

建物の再エネ余剰電力を有効活用する水素エネルギー利用システムの開発

下田 英介 山根 俊博 野津 剛
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Hydrogen Energy System for Balancing Consumption in Renewable-Supplied Buildings

Eisuke Shimoda, Toshihiro Yamane and Tsuyoshi Nozu

本稿では、開発した建物付帯型の水素エネルギー利用システムについて、構築した実証システムの構成装置概要と基本性能を報告すると共に、シミュレーションに基づいたシステムの最適運用方法の検討結果及び実際の運用結果について述べる。このシステムは晴天時に太陽光発電の余剰電力を使って水素を製造、貯蔵し、曇りや雨のような太陽光発電があまり発電をしない時間帯や建物の電力需要が多い時間帯に燃料電池を使って発電を行う。システムを高効率に運用するためには、太陽光発電の発電電力を可能な限り建物で直接利用することが重要である。本稿では、既商品化技術である分散型電源や建築設備のエネルギーマネジメント技術に基づきシステムの最適な運用方法を検討し、実際にシステムを運用することで性能を評価した。更にシミュレーションを用いることで、実建物への本システムの導入可能性についても併せて検討を行った。

This paper outlines a hydrogen energy system that has been developed for buildings supplied by photovoltaic (PV) cells and explains its basic characteristics. Hydrogen is produced using surplus electricity available when, on sunny days, the PV cells generate more power than the building consumes. The fuel cell supplies electricity and heat during periods of high demand or when PV (or other renewable) generation is low. The ability to directly supply a building with renewable electricity promotes more efficient energy usage. The authors consider an optimal operation regime based on the characteristics of the various system components and evaluate its validity by comparing actual operations with a prior simulation. The paper also shows a design method for the rated capacity of each component based on control simulations, and verifies feasibility of this system in a building.

1. はじめに

水素は利用時においてCO₂を排出しないので、再生可能エネルギー(再エネ)を用いて製造された水素は、クリーンなエネルギーとして温室効果ガスの削減に大きく寄与すると期待されている。著者らは産業技術総合研究所(産総研)と共同で、①建物の運用時における温室効果ガス排出量の削減効果の向上(再エネを建物において最大限に有効利用)、②建物の防災機能向上(電力系統停電時などの非常時にも建物へ電力・熱供給を継続)、を目的として『建物付帯型の水素エネルギー利用システム』の開発・実証を行ってきた。^{1),2)}

水素エネルギー利用システムは水の電気分解を利用した水素製造装置、水素吸蔵合金を用いることで安全かつコンパクトな水素貯蔵を実現した水素貯蔵装置、貯蔵した水素を用いて建物への熱電

併給を行う燃料電池、電気を直接充放電することでエネルギーの短期的な需給バランスを調整する蓄電池、並びにこれらの機器を統合的に一元管理することでシステムをあたかも1つの装置のように動作させる建物向けのエネルギー管理システム(スマート BEMS: Building Energy Management System)から構成されている。水素を製造・貯蔵・利用する際には変換効率に伴うエネルギーロスが生じるため、このエネルギーロスをいかに小さくするかが水素の有効活用においては重要となる。

本論文では、開発したシステムの構成装置概要と各装置の基本性能、スマート BEMS に構築した制御ロジックについて、実際の装置の運用結果を踏まえて報告する。また、実機特性を基に構築したシミュレーションモデルを用いて計算した、建物へのシステムの導入可能性評価結果と、導入時の構成装置の容量設計結果についても述べる。

2. 装置概要と基本性能

本章では開発した水素エネルギー利用システムの全体的な考え方、構成装置、および各装置の基本性能について述べる。³⁾

2.1 全体システム

図-1に水素エネルギー利用システムの概念図を示す。本システムは、建物の屋上や底などに設置した太陽光発電の再エネ余剰電力を用いて、水素製造装置を稼働させて水素を製造、水素吸蔵合金タンクに貯蔵しておき、夜間や雨天など再エネ電力が低下した際や電力需要が増大した際に、水素を取り出して燃料電池で発電するものである。さらに、システム稼働時に燃料電池などから生じる熱もエネルギーとして回収して建物で最大限に活用する。それぞれの装置はスマートBEMSで監視・制御されており、起動/停止のスケジュール管理および出力調整が行われる。

写真-1に産総研の福島再生可能エネルギー研究所(FREA)内にて構築した実証システムの外観を、表-1に実証システムの主な構成装置の設計要件を示す。各装置は4個の12フィートコンテナ内にそれぞれ設置されており、移動可能なシステムとなっている。

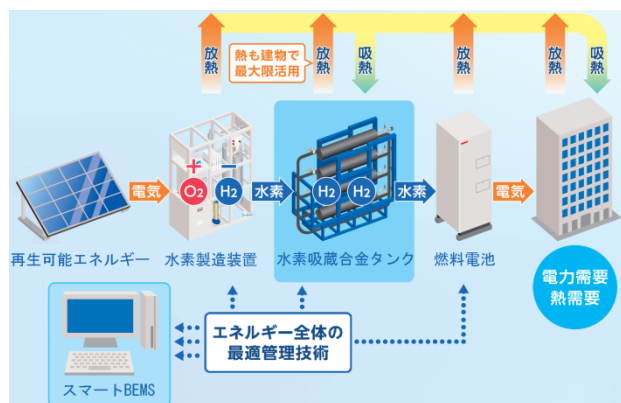


図-1 水素エネルギー利用システムの概念図



写真-1 構築した水素エネルギー利用システム

2.2 水素関連装置の基本性能

以下に水素関連装置の基本性能を示す。

2.2.1 水素製造装置

三相 200V 交流に接続された直流電源から、最大 75V500A の直流電流が固体高分子形水電解(PEM 水電解)スタック(24セルより構成)に供給され、水の電気分解(電解)によって最大 5Nm³/h 以上の流量で水素ガスを供給することが可能である。本装置では、高圧ガス保安法の適用除外となる 1.0MPa 未満の圧力で電解を行っている。なお、用いている PEM 水電解は再エネのような変動する電力による水素製造(部分負荷運転)や日起動停止(DSS)運転に適している。図-2に水電解装置の電流電圧特性を示す。定格 500A 時でセル電圧 E_{cell} は 1.8V 程度であり、理論稼働電圧を E_H として式(1)で与えられる電解効率 p は 80% 以上を達成している。

$$p = E_H / E_{cell} \times 100 = 1.48 / E_{cell} \times 100 \quad (1)$$

表-1 実証システム構成装置の設計要件

装置	種類	定格能力
水素製造装置	PEM 水電解	製造量:5Nm ³ /h 以上@500A 電解効率:80%以上
水素貯蔵装置	水素吸蔵合金	貯蔵量:34Nm ³ 以上 吸蔵速度:5Nm ³ /h 以上@20℃ 放出速度:3Nm ³ /h 以上@60℃
燃料電池	PEFC	電気出力:3.5kW 発電効率:55%(LHV) 排熱回収効率:40%(LHV)
蓄電池	Li-ion	出力:20kW 貯蔵量:20kWh
太陽光発電	ヘテロ接合型	10kW×2 250W×15

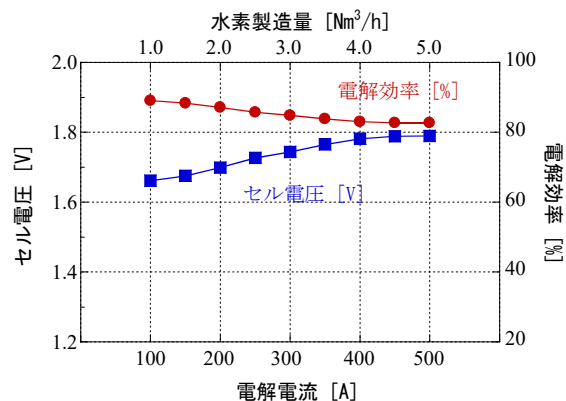


図-2 水電解装置の電圧電流特性

2.2.2 水素貯蔵装置

水素製造装置により製造された水素は、新たに開発した消防法上の危険物非該当の水素吸蔵合金を充填したタンクから構成される水素貯蔵装置に貯蔵し、需要時に合わせて燃料電池に水素を供給する。水素吸蔵合金は、水素吸蔵能力と水素放出能力の両方の性能を持たせた合金で、可逆的に水素を吸蔵させたり放出させたりすることが可能であり、温度および圧力の調整により水素の吸蔵・放出を制御することができる。

水素貯蔵装置単体の水素吸蔵・放出試験の結果を図-3、図-4にそれぞれ示す。20℃の冷却水で水素

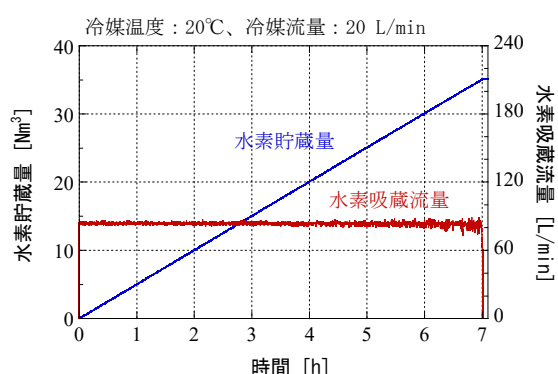


図-3 水素貯蔵装置の単体試験結果(貯蔵時)

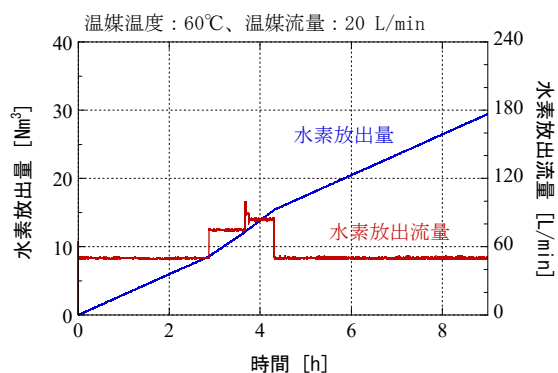


図-4 水素貯蔵装置の単体試験結果(放出時)

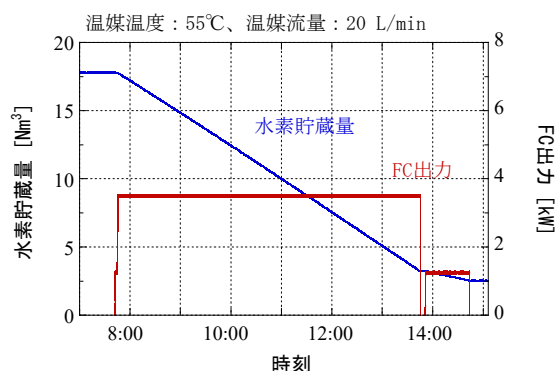


図-5 水素貯蔵装置から水素供給した燃料電池運転結果

を貯蔵、60℃の温水で水素を放出することが可能であり、34Nm³以上の水素を貯蔵・利用できることが確認できた。

2.2.3 燃料電池

最大出力3.5kWの固体高分子形燃料電池(PEFC)により、発電および温熱供給が可能である。図-5に燃料電池と水素貯蔵装置を連係させて発電をおこなった結果を示す。これは、燃料電池から供給される温熱を水素吸蔵合金タンクに直接供給することで発電に必要な水素を貯蔵装置から十分に供給可能であることを示している。

3. スマート BEMS によるエネルギーマネジメント

本章では、2章に記載した水素エネルギー利用システムの効率的な運用を実現するための制御方法と実際の運用結果について述べる。⁴⁾

3.1 運用方法

本システムの水素、電力、熱のエネルギーフローを図-6に、晴天時における電力エネルギーマネジメントの時系列イメージを図-7にそれぞれ示す。

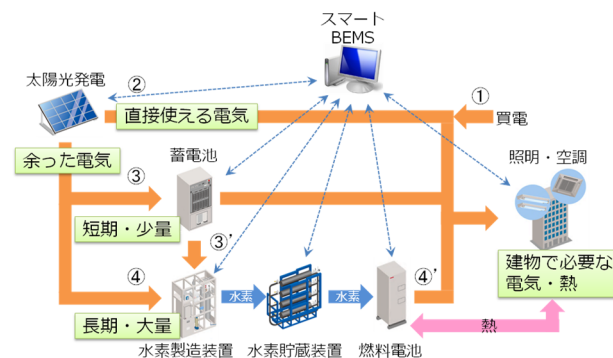


図-6 エネルギーフロー

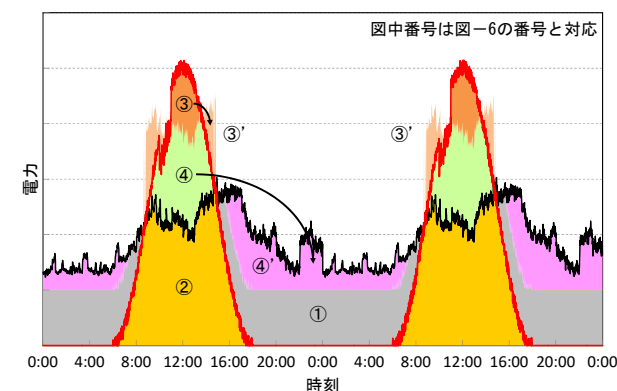


図-7 電力エネルギーマネジメントのイメージ

両図中の番号はエネルギーフローと時系列イメージの対応を表している。

太陽光発電の出力が電力需要を上回って余剰電力が発生した時間帯は、建物の電力需要の全量を太陽光発電で供給する(②)。余剰電力については、短周期・少量の電力は蓄電池(③)に、長周期・大量の電力は水素(④)に変換してそれぞれ貯蔵する。これらのエネルギーは、夜間など太陽光発電の出力が低下した時間帯に買電電力(①)とあわせて建物に供給される(③'、④')。

3.2 制御方法

スマート BEMS には、3.1 節で述べた運用方法を高い運転効率でかつ自動的に実現するため、3.2.1～3.2.2 項に記す 2 段階の制御を実装した。

3.2.1 予測/計画

図-8 に示すフローに従い、事前に各設備の起動/停止と出力のスケジュールを立案する。以下、手順について詳述する。

① 建物の最大デマンド電力の目標値設定

建物の電力デマンドの実績や各設備の容量等を考慮し、建物の最大デマンド電力の目標値を設定する。

② 最適化条件設定

最適化演算により最小化する値を設定する。「エネルギーコスト最小」、「一次エネルギー最小」、「CO2 排出量最小」のうちから選択可能である。

③ 電力/熱需要、太陽光発電予測

天気予報データや過去の建物の電力/熱需要の実績データを用い、建物の電力/熱需要と太陽光発電出力を予測する。前日夜、当日朝、当日昼の 1 日 3 回天気予報の更新に伴って、30 分ごと 2 日分の予測結果を出力する。

④ 最適運転計画

③の予測結果を用いて最適化演算を行い、各時間

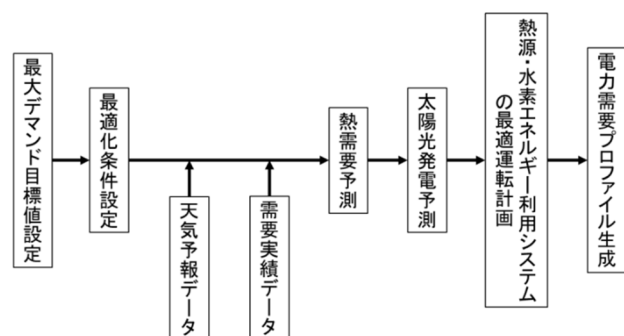


図-8 予測/計画の処理フロー

帯における各設備の起動/停止と出力計画値を決定する。本結果により、本システムを含めた建物全体の電力需要プロファイルが生成される。

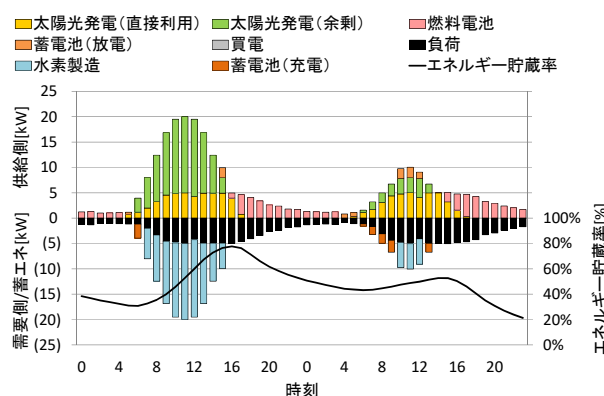
3.2.2 リアルタイム制御

各設備は 3.2.1 項に記載した予測/計画で立案したスケジュールに従って制御される。ただし同計画は電力/熱需要や太陽光発電出力の予測結果に基づくため、電力需要プロファイルと実際の運用結果には差異が生じる。スマート BEMS はデマンドを常に監視しており、必要に応じて蓄電池の充放電により需給バランスを取ることで、建物の最大デマンド目標値を上回らない運用を維持する。

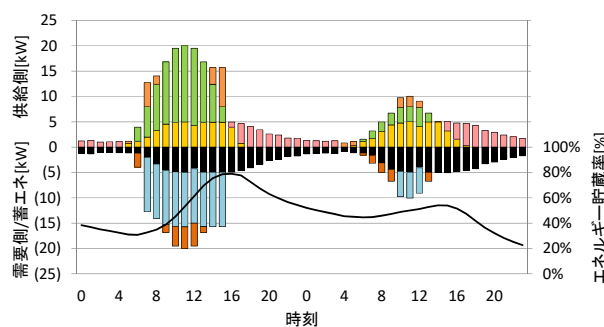
3.3 運用結果

3.3.1 予測/計画結果

初日晴天、翌日曇天の平日を対象に 3.2.1 項で記載の予測/計画を実施した。前日夜の予測/計画結果を図-9 に示す。棒グラフ(左軸)は電力の需要側(負の部分)と供給側(正の部分)、折れ線グラフ(右軸)は蓄電池と水素によるエネルギーの総貯蔵率を示す。予測/計画では以下の 2 通りの運転パターンが想定される。1 つは(a)で示すように太陽光発電の余剰電力に応じて水素製造量を変化させるパターン、もう



(a) 余剰電力に応じて水素製造



(b) 余剰電力を蓄電池で平滑化して水素製造

図-9 予測/計画結果(前日夜)

1つは(b)で示すように余剰電力を蓄電池で平滑化して水素製造量を安定化させるパターンである。表-2に各パターンの初日におけるエネルギー収支を示す。なお、システム総合効率 ϵ は、本システムがエネルギーの貯蔵を可能としていることから、太陽光発電電力量を W_{PV} 、買電電力量を W_{GRID} 、負荷電力量を W_{LOAD} 、貯蔵エネルギー増加量を W_{STC} 、貯蔵エネルギー減少量を W_{STD} として式(2)で定義した。なお、水素の貯蔵エネルギー増加量と減少量は、水素貯蔵量の変化量から水素の低位発熱量を求めて算出している。表-2よりわずかな差ではあるが、パターン(a)のほうが高い効率を示しており、予測/計画ではパターン(a)が採用された。

$$\epsilon = \frac{W_{LOAD} + W_{STD}}{W_{PV} + W_{GRID} + W_{STC}} \quad (2)$$

3.3.2 当日の運用結果

3.3.1項で予測/計画結果を示した初日における本システムの運用結果を図-10に示す。日中の太陽光発電の余剰電力で生成した水素により夜間の負荷電力を供給しており、ほぼ3.1節で述べた通りの運用結果となっている。

初日における本システムのエネルギー収支を表-3に示す。本運用により晴天時には、約60%の効率での運用が可能であることが確認できた。予測/計画の時点より効率が5%低くなっているのは、当日の太陽光発電電力量が予測より小さく、前日まで貯蔵していた水素を使用したためである。

表-2 初日のエネルギー収支

	パターン(a)	パターン(b)
太陽光発電電力量	143.0kWh	
負荷電力量	73.1kWh	
貯蔵エネルギー増加量	19.7kWh	18.7kWh
システム総合効率	64.9%	64.2%

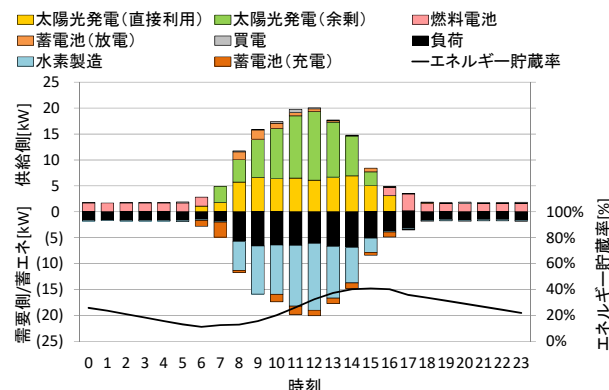


図-10 運用結果(初日)

4. 実建物適用に向けた導入可能性評価

本章では、水素エネルギー利用システムの展開を見据え、シミュレーションを用いた実建物への導入可能性について述べる。5)

4.1 シミュレーションモデル

図-11は構築したシミュレーションモデルのエネルギーフローを示したものである。各装置は2.2節で述べた装置の運転結果に基づき、実機の特徴が定格に対する出力比の形でモデル化されている。シミュレーションモデルに入力データとして一定期間における建物の特別の電力負荷(空調を除く)、温熱負荷(暖房、給湯含む)、冷熱負荷、および太陽光発電出力計算用の日射データを登録すると、時間別の各装置出力が演算される。但し太陽光発電については、パワーコンディショナー(PCS)の2次側出力を入力値とすることも可能である。

各時刻断面で解かれるエネルギーシミュレーションにおいては、3.2節で報告したスマートBEMSの最適運転計画ロジックが実装されており、実機の制御に即した機器の運用がシミュレーションできるようになっている。

また本シミュレーションモデルでは各設備容量を固定値とするだけでなく、上下限範囲を設定することもできる。この場合には各設備容量も最適化のパラメータとすることができ、例えばイニシャルとランニングを含めたエネルギーコストの最小化や、

表-3 1日のエネルギー収支(初日)

太陽光発電電力量	126.9kWh
負荷電力量	79.4kWh
貯蔵エネルギー減少量	5.5kWh
システム総合効率	59.9%

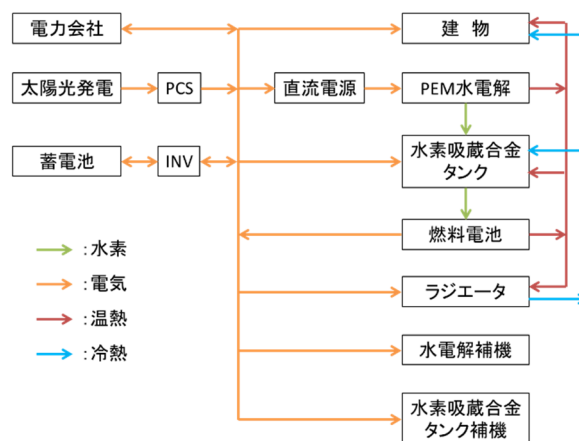


図-11 シミュレーションのエネルギーフロー

CO₂排出量を目標値以下に下げるといった制約条件での設備容量も算出できる。

4.2 エネルギーシミュレーション

4.2.1 実運用結果との比較

構築したシミュレーションモデルの妥当性を検証するため、各装置の設備容量を表-1に記載の値で固定とし、3.3節に記載の運用結果と同一日におけるシミュレーションを実施した。計算結果を図-12および表-4に示す。なお、3.3節で述べた運用では最適運転計画の作成において負荷電力と太陽光発電出力は予測値を用いていたので、本シミュレーションでも入力データには予測値を用い、各装置の時刻毎の出力を決定した後、実測値との電力誤差を全て蓄電池で補償するものとした。

図-12および表-4よりシミュレーションは実運用をほぼ忠実に再現していることが確認できる。なおシミュレーションでは若干、蓄電池の充放電量が実運用結果より大きくなっている。これは蓄電池のモデル化誤差よりも、実運用で蓄電池が補償できなかった買電電力量がシミュレーションでは充放電量に可算されていることに大きく起因している。

4.2.2 実建物への適用可能性評価

次に本エネルギーシミュレーションを表-5に示す建物に適用した際の水素エネルギー利用システムの

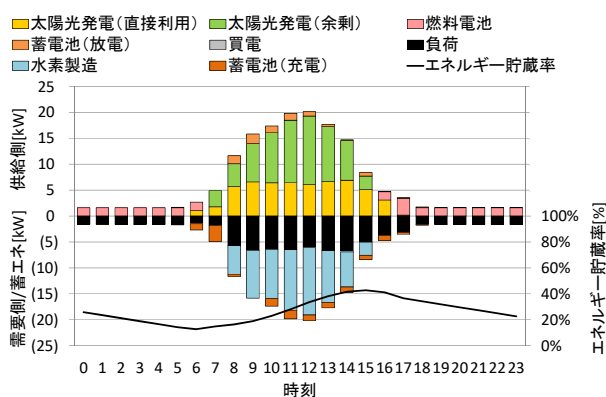


図-12 シミュレーション結果(初日)

表-4 1日のエネルギー収支の比較

装置	実運用	シミュレーション
太陽光発電電力量	126.9kWh	
負荷電力量	79.4kWh	
水素製造量	13.7Nm ³	13.4Nm ³
水素消費量	17.7Nm ³	17.6Nm ³
蓄電池放電量	7.0kWh	8.7kWh
蓄電池充電量	12.3kWh	13.6kWh

適用可能性評価結果について述べる。

CO₂の削減目標を▲25%とし、10年間の総エネルギーコストが最小になる設備構成、容量、運用方法を算出した。各装置のインシヤルコストやエネルギーコスト、各種原単位は実勢調査結果を基に表-6の通り設定した。また太陽光発電は全て自家消費するものとし、逆潮流はできないものとした。表-7に算出された各装置の容量を、図-13に例として中間期の1週間の運用計算結果を、図-14に年間の水素貯蔵量の推移をそれぞれ示す。

結果より総エネルギーコスト最小の条件下では、蓄電池と水素を組み合わせるエネルギーシフトを行う結果が得られた。これは今回のケースではエネルギーのシーズンシフトが有効であり、蓄電池では自己放電によりシーズンシフトが困難であったためと考えられる。このようにCO₂の削減目標や太陽光発電の逆潮流可否によっては、水素エネルギー利用システムの適用がエネルギーコストの観点からも有効でありうることを示された。

表-5 検討対象の建物諸元

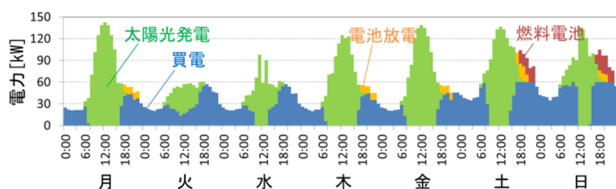
建物用途	宿泊施設(福島県内)
建築面積	2,690m ²
延床面積	5,650m ²
電力消費量	450MWh/年

表-6 シミュレーションに用いた各種数値

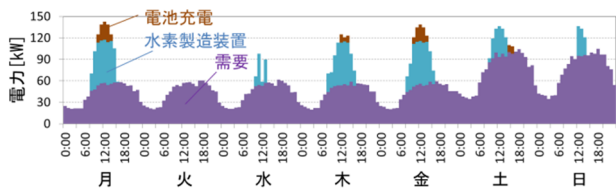
太陽光発電	40万円/kW
水素吸蔵合金タンク	10万円/Nm ³ -H ₂
水電解装置	125万円/(Nm ³ /h-H ₂)
燃料電池	35万円/kW
ガスコジェネ	25万円/kW
蓄電池インバータ	10万円/kW
買電基本料金	1500円/(kW・月)
買電従量料金	30円/kWh
LPガス従量料金	672円/Nm ³ -gas
都市ガス従量料金	96円/Nm ³ -gas
買電CO ₂ 原単位	0.573kg-CO ₂ /kWh
LPガスCO ₂ 原単位	0.398kg-CO ₂ /kWh
都市ガスCO ₂ 原単位	0.334kg-CO ₂ /kWh

表-7 装置容量算出結果

太陽光発電	200kW
水素製造装置	15Nm ³ /h
水素貯蔵装置	500Nm ³
燃料電池	30kW
蓄電池	30kW,150kWh



(a) エネルギー供給側



(b) エネルギー消費側

図-13 中間期の運用計算結果

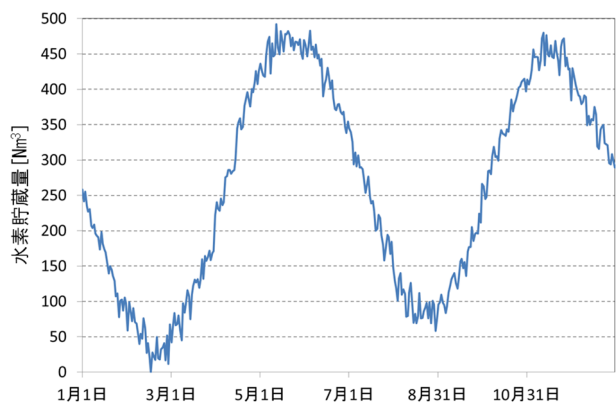


図-14 年間の水素貯蔵量の推移

5. まとめ

本論文では、開発した水素エネルギー利用システムについて、システムの概要、基本特性、ならびに制御方法について運用結果を踏まえて報告した。実機を用いた運用において、60%程度の効率で運用ができることを確認した。

またエネルギーシミュレーションにより、実建物への適用時における設備構成、容量を試算したところ、エネルギーのシーズンシフトが有効な建物においては水素の導入が選択されることが確認できた。

謝辞

水素エネルギーシステムの開発ならびに実証において、共同研究先である産業技術総合研究所の協力をいただいている。ここに記してお礼申し上げる。

<参考文献>

- 1) 下田英介, 山根俊博, 野津剛, 遠藤成輝, 五舛目清剛, 前田哲彦: “建物付帯型水素エネルギー利用システムの開発(その1)”, 第37回水素エネルギー協会大会予稿集, pp.55-58, 2017
- 2) 前田哲彦, 五舛目清剛, 遠藤成輝, 下田英介, 山根俊博, 野津剛: “建物付帯型水素エネルギー利用システムの開発(その2)”, 第37回水素エネルギー協会大会予稿集, pp.143-144, 2017
- 3) 野津剛, 下田英介, 山根俊博, 遠藤成輝, 前田哲彦: “建物付帯型水素エネルギー利用システムの開発・実証—その1—”, 2018年電気設備学会全国大会梗概集, pp.363-364, 2018
- 4) 山根俊博, 下田英介, 野津剛, 遠藤成輝, 前田哲彦: “建物付帯型水素エネルギー利用システムの開発・実証—その2—”, 2018年電気設備学会全国大会梗概集, pp.365-366, 2018
- 5) 下田英介, 山根俊博, 野津剛, 遠藤成輝, 前田哲彦: “建物付帯型水素エネルギー利用システムの開発・実証—その3—”, 2018年電気設備学会全国大会梗概集, pp.367-368, 2018

