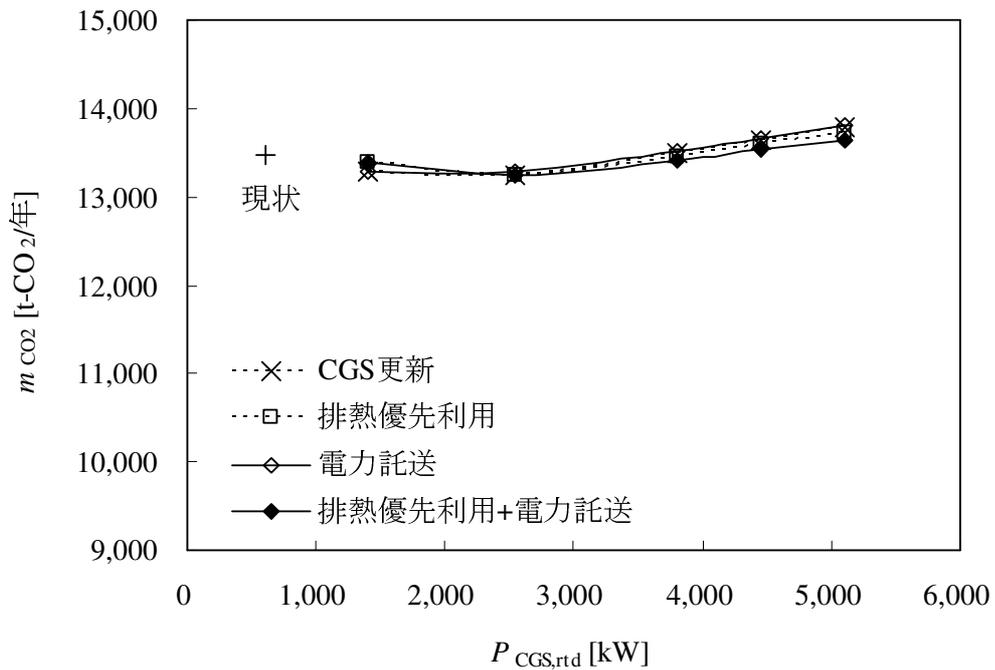


(a) CGS の比較

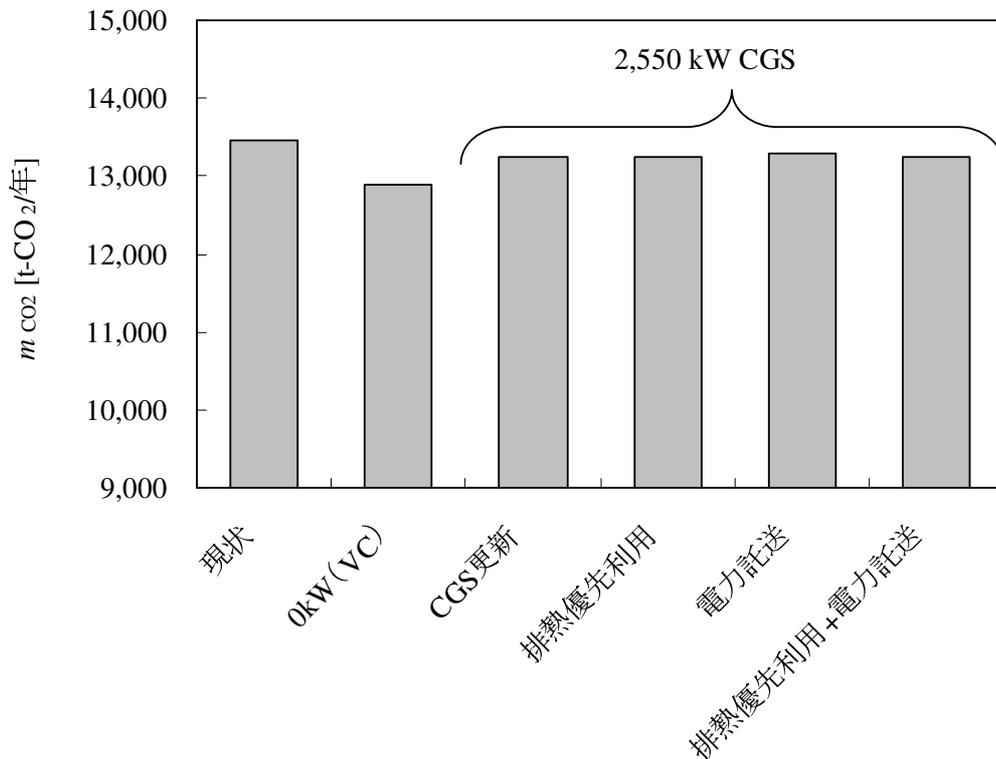


(b) システムの比較

図 7-10 SFC および矢上キャンパスの合計二酸化炭素排出量の推定結果
 【CGS 導入により石油火力 ($er_{grd} = 0.704 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[93]}$) 分が削減される場合】



(a) CGS の比較



(b) システムの比較

図 7-11 SFC および矢上キャンパスの合計二酸化炭素排出量の推定結果
 【CGS 導入により LNG コンバインド ($er_{\text{grd}} = 0.408 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[93]}$) 分が削減される場合】

7-3-5 日最大受電電力の評価

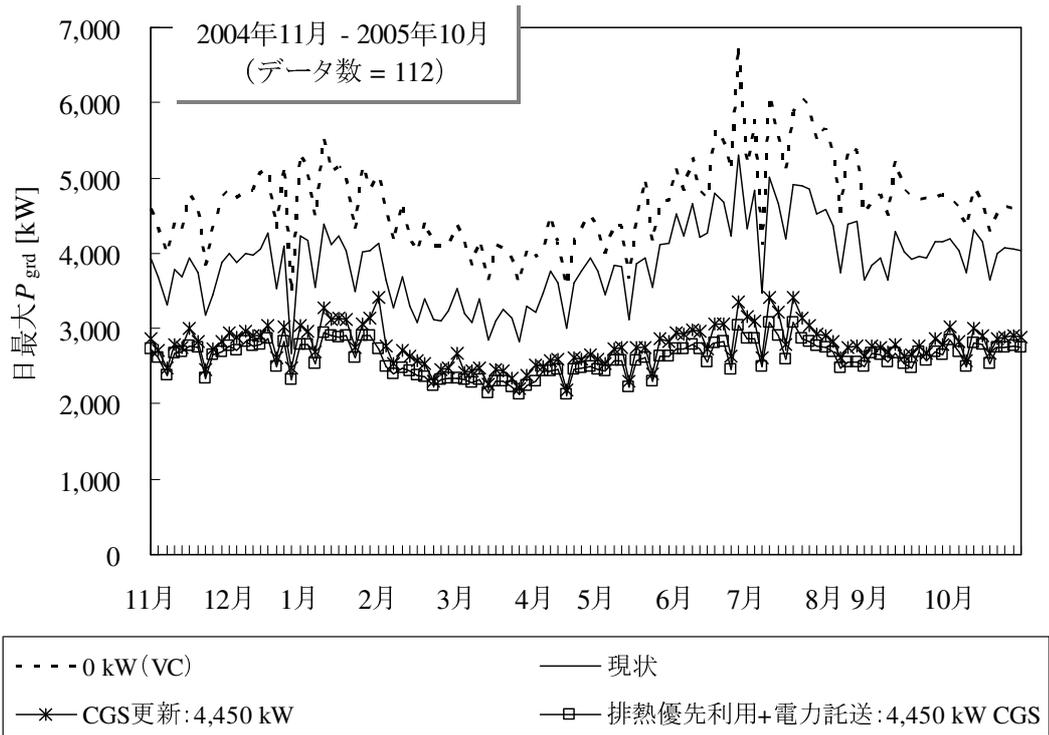
前項における考察から、SFC および矢上キャンパスの合計一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量を低減するためには、CGS を中心としたエネルギー利用システムの最適化と同時に、商用系統の電源構成に応じた、最適な CGS の導入を検討する必要があると言える。また、複数の分散電源の協調運転により、商用系統電力の負荷平準化を実現することは、ピーク供給用電源である石油火力への負荷を低減し、LNG コンバインド等の高効率発電の構成比率を高めることにつながる可以考虑することができる。このような背景により、本研究では、CGS 導入目的の一つとして、商用系統電源のピーク電力負荷の平準化を挙げ、1 日の受電電力の最大値である日最大受電電力 (P_{grd}) を用いて、CGS による商用系統電力の負荷平準化効果を定量的に評価している。

ここで、図 7-12 (a)および(b)に、CGS を導入しないで、SFC の冷暖房需要を全て電気式の VC で賄うシステム (0 kW (VC))、現状、CGS 更新および排熱優先利用+電力託送システムそれぞれについて、SFC および矢上キャンパスにおける、1 年間を通じた、合計日最大 P_{grd} の推定結果を示す。なお、図 7-12 (a)は、1 日 24 時間の最大 P_{grd} を、図 7-12 (b)は、CGS が運転される 8 - 22 時の最大 P_{grd} を示している。

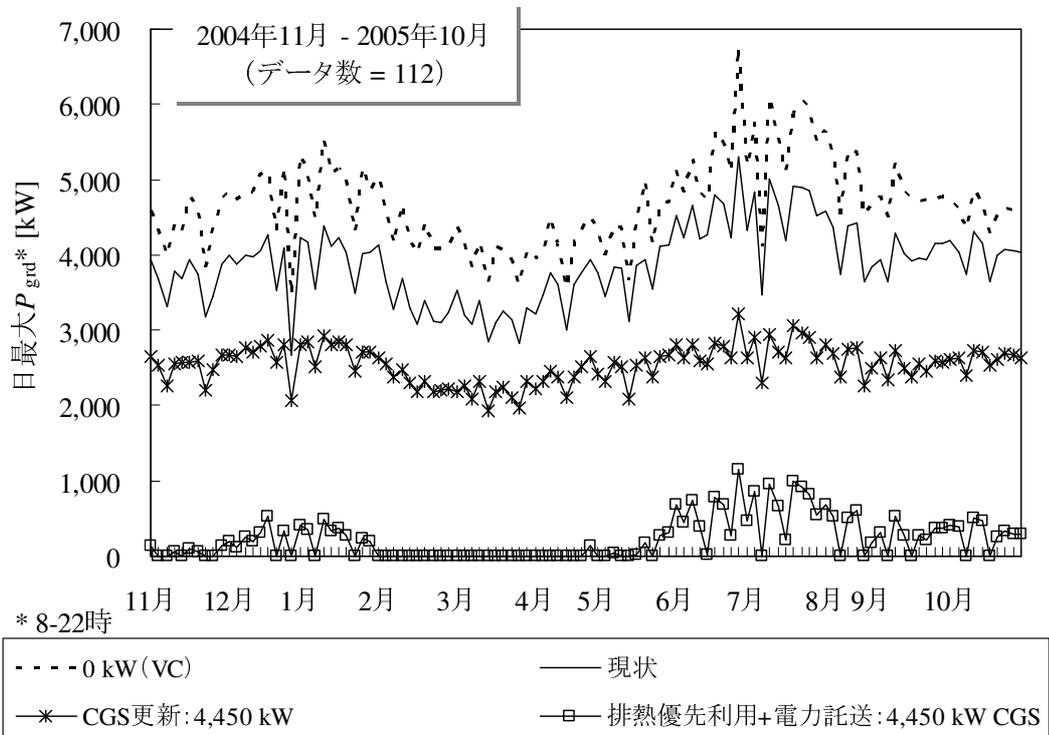
図 7-12 (a)において、現状システムの P_{grd} は実際の計測データを表しているが、日最大 P_{grd} は、6 月 28 日の 15 時に、最大値 5,297 kW を記録した。ここで、0 kW (VC) システムを採用した場合、同日における日最大 P_{grd} は、6,775 kW に達することが予測される。これに対し、4,450 kW の CGS を導入した場合、日最大 P_{grd} の年間最大値は、CGS 更新システムでは 3,419 kW、排熱優先利用+電力託送システムでは 3,074 kW と、0 kW (VC) に比べて、大きく低減することができる。なお、CGS を導入した場合の日最大 P_{grd} は、CGS が運転されない夜間時間帯 (22 - 8 時) に発生する。

図 7-12 (b)は、CGS が運転される昼間時間帯における日最大 P_{grd} を示しているが、現状および 0 kW (VC) に関しては、図 7-12 (a)と同じ結果となる。4,450 kW の CGS を導入し、電力託送を行わない CGS 更新システムにおいては、年間を通して商用系統へのピーク電力負荷は平準化されるが、日最大 P_{grd} は、6 月 28 日において 3,210 kW となる。これに対して、同じ 4,450 kW の CGS を導入し、電力を矢上キャンパスに託送する排熱優先利用+電力託送システムを採用した場合は、日最大 P_{grd} は、6 月 28 日に最大値 1,142 kW と、電力託送を行わない CGS 更新システムに比べて約 2,100 kW の削減効果がある。また、0 kW (VC) に比べて、排熱優先利用+電力託送システムに 4,450 kW の CGS (送電端出力:4,140 kW) を導入した場合、日最大 P_{grd} の削減効果は約 5,600 kW となることを確認した。この内、4,140 kW は CGS 発電 (送電端) による削減効果、1,460 kW は CGS 排熱利用による削減効果である。

環境負荷の大きい石油火力発電は、ピーク供給用として主に昼間時間帯に稼動するため、CGS 導入による日最大 P_{grd} の低減効果は、特に、昼間時間帯において重要となる。さらに、電力託送を行うことで、その低減効果が大きくなることが確認できた。このように、分散電源の協調的な導入により石油火力へのピーク電力負荷が低減されれば、LNG コンバインド等の高効率発電の構成比率が自動的に高くなることが予想できる。よって、マクロ的な視点から環境負荷を低減する方法の一つとして、分散電源の最適導入を十分に検討する必要があると考える。



(a) 日最大受電電力 (0 - 24 時)



(b) 日最大受電電力 (8 - 22 時)

図 7-12 1年間を通じた SFC および矢上キャンパスの合計日最大受電電力の推定結果

第8章 結論

我が国の民生部門における省エネルギー対策を検討するための基礎研究として、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス（SFC）を一例として取上げ、コージェネレーションシステム（CGS）を含むエネルギー利用システムの最適化による、省エネルギー効果について検討した。まず、SFCにおいて、2004年11月から2005年10月までの1年間の期間に、電力およびガス消費量等のエネルギー需要実態に関する調査を行い、発電・空調設備等を導入する際に必要な基礎情報である、時刻別電力および冷暖房需要を建物用途別に推定した。また、CGSおよび空調用熱源機器の稼働状況の調査結果より、省エネルギー性および環境性の視点から、現状設備を有効利用するための改善点について検討した。これらの実態に基づいた分析結果を基に、CGSを含むエネルギー利用システムの導入最適化に関する検討を行い、省エネルギーを実現するための効果的なCGSの導入方法について、現実的な解を検討した。以下に、本研究の結論を述べる。

- (1) SFCにおける電力および空調用ガス消費量と気温との相関を分析し、両者共に気温と強い相関を示すことを確認した。そして、この気温依存性を用いて、夏期のピーク電力需要の主要因となる、空調用電力消費量を定量的に導き出した。次に、電力および空調用ガス消費量の気温依存性に加えて、設備稼働状況、空調用熱源機器の効率特性等を考慮することで、電力およびガス消費量から、最終利用形態における電力および冷暖房需要を、時刻および建物用途別に推定する方法を提案した。要素機器の効率特性は、エネルギー需要に大きく影響を受けるため、エネルギー利用システムの最適化を行う上で、エネルギー需要は必要不可欠な基礎情報となる。本研究においては、照明、コンセント、一般動力等の電力需要と、空調用電力消費量を分離することで、自然エネルギー、CGS 排熱等、エクセルギーの小さい熱源の利用可能範囲を適切に把握するための需要モデルを構築することができた。
- (2) 上記(1)で求めた、最終利用形態におけるエネルギー需要を基に、まず、CGS 排熱の有効利用範囲を明らかにした。次に、現実的なCGS 排熱利用の効果を検討するために、SFCの空調システム間でCGS 排熱を最大限に利用する、排熱優先利用システムの評価を行った。その結果、排熱優先利用システムに最適容量のCGSを導入した場合、一次エネルギー消費量は、現状システムに比べて14%（18 TJ/年）削減可能であることを計算シミュレーションにより確認した。二酸化炭素排出量に関しては、東京電力管内における全時間帯の平均値である $0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[90]}$ を用いて評価した場合、CGSを導入しないシステムの数値が最小となった。一方で、CGS導入により商用系統電力の石油火力分が削減されると仮定した場合においては、現状に対して36%（1,900 t-CO₂/年）の二酸化炭素排出量が削減可能であることを確認した。この結果より、エクセルギーの小さい冷暖房需要に対して、エクセルギーの小さいCGS 排熱を最大限に有効利用することで、化石燃料資源の消費量が低減可能であると言える。また、石油火力発電の代替として協調的にCGSを導入することで、特に、二酸化炭素排出量を大きく削減できることが期待される。

- (3) SFC に設置した大型 CGS の余剰電力を、電力需要の大きい慶應義塾大学矢上キャンパスへ託送する、電力託送システムの評価を行った。一般的に、CGS の発電効率は、大型化するにつれて、また、電力負荷率が高くなるにつれて向上するが、電力託送システムを採用することにより、CGS の電力負荷率が高くなり、CGS 発電効率が向上することを確認した。また、排熱優先利用システムと組み合わせることにより、CGS 熱利用効率も改善されることを確認した。その結果、排熱優先利用と電力託送を組合せたシステムに最適容量の CGS を導入することにより、SFC および矢上キャンパスの合計一次エネルギー消費量は、現状システムに比べて 8 % (27 TJ/年) 削減可能であることを確認した。二酸化炭素排出量に関しては、東京電力管内における全時間帯の平均値である $0.368 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}^{[9]}$ を用いて評価した場合、CGS を導入しないシステムの数値が最小となった。一方で、CGS 導入により商用系統電力の石油火力分が削減されると仮定した場合においては、現状に対して 30 % (約 4,100 t-CO₂/年) の二酸化炭素排出量が削減可能であることを確認した。これらの結果より、CGS の効果的な導入により環境負荷を低減するためには、排熱利用の拡張と電力供給先の拡張により、CGS が高効率に運転できるシステム環境を構築することが必要である。同時に、商用系統の電源構成に応じた、最適な分散電源の導入を検討する必要があると言える。
- (4) CGS 導入による商用系統電力の負荷平準化効果を、商用系統からの受電電力により評価した。調査期間における電力需要のピークは、日平均気温が約 30 °C を記録した 6 月 28 日に発生し、SFC および矢上キャンパスの合計ピーク受電電力は、約 5,300 kW であった。これに対し、排熱優先利用および電力託送システムを採用し、4,450 kW の CGS を導入した場合、同時間帯における SFC および矢上キャンパスの合計ピーク受電電力は約 1,100 kW となることを計算シミュレーションにより確認した。一方、CGS を導入しないで SFC の冷暖房需要を全て電気式空調機器で賄った場合は、同ピーク受電電力は約 6,800 kW となることを確認した。両者の差は約 5,600 kW となるが、その内、4,140 kW は CGS 発電電力 (送電端)、1,460 kW は CGS 排熱利用による削減分である。これより、CGS 排熱をピーク電力需要の主要因となる空調用に有効利用し、また、電力託送を行うことで、CGS 導入による商用系統電力の負荷平準化効果が大きくなると言える。

中央熱源方式空調システムの熱源として CGS 排熱を最大限に利用する、排熱優先利用システムを実現するためには、配管網、建物配置等の最適化が必要である。本研究では、熱エネルギー有効利用の観点から、排熱優先利用システムについて検討し、CGS の潜在的な省エネルギー効果を明らかにしたが、実社会に反映するためには、今後、排熱優先利用システムを可能とする建築設計および経済性評価が重要となる。

また、マクロ的な観点から、分散電源の導入は、商用系統における電源構成の最適化を支援することが期待される。そのためには、1 台あたりの発電容量が小さい分散電源をネットワーク化することで、複数の分散電源による協調運転が必要である。今後は、情報通信ネットワークの適用も視野に入れ、複数の分散電源による自律分散・協調運転に研究を発展させることで、複数の需要家間における最適なエネルギー利用システムを構築できると考えている。

謝辞

本研究の遂行および本論文の作成にあたり、3年半にわたり懇切なご指導をして頂き、また、研究者としての哲学を厳しくご教授頂いた、慶應義塾大学理工学部 佐藤春樹教授に、心からの謝意を表します。

本論文の査読および助言をして頂いた、慶應義塾大学理工学部 植田利久教授、大森浩充教授、伊香賀俊治教授に厚く感謝の意を表します。

本研究は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「知能化から生命化へのシステムデザイン」の支援によるものであることを記し、謝意を表します。

本研究を遂行する上で、現地調査および実測データの収集にご協力頂いた、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス総務課の小友博課長、(株)湘南コミュニティーの土屋広之課長をはじめ関係各位に感謝致します。

佐藤研究室の博士課程に在籍中、実社会における最先端のタービン技術について教えて頂いた、福田雅文博士に感謝致します。研究者の先輩として、親身になって色々と指導して頂いた、宮本泰行博士に感謝致します。また、博士課程の同志として、公私共にお世話になった、韓相牧氏、狩野祐也氏に感謝致します。

日々の研究生活において、様々な面でご協力頂いた、秘書 小野利恵氏に感謝致します。また、公私共にお世話になった、修士課程 田起振氏に感謝致します。

本研究室の同じ研究グループとして、色々と協力して頂いた、伊藤忠和氏、川瀬峻介氏、今泉圭佑氏、橋本英樹氏、Lai, Florence 氏、弓削田健司氏、清水麻未氏に感謝致します。研究を遂行する上で、ヒートポンプのサイクル計算にご協力頂いた、古賀ひろ子氏、尾上浩通氏に感謝致します。また、研究室の同期として3年間お世話になった、木本恵美氏、廣瀬智子氏、2年半の時間を共に過ごした、須合康裕氏、花岡宏明氏、向林充氏、山本智史氏に感謝すると共に、研究室で出会った全ての人々に感謝致します。

最後に、多方面からの支援をして頂いた、父 三瀬陽夫、母 三瀬由美子に感謝致します。

文献

- [1] 資源エネルギー庁総合政策課、2002（平成 14）年度におけるエネルギー需給実績（確報）について、<http://www.eccj.or.jp/result/01/index.html>.
- [2] 経済産業研究所、総合エネルギー統計、<http://www.eccj.or.jp/databook/2004/j-ene2.html>.
- [3] 尾島俊雄研究室、建築の光熱水原単位、早稲田大学出版部、(1995.6).
- [4] 相良和伸、中原信生、名古屋地区の事務所建物のエネルギー消費量に関する調査研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.34 (1987.6)、pp.23-34.
- [5] 片山忠久、石井昭夫、浦野良美、九州地域における事務所ビルのエネルギー消費量に関する調査と解析、空気調和・衛生工学会論文集、No.39 (1989.2)、pp.87-99.
- [6] 大橋一正、中島康孝、既存事務所建物における外界条件とエネルギー消費量に関する調査と解析、空気調和・衛生工学会論文集、No.45 (1991.2)、pp.1-11.
- [7] M. J. Scott, L. E. Wrench, and D. L. Hadley, Effects of Climate Change on Commercial Building Energy Demand, *Energy Sources*, Vol.16, No.3 (1994.7), pp.317-332.
- [8] 赤林伸一、足立直之、事務所ビルにおけるエネルギー消費量実態調査 新潟市におけるエネルギー需要構造に関する研究（その 2）、日本建築学会計画系論文集、No.481 (1996.3)、pp.93-102.
- [9] D. B. Belzer, M. J. Scott, and R. D. Sands, Climate Change Impacts on U.S. Commercial Building Energy Consumption: An Analysis Using Sample Survey Data, *Energy Sources*, Vol.18, No.2 (1996.3), pp.177-201.
- [10] 陳超、渡辺俊行、龍有二、赤司泰義、福岡市と北九州市における各種建物のエネルギー消費特性に関する調査研究、日本建築学会計画系論文集、No.485 (1996.7)、pp.41-49.
- [11] 陳超、渡辺俊行、龍有二、赤司泰義、各種業務施設の空調用エネルギー消費量に関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.501 (1997.11)、pp.61-68.
- [12] 辻毅一郎、竹田功、用途別民生用エネルギー需要の月変動特性、*エネルギー・資源*、Vol.18、No.5 (1997)、pp.478-484.
- [13] 三浦秀一、須藤諭、渡辺浩文、吉野博、東北地方における庁舎建築のエネルギー消費特性に関する調査研究、日本建築学会計画系論文集、No.509 (1998.7)、pp.85-90.
- [14] O. M. Al-Rabghi, M. H. Al-Beiruty, and K. A. Fathalah, Estimation and Measurement of Electric Energy Consumption due to Air Conditioning Cooling Load, *Energy Conversion and Management*, Vol.40, No.14 (1999.9), pp.1527-1542.
- [15] 伊香賀俊治、外岡豊、事務所ビルの設備のライフサイクル環境負荷原単位、日本建築学会計画系論文集、No.529 (2000.3)、pp.117-123.
- [16] 三由賢、村上公哉、尾島俊雄、地方自治体諸施設の運用段階における省エネ・省資源管理の実態調査研究、日本建築学会計画系論文集、No.536 (2000.10)、pp.109-115.
- [17] F. W. H. Yik and P. S. K. Sat, A Climatic Variable for Constructing Thermal Performance Lines for Air-Conditioned Commercial Buildings in Hong Kong, *Building Serv. Eng. Res. Technol.*, Vol.22, No.4 (2001), pp.219-236.
- [18] E. Valor, V. Meneu, and V. Caselles, Daily Air Temperature and Electricity Load in Spain, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.40 (2001.8), pp.1413-1421.
- [19] J. C. Hwang, Assessment of Air Condition Load Management by Load Survey in Taipower, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.16, No.4 (2001.11)、pp.910-915.

-
- [20] 高草木明、中小規模賃貸事務所建物の電気使用量の実態とその変動要因に関する調査研究、日本建築学会計画系論文集、No.554 (2002.4)、pp.101-108.
- [21] 岩渕善美、村上裕子、東野達、笠原三紀夫、ビジネスホテルにおけるエネルギー・環境負荷低減（第1報）冬期における客室内の電力消費の現状分析、空気調和・衛生工学会論文集、No.92 (2004.1)、pp.57-64.
- [22] 岩渕善美、村上裕子、東野達、笠原三紀夫、ビジネスホテルにおけるエネルギー・環境負荷低減（第2報）春期・夏期における客室内の消費電力の現状分析、空気調和・衛生工学会論文集、No.97 (2005.4)、pp.23-30.
- [23] 早川智、小峯裕己、事務所ビルに関する解析結果（その1）業務用建築物におけるエネルギー消費原単位に関する研究、日本建築学会環境系論文集、No.578 (2004.4)、pp.85-90.
- [24] 山口容平、下田吉之、水野稔、居住者の行動を基準としたオフィスビルの熱・電力需要シミュレーションモデルの開発、空気調和・衛生工学会論文集、No.93 (2004.4)、pp.37-47.
- [25] 韓珺巧、尾島俊雄、床用途に基づく総合スーパーマーケットのエネルギー需要量の予測手法に関する研究、日本建築学会環境系論文集、No.580 (2004.6)、pp.77-84.
- [26] J. Moral-Carcedo and J. Vicens-Otero, Modelling the Non-Linear Response of Spanish Electricity Demand to Temperature Variations, Energy Economics, Vol.27 (2005), pp.477-494.
- [27] 鳴海大典、下田吉之、水野稔、気温変化が地域の電力消費に及ぼす影響、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、6-3 (2005.1)、pp.109-112.
- [28] 横山計三、横尾昇剛、岡建雄、2000年産業連関表によるエネルギー消費量・二酸化炭素排出量原単位の算出と建物評価、日本建築学会環境系論文集、No.589 (2005.3)、pp.75-82.
- [29] 小松正佳、高草木明、中規模賃貸事務所ビルにおける熱使用量の実態調査研究、日本建築学会環境系論文集、No.593 (2005.7)、pp.57-64.
- [30] 二浦尾友佳子、坂口勝俊、鳴海大典、下田吉之、水野稔、気温変化が業務建物におけるエネルギー消費に及ぼす影響、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、I-49 (2005.8)、pp.2165-2168.
- [31] 平野勇二郎、亀卦川幸浩、玄地裕、近藤裕昭、事務所および住宅における空調・給湯用エネルギー消費量の気温感応度算定に関する各種手法の相互比較、エネルギー・資源、Vol.27、No.3 (2006)、pp.218-224.
- [32] IEA, Energy Balances of OECD Countries 2001-2002.
- [33] 資源エネルギー庁、エネルギー2002、エネルギーフォーラム (2001.12)、pp.232, 261、http://atomica.nucpal.gr.jp/atomica/fig_01090502_08.html.
- [34] 資源エネルギー庁公益事業部、電源開発の概要 (1996)、pp.109, 398, 399、<http://atomica.nucpal.gr.jp/atomica/pict/01/01040102/02.gif>、http://atomica.nucpal.gr.jp/atomica/fig_01040102_01.html.
- [35] 日本コージェネレーションセンター、コージェネレーションシステム導入実績 (2006)、<http://www.cgc-japan.com/japanese/info/info01.html>.
- [36] 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット、EDMC/エネルギー・経済統計要覧 (2006)、<http://atomica.nucpal.gr.jp/atomica/pict/01/01040117/14.gif>.
- [37] 資源エネルギー庁、エネルギー2004、エネルギーフォーラム (2004.1)、p.265、http://atomica.nucpal.gr.jp/atomica/fig_01040117_10.html.
- [38] 日本エネルギー経済研究所、エネルギー・経済統計要覧、<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2006EnergyHTML/html/i2120000.html>.
- [39] 海野洋、石福昭、電力逆潮を前提としたコージェネ地域冷暖房のシステム評価、日本建築学

会計系論文集、No.456 (1994.2)、pp.53-62.

- [40] 市川徹、佐土原聡、電力託送によるコージェネレーションの高度利用に関する研究 (その 1) 東京 23 区における地域間託送の可能性の考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、Vol.1997 (1997.9)、pp.647-648.
- [41] 大西裕之、村上公哉、尾島俊雄、発電電力の自治体諸施設への託送を考慮した地域冷暖房施設へのコージェネレーションシステム導入の有効性に関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.532 (2000.6)、pp.57-64.
- [42] 加藤丈佳、岡本達希、横水康伸、鈴置保雄、エネルギーシステムにおける PV および CGS の CO₂ 削減効果、電気学会論文誌 B、Vol.121、No.3 (2001)、pp.342-349.
- [43] 見目喜重、阿部太志、滝川浩史、河本映、榊原建樹、民生施設への太陽光・熱コージェネレーションシステム導入によるコストおよび一次エネルギー消費量の削減、電気学会論文誌 B、Vol.121、No.6 (2001)、pp.699-707.
- [44] 見目喜重、藤原義和、滝川浩史、榊原建樹、電力託送を想定した廃棄物発電システムの運用とその経済性、電気学会論文誌 B、Vol.122、No.9 (2002)、pp.976-984.
- [45] 杉原英治、河本純、辻毅一郎、地域特定型総合エネルギーサービスにおける都市エネルギーシステムの多目的最適化モデルの開発、電気学会論文誌 B、Vol.123、No.2 (2003)、pp.151-161.
- [46] 辻毅一郎、伊東弘一、都市エネルギーシステムの最適化、エネルギー・資源、Vol.24、No.3 (2003)、pp.172-177.
- [47] 村岡由華里、大山力、需要成長の不確実性の下での分散電源を含む電源計画、電気学会論文誌 B、Vol.123、No.2 (2003)、pp.162-168.
- [48] 岡村智仁、松橋隆治、吉田好邦、長谷川秀夫、石谷久、排熱と太陽熱の有効利用による都市ガス利用システムにおける CO₂ 削減効果、電気学会論文誌 B、Vol.123、No.8 (2003)、pp.918-926.
- [49] Y. Hida and H. Sato, Basic Study on System-Design and Operation of Energy Utilization Facilities in Buildings for Reducing CO₂ Emission, Proceedings of International Conference on Building Systems and Facilities Management, Vol.2003 (2003.10), pp.342-349.
- [50] 木方真理子、遠藤康之、伊東明人、エネルギーフローに基づく電力・熱供給システムの CO₂ 排出量評価、電気学会論文誌 B、Vol.124、No.1 (2004)、pp.53-61.
- [51] 小田拓也、秋澤淳、柏木孝夫、系統電源構成を考慮した民生部門におけるエネルギー供給技術の導入可能性評価、電気学会論文誌 B、Vol.125、No.7 (2005)、pp.671-679.
- [52] 山口容平、下田吉之、水野稔、コージェネレーションにおける建物間連系の評価、空気調和・衛生工学会論文集、No.97 (2005.4)、pp.39-50.
- [53] A. Athar, S. Somasundaram, and W. D. Turner, System Optimization of the Cogeneration Facility at Texas A & M University: Present Operation and Load, Journal of Energy Resources Technology, Vol.115, No.1 (1993.3), pp.17-22.
- [54] M. R. von Spakovsky, V. Curti, and M. Batato, The Performance Optimization of a Gas Turbine Cogeneration / Heat Pump Facility with Thermal Storage, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.117, No.1 (1995.1), pp.2-9.
- [55] G. Bidini, U. Desideri, S. Saetta, and P. P. Bocchini, Internal Combustion Engine Combined Heat and Power Plants: Case Study of the University of Perugia Power Plant, Applied Thermal Engineering, Vol.18, No.6 (1998.6), pp.401-412.
- [56] 伊永隆史、宮垣浩、大学におけるエネルギー消費動向の特性、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、Vol.16th (2000.1)、pp.11-14.
- [57] M. Dettenkofer, K. Kuemmerer, A. Schuster, W. Mueller, M. Muehlich, M. Scherrer, and F. D. Daschner, Environmental Auditing in Hospitals: First Results in a University Hospital,

- Environmental Management, Vol.25, No.1 (2000.1), pp.105-113.
- [58] J. D. Stefano, Energy Efficiency and the Environment: the Potential for Energy Efficient Lighting to Save Energy and Reduce Carbon Dioxide Emissions at Melbourne University, Australia, Energy, Vol.25, No.9 (2000.9), pp.823-839.
- [59] G. Bidini and F. D. Maria, Combined Heat and Power Plant Effects on CO₂ Emission: Case Study of the University of Perugia, International Journal of Energy Research, Vol.25, No.1 (2001.1), pp.29-40.
- [60] H. Nagayoshi, K. Kurokawa, Y. Ohashi, K. Nishida, and T. Deguchi, Peak-Power Reduction with 100 kW PV and Battery Combined System at Shonan Institute of Technology, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.67, No.1 (2001.3), pp.601-609.
- [61] 伊香賀俊治、近本智行、中村准二、明治大学リバティタワーの空気調和・衛生設備、空気調和・冷凍連合講演会講演論文集、Vol.36th (2002.4)、pp.133-136.
- [62] 蜂巢浩生、早川眞、安部香菜子、日本大学理工学部駿河台校舎のエネルギー利用の実態とCO₂排出量(第1報)施設の概要と建物別電力使用量、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、B-24 (2002.9)、pp.557-560.
- [63] 早川眞、蜂巢浩生、安部香菜子、日本大学理工学部駿河台校舎のエネルギー利用の実態とCO₂排出量(第2報)エネルギー使用の内訳とCO₂排出量の推定、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、B-25 (2002.9)、pp.561-564.
- [64] J. Luz-Silveira, A. Beyene, E. M. Leal, J. A. Santana, and D. Okada, Thermo-economic Analysis of a Cogeneration System of a University Campus, Applied Thermal Engineering, Vol.22, No.13 (2002.9), pp.1471-1483.
- [65] 李演生、赤司泰義、渡辺俊行、福田健一、江島伊佐朗、省エネルギー手法による空調用エネルギー消費原単位の削減効果とPAL・CEC/AC評価、日本建築学会計画系論文集、No.564 (2003.2)、pp.55-62.
- [66] J. L. Gomez-Amo, F. Tena, and J. A. Martinez-Lozano, Energy Saving and Solar Energy Use in the University of Valencia (Spain), Renewable Energy, Vol.29 (2004), pp.675-685.
- [67] 高田宏、村川三郎、西名大作、大学福利施設における季節別水・ガス使用量の実態、空気調和・衛生工学会論文集、No.92 (2004.1)、pp.131-141.
- [68] L. Barelli and G. Bidini, Development of an Energetic Diagnosis Method for the Buildings: Example of the Perugia University, Energy and Buildings, Vol.36, No.1 (2004.1), pp.81-87.
- [69] 東啓臣、赤司泰義、渡辺俊之、大学キャンパスにおける空調エネルギー供給計画に関する研究(その1)空調方式別のエネルギー消費解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、Vol.2004 (2004.8)、pp.1325-1326.
- [70] 松崎彩、巖網林、放射エクセルギーの概念に基づいた地域熱環境の評価、環境システム研究論文発表会講演集、Vol.32th (2004.10)、pp.171-176.
- [71] S. Nayak and R. Radermacher, Thermo-economic Simulation of 27 MW Campus Cooling Heating Power (CHP) Plant, Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol.44 (2004.11), pp.477-488.
- [72] W. G. Colella, C. R. Niemoth, C. Y. Lim, and A. Ph. Hein, Evaluation of the Financial and Environmental Feasibility of a Network of Distributed 200 kW Combined Heat and Power Fuel Cell Systems on the Stanford University Campus, Fuel Cells, Vol.5, No.1 (2005.2), pp.148-166.
- [73] 岡田真幸、位寄和久、下田貞幸、大西康伸、異なる視点を持つ参加主体による大学施設整備項目の重要度算定手法に関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.593 (2005.7)、pp.79-85.
- [74] 早川眞、蜂巢浩生、大学施設における個別分散型冷暖房機のハイブリッド運転方式に関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、D-21 (2005.8)、pp.953-956.

-
- [75] 千田衛、同志社大学エネルギー変換研究センターにおけるコージェネレーションシステム、同志社大学理工学研究所研究発表会、Vol.43th (2005.11)、pp.60-65.
- [76] L. Barelli and G. Bidini, Design of the Measurements Validation Procedure and the Expert System Architecture for a Cogeneration Internal Combustion Engine, Applied Thermal Engineering, Vol.25, No.17-18 (2005.12), pp.2698-2714.
- [77] 浅野誠、熊澤正幸、加藤丈佳、鈴置保雄、大学における電気機器利用状況の実態調査に基づくベース電力需要削減の可能性評価、エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集、Vol.25th (2006.6)、pp.199-202.
- [78] 早川雄太、桶真一郎、滝川浩史、榊原建樹、豊橋技科大へのCGS導入に向けたシステム構成と運転法の検討、太陽/風力エネルギー講演論文集 (2006.10)、pp.345-348.
- [79] M. Pavlas, P. Stehlik, J. Oral, and J. Sikula, Integrating Renewable Sources of Energy into an Existing Combined Heat and Power System, Energy, Vol.31, No.13 (2006.10), pp.2163-2175.
- [80] 謝学海、山下哲生、中村安弘、大学構内における総使用電力からの空調用電力と非空調用電力の分離に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.116 (2006.11)、pp.11-19.
- [81] 気象庁、気象統計情報、<http://www.data.kishou.go.jp/>.
- [82] 資源エネルギー庁、エネルギーの使用の合理化に関する法律 第11条に基づく定期報告書記入要領 (2004.7).
- [83] 空気調和・衛生工学会、空気調和・衛生工学便覧 (第13版)、第3巻、第5編 (2001.11)、pp.199-201.
- [84] 古賀ひろ子、修士論文、慶應義塾大学 (2006.3).
- [85] P. A. Domanski, D. A. Didion, and J. S. W. Chi, Vapor Compression Cycle Design Program (CYCLE_D) Ver. 2.0, National Institute of Standards and Technology, U.S.A., (1998).
- [86] 柳正秀、藁谷至誠、植草常雄、北川美宏、斎藤茂、建物エネルギー需要特性がコージェネレーションシステムの規模と運用に与える影響、日本建築学会計画系論文集、No.555 (2002.5)、pp.85-92.
- [87] 藁谷至誠、藤井修二、湯浅和博、植草常雄、室田幸子、建物負荷の変化と設計要素がコージェネレーションシステムの省エネルギー性に及ぼす影響、日本建築学会計画系論文集、No.531 (2000.5)、pp.59-66.
- [88] 柳正秀、植草常雄、山田順一、新上和正、高次元アルゴリズムによるコージェネレーションシステムの最適設計、日本建築学会計画系論文集、No.538 (2000.12)、pp.23-30.
- [89] 横山良平、村田辰宏、伊東弘一、エネルギー供給システムの多段階拡張におけるロバスト最適設計、日本機械学会論文集 C、Vol.68, No.674 (2002.10)、pp.3037-3044.
- [90] 環境省、平成17年度の電気事業者別排出係数の公表について (2007.3).
- [91] 東京ガス、CSR 報告書 (2005).
- [92] 東京電力、電源構成比の推移、<http://www.tepco.co.jp/corp-com/db/supplyFacilities/GenCapacity-j.html>.
- [93] 電気事業連合会、電気事業における地球温暖化対策の取り組み (2006.12)、p.I-6.
- [94] 日本エネルギー学会、天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2002 (第4版)、(2002)、pp.216-239.
- [95] 経済産業研究所、総合エネルギー統計の解説 (2004).

参考論文一覧

原著論文

- 1) A. Mise and H. Sato, Effective Introduction of Cogeneration System on University Campuses, Journal of Environment and Engineering, 査読中.
- 2) 三瀬農士、佐藤春樹、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスにおけるコージェネレーションシステムの省エネルギー性および環境性評価、日本建築学会環境系論文集、No.616 (2007.6)、pp.51-58.
- 3) 三瀬農士、佐藤春樹、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスにおける電力および冷暖房需要の推定、日本建築学会環境系論文集、No.609 (2006.11)、pp.55-62.

国際学会での口頭発表

- 4) A. Mise* and H. Sato, Possible Role of Setting Photovoltaic System at Keio University Shonan Fujisawa Campus, Renewable Energy (2006.10, Japan), O-N-3-2.
- 5) A. Mise*, H. Nishi, and H. Sato, Energy Assessment of Cogeneration and Air Conditioning System on Keio University Shonan Fujisawa Campus, IEEE International Conference on Industrial Informatics (2006.8, Singapore), CD-ROM, SS01.7.

国内学会での口頭発表

- 6) 三瀬農士*、佐藤春樹、大学キャンパスにおける低環境負荷型エネルギー利用のシステムデザイン、日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集 (2007.7)、pp.350-353.
- 7) 三瀬農士*、佐藤春樹、CEMS による大学キャンパスにおける分散電源のシステムデザイン、日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集 (2006.11)、pp.61-62.
- 8) 三瀬農士*、佐藤春樹、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスにおける空調需要の推定、日本建築学会学術講演梗概集、D-2 (2006.9)、pp.247-248.
- 9) 三瀬農士*、佐藤春樹、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスにおけるコージェネレーションシステムの稼動状況、日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集 (2006.7)、pp.317-320.

- 10) 三瀬農士*、川瀬峻介、佐藤春樹、慶応大学湘南藤沢キャンパスにおけるエネルギー需要実態と供給システムの検討、日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集 (2005.11)、pp.299-300.
- 11) 川瀬峻介*、三瀬農士、佐藤春樹、UML と JAVA を用いたエネルギー供給に関するプログラム開発 (慶応義塾大学湘南藤沢キャンパスのコージェネレーションシステム)、日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集 (2005.7)、pp.447-449.

*印：発表者

付録1 SFCの空調設備の定格値(詳細)

機器名称	台数	冷房能力 [MJ/h]	暖房能力 [MJ/h]	消費電力 [kW]	ガス消費量 [MJ/h]
本館					
BLR	1	-	3,349	4	4,081
主温水ポンプ	1	-	-	11	-
AHC	3	5,024	4,639	15	5,388
主冷温水ポンプ	3	-	-	11	-
冷却塔	3	-	-	17	-
冷却水ポンプ	3	-	-	30	-
冷温水ポンプ 1	2	-	-	45	-
冷温水ポンプ 2	2	-	-	37	-
AHU1	1	198	253	4	-
AHU2	1	206	262	4	-
AHU3	1	1,051	913	12	-
FCU	-	795	1,279	4	-
PAC1	1	67	67	11	-
PAC2	1	13	16	1	-
PAC3	1	47	49	4	-
メディアセンター					
VC	2	427	-	33	-
冷水循環ポンプ	2	-	-	4	-
AHU1	1	476	150	35	-
AHU2	1	1,137	881	30	-
AHU3	1	1,045	788	22	-
AHU4	1	48	53	4	-
AHU5	1	229	85	19	-
AHU6	1	89	37	8	-
AHU7	1	106	41	8	-
AHU8	1	184	158	6	-
PAC1	1	188	201	39	-
PAC2	1	67	67	12	-
PAC3	1	47	47	7	-
PAC4	1	47	47	7	-
PAC5	1	13	16	1	-
PAC6	1	168	188	12	-
PAC7	1	89	-	13	-
大講義室棟 I					
AHU1	1	578	452	8	-
AHU2	1	494	368	8	-
AHU3	1	502	374	8	-
AHU4	1	607	482	8	-

機器名称	台数	冷房能力 [MJ/h]	暖房能力 [MJ/h]	消費電力 [kW]	ガス消費量 [MJ/h]
大講義室棟Ⅱ					
AHU	1	1,256	1,172	16	-
FCU	-	93	128	1	-
PAC1	1	13	13	2	-
PAC2	1	14	14	2	-
PAC3	1	11	12	2	-
PAC4	1	25	-	4	-
厚生棟					
AHU	1	1,136	1,018	16	-
FCU	-	764	1,236	4	-
PAC1	1	205	234	27	-
PAC2	1	188	201	23	-
PAC3	1	184	196	21	-
PAC4	1	52	59	4	-
PAC5	1	13	16	3	-
講義室棟 A					
FCU	-	383	617	2	-
PAC	2	73	-	7	-
講義室棟 B					
FCU	-	347	546	2	-
講義室棟 C					
FCU	-	375	616	2	-
講義室棟 D					
FCU	-	356	558	2	-
講義室棟 E					
FCU	-	447	757	2	-
研究棟 A					
FCU	-	913	1,454	4	-
PAC1	2	90	-	17	-
PAC2	1	84	94	6	-
研究棟 B					
FCU	-	1,121	1,777	5	-
PAC1	2	90	-	9	-
PAC2	1	84	101	6	-

機器名称	台数	冷房能力 [MJ/h]	暖房能力 [MJ/h]	消費電力 [kW]	ガス消費量 [MJ/h]
PAC3	1	84	101	6	-
PAC4	1	84	101	6	-
PAC5	1	52	59	4	-
研究棟 C					
FCU	-	1,163	1,841	6	-
PAC1	2	90	-	9	-
PAC2	1	84	94	6	-
PAC3	1	84	94	6	-
PAC4	1	84	94	6	-
PAC5	1	52	59	4	-
研究棟 D					
FCU	-	1,115	1,767	5	-
PAC1	1	90	-	9	-
PAC2	1	84	101	6	-
PAC3	1	84	101	6	-
PAC4	1	52	59	4	-
PAC5	1	52	59	4	-
研究棟 E					
FCU	-	1,163	1,841	6	-
PAC1	1	90	-	9	-
PAC2	1	84	94	6	-
PAC3	1	84	94	6	-
PAC4	1	52	59	4	-
PAC5	1	52	59	4	-
学生ラウンジ					
PAC1	0	-	-	-	-
PAC2	1	132	140	21	-
体育館					
PAC1	1	21	25	2	-
PAC2	1	47	51	4	-
クラブ室棟					
BLR	1	-	1,545	1	1,727
暖房用 1 次温水ポンプ	1	-	-	2	-
暖房用循環ポンプ	2	-	-	4	-
FCU	-	-	729	2	-

機器名称	台数	冷房能力 [MJ/h]	暖房能力 [MJ/h]	消費電力 [kW]	ガス消費量 [MJ/h]
大学院棟					
VC	1	1,022	-	82	-
VC	1	1,022	850	82	-
冷水ポンプ	1	-	-	6	-
冷温水ポンプ	1	-	-	6	-
AHU1	1	184	125	13	-
AHU2	1	147	139	7	-
AHU3	1	150	109	11	-
AHU4	1	147	106	11	-
AHU5	2	37	12	2	-
AHU6	4	29	23	2	-
AHU7	4	29	23	2	-
AHU8	6	113	19	2	-
FCU	-	705	5,241	6	-
PAC	2	8	9	2	-
Δ館					
AHC	1	1,517	1,271	9	1,224
冷却塔	1	-	-	4	-
冷水ポンプ	2	-	-	6	-
温水ポンプ 1	1	-	-	2	-
温水ポンプ 2	1	-	-	1	-
温水ポンプ 3	1	-	-	2	-
温水ポンプ 4	1	-	-	8	-
冷却水ポンプ	1	-	-	11	-
AHU	2	124	51	2	-
FCU	-	2,248	2,594	9	-
PAC1	1	26	-	3	-
PAC2	1	90	-	10	-
PAC3	1	90	-	10	-
PAC4	1	90	-	10	-

付録2 SFCにおける月別一次エネルギー消費原単位

	受電電力 [MJ/(m ² ・月)]	ガス (発電用) [MJ/(m ² ・月)]	ガス (空調用) [MJ/(m ² ・月)]	ガス (給湯・調理用) [MJ/(m ² ・月)]	合計 [MJ/(m ² ・月)]
1月	120	49	19	4	191
2月	93	41	13	2	149
3月	97	46	5	2	150
4月	104	30	4	3	142
5月	116	34	5	4	159
6月	138	32	16	4	189
7月	147	34	27	3	212
8月	124	21	21	1	166
9月	118	33	15	2	168
10月	123	34	5	4	165
11月	104	44	5	4	156
12月	109	48	9	3	170
合計	1,391	447	144	36	2,017

付録4 SFCにおける時刻別電力需要（土曜日平均）

	電力需要 [W/m ²]											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1時	13	12	12	12	13	12	13	12	13	13	13	13
2時	13	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12
3時	13	12	12	12	13	12	12	12	12	13	13	13
4時	13	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13
5時	12	12	12	11	12	12	12	11	12	12	12	12
6時	12	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
7時	12	11	10	10	12	12	12	11	12	12	12	12
8時	9	8	8	9	9	8	8	10	9	9	9	9
9時	20	19	19	15	20	19	20	16	20	21	20	20
10時	20	20	20	16	20	18	20	16	20	21	21	20
11時	22	21	21	16	22	20	22	17	22	23	22	22
12時	21	21	21	16	21	19	21	17	21	22	21	21
13時	23	22	21	17	22	21	22	17	22	23	23	22
14時	23	22	22	17	22	21	22	17	22	23	23	23
15時	22	21	20	16	21	20	21	17	21	22	22	21
16時	21	20	20	16	20	20	20	17	20	21	20	21
17時	21	20	20	16	20	20	20	16	20	21	20	21
18時	20	20	19	16	20	20	20	16	19	21	20	21
19時	20	19	19	17	19	19	19	16	19	20	18	20
20時	17	18	18	16	17	16	16	15	16	17	15	17
21時	20	19	19	16	19	19	19	16	19	19	19	19
22時	13	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13
23時	13	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13
24時	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12

付録6 SFCにおける時刻別冷房需要（平日平均）

	冷房需要 [kJ/(m ² ・h)]											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1時	2	2	2	3	3	54	69	43	33	26	2	2
2時	1	1	1	2	2	53	64	46	33	27	1	1
3時	1	1	1	2	2	59	67	52	38	38	1	1
4時	2	2	2	3	3	66	74	52	44	36	1	2
5時	2	2	2	3	3	34	40	31	35	26	2	2
6時	1	1	1	2	2	53	64	51	36	40	1	1
7時	2	2	2	3	2	49	62	38	27	22	1	1
8時	2	2	1	3	2	78	91	72	60	29	1	1
9時	3	3	3	5	5	142	176	123	106	38	3	3
10時	4	4	4	6	6	155	209	146	130	51	3	3
11時	4	4	4	6	6	191	214	146	123	58	3	3
12時	4	4	4	6	6	187	216	113	115	59	3	3
13時	4	4	4	6	6	208	239	129	123	74	3	3
14時	4	4	4	6	6	185	228	116	112	72	3	3
15時	4	4	4	7	6	175	221	106	98	58	3	4
16時	4	4	4	7	6	173	214	89	97	67	3	4
17時	4	4	4	6	6	173	211	82	98	84	3	4
18時	4	4	4	7	6	170	202	71	111	101	3	4
19時	3	3	3	5	5	180	216	70	78	102	3	3
20時	4	4	4	6	6	139	181	40	52	75	3	3
21時	4	4	3	6	5	98	103	15	28	51	3	3
22時	3	3	3	5	5	98	97	22	29	61	2	3
23時	3	3	3	5	4	77	87	31	28	49	2	3
24時	2	2	2	3	3	61	66	36	27	26	1	2

付録7 SFCにおける時刻別冷房需要（土曜日平均）

	冷房需要 [kJ/(m ² ・h)]											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1時	2	2	2	3	3	37	46	35	41	20	5	2
2時	1	1	1	2	2	37	48	42	38	24	15	1
3時	1	1	1	2	2	28	44	34	40	18	5	1
4時	2	2	2	3	3	33	35	28	38	20	9	2
5時	2	2	2	3	3	13	30	30	38	23	9	2
6時	1	1	1	2	2	29	43	33	36	12	16	1
7時	2	2	1	3	2	29	34	31	28	8	14	1
8時	2	2	1	3	2	47	54	41	60	26	12	1
9時	3	3	3	5	5	161	140	92	130	50	8	3
10時	4	4	3	6	6	191	172	113	141	82	32	3
11時	4	4	4	6	6	189	155	108	140	83	26	3
12時	4	4	4	6	6	206	169	114	138	95	36	3
13時	4	4	4	6	6	213	168	113	148	90	35	3
14時	4	4	4	6	6	199	150	103	135	74	29	3
15時	4	4	4	7	7	216	152	113	135	66	28	4
16時	4	4	4	7	7	193	153	96	137	83	34	4
17時	4	4	4	6	6	177	107	73	80	75	50	4
18時	4	4	4	7	7	137	106	47	75	73	45	4
19時	4	3	3	5	5	132	96	64	63	43	13	3
20時	4	4	4	6	6	118	100	74	99	42	11	3
21時	4	3	3	6	6	75	56	44	54	26	9	3
22時	3	3	3	5	5	67	61	45	63	38	13	3
23時	3	3	3	5	5	56	47	44	45	26	13	3
24時	2	2	2	3	3	56	57	32	45	28	17	2

付録8 SFCにおける時刻別冷房需要（日曜日平均）

	冷房需要 [kJ/(m ² ・h)]											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1時	2	2	2	3	3	54	69	46	28	48	8	2
2時	1	1	1	2	2	63	71	39	34	44	16	1
3時	1	1	1	2	2	47	62	42	18	14	8	1
4時	2	2	2	3	3	51	64	37	16	16	5	2
5時	2	2	2	3	3	27	37	28	34	32	10	2
6時	1	1	1	2	2	43	44	34	17	20	19	1
7時	2	2	2	3	2	39	63	36	20	26	6	1
8時	2	2	2	3	2	66	62	44	37	26	20	1
9時	3	3	3	6	5	103	62	80	28	21	27	3
10時	4	4	4	6	6	125	81	69	30	27	42	3
11時	4	4	4	6	6	131	85	67	41	52	48	3
12時	4	4	4	6	6	115	79	65	47	50	47	3
13時	4	4	4	6	6	123	99	69	53	66	48	3
14時	4	4	4	6	6	104	80	55	38	47	44	4
15時	4	4	4	7	6	91	83	59	42	49	38	4
16時	5	4	4	7	6	55	84	52	40	35	29	4
17時	4	4	4	6	6	99	80	47	57	41	35	4
18時	5	4	4	7	6	87	69	26	42	52	24	4
19時	4	3	3	5	5	90	74	32	30	52	15	3
20時	4	4	4	6	6	85	68	36	29	52	8	4
21時	4	4	3	6	5	59	68	38	24	38	4	3
22時	3	3	3	5	5	64	68	45	19	28	4	3
23時	3	3	3	5	5	60	66	44	23	39	10	3
24時	2	2	2	3	3	54	67	37	22	36	3	2

付録9 SFCにおける時刻別暖房需要（平日平均）

	暖房需要 [kJ/(m ² ・h)]											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1時	24	32	27	10	16	0	0	0	0	0	20	20
2時	28	29	25	11	18	0	0	0	0	0	24	16
3時	31	26	24	14	24	0	0	0	0	0	30	24
4時	32	28	24	17	27	0	0	0	0	0	29	27
5時	27	23	22	9	7	0	0	0	0	0	20	16
6時	38	31	26	12	17	0	0	0	0	0	42	36
7時	28	31	25	8	18	0	0	0	0	0	22	22
8時	44	37	35	25	43	0	0	0	0	0	45	42
9時	136	136	60	19	31	0	0	0	0	0	80	68
10時	129	121	74	25	39	0	0	0	0	0	101	72
11時	128	110	67	33	58	0	0	0	0	0	109	87
12時	110	130	71	26	53	0	0	0	0	0	38	70
13時	120	120	72	36	65	0	0	0	0	0	46	41
14時	110	112	75	27	47	0	0	0	0	0	38	27
15時	99	103	66	19	34	0	0	0	0	0	21	78
16時	103	96	63	20	36	0	0	0	0	0	29	78
17時	121	118	67	25	40	0	0	0	0	0	58	89
18時	129	108	70	36	58	0	0	0	0	0	127	93
19時	132	113	64	52	85	0	0	0	0	0	63	110
20時	128	107	69	19	47	0	0	0	0	0	43	81
21時	54	57	45	18	38	0	0	0	0	0	40	41
22時	41	41	31	19	42	0	0	0	0	0	32	32
23時	35	39	26	15	34	0	0	0	0	0	23	26
24時	27	28	27	11	22	0	0	0	0	0	20	24

付録 10 SFC における時刻別暖房需要 (土曜日平均)

	暖房需要 [kJ/(m ² ・h)]											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1時	19	18	14	9	8	0	0	0	0	0	5	21
2時	24	22	14	12	18	0	0	0	0	0	14	18
3時	21	23	14	10	9	0	0	0	0	0	10	8
4時	21	20	14	9	8	0	0	0	0	0	11	8
5時	23	23	14	7	8	0	0	0	0	0	7	18
6時	32	23	14	3	11	0	0	0	0	0	13	22
7時	13	23	14	10	11	0	0	0	0	0	8	11
8時	28	29	14	12	23	0	0	0	0	0	11	20
9時	105	87	38	8	24	0	0	0	0	0	23	48
10時	104	89	45	7	48	0	0	0	0	0	17	37
11時	80	81	46	15	42	0	0	0	0	0	6	20
12時	98	61	44	12	48	0	0	0	0	0	20	34
13時	79	64	46	19	45	0	0	0	0	0	20	38
14時	41	51	44	13	41	0	0	0	0	0	7	32
15時	35	85	45	11	64	0	0	0	0	0	13	31
16時	80	94	43	7	71	0	0	0	0	0	33	96
17時	102	70	43	8	48	0	0	0	0	0	40	112
18時	105	80	43	7	39	0	0	0	0	0	43	105
19時	87	86	42	7	22	0	0	0	0	0	44	27
20時	80	72	41	6	22	0	0	0	0	0	49	32
21時	25	26	14	2	11	0	0	0	0	0	14	16
22時	23	16	14	5	21	0	0	0	0	0	11	17
23時	19	13	14	5	12	0	0	0	0	0	12	17
24時	24	20	13	4	24	0	0	0	0	0	15	16

付録 11 SFC における時刻別暖房需要 (日曜日平均)

	暖房需要 [kJ/(m ² ・h)]											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1時	28	18	17	4	22	0	0	0	0	0	9	15
2時	32	19	25	4	27	0	0	0	0	0	19	23
3時	26	16	16	4	18	0	0	0	0	0	15	17
4時	22	14	16	3	15	0	0	0	0	0	10	16
5時	28	19	21	3	13	0	0	0	0	0	13	15
6時	33	24	23	3	12	0	0	0	0	0	21	31
7時	24	13	14	3	13	0	0	0	0	0	12	15
8時	25	19	17	3	22	0	0	0	0	0	15	8
9時	20	23	13	5	25	0	0	0	0	0	9	10
10時	27	29	22	6	23	0	0	0	0	0	24	21
11時	34	34	23	7	29	0	0	0	0	0	48	23
12時	28	29	16	7	22	0	0	0	0	0	52	17
13時	37	36	22	8	30	0	0	0	0	0	70	29
14時	27	32	21	7	30	0	0	0	0	0	30	18
15時	26	33	19	7	30	0	0	0	0	0	27	28
16時	22	21	18	7	19	0	0	0	0	0	23	23
17時	43	30	25	7	12	0	0	0	0	0	26	37
18時	34	27	22	6	10	0	0	0	0	0	16	27
19時	28	25	22	6	18	0	0	0	0	0	15	24
20時	23	20	25	5	15	0	0	0	0	0	14	21
21時	19	12	15	5	13	0	0	0	0	0	11	12
22時	22	16	15	5	9	0	0	0	0	0	7	25
23時	29	19	19	4	12	0	0	0	0	0	14	16
24時	23	14	16	4	11	0	0	0	0	0	9	23