HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	寒冷地における家庭用熱電併給システムの導入効果に関する研究
Author(s)	武田, 清賢
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11898号
Issue Date	2015-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11898
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58850
Type	doctoral thesis
File Information	Kiyotaka_Takeda.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

博 士 論 文

寒冷地における家庭用熱電併給システムの導入効果に関する研究

北海道大学大学院工学院

空間性能システム専攻

武田　清賢

目次

第 1 章　序章
1.1　研究背景 ····· 1
1.2　本論文の構成 ····· 4

第 2 章　家庭用熱電併給システムに関する国内外の動向と本研究の目的
2.1　概説 ····· 6
2.2　家庭用熱電併給システムの種類 ····· 6
2.2.1　家庭用ガスエンジン熱電併給システムの概要 ····· 6
2.2.2　家庭用固体高分子形燃料電池熱電併給システムの概要 ····· 7
2.2.3　家庭用固体酸化物形燃料電池熱電併給システムの概要 ····· 9
2.3　従来の研究 ····· 10
2.3.1　GE-CHP における研究事例 ····· 10
2.3.2　PEFC-CHP における研究事例 ····· 11
2.3.3　SOFC-CHP における研究事例 ····· 12
2.3.4　各 CHP を比較した研究事例 ····· 12
2.4　各家庭用熱電併給システムの市場動向 ····· 14
2.4.1　国内における家庭用熱電併給システムの概要 ····· 14
2.4.2　海外における家庭用熱電併給システムの概要 ····· 15
2.5　本研究の目的 ····· 17

第 3 章　負荷追従型ガスエンジンを導入した家庭用熱電併給システム
3.1　概説 ····· 22
3.2　従来型 GE システムの寒冷地における課題 ····· 22
3.3　負荷追従型 GE システムの概要 ····· 23
3.4　基本性能試験 ····· 24
3.5　実証実験 ····· 25
3.5.1　実験概要 ····· 25
3.5.2　実験結果と考察 ····· 27
3.6　エネルギー需要特性と導入効果の解析 ····· 31
3.6.1　実験概要 ····· 31
3.6.2　解析結果と考察 ····· 32
3.7　まとめ ····· 38

第 4 章　寒冷地の住宅における高効率給湯・暖房システムの稼動特性と性能評価
4.1　概説 ····· 39
4.2　潜熱回収型給湯・暖房システムのモードおよびフィールド実測試験 ····· 39
4.3　負荷追従型 GE システムのフィールド実測試験概要 ····· 43
4.4　フィールド実測試験冬期代表週運転状況 ····· 44
4.3.1　世帯 A ····· 44
4.3.2　世帯 B ····· 45
4.3.3　世帯 C ····· 47
4.5　フィールド実測試験通年運転状況 ····· 49
4.6　まとめ ····· 55

第 5 章　寒冷地向け負荷追従型ガスエンジン熱電併給システムの排熱利用方法に関する研究
5.1　概説 ····· 57
5.2　換気予熱方式およびモニタ実測世帯概要 ····· 57
5.2.1　換気予熱方式の概要 ····· 57
5.2.2　フィールド実測世帯概要 ····· 57
5.2.3　フィールド実測暖房方式概要 ····· 58
5.2.4　フィールド実測計測概要 ····· 59
5.3　フィールド実測サイトの負荷特性 ····· 60
5.4　運転結果 ····· 62
5.4.1　発電時間 ····· 62
5.4.2　発電・熱寄与率 ····· 63
5.4.3　一次エネルギー削減量・削減率 ····· 65
5.4.4　環境性 ····· 68
5.4.5　経済性 ····· 70
5.5　換気予熱なしとの比較 ····· 71
5.6　まとめ ····· 73

第 6 章　寒冷地における家庭用燃料電池システムの稼働特性と性能評価に関する研究
6.1　概説 ····· 74
6.2　機器仕様 ····· 74
6.3　フィールド実測世帯および計測概要 ····· 76
6.4　実測世帯の負荷特性 ····· 77

6.5　実測世帯の負荷特性 ····· 79
6.5.1　発電・熱寄与率 ····· 79
6.5.2　省エネルギー評価 ····· 81
6.6　まとめ ····· 84

第 7 章　固体酸化物形燃料電池による家庭用熱電併給システムの寒冷地利用に関する研究
7.1　概説 ····· 85
7.2　実験概要 ····· 85
7.2.1　機器仕様 ····· 85
7.2.2　計測項目および計測システム ····· 87
7.3　実験概要 ····· 88
7.3.1　負荷追従特性 ····· 88
7.3.2　起動・停止特性 ····· 89
7.3.3　発電・排熱回収特性 ····· 90
7.4　実証実験 ····· 91
7.4.1　実証実験概要 ····· 91
7.4.2　実証実験結果 ····· 93
7.5　エネルギー需要特性と導入効果の解析 ····· 97
7.5.1　解析概要 ····· 97
7.5.2　実験結果と解析結果の比較 ····· 98
7.5.3　SOFC-CHP 導入効果の年間評価 ····· 100
7.5.4　CHP 最適機器とエネルギー需要特性 ····· 102
7.6　まとめ ····· 104

第 8 章　寒冷地における家庭用熱電併給システムの導入支援ツールに関する研究
8.1　概説 ····· 108
8.2　解析対象システムの概要 ····· 108
8.3　アンケートの内容および回答 ····· 110
8.4　負荷予測手法 ····· 111
8.4.1　電力負荷 ····· 111
8.4.2　給湯負荷 ····· 113
8.4.3　暖房負荷 ····· 116
8.5　CHP 導入効果の簡易シミュレーション手法 ····· 118
8.6　CHP 導入効果の詳細シミュレーション手法 ····· 119

8.7　CHP 導入効果の簡易シミュレーションの評価 ····· 120
8.8　導入効果予測結果の評価 ····· 122
8.9　まとめ ····· 123

第 9 章　家庭用熱電併給システムにおける応用利用の研究
9.1　概説 ····· 125
9.2　検討目的 ····· 125
9.3　集合住宅における熱・電力融通検討 ····· 128
9.3.1　検討対象 ····· 128
9.3.2　検討方法 ····· 129
9.3.3　検討結果 ····· 131
9.4　戸建て住宅のコミュニティ内での電力の融通検討 ····· 134
9.4.1　検討対象 ····· 134
9.4.2　検討方法 ····· 135
9.4.3　検討結果 ····· 136
9.5　まとめ ····· 139

第 10 総括
10.1　総括 ····· 140
10.2　おわりに ····· 142
謝辞

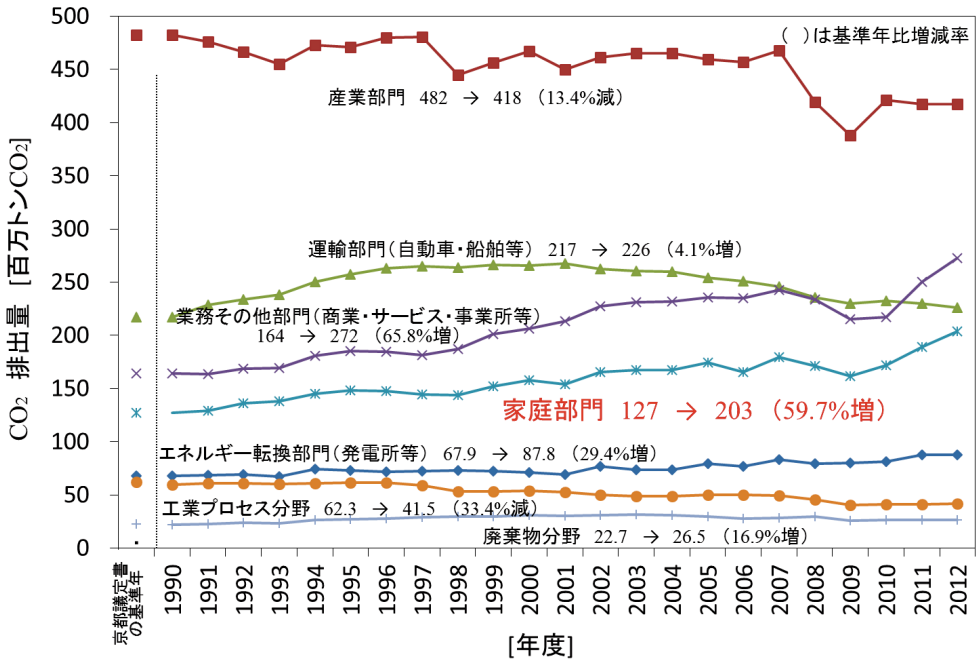
第 1 章

序論

1.1　研究背景

今日，膨大な化石燃料の消費に起因した地球温暖化が，国際社会における最大の問題の一つとなっている．国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 5 次評価報告書 [1]によると，地球温暖化の事実については疑う余地がなく，1880～2012 年において，世界平均地上気温は 0.85℃上昇している．また，人類の活動が，20 世紀半ば以降の温暖化の支配的な要因である可能性を 95%以上としており，温室効果ガスの大量排出に警告を鳴らしている．この温室効果ガスの 1970～2010 年における排出量増加量の 78%は二酸化炭素（CO_2）が占めており，排出量の削減が求められている．

国際的な地球温暖化への取り組みとしては，1997 年 12 月に第 3 回気候変動枠組み条約締結国会議（COP3）が京都で開催されており，先進国における温室効果ガス削減目標が明確に規定された「京都議定書」が採択され，1990 年を基準年として日本は 6%の削減を義務付けられた．しかし，今や国別 CO_2 排出量のトップである中国をはじめとする発展途上国に削減が義務付けられなかった事や，世界第二の CO_2 排出国であるアメリカが 2001 年 3 月に議定書離脱を表明し，日本も東日本大震災で原発が停止した影響を受け，2011 年 12 月の COP17 において事実上議定書を脱退している．2013 年 11 月にポーランドのワルシャワで開



出展：独立行政法人国立環境研究所　日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2012 年度）確定値

図 1.1 部門別 CO_2 排出量 [2]

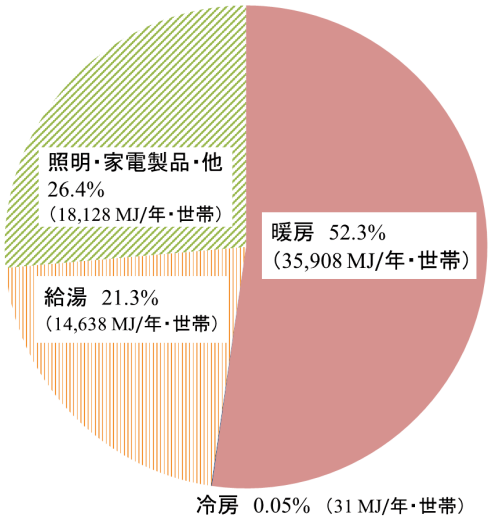
催された COP19 においては，京都議定書の効力が切れる 2020 年以降の枠組みが話し合われており，日本の削減目標は 2005 年度比で 3.8%減とした．

エネルギー起源 CO_2 排出量は京都議定書の基準年である 1990 年で 1059 Mt- CO_2，2007 年度で 1218 Mt- CO_2（基準年比+15.0%）となっており，2009 年度では不況による経済縮小により 1075 Mt- CO_2（基準年比+1.5%）と排出量は減ったものの，東日本大震災における原発停止の影響を受け，2012 年度は 1208 Mt- CO_2（基準年比+14.0%）と再び増加した [2]．図 1.1 に部門別 CO_2 排出量の推移を示す [2]．排出量の大きい産業部門・運輸部門を見ると，近年排出量が減少傾向にあることがわかる．一方で，業務・その他部門および家庭用部門においては，1990 年比でそれぞれ 65.8%，59.7%の増加となっている．

このような背景を受け，家庭部門における CO_2 排出を削減するためのさまざまな政策がなされている．1999 年には「エネルギーの使用の合理化に関する法律（省エネルギー法）」が改正され，排出量割合の大きい家電機器や冷暖房に用いられるエアコン等を対象に，トップランナー制度が導入された．また，平成 20 年度省エネルギー法改正では，年間 150 戸以上建設の事業者に対して，住宅の消費エネルギーを基準値以下にすることが義務付けられ，建築物の高断熱化，高気密化および建築設備の高効率化や自然エネルギーの利用による省エネルギー化が進んでいる．

また，ここで積雪寒冷地である北海道に目を向けると，家庭部門における一人当たりのエネルギー使用量が全国平均の約 1.5 倍程度 [3]になっている．さらに，図 1.2 に示す，家庭における用途別の一次エネルギー消費量 [3]（北海道）を見ると，暖房に占める割合が 5 割を超えており，給湯と合わせると 7 割以上が熱利用によるものであることがわかる．

このような状況を受け，①クリーンな一次エネルギーの導入（例：再生可能エネルギー・天然ガス等）②高効率機器の導入（例：各種エネ家電・ヒートポンプ・熱電併給（CHP）シ



出展：住環境計画研究所　家庭用エネルギー統計年報 2012 年版

図 1.2 家庭用用途別の一次エネルギー消費量（北海道）[3]

ステム等）③設備・建物での省エネ（例：高性能断熱材・熱交換換気システム・節湯水栓等）・④使用者による省エネ（例：クールビス・ウォームビス等）のような取り組みが行われているが，本研究では特に②高効率機器の CHP システムに注目し，その導入効果を明らかにするのが目的である．

CHP 機器は，電力・熱を合わせた総合効率が 8～9 割となる高効率システムであり（図 1.3），分散型電源という特徴から，省エネ・光熱費削減・エネルギーセキュリティの問題を解決することができる．また，ICT を導入したスマートエネルギーネットワーク社会においては，太陽光・風量発電のような不安定な再生可能エネルギーの出力変動を吸収する運転を行うことで，系統電力の安定化に寄与することも期待されている．また，熱需要が高い寒冷地においては，非寒冷地区よりも高い導入効果を得ることができる．

本研究では，近年市場導入が行われ始めた固体高分子形燃料電池（PEFC），固体酸化物形燃料電池（SOFC），ガスエンジン（GE）を用いた寒冷地向け家庭用 CHP システムの導入効果について述べる．CHP システムは，その運転状況や部分負荷性能等により実際の導入効果が異なってくるため，定格発電効率などカタログ上の性能だけで評価を行うことは難しい．そこで，本研究ではフィールド実測における通年のモニター試験および部分負荷性能・起動停止特性・負荷追従特性等の詳細な実験室実験のデータを基に作成したシミュレーションを基に，通年における各 CHP システムの導入効果を評価する．

また，各家庭におけるエネルギー使用形態により，CHP 機器によるエネルギー削減効果は異なってくる．各種 CHP を含めた省エネ機器の削減効果を試算する Web プログラム [4]などは存在し，住宅性能に応じた一次エネルギー消費量の試算が可能となっているが，世帯人数および居住者の行動による電力・給湯・暖房負荷の違いに注目したものは無い．そこで本研究では，簡易的なアンケートにより，寒冷地における家庭のエネルギー使用量を予測し，様々な種類の家庭用 CHP システムのエネルギー削減効果の予測を行う．

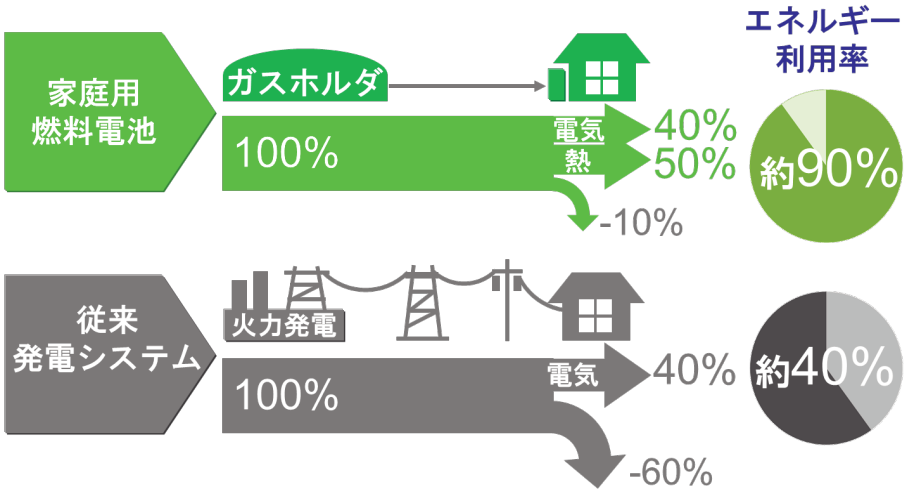


図 1.3 家庭用固体高分子形燃料電池熱電併給システムのエネルギー利用効率

1.2　本論文の構成

図 1.4 に本論文の章構成を示す．本論文は全 10 章から構成されており，各章の概要は以下の通りである．

第 1 章「序論」では，研究背景と本論文の構成を示す．

第 2 章「家庭用熱電併給システムに関する国内外の動向と本研究の目的」では，家庭用熱電併給システムにおける国内外動向について概説するとともに，各家庭用熱電併給システムの特徴・利点などについて述べたうえで，本研究の目的を示す．

第 3 章「寒冷地の住宅における高効率給湯・暖房システムの稼動特性と性能評価」では，寒冷地向け負荷追従型ガスエンジン家庭用熱電併給システムの基本性能特性の評価および，開発したシミュレーションの妥当性を確認し，既存のガスエンジンシステムとの比較を行う．

第 4 章「負荷追従型ガスエンジンを導入した家庭用熱電併給システム」では，寒冷地向け負荷追従型ガスエンジン家庭用熱電併給システムのフィールド実測試験結果を示し，冬期代表週および年間の運転状況より，本システムの省エネルギー性・経済性を明らかにする．

第 5 章「寒冷地向け負荷追従型ガスエンジン熱電併給システムの排熱利用方法」では，第 3・4 章で述べた負荷追従型ガスエンジン家庭用熱電併給システムの更なる高効率利用を目的として，排熱を換気用の外気の加熱に利用するシステムのフィールド実測を行い，通年の導入効果の評価および通常方式との比較を行う．

第 6 章「寒冷地における家庭用燃料電池システムの稼働特性と性能評価」では，寒冷地仕様家庭用固体高分子形燃料電池熱電併給システムのフィールド実測試験を行い，稼動状況，システム性能および省エネルギー性等の評価を行う．

第 7 章「固体酸化物形燃料電池による家庭用熱電併給システムの寒冷地利用」では，家庭用固体酸化物形燃料電池熱電併給システムの基本性能試験および試験モードを行い，シミュレーションにより寒冷地戸建て住宅における通年の一次エネルギー削減効果を明らかにする．

第 8 章「寒冷地における家庭用熱電併給システムの導入支援ツール」では，簡易的なアンケートにより，寒冷地における戸建て住宅のエネルギー使用量を予測し，先述の寒冷地向け家庭用熱電併給システム（負荷追従型ガスエンジン・固体高分子形燃料電池・固体酸化

物形燃料電池）のエネルギー削減効果を予測する手法を示す.

第 9 章「家庭用熱電併給システムにおける応用利用」では，コミュニティ向けシステムの検討として，集合住宅およびコミュニティ内で熱電併給システムの発電電力を融通する際の導入効果についてシミュレーションを行う.

第 10 章「総括」では，本論文で得られた知見についてまとめを示す.

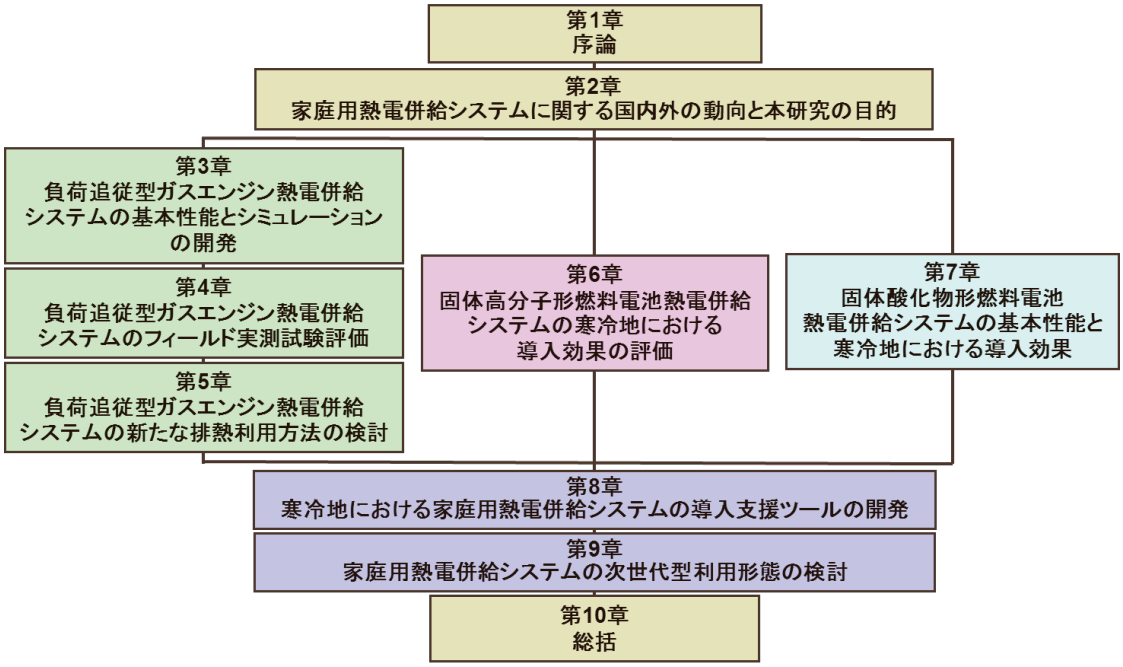


図 1.4 章構成

参考文献

1)　環境省，気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第 5 次評価報告書(AR5)について http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/

2)　独立行政法人国立環境研究所, 日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2012 年度）確定値　http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html

3)　2014 家庭用エネルギーハンドブック，住環境計画研究所，(2013-12)，41-42.

4)　平成 25 年度 国土交通省補助事業 住宅省エネルギー技術設計者講習，木を活かす建築推進協議会，(2013-11).

第２章

家庭用熱電併給システムに関する国内外の動向と本研究の目的

2.1　概説

本章では，家庭用熱電併給システムの概要について示す．2.2 節で，家庭用熱電併給システムの概要および各システムの特徴・利点などについて示す．次いで，2.3 節で従来の研究について述べる．さらに，2.4 節で家庭用熱電併給システムにおける国内外動向について概説し，2.5 節に本研究の目的を示す．

2.2　家庭用熱電併給システムの種類

現在，家庭用熱電併給システムは，大別するとエンジン方式と燃料電池方式の 2 種類がある．さらに，燃料電池方式については，固体高分子形燃料電池（PEFC）方式と固体酸化物形燃料電池（SOFC）が家庭用として注目されている．本研究では，家庭用 CHP システムとして，上記のガスエンジン方式・PEFC 方式・SOFC 方式を各 1 機種ずつ検討している．以下に，各システムの特徴を述べる．

2.2.1　家庭用ガスエンジン熱電併給システムの概要

家庭用ガスエンジン熱電併給システムについては，エンジンの技術開発が成熟していることもあり，最も早く市場導入が行われている．また，そのことから，機器の信頼性・耐久性が高いシステムであると言える．ガスエンジンシステムにおいては，後述の燃料電池

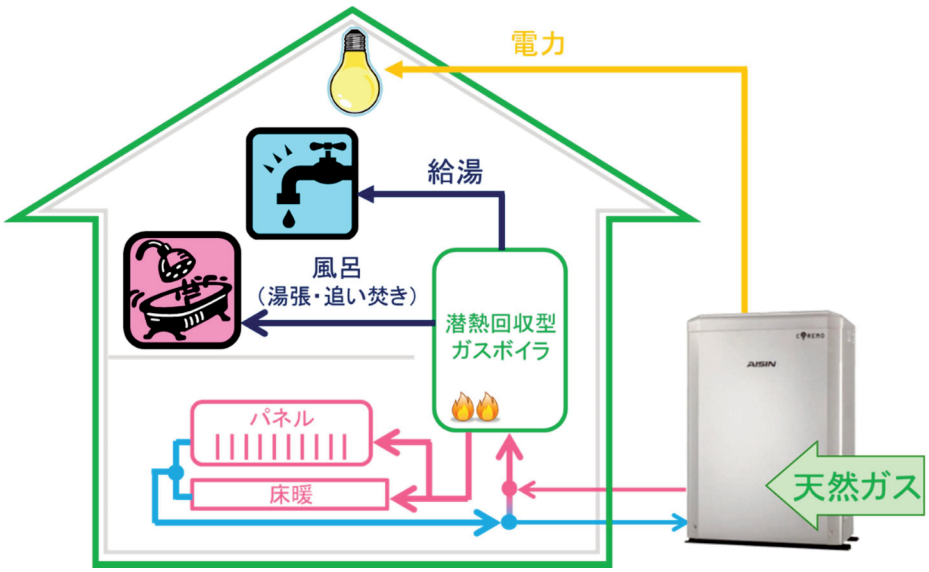


図 2.1 本研究で用いた家庭用ガスエンジン熱電併給システムの概要

システムと違い起動・停止が迅速であり消費エネルギーが低いという利点がある．一方で，発電効率については，業務用・産業用などの大型のエンジンでは一般的な大規模発電所に匹敵する 40%程度の効率を有する機器もあるが，小型のμエンジンでは 26%LHV 程度の機器が多く，燃料電池システムに劣る．

現時点で，国内で販売されている家庭用ガスエンジン熱電併給システムは 2 種類あり，1 つは排熱を給湯・暖房（給湯がメイン）に利用する定格型 GE-CHP，もう 1 つは排熱を暖房にのみ利用する負荷追従型 GE-CHP である．本研究においては，現在寒冷地において普及拡大が進められている，負荷追従型 GE-CHP について検討を行う．図 2.1 に，本研究で用いた家庭用負荷追従型 GE-CHP システムの概要を示す．ガスエンジンは屋外設置型で，天然ガスで発電を行う．排熱を給湯・暖房に利用する定格型 GE-CHP が，家庭の電力・熱需要を予測して最適運転制御（学習制御）を行うのに対し，本ガスエンジンでは暖房使用中であり電力需要が一定以上の場合に発電するという，シンプルな制御となっている．ガスエンジンの排熱で賄い切れない暖房および給湯需要は，潜熱回収型ボイラにて賄う．

2.2.2　家庭用固体高分子形燃料電池熱電併給システムの概要

家庭用固体高分子形燃料電池（PEFC）熱電併給システムは，水素と酸素の化学反応を利用した発電システムである．図 2.2 に，発電の仕組みを示す．アノード（負極）に供給された水素は，白金触媒の作用でイオン化する．この際，水素イオンはイオン透過性のある固体高分子膜を，電子は外部回路を通りカソード（正極）に移動する．この電子の動きが，電流にあたる．白金触媒の作用で，カソードに供給された酸素（空気）がアノードから移動した水素イオン・電子と反応し水を生成する．アノード・カソードにそれぞれ酸素・水素を供給し続け，発生した水を排出することで，発電を継続することができる．また，発

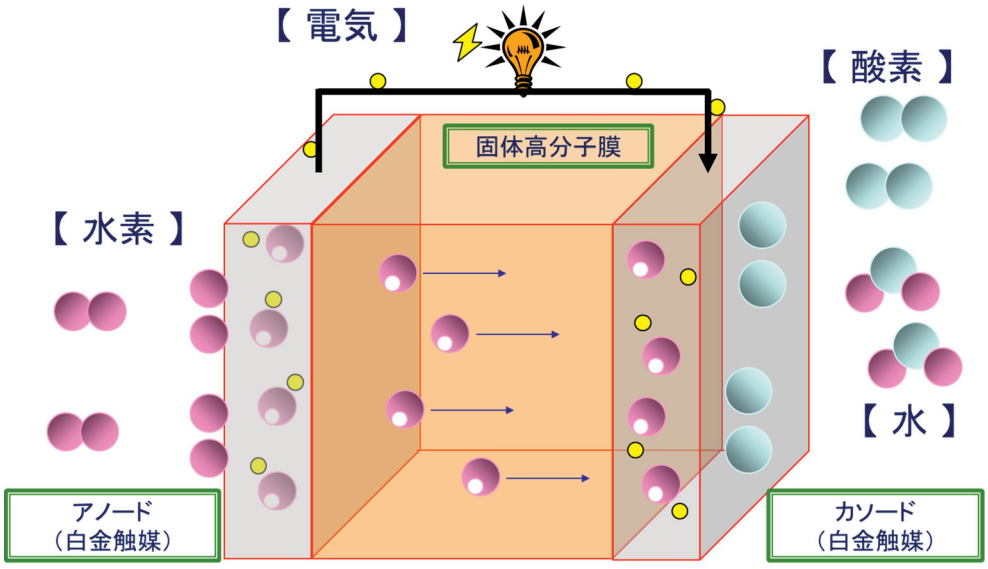


図 2.2 固体高分子形燃料電池の発電の仕組み

電時にカルノー効率の制約を受けないため，小型のシステムにおいても比較的高い発電効率を実現できる．発電に利用する水素は，天然ガス・プロパンガス・灯油などから触媒を用いた化学反応を利用して生成する．図 2.3 に，天然ガスの主成分であるメタンから水素を生成する反応（水蒸気改質反応）を示す．メタンと水（水蒸気）を混合し，高温化で触媒反応させることにより，水素と二酸化炭素を生成する．この際，副生成物として一酸化炭素も発生するが，先述の白金触媒を被毒するため，一般的に 10ppm 未満程度まで低減させる CO 処理工程を経て発電部に供給される．

図 2.4 に，家庭用固体高分子形燃料電池熱電併給システムの概要を示す．天然ガスを燃料処理装置に投入し，水素を生成する．生成した水素と空気中の酸素を発電部（スタック）に投入し発電を行う．その際に発生する排熱は，併設する貯湯タンク内の水を加熱するのに利用する．タンクのお湯は給湯需要を賄うのに利用する．暖房需要および貯湯タンクのお湯で賄い切れない給湯需要は，付属の潜熱回収型ボイラにより賄う．

家庭用固体高分子形燃料電池熱電併給システムは高効率であり，送電端で 40%LHV 程度の機器が多い．一方で，CO 処理工程を含む燃料処理装置の昇温工程の影響等により，起動時間が 1 時間程度と長い．また，発電部（スタック）の触媒として高価な白金を利用することから，コストダウンを目的として代替触媒の研究が盛んに行われている．

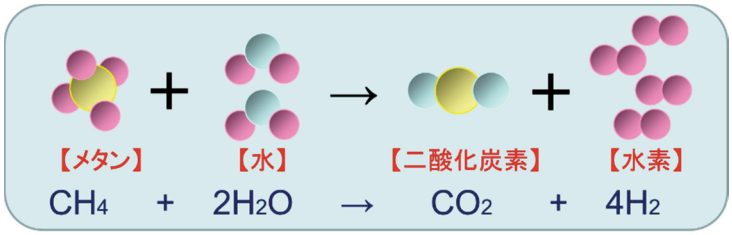


図 2.3 水素生成工程（水蒸気改質反応）

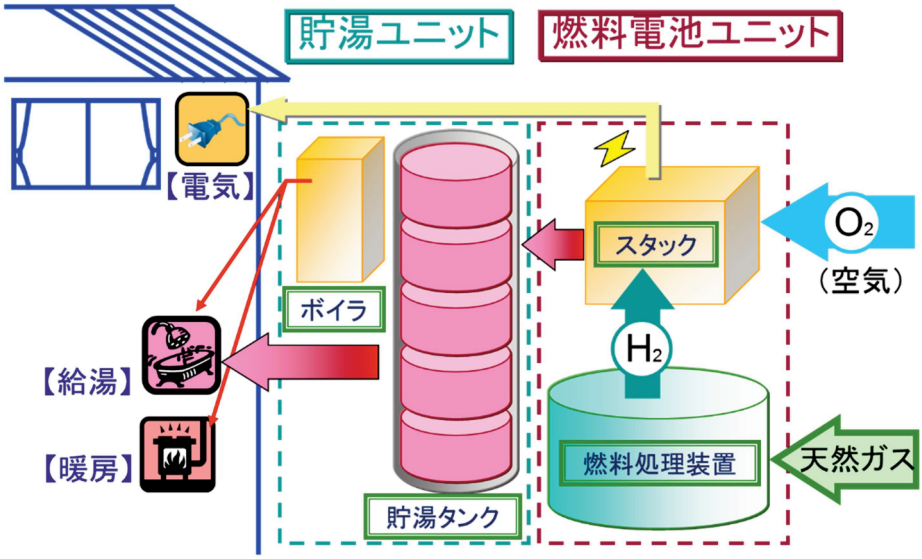


図 2.4 家庭用固体高分子形燃料電池熱電併給システムの概要

2.2.3　家庭用固体酸化物形燃料電池熱電併給システムの概要

家庭用固体酸化物形燃料電池（SOFC）熱電併給システムは，先述の PEFC とは別の種類の燃料電池を用いたシステムである．図 2.5 に，固体酸化物形燃料電池の発電の仕組みを示す．PEFC では固体高分子膜を使用していたが，SOFC ではイオン電導性のセラミックスを用いている．発電部は，800℃程度と非常に高温になり，PEFC のような白金触媒が不要であるのが特徴である．また，発電部はホットモジュールと呼ばれる，スタックと簡易な燃料処理装置が一体となった構造となっており，直接ホットモジュールに天然ガスと水を供給することで，水素生成と発電を行う．水素生成の際に発生する一酸化炭素については，PEFC では 10ppm 以下程度まで除去する必要があったが，SOFC においては一酸化炭素も燃料となるため，CO 処理工程が不要である．

家庭用固体酸化物形燃料電池熱電併給システムは，PEFC 熱電併給システムよりさらに高効率で，送電端で 47%LHV 程度の発電効率である．また，CO 処理装置が不要であることから，PEFC と比較すると機器がシンプルである．しかし，発電部が高温であることから起動に時間がかかることと，繰り返し熱応力によるセラミック部の耐久性への懸念から，基本的に起動停止は行わず，24 時間連続運転となる．また，一般的に発電効率と耐久性はトレードオフの関係にあるため，高い効率を維持しつつ所定の耐久性（一般的には 10 年以上）を実現することが重要である．

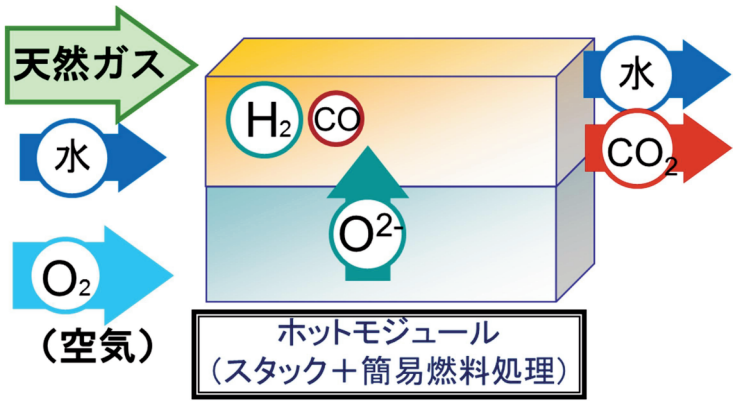


図 2.5 固体酸化物形燃料電池の発電の仕組み

2.3　従来の研究

家庭用熱電併給システムの導入効果については，国内外で多数の研究が行われている．しかし，海外については商用化された機器が少なく，フィールド実測にてエネルギー削減効果を確認した事例は少ない．以下に，国内外における研究事例を纏める．

2.3.1　GE-CHP における研究事例

GE-CHP については，解析・実験などにより環境性・経済性などの評価が行われている．表 2.1[1~11]に GE-CHP に関する研究事例を示す．

国内においては，Wakui Tetsuya らにより集合住宅の各戸に機器を導入し，住戸内で電力融通する場合の最適発電容量について解析[3]が行われており，現行システムの 1kW が最適であると結論付けられている．

海外においては，E. Entchev らがカナダの実験住宅にて発電出力が 1kW のシステムの実測を行っている[9]．本試験では，系統への逆潮流が可能となっており，試験期間中の発電量は平均 19.6kWh/day，うち 50.4%が住宅内で消費され，残り 49.6%が系統に逆潮流される結果となっている．発電寄与率は，平均 65.5%となっているが，一次エネルギー削減量および CO_2 の削減量については，評価されていない．H. Seo らが韓国の集合住宅における GE のフィールド実測を行った事例では，30%の一次エネルギー削減効果を確認した[8]．

表 2.1 GE-CHP における研究事例[1~11]

No.	タイトル	著者	掲載誌	評価手法	特徴
1	Residential cogeneration systems: review of the current technology	H. Onovwiona and V. Ugursal	Renewable and Sustainable Energy Reviews, 10-5, 389-431, 2006	解析	導入効果，マイクロタービン，スターリングエンジン，10kW未満（家庭用）および10～30kW（集合用）で検討
2	Feasibility study of applying internal combustion engines in residential buildings by exergy, economic and environmental analysis	M. Ehyaei, P. Ahmadi, F. Atabi, M. Heibati and M. Khorshidvand	Energy and Buildings, 55, 405-413, 2012	解析	集合住宅における導入効果試算
3	Optimal sizing of residential gas engine cogeneration system for power interchange operation from energy-saving viewpoint	T. Wakui and R. Yokoyama	Energy, 36-6, 3816-3824, 2011	解析	最適発電容量の試算
4	Feasibility of small-scale gas engine-based residential cogeneration in Spain	A. Celador, A. Erkoreka, K. Escudero and J. Sala	Energy Policy, 39-6, 3813-3821, 2011	解析	導入効果解析
5	Residential application of internal combustion engine based cogeneration in cold climate-Canada	C. Aussant, A. Fung, V. Ugursal and H. Taherian	Energy and Buildings, 41-12, 1288-1298, 2009	解析	経済性，環境性の解析（寒冷地）
6	Dynamic performance assessment of a building-integrated cogeneration system for an Italian residential application	A. Rosato, S. Sibilio and G. Ciampi	Energy and Buildings, 64, 343-358, 2013	解析	集合住宅における経済性，環境性の解析
7	Environmental impacts of distributed energy systems-The case of micro cogeneration	M. Pehnt	Environmental Science & Policy, 11-1, 25-37, 2008	解析	ライフサイクルにおける環境性評価（CO2・Nox・SOx）
8	Economic optimization of a cogeneration system for apartment houses in Korea	H. Seo, J. Sung, S. Oh, H. Oh and Ho-Young Kwak	Energy and Buildings, 40-6, 961-967, 2008	実測	集合住宅での環境性，経済性評価
9	Application of hybrid micro-cogeneration system-Thermal and power energy solutions for Canadian residences	E. Entchev, L. Yang, F. Szadkowski, M. Armstrong and M. Swinton	Energy and Buildings, 60, 345-354, 2013	実測	実証住宅における実測試験（寒冷地）
10	Experimental analysis of micro-cogeneration units based on reciprocating internal combustion engine	R. Possidente, C. Roselli, M. Sasso and S. Sibilio	Energy and Buildings, 38-12, 1417-1422, 2006	実験/解析	基本性能（実験），環境性・経済性（解析）
11	Calibration and validation of a model for simulating thermal and electric performance of an internal combustion engine-based micro-cogeneration device	A. Rosato and S. Sibilio	Applied Thermal Engineering, 45-46, 79-98, 2012	実験/解析	集合住宅向けのガスエンジンのシミュレーション開発

2.3.2　PEFC-CHP における研究事例

PEFC-CHP については，要素技術，システムの実験・実測，解析評価などが国内外で広く行われているが，商用電源系統と連系した家庭用 PEFC-CHP の実用化に関して，我が国が世界を牽引する立場にある．表 2.2[12~24]に PEFC-CHP に関する研究事例を示す．

海外においては，Oh Si-Doek らにより韓国の集合住宅に 1kW のシステムを導入した際のコストメリットについて解析[17]が行われており，通年で 20%の光熱費が削減されると結論づけられているが，一次エネルギー削減量および CO_2 の削減量については，評価されていない．また，解析は実機に基づいたものでは無く，理論計算で行われている．

国内については，黒木らにより試作機における実験室実験の結果を基にしたシミュレーションが作成されており，生活スケジュール自動生成プログラム SCHEDULE Ver2.0 を用いて作成した居住者の季節別生活パターンおよび多数室室温変動・熱負荷計算プログラム TrP により算出した暖冷房負荷より，電力・給湯・暖房負荷データを作成し，地域別の一次エネルギー消費量および光熱費メリットが試算[24]されている．

また，独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構および新エネルギー財団における定置用燃料電池大規模実証事業[25]では，全国各地の住宅に設置した準商用機 3,307 台の運転実績が纏められており，システム 1 台あたりの通年の一次エネルギー削減率は 17.1%となっている．

表 2.2 PEFC-CHP における研究事例[12~24]

No.	タイトル	著者	掲載誌	評価手法	特徴
1	Effect of PEFC operating conditions on the durability of sulfonated poly (arylene ether sulfone ketone) multiblock membranes	T. Okanishi, Y. Tsuji, Y. Sakiyama, S. Matsuno, B. Bae, K. Miyatake, M. Uchida and M. Watanabe	Electrochimica Acta, 56-24, 8989-8996, 2011	要素技術	電解質膜の開発
2	Design of a CO preferential oxidation reactor for PEFC systems	F. Cipiti and V. Recupero	Chemical Engineering Journal, 146-1, 128-135, 2009	要素技術	改質器のCO除去
3	Technical design and economic evaluation of a stand-alone PEFC system for buildings in Sweden	C. Wallmark and P. Alvfors	Journal of Power Sources, 118, 358-366, 2003	解析	コスト試算，発電容量の検討
4	最適化手法に基づく家庭用固体高分子形燃料電池コージェネレーション・システムの経済的導入可能性分析	蒲生恵司・横山良平・伊東弘一	日本機械学会論文集B, 68-667(2002-3), pp.899-906, 2002	解析	電力・都市ガス料金・システム性能なども含めた経済性の検討
5	City-level energy and CO2 reduction effect by introducing new residential water heaters	Y. Shimoda, T. Okamura, Yo. Yamaguchi, Yu. Yamaguchi, A. Taniguchi and T. Morikawa	Energy, 35-12, 4880-4891, 2010	解析	環境性の解析，ヒートポンプ型給湯器・太陽熱給湯器との比較
6	Optimal operation of a 1-kW PEMFC-based CHP system for residential applications	Oh Si-Doek, et al.	Applied Energy 95, 93-101, 2012	解析	集合住宅，経済性評価
7	Integration of the components in a small-scale stationary research PEFC system	C. Wallmark, S. Enback, M. Rissanen, P. Alvfors and G. Lindbergh	Journal of Power Sources, 159-1, 195-208, 2006	実験	システムの開発・実験
8	Field performance of a polymer electrolyte fuel cell for a residential energy system	Y. Hamada, M. Nakamura, H. Kubota, K. Ochifuji, M. Murase and R. Goto	Renewable and Sustainable Energy Reviews, 9-4, 345-362, 2005	実験	システムの基本性能解析
9	A study on energy saving in residential PEFC cogeneration systems	K. Maeda, K. Masumoto and A. Hayano	Journal of Power Sources, 195-12, 3779-3784, 2010	実験	学習制御の開発
10	Environment conscious residential energy use by fuel cell CHP technology	M. Itagaki	Proceedings of the 34th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings－CIB W062 2008, 81-94, 2008	実測	大規模実証（準商用機）評価（全国平均）
11	Hybrid utilization of renewable energy and fuel cells for residential energy systems	Y. Hamada, K. Takeda, R. Goto and H. Kubota	Energy and Buildings, 43-12, 3680-3684, 2011	実測/解析	太陽光発電システムとの併用について
12	Evaluation of a low temperature fuel cell system for residential CHP	N. Briguglio, M. Ferraro, G. Brunaccini and V. Antonucci	International Journal of Hydrogen Energy, 36-13, 8023-8029, 2011	実験・実測	基本性能
13	家庭用分散型電熱源の導入効果に関する研究（その1）家庭用固体高分子形燃料電池CGSの運転方法と導入効果	黒木　洋・清水章太郎・高口洋人・渡辺俊行	日本建築学会環境系論文集, 610, 67-73, 2006	実験/解析	モード試験における解析

2.3.3　SOFC-CHP における研究事例

SOFC-CHP については，システムの解析評価，耐久性評価，プラグインハイブリッド車との連係による評価など多数の研究が存在するが，商用機もしくは商用に近い段階の実証機における部分負荷特性・負荷追従性・起動停止特性などを明らかにしたものや，実機を用いたモード試験結果の評価を行ったものは無かった．表 2.3[26~31]に SOFC-CHP に関する研究事例を示す．

海外においては，Hawkes Adam らによりイギリスの住宅における SOFC のコストメリットについて解析[28]が行われており，比較的エネルギー消費量の高い住宅においては SOFC の導入によりコストメリットが生じ，最適発電容量は 1.25kW と結論付けられている．

国内においては，Ono Takashi らにより実証機の運転特性が報告されており，実使用環境下においても高い発電効率（41.3%）が出ることを確認している[31]．また，独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構および新エネルギー財団における SOFC（固体酸化物形燃料電池）実証事業[32]では，全国で 233 台の試作機を住宅に設置し，平均で 16.4%の一次エネルギー削減率を確認している．

表 2.3 SOFC-CHP における研究事例[26~31]

No.	タイトル	著者	掲載誌	評価手法	特徴
1	Feasibility study on combined use of residential SOFC cogeneration system and plug-in hybrid electric vehicle from energy-saving viewpoint	T. Wakui, N. Wada and R. Yokoyama	Energy Conversion and Management, 60(Aug., 2012), pp.170～179	解析	プラグインハイブリッド自動車との併用
2	Economics evaluation of a 5 kW SOFC power system for residential use	E. Bompard, R. Napoli, B. Wan and G. Orsello	International Journal of Hydrogen Energy, 33-12(Jun., 2008), pp.3243～3247	解析	発電効率などを変化させた場合の経済性評価
3	Solid oxide fuel cell micro combined heat and power system operating strategy	A. Hawkes, P. Aguiar, B. Croxford, M. Leach, C. Adjiman and N. Brandon	Journal of Power Sources, 164-1(Jan., 2007), pp.260～271	解析	経済性，環境性の解析，排熱利用の検討
4	The financial viability of an SOFC cogeneration system in single-family dwellings	K. Alanne, A. Saari, V. Ugursal and J. Good	Journal of Power Sources, 158-1(Jul., 2006), pp.403～416	解析	経済性の評価
5	Solid oxide fuel cell systems for residential micro-combined heat and power in the UK	A. Hawkes and M. Leach	Journal of Power Sources, 149(Sep., 2005), pp.72～83	解析	経済性の評価
6	Development of residential SOFC cogeneration system	T. Ono, I. Miyachi, M. Suzuki and K. Higaki	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 18-13(Jun., 2011), pp.1～4	実測	準商用機における基本性能・耐久性

2.3.4　各 CHP を比較した研究事例

表 2.4[33~40]に，各 CHP を比較した研究事例を示す．Dorer Viktor らにより，GE（内燃機関およびスターリングエンジン）・PEFC・SOFC・地中熱ヒートポンプにおける一次エネルギー削減率および CO_2 の削減率の解析[35]が行われている．欧州における系統電力およびガスボイラーを用いた場合と比較すると，エネルギー負荷の低いパッシブ住宅およびスイスの建築基準法に準拠する新設住宅では SOFC が，スイスにおける既存住宅では GE（内燃機関）の削減量が最大になるが，系統電力に高効率なコンバインドサイクル発電が導入された場合，地中熱ヒートポンプの効果が高くなると結論付けている．

これらの GE・PEFC・SOFC における研究事例は，運転条件の最適化検討や将来の系統電力の電源構成が変化した場合の検討などについては有効であるが，各 CHP システム実機の運転特性やユーザによる実使用下における結果と一致しないことがあるため，CHP システ

ムの定量的な評価を行うことは難しい.

表 2.4 各 CHP を比較した研究事例 [33～40)]

No.	タイトル	著者	掲載誌	機器	評価手法	特徴
1	Small-scale fuel cells for residential applications	N. Sammes and R. Boersma	Journal of Power Sources, 86(Mar., 2000), pp.98～110	PEFC/SOFC	調査	基本性能など
2	Study on running condition of residential gas engine co-generation system	Y. Shimizu, S. Murakawa, H. Takata, H. Kitayama, Y. Hamada and M. Nabeshima	Proceedings of the 34th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings－CIB W062, 106-117, 2008	GE/PEFC/SOFC	調査	環境性，経済性，耐久性などの比較検討
3	Energy and CO2 emissions performance assessment of residential micro-cogeneration systems with dynamic whole-building simulation programs	V. Dorer and A. Weber	Energy Conversion and Management, 50-3, 648-657, 2009	GE/PEFC/SOFC	解析	モード試験における解析
4	Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan	H. Ren and W. Gao	Energy and Buildings, 42-6, 853-861, 2010	GE/PEFC	解析	コスト最小化運転と環境性重視型運転の検討
5	Performance assessment of fuel cell micro-cogeneration systems for residential buildings	V. Dorer, R. Weber and A. Weber	Energy and Buildings, 37-11, 1132-1146, 2005	PEFC/SOFC	解析	環境性解析，発電容量・貯湯容量の最適化の検討
6	Sizing of residential μCHP systems	O. Shaneb, G. Coates and P. Taylor	Energy and Buildings, 43-8(Aug., 2011), pp.1991～2001	GE/PEFC/SOFC	解析	SOFCシステムの最適発電容量およびPEFC，GEとの比較
7	An energetic-exergetic comparison between PEMFC and SOFC-based micro-CHP systems	L. Barelli, G. Bidini, F. Gallorini and A. Ottaviano	International Journal of Hydrogen Energy, 36-4(Feb., 2011), pp.3206～3214	PEFC/SOFC	解析	熱力学的解析による基本性能の検討
8	家庭用分散型電熱源システムの導入効果に関する研究	青木博子・中尾美晴・黒木洋・渡辺俊行	都市・建築学研究. 16 pp. 101-109, 2009-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門	GE/PEFC/SOFC	解析	ヒートポンプ給湯器も含めた環境性評価

2.4　各家庭用熱電併給システムの市場動向

2.4.1　国内における家庭用熱電併給システムの概要

表 2.5 に，日本国内の主な家庭用熱電併給システムを示す．ガスエンジンは，定格型 GE[41]と負荷追従型 GE[42]がある．定格型 GE は，2003 年の販売開始以降着実に販売台数を伸ばし，2012 年には年間 11.5 万台の導入実績[43]となっている．負荷追従型 GE は寒冷地仕様となっており，2011 年に北海道より販売開始された．市場が寒冷地に限定されており，まだ販売台数は多くないが，毎年倍増のペースで増加しており，2013 年度の実績は 270 台である．

固体高分子形燃料電池は，2005 年～2008 年に実施された定置用燃料電池大規模実証事業[25]（新エネルギー財団，新エネルギー・産業技術総合開発機構）にて，全国に 3,307 台のシステムを設置し，実使用下での性能評価・課題の抽出を行い，性能・信頼性の向上およびコストダウンに大きく寄与した．その後，世界に先駆けて 2009 年にメーカ 3 社（うち 1 社は後に撤退）より販売が開始された．

固体酸化物形燃料電池は，2007 年～2010 年に実施された SOFC（固体酸化物形燃料電池）実証事業[32]（新エネルギー財団，新エネルギー・産業技術総合開発機構）にて，全国に 223 台のシステムを設置し，評価を行った．その後，2011 年に A 社，2012 年 B 社より販売開始された[44]が，後に A 社は生産・受注の中止を発表した．

家庭用燃料電池（PEFC・SOFC）の年間販売台数は，2013 年度に 3 万台[45]を超えた．累計販売台数は，2014 年に 10 万台を突破[46]し，2020 年には 140 万台，2030 年に 530 万台（全世帯の１割）の目標が掲げられている．

表 2.5 国内の主な家庭用熱電併給システム

発電方式	ガスエンジン (Gas Engine : GE)		固体高分子形燃料電池 (Polymer Electrolyte Fuel Cell : PEFC)		固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell : SOFC)
概観	定格型GE	負荷追従型GE	PEFC1	PEFC2	SOFC1
出力 発電効率 総合効率	1000W 26.3% 92.0%	500～1500W 26.0% 90.0%	200～750W 39.0% 95.0%	250～700W 39.0% 95.0%	～700W 46.5% 90.0%
運転制御	連続/間欠	暖房使用時	DSS (Daily Start Stop)	連続/DSS	連続
貯湯量	90L/137L	15Lバッファ	147L	200L	90L
燃料種	13A（一般的な都市ガスの燃料種）/LPG	13A/LPG	13A	13A/LPG	13A/LPG

2.4.2　海外における家庭用熱電併給システムの概要

海外においては，ドイツ・韓国などで PEFC の開発が進められている（表 2.6）が，何れも実証段階となっている．また，発電効率も国内メーカと比較すると低くなっており，スタックの耐久性についても 10 年に満たない機種がある．

このような中，国内の PEFC メーカ（表 2.5 の PEFC1 のメーカ）がドイツのボイラメーカと共同で開発した家庭用固体高分子形燃料電池熱電併給システムを，2014 年 4 月より欧州で初めて販売を開始した [53]．日本国内においては，燃料電池ユニット・貯湯ユニット・バックアップボイラは屋外設置が一般的だが（寒冷地においては，バックアップボイラのみ屋内設置），欧州では専用の地下室等への設置が一般的であり，本製品も屋内設置に対応している．

他の国内 PEFC メーカ（表 2.5 の PEFC2 のメーカ）も，ドイツのボイラメーカとの提携を発表し，2014 年度中の市場導入を目指している [54]．

表 2.6 海外の主な家庭用熱電併給システム（PEFC）[47)~52)]

発電方式	固体高分子形燃料電池 (Polymer Electrolyte Fuel Cell：PEFC)				
概観	ドイツ	ドイツ	ドイツ	韓国	韓国
出力 発電効率 総合効率	1000W 34% 96%	300W 不明 98%	750W 37% 90%	1000W 36% 80%	1000W 35% 85%
開発状況	フィールド実証中（～2015）	フィールド実証中	2014年より販売開始	フィールド実証中	フィールド実証中
その他	日本の燃料電池メーカと提携を発表	寿命は10～15年（期待値） 5年に1回スタック交換が必要	発電ユニットは日本の燃料電池メーカが製作	貯湯タンク 150L	起動時間 <1hour 戸建住宅1000世帯に設置

固体酸化物形燃料電池についても，欧州・オーストラリア等で開発が進められている．表 2.7 に主なシステムを示す．オーストラリアの機種・イギリスの機種は，発電効率が 60%・50%と高いのが特徴である．しかし，表 2.5 で示した日本国内で販売されている機種については，参考文献 [31]の図表より発電効率の低下が 0.45%/1,000hours 程度となっているのに対し，表 2.7 に示す海外機種は，何れも 1%/1,000hours 程度の効率低下となっており，耐久性に不安が残る．オーストラリアの機種は販売開始されているが，累積販売台数は 500 台程度に留まっており，その他の機種も実証中である．

表 2.7 海外の主な家庭用熱電併給システム（SOFC）[55)～59)]

発電方式	固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell：SOFC)		
概観	オーストラリア	イギリス	スイス
出力 発電効率 総合効率	500～1500W 60% 85%	300W 50% 不明	1000W 35% 95%
開発状況	発売中（販売台数500台程度）	実証中	実証中
その他	発電効率の低下 1%/1,000hours	発電効率の低下 1%/1,000hours （ショートスタック試験にて）	発電効率の低下 1%/1,000hours

2.5　本研究の目的

2.3 節で示した従来の研究事例から，これまで以下の報告はなされていない.

・排熱を暖房に利用する負荷追従型 GE に関する報告
・GE・PEFC・SOFC-CHP を実測負荷にて評価し比較した報告
・寒冷地における PEFC・SOFC-CHP の導入効果に関する報告
・居住者のライフスタイルから各種 CHP の導入効果を予測する報告

このような状況を鑑み，本研究の目的を以下の通りとする.

①従来，定格発電のみであった GE-CHP システムに対し，負荷追従を可能とした新規 GE-CHP システムを開発（共同）し，実験室で検証する
②負荷追従型 GE-CHP システム試験機のフィールド実測で，導入効果（一次エネルギー削減量）を明らかにする
③負荷追従型 GE-CHP システム商用機にて，新しい排熱利用方法を提案する
④寒冷地仕様 PEFC-CHP を開発（共同）し，フィールド実測により導入効果（一次エネルギー削減量）を明らかにする
⑤SOFC-CHP の実験室実験により基本性能を明らかにし，導入効果解析シミュレーションを作成する
⑥居住者のライフスタイルから各 CHP の導入効果を予測する導入支援ツールを開発し，適用精度を検証する
⑦家庭用 CHP システムの次世代型利用形態の提案を行う

本論文においては，上記①～⑦を明らかにすることで，寒冷地における CHP システムの導入効果を明らかにする.

参考文献

1) H. Onovwiona and V. Ugursal ; Residential cogeneration systems: review of the current technology，Renewable and Sustainable Energy Reviews，10-5，389-431，2006
2) M. Ehyaei, P. Ahmadi, F. Atabi, M. Heibati and M. Khorshidvand ; Feasibility study of applying internal combustion engines in residential buildings by exergy, economic and environmental analysis，Energy and Buildings，55，405-413，2012
3) T. Wakui and R. Yokoyama ; Optimal sizing of residential gas engine cogeneration system for power interchange operation from energy-saving viewpoint, Energy, 36-6, 3816-3824, 2011
4) A. Celador, A. Erkoreka, K. Escudero and J. Sala ; Feasibility of small-scale gas engine-based residential cogeneration in Spain，Energy Policy，39-6，3813-3821，2011
5) C. Aussant, A. Fung, V. Ugursal and H. Taherian ; Residential application of internal

combustion engine based cogeneration in cold climate-Canada，Energy and Buildings，41-12，1288-1298，2009

6) A. Rosato, S. Sibilio and G. Ciampi ; Dynamic performance assessment of a building-integrated cogeneration system for an Italian residential application，Energy and Buildings，64，343-358，2013
7) M. Pehnt ; Environmental impacts of distributed energy systems-The case of micro cogeneration，Environmental Science & Policy，11-1，25-37，2008
8) H. Seo, J. Sung, S. Oh, H. Oh and Ho-Young Kwak ; Economic optimization of a cogeneration system for apartment houses in Korea, Energy and Buildings, 40-6, 961-967, 2008
9) E. Entchev, L. Yang, F. Szadkowski, M. Armstrong and M. Swinton ; Application of hybrid micro-cogeneration system-Thermal and power energy solutions for Canadian residences, Energy and Buildings，60，345-354，2013
10) R. Possidente, C. Roselli, M. Sasso and S. Sibilio ; Experimental analysis of micro-cogeneration units based on reciprocating internal combustion engine，Energy and Buildings，38-12，1417-1422，2006
11) A. Rosato and S. Sibilio ; Calibration and validation of a model for simulating thermal and electric performance of an internal combustion engine-based micro-cogeneration device, Applied Thermal Engineering，45-46，79-98，2012
12) T. Okanishi, Y. Tsuji, Y. Sakiyama, S. Matsuno, B. Bae, K. Miyatake, M. Uchida and M. Watanabe : Effect of PEFC operating conditions on the durability of sulfonated poly (arylene ether sulfone ketone) multiblock membranes，Electrochimica Acta，56-24，8989-8996，2011
13) F. Cipiti and V. Recupero : Design of a CO preferential oxidation reactor for PEFC systems, Chemical Engineering Journal，146-1，128-135，2009
14) C. Wallmark and P. Alvfors : Technical design and economic evaluation of a stand-alone PEFC system for buildings in Sweden，Journal of Power Sources，118，358-366，2003
15) 蒲生恵司・横山良平・伊東弘一：最適化手法に基づく家庭用固体高分子形燃料電池コージェネレーション･システムの経済的導入可能性分析, 日本機械学会論文集 B, 68-667(2002-3)，pp.899-906，2002
16) Y. Shimoda, T. Okamura, Yo. Yamaguchi, Yu. Yamaguchi, A. Taniguchi and T. Morikawa : City-level energy and CO2 reduction effect by introducing new residential water heaters, Energy，35-12，4880-4891，2010
17) Oh Si-Doek, et al. : Optimal operation of a 1-kW PEMFC-based CHP system for residential applications，Applied Energy 95，93-101，2012
18) C. Wallmark, S. Enback, M. Rissanen, P. Alvfors and G. Lindbergh : Integration of the

components in a small-scale stationary research PEFC system，Journal of Power Sources，159-1，195-208，2006

19) Y. Hamada, M. Nakamura, H. Kubota, K. Ochifuji, M. Murase and R. Goto : Field performance of a polymer electrolyte fuel cell for a residential energy system，Renewable and Sustainable Energy Reviews，9-4，345-362，2005

20) K. Maeda, K. Masumoto and A. Hayano : A study on energy saving in residential PEFC cogeneration systems，Journal of Power Sources，195-12，3779-3784，2010

21) M. Itagaki ; Environment conscious residential energy use by fuel cell CHP technology，Proceedings of the 34th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings－CIB W062 2008，81-94，2008

22) Y. Hamada, K. Takeda, R. Goto and H. Kubota：Hybrid utilization of renewable energy and fuel cells for residential energy systems，Energy and Buildings，43-12，3680-3684，2011

23) N. Briguglio, M. Ferraro, G. Brunaccini and V. Antonucci：Evaluation of a low temperature fuel cell system for residential CHP，International Journal of Hydrogen Energy，36-13，8023-8029，2011

24) 黒木　洋・清水章太郎・高口洋人・渡辺俊行：家庭用分散型電熱源の導入効果に関する研究（その１）家庭用固体高分子形燃料電池 CGS の運転方法と導入効果，日本建築学会環境系論文集，610，67-73，2006

25) 新エネルギー財団　定置用燃料電池大規模実証事業（http://www.nef.or.jp/happyfc/），著者閲覧日：平成 26 年 11 月 29 日

26) T. Wakui, N. Wada and R. Yokoyama : Feasibility study on combined use of residential SOFC cogeneration system and plug-in hybrid electric vehicle from energy-saving viewpoint，Energy Conversion and Management，60(Aug., 2012)，pp.170-179

27) E. Bompard, R. Napoli, B. Wan and G. Orsello : Economics evaluation of a 5 kW SOFC power system for residential use，International Journal of Hydrogen Energy，33-12，pp.3243-3247，2008

28) A. Hawkes, P. Aguiar, B. Croxford, M. Leach, C. Adjiman and N. Brandon : Solid oxide fuel cell micro combined heat and power system operating strategy，Journal of Power Sources，164-1，pp.260-271，2007

29) K. Alanne, A. Saari, V. Ugursal and J. Good : The financial viability of an SOFC cogeneration system in single-family dwellings，Journal of Power Sources，158-1，pp.403-416，2006

30) A. Hawkes and M. Leach : Solid oxide fuel cell systems for residential micro-combined heat and power in the UK，Journal of Power Sources，149，pp.72-83，2005

31) T. Ono, I. Miyachi, M. Suzuki and K. Higaki : Development of residential SOFC cogeneration system，IOP Conference Series: Materials Science and Engineering，18-13，

pp.1-4，2011
32) 新エネルギー財団　SOFC（固体酸化物形燃料電池）実証事業
（http://www.nef.or.jp/sofc/index.html），著者閲覧日：平成 26 年 12 月 31 日
33) N. Sammes and R. Boersma：Small-scale fuel cells for residential applications，Journal of Power Sources，86，pp.98-110，2000
34) Y. Shimizu, S. Murakawa, H. Takata, H. Kitayama, Y. Hamada and M. Nabeshima；Study on running condition of residential gas engine co-generation system，Proceedings of the 34th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings－CIB W062，106-117，2008
35) V. Dorer and A. Weber；Energy and CO2 emissions performance assessment of residential micro-cogeneration systems with dynamic whole-building simulation programs，Energy Conversion and Management，50-3，648-657，2009
36) H. Ren and W. Gao：Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan，Energy and Buildings，42-6，853-861，2010
37) V. Dorer, R. Weber and A. Weber：Performance assessment of fuel cell micro-cogeneration systems for residential buildings，Energy and Buildings，37-11，1132-1146，2005
38) O. Shaneb, G. Coates and P. Taylor : Sizing of residential μCHP systems，Energy and Buildings，43-8，pp.1991-2001，2011
39) L. Barelli, G. Bidini, F. Gallorini and A. Ottaviano : An energetic-exergetic comparison between PEMFC and SOFC-based micro-CHP systems，International Journal of Hydrogen Energy，36-4，pp.3206-3214，2011
40) 青木博子・中尾美晴・黒木洋・渡辺俊行：家庭用分散型電熱源システムの導入効果に関する研究，都市・建築学研究. 16，pp. 101-109，2009
41) 本田技研　エコウィルで「マイホーム発電」をはじめよう！
（http://www.honda.co.jp/cogeneration/），著者閲覧日：平成 26 年 11 月 29 日
42) アイシン精機株式会社　コレモホームページ
（http://www.aisin.co.jp/cogene/coremo.html），著者閲覧日：平成 26 年 11 月 29 日
43) 日本ガス協会　自主行動計画
（http://www.gas.or.jp/kankyo/02_03.html），著者閲覧日：平成 26 年 11 月 29 日
44) アイシン精機株式会社　エネファーム TypeS ホームページ
（http://www.aisin.co.jp/cogene/enefarm.html），著者閲覧日：平成 26 年 11 月 29 日
45) コージェネ財団　エネファームメーカー販売台数
（http://www.ace.or.jp/web/works/works_0090.html），著者閲覧日：平成 26 年 11 月 29 日
46) エネファーム 10 万台突破 記者発表会
（ http://www.gas.or.jp/user/comfortable-life/enefarm-partners/common/data/20140929_we

b.pdf)，著者閲覧日：平成 26 年 11 月 29 日
47) EU Prospects Fuel Cell CHP event report
（http://www.fuelcelltoday.com/media/1751320/eu_prospects_fuel_cell_chp.pdf)，著者閲覧日：平成 27 年 1 月 3 日
48) 資源エネルギー庁　燃料電池推進室　家庭用燃料電池について
（ http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/pdf/002_01_00.pdf)，著者閲覧日：平成 27 年 1 月 3 日
49) Baxi innotech ホームページ
（http://www.baxi-innotech.de/)，著者閲覧日：平成 27 年 1 月 3 日
50) Elcore ホームページ
（http://www.elcore.com/de/home.html)，著者閲覧日：平成 27 年 1 月 3 日
51) GS Fuel Cell ホームページ
（http://gsfc.en.ec21.com/)，著者閲覧日：平成 27 年 1 月 3 日
52) Fuel Cell Power ホームページ
（http://www.fuelcellpower.co.kr/index.php)，著者閲覧日：平成 27 年 1 月 3 日
53) パナソニック　トピックス
（http://panasonic.co.jp/news/topics/2013/115949.html)，著者閲覧日：平成 26 年 11 月 29 日
54) 東芝燃料電池システム　ニュースリリース
（http://www.toshiba.co.jp/product/fc/whatsnew/news/20140314.htm)，著者閲覧日：平成 26 年 11 月 29 日
55) 小笠原 慶;海外のSOFC研究開発状況, 水素エネルギーシステム, Vol.37, No.2(2012), 132-137.
56) 鈴木 稔；家庭用・小型ＳＯＦＣシステムの現状と展望，Spring-8 利用推進協議会，第 6 回グリーンエネルギー研究会，2012-3
57) Ceramic Fuel Cells Limited ホームページ
（http://www.cfcl.com.au/)，著者閲覧日：平成 27 年 1 月 3 日
58) Ceres Power ホームページ
（http://www.cerespower.com/)，著者閲覧日：平成 27 年 1 月 3 日
59) Hexis ホームページ
（http://www.hexis.com/en)，著者閲覧日：平成 27 年 1 月 3 日

第３章

負荷追従型ガスエンジンを導入した家庭用熱電併給システム

3.1　概説

本章では，寒冷地向け負荷追従型ガスエンジン熱電併給（GE-CHP）システムを取り上げ，その基本性能および既存 GE システムとの比較を行う．まず，3.2 節で従来型 GE システムの寒冷地における課題について述べ，3.3 節で本 GE-CHP システムについて概説する．次いで，3.4 節で GE-CHP システムの基本性能試験結果を示し，3.5 節で模擬負荷を用いた実証試験による冬期代表週の運転結果を示す．さらに，3.6 節では解析を行い，本 GE-CHP システムの通年の導入効果の試算および従来型 GE システムとの比較を行う．最後に，3.7 節でまとめを述べる．

3.2　従来型 GE システムの寒冷地における課題

従来型のGEシステム[1)]の構成を図3.1に示す．エンジンは学習制御により発電時間を決定する．エンジン停止時およびエンジン発電分で賄いきれない電力は，商用電力を使用する．

発電時の排熱は，貯湯タンクに貯めて給湯や暖房に利用する．タンクの湯で賄いきれない分は，貯湯ユニットに付属のバックアップボイラで補助するため，湯切れの心配はない．北海道において貯湯ユニットは室内設置方式であるが，それ以外の日本国内地域では屋外設置方式である．また，GEは何れも屋外設置である．

本システムは環境性に優れているが，寒冷地においては課題もある．1点目は，貯湯ユニットが一般的なガスボイラよりも大きく，室内スペースを要することである．2点目は，本システムのバックアップボイラが高効率の潜熱回収でないことである．熱負荷が少ない非寒冷地区においては，排熱で大半の熱を賄うので，コスト重視でバックアップボイラに非潜熱回収型を採用するのは理に適っているが，寒冷地においては暖房利用によるバックアップボイラの稼動率が高いため，潜熱回収を採用するメリットが大きい．

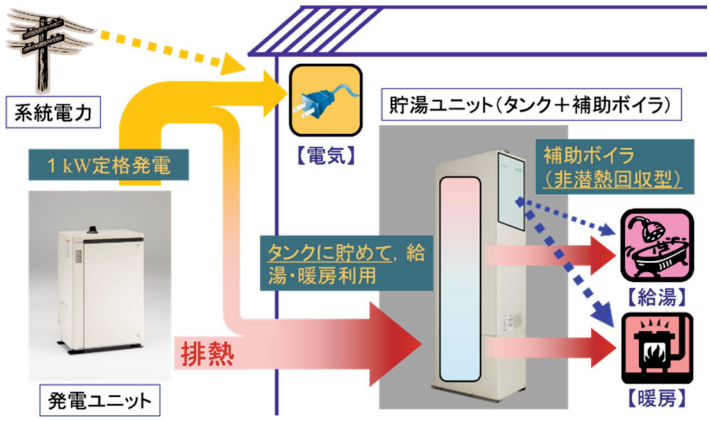


図 3.1 従来型 GE システムの構成図

3.3　負荷追従型 GE システムの概要

新規開発システムの構成，外観をそれぞれ図 3.2，図 3.3 に示す．本システムはエンジン発電時の排熱を暖房にのみ利用するのが大きな特徴である．エンジンは暖房使用時，かつ電力使用量が一定以上の場合に発電する制御となっており，別置きの貯湯ユニットが不要である（エンジンユニット内部には小型のバッファタンクを内蔵）．また，エンジン発電分で賄いきれない電力は，商用電力を利用する．給湯とエンジン排熱で賄いきれない暖房負荷は，潜熱回収型ボイラにて補う．貯湯ユニットを不要とし，小型の潜熱回収型ボイラを使用することで，コンパクトなシステムとなり，コストダウンの効果も期待できる．

表 3.1 に本 GE-CHP の仕様を示す．既存のシステムが一定出力であるのに対し，本システムは 0.5～1.5 kW で負荷追従発電を行い，最大出力時の発電熱効率は 23.5%（HHV），排熱回収熱効率は 53.3%（HHV）に達する．本システムでは，低負荷運転時のエンジン回転数を下げることで部分負荷効率の低下を抑えているが，回転角速度変化の影響により，エンジン回転数が不安定になるなどの問題がある．この問題を解決するため回生インバータの改良およびフライホイールの最適化を図っている．この背反として，インバータが複雑になること，機器重量が増加することが課題となる．

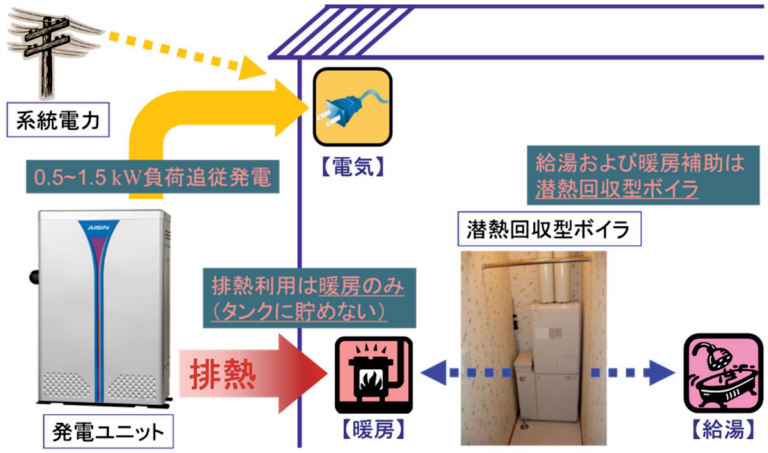


図 3.2 寒冷地向け負荷追従型 GE システムの構成図

図 3.3 寒冷地向け負荷追従型 GE システムの概観

表 3.1 寒冷地向け負荷追従型 GE システムの仕様

設置方法		屋外据置設置（戸建住宅）
能　力	発電出力範囲	0.5～1.5kW
	熱出力	1.4～3.4kW
電気方式		単相3線式　101V/202V
発電熱効率		23.5%(HHV)
排熱回収効率		53.3%(HHV)
総合効率		76.8%(HHV)
外形寸法	高さ・幅・奥行き	1,150×750×400（mm）　※突起部含まず

3.4　基本性能試験

発電･排熱回収熱効率に関する部分負荷特性の評価を行った. 発電量は 500 W～1500 W の範囲を対象とした. 図 3.4 に実験装置およびセンサ設置箇所を示す. 電力量計により GE の発電量を，温度計および流量計により GE の排熱回収熱量を計測した. また，ガス流量計にて GE のガス消費熱量を計測した. さらに，潜熱回収型ボイラのガス消費量，給湯・暖房出力も計測した. 図 3.5 に基本性能試験結果を示す（図の横軸は最大出力に対する割合）. 低負荷領域でも発電熱効率 13.6%と比較的高い値を有している. 排熱回収熱効率はいずれの負荷においても高い値を示している. 最大出力に対する割合が約 0.8（出力約 1.2 kW）の時の発電熱効率は 21.6%（HHV），排熱回収熱効率は 53.9%（HHV）となった

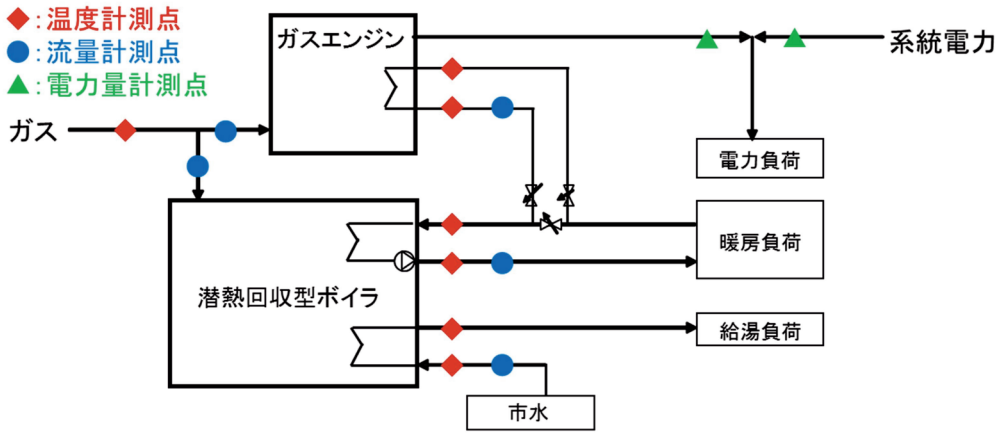


図 3.4 実験装置の概要

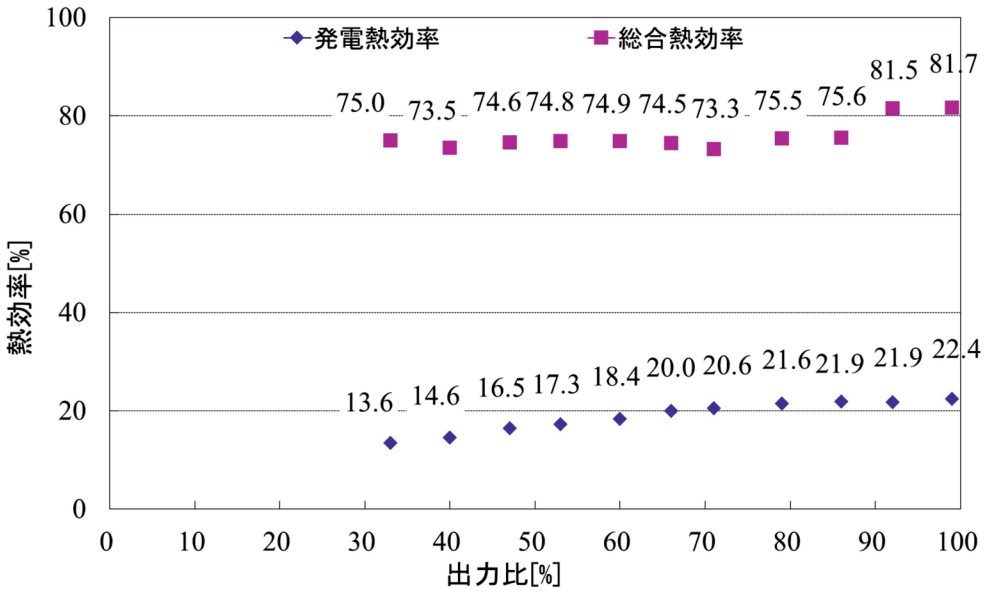


図 3.5 寒冷地向け負荷追従型 GE システムの概観

3.5　実証実験

3.5.1　実験概要

電力・給湯・暖房各負荷を与え，新規開発の GE-CHP システムの省エネルギー性の評価を行った．暖房については，24 時間連続運転と，5 時から 17 時まで主要居住空間のみ暖房を行う間欠運転を行った．それぞれの暖房実験条件を図 3.6 に示す．

図 3.7，図 3.8 に検討対象の負荷特性を示す（図の縦軸の単位 GJ/a は年間値）．検討対象としては，既往のエネルギー調査[3)]で得られた札幌地区の実負荷等を用いる．その中から比較的電力・給湯需要（Domestic Hot Water : DHW）の小さい世帯 5，平均的な負荷の世帯 18，比較的電力需要の大きい世帯 20，電力・給湯需要の大きい世帯 21 の四世帯における冬期代表週の実負荷を選定し，模擬負荷制御装置において電力・給湯負荷を与えた．図 3.9 に実験時における各実験の 1 日あたりの負荷を示す．

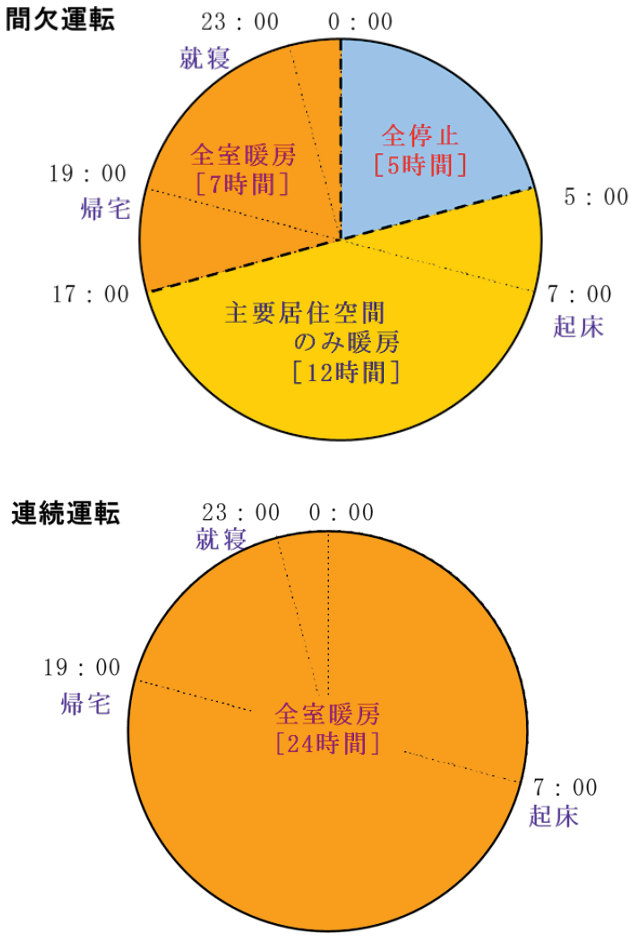


図 3.6 暖房実験条件

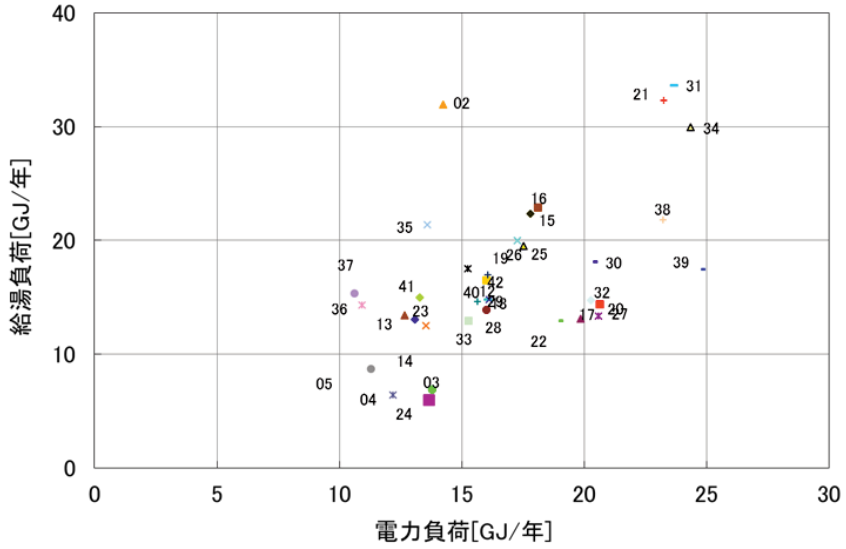


図 3.7 検討対象の負荷特性（電力-給湯）

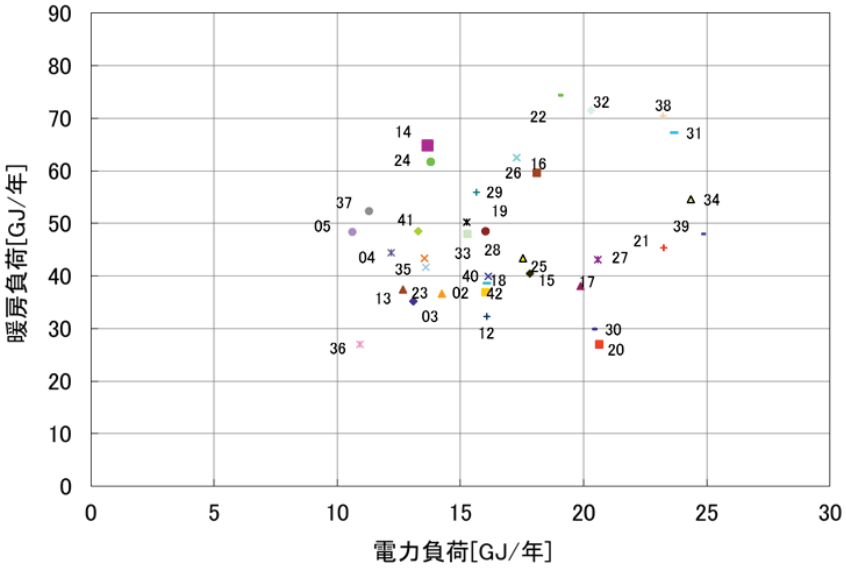


図 3.8 検討対象の負荷特性（電力-暖房）

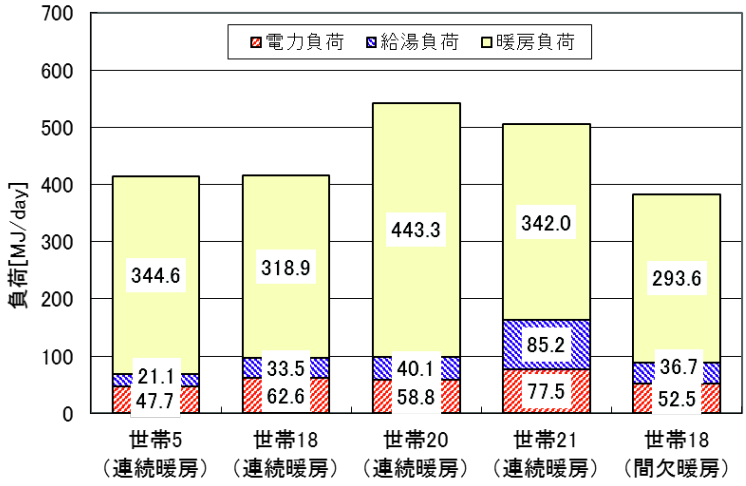


図 3.9 各実験条件における 1 日あたりの負荷

3.5.2　実験結果と考察

連続運転の実験結果として，図 3.10，図 3.11，図 3.12 に世帯 18 における冬期代表週の電力収支，熱収支，エネルギーフローをそれぞれ示す．一週間の総発電量 369.3 MJ，受電電力量は 69.1MJ となり，電力需要の 84.2%を GE により供給する結果となった．受電電力が常に存在するのは，逆潮防止に配慮した制御によるものである．また，排熱利用量は 1483.8 MJ，潜熱回収型ボイラ熱量は 1095.5 MJ，排熱寄与率は 66.5%となった．一週間を通じた発

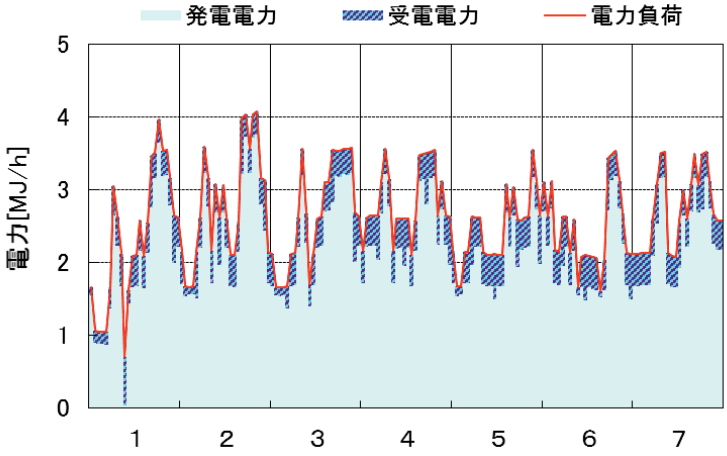


図 3.10 電力収支（世帯 18：連続運転）

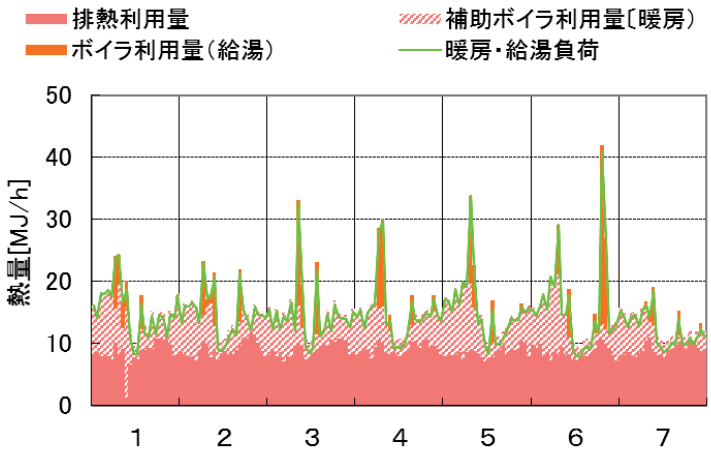


図 3.11 熱収支（世帯 18：連続運転）

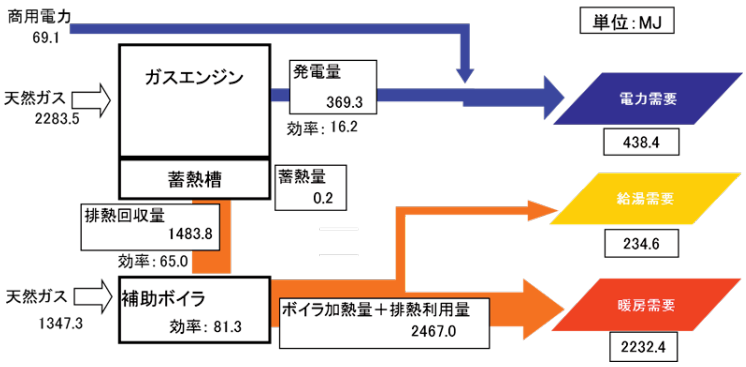


図 3.12 エネルギーフロー（世帯 18：連続運転）

電熱効率は 16.2%，排熱回収熱効率は 65.0%であった．

図 3.13，図 3.14，図 3.15 にそれぞれ世帯 5，世帯 20，世帯 21 の冬期代表週のエネルギーフローを示す．世帯 5 では，発電寄与率 83.3%，排熱寄与率 55.5%，発電熱効率 14.2%，排熱回収熱効率 68.3%であった．世帯 20 では，発電寄与率 89.6%，排熱寄与率 48.2%，発電熱効率 16.0%, 排熱回収熱効率 64.9%, 世帯 21 では発電寄与率 84.8%, 排熱寄与率 65.0%，発電熱効率 18.1%，排熱回収熱効率 61.1%であった．

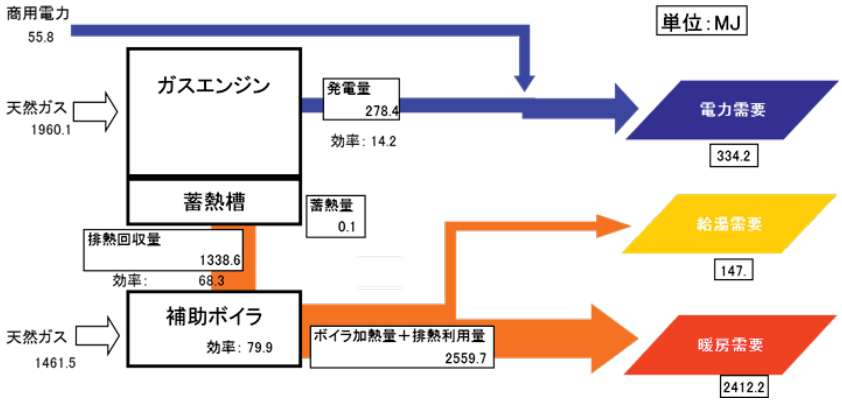


図 3.13 エネルギーフロー（世帯 5：連続運転）

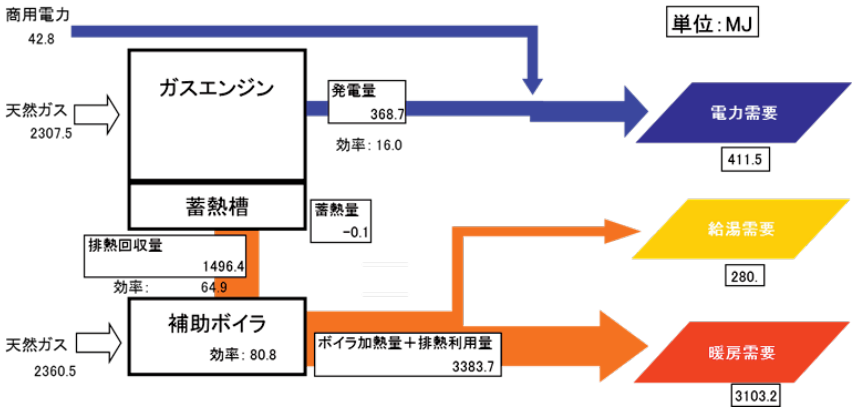


図 3.14 エネルギーフロー（世帯 20：連続運転）

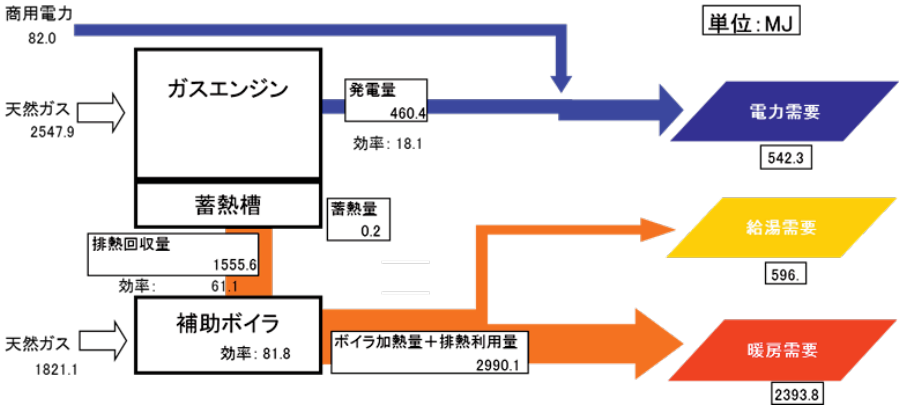


図 3.15 エネルギーフロー（世帯 21：連続運転）

間欠暖房運転の実験結果として，図 3.16，図 3.17，図 3.18 に世帯 18 における冬期代表週の電力収支，熱収支，エネルギーフローをそれぞれ示す．一週間の総発電量 225.2 MJ，受電電力量は 89.7 MJ となり，発電寄与率は 71.5%となった．また，排熱利用量は 895.5 MJ，排熱寄与率は 50.8%となった．暖房を全停止している 0 時から 5 時までの間は，GE は停止することになる．一週間を通じた発電熱効率は 15.6%，排熱回収熱効率は 62.1%であった．

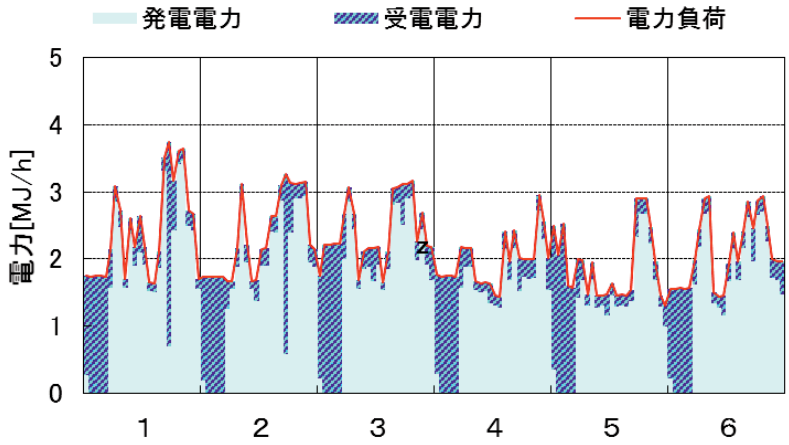


図 3.16 電力収支（世帯 18：間欠運転）

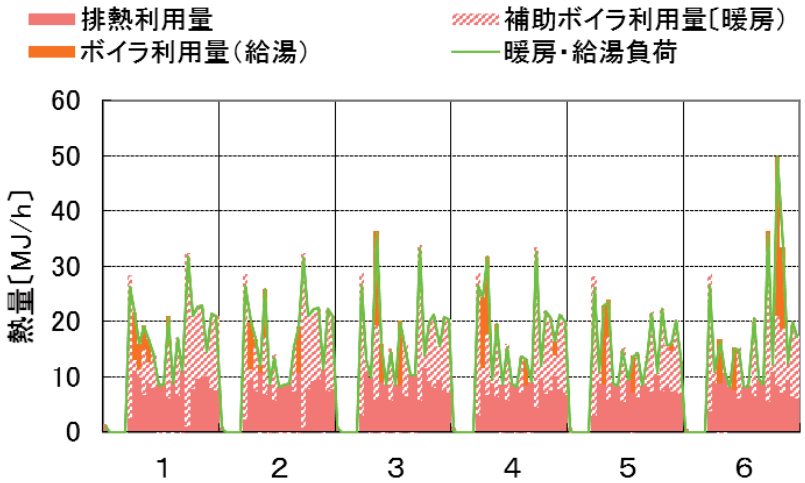


図 3.17 熱収支（世帯 18：間欠運転）

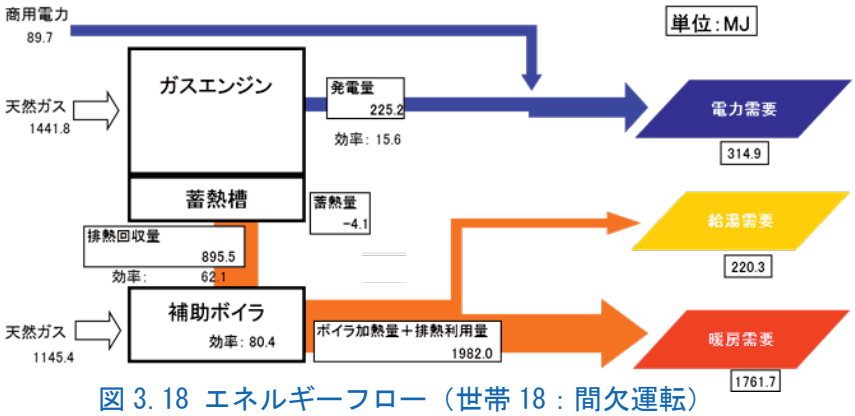


図 3.18 エネルギーフロー（世帯 18：間欠運転）

各実験の運転実績を表 3.2 にまとめた．連続暖房における発電寄与率は，いずれも 83～90%であり，間欠の場合でも約 72%に達している．これより，暖房使用時期の本システムの稼動状況は，良好であると言える．

図 3.19 に各実験（連続暖房）における一週間の従来方式（商用電源＋非潜熱回収型ボイラ）に対する総一次エネルギー削減量の内訳を示す. 総量に占める GE の寄与分は, 69～77%に達した．また，潜熱回収型ボイラ導入による効果は，暖房，給湯分について，それぞれ 16～26%，3～10%であった．

表 3.2 各世帯の運転実績

世帯番号	発電熱効率[%]	排熱回収熱効率[%]	発電寄与率[%]	熱寄与率[%]
5 (連続運転)	14.2	68.3	83.3	55.5
20 (連続運転)	16.0	64.9	89.6	48.2
21 (連続運転)	18.1	61.1	84.8	65.0
18 (連続運転)	16.2	65.0	84.2	66.5
18 (間欠運転)	15.6	62.1	71.5	50.8

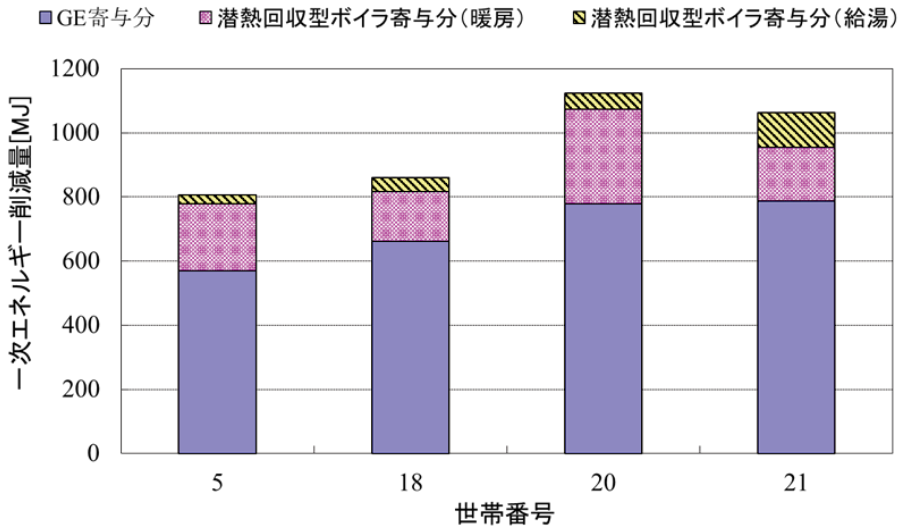


図 3.19 一次エネルギー削減量の内訳

3.6　エネルギー需要特性と導入効果の解析

3.6.1　解析概要

本システムを導入した場合の札幌地区の実負荷を用いた省エネルギー効果に関する解析を実施した．稼動条件は実システムと同様に冬期に電力負荷・暖房負荷が設定値以上ある場合とした．また，稼動は連続運転，冷機起動，暖機起動を考慮し，それぞれ実機同様の負荷追従特性・起動エネルギー等の性能値を与えた．

図 3.20 に 3.5 節の実験結果と本手法による解析結果を示す．誤差は平均 8%，最大でも 14%であり，比較的高い再現性が得られていると考えられる．

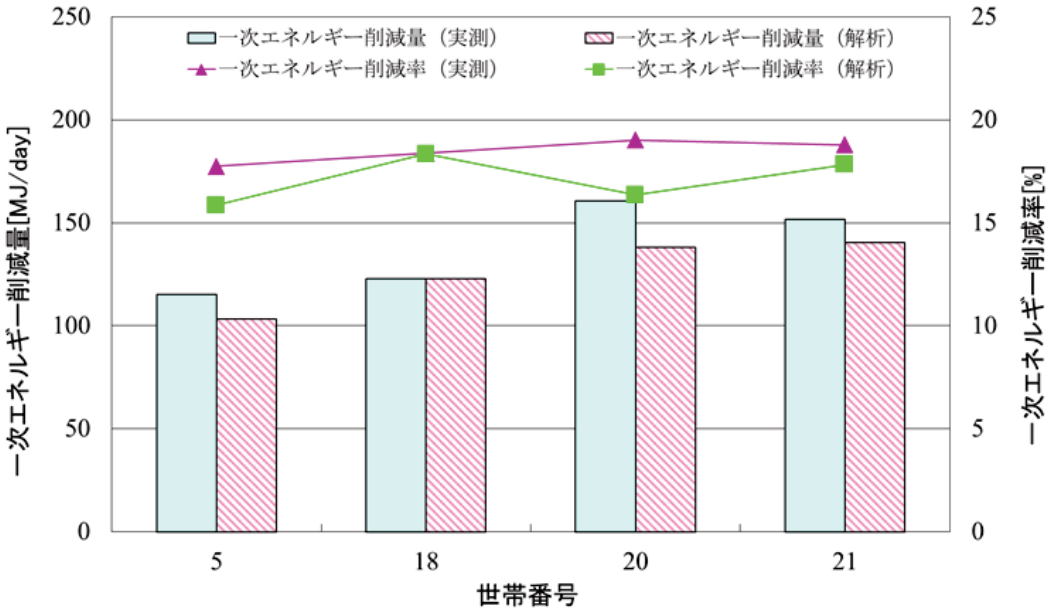


図 3.20 実測と解析結果の比較

3.6.2　解析結果と考察

代表世帯として世帯 18 を取り上げた（図 3.21）．年間の照明他電力需要，給湯需要，暖房需要はそれぞれ 16.1 GJ，14.8 GJ，40.0 GJ である．

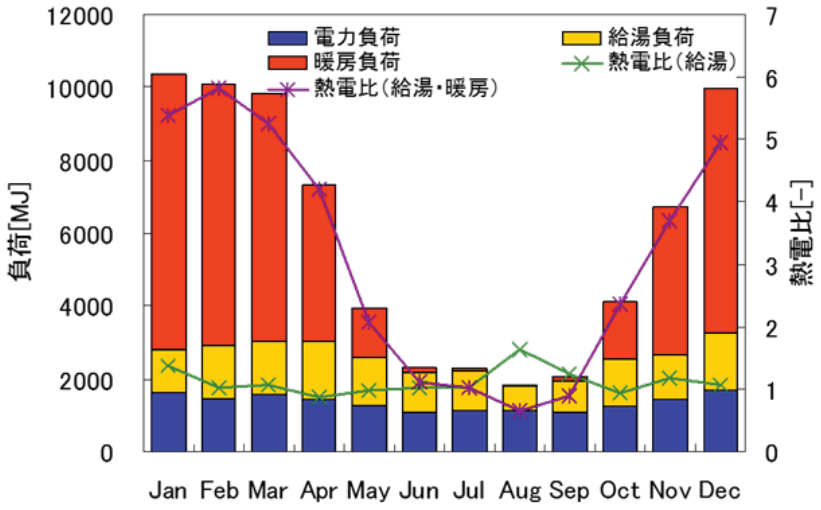


図 3.21 電力・給湯・暖房負荷特性（世帯 18）

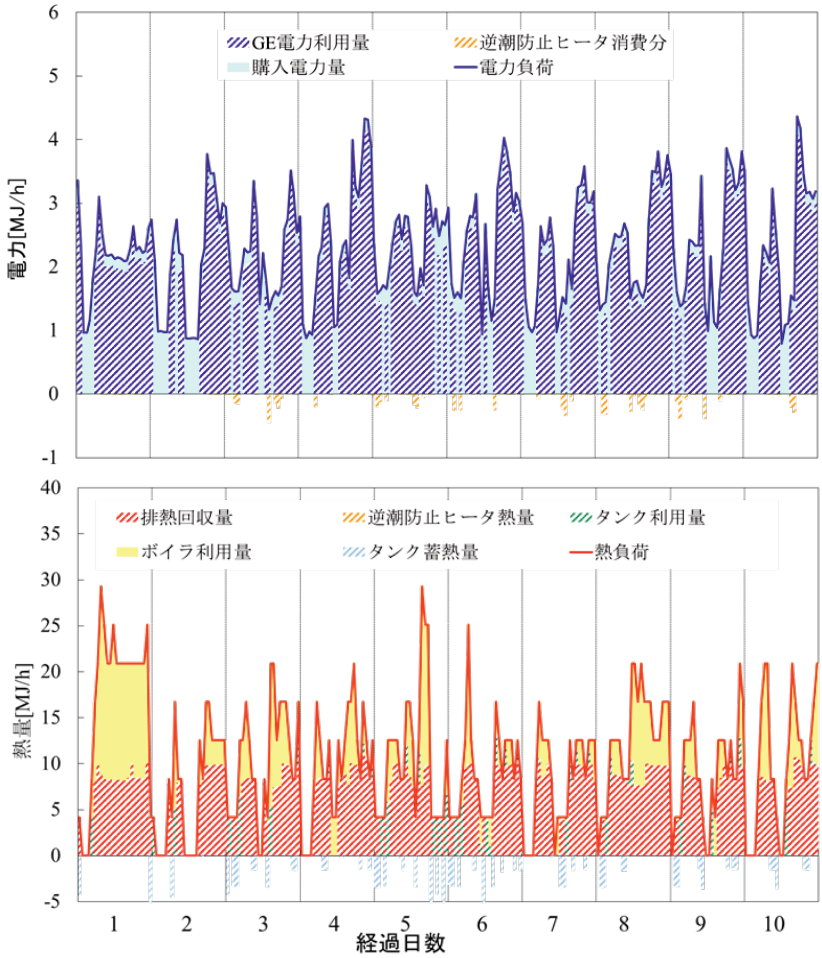


図 3.22 冬期代表週における電力・熱収支（世帯 18）

（a）代表世帯解析結果

図 3.22 に冬期代表期間の世帯 18 の電力・熱収支を示す．日平均稼動時間は 18.2 時間となり，発電電力利用量は 43.2 MJ/day，排熱利用量は 147.6 MJ/day となる．発電寄与率は 78.7%で非常に高い値を示した．また，排熱寄与率は 59.2%となった．世帯 18 における月別稼動状況として図 3.23 に日平均稼動時間・寄与率を，図 3.24 に一次エネルギー消費量を示す．日平均稼動時間は 12 月から 2 月に高くなり，18 時間程度であった．一方，暖房負荷の小さい 5 月，10 月は 5 時間程度となり，冬期平均では 13.1 時間となる．発電寄与率も日平均稼動時間と同様に 12 月から 2 月に高くなり，80%程度であった．暖房負荷の小さい 5 月，10 月は 23%程度となり，冬期平均では 60.5%となる．排熱寄与率は暖房負荷が大きな 2 月でも 64%と高い．特に暖房負荷の小さい 5 月は 87%であった．冬期平均では 77%と非常に高い．月別一次エネルギー消費量では冬期において本 GE-CHP を導入することで大きな削減が得

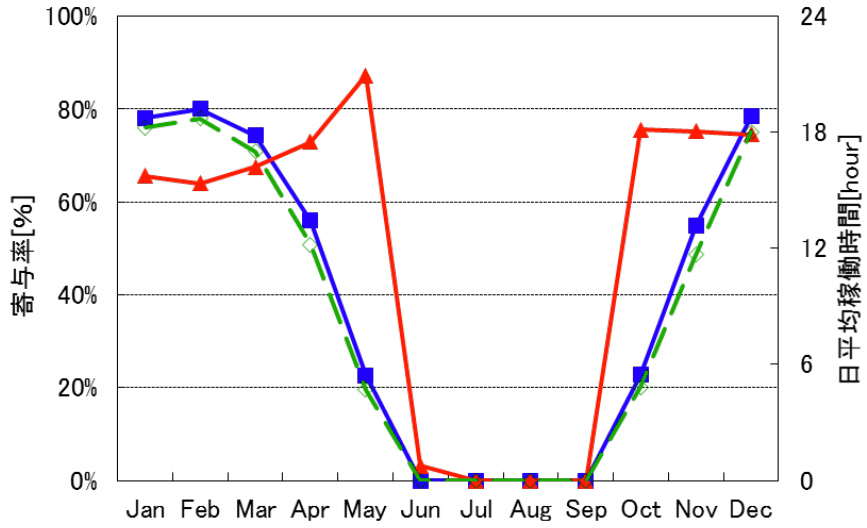


図 3.23 日平均稼働率・寄与率（世帯 18）

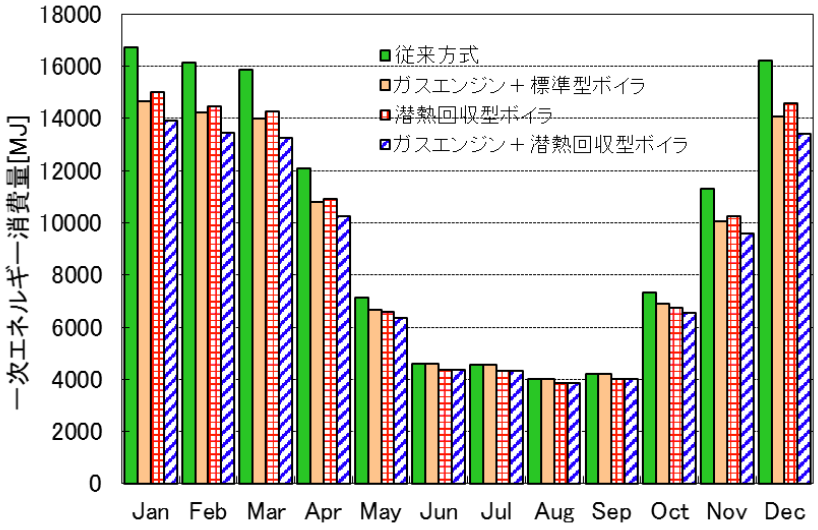


図 3.24 月別一次エネルギー消費量（世帯 18）

られた．特に 12 月から 2 月は商用電力と標準型ボイラで賄う従来方式と比較して 2.7 GJ/month の削減量であった．また，標準型ボイラと組み合わせた場合においても 12 月から 2 月は 2.0 GJ/month の削減量であった．図 3. 25 に世帯 18 における年間一次エネルギー消費量を示す．本 GE-CHP を導入することで暖房ボイラの一次エネルギー消費量が半分以下となった．また，商用電力による一次エネルギー消費量も 6 割程度となる．一次エネルギー削減量は 16.8 GJ/a であった．標準型ボイラと組み合わせた場合でも 11.5 GJ/a の削減が可能である．

本 GE を標準ボイラ，潜熱回収型ボイラそれぞれと組み合わせた場合の比較より，本システムにおける潜熱回収型ボイラの採用による光熱費削減のメリットは，2011 年 11 月現在における札幌市内の電力・都市ガス料金メニューで試算すると年間 1～1.5 万円（システム全体では，4～5 万円）と想定される．機器を 10 年間使用するとした場合，10～15 万円の効果であり，実質的な潜熱回収型と非潜熱回収型ボイラの価格差よりも大きく，価格面においても潜熱回収型ボイラの採用は有効であると言える．

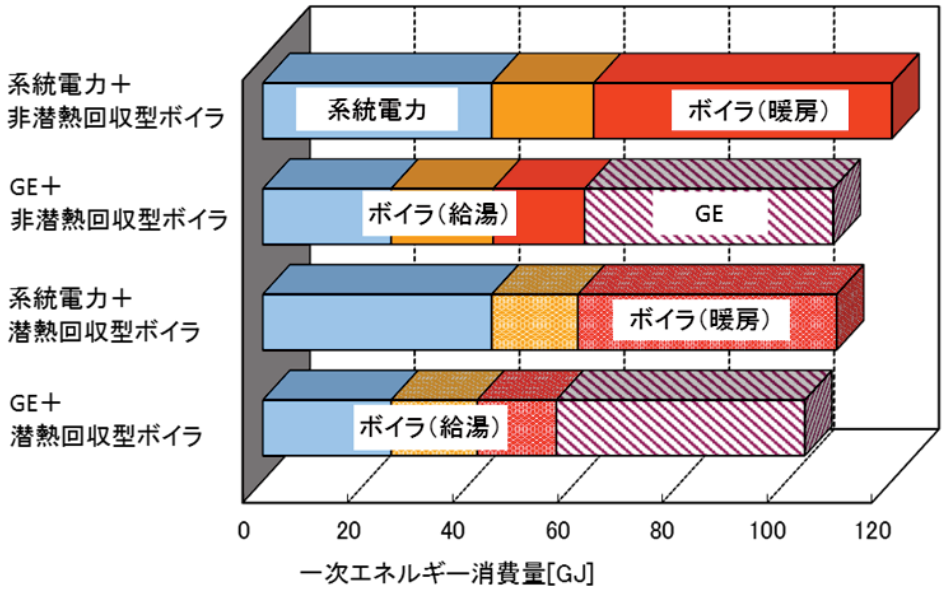


図 3. 25 年間一次エネルギー消費量（世帯 18）

（b）世帯別解析結果

図 3.26 に世帯別の一次エネルギー削減量を示す．本システムを導入することによって削減効果の小さい世帯でも 10.6 GJ/a，削減効果の大きい世帯では 31.7 GJ/a となり，いずれの世帯においても良好な削減効果が得られた．削減効果が 25 GJ/a を超える世帯は 8 世帯に達した．また，標準型ボイラと組み合わせた場合でも 4.6 GJ/a～21.2 GJ/a と大きな削減効果が得られた．

（c）各種 CHP システムとの比較

今回のシステムと表 3.3，図 3.27 に示す各種 CHP との比較を行った．図 3.28 に世帯別一次エネルギー削減量の定格型 GE との比較を示す．定格型 GE は電力・給湯・暖房システムとし，既報[4]の手法により解析した．定格型 GE では削減量の小さな世帯では 6.6 GJ/a，大きな世帯では 22.0 GJ/a であった．平均では 13.8 GJ/a となる．いずれの世帯においても定格型ＧＥと比較して大きな削減効果があることが分かる．削減効果の差は 3.7 GJ/a～10.6 GJ/a であった．平均では 5.3 GJ/a となる．本システムの年間一次エネルギー削減量は定格型 GE に対して 20～45%上昇している．定格型 GE に対する削減効果の 6～7 割が GE の寄与分で，残りは潜熱回収型ボイラによるものである．

図 3.29 に CHP 最適機器とエネルギー需要の関係を示す．全世帯中 15 世帯分について日毎の負荷条件に対する最適機器（一次エネルギー消費量が最も低くなる機器）をプロットしており，プロット数は一つの世帯について年間の 365 点である．解析手法は，固体高分子形燃料電池（PEFC），固体酸化物形燃料電池（SOFC）は既報[4]の手法によった．また，図 3.30 に最適機器が負荷追従型 GE となるエネルギー需要を示す.暖房負荷が大きい場合，他機種と比較して負荷追従型の GE が最適機器となる割合が増加する．それぞれの出現頻度は負荷追従型 GE が 46.2%，SOFC が 34.7%，PEFC が 17.1%となった．

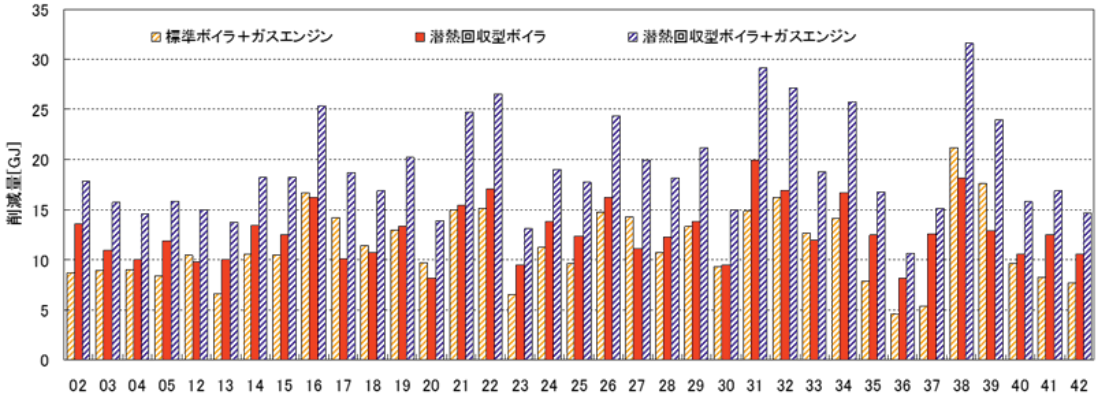


図 3.26 世帯別一次エネルギー削減量

表 3.3 数値解析における比較対象システム

		SOFC	PEFC	GE
定格発電出力	W	700	1000	1000
最低発電出力	W	100	300	-
定格発電熱効率	%	41	34	20
定格排熱回収熱効率	%	37	51	57
貯湯タンク容量	L	70	200	150

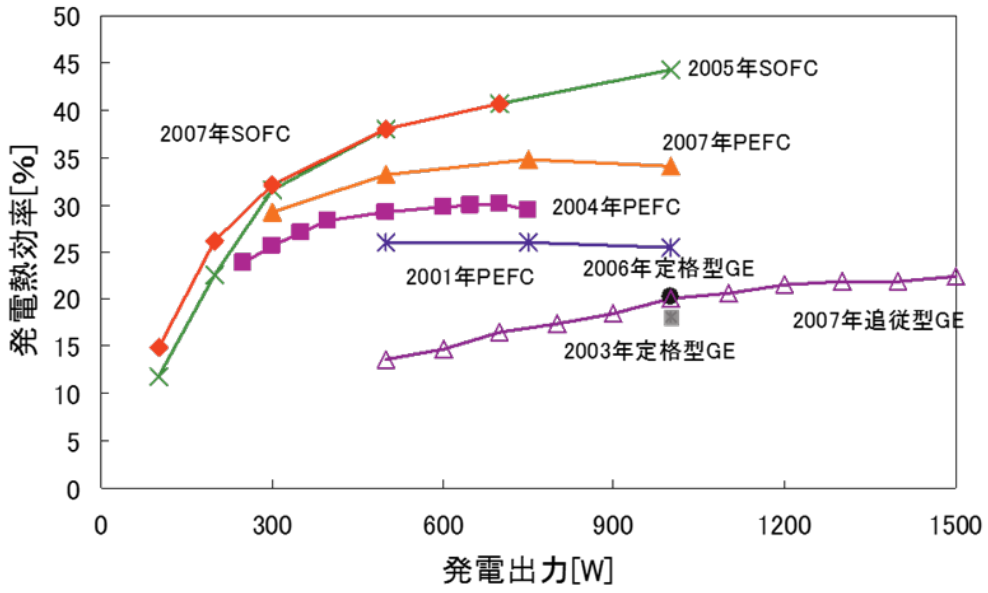


図 3.27 比較対象システムの部分負荷効率

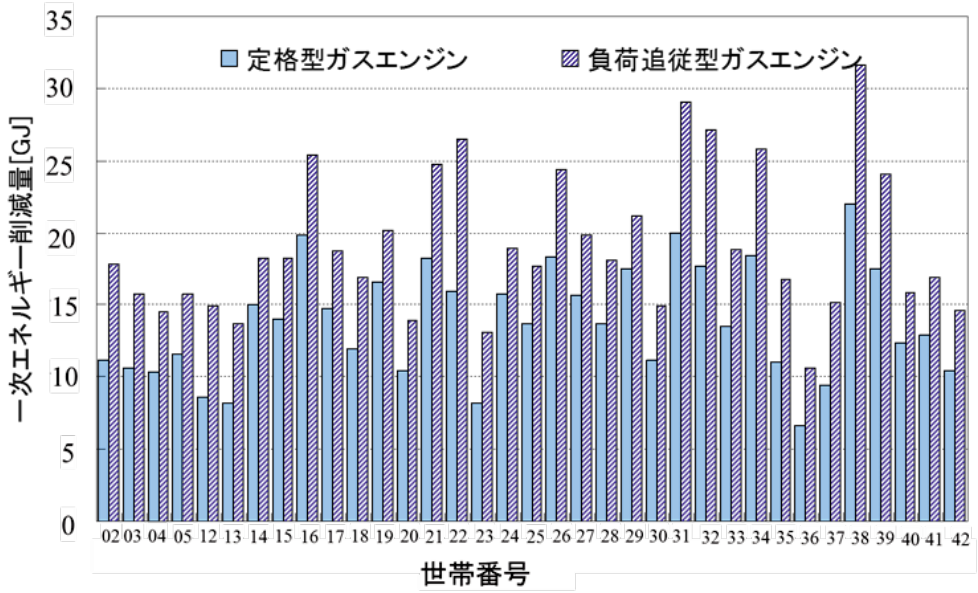


図 3.28 定格型 GE と負荷追従型 GE の一次エネルギー削減量

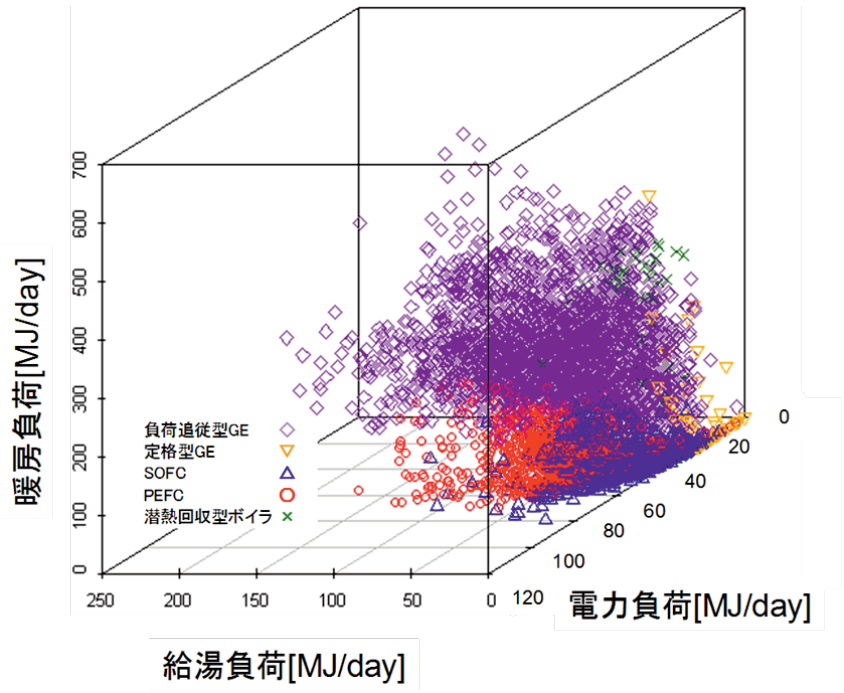


図 3.29 電力・給湯・暖房負荷と最適 CHP システムの関連

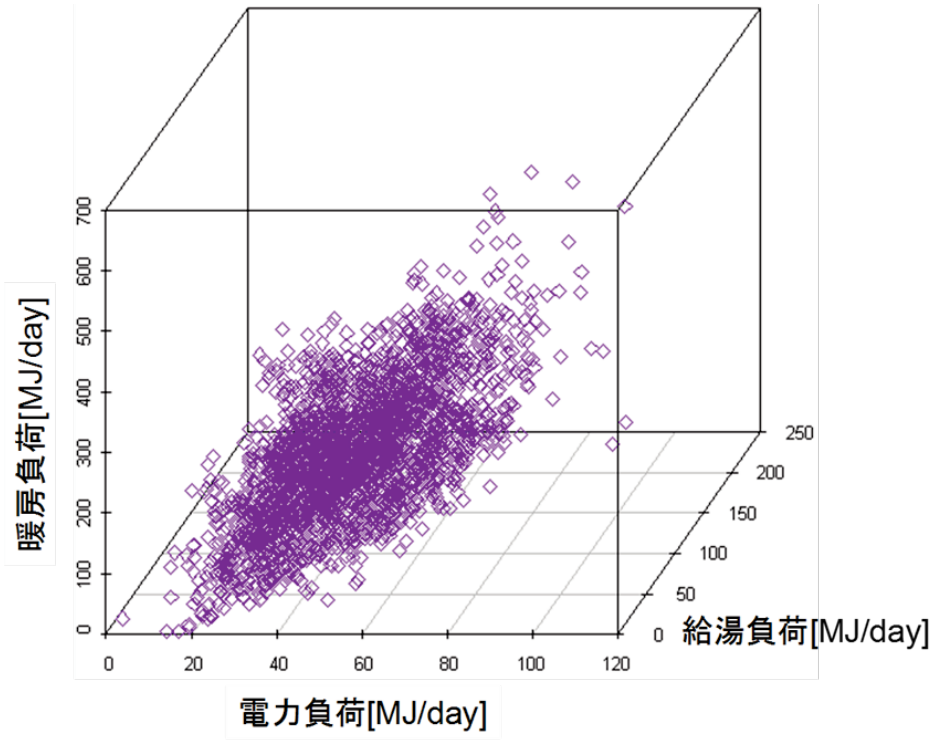


図 3.30 負荷追従型 GE が最適機器となるエネルギー需要

3.7　まとめ

1)　新規開発 GE-CHP システムの概要を示した．また，基本性能試験を行った結果，出力約 1.2 kW では発電熱効率は 21.6%（HHV），排熱回収熱効率は 53.9%（HHV）となった．

2)　寒冷地における本 GE の実証実験を行い，代表世帯における状況を示した．いずれの世帯においても電力寄与率は 80%を超えており，高い値を示した．また，排熱も全て有効利用されている結果となった．

3)　世帯別の年間一次エネルギー削減量の解析を行った結果，10.6 GJ/a～31.7 GJ/a となり，いずれの世帯においても大きな削減効果が得られた．

4)　定格型 GE との比較を行った結果，一次エネルギー削減効果は 3.7 GJ/a～10.6 GJ/a であった．平均では 5.3 GJ/a となる．

5)　CHP 最適機器とエネルギー需要の関係を示した．それぞれの出現頻度は負荷追従型 GE が 46.2%，SOFC が 34.7%，PEFC が 17.1%であった

参考文献

1) 清水康成，村川三郎，北山広樹，濱田靖弘，鍋島美奈子，高田　宏：第２５回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，pp. 223-227，東京（2009）．

2) 濱田靖弘，天澤敬太，村川三郎，北山広樹，鍋島美奈子，高田　宏：第２７回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，pp.95-99，東京（2011）．

3) 濱田靖弘，中村真人，落藤　澄，村越千春，鶴崎敬大，横尾美雪，成田涼子，鴫原　亮，長倉香織，横山真太郎：空気調和・衛生工学会論文集，82，29（2001）．

4) 濱田靖弘，田篭秀俊，長野克則，後藤隆一郎，中村　充：太陽エネルギー，185，51（2008）．

第４章

寒冷地の住宅における高効率給湯・暖房システムの稼動特性と性能評価

4.1　概説

本章では，寒冷地向け負荷追従型ガスエンジン熱電併給（GE-CHP）システムを取り上げ，実運用下における本システムの省エネルギー性・経済性を明らかにする．まず，4.2 節で潜熱回収型給湯・暖房システムのモードおよびフィールド実測試験結果について述べる．次いで，4.3 節で本 GE-CHP システムのフィールド実測の概要を示し，4.4 節で冬期代表週の運転状況を，4.5 節で通年の運転結果を示す．最後に，4.6 節でまとめを述べる．

4.2　潜熱回収型給湯・暖房システムのモードおよびフィールド実測試験

潜熱回収型給湯・暖房機は，従来回収しきれなかった排気ガス中の水蒸気による潜熱を

表 4.1 潜熱回収型給湯器・暖房機の概要

項目			能力最大	能力最小
給湯	ガス消費量		52.3 kW	5.58 kW
	出湯量	水温 +25℃上昇	24 L/min	
		水温 +40℃上昇	15 L/min	
	能力制御範囲･方式		24号～2.5号･FF+FB+水比例制御+Q機能	
	温度調節範囲		37～48℃(1℃刻み) 60℃[13段階]	
ふろ	追焚能力		8.72 kW	
	最低作動流量		3.5 L/min	
	温度調節範囲		37～48℃(1℃刻み)	
	ポンプ機外揚程		流量 5 L/minの時，53.9 kPa =5.5 mH $_2$O	
暖房	暖房能力(出力)		2.5 kW ～14.0 kW	
	暖房水設定温度		高温側：80℃(エアコンアメニティー制御時は60℃)	
	ポンプ機外揚程		流量 8 L/minの時，39.2 kPa =4.0 mH $_2$O	
最大ガス消費量			69.5 kW	

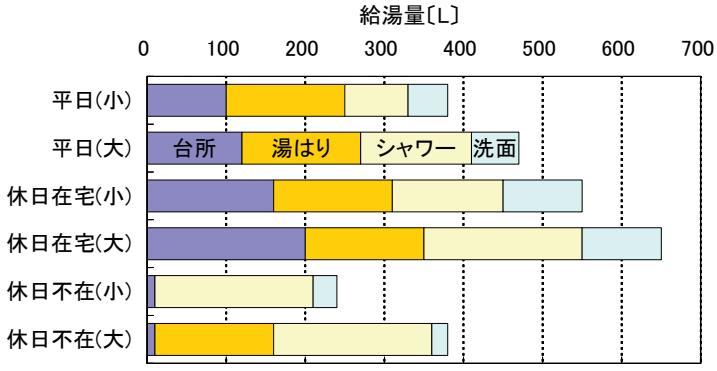


図 4.1 修正 M1 モード概要

二次熱交換器により回収し，加熱に用いる高効率な機器である．本研究で取り上げた機器の概要を表4. 1に示す．使用した潜熱回収型給湯・暖房機は給湯時最大52.3 kW，5.58 kWの最小能力を有する．追焚に関しては8.72 kW，暖房時には2.5～14.0 kWの出力である．測定項目は外界気象条件，給湯・給水温度，流量で測定間隔は2秒とした．図4. 1に給湯需要パターンの変動を重視した複数日モードである財団法人建築環境・省エネルギー機構の修正M1モード[7]における給湯負荷を示す．修正M1モードは，「平日(小)」，「平日(大)」，「休日在宅(小)」，「休日在宅(大)」，「休日不在(小)」，「休日不在(大)」の6パターンからなる複数日モードであり，平均・変動が実測結果より設定されたものである．表4. 2に給湯負荷の継続時間，停止間隔を重視した単日モードである社団法人日本ガス石油機器工業会(Japan Industrial Association of Gas and Kerosene Appliances：JGKA)の標準モード[8]における給湯負荷を示す．継続時間・停止間隔が細かく設定されている．

表 4. 2 JGKA 標準モードにおける給湯負荷内訳

開始時刻	時間[s]	流量[L/min]	使用量[L]	用途
6:45	120	5	10	洗面
	30			
	10	5	0.83	洗面
	30			
	10	5	0.83	洗面
	60			
	10	5	0.83	洗面
	30			
	10	5	0.83	洗面
8:00	60	5	5	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	600			
	300	5	25	台所
	120			
	30	5	2.5	台所
12:45	60	5	5	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	300			
	120	5	10	台所
	60			
	30	5	2.5	台所
18:00	60	5	5	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	120			
	60	5	5	台所
	300			
	60	5	5	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	300			
	30	5	2.5	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	30			
	10	5	0.83	台所

開始時刻	時間[s]	流量[L/min]	使用量[L]	用途
19:30	720	15	180	湯張
19:45	120	5	10	台所
	30			
	30	5	2.5	台所
	300			
	120	10	20	シャワー
	120			
	30	5	2.5	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	300			
	30	5	2.5	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	600			
	300	10	50	シャワー
	60			
	10	5	0.83	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
	30			
	10	5	0.83	台所
21:45	120	5	10	洗面
	30			
	10	5	0.83	洗面
	30			
	10	5	0.83	洗面
	30			
	10	5	0.83	洗面
	600			
	120	10	20	シャワー
	30			
	10	5	0.83	洗面
	30			
	10	5	0.83	洗面
	900			
	300	10	50	シャワー
	120			
	30	5	2.5	洗面
	60			
	10	5	0.83	洗面
	120			
	60	5	5	洗面
	60			

図4. 2に修正M1モードにおける運転実績を示す．51 MJ/dayのガス供給を行い，47 MJ/dayの給湯を賄っており，熱効率は91.8%となった．従来方式(非潜熱回収型ボイラ，熱効率75.0 %)に対する一次エネルギー消費量の比として定義する一次換算エネルギー消費係数(Coefficient of Primary Energy Consumption：CPEC)[9]に関しても0.82と省エネルギー性が高いことが示された．図4. 3にJGKA標準モードにおける運転実績を示す．継続時間・停止間隔が細かいため，熱効率90.0 %，CPECは0.83と修正M1モードと比較して効率が低下したが，その差はそれほど大きくない．また，フィールド実測は，札幌市内の戸建て住宅において実施した．対象住宅は総2階建てであり，延床面積は128.35 m²となっている．図4. 4と表4. 3にそれぞれ冬期間の運転実績，用途別供給熱量を示す．期間における給湯・暖房総合熱効率は80～95 %の範囲であり，期間平均では89.6%であった．図4. 2の実績に従い給湯熱効率を91.8 %と想定した場合，暖房熱効率は88.5 %となる．

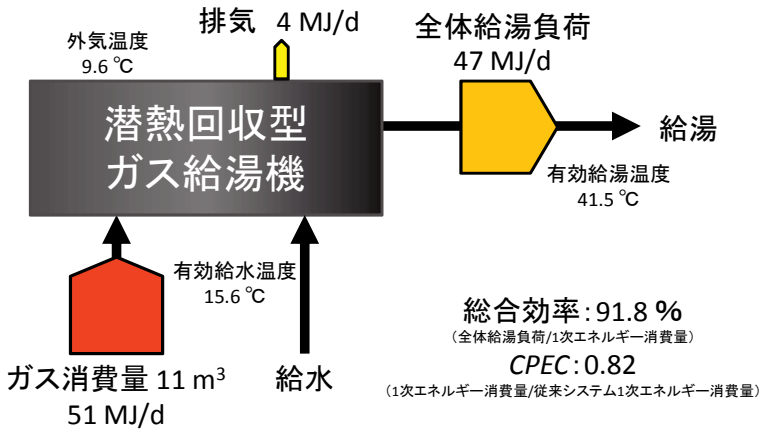


図 4. 2 修正 M1 モードにおける運転実績

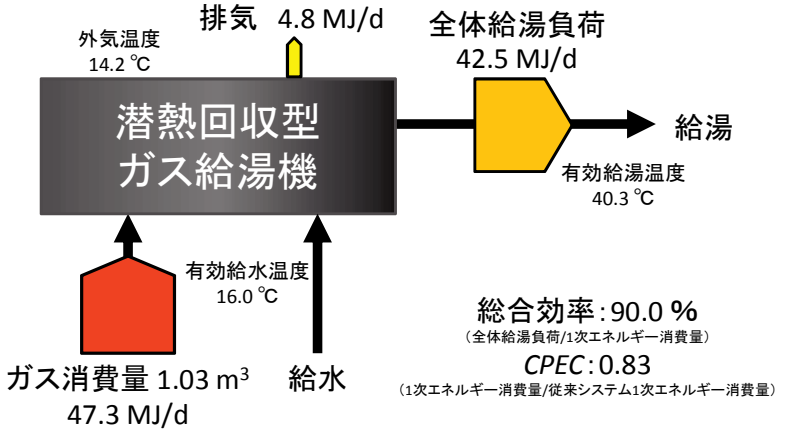


図 4. 3 JGKA 標準モードにおける運転実績

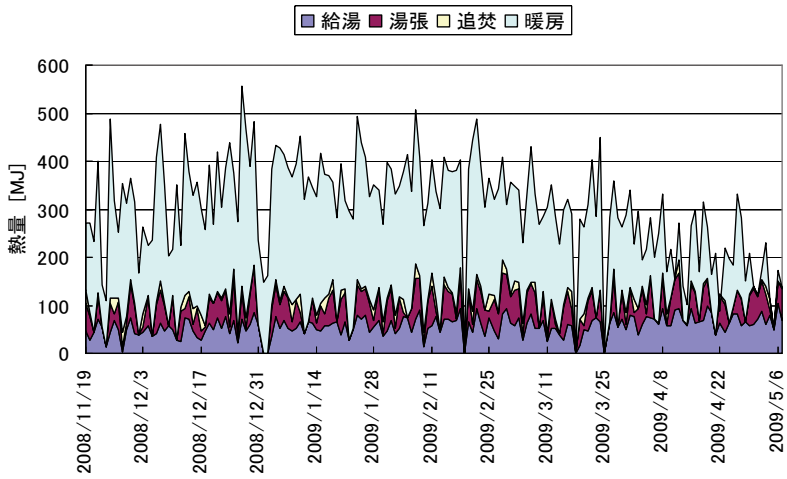


図 4.4 冬期運転実績

表 4.3 期間用途別熱負荷

給湯負荷	9.7 GJ
湯張負荷	6.6 GJ
追焚負荷	1.6 GJ
暖房負荷	33.9 GJ
総熱負荷	51.8 GJ
原燃料消費量	57.8 GJ

4.3　負荷追従型 GE システムのフィールド実測試験概要

図 4.5 にフィールド実測試験における計測概要を示す．全ての世帯で，電力量計により GE の発電量および受電電力量を計測した．また世帯 A～C（詳細計測）は，ガス流量計および温度計にて GE のガス消費量・排熱出力，潜熱回収型ボイラのガス消費量・暖房出力も計測した．世帯 D～I（簡易計測）は，GE の発電量および GE の部分負荷効率より GE のガス消費量および排熱出力を推定した．給湯負荷については，フィールド実測世帯における月々のガス消費量および GE・潜熱回収型ボイラのガス消費量より推定した．図 4.6 に既往のエネルギー調査[10]等で得られた札幌地区の実負荷等(世帯 02～61)と今回のフィールド実測世帯(世帯 A～I)のエネルギー需要特性を示す．年間の電力負荷および暖房負荷は世帯 A で 15.3 GJ，60.9 GJ，世帯 B で 12.6 GJ，55.8 GJ，世帯 C で 19.4 GJ，35.8 GJ となっている．世帯 D～I では電力負荷が 11.4 GJ～18.5 GJ,暖房負荷が 49.1 GJ～75.3 GJ となっている．なお，結果の整理にあたっては，4.2 の実験とフィールド実測結果に基づき，潜熱回収型ボイラの暖房効率，給湯効率をそれぞれ 88.5%，91.8%とした．

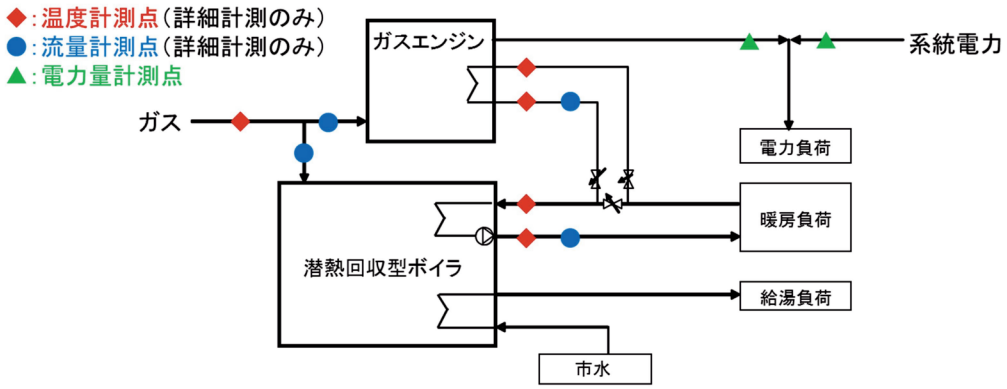


図 4.5 フィールド実測試験計測概要

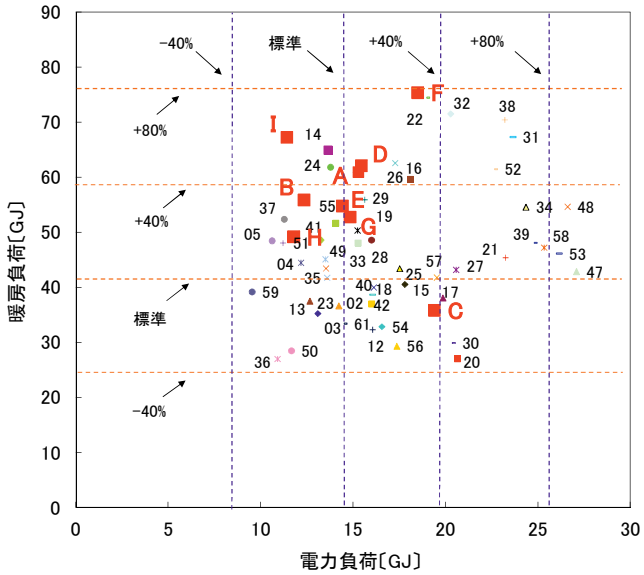


図 4.6 寒冷地世帯のエネルギー需要特性

4.4　フィールド実測試験冬期代表週運転状況

4.4.1　世帯 A

世帯 A における稼動状況として，図 4.7，図 4.8 に代表週(1 月 16 日～22 日)の電力収支及び熱収支を，図 4.9 に一次エネルギー削減量(比較対象：電力換算係数 9.76 MJ/kWh，ボイラ熱効率 75.0%)を示す．一週間の総発電電力量は 92.3 kWh，受電電力量は 9.0 kWh となり，発電寄与率(発電電力量÷電力負荷)91.1%と高い値になった．また，排熱利用量は 1313.0 MJ，潜熱回収型ボイラ熱量(暖房)は 1702.7 MJ，排熱寄与率(排熱利用量÷暖房負荷)は 43.5%となった．また，一週間の一次エネルギー削減量は合計 1185.3 MJ となり，そのうち GE-CHP

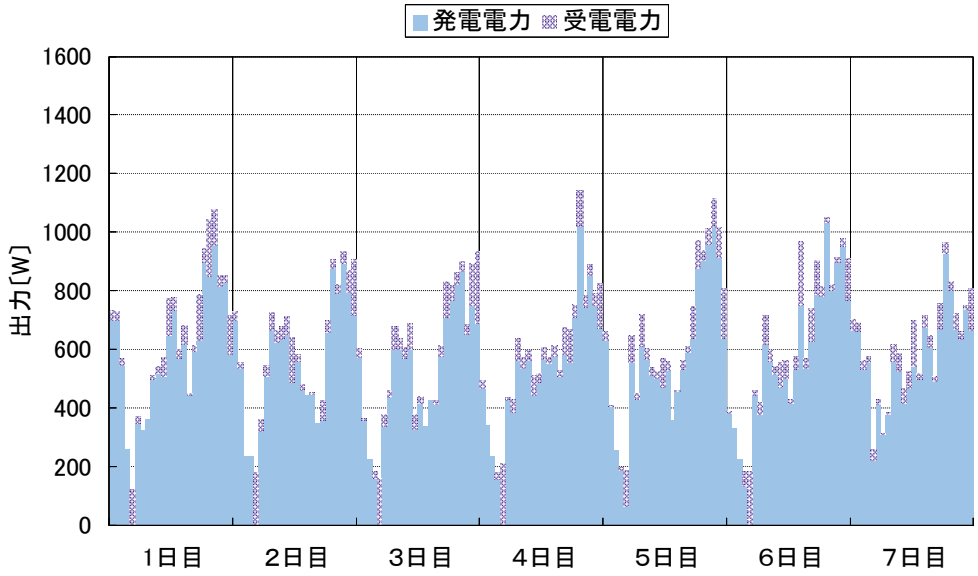


図 4.7 電力収支（世帯 A）

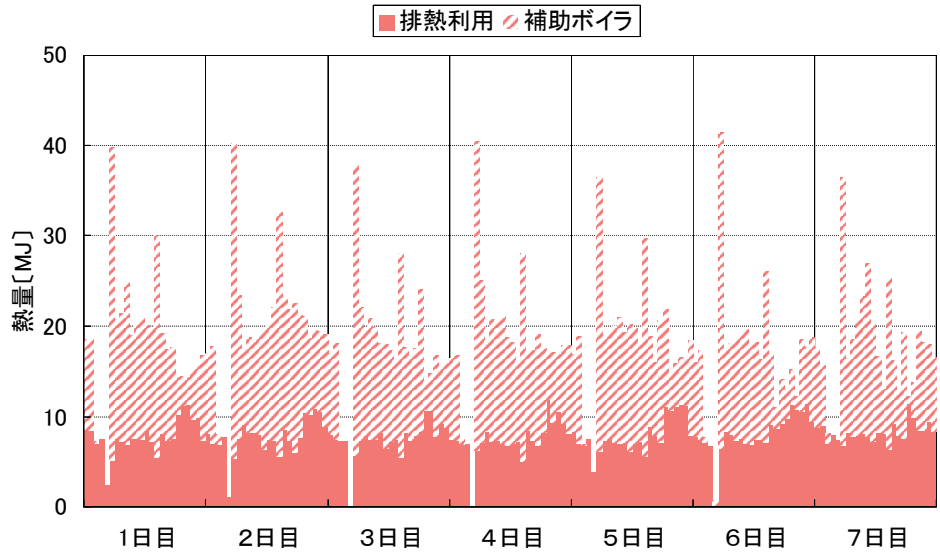


図 4.8 熱収支（世帯 A）

により 698.3 MJ，潜熱回収型ボイラにおける暖房及び給湯分により 346.6 MJ，140.7 MJ 削減された．本世帯は電力負荷及び暖房負荷が共に大きいため，一次エネルギー削減量が大きくなっている．また，暖房時間が長いことから発電時間も長くなっており，GE-CHP による一次エネルギー削減効果が高くなっている．

4.4.2　世帯 B

世帯 B における稼動状況として，図 4.10，図 4.11 に代表週の電力収支および熱収支を，

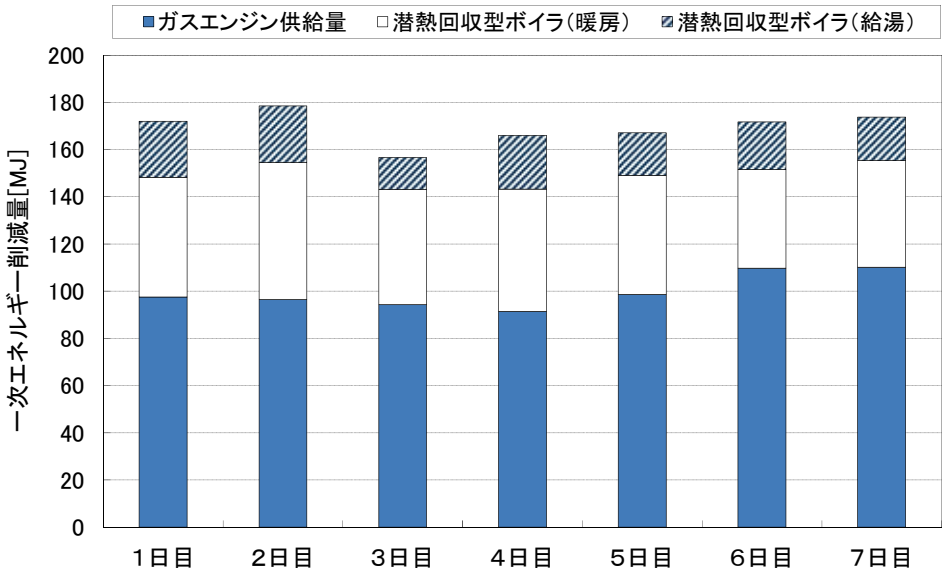


図 4.9 一次エネルギー削減量（世帯 A）

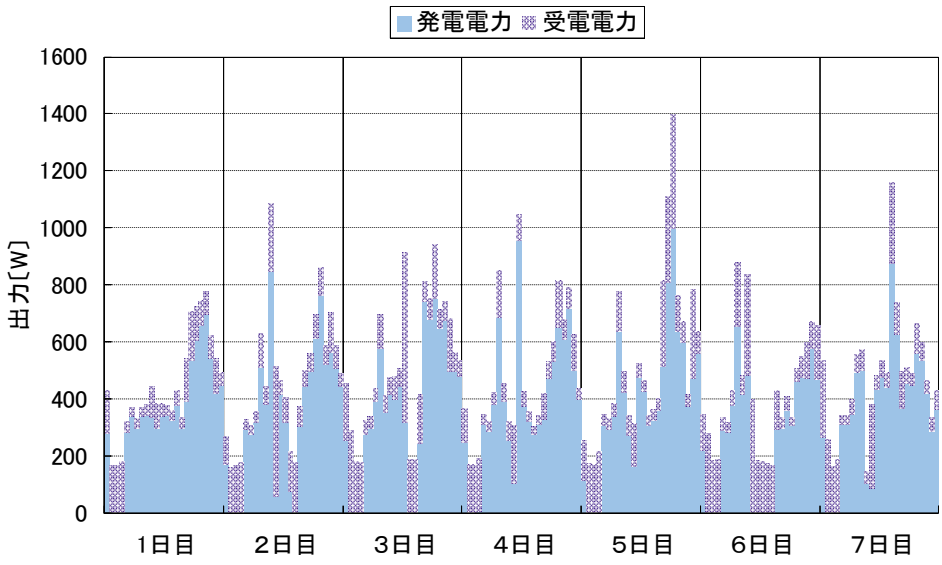


図 4.10 電力収支（世帯 B）

図 4.12 に一次エネルギー削減量を示す．一週間の総発電電力量は 59.4 kWh，受電電力量は 19.5 kWh となり，発電寄与率は 75.3%となった．排熱利用量は 888.1 MJ，潜熱回収型ボイラ熱量(暖房)は 1584.1 MJ，排熱寄与率は 35.9%となった．また，一週間の一次エネルギー削減量は合計 764.1 MJ となり，そのうち GE-CHP により 297.2 MJ，潜熱回収型ボイラにおける暖房及び給湯分により 322.2 MJ，144.7 MJ 削減された．本世帯は暖房が間欠運転で使用時間が短いため，結果として発電時間が短くなった．そのため，GE-CHP よりも潜熱回収型ボイラによる一次エネルギー削減効果が高くなっている．

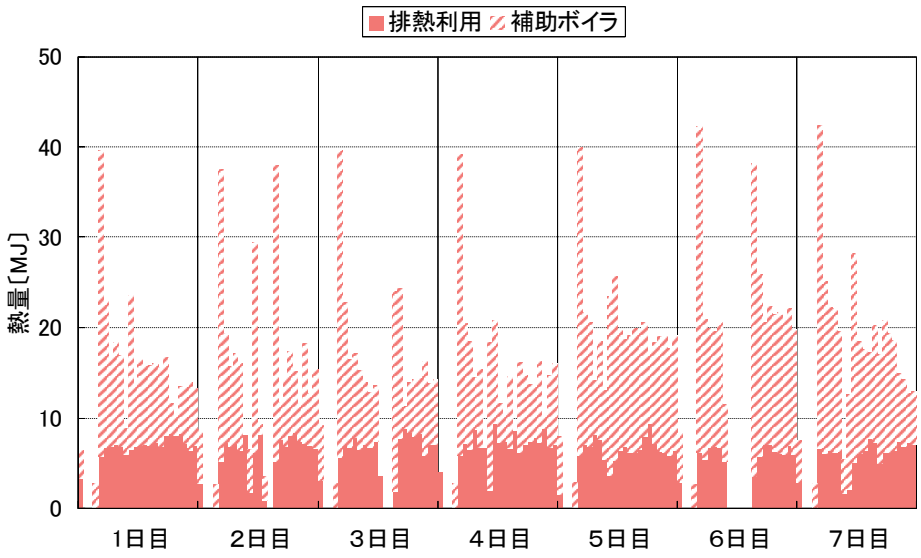


図 4.11 熱収支（世帯 B）

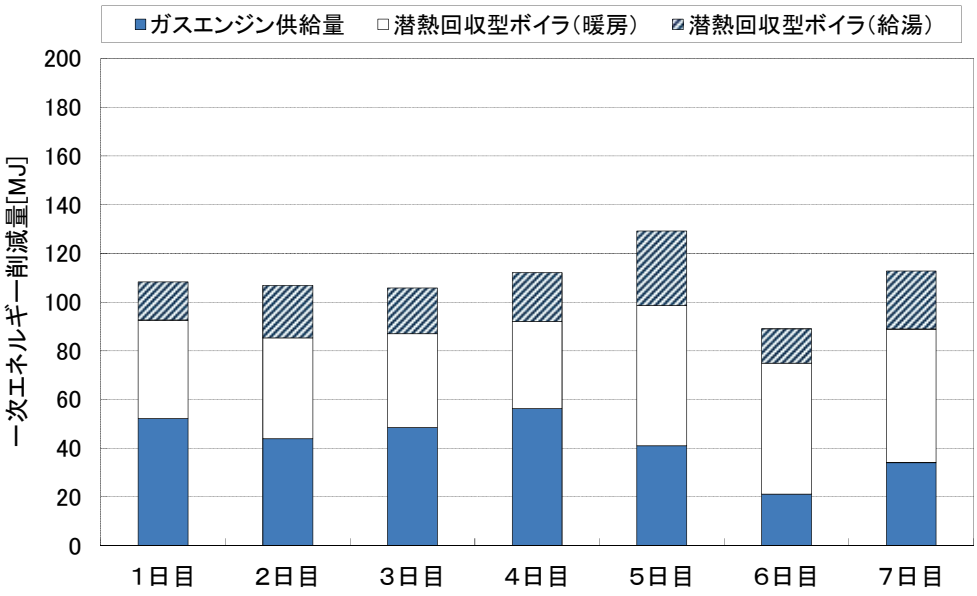


図 4.12 一次エネルギー削減量（世帯 B）

4.4.3　世帯 C

世帯 C における稼動状況として，図 4.13，図 4.14 に代表週の電力収支および熱収支を，図 4.15 に一次エネルギー削減量を示す．一週間の総発電電力量は 117.9 kWh，受電電力量は 22.7 kWh となり，発電寄与率は 83.8%となった．排熱利用量は 1401.4 MJ，潜熱回収型ボイラ熱量(暖房)は 54.4 MJ，排熱寄与率は 96.3%となった．また，一週間の一次エネルギー削減量は合計 840.4 MJ となり，そのうち GE-CHP により 729.2 MJ，潜熱回収型ボイラにおける暖房及び給湯分により 11.1 MJ，100.0 MJ 削減された．本世帯は電力負荷が高いため，

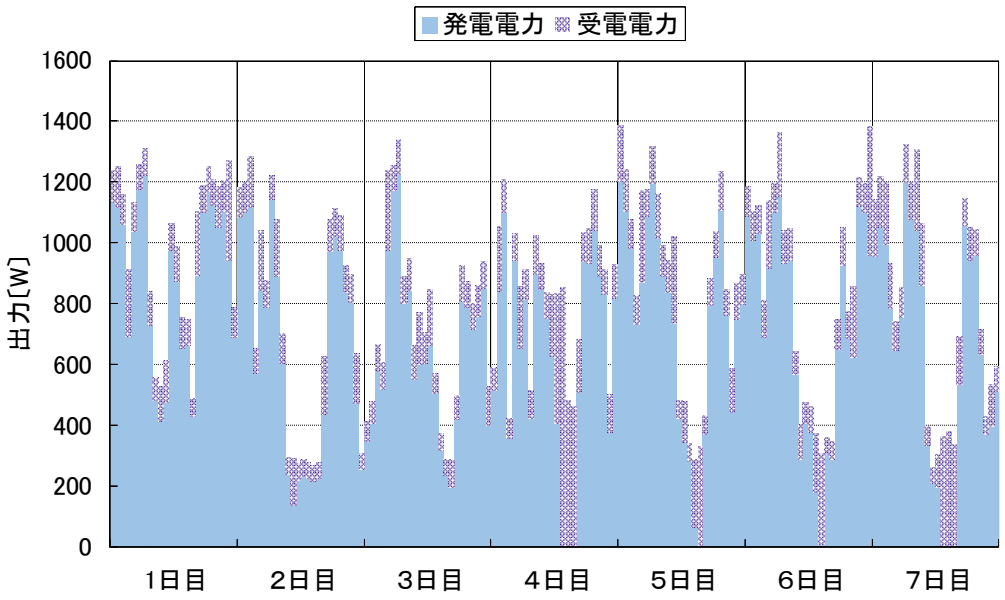


図 4.13 電力収支（世帯 C）

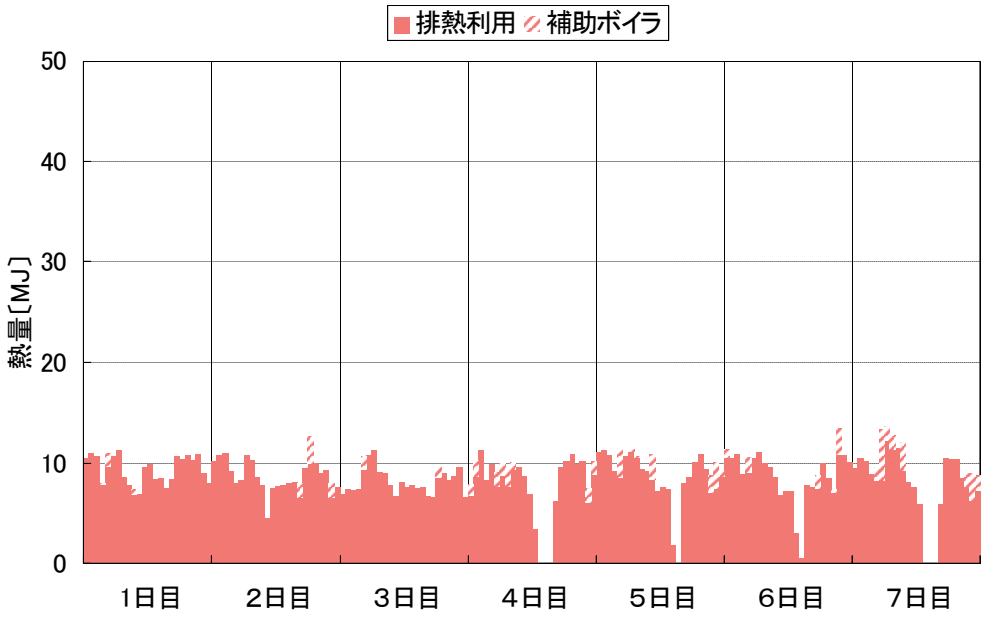


図 4.14 熱収支（世帯 C）

GE-CHP による発電・熱出力ともに高くなっている．また，基本的に 24 時間連続暖房であるため，GE の運転時間も長く，その削減効果も非常に高いものとなった．一方で，潜熱回収型ボイラの稼動率は低いため，その削減効果は小さい．

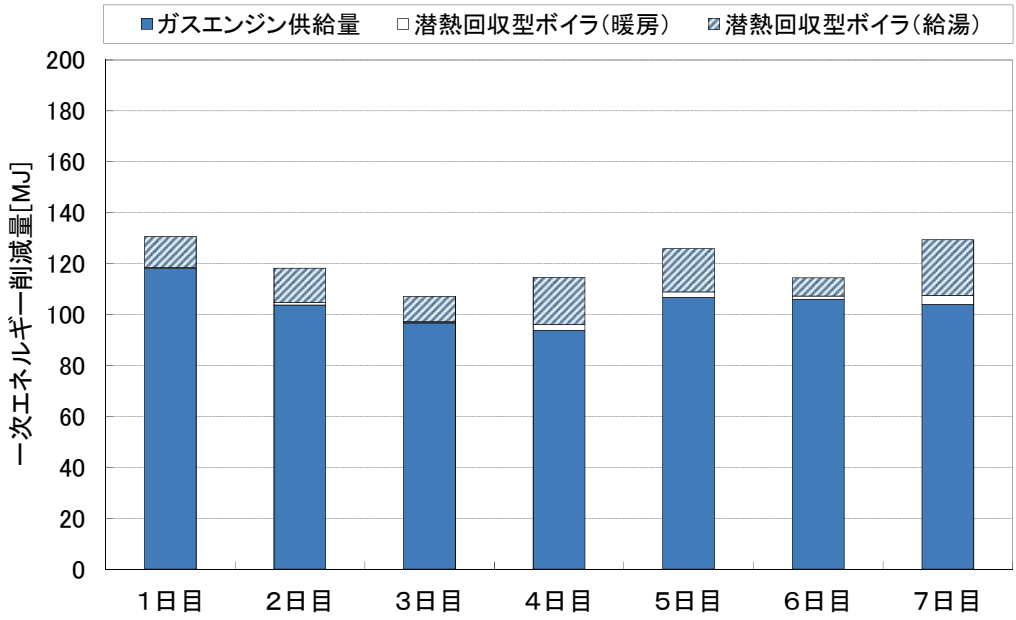


図 4.15 一次エネルギー削減量（世帯 C）

4.5　フィールド実測試験通年運転状況

図 4.16～図 4.18 に世帯 A～I における月別日平均電力負荷，暖房負荷および給湯負荷を示す．年間を通して電力負荷が大きい世帯 C では 38.5～72.3 MJ/day，小さい世帯 I では 23.4～38.4 MJ/day となった．暖房負荷，給湯負荷に関しても電力負荷と同様に，世帯間で負荷の差異が大きくみられた．

図 4.19 に各世帯の月別発電寄与率を，図 4.20 に暖房期間における各世帯の月別排熱

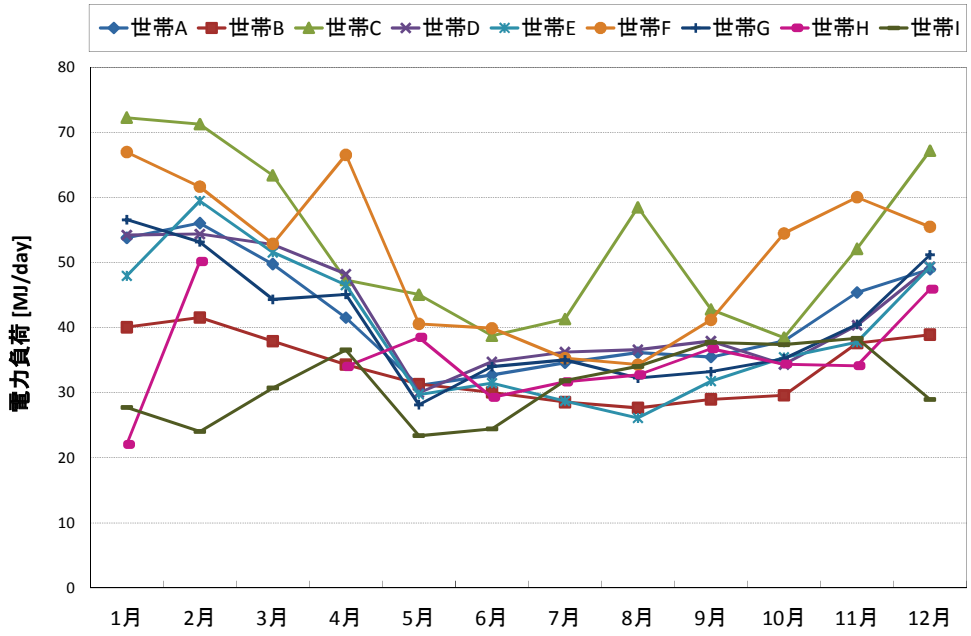


図 4.16 各世帯の月別電力負荷

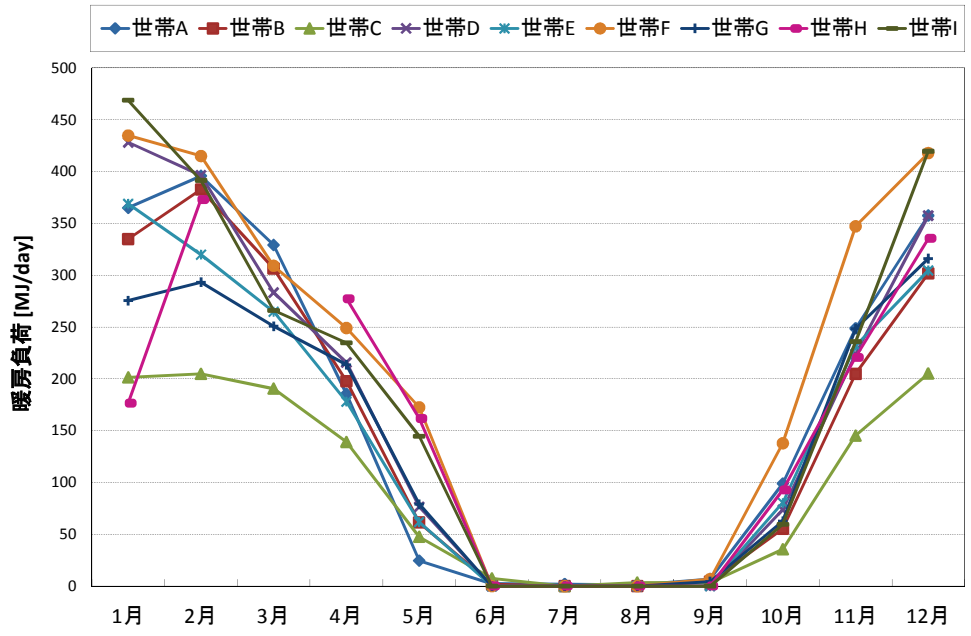


図 4.17 各世帯の月別暖房負荷

寄与率を示す. 世帯 A～I の冬期間(1～2 月,11～12 月)の平均発電寄与率および平均排熱寄与率は 49.4～88.2%，27.6～93.2%であった．冬期は，大半のサイトで高い発電寄与率を示す一方で，排熱寄与率はさほど高くなかった．これは，札幌の冬期における暖房負荷が電力負荷に比べて高いためであり，電力の大半を GE-CHP で賄っても，排熱の利用先が十分にあることを示す．CHP システムは，電気と熱ともに有効利用することが導入効果の向上につながるため，熱を十分に有効利用する本システムは，寒冷地に適していると言える．

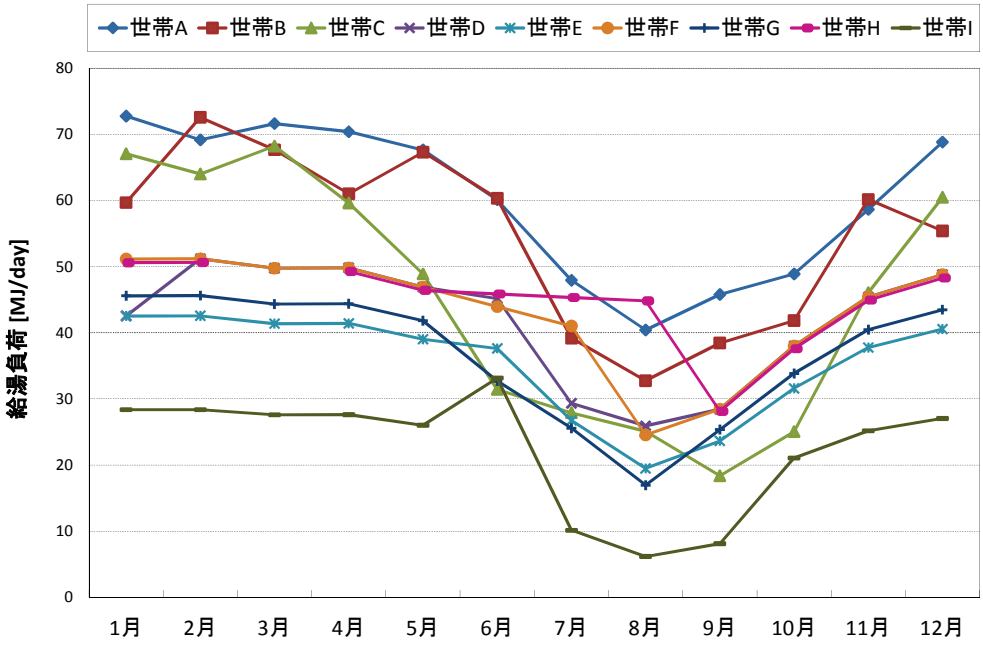


図 4.18 各世帯の月別給湯負荷

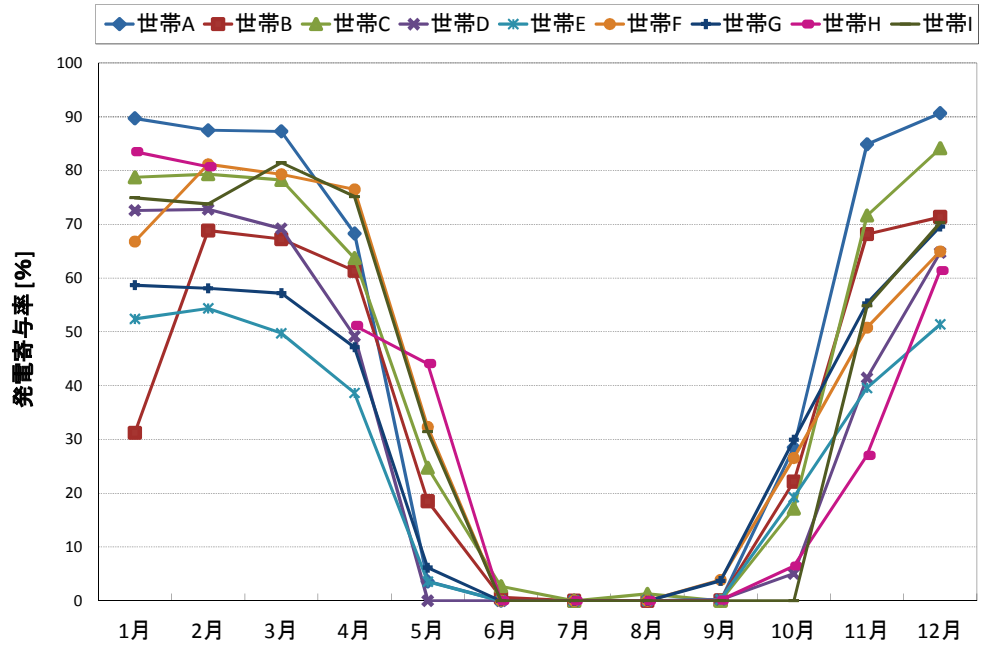


図 4.19 各世帯の月別発電寄与率

図 4.21 に世帯 A～C の月別一次エネルギー削減量を示す．冬期間(1～2 月，11～12 月)，世帯 A での一次エネルギー削減量が期間月平均で 3715 MJ となった．この内，GE-CHP による削減量は 2162 MJ, 潜熱回収型ボイラの暖房及び給湯による削減量は 1060 MJ, 493.2 MJ

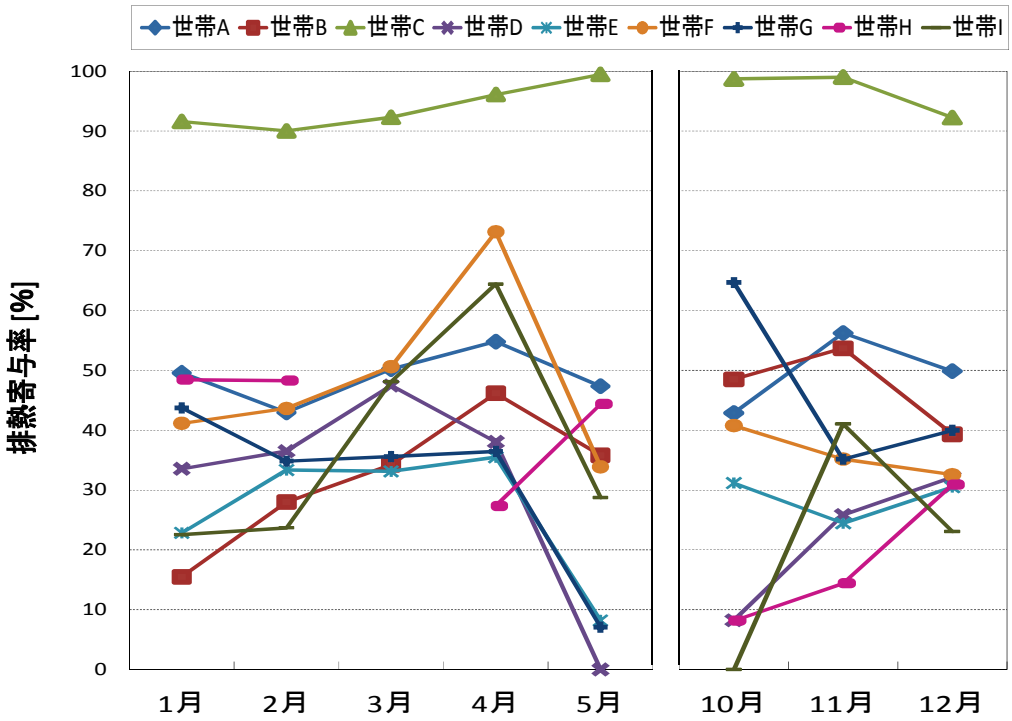


図 4.20 暖房期間における各世帯の月別排熱寄与率

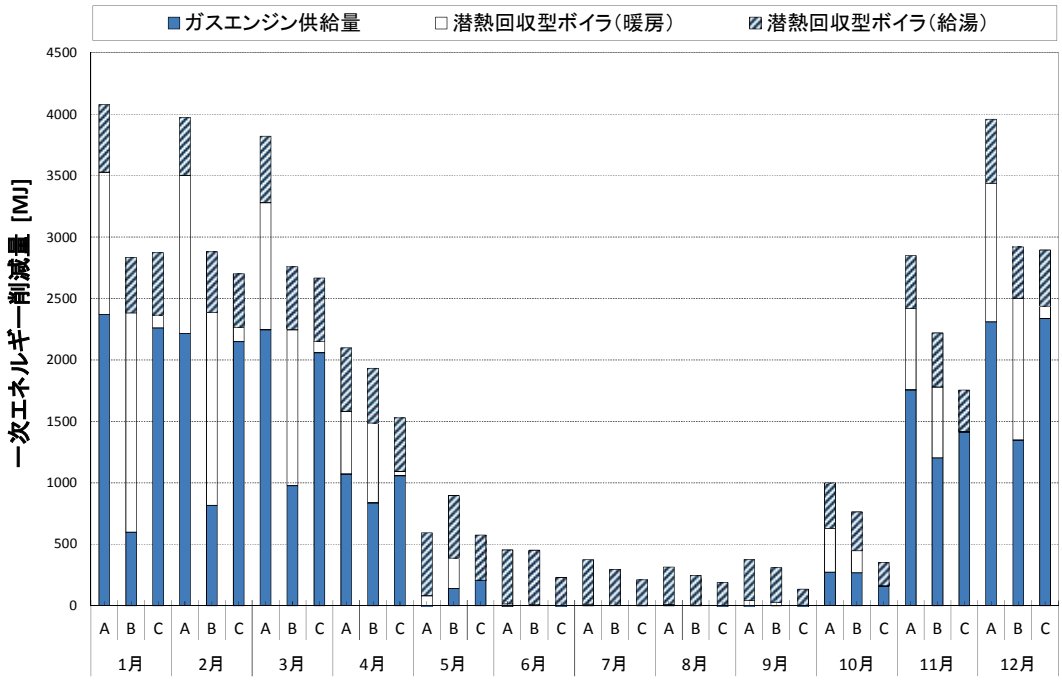


図 4.21 世帯 A～C の月別一次エネルギー削減量

となった. 同期間での世帯 B では, 一次エネルギー削減量が期間月平均で 2713 MJ, この内, GE-CHP による削減量は 990.7 MJ，潜熱回収型ボイラの暖房及び給湯による削減量は 1271 MJ，451.6 MJ となった．同期間，世帯 C では，一次エネルギー削減量が期間月平均で 2556 MJ，この内，GE-CHP による削減量は 2038 MJ，潜熱回収型ボイラの暖房及び給湯による削減量は 82.99 MJ，434.4 MJ となった．世帯 A と世帯 C においては GE-CHP による一次エネルギー削減量が大きく，世帯 B では潜熱回収型ボイラ(暖房)による削減量が大きくなる結果となった．

図 4. 22 に各世帯の熱(暖房＋給湯)負荷と一次エネルギー削減量の関係を示す．熱負荷の増加に伴い一次エネルギー削減量も大きくなることがわかる．

図 4. 23 に各世帯の年間一次エネルギー削減量を示す．世帯 A～I において年間一次エネルギー削減量 15.9～27.1 GJ となり，いずれの世帯でも大きな削減効果が得られた．既報 [6] で述べたとおり，既存の定格型 GE-CHP に対し，一次エネルギー削減量は 20～45%上昇している．発電・排熱寄与率が高い値となった世帯 A と世帯 F では削減量も特に大きい結果となった．

図 4. 24 に従来型ボイラ及び商用電力と比較した，各世帯の年間光熱費削減量を示す．ガス料金(都市ガス)・電気料金は，札幌市における一般戸建て住宅向けの料金メニュー(2012 年 5 月現在)を用いた．各メニューの基本料金および単価を表 4. 4 に示す．世帯 A～I において年間光熱費削減量は 3.3～6.2 万円となった．一次エネルギー削減量の大きい世帯 A と世帯 F では光熱費削減量も大きい結果となった．本システムは学習制御などが無く，電力・熱負荷ともに存在するときのみ発電するシンプルなシステムであるため，予測が外れて蓄

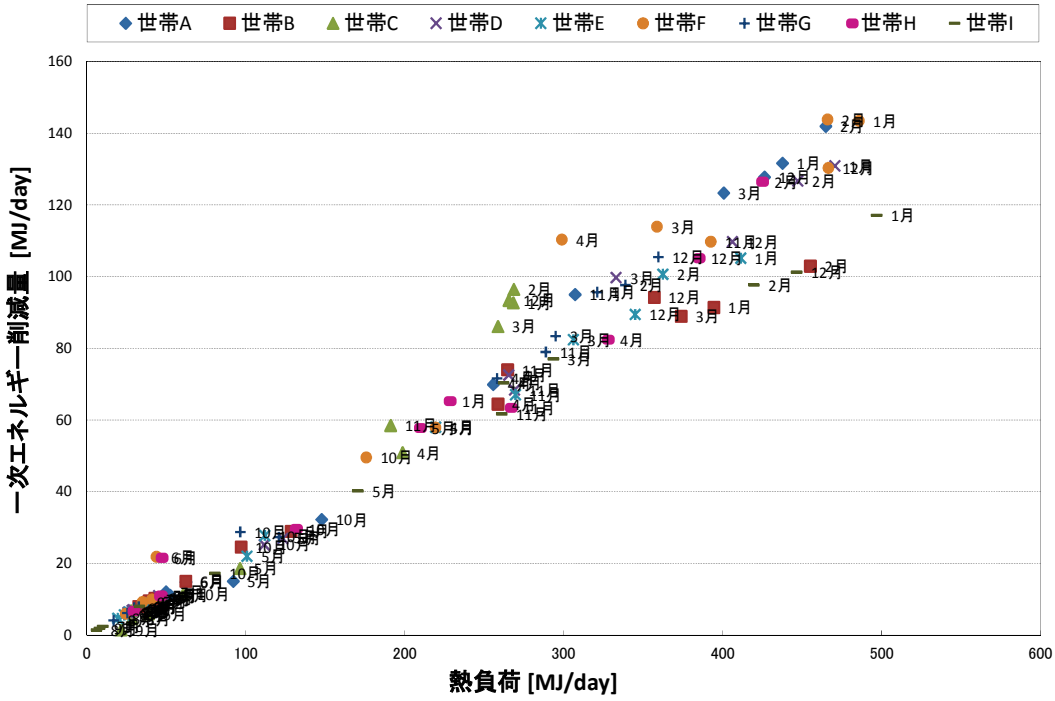


図 4. 22 各世帯の熱負荷と一次エネルギー削減量

熱分をロスするようなことが無い．よって，生活スタイルによらず，基本的には発電すればする程効果が発揮できるシステムである．このような特徴から，全てのサイトで一定のコストメリットを得ることができたものと言える．また，電力負荷・暖房負荷が高いA・Fのようなサイトでは，特にその効果が高くなる．

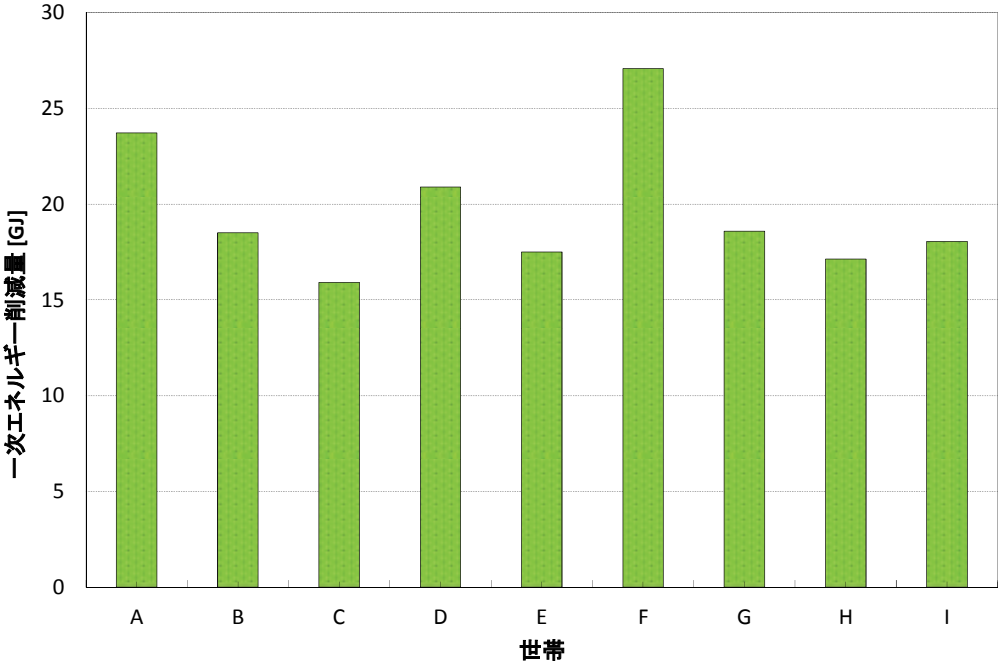


図 4.23 各世帯の年間一次エネルギー削減量

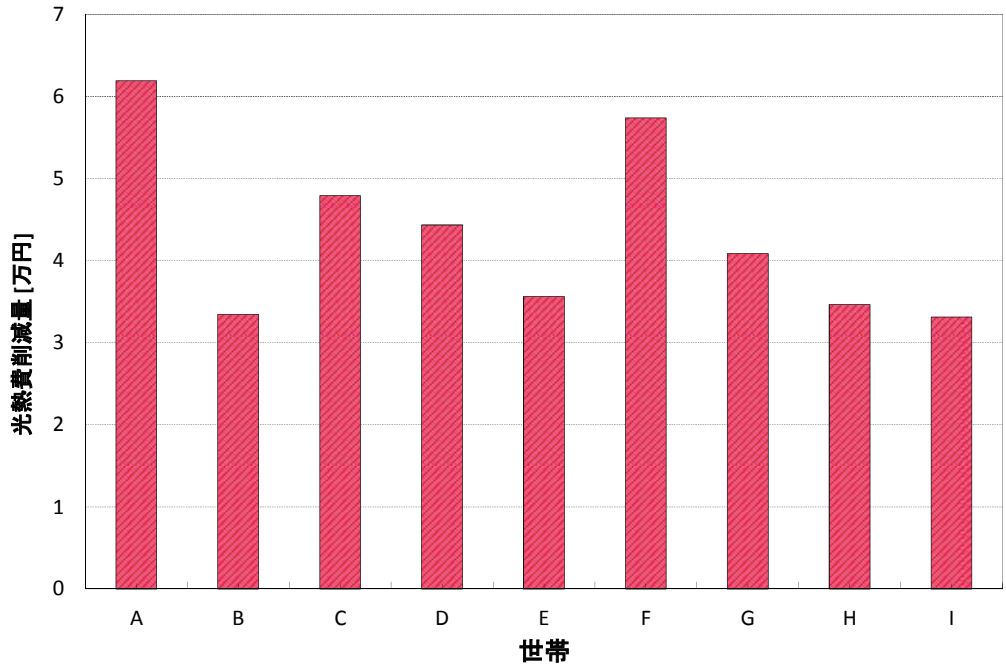


図 4.24 各世帯の年間光熱費削減量

表 4.4 ガス料金・電気料金メニュー

■GE-CHP向け都市ガス料金

	基本料金 円/月	単位料金 円/m3
0～40m3	2,993	106.38
40m3～	4,673	64.38

■従来型向け都市ガス料金

	基本料金 円/月	単位料金 円/m3
0～30m3	2,520	113.92
30～80m3	3,686	75.07
80m3～	4,274	67.72

■電力料金

	基本料金 (契約50A) 円/月	単位料金 円/kWh
0～120kWh	1,628	18.27
120～280kWh		23.68
280kWh～		25.37

※都市ガス熱量：46.04655MJ/Nm3
※燃料調整単価は考慮していない

4.6　まとめ

本 GE-CHP は，排熱を暖房にのみ利用するという特徴から，夏期と中間期の一部は発電しない．しかし，寒冷地において暖房使用期間は電力・熱負荷ともに比較的高くなるため，CHP の導入効果は大きくなる．その時期に集中的に発電することで，年間を通しても高い効果が得られることをフィールド実測により明らかにした．

(1) 給湯需要パターンの変動を重視した複数日モードである修正 M1 モードを用いて潜熱回収型給湯システムの性能評価を実施した結果，熱効率，一次換算エネルギー消費係数は，それぞれ 91.8%，0.82 と極めて高い値を示した．

(2) 給湯負荷の継続時間，停止間隔を重視した単日モードである JGKA 標準モードを用いて潜熱回収型給湯システムの性能評価を実施した結果，熱効率，一次換算エネルギー消費係数は，それぞれ 90.0%，0.83 であり，修正 M1 モードと比較した場合の性能低下は僅かであった．

(3) 潜熱回収型給湯・暖房システムのフィールド実測を実施した．湯張・追焚を含む全体給湯負荷，期間暖房負荷はそれぞれ約 18 GJ，約 34 GJ であった．冬期間における給湯・暖房総合熱効率は 80～95%の範囲であり，期間平均は 89.6%となっており，本給湯・暖房システムの実動効率が非常に高いことを示した．

(4) 寒冷地の実住宅に設置した負荷追従型 GE-CHP の冬期代表週及び一年間の稼動状況と一次エネルギー削減量を確認し，GE-CHP，潜熱回収型ボイラの省エネルギー性を示した．

(5) 冬期間における月平均の排熱寄与率および発電寄与率は一世帯 A～I において 49.4～88.2%，27.6～93.2%であった．その期間は大半のサイトで高い発電寄与率を示す一方で，排熱寄与率はさほど高くなく，電力の大半を GE-CHP で賄っても，排熱の利用先が十分にあることがわかった．

(6) 年間における一次エネルギー削減量および光熱費削減量は世帯 A～I において 15.9～27.1 GJ，3.3～6.2 万円となり，いずれの世帯においても大きな削減効果が得られた．

参考文献

1) 経済産業省，国土交通省；告示第二号，(2009-1)．

2) Y. Shimizu, S. Murakawa, H. Takata, H. Kitayama, Y. Hamada and M. Nabeshima；Study on running condition of residential gas engine co-generation system，Proceedings of the 35th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings－CIB W062 2008(Sep., 2008)，106-117.

3) M. Itagaki；Environment conscious residential energy use by fuel cell CHP technology, Proceedings of the 35th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings－CIB W062 2008(Sep., 2008)，81-94.

4) M. Itagaki, S. Murakawa and Y. Hamada；Operation characteristics and performance evaluation

of residential combined heat and power system，Proceedings of the 38th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings－CIB W062 2011(Sep., 2011), 110-116.

5) 北海道経済産業局；北海道のエネルギー消費動向について(2008 年度版).

6) 武田清賢，濱田靖弘，村井拓矢，後藤隆一郎，中村　充；負荷追従型ガスエンジンを導入した家庭用熱電併給システムに関する研究，日本冷凍空調学会論文集，29-2(2012-6)，印刷中.

7) 前　真之，三浦尚志，羽原宏美，堀　祐治，桑沢保夫，秋元孝之，宇梶正明，澤地孝男；住宅のための省エネルギー手法の実験的評価に関する研究(その３)，日本建築学会環境系論文集，659(2011-1)，49-57.

8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構；給湯器の年間エネルギー消費効率測定方法に関する調査，(2006-4).

9) 濱田靖弘，永廣健太郎，後藤隆一郎，中村　充；高効率機器を導入した戸建て住宅の環境エネルギー工学的診断，人間と生活環境，16-1(2009-5)，27-35.

10)濱田靖弘，中村真人，落藤　澄，村越千春，鶴崎敬大，横尾美雪，成田涼子，鴫原　亮，長倉香織，横山真太郎；札幌における家庭用エネルギー消費量とその季時別変動に関する実測と評価，空気調和・衛生工学会論文集，82(2001-7)，29-37.

第５章

寒冷地向け負荷追従型ガスエンジン熱電併給システムの排熱利用方法に関する研究

5.1　概説

本章では，３・４章で述べた負荷追従型 GE-CHP システムの更なる高効率利用を目的として，新たな排熱利用方法である換気予熱方式について検討した．まず，5.2 節で換気予熱方式の概要および通常暖房方式との違いについて述べる．次いで，5.3 節でフィールド実測モニタ世帯の負荷特性を示し，5.4 節で通年の省エネ性・環境性・経済性などの運転結果を示す．5.5 節で第４章の通常暖房方式におけるフィールド試験結果と比較を行い，最後に，5.6 節でまとめを述べる．

5.2　換気予熱方式およびモニタ実測世帯概要

5.2.1　換気予熱方式の概要

第３・４章で述べた負荷追従型 GE-CHP システムでは，排熱を暖房利用する際に，その熱をパネルヒータ・床暖・ファンコンベクタ等の暖房端末に利用していたが，本章においては換気用の外気を加熱し室内を暖める手法（以下，換気予熱）を検討する．本 GE-CHP においては，①上記の暖房端末使用中かつ②家庭の電力使用量がある閾値を超える際に発電を行う制御となっていたが [1), 2)]，換気予熱方式では，暖房端末不使用でも換気温度が設定値以下であり，電力使用量が閾値を超える際にも自動的に GE に発電指令を出す制御としており，発電機会が増加する．また，本 GE の排熱出力範囲は 1.4～3.4 kW と低いため，高断熱住宅のベース暖房として 24 時間連続暖房として利用するのに適しており，上記の制御と組み合わせることで，住宅熱環境の向上および一次エネルギー削減効果を高めることが期待できる．

5.2.2　フィールド実測世帯概要

表 5.1 にフィールド実測世帯概要を示す．本 GE は，札幌市内の同一区画内にある新築物件 19 戸全てに採用されたが，本論文においては計測の同意を得た 11 戸の結果を示す．全ての住宅は，次世代省エネ基準である Q 値 1.6 となっており，高い断熱性能を有する．計測期間は，2013 年 4 月～2014 年 3 月である（世帯 J・K のみ 2013 年 6 月～2014 年 3 月）．

表 5.1 フィールド実測世帯概要

世帯	家族構成	延床面積	Q値
A邸	成人2名，未成年1名	117m^2	1.6
B邸	成人2名，未成年1名	116m^2	
C邸	成人2名，未成年2名	133m^2	
D邸	成人2名	94m^2	
E邸	成人2名，未成年2名	118m^2	
F邸	成人2名，未成年1名	133m^2	
G邸	成人3名，未成年2名	123m^2	
H邸	成人2名，未成年1名	128m^2	
I邸	成人2名，未成年2名	123m^2	
J邸	成人2名，未成年1名	114m^2	
K邸	成人2名，未成年2名	115m^2	

5.2.3　フィールド実測暖房方式概要

図5.1に，本フィールド実測住宅で用いた換気予熱方式および通常の暖房方式の概要を示す．通常暖房方式ではGEの排熱をパネルヒータ・床暖・ファンコンベクタ等の暖房端末を暖めるのに使用するが，今回採用した換気予熱方式では，床下に設置した換気予熱システムにて換気用の外気を加熱し，室内を暖める．GEで出力された排熱は，GE内蔵のポンプにて温水循環回路に送水し熱交換する．その際の温水温度は，戻り温水温度により成り行きとなる．その後，潜熱回収型ボイラの循環ポンプにて暖房端末まで送水される．その際，暖房負荷に応じ潜熱回収型ボイラにより温水が再加熱される．なお，換気予熱単独運転時は，潜熱回収型ボイラは動作せず，GE内蔵の循環ポンプのみで送水する構造になっている．また，通常暖房方式では潜熱回収型ボイラの暖房がONの際にGEに発電指令を出す制御であるが，換気予熱方式では換気用の流入外気が設定温度以下となった場合も，自動的にGEに発電指令を出す制御となっている．

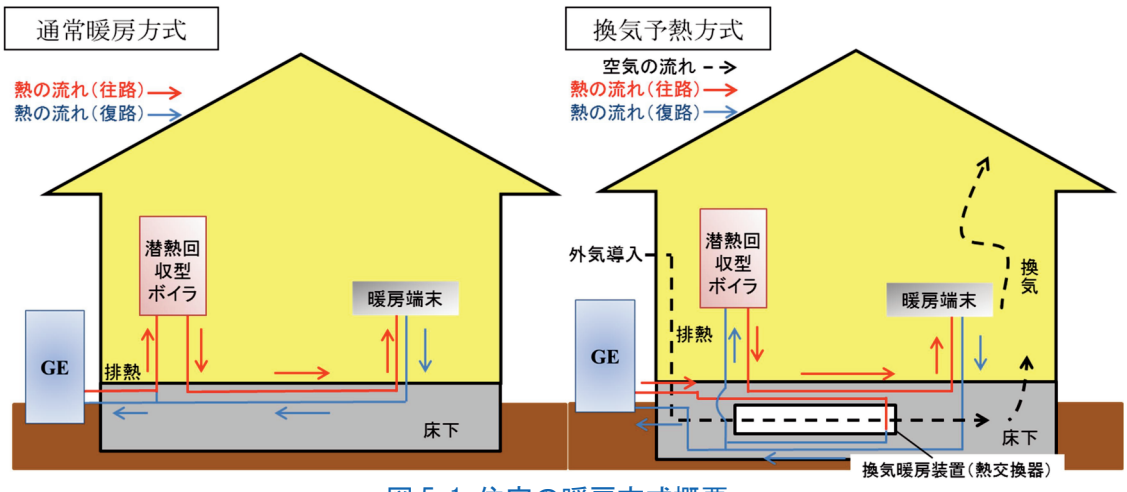


図 5.1 住宅の暖房方式概要

5.2.4　フィールド実測計測概要

図 5.2 にフィールド実測世帯概要を示す．電力量計にて，GE の発電量および受電電力量を計測し，1 分間の積算値を出力した．また，潜熱回収型ボイラで消費するガスの熱量および出力熱量を，給湯および暖房に分けて計測した．これらの熱量の計測は，1 時間あたりの積算値として出力した．さらに，暖房端末および換気予熱装置から GE への発電指令の状況も計測し，換気予熱単独運転時（換気の給気が設定温度以下で換気予熱が作動しており，かつ潜熱回収型ボイラの暖房が OFF となっている時）が識別出来るようにした．

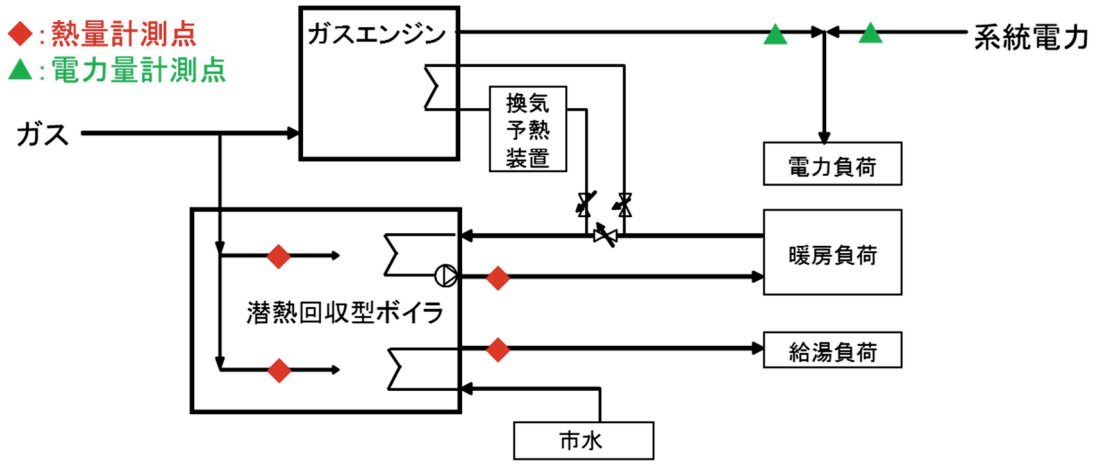


図 5.2 フィールド実測計測概要

5.3　フィールド実測サイトの負荷特性

モニタ実測世帯の負荷特性を図5.2～図5.4に示す．本データは，各世帯の月別の平均値を示すものであり，以降の図5.5～8，図5.12も同様である．電力負荷については，使用量が多い世帯と少ない世帯の差が大きくなった．非寒冷地域の電力負荷は，冬期と夏期に高くなるW型を示すのに対し，本実測サイトでは冬期間に使用量が多くなり，夏期・中間期に少なくなる傾向となった．これは，札幌地区においては夏期の冷房負荷が低く，エアコンを装備しない住宅が多い事に起因する．一年間の計測が完了している世帯A～I邸については，2,289～6,513 kWh/年となり，平均3,771 kWh/年となった．

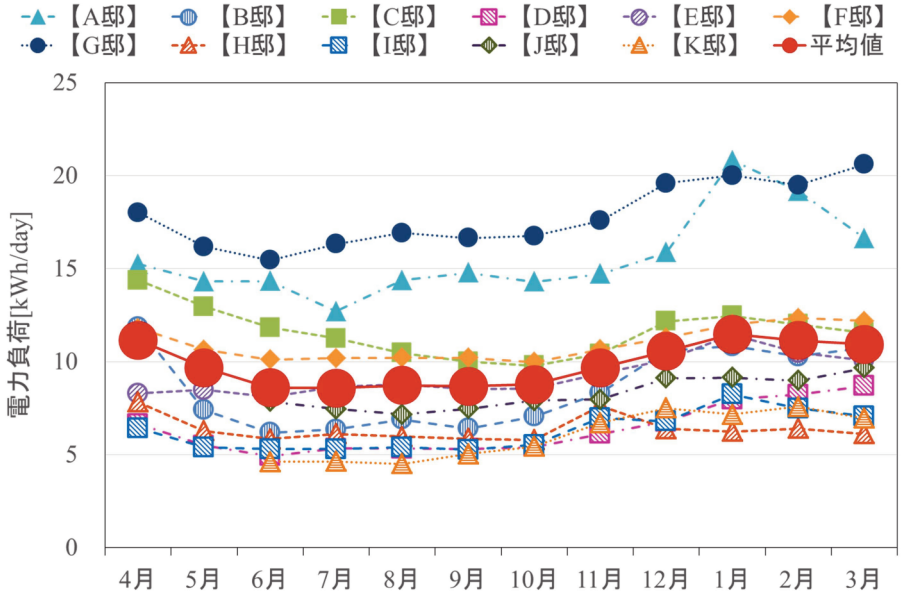


図 5.2 月別・世帯別の電力負荷

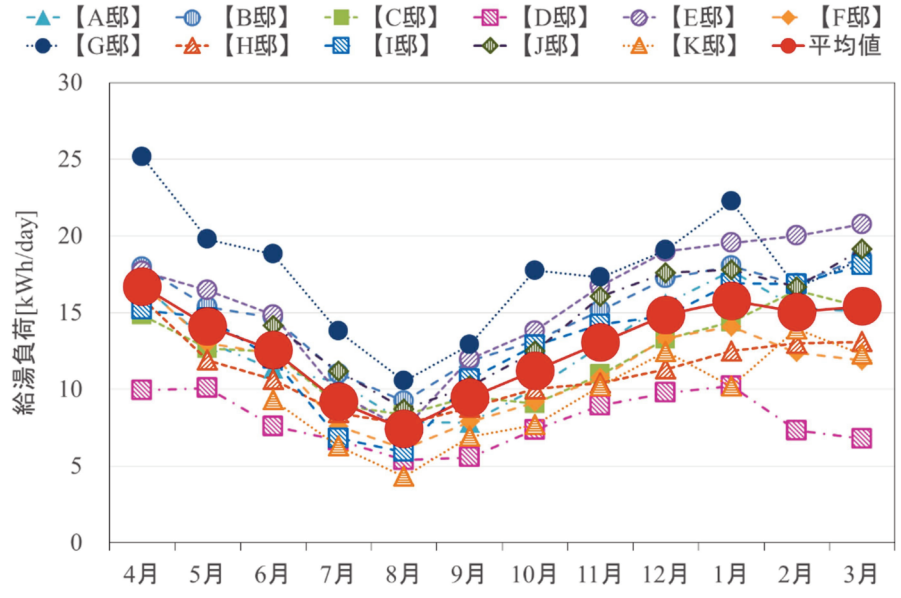


図 5.3 月別・世帯別の給湯負荷

給湯負荷については，冬期間に負荷が高く，夏期に低くなる傾向となった．これは，非寒冷地域と同様の傾向である．年間の負荷（世帯A～I邸）は，2,917～6,479 kWh/年となり，平均4,753 kWh/年となった．

暖房負荷については，札幌市内の平均外気温度に反比例し，1月に最大負荷が発生する傾向となった．また，電力・給湯と比較すると負荷が高くなっている．暖房使用時期は10～5月と長く，本論文で取り上げる排熱を暖房にのみ使用するGEは，この時期に稼働することになる．年間の負荷（世帯A～I邸）は，10,452～22,107 kWh/年となり，平均16,079 kWh/年となった．

電力・給湯・暖房負荷は，共通して6～9月の使用量が少ない結果となった．よって寒冷地において，当該時期のCHPシステムの導入効果は，それ以外の時期と比較して少なくなることがわかる．本GE-CHPシステムはその点に着目し，導入効果の高くなる暖房時期に稼働する設計になっている．

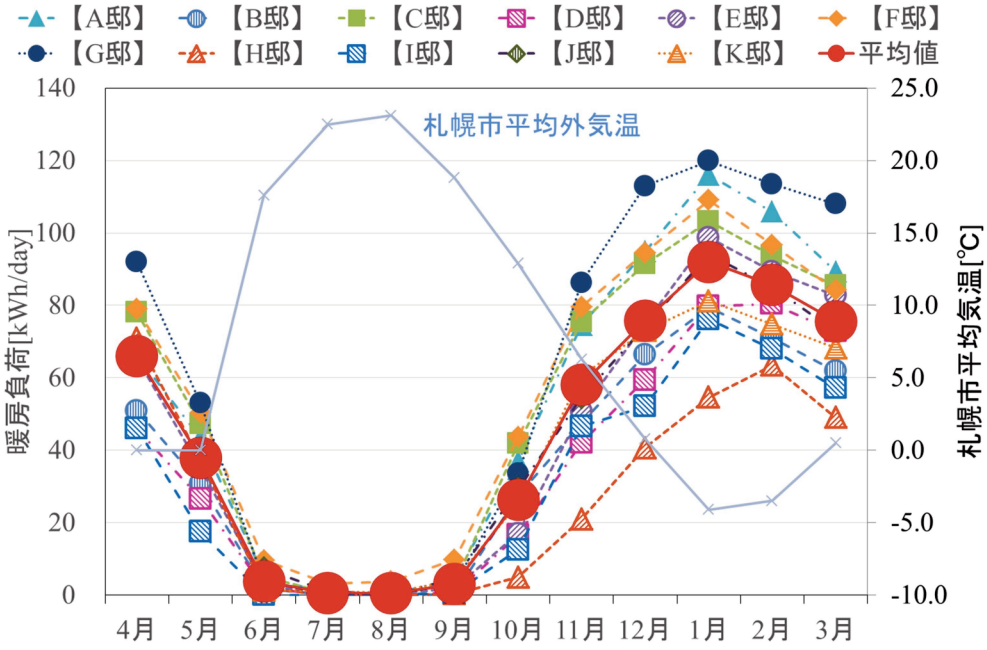


図 5.4 月別・世帯別の暖房負荷

5.4　運転結果

5.4.1　発電時間

図5.5に月別・世帯別の暖房使用時間（換気予熱も含む），図5.6にGEの発電時間をそれぞれ示す．また，比較のため換気予熱なしの場合の平均値も示す（以降，図5.7，図5.8，図5.12も同様）．換気予熱なしは，パネルヒータ・床暖などの暖房端末にGEの排熱を利用する通常暖房方式としており，その場合の暖房使用時間およびGEの発電時間は，換気予熱ありの実測データより換気予熱単独運転時（換気の給気が設定温度以下で換気予熱が作動

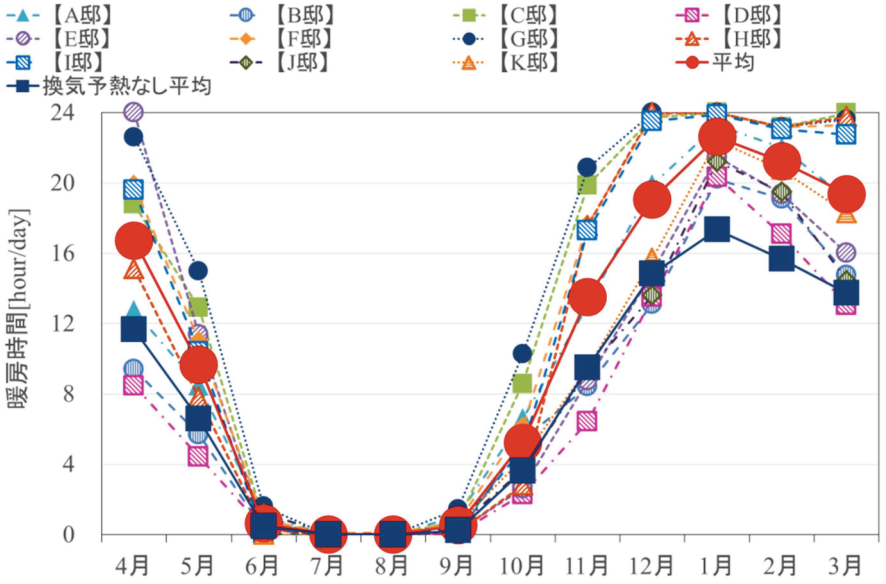


図 5.5 月別・世帯別の暖房使用時間

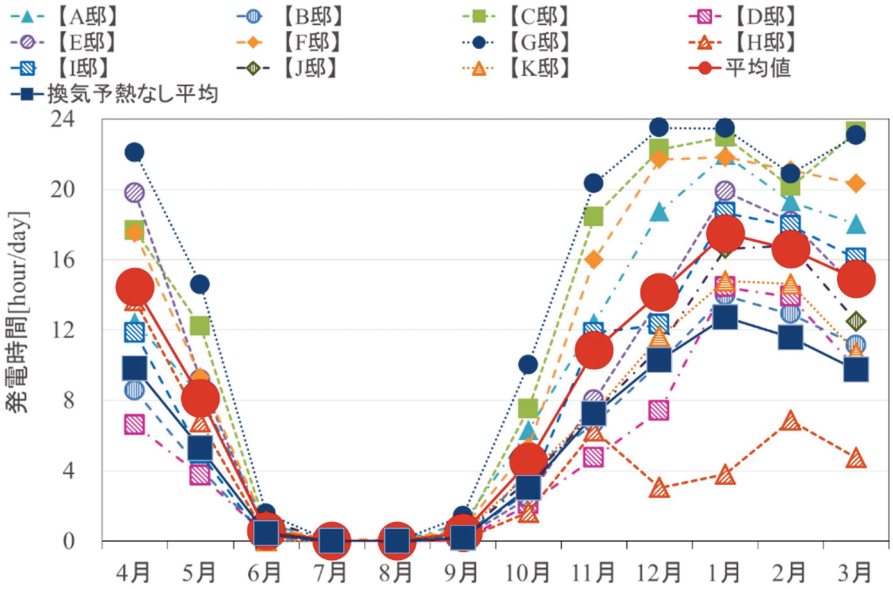


図 5.6 月別・世帯別の GE 発電時間

しており，かつ潜熱回収型ボイラの暖房がOFFとなっている時）を除いて試算した（以降，本5.4節では全て同じ試算で換気予熱なしの結果を想定している）．暖房使用時間については，いずれの世帯も冬期間において長く，特に世帯C・F・G・H・Iについては12～3月において，ほぼ24時間連続暖房となっている．世帯別の通年の暖房使用時間は，2,541～5,071時間/年となり，平均3,769時間/年となった．また，換気予熱なしの場合，平均2,751時間/年となっており，1,018時間/年短い結果となった．

GEの発電時間については，暖房時間とほぼ同様の傾向を示しており，12～3月を中心に長い稼働時間となった．暖房使用時間が長い世帯ではGEの発電時間も長い傾向となったが，例外として冬期にほぼ24時間連続暖房であった世帯Hについては，発電時間が最も少ない結果となった．これは，世帯Hの電力負荷が非常に低いため，暖房は使用するもGEの発電開始最低電力使用量に到達せず，発電が行われない時間帯が多かったものと考えられる．世帯別の通年のGE稼働時間は，1,428～4,904時間/年となり，平均2,984時間/年となった．また，換気予熱なしの場合，平均2,057時間/年となっており，換気予熱の導入により927時間/年発電時間が長くなった．換気予熱による発電時間の増加については，当初中間期における効果が大きいと予測していたが，むしろ厳冬期の寄与が大きかった．この理由について分析したところ，夜間（就寝時等）に潜熱回収型ボイラの暖房をOFFにしている家庭において，GEの排熱のみで換気予熱が行われているパターンが多いことに起因することがわかった．

5.4.2　発電・熱寄与率

図5.7に，GEの発電寄与率（有効発電出力÷電力負荷）および熱寄与率（排熱利用量÷暖房負荷）をそれぞれ示す．12～4月の冬期間は，世帯平均の発電寄与率が6割を超す結果となった．また，世帯C・F・Gについては同期間の発電寄与率がほぼ8割程度になっており，家庭で使用する電力の大半をGEで賄う結果となった．これは，札幌地区における冬期間の暖房時間が長いことから，GEが長時間発電できることと，GEの最大発電出力が1.5 kWと高く商用電力の使用量を少なく抑えられることに起因する．世帯別の通年の発電寄与率は，18.6～44.9%，平均37.0%となった．換気予熱なしの場合，16.4～40.6%，平均28.2%となり，特に厳寒期において換気予熱による寄与率の増加が目立った．これは，図5.6で示した通り，厳冬期において換気予熱による発電時間増加の影響が大きくなるためである．

一方で熱寄与率については，冬期間の平均がおよそ4割程度となった．これは，GE排熱出力に対し暖房負荷が大きく，GEが熱余りになりにくい状態であることを意味し，本換気予熱システムのように排熱利用の拡大が重要であることがわかる．一部のサイトで中間期における熱寄与率が高くなっているが，これは冬期と比べ暖房負荷が低い割に発電時間が減らなかったためである．世帯別の通年の熱寄与率は，28.7～54.2%，平均39.5%となった．また，換気予熱なしの場合，20.4～36.7%，平均27.1%となった．この際，換気予熱単独運転時の排熱利用分を，全て潜熱回収型ボイラで賄うこととして計算を行った．

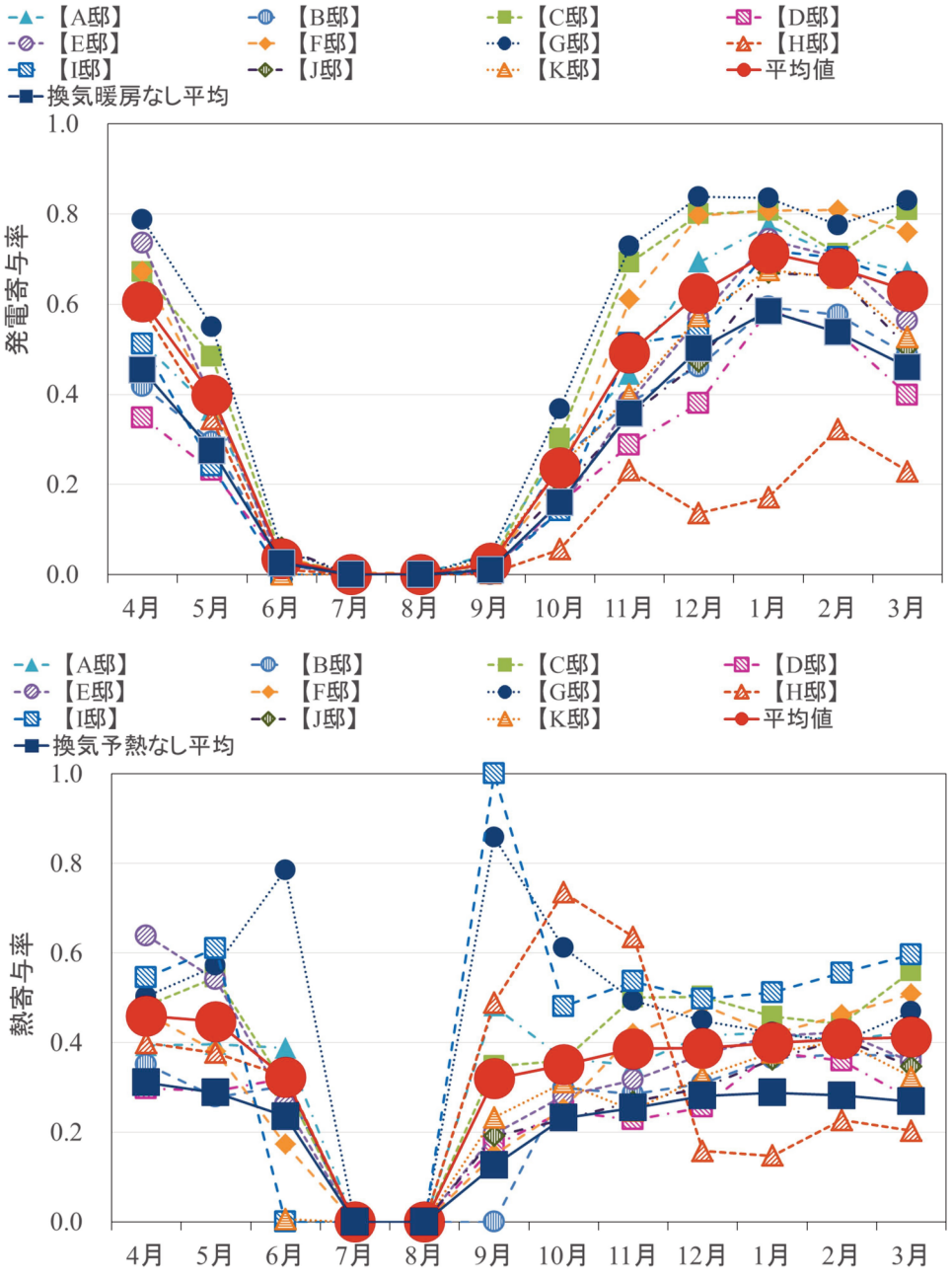


図 5.7 月別・世帯別の発電・熱寄与率

5.4.3　一次エネルギー削減量・削減率

図5.8に，月別・世帯別の一次エネルギー削減量を示す．比較対象は従来型システム（商用電源＋非潜熱回収型ガスボイラ）として，電力・給湯・暖房におけるエネルギー削減量を求めた．改正省エネルギー法より電力の換算係数，ボイラ熱効率をそれぞれ9.76 MJ/(kWh)，75%とした．電力・暖房負荷が高い1月に削減量が最も高くなる傾向となった．特に，12～4月は一次エネルギー削減量の平均値が20 kWh/dayを超す高い結果となった．夏期および暖房を使用しない中間期においては，潜熱回収型ボイラによる給湯使用分の削減効果のみとなる．また，換気予熱なしの場合と比較すると，暖房使用時期（10～5月）における一次エネルギー削減量が，平均0.9～2.1 kWh/day増加しており，GEの発電時間と同様に，厳冬期における換気予熱による削減効果が大きい結果となった．

図5.9に，世帯別の年間の一次エネルギー削減効果を示す．一次エネルギー削減率は，一次エネルギー削減量に対する従来型システム（商用電源＋非潜熱回収型ガスボイラ）における電力・給湯・暖房に使用する一次エネルギー消費量の割合とした．削減量は2,932～8,539 kWh/年，平均4,787 kWh/年と年間での高い削減効果を確認した．本システムは，一般的な家庭用CHPシステムと比較すると夏期における削減効果は低いものの，冬期の削減量が大きいため，貯湯タンクを有さないシンプルなシステムであるにも関わらず，年間での削減効果は高くなる．

世帯別に見ると，特に削減量の多かった世帯A・C・F・Gは，電力・暖房負荷がともに高く，逆に比較的削減効果が低い世帯H・Kは，電力・暖房負荷が低かった．よって，本GE-CHPは電力・暖房使用量の多い世帯に向いたシステムであることがわかる．また，削減率については11.4～15.3%，平均13.0%と世帯による差が少ない結果となった．また，換気予熱な

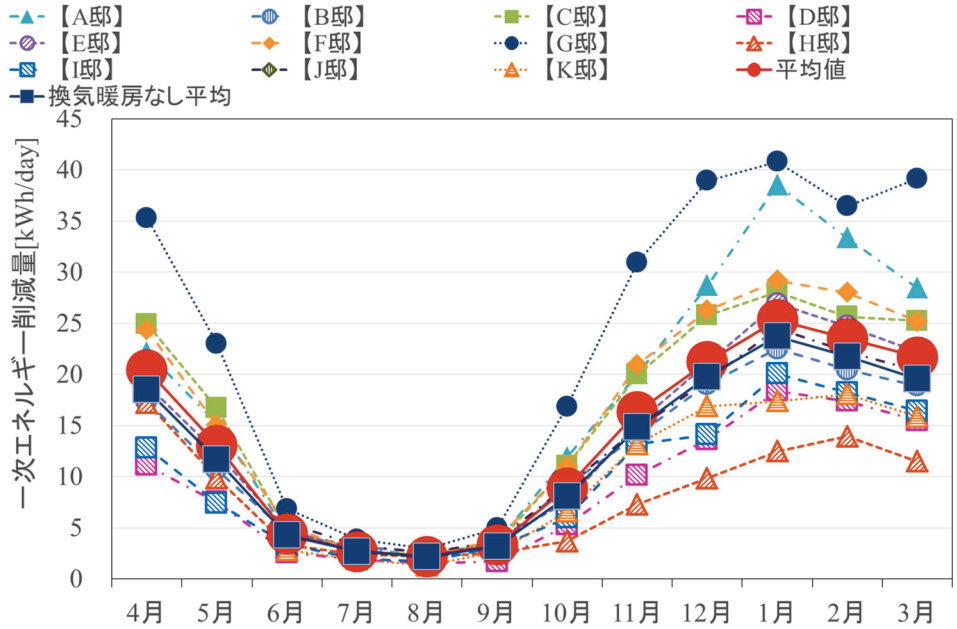


図 5.8 月別・世帯別の一次エネルギー削減量

しの場合は，削減量は2,880～7,667 kWh/年，平均4,410 kWh/年となり，全ての世帯で換気予熱による一次エネルギー削減効果を確認した．換気予熱による追加の一次エネルギー削減効果は，世帯平均で376 kWh/年となり，排熱の利用方法の工夫のみで概ね1割弱の削減効果の増加を確認できた．一方で，C・H・K邸は換気予熱による削減効果が比較的小さかったが，これは電力負荷が低いため，GEの発電開始最低電力使用量に到達せず，発電時間があまり増えなかったためである．当該GEの熱寄与率は，図5. 7で示した通りいずれのサイトも概ね6割以下と低く，排熱の需要は十分あることから，発電時間が増えればエネルギー削減効果も増加する．よって，電力需要の大小による換気予熱導入効果の差を減らすため

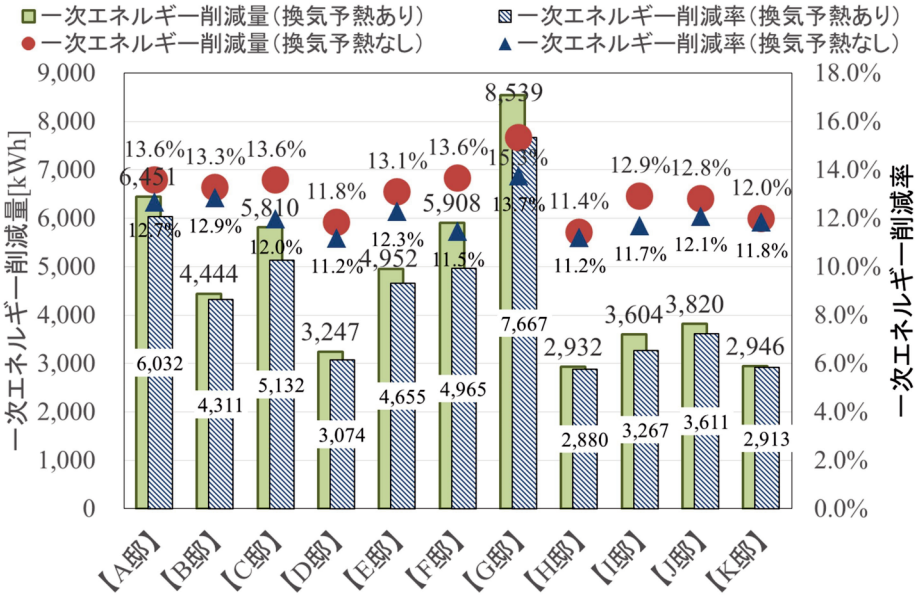


図 5. 9 通年の一次エネルギー削減量および削減率
（対商用電源＋非潜熱回収型ガスボイラ）

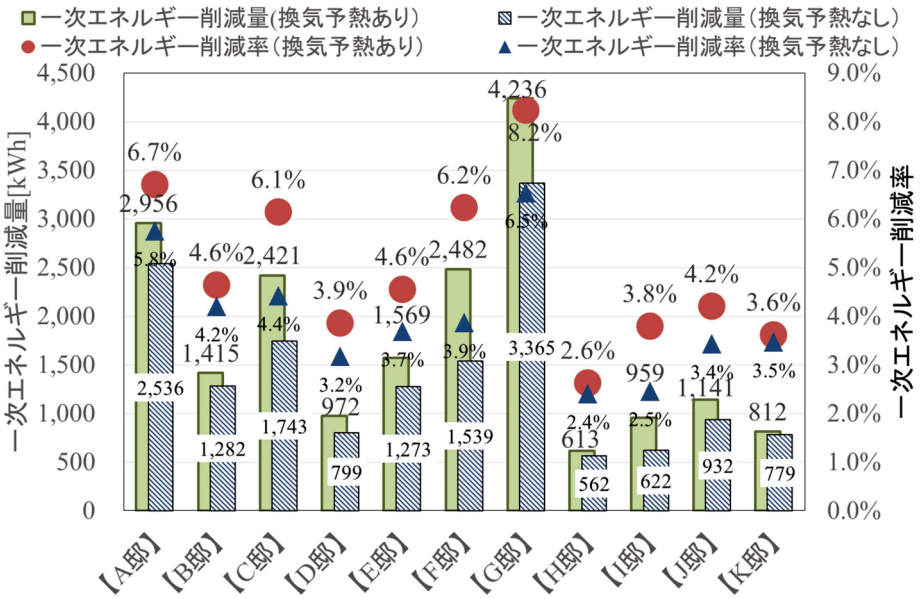


図 5. 10 通年の一次エネルギー削減量および削減率
（対商用電源＋潜熱回収型ガスボイラ）

には，GEの部分負荷効率を上げて発電開始最低電力使用量を下げるか，電力融通が可能な場合は逆潮させて発電出力を上げることなどが改善策として考えられ，今後の課題と言える．

さらに，GE単体の導入効果の評価として，従来型システムを商用電源＋潜熱回収型ボイラとした場合の試算結果を図5. 10に示す．削減量は613～4,236 kWh/年，平均1,780 kWh/年となった．

また，図5. 11に各世帯の一次エネルギー削減量の内訳を示す．サイトにより差はあるが，GE追加分の削減量は，全体の21～46%を示す結果となった．GE追加分の削減量は，平均1,780 kWh/年であり，潜熱回収型ボイラの削減量（給湯と暖房分の合計）3,000 kWh/年と比べると少ないが，電力使用量に換算すると657 kWh（約2.1ヶ月分の使用量）に相当し，高い削減効果であると言える．

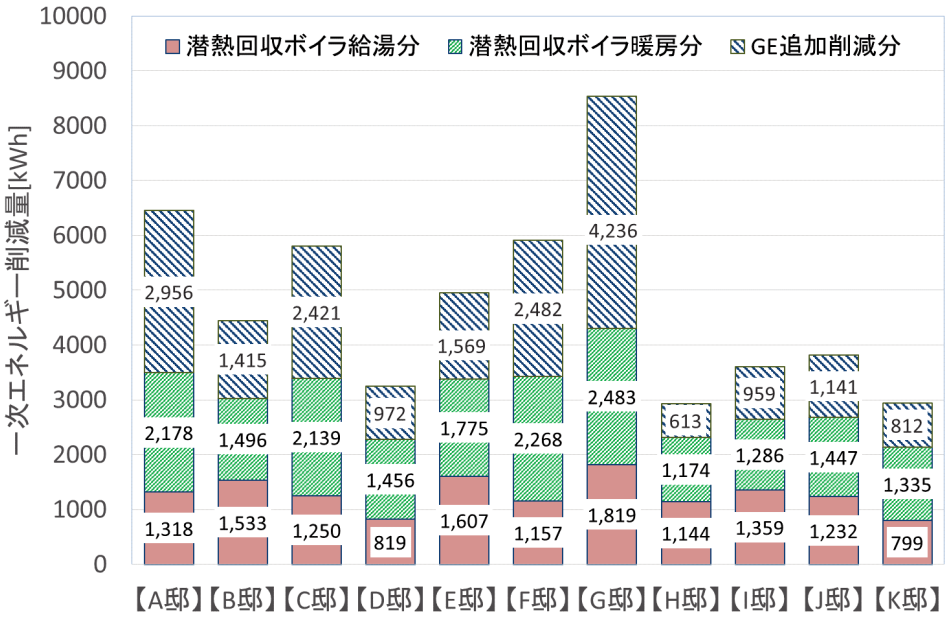


図 5. 11　世帯別の一次エネルギー削減量内訳

5.4.4　環境性

環境性の評価として，図5. 12に，月別・世帯別のCO_2削減量を示す．4.3の一次エネルギー削減量・削減率の評価と同様に，従来型システム（商用電源＋非潜熱回収型ガスボイラ）を比較対象とした．燃料のCO_2原単位は0.05125 kg-CO_2/MJ，火力発電CO_2原単位は0.69 kg-CO_2/kWhとした[3)]．一次エネルギー削減量と同様に，電力・暖房負荷が高い1月に削減量が最も高くなる傾向となった．また，換気予熱なしの場合と比較すると，暖房使用時期（10～5月）におけるCO_2削減量が，平均0.29～0.74 kg-CO_2/day増加しており，厳冬期における換気予熱による削減効果が大きい結果となった．

図5. 13に，世帯別の年間のCO_2削減効果を示す．CO_2削減率は，CO_2削減量に対する従来型システムにおける電力・給湯・暖房の使用によるCO_2発生量の割合とした．削減量は623～2,206 kg-CO_2/年，平均1,145 kg-CO_2/年と年間での高い削減効果を確認した．さらに，換気予熱なしの場合は604～1,917 kg-CO_2/年，平均1,013 kg-CO_2/年となり，換気予熱導入による追加の削減量は，平均132 kg-CO_2/年であることがわかる．

また，GE単体の導入効果の評価として，従来型システムを商用電源＋潜熱回収型ボイラとした場合の試算結果を図5. 14に示す．削減量は196～1,412 kg-CO_2/年，平均590 kg-CO_2/年となった．非潜熱回収型ボイラとの比較では平均1,145 kg-CO_2/年の削減量であったため，当該GE-CHPシステムにおける潜熱回収型ボイラのCO_2削減量の寄与分は，世帯平均で555 kg-CO_2/年となり，GEの寄与分の方が高い結果となった．

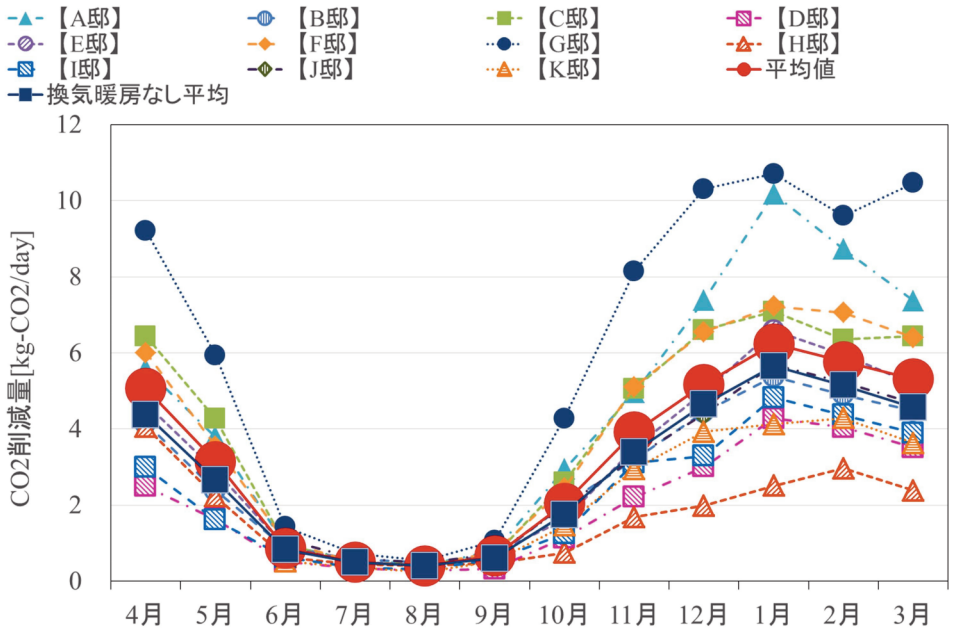


図 5. 12　月別・世帯別の CO2 削減量

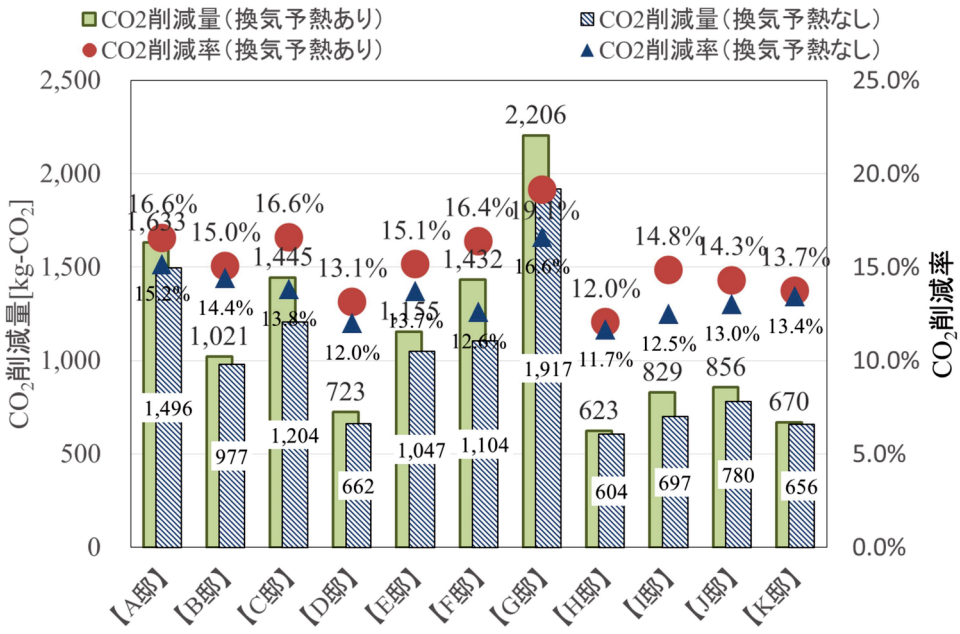


図 5.13 通年の CO_2 削減量および削減率
（対商用電源＋非潜熱回収型ガスボイラ）

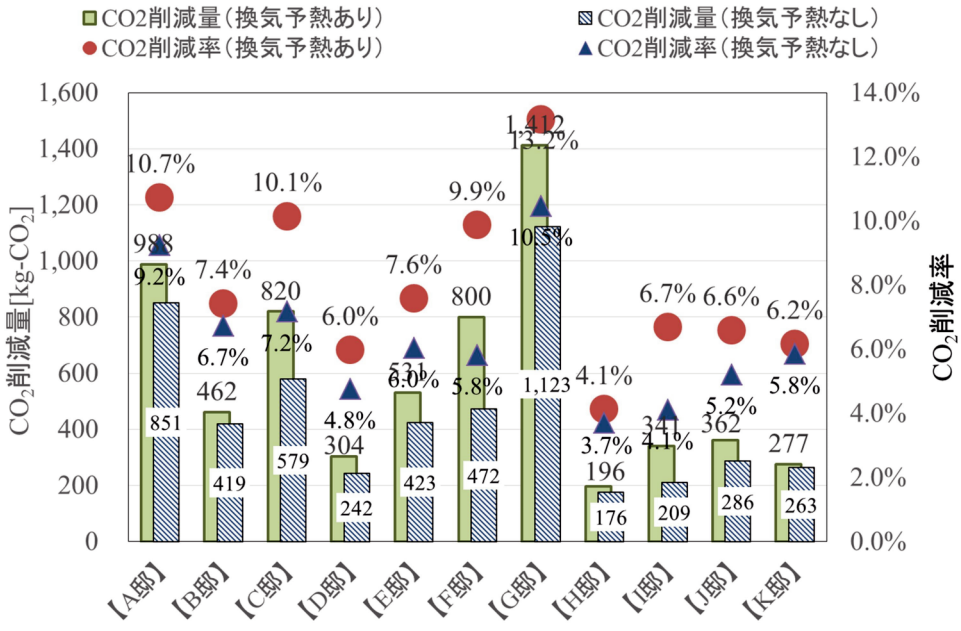


図 5.14 通年の CO_2 削減量および削減率
（対商用電源＋潜熱回収型ガスボイラ）

5.4.5　経済性

経済性の評価として，光熱費（電気代＋ガス代）の削減効果を図5.15に示す．年間の削減効果は，32.6～117.0千円・平均60.4千円（電気料金：北海道電力・従量電灯B，ガス料金：北海道ガス・ゆ～ぬっく24ネオおよび家庭用コージェネ料金，2014年5月時点の料金）となった．換気予熱なしの場合は31.8～104.6 千円・平均55.3 千円となり，換気予熱導入による追加の削減量は，平均5.1 千円であることがわかる．

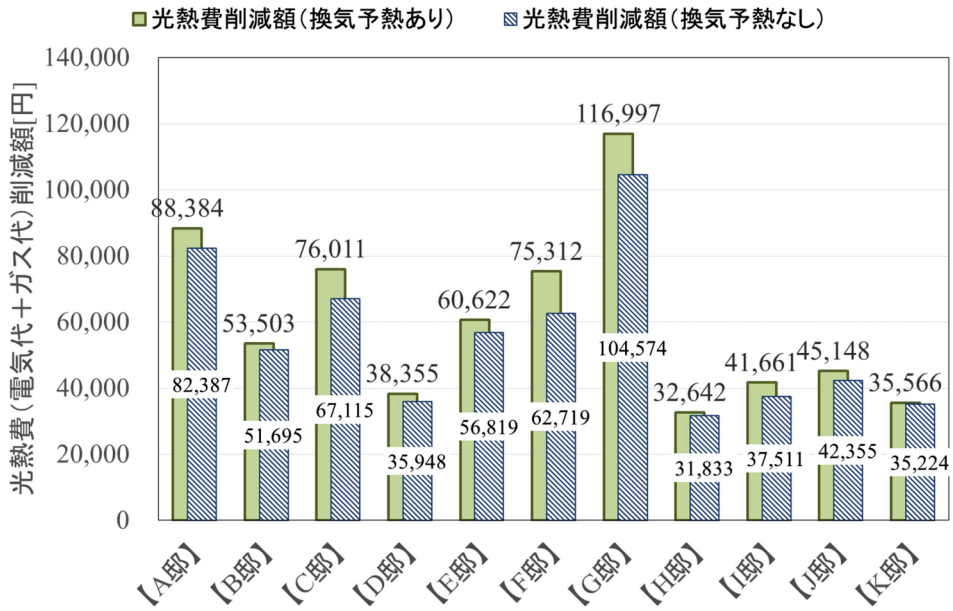


図 5.15 光熱費（電気代＋ガス代）削減額

5.5　換気予熱なしとの比較

図5.16・図5.17に，各世帯の月別暖房負荷・電力負荷と一次エネルギー削減量の関係を示す．この際，潜熱回収型ボイラにおける削減分を含めず，GEによる効果の比較を行うため，従来型システムを潜熱回収型ボイラとした際の結果を示す．また，本評価においては，エンジンがほとんど稼働しない6～9月のデータを除いて評価した．さらに，第４章で示したGE-CHPのモニタ試験（換気予熱なし，本章とは異なる世帯）の結果も示す．換気予熱の有無に関わらず，暖房負荷および電力負荷の増加に伴い一次エネルギー削減量が大きく

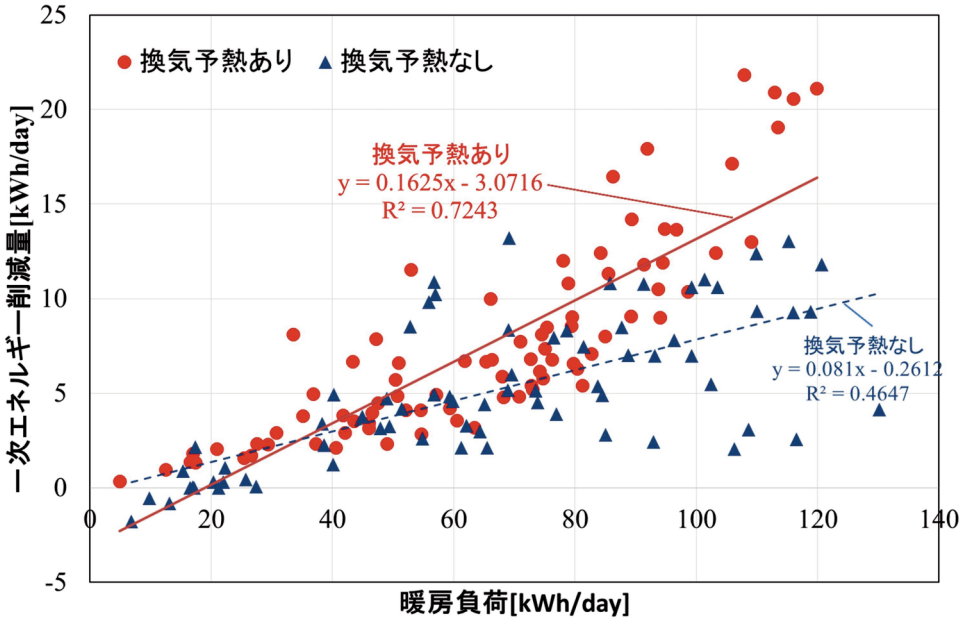


図 5.16　一次エネルギー削減量と暖房負荷

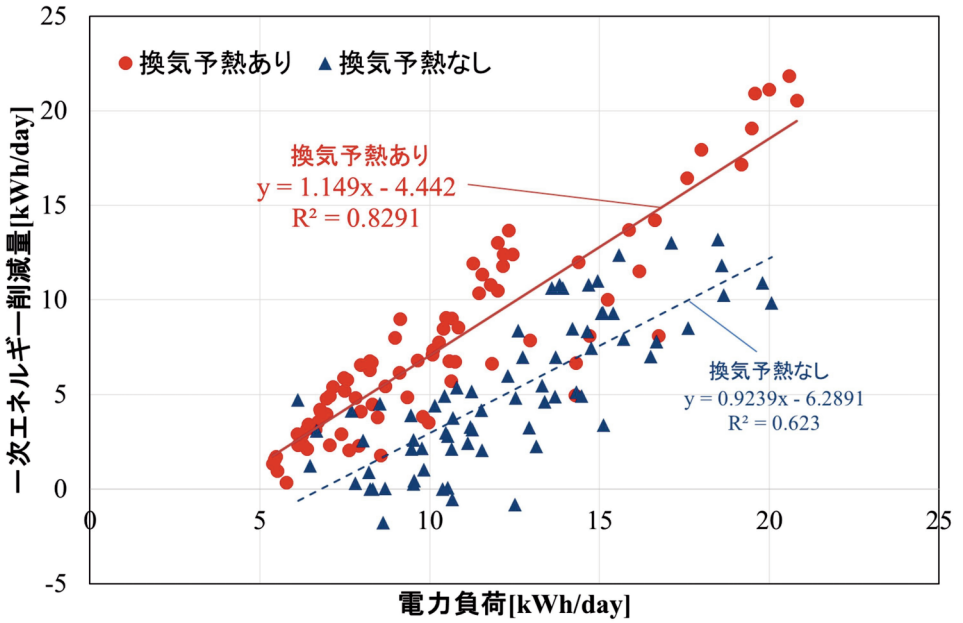


図 5.17　一次エネルギー削減量と電力負荷

なる傾向が見られた.

また，換気予熱有りと無しの結果を比較すると，同じ電力および暖房負荷において換気予熱有りの方が高い一次エネルギー削減量を示す傾向が見えるため，図5. 18に示す有意差検定を実施した．その結果，換気予熱の有りと無しの間に有意差が認められ，換気予熱の導入による一次エネルギー削減の効果を確認できた.

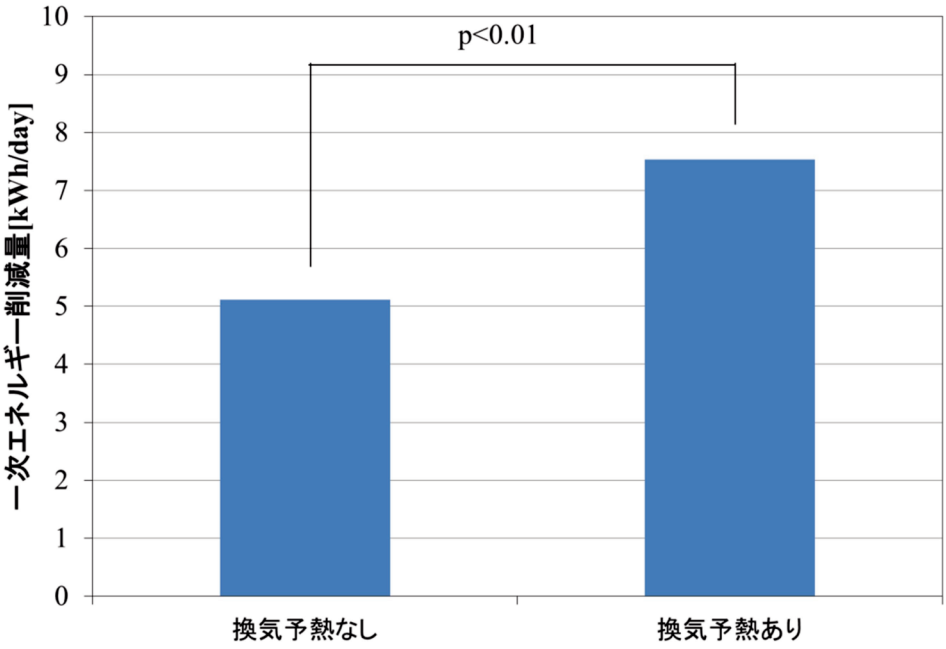


図 5. 18　一次エネルギー削減量の検定結果

5.6　まとめ

(1) 排熱を暖房にのみ利用する寒冷地向け負荷追従型GE-CHPの更なる高効率利用を目的として，GEの排熱を換気予熱に使用するシステムを，11軒のモニタ実測住宅に設置して一年間のエネルギー計測を実施した.

(2) 換気予熱システムでは，換気用の流入外気が設定温度以下となった場合に，自動的にGEに発電指令を出す制御としており，従来のシステムより発電機会が増加する.

(3) モニタ住宅におけるGEの稼働状況を確認したところ，世帯別の通年の稼働時間は1,428～4,904時間/年，平均2,984時間/年となり，換気予熱の導入により平均927時間/年の増加を確認した．また，12～4月の冬期間は，世帯平均の発電寄与率が6割を超しており，家庭で使用する電力の大半をGEで賄う結果となった.

(4) モニタ住宅における通年の一次エネルギー削減効果を確認したところ，従来型システム（商用電源＋非潜熱回収型ガスボイラ）に対して2,932～8,539 kWh/年，平均4,787 kWh/年であり，換気予熱の導入により平均376 kWh/年増加した．これより，排熱の利用方法の工夫のみで，概ね1割弱の削減効果の増加を確認した.

(5) 環境性については，623～2,206 kg-CO_2/年，平均1,145 kg-CO_2/年のCO_2削減量，経済性については年間の光熱費削減効果が，32.6～117.0千円・平均60.4千円といずれも高い効果となった．換気予熱による効果は，それぞれ平均132 kg-CO_2/年，5.1千円/年となった.

(6) 換気予熱なしのモニタ試験結果との比較を行ったところ，同じ電力および暖房負荷において，換気予熱ありの方が高い一次エネルギー削減量を示す傾向となり，換気予熱の導入による一次エネルギー削減効果を確認できた.

参考文献

1) 武田清賢，濱田靖弘，村井拓矢，後藤隆一郎，中村　充；負荷追従型ガスエンジンを導入した家庭用熱電併給システムに関する研究，日本冷凍空調学会論文集，29-2(2012-6)，237-245.

2) 武田清賢・濱田靖弘・高田信一朗・南沢慶一・後藤隆一郎・中村　充・板野愉明；寒冷地の住宅における高効率給湯・暖房システムの稼動特性と性能評価に関する研究，エネルギー・資源，33-6 (2012-11)，21-28.

3) 新エネルギー財団：平成 21 年度定置用燃料電池大規模実証事業報告書 (http://www.nef.or.jp/happyfc/progress.html)，閲覧日：平成 26 年 7 月 13 日

第６章

寒冷地における家庭用燃料電池システムの稼働特性と性能評価に関する研究

6.1　概説

本章では，寒冷地における家庭用固体高分子形燃料電池熱電併給システムの導入効果を明らかにすることを目的として，システムを札幌市内の戸建て住宅 4 軒に設置し，一年間の運転データ解析した．まず，6.2 節で機器の仕様について述べる．次いで，6.3 節で実測世帯について概説し，6.4 節でその負荷特性について述べる．さらに，6.5 節で通年の運転実績・省エネ性・環境性・経済性について述べたうえで，本州での運転実績との比較を行う．最後に，6.6 節でまとめを述べる．

6.2　機器仕様

本システムの概念図および機器仕様を図 6.1，表 6.1 に示す．本システムは，PEFC 発電ユニットと排熱利用給湯・暖房ユニットからなり，発電時に発生する排熱は排熱利用給湯・暖房ユニット内の貯湯タンクにお湯として貯める．本システムは排熱の暖房利用の機能も有するが，本フィールド実測においては施工の都合上，給湯のみの排熱利用とした．タンク内のお湯（発電時の排熱）で賄いきれない給湯負荷および暖房負荷については，排熱利

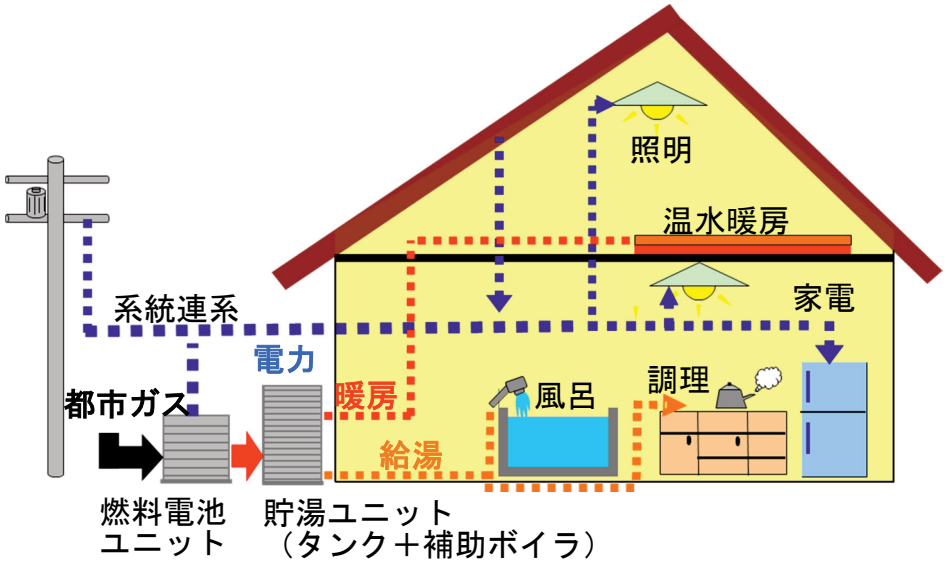


図 6.1 システム概念図

用ユニットに付属の高効率な潜熱回収型ボイラより供給する．PEFC 発電ユニットは，逆潮流しないよう住宅内の電力負荷に合わせて負荷追従運転する．住宅の電力負荷が PEFC 発電ユニットの最大出力より高い時や発電を行っていないとき（待機中・起動停止中）は，不足分を系統から補う．PEFC 発電ユニットに関しては，発電出力，発電熱効率(Higher Heating Value：HHV 基準，Lower Heating Value：LHV 基準)，排熱回収熱効率(HHV，LHV 基準)はそれぞれ，0.25～0.75 kW，（36%，40%），（45%，50%）となっている．排熱利用給湯・暖房ユニットに関しては，貯湯槽容量 200 L，貯湯温度 60℃となっている．NEDO・NEF による大規模実証 [1]時の PEFC-CHP は，発電出力 0.3～1.0 kW，発電熱効率(HHV 基準) 33%以上，排熱回収熱効率(HHV 基準) 45%以上，貯湯槽容量 200 L，貯湯温度 60℃であり，本論文で扱う機種は大規模実証時よりも発電熱効率が高くなり性能が向上している．

表 6.1 機器仕様

PEFC発電ユニット	発電出力		0.25～0.75 kW
	定格発電熱効率（HHV，LHV）		36%，40%
	定格排熱回収熱効率（HHV，LHV）		45%，50%
	ガスの種類		都市ガス13A
	寸法		315(W)×480(D)×1883(H)
排熱利用給湯・暖房ユニット（タンク＋補助ボイラ）	タンク容量		200 L
	補助ボイラ	種類	潜熱回収型
		給湯能力	41.9 kW
		暖房能力	17.4 kW
		追焚能力	9.88 kW
		最大ガス消費量	64.7 kW
		ガスの種類	都市ガス13A
	寸法		480(W)×750(D)×1883(H)

6.3　フィールド実測世帯および計測概要

表6.2に，フィールド実測世帯の概要を示す．いずれの世帯も，札幌市内の戸建住宅である．世帯11Aは電力使用量がやや多めで給湯が標準，世帯11Bは電力・給湯ともに標準，世帯11Cは電力が多く給湯が少なめ，11Dは電力・給湯ともに使用量の多いサイトである．消費機器のアンケートを行った結果，2世帯住宅である世帯11Dは，冷蔵庫2台・テレビ3台を所有しており電力負荷を押し上げていることが予想される．また，給湯設定温度が44℃とやや高めであり，高い給湯負荷の一因と言える．世帯11Aは，白熱電球が照明器具の半数以上を占めており，電力負荷が増えたことが予想される．追焚・暖房については世帯11A・11C・11Dが多め，世帯11Bが標準であった．世帯11Aでは全館24時間暖房しており，暖房負荷が高い要因となっている．また，いずれのサイトもエアコンの設置がなく，冬期はバックアップの潜熱回収型ボイラによる温水暖房（パネルヒータや床暖房）を使用し，夏期は冷房を使用しない．これは，寒冷地の特色の一つと言える．

図6.2に，フィールド実測サイトの計測概要を示す．電力については，PEFCの発電量および受電電力量を計測した．さらに，PEFCの消費ガス流量および貯湯タンクから潜熱回収型ボイラへの供給熱量・給湯負荷・暖房負荷を測定した．測定間隔は，1日あたりの積算値とした．

表 6.2 フィールド実測世帯の概要

サイト		11A	11B	11C	11D
家族構成		4人家族（成人2名 未成年2名）	4人家族（成人2名 未成年2名）	5人家族（成人3名 未成年2名）	6人家族（成人4名 未成年2名）
建物概要	延床面積	144 m^2	130 m^2	182.18 m^2	172 m^2
	築年数（当時）	15年	3年	新築	8年
	形式	木造2階建て	木造2階建て	木造2階建て	木造2階建て
暖房設備		パネルヒータ 床暖房	パネルヒータ	パネルヒータ	パネルヒータ
負荷（年間）	電力	5,569 kWh	4,986 kWh	6,529 kWh	7,854 kWh
	給湯	4,594 kWh	4,836 kWh	3,303 kWh	6,474 kWh
	追焚・暖房	21,829 kWh	11,743 kWh	16,268 kWh	15,972 kWh

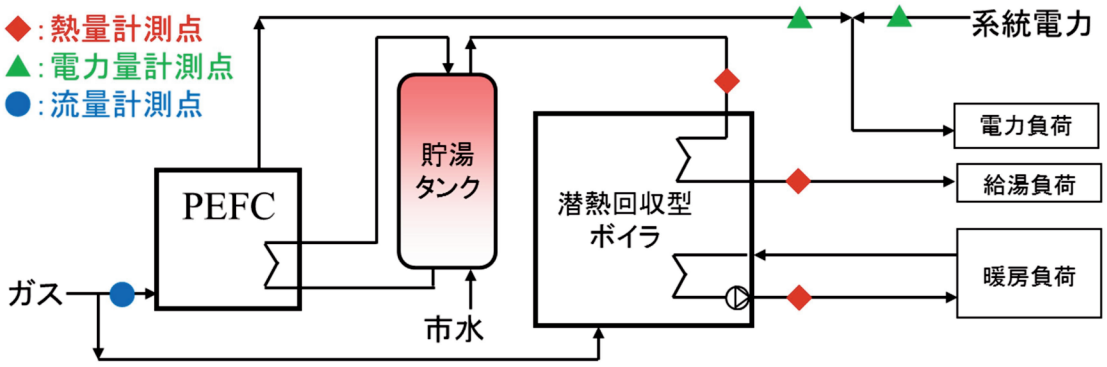


図 6.2 フィールド実測の計測概要

6.4　実測世帯の負荷特性

図6.3，図6.4に各世帯における月別日平均電力・給湯負荷を示す．比較対象として，NEDO・NEFによる既往の大規模実証実績値（平成20年度通年データを有する全523サイト平均値：本データを全国平均と考える）[2]を合わせて示す．

一日あたりの電力負荷は，年間を通して概ねNEDO・NEFの実績値を下回った．また，NEDO・NEFの実績では夏期と冬期に電力負荷が高くなる傾向（W型）となったが，寒冷地においては冬期に電力負荷が高く夏期に低い結果となった．これは，全国的には夏期の冷房負荷により電力負荷が増加するのに対し，寒冷地においては冷房負荷が少ないことに

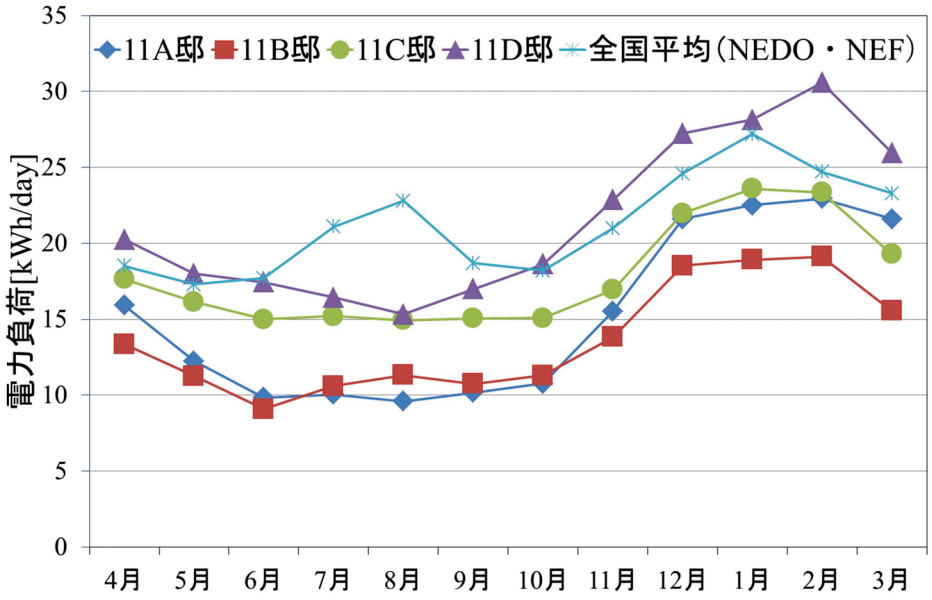


図 6.3 各世帯の月別電力負荷

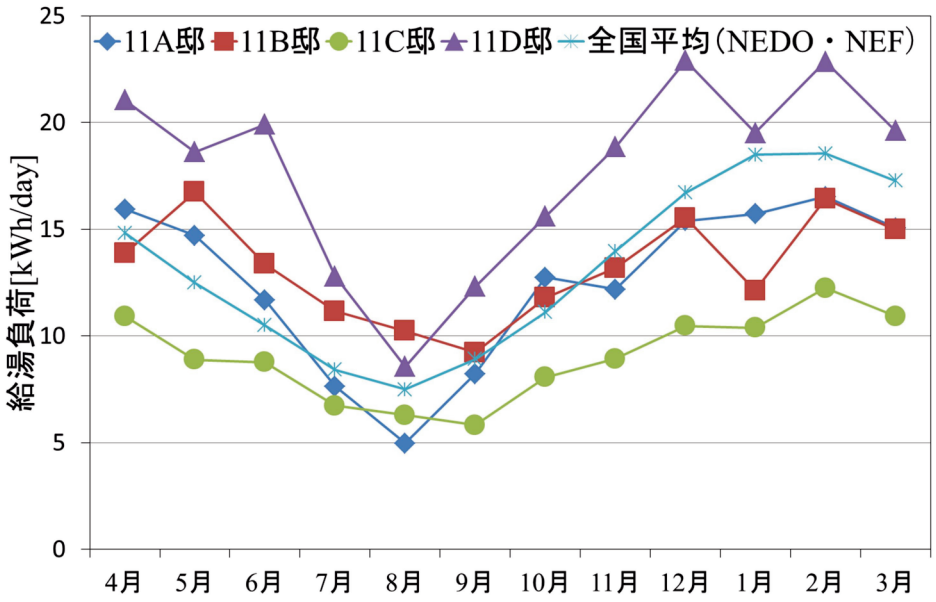


図 6.4 各世帯の月別給湯負荷

起因する．

一日あたりの給湯負荷については，実証住宅毎のバラつきはあるものの，負荷は夏期に低く冬期に高くなる結果となり，NEDO・NEFの実績値と寒冷地サイトの間に大きな違いは見られなかった．

図6. 5に各世帯の熱電比（＝給湯負荷÷電力負荷）を示す．世帯11Cを除き，NEDO・NEFの実績値よりも熱電比は高く，とりわけ中間期・夏期における差が顕著であった．PEFCの熱出力と発電出力の比は，定格出力時において概ね1.25（排熱熱効率50%÷発電熱効率40%）であるため，寒冷地のエネルギー使用状況は非寒冷地域に比べ燃料電池の特性に合ったものであると言える

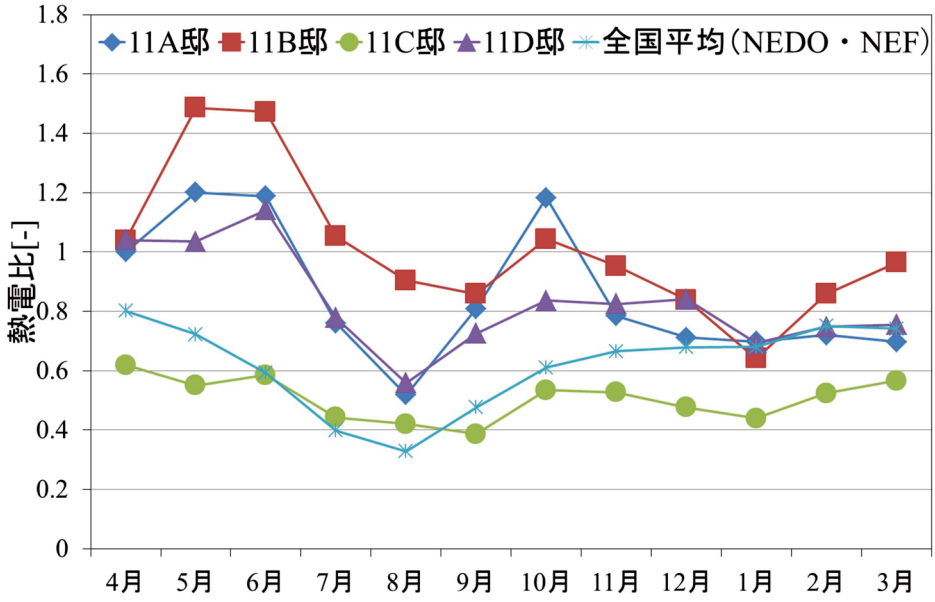


図 6. 5 各世帯の熱電比

6.5　実測世帯の負荷特性

6.5.1　発電・熱寄与率

図 6.6 に世帯別の月別発電寄与率（＝有効発電利用量÷電力負荷）を示す．発電寄与率は，NEDO・NEF 平均に対し概ね年間を通じて寒冷地の実証サイトの方が高い結果となった．これは，当該家庭用燃料電池システムは給湯需要を予測して熱余りにならないよう発電時間を決定するが，NEDO・NEF の大規模実証時に比べ機器の発電熱効率が上がった（大規模実証機 34～38%LHV，当該システム 40%LHV）一方で，貯湯容量についてはいずれも 200L と変わりがないため，熱需要を満たすまでの発電量が増加したものと考えられる．大規模実証機の最大発電出力は 0.7～1.0kW であり，本実証機の 0.75kW より比較的高めである．また，寒冷地の実証サイトにおける熱電比の高さも，発電寄与率を押し上げる要因の一つと考えられる．

また，図 6.7 に月別熱寄与率（＝排熱有効利用量÷給湯負荷）を示す．NEDO・NEF 平均では，夏期に寄与率が上昇し冬期に低下する傾向にあったが，寒冷地の実証サイトでは冬期と夏期に高く，中間期に低い結果となった．NEDO・NEF 平均における夏期の寄与率上昇は，エアコンの使用により電力負荷が高く燃料電池の発電機会が多い一方で給湯需要が低いため，需要の大半を排熱で賄ったものと考えられる．寒冷地世帯の熱寄与率は，年間で 55～85%となり 4 邸平均で 69%となった．つまり，PEFC-CHP の排熱で給湯負荷の 7 割程度を賄い，補助ボイラの稼働量が 3 割程度まで減少したことになる．

図 6.8 に，各世帯の年間の発電および熱寄与率を示す．発電寄与率については，月別データと同様に年間でも NEDO・NEF の平均値より寒冷地実証サイトの方が高い結果となった．熱寄与率については，給湯負荷が低いサイトほど高い傾向となった．

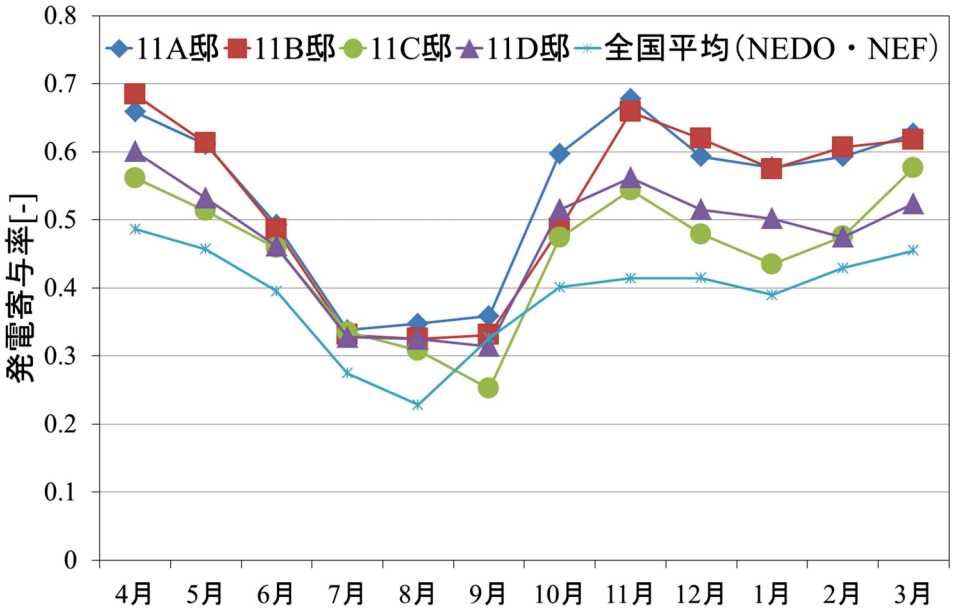


図 6.6 各世帯の月別発電寄与率

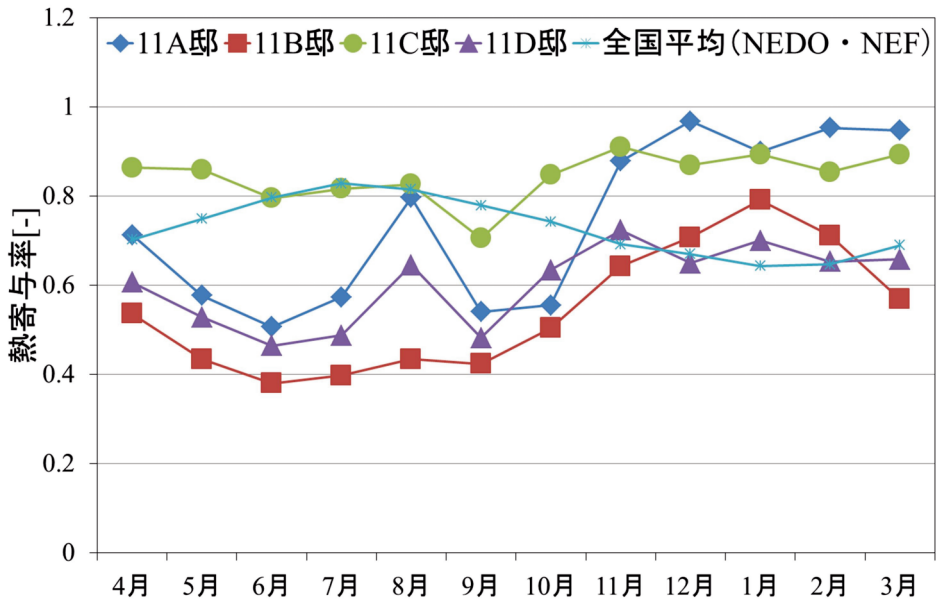


図 6.7 各世帯の月別熱寄与率

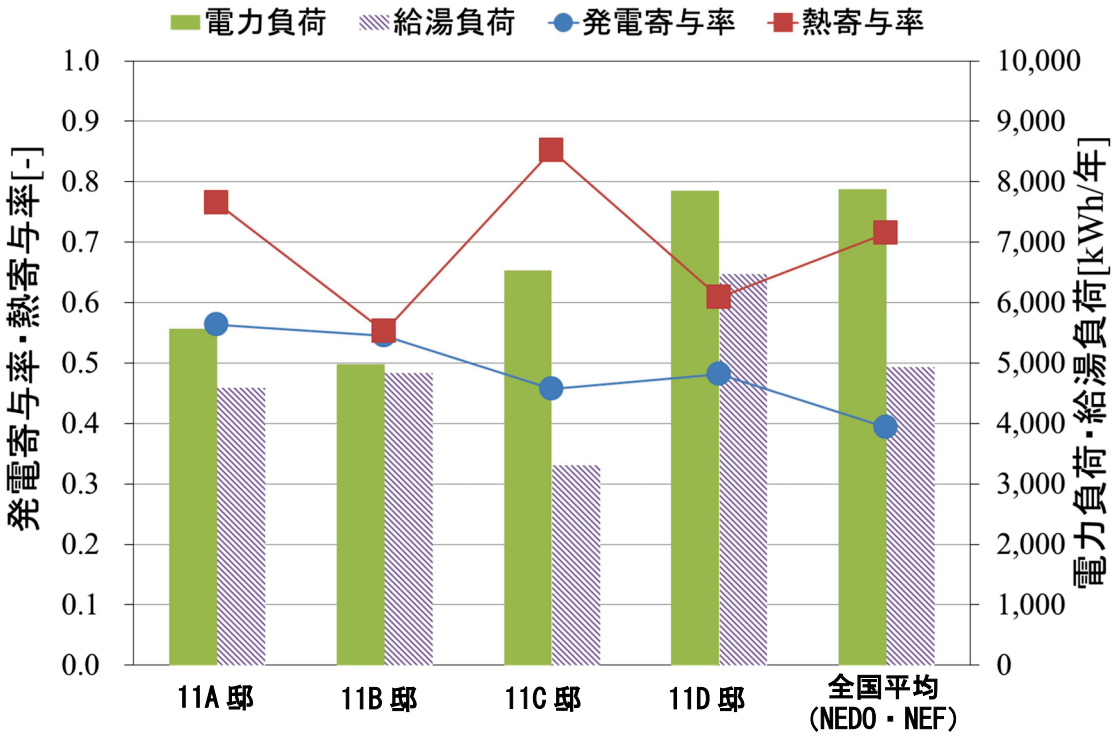


図 6.8 各世帯の年間発電寄与率・熱寄与率

6.5.2　省エネルギー評価

図6.9に各世帯における月別の一次エネルギー削減量を示す．従来型システムとの比較を目的とし，商用電源と非潜熱回収型ガスボイラを比較対象とした．改正省エネルギー法より電力の換算係数，ボイラ熱効率をそれぞれ9.76 MJ/(kWh)，75%とした．また，削減率に関しては，NEDO・NEFによる大規模実証[2]時のCHP評価と同様に［1－{CHP燃料消費量÷(発電電力量÷電力換算係数＋排熱利用量÷ボイラ熱効率)}］×100とした．本計算式は，PEFC-CHPの発電・排熱出力による電気利用・熱利用分により評価を行うことで，潜熱回収型補助ボイラによる削減効果（燃料電池の排熱で賄えない給湯需要および暖房需要）を除き，PEFC-CHPのみの評価を行うことができる．

全般的に，夏期に比べ冬期の方が削減量・率ともに高い結果となった．

電力・給湯負荷ともに他サイトよりも高い11Dサイトは，年間を通して，比較的高い一次エネルギー削減量・率を示した．

一方で，電力負荷が高く給湯負荷が小さい11Cサイトは，夏期および中間期の削減量・率は比較的高いものの，冬期の伸びがあまりなく，夏期において勝っているサイト11Aを下回る結果となった．これは，冬期の電力需要が高いものの，給湯負荷が少なく熱余りになることを防止するために十分な発電が出来なかったためである．

また，電力負荷がやや高めで給湯負荷が標準の11Aサイトでは，冬期の削減量・削減率が高く夏期は低い結果となった．これは，夏期においては電力需要が低くなるため燃料電池があまり発電せず省エネ効果が下がったが，電力需要が高まる冬期においては発電量が増加し，排熱の利用先である給湯需要も十分にあるため高い省エネ効果が出たと考えられる．

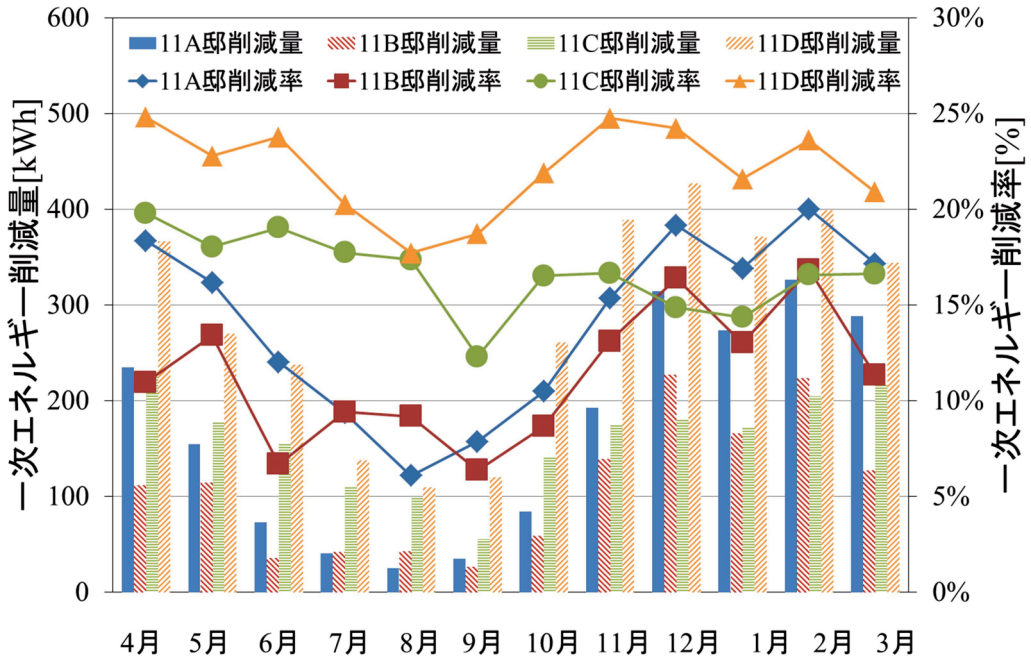
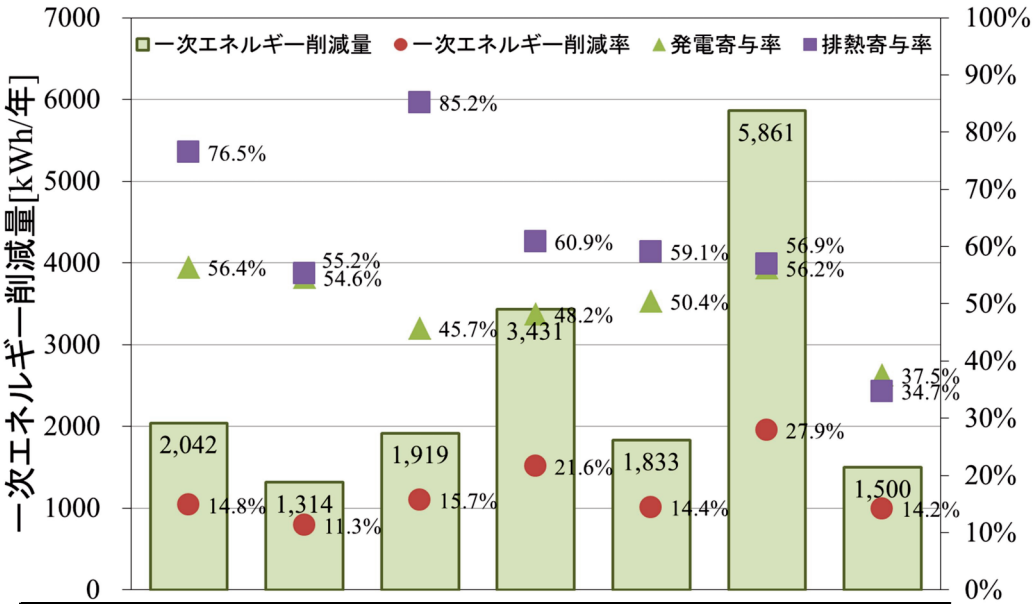


図 6.9 各世帯の月別一次エネルギー削減量

図6. 10に各サイトにおける通年の運転実績を示す．また同図には，参考データとして一般財団法人ベターリビング「貯湯利用における実使用実態把握及びその評価研究委員会」にて取得した本州におけるデータ[3]も記載する．一次エネルギー削減量はNEDO・NEFによる大規模実証[2]時のCHP評価と同様に{（発電電力量÷電力換算係数＋排熱利用量÷ボイラ熱効率)－CHP燃料消費量}とした．寒冷地サイトにおける一次エネルギー削減量は，1,314～3,431 kWh/年と高い結果となった．全データを比較すると，関東8サイトにおける一次エネルギー削減量が最も高い結果となった．これは，同サイトにおける電力・給湯負荷が他と比べ高いことに起因する．一方で，寒冷地域と本州サイトの比較として，電力・給湯負荷が近い11A邸と中国6サイトを比較すると，一次エネルギー削減量・率ともに11A邸が上回っている．また，関東9と11C邸を比較すると，11C邸の方が電力・給湯負荷が低いにも関わらず，一次エネルギー削減量・率とも高い結果となっている．また，発電および熱寄与率については寒冷地サイトの方が高い傾向にある．これは図6. 4で示した通り，寒冷地における家庭の熱電比が本PEFC-CHPに適していることに起因し，同等のエネルギー負荷であれば寒冷地の方が家庭用燃料電池システムの導入効果が高くなることが示唆される．

また，環境性についても評価を行ったところ，CO_2削減率が29.3%～37.3%と高い値であった. 削減率の計算式は, NEDO・NEFによる大規模実証[2]時のCHP評価と同様に［1－{CHP燃料消費量×燃料のCO2原単位÷(発電電力量×火力発電CO_2原単位＋排熱利用量÷ボイラ熱効率×燃料のCO2原単位)}］×100とした．燃料のCO_2原単位は0.05125kg-CO2/MJ，火力発電CO_2原単位は0.69kg-CO_2/kWhとした．



	11A邸	11B邸	11C邸	11D邸	中国6（参考）	関東8（参考）	関東9（参考）
電力負荷	5,569	4,986	6,529	7,854	5,607	9,125	7,016
給湯負荷	4,594	4,836	3,303	6,474	4,147	10,747	4,928

図 6. 10 各世帯の年間一次エネルギー削減量

経済性については，光熱費（電気代＋ガス代）の削減効果が年間50～89千円・平均69千円（電気料金：北海道電力・従量電灯B，ガス料金：北海道ガス・ゆ～ぬっく24ネオおよび家庭用コージェネ料金，2014年2月時点の料金，暖房負荷を含めた試算）となった．投資回収年数を10年と仮定すると，従来型の機器に対するイニシャルコストの増額が50万円以内だと全てのサイトで経済性が成り立つことになる．

図6. 11，図6. 12に，各世帯の月別電力負荷・給湯負荷と一次エネルギー削減量の関係を示す．電力負荷・給湯負荷いずれも一次エネルギー削減量と高い相関性があり，エネルギ

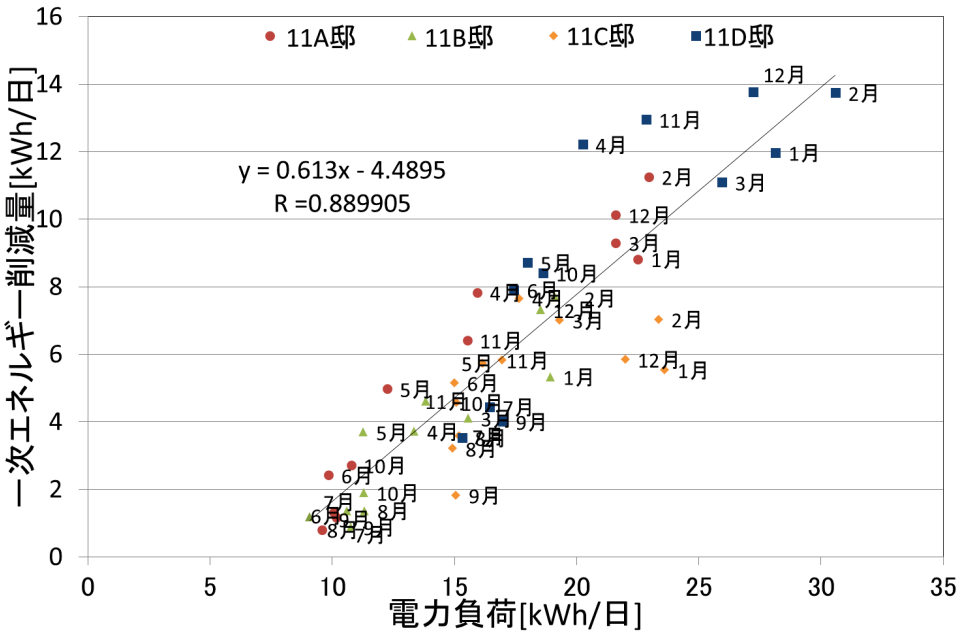


図 6. 11　一次エネルギー消費量と電力負荷

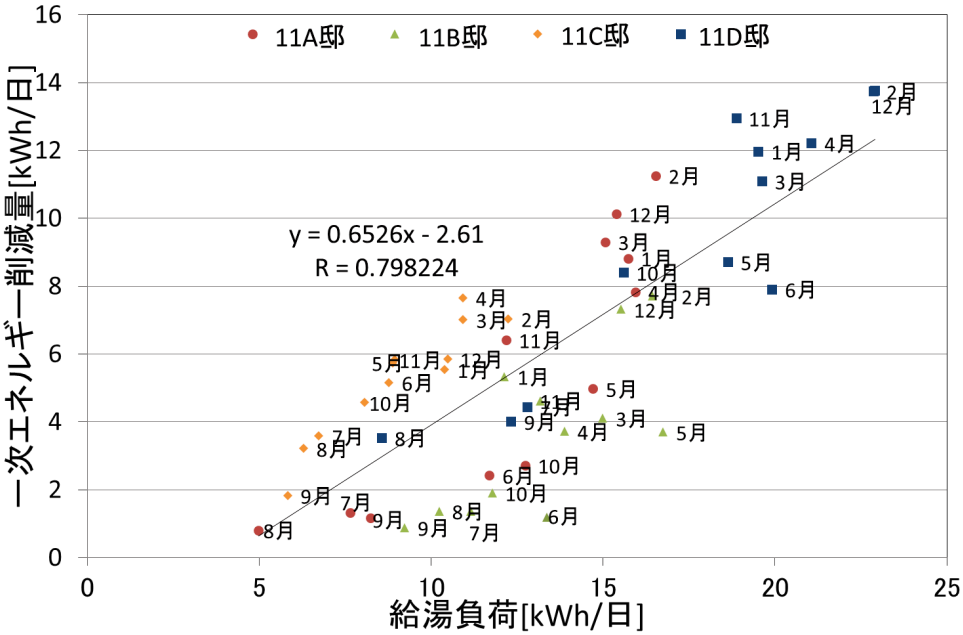


図 6. 12　一次エネルギー消費量と給湯負荷

一負荷が高いサイト程，家庭用燃料電池システムの導入効果が高くなる結果となった．

さらに，電力・給湯負荷を説明変数，一次エネルギー削減量を目的変数として重回帰分析を行った．

X_1：月別電力負荷[kWh/day]，X_2：月別給湯負荷[kWh/day]

Y：月別一次エネルギー削減量[kWh/day]

$Y=0.442013\times X_1+0.329135\times X_2-5.89789$

重相関係数R=0.944676

上記の通り，電力負荷・給湯負荷と一次エネルギー削減量の相関性が非常に高い結果となった．さらなるデータ収集を行い重回帰分析式の精度を向上させることにより，寒冷地における一般戸建住宅のエネルギー使用状況から家庭用燃料電池システムの省エネ効果を簡易に予測することが可能になると言える．

6.6　まとめ

寒冷地における家庭用燃料電池システムの性能評価を行うことを目的として，熱需要量の異なる複数の世帯におけるフィールド実測を実施し，以下の知見が得られた．

(1) 寒冷地においては冷房需要が少なく，夏期の電力負荷が低い特徴がある．このため，夏期に電力需要の上がる非寒冷地域と比較して，年間を通して熱電比が高くなる傾向にある

(2) 発電寄与率は，NEDO・NEFの実績値より高い結果となった．これは，大規模実証時よりも機器の発電熱効率が向上したことと，寒冷地における熱電比の高さに起因する．

(3) 寒冷地サイトにおける一次エネルギー削減量は，1,314～3,431 kWh/年と高い結果となった．また，同程度のエネルギー負荷の本州サイト実績と比較すると，寒冷地サイトの方が高い省エネルギー性を示した．

(4) 電力および給湯負荷と一次エネルギー削減量には，高い相関性が見られた．今後，データを蓄積し重回帰分析の精度を高めることにより，エネルギーの使用状況から家庭用燃料電池システムの導入効果（一次エネルギー削減量）を簡易に予測することが可能になると言える．

参考文献

1) M. Itagaki；Environment conscious residential energy use by fuel cell CHP technology, Proceedings of the 34th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings－CIB W062 2008(Sep., 2008), 81-94.

2) 新エネルギー財団：平成 21 年度定置用燃料電池大規模実証事業報告書 (http://www.nef.or.jp/happyfc/progress.html)，著者閲覧日：平成 25 年 11 月 6 日

3) 濱田靖弘・村川三郎・高橋功多・北山広樹・鍋島美奈子・高田宏：家庭用燃料電池システムの稼働特性と性能評価に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集(190)，pp.21-29

第７章

固体酸化物形燃料電池による家庭用熱電併給システムの寒冷地利用に関する研究

7.1　概説

本章では，寒冷地における固体酸化物形燃料電池を導入した家庭用熱電併給システムの導入効果を明らかにすることを目的として，実験と解析を行う．まず，7.2 節で機器の仕様について述べ，7.3 節で基本性能試験結果を示す．次いで，7.4 節で試験モードおよび実測負荷を用いた実証試験の結果を示し，評価を行う．さらに，7.5 節では基本性能試験結果を基に作成した解析ツールについて述べ，各種実証試験結果との差異を評価したうえで，固体酸化物形燃料電池家庭用熱電併給システムの年間の導入効果について評価を行う．最後に，7.6 節でまとめを述べる．

7.2　実験概要

7.2.1　機器仕様

図 7.1，表 7.1 に本システムの概念図と仕様を示す．本システムは燃料電池発電ユニット及び排熱利用給湯ユニットで構成されている．本実験では，燃料電池発電ユニットおよび排熱利用給湯ユニットを専用の小屋内に設置した．燃料電池発電ユニットに関しては，定格出力 700 W，最低出力 100 W 以下，定格発電熱効率 41%（HHV 基準），排熱回収熱効

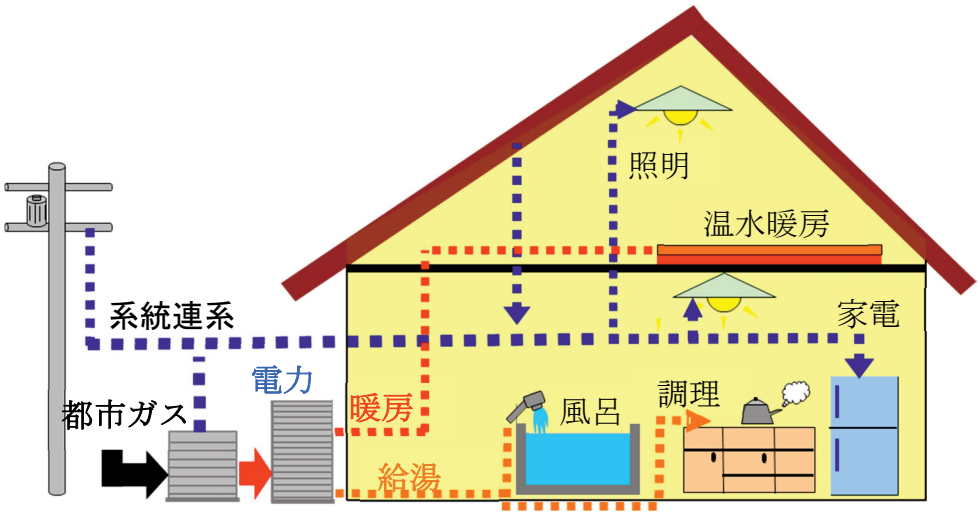


図 7.1 システム概念図

率 36%（HHV 基準）となっており，寸法は幅 570 mm，高さ 960 mm，奥行 350 mm，重量は 91 kg とコンパクトである．運転制御は逆潮なし系統連系で電力負荷に対して追従（電主熱従運転）する．また，SOFC は 24 時間連続運転が基本となっている．発電の際に出る排熱は貯湯槽に貯められ給湯に利用する．給湯負荷を排熱で賄えない場合は湯切れを防ぐために補助ボイラで加熱する．補助ボイラとして非潜熱回収型のボイラを用いている．排熱利用給湯ユニットに関しては，有効タンク容量 70 L，寸法は幅 700 mm，高さ 1700 mm，奥行 350 mm となっており，燃料電池ユニットと同様にコンパクトである．また排熱利用ユニット内に搭載されているラジエータにより，タンクが満蓄時においても連続運転が可能となる．

表 7.1 機器仕様

燃料電池発電ユニット	最大出力	700 W
	最小出力	100 W以下
	定格発電熱効率	41%(HHV)
	排熱回収熱効率	36%(HHV)
	運転制御方法	連続運転（基本）負荷追従
	出力形態	系統連系 逆潮なし
	燃料	13A, 1～2.5 kPa
	設置環境	屋外（-5～40℃）
	寸法	幅：570 mm, 高さ：960 mm, 奥行：350 mm
	重量	91 kg
排熱利用給湯ユニット	タンク容量	70 L
	設置方式	屋外式据置型・壁面近接設置形
	寸法	幅：700 mm, 高さ：1700 mm, 奥行：300 mm
	重量	105 kg（満水時約175 kg）

7.2.2　計測項目および計測システム

図 7.2，表 7.2 に実験装置およびセンサ設置箇所，測定項目を示す．電力量・各種水温・流量・ガス消費量・気温等を 2 秒間隔で収集した．

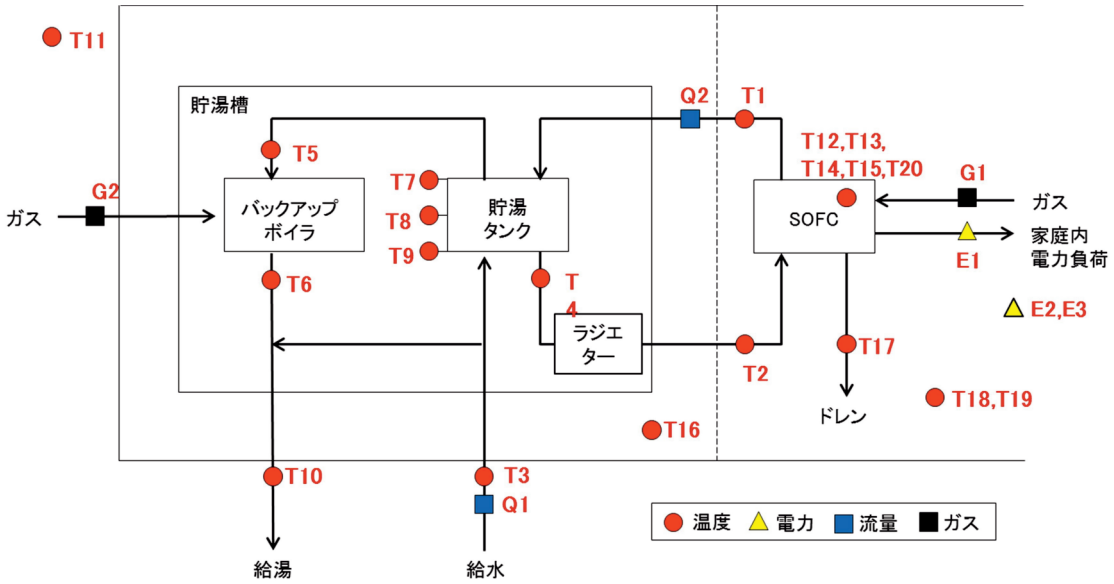


図 7.2 センサ設置箇所

表 7.2 測定項目と測定機器

記号	測定項目	測定機器	測定点数	精度
G1・G2	ガス流量	DC型乾式ガスメータ	2	±0.3%
E1	発電電力量	電力トランスデューサ	1	±2%
E2	FC受電電力量	電力トランスデューサ	1	±2%
E3	世帯負荷電力量	電力トランスデューサ	1	±2%
T1・T2	FC熱回収温度(往き・戻り)	T型熱電対	2	±0.5℃
T3	給水温度	T型熱電対	1	±0.5℃
T4	タンク出口温度	貯湯組み込み(張付)	1	±0.5℃
T5・T6	BU入口・出口温度	貯湯組み込み(張付)	2	±0.5℃
T7～T9	タンク温度	貯湯組み込み(張付)	3	±0.5℃
T10	給湯温度	貯湯組み込み(張付)	1	±0.5℃
T11	気温	T型熱電対	1	±0.5℃
T12	FC上部温度	T型熱電対	1	±0.5℃
T13	FC背面温度	T型熱電対	1	±0.5℃
T14	FC側面温度	T型熱電対	1	±0.5℃
T15	FC排気温度	T型熱電対	1	±0.5℃
T16	貯湯槽室内温度	T型熱電対	1	±0.5℃
T17	ドレン温度	T型熱電対	1	±0.5℃
T18	FC室内温度	T型熱電対	1	±0.5℃
T19	FC吸気温度	T型熱電対	1	±0.5℃
T20	排ガス出口熱交温度	K型熱電対　組み込み	1	±1.5℃
Q1	給水流量	羽根車式流量計	1	±2%
Q2	排熱回収流量	電磁式流量計	1	±2%

7.3　実験概要

7.3.1　負荷追従特性

図 7.3 に交流端発電出力が 124 W から 440 W まで上昇した時の発電状況を，図 7.4 に 670 W から 385 W まで下降した時の発電状況を示す．上昇時に関しては，追従を開始してから約 70 秒で 440 W に達し，追従速度は約 4.5 W/s となった．一方，下降時に関しては追従を開始してから約 4 秒後には安定して発電しており，追従速度は約 71 W/s となり，上昇時と比較して，非常に早い結果となった．

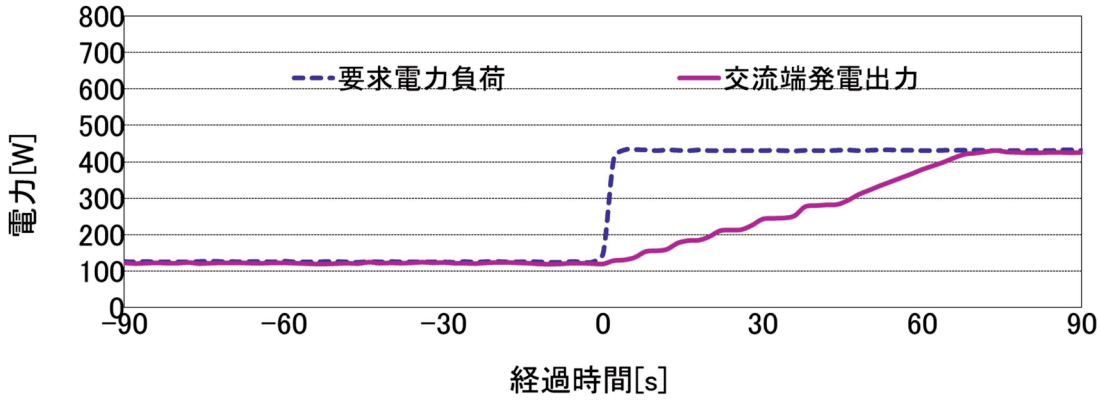


図 7.3 負荷追従状況（上昇時）

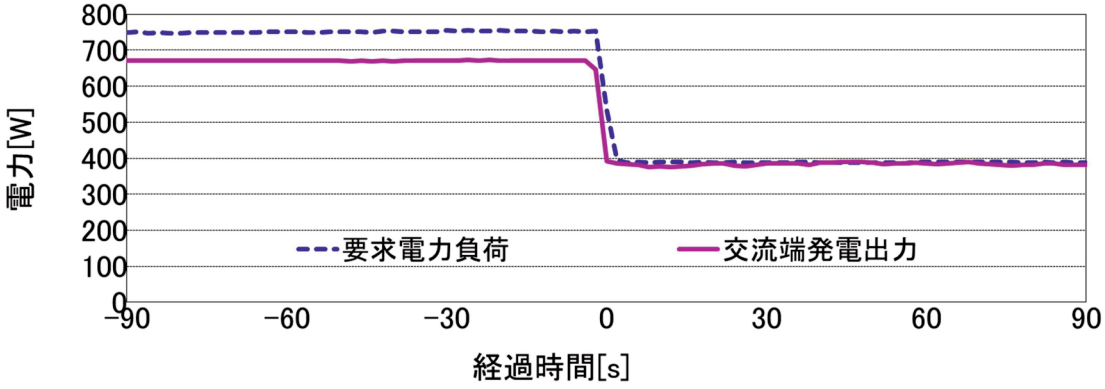


図 7.4 負荷追従状況（下降時）

7.3.2　起動・停止特性

図 7.5，図 7.6 に起動および停止の運転状況を示す．起動試験に関しては冷機時（発電が停止してから 24 時間以上経過後）に行い，交流端発電出力が約 650 W に到るまで行った．起動を開始してから約 98 分後に発電を開始し，この間に約 10 MJ の原燃料消費量と約 0.88 MJ の電力消費量を要した．発電開始から 100 秒で 230 W（追従速度：2.3 W/s）に達し，その後，約 45 分で 620 W（追従速度：0.15 W/s）に達した．起動を開始してから約 150 分後に出力 650 W に到った．停止試験に関しては定格発電出力付近の 680 W 時に停止させた．停止指示を出した 4 分後には発電出力は 0 W となった．停止後の原燃料消費量および電力消費量は，それぞれ約 2.5 MJ，約 0.50 MJ であった．

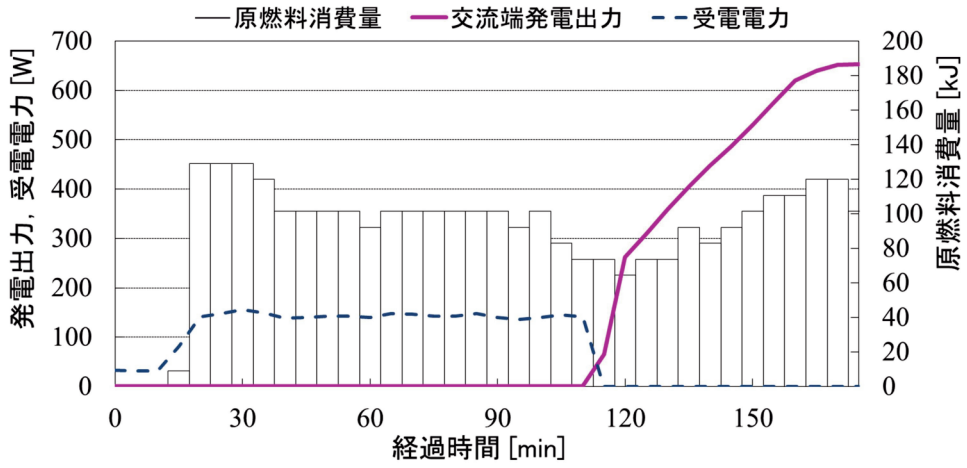


図 7.5 起動状況

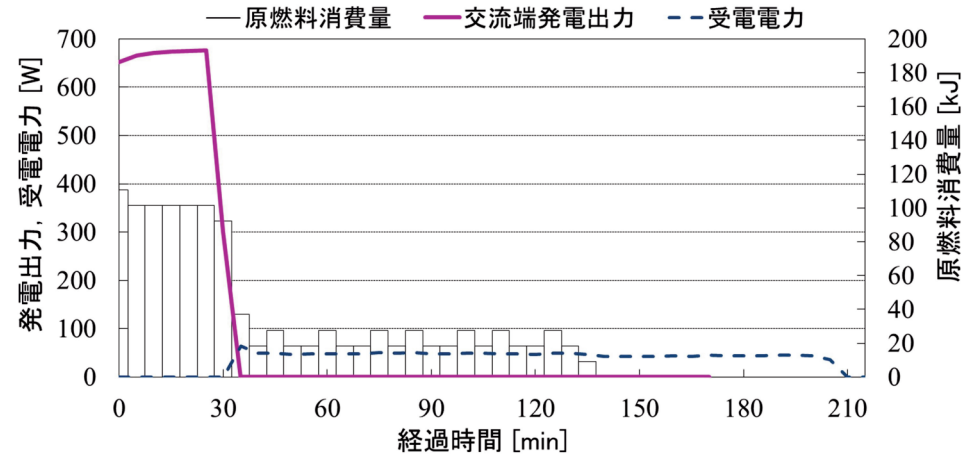


図 7.6 停止状況

7.3.3　発電・排熱回収特性

表 7.3 に各出力における運転結果を示す（HHV 基準）．定格出力付近では，発電熱効率（補機動力消費分を差し引いた実動効率，以下同様）が 40.4%，排熱回収熱効率が 35.8%であり，総合熱効率は 76.2%とほぼ仕様値通りの値を示した．また，負荷率の低い出力 100 W 付近でも 17.6%と比較的高い発電熱効率を示している．

表 7.3 各出力における運転結果

交流端発電出力	W	115	217	297	394	506	615	678
原燃料消費量	MJ/h	2.35	3.04	3.80	4.10	5.02	5.76	6.04
排熱回収水入口温度	℃	24.4	22.7	22.8	23.3	19.2	21.1	22.6
排熱回収水出口温度	℃	71.4	64.4	66.0	74.4	74.1	74.0	74.3
排熱回収水温度差	℃	47.0	41.6	43.2	51.1	55.0	53.0	51.7
排熱回収熱出力	MJ/h	0.69	0.95	1.25	1.33	1.95	2.10	2.16
交流端発電熱効率	%	17.6	25.6	28.3	34.6	36.2	38.5	40.4
排熱回収熱効率	%	29.3	31.3	33.0	32.5	38.9	36.5	35.8
総合熱効率	%	46.9	56.9	61.3	67.1	75.1	75.0	76.3

7.4　実証実験

7.4.1　実証実験概要

様々なエネルギー負荷条件における SOFC-CHP の一次エネルギー削減効果の比較および次節で行う解析の妥当性を確認することを目的として，実証実験を行う．まず，改正省エネルギー法（エネルギーの使用の合理化に関する法律の一部を改正する法律）[1]における基準一次エネルギー消費量の評価に採用されている試験負荷モード（北海道）を用いた実験を実施した．試験負荷モードの電力・給湯負荷は 5 分間隔のデータを用いている．電力負荷は生活スケジュールの違いにより「平日」，「休日在宅」，「休日不在」の 3 パターンがある．図 7.7 に電力負荷の内訳を示す．図 7.8 に給湯需要パターンの変動を重視した複数日モードである修正 M1 モード（改正省エネルギー法で採用）[2]における給湯負荷を示す．修正 M1 モードは，「平日(小)」，「平日(大)」，「休日在宅(小)」，「休日在宅(大)」，「休日不在(小)」，「休日不在(大)」の 6 パターンからなる複数日モードであり，平均・変

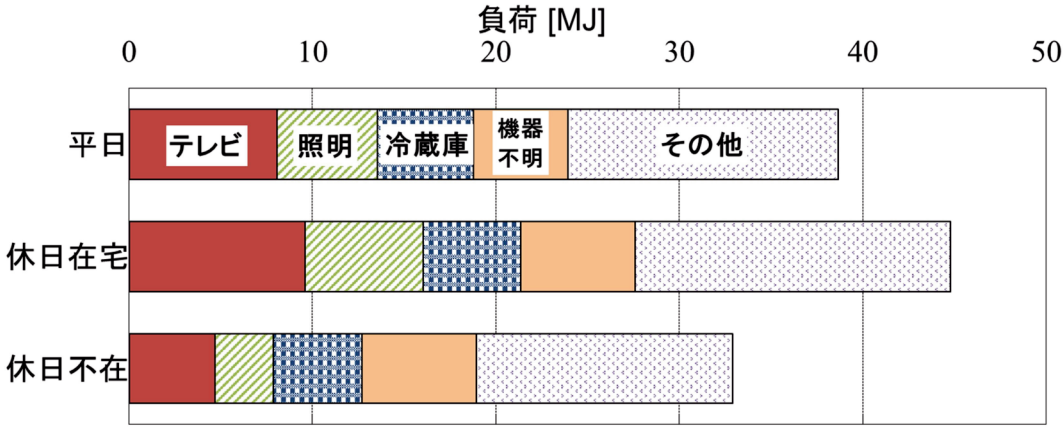


図 7.7 電力負荷内訳

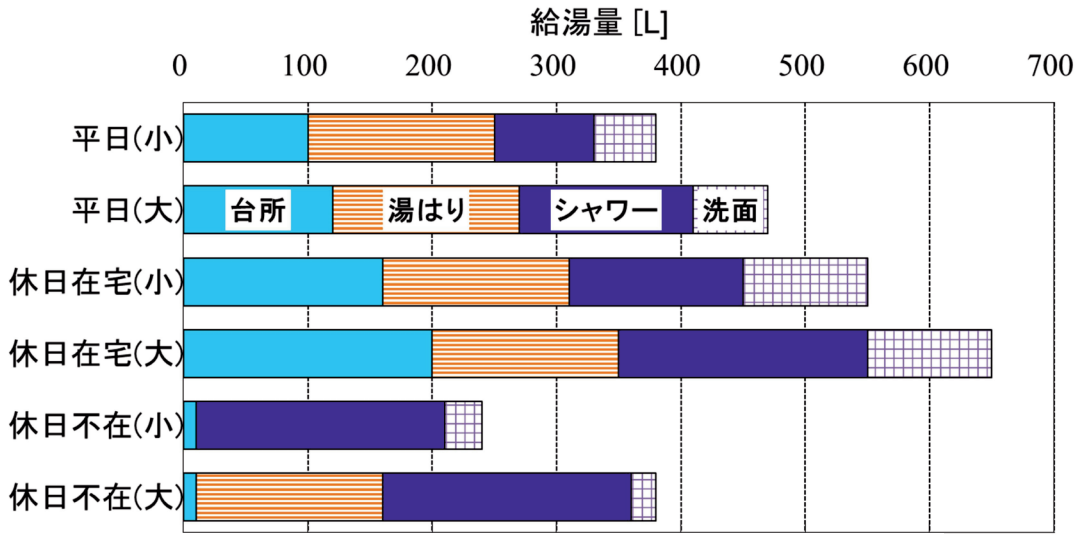


図 7.8 使用湯量内訳

動が実測結果より設定されたものである．次いで，前述の基準一次エネルギー消費量との比較を行うことを目的として，既往のエネルギー調査[3]等で得られた札幌地区の実負荷（表 7.4：世帯 02～62 は札幌，世帯 63～72 は本州以南）のうち，出来るだけ幅広く各グリッドに近い 10 世帯を選定し実証実験を実施した．本来は各世帯の年間負荷を用いた評価を行う必要があるが，今回は実験日程の制約から，各世帯の評価期間を 1 週間と設定している．また，検討対象となる季節により結果の数値は異なってくるが，今回は代表週としてそれぞれの世帯における中間期（５・６・９・１０月）の平均負荷に近い 1 週間を選定し，試験を実施した．実験室における模擬電力負荷は電子負荷装置を，模擬給湯負荷は給湯電磁弁の開閉を制御することで発生させた．実負荷の電力・給湯負荷は 30 秒間隔のデータを用いている．改正省エネルギー法における電力・給湯負荷に対して，それぞれ-40%～+80%・-40%～+40%の領域を点線で示すとともに，新エネルギー・産業技術総合開発機構（New Energy and Industrial Technology Development Organization：NEDO）・新エネルギー財団（New Energy Foundation：NEF）の実測による 205 世帯平均値の負荷[4]を実線で示している．ここで，北海道内世帯ではエアコンの普及率が低いことを踏まえて，改正省エネルギー法の電力負荷から空調用を除いており，その値は札幌地区の実測電力負荷と比較的近い値を示している．一方，空調用を含めた場合（東京）や空調用も含まれている NEDO・NEF の 205 世帯平均電力負荷に関しては，番号 63 以降でそれに近い値をとる世帯もある．本研究は，SOFC-CHP の寒冷地における特性を明らかにすることを目的としており，札幌の代表世帯 10 軒を選定し，実験を行ったものである．

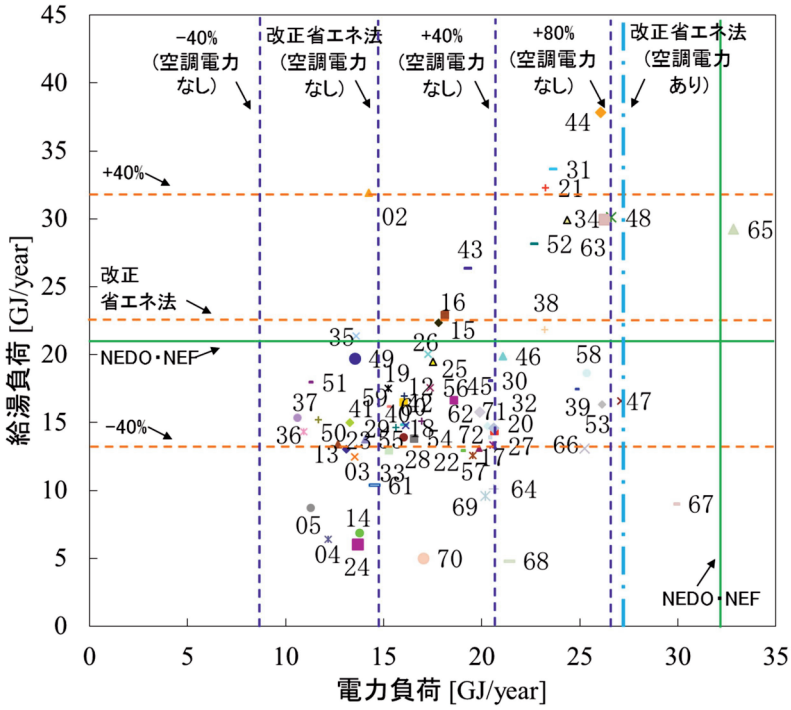


表 7.4 検証対象の年間負荷

7.4.2　実証実験結果

(1)　試験負荷モードを用いた実験

前述の改正省エネルギー法における電力負荷（空調除く），給湯負荷を標準として，それぞれ-40%～+80%・-40%～+40%の範囲において実験を行った．図 7.9，図 7.10 に標準負荷の実験期間の電力収支，熱収支を示す．一週間の総発電量 230.4 MJ，受電電力量は 24.2 MJ となり，電力需要の 89.5%を燃料電池により供給する結果となった．受電電力が常に存在するのは，逆潮防止に配慮した制御によるものである．また，排熱利用量は 173.9 MJ，補助ボイラ利用量は 148.8 MJ,排熱寄与率は 53.8%となった.図 7.11 に標準負荷の場合の SOFC-CHP

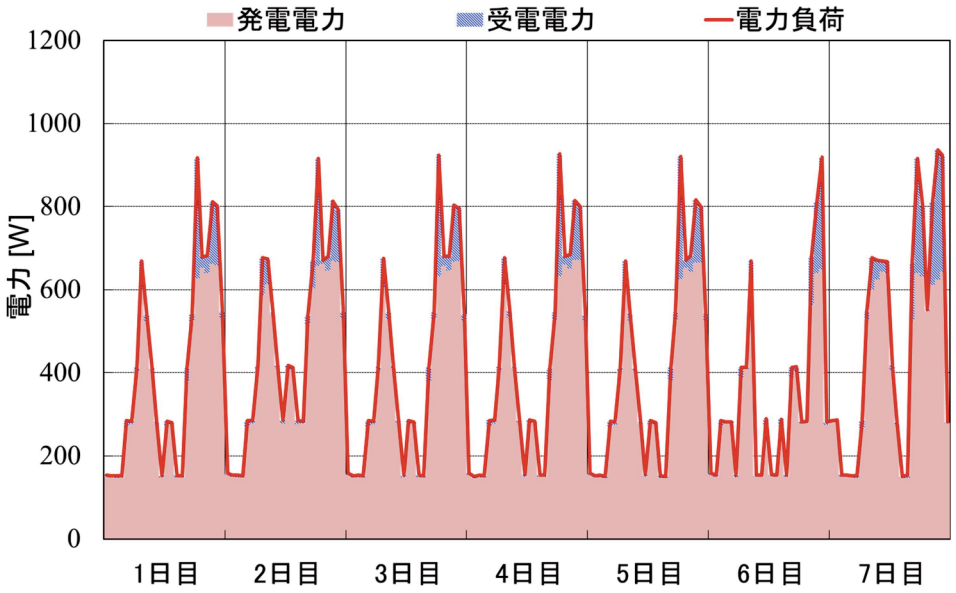


図 7.9 電力収支（電力負荷：標準　給湯負荷：標準）

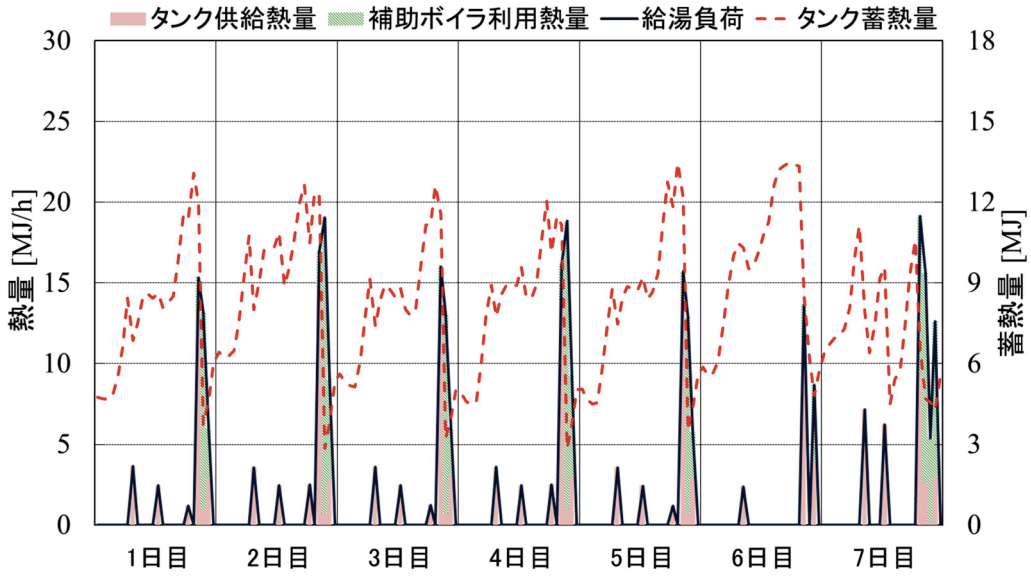


図 7.10 熱量収支（電力負荷：標準　給湯負荷：標準）

および従来方式（比較対象：電力換算係数 9.76 MJ/k・Wh，ボイラ熱効率 75%）[1)]の一次エネルギー消費量および一次エネルギー削減率を示す．削減量は平均で 21.3 MJ/day，削減率は平均で 16.3%となった．

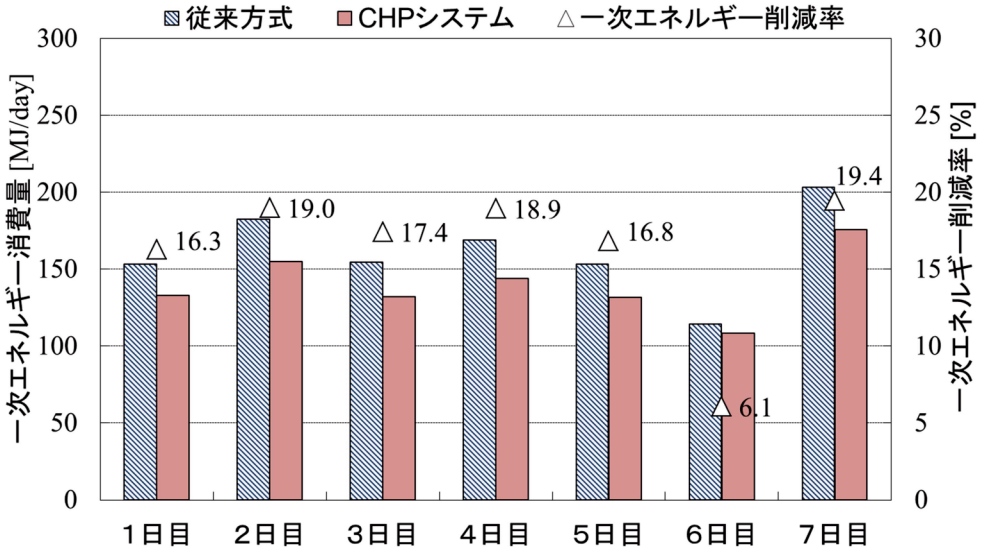


図 7.11 省エネルギー性
（電力負荷：標準 給湯負荷：標準）

(2)　　戸建て住宅実負荷を用いた実験

図 7.12，図 7.13 に電力負荷が NEDO・NEF の 205 世帯平均値に比較的近い世帯 53（図-9）の実験期間の電力収支，熱収支を示す．当該世帯は，寒冷地の平均的集団から離れた位置にあり寒冷地代表とは言えないが，近年北海道においてもエアコンの普及台数が増加傾向にあることから，一例として取り上げたものである．一週間の総発電量 331.1 MJ，受電電

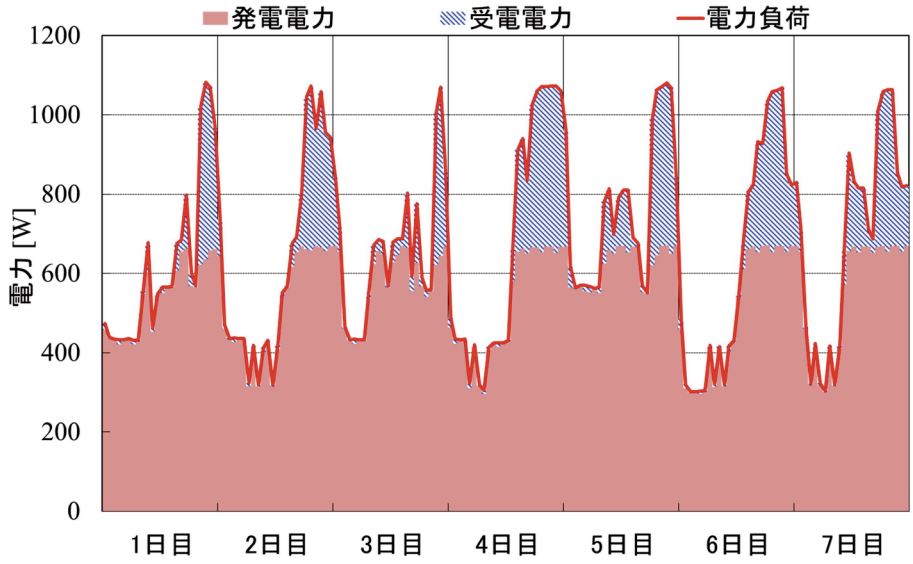


図 7.12 電力収支（世帯 53）

力量は 70.6 MJ となり，電力需要の 82.4%を燃料電池により供給する結果となった．また，排熱利用量は 193.3 MJ，補助ボイラ利用量は 81.7 MJ，排熱寄与率は 70.3%となった．図 7.14 に世帯 53 における SOFC-CHP および従来方式の一次エネルギー消費量および一次エネルギー削減率を示す．削減量は平均で 40.0 MJ/日，削減率は平均で 23.7%となり，大きな削減効果を得ることができた．図 7.15 に実験対象とした戸建て住宅における省エネルギー性を示す．縦軸を給湯負荷，横軸を電力負荷として，各世帯の負荷特性をグラフ内の位置で表している．グラフ内の数値は日平均一次エネルギー削減量を示している．さらに，戸建て住宅の実験結果との比較を目的として，試験負荷モードの 2 パターン（「電力：標準，給湯：標準」…①，「電力：+80%，給湯：+40%」…②，以下それぞれを①，②と表記）の実験結果も示している．①は北海道基準一次エネルギー消費量を，②は東京基準一次エネルギー消費量を想定している．SOFC-CHP は，電力負荷の大きい本州以南の世帯に適していると考えられるが，本システムを寒冷地に利用した場合に得られる効果を検証する．前述の通り，検証範囲は中間期に限定されるものの，対象とした戸建て住宅における日平均一次エネルギー削減量は 10.0 ～49.1 MJ/日となり，実世帯においても大きな削減効果があることを確認した．また，①と②における一次エネルギー削減量はそれぞれ，21.3 MJ/日，43.8 MJ/日であり，何れにおいても高い削減効果が得られた．

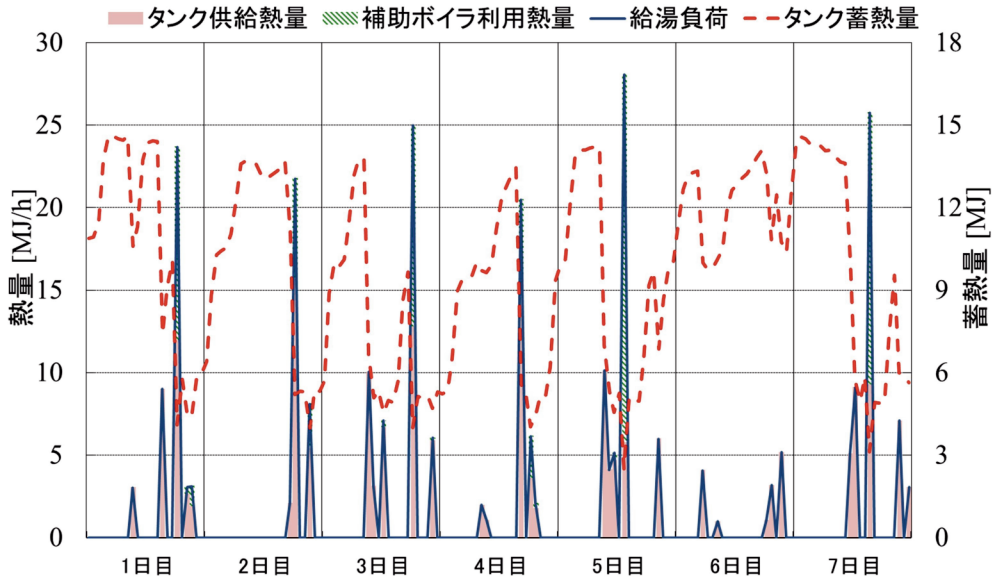


図 7.13 熱量収支（世帯 53）

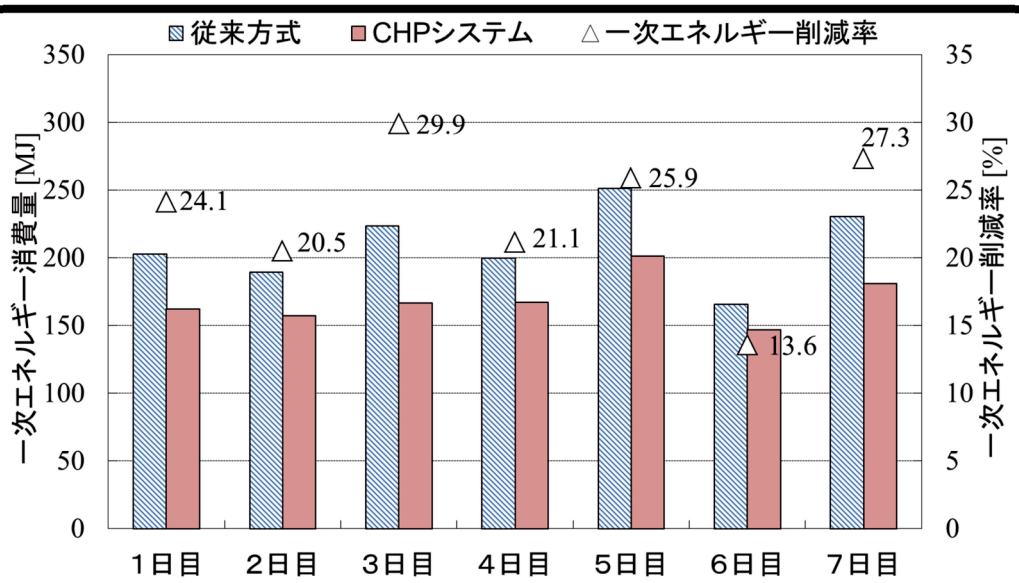


図 7.14 省エネルギー性（世帯 53）

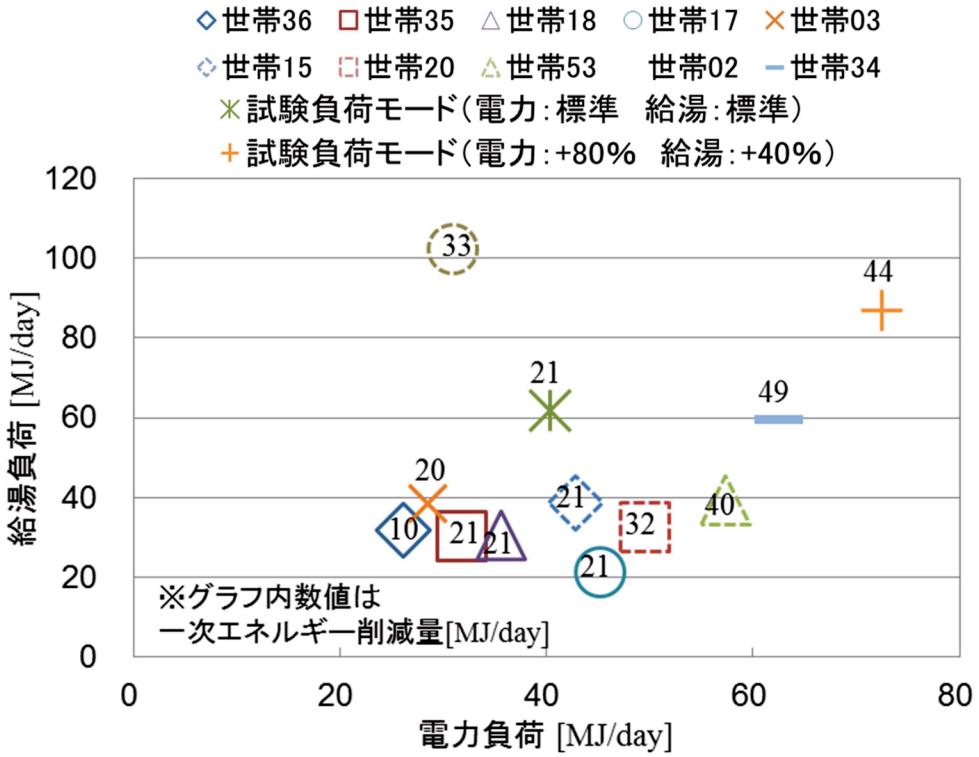


図 7.15 省エネルギー性（戸建て住宅）

7.5　エネルギー需要特性と導入効果の解析

7.5.1　解析概要

SOFC-CHP システムを導入した場合の省エネルギー効果に関する解析を実施した．実機同様の部分負荷特性・負荷追従特性の性能値を与え，電主熱従による連続運転を行うものとした．蓄熱槽は温度成層型を想定し，簡易的に高温域と低温域に分割して計算する．貯湯槽解析は，筆者らが開発に携わった既報 [5)~7)]における解析ツールと同様である．また，表 7.5 に示す各種 CHP システムの性能値を用いた導入効果の解析を行った．SOFC については，今回の実験を行った 2008 年機に加えて 2010 年機も取り上げた．PEFC-CHP に関しては，既報 [8)]における CHP 解析プログラムを利用した．解析手法の詳細は既報 [8)]によるが，大略・要点を注［注 1)］に示す．

表 7.5 構成機器性能

	単位	SOFC		PEFC		
		2008年機	2010年機	機種A	機種B	機種C
最大出力	[W]	700	700	1000	700	750
最小出力	[W]	100以下	100以下	300	250	250
発電熱効率（最大出力）	[%]	40	43	33	32	36
排熱回収熱効率(最大出力)	[%]	36	42	47	45	45
貯湯槽容量	[L]	70	70	200	200	200
運転形態		電力･給湯		電力･給湯		
非潜熱回収型ボイラ	[%]	給湯	75	暖房		75
潜熱回収型ボイラ	[%]	給湯	91.8	暖房		88.5

7.5.2　実験結果と解析結果の比較

試験負荷モードの標準負荷を用いた実験および解析の結果に関して比較を行う．図 7.16，図 7.17 にそれぞれ，貯湯槽平均温度と排熱回収水往き温度の比較を示す．実験値と比較して高い再現性が得られている．また，図 7.18 に発電電力量，排熱利用量，原燃料消費量の比較を示す．各値の相対誤差は，発電電力量が 2.62%，排熱利用量が 3.72%，原燃料消費量が 1.09%と小さく，実験と解析結果は概ね一致した．図 7.19 に省エネルギー性の比較を示した.一次エネルギー削減量は 18.6 MJ/日，19.6 MJ/日となり，削減率は 11.4%，12.2%となった．6 日目に計算値と実験値の差がみられるが，これは 6 日目の排熱利用量が計算値 20.1 MJ，実験値 17.8 MJ と他日と比較して差が若干大きくなったことが原因である．排熱利用量の違いの原因は，6 日目の昼間の時間帯における給湯使用量が少ない影響で，実験では夕方以降にタンクが満蓄となりラジエータによる放熱が行われているが，計算では貯湯槽の蓄熱可能量に違いが生じて蓄熱が続けられており，排熱の寄与率が高めに出たためである．

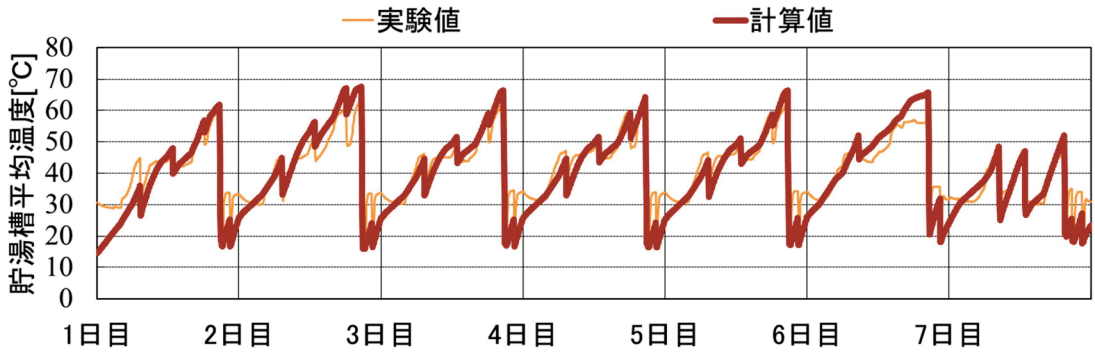


図 7.16 貯湯槽平均温度の比較

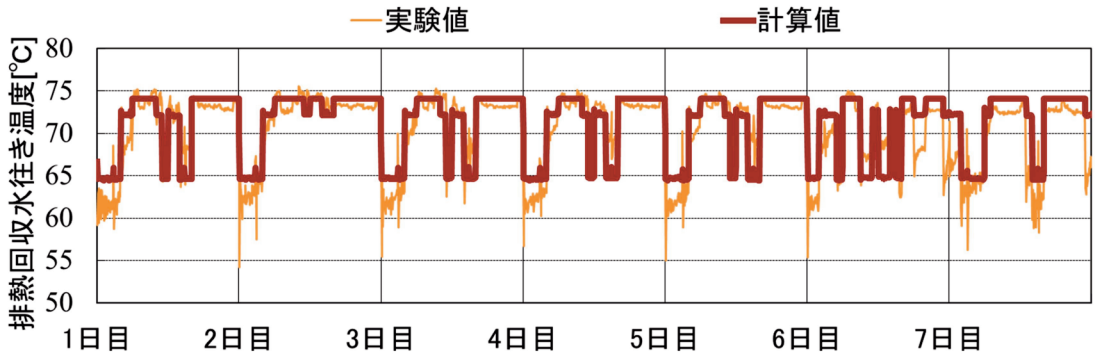


図 7.17 排熱回収水往き温度の比較

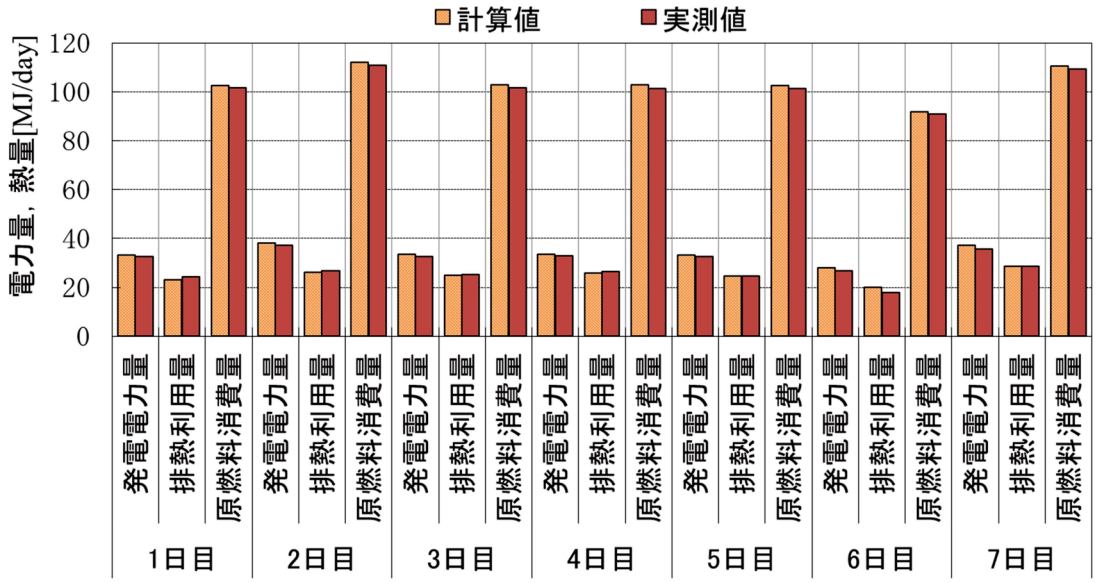


図 7.18 試験負荷モードにおける省エネルギー性
（非潜熱回収型・潜熱回収型ボイラ）

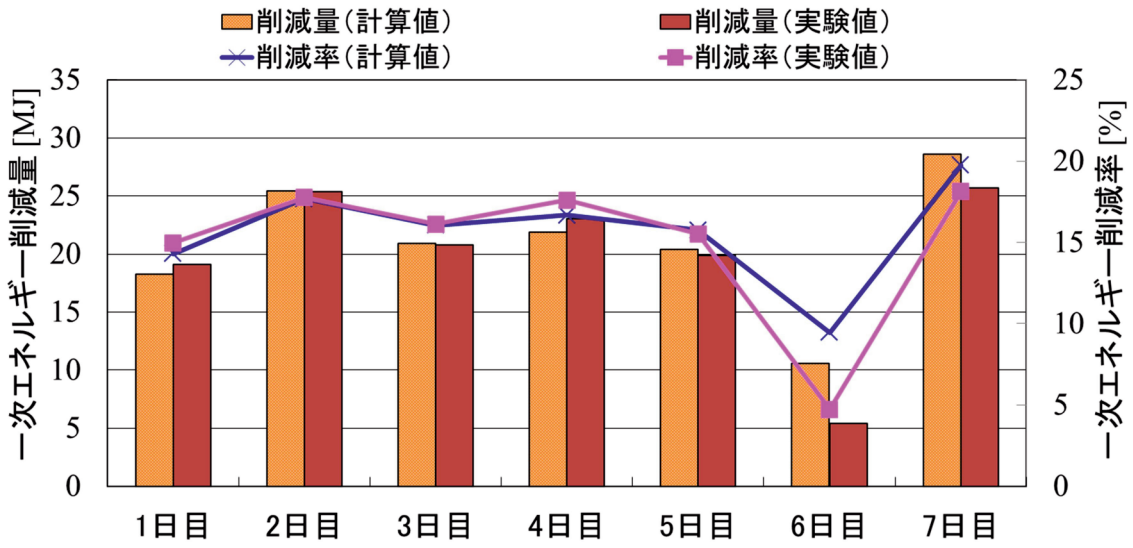


図 7.19 戸建て住宅実負荷における省エネルギー性

7.5.3　SOFC-CHP 導入効果の年間評価

図 7.20, 図 7.21 に試験負荷モードおよび戸建て住宅実負荷を用いて補助ボイラに非潜熱回収型もしくは潜熱回収型ボイラを採用した場合の年間の省エネルギー性を示す．試験負荷モードにおいて, 一次エネルギー削減量は非潜熱回収型ボイラの場合は 3.3～14.3 GJ/年, 潜熱回収型ボイラの場合は 12.7～26.6 GJ/年であった．また，戸建て住宅実負荷において，一次エネルギー削減量は非潜熱回収型ボイラの場合は 1.0～20.6 GJ/年，潜熱回収型ボイラの場合は 7.5～28.4 GJ/年であり，いずれの条件のモードおよび世帯においても大きな削減効果が得られた．また，この際の光熱費（電気代＋ガス代）の削減効果は，非潜熱回収型ボイラの場合は年間 40～126 千円・平均 81 千円，潜熱回収型ボイラの場合は年間 41～135 千円・平均 84 千円（電気料金：北海道電力・従量電灯 B，ガス料金：北海道ガス・ゆ～ぬっく 24 ネオおよび家庭用コージェネ料金，2014 年 2 月時点の料金，実測の暖房負荷を含めた試算）となる．投資回収年数を 10 年と仮定すると，従来型の機器に対するイニシャルコストの増額が 40 万円で全てのサイト，60 万円で 8 割以上のサイトで経済性が成り立つことになる．

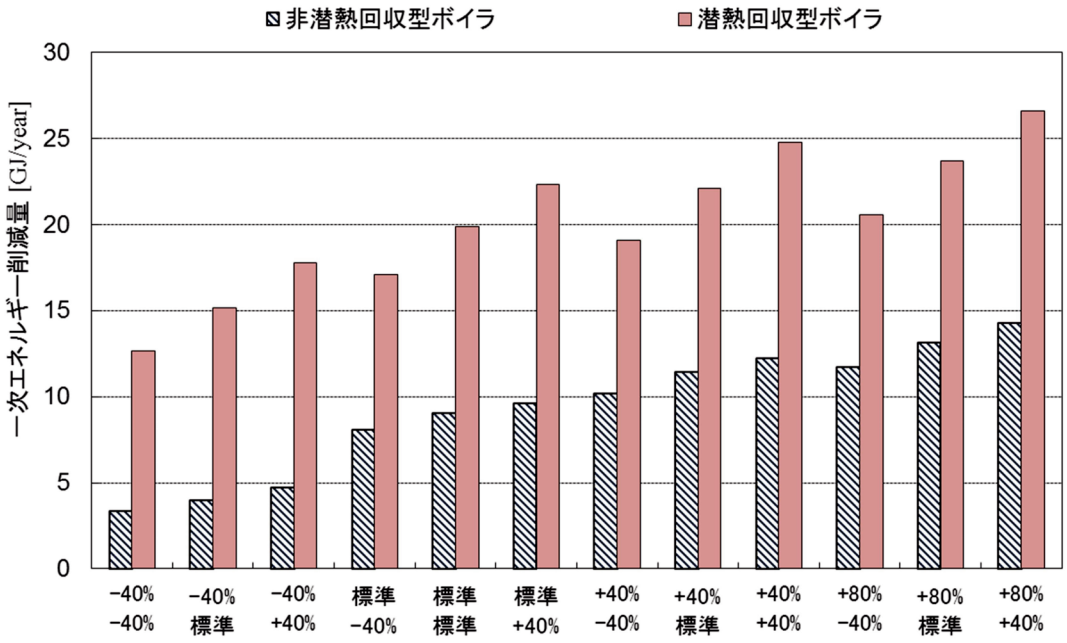


図 7.20 試験負荷モードにおける省エネルギー性
（非潜熱回収型・潜熱回収型ボイラ）

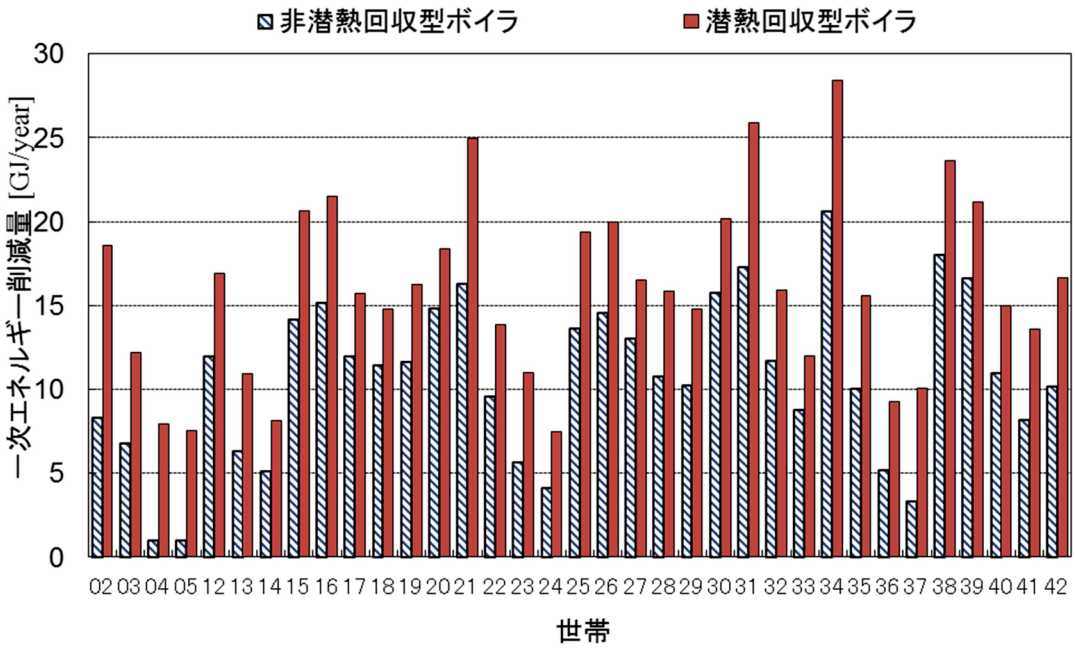


図 7.21 戸建て住宅実負荷における省エネルギー性

7.5.4　CHP 最適機器とエネルギー需要特性

図 7.22，図 7.23 に従来方式のボイラを非潜熱回収型もしくは潜熱回収型とした場合の各世帯における年間一次エネルギー削減量を示す．また，一次エネルギー削減量が SOFC を導入した際に最大となった世帯番号を丸で囲って示している．SOFC（2010 年機）の削減量が最も多くなった世帯が 30 世帯，PEFC（機種 A）が 1 世帯，PEFC（機種 B）が 1 世帯，PEFC（機種 C）が 3 世帯となり，検討対象において SOFC の優位性が示されている．また，従来方式のボイラを潜熱回収型とした場合，対象全体では削減量が少ない世帯・機器でも 3.4 GJ/年，削減量の多い世帯・機器では 22.8 GJ/年であった．図 7.24 に補助ボイラを潜熱回収型ボイラにした場合の SOFC，PEFC が最適機器（一次エネルギー消費量が最も低くなる機器）となるエネルギー需要特性を示す．35 世帯分について月毎の負荷条件に対する最適機器として SOFC，PEFC が選定された場合をプロットしている．プロット数は 35 世帯×12 ヶ月で 420 個である．PEFC が最適となったプロットは僅かに 4 個で，SOFC 導入による全般的な優位性が示されている．また，SOFC は負荷が小さい場合においても高い導入効果を示している．その理由として，PEFC よりも発電熱効率が高く，最小出力が低いこと等が挙げられる．各機器の出現頻度は SOFC が 99%，PEFC が 1%となり，電力・給湯負荷によらずほぼ全ての世帯が SOFC-CHP が最適となった．

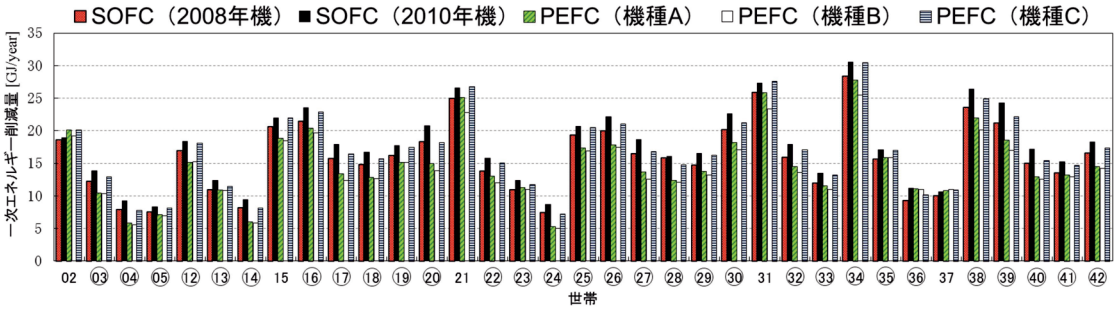


図 7.22　一次エネルギー削減量（従来方式ボイラ：非潜熱回収型）

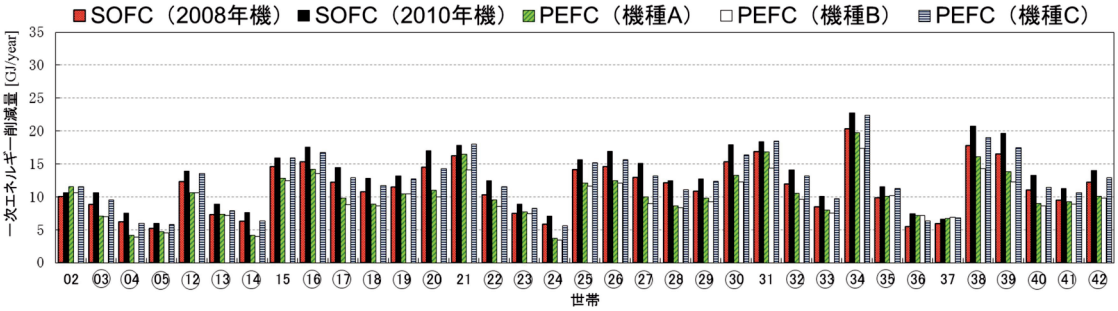


図 7.23　一次エネルギー削減量（従来方式ボイラ：潜熱回収型）

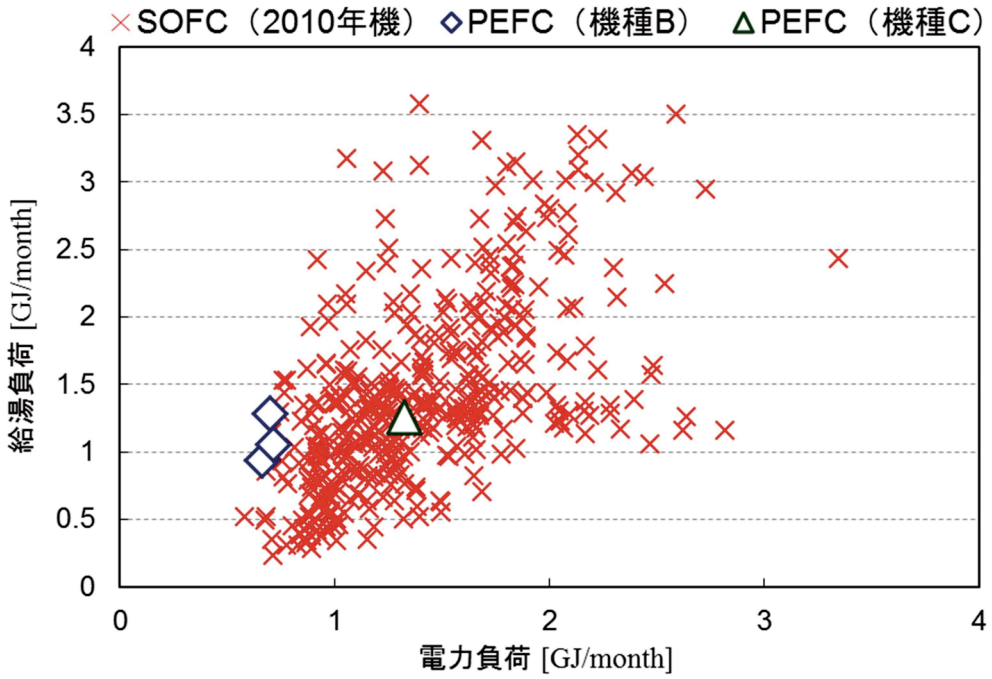


図 7.24 SOFC, PEFC-CHP が最適となるエネルギー需要特性
（潜熱回収型ボイラ）

7.6　まとめ

(1)　SOFC-CHP システムの部分負荷特性，負荷追従特性，起動・停止特性，発電・排熱回収特性に関する基本性能試験を実施し，安定的に発電出力が得られることを確認した．負荷変動に対する追従速度は上昇時約 4.5 W/s，下降時約 71 W/s であった．発電・排熱回収特性に関しては，発電熱効率 40.4%（HHV），排熱回収熱効率 35.8%（HHV）となり，ほぼ仕様値通りの高い値を示した．

(2)　寒冷地戸建て住宅における実使用を想定した実証実験を実施した．一次エネルギー削減量は 10.0～49.1 MJ/day となり，いずれの世帯においても大きな削減効果があることを確認した．

(3)　SOFC-CHP システムの数値解析を実施し，実証実験と解析結果の比較を行った結果，比較的高い再現性が得られることを確認した．

(4)　試験モードによる導入効果の年間評価を実施した．補助ボイラに非潜熱回収型ボイラ，潜熱回収型ボイラを使用した場合の年間一次エネルギー削減量は，それぞれ 3.3～14.3 GJ，12.7～26.6 GJ となった．

(5)　寒冷地戸建て住宅における実使用を想定した導入効果の年間評価を実施した．補助ボイラに非潜熱回収型ボイラ，潜熱回収型ボイラを使用した場合の年間一次エネルギー削減量は，それぞれ 1.0～20.6 GJ，7.5～28.4 GJ となった．

(6)　SOFC，PEFC を取り上げ，数値解析を実施し，一次エネルギー消費量の観点から最適機器・適正エネルギー需要範囲について検討を行なった．それぞれの機器の出現割合は，SOFC が 99%，PEFC が 1%となり，電力・給湯負荷によらずほぼ全ての世帯が SOFC-CHP が最適となった．

注

注１）プログラムは従来方式計算部と CHP 計算部から構成されており，CHP 計算部には蓄熱制御計算部が含まれている．まず，時刻別の電力負荷，給湯負荷および暖房負荷を入力し，従来方式における一次エネルギー消費量と二酸化炭素排出量の算出を行う．次いで，CHP 計算部の蓄熱制御計算部で蓄熱量・放熱量を求め，商用電源およびその他の構成機器を含む全体の一次エネルギー消費量が最小となる CHP の発電電力量を決定する．CHP を用いた場合の一次エネルギー消費量および二酸化炭素排出量を算出し，削減量・削減率を算出する．蓄熱制御計算部では，各時間における重み付け変数として，蓄熱リスク係数と放熱リスク係数を導入し，蓄熱槽周りの運転計画を予め構築することによって演算負荷の低減を行う．ここで，蓄熱リスク係数 $\phi in(k)$ は非蓄熱時過剰排熱値で，燃料電池定格熱出力と蓄熱槽を有しない場合の燃料電池電主熱従運転時の排熱量と熱需要の差で表される蓄熱可能熱量との差としており，値が大きいほど蓄熱運転のリスクが大きいこととなる．放熱リスク係数 $\phi out(k)$ は非蓄熱時不足排熱値としている．蓄熱運転解析部分では，以下の蓄熱槽目的関数を最小化し，各時刻における蓄熱量，放熱量を決定する．

$$J_{ST}=\sum_{k=0}^{D-1}\left[\left\{\phi_{in}(k)\right\}^{T}Q_{ST}^{in}(k)-\left\{\phi_{out}(k)\right\}^{T}Q_{ST}^{out}(k)\right]\cdot\Delta t \quad \cdots(1)$$

$$\phi_{in}(k)=\frac{H_{FC,\max}-H_{FC,plf}+H_{dd}}{H_{FC,\max}} \quad \cdots(2)$$

$$\phi_{out}(k)=\frac{H_{dd}-H_{FC,plf}}{H_{FC,\max}} \quad \cdots(3)$$

CHP 計算部においては，0-1 混合整数線形計画法を用いて計算を行っている．以下に制約条件および目的関数に関する式を示す.

・商用電力

$$E_{PS}=\eta_{PS}\times F_{PS} \quad \cdots(4)$$

・補助ボイラ

$$H_{B}=\eta_{B}\times F_{B} \quad \cdots(5)$$

$$F_{B,\min}\cdot\delta_{B}\le F_{B}\le F_{B,\max}\cdot\delta_{B}\quad \delta_{B}\in\{0,1\} \quad \cdots(6)$$

・CHP

$$E_{FC}=\eta_{FC,E}\times F_{FC} \quad \cdots(7)$$

$$H_{FC}=\eta_{FC,H}\times F_{FC} \quad \cdots(8)$$

$$F_{FC,\min}\cdot\delta_{FC}\le F_{FC}\le F_{FC,\max}\cdot\delta_{FC}$$

$$\delta_{FC}\in\{0,1\} \quad \cdots(9)$$

・電力収支式

$$E_{FC}+E_{PS}=E_{d} \quad \cdots(10)$$

・給湯収支式

$$H_{FC}+H_{B}=H_{dd} \quad \cdots(11)$$

・暖房収支式

$$H_{FC}+H_{B}=H_{hd} \quad \cdots(12)$$

・目的関数

$$J_{PE}=F_{PS}+F_{FC}+F_{B} \quad \cdots(13)$$

目的関数は，一次エネルギー消費量の和の形で表し，これを最小化するものとした．また，逆潮については考慮していない.

記号　D：時間分割数[-]，E：電力量[W]，F：一次エネルギー消費量[W]，H：熱量[W]，J_{PE}：一次エネルギー消費量における目的関数[W]，J_{ST}：蓄熱槽における目的関数[J]，k：時刻ステップ[-]，Q：熱量[W]，Δt：時間間隔[s]，ϕ：リスク係数[-]，η：熱効率[-]

添字　B：補助ボイラ，d：需要，dd：給湯需要，E：発電電力，FC：燃料電池，H：排熱回収，hd：暖房需要，in：蓄熱，max：最大値，min：最小値，out：放熱，PE：一次エネルギー消費量，plf：電主熱従運転 ，PS：商用電力，ST：蓄熱槽

本章報に関連した既発表文献

・　後藤隆一郎・中村　充・武田清賢・濱田靖弘・田篭秀俊・我妻泰憲・天澤敬太・長野克則：固体酸化物形燃料電池による次世代家庭用熱電併給システムに関する研究（第１報）固体酸化物形燃料電池の発電・排熱回収特性，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2009-9)，pp.1679～1682

・　天澤敬太・濱田靖弘・田篭秀俊・我妻泰憲・長野克則・後藤隆一郎・中村　充・武田清賢：固体酸化物形燃料電池による次世代家庭用熱電併給システムに関する研究（第２報）エネルギー需要特性による固体酸化物形燃料電池の導入効果，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2009-9)，pp.1683～1686

・　後藤隆一郎・中村　充・武田清賢・濱田靖弘・天澤敬太・村井拓矢・長野克則：固体酸化物形燃料電池による次世代家庭用熱電併給システムに関する研究（第３報）実使用を考慮した稼動特性評価，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2010-9)，pp.955～958

・　村井拓矢・濱田靖弘・天澤敬太・長野克則・後藤隆一郎・中村　充・武田清賢：固体酸化物形燃料電池による次世代家庭用熱電併給システムに関する研究（第４報）エネルギー需要特性による導入効果の解析，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2010-9)，pp.959～962

参考文献

1）経済産業省・国土交通省：告示第二号(2009-1)

2）前　真之・三浦尚志・羽原宏美・堀　祐治・桑沢保夫・秋元孝之・宇梶正明・澤地孝男：住宅のための省エネルギー手法の実験的評価に関する研究（その３），日本建築学会環境系論文集，659（2011-1），pp.49～57

3）武田清賢・濱田靖弘・村井拓矢・後藤隆一郎・中村　充：負荷追従型ガスエンジンを導入した家庭用熱電併給システムに関する研究，日本冷凍空調学会論文集，29-2(2012-6)，pp.237～245

4）M. Itagaki：Environment conscious residential energy use by fuel cell CHP technology，Proceedings of the 35th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings－CIB W062 2008(Sep.，2008)，pp.81～94

5）月館　司・濱田靖弘・村田さやか・田篭秀俊・我妻泰憲・長野克則・成　哲俊：住宅用トータルエネルギー予測プログラムの開発（第１報）プログラムの概要と全体構成，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2008-8)，pp.1489～1492

6）我妻泰憲・濱田靖弘・田篭秀俊・長野克則・月館　司・村田さやか・成　哲俊：住宅用トータルエネルギー予測プログラムの開発（第２報）熱電併給・給湯システムの計算例，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2008-8)，pp.1493～1496

7）我妻泰憲・濱田靖弘・田篭秀俊・長野克則・月館　司・村田さやか・成　哲俊：住宅用

トータルエネルギー予測プログラムの開発（第３報）寒冷地における戸建て住宅の計算例，空気調和・衛生工学会北海道支部第４３回学術講演会論文集(2009-3)，pp.175～178

8）濱田靖弘・田篭秀俊・長野克則・後藤隆一郎・中村　充：寒冷地における家庭用コージェネレーションシステムの現状評価と将来性に関する研究，太陽エネルギー，185(2008-5)，pp.51～58

第８章

寒冷地における家庭用熱電併給システムの導入支援ツールに関する研究

8.1　概説

本章では，簡易的なアンケートにより，寒冷地における戸建て住宅のエネルギー使用量を予測し，先述の寒冷地向け家庭用熱電併給システム（負荷追従型ガスエンジン・固体高分子形燃料電池・固体酸化物形燃料電池）のエネルギー削減効果を予測する手法を示す．まず，8.2 節で解析対象機器の仕様について述べ，8.3 節でアンケートの内容および回答について述べる．次いで，8.4 節で電力・給湯・暖房負荷の予測手法について述べ，予測精度を評価する．さらに，8.5 節で CHP 導入効果の簡易予測シミュレーション・8.6 節で CHP 導入効果の詳細シミュレーションについて概説し，8.7 節で予測負荷と簡易シミュレーションにおける一次エネルギー削減量の誤差について述べる．最後に，8.8 節でまとめを述べる．

8.2　解析対象システムの概要

本研究においては，３～７章で述べた，試験データ[1)~3)]を有する負荷追従型 GE，固体高分子形燃料電池（Polymer Electrolyte Fuel Cell：PEFC）および固体酸化物形燃料電池（Solid Oxide Fuel Cell：SOFC）について評価を行う．表 8.1 に各機器の性能を示す．負荷追従型ガスエンジンは，排熱を暖房にのみ利用する方式であり，暖房負荷および電力負荷が一定以上の際に発電する制御となっている．PEFC は，排熱を給湯に利用し DSS（Daily Start and Stop）が基本となっている．また，本 PEFC は学習制御にて家庭の電力・給湯需要を予測し，最適発電時間を決定する制御となっている．SOFC については，排熱を給湯に利用し，24 時間連続発電が基本となっている．また，貯湯タンクユニットにラジエータを搭載しており，タンクが満蓄の場合においても発電が継続できるシステムである．PEFC・SOFC においては，①ユーザーによる手動停止指令もしくは②都市ガスのマイコンメータ対策などで基本の動作（DSS および 24 時間連続発電）を外れ終日停止する場合もあ

表 8.1 各 CHP の性能

		単位	SOFC	PEFC	GE
最大出力		[W]	700	750	1500
最低出力		[W]	100	250	500
発電熱効率	定格時	[HHV%]	43	37	24
排熱回収熱効率	定格時	[HHV%]	42	45	53
貯湯タンク容量		[L]	90	200	－
運転形態		－	連続	DSS	暖房利用時
排熱利用方法		－	給湯	給湯	暖房

るが，①は予測が極めて困難であることと，②は月に一度程度の発生で年間値に対する影響は少ないと考え，後述のシミュレーションには考慮していない．

図 8.1 に各 CHP の部分負荷特性[4]を示す．燃料電池（SOFC・PEFC）は，GE と比較すると発電熱効率が高い傾向となった．SOFC は定格効率が高いが，PEFC よりも部分負荷における効率低下が大きく，低負荷では PEFC の方が高効率である．

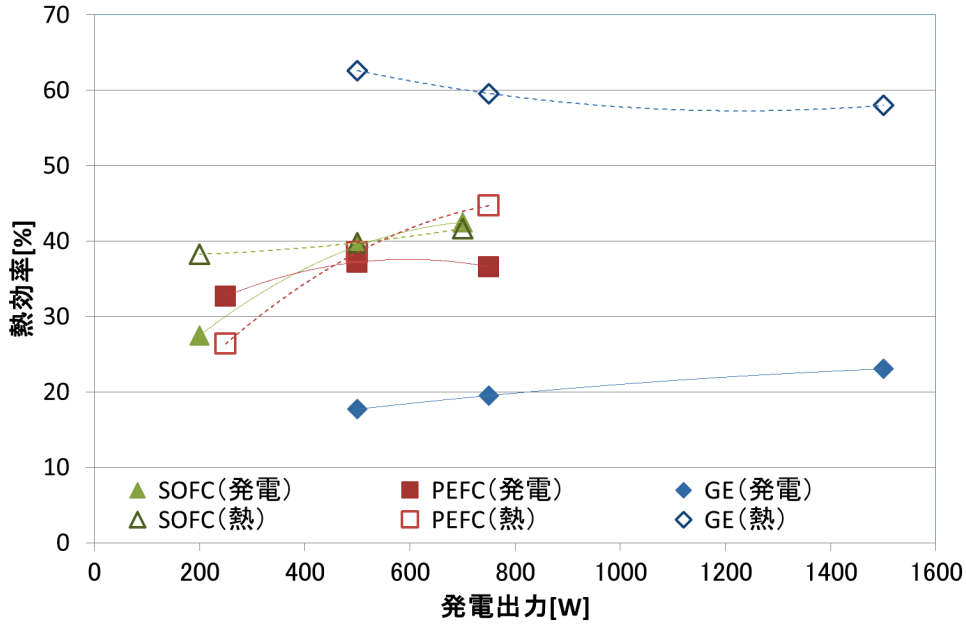


図 8.1 各 CHP の部分負荷特性[4]

8.3　アンケートの内容および回答

アンケートは，札幌市内の戸建住宅に入居する25世帯に調査を依頼し，そのうち21世帯回収した．当該世帯においては，電力・給湯・暖房負荷の計測も行っており，アンケートによる予測負荷と実測負荷の比較が可能であるが，1世帯において暖房負荷の計測に不備があったため，当該データは無効とした．

アンケート内容および回答を表8.2に示す．アンケートは大別すると4項目から構成されている．１つ目は家族構成・ライフスタイル・住宅に関するもので，世帯構成・年齢・起床時刻・就寝時刻・年間不在日数・築年数・延床面積などを質問項目として挙げた．２つ目は電力使用状況に関するもので，照明器具の種類・テレビの数と種類・テレビの視聴時間・冷蔵庫の数と種類などを質問項目として挙げた．３つ目は湯使用状況に関するもので，入浴回数・シャワー回数などを質問項目として挙げた．４つ目は暖房使用状況に関するもので，暖房設定温度・暖房使用時間などを質問項目として挙げた．

次いで，アンケートの回答を確認すると，世帯構成については，1世帯のみ2世帯住宅であり，他は夫婦と子供，もしくは夫婦のみの世帯であった．

建築年度・延床面積については，それぞれ1988年～2008年度築・99～173 m²と幅広い結果となった．

表 8.2 アンケート内容および回答

世帯番号	家族構成・ライフスタイル・住宅								湯使用状況						暖房使用状況	
	世帯人数	建築年度	延床面積	年間不在日数	起床・就寝時刻				お風呂						暖房設定温度	暖房時間
									春秋		夏		冬			
					平日起床	平日就寝	休日起床	休日就寝	湯張り	シャワーのみ	湯張り	シャワーのみ	湯張り	シャワーのみ		
	人	年	m2	日	最も早い方	最も遅い方	最も早い方	最も遅い方	回/週		回/週		回/週		℃	
1	2	2006	100	50	6:30	23:30	8:00	0:00	7	0	7	0	7	0	–	24時間
2	2	2006	131	10	7:00	2:00	9:00	0:00	3	3	3	4	3	3	22	24時間
3	5	2006	113	4	5:45	0:00	7:00	0:00	7	0	7	0	6	0	22	就寝時OFF
4	4	1996	144	2	6:00	1:00	6:30	23:00	3	4	3	4	3	4	22	24時間
5	5	1988	119	20	6:00	23:00	7:30	23:00	2	4	2	4	3	3	22	タイマー
6	4	2004	125	0	6:00	2:00	7:00	2:00	4	3	4	3	4	3	25	24時間
7	4	2002	173	10	6:30	0:00	7:30	0:00	5	0	5	1	5	0	25	タイマー
8	1	2007	103	7	7:30	1:00	10:00	1:00	7	0	7	0	7	0	23	24時間
9	7	2003	161	0	5:30	0:00	6:00	0:00	2	5	2	5	3	3	–	タイマー
10	4	2007	130	5	6:30	0:00	8:30	23:00	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	22	タイマー
11	3	2007	100	20	5:00	22:30	6:00	21:00	7	0	7	0	7	0	22	適宜
12	4	2007	124	10	6:30	0:00	8:00	0:00	7	0	7	0	7	0	–	タイマー
13	3	2007	134	14	6:00	1:00	7:00	0:00	7	0	7	0	7	0	24	タイマー
14	3	2003	143	4	6:00	22:00	7:00	22:00	3	2	2	5	3	5	21	24時間
15	4	2004	99	15	6:00	1:00	7:30	0:30	7	0	7	0	7	0	22	就寝時OFF
16	5	1995	124	10	6:00	23:30	8:00	23:00	3	3	3	3	3	3	25	タイマー
17	3	2008	109	10	6:30	0:00	7:00	0:00	7	0	7	0	7	0	25	24時間
18	4	2008	137	15	6:30	1:00	8:30	1:00	7	0	7	0	7	0	22	適宜
19	4	2008	112	20	5:30	0:30	7:00	0:00	7	0	7	0	7	0	23	適宜
20	3	1993	124	10	5:00	23:00	5:00	23:00	2	5	2	5	2	5	24	タイマー

世帯番号	電力使用状況													
	テレビ										照明器具			
	サイズ			型式			視聴時間				設置割合			
	1台目	2台目	3台目	1台目	2台目	3台目	1台目	2台目	3台目		白熱電球	蛍光灯	LED	その他
	インチ	インチ	インチ				時間	時間	時間		%	%	%	%
1	32			液晶			5				20	80		
2	30			液晶			3				5	90	5	
3	32			液晶			11				30	70		
4	37	25		液晶	ブラウン管		6	1			60	40		
5	42			液晶			3				30	70		
6	32	21	21	ブラウン管	ブラウン管	記載無し	8	2	0.1		20	80		
7	28			ブラウン管			4				70	30		
8	28	14		液晶	液晶		3	3			82	13	5	
9	40	38	32	液晶	液晶	液晶	10	7	2		20	80		
10	40			液晶			8				10	90		
11	32	16		液晶	ブラウン管		5	0.1			60	40		
12	42			プラズマ			0				40	60		
13	49	29	16	プラズマ	ブラウン管	ブラウン管	10	2	10		30	70		
14	37	29	36	液晶	ブラウン管	ブラウン管	5	1	0		50	50		
15	32			液晶			15				25	37	38	
16	28			ブラウン管			8				20	80		
17	42			プラズマ			3				50	50		
18	50	32		プラズマ	ブラウン管		8	0			21	76		3
19	42			液晶			9				50	50		
20	37			液晶			5				20	50	30	

8.4　負荷予測手法

8.4.1　電力負荷

電力負荷については，世帯人数・延床面積・テレビの視聴時間・照明器具の種類（白熱電球・蛍光灯・LED）・冷蔵庫のサイズにて重回帰分析を実施し，図8.2に示す標準偏回帰係数を求めた．照明器具の種類については，白熱電球54W・蛍光灯12W・LED6.9W[5]と消費電力を仮定し，アンケートで求めたそれぞれの機具の設置割合にて平均化した値を独立変数として使用した．その結果，テレビの視聴時間および延床面積の相関性が比較的高い結果となった．

さらに，独立変数を変化させた場合の自由度修正済決定係数を求めた（表8.3）．この際，テレビの種類を考慮するため「テレビの視聴時間×消費電力[6]」を独立変数とした場合の結果も求めた．その結果，「延床面積，テレビ視聴時間」と「延床面積，テレビ視聴時間，

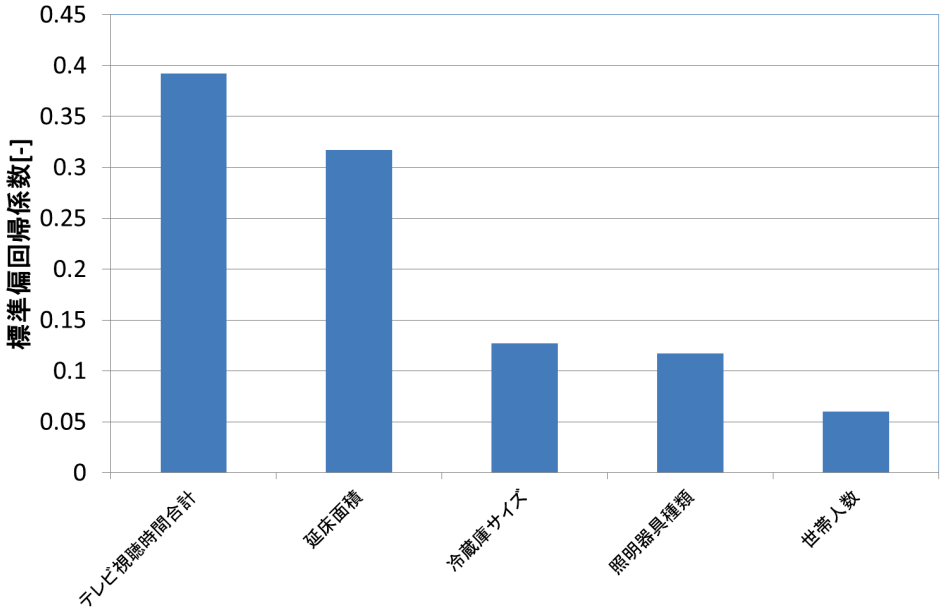


図 8.2 標準偏回帰係数（電力負荷）

表 8.3 独立変数の検討（電力負荷）

独立変数	独立変数個数	(重)相関係数	決定係数	自由度修正済決定係数
テレビ視聴時間	1	0.493	0.243	0.224
延床面積，テレビ視聴時間	2	0.593	0.352	0.318
延床面積，テレビ視聴時間(テレビ種類考慮)	2	0.562	0.316	0.281
延床面積，テレビ視聴時間，冷蔵庫サイズ	3	0.609	0.371	0.321

冷蔵庫サイズ」がほぼ同等の自由度修正済決定係数を示したが，冷蔵庫サイズにおける標準偏回帰係数が他２項目より低かったことと，アンケートの質問項目を減らすため，「延床面積，テレビ視聴時間」を独立変数として採用することとし，以下の式(1)を得た．

$$Y=21.72\times X_1+104.38\times X_2+1277.55 \quad \cdots\cdots (1)$$

X_1：延床面積[m²]，X_2：テレビの視聴時間[時間/日]

Y：年間電力負荷[kWh]

重相関係数R=0.593

本予測式を用いた場合の誤差（｛予測負荷－実測負荷｝÷実測負荷：以下同様の定義）を，図8.3に示す．本図では，誤差がプラス値の場合，予測値が実測負荷よりも高いことを示す．最も予測が外れたのは世帯15で，誤差は34.8%となった．また，誤差の絶対値の平均は14.3%となった．

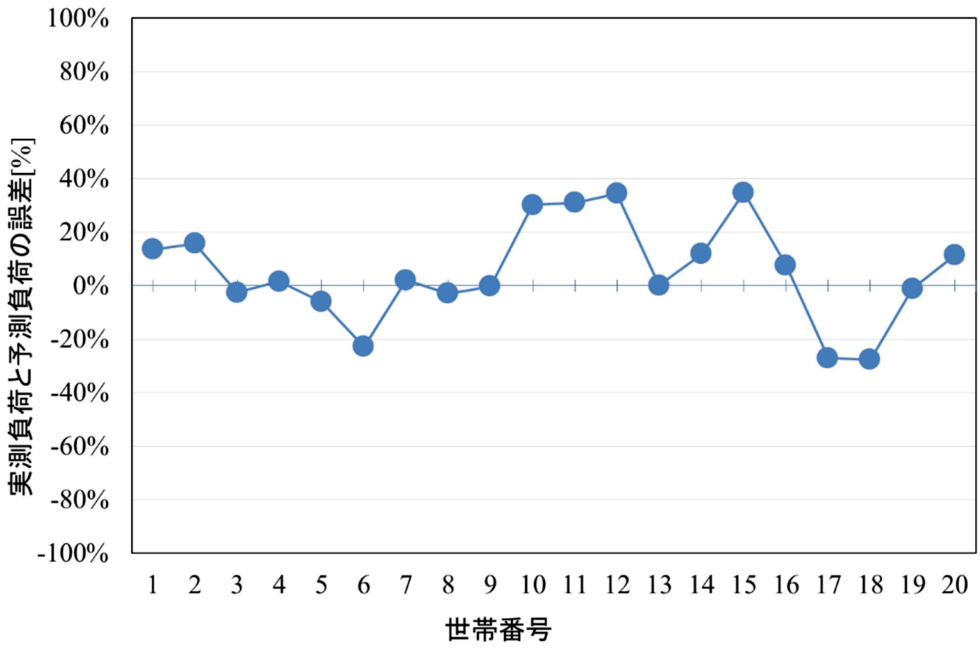


図 8.3 予測負荷の誤差（電力負荷）

8.4.2　給湯負荷

給湯負荷については，世帯人数・浴槽の湯張り回数・シャワーのみの入浴回数・年間不在日数にて重回帰分析を実施した．湯張り回数，シャワーのみの入浴回数については，季節毎（春秋・夏・冬）の頻度を問い，その平均値を用いた．しかし，図8.4に示す通り，大半の世帯（図中に〇で示した14世帯）で季節による差が全く無く，その他の世帯も差が僅

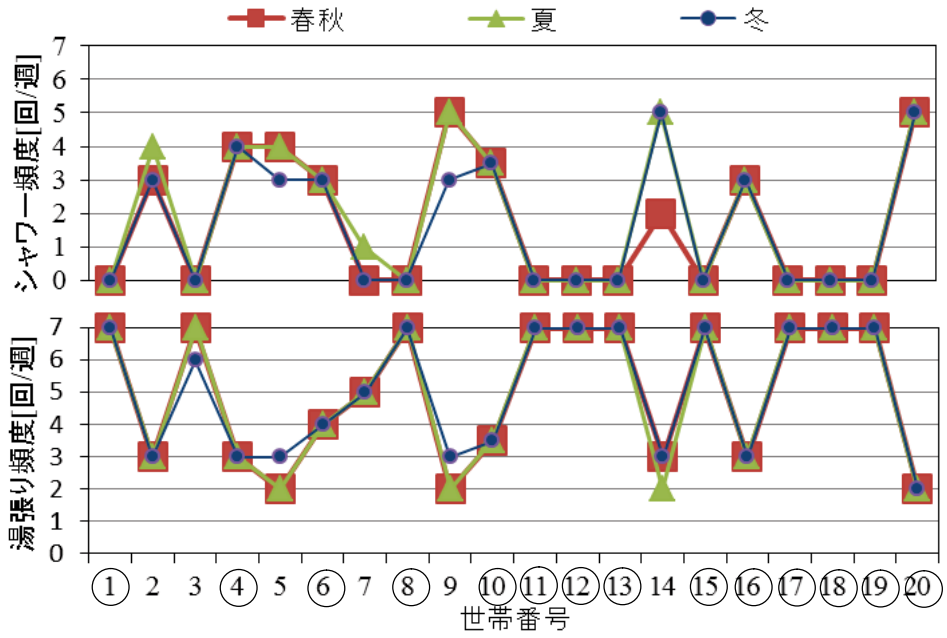


図 8.4 湯張り頻度とシャワー頻度の季節差

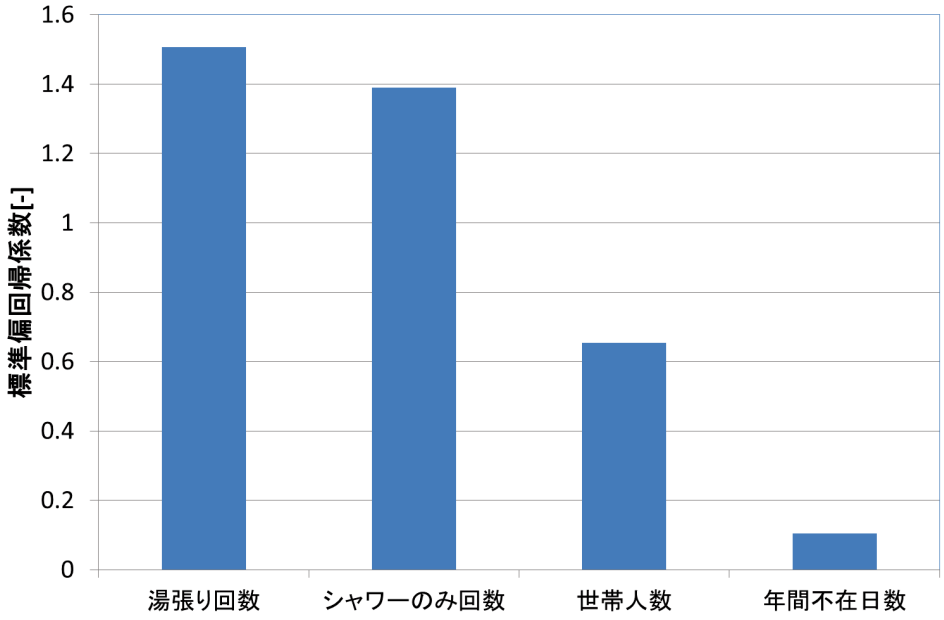


図 8.5 標準偏回帰係数（給湯負荷）

かだったため，今後は質問を簡略化して年間の代表的な頻度を尋ねることを検討する．

図8. 5に示す標準偏回帰係数の通り，浴槽の湯張り回数，シャワーのみの入浴回数に次いで，世帯人数の相関性が比較的高い結果となった．また，年間不在日数の相関性は低かった．

さらに，独立変数を変化させた場合の自由度修正済決定係数を求めた（表8. 4）．この際，湯張り回数とシャワーのみの入浴を区別せず，単に入浴回数（シャワーも含む）とした場合の結果も求めた．その結果，自由度修正済決定係数は，「風呂（湯張り＋シャワー）回数，世帯人数」で最も高い値となった．重相関係数については，「風呂（湯張り＋シャワー）回数，世帯人数」と「湯張り回数，シャワーのみ回数，世帯人数」が同じ値であったが，アンケートの質問項目を減らすため，「風呂（湯張り＋シャワー）回数，世帯人数」を独立変数として採用することとし，以下の式(2)を得た．

表 8. 4 独立変数の検討（給湯負荷）

独立変数	独立変数個数	(重)相関係数	決定係数	自由度修正済決定係数
湯張り回数，シャワーのみ回数	2	0.319	0.102	0.056
風呂（湯張り＋シャワー）回数，世帯人数	2	0.697	0.486	0.459
湯張り回数，シャワーのみ回数，世帯人数	3	0.697	0.486	0.445
湯張り回数，シャワーのみ回数，世帯人数，年間不在日数	4	0.704	0.496	0.442

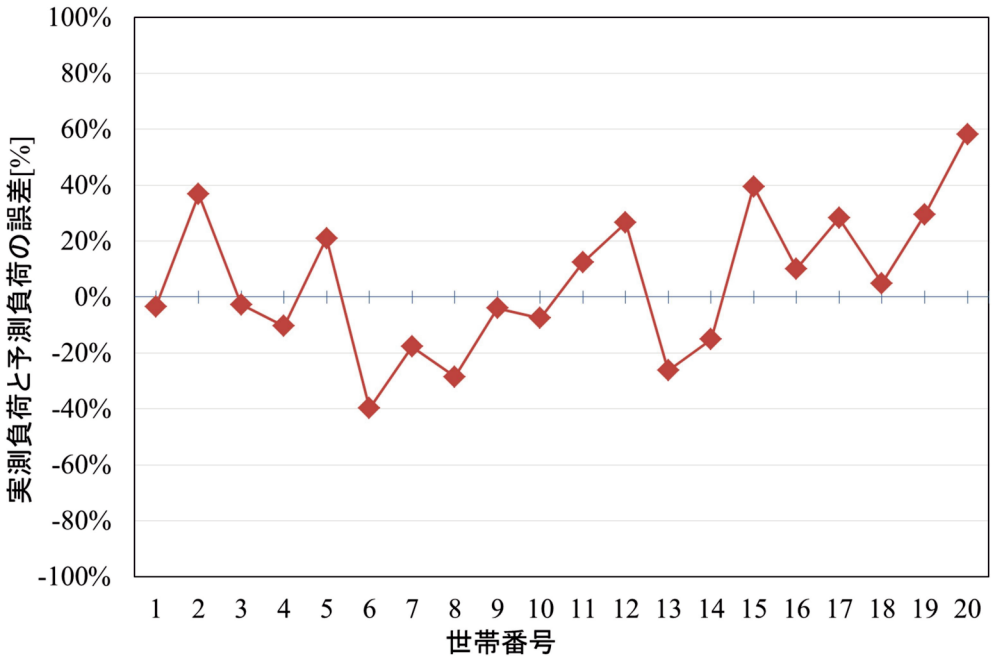


図 8. 6 予測負荷の誤差（給湯負荷）

$Y = 955.80 \times X_1 + 1367.56 \times X_2 - 7938.29$ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・(2)

X_1：世帯人数[人]，X_2：風呂（湯張り＋シャワー）回数[回/週]

Y：年間給湯負荷[kWh]

重相関係数R= 0.697

本予測式を用いた場合の誤差を，図8. 6に示す．最も誤差が大きかったのは世帯20で，55.9%となった．当該住宅は世帯人数が3人だが，給湯負荷が平均値の半分程度であり，他の世帯と傾向が異なっていたことが原因と考えられる．また，誤差の絶対値の平均は21.1%となった．

8.4.3　暖房負荷

暖房負荷については，Q値・延床面積・暖房設定温度・世帯人数を用いて北方型住宅の暖房用エネルギー消費量の計算法[7]にて試算した．

$$Y=24\times q_s\times D\div 1000 \quad \cdots\cdots (3)$$

q_s：総熱損失係数[W/K]，D：暖房度日数[K日]，

Y：年間暖房負荷[kWh]

熱損失係数q_sは，延床面積［m^2］とQ値［W/m^2K］の積にて求めた．Q値については，建築年度より以下の通り仮定した（札幌）．

1980～1992年度：2.8（昭和55年 旧省エネルギー基準）

1993～1999年度：1.8（平成4年 新省エネルギー基準）

2000年度～：1.6（平成11年 次世代省エネルギー基準）

暖房度日数は，以下の式(4)[8]より求めた．自然温度差を求める際，日射取得熱は1,003 W[8]，室内発生熱はそれぞれの住宅における冬期の電力予測負荷の平均値，人体発熱量は一人当たり60 W[8]として計算した．なお，世帯1・9・12においては暖房設定温度の欄に回答が無かったため，最多回答である22 ℃と仮定して計算を行った．

$$D=5.2933\times(T-\Delta tn)2+87.382\times(T-\Delta tn)+299.88 \quad \cdots\cdots (4)$$

T：暖房設定温度の申告値[℃]，Δtn：自然温度差[℃]

本予測式を用いた場合の誤差を，図8.7に示す．誤差の絶対値の平均は30.6%と，電力・給湯に比べ大きくなった．これは，世帯5（誤差115.7%）・世帯16（誤差117.1%），世帯20（誤差97.8%）の３世帯における誤差が大きいことに起因する．この３世帯については，建築年度が比較的古く（それぞれ1988年・1995年・1993年），かつタイマーにて暖房時間を調整している世帯であった（それぞれ6:00～21:00，6:00～11:00と15:00～23:00，5:30～11:30と16:00～23:00）．比較的新しい住宅においては，断熱仕様が高く住宅の蓄熱効果が大きいため，24時間連続暖房と間欠暖房における暖房負荷に明確な違いは現れなかったが，比較的断熱仕様の低い住宅においては間欠暖房による暖房用エネルギー消費量の減少傾向が見られ，本計算手法では暖房負荷が高めに出たものと推測される．

以上，誤差の絶対値の平均は，電力負荷が14.3%，給湯負荷が21.1%，暖房負荷が30.6%であり，1～3割の平均誤差となることを確認した．さらに質問項目を増やすことで予測精度を高める手法も考えられるが，項目が多く内容が難しくなると，回答者の負担となり回答が得られないことがあるため，設問を簡単にしつつ，ある程度の予測精度を保つことが重要である．

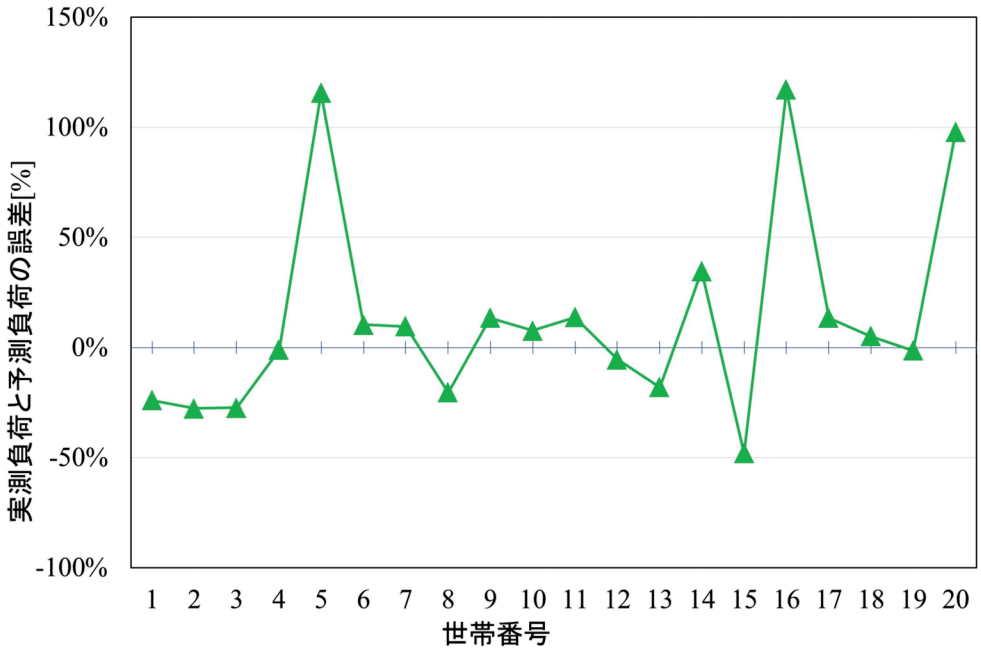


図 8.7 予測負荷の誤差（暖房負荷）

8.5　CHP 導入効果の簡易シミュレーション手法

8.4節で求めた予測負荷を用いて，GE-CHPシステム・PEFC-CHPシステム・SOFC-CHPシステムの導入効果を予測するための簡易シミュレーションを作成した．図8.8に，本簡易シミュレーションの概略を示す．まず，得られた年間の電力・給湯・暖房予測負荷を，各世帯の実測負荷より求めた月別比率の平均値にて月別に展開する．次いで，同様に各世帯の実測負荷より求めた時刻別比率の平均値にて，月別の負荷をそれぞれ時間帯別に展開する．これにより得られた時間帯別の電力負荷を用いて，各CHPシステムの発電量を決定する．発電熱効率については，図8.1で示したデータを用いて計算を行った．同様に，排熱回収熱効率についても部分負荷効率のデータを用い，排熱量を求めた．GE-CHPについては，求めた排熱を暖房に利用し，熱余りになる場合は発電時間を短くするものとした．PEFC-CHPおよびSOFC-CHPについては，貯湯タンクに熱を貯めて給湯に利用する制御となっているため，熱ロスを考慮して排熱回収量の8割もしくは給湯負荷の8割の少ない方を排熱利用量とする簡易的な計算を行った．各CHPの排熱で賄い切れなかった給湯・暖房負荷については，補助ボイラ（潜熱回収型）にて賄い，各CHPの発電で賄い切れない電力負

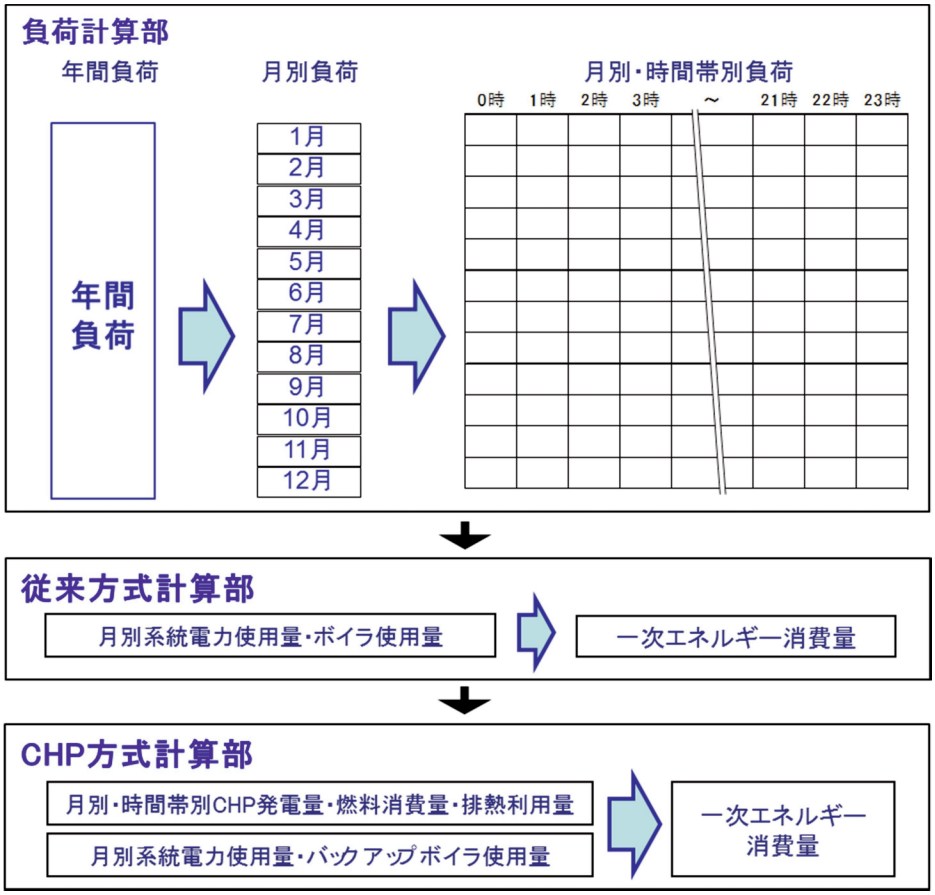


図 8.8 CHP 簡易シミュレーションプログラムフロー

荷については，系統電力を利用するものとした．これらの計算より，各世帯の商用電力利用量およびガス消費量を決定し，一次エネルギー消費量を試算した．

また，従来型システムを「商用電源＋非潜熱回収型ガスボイラ」として，各世帯の一次エネルギー消費量を求め，各CHPシステムの一次エネルギー削減量を求めた．なお，改正省エネルギー法より電力の換算係数，従来型のボイラ熱効率をそれぞれ9.76 MJ/(kWh)，75%とした．

本簡易シミュレーションは比較的容易な計算となっており，プログラム言語を用いた繰り返し計算などが不要で，表計算ソフト等で直ぐに計算結果を出せるようになっている．

8.6　CHP 導入効果の詳細シミュレーション手法

実測負荷データより，各CHPシステムの導入効果を試算するため，詳細シミュレーション[9]を実施した．その概略を，図8.9に示す．本詳細シミュレーションでは，簡易シミュレーションと同様の部分負荷効率を与え，時刻別需要データより一次エネルギー消費量が最も少なくなるCHPの最適運転を求める．

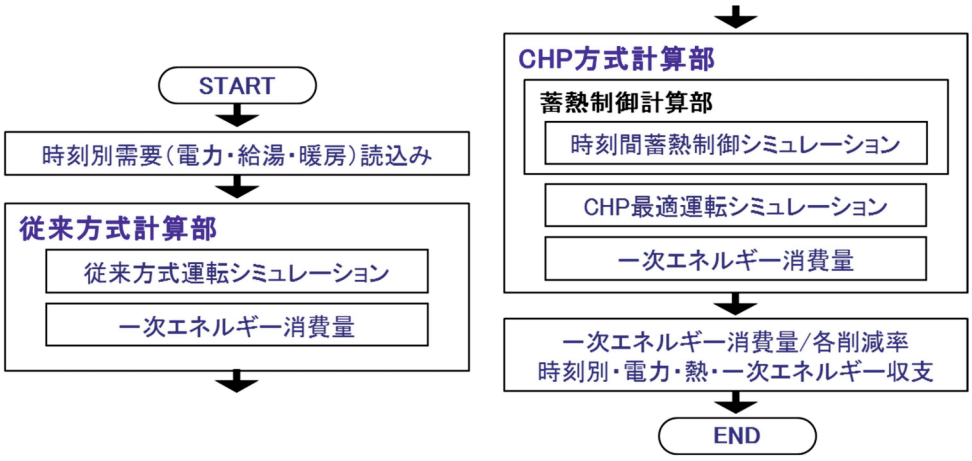


図 8.9 CHP 詳細シミュレーションプログラムフロー

8.7　CHP 導入効果の簡易シミュレーションの評価

8.5節にて記載した，CHPの導入効果の簡易シミュレーション手法について評価を行う．本章では，負荷予測の誤差による影響を切り離し，詳細シミュレーションと簡易シミュレーションの違いを評価するため，ともに実測負荷を用いて計算した結果を比較する．なお，詳細シミュレーションについては各負荷（電力・給湯・暖房）の10分間隔の積算値を，簡易シミュレーションついては各負荷の年間の合計値および暖房使用時間をそれぞれインプットとして計算を行った．

表8.5に，各シミュレーション（実測負荷と詳細シミュレーション・実測負荷と簡易シミュレーション・予測負荷と簡易シミュレーション）における一次エネルギー削減量，図8.10に実測負荷と簡易シミュレーションにおける一次エネルギー削減量の誤差（実測負荷と詳細シミュレーションに対する）の割合を示す．実測負荷と詳細シミュレーション・実測負荷と簡易シミュレーションを比較すると，簡易シミュレーションは，詳細シミュレーションの結果と概ね近い値を示す結果となった．一次エネルギー削減量における誤差の絶対値の平均は，SOFCで7.6%，PEFCで14.3%，GEで5.3%となった．また，各世帯における一次エネルギー削減量の平均は，詳細シミュレーション・簡易シミュレーションでそれぞれ，

表 8.5 一次エネルギー削減量（実測負荷と詳細シミュレーション・実測負荷と簡易シミュレーション・予測負荷と簡易シミュレーション）［MWh/year］

		SOFC			PEFC			GE		
負荷		実測	実測	予測	実測	実測	予測	実測	実測	予測
シミュレーション		詳細	簡易	簡易	詳細	簡易	簡易	詳細	簡易	簡易
世帯番号	1	5.6	5.2	5.5	5.1	4.7	5.0	3.6	4.0	4.1
	2	6.0	5.0	5.4	5.4	5.5	5.3	5.3	5.3	4.9
	3	8.4	8.7	8.6	7.9	6.7	6.6	4.9	5.7	5.6
	4	9.8	9.9	9.1	9.0	7.8	7.2	6.8	7.1	6.4
	5	7.3	7.0	7.4	6.6	5.9	5.9	5.0	4.7	4.7
	6	11.8	11.0	9.2	10.9	8.4	7.3	8.1	7.6	6.6
	7	9.1	9.0	7.0	8.5	8.2	6.4	7.5	7.4	5.9
	8	6.6	6.2	5.1	6.1	5.6	5.2	5.2	4.8	4.6
	9	11.9	10.9	10.8	11.1	8.2	8.1	7.2	7.0	6.9
	10	7.4	7.2	8.1	6.8	5.7	6.2	4.7	4.7	5.0
	11	4.8	4.4	6.2	4.1	3.6	5.0	3.0	2.9	3.8
	12	5.8	5.7	7.3	5.5	4.7	5.8	4.2	4.1	4.7
	13	11.5	10.6	8.6	10.5	8.3	7.1	8.8	7.6	6.2
	14	7.1	6.4	7.1	6.3	5.4	6.4	4.4	4.4	5.7
	15	7.1	6.2	8.3	6.6	5.3	6.4	4.7	4.6	5.4
	16	7.3	6.6	8.1	6.7	5.2	6.4	4.1	4.0	5.2
	17	7.1	6.5	7.3	6.4	5.7	6.1	5.0	5.0	5.4
	18	8.9	9.4	8.3	8.7	7.2	6.4	5.9	5.9	5.0
	19	7.4	6.7	7.6	6.9	5.6	5.9	4.9	4.1	4.4
	20	5.6	4.4	7.2	5.0	4.4	5.9	3.8	3.4	4.7
平均		7.8	7.4	7.6	7.2	6.1	6.2	5.4	5.2	5.3

SOFC 7.8 MWh/年・7.3 MWh/年，PEFC 7.2 MWh/年・6.1 MWh/年，GE 5.4 MWh/年・5.2 MWh/年と概ね一致した．PEFCについては，SOFC・GEと比較するとやや誤差が大きく，詳細シミュレーションよりも低い一次エネルギー削減量を示す結果となった．これは，PEFCの詳細シミュレーションでは一次エネルギー削減量が最も高くなる最適発電時間を算出し，実機に搭載される学習制御を模擬しているのに対し，簡易シミュレーションにおいては計算負荷を減らすために発電時間を一般的な条件に固定しているためと考えられる．一方で，SOFCは基本的に24時間連続運転であり，GEは暖房使用中のみ発電する単純な発電条件であるため，比較的精度よく計算できたものと考えられる．PEFCのような複雑な発電条件の機器の導入効果予測を，簡易的な計算手法を用いつつ精度を高めることは，今後の課題である．

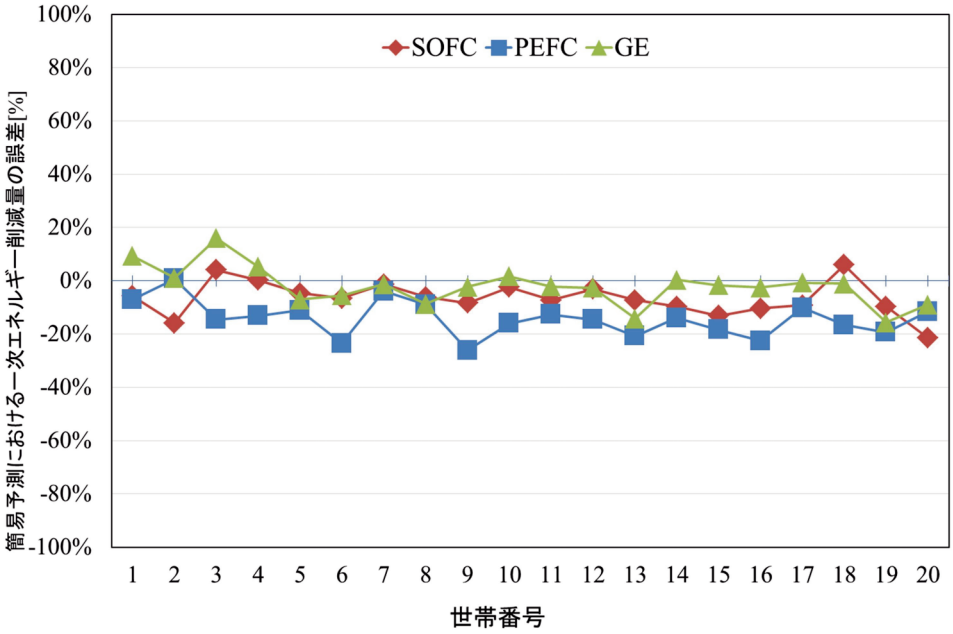


図 8.10 実測負荷と簡易シミュレーションにおける一次エネルギー削減量の誤差（実測負荷と詳細シミュレーションに対する）

8.8　導入効果予測結果の評価

図8.11に予測負荷と簡易シミュレーションにおける一次エネルギー削減量の誤差（実測負荷と詳細シミュレーションに対する）の割合を示す．

一次エネルギー削減量における誤差の絶対値の平均は，SOFCで15.8%，PEFCで17.6%，GEで18.1%と，何れも概ね二割弱という結果となった．世帯5・16・20では削減効果が比較的高く見積もられる結果となったが，当該世帯は8.4節で示した通り暖房負荷が高く見積もられているため，CHPを導入した際の削減効果が高く出たものである．また，表8.5に示す実測負荷と詳細シミュレーション結果と予測負荷と簡易シミュレーション結果の平均値を比較すると，PEFCについては8.7節で記載した簡易シミュレーションの特性により，やや低い一次エネルギー削減量を示したものの，全体的に概ね実測負荷と詳細シミュレーション結果と近い結果を示した．また，予測負荷と簡易シミュレーションを用いた手法では，実測負荷データ取得の労力が削減可能であり，計算方法が簡易なため幅広いユーザーが利用可能で修正も容易である．さらに実測負荷と詳細シミュレーションを用いた手法では1件あたりの計算に20分程度要する（コンピュータ仕様：CPU3.00GHz，メモリ4GB）のに対し，予測負荷と簡易シミュレーションを用いた手法では瞬時に結果が出力される．これより，簡易なアンケートを基に家庭の負荷を予測し，CHPの導入効果を予測する手法が有効であることがわかる．

また，本報はCHPの一次エネルギー削減効果の予測に特化したが，外気温度に対する実COPや貯湯ロスなどを加味すれば，ヒートポンプ機器における導入効果等も予測が可能であり，さらに総合的な視点から熱源機器の選定が可能となる．

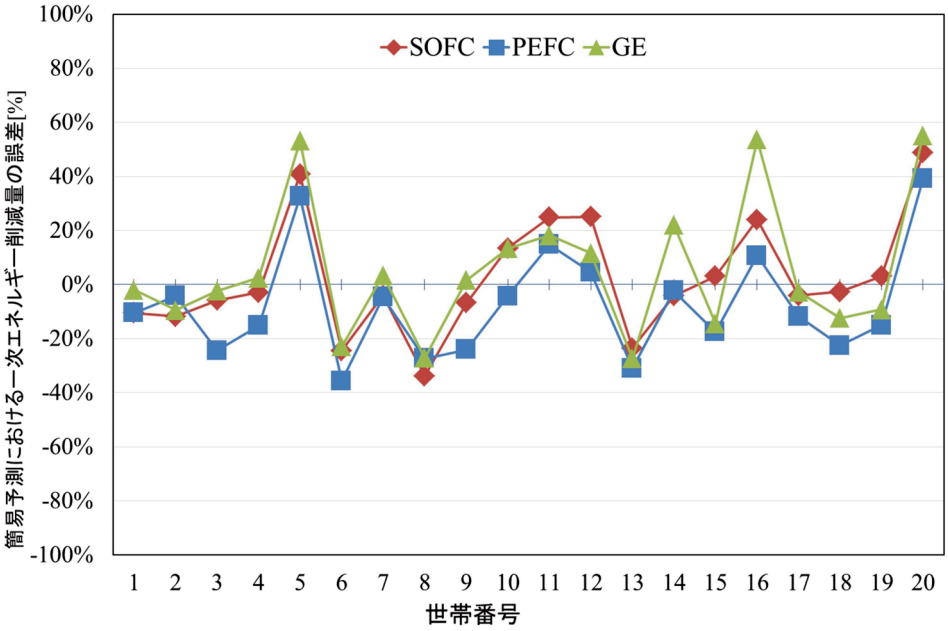


図 8.11 予測負荷と簡易シミュレーションにおける一次エネルギー削減量の誤差（実測負荷と詳細シミュレーションに対する）

8.9　まとめ

(1) 簡易的な手法にて，寒冷地の戸建住宅における負荷予測を行うことを目的としてアンケート調査を実施した．アンケートによる予測負荷と実測負荷の誤差の絶対値の平均は，電力負荷が14.3%，給湯負荷が21.1%，暖房負荷が30.6%であり，概ね1～3割の平均誤差となることを確認した．

(2) 寒冷地における家庭用CHPシステムの導入効果を予測するため，GE-CHPシステム・PEFC-CHPシステム・SOFC-CHPシステムを対象とした簡易シミュレーションを作成した．

(3) 作成した簡易シミュレーションと，既報で作成した詳細シミュレーションを比較するため，ともに実測負荷をインプットとした際のCHP機器毎の一次エネルギー削減量を解析した結果，予測負荷と実測負荷による誤差の絶対値の平均は，SOFC-CHPで7.6%，PEFC-CHPで14.3%，GE-CHPで5.3%となり，概ね高い精度を示した．

(4) 寒冷地におけるCHP導入効果の簡易予測を評価するため，（実測負荷と詳細シミュレーション）および（アンケートによる予測負荷と簡易シミュレーション）の一次エネルギー削減量を比較したところ，誤差の絶対値の平均は，SOFCで15.8%，PEFCで17.6%，GEで18.1%と，何れも概ね二割弱という結果となった．

(5) 予測負荷と簡易シミュレーションを用いた手法では，実測負荷データ取得の労力が削減可能であり，計算方法が簡易なため幅広いユーザーが利用可能で修正も容易である．さらに実測負荷と詳細シミュレーションを用いた手法では1件あたりの計算に20分程度要する（コンピュータ仕様：CPU3.00GHz，メモリ4GB）のに対し，予測負荷と簡易シミュレーションを用いた手法では瞬時に結果が出力される．これより，簡易なアンケートによる予測が有効であることが示された．

参考文献

1）武田清賢，濱田靖弘，村井拓矢，後藤隆一郎，中村　充；負荷追従型ガスエンジンを導入した家庭用熱電併給システムに関する研究，日本冷凍空調学会論文集，29-2(2012-6)，237-245.

2）武田清賢，濱田靖弘，高田信一朗，南沢慶一，後藤隆一郎，中村　充，板野愉明；寒冷地の住宅における高効率給湯・暖房システムの稼動特性と性能評価に関する研究，エネルギー・資源，33-6（2012-11），21-28.

3）武田清賢，濱田靖弘，高橋功多，中村　充，板野愉明；固体酸化物形燃料電池による家庭用熱電併給システムの寒冷地利用に関する研究，空気調和・衛生工学，No.208（2014-7），1-10.

4）武田清賢，濱田靖弘，高橋功多，中村　充，板野愉明；家庭用熱電併給システムの導入支援ツールに関する研究，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2012-8），65-68.

5）照明器具の省エネ，関東電気保安協会 ，

(https://www.kdh.or.jp/safe/energy_saving/estimation/filament_bulbs.html), 著者閲覧日：平成 26 年 10 月 21 日.

6) テレビジョン受信機判断基準小委員会最終取りまとめ, 総合資源エネルギー調査会省エネルギー基準部会, (2007-7).

7) 北方型住宅の熱環境計画 2010 年, 北海道建築技術協会 (2010-1).

8) 札幌版次世代住宅基準技術解説書（平成 25 年 4 月版）, (https://www.city.sapporo.jp/toshi/jutaku/10shien/zisedai/documents/00gijutukaisetu_zenshou.pdf), 著者閲覧日：平成 26 年 7 月 21 日.

9) 濱田靖弘, 田篭秀俊, 長野克則, 後藤隆一郎, 中村　充；寒冷地における家庭用コージェネレーションシステムの現状評価と将来性に関する研究, 太陽エネルギー, 185(2008-5), 51-58.

第９章

家庭用熱電併給システムにおける応用利用の研究

9.1　概説

本章では，コミュニティ向けシステムの検討として，集合住宅および戸建て住宅のコミュニティ内で追従型ガスエンジン熱電併給システムの発電電力を融通する際の導入効果についてシミュレーションを行う．まず，9.2 節で検討目的を示す．次いで，9.3 節で集合住宅における熱・電力融通の検討を，9.4 節で戸建て住宅のコミュニティ内での電力の融通の検討結果を示す．最後に，9.5 節でまとめを述べる．

9.2　検討目的

これまで３～８章では，家庭用負荷追従型ガスエンジン熱電併給（以下 GE-CHP）・固体高分子形燃料電池熱電併給（以下 PEFC-CHP）システム・固体酸化物形燃料電池熱電併給（SOFC-CHP）システムの寒冷地における戸建て住宅でのエネルギー削減効果ついて評価を行い，それぞれ高い省エネルギー効果があることを明らかにしてきた．本章では，これらの家庭用熱電併給システムのさらなる高効率利用を目的として，集合住宅および戸建て住宅におけるコミュニティ内での電力・熱融通の効果について解析を行う．

図 9.1 に，CHP における電力融通の概念図を示す．CHP の電力出力と熱出力の比（熱電

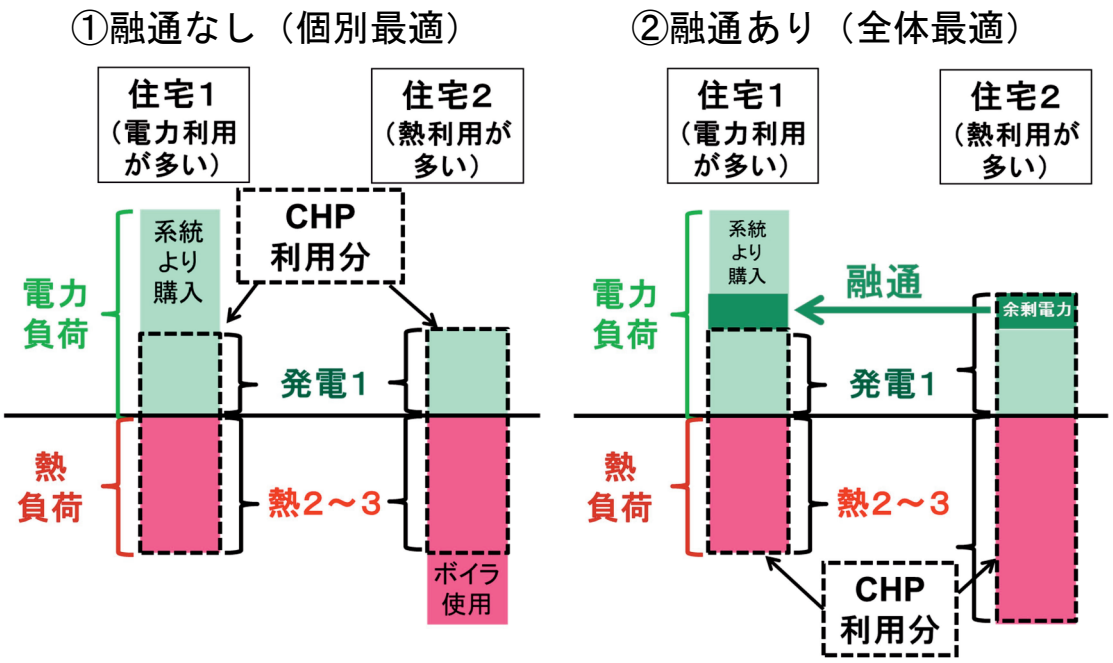


図 9.1 CHP における電力融通の概念図

比）は発電方式により異なるが，ここでは GE-CHP を想定し，熱出力が電力出力の 2～3 倍であると仮定する．CHP システムでは，通常電気と熱の両方を有効利用することが環境性・経済性の向上に繋がるため，電力利用が多い住宅１では熱負荷により CHP の発電量が決まり，熱利用の多い住宅２では電力負荷により CHP の発電量が制限される．この際，CHP で賄えない電力は系統より購入し，CHP で賄えない熱負荷はボイラ等でバックアップすることになる．このような運転方式を，本論文では個別最適運転と定義する．

一方で，電力融通を行う場合は，住宅２の CHP 発電量を熱負荷に合わせて決定し，余剰電力を住宅１に融通させることが可能である．これにより，CHP の電力・熱寄与率が増加するため，個別最適運転よりも，さらに省エネルギー効果を高めることが出来る．このような運転方式を，本論文では全体最適運転と定義する．

図 9.2 に，CHP における熱融通の概念図を示す．電力融通の概念図と同様に，電力利用が多い住宅１・熱利用が多い住宅２を想定する．熱融通が可能な全体最適では，住宅１における CHP 発電量を増やし，当該住宅の熱負荷を超える排熱を住宅２に融通させることが可能である．この際，電力融通の場合と異なり，熱融通に用いる熱配管からの熱ロスを考慮することが必要であるが，個別最適運転よりも CHP の電力・熱寄与率が増加するため，省エネルギー効果の増加が期待できる．

このように，電力と熱の両方を利用する CHP の特徴より，「電力利用量が多く熱利用量が少ない世帯」と「熱利用量が多く電力利用量が少ない世帯」で融通を行う際，その効果は特に高くなる．また，ピーク電力使用量が大きい世帯については，個別運転では CHP の最大発電出力までしか電力を賄えないが，融通方式では各世帯のピーク電力発生時間が異なり，融通世帯群における１世帯あたりのピーク電力が低くなるため，融通による効果が

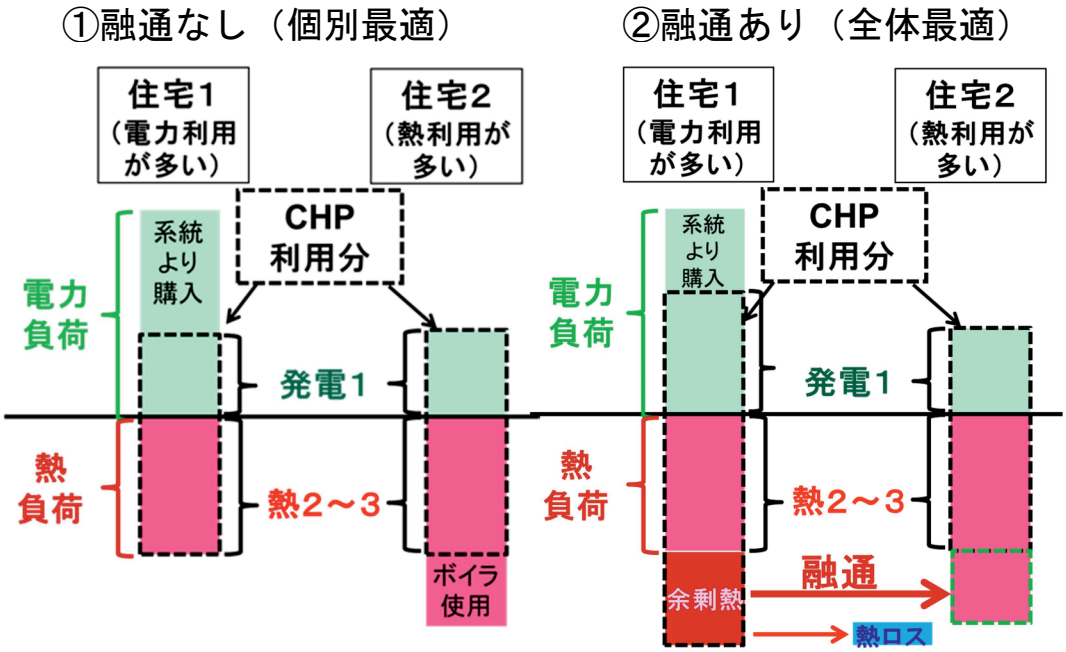


図 9.2 CHP における熱融通の概念図

大きくなる．

表 9.1 に，本論文で検討を行った各 CHP の性能を示す．GE は，PEFC・SOFC と比較して最大発電出力が高く，電力融通を行う場合の発電余力が比較的大きい．また，第２章で示した通り，PEFC・SOFC は起動に１時間程度要するのに対し，GE は速やかに起動が可能であり，起動停止に要するエネルギーも比較的少なく，全体最適運転においてもフレキシブルな制御が可能である．このような特徴から，本論文で検討を行った CHP システムのうち，GE が最も全体最適運転に向いていると考え，本章では GE における融通を検討する．PEFC・SOFC における融通の検討は，今後の課題である．

表 9.1 各 CHP の性能

		単位	SOFC	PEFC	GE
最大出力		[W]	700	750	1500
最低出力		[W]	100	250	500
発電熱効率	定格時	[HHV%]	43	37	24
排熱回収熱効率	定格時	[HHV%]	42	45	53
貯湯タンク容量		[L]	90	200	ー
運転形態		ー	連続	DSS	暖房利用時
排熱利用方法		ー	給湯	給湯	暖房

9.3　集合住宅における熱・電力融通検討

9.3.1　検討対象

本節では，中小規模のコミュニティの代表である集合住宅において，GE-CHPを共有し電気と熱を供給するシステムの検討を行う．このシステムの概念図を図9.3に示す．GE-CHPは各世帯に設置するのでは無く，集合住宅の中央熱源室に複数台設置し，集合住宅内の世帯に電気と熱を供給する（以降，中央熱源方式と呼ぶ）．GEの発電で賄えない電力負荷は，商用電力を利用する．また，GEの排熱で賄えない暖房負荷および給湯負荷は，各世帯に設置した補助ボイラ（潜熱回収型給湯・暖房ボイラ：以降CB）で賄う．GEの稼働台数は，集合住宅内の電力・暖房負荷に応じて，一次エネルギー削減量が最適になるように決定するものとする．

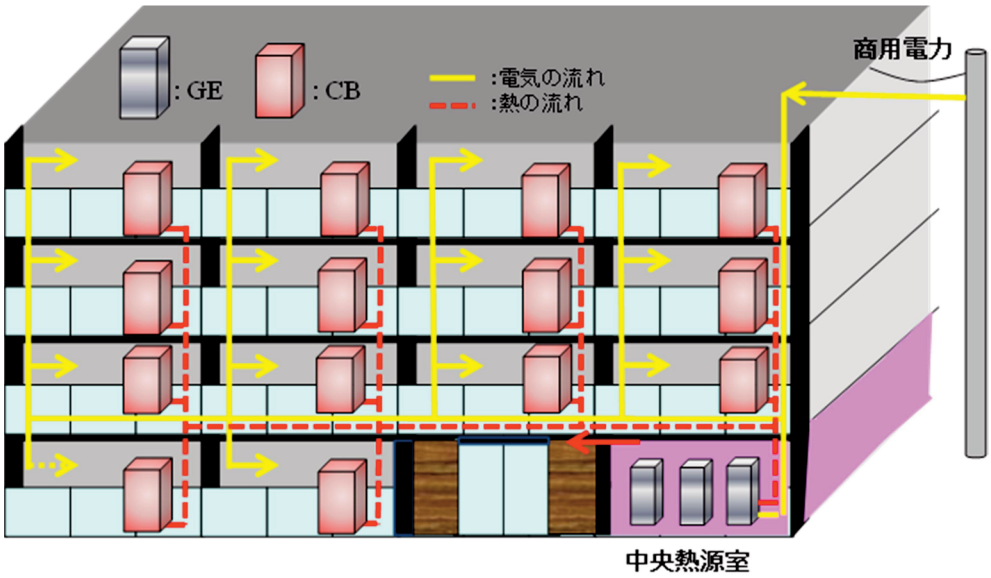


図 9.3 集合住宅における GE-CHP の電力・熱融通システム概念図

9.3.2　検討方法

図9.4に，集合住宅におけるGE-CHPの電力・熱融通システム解析フローを示す．先ず，条件設定部にて各世帯および集合住宅全体の電力・給湯・暖房負荷を計算する．この際，集合住宅における負荷データが無いことから，既往研究[1]で取得した戸建住宅49世帯の負荷データに，集合住宅への換算係数[2]を乗じたものを利用した．図9.5に，利用した戸建住宅の負荷特性を示す．また，負荷計算時は，これら49世帯より乱数にて任意の住宅を選択し，検討対象集合住宅の戸数分の負荷を設定した．

GEの稼働台数は，集合住宅の合計電力負荷と合計暖房負荷より，電力および熱の余剰が発生しないように決定する．GEの発電熱効率および排熱熱効率は，実測ないしは実測した部分負荷効率を基に作成した近似式を用いて決定する．

GEの排熱利用量の計算において，配管熱損失は常に一定割合であると仮定し，排熱全体の3割[3]が損失すると仮定して計算した．

また，比較対象として，集合住宅および戸建て住宅の各戸に1台ずつGE-CHPを設置する場合（以降，個別設置方式と呼ぶ）の計算も行い，それぞれ商用電力＋非潜熱回収型給湯・暖房ボイラ使用時と比較した場合の一次エネルギー削減量を求めた．また，世帯数は20戸から100戸まで，10戸刻みで検討を行った．

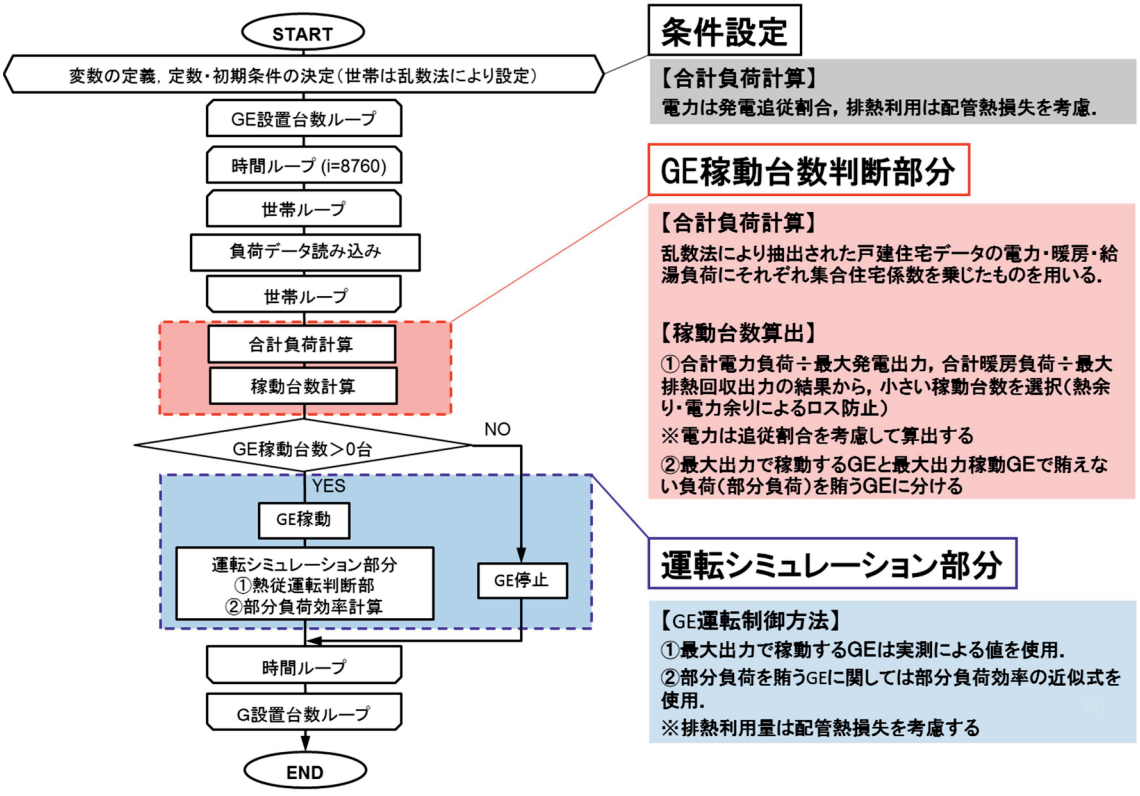


図 9.4 集合住宅における GE-CHP の電力・熱融通システム解析フロー

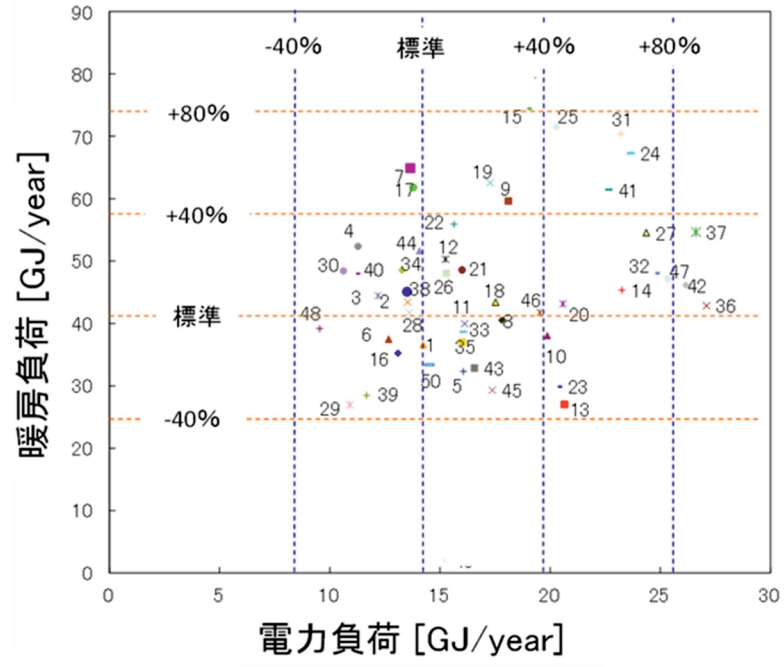


図 9.5 既往研究における戸建住宅の負荷特性

9.3.3　検討結果

表9.2に，戸建住宅と集合住宅における設定負荷を，図9.6に融通を行わない個別設置方式における，戸建住宅と集合住宅のGEによる一次エネルギー削減量の比較を示す．個別設置方式における戸建住宅と集合住宅の一次エネルギー削減量を比較すると，集合住宅の削減効果の方が概ね4割程度少ない．これは，集合住宅は戸建住宅と比較してエネルギー使用量が少なく，特に暖房負荷は6割程度の値となり，GE-CHPの発電量が少なくなったためである．

表 9.2 集合住宅と戸建住宅の設定負荷

戸数	電力負荷 GJ/year		給湯負荷 GJ/year		暖房負荷 GJ/year	
	集合	戸建	集合	戸建	集合	戸建
20	310	331	315		546	881
30	452	484	456		816	1,316
40	615	658	641		1,110	1,790
50	794	849	828		1,422	2,294
60	950	1,016	978		1,704	2,749
70	1,126	1,204	1,154		2,029	3,273
80	1,269	1,357	1,288		2,302	3,714
90	1,421	1,519	1,453		2,597	4,188
100	1,569	1,679	1,607		2,906	4,687

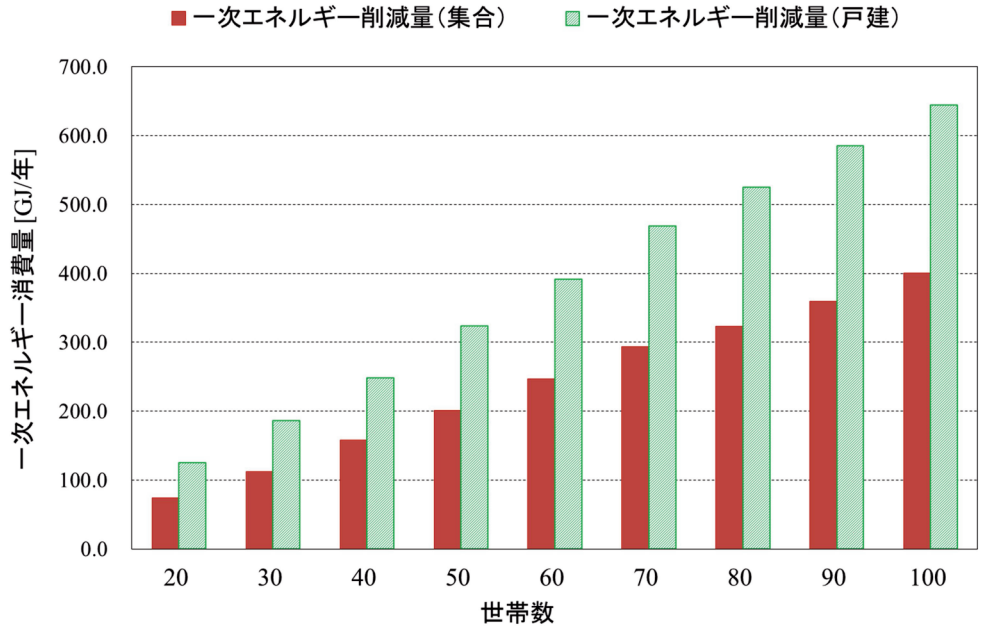


図 9.6 個別設置方式における集合住宅と戸建住宅の一次エネルギー削減量

図9. 7に，集合住宅（中央熱源方式，100戸）におけるGE設置台数と，一次エネルギー削減量・GE最大稼働台数・GE平均稼働台数の関係を示す．GEの最大稼働台数は，通年のシミュレーションにおけるGEの最大稼働台数とした．試算の結果，設置台数の増加とともにGEの最大稼働台数は増加するが，64台が上限であった．また，平均稼働台数は，GE設置台数51台で概ね最大値に達し，22.5台となった．一次エネルギー削減量は，GE設置台数が40～50台に達する辺りから増加量が低くなるものの，GE最大稼働台数である64台までは，僅かながら上昇する結果となった．これより，本検討で仮定する集合住宅においては，65台以上のGEの設置は必要ないことがわかる．

図9. 8に，集合住宅（中央熱源方式）におけるGE設置台数の検討のため，戸建住宅（個別設置方式）と一次エネルギー削減量が同等になる際のGE設置台数を示す．試算の結果，戸数により多少の違いはあるものの，GEの設置台数が全世帯数の概ね4割程度で戸建住宅（個別設置方式）と同等の一次エネルギー削減効果を発揮する結果となった．図9. 6に示した通り，GE-CHP個別設置方式における集合住宅の一次エネルギー削減量は，負荷の違いから戸建住宅の6割程度と低くなったが，中央熱源方式を採用することにより，戸建住宅よりも少ない設置台数で同等の省エネルギー効果が出ることから，本中央熱源方式が集合住宅にGE-CHPを導入際の有力な手法であると言える。

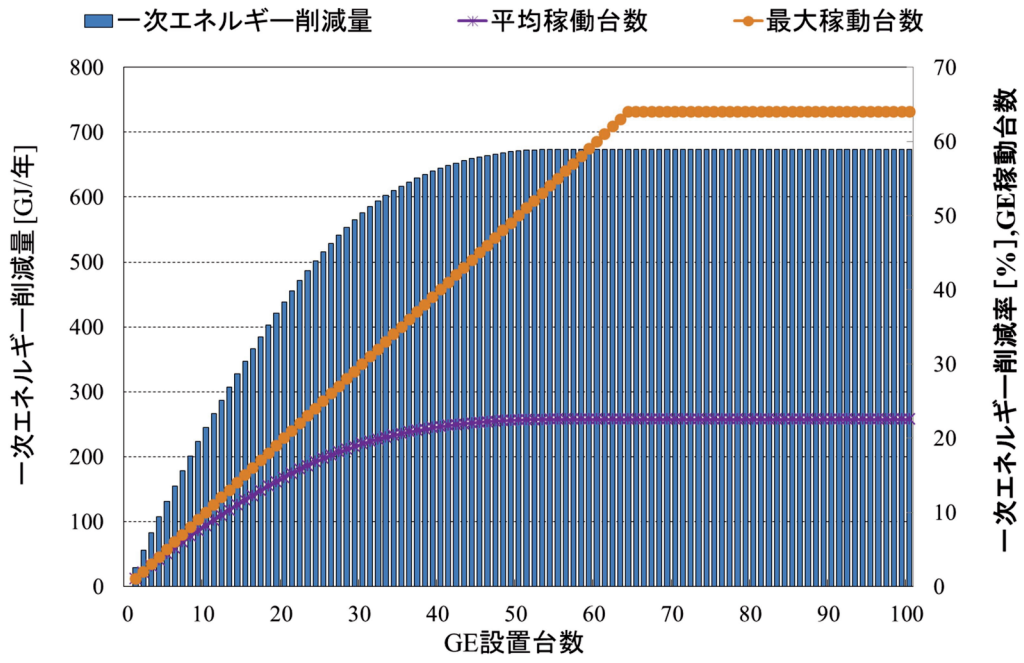


図 9. 7 集合住宅（中央熱源方式）における解析結果（100 戸）

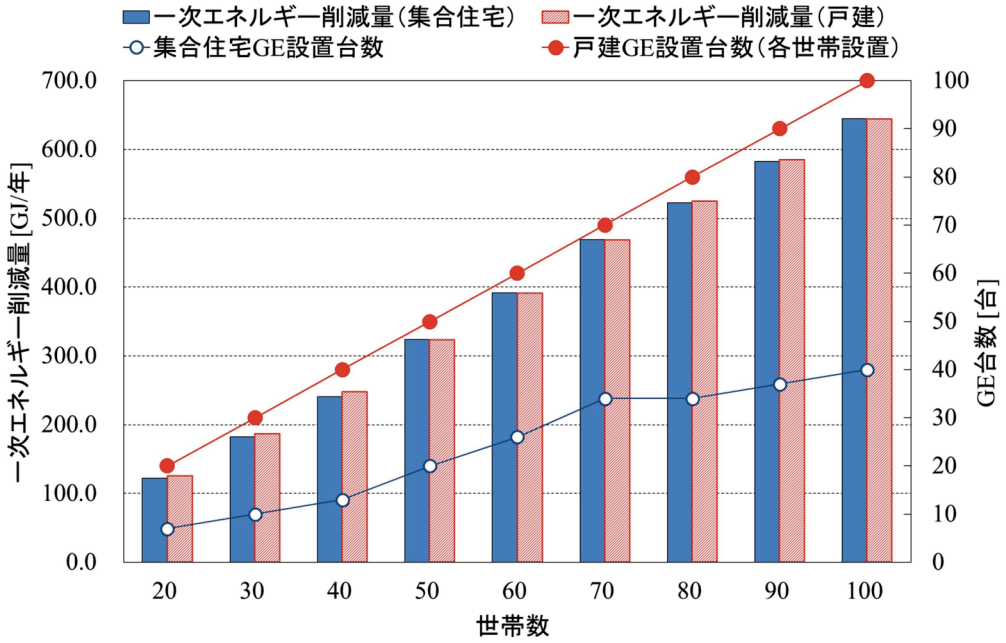


図 9.8 集合住宅（中央熱源方式）における一次エネルギー削減量と GE 設置台数

9.4　戸建て住宅のコミュニティ内での電力の融通検討

9.4.1　検討対象

本節では，戸建住宅におけるGE-CHPシステムの一次エネルギー削減効果の拡大を目的として，一定規模のコミュニティ内で電力を融通するシステムの検討を行う．このシステムの概念図を図9.9に示す．日本国内において，一般的に家庭用CHPシステムから商用電力への逆潮流は認められておらず，家庭の電力負荷に合わせた負荷追従運転となるが，本システムにおいてはコミュニティ内の戸建住宅における電力負荷を中央制御棟で監視し，各GE-CHPシステムの運転を制御することで，商用電力への逆潮流を防止する．集合住宅の中央熱源方式においては，電力だけではなく熱の融通も行ったが，戸建住宅のコミュニティにおいては，熱配管の敷設などが現実的ではない（新たに熱配管を地中埋設しなくてはいけない，集合住宅に比べ配管距離が長く熱ロスが増加する恐れがある等）ため，電力の融通のみ行うシステムとした．各戸のGEの発電で賄えない電力負荷は，コミュニティ内の他の住戸のGE発電および商用電力を利用する．GEの排熱で賄えない暖房負荷および給湯負荷は，各世帯に設置した補助ボイラ（潜熱回収型給湯・暖房ボイラ：以降CB）で賄うものとした．

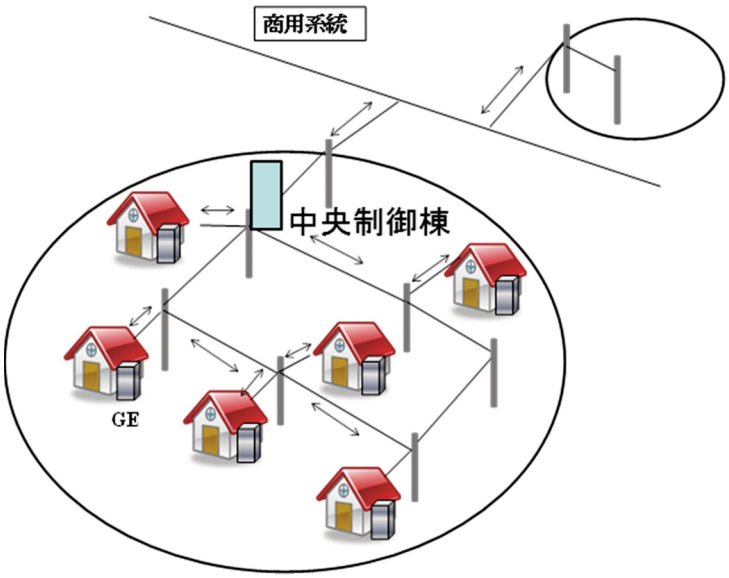


図 9.9 戸建住宅における GE-CHP の電力融通システム概念図

9.4.2　検討方法

図9.10に，戸建住宅におけるGE-CHPの電力融通システム解析フローを示す．先ず，条件設定部にて各世帯の電力・給湯・暖房負荷を計算する．この際，集合住宅（中央熱源方式）における計算と同様に，図9.5に示した既往研究[1)]の戸建住宅49世帯の負荷データより，乱数にて任意の住宅を選択した．

次に，仮運転シミュレーション部分にて，電力融通を行わなかった場合（個別設置方式）の運転結果を算出する．

さらに，ネットワーク内負荷把握部分において，ネットワーク内における電力融通で，発電出力を増加させる世帯の優先順位を付ける．この際，暖房負荷が大きい世帯ほど，発電出力増加に伴う排熱増加に対応できることから，暖房負荷の大きい世帯ほど優先順位が高くなるように順位を付けることとした．

運転シミュレーション部分においては，先述の発電出力増加の優先順位に基づき，GEの運転計画を決定した．発電出力の増加を行う世帯では，GEの発電出力を暖房負荷から決定し，個別の住宅で熱余りにならないようにした．また，発電出力の増加は，ネットワーク外への逆潮流が発生しないよう，個別設置方式におけるネットワーク内の商用電力利用量に達するまでとした．　GEの発電熱効率および排熱熱効率は，実測ないしは実測した部分負荷効率を基に作成した近似式を用いて決定した．

また，構成世帯は5～100世帯を5世帯毎に増加させて試算した．

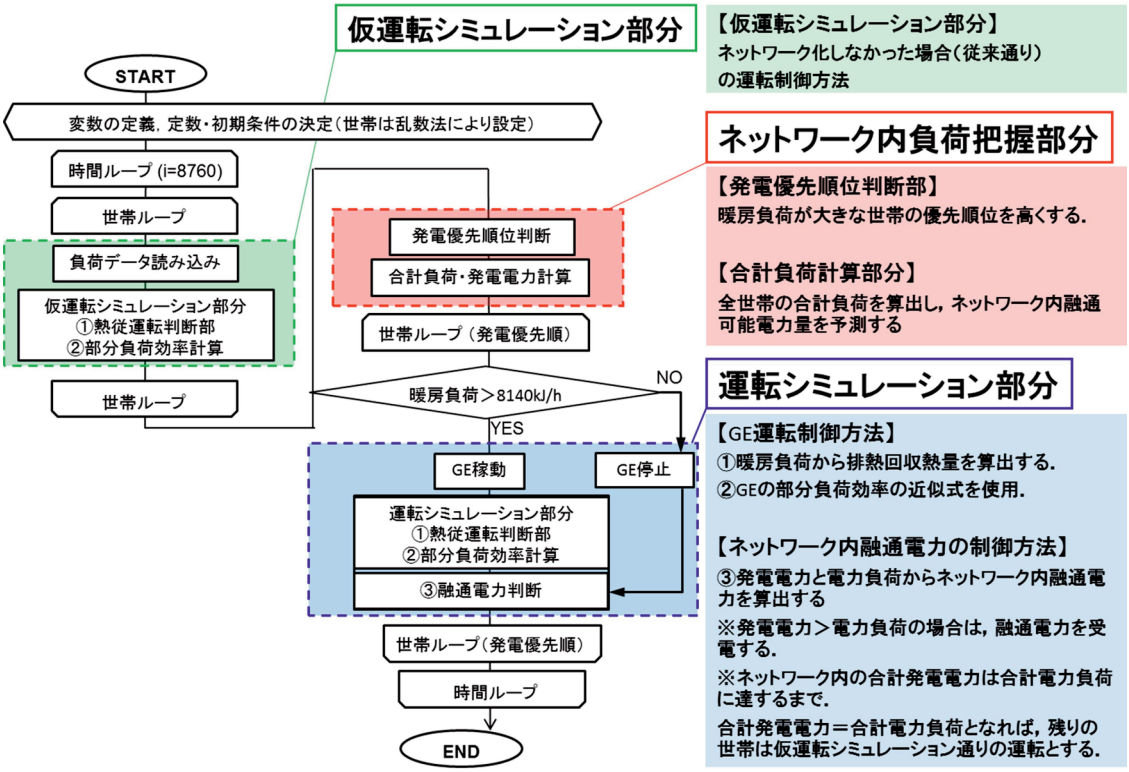


図 9.10 戸建住宅における GE-CHP の電力融通システム解析フロー

9.4.3　検討結果

図9.11に，戸建住宅（ネットワーク方式：20世帯）における発電寄与率を示す．GE稼働月（10～5月）は，何れも電力融通により発電寄与率が増加する結果となった．特に，厳冬期である12～3月は，融通なしの場合と比較して20～30ポイント寄与率が増加し，何れも100%に近い値となった．

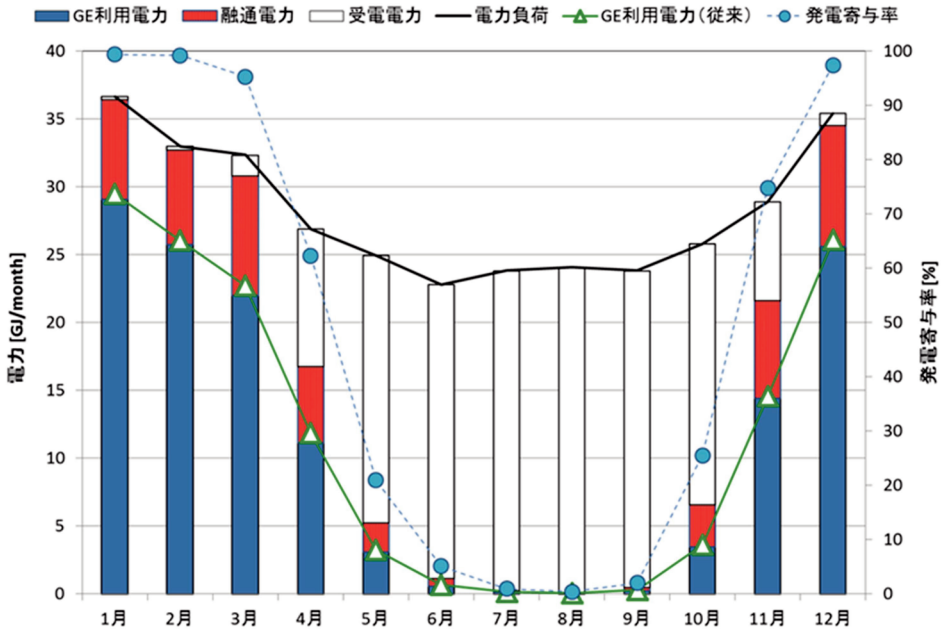


図 9.11 戸建住宅（ネットワーク方式：20 世帯）の発電寄与率

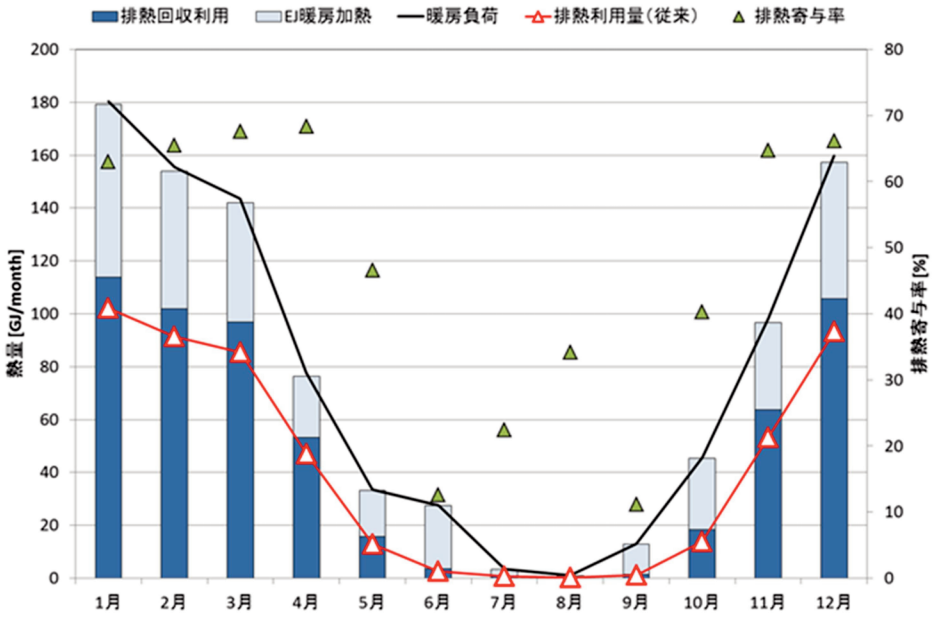


図 9.12 戸建住宅（ネットワーク方式：20 世帯）の熱寄与率

図9. 12に，戸建住宅（ネットワーク方式：20世帯）における熱寄与率を示す．月によりバラツキはあるものの，GE稼働月においては何れも30～40ポイント以上の寄与率の増加を確認できた．個別設置方式においては，何れの月も熱寄与率が4割を下回っており，GEの排熱出力に対し暖房負荷が大きく，GEが熱余りになりにくい状態であることがわかる．これは，GEの発電量を増やした場合の排熱の利用先が十分にあることを意味し，本ネットワーク方式のような手法はGE-CHPシステムの省エネルギー効果の増加に有効であると言える．

図9. 13に，ネットワーク方式における世帯数とGE発電電力の関係を示す．世帯数により多少のバラツキはあるものの，何れも発電寄与率が概ね5割程度となった．また，融通電力と家庭内で消費されたGE利用電力を比較すると，ネットワーク方式を用いることにより，概ね40%の発電電力の増加が確認できた．

図9. 14に，ネットワーク方式における世帯数とGE排熱利用量の関係を示す．排熱寄与率は50～60%程度となり，個別設置方式と比較すると高い値となった．しかし，まだ潜熱回収型ボイラによるバックアップが40～50%程度を占めているため，ネットワーク外への逆潮流が認められる場合は，さらに高い効果を発揮することも期待できる．

図9. 15に，ネットワーク方式における一次エネルギー削減量の内訳を示す．その結果，10世帯以上の結果においては，何れもネットワーク内融通における一次エネルギー削減量が家庭内利用における削減量の50%を超える結果となっており，電力融通のみで一次エネルギー削減量を5割増加させる結果となった．これにより，GE-CHPシステムをネットワーク方式利用が，一次エネルギー削減に対し有効であることが確認できた．

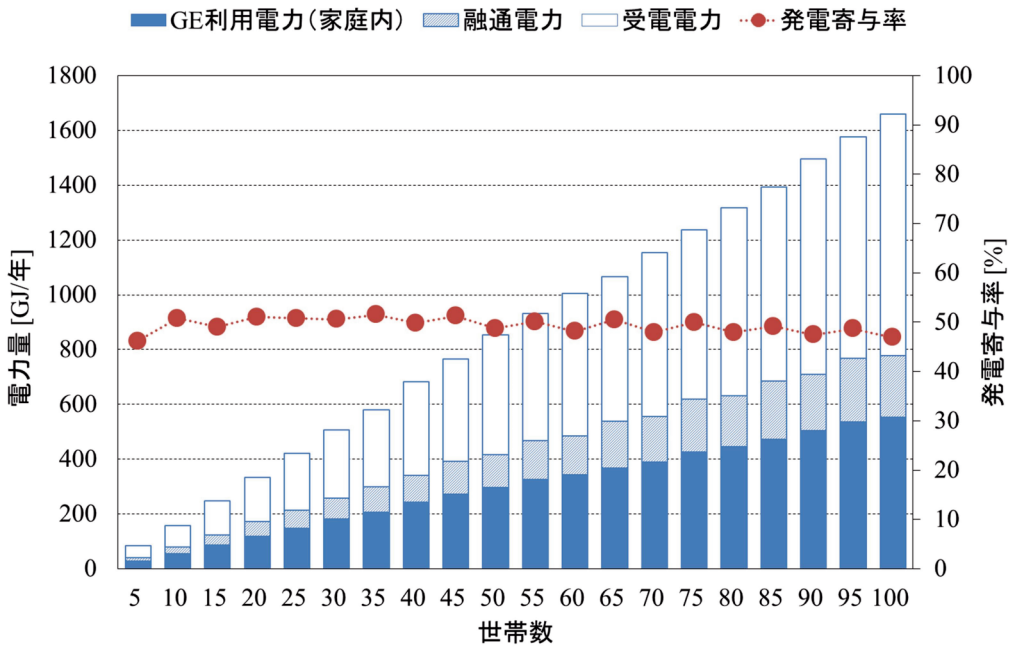


図 9. 13 ネットワーク方式における世帯数と GE 発電電力の関係

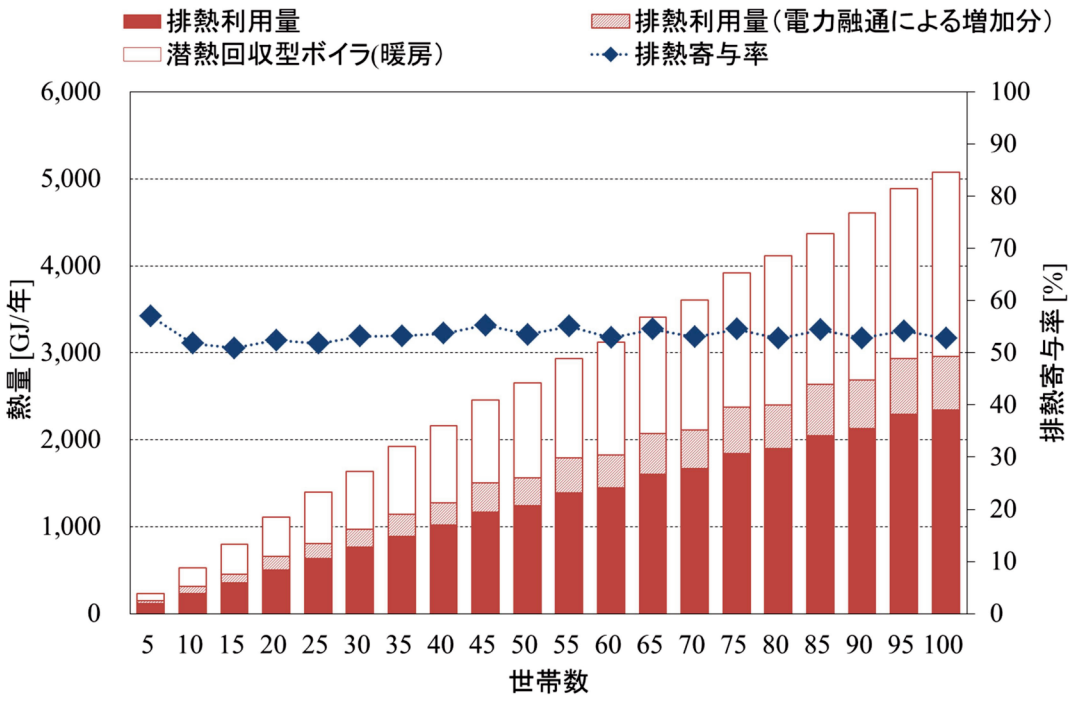


図 9.14 ネットワーク方式における世帯数と GE 排熱利用量の関係

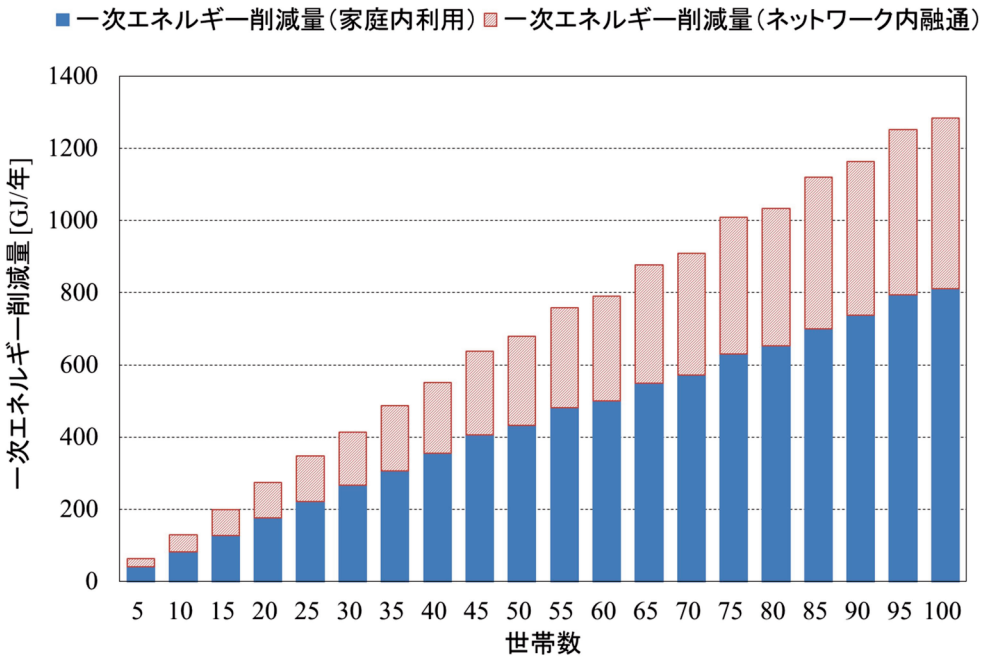


図 9.15 ネットワーク方式における一次エネルギー削減量の内訳

9.5　まとめ

(1) 集合住宅におけるGE-CHPシステムの電力･熱融通(中央熱源方式)を検討したところ，100戸の住宅に対しGEの稼働台数は最大で64台となった．また，集合住宅は戸建住宅と比較して暖房負荷が低いことから，個別設置方式においてはGE-CHPの一次エネルギー削減量も4割程度少なくなる結果となったが，中央熱源方式を用いることにより，入居戸数よりも少ないGE設置台数で，戸建住宅と同等の一次エネルギー削減効果があることを確認した．

(2) 戸建住宅におけるGE-CHPシステムの一次エネルギー削減効果の拡大を目的として，コミュニティ内における電力融通（ネットワーク方式）を検討したところ，通年で概ね35%の発電電力の増加と，50%程度の一次エネルギー削減量の増加を確認し，本方式が有効であることがわかった．

参考文献

1）濱田靖弘，中村真人，落藤　澄，村越千春，鶴崎敬大，横尾美雪，成田涼子，鴫原　亮，長倉香織，横山真太郎；札幌における家庭用エネルギー消費量とその季時別変動に関する実測と評価，空気調和・衛生工学会論文集，82(2001-7)，29-37.

2）北海道経済部；「北海道エネルギー問題懇談会」関連調査事業調査結果（2010 年 2 月）

3）羽山広文，森太郎，菊田弘輝；マンションのエネルギー消費に関する研究，空気調和・衛生工学会北海道支部学術講演会論文集（2013.3），pp235-238

第１０章

総括

10.1　総括

近年，地球温暖化や資源枯渇などの地球環境問題を背景にさまざまな分野で省エネルギー化が進んでいる．改正省エネルギー法（エネルギーの使用の合理化に関する法律の一部を改正する法律）では，住宅の省エネルギー性能の判断基準として，基準一次エネルギー消費量があり，それに対する達成率の報告が求められる．そして，省エネルギー性能については，これまでの断熱・気密性能などに加え，暖冷房・給湯など住宅設備の機器効率を踏まえた評価が必要となる．住宅における省エネルギー化は，近年増加傾向にある民生部門のエネルギー消費量を削減する上でも重要である．また，寒冷地区である北海道では，家庭部門における一人当たりのエネルギー使用量が全国平均の約 1.5 倍程度になっている．

このような背景から，本研究では近年普及しつつある潜熱回収型ボイラよりもさらに高い省エネルギー性･環境保全性を有するガスエンジン（Gas Engine：GE）および燃料電池（Fuel Cell：FC）を用いた家庭用熱電併給（Combined Heat and Power：CHP）システムの，寒冷地戸建て住宅における実使用を考慮した省エネルギー性評価を目的とし，各システムの実験室試験・フィールド実測試験・シミュレーションを実施した．さらに，各家庭における多様なエネルギー使用形態により，各 CHP 機器によるエネルギー削減効果が異なってくるため，簡易的なアンケートにより，寒冷地における家庭のエネルギー使用量を予測し，各家庭用 CHP システムのエネルギー削減効果を予測する手法の開発も実施した．本論文で得られた知見を以下に示す．

第 1 章「序論」

第 1 章では，研究背景と本論文の構成を示した．

第 2 章「家庭用熱電併給システムに関する国内外の動向と本研究の目的」

第 2 章では，家庭用熱電併給システムにおける国内外動向について概説するとともに，各家庭用熱電併給システムの特徴・利点などについて述べた．

第 3 章「寒冷地の住宅における高効率給湯・暖房システムの稼動特性と性能評価」

第 3 章では，寒冷地向け負荷追従型ガスエンジン家庭用熱電併給システムの部分負荷特性を示した．さらに，既往のエネルギー調査で得られた札幌地区の実測データより代表 4 世帯を選び，模擬負荷装置を用いた実験室実験にて運転データを取得し，シミュレーションの妥当性を確認した．さらに，既存の定格型ガスエンジン家庭用熱電併給システムを比較

対象としたシミュレーションを実施したところ，解析対象となった全 35 世帯において，当該負荷追従型ガスエンジン家庭用熱電併給システムが既存の定格型ガスエンジン家庭用熱電併給システムを上回る一次エネルギー削減効果となった．

第 4 章「負荷追従型ガスエンジンを導入した家庭用熱電併給システム」

第 4 章では，試験モードによる実験およびフィールド実測試験による実使用下におけるシステム性能評価を実施し，潜熱回収型給湯・暖房機単体の性能を示した．さらに，潜熱回収型給湯・暖房機を併用する負荷追従型ガスエンジン家庭用熱電併給システムのフィールド実測試験を実施した．冬期代表週および年間の運転状況の評価を通じ，本システムの省エネルギー性・経済性を明らかにした．

第 5 章「寒冷地向け負荷追従型ガスエンジン熱電併給システムの排熱利用方法」

第 5 章では，3・4 章で述べた負荷追従型ガスエンジン家庭用熱電併給システムの更なる高効率利用を目的として，新たな排熱利用方法について検討した．当該ガスエンジン家庭用熱電併給システムの冬期間における熱寄与率は，モニター平均で 4 割程度となっていることから，住宅全体で熱余りになっておらず，発電機会および排熱利用の拡大が導入効果の向上に繋がることを示した．札幌市内のモニター住宅にて，ガスエンジンの排熱を換気用の外気の加熱に利用するシステムのフィールド実測行い，通年の導入効果を明らかにしたうえで，通常の排熱利用方式の結果（第 4 章）と比較し，高い一次エネルギー削減効果を示すことを明らかにした．

第 6 章「寒冷地における家庭用燃料電池システムの稼働特性と性能評価」

第 6 章では，寒冷地における家庭用固体高分子形燃料電池熱電併給システムの導入効果を明らかにすることを目的として，システムを札幌市内の戸建て住宅 4 軒に設置し，一年間の運転データを示した．フィールド実測サイトのエネルギー負荷特性，発電・熱寄与率を纏め，新エネルギー財団，新エネルギー・産業技術総合開発機構による大規模実証の全国平均値と比較を示した．次いで，一次エネルギー削減量の実績を纏め，本州における実績との比較を行い，同程度のエネルギー負荷のサイトで比較すると，寒冷地サイトの方が高い一次エネルギー削減量となることを示した．最後に，家庭用固体高分子形燃料電池熱電併給システムにおいて，一次エネルギー削減量と電力・給湯負荷の相関性が高いことを示した．

第 7 章「固体酸化物形燃料電池による家庭用熱電併給システムの寒冷地利用」

第 7 章では，寒冷地における家庭用固体酸化物形燃料電池熱電併給システムの導入効果を明らかにすることを目的とした．まず，負荷変動特性・起動停止特性・部分負荷特性の実験室実験の結果を示した．次いで試験モード，および実使用を想定した実証実験を実施し，

従来方式と一次エネルギー消費量および一次エネルギー削減率を比較した．さらに数値解析を行い，寒冷地戸建て住宅における通年の一次エネルギー削減効果を明らかにした．

第 8 章「寒冷地における家庭用熱電併給システムの導入支援ツール」

第 8 章では，簡易的なアンケートにより，寒冷地における戸建て住宅のエネルギー使用量を予測し，先述の寒冷地向け家庭用熱電併給システム（負荷追従型ガスエンジン・固体高分子形燃料電池・固体酸化物形燃料電池）のエネルギー削減効果を予測する手法を示した．アンケートにおいては，各世帯の延床面積・テレビの視聴時間・世帯人数・一週間における入浴回数・建築年度・暖房設定温度を問うことで，通年の電力・給湯・暖房負荷をそれぞれ 14.3%・21.1%・30.6%の平均誤差で予測できた．さらに，本予測負荷より簡易に各熱電併給システムの一次エネルギー消費量を試算する手法（簡易シミュレーション）について述べ，実測負荷と最適運転手法を求める詳細シミュレーションに対し，何れの熱電併給システムでも 2 割弱の誤差になることを示した．

第 9 章「家庭用熱電併給システムにおける応用利用」

第 9 章では，コミュニティ向けシステムの検討として，集合住宅およびコミュニティ内で熱電併給システムの発電電力を融通する際の導入効果についてシミュレーションを行った．先述の負荷追従型ガスエンジン熱電併給システムにおいて，個別設置方式（通常設置方式）・ネットワーク方式（ネットワーク外への逆潮無）の比較を行い，個別設置方式と比較して高い一次エネルギー削減効果を得られることを確認した．

10.2　おわりに

本論文では，近年の地球環境・エネルギー資源枯渇への問題に対し，家庭用部門における省エネルギーの達成を目的として，CHP システムに注目した．また，寒冷地区である北海道では，家庭部門における一人当たりのエネルギー使用量は全国平均の約 1.5 倍程度となっていることから，寒冷地における固体高分子形燃料電池（PEFC），固体酸化物形燃料電池（SOFC），ガスエンジン（GE）を用いた寒冷地向け家庭用 CHP システムの導入効果を明らかにした．

また，これらの機器を実際の住宅に導入する際は，住宅性能および住居者の行動により電力・給湯・暖房等のエネルギー負荷が異なるが，特に新築住宅においては事前にエネルギー負荷を予測することが困難であることから，簡易的なアンケートにより，寒冷地における戸建て住宅のエネルギー使用量を予測し，各 CHP システムのエネルギー削減効果を予測する手法についても開発を行った．

本予測手法は，月別・時間帯別の電力・給湯・暖房負荷を予測し，CHP の部分負荷効率を計算する手法を用いていることから，外気温データ等を導入することによりヒートポンプ機器（CO_2 ヒートポンプ式給湯機，エアコン）への応用も可能であり，今後より多くの高

効率機器の評価に役立つことが期待できる．

CHP 機器に関しては，電力・熱を合わせた総合効率が 8～9 割となる高効率システムであり，分散型電源という特徴から，省エネ・光熱費削減・エネルギーセキュリティの問題を解決することができる．また，ICT を導入したスマートエネルギーネットワーク社会においては，太陽光・風量発電のような不安定な再生可能エネルギーの出力変動を吸収する運転を行うことで，系統電力の安定化に寄与することも期待されている．このような状況から，CHP 機器を個別の住宅で使用するだけでなく，コミュニティおよびマンション内等で電力・熱融通を行い，その効果を最大化させることも重要である．本研究においては，融通による導入効果が最も高いと予測される GE-CHP システムにおいて解析を実施したが，今後は PEFC・SOFC およびその複合利用での融通なども検討し，最適な運転・融通制御を検討することが重要であると考える．またその際，将来における住宅のエネルギー負荷を予想し，検討を行う必要もある．例えば，住宅の高断熱・高気密化により暖房負荷は減少することが予測されるため，現在の GE-CHP システムの仕様が最適であるか検討することも必要である．

本論文においては，各 CHP の基本的な性能や特徴，実使用を考慮した導入効果，導入効果の予測手法，電力・熱融通における効果の一例などが記載されており，CHP システムを適材適所に導入するための一助となれば幸いである．

謝辞

本研究は，主査である本学工学研究院環境人間工学研究室　濱田靖弘教授の御指導の下で行われたものであります．濱田靖弘教授には，本研究の方向性をはじめ，実験・論文などにおいて大変親切で適切な御指導を賜りました．また，本学入学以前より，長年の共同研究を通じて多くの御助言・御協力を賜りました．ここに深甚なる謝意を表するとともに，今後もこれまでと変わらぬ共同研究での御指導をお願い申し上げる次第です．

本論文審査の副査を御担当賜りました，空間性能システム部門　長野克則教授，羽山広文教授には懇切丁寧な御助言を賜りました．厚く御礼を申し上げます．

学位授与審議委員を御担当賜りました，空間性能システム部門　千歩修教授，飯場正紀教授，前田享史准教授，エネルギー環境システム部門　近久武美教授，環境創生工学部門　船水尚行教授，高橋正宏教授，松井佳彦教授，松藤敏彦教授，松井利仁教授には本論文に関しまして適切な御助言，御意見を賜りました．厚く御礼を申し上げます．

環境人間工学研究室　小川まどか特任助教には，本論文に関する内容のみならず，私にとって全く新しい分野の研究について御指導頂き，研究の視野を広げることができました．厚く御礼を申し上げます．

本研究の遂行にあたり，アイシン精機株式会社の御厚意・御協力によりガスエンジンシステムの貴重なデータを取得することが出来ました．特に，早川誠治様，中野吉信様，神谷洋様，中谷則天様には様々な御助言を頂きました．厚く御礼を申し上げます．

また，同研究室のメンバーであった，田篭秀俊様（現　大成建設株式会社），我妻泰憲様（現　東京ガス株式会社），天澤敬太様（現　東京電力株式会社），村井拓矢様（現　北海道電力株式会社），高田信一朗様（現　日本海ガス株式会社），寺尾一孝様（現　大阪ガス株式会社），坂本鷹彦様（現　新菱冷熱株式会社），高橋功多様（現　富士通株式会社），南沢慶一様（現　アイシン精機株式会社），高市圭佑様，福澤明大様，佐藤博紀様，高橋勇伍様，山田拓郎様，花野翔眞様には，特に実験・解析・分析など非常に多くの御手伝いを頂きました．また，研究室のメンバーの皆様のお蔭で，研究室での時間を楽しく有意義に過ごすことが出来ました．心より感謝申し上げます．

北海道ガス株式会社　技術開発研究所　熊谷斉所長，若松栄マネージャー，横川誠課長，三谷淳様（現　室蘭ガス株式会社顧問），青木徹様（現　エリア開発部長），中村充様（現　スマートエネルギー推進Ｇマネージャー），後藤隆一郎様（現　施工管理Ｇマ

ネージャー）を始めとする上司・同僚の皆様には，学位取得への御理解および後押しを頂きました．また，業務面の御調整や御協力，アドバイスを賜りました．厚く御礼申し上げます．

また，同社総務人事部　松永吉弘マネージャー，柳沢尚美課長，北ガスジープレックス株式会社　武田勝副部長には，学位取得に関する御相談および手続き等，様々な御協力を頂きました．心より感謝申し上げます．

北ガスジープレックス株式会社　河合洋一係長，忠岡知恒係長，高梨洸二主任には，実験住宅およびフィールド実測サイトの実証機設置・計測等，多々御尽力頂きました．厚く御礼申し上げます．

最後に，学位取得に理解を示し，励ましてくれた家族に感謝の意を表します．

平成 27 年 2 月 16 日