

エネルギーネットワークを基調とした エネルギー需給型コミュニティの検討

A concept of hydrogen energy community balanced supply with demand
internetworking electric power, hydrogen and hot water

杉 本 一 郎* ・ 安 芸 裕 久* * ・ 石 田 政 義* * *

Ichiro Sugimoto

Hirohisa Aki

Masayoshi Ishida

The authors have designed the hydrogen energy community (HEC) interconnecting stationary fuel cells as distributed energy resources (DERs) and internetworking electric power, hydrogen and hot water in residential areas. The demonstration project of HEC has been performed from April 2007 to March 2009, and the results showed the performance as same as its design model and indicated the way to conduct hydrogen society.

After that, there have been changed the environments of DERs in Japan, they are caused by the regulation for residential PV net metering performed in Nov. 2009 and by the Great East Japan Earthquake on 11 March 2011. As a new framework of HEC harmonizing PV systems with stationary fuel cells in energy networks and holding resilience of distributed energy systems against heavy disaster, the authors revise the concept to HEC balanced supply with demand based on energy networks. The outlooks of this concept are to illustrate the network configuration and to formulate the objective functions both on normal mode and on emergency mode.

Keywords : Energy network, Hydrogen energy community, Stationary fuel cell

1. はじめに

これまで筆者らは、商用化されている定置用燃料電池の様々な課題を解決することや、住宅地域において、新たな形態および構成で定置用燃料電池を普及させることによって水素エネルギー社会を形成することを目的に、

- 定置用燃料電池を改質器、燃料電池スタック、補助熱源機等の「機能」に分離して、
- 各機能を電気・水素・熱（温水）を「キャリア」としてネットワークする、

「エネルギーネットワーク」を提言してきた。

まずこのコンセプトを基に、戸建住宅群・集合住宅の区画範囲・建物規模に対応した「水素エネルギーコミュニティ」を定義・類型化して、戸建住宅の基本区画4軒単位と8軒単位、集合住宅の基本構成1フロア10軒単位について、エネルギーネットワーク構成手法¹⁾を用いて、それぞれの性能を推定・検証し、基本設計を行った²⁾³⁾。

次に筆者らは、大阪市内の実住宅に戸建住宅の基本区画4軒単位と集合住宅2フロア6軒のエネルギーネットワーク実証システムを構築した⁴⁾。そして、2007年4月から

2009年3月までの2年間、実証試験を行い、実証システムが基本設計と同等程度の省エネルギー性や環境負荷低減効果を得られることを示すと共に、エネルギーネットワークの基本区画・基本構成を展開することにより、「水素を主要なエネルギーとする住宅地域」を形成できることを示唆した⁵⁾。

この実証試験以降、分散型エネルギー（以下、DERと略す）を取り巻く環境は、以下のように大きく変化した。

- 1) 2009年11月から施行された「太陽光発電の余剰電力買取制度」⁶⁾と2012年7月から施行された「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」⁶⁾により、再生可能エネルギーが急速に普及する見通しとなる。
- 2) 2011年3月11日の東日本大震災による被害および福島第一原子力発電所事故に伴い、社会や住民からエネルギーシステムに対する安全性や回復力への要求が高まる⁷⁾。

上記1)は日本政府の政策（制度）による再生可能エネルギーの導入環境の変化であり、住宅地域においては特に太陽光発電（以下、PVと略す）の導入が加速される。上記2)は社会的ニーズとしてエネルギーシステムに求められる仕様・機能の変化であり、DERにおいてもレジリエンス（Resilience；回復力）が要求される。

以上の環境変化を考慮すると、これまで設計・実証した水素エネルギーコミュニティに、PV等のDERをネットワ

*公益財団法人関西文化学術研究都市推進機構
エコシティ推進事業部

〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台1丁目7

E-mail i-sugimoto@kri.or.jp

**独立行政法人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1-1-1 つくば中央第二事業所

***筑波大学 システム情報系 教授

〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1

ークに統合して融通する仕組みと、災害等によるユーティリティ停止時において、過度な設備投資をすることなく少しでもエネルギー需給を確保する、供給側と需要側の仕組みが必要となってくる。

そこで本稿では、これまで設計した水素エネルギーコミュニティを、「エネルギーネットワーク構成」と「目的関数」という視点から再整理する。次に、DERの普及見通しと、災害時等に顕在化する水素エネルギーコミュニティの課題について述べ、これらに対応した新しいエネルギーネットワークの枠組として「エネルギー需給型コミュニティ」のコンセプトを提言し、そのネットワーク構成と目的関数を示す。

2. 水素エネルギーコミュニティ

本研究では、住宅地域において電気・水素・熱（温水）をエネルギーキャリアとしてネットワークを行い、相互にエネルギー融通が可能となる、一定範囲の区画または一定規模の建物を「水素エネルギーコミュニティ」と定義し、類型化した³⁾。電気・水素・熱（温水）のエネルギーネットワークの範囲・規模は、それぞれのキャリアとしての特性から自ずと制約され、「電気 > 水素 > 熱（温水）」の関係となる²⁾。以下に、水素エネルギーコミュニティをネットワーク構成と目的関数の視点から記述する。

○エネルギーネットワーク構成

水素エネルギーコミュニティのネットワークは、電気・水素・熱（温水）を融通する「エネルギーネットワーク」、エネルギーネットワークに接続されたDERと周辺装置（総称してDERモジュールという）、外部から供給される系統電力・都市ガス等のユーティリティ、区画・建物を形成する戸建住宅または集合住宅の需要家群（DERを有する需要家を「需給家」という）から構成される。

DERモジュールには「水素製造」「エネルギー変換」「エネルギー貯蔵」等のモジュールがある。また需要家群のエネルギー需給情報はインターネット上で共有される。

図1に水素エネルギーコミュニティのネットワーク構成のブロック関係図を示す。

ここで、「水素製造」モジュールは、都市ガス／LPガスを原料に水蒸気改質（SMR）により水素を製造する。「変換」モジュールは、燃料電池スタック（以下、FCと略す）を対象として、水素を電気と熱（温水）に変換する。「貯蔵」モジュールは、製造した水素を水素ホルダに、変換した熱（温水）を排熱温水タンクに貯蔵する。

○目的関数

水素エネルギーコミュニティの評価指標として、以下の3つが挙げられる。

- ・エネルギー供給の安定性（Energy Security）[SEC]：DERとユーティリティ（系統電力・都市ガス等）の連系によるエネルギー供給の半二重化
- ・経済性・コスト（Economic Efficiency）[COST]：年間のエネルギー費用（エネルギー消費量とほぼ等価）
- ・環境・温暖化対応（Environment）[CO2]：年間の消費エネルギーに対応する二酸化炭素の排出量

そこで、水素エネルギーコミュニティの目的関数[Obj.]は、上記の評価指標を組み合わせた[COST]と[CO2]の和を設定し、目的関数を最小化（パレート最適化）する²⁾。

$$Obj. = w_{cost} \frac{\sum_n cost_{energy}(n)}{MAX_{cost}} + w_{CO2} \frac{\sum_n CO2(n)}{MAX_{CO2}} \quad (式1)$$

→ Minimum

$$w_{cost} + w_{CO2} = 1$$

$$MAX_{cost} = \sum_n cost_{total}(n) \Big|_{w_{cost}=0}$$

$$MAX_{CO2} = \sum_n CO2(n) \Big|_{w_{CO2}=0}$$

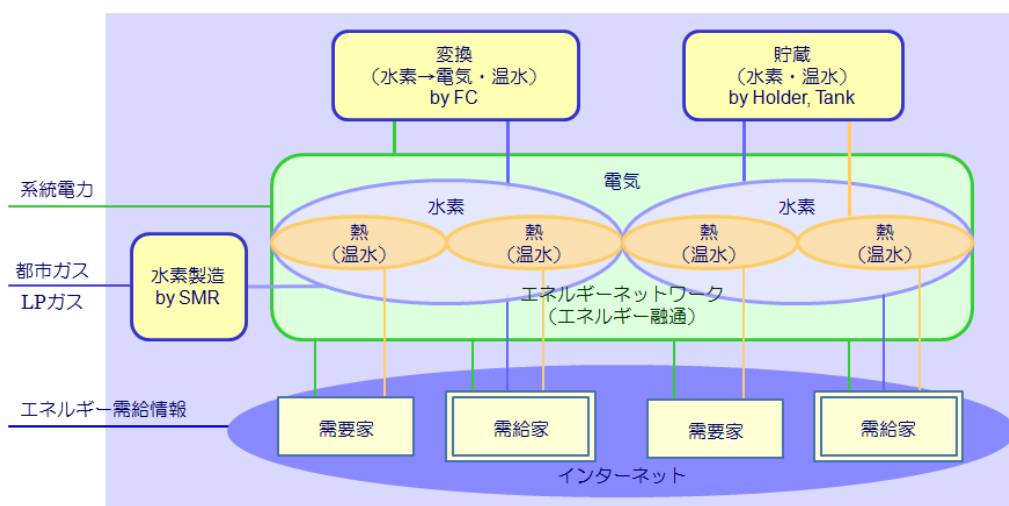


図1 水素エネルギーコミュニティのネットワーク構成

3. 分散型エネルギーの普及見通しと災害時の課題

3.1 太陽電池（PV）の普及見通し

家庭部門へのPVの導入施策の加速により、PVは戸建住宅において、2009年度～2011年度の3年間で約53万軒に導入設置が進んでいる⁸⁾。この導入軒数は日本の総戸建住宅数2,745万軒の約2%の普及率に相当し、2011年度末には累積3.6%に達している。この普及率の伸び（3年で2%）が持続するとして、2030年時点でPVの累積普及率は15%程度となり、戸建住宅6～7軒に1軒の割合でPVが設置されていることになる。つまり、水素エネルギーコミュニティの戸建住宅の基本区画8軒単位において、最低1軒はPVが設置されている可能性が高い。

これまで水素エネルギーコミュニティの基本区画を設計するに当たり、目的関数を最適化するFCや改質器の台数・容量を算定したが、今後は経済性・省エネルギー性[COST]と環境負荷の低減[C02]の両方の観点から、PVの余剰電力を基本区画内で融通することが必須となる。

3.2 災害時における水素エネルギーコミュニティの課題

災害等によって「系統電力と都市ガスの供給が、期間は不明であるが限定的に停止する」という状況を想定する。このような状況では、水素エネルギーコミュニティにおいて以下の問題が顕在化する。

① 水素供給の停止

都市ガスが停止すると、「水素製造」モジュールへの燃料供給がなくなり水素製造が停止する。よって、ホルダに貯蔵した水素を使い切った時点で、水素供給は停止する。

② 燃料電池スタック（FC）の移動停止

FC群は一括して系統連系して移動しているため、FC群は系統電力の停止を検出すると、系統連系技術要件ガイドライン⁹⁾に従い、単独運転を停止する。

③ 需要家機器の使用制限

ホルダに貯蔵された水素によりFC群が自立運転に移行した場合でも、需要家の使用する機器が制限され、FC群の供給する電力と需要のバランスが崩れると、電気ネットワーク全体がブラックアウトする。

4. エネルギー需給型コミュニティ

住宅地域におけるPVの普及見通しと災害等によるユーティリティ停止時の課題に対応するために、これまでの水素エネルギーコミュニティの設計を修正する必要がある。本研究では、FC以外のDER（当初はPVを対象とする）をエネルギーネットワークに組み込むと共に、ユーティリティ停止時に対処可能なレジリエンスを有する、水素エネルギーコミュニティを「エネルギー需給型コミュニティ」と称す。以下に、エネルギー需給型コミュニティのネットワーク構成と目的関数について述べる。

○エネルギーネットワーク構成

PVは太陽光を電気に変換する素子であるが、自然エネルギー（太陽光）により電気を生成することから、「エネルギー生成」モジュールに位置付ける。「水素製造」モジュールでは、ユーティリティ停止時の代替用として固体高分子電解質膜(Membrane)による水素発生装置も併用する。さらに、エネルギーネットワークと需要家の分岐点に、需給バランス調整用のフローコントローラを設ける。

図2にエネルギー需給型コミュニティのネットワーク構成のブロック関係図を示す。

ここで、「生成」モジュールのPVと「変換」モジュールのFCを自立運転可能な構成とするため、「貯蔵」モジュールに再起動用の小容量バッテリーを追加装備する。またPVで生成した電気は、FC群と同様に余剰電力をエネルギー

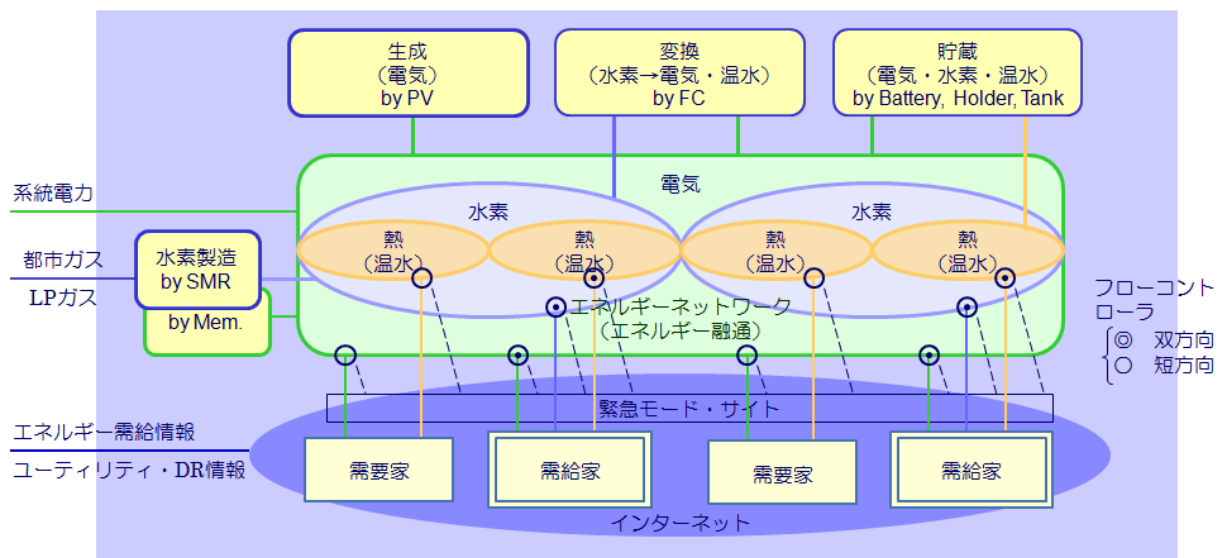


図2 エネルギー需給型コミュニティのネットワーク構成

需給型コミュニティ内で融通して使い切り、コミュニティ外へは逆潮流しない。さらに、災害等によって系統電力と都市ガスの供給が停止した場合、PVとFCは自立運転に移行すると共に、需要家機器（電気）は、需給家も含めて、フローコントローラによって防災負荷（例えば、非常用照明）または保安負荷（例えば、医療機器）のみに使用制限される。つまり、緊急時・災害時において暫定期間のみであるが、コミュニティ内のエネルギー需給をバランスさせて自立性を確保する。

○目的関数

エネルギー需給型コミュニティの評価指標と目的関数は、平常時において水素エネルギーコミュニティとほぼ同様の運転を行う「通常モード」と、緊急災害時（ユーティリティ停止時）において電力需給を重視して自立・負荷制限運転を行う「緊急モード」の2種類から成る。

（通常モードの目的関数）

通常モードの目的関数は（式1）と同様であるが、以下の評価指標の定義と算定方法が水素エネルギーコミュニティと異なる。

- ・ 経済性・コスト（Economic Efficiency）[COST]：年間の購入エネルギー費用（系統電力と都市ガスの合計）。
- ・ 環境・温暖化対応（Environment）[CO2]：年間の購入エネルギーに対応する二酸化炭素排出量。

ここで[COST]は、需要家全体の消費電力量からPVとFCの発電量を控除した電力量（つまり、系統電力の使用量）に相当する料金と、需要家全体と水素製造モジュールが消費した都市ガス使用量に相当する料金の合計となる。また[CO2]は、系統電力と都市ガスの使用時刻・使用量に二酸化炭素排出原単位を乗じて算定される。

（緊急モードの目的関数）

エネルギー需給型コミュニティの評価指標として、以下の3つが挙げられる。

- ・ エネルギー供給の安定性（Energy Security）[SEC]：DERとユーティリティの連系に加えて、ユーティリティ（系統電力・都市ガス等）が停止したことを検知し、通常モードのネットワーク制御方式（自立分散制御）から緊急モードの制御方式（統合制御）へ移行する構成
- ・ システム回復力（System Resilience）[REL]：PVおよびFCを自立運転に移行した後、以下の式で表わされるDER全体の供給電力（kW）

$$REL = PV + FC - Membrane \pm Battery \quad (\text{kW}) \quad (\text{式 } 2)$$

- ・ 需給ギャップ調整力（Negawatt Power）[NEG]：各需要家の防災負荷や保安負荷の消費電力（kW）

エネルギー需給型コミュニティでは、[REL]が[NEG]の総和以上の容量を有すると共に、[NEG]の総和を必要最小限

に抑えて、[REL]が電力を供給する時間を最大化することが求められる。よって、目的関数は以下の2式のように表記される。

$$REL \geq \sum_n NEG \quad (\text{kW}) \quad (\text{式 } 3)$$

$$\int_{t=0}^{t=T} REL dt = \int_{t=0}^{t=T} \sum_n NEG dt, \quad T \rightarrow \text{Maximum} \quad (\text{kWh}) \quad (\text{式 } 4)$$

5. まとめ

本稿では、再生可能エネルギー（PV）の普及見通しと災害時等に顕在化する水素エネルギーコミュニティの課題を示し、それらに対応した新しいエネルギーネットワークの枠組としてエネルギー需給型コミュニティのコンセプトを提言し、そのネットワーク構成と目的関数を示した。

参考文献

- 1) Aki H, Ishii I, et.al. Operational strategies of networked fuel cells in residential homes, IEEE Transactions on Power Systems 2006; 21(3):1405-1414.
- 2) Aki H, Yamamoto S, et.al. Fuel cells and energy networks of electricity, heat, and hydrogen in residential areas, International Journal of Hydrogen Energy 2006; 31(8):967-980.
- 3) Sugimoto I, Aki H, Ishida M. Energy network designs and a hydrogen energy community growth scenario based on networking stationary fuel cells. In: Hydrogen and fuel cells 2011. Vancouver: 2011.
- 4) Aki H, Taniguchi Y, Kegasa A, Sugimoto I, et.al. Demonstration of hydrogen energy network and fuel cells in residential homes, Proceedings of the World Hydrogen Energy Conference (WHEC2006), Lyon, France.
- 5) Aki H, Yamamoto S, Sugimoto I, et.al. Fuel cells and energy networks of electricity, heat, and hydrogen: A demonstration in hydrogen-fueled apartments, International Journal of Hydrogen Energy 2012, Vol. 37, pp. 1204-1213
- 6) 経済産業省；なっとく！再生可能エネルギー
<http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/>
- 7) 横浜市環境創造審議会；（平成23年度提言）これからの環境行政のあり方について（平成24年3月）
- 8) 経済産業省中国経済産業局；住宅用太陽光発電システム導入状況（件数）（平成23年度末）
<http://www.chugoku.meti.go.jp/energy/sun2/info/pdf/download/fukyuritsu.pdf>
- 9) 経済産業省資源エネルギー庁；電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン（平成16年10月1日制定）