

博士論文

分散型電源・熱源技術の計画における多目的分析及び
最適化に関する研究

STUDY ON MULTI-OBJECTIVE OPTIMAL METHOD IN THE PLANNING OF
DISTRIBUTED GENERATION AND HEAT SOURCE TECHNOLOGIES

北九州市立大学国際環境工学研究科

2013年9月

施 行之

Xingzhi SHI

分散型電源・熱源技術の計画における多目的分析及び最適化に関する研究

第一章 従来研究と研究の位置づけ

1-1	分散型エネルギーシステムとは	2
1-2	分散型エネルギーシステムの分類	3
1-3	エネルギー・環境に関する国の主要政策	6
1-4	コージェネレーションシステムの評価指標	8
1-4-1	省エネルギー性	9
1-4-2	経済性	11
1-4-3	環境性	13
1-5	分散型電源・熱源技術計画ツールの必要性	14
1-6	従来研究	15
1-6-1	分散型エネルギーシステムの導入に関する従来研究	15
1-6-2	分散型エネルギーシステムの分析ツール	16
1-7	論文の構成	17

第二章 北九州市学研都市における地域エネルギーシステムの利用状況に関する研究

2-1	はじめに	23
2-2	研究対象	24
2-2-1	地域エネルギーシステム仕様概略	26
2-2-2	地域エネルギーシステムの運転管理	27
2-3	運転状況	30
2-3-1	エネルギー消費	30
2-3-2	発電設備の分析	31
2-3-3	熱源設備の分析	33
2-4	冷暖房供給と日平均気温の関係	34
2-5	省エネルギー率	36
2-6	結論	37

第三章 分散型電源・熱源技術の多目的計画に関する理論

3-1	はじめに	39
3-2	分散型電源・熱源技術の計画手順	40
3-3	分散型電源・熱源技術の多目的計画における定式化	43
3-3-1	目的関数	44
3-3-2	制約条件	45
3-3-3	パラメータの設定	46

3-4	単目的の最適化問題の解法	48
3-5	多目的最適化の解法アルゴリズム	49
3-5-1	パレート最適解	49
3-5-2	ε -制約法	50
3-6	多目的分析評価の計算フロー	51
3-7	蓄電池の最適化計画における定式化	53
3-7-1	目的関数	53
3-7-2	制約条件	55

第四章 北九州市学研都市における分散型電源・熱源技術の導入効果及び要因分析に関する研究

4-1	はじめに	58
4-2	エネルギーシステムの構成	60
4-3	データベースの構築	62
4-3-1	負荷データ	62
4-3-2	機器データ	64
4-3-3	他のデータの設定	65
4-4	発電技術容量の影響	66
4-4-1	発電技術容量に関する単目的解析	67
4-4-2	発電技術容量に関する多目的解析	72
4-5	熱源技術の影響	75
4-5-1	熱源技術に関する単目的解析	76
4-5-2	熱源技術に関する多目的解析	78
4-6	経済性要因の影響	81
4-6-1	電力価格の影響	81
4-6-2	ガス価格の影響	82
4-6-3	炭素税の影響	83
4-7	まとめ	84

第五章 蓄電池と連携したガスコージェネレーションシステムの導入効果に関する研究

5-1	はじめに	87
5-2	モデルの紹介	88
5-3	ケーススタディ	89
5-3-1	エネルギーシステムの構成	89
5-3-2	データベースの整備	90
5-4	感度解析	93

5-5	まとめ	98
第六章 太陽熱発電システムの導入効果に関する研究		
6-1	はじめに	101
6-2	太陽熱発電の定義及び特徴	102
6-3	エネルギーシステムの構成	104
6-4	データベースの整備	105
6-5	導入効果	106
6-6	最適化計算	111
6-6-1	省エネルギー性の最適化	112
6-6-2	経済性の最適化	113
6-7	まとめ	115
第七章 分散型電源・熱源機器の選定に関する多目的最適化		
7-1	はじめに	118
7-2	エネルギーシステムの構成	119
7-3	データベースの構築	120
7-4	単目的解析	122
7-5	多目的解析	127
7-5-1	経済性と省エネルギー性のトレードオフ関係	127
7-5-2	経済性と環境性のトレードオフ関係	130
7-5-3	経済性、省エネルギー性、環境性のトレードオフ関係	132
7-6	まとめ	134
第八章 結論と展望		
8-1	結論	137
8-2	今後の展望	139
	研究業績	140
	謝辞	143

分散型電源・熱源技術の計画における多目的分析及び最適化に関する研究フロー

研究背景	第一章 従来研究と研究の位置づけ
実態研究	第二章 北九州市学研都市における地域エネルギーシステムの利用状況 に関する研究
理論研究	第三章 分散型電源・熱源技術の多目的計画に関する理論
応用研究	第四章 北九州市学術研究都市における分散型電源・熱源技術の導入効果及び 要因分析に関する
	第五章 蓄電池と連携したガスコージェネレーションシステムの導入効果 に関する研究
	第六章 太陽熱発電システムの導入効果に関する研究
	第七章 分散型電源・熱源機器の選定に関する多目的最適化
結論	第八章 結論と展望

第一章 従来研究と研究の位置づけ

- 1-1 分散型エネルギーシステムとは
- 1-2 分散型エネルギーシステムの分類
- 1-3 エネルギー・環境に関する国の主要政策
- 1-4 コージェネレーションシステムの評価指標
 - 1-4-1 省エネルギー性
 - 1-4-2 経済性
 - 1-4-3 環境性
- 1-5 分散型電源・熱源技術計画ツールの必要性
- 1-6 従来研究
 - 1-6-1 分散型エネルギーシステムの導入に関する従来研究
 - 1-6-2 分散型エネルギーシステムの分析ツール
- 1-7 論文の構成

1-1 分散型エネルギーシステムとは

エネルギーシステムは、自然界の一次エネルギー資源の採取から始まり、変換、輸送、利用という段階で構成される。変換は、精製、ガス化、燃焼、発電等があり、燃料、熱、電気などの二次エネルギー製品を生成する。また、二次エネルギー間での変換もある。輸送は、一次エネルギー資源と二次エネルギー製品に関して行われる。利用は、二次エネルギー製品を用いて、動力や照明、冷暖房などの需要家ニーズに対応したエネルギーサービスが提供される段階で、ここでも種々のエネルギー形態への変換が行われる。¹⁾

従来のエネルギー供給は、一次エネルギー資源の採取と二次エネルギー製品の生産及びこれらの輸送を意味し、エネルギー産業が担い、二次エネルギー製品を需要家が各種家電製品や自動車等のエネルギー利用機器で消費するのが一般的であった。

分散型エネルギーシステムは、広く薄く賦存する太陽光などの自然エネルギーや廃棄物、バイオマス等を適地で変換し利用するシステムと化石燃料を需要側で供給を受けて二次エネルギーに変換し利用するシステムである。

こうした分散型エネルギーシステムの特徴は次のような点にある。

- (1) エネルギー変換と利用が一体となっている。需要側に発電機などのエネルギー変換装置が置かれる場合には、オンサイト型と呼ばれている。これにより、送電時のロスを減じ発電効率の向上につながる。
- (2) オンサイト型分散エネルギーでエンジン、タービンのような熱機関型や燃料電池は、電気と熱を同時生産し、従来のエネルギーシステムでは独立に扱われていたエネルギー形態が複合化される。こうした形態は、コージェネレーションシステムと呼ばれている。
- (3) 分散エネルギーがネットワーク化されるシステムでは、電力の配電網における逆潮流などのように利用部門から二次エネルギーの流出が起こり、双方向の電力潮流となる。
- (4) 都市ごみやバイオマスの利用は、物質循環とエネルギーシステムを結びつけ、循環型社会構築という大きな社会的目標の中にエネルギーシステムを位置づけることとなる。
- (5) 燃料電池は自動車用にも利用でき、移動する分散型エネルギーシステムといえる。その燃料供給として、天然ガス、更に将来的には、水素等の燃料供給インフラ整備が重要となる。
- (6) 分散型エネルギーシステムの発電容量が中小規模、比較的簡単な運用と動作、そして立地制約が少ない等が挙げられる。また、比較的低い生産運用コストも分散型エネルギーシステムのメリットである。しかし、反対にイニシャルコストの負担が大きく、設備運転管理人の確保（人件費）、管理費がかかり、ランニングコストの変動によるリスク等のデメリットもある。

1-2 分散型エネルギーシステムの分類

分散型エネルギーシステムは、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー型、廃棄物発電などのリサイクル型、コージェネレーションに代表される燃料投入型に分けることもできる。

(1) 再生可能エネルギーシステム

水力や地熱などで発電する再生可能エネルギーシステムは、すでに技術的、経済的に実用化し普及している。これらは、経済的な開発地点は限られ、また環境への影響を考慮した開発が必要で、立地は飽和傾向にある。今後は中小水力の普及が期待されている。太陽エネルギー（太陽光発電、太陽熱利用）、風力発電は、技術開発の成果により実用化段階にある。出力が不安定であるという欠点があるが、資源的に枯渇しないこと、化石燃料を消費せず、CO₂排出がないことという大きな利点があり、経済的な課題はあるものの今後の普及拡大が期待される。波力、海洋温度差発電などの海洋エネルギーは、技術開発段階である。

(2) リサイクル型エネルギーシステム

廃棄物は、既にかかなりの部分焼却処理されていることから、新たに環境に負荷を与えることなく、熱利用や電力利用をすることが可能である。また河川水や下水等は、夏は大気より冷たく、冬は大気よりも暖かくこうした温度差エネルギーをヒートポンプを活用して、熱供給することが可能となった。また工場廃熱は、生産工程から高温で排熱されることから利用可能である、これらはリサイクル型エネルギーとして、新エネルギーに位置づけられている。

(3) 化石燃料投入型エネルギーシステム

各種エンジン、タービンなどの熱機関や燃料電池による分散エネルギーは、発電するとともに廃熱による熱供給を行うコージェネレーションとして高効率なエネルギーシステムを構成できる。天然ガスコージェネレーションと燃料電池は、国の定義によれば、従来型エネルギーの新利用形態として需要サイドの新エネルギーに位置づけられている。

なお、バイオマスエネルギーのメタノール化等の高品位燃料技術の開発が進められており、化石燃料投入型エネルギーシステムの化石燃料を代替するエネルギーシステムの普及も注目される。

本研究では、分散型電源・熱源システムの導入について検討を行い、主にコージェネレーションシステムを指す。コージェネレーションシステムは、回転型発電機のタイプと電気化学的に発電する燃料電池のタイプに大別され、前者は発電機を駆動する原動機によってディーゼルエンジン、ガスエンジン、ガスタービンに分類される（図1-2-1）。

その中で、天然ガスを燃料とする天然ガスコージェネレーションシステムはガスエンジンとガスタービンと燃料電池の3種類となる。以下に、各天然ガスコージェネレーションシステムの主な特徴を記す。²⁾

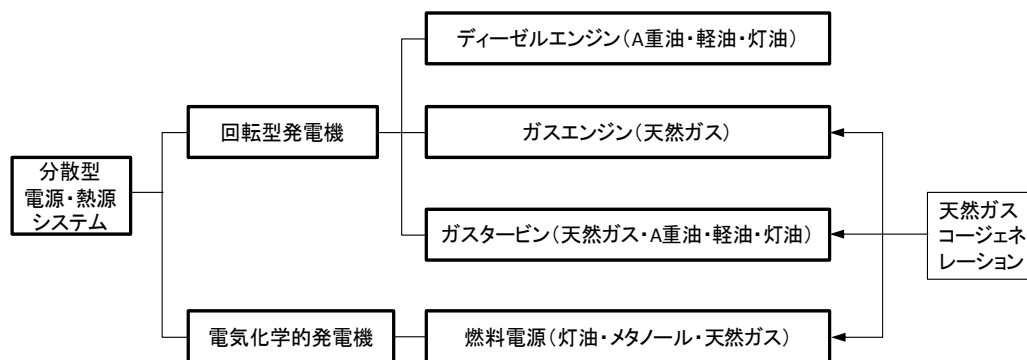


図 1-2-1 分散型電源・熱源システムの分類

資料：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 2008」

ガスエンジン

ガスエンジンで発電機を駆動して電圧年力を供給、同時に排ガスやジャケット冷却水から排熱を回収して冷暖房・給湯などに利用するシステムである。ガスエンジンは、燃料と空気の混合気に火花点火するものと点火用の液体燃料を圧縮自着火させる方式があるが、いずれも天然ガスを燃料とするものは排ガスもクリーンであり、都市部の民生用としては発電出力 100～1,000kW 程度のものが普及している。発電効率は近年高効率化が進んでおり、最新機種では、40%(LHV)を越えるものができた。さらには 45%程度のもも商品化されている。その特徴としては

- ① 同出力規模のガスタービンに比べて発電効率が高い。
- ② 事務所、病院やホテル、スポーツセンターなど延床面積が数千 m²～数万 m²の建物に 200～500kW クラスを中心として導入実績が豊富である。
- ③ 排熱は「温水」または「温水+蒸気」で回収される。
- ④ ガスエンジンは、長い歴史を持ち、導入実績数も豊富で、信頼性・安全性も高い。
- ⑤ ガスエンジンは、クリーンな天然ガスを燃料とするので内部を清浄に保つことができ、性能の安定化とエンジン寿命に優れる。またメンテナンス費用も軽減できる。
- ⑥ 出力 10kW 未満の小型ガスエンジンは電気主任技術者が不要となり、比較的小規模な施設に導入されている。また、商用電力系統とのインバータによる連系も開発されている。

ガスタービン

ガスタービンで発電機を駆動して電力を供給し、排熱で冷暖房・給湯・加熱等を行うシステムである。ガスタービンは、振動が少なく軽量であり、燃料排熱ガスから高温の蒸気を回収できる利点があり、発電出力はマイクロガスタービン(300kW 以下)を除くと、500kW から 50,000kW 程度とガスエンジンより高い出力規模にラインアップされる。その特徴としては、

- ① 電気出力に対し熱出力の割合が高い（熱電比（電気に対する熱の割合）=2~3）ため、大量の蒸気を必要とする施設に適している。

- ② 地域冷暖房、大規模複合ビルや産業用など、1000kW 以上の大規模な施設に多く導入されている。
- ③ 発電規模に対して、設備の設置面積が小さい。
- ④ 排ガス温度が高いため、蒸気 0.78~0.88MPa での熱回収ができ、二重効用蒸気吸収冷凍機や各種プロセス用の蒸気として利用できる。
- ⑤ ガスタービンの運転音は高周波のため遮断しやすく、防音・防振対策が容易である。
- ⑥ 熱電可変形の高タービンを採用すると、電力と熱需要の変動に対応した運転が可能である。
- ⑦ 出力 300kW 未満であるマイクロガスタービンは、最高使用圧力等の上限を満たせば、ボイラ・タービン主任技術者が不要となる。

燃料電池

燃料極（アノード）、空気極(カソード)の2種類の電極と電解質から構成される燃料電池は、天然ガス等から作った水素と空気中の酸素より電気化学的な反応で直流電流を取り出す。これをインバータで交流変換して電力を供給するとともに、さらにスタック及び燃料改質装置から蒸気や温水の形で熱を取り出し、冷暖房・給湯の熱源とすることでコージェネレーションシステムとして利用される。その特徴としては

- ① 部分負荷効率が比較的高い。電気化学反応で化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換するので、最大負荷よりも部分負荷で効率が最大となる。
- ② 電池反応では基本的に水が生成するだけであり、燃料を高温で燃焼させないため、窒素酸化物もほとんど発生しない。総合エネルギー効率が高いため、二酸化炭素の発生も低減できる等環境性に優れている。
- ③ 実用段階にあるリン酸形燃料電池の出力は50kW~200kWで、高品質・高信頼性重視の研究所や半導体工場、直流・高効率利用の浄水場や鉄鋼業などの分野に加え、熱多消費のホテル・病院等に適している。
- ④ 電池の効率は規模によらないため小規模・小容量でも、高い効率を持つ発電システムが可能である。
- ⑤ 電池本体には駆動部分がないので、回転型発電機に比べ極めて低騒音・低振動である。
- ⑥ 燃料電池に供給する水素は、炭化水素系の燃料を変換(水蒸気改質)して得るため、天然ガス、LPG、メタノール、ナフサ、灯油など多様な燃料を用いることができる。

1-3 エネルギー・環境に関する国の主要政策

原油をはじめとするエネルギー資源の需給が中長期的逼迫するという懸念が高まるとともに、化石燃料由来の温室効果ガスの排出が増大する中で、世界のエネルギー情勢が大きく変化してきている、こうした中で、世界の国々や地域では、自らのエネルギー資源の安定的な確保や環境問題への対応に迫られており、それぞれにエネルギー戦略の練り直しを行っている。

ここで、エネルギー・環境政策や都市政策に加えて、新成長戦略や東日本大震災からの復興についても考慮しながら、自立・分散型のエネルギーシステムの導入やエネルギーの面的利用の推進、ならびに再生可能エネルギー、未利用エネルギーの活用等を図っていくことが求められている。以下では、踏まえるべき国の主要政策についてまとめる。³⁾

エネルギー環境政策

①京都議定書目標達成計画（2009年3月全部改訂）

- (1) 低炭素型の都市へ向けた都市機能の集約化
- (2) 複数の新エネルギー利用設備を地域・街区や建物へ集中的に導入
- (3) 街区レベルや地区レベルで複数の建物が連携したエネルギーの面的利用の促進

②地球温暖化対策に係る中長期ロードマップ（2010年3月、12月）

- (1) 自治体等と連携した横断的、総合的取組による住宅群、建築物群の省エネの推進
- (2) 低炭素社会を見据えた次世代のエネルギー供給

③エネルギー・環境戦略基本方針(案)（2011年12月、エネルギー・環境会議）

- (1) リスク分散と効率性を確保する分散型の次世代システムを実現
- (2) 多様なエネルギー源を最大効率で活用しうる社会基盤の整備（電気と熱の有効利用、未利用熱の活用・融通など）

都市政策

①「持続可能で活力ある国土・地域づくり」の推進について（2011年11月、国土交通省）

- (1) 低炭素・循環型システムの構築（ゼロエネルギー、蓄エネルギー、エネルギー管理等）
- (2) 地域の集約化（集約化されたまちづくり（コンパクトシティー）を推進）

②「環境未来都市」構想、総合特区の対象決定（2011年12月、内閣府）

- (1) 環境未来都市（11件）：スマートグリッド、再生可能エネルギー等を組合せた都市のエネルギーマネジメントシステムの構築等
- (2) 総合特区（33区域）：「国際戦略総合特区」「地域活性化総合特区」を指定

③特定都市再生緊急整備地域の指定（2012年1月）（内閣府）

- (1) 都市再生緊急整備地域から、都市の国際競争力の強化を図る上で特に有効な地域を政令で指定（東京都心・臨海地域など11地域）
- (2) 都市開発事業において、自立・分散型かつ効率的なエネルギーシステムの導入を誘導、等

成長戦略

① 新成長戦略（2010年6月） [環境・エネルギー大国戦略]

- (1) 熱等のエネルギーの面的利用等環境負荷低減事業の推進
- (2) 都市・地域構造の低炭素化等に向けた制度の構築（低炭素都市づくりガイドライン等の策定）

② 日本再生の基本戦略（2011年12月閣議決定）

- (1) 「ゼロエネルギー住宅」、集約型まちづくり等の推進による低炭素・循環型の持続可能な社会の実現
- (2) 防災・環境配慮に優れたエネルギー分散型の都市のモデル街区の形成を推進
- (3) 「環境未来都市」構想の推進、地域活性化総合特区の活用

復興政策

① 復興への提言（2011年6月、東日本大震災復興構想会議）

- (1) 先端的な自立・分散型エネルギーシステム（蓄電池、ガスなどを活用したコジェネの活用等）
- (2) エネルギー効率が高く災害にも強いスマート・コミュニティ、スマート・ビレッジを長期的に整備

② 東日本大震災からの復興の基本方針（2011年8月改定、東日本大震災復興対策本部）

- (1) 地域の未利用資源を徹底活用しながら自立・分散型エネルギーシステムを導入
- (2) 地域冷暖房での活用も視野に入れたコジェネレーションシステムの促進

1-4 コージェネレーションシステムの評価指標

本研究では、主にコージェネレーション設備について多目的計画を行うため、ここで、コージェネレーションシステムの評価指標を紹介する。良いコージェネレーションシステム（CGS）の設計とは、システムの容量、台数分割、熱回収方式などを、建物電力、冷暖房、給湯負荷の変動に適合させ、無駄の少ない運転ができるように各機器の仕様や運転方法を決定することにある。各建物のCGSへの適性を把握し、事業サイクルに適合した回収年数になるよう検討・評価を繰り返し、適切な設計をすることが重要である。⁴⁾

具体的には、対象建物の負荷を推定し、計画から基本設計、そして実施設計の各段階に応じてできるかぎり詳細なシステム検討を行い、これを反映させた年間のエネルギーシミュレーションを行うことが重要である。このシミュレーション結果を基に、以下のような評価項目によって総合的な評価を繰り返しながら、最適なシステムの導入を図る。

- ① 省エネルギー性
- ② 経済性
- ③ 環境性
- ④ その他（電力負荷平準化効果など）

各評価項目の精度は、シミュレーションを行う場合の事前に与えられる情報の量やその精度によって異なるが、重要なことは、最初から単に精度を高めることより、各段階に応じ与えられた条件の範囲内でこれらの評価検討を速やかに行うことである。

1-4-1 省エネルギー性

省エネルギー性は、一般には建物全体のエネルギー評価を行う指標であり、従来型システムとCGSを採用したときとの年間の一次エネルギー消費量を比較する相対評価で行う。

省エネルギー的に、最適なCGSの検討をより適切に行うためには、原動機と発電機という分散型電源・熱源設備まわりのエネルギー評価も同時に行い、その要因を細かく分析する必要がある。以下に代表的なエネルギー評価指標を示す。

発電効率

システムを評価するときは、年間の平均発電効率で評価する。システムの補機の消費電力量を差し引いた有効発電効率を使うときもある。

$$\text{発電効率} = \frac{\text{発電量}}{\text{燃料消費量}}$$

負荷率

CGSの定格発電出力に対する実際の発電出力の割合を示す。一般に負荷率が低くなると発電効率は低下するため、負荷率の低い部分負荷運転が長くならないように計画する。

$$\text{負荷率} = \frac{\text{発電量}}{\text{発電機容量} \times \text{運転時間}}$$

排熱利用率

CGSから回収された（排熱回収量）のうち、空調や給湯などに有効に利用された熱（排熱利用量）の比率を示す。省エネルギー性や経済性を高めるうえでは、年間を通して排熱利用率ができるだけ高くなるよう容量、台数、運転制御などを計画することが重要である。なお、分母を原動機の燃料消費量（投入エネルギー）としたものを排熱利用率とすることもある。

$$\text{排熱利用率} = \frac{\text{排熱利用量}}{\text{排熱回収量}} \text{もしくは} \frac{\text{排熱利用量}}{\text{燃料消費量}}$$

総合効率

CGSから出力された発電電力と排熱利用量を燃料消費量（投入エネルギー）で除したものである。年間平均で60%以上の総合効率が得られるように計画することが望ましい。

ただし、CGSから回収される熱媒体には、蒸気と温水があり、蒸気の場合その圧力が、温水の場合その温度が、各々熱の質を決定し、排熱利用機器を制約する。特に冷房に利用する場合は、熱の質によって排熱利用機器の成績係数に大きな違いを生じるため、CGSは総合効率だけでなく、排熱利用機器の選定、制御・運用も充分考慮して計画することが重要である。

全負荷相当運転時間

発電機を全負荷で運転できる年間の総時間である。CGSの負荷率と年間稼動時間を加味した指標で、省エネルギー性よりも経済性との相関が高い。排熱利用率、もしくは総合効率が低い運転で、全負荷相当運転時間が長ければ長いほど、経済性は良くなる傾向を示す。

たとえば、全負荷相当運転時間は年間で最大8,760時間であるが、民生用の建物は夜間、休日にCGSを停止するケースが多く3,000~5,000時間程度となり、稼働時間の長い産業用のCGSに比べて初期投資の回収は長くなる傾向にある。

コージェネレーション依存率

コージェネレーション依存率（電力）は、建物の年間電力需要量のうちCGSの発電電力で賄った比率を示す指標で発電依存率ともいう。なお、CGSの総発電出力と最大需要電力の比を自家発電依存率という。また、コージェネレーション依存率（熱）は、年間熱需要量のうちCGSから回収された排熱で賄った比率で排熱依存率ともいう。

建物のエネルギー需要に対してCGSの容量が小さいと排熱利用率や総合効率は一般に高くなるが、コージェネレーション依存率が小さいため、建物全体の省エネルギー性は必ずしも高くない。すなわち、機器の稼働率や排熱利用率、総合効率を犠牲にしない範囲で、コージェネレーション依存率の高いシステムとすることが望ましい。

$$\text{コージェネレーション依存率(電力)} = \frac{\text{発電量}}{\text{年間電力需要量}}$$
$$\text{コージェネレーション依存率(熱)} = \frac{\text{排熱利用量}}{\text{年間熱需要量}}$$

省エネルギー性

この指標は、対象建物の電力・熱需要を満たすために必要となる従来システムのエネルギー消費量（一次エネルギー換算）に対して、CGSの採用によるエネルギー消費量（一次エネルギー換算）の削減率を示す。すなわち、建物全体で年間どれだけエネルギーを節約できたかを評価するもので、最も重要な指標と言える。

省エネルギー性は一次エネルギー消費量の比較であるから、商用電力についても一次エネルギーへの換算が必要となる。その際は、沖縄電力を除いた電力会社の火力発電所の発電効率及び送電ロスを考慮した受電端発電効率を35.1%(高発熱量基準)に相当する以下の係数で換算するのが一般的である。

商用電力の一次エネルギー換算係数：10,250kJ/kWh(2,450kcal/kWh相当)

また、余剰電力を商用電力系統に逆潮流する場合は、逆潮流した電力分は電力会社の火力発電所の一次エネルギー投入量を削減できたものとして、同じ係数で一次エネルギー消費量に換算して評価する。

$$\text{省エネルギー性} = \frac{\text{従来システムの年間一次エネルギー消費量} - \text{CGSを採用したときの年間一次エネルギー消費量}}{\text{従来システムの年間一次エネルギー消費量}}$$

1-4-2 経済性

省エネルギー性と同じく経済性の評価も、従来システムとの比較による相対評価で検討する。経済性は省エネルギー性と密接な関係があるものの、必ずしも省エネルギー性の高いシステムが経済性も高いとは限らず、本来期待すべき省エネルギー性や環境保全性など社会的な貢献度も十分に配慮しながら、より経済性の高いシステムを構築することが重要である。

経済性の評価は、従来システムとCGSのイニシャルコストを算出するとともに、エネルギーシミュレーションを行った後、それぞれの年間のランニングコストを算出することが前提となる。すなわち、詳細なシステムの計画・設計を反映した、より正確なエネルギーシミュレーションが、精度の高い経済性評価の重要なポイントと言える。そして、CGSの経済性は、従来システムに対して増加するイニシャルコストをランニングコストの低減メリットでいかに早期に回収できるかで評価される。ここでは、単純回収年数及び年間経常費などの代表的な経済性評価指標について紹介する。

単純回収年数

単純回収年数は、CGSを導入した場合のイニシャルコストの増分を年間運転メリット（ランニングコストの低減額）で除したもので、金利などは加味しない。簡便で定性的な比較に優れているため、初期の段階kから最もよく使われる指標であるが、投資を回収した後の設備や建物の耐用年数に対応する長期間の定量的経済指標には適していない。

$$\text{単純回収年数} = \frac{\text{CGS イニシャルコスト} - \text{従来システムイニシャルコスト}}{\text{従来システムランニングコスト} - \text{CGS ランニングコスト}}$$

年間稼働時間が比較的短い民生用のCGSの単純回収年数はおよそ5年程度、稼働時間の比較的長い産業用のCGSではおよそ3年程度であり、これがCGSの導入意思決定の目安と言われている。

年間経常費

年間経常費は、長期的な経済性の効果を評価することができる最も簡便な指標で、イニシャルコストも含めて単年度当たりの経費に換算して従来システムと比較評価するものである。すなわち、イニシャルコストを耐用年数や金利などを考慮して、1年当たりの金額に換算した固定費に、変動費（ランニングコスト）を加えたもので、以下の式で求められる。

年間経常費 = 変動費 + 固定費

固定費 = 設備費 × 固定比率

$$\text{固定比率} = (1 + Ar)^t \frac{i(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} + \frac{Ar(1-S/C)}{(1-t\sqrt{S/C}) \times t}$$

C: 設備費

S: 残存価格

t: 耐用年数

i: 利率

A: 評価率

r, r': 保険料率、税率

CGSの年間経常費が従来システムの年間経常費に比較して小さいと経済性があるものと評価できる。

ライフサイクルコスト (LCC)

ライフサイクルコストは、長期的な経済指標で、金利や物価上昇、エネルギー単価の上昇も加味し、企画・設計、建設にかかる費用から、運転、保守管理、保険及び廃棄処分費までのすべてを考慮して評価する。

正確なコストや数量など細部にわたる詳細な積算資料がないとよい精度が得られず、考慮しなければならぬ要素も多いため、計算は複雑かつわかりにくいものに成らざるを得ない。そのため、企画や初期の設計段階では使いにくい指標といえる。

以下に計算概念を示す。

$$LCC = C_e F_p + \sum_{j=1}^n F_p (C_r + C_{oj} I_{oj} + C_{mj}) + S F_p$$

LCC: ライフサイクルコスト

F_p : 現価換算率 $= 1 / (1 + i)^n$

C_e : 企画・設計・建設の初期コスト

C_{oj} : j 年度の年間運転費 (ベース年換算)

C_r : 建物の寿命中の部材の修理・更新費

C_{mj} : ベース年換算の j 年次の年間維持費

I_{oj} : j 年度のインフレ率 (金利上昇率)

I: 利息

S: 廃棄処分費または残存価値

n: 寿命

1-4-3 環境保全性

CGSによる排ガス（NO_x、SO_x、ばいじん）・振動・騒音については国の規制ならびに地方自治体の行政指導があるため、十分配慮する必要がある。

CGSは現状では内燃機関によるシステムが多いため、燃焼時CO₂（二酸化炭素）やNO_x（窒素酸化物）を生成する。そのような中、特にCO₂については、最近の環境問題の高まりの中で、システムとして低減効果を評価していくことが重要視されつつある。

CO₂低減効果

評価の対象は、ボイラや冷温水発生機のように建物でCO₂を発生するものだけでなく、電気を消費するものは商用電力の発電所においてCO₂を発生しているものとして評価する。

後者の場合、商用電力は原子力を含む多様な電源で構成されており、その運用も複雑であるため、比較する対象は全電源の平均値とするという考え方がある。しかし、CGSの導入は商用電力のベースロードを担う原子力発電ではなく、ピークとミドル電源に対応する火力発電の発電電力を低減できると評価することも妥当な考え方である。この観点に立脚すれば、CO₂の低減の評価のために使う商用電力の排出原単位は、火力発電基準のものとするのが適切と考えられる。

ライフサイクルアセスメント(LCA)

近年、環境影響評価指標においては、設備の製造から搬入・設置、運用、撤去・廃棄となるまでの機器の生涯に地球温暖化、オゾン層破壊、酸性雨、有害廃棄物、森林の伐採などに及ぼす多面的な影響を、総合的かつ定量的に評価するライフサイクルアセスメント（LCA）という手法の研究が進められている。LCAは、ISO(the International Organization for Standardization:国際標準化機構)の中でISO14040として国際規格となり、国内外でインベントリー分析（各プロセスでの物質やエネルギーのインプット及びアウトプットの詳細な調査）やインパクトアセスメント（環境問題との関連づけと評価手法の確立）の研究が行われている。

しかし、CGSを含め空調・熱源設備においてLCA評価がなされた報告は少ない。これは、現時点では基本的にインベントリー分析が正確に行われオーソライズされていないことが要因としてあげられるが、何よりもこうした燃焼機器の場合、運用時の環境負荷排出量が製造時や廃棄時に比して極めて大きく、ライフサイクルでの環境負荷排出量のほとんどを占めるため、運用時の評価でライフサイクル評価をほぼ代替できるためと考えられる。

一方、LCAの一部として、地球温暖化についての定量的な評価手法として提言されているのがLCCO₂（ライフサイクルCO₂）であり、建築物ではLCCO₂を指標とすることで環境負荷のかなりの部分を定量化し、評価の指針とすることができると考えられている。LCAにおいてインベントリー分析が進みインパクト評価が確立されてくるまで、当面LCCO₂評価が先行し、近い将来一般的な指標として利用されてくるものと考えられる。

1-5 分散型電源・熱源技術計画ツールの必要性

太陽光発電、風力発電、蓄電池とコージェネレーションを組み合わせ、再生可能エネルギーを最大限活用しながら、商用電力の受電量を一定に制御することにより、電力網の安定化にも寄与するマイクログリッドの開発も進められており、分散型エネルギーシステムは将来にわたって重要な役割を担うと考えられる。

一方、建物内部で必要となる熱量を電力量で割った値を熱電比という。熱電比は建物の用途によって異なり、ホテルや病院では大きく、オフィスビルやデパートなどでは小さい値をとる。コージェネレーションシステムによって供給される熱電比が、建物の需要する熱電比と大きく異なる場合、コージェネレーションを導入してもエネルギーを有効に利用することができない。また、住宅など熱需要の大きい時間帯と電力需要の大きい時間帯がずれている建物もあり、このような場合も大きな省エネ効果を期待することはできない⁷⁾。そこで、分散型エネルギーシステムの設計は必要だと考えられる。

しかし、分散型エネルギーシステムの設計問題は最適配置問題と最適運用問題が複合した非常に困難な問題となる。分散型エネルギーシステムの設計する際には、設計条件となるパラメータが多く、また時間ごとの煩雑なエネルギー計算を年間にわたって行う必要がある。例えば、CGSの場合は発電を行なうための原動機(ガスエンジン、ガスタービン、燃料電池など)と、発電時に発生する熱を利用する排熱利用機器(熱交換器、熱で駆動する吸収式冷凍機など)から構成され、発電出力と熱の両方を有効に利用しなければ、本来の効率を発揮できないことから、CGSのシステム構成を決定する問題は重要である。そして、分散型エネルギーシステムの設計は、構成の決定と評価を繰り返す必要があり、設計には労力がかかる。このため、分散型エネルギーシステムの設計においては、パソコン等による支援ツールを活用するのが望ましい。

1-6 従来研究

1-6-1 分散型エネルギーシステムの導入に関する従来研究

盛野ら⁸⁾は、建物のエネルギー需要データを基に、負荷を満たす様々な機器構成で最も投入一次エネルギーが小さくなる組み合わせを算出するプログラムを作成した。また、事務所ビルの電力・冷房・暖房需要データを用いて、投入一次エネルギーが最小となる組み合わせを算出し、考察を行った。加用、大岡ら^{9),10)}はモデル建築物(群)の分散型エネルギーシステムに対し、遺伝的アルゴリズム手法を用いた機器選定の最適化及び年間1次エネルギー消費が最小となる運用計画の決定を行い、最適化手法適用による1次エネルギー消費量削減効果を検討した。奥田英信ら¹¹⁾の『P15-07 マイクロガスタービンの性能試験に基づくコージェネレーションシステムの導入評価』はマイクロガスタービンの負荷特性を考慮し、最適化手法を用いて年間エネルギーコスト最小化した場合コージェネレーションの最適運用方法を示し、経済性と環境性について考察した。それらの論文では、省エネルギー性、環境性、経済性の中から、一つ要素を目的として、分散型エネルギーシステムについて最適化を行った。

吉田聡、佐土原ら^{12),13)}は熱併給発電(CHP)を組み込んだ広域熱供給システムのエネルギー評価を行った。黒木、高口、渡辺ら¹⁴⁾は、家庭用固体高分子形燃料電池CGSの運転方法と地域別の導入効果を検討した。下田、水野ら¹⁵⁾は実態データに基づいて地域熱供給システムの総合エネルギー効率に係わる要因の検証を目的とし、省エネルギー性評価を行った。山口容平ら¹⁶⁾は2棟間の分散型電源システムの省エネルギー性と経済性を検討した。それらの論文では、想定した分散型エネルギーシステムもしくは既存なシステムの導入効果について、評価を行った。

筆者ら^{17),18)}は、北九州学研都市を対象に、エネルギーシステム内部(機器効率)・外部(電気・ガス料金)に存在する要素がシステムの運転状況及び経済性への影響について報告し、最適な分散型電源・熱源技術選択のケーススタディを行った。しかし、それらの研究では、熱源機器の計画や省エネルギー性、経済性、環境性の制約に伴う異なる技術選択への影響を考慮していない。

分散型エネルギーシステムの多目的計画に論文もいくつかあります。吉田、蒲生、横山ら¹⁹⁾は、多目的最適化の導入により、経済性、省エネルギー性、環境性のトレードオフ分析を行いながら、システム構成の計画立案が可能となり実務者にとっても有益な知見が得られることが判明した。この論文では、得られる機器容量は連続値であり、現実に存在しないため、容量が不連続である実在機器を考慮する必要であると考えられる。小原、工藤ら²⁰⁾は、遺伝的アルゴリズムを用いて、燃料電池及びヒートポンプ複合システムの多目的運用計画を行い、各目的関数についてそれぞれの最適化システムの運転パターンの特徴を明らかにしたが、各目的を総括的に考慮していない。

1-6-2 分散型エネルギーシステムの分析ツール

分散型エネルギーシステムの分析ツールはいくつがある。HEATMAP²¹⁾はアメリカのワシントン州立大学が開発された地域分散型エネルギーシステム分析ソフトウェアである。HEATMAPは導入しようとする分散型エネルギーシステムの最適な容量、運転スケジュール、ネットワーク内パイプのサイズまで決定することができる。さらに熱の搬送システムを決め、コスト全体及び環境性などの予測ができる。しかし、これは導入しようとするシステムと技術がある程度確定し、その評価を行うというシナリオである。用途別、規模別の建物に対して技術の最適化はできない。

DER-CAM^{22),23)}はローレンスバークレー国立研究所が開発している分散型エネルギー資源経済導入ツールである。DER-CAMは特定の顧客のエネルギーコストを最小限にするための分散型エネルギーシステムの技術選択を最適化できる。顧客の負荷、燃料価格や分散型エネルギーシステムの仕様などを入力し、DER-CAMが最適の技術組み合わせと顧客の基本的な運転スケジュールを決定する。ツールはアメリカの燃料料金体系や気象条件で開発したもので、日本で応用するために、日本市場を考慮した地域分散型エネルギーシステム最適化の研究開発が求められている。

また、空気調和・衛生工学会が販売している評価プログラムCASCADE²⁴⁾はホテルや病院など5種類の建物用途の負荷データを内蔵しており、環境性、省エネルギー性と経済性を総合的に評価できる。しかし、汎用的なソフトとしてデータは平均的なものであり、気象条件や地域性による各地域負荷の違いが考慮されておらず、平日と休日のタイプ別による区別がなく、ピーク時の負荷も把握できない。ピーク時の負荷が各月のピーク時負荷も直接電力契約量を決定し、コージェネレーションの導入によりピークカットができ、さらに導入側の電力購入コスト削減につながるので、評価する際重要だと思われるが、現実ほとんど考慮されていない。

以上、分散型電源ならびにコージェネレーション導入に関する評価方法及び評価ツールが数多く存在するが、デマンドサイドから導入のメリットと最適な技術選択、システム設計がまだ十分に行われていない。

このような背景の下、本論では、ある特定地域へのエネルギー供給に対して責任を有する主体（例えば、地方自治体、民間企業、特定非営利活動法人など）の各要求を満たすために、数理計算プログラミング言語GAMSを用いて、分散型エネルギーシステムの省エネルギー性、経済性、環境性を考慮した多目的最適化モデルを開発した。

本モデルの特徴としては、幅広い且つ容量が離散である実在分散型電源・熱源機器のデータベースから、各目的により、分散型電源機器と熱源機器の種類、容量、協調運転などを考慮し、システムの計画立案や評価が効率的かつ短時間に実行可能である。

1-7 論文の構成

本論文は、本章の第1章「従来研究と研究の位置づけ」と第8章「結論及び展望」を含め、全8章から構成されている。表1-7-1では、本論文の構成を示す。

第一章「従来研究と研究の位置づけ」では、エネルギー・環境政策や都市政策に加えて、新成長戦略や東日本大震災からの復興についても考慮しながら、自立・分散型のエネルギーシステムの普及及び推進について、その重要性や必要性を指摘した。分散型エネルギーシステムの設計問題は最適配置問題と最適運用問題が複合した非常に困難な問題となる。分散型エネルギーシステムの設計する際には、設計条件となるパラメータが多く、システム構成の決定と評価を繰り返す必要がある。そのため、分散型エネルギーシステムの設計においては、パソコン等による支援ツールを活用するのが極めて重要であると指摘した。

第二章「北九州市学研都市における地域エネルギーシステムの利用状況及び経年評価に関する研究」では、分散型電源・熱源システムの実際運転状況を把握することを目的とする。北九州学術研究都市に導入された燃料電池、ガスエンジン及び太陽光発電などを組み合わせた分散型エネルギーシステムを研究対象として、2010年の利用状況を調査した。各電源・熱源設備の性能評価を行った。

第三章「分散型電源・熱源技術の多目的計画に関する理論」では、分散型電源・熱源技術の導入問題においては、省エネルギー性、経済性、環境性の目的関数を同時に考慮すると、複数の目的関数を持つ多目的最適化問題となると指摘した。このような多目的最適化問題を解決するために、多目的解析理論を構築した。構築した理論に基づいて、分散型エネルギーシステムの省エネルギー性、経済性、環境性を考慮した多目的最適化モデルを開発した。

第四章「北九州市学研都市における分散型電源・熱源技術の導入効果及び要因分析に関する」を題とした。分散型電源・熱源技術の設計は、計画によって導かれた電源・熱源技術の種類、容量、運転制御などの基本条件により進めることになるが、これらの基本条件が変わった場合はその影響度に応じてどの段階まで立ち戻るか判断する必要がある。第三章で述べた理論を用いて、北九州学研都市を対象として、定量的な多目的達成度を設定し、分散型電源・熱源技術の種類、容量、運転制御の決定により、それぞれの影響を検討した。また、経済性要因による技術導入の影響を加味した。

第五章「蓄電池と連携したガスコージェネレーションシステムの導入効果に関する研究」を題とした。発電効率を高めるように、ガスコージェネレーションシステムは全年満負荷で運転する場合に対して、電力需要が少ない夜には大量な余剰電力を系統に売電することが発生した。このような状況に対して、本章では、蓄電池の導入を提案し、負荷が低い夜に大量な余剰電力を蓄えて、負荷が高い昼に放電する。また、北九州学研都市を対象として、電力・熱負荷、燃料料金、電源技術・熱源技術の仕様など入力データを基づいて、ガスコージェネレーションシステムに、蓄電池を電力貯蔵装置として、その導入効果を検討した。

第六章「太陽熱発電システムの導入効果に関する研究」では、北九州学術研究都市にある燃料電池が故障したことに対して、他の設備が変更しないで、同じ容量の太陽熱発電設備と燃料電池を入れ替えようと提案した。そして、現行システムと比較し、省エネルギー、経済性、環境性の効果について、試算を行った。また、対象地域に太陽熱発電及びガスエンジンを別々に導入し、従来型システムを比較システムとして設定し、比較システムに対する省エネルギー性及び経済性の最適化計算を行い、発電設備の最適容量を求めた。

第七章「北九州市学研都市における分散型電源・熱源機器の選定に関する多目的最適化」では、北九州学研都市を対象として、詳細なデータベースを構築し、種々の制約条件下において複数の評価指標に基づいて各設備の組み合わせの良し悪しを総合的に比較検討（価値判断）し、容量が不連続である実際の分散型電源・熱源機器の組み合わせを策定することを目的として、ケーススタディを行った。北九州学研都市の場合は、幅広い代替システムや条件下で、省エネルギー性、環境性、経済性のうち、どちらを優先するかにより、採用されるエネルギーシステムの構成がどのように異なるかを明らかにした。

表 1-7-1 論文の構成

研究背景	第一章 従来研究と研究の位置づけ
実態研究	第二章 北九州市学研都市における地域エネルギーシステムの利用状況 に関する研究
理論研究	第三章 分散型電源・熱源技術の多目的計画に関する理論
応用研究	第四章 北九州市学術研究都市における分散型電源・熱源技術の導入効果及び 要因分析に関する
	第五章 蓄電池と連携したガスコージェネレーションシステムの導入効果 に関する研究
	第六章 太陽熱発電システムの導入効果に関する研究
	第七章 分散型電源・熱源機器の選定に関する多目的最適化
結論	第八章 結論と展望

参考文献

1. 山地憲治 編著：分散型エネルギーシステム，エネルギー・資源学会出版
2. 日本エネルギー学会編：天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2008，通産資料出版会
3. 一般財団法人建築環境・省エネルギー機構（IBEC）：持続可能な都市・地域づくりに貢献する分散型エネルギーシステム・スマートエネルギーネットワーク—多様な間接的便益（NEB）を考慮した事業スキームの構築に向けて，2012年6月
4. 日本コージェネレーションセンター編：コージェネレーション総合マニュアル，日本工業出版
5. 田中洋一：数理最適化によるコージェネレーションシステムの設計と運用に関する研究
6. 名田、西岡、徳山、林：分散型電源
7. ウィキペディアフリー事典：コージェネレーション <http://ja.wikipedia.org/wiki>
8. 盛野幸一，細野英之：最適化手法を用いたエネルギーシステム設計 事務所ビルにおける一次エネルギー最小化，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2 分冊，pp.1397～1398，2007.8
9. 加用現空，大岡龍三：複合街区における分散エネルギーシステムの面的活用に関する GA 最適化，日本建築学会環境系論文集，第 649 号，pp.297～303，2010.3
10. 加用現空，大岡龍三：遺伝的アルゴリズムを用いた分散エネルギーシステム最適計画手法の開発，日本建築学会環境系論文集，第 641 号，pp.869～876，2009.7
11. 奥田英信，笠木伸英ら：P15-07 マイクロガスタービンの性能試験に基づく CHP システムの導入評価，日本機械学会，No.02-7,第 8 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集，pp.43-46，2002
12. 吉田聡，佐土原聡：日本における熱併給発電所(CHP) を組込んだ広域熱供給システムのエネルギー評価に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第 529 号，pp.85～92，2000.3
13. 潮田尚史，吉田聡，佐土原聡：高密度地域における CGS を用いた最適エネルギーシステムの省 CO₂ ポテンシャル評価，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1 分冊，pp.793～798，2008
14. 黒木洋，清水章太郎，高口洋人，渡辺俊行：家庭用固体高分子形燃料電池 CGS の運転方法と導入効果：家庭用分散型電熱源の導入効果に関する研究その 1，日本建築学会環境系論文集，第 610 号，pp.67～73，2006.12
15. 名古田知志，下田吉之，水野稔：地域熱供給システムの省エネルギー性評価に関する研究 全国 123 プラントのデータを基にした要因分析と CGS 評価手法の検討，日本建築学会環境系論文集，第 613 号，pp.87～93，2007.3
16. 山口容平，下田吉之，水野稔：CGS による廃熱供給ネットワークの研究・その 2，第 22 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集，pp. 123～128，2003.6
17. 楊涌文，高偉俊等：分散型エネルギーシステムの経済的な運転最適化モデルの構築と北

- 九州学研都市におけるケーススタディ, 日本建築学会環境系論文集, 第 621 号, pp.77
~82, 2007.11
18. 高偉俊, 楊涌文等: 分散型エネルギー技術の選択手法及びその利用に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 650 号, pp.389~395, 2010.4
 19. 吉田修, 蒲生恵司, 伊東弘一, 横山良平, 橋場隆行: 多目的最適化手法に基づくエネルギー供給システムの構造シンセシス, 日本機械学会論文集(B編)70巻699号, pp.328-335, 2004.11
 20. 小原伸哉, 工藤一彦, 遺伝的アルゴリズムによる燃料電池及びヒートポンプ複合システムの多目的運用計画, 空気調和・衛生工学会論文集, No.91, pp.65-75, 2003年10月
 21. 阮応君, 高偉俊, 龍有二: 地域エネルギーシステムにおけるエネルギー及び環境特性に関するシミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1 分冊, pp.529~530, 2003
 22. Siddiqui, A.S., etc.: Distributed Energy Resources Customer Adoption Modeling with Combined Heat and Power Applications, Berkeley Lab report, LBNL-52718, 2003
 23. Marnay, C.,etc.: Microgrids in the Evolving Electricity Generation and Delivery Infrastructure, Berkeley Lab report, LBNL-59544, 2006
 24. 空気調和・衛生工学会編: 都市ガスによるコージェネレーション評価プログラム CASCADE,2003

第二章 北九州市学研都市における地域エネルギーシステムの利用状況に関する研究

2-1 はじめに

2-2 研究対象

2-2-1 地域エネルギーシステム仕様概略

2-2-2 地域エネルギーシステムの運転管理

2-3 運転状況

2-3-1 エネルギー消費

2-3-2 発電設備の分析

2-3-3 熱源設備の分析

2-4 冷暖房供給と日平均気温の関係

2-5 省エネルギー率

2-6 結論

2-1 はじめに

近年では、地球温暖化の防止と経済成長の持続という相対立する命題の中で、環境とエネルギーの調和に取り組む必要に迫られている。日本においても、京都議定書の発効により温室効果ガス排出量を削減する目標が定められている。

この背景を踏まえ、北九州学術研究都市では、教育研究活動に必要なエネルギーや水を、環境に配慮しつつ効率的に供給するために様々な工夫をしている。中でも北九州市立大学国際環境工学部は、環境負荷の低減をテーマに、光・風・熱等の自然エネルギーを最大限に利用するとともに、水やエネルギーを無駄なく利用するためのシステムを積極的に取り入れている。さらに、周辺の自然生態系や水の循環を復元することを目指したエコロジカルなキャンパス整備を実践している。

学術研究都市では、環境にやさしい新エネルギーの供給の仕組みを取り入れている。環境エネルギーセンターに設置した燃料電池やガスエンジン発電装置によるコージェネレーションと北九州市立大学屋上の太陽光発電からなる複合エネルギーシステムを採用し、電力と熱を供給するとともに、エネルギー消費量と二酸化炭素の排出量の低減を図っている。発電の際に排出される熱を空調などにも利用することにより、電気と熱の両方を供給する仕組みである。

本章では北九州学研都市に導入された地域エネルギーシステムを対象として、2010年の運転状況を調査し、太陽光発電、燃料電池、ガスエンジンの発電電力量、ガス使用量など基本データをまとめ、年間発電、排熱利用量、発電効率、排熱回収率などを評価した。さらに、排熱利用の側面より各排熱利用設備の性能評価を行った。

2-2 研究対象

環境エネルギーセンターから供給される電力、熱の対象施設（図2-2-1、図2-2-2）は学術研究都市内にあるすべての施設ではなく、電力は北九州市立大学、体育館棟、学術情報センターである。また、熱は北九州市立立大学、体育館棟、学術情報センター、会議場、産学連携センター、共同研究開発センターである。その他の学研都市内の施設に対しては電力、熱供給はおこなわれていないため、調査対象に含まない。

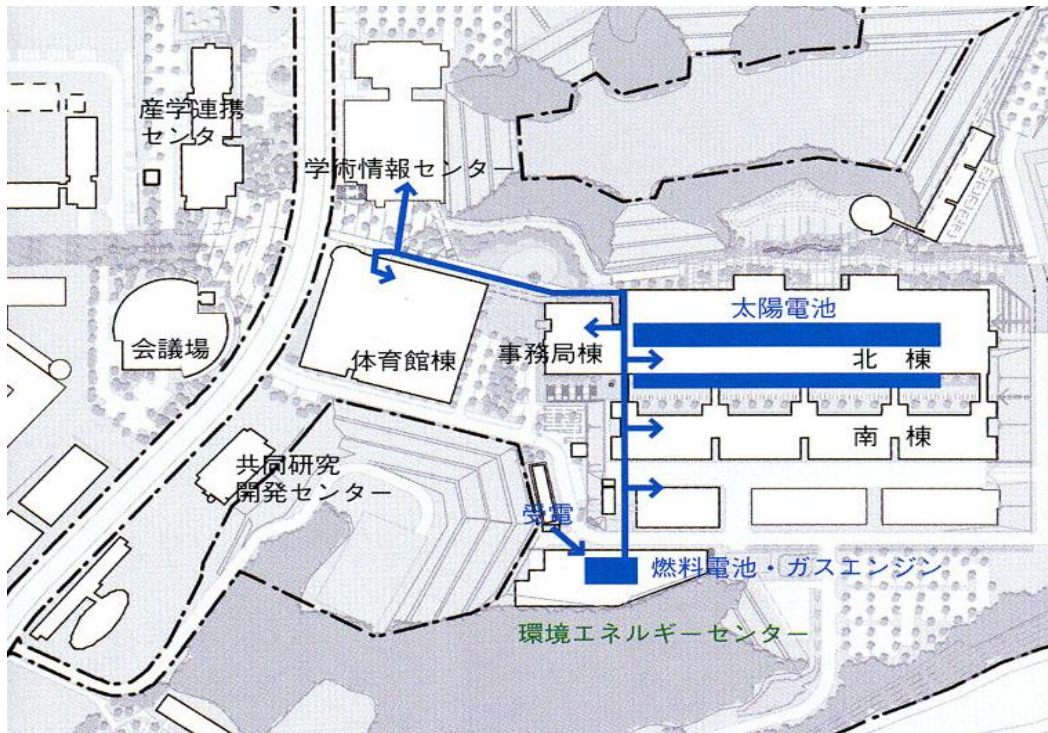


図 2-2-1 電力の対象施設

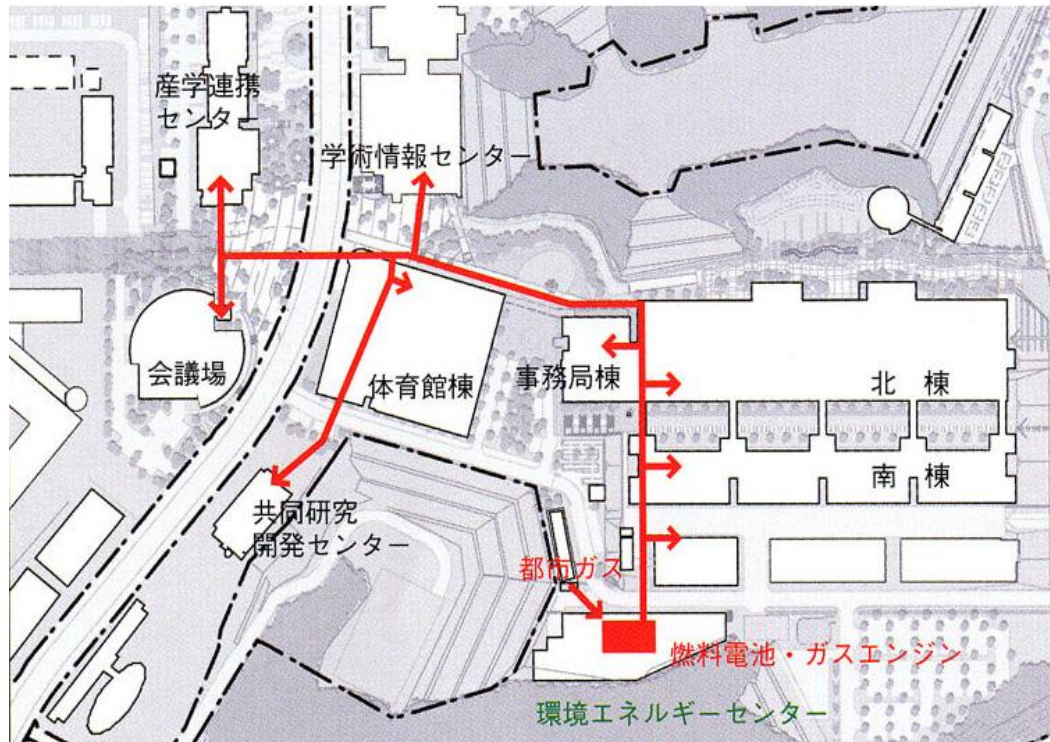


図 2-2-2 熱の対象施設

2-2-1 地域エネルギーシステム仕様概略

北九州学術研究都市では、燃料電池やガスエンジン発電装置によるコージェネレーションと北九州市立大学屋上の太陽光発電からなる複合エネルギーシステムを採用する。分散型エネルギーシステムの各設備仕様について表 2-2-1 にまとめた。コージェネレーションの容量は燃料電池が 200kW、ガスエンジンが 160kW であり、発電効率は 100% 発電時にそれぞれ 40% と 28.7% である。排熱の利用について、その熱回収方法は発電時に出る約 550°C の蒸気から燃料電池では 90°C 高温水と 50°C 低温水をつくり、ガスエンジンでは 90°C の高温水を作る。これを給湯や空調用の熱源に当てて排熱を利用している。これらの排熱回収効率は燃料電池が 90°C、50°C 温水合わせて 20% であり、ガスエンジンが 47.7% である。

太陽電池は、純度の高いシリコンの単結晶を薄切りにした単結晶シリコン太陽電池と製造コストを下げるために金属シリコンを鋳型で多結晶化させた多結晶シリコン太陽電池がある。他に非結晶のアモルファスシリコン太陽電池や結晶型と組み合わせたハイブリッド型がある。北九州市立大学では、北棟のひさしに単結晶型 (250cm×75cm) 156 枚と屋上の傾斜台に多結晶型 (132cm×89.5cm) 864 枚を設置している。

表 2-2-1 地域エネルギーシステム仕様概略

設備	天然ガスコージェネレーション設備		太陽光発電設備	
	燃料電池(リン酸型)	ガスエンジン	多結晶シリコン (屋上設置) 型	単結晶シリコン (建材一体) 型
設備容量	200kW	160kW	129.6kW	23.4kW
発電効率	40.0% (100% 発電時)	28.7% (100% 発電時)	0.133	0.072
熱回収効率	20.0% (90°C 高温水) 20.0% (50°C 低温水)	47.7% (90°C 高温水)	なし	
ガス消費量	43.3Nm ³ /h (都市ガス 13A)	44.1Nm ³ /h (都市ガス 13A)	なし	
排熱利用 設備	<ul style="list-style-type: none"> ・排熱利用型ガス焚冷温水発生機 ・貯湯槽 ・暖房用熱交換機 ・給湯予熱用熱交換器 ・放熱用交換器 		なし	

2-2-2 地域エネルギーシステムの運転管理

表 2-2-2 に地域エネルギーシステムの運転管理を示す。季節による、各設備の運転負荷、運転時間は設定された。2010 年における、冬季は 1 月 1 日～ 4 月 16 日、11 月 16 日～12 月 31 日であり、中間期は 4 月 17 日～ 5 月 23 日、10 月 30 日～ 11 月 15 日であり、夏季は 5 月 24 日～ 10 月 29 日である。運転状況は燃料電池 24 時間通年運転であるのに対して、ガスエンジンは 8 時～22 時の間の 14 時間の運転であり、中間期と日曜、祝日には運転停止である。また、ガスエンジンは全負荷で運転しているのに対して、燃料電池は夏季に 200kW と全負荷で運転を行い、中間期と冬季に 125kW と部分負荷で運転である。冷暖房供給については排熱利用型冷温水発生機 2 台 (RH-1、RH-2) とガス焚吸収式冷温水発生器 1 台 (RH-3) である。RH-2 は 600USRT (冷凍トン) であり、RH-1、RH3 の 200USRT と比べて 3 倍の冷凍能力を持っている。基本的には RH-1 を稼動し、RH-2、RH-3 は冷暖房の需要が多くなる時に稼動してサポートする運転方式を取っている。排熱利用する貯湯槽の温度が 60℃以下に下がるときに、ガスボイラーの運転は始まる。学研都市における各季節のエネルギーシステムフロー図を図 2-2-3、図 2-2-4、図 2-2-5 に示す。

表 2-2-2 地域エネルギーシステムの運転管理

設備	運転時間、負荷設定					
	夏季		中間期		冬季	
	平日、土	日、祝日	平日、土	日、祝日	平日、土	日、祝日
ガスエンジン	am8:00-pm10:00	停止	停止		am8:00-pm10:00	停止
	160kW	0	0		160kW	0
燃料電池	通年運転					
	200 kW		125 kW		125 kW	
排熱利用型冷温水発生機 (RH-1)	24 時間		停止		24 時間	
	200USRT		0		200USRT	
排熱利用型冷温水発生機 (RH-2)	24 時間		停止		24 時間	
	600USRT		0		600USRT	
ガス焚吸収式冷温水発生機 (RH-3)	24 時間		停止		24 時間	
	200USRT		0		200USRT	
冷温水発生機の運転先設定	冷温房需要量：小⇒大					
	RH-1⇒RH-2⇒RH-1,RH-2⇒RH-2,RH-3⇒RH-1,RH-2,RH-3					
ガスボイラー	貯湯槽の温度が 60 度以下の場合に運転する					

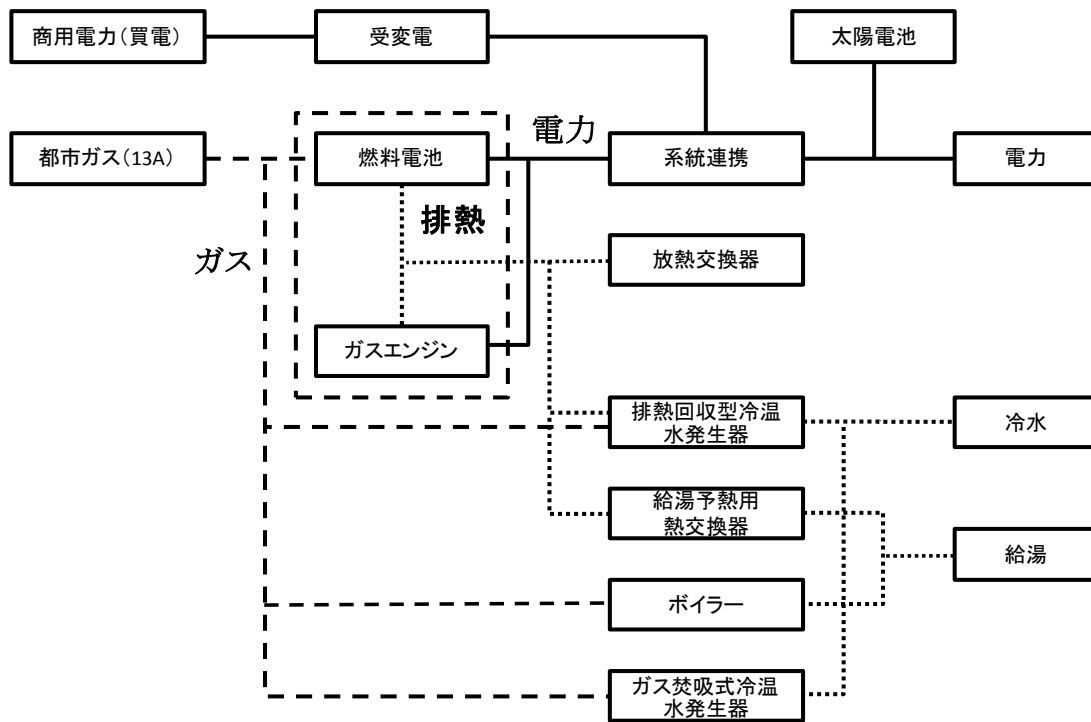


図 2-2-3 夏季のエネルギーシステムフロー

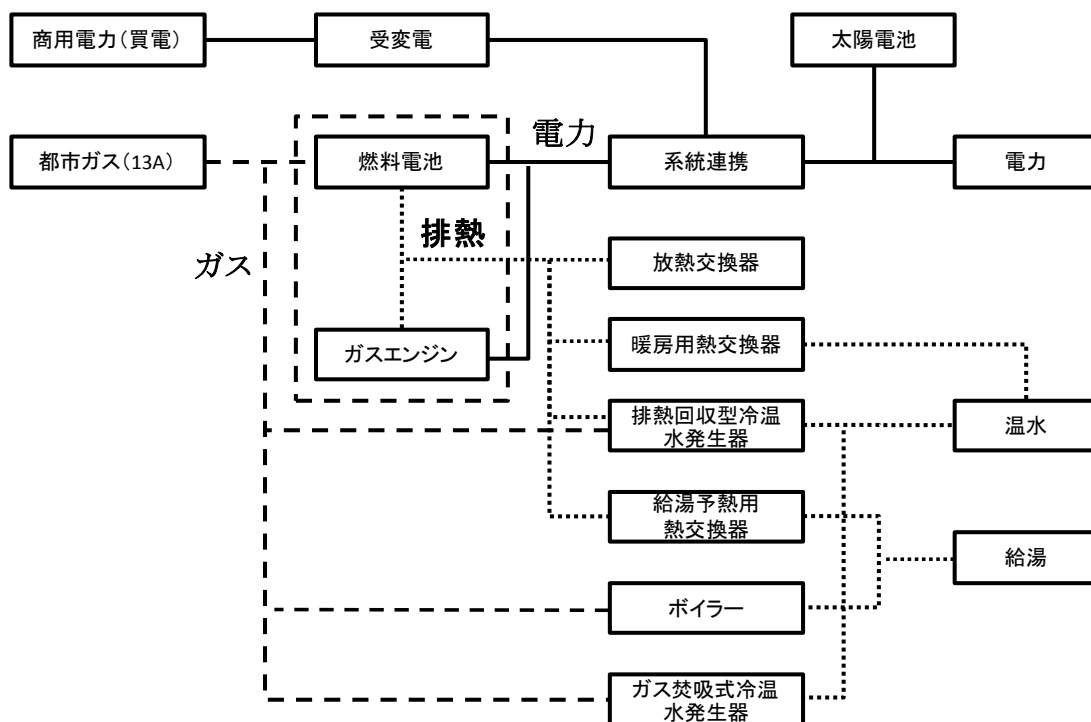


図 2-2-4 冬季のエネルギーシステムフロー

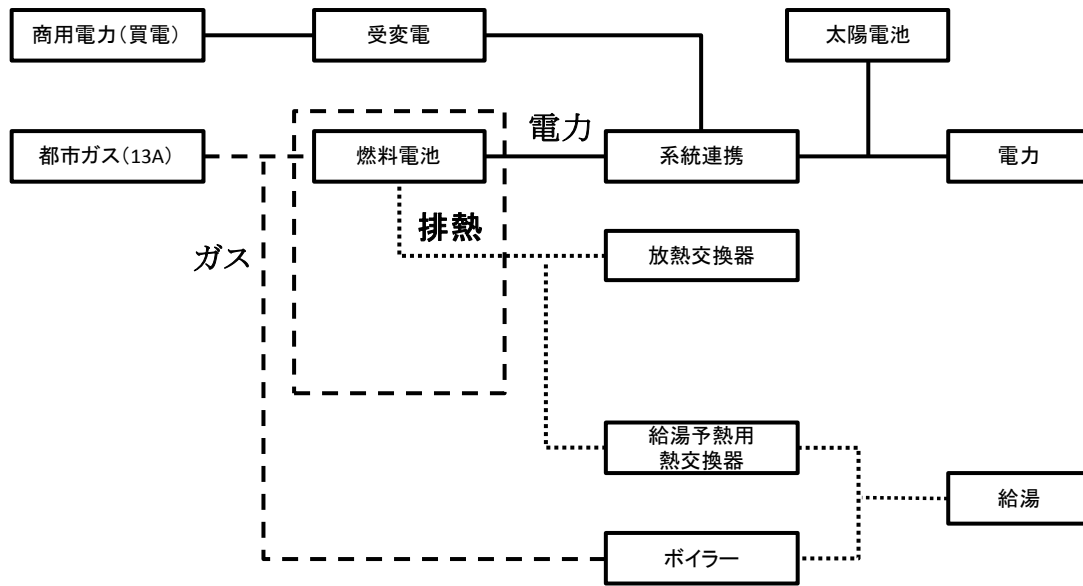


図 2-2-5 中間期のエネルギーシステムフロー

2-3. 運転状況

2-3-1 エネルギー消費

図 2-3-1 には 2010 年毎月の地域エネルギーシステムのガス消費量を示す。全体では 8 月のガス使用量が最も大きく、151801.7m³である。続いては 7 月、1 月である。各設備を見ると、ガスエンジンの毎月ガス使用量は中間期を除き大きなばらつきがない。中間期と冬季と比べると、夏季には燃料電池が全負荷で運転しているため、ガス使用量がやや高い。また、ガス使用量により、冬季には RH-3 があまり稼動しないこと見られる。夏季の冷房需要の増加に伴い、RH-3 を稼動している場合は多くなる。

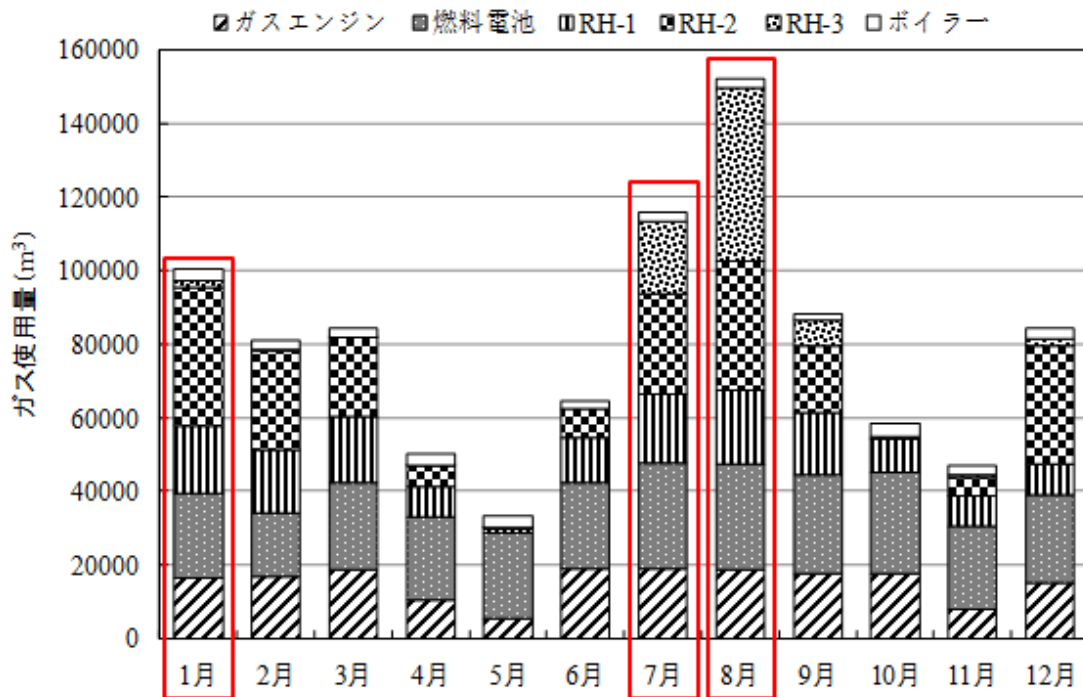


図 2-3-1 2010 年毎月の地域エネルギーシステムのガス消費量

2-3-2 発電設備の分析

図 2-3-2 には 2010 年毎月の地域エネルギーシステムの発電量及び受電量を示す。学研都市の電力は主に商用電力により供給している。全体ではガスエンジン、燃料電池、太陽光発電、商用電力の割合はそれぞれ 8.8%、18%、2.2%、71%である。また、夏季のほうが冬により総電力消費量が多い。4月17日~5月23日、10月30日~11月15日は中間期であり、ガスエンジンの運転を停止しているため、4月、5月、11月には発電量が少ない。ほかの月はガスエンジンの発電量がほとんど変わっていない。燃料電池は2月21日~2月25日に点検を行い、運転していなかったため、2月の発電量は少ない。

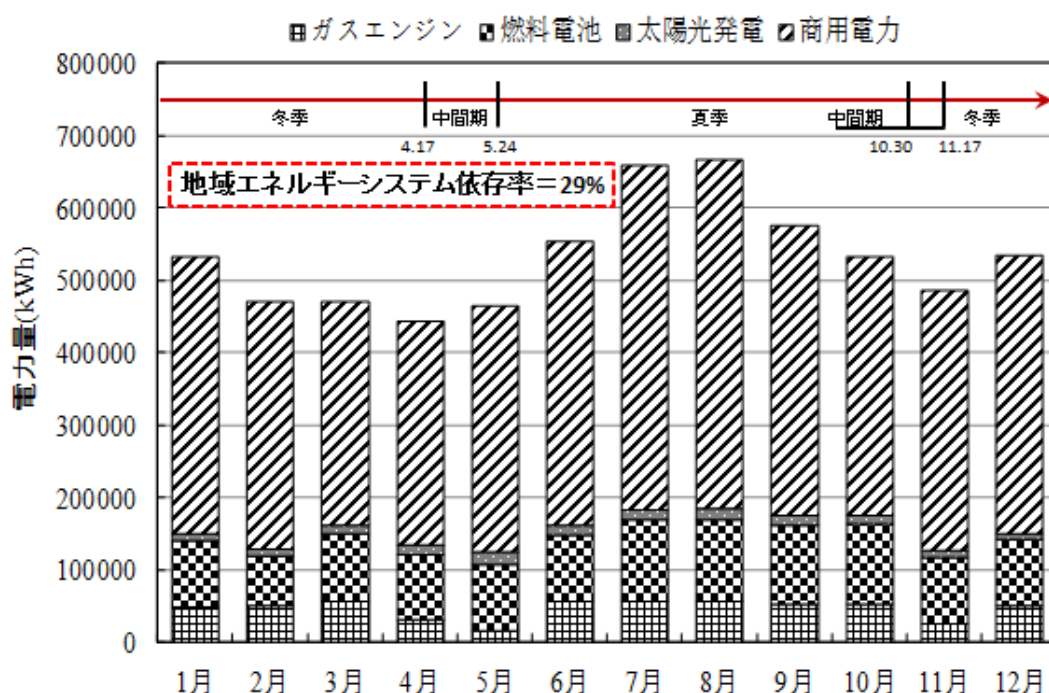


図 2-3-2 2010 年毎月の地域エネルギーシステムの発電量及び受電量

図 2-3-3 にはコジェネレーションの発電効率を示す。燃料電池システムが優先運転されているため、燃料電池の発電時間はガスエンジンより多かった。また、燃料電池の発電効率が 30%~35%の時間数は 6687 時間で、全体運転時間 (8632 時間) の 77%を占めた。それに対して、ガスエンジンの発電効率が 20%~30%の時間数は 3552 時間で、全体運転時間 (3816 時間) の 93%であった。

熱回収効率はガスエンジンと燃料電池から排熱、発生した熱エネルギーがどの程度回収されることを示すパラメータである。コージェネレーションシステムにとって、熱回収効率は省エネルギー性能を表している。図 2-3-4 には 2010 年の熱回収効率を示している。ガスエンジンの熱回収効率の平均値は約 39.8%である。燃料電池の平均値は約 6.8%である。ガスエンジンは稼働時間が少ないが、高い熱回収効率を示している。燃料電池は稼働時間が長い、そのほとんどが 10%以下の熱回収効率を示している。

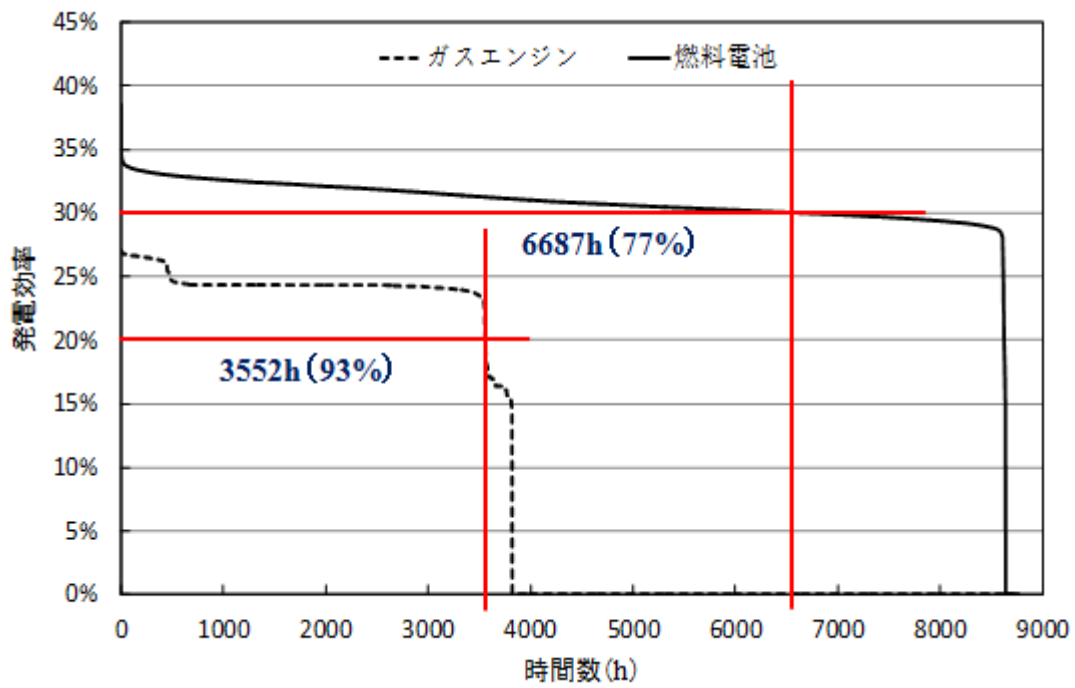


図 2-3-3 発電効率

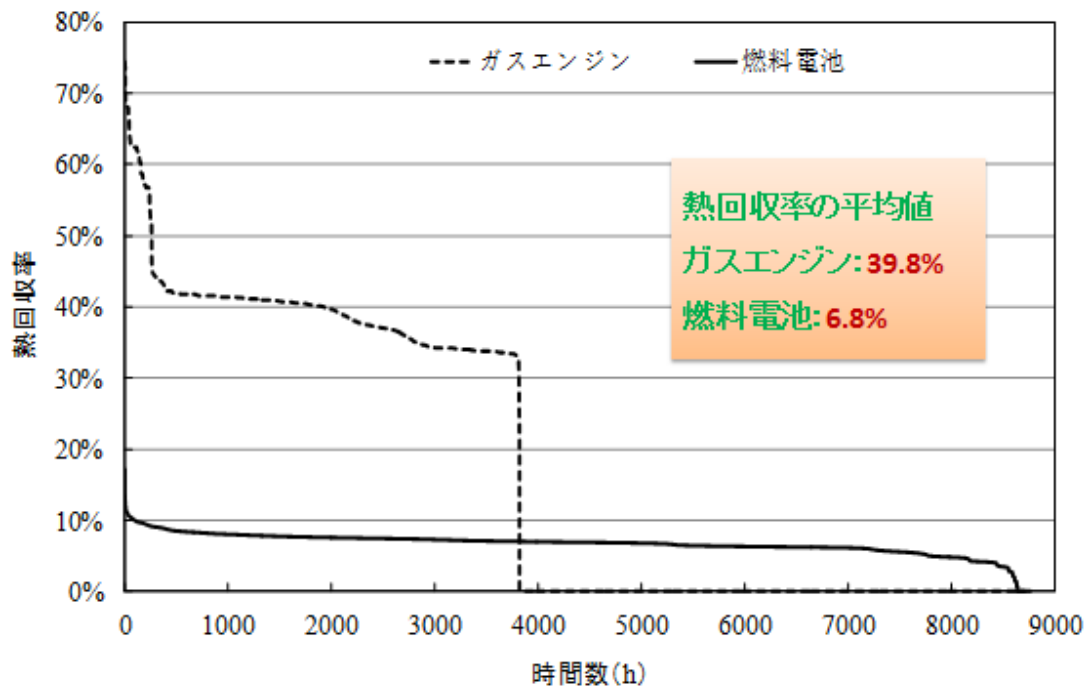


図 2-3-4 熱回収効率

2-3-3 熱源設備の分析

図 2-3-5 には地域エネルギーシステムの排熱利用状況を示す。排熱利用設備は暖房用熱交換器、排熱利用型冷温水発生機 (RH-1、RH-2)、貯湯槽四つである。全体をみると、夏季のほうが冬季により排熱利用量が大きい。その原因として、まず夏季に燃料電池全負荷で運転し、総排熱量も大きくなったと考えられる。冬季に排熱は主に貯湯槽と暖房用交換器に利用されている。冷温水発生機は排熱をあまり利用できていないことが見られる。夏季に冷房需要が増加するとともに、RH-2 は稼動して、RH-1 をサポートする時間数が多くなるため、RH-1、RH-2 の排熱利用量も著しく増加する。

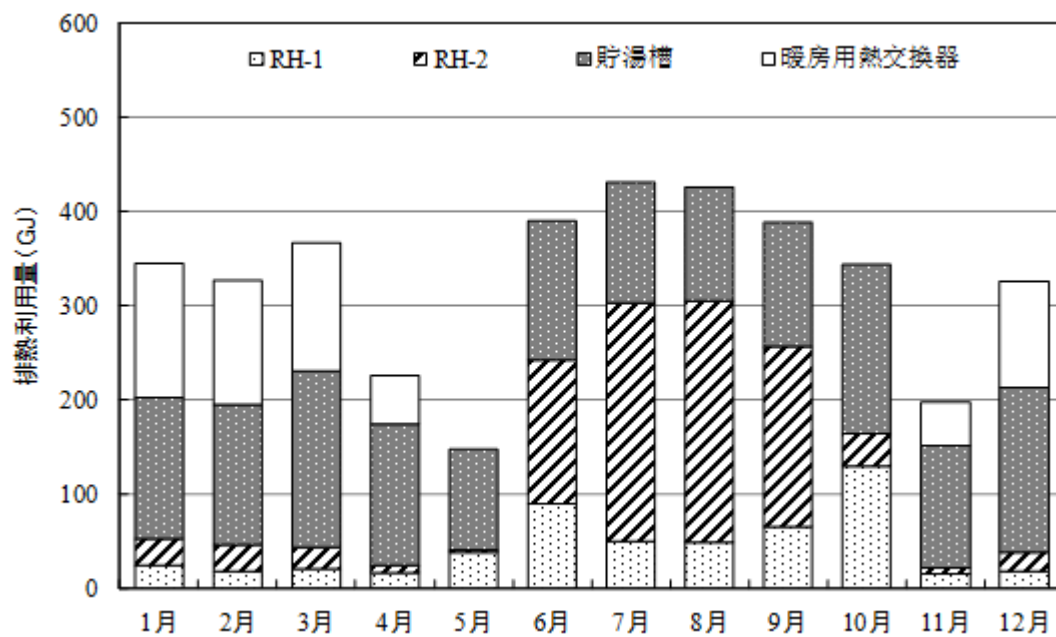


図 2-3-5 排熱利用量

2-4 冷暖房供給と日平均気温の関係

地域エネルギーシステムの冷暖房供給は暖房用熱交換器、排熱利用型冷温水発生機 (RH-1、RH-2)、ガス焚吸収式冷温水発生機 (RH-3) を含めている。図 2-4-1 には各設備の冷暖房供給量を示している。全体として、冷暖房は主に RH-1、RH-2 から供給されている。夏季の冷房供給量は冬季の暖房供給量の 1.6 倍である。冷暖房の供給は月平均温度の変化に伴い、変わっている。8 月の月平均温度が 29.3℃ と最も高い値であり、冷房供給も約 3689.1GJ と最大値である。図により、RH-2 の冷暖房供給量は約 RH-1 の約 2 倍の値を示している。また、RH-1 は中間期を除きほとんど稼働しているのに対して、RH-2 は稼働していない時間が多く、熱供給量の大きさも月によって大きく変わる。RH-1、RH-2 で冷暖房供給不足が発生した場合は RH-3 を稼働するという運転方式を設定されている。図より、2010 年に RH-3 は稼働する時間数が非常に少ないことが見られる。

本研究では、日平均気温を説明変数に、地域エネルギーシステムの冷暖房供給量を目的変数にとり、季節により回帰分析を行った。図 2-4-2 には回帰分析の結果を示している。どの季節においても決定係数 0.75 以上と良好な回帰式を得られた。日平均気温は冷暖房供給の増減に影響が大きいことがわかった。

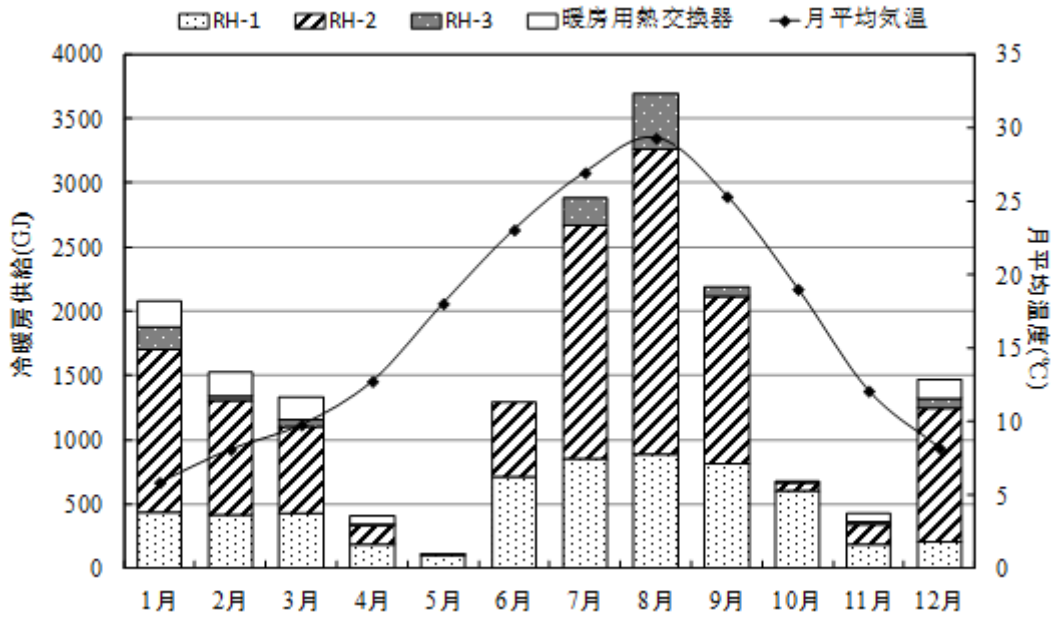


図 2-4-1 各熱源設備の冷暖房供給

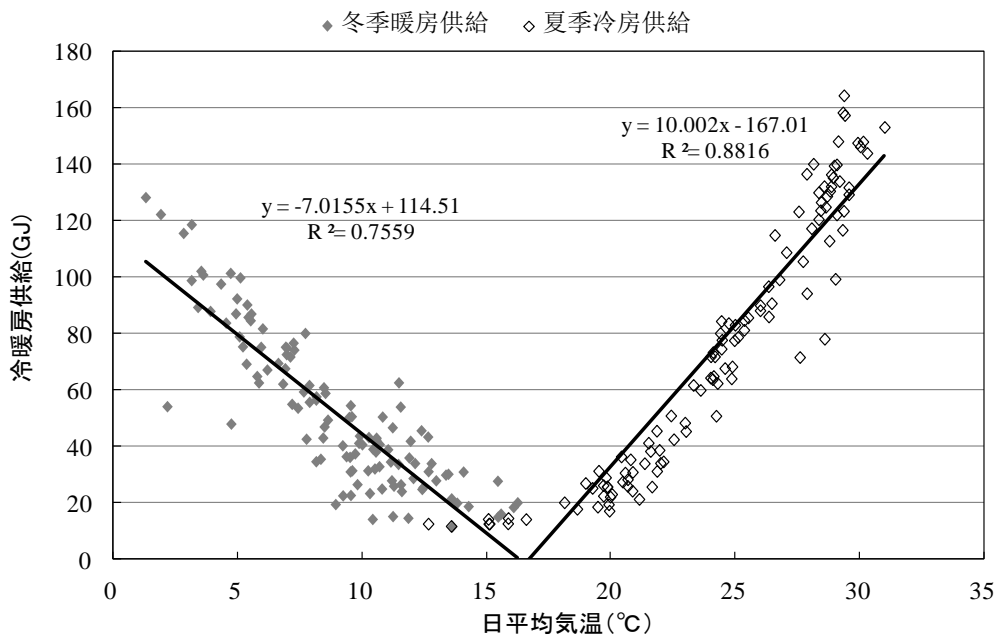


図 2-4-2 冷暖房供給と日平均気温の関係

2-5 省エネルギー率

本研究では、省エネルギー率を計算するため、系統電力により供給エリアへ電力を供給とし、ボイラー、蒸気吸収型冷凍機を用いて、供給エリアへ温熱、冷熱を供給とし、従来エネルギー供給システムとする。また、表 2-5-1 に示した換算係数を用いて、各エネルギー消費量を発熱量に換算し、次の式による省エネルギー率を得る。

$$R = \frac{P_{total}^{con} - P_{total}^{der}}{P_{total}^{con}} \quad (1)$$

ここに、 P_{total}^{con} は従来システムの一次エネルギー消費量、 P_{total}^{der} は地域エネルギーシステムの一次エネルギー消費量である。

表 2-5-1 各エネルギー発熱量の換算係数

エネルギー	発熱量
電力	9.97MJ/kwh
都市ガス	46.0655MJ/m3

図 2-5-1 には地域エネルギーシステム毎月の省エネルギー率を示す。中間期にガスエンジンと排熱利用型冷温水発生機の運転を停止しているため、省エネルギー率は低い。ほかの月にはあまり変わっていない。また、年間省エネルギー率は 5.7% であり、高い値といえない。

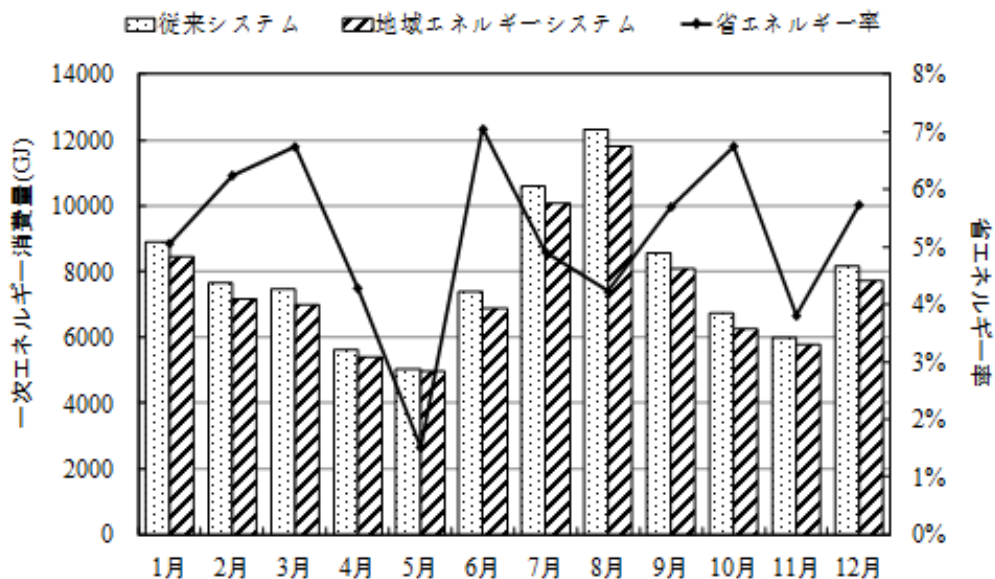


図 2-5-1 2010 年各月の省エネルギー率

2-6 結論

- (1) 2010年電力供給割合として、燃料電池、ガスエンジン、太陽光発電と購入電力量はそれぞれ18.0%、8.8%、2.2%、71.0%である。
- (2) 2010年燃料電池の発電効率は30%前後を維持している。設計値より10%ほど低い。ガスエンジンの発電効率は約23%を維持している。こちらは比較的に設計値に近い。
- (3) 冬季に排熱は主に貯湯槽と暖房用交換器に利用されている。冷温水発生機は排熱をあまり利用できていないことが見られた。
- (4) 2010年、分散型エネルギーシステムにより、約5.6%の年間省エネルギー率を実現している。

第三章 分散型電源・熱源技術の多目的計画に関する理論

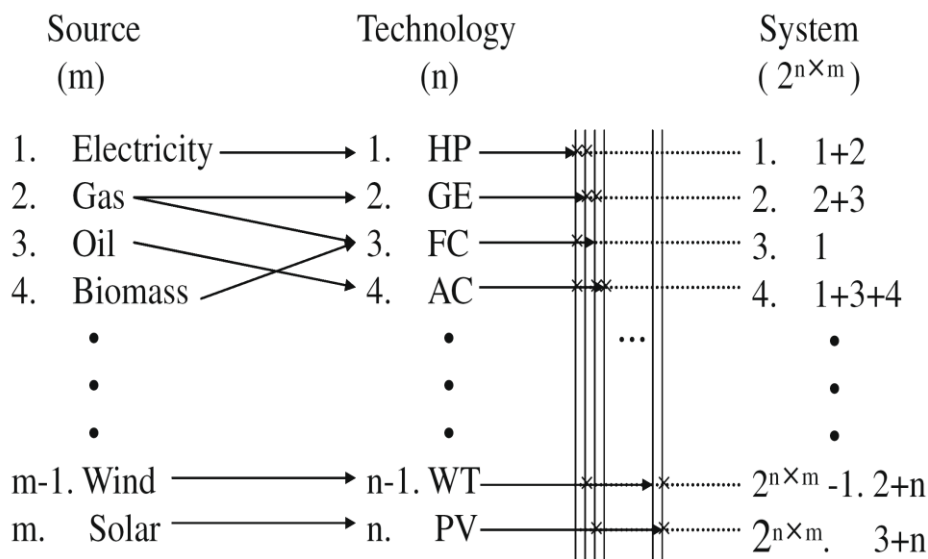
- 3-1 はじめに
- 3-2 分散型電源・熱源技術の計画手順
- 3-3 分散型電源・熱源技術の多目的計画における定式化
 - 3-3-1 目的関数
 - 3-3-2 制約条件
 - 3-3-3 パラメータの設定
- 3-4 単目的の最適化問題の解法
- 3-5 多目的最適化の解法アルゴリズム
 - 3-5-1 パレート最適解
 - 3-5-2 ε -制約法
- 3-6 多目的分析評価の計算フロー
- 3-7 蓄電池の最適化計画における定式化
 - 3-7-1 目的関数
 - 3-7-2 制約条件

3-1 はじめに

近年では、分散型エネルギーシステムは、省エネルギー性や環境保全性に貢献し、経済性においても早期に初期投資の回収が可能になるなど大きなメリットを創出している。しかし、無条件にその有効性が発揮されるわけではなく、分散型エネルギーシステムの企画設計段階において、省エネルギー性、経済性、環境保全性などの考慮すべき要素を総括的に達成することは極めて困難である。その原因としては、ある目的を良くするために、他のどれかの目的を悪くせざるを得ないという競合関係（トレードオフの関係）が内在する状況に陥る。したがって、このような複数の評価基準が存在し、かつ複数の評価基準が互いにトレードオフの関係にある問題を解決することが重要となる。

また、現在太陽電池（PV）、風力発電（Wind）、燃料電池（FC）等を代表する多くの分散型エネルギー技術が開発されている。また、排熱を利用する吸収式冷凍機（AC）、ヒートポンプ（HP）等の技術とあわせて、多くのシステム組み合わせを作り出している。燃料、技術及びそれらに構成されるシステムを考えると、図3-1-1に示すように、計算できないほどの組み合わせがある。ユーザとして、電力需要は系統電力か自家発電か、熱需要は従来のボイラか排熱利用か、多様な選択を強いられている。どのように適切なシステムモデルを選ぶのかは、ユーザにとっても、設計者にとっても、難しい選択になる。

そこで、本論では、ある特定地域へのエネルギー供給に対して責任を有する主体（例えば、地方自治体、民間企業、特定非営利活動法人など）の各要求を満たすために、ε-制約法を用いて、分散型エネルギーシステムの省エネルギー性、経済性、環境性を考慮した多目的最適化モデルを開発する。



AC: Absorption chiller FC: Fuel cell GE: Gas engine HP: Heat pump PV: Photovoltaic WT: Wind turbine

図 3-1-1 分散型電源技術の組み合わせ

3-2 分散型電源・熱源技術の計画手順

本論では、分散型エネルギーシステムの省エネルギー性、経済性、環境性の向上の一助となることを目指し、分散型エネルギーシステムの設計と運用に適用する計算モデルを提案する。本モデルにより、幅広い設備、指標及び条件下で、エネルギーシステムの計画立案や評価が効率的かつ短時間に実行可能である。分散型エネルギーシステムの計画手順を図3-2-1に示す。図中の各ステップについて、以下に説明する。

(1) 導入建物における時刻別の電力、熱負荷の推定

分散型エネルギーシステムを導入する施設の電力需要、冷暖房需要、給湯需要などのエネルギー需要を、なるべく正確に把握する必要がある。主に、建物の用途別(事務所, 病院, ホテル, 店舗など)により、単位床面積あたりの代表的なエネルギー需要を調査し、エネルギー需要の推定に利用できる。もしくは、過去のエネルギー需要の実測値を用い、推定できる。

(2) 導入建物における時刻別の電力、熱負荷の推定

分散型エネルギーシステムを導入する施設の電力需要、冷暖房需要、給湯需要などのエネルギー需要を、なるべく正確に把握する必要がある。主に、建物の用途別(事務所, 病院, ホテル, 店舗など)により、単位床面積あたりの代表的なエネルギー需要を調査し、エネルギー需要の推定に利用できる。もしくは、過去のエネルギー需要の実測値を用い、推定できる。

(3) 対象施設側の燃料料金 (ガス、電気)

ガスエンジン、燃料電池などの電源設備及び冷温水機、ボイラなどの熱源設備の燃料代である。従来システムに対し、CGSの燃料費は純増となるが、排熱利用によって熱源設備の燃料費は減少する。都市ガスの場合、ガス会社によって、またガスの使用量、負荷率、使用用途によって料金体系や単価が異なるので、当該地域のガス会社と適用される料金を個々に打ち合わせる必要がある。電気料金には、基本料金・従量料金のほかに、CGSを導入した場合にバックアップとして必要となる自家発電補給電力料金も加算する。年間の電気料金は、買電料金から売電料金を差し引いた値となる。

(4) 分散型電源・熱源技術の情報 (種類、容量、効率、投資コスト等)

現在販売されている分散型電源・熱源設備容量、効率、寿命、投資コスト、維持コストなどの情報を調査し、幅広い機器データベースを構築する必要がある。モデルが実行される時に、データベースからいろいろな設備の組み合わせを選択し、各指標を満足するように、反復計算を行う。

(5) 分散型エネルギーシステムの構成決定

想定したエネルギー需要と各評価指標に対し、適切と思われる種類、容量、台数の電源・熱源設備を選定する。

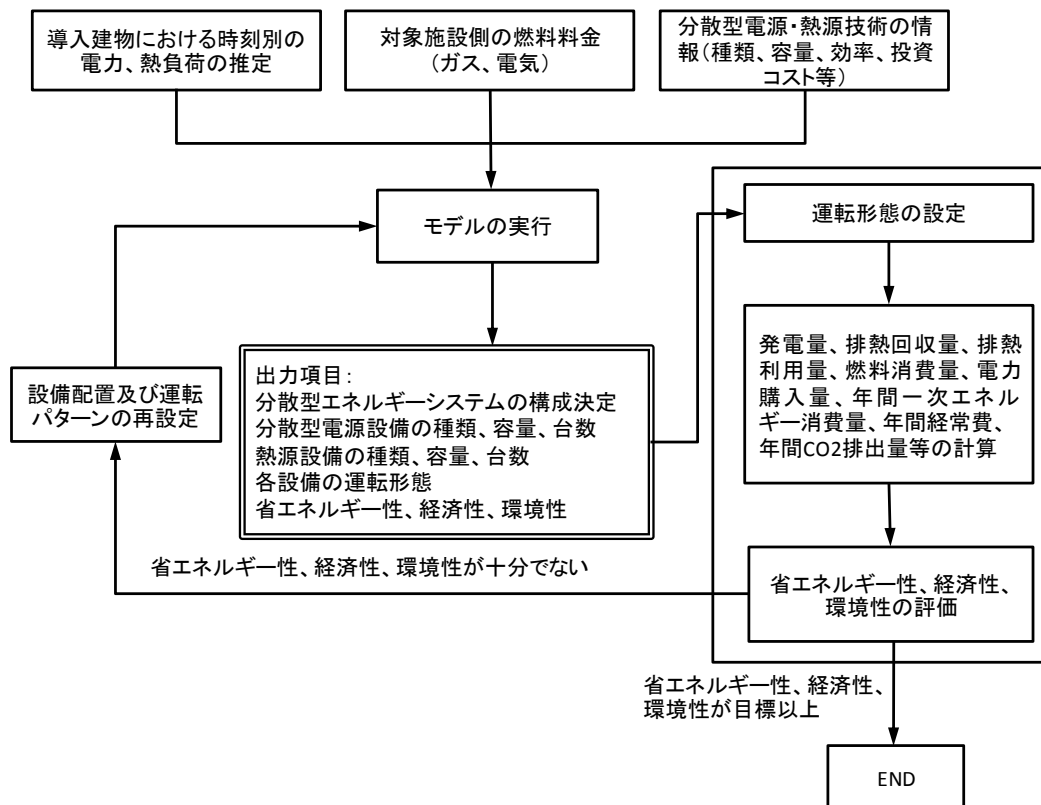


図 3-2-1 分散型エネルギーシステムの計画手順

(6) 運転形態の設定

負荷の変動を考慮して、最適な運転形態を設定することが重要である。運転形態には、電主熱従と熱主電従運転方式の2種類があり、次の特徴がある。

電主熱従運転：電力負荷の変動に追従して発電し、回収された排熱をできるだけ利用し、余った時は放熱する方式である。逆潮流をしない場合、瞬時的な電力負荷変動による逆潮流を回避するため最低買電量を設定する必要がある。

熱主電従運転：熱負荷の変動に追従して発電する方式である。この方式、回収される排熱が熱負荷にほぼ等しくなるように運転されるため、一般にエネルギー利用効率の高い運転といえる。但し、排熱利用を優先するので、逆潮流を起こすことがないか、また、急激な熱負荷変動に追従しにくいので、熱負荷変動の少ないベース負荷に対応した排熱量を設定する等の留意が必要がある。

(7) 発電量、排熱回収量などの計算

発電量、排熱回収量などの計算時刻毎のエネルギー需要データを元に、発電設備の運転をシミュレーションし、発電設備から回収される排熱量(排熱回収量)を計算する。この過程で、建物全体の消費電力のコスト、発電設備の燃料消費のコストも計算される。

排熱利用量の計算時刻毎のエネルギー需要、排熱回収量を元に、排熱利用設備の運転をシミュレーションし、排熱利用量を計算する。この過程で、建物全体の熱需要を賄うため

の電力消費コスト、燃料消費コストも計算される。

(8) 省エネルギー性、経済性、環境性の評価

これまで試算した省エネルギー性、経済性、環境性の定量的評価に定性的評価を加え総合評価を行う。分散型電源・熱源設備導入の目的、動機づけ等と評価結果を照らし合わせ、分散型エネルギーシステムの導入可否の判断を行い採用システムを決定する。

3-3 分散型電源・熱源技術の多目的計画における目的関数

3-3-1 目的関数

分散型電源・熱源システムの計画において、主に省エネルギー性、経済性と環境性を目的とする場合が多い。それらの目的を統合的に解析する（多目的解析）前に、単目的の場合の状況を把握する必要がある。また多目的解析も単目的解析に基づくものが多い。一般的にある目的（例えば省エネルギー）の効果を評価するために、対照系（ベースケース）が必要になる。本報では、従来型システムを比較システムとして設定し、比較システムに対する各目的の削減率を目的関数とする。各目的関数は以下のように定式化されている。

省エネルギー性：

$$\text{Max } R^{PEC} = \frac{\text{TotPEC}_{\text{conv.}} - \text{TotPEC}}{\text{TotPEC}_{\text{conv.}}} \times 100 \quad (1)$$

経済性：

$$\text{Max } R^{ECO} = \frac{\text{TotCost}_{\text{conv.}} - \text{TotCost}}{\text{TotCost}_{\text{conv.}}} \times 100 \quad (2)$$

環境性：

$$\text{Max } R^{CE} = \frac{\text{TotCE}_{\text{conv.}} - \text{TotCE}}{\text{TotCE}_{\text{conv.}}} \times 100 \quad (3)$$

ここに、

R^{PEC}	年間一次エネルギー消費量削減率	%
R^{ECO}	年間コスト削減率	%
R^{CE}	年間 CO ₂ 排出量削減率	%
$\text{TotPEC}_{\text{conv.}}$	比較システムの年間一次エネルギー消費量	MJ
TotPEC	分散型エネルギーシステムの年間一次エネルギー消費量	MJ
$\text{TotCost}_{\text{conv.}}$	比較システムの年間コスト	万円
TotCost	分散型エネルギーシステムの年間コスト	万円
$\text{TotCE}_{\text{conv.}}$	比較システムの年間 CO ₂ 排出量	t
TotCE	分散型エネルギーシステムの年間 CO ₂ 排出量	t

分散型エネルギーシステムの年間一次エネルギー消費量、年間コスト、年間 CO₂ 排出量の計算方法は以下のように定式される。

① 年間一次エネルギー消費量

$$\text{TotPEC} = E_{\text{Gen}} + E_{\text{Elec}} + E_{\text{Heat}} \quad (3)$$

$$E_{\text{Gen}} = \sum_i \sum_m \sum_t \sum_h (\text{Gen}L_{i,m,t,h} \times \text{Derconv}_i \times \lambda_{m,t}) \quad (4)$$

$$E_{Elec} = \sum_m \sum_t \sum_h (DePur_{m,t,h} \times Econv \times \lambda_{m,t}) \quad (5)$$

$$E_{Heat} = \sum_j \sum_u \sum_m \sum_t \sum_h (HeatGP_{j,u,m,t,h} \times Hconv \times HGP_j \times \lambda_{m,t}) \quad (6)$$

式(3)は分散型エネルギーシステムの年間一次エネルギー消費量である。

式(4)は発電技術の年間一次エネルギー消費量である。

式(5)は系統電力の年間一次エネルギー消費量である。

式(6)は熱源技術の年間一次エネルギー消費量である。

② 年間コスト

$$TotCost = C_{Gen} + C_{Heat} + C_{Elec} + C_{Gas} \quad (7)$$

$$C_{Gen} = \sum_i GenInv_i \times (Der\ cost_i \times GF_i + Der\ cap_i \times Gomf_i) + \sum_m \sum_i \sum_t \sum_h (GenL_{i,m,t,h} \times \lambda_{m,t} \times Gomv_i) \quad (8)$$

$$C_{Heat} = \sum_u \sum_j HeatInv_{u,j} \times (Heat\ cost_j \times HF_j + Hcap_j \times Homf_j) \quad (9)$$

$$C_{Gas} = \sum_m GBase_m + \sum_m GBaseflow_m \times BillingG + \sum_m \sum_i \sum_t \sum_h (GenL_{i,m,t,h} \times Derconv_i \times \lambda_{m,t} / Gconv \times Gprice_m) \\ + \sum_m \sum_j \sum_u \sum_t \sum_h (HeatGP_{j,u,m,t,h} \times Hconv \times HGP_j \times \lambda_{m,t} / Gconv \times Gprice_m) \quad (10)$$

$$C_{Elec} = \sum_m (EBase_m \times BillingE) + \sum_m \sum_t \sum_h (DePur_{m,t,h} \times \lambda_{m,t} \times Eprice_m) \quad (11)$$

$$GF_i = IRate / (1 - \frac{1}{(1 + IRate)^{Derlife_i}}) \quad (12)$$

$$HF_j = IRate / (1 - \frac{1}{(1 + IRate)^{Heatlife_j}}) \quad (13)$$

式(7)は分散型エネルギーシステムの年間コストである。

式(8)は発電技術の初期投資である。

式(9)は熱源技術の初期投資である。

式(10)は年間ガス料金である。

式(11)は年間電力料金である。

式(12)は発電技術の年金利係数である。

式(13)は熱源技術の年金利係数である。

③ 年間 CO₂ 排出量

$$TotCE = (E_{Gen} + E_{Heat}) / Gconv \times GCE + E_{Elec} / Econv \times ECE \quad (14)$$

式(14)は分散型エネルギーシステムの年間 CO₂ 排出量である。

3-3-2 制約条件

制約条件としては、運用計画と同様に、年間に何日か設定された代表日における各時間のエネルギー需要に対して、各構成機器の性能特性を表すエネルギーの入出力関係、各エネルギー・フローについてのエネルギー・バランス及び需給関係を考慮する必要がある。したがって、デマンドサイトの需要を満たすために、いくつかの制約条件を設ける必要となり、以下の式が成立する。

$$Eload_{m,t,h} = \sum_i GenL_{i,m,t,h} + DePur_{m,t,h} - \sum_u \sum_j (HeatEP_{u,j,m,t,h} \times HEP_j) \quad (15)$$

$$Hload_{u,m,t,h} = \sum_j (HeatGP_{j,u,m,t,h} \times HGP_j \times Heatcop_{u,j,m} + HeatEP_{j,u,m,t,h} \times HEP_j \times Heatcop_{u,j,m} + \beta_{u,j} \times RecHeat_{j,u,m,t,h} \times Heatcop_{u,j,m}) + \gamma \times ReHEX_{u,m,t,h} \times HEXRA_{u,m} \quad (16)$$

$$GenL_{i,m,t,h} \leq GenInv_i \times Dercap \times Solar_{i,m,t,h} \quad (17)$$

$$RecHeat_{u,j,m,t,h} \times \beta_{u,j} \times Heatcop_{u,j,m} \leq HeatInv_{u,j} \times Heatcap_{u,j,m} \times MaxRec_{u,j} \quad (18)$$

$$\sum_u \sum_j RecHeat_{u,j,m,t,h} + \sum_u ReHEX_{u,m,t,h} \leq \sum_i (GenL_{i,m,t,h} \times \alpha_i) \quad (19)$$

$$\sum_i GenInv_i \leq MaxGenInv \quad (20)$$

$$\sum_j HeatInv_{u,j} \leq MaxHeatInv_u \quad (21)$$

$$Heatcap_{u,j,m} \times HeatInv_{u,j} \geq HeatGP_{j,u,m,t,h} \times HGP_j \times Heatcop_{u,j,m} + HeatEP_{j,u,m,t,h} \times HEP_j \times Heatcop_{u,j,m} + \beta_{u,j} \times RecHeat_{j,u,m,t,h} \times Heatcop_{u,j,m} \quad (22)$$

$$BillingG \geq \sum_i (GenL_{i,m,t,h} \times Derconv_i / Gconv) + \sum_j \sum_u (HeatGP_{j,u,m,t,h} \times HGP_j \times Hconv / Gconv) \quad (23)$$

$$BillingE \geq DePur_{m,t,h} \quad (24)$$

式(15)は各時刻の電力需要バランスを実施する。

式(16)は各時刻の熱需要バランスを実施する。

式(17)は発電容量制限及びPVシステムの太陽光日射率を考慮する。

式(18)は熱源技術の排熱回収量の制限である。

式(19)は発電時の排熱生産量の制限である。

式(20)は発電技術の導入量の制限である。

式(21)は用途別熱源技術の導入量の制限である。

式(22)は熱源技術容量の制限である。

式(23)は契約ガスの制限である。

式(24)は契約電力の制限である。

3-3-3 パラメータの設定

パラメータの設定は以下の表に参照する。

表 3-3-1 基本パラメータの設定

項目	定義
h	時間 (1,2...24)
i	発電技術
j	熱源技術
m	月 (1,2...12)
t	日種類 (平日、休日)
u	熱源技術の用途 (冷暖房、給湯)

表 3-3-2 定数の設定

定数	定義	
α_i	発電技術 i 1kWh 発電時の排熱量	kWh
$\beta_{u,j}$	熱源技術 j 1kWh 排熱量からの有効熱量	kWh
γ	熱交換器 1kWh 排熱量からの有効熱量	kWh
$\lambda_{m,t}$	月別平日と休日の日数	日
BillingG	契約ガス	m ³
BillingE	契約電力	kW
Derconv _i	発電技術 i 1kWh 発電時の一次エネルギー消費量	MJ
Dercost _i	発電技術 i の初期投資	万円/台
Derlife _i	発電技術 i の使用寿命	年
Dericap _i	発電技術 i の定格容量	kW
Eload _{m,t,h}	電力負荷	kW
Econv	系統電力発熱量の換算係数	MJ/kWh
EBase _m	電力基本料金	円/kW
Eprice _m	電力従量料金	円/kWh
ECE	発電時の CO ₂ 排出係数	kg/kWh
Gconv	都市ガス発熱量の換算係数	MJ/m ³
GF _i	発電技術 i の年金利係数	
Gomf _i	発電技術 i の運転維持固定費用	円/kW
Gomv _i	発電技術 i の運転維持変動費用	円/kWh
GBase _m	ガスの定額基本料金	円/月
GBaseflow _m	ガスの流量基本料金	円/m ³
Gprice _m	ガス従量料金	円/m ³
GCE	都市ガスを燃焼させた時の CO ₂ 排出係数	kg/m ³
Hload _{m,t,h,u}	熱負荷	kW
Heat cost _j	熱源技術 j 初期投資	万円
HF _j	熱源技術 j の年金利係数	
Heatlife _j	熱源技術 j の使用寿命	年
Hicap _j	熱源技術 j の定格容量	kW
Homf _j	熱源技術 j の運転維持固定費用	円/kW

H_{conv}	1kWh 熱量からの一次エネルギー消費量	MJ
HGP_j	熱源技術 j ガス使用の判断	0 or 1
HEP_j	熱源技術 j 電力使用の判断	0 or 1
$Heatcap_{u,j,m}$	用途別月別熱源技術 j の供給能力	kW
$Heatcop_{u,j,m}$	用途別月別熱源技術 j の COP	
$HEXRA_{u,m}$	用途別熱交換器の効率	
$IRate$	投資金利	
$MaxRec_{u,j}$	用途別熱源技術 j の最大排熱回収率	%
$MaxGenInv$	発電技術の最大導入量	台
$MaxHeatInv_u$	用途別熱源技術の最大導入量	台

表 3-3-3 変数の設定

変数	定義	
C_{Gen}	発電技術 i の初期投資費用	万円
C_{Heat}	熱源技術 j の初期投資費用	万円
C_{Gas}	年間ガス料金	万円
C_{Elec}	年間電力料金	万円
$DePur_{m,t,h}$	系統電力からの時刻別電力購入量	kWh
E_{Gen}	発電技術の年間一次エネルギー消費量	MJ
E_{Elec}	系統電力の年間一次エネルギー消費量	MJ
E_{Heat}	熱源技術の年間一次エネルギー消費量	MJ
$GenL_{i,m,t,h}$	発電技術 i 時刻別の発電量	kWh
$GenInv_i$	発電技術 i の導入量	台
$HeatGP_{u,j,m,t,h}$	熱源技術 j のガス購入量	kWh
$HeatEP_{u,j,m,t,h}$	熱源技術 j の電力購入量	kWh
$HeatInv_{u,j}$	用途別熱源技術 j の導入量	台
$RecHeat_{u,j,m,t,h}$	熱源技術 j の排熱回収量	kWh
$ReHEX_{u,m,t,h}$	熱交換器の排熱回収量	kWh
R^{PEC}	年間一次エネルギー消費量削減率	%
R^{ECO}	年間コスト削減率	%
R^{CE}	年間 CO ₂ 排出量削減率	%

3-4 単目的の最適化問題の解法

分散型電源・熱源技術の選択過程において、すべての技術の組み合わせに関して計算をしない限り、最適解を求めることができない。本論文では機器の効率等は負荷の変動により変化がないとし、目的関数と制約条件を分析したところ、2次項以上のような項目が存在しないため、典型的な線形、整数計画問題であることがわかる。一般の線形計画問題を解くために、G.B.Dantzig⁴⁾が提案したシンプレックス法（単体法）を用いて、最適配置を求める。シンプレックス法は図3-4-1に示すように最適解が多面体の頂点に現れることを利用し、最適解に達するまで多面体の辺をたどってより高い目的関数の値を次々にたどることで線形計画問題を解く。このアルゴリズムは実際はかなり能率のいいもので、巡回していないか（巡回してしまうと最適解に到達することができない）に注意を払えば（大域的）最適解を見つけることが保証される。現在LINGO⁵⁾、GAMS⁶⁾のような多くの線形計画問題ツール言語が開発された。本論では、GAMS 言語を用いて、分散型エネルギー技術の多目的最適化モデルを開発した。

GAMS とは、一般的な(general)、代数的演算用の(algebraic)、モデル構築用プログラミング言語(modeling system)である。その特長として、① 反復計算に強い。FORTRAN の DO ループやC の for ループでは、初期値、終値、増分を指定し、for(i=1; i<=n; i++){.....}などとして反復計算を実行しなければならないが、GAMS は半自動的に実行してくれる。② データの配列（行列）に適応している。データの並びで自動的に配列のサイズが決まり、データを格納してくれる。③ 各種の解法ルーチン（Solver）が豊富であるため、自分で解法のプログラムを書く必要がない。

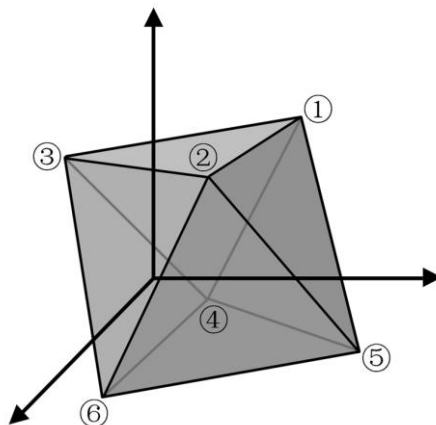


図 3-4-1 シンプレックス法（単体法）

3-5 多目的最適化の解法アルゴリズム

多目的最適化とは、複数の評価基準を同時に考慮しながら制約条件を満足する解を探索する操作であり、非劣解（ある評価値を改善するためには、少なくとも他の一つの評価値を改悪せざるを得ないような解）の集合であるパレート最適解集合を求めることを目的とする。複数の評価の下での考察は多目的最適化問題、式(4)として定式化される。⁷⁾

$$\text{Max or Min } f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_N(x)\} \text{ subj. to } x \in X \quad (4)$$

3-5-1 パレート最適解

図 3-5-1 に示す模式的な例では、評価指標として、エネルギーシステムの省エネルギー性と経済性を選択しており、省エネルギー性を高くする場合には、経済性が悪くなり、逆に、経済性を低く抑える場合には、省エネルギー性を下げるといった競合関係が線で示すパレート最適解として表されている。パレート最適解(点 A、B)は、実行可能解(点 C)の領域の境界の一部となる。通常は、このパレート最適解の中から意思決定者の価値判断に基づいて最終的な解を選択することが行われる。⁸⁾

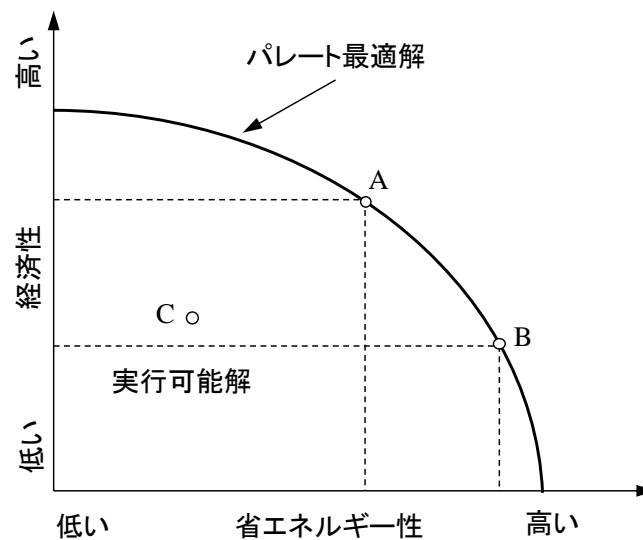


図 3-5-1 パレート最適解のイメージ

3-5-2 ϵ -制約法

多目的最適化問題におけるパレート最適解は、複数存在する目的関数を何らかの工夫により単一目的化することで求めることができる。これは、単一目的化された目的関数の最適解をパレート最適解集合の 1 つとして対応づけすることができるためである。一般に、この手法はスカラー化手法と呼ばれる。代表的なスカラー化手法として、重み係数法、 ϵ -制約法、重み付けミニマックス法、および辞書式配列法がある⁹⁾。重み係数法(weight method)は、重み係数を用いて各目的関数に重みを設定し、得られる加重和を単一の目的関数 $Wf(x)$ とし、パレート最適解の 1 つを求める手法である。辞書式配列法では、目的関数に優先順位を付け、その優先順位に従って解探索を行う手法である。制約法(または、 ϵ -制約法)(constraint method)は、ある 1 つの目的関数以外の目的関数を制約条件に変換するというスカラー化手法になる。本論文では、事前にどちらかを重み付け或いは優先順位付けにするのではなく、あらゆる可能性を探りたいので、 ϵ -制約法を選んで、多目的な解析を行う。

ϵ -制約法は任意の $f_j(x)$ のみを目的関数とし、残りの (N-1) 個の目的関数には下限値 $f_i^* + \epsilon_i (i = 1, 2 \dots N, i \neq j)$ を設定して、 ϵ -制約と呼ばれる不等式制約に変換する。ここで、 f_i^* 及び ϵ_i はそれぞれ目的毎の理想(最適)値とそれからの劣化(ϵ -制約)量である。そして、制約問題を解くことにより、パレート最適解を求めることができる。下記の式 (5) で表す。

$$\text{Max or Min } f_j(x) \quad \text{subj. to } \left\{ \begin{array}{l} x \in X \\ f_i(x) \geq f_i^* + \epsilon_i \end{array} \right\} \quad (5)$$

3-6 多目的分析評価の計算フロー

分散型電源・熱源技術の導入問題においては、省エネルギー性、経済性、環境性の目的関数を同時に考慮すると、複数の目的関数を持つ多目的最適化問題となる。したがって、ここでは、 ε -制約法を採用し、単一目的の最適化問題に変換した上で、単目的の最適化問題の解法を用いて、パレート最適解を求める。すなわち、省エネルギー性、経済性、環境性の中、いずれか一つを目的関数として採用し、残りの二つを限界値以下の値に制限するという制約条件式によって扱う。これらの制約条件式中の限界値をパラメータとし、様々に変化させることにより、パレート最適解を求める。

図 3-6-1 には分散型電源・熱源技術計画の多目的分析の計算フローを示す。まず、デマンドサイドの電力・熱負荷、燃料料金、分散型電源・熱源技術の情報を入力条件とし整備する。その上で、需要・供給の制約条件を定め、それぞれの目的に応じて最適化ケースを求める。ここでは、省エネルギー性の最適化ケースをケース 1、経済性の最適化ケースをケース 2、環境性の最適化ケースをケース 3 とする。次はパレート最適解を求めるために、 ε -制約法を用いる。 ε -制約法を用いた場合は、年間一次エネルギー消費量削減率、コスト削減率、CO₂排出量削減率の中に、一つを目的関数として選んで、残りの二つを制約条件とし

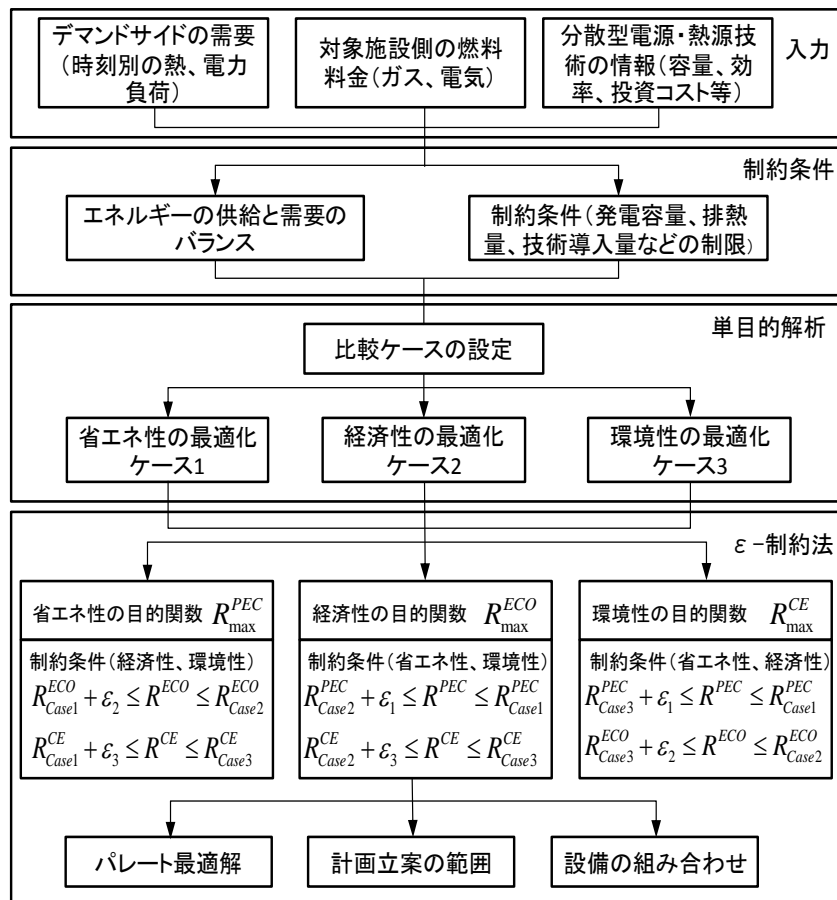


図 3-6-1 モデルの計算フロー

て扱う。制約量 ε を変更しながら、最適化することで、変更した値域内のパレート最適解を全て求めることができる。

ここで、多目的解析において年間コスト削減率をメインの目的関数 $Max R^{ECO}$ とし、年間一次エネルギー消費量削減率と年間 CO_2 排出量削減率を制約条件とした場合、 ε 制約範囲の確定方法を例に説明する。省エネルギー性の単目的で決めた年間一次エネルギー消費量削減率の最適値（最大値）は R_{Case1}^{PEC} とし、他の条件でも、年間一次エネルギー消費量削減率はこの値を超えることはない。一方、単目的評価の経済性の最適化ケース 2 で得られた年間一次エネルギー消費量削減率は R_{Case2}^{PEC} とし、もしこの年間一次エネルギー消費量削減率により小さくなると、経済性と省エネルギー性の両方が意味ない。即ち R_{Case2}^{PEC} は年間一次エネルギー消費量削減率の下限值となる。 R_{Case1}^{PEC} は年間一次エネルギー消費量削減率の上限値となる。従って、 ε 制約範囲の確定は下記の式により決めることができる。

$$R_{Case2}^{PEC} + \varepsilon_1 \leq R^{PEC} \leq R_{Case1}^{PEC} \quad (6)$$

年間 CO_2 排出量削減率の制約範囲も同様に確定する。

$$R_{Case2}^{CE} + \varepsilon_3 \leq R^{CE} \leq R_{Case3}^{CE} \quad (7)$$

3-7 蓄電池の最適化計画における定式化

3-7-1 目的関数

エネルギーシステムの年間コスト削減率を最大化する目標関数は以下のように表す。

$$\text{Max } R^{ECO} = \frac{\text{TotCost}_{\text{conv.}} - \text{TotCost}}{\text{TotCost}_{\text{conv.}}} \times 100 \quad (1)$$

ここに、

R^{ECO} = 年間コスト (%)

$\text{TotCost}_{\text{conv.}}$ = 蓄電池が導入された CGS の年間コスト (万円)

TotCost = 蓄電池未導入 CGS の年間コスト (万円)

蓄電池が導入された CGS の年間コストは以下のように構成されている。

$$\text{TotCost} = C_{\text{Der}} + C_{\text{Heat}} + C_{\text{SB}} + C_{\text{Elec}} + C_{\text{Gas}} + C_{\text{ctax}} - C_{\text{sell}} \quad (2)$$

ここに、

C_{Der} = 発電技術 i の初期投資 (万円)

C_{Heat} = 熱源技術 j の初期投資 (万円)

C_{SB} = 蓄電池の初期投資費用(万円)

C_{Gas} = 年間ガス料金(万円)

C_{Elec} = 年間電力料金(万円)

C_{sell} = 売電収入(万円)

C_{ctax} = 炭素税(万円)

分散型電源・熱源技術の初期投資は各技術の値段及び金利、寿命を考慮し、下記の式(2)~式(7)で計算する。

$$C_{\text{Der}} = \sum_i \text{DerInv}_i \times \text{Der cost}_i \times GF_i \quad (3)$$

$$C_{\text{Heat}} = \sum_u \sum_j \text{HeatInv}_{u,j} \times \text{Heat cost}_j \times HF_j \quad (4)$$

$$C_{\text{SB}} = \text{SBInv} \times \text{SB cost} \times \text{SBF} \quad (5)$$

$$GF_i = \text{IRate} / \left(1 - \frac{1}{(1 + \text{IRate})^{\text{Derlife}_i}}\right) \quad (6)$$

$$HF_j = \text{IRate} / \left(1 - \frac{1}{(1 + \text{IRate})^{\text{Heatlife}_j}}\right) \quad (7)$$

$$\text{SBF} = \text{IRate} / \left(1 - \frac{1}{(1 + \text{IRate})^{\text{SBFlife}_c}}\right) \quad (8)$$

ここに、

DerInv_i = 発電技術 i の導入量 (kW)

Der cost_i = 発電技術 i 初期投資 (万円/kW)

GF_i = 発電技術 i の年金利係数

$HeatInv_{u,j}$	= 用途 u の熱源技術 j の導入量(kW)
$Heat\ cost_j$	= 熱源技術 j 初期投資 (万円/kW)
HF_j	= 熱源技術 j の年金利係数
SBI_{nv}	= 蓄電池の導入量(kWh)
$SB\ cost$	= 蓄電池の初期投資(万円/kWh)
SBF	= 蓄電池の年金利係数
$IRate$	= 投資金利
$Derlife_i$	= 発電技術 i の使用寿命 (年)
$Heatlife_j$	= 熱源技術 j の使用寿命 (年)
$SBlife$	= 蓄電池の使用寿命 (年)

3-7-2 制約条件

各時刻の電力需要と熱需要を満たすために、式(9)、式 (10) が成立する。

$$Eload_{m,t,h} = \sum_i GenL_{i,m,t,h} + DePur_{m,t,h} - \sum_u \sum_j (HeatEP_{u,j,m,t,h} \times HEP_j) - \sum_i Sell_{i,m,t,h} \quad (9)$$

$$Hload_{u,m,t,h} = \sum_j (HeatGP_{j,u,m,t,h} \times HGP_j \times Heatcop_{u,j,m} + HeatEP_{j,u,m,t,h} \times HEP_j \times Heatcop_{u,j,m} + \beta_{u,j} \times RecHeat_{j,u,m,t,h} \times Heatcop_{u,j,m}) + \gamma \times ReHEX_{u,m,t,h} \times HEXRA_{u,m} \quad (10)$$

ここに

$Eload_{m,t,h}$ = 月 m、平休日 t、時刻 h の電力負荷 (kW)

$GenL_{i,m,t,h}$ = 月 m、平休日 t、時刻 h、発電技術 i の発電量 (kW)

$DePur_{m,t,h}$ = 月 m、平休日 t、時刻 h の電力購入量 (kW)

$Sell_{i,m,t,h}$ = 月 m、平休日 t、時刻 h、発電技術 i の買電量 (kW)

$HeatEP_{u,j,m,t,h}$ = 月 m、平休日 t、時刻 h、用途 u の熱源技術 j の電力購入量 (kW)

HEP_j = 熱源技術 j 電力使用の判断 0 or 1

$HeatGP_{u,j,m,t,h}$ = 月 m、平休日 t、時刻 h、用途 u の熱源技術 j のガス購入量 (kW)

HGP_j = 熱源技術 j ガス使用の判断 0 or 1

$Hload_{m,t,h,u}$ = 月 m、平休日 t、時刻 h、最終用途 u の熱負荷 (kW)

$Heatcop_{u,j}$ = 用途 u の熱源技術 j の COP

γ = 熱交換器 1kW 排熱量からの有効熱量(kW)

$ReHEX_{u,m,t,h}$ = 月 m、平休日 t、時刻 h、用途 u の熱交換器の排熱回収量(kW)

$HEXRA_{u,m}$ = 月 m、最終用途 u の熱交換器の効率

参考文献

1. 日本コージェネレーションセンター編：コージェネレーション総合マニュアル，日本工業出版
2. 日本エネルギー学会編：天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2008，通産資料出版会
3. 田中洋一：数理最適化によるコージェネレーションシステムの設計と運用に関する研究
4. G.B.Dantzig, etc : Updating the product form of the inverse for the revised simplex method, Journal of the ACM, Volume12 Issue4, p.603, 1965.10
5. Linus Schrage 著 新村 秀一 訳：LINGO による数理計画法モデル，http://www.lindo.jp/manuals/LINGO_Text.html, 2012.06.01 参照
6. Anthony.Brooke, ect: GAMS A User's Guide, GAMS Development Corporation, 1998
7. 中山弘隆等：多目的計画法の理論と応用，コロナ社，1994
8. 黒岩正：トレードオフ分析手法，東芝レビューVol.60 No.1, 2005
9. 渡辺真也：近傍個体の交叉に基づく多目的遺伝的アルゴリズムとその応用に関する研究，同志社大学大学院，工学研究科，知識工学専攻，博士論文，2003.3

第四章 北九州市学研都市における分散型電源・熱源技術の導入効果及び要因分析 に関する研究

- 4-1 はじめに
- 4-2 エネルギーシステムの構成
- 4-3 データベースの構築
 - 4-3-1 負荷データ
 - 4-3-2 機器データ
 - 4-3-3 他のデータの設定
- 4-4 発電技術容量の影響
 - 4-4-1 発電技術容量に関する単目的解析
 - 4-4-2 発電技術容量に関する多目的解析
- 4-5 熱源技術の影響
 - 4-5-1 熱源技術に関する単目的解析
 - 4-5-2 熱源技術に関する多目的解析
- 4-6 経済性要因の影響
 - 4-6-1 電力価格の影響
 - 4-6-2 ガス価格の影響
 - 4-6-3 炭素税の影響
- 4-7 まとめ

4-1 はじめに

分散型電源・熱源技術の設計計画における評価指標としての省エネルギー性、経済性、環境性は、多くの因子によって影響を受ける。図 4-1-1 は、(a)システム、(b) 入力エネルギー、(c) 出力エネルギー、(d) エネルギー管理を示したものである。設計計画においては、これらの因子を総合的に考慮する必要がある。

ここでは、●印を付けた因子を設計条件として、○印を付けたものを決定すべき設計項目として、また▲印を付けたものを設計項目から付随的に決定される設計特性としてそれぞれ考慮し、設計計画問題を考察する。すなわち、与えられた機器構成、ユーティリティの燃料料金及びエネルギー負荷に対して、各評価指標を考慮しながら、機器容量及び運用方策を最適に決定する問題について考察する。

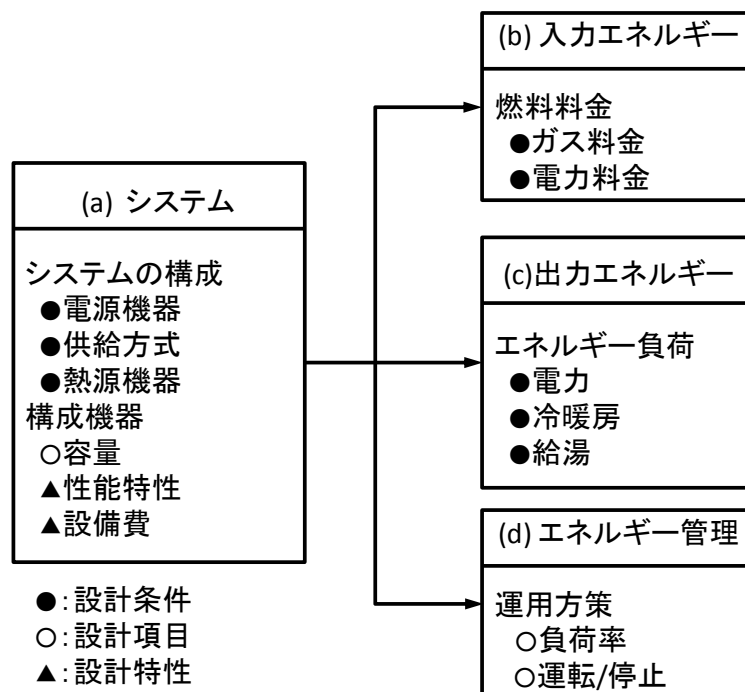


図 4-1-1 設計計画に対する影響因子

そこで、分散型電源・熱源技術の設計は、計画によって導かれた電源・熱源技術の種類、容量、運転制御などの基本条件により進めることになるが、これらの基本条件が変わった場合はその影響度に応じてどの段階まで立ち戻るか判断する必要がある。とくにシステムの容量が変化するような場合は、省エネルギー性、経済性、環境性に大きな影響が出る可能性があるため、その場合は設計に進むのではなく、計画段階の検討プロセスを再度実施することが望ましい。

また、経済性は、分散型電源・熱源技術の導入を左右する大きな鍵となり、燃料料金、設備投資などの要因により影響されている。したがって、各要因が変化し、分散型電源・

熱源技術の経済性にどの程度の影響があるか検討する必要がある。本章では、前章で述べた理論を用いて、北九州学研都市を対象として、定量的な多目達成度的を設定し、分散型電源技術と熱源技術それぞれの影響を検討した。また、経済性要因による技術導入の影響を加味する。

4-2 エネルギーシステムの構成

エネルギーシステムの構成を設定する必要があるが、従来システムを含めて、考え得る種々の代替システムを比較検討することは当然必要である。一般に、地域冷暖房などの大規模な施設にはガスタービンが採用されることが多いが、単独ビルなどの比較的小規模な施設には、ガスエンジンやディーゼルエンジンが主に適用される。主要技術の種類決定後、需要量の季節的・時間的変動を参考にしながらシステム機器構成案、すなわち要素機器の機種と容量、ならびにそれらの構成法を設定する必要がある。初期計画段階においては、唯一のシステム機器構成案が単純に設定できるわけではなく、いくつかの代替案を検討対象として想定するのが一般的である。

図 4-2-1 に想定する分散型エネルギーシステムの構成を示す。電力はガスエンジン(GE)により供給され、不足分は商用系統から買電する。冷房負荷は排熱回収型冷温水発生機(ABS)、ターボ冷凍機(TC)、ヒートポンプ(HP)からの三種類、暖房負荷はガスエンジン(GE)の排熱、排熱回収型吸収式冷温水発生機(ABS)、ヒートポンプ(HP)からの三種類の供給方式が可能である。給湯負荷はCGS 発電時の排熱から供給され、不足分はバックアップボイラ(GB)により補う。最適化システムを比較するために、図 4-2-2 に示すガスエンジン(GE)未導入システムを比較対象とする。電力負荷は系統電力により供給される。冷暖房負荷は吸収式冷温水発生器によって供給される。給湯需要はボイラによって供給される。ここでは、システムの構成のみを決定し、各条件のもとで、モデルを実行し、各機器の容量、運転方式を自動的にフィードバックする。

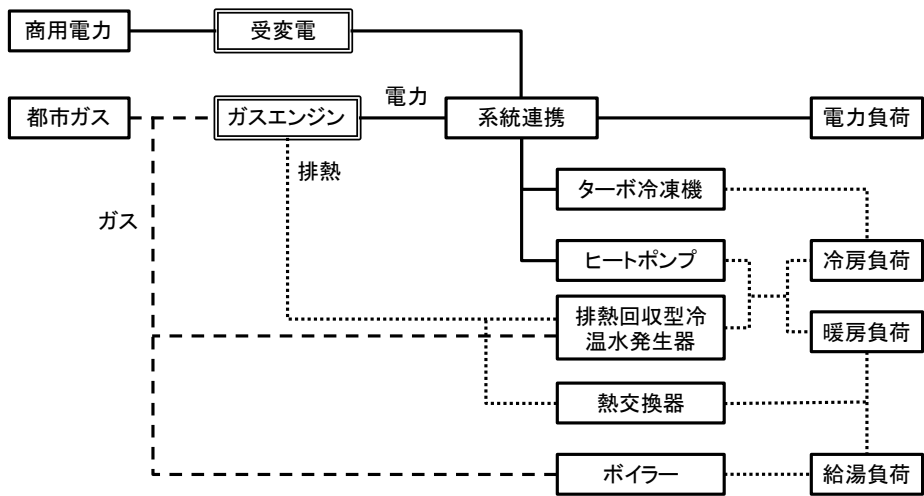


図 4-2-1 分散型エネルギーシステム

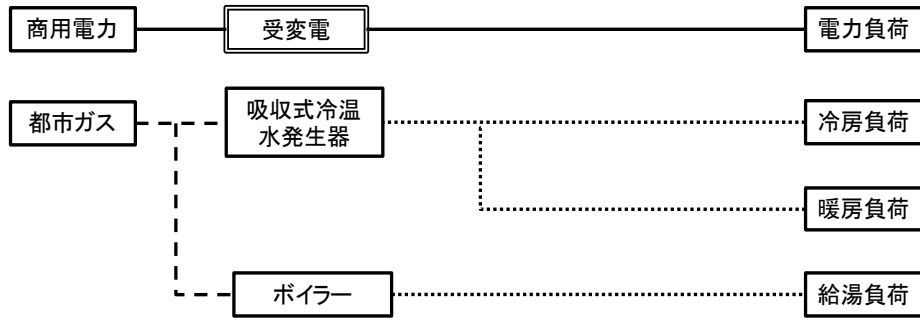


図 4-2-2 比較システム

4-3 データベースの構築

4-3-1 負荷データ

計画の出発は、電力・冷暖房・給湯などのエネルギー負荷の推定に始まる。分散型電源・熱源技術計画対象施設の負荷を、長期的な観点からの確に推定することは難しい問題であるが、システムの設計計画において非常に重要なステップである。なぜならば、需要量の過大推定は設備の過大投資につながり、逆に過小推定はシステムの供給能力不足の原因となるなど、推定負荷の精度がシステムの機器構成の決定や経済性の評価に直接大きな影響を及ぼすからである。

本報では、学研都市 2011 年の各需要の実測データを参照し、各月平、休日の時刻別負荷を作成した。各月の代表日計算（24 時間×12 か月）（平日・休日）を用いて計算を行う。負荷特性を見るために、図 4-3-1、4-3-2、4-3-3 に冬季（1 月）、夏季（8 月）、中間期（11 月）平日の時刻別負荷を示す。時刻別の冷暖房・電力負荷の変動は激しく、熱と電力の供給ピークはほぼ同じ時間帯に発生する。そして、季節により、給湯と電力負荷の変動は大きなばらつきがない。

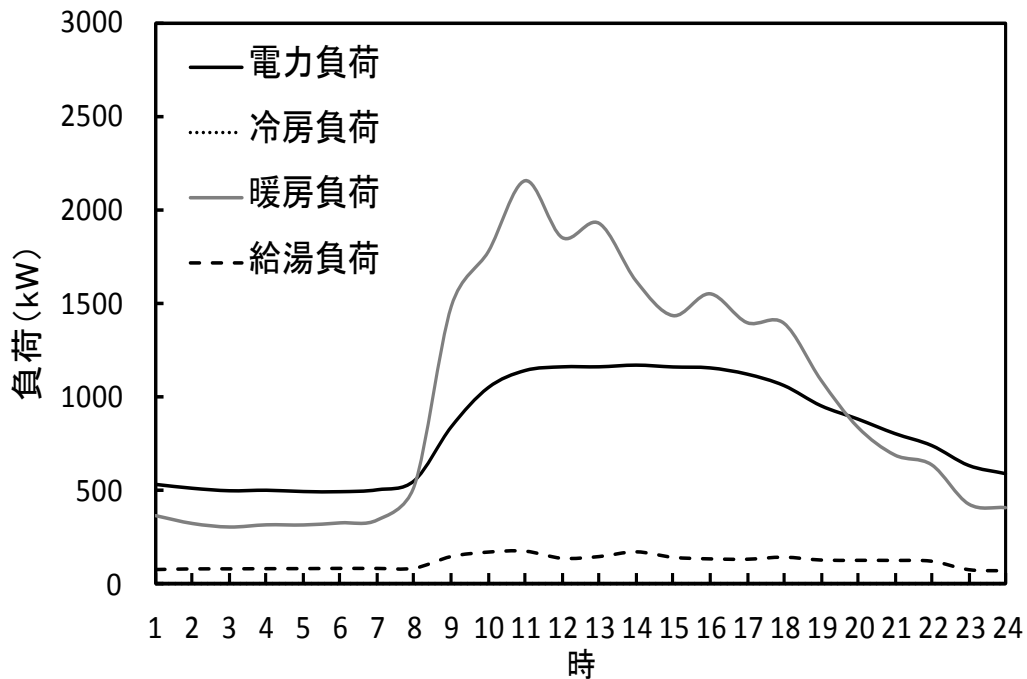


図 4-3-1 冬季 1 月平日の負荷

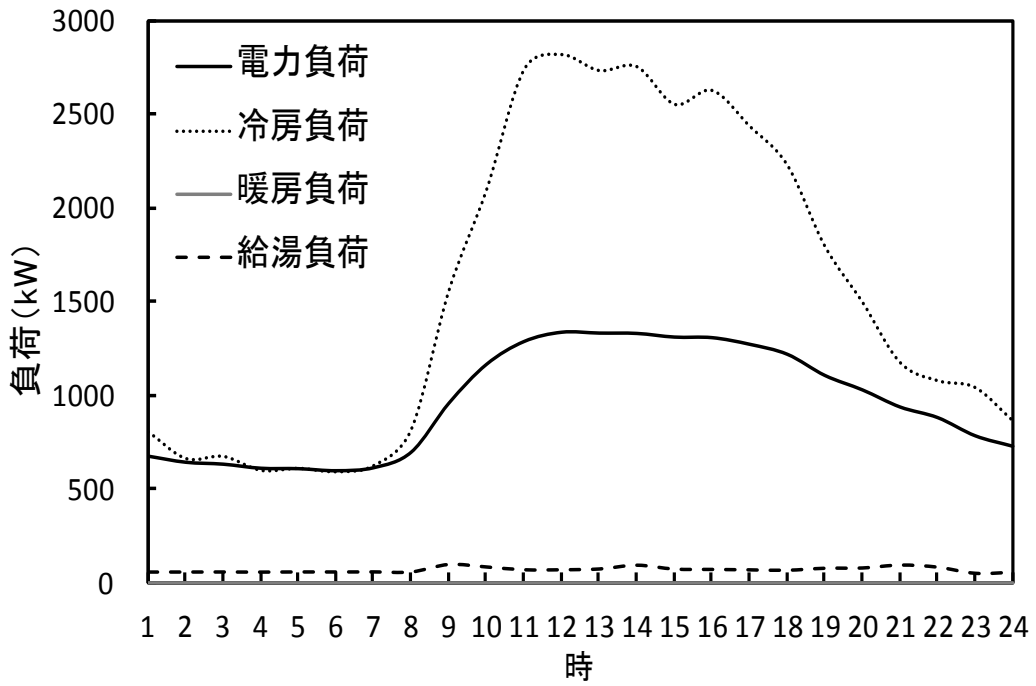


図 4-3-2 夏季 8 月平日の負荷

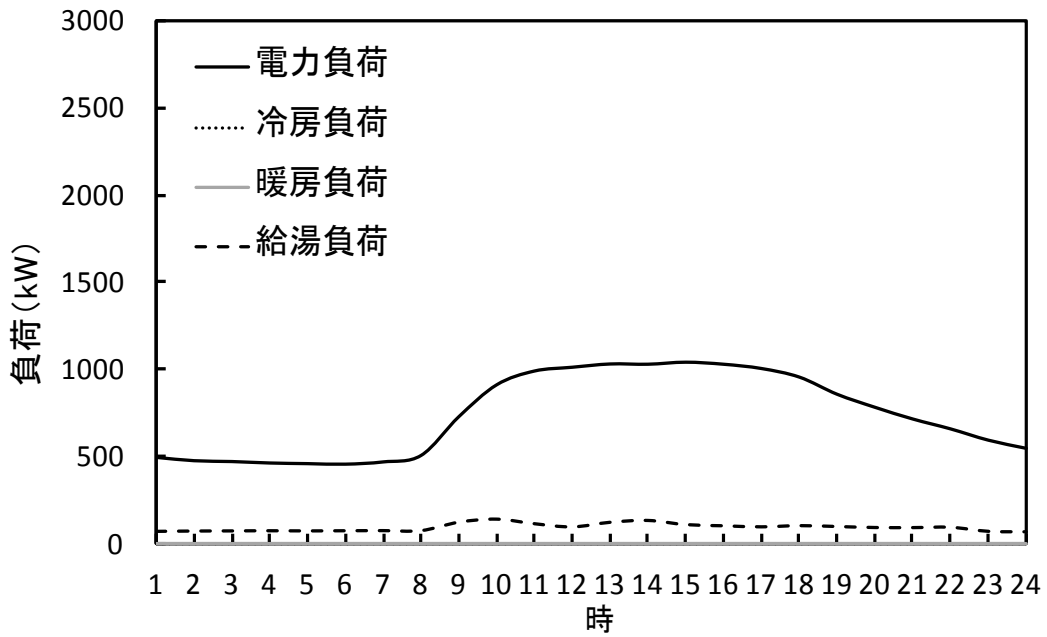


図 4-3-3 中間期 11 月平日の負荷

4-3-2 機器データ

メーカーのカタログや調査等を通して、表 4-3-1、4-3-2、4-3-3 に示すように、各設備の効率、コストを集め、分散型電源・熱源技術のデータベースを構築した。電源技術はガスエンジン（GE）のみを採用する。熱源設備は排熱回収型冷温水発生機（ABS）、ヒートポンプ（HP）、ターボ冷凍機（TC）などを採用する。

表 4-3-1 分散型電源技術の効率

分散型技術	発電効率	排熱回収率
GE	0.36	0.45

注：GE:ガスエンジン

表 4-3-2 熱源技術の COP

熱源技術	COP		
	冷房	暖房	給湯
ABS	1.45	0.88	/
HP	2.8	3.7	/
TC	6	/	/
GB	/	/	0.9
HE	/	0.9	0.9

注：ABS：排熱回収型吸収式冷温水発生機 HP：ヒートポンプ TC：ターボ冷凍機 GB：ガスボイラー HE：熱交換器

表 4-3-3 各技術のコスト

設備	コスト(万円/kW)
GE	20
ABS	4.5
HP	3.5
TC	4
GB	1.5

4-3-3 他のデータの設定

電力会社及びガス会社の契約を参照し、表 4-3-4 に示すように料金データベースを作成した。各エネルギー料金は、基本料金と従量料金から構成される。電力料金は業務用電力 A を採用する。ガス料金は、比較システムの場合、ガス吸収式冷温水器を利用になり、空調用 A 契約第一種を採用する。分散型エネルギー技術が導入される場合は、トータルエネルギーシステム契約第一種を採用する。北九州地区エネルギー別発熱量と CO₂ 排出量の換算係数を表 4-3-5 に示す。

表 4-3-4 エネルギー料金

	料金構成	比較型	分散型
電力	基本料金(円/kW)	1953	1953
	従量料金 (夏季) (円/kWh)	10.59	10.59
	従量料金 (その他) (円/kWh)	9.70	9.70
ガス	定額基本料金(冬季) (円/月)	73500	78750
	定額基本料金(その他) (円/月)	42000	78750
	流量基本料金(冬季)(円/m ³)	4725	793.8
	流量基本料金(その他)(円/m ³)	840	793.8
	従量料金(円/m ³)	64.16	62.7

表 4-3-5 北九州地区エネルギー別発熱量及び CO₂ 排出量の換算係数

	発熱量の換算係数	CO ₂ 排出量の換算係数
電力	9.97MJ/kWh	0.69kg/kWh
ガス	46.06MJ/m ³	2.26kg/m ³

4-4 発電技術の影響

エネルギー需要量の変動に対する発電技術の容量及び運転方策の合理的な決定は、設計計画段階の分析において十分考察を行っておかねばならない。発電技術の容量及び運転方策の検討においては、各構成機器の性能特性に加えて、使用燃料の料金体系、一般商用電源との連携問題などを考慮しながら決定していく必要がある。このとき、外気温の季節的・時間的变化による機器特性の影響や買電やガスなどの季節別・用途別あるいは時刻別料金の相違などを加味する必要がある。

本節では、発電設備の容量決定及び運転計画を考慮することにより、省エネルギー性、経済性、環境性をどのくらい改善できるか検討する。発電技術はガスエンジンのみであり、熱源技術の影響を排除するために、排熱回収型冷温水発生機は熱源技術として、3000kW と固定する。

4-4-1 発電技術容量に関する単目的解析

まず分散型エネルギーシステム導入の単目的最適化解析を行い、比較ケースに対する各ケースの年間一次エネルギー消費量削減率、コスト削減率、CO₂排出量削減率を計算した。各目的の最適化ケースの効果を明らかにした。その解析結果を表 4-4-1 に示す。

ケース 0：比較ケース。ガスエンジン未導入システム。

ケース 1：省エネルギー性の最適化ケース。年間一次エネルギー消費量削減率が最も大きいシステム。

ケース 2：経済性の最適化ケース。年間コスト削減率が最も大きいシステム。

ケース 3：環境性の最適化ケース。年間 CO₂ 排出量削減率が最も大きいシステム。

ケース 1 では、ガスエンジンの最適化容量は 1378kW となり、年間一次エネルギー消費量は 16.56%減少し、年間コストは 6.05%増加し、年間 CO₂ 排出量は 31.68%減少した。ケース 2 では、ガスエンジンの最適化容量は 1026kW となり、年間一次エネルギー消費量は 11.85%減少し、年間コストは 6.14%減少し、年間 CO₂ 排出量は 23.95%減少した。ケース 3 では、ガスエンジンの最適化容量は 1378kW となり、年間一次エネルギー消費量は 16.52%減少し、年間コストは 4.84%減少し、年間 CO₂ 排出量は 36.57%減少した。比較システムと比べ、三つケースとも高い省エネ性と環境性の両方を持っている。ケース 2、ケース 3 の経済性は向上し、ケース 1 の経済性はない。ケース 1 とケース 3 の最適化容量は同じであるが、各目的の削減率は異なることが見られた。その原因として、目的による運転方式は異なることである。発電技術を最適化することにより、各最適化ケースの省エネルギー性、環境性、経済性も大きく変化している。

表 4-4-1 発電技術容量に関する単目的解析の結果

	年間一次エネルギー消費量 (GJ)	年間コスト (万円)	年間 CO ₂ 排出量(t)	年間一次エネルギー消費量削減率(%)	年間コスト削減率 (%)	年間 CO ₂ 排出量削減率 (%)	発電設備容量 (kW)	熱源設備容量 (kW)		
							GE	ABS	HP	TC
ケース 0	86281.11	14180.05	5572.02	—	—	—	—	3000	—	—
ケース 1	71990.61	15037.37	3806.69	16.56	-6.05	31.68	1378	3000	—	—
ケース 2	76057.25	13309.02	4237.60	11.85	6.14	23.95	1026	3000	—	—
ケース 3	72031.60	13494.17	3534.33	16.52	4.84	36.57	1378	3000	—	—

各ケースにおいて年間一次エネルギー消費量の構成を図 4-4-1 に示す。どのケースにおいても、発電設備の一次エネルギー消費量の割合が最も高く、次は系統電力の一次エネルギー消費量である。系統電力と熱源設備の一次エネルギー消費量を見ると、ケース 2 のほうが最も高く、発電設備の一次エネルギー消費量は、ケース 3 のほうが最も高い。系統電力の CO₂ 排出量の換算係数が高いため、環境性の最適化ケース 3 では、すべての電力負荷をガスエンジンで供給し、系統から電力を購入しない。また、ケース 1 のガスエンジンの最適化容量はケース 3 と同じであるが、一次エネルギー量の構成が異なることがわかった。その原因としては、それぞれの目的を最適化するために、異なる運転方式が必要となることです。

各ケースにおいて年間コストの構成を図 4-4-2 に示す。どのケースにおいても、ガス料金の割合が最も高く、次は電力料金である。三つケースを比べ、ケース 3 のガス料金が最も高い。図 4-4-1 から、ケース 2 と比べ、ケース 2 の系統電力の一次エネルギー消費が高い、しかし、電力料金を見ると、ケース 2 は、ケース 1 によりやや低い。これは、ケース 1 の契約電力はケース 2 により高く、ケース 1 の電力基本料金が高いというわけである。また、ケース 1 の一次エネルギー削減率はケース 3 とほぼ同じ、しかし、二つケースの年間コスト削減率の差が大きい。これにより、省エネルギー性が高いほど、省エネルギー性単当たりでの年間コストも高いことが分かった。

各ケースにおいて年間 CO₂ 排出量の構成を図 4-4-3 に示す。年間 CO₂ 排出量は、一次エネルギー消費量に影響されてるため、各ケースにおいて年間 CO₂ 排出量の構成割合は、年間一次エネルギー消費量の構成割合と同じ傾向がある。

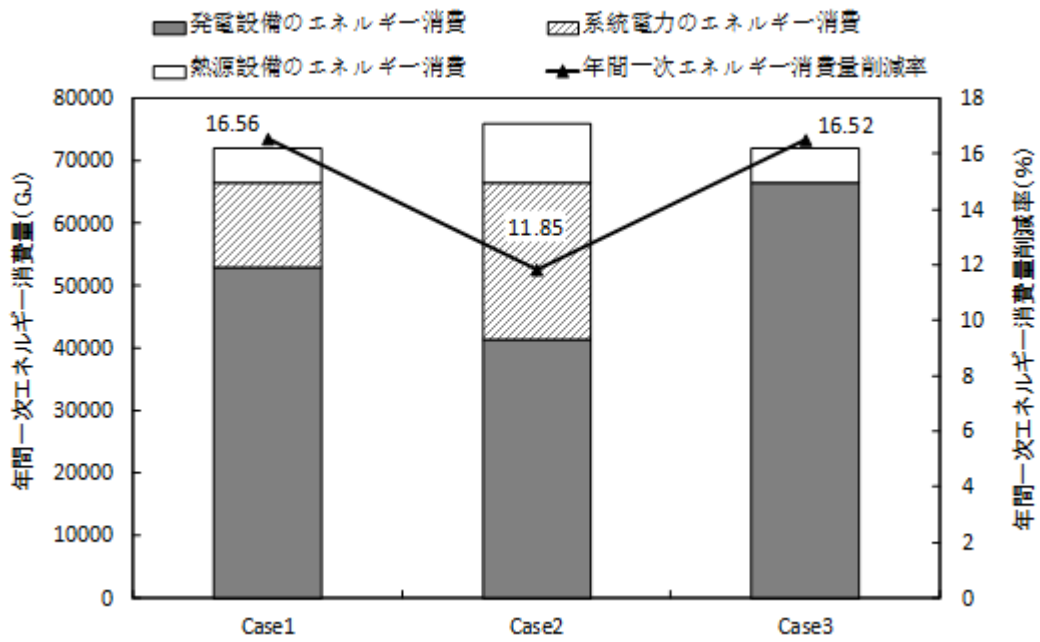


図 4-4-1 各ケースにおいて年間一次エネルギー消費量の構成

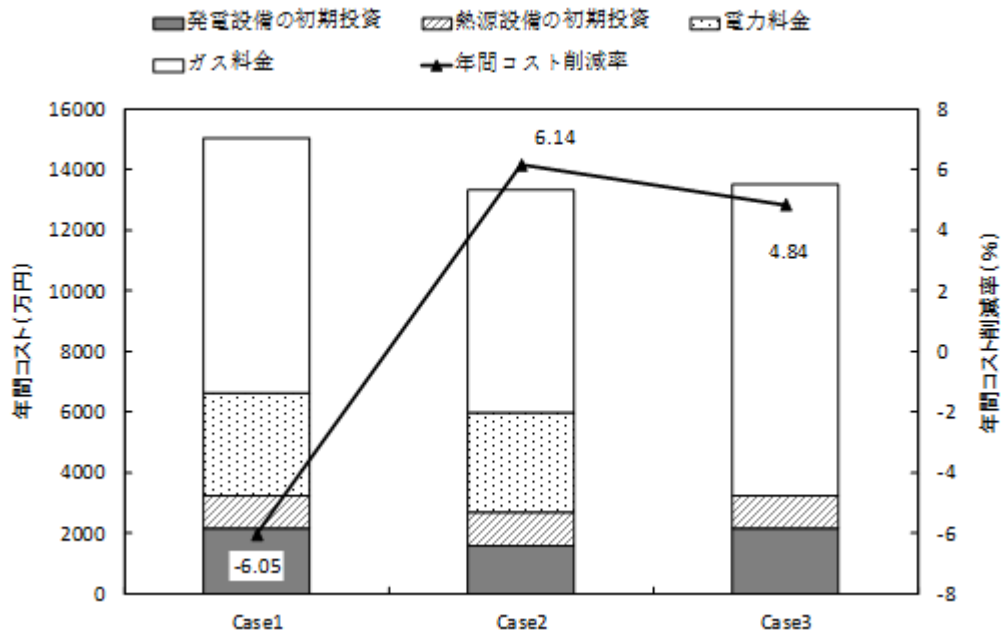


図 4-4-2 各ケースにおいて年間コストの構成

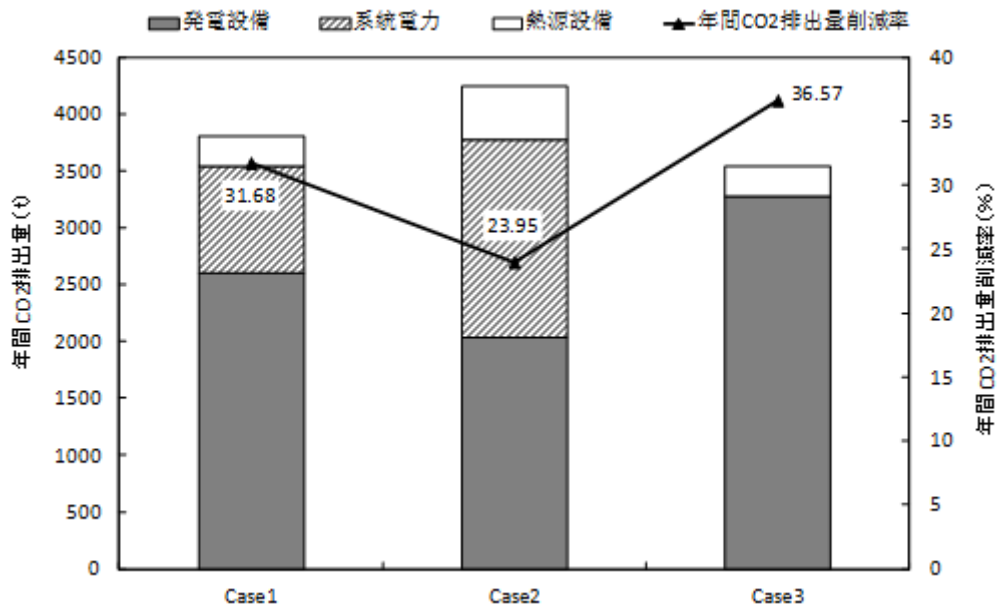


図 4-4-3 各ケースにおいて年間 CO₂ 排出量の構成

4-4-2 発電技術容量に関する多目的解析

まず、年間コスト最大削減率を目的関数として、年間 CO₂ 排出量削減率を考慮せずに、年間一次エネルギー消費量削減率を制約条件として設定する。表 4-4-1 に示すように、最も経済的なケース 2 では、年間一次エネルギー消費量削減率は 11.85% となる。検討するケースの年間一次エネルギー消費量削減率は 11.85% 以下に低くなると、経済性もなければ、省エネ性もない。したがって、年間一次エネルギー消費量削減率の制約を 11.5% からスタートする。省エネルギー性と経済性のパレート最適解を図 4-4-1 に示す。年間一次エネルギー消費量制約の増加により、年間 CO₂ 排出量の削減率が激しく増加することに対して、年間コストの削減率はやや減少した。年間一次エネルギー消費量制約は 5% 増加すると、年間コストは 0.9% だけ減少した。図 4-4-2 には省エネルギー性の制約による容量の変化を示す。年間一次エネルギー消費量削減率が 11.5% から 16% まで増加すると、ガスエンジンの最適化容量の変化は穏やかであり、ガスエンジンの容量は 34kW 増加したが、また、年間一次エネルギー消費量削減率が 16% から 16.5% まで増加すると、ガスエンジンの容量は急に 262kW 増加した。すなわち、年間一次エネルギー消費量削減率 16.5% 以上の制限を満たす同時に、年間コストが最小化するために、ガスエンジンの容量が大きく増加しないといけない。

年間コスト最大削減率を目的関数として、年間一次エネルギー消費量削減率を考慮せずに、年間 CO₂ 排出量削減率を制約条件として設定する。表 4-4-1 に示すように、最も経済的なケース 2 では、年間 CO₂ 排出量削減率が 23.95% となる。検討するケースの年間 CO₂ 排出量削減率は 23.95% 以下に低くなると、経済性もなければ、環境性もない。したがって、年間 CO₂ 排出量削減率の制約を 23% からスタートする。図 4-4-3 に環境性と経済性のパレート最適解を示す。年間 CO₂ 排出量の制約は 23% から 36% までの範囲で、年間コストは 1.05% 増加し、年間一次エネルギー消費量は 4.66 減少した。図 4-4-4 に環境性の制約による容量の変化を示す。年間 CO₂ 排出量削減率の制約が厳しくなるにつれ、ガスエンジンの容量が増加した。環境性の制約条件を満足し、経済性の最適化を求めるときに、ガスエンジンの容量を考慮することだけではなく、運転方式も考慮する必要がある。年間 CO₂ 排出量削減率の制約は 25% から 30% まで以上増加すると、ガスエンジンの容量は 1047kW の一定値になる。すなわち、このような場合、ガスエンジンの容量を変更し、経済性を改善することと比べ、運転方式を変更するのほうが、経済性が高い。

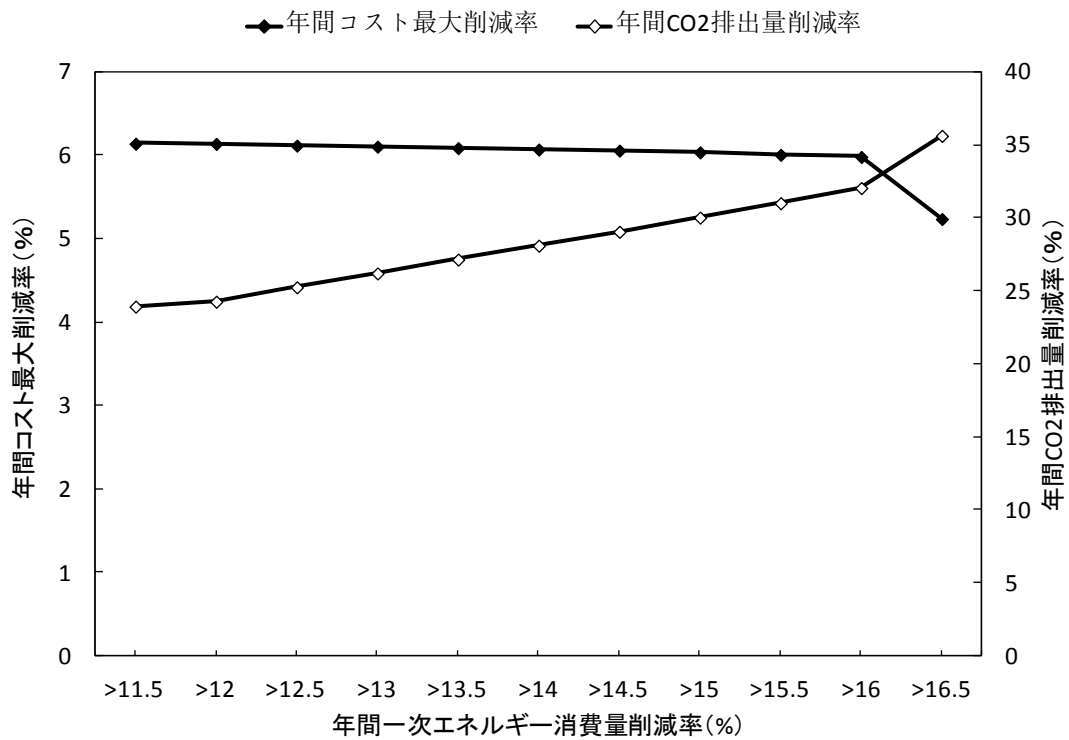


図 4-4-1 省エネルギー性と経済性のパレート最適解

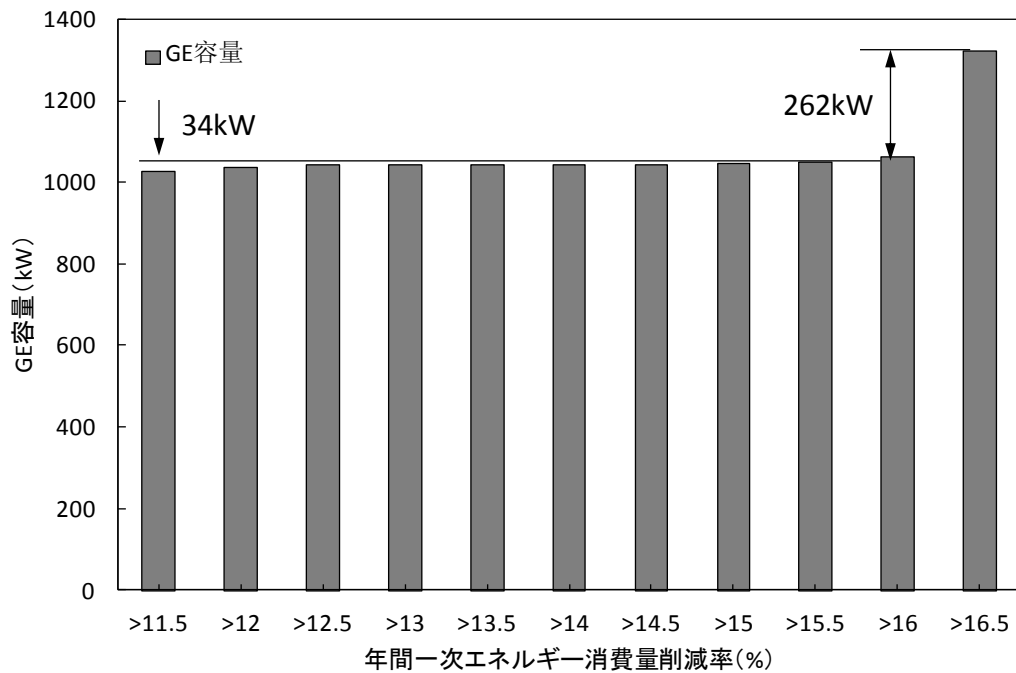


図 4-4-2 省エネルギー性の制約による容量の変化

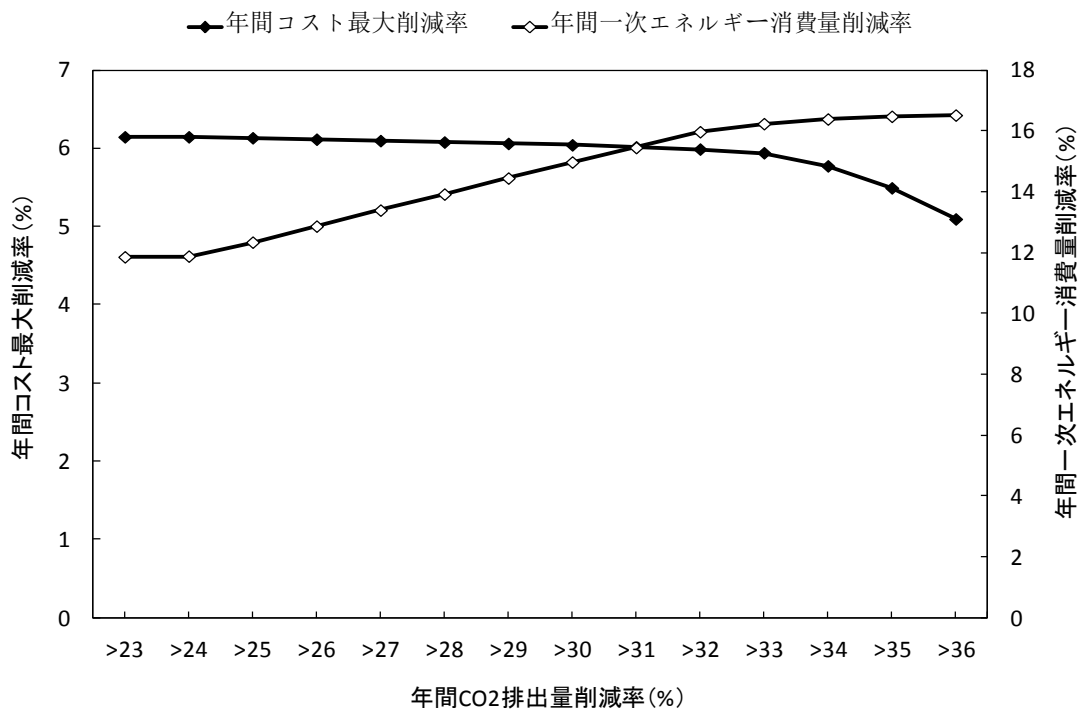


図 4-4-3 環境性と経済性のパレート最適解

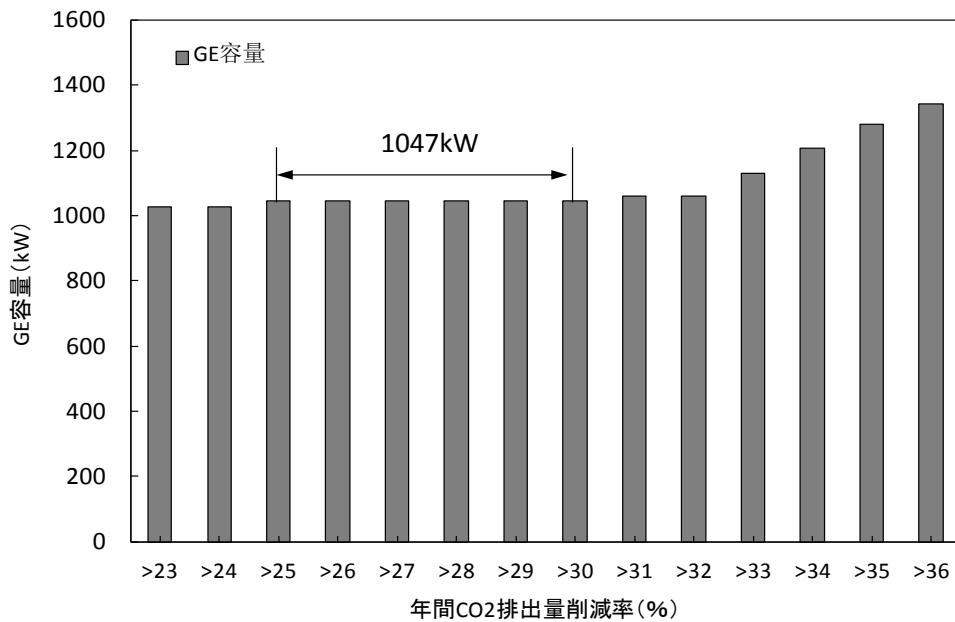


図 4-4-4 環境性の制約による容量の変化

4-5 熱源技術の影響

ガスエンジンの容量が 100kW から 1400kW までの範囲で、図 4-6-1 に熱源技術組み合わせ別年間コスト削減率の変化を示すように、同じ容量のガスエンジンが導入される場合は、ABS+HP+TC を組み合わせたエネルギーシステムの経済性が最も高い。本節では、熱源技術は ABS+HP+TC の組み合わせを設定し、多目的計画を行い、各目的を達成するため、各熱源技術の容量はどう変化するか検討する。ここで、発電技術は 500kW のガスエンジンを選定し、通年全負荷で運転する方式を設定する。

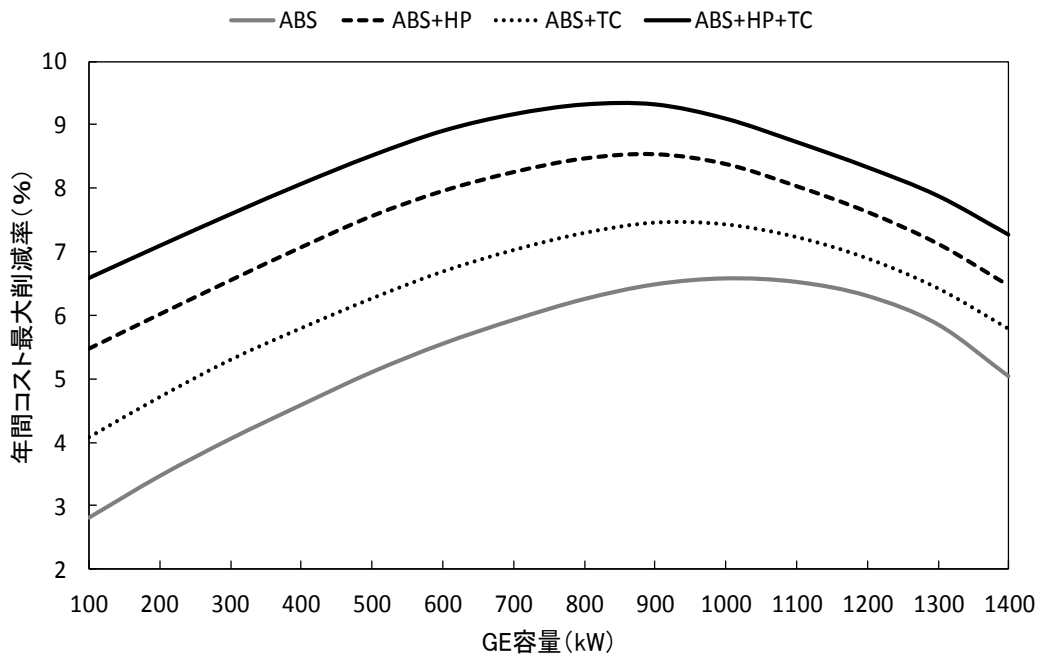


図 4-5-1 熱源技術組み合わせ別年間コスト削減率の変化

4-5-1 熱源技術に関する単目的解析

まず分散型エネルギーシステム導入の単目的最適化解析を行い、比較ケースに対する各ケースの年間一次エネルギー消費量削減率、コスト削減率、CO₂ 排出量削減率を計算した。各目的の最適化ケースの効果を明らかにした。その解析結果を表 4-5-1 に示す。

ケース 0：比較ケース。ガスエンジン未導入システム。

ケース 1：省エネルギー性の最適化ケース。年間一次エネルギー消費量削減率が最も大きいシステム。

ケース 2：経済性の最適化ケース。年間コスト削減率が最も大きいシステム。

ケース 3：環境性の最適化ケース。年間 CO₂ 排出量削減率が最も大きいシステム。

ケース 1 では、年間一次エネルギー消費量は 14.35% 減少し、年間コストは 1.04% 増加し、年間 CO₂ 排出量は 24.04% 減少した。ケース 2 では、年間一次エネルギー消費量は 12.57% 減少し、年間コストは 3.80% 増加し、年間 CO₂ 排出量は 23.81% 減少した。ケース 3 の結果はケース 1 と同じである。ケース 1 と比べ、ケース 2 では、年間一次エネルギー消費量の削減率は 1.78% 減少し、年間コスト削減率は 4.84% 増加し、年間 CO₂ 排出量の削減率は 0.23% 減少した。そのため、発電技術の容量及び運転方式が固定される場合は、熱源技術の変化による、省エネルギー性、環境性の向上には効果が非常に小さく、経済性の向上には大きな効果が得られている。

表 4-5-1 熱源技術に関する単目的解析の結果

	年間一次エネルギー消費量 (GJ)	年間コスト (万円)	年間 CO ₂ 排出量(t)	年間一次エネルギー消費量削減率(%)	年間コスト削減率 (%)	年間 CO ₂ 排出量削減率 (%)	発電設備容量 (kW)	熱源設備容量 (kW)			
							GE	ABS	HP	TC	
ケース 0	86281.11	14180.05	5572.02	—	—	—	—	3000	—	—	—
ケース 1	73900.04	14327.21	4232.26	14.35	-1.04	24.04	500	463	1989	2389	
ケース 2	75439.66	13641.06	4245.55	12.57	3.80	23.81	500	2550	698	269	
ケース 3	73900.04	14327.21	4232.26	14.35	-1.04	24.04	500	463	1989	2389	

4-5-2 熱源技術に関する多目的解析

まず、年間コスト最大削減率を目的関数として、年間 CO₂ 排出量削減率を考慮せずに、年間一次エネルギー消費量削減率を制約条件として設定する。

表 4-5-1 に示すように、最も経済的なケース 2 では、年間一次エネルギー消費量削減率は 12.57% となる。検討するケースの年間一次エネルギー消費量削減率は 12.57% 以下に低くなると、経済性もなければ、省エネ性もない。したがって、年間一次エネルギー消費量削減率の制約を 12.5% からスタートする。省エネルギー性と経済性のパレート最適解を図 4-6-2 に示す。ケース 2 により、省エネルギー性の最適化ケース 1 の年間一次エネルギー消費量削減率は 1.78% だけ増加するため、省エネルギー性の制約変化は少ない。年間一次エネルギー消費量の制約は 12.5% から 14.3% まで増加すると、年間コストは 3.57% 減少した。図 4-5-3 には省エネルギー性の制約による熱源技術容量の変化を示す。省エネルギー性の制約が小さい場合には、ABS の容量が最も大きく、2550kW であり、HP と TC の容量がそれぞれ 698kW、269kW である時、経済性が最も高い。年間一次エネルギー消費量削減率が高くなるにつれ、ABS の容量が減少し、HP と TC の容量が増加した。その理由として、排熱を利用できる ABS により、比較的 COP の高い HP、TC を大きく導入しないと、省エネルギー性を向上できない。しかし、電源機器 HP、TC を導入することにより、冷暖房供給コストは高くなるため、経済性は低減した。

年間コスト最大削減率を目的関数として、年間一次エネルギー消費量削減率を考慮せずに、年間 CO₂ 排出量削減率を制約条件として設定する。表 4-5-1 に示すように、最も経済的なケース 2 では、年間 CO₂ 排出量削減率が 23.81% となる。検討するケースの年間 CO₂ 排出量削減率は 23.81% 以下に低くなると、経済性もなければ、環境性もない。したがって、年間 CO₂ 排出量削減率の制約を 23.80% からスタートする。図 4-6-4 に環境性と経済性のパレート最適解を示す。環境性が最も高いケースでは、年間 CO₂ 排出量が 24.04% となるため、年間 CO₂ 排出量の制約は 24.04% まで増加できる。年間 CO₂ 排出量の制約は 24.04% 以上になると、経済性がなくなる。図 4-5-5 に環境性の制約による熱源技術容量の変化を示す。年間 CO₂ 排出量削減率の制約が 23.80% から 24.04% まで厳しくなると、ABS の容量は 1861kW 減少し、HP と TC の容量はそれぞれ 1024kW、1861kW 増加した。経済性を考慮すると、冷房需要は TC と ABS により供給され、TC と ABS の総容量は、冷房のピーク負荷と同じである時、コストが最も低い。環境性の制約が厳しくなるにつれ、TC の容量が増加し、経済性に対して、ABS の容量がある程度削減できるが、しかし、ABS 容量の減少量は TC 容量の増加量より大きい場合は、冷房のピーク負荷は満たせない。また、ABS 容量の減少量は TC 容量の増加量より小さい場合は、経済性がない。そのため、ABS 容量の減少量は TC 容量の増加量と同じである時、経済性が最も高い。

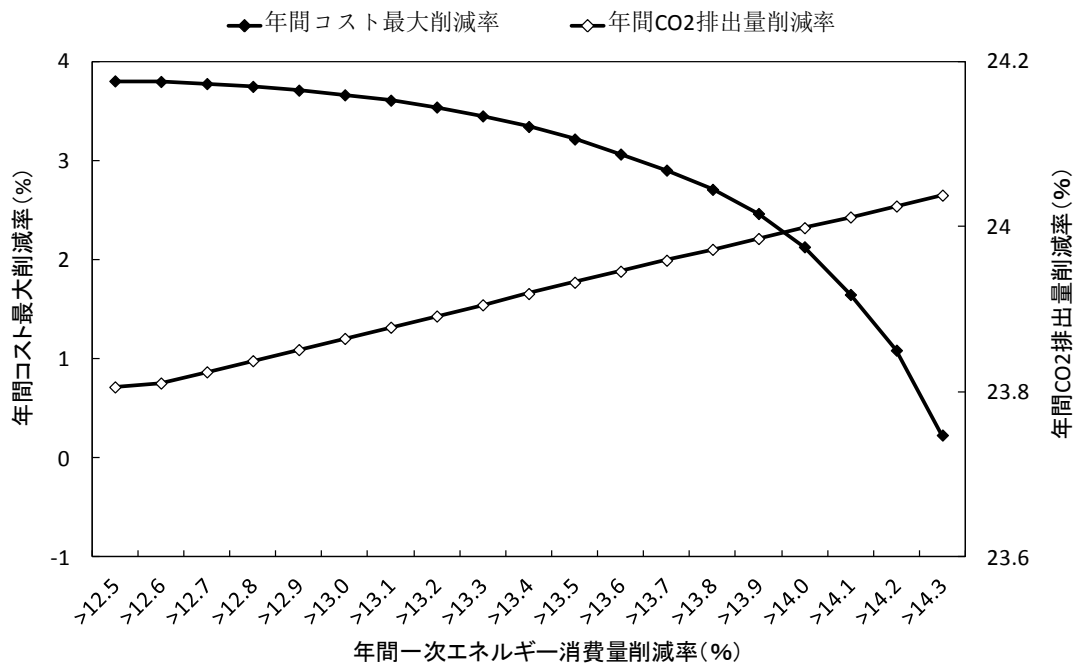


図 4-5-2 省エネルギー性と経済性のパレート最適解

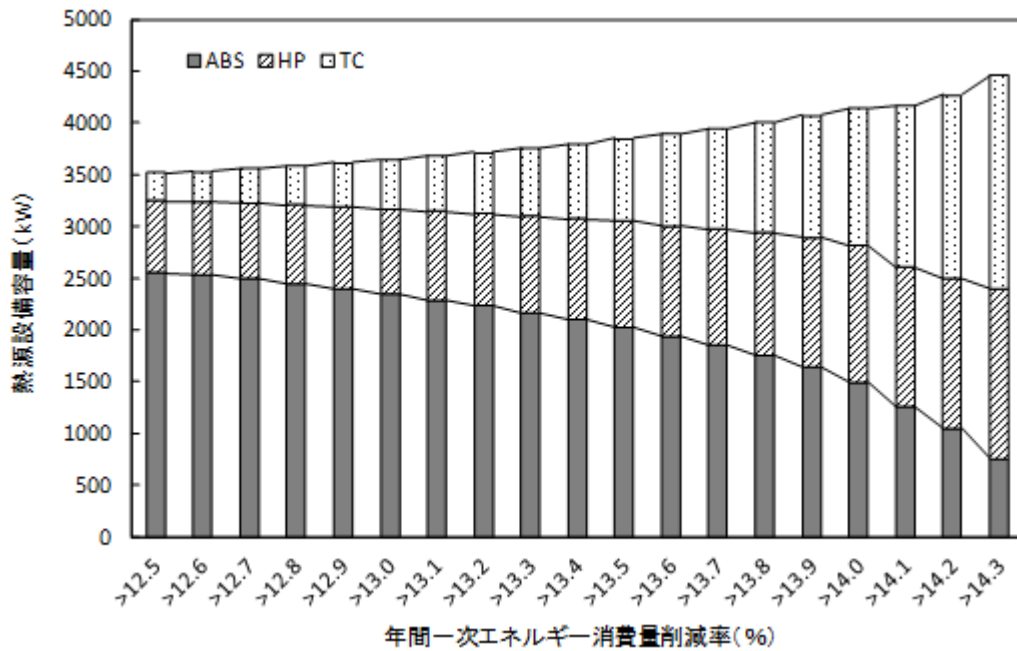


図 4-5-3 省エネルギー性の制約による熱源技術容量の変化

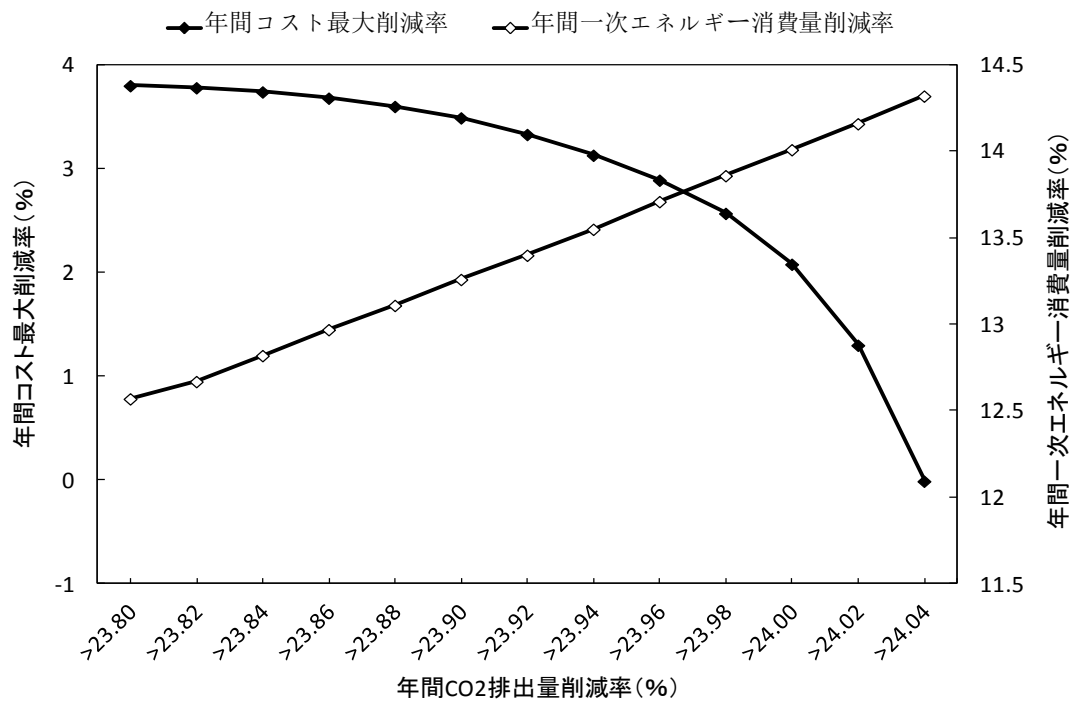


図 4-5-4 環境性と経済性のパレート最適解

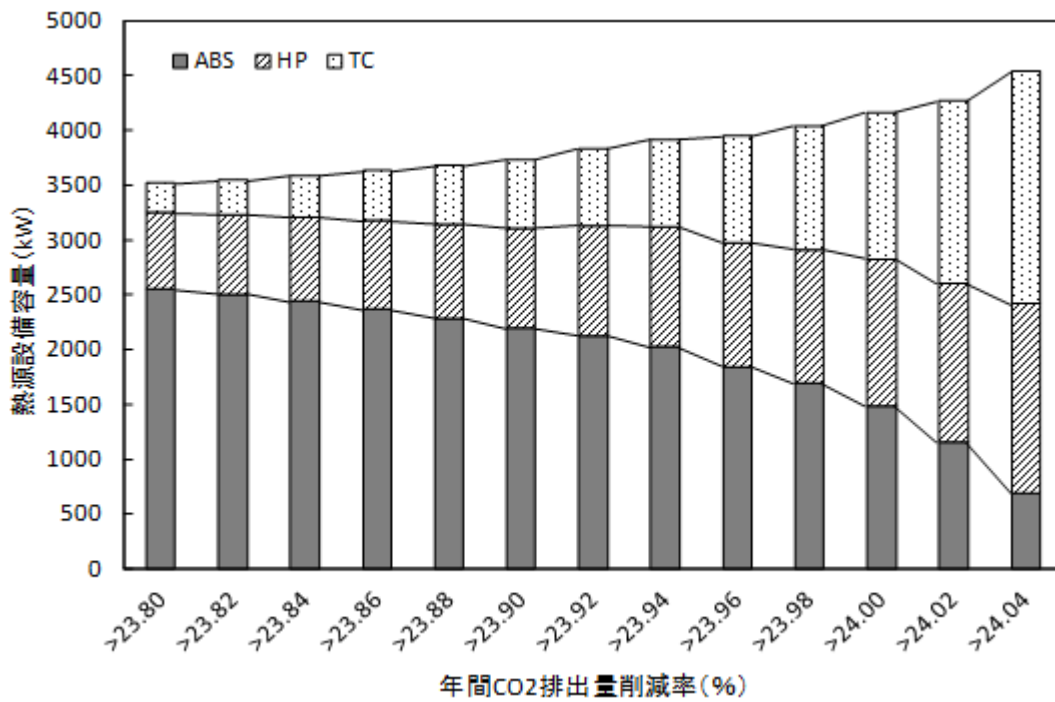


図 4-5-5 環境性の制約による熱源技術容量の変化

4-6 経済性要因の影響

本節では、発電容量と運転方式を固定せず、各経済性の要因が変化する場合、経済性に対する発電設備の最適化容量を求める。

4-6-1 電力価格の影響

電力価格の影響を図 4-6-1 に示す。全体をみると、どの場合においても、ガスエンジンを導入するのは、経済性がある。現在では、ガスエンジンの初期投資が 20 万円/kW であり、1025kW 導入すれば、経済性が最も高い。ガスエンジンの初期投資が減少するとともに、導入容量が増加することが見られた。初期投資が 4 万円/kW までさがると、導入容量が変化せず、1377kW となった。その原因として、電力ピーク負荷は 1377kW であるため、ガスエンジンの初期投資が下がると、すべての電力はガスエンジンから供給されるほうが安い。電力の従量料金が 10% 増加すれば、系統から電力を購入する料金が高くなり、同じ初期投資でガスエンジンの最適化容量が増加した、初期投資が 10 万円/kW まで下がると、すべての電力がガスエンジンから供給されるのは経済性が高い。電力の従量料金が 20% 増加すれば、初期投資が 16 万円/kW まで下がると、すべての電力がガスエンジンから供給されるのは経済性が高い。

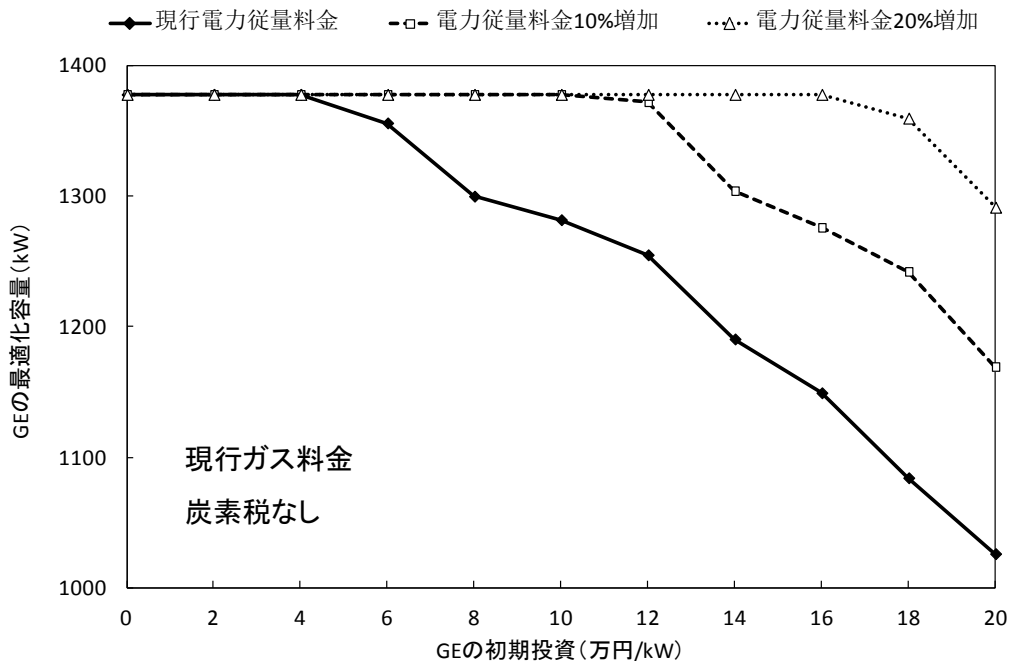


図 4-6-1 電力価格の影響

4-6-2 ガス価格の影響

ガス価格の影響を図 4-6-2 に示す。ガスの従量料金が 10%減少すれば、系統から電力を購入することにより、ガスエンジンから発電するほうが安いいため、同じ初期投資でガスエンジンの最適化容量が増加した、初期投資が 14 万円/kW まで下がると、すべての電力がガスエンジンから供給されるのは経済性が高い。電力の従量料金が 20%増加すれば、初期投資が 20 万円/kW のままでも、すべての電力がガスエンジンから供給されるのは経済性が高い。

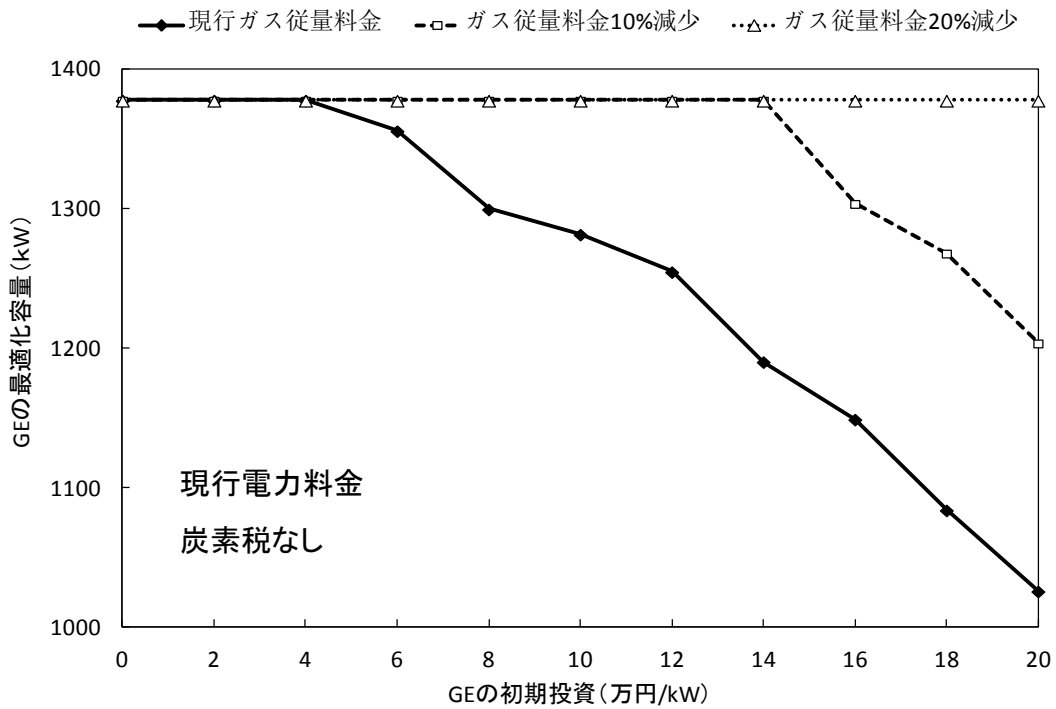


図 4-6-2 ガス価格の影響

4-6-3 炭素税

炭素税の影響を図 4-6-3 に示す。炭素税が 5 円/kg になれば、系統から電力を購入することにより、ガスエンジンから発電するほうが CO₂ 排出量が少ないため、同じ初期投資でガスエンジンの最適化容量が増加した、初期投資が 12 万円/kW まで下がると、すべての電力がガスエンジンから供給されるのは経済性が高い。炭素税が 10 円/kg になれば、初期投資が 18 万円/kW まで下がると、すべての電力がガスエンジンから供給されるのは経済性が高い。

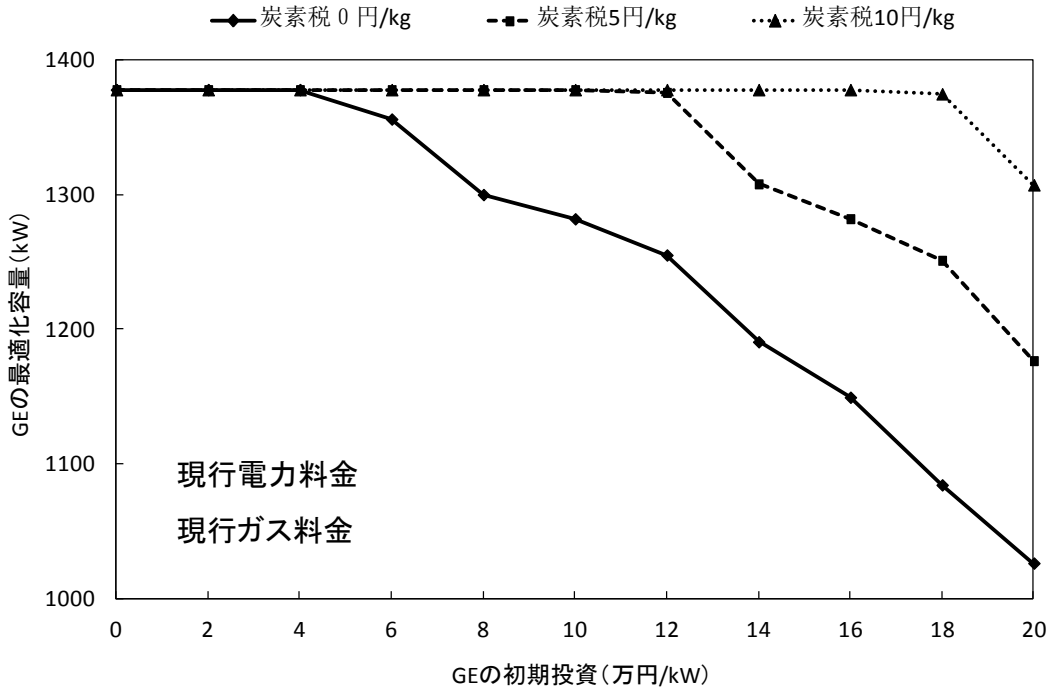


図 4-6-3 炭素税の影響

4-7 まとめ

分散型電源・熱源システムの省エネルギー性、経済性、環境性を達成するために、電源・熱源技術の容量、運転方式、燃料料金などの要素を考慮するのが必要と考えられる。

- (1) 発電技術を最適化することにより、各最適化ケースの省エネルギー性、環境性、経済性も大きく変化している。
- (2) 同じ容量の発電技術が導入された場合にも、ABS+HP+TC を組み合わせたエネルギーシステムの経済性が最も高い。発電技術の容量及び運転方式が固定される場合は、熱源技術の変化による、省エネルギー性、環境性の向上には効果が非常に小さく、経済性の向上には大きな効果が得られている。
- (3) 電力料金の増加、ガス料金の低減、ガスエンジンの初期投資の低減及び炭素税の導入ことにより、経済性に対して、ガスエンジンの最適容量が増えることが分かった。どんな場合、すべての電力はガスエンジンから供給されるか検討した。

参考文献

1. 藤井 照重：コージェネレーションの基礎と応用，コロナ社
2. 九州電力業務用電力 A：
http://www.kyuden.co.jp/agreement_rate_gyomua_-080901.html, 2012.06.01 参照
3. 西部ガス料金メニュー：
http://www.saibugas.co.jp/home/rates_business/menu/price_list.htm#price06, 2012.06.01 参照

第五章 蓄電池と連携したガスコージェネレーションシステムの導入効果に関する研究

5-1 はじめに

5-2 モデルの紹介

5-3 ケーススタディ

5-3-1 エネルギーシステムの構成

5-3-2 データベースの整備

5-4 感度解析

5-5 まとめ

5-1 はじめに

高度技術開発の発展に伴い、電力需要は年々増加してきている。殊に、昼夜間および季節間の電力需要の格差は大きな問題となっている。これらの問題をすべてカバーし、発電所や送電施設を建設することは非常に困難であり、またそれらをまかなうコストも問題となる。もしこれらの問題が解決できるのであれば、発電所や送電施設の効率的な運用が可能となり、運転コスト削減や省資源につながる。

そのような背景から現在蓄電池が注目されています。蓄電池システムは、電力負荷を平準化することにより電力変動を抑制できます。さらに電力需要の少ない時間帯に充電し、ピーク時間帯に放電させる運用ができ、需要家設置の場合においては電力料金削減や電力品質向上が期待できます。また、個々の用途を見ても、電力系統用、自動車用、防災用、家庭用を初めとして大きな市場拡大が想定される成長産業分野である。

一方、分散型エネルギーシステムにおける電力貯蔵の役割を紹介する。(1) 連系線潮流一定制御を目的にマイクログリッド内需要および分散型電源出力変動の平滑化する。短時間周期（数十分オーダーまで）の小さい変動を吸収する最低限の容量がある。(2) 安価な夜間電力活用のため、長時間（6-8時間）充放電に必要な容量が必要である。昼間ピーク削減による基本料金節減をメリットとする。(3) 制御可能な分散型電源の運用効率向上のため短時間（分-1時間）容量が必要であり、部分負荷運転や余分な原動機の起動・停止を回避するメリットがある。

本章では、部分負荷時の効率低下を考慮すると、ガスコージェネレーションシステムは全年満負荷で運転する場合に対して、電力需要が少ない夜には大量な余剰電力を系統に売電することが発生した。このような状況に対して、蓄電池の導入を提案し、負荷が低い夜に大量な余剰電力を蓄えて、負荷が高い昼に放電する。また、北九州学研都市を対象として、電力・熱負荷、燃料料金、電源技術・熱源技術の仕様など入力データを基づいて、ガスコージェネレーションシステムに、蓄電池を電力貯蔵装置として、その導入効果を検討する。

5-2 モデルの紹介

本報では、第三章の 3-6 の理論を用いて、蓄電池と連携したガスコージェネレーションシステムの経済的なモデルを開発する。

図 5-2-1 にモデルの計算フローを示す。まず、デマンドサイドの熱・電負荷、燃料料金契約、電源技術と熱源技術の情報を入力条件として、調査・整備する必要がある。ここでは蓄電池が未導入場合の CGS を比較システムとする。モデルの目標として、比較システムに対する年間コスト削減率の最大値とする。その上、エネルギーの供給と需要の均衡など制約条件下に、モデルを実行して最適化計算を行い、最適な蓄電池容量及び最適な運転パターンを求める。

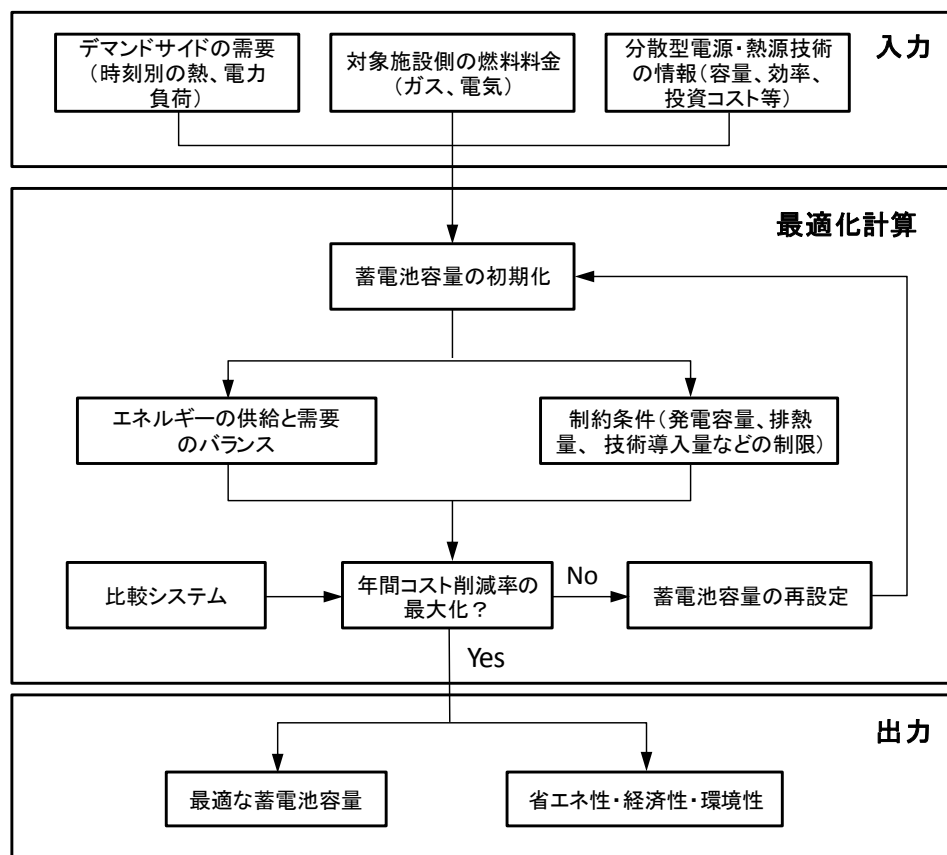


図 5-2-1 モデルの計算フロー

5-3 ケーススタディ

本報では、蓄電池と連携したガスコージェネレーションシステムの導入効果を明らかにするために、北九州学研都市を対象として、ケーススタディを行う。

5-3-1 エネルギーシステムの構成

図 5-3-1 に想定する分散型エネルギーシステムのモデルを示す。本モデルでは、コージェネレーションを分散型技術として、採用する。電力負荷はコ不足分は商用系統から買電する。冷暖房負荷はコージェネレーション(CGS)の排熱及び排熱回収型吸収式冷温水発生機(ABS)から供給される。給湯負荷は CGS 発電時の排熱により供給され、不足分はバックアップボイラ(GB)により補う。

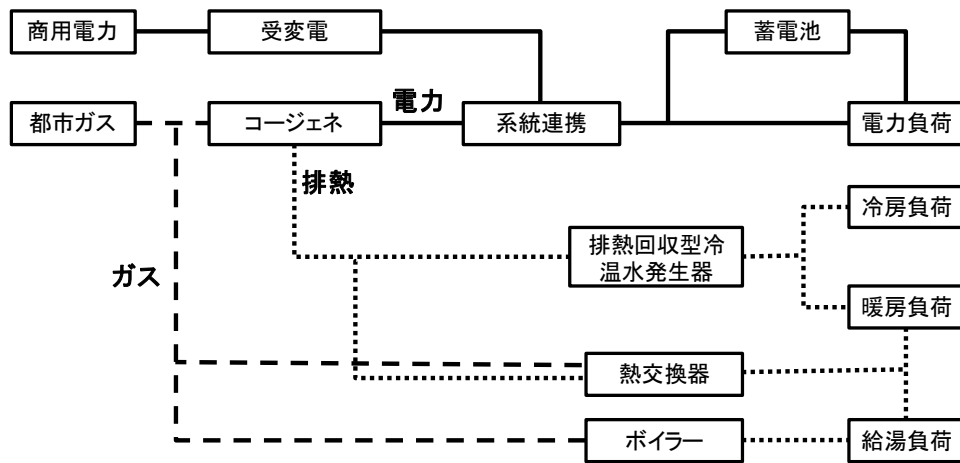


図 5-3-1 蓄電池が導入された CGS

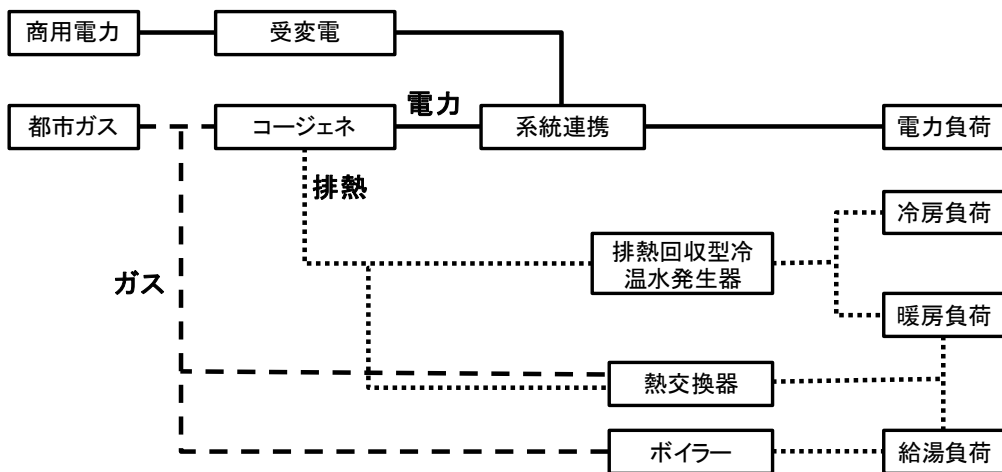


図 5-3-2 蓄電池が未導入 CGS

5-3-2 データベースの整備

(1) 負荷データ

詳細については第四章の 4-3 を参照してください。

(2) 電源・熱源設備データ

メーカーのカタログや調査等を通して、表 5-3-1、5-3-2 に示すように、各技術の効率、コストを集め、分散型電源・熱源技術のデータベースを構築した。ここに、CGS の容量は 800kW を選定した。発電効率を高めるために、通年全負荷で発電し、余剰電力は系統に売電するもしくは蓄電池に充電するという運転方式を設定した。

表 5-3-1 発電設備のデータ

CGS	容量(kW)	800
	発電効率	0.36
	排熱回収率	0.40
	負荷制限	全負荷
	初期投資 (万円/kW)	20
	運転維持固定費用 (円/kW)	945
	運転維持変動費用 (円/kWh)	1
	耐用年数(年)	15

表 5-3-2 熱源設備のデータ

	容量 (kW)	COP		初期投資 (万円/kW)	耐用年数 (年)
		冷凍	加熱		
ABS	3000	1.45	0.88	4.5	15
GB	200	/	0.9	1.5	15
HE	200	/	0.8	0.6	15

(3)蓄電池データ

蓄電池は負荷の少ない夜間に電池を充電し、負荷がピークとなる昼間に放電する「負荷平準化」電力貯蔵設備である。

表 3 に蓄電池の仕様を示す。蓄電池は平日（日曜日と祝日以外の日）の 22 時から 8 時まで連続充電し、9 時から 22 時まで連続放電する運転方法と設定する。図 6 に蓄電池充放電量の設定を示す。夏季及びその他季節では、蓄電池は充電時間帯(22 時から 8 時) で、容量の 1/10 の電流で 10 時間程度充電を行う。放電方法について、夏季の平日は他の日（その他季節、夏季の日曜日と祝日）と異なる。夏季の 13 時から 16 時までにはピーク時間帯となるため、容量の 16%の電流で放電し、この以外の放電時間帯で、容量の 2.9%の電流で放電する。他の日では、容量の 5.7%の電流で 14 時間程度放電を行う。

表 5-3-3 蓄電池情報

充放電効率	77%
初期投資 (万円/kWh)	2.5
充電時間帯	22 時～8 時
放電時間帯	9 時～22 時 (発電機と系統電力両方から充電できる)
耐用年数 (年)	15

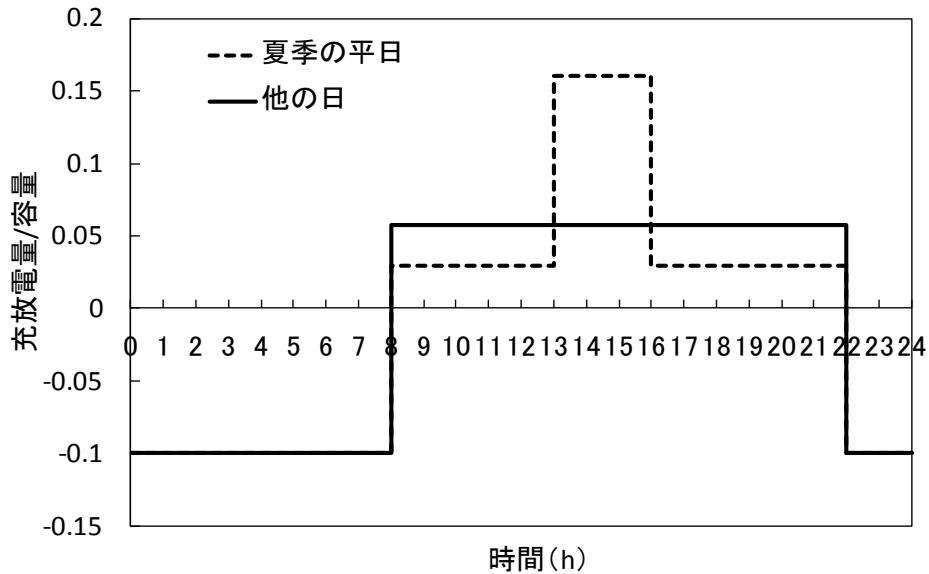


図 5-3-2 充放電量の設定

(4) 他のデータ

燃料料金データ、電力会社及びガス会社の契約を参照し、表 5-3-4 に示すように、料金データベースを作成した。電力料金は業務用季時別電力 A を採用する。「夏季」は 7 月 1 日から 9 月 30 日までの期間となる。「その他季」は「夏季」以外の期間となる。時間区分は次の通りである。「ピーク時間」は、夏季の毎日 13 時から 16 時までの時間となる。「昼間時間」とは、毎日 8 時から 22 時までの「ピーク時間」以外の時間となる。「夜間時間」は「ピーク時間」および「昼間時間」以外の時間となる。また日曜日、祝日は終日「夜間時間」扱いとする。ガス料金は、CGS が導入される場合、トータルエネルギーシステム契約第一種を採用する。また、自家発電の余剰電力の買取価格は季節、時間帯によって違う。北九州地区エネルギー別発熱量、CO₂ 排出量の換算係数などは、第四章の 4-3 を参照してください。

表 5-3-4 燃料料金

電力	基本料金(円/kW)		1953
	従量料金 (円/kWh)	ピーク	14.37
		夏季昼間	12.02
		その他季昼間	11.10
		夜間	6.84
ガス	定額基本料金(円/月)(冬季)		78750
	定額基本料金(円/月)(その他)		78750
	流量基本料金(円/m ³)(冬季)		793.80
	流量基本料金(円/m ³)(その他)		793.80
	従量料金(円/m ³)		62.70
売電	夏季昼間 (円/kWh)		7.50
	その他季昼間 (円/kWh)		6.60
	夜間 (円/kWh)		3.60

5-4 感度解析

本報では、発電効率を高めるように、CGSは800kWと全負荷で運転している。電力需要が少ない夜には大量な余剰電力を系統に売電することが発生した。しかし、売電価格が低いため、経済性がない。また、売電することにより、省エネルギー性も得られない。このような状況に対して、蓄電池の導入を提案し、負荷が低い夜に大量な余剰電力を蓄えて、負荷が高い昼に放電する。蓄電池容量によるエネルギーシステムの年間売電量と充電量を図5-4-1に示す。蓄電池容量が大きくなるにつれ、充電量が増加した。売電量がまず減少して、蓄電池容量が3000kWhを超えると、売電量が増加し始める。この原因としては、蓄電池容量が大きくなるとともに、昼に放電量も大きくなるため、昼の余剰電力が増加したことである。

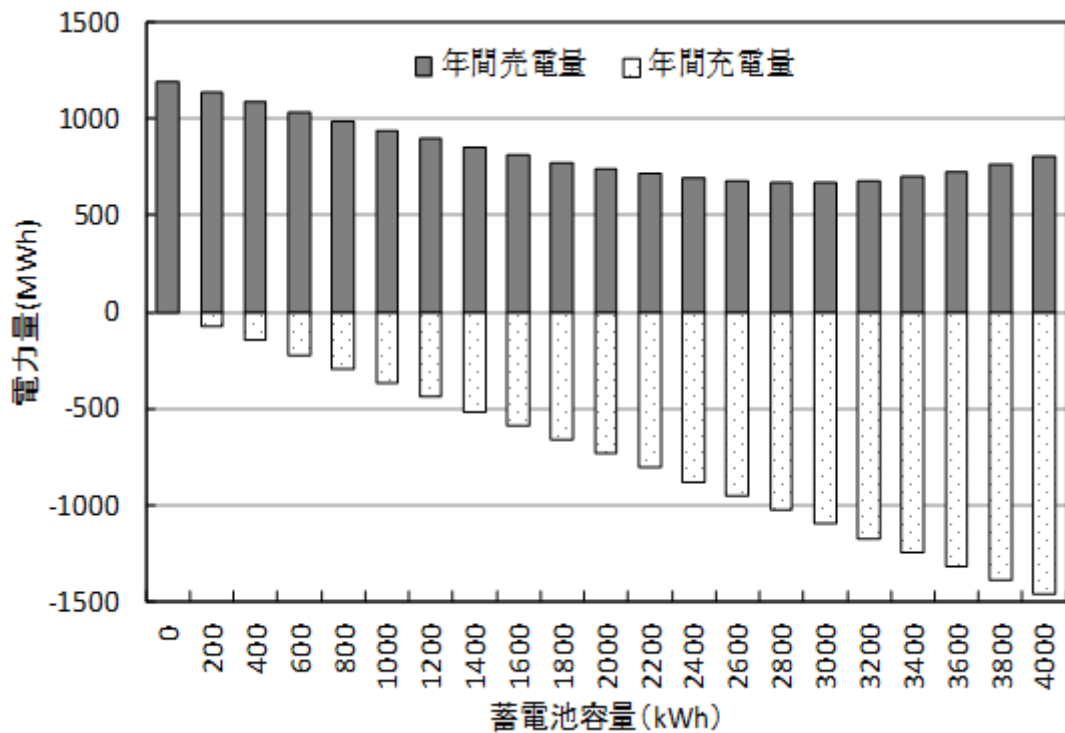


図 5-4-1 蓄電池容量による年間売電量と充電量

蓄電池が導入するにつれ、蓄電池がない場合に対する年間コスト削減率を図5-4-2に示す。蓄電池が導入することにより、年量が1372kWhになる時に、年間コスト削減率は0.15%と最大値である。现阶段では、蓄電池の導入により経済性をあまり改善できないことが見られた。

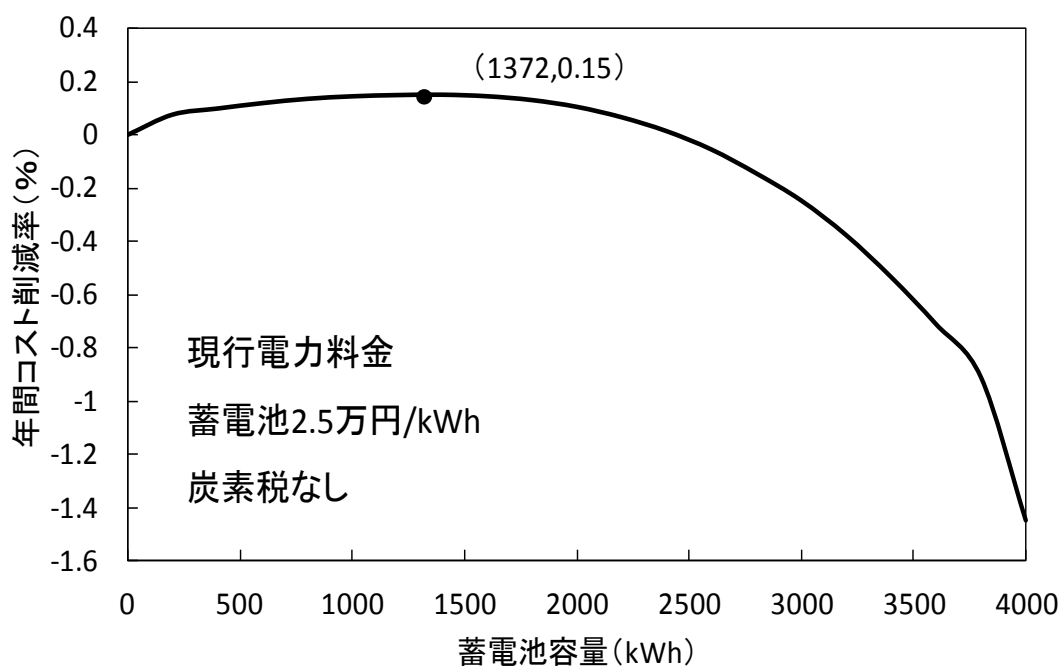


図 5-4-2 年間コスト削減率

図 5-4-3 は電力料金が増加する場合、蓄電池容量による年間コスト削減率を示している。この図から、蓄電池容量の増加により、まず年間コストの削減率が高くなるが、一定値に達してから、逆に下がっていることが分かった。即ち、経済性からみると、蓄電池の発電容量には最適値が存在することになる。電力料金の増加が 25%、50%、75%である場合は、最適な蓄電池容量がそれぞれ 2364kWh、2584kWh、2385kWh となる。電力料金の増加が大きいくほど、蓄電池の最適な容量も大きくなる。

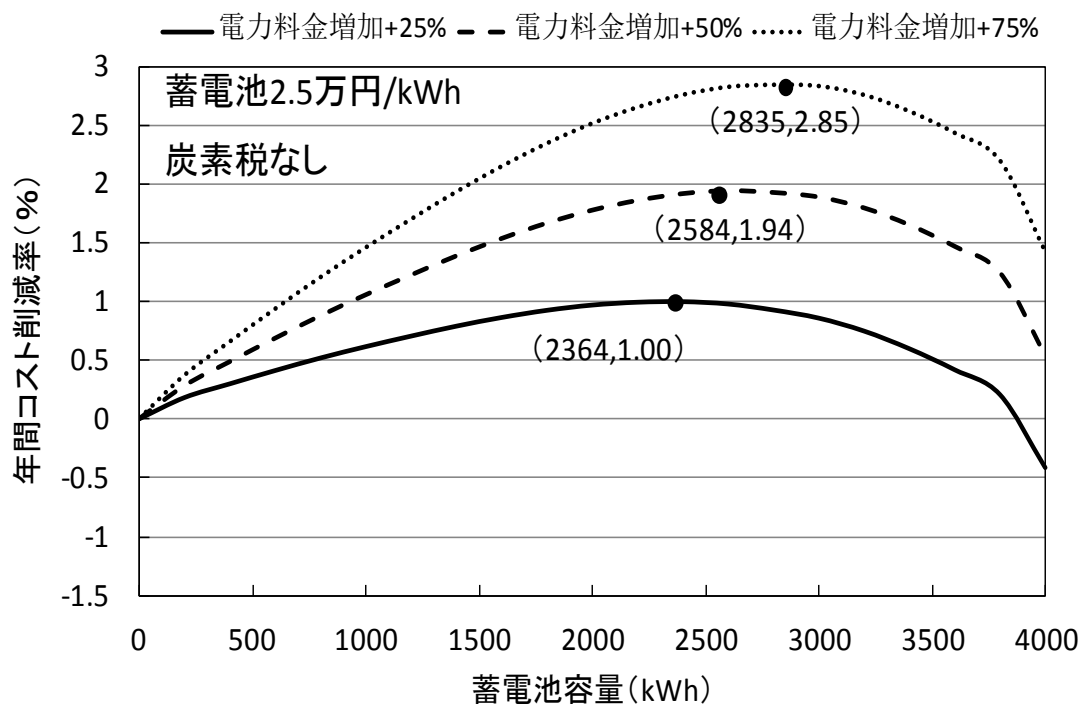


図 5-4-3 電力料金の影響

蓄電池の価格は蓄電池導入の経済効果を左右するため市場への普及及び推進に影響を与える。前の計算結果によると、蓄電池が今の価格で、年間コスト最大削減率は0.15%であり、経済性があまりないことが分かった。図5-4-4は蓄電池価格が変化した場合、蓄電池容量による年間コスト削減率を示している。蓄電池の価格が2万円/kWh、1.5万円/kWh、1万円/kWhである場合は、最適な蓄電池容量がそれぞれ2312kWh、2970kWh、3302kWhとなる。

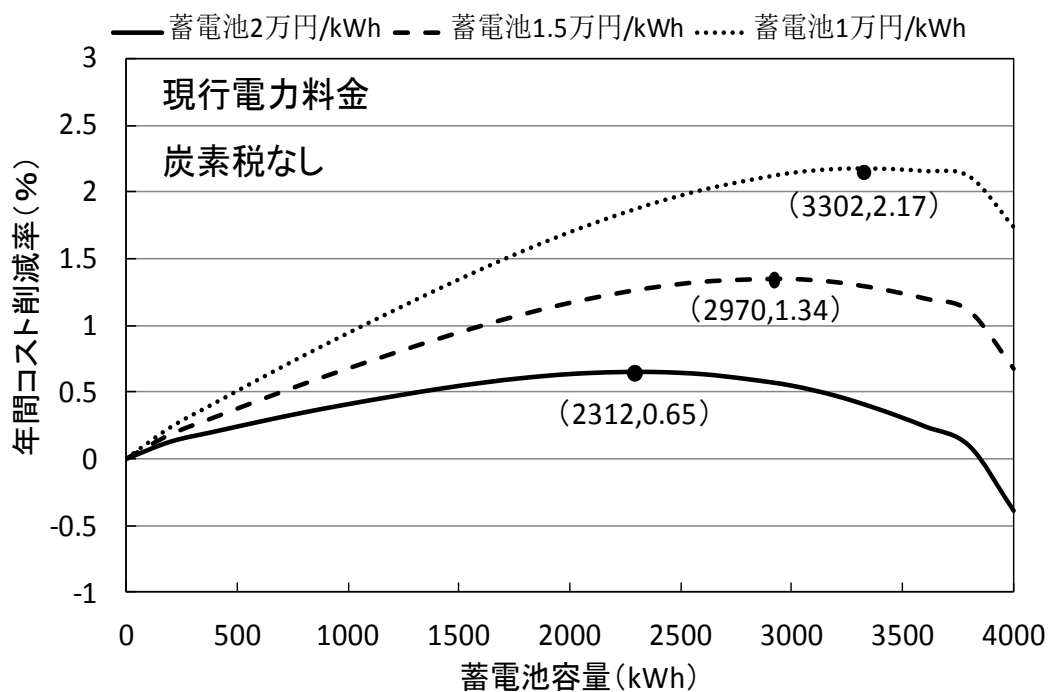


図 5-4-4 蓄電池価格の影響

系統から買電することにより、天然ガスを燃やし、CGS から発電したほうが CO₂ 排出量が低い。蓄電池が夜に CGS から生産した電力を蓄えて、昼に放電するのは、系統からの買電量を削減し、CO₂ 排出量も削減した。そのため、将来炭素税を実施すると、蓄電池の導入は、経済性の向上に貢献できる。図 5-4-5 は炭素税が考慮される場合、蓄電池容量による年間コスト削減率を示している。炭素税が 5 円/kg、10 円/kg、15 円/kg である場合は、最適な蓄電池容量がそれぞれ 2016kWh、2178kWh、2265kWh となる。

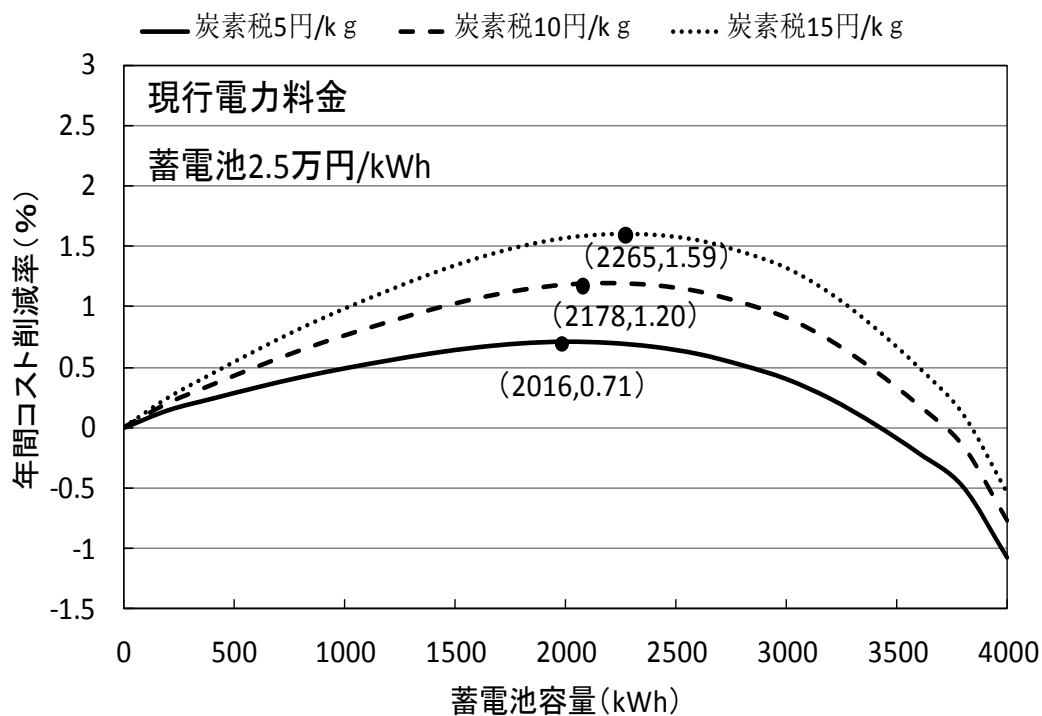


図 5-4-5 炭素税の影響

5-5 まとめ

本報では、CGS が通年全負荷で発電し、負荷が低い夜に大量な余剰電力が存在する場合に対して、経済性及び省エネルギー性を改善するために、蓄電池の導入を提案した。また、電力料金、蓄電池の価格、炭素税の変動を考慮した場合には、経済性のある蓄電池の最適な容量を検討した。

- (1) 蓄電池が導入することにより、年量が 1372kWh になる時に、年間コスト削減率は 0.15% と最大値である。現段階では、蓄電蓄電池の導入により経済性をあまり改善できないことが見られた。
- (2) 電力料金の増加が 25%、50%、75% である場合は、最適な蓄電池容量がそれぞれ 2364kWh、2584kWh、2385kWh となる。電力料金の増加が大きいほど、蓄電池の最適な容量も大きくなる。
- (3) 蓄電池の価格が 2 万円/kWh、1.5 万円/kWh、1 万円/kWh である場合は、最適な蓄電池容量がそれぞれ 2312kWh、2970kWh、3302kWh となる。
- (4) 炭素税が 5 円/kg、10 円/kg、15 円/kg である場合は、最適な蓄電池容量がそれぞれ 2016kWh、2178kWh、2265kWh となる。

参考文献

1. 日本コージェネレーションセンター編：コージェネレーション総合マニュアル，日本工業出版
2. 資源エネルギー庁：蓄電池技術の現状と取組について，平成 21 年 2 月
3. 経済産業省 蓄電池戦略プロジェクトチーム：蓄電池戦略，平成 24 年 7 月
4. NAS 電池の市場動向と普及拡大，NGK レビュー第 60 号，平成 16 年 3 月
5. 浅野 浩志，電力貯蔵を含む分散型エネルギーシステムの最適運用，2008 年 12 月
6. 建築コスト管理システム研究所，新技術調査検討会：NAS 電池について，新技術調査レポート
7. 九州電力業務用電力 A：
http://www.kyuden.co.jp/agreement_rate_gyomua_-080901.html，2012.06.01 参照
8. 西部ガス料金メニュー：
http://www.saibugas.co.jp/home/rates_business/menu/price_list.htm#price06，2012.06.01 参照

第六章 太陽熱発電システムの導入効果に関する研究

- 6-1 はじめに
- 6-2 太陽熱発電の定義及び特徴
- 6-3 エネルギーシステムの構成
- 6-4 データベースの整備
- 6-5 導入効果
- 6-6 最適化計算
 - 6-6-1 省エネルギー性の最適化
 - 6-6-2 経済性の最適化
- 6-7 まとめ

6-1 はじめに

1974年に日本の新エネルギー技術開発推進のため、国家的プロジェクトとしてスタートした「サンシャイン計画」で、実用プラントの経済性が実証できなかったことを背景に、日本国内で太陽熱発電の開発や事業化が足踏みしていた。しかし、近年の石油価格の高騰や気候変動問題に対する意識の高まりなどに伴い、欧米を中心に技術開発が進み、ここ数年太陽熱発電が続々と稼働している。

一方、学研都市設立当初は省エネルギーへの取り組み及び地域エネルギー供給の実践地として、環境モデル都市の先駆け役として、10年間には大きな役割を果たしたが、技術の進歩や社会ニーズの変化及び設備の劣化により、新たな挑戦を直面している。

本章では、昨年、学術研究都市にある燃料電池が故障したことに対して、他の設備が変更しないで、同じ容量の太陽熱発電設備と燃料電池を入れ替えようと提案する。そして、現行システムと比較し、省エネルギー、経済性、環境性の効果について、試算を行う。

6-2 太陽熱発電の定義及び特徴

太陽電池で発電を行う太陽光発電と異なり、太陽熱発電は太陽光をレンズや反射鏡を用いた太陽炉で集光することで汽力発電の熱源として利用する発電方法である。太陽光がエネルギー源のため今後数十億年に渡り資源の枯渇のおそれがない再生可能エネルギー利用の発電方法である。燃料を用いないため二酸化炭素などの温室効果ガスを排出せず、燃料費が不要であるため運転にかかる費用を低く抑えられ、有毒ガスの発生や燃料費高騰によるコスト上昇のリスクもない。

太陽光発電に比べて、高コストな太陽電池を使う必要がない、太陽電池より反射鏡のほうが製造・保守の面で有利、エネルギー密度が低い自然エネルギーを利用するのにも関わらずエネルギーの集中が可能、蓄熱により発電量の変動を抑えることが可能で夜間でも稼働できる、発電する時発生した熱を利用することが可能、火力発電との共用が可能など種々の利点がある。太陽エネルギーを利用するにもかかわらず、再生可能エネルギー特有の欠点のある程度克服することが可能である。

特徴としては、太陽光発電に必要な「光」を保存しておくことはできないが、「太陽熱発電」に使う「熱」は保存しておくことが可能である。昼間に熱を蓄えておくことによって、夜間にそれを使用して発電できる。しかし、効率性を考えると、大型の設備が必要となるとともに十分な熱量確保のため広大な「受光面積」が必要となり、大規模な面積の土地が必要である。

ここでは、図 6-2-1 に示すようなトラフ型太陽熱発電を採用し、対象地域に導入する。トラフ型太陽熱発電は、太陽熱発電の一種として、現在ほとんどの商業プラントで採用されている。トラフ型は多数の凹面鏡の前に設置した真空チューブに太陽光を集中させ、チューブを流れるオイルを加熱し、その熱で蒸気を製造して発電する方式である。太陽熱が足りない場合は、ガスを燃料として、ボイラーで蒸気を作って蒸気タービンで発電する。

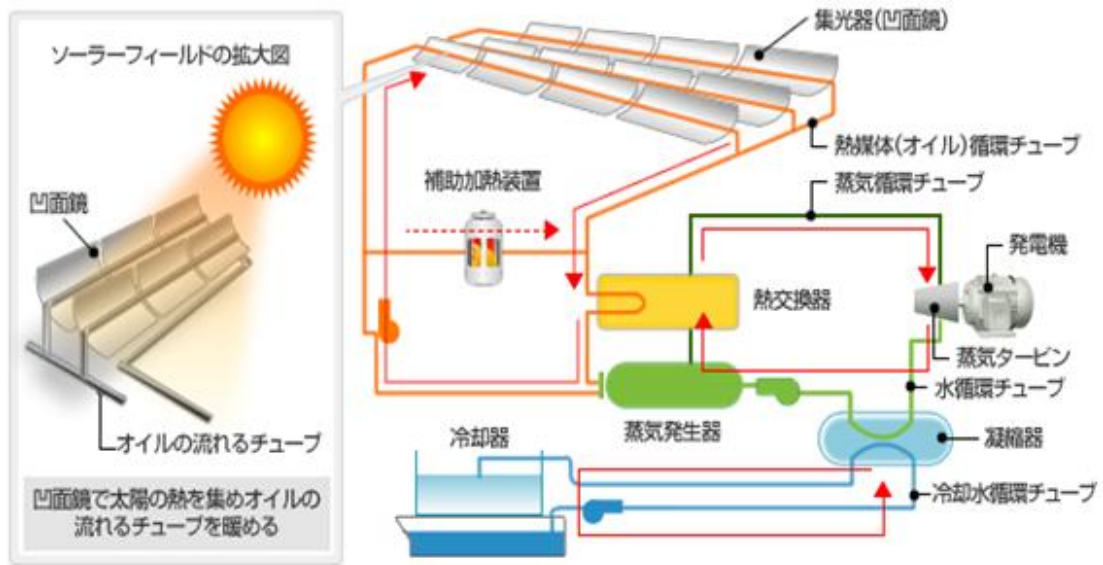


図 6-2-1 トラフ型太陽熱発電のしくみ

資料：三菱商事

<http://www.mitsubishicorp.com/jp/ja/mclibrary/evolving/vol03/page3.html>

6-3 エネルギーシステムの構成

第二章で紹介した現行システムでは、200kWの燃料電池と160kWガスエンジンが設置されている。昨年、学術研究都市にある燃料電池が故障したことに對して、他の設備が変更しないで、同じ容量の太陽熱発電設備と燃料電池を入れ替えようと提案しする。

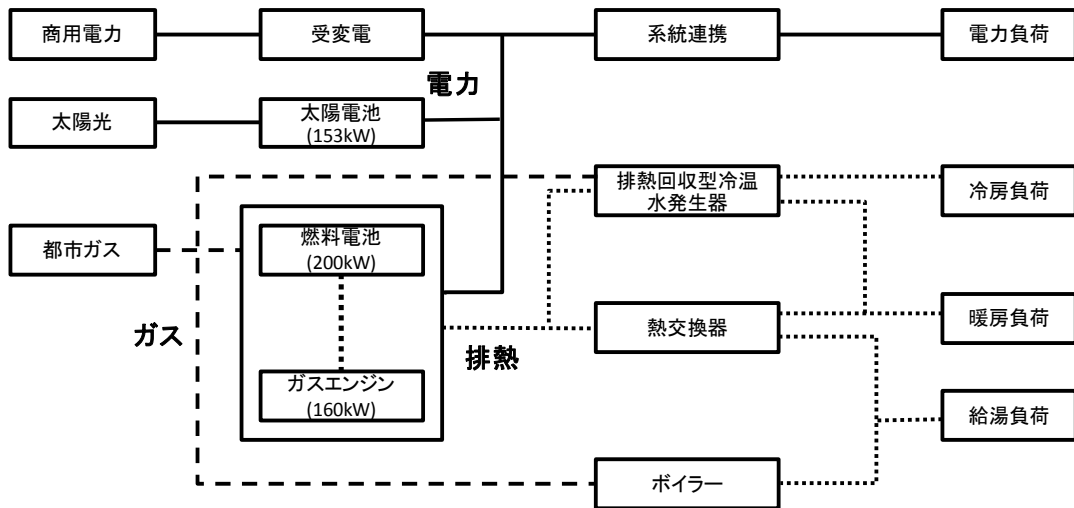


図 6-3-1 現行システム

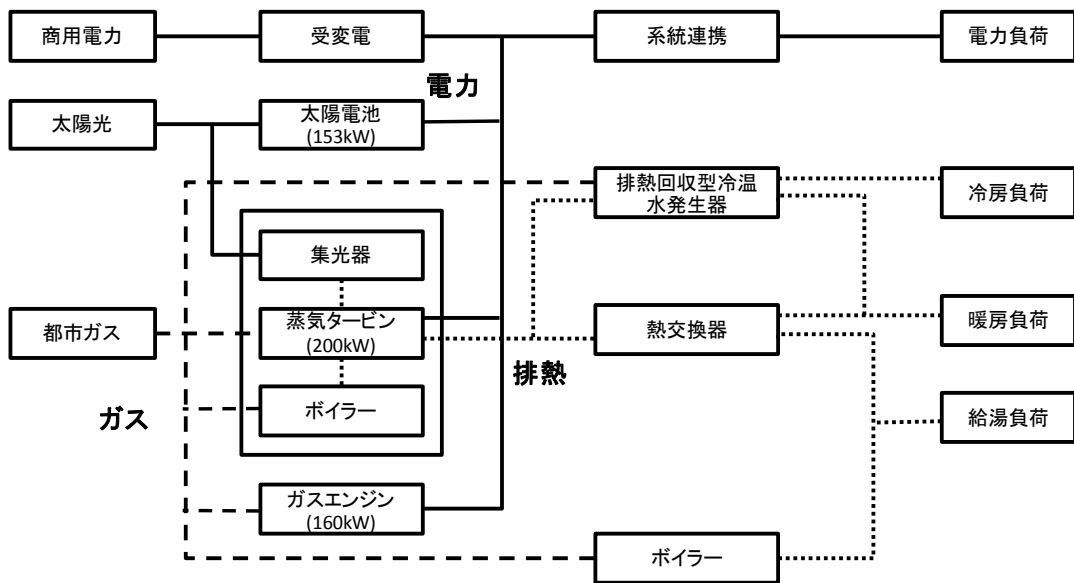


図 6-3-2 提案システム

6-4 データベースの整備

(1) 負荷データ

詳細については第四章の 4-3 を参照してください。

(2) 設備データ

各設備の仕様概略及び運転制御を表 6-4-1 に示す。200kW 太陽熱発電システムの場合は、1205m² の面積が必要となる。太陽熱部分の発電効率は 21.5% となり、集光器の熱回収率 (61.5%) X 蒸気タービン(35%)の発電効率と算出できる。ガス部分の発電効率は 31.5% となり、ボイラーの COP (90%) X 蒸気タービンの発電効率(35%)と算出できる。各設備の初期投資を表 6-4-2 に示す。メガのカタログにより、太陽熱発電の初期投資は 30 万円である、他の設備の初期投資は、学術研究都市のエネルギー管理センターから調査した。

表 6-4-1 各設備の仕様概略

	現行システム		太陽熱発電システム	
発電技術	ガスエンジン (GE) 燃料電池(FC) 単結晶シリコン (建材一体) 型(PV-1) 多結晶シリコン (屋上設置) 型(PV-2)		ガスエンジン (GE) 太陽熱発電システム(CSP) 単結晶シリコン (建材一体) 型(PV-1) 多結晶シリコン (屋上設置) 型(PV-2)	
発電容量	GE	160kW	GE	160kW
	FC	200kW	CSP	(200kW)1205m ²
	PV-1	1008m ² (21kW)	PV-1	1008m ² (21kW)
	PV-2	1006m ² (132kW)	PV-2	1006m ² (132kW)
発電効率	GE	28.7%	GE	28.7%
	FC	40%	CSP (太陽熱部分)	21.5%
			CSP (ガス部分)	31.5%
	PV-1	7.2%	PV-1	7.2%
PV-2	13.3%	PV-2	13.3%	
熱効率	GE	47.7%	GE	47.7%
	FC	20%	CSP	30%
	PV-1	/	PV-1	/
	PV-2	/	PV-2	/
運転制御	全負荷通年運転		全負荷通年運転	
熱源技術	排熱回収型冷温水発生器(ABS) ガスボイラー(GB)		排熱回収型冷温水発生器(ABS) ガスボイラー(GB)	
容量	ABS	3000kW	ABS	3000kW
	GB	200kW	GB	200kW
COP	ABS	1.45 (冷房)	ABS	1.45 (冷房)
		0.88 (暖房)		0.88 (暖房)
	GB	0.9	GB	0.9

表 6-4-2 各設備の初期投資

	現行システム		提案システム	
初期投資	FC	750,000 円/kW	CSP	300,000 円/kW
	GE	300,000 円/kW	GE	300,000 円/kW
	PV	600,000 円/kW	PV	600,000 円/kW
	ABS	45,000 円/kW	ABS	45,000 円/kW
	GB	15,000 円/kW	GB	15,000 円/kW
維持費	GE	/	GE	/
	PV	/	PV	/

(3) 他のデータの設定

燃料料金データ、北九州地区エネルギー別発熱量、CO₂排出量の換算係数などは、第四章の 4-3 を参照してください。

6-5 導入効果

図 6-5-1、6-5-2、6-5-3 に冬季（1月）、夏季（8月）、中間期（11月）平日の太陽熱発電の発電量を示す。全体を見ると、太陽熱発電については、通年に 160kW の満負荷で出力している。160kW の出力を維持するように、まず、太陽熱で、蒸気を作って蒸気タービンから出力し、太陽熱が足りない場合はガスを燃やし、蒸気タービンから出力する。太陽熱部分の出力は、日射率による変化している。太陽熱からの発電量を見ると、1月の発電量は、最も少なく、8月の発電量は、最も多い。1月、8月、11月の発電時間帯は、それぞれ 8時-17時、6時-18時、7時-17時となる。

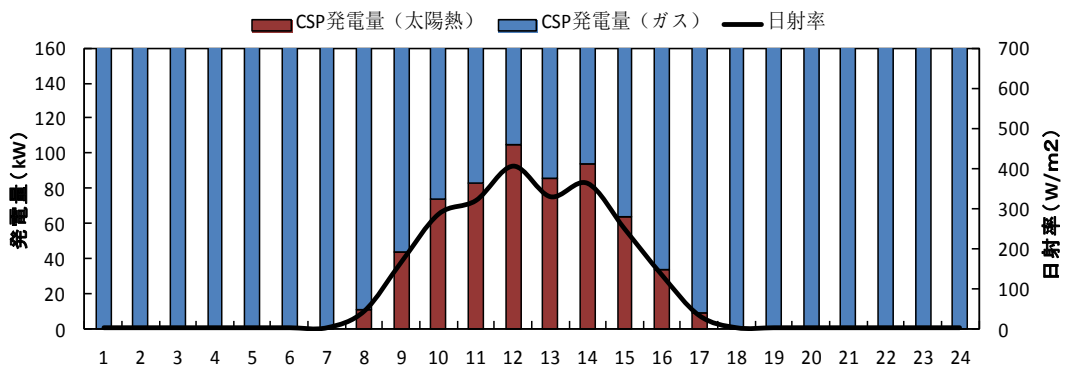


図 6-5-1 1月平日の太陽熱発電の発電量

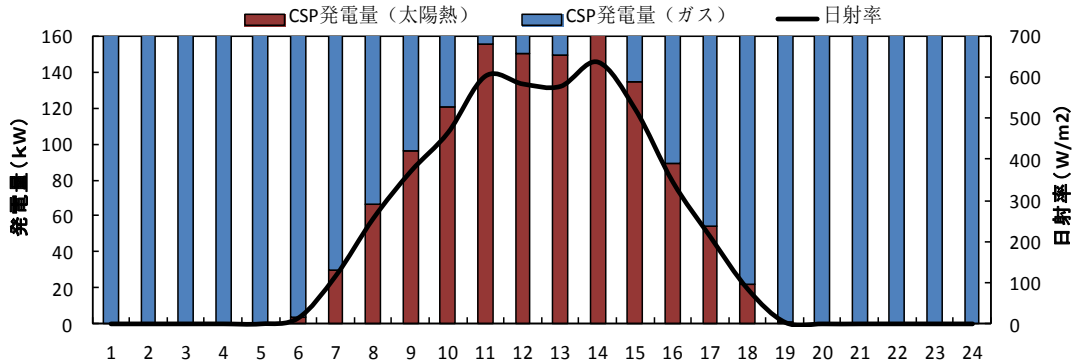


図 6-5-2 8月平日の太陽熱発電の発電量

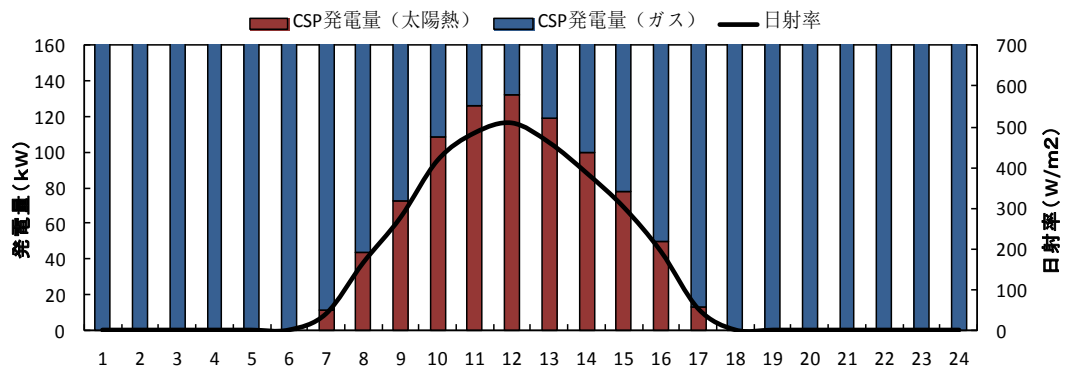


図 6-5-3 11月平日の太陽熱発電の発電量

図6-5-4に現行システム及び提案システムの年間発電量の構成を示す。二つシステムでは、同じ容量な自家発電設備が導入され、通年満負荷で運転するため、年間発電総量は同じである。また、提案システムでは、太陽熱部分から発電量は372MWhであり、ガス部分から発電量は1380MWhである。

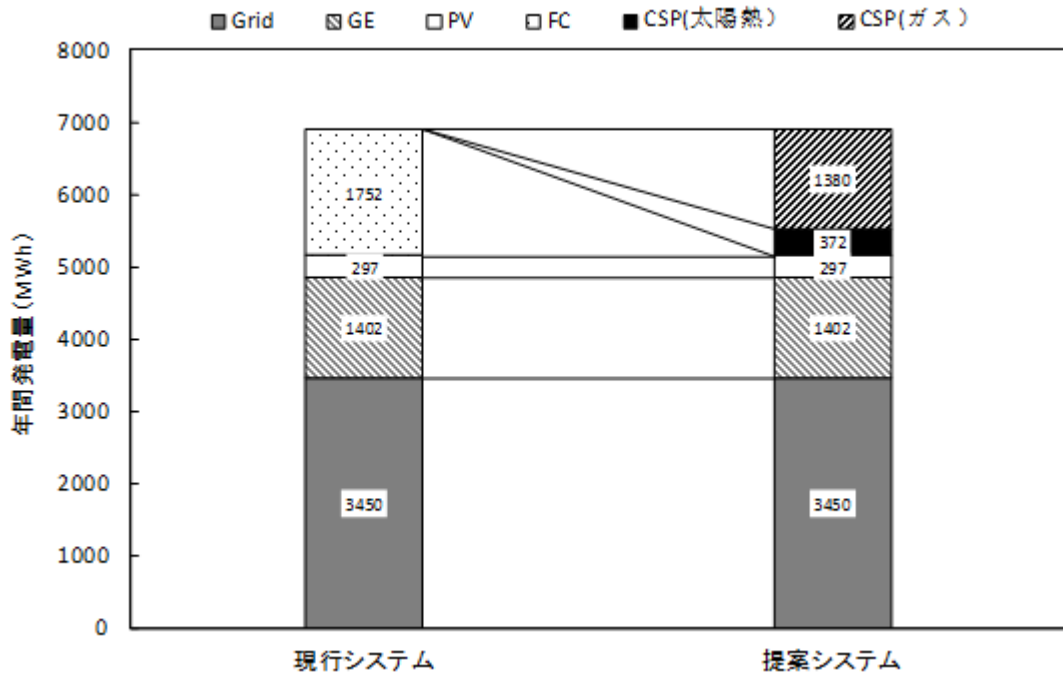


図 6-5-4 年間発電量の構成

図 6-5-5 に年間一次エネルギー消費量の構成を示す。同じ容量な燃料電池と比べると、燃料電池の発電効率が高いため、一部分の発電量は太陽熱から生産しても、太陽熱発電の年間一次エネルギー消費量はやや高い。しかし、太陽熱発電のほうが、排熱回収率が高いため、提案システムでは、熱源設備による利用された排熱が多く、熱源設備の年間エネルギー消費は 1542GJ 低減した。全体をみれば、同じ容量の太陽熱発電は燃料電池を置換すると、2%の省エネルギー効果が得られている。

図 6-5-6 に年間コストの構成を示す。太陽熱発電と燃料電池を入れ替えると、自家発電の初期投資及びガスの年間コストを減少した、現行システムに対する提案システムの年間コストは 6.03% 低減した。

図 6-5-7 に年間 CO₂ 排出量の構成を示す。各設備の年間 CO₂ 排出量の割合は、一次エネルギー消費量とはほぼ同じで傾向がある。提案システムでは、CO₂ 排出量が 1.71% 削減した。

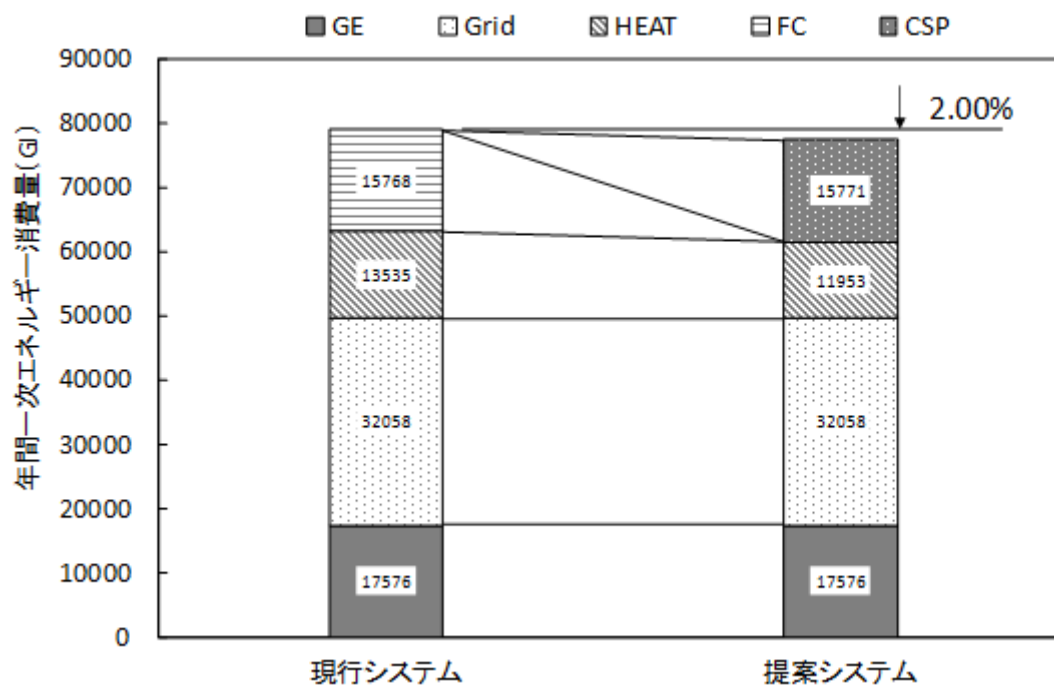


図 6-5-5 年間一次エネルギー消費量の構成

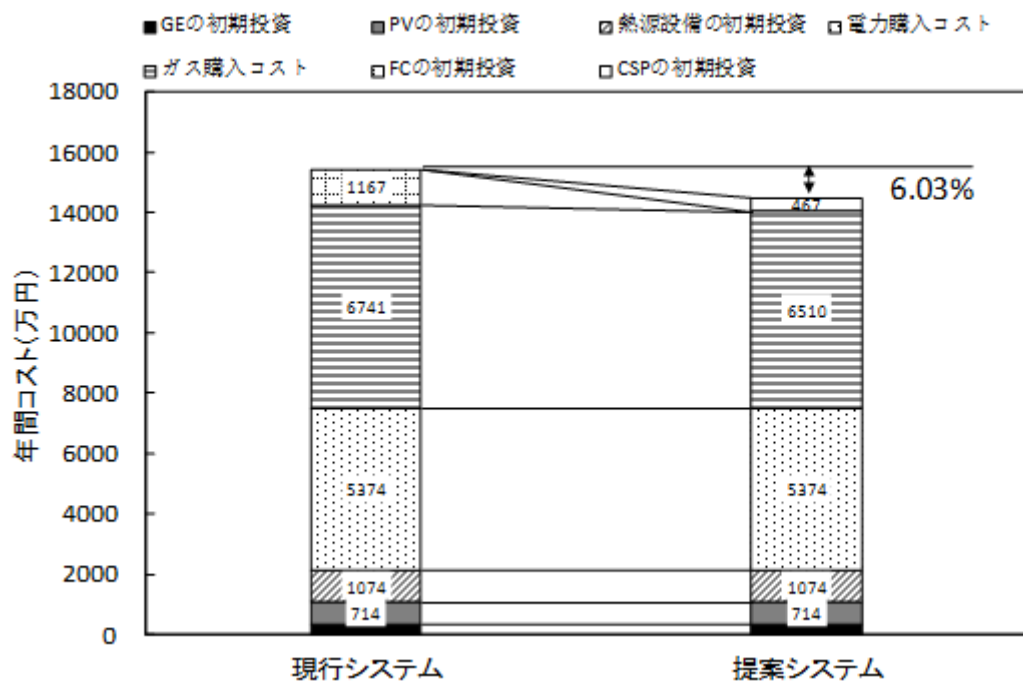


図 6-5-6 年間コストの構成

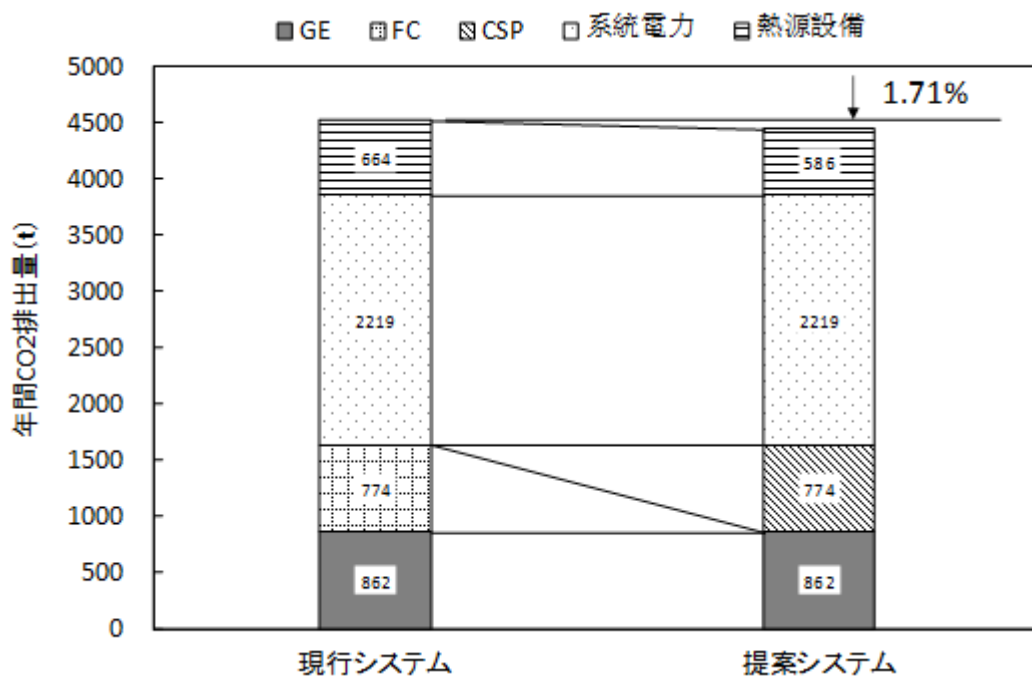


図 6-5-7 年間 CO₂ 排出量の構成

6-6 最適化計算

本節では、対象地域に太陽熱発電（図 6-6-1）及びガスエンジン（図 6-6-2）を別々に導入し、従来型システム（図 6-6-3）を比較システムとして設定し、比較システムに対する省エネルギー性及び経済性の最適化計算を行う。

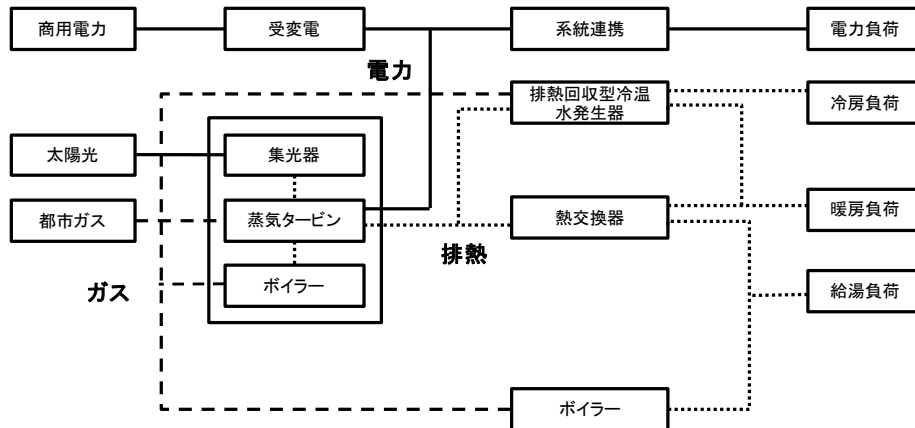


図 6-6-1 太陽熱発電システム

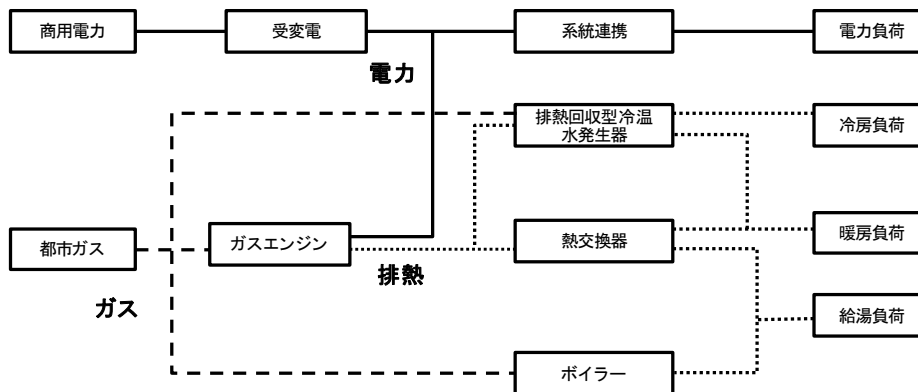


図 6-6-2 ガスエンジン発電システム

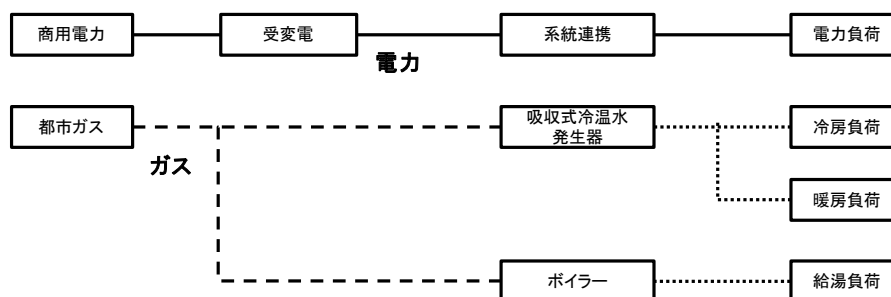


図 6-6-3 従来型システム

6-6-1 省エネルギー性の最適化

まず、省エネルギー性の運用形態を考慮し、年間一次エネルギー消費量の削減率を目的関数として、発電設備の容量を100kWずつ増加する場合、年間一次エネルギー消費量最大削減率の変化を図6-6-4に示す。同じ容量である場合は、太陽熱発電の年間一次エネルギー消費量の削減率はガスエンジンにより大きい。太陽熱発電の容量が大きいほど、太陽熱の利用量が多いため、太陽熱発電の効果が著しい。太陽熱発電の容量が1400kWである時に、年間一次エネルギー消費量削減率は最も高い。ガスエンジンの年間一次エネルギー消費量の削減率変化は穏やかであり、1300kW以上に増加すると、一定になる。その原因としては、省エネルギー性の最適化に対して、ガスエンジンの総合効率は系統電力より高い場合、電力はガスエンジンによる供給される。しかし、北九州学術研究都市の電熱負荷に対して、ガスエンジンが1300kW以上発電するときの総合効率は系統電力より低く、系統から電力を購入したほうが省エネルギー性が高い。すなわち、省エネルギー性の最適化を考慮すると、1300kWより大きい場合、ガスエンジンは出力しないため、発電容量が増加しても、省エネルギー性に影響しない。発電容量が不連続に増加する場合は、太陽熱発電及びガスエンジンの最適化容量はそれぞれ、1400kWと1300kWである。

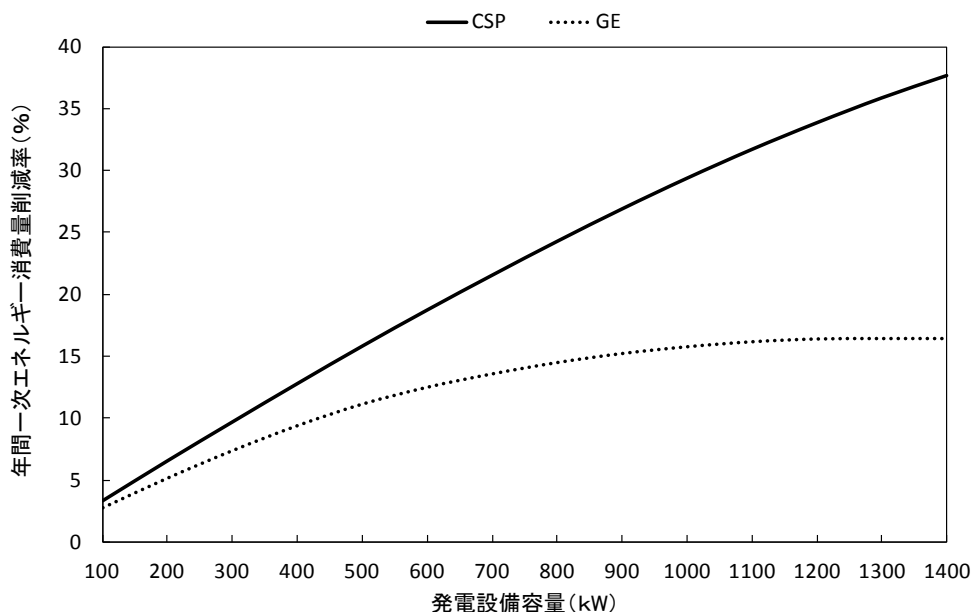


図 6-6-4 発電設備の容量による年間一次エネルギー消費量の削減率

6-6-2 経済性の最適化

経済性の運用形態を考慮し、年間コストの削減率を目的関数として、発電設備の容量を100kW ずつ増加する場合、年間コスト最大削減率の変化を図 6-6-5 に示す。同じ容量である場合は、太陽熱発電の年間コスト削減率はガスエンジンにより大きい。発電容量が大きくなるにつれて、太陽熱発電のコスト削減率は激しく増加し、1000kW 以上に増加すると、削減率の変化は小さくなり、削減率もやや下がった。ガスエンジンのほうは、穏やかであり、1000kW に達すと、削減率が下がることが見られた。その原因として、イニシャルコスト増加はランニングコストの低減より高い。そのため、発電容量が不連続に増加する場合は、太陽熱発電及びガスエンジンの最適化容量はそれぞれ、1100kW と 1000kW である。

太陽熱発電の容量を増加する場合、年間コストの構成を図 6-6-6 に示す。ガスエンジンの初期投資及びガス購入量が増加し、買電コストが減少した。全体を見ると、1100kW の場合は、年間コストが最も少ない。

大きい容量の太陽熱発電を導入すると、省エネルギー性、経済性に対して、著しい効果が得られていると見られた。しかし、太陽熱発電を設置する場合は、広い面積の敷地が必要となる。1kW 当たりの集熱面積は 6m^2 となる。そのため、ガスエンジンと比べ、太陽熱発電の省エネ性及び経済性は両方とも高いが、設置スペース不足問題は、普及上大きな障碍となる。

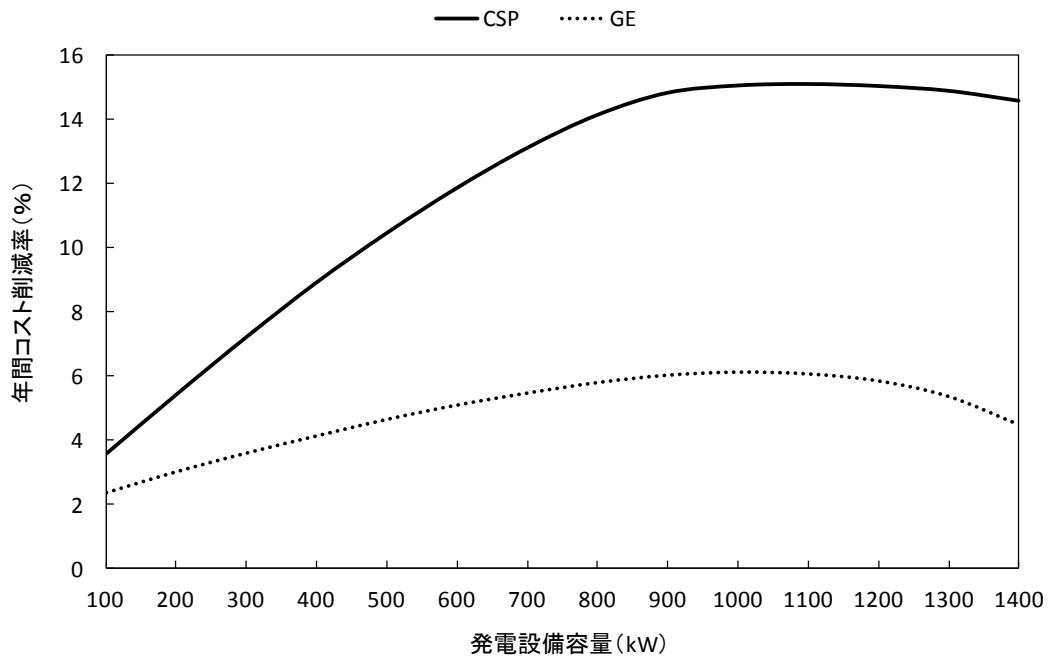


図 6-6-5 発電設備の容量による年間コスト削減率

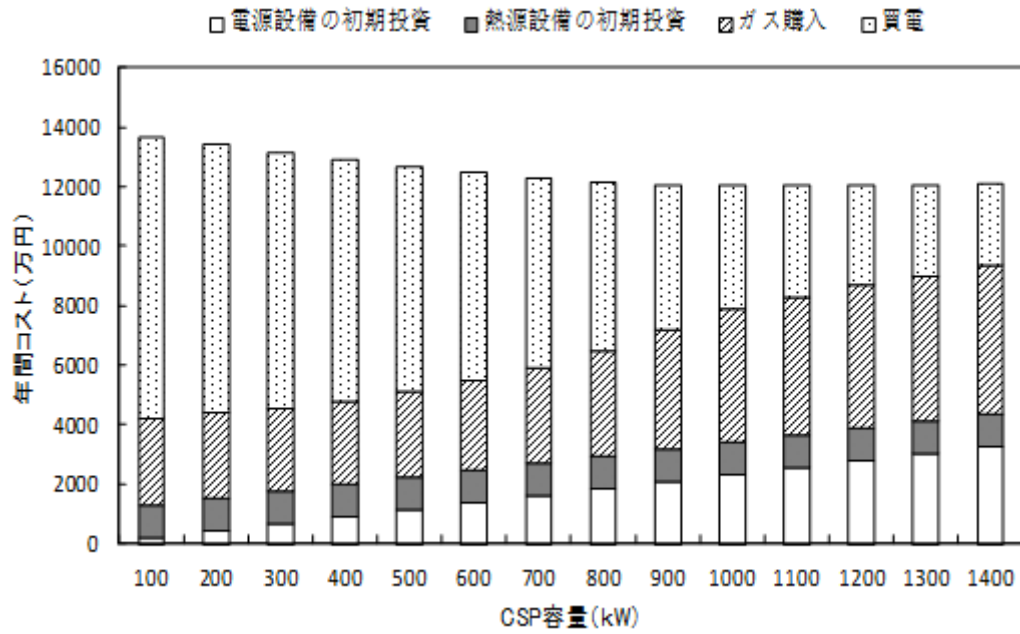


図 6-6-6 太陽熱発電容量の変化による年間コストの構成

6-7 まとめ

(1) 学術研究都市にある燃料電池が故障したことに對して、他の設備が変更しないで、同じ容量の太陽熱発電設備と燃料電池を入れ替えようと提案した。また、太陽熱発電を導入した後の効果を試算した。年間一次エネルギー消費量削減率、年間コスト削減率、年間 CO₂ 排出量削減率はそれぞれ 2.00%、6.03%、1.71%となる。

(2) 対象地域に太陽熱発電及びガスエンジンを別々に導入し、従来型システムを比較システムとして設定し、比較システムに対する省エネルギー性及び経済性の最適化計算を行った。省エネルギー性に対して、太陽熱発電及びガスエンジンの最適化容量はそれぞれ 1400kW と 1300kW である。経済性に対して太陽熱発電及びガスエンジンの最適化容量はそれぞれ 1100kW と 1000kW である。

参考文献

1. 西村 啓道 集光型太陽熱発電(CSP)方式とその現状
2. ウィキペディアフリー事典：太陽熱発電 <http://ja.wikipedia.org/wiki>
3. 太陽熱発電とは：<http://www.taiyoukouhatsuden1.jp/taiyounetsu.html>
4. 三菱商事 <http://www.mitsubishicorp.com/jp/ja/mclibrary/evolving/vol03/page3.html>
5. 九州電力業務用電力 A：
http://www.kyuden.co.jp/agreement_rate_gyomua_-080901.html, 2012.06.01 参照
6. 西部ガス料金メニュー：
http://www.saibugas.co.jp/home/rates_business/menu/price_list.htm#price06, 2012.06.01 参照

第七章 分散型電源・熱源機器の選定に関する多目的最適化

7-1 はじめに

7-2 エネルギーシステムの構成

7-3 データベースの構築

7-4 単目的解析

7-5 多目的解析

7-5-1 経済性と省エネルギー性のトレードオフ関係

7-5-2 経済性と環境性のトレードオフ関係

7-5-3 経済性、省エネルギー性、環境性のトレードオフ関係

7-6 まとめ

7-1 はじめに

各構成機器の容量は本来離散的であるが、前章では、すべて機器の容量を連続変数によって表し、設計計画問題を考察する。しかし、実設計では、決定された最適値近傍の容量をもつ機器を選定する必要がある。

一方、第四章では、熱源技術を固定し、発電技術を分析するもしくは発電技術を固定し、熱源技術を分析する。このように、分析すると、発電技術及び熱源技術は、それぞれの各目的への影響を明らかにした。しかし、実設計では、分散型電源・熱源機器の協調性を考慮し、同時に選定する必要がある。

そこで、本モデルでは、分散型エネルギーシステム設計の利便性及び汎用性の向上を目指し、容量が不連続である実在の機器を考慮し、分散型電源・熱源機器を同時に選択することができる。

本章では、北九州学研都市を対象として、容量が不連続である実在の機器を考慮し、複数の評価指標に基づいて各機器の組み合わせの良し悪しを総合的に比較検討（価値判断）し、分散型電源・熱源機器の組み合わせを同時に策定することを目的として、ケーススタディを行った。

7-2 エネルギーシステムの構成

図 7-2-1 に想定する分散型エネルギーシステムを示す。電力はガスエンジン(GE)、燃料電池(FC)、太陽電池(PV)、商用電力からの四種類、冷房は排熱回収型冷温水発生機(ABS)、ターボ冷凍機(TC)、ヒートポンプ(HP)からの三種類、暖房は CGS の排熱、排熱回収型吸収式冷温水発生機(ABS)、ヒートポンプ(HP)からの三種類の供給方式が可能である。給湯は排熱から供給され、不足分はバックアップボイラー(GB)により補う。ここで、ガスコージェネレーションの最大導入台数は 3 台、太陽光発電の最大導入容量は 400kW、冷暖房設備の最大導入台数は 5 台、給湯設備の最大導入台数は 2 台、熱交換器の最大交換熱量は 600kW の設計変数を設定する。分散型電源技術が導入された最適化システムの効果を確認するために、図 7-2-2 に示す分散型電源技術未導入システムを比較システムとする。電力需要は系統電力によって供給される。冷暖房需要は吸収式冷温水発生器によって供給される。給湯需要はボイラーによって供給される。

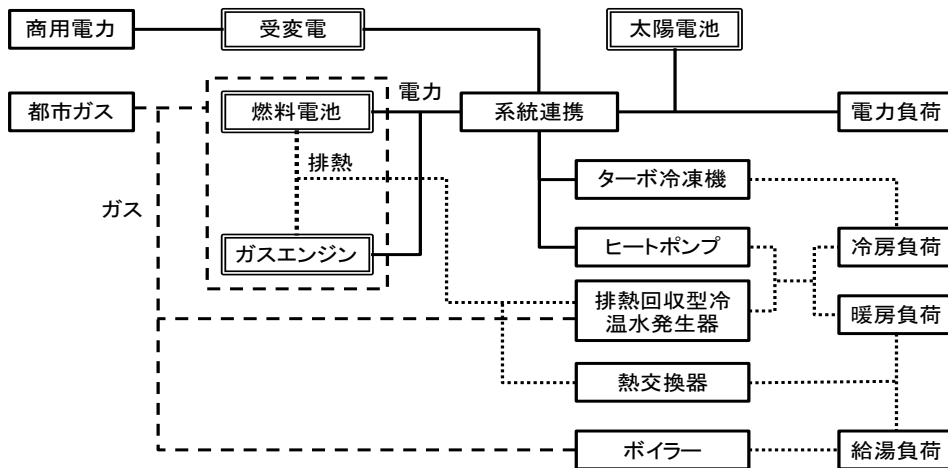


図 7-2-1 分散型エネルギーシステム

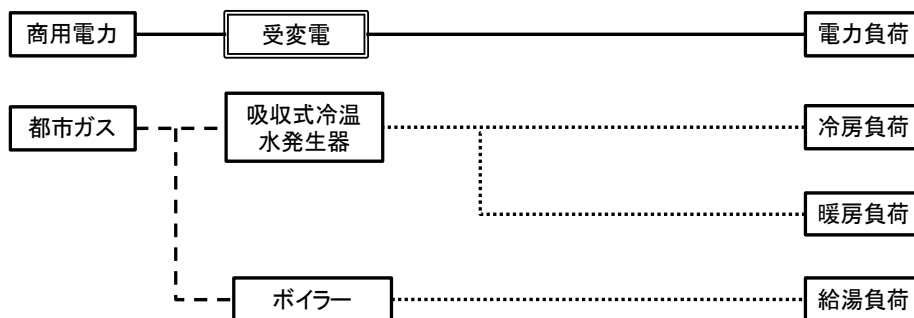


図 7-2-2 比較システム

7-3 データベースの構築

(1) 負荷データ

詳細については第四章の 4-3 を参照してください。

(2) 機器データ

メーカーのカタログや調査等を通して、表 7-3-1、7-3-2 に示すように、各設備の容量、効率、コストを集め、分散型電源・熱源技術のデータベースを構築した。同じ分散型電源技術では、発電効率及び排熱回収効率が容量により変化している。排熱回収型冷温水発生機（ABS）、ヒートポンプ（HP）等冷熱、温熱それぞれを供給可能な設備については、異なる冷暖房供給能力及び成績係数を設定する。

(3) 他のデータの設定

燃料料金データ、北九州地区エネルギー別発熱量、CO₂排出量の換算係数などは、第四章の 4-3 を参照してください。

表 7-3-1 候補発電設備

発電設備	容量(kW)	発電効率	熱回収率	初期投資(万円)	運転維持固定費用(円/kW)	運転維持変動費用(円/kWh)
GE-1	100	0.30	0.48	2000	945	1
GE-2	150	0.31	0.47	2925	945	1
GE-3	200	0.32	0.46	3800	945	1
GE-4	250	0.33	0.45	4625	945	1
GE-5	300	0.34	0.44	5400	945	1
GE-6	350	0.35	0.43	6125	945	1
GE-7	400	0.36	0.42	6800	945	1
FC-1	100	0.38	0.36	8000	760	2.3
FC-2	150	0.39	0.35	11625	760	2.3
FC-3	200	0.40	0.34	15000	760	2.3
FC-4	250	0.41	0.33	18125	760	2.3
FC-5	300	0.42	0.32	21000	760	2.3
FC-6	350	0.43	0.31	23625	760	2.3
FC-7	400	0.44	0.30	26000	760	2.3
PV-1	50	/	/	3000	940	0
PV-2	100	/	/	6000	940	0
PV-3	150	/	/	9000	940	0
PV-4	200	/	/	12000	940	0

注：GE:ガスエンジン FC：燃料電池 PV：太陽光発電

表 7-3-2 候補熱源設備

熱源設備	供給能力(kW)		COP		初期投資(万円)	運転維持固定費用(円/kW)
	冷凍	加熱	冷凍	加熱		
ABS-1	400	260	1.45	0.88	1920	1000
ABS-2	450	300	1.45	0.88	2160	1000
ABS-3	500	330	1.45	0.88	2400	1000
ABS-4	550	360	1.45	0.88	2580	1000
ABS-5	600	400	1.45	0.88	2800	1000
ABS-6	650	430	1.45	0.88	2920	1000
ABS-7	700	460	1.45	0.88	3100	1000
HP-1	200	300	2.8	3.7	800	1110
HP-2	250	375	2.8	3.7	975	1110
HP-3	300	450	2.8	3.7	1155	1110
HP-4	350	525	2.8	3.7	1310	1110
HP-5	400	600	2.8	3.7	1480	1110
HP-6	450	675	2.8	3.7	1640	1110
HP-7	500	750	2.8	3.7	1800	1110
TC-1	800	/	6	/	3000	600
TC-2	850	/	6	/	3100	600
TC-3	900	/	6	/	3200	600
GB-1	/	50	/	0.9	150	/
GB-2	/	100	/	0.9	280	/
GB-3	/	150	/	0.9	390	/
GB-4	/	200	/	0.9	500	/
HE-1	/	100	/	0.8	60	/
HE-2	/	200	/	0.8	120	/
HE-3	/	300	/	0.8	180	/
HE-4	/	400	/	0.8	240	/
HE-5	/	500	/	0.8	300	/
HE-6	/	600	/	0.8	360	/

注：ABS：排熱回収型吸収式冷温水発生機 HP：ヒートポンプ TC：ターボ冷凍機 GB：ガスボイラー HE：熱交換器

7-4 単目的解析

ε -制約範囲を確定するために、まず分散型エネルギーシステム導入の単目的最適化解析を行い、比較ケースに対する各ケースの年間一次エネルギー消費量削減率、コスト削減率、CO₂排出量削減率を計算した。各目的の最適化ケースの効果を明らかにした。その解析結果を表 7-4-1 に示す。

ケース 0：比較ケース（図 7-2-2）。分散型電源技術未導入システム。

ケース 1：省エネルギー性の最適化ケース。年間一次エネルギー消費量削減率が最も大きいシステム。

ケース 2：経済性の最適化ケース。年間コスト削減率が最も大きいシステム。

ケース 3：環境性の最適化ケース。年間 CO₂ 排出量削減率が最も大きいシステム。

ケース 1 では、年間一次エネルギー消費量は 32% 強減少し、年間コストは 33% 強増加し、年間 CO₂ 排出量は 48% 強減少した。燃料電池が導入されることにより、経済性はないものの、非常に効果的な省エネルギー性向上を計ることが可能である。ケース 2 では、ガスエンジンが経済性上の最適発電設備となり、年間一次エネルギー消費量は 9% 減少し、年間コストは 11% 弱減少し、年間 CO₂ 排出量は 10% 弱減少した。ケース 3 の設備構成及び各削減率はケース 1 とほぼ同じである。この二つケースは高い省エネ性と環境性の両方を持っている。エネルギー消費量の削減は環境負荷の低減に大きな影響を与えることが分かった。しかし、このような設備の組み合わせの導入投資は高すぎて、良いとはいえない。したがって、多目的解析を用いて、省エネルギー性または環境性を保ちながら、経済性を改善することは必要だと考えられる。

表 7-4-1 単目的解析結果

	年間一次エネルギー消費量 (GJ)	年間コスト (万円)	年間 CO ₂ 排出量(t)	年間一次エネルギー消費量削減率(%)	年間コスト削減率 (%)	年間 CO ₂ 排出量削減率 (%)	発電設備種類 (台数)	熱源設備種類 (台数)
ケース 0	83442.05	14497.98	5394.18	—	—	—	—	ABS-7(5), GB-4(1)
ケース 1	56371.75	19278.21	2794.10	32.44	-33.04	48.20	FC-7(3),PV-4(2)	ABS-7(2),HP-7(2),TC-3(1),GB-4(1),HE-4(1)
ケース 2	75931.77	12922.82	4874.90	9.00	10.86	9.63	GE-7(2)	ABS-1(1),ABS-7(2),HP-7(1),TC-3(1),GB-2(1),HE-3(1)
ケース 3	56603.16	19293.39	2792.59	32.16	-33.17	48.23	FC-7(3),PV-4(2)	ABS-7(3),HP-7(1),TC-3(1),GB-4(1),HE-5(1)

各ケースにおいて年間一次エネルギー消費量の構成を図 7-4-1 に示す。年間一次エネルギー消費量は発電設備の一次エネルギー消費量、熱源設備の一次エネルギー消費量及び系統電力の一次エネルギー消費量を含めている。省エネルギー性を重視したケース 1 では、年間一次エネルギー消費量を削減するために、総合効率が低い発電設備からの発電量が多く、発電設備の一次エネルギー消費量の割合が最も大きい。経済性の最適化は、発電設備の初期投資、排熱が十分に利用できない時の運転方式を考慮している。経済性を重視したケース 2 では、800kW のガスエンジンが選択され、発電設備の導入量が少なく、電力が足りない場合が多いため、商用電力からの電力を購入しないとイケない。また、排熱が十分に利用できない場合は、ガスで発電することにより、商用電力から購入したほうが安い。したがって、このような場合にも、商用電力から電力を購入することになる。環境性を重視したケース 3 では、ケース 1 と同じ、発電設備の一次エネルギー消費量が最も多い。その原因としては、発電設備が天然ガスを燃やして、電気を作ると、石炭よりかなり CO₂ が減るとされている。

各ケースにおいて年間コストの構成を図 7-4-2 に示す。年間コストは発電設備の初期投資、熱源設備の初期投資、電力料金、ガス料金を含めている。したがって、ケース 1 及びケース 3 では、燃料電池と太陽光発電が採用され、発電設備の初期投資が高い。また、省エネルギー性と環境性を向上するため、燃料電池が稼動する場合は多く、ガス料金も高い。ケース 2 では、経済性を考慮し、2 台のガスエンジンが導入され、発電設備の初期投資が低い。そして、前に言ったような電力が足りない場合及び排熱十分に利用できない場合も考慮すると、商用電力からの電力購入量が多いで、電力料金が高い。

各ケースにおいて年間 CO₂ 排出量の構成を図 7-4-3 に示す。年間 CO₂ 排出量は発電設備の CO₂ 排出量、熱源設備の CO₂ 排出量、電力の CO₂ 排出量を含めている。環境性の最適化ケース 3 では、総合効率が低い燃料電池と太陽光発電の役割で、年間 CO₂ の排出量が最も少ない。CO₂ の削減に対して、一次エネルギー消費量を削減するのは、一つ有効な手段である。省エネルギー性の最適化ケース 1 でも、年間 CO₂ の排出量が少ない。ケース 2 では、省エネルギー性と環境性を考慮してないため、年間 CO₂ の排出量が最も大きい。そして、電力購入量が多く、系統電力の CO₂ 排出量の割合も大きい。

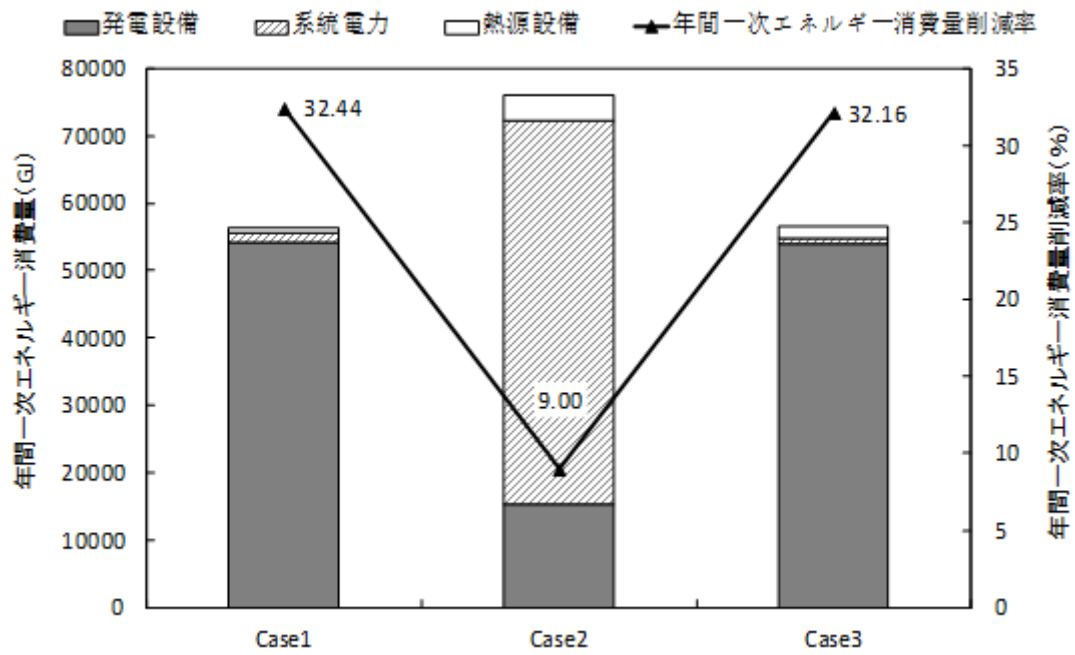


図 7-4-1 各ケースにおいて年間一次エネルギー消費量の構成

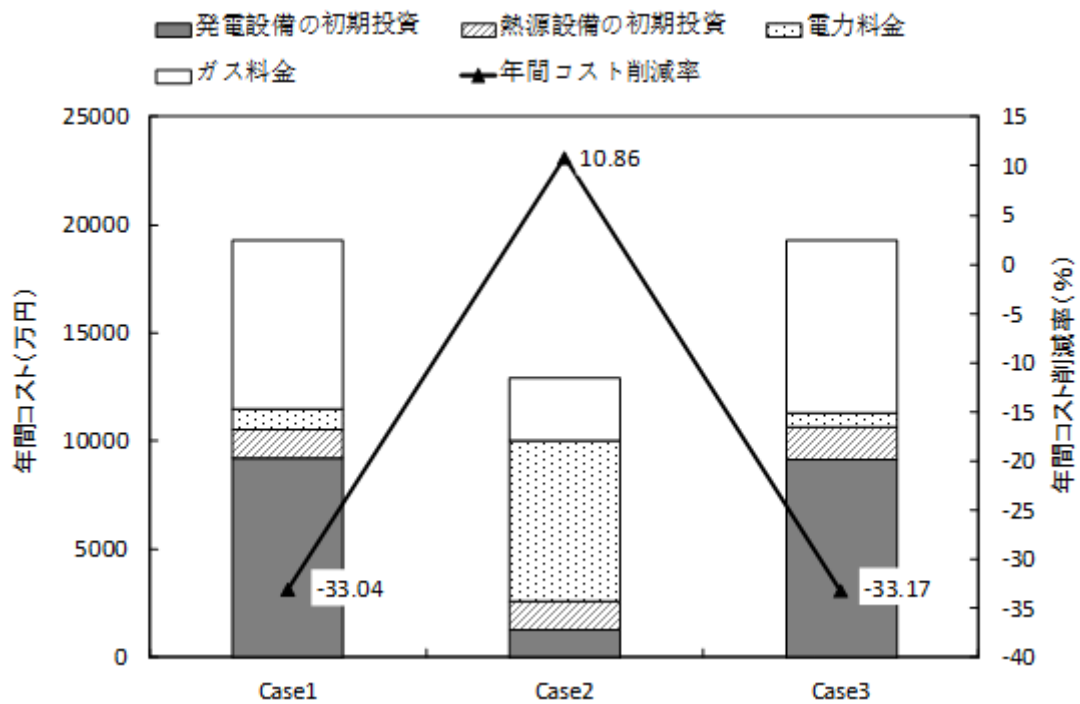


図 7-4-2 各ケースにおいて年間コストの構成

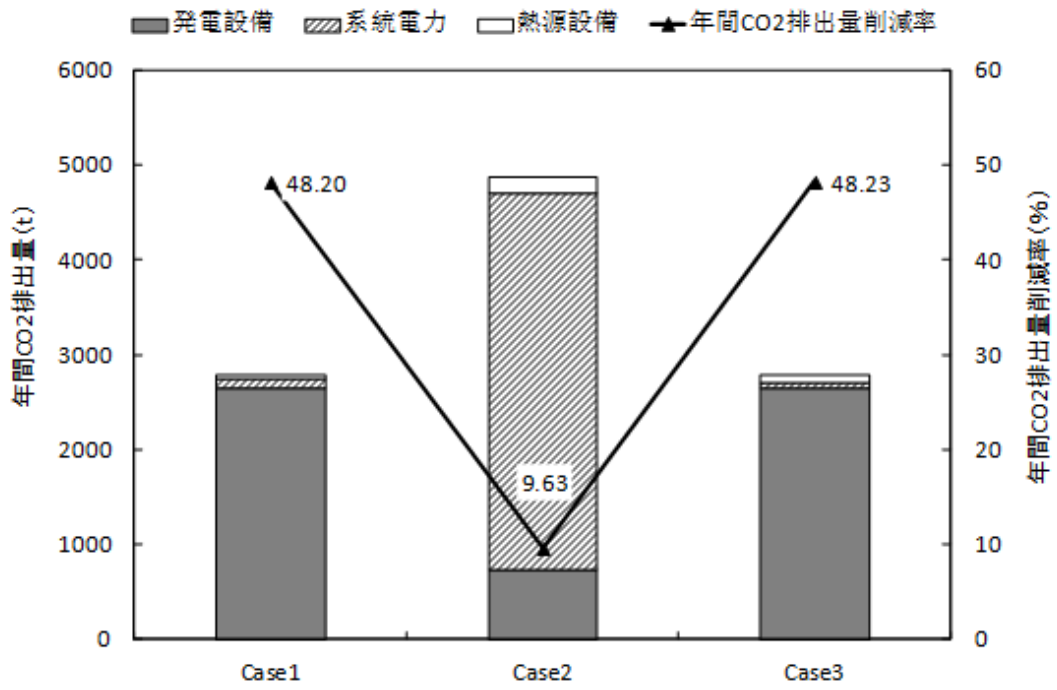


図 7-4-3 各ケースにおいて年間 CO₂ 排出量の構成

7-5 多目的解析

7-5-1 経済性と省エネルギー性のトレードオフ関係

まず、年間コスト最大削減率を目的関数として、年間 CO₂ 排出量削減率を考慮せずに、年間一次エネルギー消費量削減率を制約条件として設定する。下記の式で表す。

$$\text{Max } R^{ECO} \quad \text{subj. to } \left\{ R_{Case2}^{PEC} + \varepsilon_1 \leq R^{PEC} \leq R_{Case1}^{PEC} \right\} \quad (8)$$

表 7-4-1 に示すように、最も経済的なケース 2 では、年間一次エネルギー消費量削減率は 9.00% となる。検討するケースの年間一次エネルギー消費量削減率は 9.00% 以下に低くなると、経済性もなければ、省エネ性もない。したがって、年間一次エネルギー消費量削減率の制約を 9% からスタートする。省エネルギー性と経済性のパレート最適解を図 7-5-1 に示す。年間一次エネルギー消費量削減率は約 21% に超えると、年間コスト最大削減率が負になった。

表 7-5-1 及び図 7-5-2 には制約条件を省エネルギー性とした場合の設備の選択結果を示す。年間一次エネルギー消費量削減率が小さい場合には、400kW のガスエンジン GE-7 が 2 台選択された。年間一次エネルギー消費量削減率が高くなるにつれ（制約が厳しくなる）、選択されたガスエンジンの容量が増加する。その理由としてコージェネレーションによる排熱利用により、システム全体のエネルギー利用効率が上がるからであると推測できる。年間一次エネルギー消費量削減率が 19% を超えると、ガスエンジンだけでは予定な省エネルギー性には達することができなく、太陽光発電 PV を導入し始める。年間一次エネルギー消費量削減率が 21% 以上になると、400kW の太陽電池を導入することにより、年間コスト最大削減率はマイナスに転落し、経済性が確保できなくなる。したがって、良好な省エネルギー性と経済性を同時に得られるため、ガスエンジン、燃料電池や太陽電池のベストミックスは重要である。さらに、年間一次エネルギー消費量削減率が 23% 以上になると、発電効率の高い燃料電池 FC を導入し始める。年間一次エネルギー消費量削減率が 29% 以上を超える場合には、1 台ガスエンジン GE+2 台燃料電池 FC が選択された。

また、表 7-5-1 から熱源設備については、排熱回収型冷温水発生機 (ABS) はコージェネレーションの排熱を回収するために必須であり、冷房需要は COP の高いターボ冷凍機により満たす。以上の足りない部分はヒートポンプ (HP) により満たす。図 7-5-2 に示すように冷温熱源に関してはほぼ冷暖房負荷と同じであるため、熱源設備の変化は小さく、いずれのケースでも 3 台 ABS+1 台 HP+1 台 TC となり、それぞれの容量は大きなばらつきがない。ガスエンジンの容量が低い場合 (≥9%、≥11%) には、排熱量が少ないため、一部の給湯負荷をボイラーで賄う必要となる。また、年間一次エネルギー消費量削減率が 29% より高い場合、燃料電池が二台以上選択され、燃料電池の排熱量が少ないため、一部の給湯負荷をボイラーで賄う必要となる。他のケースでは、すべての給湯負荷は発電設備が発電する時の排熱から供給される。

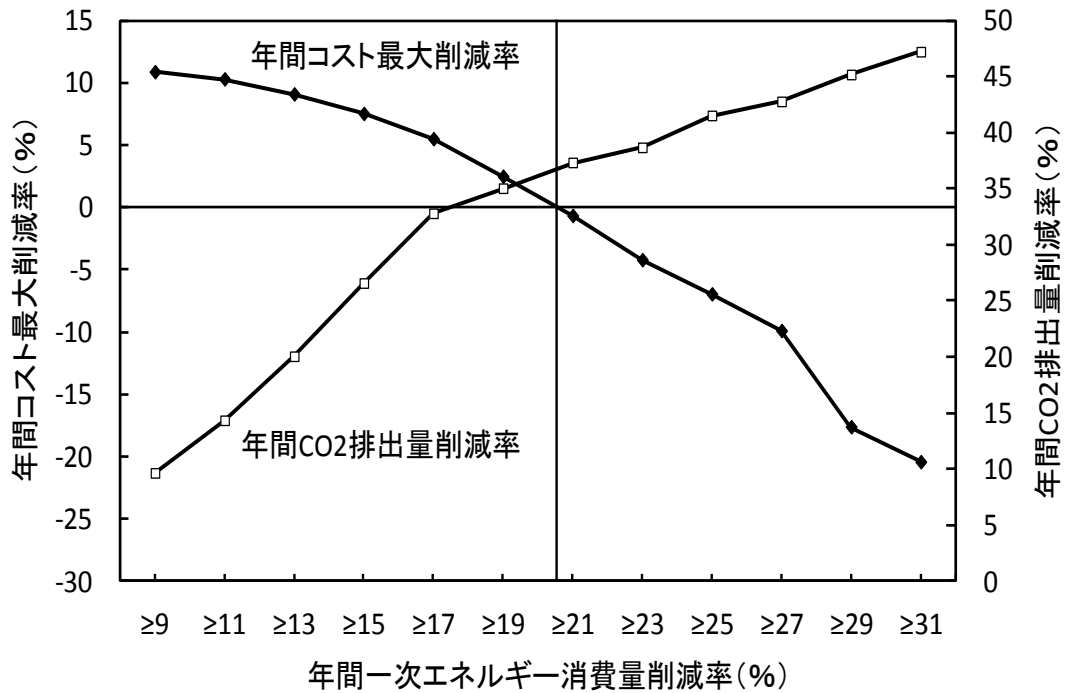


図 7-5-1 省エネルギー性と経済性のパレート最適解

表 7-5-1 省エネルギー性の制約による設備の選択

R^{PEC}	発電設備種類 (台数)	熱源設備種類 (台数)
≥9%	GE-7(2)	ABS-1(1),ABS-7(2),HP-7(1),TC-3(1),GB-2(1),HE-3(1)
≥11%	GE-7(2)	ABS-6(1),ABS-7(2),HP-7(1),TC-1(1),GB-1(1),HE-2(1)
≥13%	GE-2(1),GE-7(2)	ABS-6(1),ABS-7(2),HP-7(1),TC-1(1),HE-3(1),
≥15%	GE-6(1),GE-7(2)	ABS-6(2),ABS-7(1),HP-7(1),TC-1(1),HE-3(1)
≥17%	GE-7(3)	ABS-7(3),HP-7(1),TC-1(1),HE-2(1)
≥19%	GE-7(3),PV-4(1)	ABS-6(2),ABS-7(1),HP-7(1),TC-1(1),HE-3(1)
≥21%	GE-7(3),PV-4(2)	ABS-6(3),HP-7(1),TC-1(1),HE-3(1)
≥23%	GE-7(2),FC-7(1)	ABS-7(3),HP-7(1),TC-1(1),HE-2(1)
≥25%	GE-7(2),FC-7(1),PV-3(1)	ABS-7(3),HP-7(1),TC-2(1),HE-2(1)
≥27%	GE-7(2),FC-7(1),PV-4(2)	ABS-7(3),HP-7(1),TC-1(1),HE-2(1)
≥29%	GE-7(1),FC-7(2),PV-4(1),	ABS-6(1),ABS-7(2),HP-7(1),TC-1(1),GB-1(1),HE-2(1)
≥31%	GE-7(1),FC-7(2),PV-4(2)	ABS-6(1),ABS-7(2),HP-7(1),TC-1(1),GB-1(1),HE-2(1)

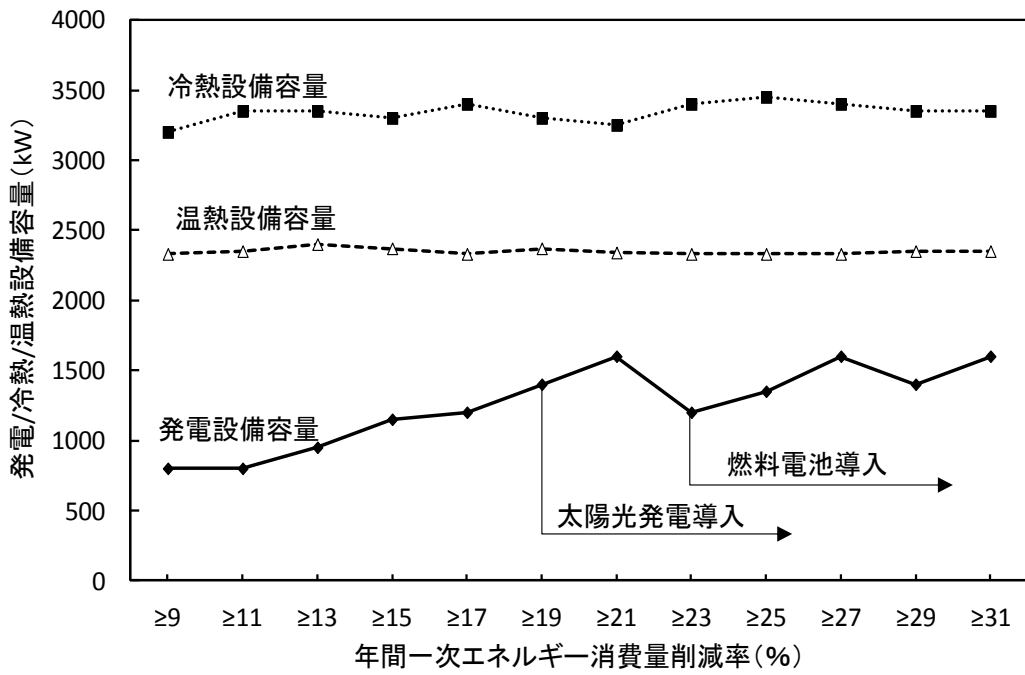


図 7-5-2 省エネルギー性と設備容量の関係

7-5-2 経済性と環境性のトレードオフ関係

年間コスト最大削減率を目的関数として、年間一次エネルギー消費量削減率を考慮せずに、年間 CO₂ 排出量削減率を制約条件として設定する。下記の式で表す。

$$\text{Max } R^{ECO} \quad \text{subj. to } \left\{ R_{Case2}^{CE} + \varepsilon_3 \leq R^{CE} \leq R_{Case3}^{CE} \right\} \quad (9)$$

表 7-4-1 に示すように、最も経済的なケース 2 では、年間 CO₂ 排出量削減率が 9.63% となる。検討するケースの年間 CO₂ 排出量削減率は 9.63% 以下に低くなると、経済性もなければ、環境性もない。したがって、年間 CO₂ 排出量削減率の制約を 9% からスタートする。図 7-5-3 に環境性と経済性のパレート最適解を示す。年間 CO₂ 排出量削減率が約 39% により小さい場合は、三つの評価指標を同時に改善することができる。

表 7-5-2 には環境性の制約による設備の選択を示す。年間 CO₂ 排出量削減率が小さい場合には、経済性を高めるため、800kW のガスエンジン(GE)が選択された。環境性の制約がある程度厳しくなると、ガスエンジンの容量が増加する。また、年間 CO₂ 排出量削減率が 31% 以上になると、CO₂ の排出量を削減するように、ガスエンジンの排熱利用量が増加し、ABS が 4 台まで増加する。年間 CO₂ 排出量削減率が 37% 以上になる場合、PV が導入され始める。その後さらに燃料電池の導入が始まる。燃料電池の排熱効率はガスエンジンより低いため、排熱回収型冷温水発生機 (ABS) が 3 台まで減少する。CO₂ 排出量削減率が 45% 以上になる場合には、燃料電池は 2 台となった。

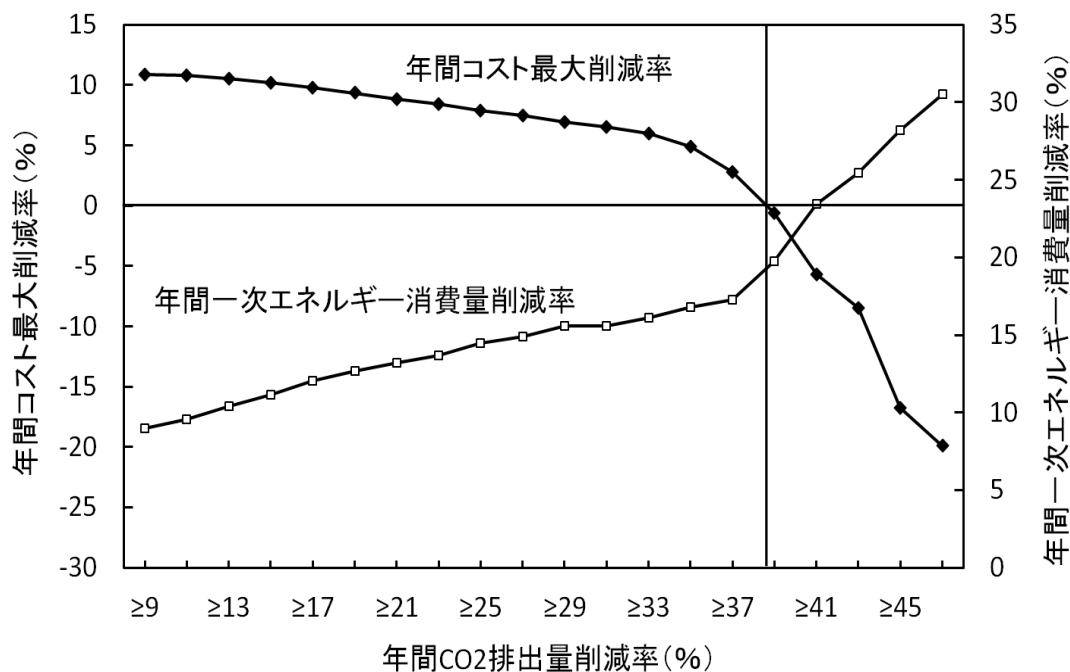


図 7-5-3 環境性と経済性のパレート最適解

表 7-5-2 環境性の制約による設備の選択

R^{CE}	発電設備種類 (台数)	熱源設備種類 (台数)
≥9%	GE-7(2)	ABS-1(1),ABS-7(2),HP-7(1),TC-3(1),GB-2(1),HE-3(1)
≥11%	GE-7(2)	ABS-6(3),HP-7(1),TC-2(1),GB-2(1),HE-2(1)
≥13%	GE-7(2)	ABS-6(1),ABS-7(2),HP-7(1),TC-1(1),GB-2(1),HE-2(1)
≥15%	GE-1(1),GE-7(2)	ABS-6(2),ABS-7(1),HP-7(1),TC-1(1),GB-2(1),HE-2(1)
≥17%	GE-1(1),GE-7(2)	ABS-6(2),ABS-7(1),HP-7(1),TC-1(1),HE-3(1)
≥19%	GE-2(1),GE-7(2)	ABS-6(1),ABS-7(2),HP-7(1),TC-1(1),HE-3(1)
≥21%	GE-3(1),GE-7(2)	ABS-7(3),HP-6(1),TC-2(1),HE-3(1)
≥23%	GE-5(1),GE-7(2)	ABS-6(1),ABS-7(2),HP-5(1),TC-1(1),HE-4(1)
≥25%	GE-6(1),GE-7(2)	ABS-6(2),ABS-7(1),HP-6(1),TC-1(1),HE-4(1)
≥27%	GE-7(3)	ABS-6(2),ABS-7(1),HP-4(1),TC-1(1),HE-5(1)
≥29%	GE-7(3)	ABS-6(1),ABS-7(2),HP-4(1),TC-1(1),HE-5(1)
≥31%	GE-7(3)	ABS-6(4),HP-3(1),HE-2(1)
≥33%	GE-7(3)	ABS-6(2),ABS-7(2),HP-2(1),HE-2(1)
≥35%	GE-7(3)	ABS-6(2),ABS-7(2),HP-4(1),HE-2(1)
≥37%	GE-7(3),PV-1(1)	ABS-6(2),ABS-7(2),HP-4(1),HE-2(1)
≥39%	GE-7(3),PV-3(2)	ABS-6(4),HP-5(1),HE-2(1)
≥41%	GE-7(2),FC-7(1)	ABS-7(3),HP-7(1),TC-1(1),HE-2(1)
≥43%	GE-7(2),FC-7(1),PV-4(1)	ABS-7(3),HP-7(1),TC-1(1),HE-2(1)
≥45%	GE-7(1),FC-7(2),PV-2(1)	ABS-7(3),HP-7(1),TC-1(1),HE-2(1)
≥47%	GE-7(1),FC-7(2),PV-3(1),PV-4(1)	ABS-7(3),HP-7(1),TC-1(1),HE-2(1)

7-5-3 経済性、省エネルギー性、環境性のトレードオフ関係

次は年間コスト最大削減率を目的関数として、年間一次エネルギー消費量削減率と年間CO₂排出量削減率を制約条件として、同時に考慮する。下記の式で表す。

$$\text{Max } R^{ECO} \quad \text{subj. to } \left\{ \begin{array}{l} R_{Case2}^{PEC} + \varepsilon_1 \leq R^{PEC} \leq R_{Case1}^{PEC} \\ R_{Case2}^{CE} + \varepsilon_3 \leq R^{CE} \leq R_{Case3}^{CE} \end{array} \right\} \quad (10)$$

図 7-5-4 に省エネルギー性、経済性、環境性のパレート最適解を示す。年間一次エネルギー消費量削減率が 9%-15%である区域Ⅰで、且つ年間CO₂排出量削減率が 27%以上の場合、経済性はほぼ同じである。この区域では年間コスト最大削減率の変化が穏やかである。年間一次エネルギー消費量削減率は 15%-21%である区域Ⅱでは、年間CO₂排出量削減率が 27%より低い場合には、経済性が同じになり、年間一次エネルギー消費量削減率の増加により、年間コスト最大削減率が小さくなる。年間一次エネルギー消費量削減率は 21%以上である区域Ⅲでは、年間CO₂排出量削減率にも係らず、年間コスト最大削減率が同じになり、年間一次エネルギー消費量削減率の増加により、年間コスト最大削減率が小さくなる。年間一次エネルギー消費量削減率は 21%以上になると、年間コスト最大削減率がマイナスになり、経済性がなくなる。ここでは、図 7-5-4 の制約条件により、表 7-5-3 に一部の設備組み合わせを示す。

図 7-5-4 及び表 7-5-3 により、分散型エネルギーシステムを計画する際には、設計者が定量的に制約条件を設定し、パレート曲線により、省エネルギー性、経済性、環境性など指標を一定の範囲中に収める設備の組み合わせを選択することができる。

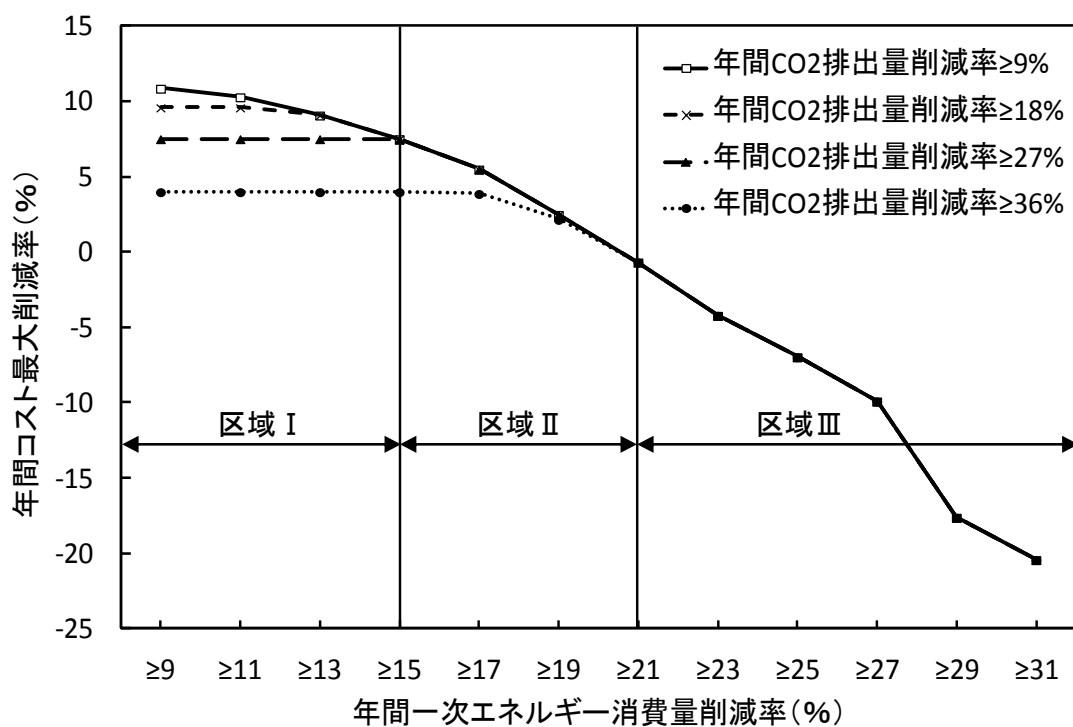


図 7-5-4 省エネルギー性、経済性、環境性のパレート最適解

表 7-5-3 省エネルギー性、環境性の制約による設備の選択

R^{PEC}	R^{CE}	R_{max}^{ECO}	発電設備種類 (台数)	熱源設備種類 (台数)
$\geq 9\%$	$\geq 9\%$	10.86%	GE-7(2)	ABS-1(1),ABS-7(2),HP-7(1),TC-3(1),GB-2(1),HE-3(1)
	$\geq 18\%$	9.59%	GE-2(1),GE-7(2)	ABS-6(2),ABS-7(1),HP-7(1),TC-1(1),HE-3(1)
	$\geq 27\%$	7.51%	GE-7(3)	ABS-6(2),ABS-7(1),HP-4(1),TC-1(1),HE-5(1)
	$\geq 36\%$	3.99%	GE-7(3)	ABS-6(2),ABS-7(2),HP-4(1),HE-2(1)
$\geq 13\%$	$\geq 9\%$	9.08%	GE-2(1),GE-7(2)	ABS-6(1),ABS-7(2),HP-7(1),TC-1(1),HE-3(1)
	$\geq 18\%$	9.08%	GE-2(1),GE-7(2)	ABS-6(1),ABS-7(2),HP-7(1),TC-1(1),HE-3(1)
	$\geq 27\%$	7.51%	GE-7(3)	ABS-6(2),ABS-7(1),HP-4(1),TC-1(1),HE-5(1)
	$\geq 36\%$	3.99%	GE-7(3)	ABS-6(2),ABS-7(2),HP-4(1),HE-2(1)
$\geq 17\%$	$\geq 9\%$	5.49%	GE-7(3)	ABS-7(3),HP-7(1),TC-1(1),HE-2(1)
	$\geq 18\%$	5.49%	GE-7(3)	ABS-7(3),HP-7(1),TC-1(1),HE-2(1)
	$\geq 27\%$	5.49%	GE-7(3)	ABS-7(3),HP-7(1),TC-1(1),HE-2(1)
	$\geq 36\%$	3.87%	GE-7(3)	ABS-6(2),ABS-7(2),HP-7(1),HE-2(1),GB-1(1)

7-6 まとめ

本章では、分散型電源技術及び熱源技術の多様化により、省エネルギー性、経済性、環境性を総括的達成できるように、設備の組み合わせの選択が益々難しくなることから、多目的最適化モデルを開発した。さらに、北九州学研都市を対象として、このモデルを用いて、ケーススタディを行った。その結果は以下のようにまとめる。

(1) 省エネルギー性、環境性、経済性視点から、各目的関数を構築し、分散型電源・熱源技術の導入問題について、 ε -制約法を用いて、汎用性の高い支援モデル及び解析手法を提案した。

(2) ケーススタディを通して、北九州学研都市の場合は、省エネルギー性、環境性、経済性のうち、どちらを優先するかにより、採用されるエネルギーシステムの構成がどのように異なるかを明らかにした。本モデルにより、幅広い代替システムや条件下で、システムの計画立案や評価が効率的かつ短時間に実行可能であることが検証した。

(3) 分散型電源技術未導入システムと比較することにより、北九州学研都市に分散型エネルギーシステムが導入される場合の省エネルギー性、経済性、環境性間の制約を定量的に明らかにした。比較システムに対して、省エネルギー性、経済性、環境性を同時に改善できるように、分散型発電設備・熱源設備を組み合わせたケースを提案した。また、年間一次エネルギー消費量削減率と CO₂ 排出量削減率はそれぞれ 21%、39%以上に制限すると、経済性を達成できないことが分かった。

参考文献

1. 日本コージェネレーションセンター編：コージェネレーション総合マニュアル，日本工業出版
2. 九州電力業務用電力 A：
http://www.kyuden.co.jp/agreement_rate_gyomua_-080901.html， 2012.06.01 参照
3. 西部ガス料金メニュー
http://www.saibugas.co.jp/home/rates_business/menu/price_list.htm#price06， 2012.06.01 参照

第八章 結論と展望

8-1 結論

8-2 今後の展望

8-1 結論

本研究では、分散型電源技術及び熱源技術の多様化により、省エネルギー性、経済性、環境性を総括的達成できるように、設備の組み合わせの選択が益々難しくなることから、多目的最適化モデルを開発した。さらに、モデルの効果及び汎用性を明らかにするために、いろいろなケーススタディを行った。その結果は以下のようにまとめる。

第一章「従来研究と研究の位置づけ」では、エネルギー・環境政策や都市政策に加えて、新成長戦略や東日本大震災からの復興についても考慮しながら、自立・分散型のエネルギーシステムの普及及び推進について、その重要性や必要性を指摘した。分散型エネルギーシステムの設計問題は最適配置問題と最適運用問題が複合した非常に困難な問題となる。分散型エネルギーシステムの設計する際には、設計条件となるパラメータが多く、システム構成の決定と評価を繰り返す必要がある。そのため、分散型エネルギーシステムの設計においては、パソコン等による支援ツールを活用するのが極めて重要であると指摘した。

第二章「北九州市学研都市における地域エネルギーシステムの利用状況及び経年評価に関する研究」では、分散型電源・熱源システムの実際運転状況を把握することを目的とする。北九州学術研究都市に導入された燃料電池、ガスエンジン及び太陽光発電などを組み合わせた分散型エネルギーシステムを研究対象として、2010年の利用状況を調査した。各電源・熱源設備の性能評価を行った。

第三章「分散型電源・熱源技術の多目的計画に関する理論」では、分散型電源・熱源技術の導入問題においては、省エネルギー性、経済性、環境性の目的関数を同時に考慮すると、複数の目的関数を持つ多目的最適化問題となると指摘した。このような多目的最適化問題を解決するために、多目的解析理論を構築した。構築した理論に基づいて、分散型エネルギーシステムの省エネルギー性、経済性、環境性を考慮した多目的最適化モデルを開発した。

第四章「北九州市学研都市における分散型電源・熱源技術の導入効果及び要因分析に関する」を題とした。分散型電源・熱源技術の設計は、計画によって導かれた電源・熱源技術の種類、容量、運転制御などの基本条件により進めることになるが、これらの基本条件が変わった場合はその影響度に応じてどの段階まで立ち戻るか判断する必要がある。第三章で述べた理論を用いて、北九州学研都市を対象として、定量的な多目的達成度を設定し、分散型電源技術と熱源技術それぞれの影響を検討した。また、経済性要因による技術導入の影響を加味した。

第五章「蓄電池と連携したガスコージェネレーションシステムの導入効果に関する研究」を題とした。発電効率を高めるように、ガスコージェネレーションシステムは全年満負荷で運転する場合に対して、電力需要が少ない夜には大量な余剰電力を系統に売電することが発生した。このような状況に対して、本章では、蓄電池の導入を提案し、負荷が低い夜に大量な余剰電力を蓄えて、負荷が高い昼に放電する。また、北九州学研都市を対象として、電力・熱負荷、燃料料金、電源技術・熱源技術の仕様など入力データを基づいて、ガ

スコージェネレーションシステムに、蓄電池を電力貯蔵装置として、その導入効果を検討した。

第六章「太陽熱発電システムの導入効果に関する研究」では、北九州学術研究都市にある燃料電池が故障したことに対して、他の設備が変更しないで、同じ容量の太陽熱発電設備と燃料電池を入れ替えようと提案した。そして、現行システムと比較し、省エネルギー、経済性、環境性の効果について、試算を行った。また、対象地域に太陽熱発電及びガスエンジンを別々に導入し、従来型システムを比較システムとして設定し、比較システムに対する省エネルギー性及び経済性の最適化計算を行い、発電設備の最適容量を求めた。

第七章「北九州市学研都市における分散型電源・熱源機器の選定に関する多目的最適化」では、北九州学研都市を対象として、詳細なデータベースを構築し、種々の制約条件下において複数の評価指標に基づいて各設備の組み合わせの良し悪しを総合的に比較検討（価値判断）し、容量が不連続である実在の分散型電源・熱源機器の組み合わせを策定することを目的として、ケーススタディを行った。北九州学研都市の場合は、幅広い代替システムや条件下で、省エネルギー性、環境性、経済性のうち、どちらを優先するかにより、採用されるエネルギーシステムの構成がどのように異なるかを明らかにした。

8-2 今後の展望

- (1) 本研究では、線形整数計画手法を用いており、部分負荷により分散型電源設備の発電効率の変化には対応しておらず、今後本報の手法を改良し、非線形型のモデルにも適用できるように研究していきたい。
- (2) 開発したツールを用いて、他の用途別建物を対象として、分散型電源・熱源技術の多目的計画を行い、導入可能性を検討する予定である。
- (3) 機器のデータベースを拡充し、広い範囲に分散型電源技術と熱源技術の組み合わせを選択できるように、ツールを改善して行きたい。
- (4) 本論では、多目的計画により、一つシステムの高い省エネルギー性、経済性、環境性が実現されているが、将来のシステムでは、複数システムがお互いに電力及び熱を融通しあうような多目的計画を行うことで、全体としてさらに高い効果を実現できると考えている。

研究業績

審査論文

1. Xingzhi Shi, Hexiang Xu, Weijun Gao, Takao Katsura, Yasunori Akashi, Daisuke Sumiyoshi, Shouichiro Maeda, Hirotooshi Yoda, Analysis of Energy Consumption of Public Buildings in Kitakyushu, The Yellow Sea Rim International Exchange Meeting on Building Environment and Energy 2011, Busan, Korea, pp.13-20, January 21-23, 2011
2. Xingzhi Shi, Weijun Gao, Field Study of the Performance of Distributed Energy System in Kitakyushu Eco-Campus, Japan, Building Simulation 2011, Sydney, Australia, pp.1237-1240, November 14-16, 2011
3. Xingzhi Shi, Weijun Gao, Integration of Distributed Energy Resource and System---Combined Natural Gas Cogeneration System and Storage Battery, The Yellow Sea Rim International Exchange Meeting on Building Environment and Energy 2013, Suzhou, China, pp.205-210, January 25-27, 2013
4. Xingzhi Shi, Weijun Gao, Economic Optimization and Sensitivity Analysis of Distributed Energy Resource Systems in the Residential Building, The 1st Asia Future Conference, Bangkok, Thailand, March 8-10, 2013
5. 施 行之, 高 偉俊, 分散型電源・熱源技術の計画における多目的分析及び最適化に関する研究, 日本建築学会環境系論文集 第 78 卷 第 684 号, pp.183-191, 2013 年 2 月

国内講演（口頭発表）

1. Xingzhi SHI, Katsushi Ijima, Hiroyuki Obiya, Large Deformation Analysis of Membrane Structures considering Small Compressive Stiffness, 2008 年度日本土木学会全国大会
2. 許 廉平, 施 行之, 高 偉俊, 葛 隆生, 赤司 泰義, 住吉 大輔, 前田 昌一郎, 依田 浩敏, 九州地域における非住宅建築物のエネルギー消費量データベース構築に関する研究：(その 9)北九州市における公共施設の 20 年度電力消費量と CO₂ 排出量に関する調査, 2011 年 3 月, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 2, 環境系, pp.117-120
3. 施 行之, 許 赫翔, 高 偉俊, 葛 隆生, 赤司 泰義, 住吉 大輔, 前田 昌一郎, 依田 浩敏, 九州地域における非住宅建築物のエネルギー消費量データベース構築に関する研究：(その 10)北九州市における公共施設のエネルギー消費について, 2011 年 3 月, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 2, 環境系, pp.121-124
4. 許 赫翔, 外岡 豊, 施 行之, 高 偉俊, 高 永志, 玄 姫, 中国非住宅建築物における CO₂ 排出量構造に関する研究, 2011 年 3 月, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 2, 環境系, pp.157-160
5. 許 偉, 施 行之, 高 偉俊, 油田汚水を利用したヒートポンプの省エネルギー効果に関する研究, 2011 年 3 月, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 2, 環境系, pp. 277-280
6. 施 行之, 高 偉俊, 北九州市学研都市における地域エネルギーシステム2009年の利用状況及び経年評価に関する研究, 2011年5月, 空気調和・衛生工学会九州支部研究論文報告書, 第18号, pp.37-40
7. 許 赫翔, 外岡 豊, 施 行之, 高 偉俊, 中国における都市住宅のエネルギー消費量に関する推計, 2011 年 7 月, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.1053-1054
8. 許 廉平, 施 行之, 高 偉俊, 葛 隆生, 赤司 泰義, 住吉 大輔, 前田 昌一郎, 依田 浩敏, 非住宅(民生業務部門)建築物の環境関連データベース構築に関する研究：その 64 平成 21 年度調査に基づく九州におけるエネルギー消費量の実態について(北九州市の教育施設におけるデータ精査結果), 2011 年 7 月, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.993-994
9. 施 行之, 高 偉俊, 地域分散型電源・熱源及び供給システムの統合化に関する研究：その 31 北九州学研都市における地域エネルギーシステム 2009 年の利用状況について, 2011 年 7 月, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2 分冊, pp.911-912
10. 施 行之, 高 偉俊, 北九州学研都市における地域エネルギーシステム2010年の利用状況に関する研究, 2011年9月, 空気調和・衛生工学会大会
11. 施 行之, 高 偉俊, 地域分散型電源・熱源及び供給システムの統合化に関する研究：その 33 省エネルギー性、経済性、環境保全性を考慮した分散型エネルギーシステムの多目的最適化手法の開発, 2012年3月, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 2, 環境系, pp.217-220
12. 施 行之, 高 偉俊, 北九州学研都市における分散型エネルギー技術・熱源技術の経

済的な最適化導入に関する研究，2011年5月，空気調和・衛生工学会九州支部研究論文報告書，第19号，pp.21-26

13. 施 行之，高 偉俊，地域分散型電源・熱源及び供給システムの統合化に関する研究：その 35 分散型エネルギーシステムにおける省エネルギー性、経済性、環境保全性を考慮した多目的最適化手法の開発，2012 年 9 月，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2 分冊，pp.1013-1014
14. 施 行之，高 偉俊，蓄電池と連携したコージェネレーションシステムの導入効果に関する研究，2013年6月，空気調和・衛生工学会九州支部研究論文報告書，第20号，pp.113-116

謝辞

恩師でいらっしゃる北九州市立大学教授高 偉俊先生には、研究から生活の各面までご指導ご支援をくださいました。また、博士の学位を取得したいという私の無望な夢を理解して頂き、研究の当初から論文のまとめ方まで終始、あたたかいご指導をくださるばかりでなく、幅広い視野で建築環境について理解を深める機会を与えて頂きましたことを衷心から感謝いたします。

北九州市立大学教授でいらっしゃる龍 有二先生、白石 靖幸先生、二渡 了先生には、ご多忙の中快く審査を御引き受け頂き、貴重なご助言とご指導を頂きましたことを感謝いたします。

研究室の先輩方、任洪波博士には、北九州学術研究都市における分散型エネルギーシステムに関する研究などに貴重なご意見を頂きました。なお、共同研究やグループの活動を通じて同研究室の皆さんには、多くの御協力を頂きました。心から感謝申しあげます。

最後になりますが、現在に至るまでの勉強や生活は、そばで面倒をみることもできない私に対し、いつも理解し黙々と支えてくださった父母に心から感謝致します。