

一般研究課題 環境負荷低減のための住宅用燃料電池コジェネの
最適導入形態と運転制御に関する検討
助成研究者 名古屋大学 加藤 丈佳



環境負荷低減のための住宅用燃料電池コジェネの 最適導入形態と運転制御に関する検討

加藤 丈佳
(名古屋大学)

1. まえがき

住宅部門におけるエネルギー効率向上やこれに伴う環境負荷の低減に向けて、ガスエンジン（以下、GE）や燃料電池（以下、FC）を用いた1kWクラスの住宅用コージェネレーションシステム（以下、H-CGS）の導入が期待されている。燃料電池実用化戦略研究会では、FCを用いたH-CGSの導入目標として、2010年に120万kW、2020年に570万kWがそれぞれ示された。この目標を達成するためには、住宅の世帯構成や生活パターンに応じた設備構成を選択し、余剰電力を系統へ逆潮流するなど、フレキシブルな設備設計・運転を行うことが重要である。また、個々の住宅に個別にH-CGSを導入するだけでなく、住宅と業務の複合ビルや住宅地域における小規模な地域熱供給など、様々な形態により、住宅部門におけるCGS導入拡大の可能性を検討することが重要である。

そこで本研究では、将来的な住宅部門におけるCGSの導入拡大に向けた基礎的検討として、以下の項目について検討を行った。

- 1) 世帯構成等の統計データに基づき、住宅におけるエネルギー需要の観点から、世帯構成や住宅様相に応じたH-CGSの適正規模および規模別の導入ポテンシャルを概算し、わが国における2020年の燃料電池型H-CGSの導入目標570万kWとの対応を検討した。
- 2) H-CGSの導入に適した4人家族の住宅において電力・温水需要の実測を行い、温水・電力需要の日々の変動特性を考慮して、様々な運転方式についてH-CGSの導入による一次エネルギー消費削減量を算定した。また、その結果に基づき、H-CGSの負荷追従性能など、H-CGSが具備すべき性能を検討した。
- 3) 家族構成が異なる様々な家庭におけるH-CGSの導入効果を概算するためのツールの構築に向けて、個人のライフスタイルに関する統計的な調査結果と時間帯ごとの日々の変動確率とを考慮した電力需要の確率変動モデルを構築した。

- 4) 住宅用CGSの導入拡大方策の一つとして、住宅および業務ビルによって構成される小規模な地域熱供給における熱源としてのCGS導入に着目し、豊田市を対象として、小規模地域熱供給に適した地域を統計的に評価した。

2. 統計情報に基づくH-CGSの導入ポテンシャル評価

H-CGSの導入メリットは、温水として回収される排熱の有効利用の度合いによって大きく異なる。そこで本研究では、世帯人数別の温水需要を概算し、H-CGSの排熱利用によって賄うことが可能な温水需要の観点からH-CGSの導入ポテンシャルを評価し、わが国における2020年の燃料電池型H-CGSの導入目標570万kWとの対応を考察した。

エネルギー・経済統計によると、家庭部門における2000年度の給湯用エネルギー消費量は633,264 TJである¹⁾。この値に基づき、世帯人数別の温水需要の算定を試みた。まず、世帯あたりの温水需要が都市ガス需要に比例していると想定し、政令指定都市（札幌と仙台を除く）、愛知県内の27市（名古屋市を除く）、岐阜市および津市について、市全体の都市ガス消費量および都市ガス契約世帯数、各都市の平均世帯人数を調査した。その結果、世帯あたりの都市ガス需要との相関を次式のように定式化した。

$$\text{世帯あたり都市ガス需要} = 13.278 \times (\text{世帯人数})^{0.2684} \text{ [GJ/年]}$$

2000年度の国勢調査に基づき全国の平均世帯人数2.7人/世帯、および世帯人数別の全国世帯数を用いて、上述の給湯用エネルギー消費量から世帯人数別の温水用エネルギー需要を算定した。さらに、給湯器の効率：80%、12ヶ月の温水需要割合を考慮して²⁾、世帯人数別・月別の温水需要を算定した。その結果、例えば、世帯人数が4人の住宅の場合、温水需要は最小13.2 MJ/日（8月）から最大48.9 MJ/日（2月）となった。

一方、1kWのH-CGS（発電効率：35%、排熱回収効率：40%）の場合、定格出力による24時間連続運転時に供給可能な温水は99MJ/日である。したがって、上述の世帯人数が4人の住宅の場合、2月の温水需要をH-CGSの排熱によって賄うためには、平均して約50%の稼働率であればよい。

同様の計算を様々な世帯人数の住宅について行った。結果を図1に示す。同図において、印、およびエラーバーの上下限は、それぞれ排熱によって温水需要を賄うために必要な稼働率の月平均、2月および8月の値を示す。世帯人数が4人の場合、排熱によって温水需要を賄う場合のH-CGSの年

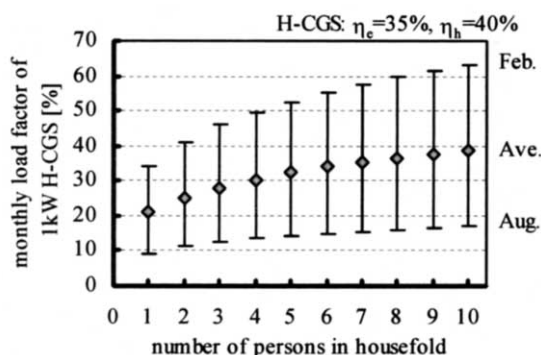


図1 世帯人数とH-CGS(1kW)の負荷率との関係

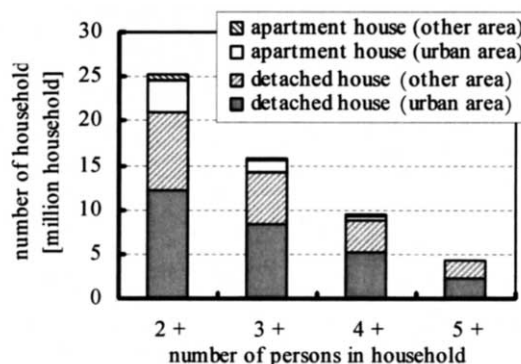


図2 地域別・世帯人数別の全国世帯数

平均の稼働率は約30%となる。一方、世帯人数が1人の場合、H-CGSの年平均の稼働率は約20%と非常に低くなる。ただし、世帯人数が1人の場合でも、温水需要が大きい冬期においては、H-CGSの排熱のみで温水需要を賄うためには、30%以上の稼働率が必要であり、世帯人数が4人の場合には約50%の稼働率が必要になる。電力需要の変動を考慮すると、1kWのH-CGSが定格出力で運転する場合、逆潮流せずに数十%の稼働率を実現することは非常に困難と考えられる。必要な温水を確保するために運転時間が長くとると余剰電力が発生するが、温水に変換されるため、排熱回収による温水供給の割合が低下すると考えられる。したがって、統計情報に基づく温水需要の推定からみても、H-CGSの有効利用のためには、余剰電力の系統への逆潮流を可能にすることが非常に重要であることを明らかにできた。

次に、世帯人数が2人以上の住宅にH-CGSが導入されると想定して、導入可能な世帯数を算定した。本研究では、H-CGSを導入可能な世帯として、総務省の統計に基づき、戸建住宅：最低居住水準、共同住宅：都市居住型誘導居住水準の住宅とした。それぞれの住宅数を大都市圏・都市圏とそれ以外の地域に分類して図2に示す。都市ガスを燃料とするH-CGSの場合、都市ガスインフラが整った大都市圏・都市圏における戸建住宅への導入可能性が最も高いと考えられる。図2に示すように、世帯人数が4人以上の最低居住水準の住宅数は514万世帯である。これらの住宅に1kWのH-CGSを導入する場合、全体の導入容量は514万kWに達する。この値は、2001年1月に燃料電池実用化戦略研究会において示された燃料電池を用いたH-CGSの2020年の導入目標570万kWの9割に達する。すなわち、上述の導入目標は、都市圏における最低居住水準の全戸建住宅にH-CGSを導入するだけでなく、さらに集合住宅や郊外の戸建住宅にもH-CGSを導入している状況と考えられる。なお、都市ガスインフラが整備されていない地方には、灯油を改質する燃料電池型H-CGSが導入されると考えられる。また、稼働率は低くなるが世帯人数が少ない住宅においてもH-CGSの導入可能性があると考えられる。したがって、図2に基づき、例えば、世帯人数が3人以上の全ての最低居住水準の戸建住宅に1kWのH-CGSを1台、都市居住型誘導居住水準の共同住宅に3世帯あたり1kWのH-CGSを1台導入すれば、約1500万kWに達する。この値は、わが国の一般電気事業者の発電容量：約19,800万kW（2003年度末）³⁾の7.4%に相当する。

ただし、高効率の温水供給技術としてH-CGSを考えた場合、潜熱回収型の給湯器やCO₂ヒートポンプなどの競合技術が存在する。H-CGSの導入ポテンシャルの算定には、これらの競合技術の導入割合の推移などを考慮して算定する必要があると考えられる。

3. 温水需要・電力需要の実測に基づくH-CGSの運転方式と省エネルギー性

3.1 温水需要・電力需要の実測

H-CGSの導入拡大のためには、世帯構成や住人の生活パターンに対応した設備構成を選択し、余剰電力を系統へ逆潮流するなど、フレキシブルな設備設計・運転を行うことが重要である。特に、発電効率が高く、熱回収効率が低い燃料電池型のH-CGSの場合、余剰電力の逆潮流の可否がその省エネルギー性に大きく影響すると考えられる。そこで本研究では、3世帯において、温水需要と電力需要の実測を行い、日々の需要変動を考慮して、H-CGSの運転方式による省エネルギー性の相違について検討した。

温水需要および電力需要の実測は下記のように行った。

<世帯1>

- ・家族構成：世帯人数4人（男勤め人、主婦、学生2人）
- ・開始年月日：温水需要2004年8月26日～、電力需要2004年10月2日～（ともに継続中）
- ・サンプリング間隔：1分

<世帯2>

- ・家族構成：世帯人数2人（男勤め人、女勤め人）
- ・開始年月日：温水需要2004年8月19日～2005年3月29日
- ・サンプリング間隔：1分

<世帯3>

- ・家族構成：世帯人数2人（老夫婦）
- ・開始年月日：温水・電力需要2004年11月15日～（不定期、継続中）
- ・サンプリング間隔：1分または10秒

なお、温水需要に関しては、実際の温水需要を実測することは、機器の改修を伴い困難であるため、本研究では、給湯器の排気温度を実測し、給湯の設定温度、水温および蛇口からの流量（約10ℓ/分）に基づき、給湯の熱量に換算した⁴⁾。

世帯1と世帯3について、1日あたりの温水需要と電力需要との関係を図3に示す。同図(a)の世帯1では温水需要と電力需要ともに1月や2月において大きい値が、日によって値が大きく異なり、両者の相関は小さい。また、温水需要については、他の月においても日によって値が異なるが、電力需要はばらつきが小さい。したがって、H-CGSが電力需要にあわせて運転する（電主熱従運転）場合、日によって供給できる温水の量と温水需要との差が生じる可能性がある。また、温水需要にあわせて運転する（熱主電従運転）場合、日によってH-CGSの運転時間が大幅に制限される可能性もある。世帯3も同様の傾向がある。ただし、世帯3では、世帯1と比較して電力需要が小さいにも関わらず、世帯1と同程度の温水需要が発生する日もあった。

3.2 H-CGSの運転方式と供給可能な温水・電力との関係

世帯1で実測した温水需要と電力需要の6ヶ月間の時系列データを用いて、H-CGSの運転方式による温水供給量、一次エネルギー削減量等を算定した。H-CGSとして、燃料電池(FC)型（発電効率：35%、熱回収効率：40%）とガスエンジン(GE)型とを想定し、発電機容量を0.1kW～1.0kWと

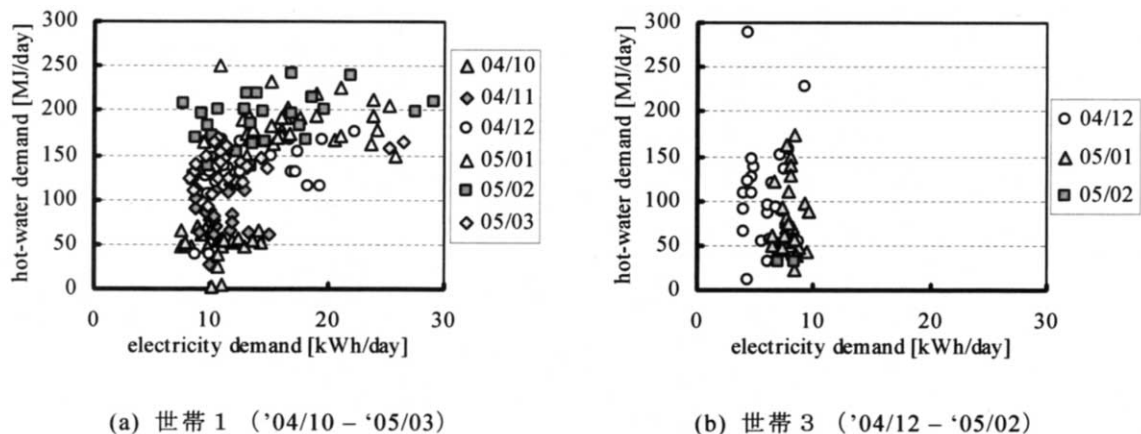


図3 1日あたりの温水需要と電力需要との関係

した。また、H-CGSの運転方式として、下記の3つの方式を想定した。なお、方式2と3については、逆潮流の可否が異なる2通りをそれぞれ想定した。

- 方式1 : On/Off運転（逆潮流不可、運転最低継続時間15分、最低停止時間：15分～60分）
 - 方式2a : 部分負荷運転（逆潮流不可[余剰電力は温水に変換]、負荷追従性能：1%/分～50%/分）
 - 方式2b : 部分負荷運転（逆潮流可、負荷追従性能：1%/分～50%/分）
 - 方式3a : DSS運転^注（逆潮流不可[余剰電力は温水に変換]）
 - 方式3b : DSS運転^注（逆潮流可）
- 注：Daily Start and Stop

方式1では、H-CGSの発電電力よりも大きい電力需要が15分以上継続した場合のみ発電し、発電停止後に発電を再開するまでの停止時間を変化させた。方式1では、最低停止時間によらず、発電機容量が1kWになると運転時間は非常に限定され、例えば'04年10月2日に運転可能な時間はわずか17分間であった。このとき、FC型H-CGSであれば、供給可能な電力および温水の需要に対する割合は、共に2%程度にすぎない。

そこで、H-CGSの発電機容量が0.1～1.0kWの場合について、温水需要および電力需要に対して方式1で供給可能な割合を1日ごとに算定し、月単位で集計した。最低停止時間が15分の場合について、1ヶ月間の温水・電力需要に対してFC型H-CGSから供給可能な電力の割合を図4に示す。同図に示すように、世帯1では、FC型H-CGSの発電機容量が0.4kWの場合に温水・電力需要に対する供給割合が高くなる。しかし、この場合でも供給可能な温水・電力は需要の30%にすぎない。特に、温水については、需要が大きくなる12月以降は、0.4kWのFC型H-CGSでもともに、供給可能な量は需要の十数%にすぎない。以上の結果、H-CGSからの温水・電力供給量を増やすためには、運転時間を長くする必要がある。

そこで、H-CGSの運転時間を長くする方式として、方式2（部分負荷運転）と方式3（DSS運転）とを想定した。方式2は余剰電力の発生を抑制して運転時間を長くするものであるが、急峻な需要変動に対する出力追従性能や最低出力を考慮すると、わずかながら逆潮流する可能性がある。そこで本研究では、余剰電力はヒータにて温水に変換する場合（方式2a）と、系統に逆潮流できる場合（方式2b）とを想定した。また、方式2における出力追従性能として、出力増加時および減少時ともに定格出力の1%/分、10%/分および50%/分を想定した。さらに、急激な需要減少に対

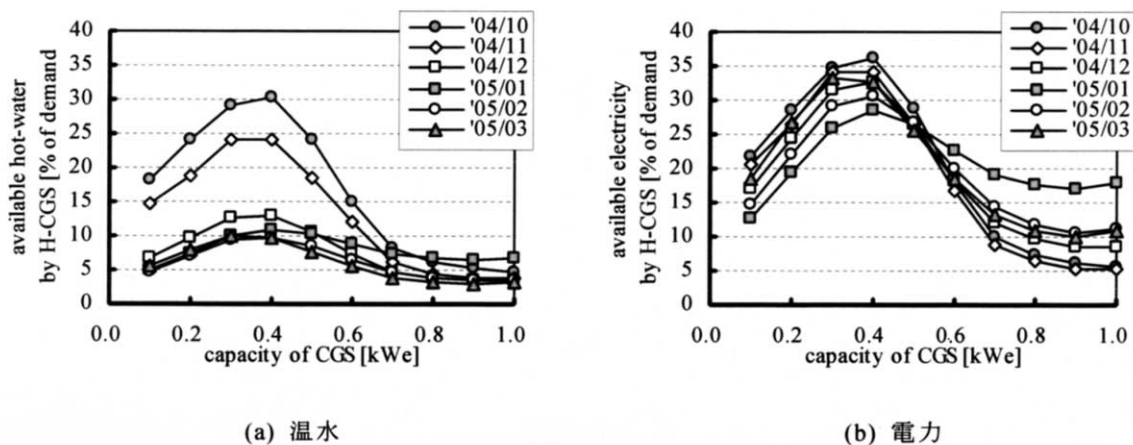


図4 on/off 運転されたFC型H-CGSの温水・電力供給量（最低停止時間15分）

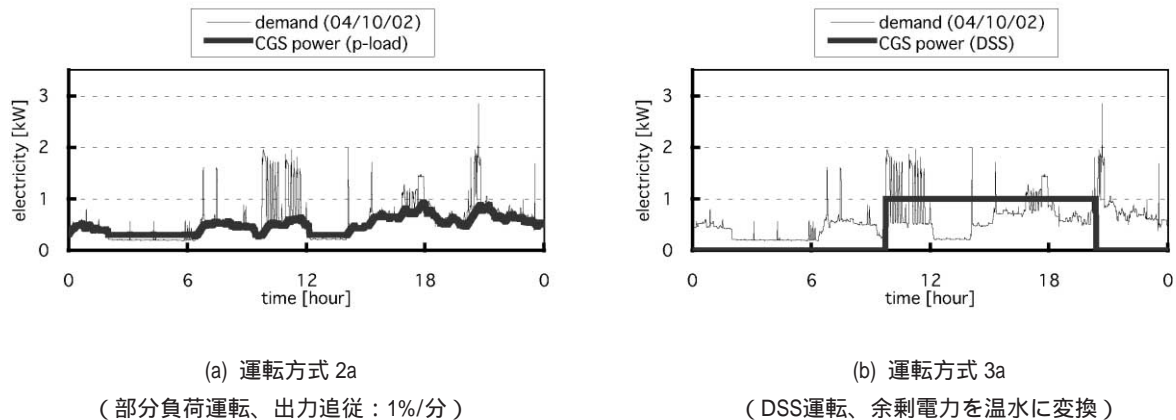


図5 FC型H-CGSの運転パターンの一例（'04年10月2日）

応できるように、部分負荷時には出力を需要の90%となるように設定した。一方、方式3では、あらかじめ1日あたりの温水需要が所与であるとして必要な運転時間数を算出し、電力需要パターンから余剰電力が最も少なくなる時間帯に発電するものとした。この場合も、余剰電力を温水に変換する場合（方式3a）と、系統に逆潮流できる場合（方式3b）とを想定した。

'04年10月2日の電力需要パターンに対する方式2a（出力追従性能：1%/分）と方式3aのH-CGSの運転パターンを図5に示す。方式1と比較して両者とも運転時間が大幅に長くなっている。同図(a)の方式2aの場合、H-CGSの温水および電力出力は同日の温水および電力需要のそれぞれ88%および86%を賄うことができる。一方、同図(b)の方式3bの場合も、H-CGSの温水および電力出力は同日の温水および電力需要のそれぞれ100%および65%を賄うことができる。他の日も同様に、方式2または方式3とすることで、H-CGSの運転時間が長くなり、温水および電力の供給量が増加する。また、現状のように、H-CGSの余剰電力が不可能な場合には、方式2aのように部分負荷運転を行った方が、温水に変換される余剰電力が少なく、必要な温水需要の大部分を排熱によって賄うために運転時間も長くなり、その結果として電力供給量も多くなる。ただし、余剰電力の逆潮流が可能であれば、運転方式3のようにDSS運転を行った方が有利になる可能性もある。そこで、次節では、一次エネルギー消費削減の観点から、運転方式2と運転方式3との比較を行う。

3.2 H-CGSの運転方式による一次エネルギー削減効果の相違

FC型H-CGSとGE型H-CGSの場合について、発電容量を0.1～1.0kWと変化させ、世帯1における'04年10月～'05年3月の温水・電力需要を賄うために必要な一次エネルギー消費量を算定した。H-CGSの運転方式として方式2（部分負荷運転）と方式3（DSS運転）とを想定し、両方式とも、余剰電力を温水に変換する場合と逆潮流可能な場合を想定した。なお、H-CGSからの温水供給の不足分はバックアップボイラ（効率：80%）で賄い、電力供給の不足分は系統電力（受電端効率：36.5%）で賄うと想定した。比較として、温水・電力需要を給湯器（効率：80%）と系統電力とで賄う場合（従来システム）を想定した。

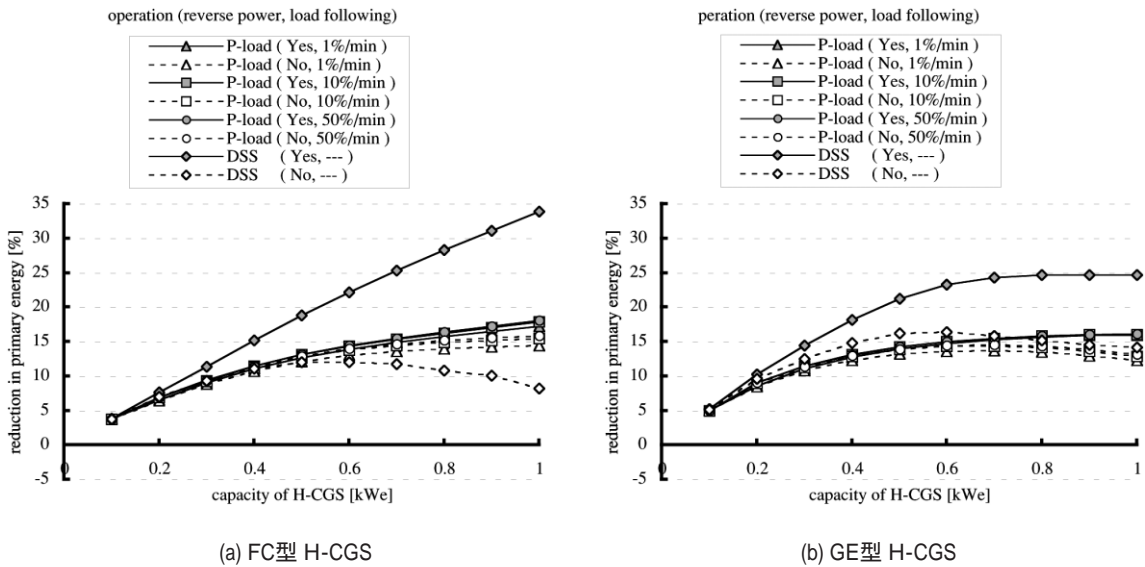


図6 従来型エネルギーシステムに対するH-CGSの一次エネルギー削減率

図6に各方式における従来システムに対する一次エネルギー削減率を示す。同図(a)のFC型H-CGSの場合、DSS運転で逆潮流が可能であれば（方式3b）、一次エネルギー削減率は最も大きく、発電容量の増加とともに一次エネルギー削減率も増加する。しかし、DSS運転で逆潮流が不可能な場合には、発電容量が0.4kWよりも大きくなると一次エネルギー削減率は低下し、さらに0.9 kW以上になると一次エネルギー削減率は負、すなわち従来システムよりも一次エネルギー消費が大きくなった。FC型H-CGSの発電効率は35%と高いものの、総合効率は75%が温水器の効率よりも低いため、余剰電力を温水に変換する割合が大きくなると、従来システムよりも一次エネルギー消費量は増加する。なお、発電容量 C_p kWのH-CGSにおいて $R\%$ の余剰電力を温水に変換する場合、次式のようにH-CGSと従来システムとの一次エネルギー消費が同じになると考える。

$$\frac{C_p}{\eta_e} = \frac{C_p \times (1 - \frac{R}{100})}{\eta_{sys}} + \frac{C_p \times \frac{R}{100} + C_p \times \frac{\eta_h}{\eta_e}}{\eta_b}$$

ただし、 η_{sys} : 系統電力の受電端効率 (=36.5%)、 η_b : 温水器の効率 (=80%)、 η_e : H-CGSの発電効率、 η_h : H-CGSの排熱回収効率。

上式から、H-CGSと従来システムとの一次エネルギー消費が同じになるような温水に変換される余剰電力の割合 $R\%$ は次式によって算定できる。

FC型H-CGS (η_e : 35%、 η_h : 40%) の場合、 $R=88\%$ となる。すなわち、発電電力のうち、88%以上を温水に変換するような状況では、FC型H-CGSの効率は従来システムよりも悪化する。本研究で対象とした世帯1における10月～3月までの電力需要に対しては、FC型H-CGSの発電容量が

0.9kW以上になると余剰電力を温水に変換する割合が88%以上になったと考えられる。また、運転方式2のように、部分負荷運転する場合にも、余剰電力が逆潮流可能な方が一次エネルギー削減率は大きくなるが、逆潮流不可能な場合との差は発電容量1kWの場合でも数%程度である。また、部分負荷時運転において、需要変動に対する出力追従性能が変化しても、一次エネルギー削減率はほとんど変化しない。これは、パルス的な電力需要変動が限られていることや、急激な需要低下に追従できずに余剰電力が発生しても、温水に変換されるため、その影響が緩和されることによる。以上の結果、発電効率が高いFC型H-CGSの有効利用のためには、余剰電力の逆潮流の可否が大きく影響することがわかった。

一方、GE型H-CGSにおいても、運転方式3bのようにDSS運転で余剰電力を系統に逆潮流可能な場合、従来システムに対する一次エネルギー削減率は最も大きい。ただし、排熱回収効率が高いGE型H-CGSでは、発電容量が0.7kW程度になると、24時間連続運転しなくても必要な温水を回収するため運転時間が短くなり、一次エネルギー削減率は飽和する。また、GE型H-CGSは η_e : 20%、 η_h : 65%であり、従来システムと一次エネルギー消費が同じになるような温水に変換される余剰電力の割合 R は121%である。すなわち、全ての発電電力を温水に変換しても、従来システムよりも一次エネルギー消費は小さい。これは、総合効率が85%であり、温水器の効率80%よりも高いためである。このため、図5(b)に示すように、DSS運転で余剰電力の逆潮流できずに温水に変換する場合でも、従来システムよりも一次エネルギー消費は削減される。また、このときの一次エネルギー削減率は、運転方式2のように部分負荷運転を行う場合と同程度である。すなわち、発電効率は低くても総合効率が高いGE型H-CGSでは、制御が複雑な部分負荷運転を行う場合に対し、適切な温水需要予測に基づきDSS運転を行い、余剰電力が発生する場合には温水に変換する場合でも、同程度の一次エネルギー削減率が得られる。なお、現在販売中のGE型H-CGSの運転方式もこのような運転方式を行っており、余剰電力の逆潮流が不可能な現状においては、適切な運転方式であると考えられる。

4. 変動確率を考慮した需要モデルの構築

4.1 需要モデルの概要

前節で示したように、特にFC型H-CGSの場合には、余剰電力の逆潮流の可否によって一次エネルギー削減量が大きく変化する。同様に、経済性やCO₂排出削減の観点からも、余剰電力の逆潮流可否は、H-CGSの導入メリットに大きな影響を及ぼすと考えられる。また、これに伴ってH-CGSの導入メリットを最大化するための適切な設備規模や運転方法が異なると考えられる。しかし、様々な家庭についてH-CGSの設備規模や運転方法を適切に設定し、その導入メリットを見積もるためには、実際の温水・電力需要パターンを用いた評価が必要である。しかし、様々な家庭について温水・電力需要パターンを実測することは困難である。

そこで本研究では、各種の統計情報や代表的な家族構成の住宅における温水・電力需要パターンの実測に基づき、家族構成が異なる様々な家庭におけるH-CGSの導入効果を概算するためのツールの構築を試みた。その第一段階として、個人のライフスタイルに関する統計的な調査結果と時間帯ごとの日々の変動確率とを考慮した電力需要の確率変動モデルの構築を試みた。様々な世帯構成の住宅における平均的な時間パターンについては、生活行動パターンに関する統計調査⁵⁾

に基づくモデルの構築が試みられている⁶⁾。しかし、発電容量に応じた余剰電力を適切に見積もるためには、家族構成から予測される平均的な電力需要パターンだけでなく、日々の需要変動を考慮する必要がある。そこで本研究では、1日の時間帯ごとに、使用される電力機器に応じて日々の電力需要の変動の様子が異なることに着目し、上述の世帯1の電力需要の実測結果を用いて、時間帯ごとの需要の変動確率を見積もった。その結果と家族構成から予測される平均的な電力需要パターンとを組み合わせて、日々の変動を考慮した電力需要モデルを構築した。なお、本研究では、確率モデル構築の第一段階として、冷暖房需要が発生しない中間期のみを対象としているが、将来的には年間に拡大する予定である。

4.2 統計情報に基づく平均電力需要の時間変化の設定

「国民生活時間調査2000」⁹⁾では、年齢や性別、職業の有無などが異なる様々な属性の人に応じて、15分単位で27行動の行動割合が統計的に整理されている。このうち、16行動が電力需要を伴う。本研究では、16行動で使用する電気機器について、世帯1で実際に使用されている機器の消費電力、待機電力、使用場所および使用場所の照明の消費電力を設定し、行動割合に基づき、15分単位で機器の電力消費を想定した⁷⁾。その際、機器が設置されている部屋の照明とテレビについては、複数人の同時使用確率を考慮した。

このようにして算出した住宅全体の各時間帯の電力需要を図7に示す。また、同図には、世帯1における10月および11月の平均の電力需要パターンを実線で併記する。同図に示すように、深夜の時間帯において実際の電力需要の方が大きいことを除いて、概ね平均需要の時間パターンは推定値と実測値とで同様の傾向を示している。ベース電力需要（待機電力と常時稼動機器の合計）は、約0.17kWであり、1日の電力需要量としては全体の45%を占める。変動分としては、使用確率の高いテレビと照明が大きい。また、個人使用分については家庭婦人の消費が大きい。これは、家庭婦人が家にいる時間が長く、家事に用いる電気機器の消費電力が大きいことによる。

4.3 電力需要の実測に基づく時間帯ごとの変動確率

図7に示した平均電力需要パターンに対して、各時間帯の需要のばらつきを考慮するため、上述の世帯1の'04年10月の30日分のデータを用いて、毎日の同じ時刻における電力需要のばらつきを評価した。まず、実測の電力需要のうち電力需要が0.05kW程度となる時間帯が1日平均40分程度発生しており、この値を待機電力と常時稼動機器の電力需要の合計値とみなした。次に、電力

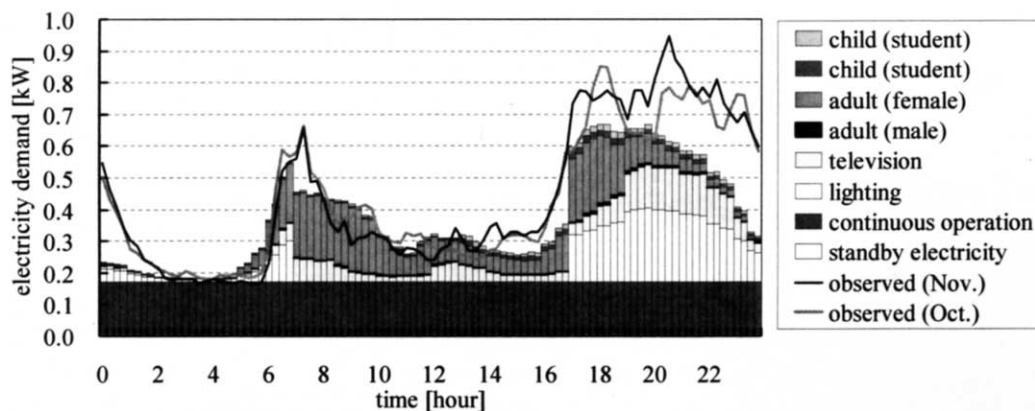


図7 行動割合に基づき算出した世帯1の平均電力需要パターン

需要の実測値から0.05kWを差し引いた変動分のみについて、1ヵ月間の発生回数を0.1kW単位で集計した。需要の小さい時間帯として3時0分～15分、大きい時間帯として18時0分～15分について、結果を図8に示す。同図(a)では、電力需要はほとんど0.1kWに集中している。これに対して、同図(b)では、ばらつきが非常に大きい。本研究では、いずれの場合も、最も発生確率が高い需要値から大小に同程度のばらつきを持つとみなし、各時間帯の電力需要のばらつきを正規分布で表すこととした。

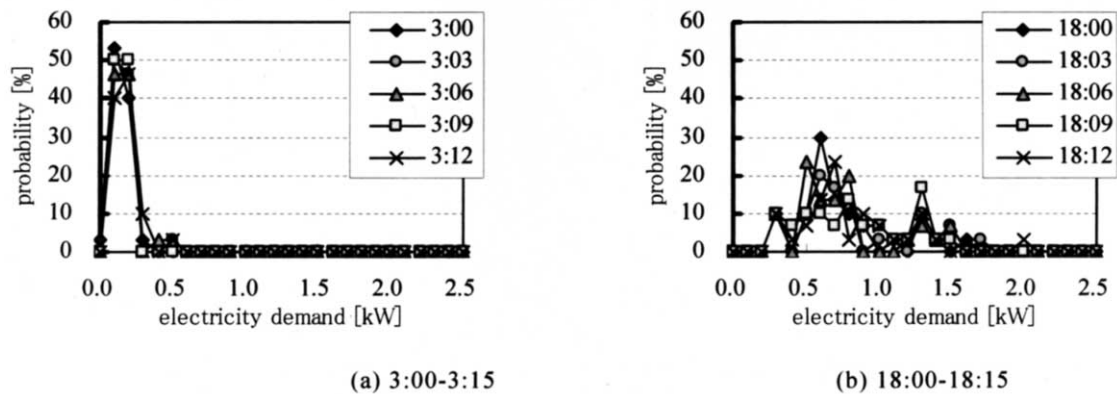


図8 時間帯別の1ヶ月間の電力需要の変動

4.4 電力需要の確率モデル

図7で示した平均電力需要と、図8の需要のばらつきを組み合わせ、電力需要の確率モデルを構築した。本モデルにおいて、各値以下の電力需要発生の累積分布確率を算定した。例として、3:00～3:15、12:00～12:15および18:00～18:15の場合を図9に示す。なお、本モデルでは、0.05kWのベース電力需要は常時発生しているとしているため、同図に示すように、0.05kW以下の発生確率は0%となる。ある電力需要の累積確率は、1ヵ月のうち何日ぐらいがその電力以下になるかの確率を示す。例えば電力需要が0.5kW以下である確率は、3時については1ヵ月間のうちの100%であり、18時については30%、すなわち9日間は0.5kW以下の消費電力であることを示している。

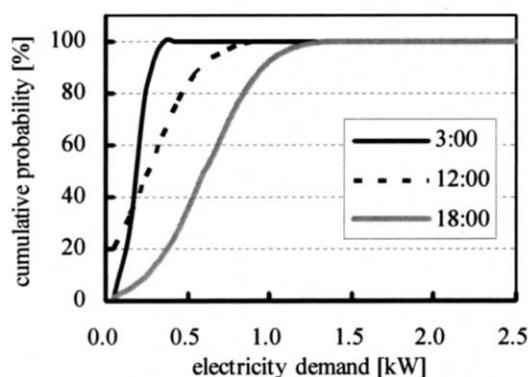


図9 電力需要の発生累積確立

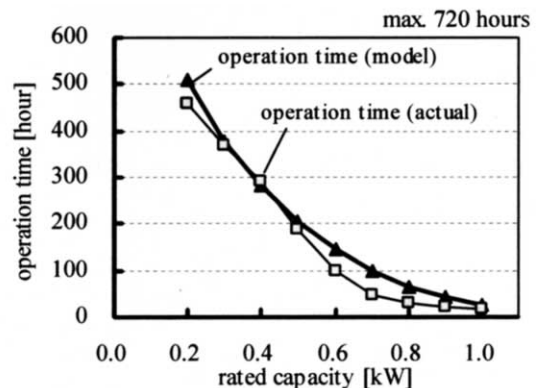


図10 GE型H-CGSの定格出力と1ヶ月の運転可能時間

4.5 確率モデルを用いたH-CGS運転可能時間の算定

発電容量が0.2～1.0kWのH-CGSについて、定格出力による運転を行い、起動・停止を15分単位で制御できると仮定し、それぞれ発電容量について逆潮流せずに運転できる1ヵ月間の総時間数を上記の確率モデルを用いて算定した。結果を図4に 印で示す。比較のため、サンプリング間隔1分の実測データを用いて、電力需要が15分以上連続して、各定格出力よりも大きくなる時間の1ヵ月間の総時間を算出し、同図に 印で示す。図のように、定格出力が0.6kW～0.8kWにおいて多少の差はあるが、確率モデルを用いた結果は、実測データを用いた結果を概ね再現している。これは、時間帯ごとに正規分布で表した需要変動が実状をよく反映していることを示している。

4.6 考察

本研究で構築した需要モデルを用いることにより、上述のような15分単位でH-CGSの起動・停止が制御可能な場合の運転可能時間や、部分負荷運転を行う場合の電力・温水供給量を算定することができる。しかし、DSS運転のように数時間単位で連続して運転するような場合の逆潮流電力を算定することはできない。今後、このような検討を可能にするため、機器の継続使用時間や使用頻度などを考慮し、同じ日の異なる時間帯の電力需要の相関などについて統計的に整理する必要がある。また、温水需要のばらつきを考慮し、貯湯槽の容量制約下において運転可能な時間を確率的に算定する必要がある。

本研究では、1家族の電力需要の実績に基づき需要変動特性を評価したが、今後、様々な家族構成の住宅について、需要変動特性を統計的に評価し、需要変動の適切な定式化についてさらに検討を行う。これにより、家族構成などの情報に基づき、日々の需要変動を考慮してH-CGSの導入を評価するためのモデルの開発を目指す。

5. 住宅地域における小規模地域熱供給の導入可能性

5.1 都市再開発を利用した省エネ対策

H-CGSを有効活用するためには、余剰電力の逆潮流を可能にするなど、運転時間を長くするための方策が重要である。しかし、個々の住宅にH-CGSを導入する場合、排熱を有効利用するのであれば、必要な運転時間は温水需要によって決まり、一定時間以上、運転時間を長くすることはできない。そこで、CGSの有効活用の観点からは、集合住宅や様々な種類の需要が混在するビルなどへのCGSの導入が有効と考えられている。

さらに本研究では、住宅地域における小規模熱供給システムの熱源として住宅部門におけるCGSの導入拡大の可能性に着目した。わが国の建物寿命は30数年と欧米諸国と比較して非常に短く、数十年程度の中長期的には住宅地を含む都市域全体において大部分の建物が建てかわる。そこで、複数の建物が建て変わる際、地域内のコンビニ、病院、学校などの様々な需要家を中長期的な視点から計画的に再配置することにより、地域単位で需要集中地点を形成して小規模な地域熱供給システムを導入することにより、その熱源として住宅部門におけるCGSの導入を拡大できる可能性がある。図11に本構想の概念図を示す。

このような構想において重要な点は、実際の都市の様々な地域において、小規模熱供給に適した需要家の組み合わせの存在を示し、その省エネ効果を明らかにすることである。市内の広い範

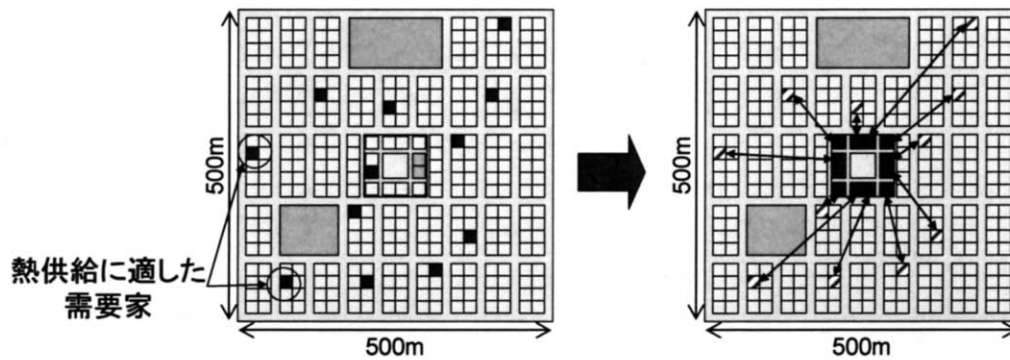


図11 需要集中地点形成の概念図

困から需要家を再配置することができれば、地域熱供給に適した需要家の組み合わせを実現できると考えられるが、それによって地域住民の生活に影響を与えてはならない。例えば、病院とコンビニとの組み合わせが地域熱供給において有効であるとしても、それらを市内の広い範囲から一ヶ所に集めることは非現実的である。一方、狭い地域内で需要家を再配置する場合、需要家の組み合わせが限られるため、熱需要パターンが平準化されず、地域熱供給の導入効果が小さくなる。そこで、本構想の実現可能性を示すためには、どの程度の狭い地域内を対象とするべきかが重要な検討項目となる。そこで本研究では、豊田市を対象として、小規模な地域熱供給に適した地域の数やその需要家構成を明らかにし、その省エネルギー効果について統計的な評価を試みた。

5.2 検討対象地域における需要家の想定

豊田市内の様々な地域について実際の需要家の構成を詳細に把握することは非常に困難である。そこで、本研究では各種の統計データの利用に着目し、豊田市が公表している各種統計データと、需要家の分布に関連するデータとして総務省統計局発行の地域メッシュ統計⁸⁾⁹⁾の4次メッシュ(500m×500m)のデータを用いて、豊田市内各地域の需要家構成を見積もった。豊田市には山林や湖などを含めて、1,219個の4次メッシュが含まれ、民生需要が存在する4次メッシュは787個である。山林周辺の極端に需要密度が低い地域は需要集中地点を形成できないため対象から除外し、後述する需要家別の敷地面積の算定結果に基づき、4次メッシュ全体の需要家延床面積が1000㎡以上となった645個の4次メッシュのみを対象とした。

本研究では住宅部門および業務部門の8種類の民生需要のみを対象とし、都市内に存在する小規模工場などの産業部門は対象としていない。住宅部門に関しては、平成12年度国勢調査⁹⁾を利用し、戸建住宅に居住する世帯数および集合住宅(長屋建および共同)に居住する世帯数を用いて、各4次メッシュにおける総床面積を算出した。また、各業務需要家の分布については、平成13年度事業所統計調査⁹⁾を利用し、各業種の従業者数から4次メッシュごとに各業種の延床面積を算出した。それぞれの延床面積の算出方法の詳細については文献10を参照されたい。総延床面積が大きいメッシュになるほど、戸建住宅に対する集合住宅の割合が高く、また、事務所や店舗などの業務需要の割合も高くなる。なお、各需要家について、冷暖房・温水の熱需要、照明・動力の電力需要の12ヶ月×24時間の時間パターンを設定した²⁾。

5.3 集中地点における需要家組み合わせおよび一次エネルギー消費量の算定

500m×500mの4次メッシュごとに100m×100mの需要集中地点を形成し、小規模な地域熱供給が導入されるとした。図11に示した概念図において、100m×100mの需要集中地点の中の6,800㎡（道路を除く）に需要家が配置されると想定し、線形計画法を用いた最適化計算により、500m×500mの地域全体の一次エネルギー消費量が最小となるように、地域内から需要集中地点に再配置される8種類の需要家の組み合わせ、すなわち、集中地点における各需要家の延床面積を算定した。

需要集中地点に導入される地域熱供給システムは、ガスエンジンCGS（発電効率：35%、排熱回収効率：45%）、補助ボイラおよび吸収式冷凍機（COP=1.2）から構成されるとする。CGSの規模としては、熱供給力が形成された需要集中地点の年間平均熱需要に等しくなる容量とした。また、CGSは熱主電従運転を行い、余剰電力は系統に逆潮流されて地域全体で利用されるとした。これにより、系統発電機（受電端効率36.5%）からの電力供給のための一次エネルギー消費量が削減されるとした。CGSからの電力供給の不足分は系統電力によって賄われる。また、CGSから回収した排熱とボイラとにより、温水（往路：50、復路：43）および冷水（往路：10、復路：15）が供給され、それぞれ暖房・温水需要と冷房需要を賄うとした。熱輸送におけるポンプ動力と熱輸送損失とを考慮しているが、CGSの設備規模による効率の違い、部分負荷効率は考慮していない。一方、需要集中地点の周辺部については、冷房、照明・動力負荷を系統からの買電（受電端効率36.5%）で賄い、温水需要および冷暖房需要は個々の需要家に設置された個別機器によって賄われると想定した（従来型システム）。住宅部門については、暖房は石油ファンヒーター、冷房はエアコン、給湯はガス給湯器で賄う。業務部門については、暖房および冷房はエアコン、給湯はガス給湯器で賄う。

645地域のそれぞれについて、需要集中地点を形成する各需要家の総延床面積を図11に示す。また、メッシュ内の全ての需要家が従来型システムによって賄われる場合（比較ケース1）に対する一次エネルギー消費削減率を図12に示す。なお、両図において、メッシュは比較ケース1に対する一次エネルギー消費削減量の昇順である。図12に示すように、豊田市のほぼ全域において、500m×500mの地域単位で需要集中地点を形成して小規模な地域熱供給を導入することにより、比較ケース1に対して概ね5～10%の一次エネルギー消費が削減された。また、図11に示すように、メッシュ番号が約250番目になると、集中地点を形成する需要家として戸建住宅の割合が減少し、集合住宅の割合が増加するにすぎない図12に示すように一次エネルギー削減率も概ね増加する。全645地域におけるエネルギー削減量の総和は430TJ/年である。一方、豊田市のすべての需要家に対して従来システムによってエネルギー供給を行う場合の一次エネルギー消費量は10,883TJ/年である。したがって、各地域において小規模な地域熱供給を導入することにより、年間3.9%に相当する一次エネルギー消費量を削減できることになる。

しかし、需要密度が低い地域では、相対的に熱供給損失が大きく、小規模であっても地域熱供給の導入効果は小さい。また、需要密度が高い地域では、個々の需要家の規模が比較的大きいため、地域熱供給を導入せずに個別にCGSを導入しても、一次エネルギー消費削減量は大きくなる可能性がある。そこで、需要集中地点を形成する各需要が個別にCGSを導入する場合（比較ケース2）との比較を行い、比較ケース2に対する一次エネルギー削減率を算定した。結果を図12に併

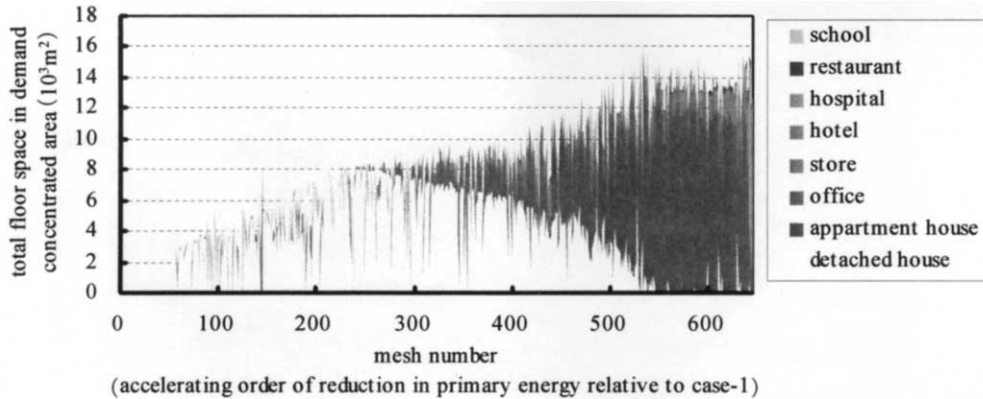


図12 各地域における需要集地点の需要家構成

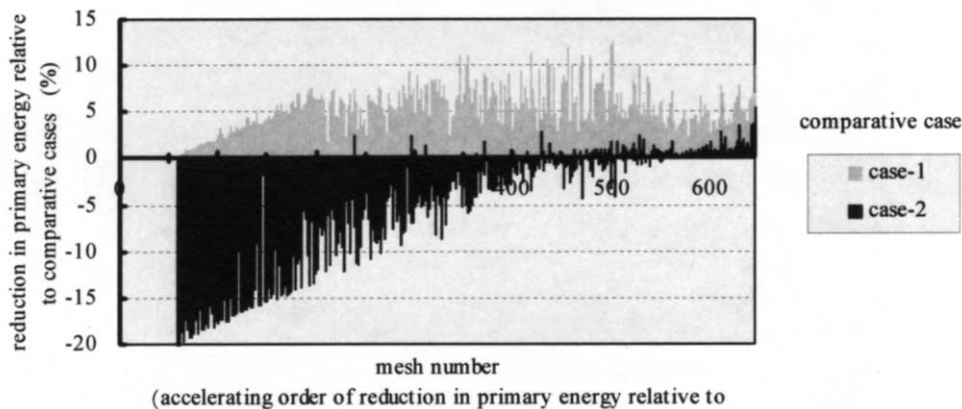


図13 比較ケースに対する一次エネルギー消費削減率

記する。同図に示すように、需要密度が低い地域においては、一次エネルギー削減量、削減率は負の値となっている。すなわち、地域ごとに需要集中地点を形成して小規模な地域熱供給を行うよりも、個別にCGSを導入する方が一次エネルギー消費削減量は大きい。これは、需要集中地点を形成して熱需要を平準化し、CGSの運転時間を長くする効果よりも熱供給に伴う熱損失の影響が大きいためである。一方、多種類の小規模な業務部門の需要家と多くの集合住宅によって需要集中地点を形成できる181地域においては、比較ケース2に対しても一次エネルギー削減量および削減率はともに正の値となり、小規模地域熱供給の効果が表れている。このような地域における一次エネルギー消費削減効果が得られる地域の削減量の総和は、豊田市のすべての需要家に対して従来型システムによるエネルギー供給を行う場合（比較ケース1）の年間一次エネルギー消費量の2.4%に相当する。なお、これら181地域の地域で需要集中地点を形成する需要家は、豊田市全体の合計で、戸建住宅：2.6%、集合住宅：46.7%、事務所：17.1%、店舗：38.8%、ホテル：88.8%、病院：89.8%、飲食店：73.7%、学校：8.2%であった。

以上のように、500m×500mといった比較的狭い地域内でも、様々な需要家が存在し、これらによって需要集中地点を形成してCGSを中心とする地域熱供給を導入することにより、豊田市全体で数%の一次エネルギーを削減できる可能性があることがわかった。本来、需要家の再配置は、エネルギー利用の効率化を目的として行われる訳ではない。しかし、将来的な都市のコンパクト

ト化において、都市の郊外から都心へ需要家を再配置する際、需要家の再配置の仕方によっては、エネルギーを効率的に利用できる可能性があるため、再配置させる需要家を選択する際のひとつの目安になると考えられる。また、このようなことが実現できる場合、需要集中地点には多くの集合住宅が配置される。したがって、住宅部門へのCGSの導入拡大において、集合住宅に関しては業務部門の需要家とともに小規模な地域熱供給における熱源としてのCGSを導入し、1kWクラスの住宅用CGSは需要密度が低い郊外の戸建住宅への導入が有効と考えられる。

6. あとがき

民生部門におけるエネルギー利用を高効率化し、環境負荷の低減に向けて、住宅部門におけるCGSの導入のあり方を検討した。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 世帯人数別の温水需要の推定に基づき、住宅用CGS（発電効率：35%、排熱回収効率：40%）の排熱のみで温水需要を賄うため必要なH-CGSの稼働率を算定した結果、世帯人数4人の場合には約50%となった。電力需要の変動を考慮すると、1kWのH-CGSが定格出力で運転する場合、逆潮流せずに数十%の稼働率を実現することは非常に困難である。このように、H-CGSの有効利用のためには、余剰電力の系統への逆潮流を可能にすることが非常に重要であることを統計的に示すことができた。
- 2) 燃料電池型H-CGSの2020年の導入目標570万kWは、大都市圏・都市圏における世帯人数が4人以上の最低居住水準の住宅（514万世帯）だけでなく、集合住宅や郊外の戸建住宅にもH-CGSを導入するような状況に相当する。
- 3) 典型的な家族構成の住宅において実測した給湯・電力需要の6ヶ月間の時系列データを用いて、定格出力において15分単位でon/off可能なH-CGSが逆潮流せずに供給可能な温水および電力を算定した。その結果、発電容量が0.4kWの場合、供給可能な温水および電力は最大となり、それぞれ需要の30%となった。
- 4) H-CGSの運転方式として部分負荷運転およびDSS運転を想定し、それぞれ一次エネルギー削減量の観点から、適した運転方式を検討した。その結果、発電効率が高いFC型H-CGSの場合、逆潮流が可能であればDSS運転が最も適しており、FC型H-CGSの有効利用のためには余剰電力の逆潮流の可否が大きく影響することがわかった。一方、排熱回収効率が高いGE型H-CGSの場合は、余剰電力の逆潮流が可能であればDSS運転が効果的であるが、不可能であればDSS運転と部分負荷運転との差は小さいことがわかった。
- 5) 個人のライフスタイルに関する統計的な調査と日々の需要変動とを考慮し、住宅における電力需要の確率モデルを構築し、世帯構成に応じてH-CGSからの逆潮流電力等を算定できる可能性があることを示した。
- 6) 住宅用CGSの導入拡大方策の一つとして、住宅および業務ビルによって構成される小規模な地域熱供給における熱源としてのCGS導入に着目し、豊田市を対象として、小規模地域熱供給に適した地域を統計的に評価した。その結果、小規模地域熱供給に適した地域における年間一次エネルギー削減量は、豊田市全体の一次エネルギー消費量の2.4%に相当することがわかった。

以上のように本研究では、将来的な住宅部門におけるCGSの導入拡大に向けて、様々な観点から

基礎的検討を行った。今後もこれらの研究を継続し、効率や制御性などハード側の技術開発目標だけでなく、ユーザ側の需要制約の受容性、さらにこれによる技術開発目標へのフィードバックをも含めて、わが国における住宅用CGSの導入のあり方を提案することを目指す。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、温水・電力需要の実測にご協力いただきました3世帯のご家族に深く感謝いたします。また、ご支援いただきました財団法人日比科学技術振興財団に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本エネルギー経済研究所計量分析部編：「エネルギー・経済統計要覧」(2004)
- 2) 柏木：「天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル2000」, 日本工業出版(2000)
- 3) 電気事業連合会統計委員会編：「電気事業便覧平成16年版」, オーム社(2004)
- 4) 加藤、日野、春日井、鈴置：「温水需要の実測に基づく住宅用コージェネレーションシステムの経済評価」, 電学論B、Vol.123、No.12、pp.1513-1521(2003)
- 5) 藤井、森川、下田、水野：「世帯類型や住宅形式を考慮した家庭用エネルギーエンドユースモデルの開発」, 第19回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集pp.575-580(2003)
- 6) NHK放送文化研究所編：「国民生活時間調査2000」, NHK出版(2001)
- 7) 南形、加藤、鈴置：「実測に基づく電力需要の変動確率を考慮した住宅用コージェネの導入評価モデル-逆潮流可否の影響-」, 第22回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集、No.16-4(2005)
- 8) 総務省統計局：地域メッシュ統計、平成12年度国勢調査(2002)
- 9) 総務省統計局：地域メッシュ統計、平成13年度事業所統計調査(2003)
- 10) 叶、加藤、鈴置：「都市再生に伴うエネルギー需給の高効率化のための一考察 - 地区ごとの需要集中と小規模熱供給の導入効果 - 」, 第21回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、(2005)