

住宅地における燃料電池とエネルギーネットワークの実証研究

安芸裕久

(独) 産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門
305-8568 茨城県つくば市梅園一丁目 1-1 中央第二事業所

Experimental Study on Fuel Cells and Energy Networks in Residential Areas

Hirohisa Aki

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
AIST Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

The demonstration project on fuel cells and energy networks of electricity, heat, and hydrogen in an existing apartment building has been initiated to evaluate authors' proposal. The authors proposed the setting up of an energy system by fuel cells and energy networks of electricity, hot water, and hydrogen in residential areas. The apartments building has hydrogen production facilities on the roof and hydrogen is available as basic infrastructure. Six apartment houses are involved and three PEM fuel cells (700 W) with hot water storage tanks have been installed, and the electricity and hot water from the fuel cells are shared via an internal electricity grid and a hot water network. The operation results including the performance of each system component such as fuel cell are reported.

Key words: hydrogen network, fuel cell, residential homes, micro combined heat and power

1. はじめに

筆者の所属する(独)産業技術総合研究所(産総研)では、分散型エネルギーネットワーク技術の開発により、CO₂排出量の削減とエネルギー自給率の向上に資することを戦略目標に掲げ、積極的に研究を推進している。

分散型エネルギーネットワーク技術では、地域から個々の需要家までの様々な規模において、分散型システムと需要家とをエネルギーネットワークによりネットワーク化し、統合的な運用を実現し、省エネルギーとCO₂排出削減に寄与することを図る。電気、熱および化学の3つのエネルギーネットワークを統合的に扱うと共に、個別分散型システムや小規模エネルギーネットワークと基幹システムとの協調を図ると共にエネルギーシステム全体としてより効率的な運用を図る。つまり、分散エネルギー源(Distributed Energy Resources: DER)である分散電源、エネルギー貯蔵および需要家の負荷を個々に制御するのではなく、電気・熱・化学エネルギーネットワークによるエネルギー融通と組み合わせ全体で協調制御を図

る。水素と燃料電池は各々重要な化学エネルギー、分散型システムとして位置づけられる。

本稿では主に住宅地を対象として燃料電池を用いたコージェネレーションシステム(CGS)を導入し、住宅を電気・熱・水素によるエネルギーネットワークでネットワーク化することで、エネルギーの融通と機器の共有とによって、機器の柔軟かつ効率的な運用による省エネルギーとCO₂排出削減の実現と経済性の向上を図る研究について述べる。特に大阪ガス(株)様と共同で集合住宅の一部に水素エネルギーシステムを構築して実施してきた実住宅での実証試験について紹介する。

2. 燃料電池と電気・熱・水素エネルギーネットワーク

2.1 住宅への燃料電池導入の課題と提案概念

我が国では固体高分子形燃料電池(PEFC)は既に2千世帯以上の住宅に導入されており、CGSとして電気と熱(温水)を各住宅に供給している。それらは全てシステム内部に組み込まれた改質器により炭化水素燃料を水

素へ改質し利用している。このことは既存の都市ガス／石油供給網が利用でき早期普及が期待できるという利点を有する反面、CGS として見れば、炭化水素から電気と熱とを得るという点でガスエンジン (GE) 等の従来の天然ガス／石油 CGS と大きな違いはなく、必ずしも水素エネルギーの特徴を充分利用しているとは言い難い。将来における水素エネルギーの本格的な利用を考えると、小規模ではあっても水素ネットワークを構築し、燃料電池への直接水素供給を模索することには意義がある。

前述のように住宅へ燃料電池を導入する場合は一般的に CGS として運用される。住宅向け CGS としてはガスエンジン CGS が先に普及し、現在も年間導入台数では家庭用燃料電池システムより一桁多い。これまで CGS の普及が進んできた民生施設 (ホテルや事務所ビルなど) と違って住宅への CGS 導入には次のような課題がある。

即ち、住宅のエネルギー需要は、需要の熱電比 (熱需要と電気需要との割合) が季節間で大きく変化するだけでなく、日々の生活によっても変化が大きいため、CGS の運用で常に大きな課題となっている電気と熱との有効利用がより難しくなる。例えば、システムを運転しながら夕方に向けて湯を貯めていく際に、湯の消費量を正確に予測できれば効率的な運用ができるが、実際には日々の湯の消費量は変化が激しく正確な予測は極めて難しい。

電気需要についても、電子レンジ等の使用時に生じるスパイク状の負荷にまで追従させるのは困難であるし、追従させるために大きな容量の CGS を導入すると稼働率が小さくなってしまいう問題がある。さらに商用化されている家庭用燃料電池システムの場合、内蔵している改質器は、その特性上、燃料電池スタックと比べて負荷追従性が劣り、部分負荷運転時の効率も落ちやすいため、できる限り定格運転を維持することが望ましい。

本研究では以上の諸問題・課題を解決する方策として、一部の住宅に燃料電池を設置し、さらにその一部に改質器を設置して全住宅で機器を共有し、各住宅の間を配電線と配管で接続して電気・熱 (温水) ・水素の融通を行うことを提案してきた。

機器の共有とエネルギー融通とによって全体的な機器容量の削減や効率的な運用が可能となり、各戸の機器費用の負担を低減できる。水素の貯蔵と融通により改質器

の部分負荷運転や起動・停止を削減できるし、電気と熱 (温水) の融通により逆潮流の制限や熱余りによる燃料電池の運用制約が解消され、燃料電池の稼働率を向上できる。また、エネルギー融通の範囲を電気・熱 (温水) ・水素という各エネルギー媒体の特性に合わせることで、融通のための損失や必要な配電線・配管の初期費を低減できる。

2.2 システム

提案概念をもとに、燃料電池、改質器及び水素純化装置等に関する今後の技術開発の進展を考慮し、2030 年頃に技術的に実現可能なシステムの提示を試みた。これらのシステムは水素や燃料電池に関する技術開発が順調に進み、規制緩和 (又は安全基準の確立) がなされるという条件の下で成立可能である。提示したシステムは、戸建住宅 (住宅地の一角) を対象としたものと集合住宅を対象としたものの 2 種類である。

システムの設計に際し、実験装置、シミュレータ及び数理計画モデルを構築し、機器構成の最適化、機器とエネルギーの運用・融通方策の検討およびシステムの導入効果 (CO₂ 排出削減など) の分析・評価を行った。1) 実験装置 (図 1) により燃料電池の特性を取得し、シミュレータと数理計画モデルに反映させ、2) 数理計画モデルでシステムや運用の最適化及びシステムの効果 (CO₂ 排出量など) を分析・評価し、シミュレータではより実用的な運用方策 (制御アルゴリズム) について試行錯誤を繰り返して検討を行い、3) それらの結果をもとに最終的に実験装置で実機検証を行う、というように各ツールの連携運用を繰り返しながらシステムの設計を進めた。



図 1. PEFC 4 台を連携させた実験装置

¹筆者らは実際に家庭用燃料電池に組み込まれる改質器単体入手し運転や特性計測を行った。

(1) 戸建住宅[1]

住宅地の一面を想定し、戸建住宅 8 戸からなるグループを対象としたシステムの例を図 2 に示す。8 戸の住宅に対し、燃料電池 4 台と改質器 3 台とを設置し、各住宅を配電線と配管とで接続し、電気・熱（温水）・水素の融通を行う。部分負荷運転でも効率低下の小さい燃料電池は負荷に追従して運転され、改質器は定格運転を維持して高効率で水素を製造できる。温水を近隣に供給することで湯余りによる燃料電池の運用制限が緩和され、燃料電池の稼働率が向上できる。この際、温水の融通範囲を左右 4 戸ずつに制限することで、温水の融通に必要なポンプ動力を抑えている。

数理計画モデルを用いて分析したところ、エネルギー融通によって、家庭用燃料電池システムを戸別に各家庭に導入する場合と比較して、条件にもよるが、図 2 に示したシステムの場合、エネルギー費は約 20%、CO₂ 排出量は約 6-8%、一次エネルギーは約 15% 低減されるという結果となった。

8 戸に対し、燃料電池 4 台と改質器 3 台とで十分であることから、各住宅に単独に家庭用燃料電池システムを設置する場合と比較して、初期費が約半分で済む。また、必ずしも燃料電池 4 台が必要ではなく、2 台程度の小規模であっても十分な効果を発揮でき、徐々に機器を追加しながら拡張していけば良い。拡張に当たっても、4-10 戸程度の基本ブロックを相互接続していくことでより大きなネットワークへ拡張できる。さらに、燃料電池や改質器を導入する住宅以外は、既存のシステムをほぼそのまま流用できることから、新規開発住宅地に限らず既存の住宅地においても導入が可能となる。

(2) 集合住宅（大阪ガス様との共同研究）

集合住宅向けシステムの例を図 3 に示す。集合住宅内に水素インフラ、即ち水素製造装置（都市ガス改質器と純化装置（PSA））、水素貯蔵及び水素配管を設置し、水素を各階に供給する。各階には PEFC と貯湯槽とを集中して設置し温水を循環させる。さらに固体酸化物形燃料電池（SOFC）といった PEFC とは熱電比の異なる CGS を設置する。

このシステムの特徴は、PEFC および SOFC など熱電比の異なる CGS を組み合わせて設置することで熱電比を可変とし、CGS で常に大きな課題となっている熱電比の需給バランスの改善が図られ、より一層の省エネルギー

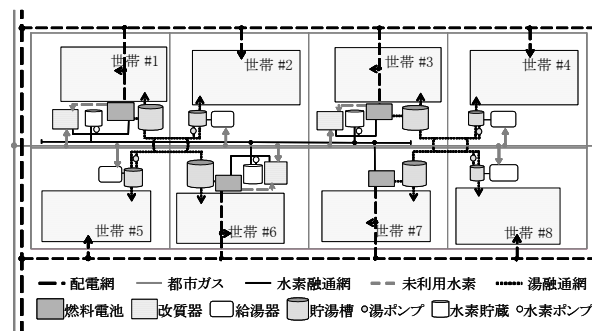


図 2. 戸建住宅向けシステムの例（8 戸用）

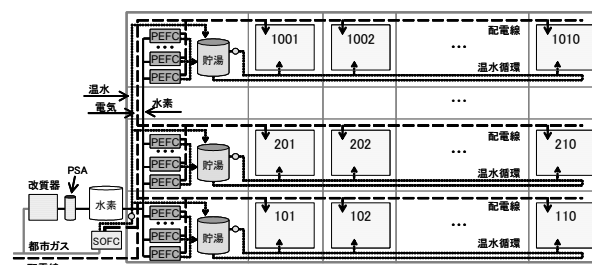


図 3. 集合住宅向けシステムの例

ーが期待できることである。さらに一般の CGS を備えた集合住宅における省エネルギー効果や機器共有による初期費の低減効果に加えて、入居状況や需要状況に応じてシステムの一部（例えば PEFC の台数）が変更可能である。

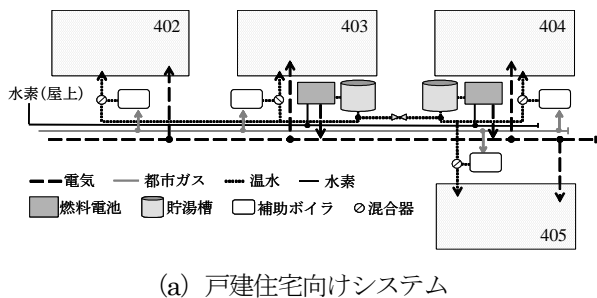
中規模の集合住宅（100 戸）において、GE（10kW）2 台と PEFC（1kW×10-100 台）との組合せについて分析を行ったところ結果、PEFC の台数が 20-40 の時が最も一次エネルギー消費が少なく、家庭用燃料電池システムを戸別に導入するよりも約 15% の省エネルギーが達成できる結果となった。

3. 実住宅を用いた実証試験

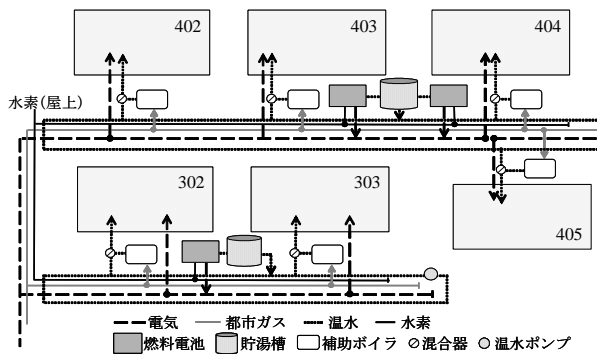
大阪ガス様の実験住宅 NEXT21（集合住宅、17 戸[2]）の一部において戸建住宅向けと集合住宅向けとの両方のシステムを構築し、2007 年度から実際に人々が日常生活を送る状況下で運用を行い、運用方策や効果の検証を行っている。集合住宅内に実際に水素配管を敷設し燃料電池を設置してネットワークで接続し、エネルギー融通を行う。

3.1 実証試験設備

当該集合住宅は大阪ガス様により水素インフラが設置



(a) 戸建住宅向けシステム



(b) 集合住宅向けシステム

図 4. 実証試験のシステム構成

されている。屋上に都市ガス改質器と PSA からなる超小形水素製造装置 (定格 1.5Nm³/h) と小形水素バッファが各 3 台設置され、建物のパイプシャフト内に水素配管が敷設されている。以上により水素エネルギーをインフラの一つとして利用できる。今回の実証試験では、この水素インフラを利用しているが、その運用は本実証試験の範囲外である。

集合住宅の一部である 6 戸 (3 階 2 戸、4 階 4 戸) を用い、大阪ガス様と共同で実証試験設備を構築した。改質器を持たない、水素を直接供給する PEFC と貯湯槽の組合せを廊下に 3 台 (3 階 1 台、4 階 2 台) 設置し、温水を各戸へ供給するための温水配管を敷設した。

システム構成を図 4 に示す。図では、戸建住宅と集合住宅の両方を想定した 2 種類のシステム構成が示されているが、実際には機器は両方で共通に利用し、機器運用と温水配管の切り替えにより 2 つの試験を実施する。様々な制約のため図 2 と図 3 に示したシステムを完全に再現することはできなかったが、表 1 に示すように基本的な概念は取り入れることができた。

貯湯槽からの温水は 60–70℃であり、各戸の混合器で市水と混ぜて温度を調整する。また貯湯槽の湯切れなどで温水温度が低下した場合は瞬時に補助ボイラが動作して加熱し温度を維持する。集合住宅向けを想定した試験

表 1. 実証試験のシステム構成の概念の違い

	戸建住宅	集合住宅
対象住戸	4戸 (4階)	2戸 (3階) + 4戸 (4階)
燃料電池	設置住戸で優先使用	各階で共有
電気	4戸全体を考慮	6戸全体を考慮
熱 (温水)	設置住戸+隣接住戸 (お隣さんへお裾分け)	各階で共有 (みんなで仲良く)

表 2. 実証試験に用いた燃料電池システムの仕様

項目	仕様
種類	固体高分子形
燃料	純水素 (純度99.99%以上)
定格発電容量	700 W
発電	定格効率 40% (HHV) 以上
	出力 交流単相200V
排熱回収	定格効率 30% (HHV) 以上
	回収温度 60–70℃
発電部概略寸法	300 W × 1250 H × 440 D (mm)
貯湯槽容量	370L (大)、200L (小) × 2台

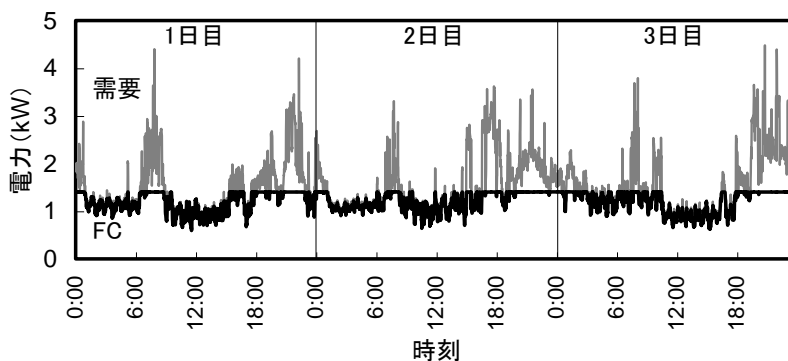
では温水を循環させるための温水ポンプを設置している。

設置機器のうち、燃料電池と貯湯槽の主な仕様を表 2 に示す。燃料電池は 5–10 分程度で起動でき、電気出力もほぼ電気需要に追従できる程度の応答性を有する。実際の応答性は燃料電池スタックからの直流の電気出力を交流に変換するためのインバータの性能に依存する²⁾。

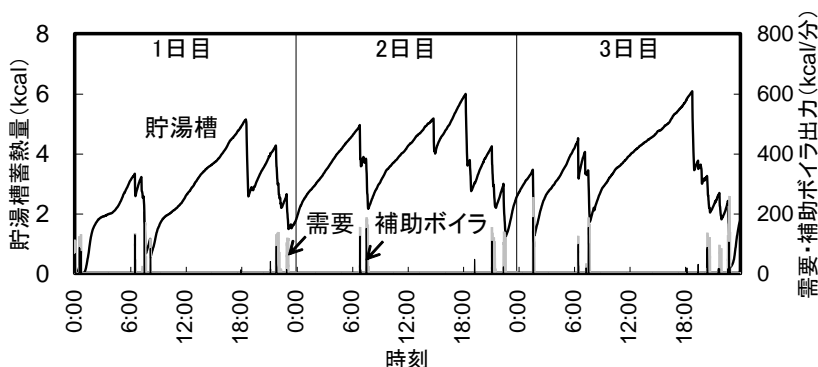
実証試験設備の運用における大きな課題の一つは燃料電池の運用である。例えば、対象全住戸 (4 戸または 6 戸) の全電力需要を全燃料電池 (2 台または 3 台) で均等に分担する運用、できるだけ少ない台数で賄う運用 (台数制御)、特定の住戸の電力需要のみを考慮する運用、などが考えられる。ここでは、次の通りとした。なお、この実証試験では燃料電池からの熱の廃棄は行わないし、対象住戸外への逆潮流も原則として行わない。

- (a) 戸建住宅ケース：2 台の燃料電池は各々特定の 2 戸の住戸に電力と温水とを供給するものとし、その 2 戸の電力需要に追従するよう制御する。温水も各 2 戸へ供給されるが、必要に応じて他の貯湯槽からも供給を受けられる。
- (b) 集合住宅ケース：3 台の燃料電池で 6 戸の電力需要合計に追従するよう制御する。温水は各回で循環され 2 戸または 4 戸で共有される。

²⁾特に燃料電池は電圧の変化幅が大きいことためインバータの負担が大きいし、低負荷時には固定損が無視できず効率が低下しやすい。



(a) 電力需給 (4階: 4戸+FC 2台)



(b) 温水需給 (4階: 2戸+貯湯槽 1台)

図 5. 試験結果の例 (戸建住宅ケース、秋期、平日)

本実証試験では設備の運用と並行してエネルギー需要計測を実施している。燃料電池の発電量、水素消費量や貯湯槽レベルなどといった実証試験設備の運用状態や物質フローに加えて、各住戸の電力消費（一部の住戸ではエアコンの消費電力と住戸全体、その他は住戸全体の電力消費のみ）、給湯需要（温水流量と温度）を2秒間隔で計測している。

3.2 実証試験結果

実証試験は春、夏、秋、冬の各季節に実施した。まず燃料電池を用いない状態、即ち電気事業者からの購入電力とガス給湯器とを用いる状態、においてエネルギー需要計測を一定期間（1週間ないし10日間）行い、評価の基準とする。次に戸建住宅ケースを一定期間行い、最後に集合住宅ケースを一定期間行う。

ここでは、具体的な例として本稿執筆の時点でほぼ解析を終えている秋期に行った試験結果を紹介する。なお、エネルギー需要は日々異なるため、ここに示す結果がいつも得られる訳ではなく、ここに示すのはあくまである一日の例であることに注意されたい。

図5と図6に戸建住宅ケースと集合住宅ケースの結果のうち電力需給および温水需給の運用状況についてある平日3日間を取り出したものを示す。

図5(a)は戸建住宅ケースの結果から4階に設置された燃料電池2台と4住戸における燃料電池発電量と電力需要とを示したものである。電力需要が燃料電池の発電容量（1.4kW）以下である時間帯には、燃料電池はほぼ電力需要に追従して制御されており、純水素を利用する燃料電池であれば十分な負荷追従性があることがわかる。電力需要が燃料電池の発電容量を超える場合は外部系統から電気を購入することとなる。図5(a)では、電力量としてはそれほど多くなく、電力需要全体の8割は燃料電池から供給されている。

図5(b)は2台の貯湯槽のうちの1台の貯湯槽蓄熱量および当該貯湯槽から供給される2戸の住宅の給湯需要とガス給湯器による供給量を示す。燃料電池の運転に伴って貯湯槽の蓄熱量が上昇していき、朝と夕方に給湯需要が発生すると一気に貯湯レベルが低下し、場合によってはガス給湯器で補助されているのがわかる。この3日間では貯湯槽蓄熱量がゼロになる事態、つまり湯切れが

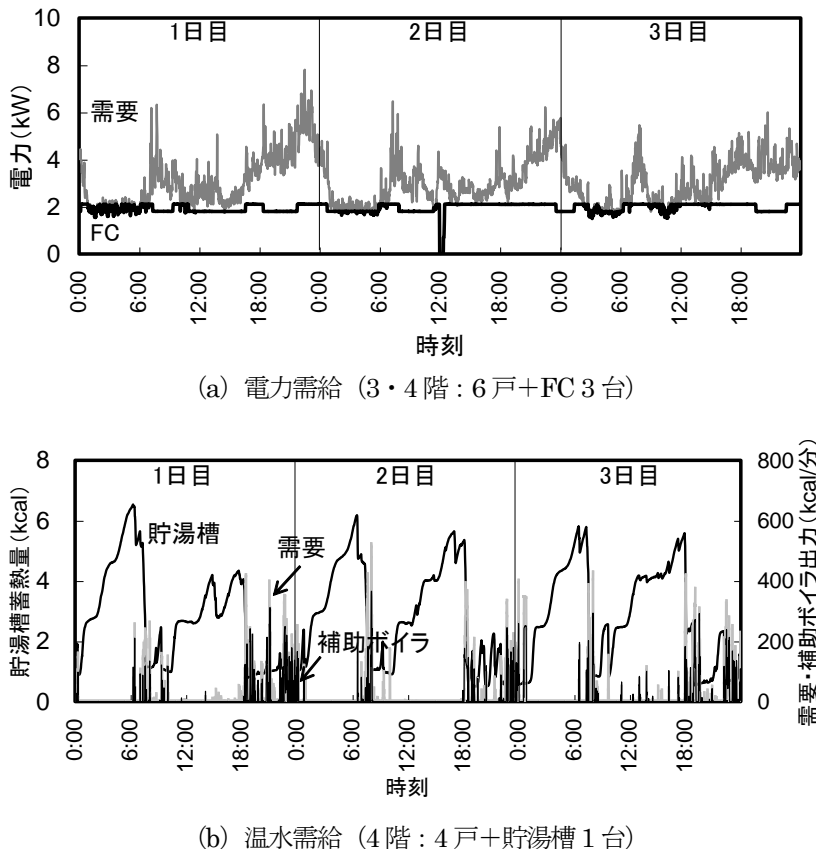


図 6. 試験結果の例 (集合住宅ケース、秋期、平日)

何度か発生している。湯切れでなくても補助ボイラが動作していることがあるのは、温水配管から各住戸までの配管中の湯が冷えてしまい、それを加熱するためにボイラが動作したためである。

図 6 (a) は集合住宅ケースの電力需要の結果である。図 5 (a) と比較すると全体的に電力需要が大きく、燃料電池の定格発電容量を超えている部分が多い。その場合に燃料電池が定格一杯 (2.1kW) まで出力せず、2kW 弱しか出力していない時間がかかなりある。これは燃料電池の不具合によるものであり、ここで詳細について述べることはできないが制御系のソフトウェアに関する不具合であると推測している。

秋期の試験実施中に気温が低下し始め、集合住宅ケースの試験を行った際は、戸建住宅ケースの時よりも温水需要が大きく増加した。そのため図 6 (b) に示すように湯切れが度々発生し補助ボイラに大きく依存することとなった。つまり、本試験で設置した 700W の燃料電池では温水需要を賄うには容量不足だったと言える。しかし、年間を通じて稼働率を考えれば大きな燃料電池を設置すべきであったとも一概には言えない。

実験期間中の一日当たりの平均エネルギー需給を表 3 に示す。FC 分担率の定義は様々考えられるが、ここでは需要から燃料電池以外によって賄われたものを差し引いて求めた。戸建住宅ケースは 4 戸、集合住宅ケースは 6 戸を対象としていることに注意されたい。

世帯数の差を考慮しても集合住宅ケースの方が戸建住宅ケースよりも需要が大きかった。特に外気温の低下による温水需要の増加が著しい。

そのため電力需要、温水需要ともに FC 分担率が集合住宅ケースにおいて大きく低下している。温水については配管中の損失が大きかったこともあり、FC 分担率は需要の約 1/3 から 1/4 にとどまった。

外部から供給されたエネルギーに注目すると、戸建住宅ケースでは 80%以上、集合住宅ケースでも半分以上は水素の形で供給されている。但し、都市ガスは一次エネルギーで、その他は二次エネルギーであるが、ここでは便宜上両者を単純に合算していることに注意されたい。即ち本実証試験の対象とした住戸は水素エネルギーに大きく依存しており、ここに水素エネルギーシステムが実現されたと言える。

表3 実証試験結果の例
(秋期の一日当たりエネルギー需給: MJ/日)

	戸建住宅ケース (4戸, FC2台)		集合住宅ケース (6戸, FC3台)	
	平日	土日	平日	土日
電力需給				
1) 需要	127.7	144.8	256.5	290.0
2) FC供給	103.9	111.6	170.1	163.5
3) 商用系統	23.9	33.2	86.6	126.7
4) FC分担率 (1)-(3)/1)	81.3%	77.1%	66.2%	56.3%
温水需給				
5) 需要	72.3	59.7	192.0	234.5
6) FC供給	104.9	109.3	162.4	160.0
7) 損失	45.4	60.0	96.8	106.6
8) 補助ボイラ供給	16.8	14.7	128.2	171.3
9) FC分担率 (5)-(8)/5)	76.8%	75.4%	33.2%	26.9%
外部エネルギー供給				
10) 電力	23.9	33.2	86.6	126.7
11) 都市ガス	22.4	19.6	171.0	228.4
12) 水素	262.1	276.0	424.7	411.7
13) 水素分担率 (10)と(11)は一次エネルギー, 12)は二次エネルギー)	85.0%	83.9%	62.2%	53.7%

3.3 実証試験の今後

実証試験設備は大きな故障もなく順調に稼働しており、今後も引き続き試験を継続していく。特に燃料電池や熱ネットワークの運用について様々な制御アルゴリズムを実装し、評価を行っていきたいと考えている。

4. 今後の展開

今後の展開としては、2.2に述べたシステムの実用化に向けた取り組みを進めていく。本研究で提示した2つのシステムのうち、集合住宅向けシステムは戸建住宅向けシステムと比較して、より早期に実用化が可能である。燃料電池や水素製造装置の費用の問題を除けば、他に大きな阻害要因はない。設置スペースの問題も、既存の家庭用燃料電池システムを各戸に設置するのに比べれば小さく、共用部に数台の純水素駆動PEFCと貯湯槽を設置するのは十分現実的である。今後は技術開発だけでなく、事業化のためのビジネスモデルの構築、課金システムの問題[3]などにも取り組んでいく予定である。

本研究の最終的な目標は、戸建住宅と集合住宅を含めた住宅地や都市域を対象とする面的広がりを持ったシステムの提示である。そのためには、水素インフラをどのように整備するのか、短期的には水素は化石燃料から製

造することを前提とすると、例えば都市における都市ガスから水素への変換点をどこに設定するのかという問題にも取り組む必要がある。

本実証試験のように水素への依存率が高くなると、水素の製造効率やCO₂排出源単位が、この集合住宅の省エネルギー性やCO₂排出量に大きな影響を与える。これは水素エネルギー社会において「水素を何から作るのか」、「供給水素の低炭素化」という問題は避けられず、その議論なくして水素エネルギー社会の青写真は描けないということを示唆するものである。その解を提示できるよう今後も積極的に研究を推進していく。

5. まとめ

本稿では、住宅を対象とした燃料電池と電気・熱・水素エネルギーネットワークに関する取り組みについて述べた。特に大阪ガス様と共同で集合住宅に水素エネルギーシステムを構築して実施している実証試験について概要を述べ、試験結果の一例として秋期の機器運用とエネルギー需給について紹介した。その結果から、集合住宅がエネルギー供給を水素エネルギーに大きく依存しており、小規模ながらも水素エネルギーシステムが実現されていることを示した。

謝辞

本実証研究を実施するに当たり、大阪ガス様に共同研究先として多大なるご協力を頂いている。ここに深く感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1 H. Aki, et. al; "Fuel cells and energy networks of electricity, heat, and hydrogen in residential areas" Int'l J. of Hydrogen Energy, 31-8, (2006), pp. 967-980.
- 2 志波 徹; "実験集合住宅NEXT21の居住実験" エネルギー・資源、28-5 (2007)、pp. 342-345.
- 3 山本 重夫、他; "エネルギーネットワークにおける各需要家の経済的負担に関する検討" エネルギー・資源学会第27回研究発表会 (2008)