

建物・施設における蓄エネルギーシステムに関する研究

蓄電池・水素設備を用いた蓄エネルギー容量に関する検討

岡田 健志*¹・七里 彰俊*¹・張本 和芳*¹・関根 賢太郎*¹

Keywords : hydrogen, battery, surplus electricity, energy storage, simulation

水素, 蓄電池, 余剰電力, 蓄エネルギー, シミュレーション

1. はじめに

社会全体のカーボンニュートラル化に向けて再生可能エネルギー（以降、再エネ）の主電源化が進められているが、課題の一つは発電量の変動性である。再エネのうち日本で最も発電量の多い太陽光発電（以降、PV）は日照に依存するため、雨天時と夜間は発電しないことに加え、発電量は4~6月の中間期に最も多く、冬季に少ないという特徴がある。一方、電力需要は夏季や冬季に多くなるため、主電源化のためには季節を越える長期的な需給のバランスが必要となる。

また、PV普及時のエネルギーシステムの在り方も検討されている。これまでPVは固定価格買取制度により建物や施設、地域などの需要家に広く普及されてきたが¹⁾、電力システムを強化しなければ逆潮流して他施設へ送電できないこと²⁾、需給バランスが崩れ停電になることを防ぐため、出力制限が発生してしまうことなどの問題が生じている。これらよりPVを持つ需要家側での対策の可能性を検討する必要がある。

そこで本研究では長期的な蓄エネルギーとして注目される水素を対象として、蓄電池と水素設備により年間を通して電力需給調整する蓄エネルギーシステムの可能性を検討し、蓄エネルギーシステムの最適な計画手法を構築することを目的としている。PVの発電が余剰する時に水電解により水素を生成し、電力が不足するときに水素を利用して燃料電池が発電することで季節を越えて電力を融通する。短期的な時間や日単位の需給調整は蓄電池により行う。本稿では蓄電池と水素設備を組み合わせることで年間で需給調整しながらシステムからの受電量をゼロとする場合の蓄エネルギー容量の必要

容量に関する知見を得る。具体的には実建物の発電量と電力需要の実測値から日々の充放電をシミュレーションし、システムから化石由来電源を利用せず年間を通してPVのみで運用する際の蓄エネルギー容量とエネルギーバランスを評価する。

2. 蓄エネルギーシステムの概要

対象とする蓄エネルギーシステムを図-1に示す。PV、蓄電池、水電解装置、水素貯蔵タンク、純水素燃料電池（以降、FC）で構成される。PVの発電分のうち、建物の電力需要に対する同時同量分はそのまま利用し、余剰電力は蓄電池へ蓄電、もしくは水素として貯蔵する。蓄電池からの給電、及びFCの発電からの電力で電力需要を賄えないときはシステムから受電する（以降、外部受電）。また、余剰電力を蓄電池や水素貯蔵タンクへ貯められないときはシステムへ逆潮流する。本研究では蓄電池と水素設備によってPVの電力で建物の需要を賄い、外部受電をゼロとする蓄エネルギー容量を検討する。

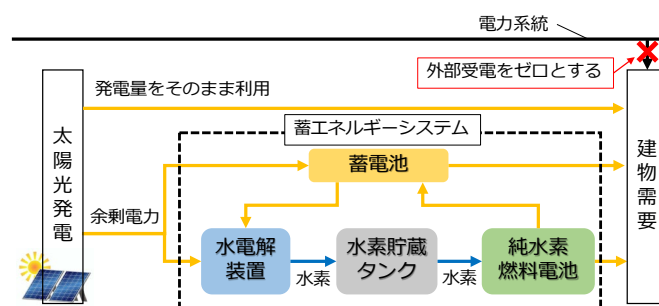


図-1 蓄エネルギーシステム
Fig.1 Energy storage system

* 1 技術センター 都市基盤技術技術研究部 空間研究室

3. 検討内容

本システムに対して以下の3つの検討を実施した。

1) 蓄電池と水素貯蔵の蓄エネルギー容量の組合せ検討
 本システムを建物・施設に導入する場合、電力需給に対して通年で外部受電をゼロとするために必要な蓄エネルギー容量と、そのエネルギー収支を検討する。また、電力需給に対して蓄電池と水素貯蔵容量の最適な組み合わせを検討するため、蓄電池と水素貯蔵の導入容量に対する外部受電の削減量を評価する。

2) 複数年度における蓄エネルギー容量の検討
 暖冬や冷夏などの年ごとの天候の傾向により、余剰電力の多い年、少ない年がある。継続的に外部受電をゼロとするためには年度を超える電力融通が必要となる可能性がある。複数年度にわたる電力需給に対して、外部受電ゼロに必要な蓄エネルギー容量を評価する。

3) 技術進展による蓄エネルギー容量の低減効果
 蓄エネルギー技術はエネルギー変換に伴う損失が課題であるが、将来的には技術的進展により改善していくと考えられる。経済産業省は水電解装置の水素製造効率を2030年目標で4.3 kWh/Nm³としている³⁾。水電解装置の他、蓄電池やPV、FCなどの技術進展により、蓄エネルギー設備の導入効果の向上が期待される。そこで蓄電池、PV、FC、水電解装置の効率向上による蓄エネルギーの必要容量の低減や外部受電の削減の効果を検討する。

4. 評価方法

4.1 建物・設備機器

建物と設備機器の各種仕様を表-1に示す。蓄電池の充放電効率は80%^{注1)}とし、「電気→水素→電気」の変換効率は、表-1の水電解装置の製造効率とFCの水素消費量に対する発電電力から算出し、26%とした。

表-1 各種仕様

Table 1 Specifications of energy storage system

施設/設備	仕様	
オフィスビル	延床面積	1277m ²
PV	設備容量	140kW
蓄電池	充放電効率 ^{注1)}	80%
水電解装置	製造能力 ^{注2)}	5Nm ³ /h
	製造効率 ^{注2)}	6.5kWh/Nm ³
FC	発電電力 ^{注3)}	5kW
	水素消費量 ^{注3)}	3Nm ³ /h

4.2 電力需要データ・発電量データ

シミュレーションではZEBを達成した建物⁴⁾(以降、対象建物)の電力需要と発電量の時刻毎の実績値を参考にした。なお、PVの設備容量は蓄エネルギーによる損失を考慮し、年間で外部受電をゼロとするように調整した。その結果、年間の総量は電力需要55.5MWh、発電量84.6MWhとなった。このうち、PV発電時に需要が発生している同時同量分は25.7MWh、同時刻に発電量が需要量を上回る余剰電力は58.9MWh、下回る不足電力は29.9MWhであった。

4.3 運転制御

水電解装置およびFCは表-2に示す蓄電池残量の閾値(以降、制御パラメータ)で稼働制御する。蓄電池残量が0~A kWhの場合は、水素が貯蔵されていれば、FCを稼働させる。蓄電池残量がA~B kWhの場合は水素設備を利用せず蓄電池を充放電させる。蓄電池残量がB~C kWhの場合はPVの発電量で水電解装置を稼働させる。蓄電池残量がC kWh以上の場合は蓄電池から給電して水電解装置を稼働させる。蓄電池はPV・FCの発電量と電力需要の差分を充放電する。上記の運転フローに基づき、外部受電量を最小化、蓄エネルギー容量を最小化するように制御パラメータを決定した。

表-2 蓄電池残量に対する水電解装置・FCの稼働パターン
 Table 2 Operation pattern of water electrolyzer / FC based on the remaining amount of battery

蓄電池残量	水電解装置	FC
0 ~ A kWh	停止	稼働
A ~ B kWh	停止	停止
B ~ C kWh	稼働 ^{※1)}	停止
C kWh~	稼働 ^{※2)}	停止

※1: PVから給電 ※2: 蓄電池から給電

4.4 設備特性の考慮

水電解装置は部分負荷運転せず定格運転(32.5kW)とした。また、FCは定格運転(5kW)とし、運転開始から最低12時間連続運転するものとした。

4.5 シミュレーション例

中間期のシミュレーション結果の例を図-2に示す。5月の14、15、17日はPV発電が50kWであるのに対し電力需要が7kWであり、余剰が多く発生している。この余剰電力を用いて蓄電池の充電と水電解装置の稼働による水素製造が行われる。夜間の電力需要に対しては蓄電池からの放電で賄われる。次に冬季の結果の例を図-3に示す。1月の22、24、25日は蓄電池残量が少ないことからFCが稼働し5kWの発電をしている。このような蓄電池の充放電、水電解装置の稼働、FCの稼

働を通年でシミュレーションし、外部受電ゼロに必要な蓄電池と水素貯蔵の蓄エネルギー容量を評価した。

月末まで4000kWh程度となる。12~2月中旬は電力不足の時間帯が多くなるため放電量が充電量を上回り、2月中旬で0kWhになる。3月は再び余剰電力が増えて充電量が放電量を上回り、蓄電池残量が増える。

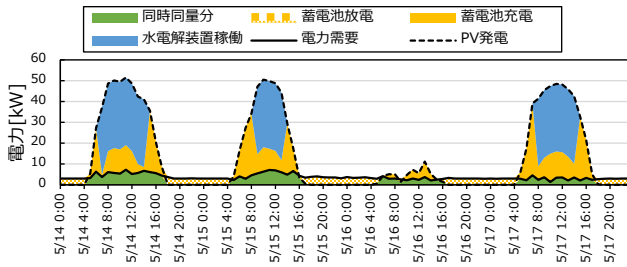


図-2 中間期のシミュレーション結果の一例

Fig.2 An example of simulation results in the intermediate period between summertime and wintertime

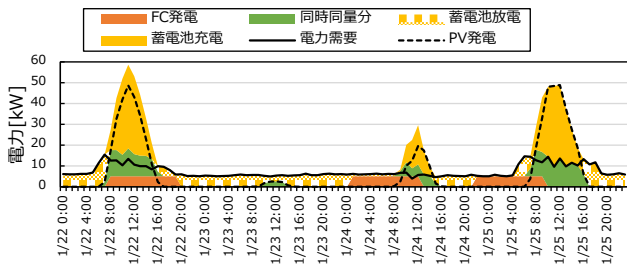


図-3 冬季のシミュレーション結果の一例

Fig.3 An example of simulation results in the wintertime

5. 蓄電池と水素貯蔵の蓄エネルギー容量の組合せの検討

シミュレーションケースを表-3 に示す。Case 1 では蓄電池のみを用いて外部受電をゼロとした場合の容量を試算した。Case 2 では蓄電池と水素設備を用いて外部受電をゼロとした場合の容量を試算した。Case 3 では、蓄電池が時間単位・日単位の需給調整に用いられることを想定し、最大容量に対して利用率を高くするシミュレーションを検討した。

表-3 シミュレーションケース

Table 3 Simulation cases

ケース	条件	蓄エネルギー設備	制御パラメータ		
			A	B	C
Case 1	外部受電をゼロとする	蓄電池	—	—	—
Case 2	外部受電をゼロとする	蓄電池+水素	300	450	500
Case 3	蓄電池の設備利用率を高くする	蓄電池+水素	100	250	300

5.1 外部受電をゼロとする蓄エネルギー容量の推計

蓄電池のみで外部受電をゼロとするケース (Case 1) の蓄電池残量の推移を図-4 に示す。4月から5月は余剰電力が多く発生するため、蓄電池は4200kWhまで充電される。その後は充放電を繰り返す、蓄電池残量は11

次に蓄電池と水素設備で外部受電をゼロとするケース (Case 2) の蓄電池残量と水素貯蔵量の推移を図-5 に示す。余剰電力が多く発生する4~6月と8月の夏季休暇の期間に継続的に水素が貯蔵され、水素貯蔵量の最大値は2444Nm³となり、蓄電池残量の最大値は560kWhとなる。7~11月は水素を貯蔵・利用しながら蓄電池を300~500kWhの幅で充放電し、電力需要を賄っている。12~2月は電力需要が最も多くなり発電量が減るが、外部からの受電をゼロとするために、4~6月に貯蔵した水素を利用してFCが発電した。図-6 に水電解装置とFCの月別稼働時間数を示す。水電解装置の最も多い稼働月は5月の167時間となり、FCは1月の408時間であった。年間稼働時間数は水電解装置が809時間、FCが1221時間であった。

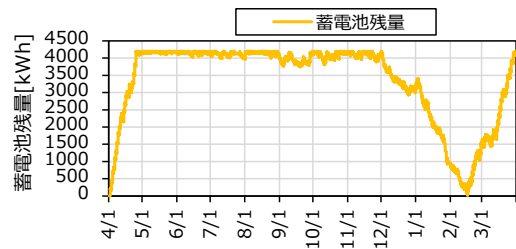


図-4 蓄電池残量 (蓄電池のみでの外部受電ゼロケース)

Fig.4 Time series change in the remaining amount of battery in Case 1

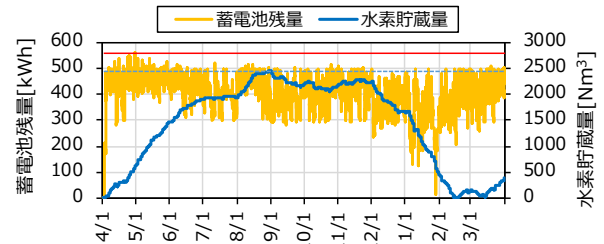


図-5 蓄電池残量と水素貯蔵量 (外部受電ゼロケース)

Fig.5 Time series change in the remaining amount of battery and hydrogen storage in Case 2

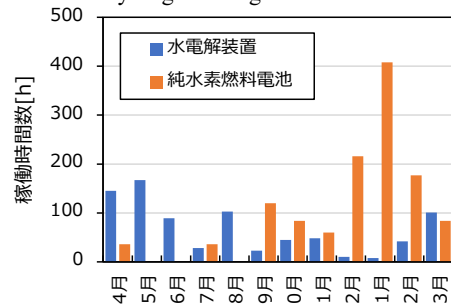


図-6 水電解装置と純水素燃料電池の月別稼働時間数

Fig.6 Monthly operating hours of water electrolyzer and pure hydrogen fuel cell

5.2 蓄電池の設備利用率の向上

Case 2 では4~12月において常に300kWhが充電されており、蓄電池の設備利用率が低い。このため蓄電池の設備利用率を向上させることを目的に、制御パラメータをA=100, B=250, C=300 [kWh]としてシミュレーションした (Case 3)。蓄電池残量と水素貯蔵量の推移を図-7に示す。蓄電池残量は最大値357kWhに対して100~300kWhで推移しており、蓄電池の設備利用率が向上している。一方、1月では電力需要に対する発電量の余剰が発生しない日が続き、蓄電池の充電量が不足して合計264kWhを外部から受電した。この時、水素の貯蔵量は不足していないが、FCは定格の5kW以上の給電ができないことにより外部から受電した。水素貯蔵量の最大値は2417Nm³であった。

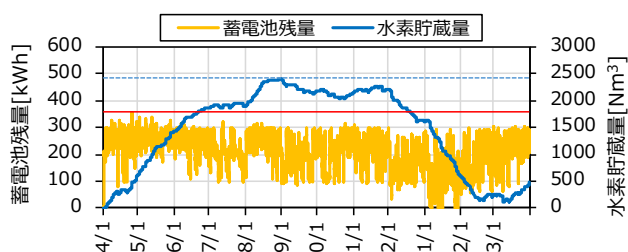


図-7 蓄電池残量と水素貯蔵量 (設備利用率向上ケース)
Fig.7 Time series change in the remaining amount of battery and hydrogen storage in Case 3

5.3 エネルギー収支

蓄電池と水素設備により外部受電をゼロとしたとき (Case 2) のシミュレーション終了時における年間エネルギー収支を図-8に示す。発電量84.6MWhのうち、30%は電力需要に対する同時同量分として、残りの70%は蓄エネルギーとして利用することにより、外部からの受電をゼロにすることができた。損失のうち、充放電分は8.4MWh、水素への変換分は19.6MWhであった。蓄電池から水電解装置への給電(9.3MWh)は水素を十分に貯蔵するために行われており、水電解装置の運転に必要な32.5kWに対して余剰電力が不足する場合に蓄電池から給電していることに起因している。FCから蓄電池への給電(0.1MWh)はFC運転時に電力需要が5kWを下回る場合(夜間や休日)と、PVとFCの発電で余剰した場合に行われており、FCの定格運転に起因している。蓄電池と水素設備の間でのエネルギー変換を減らすためには、需要と発電を予測し運転計画を最適化する必要性が示唆された。

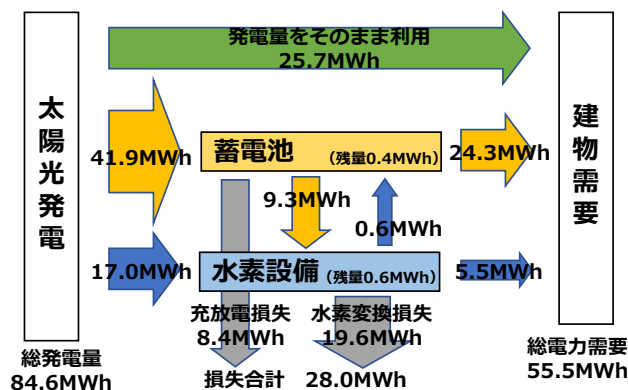


図-8 エネルギー収支 (外部受電ゼロケース)
Fig.8 Energy balance in Case 2

5.4 蓄電池・水素貯蔵の容量の組合せと外部受電削減率

次に蓄電池と水素貯蔵の容量の組合せと外部受電の削減量を試算した。容量について、蓄電池は300, 600, 900, 1200, 4200kWh、水素貯蔵は0~3000Nm³の500Nm³ごとの組合せとした。各組合せの制御パラメータは組合せごとに外部受電量を最小化するように決定した。その結果を表-4に示す。外部受電削減率は蓄エネルギー設備を導入しない場合の外部受電量(29.9MWh)を基準としており、100%は外部受電がゼロであることを意味する。

蓄電池容量300kWhにおいて、水素貯蔵容量0Nm³の削減率は87.2%であり、4~11月の期間は外部受電をゼロにできる。水素貯蔵の容量が500~3000Nm³と多くなるに従い削減率が増加しており、余剰電力を水素変換して電力需要の多い月へ電力融通した効果がみられている。

蓄電池容量600kWhにおいては、水素貯蔵容量2500Nm³の削減率は100%となる。水素設備を導入せずに削減率を100%とするには図-4で示したように蓄電池容量4200kWhが必要となる。

表-4 蓄エネルギー導入設備容量に対する外部受電量削減率
Table 4 External power reception reduction rate for energy storage capacity

外部受電量 削減率[%]	蓄電池容量[kWh]						
	300	600	900	1200	...	4200	
水素貯蔵 容量 [Nm ³]	0	87.2	89.8	90.7	91.5	...	100.0
	500	88.2	91.4	92.2	92.3	...	100.0
	1000	90.0	93.2	94.3	93.9	...	100.0
	1500	92.1	95.7	96.9	96.4	...	100.0
	2000	94.3	98.6	99.3	98.9	...	100.0
	2500	95.1	100.0	100.0	100.0	...	100.0
	3000	95.1	100.0	100.0	100.0	...	100.0

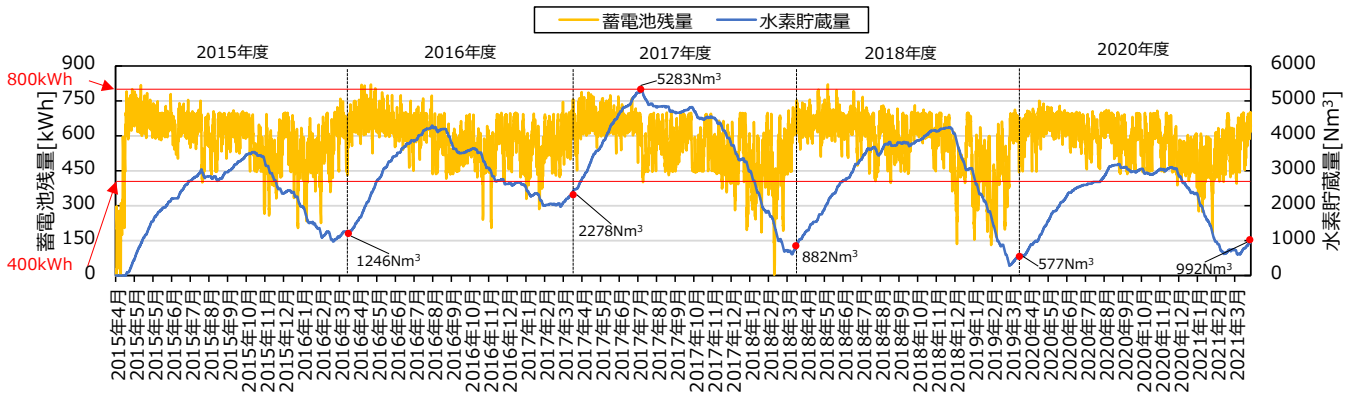


図-9 複数年度を通じた蓄電池残量及び水素貯蔵量の推移
 Fig.9 Changes in the remaining amount of battery and hydrogen storage over multiple years

6. 複数年度における蓄エネルギー容量の検討

2015～2020年度（2019年度は建物改修工事によるデータ不足のため除く）の5年間を通して外部受電をゼロとするケースを試算した。蓄電池残量と水素貯蔵量の推移を図-9に示す。この時の制御パラメータは A=450, B=550, C=700 [kWh]である。

蓄電池残量はどの年度も4～11月においておよそ400～800kWhの幅を推移し、最大残量は821kWhであった。水素貯蔵量は2017年度と2018年度の12月から2月にかけて大きく減少している。これは2017年度、2018年度の12～2月の気温が他の年度と比較して低いことに起因する。暖房需要が多くなったことにより不足電力が多く発生し、水素消費量が増加した。図内に各年度開始時（4月1日）の水素貯蔵量を示す。2017年度の開始時には2278Nm³まで水素が貯蔵されるが、2019年度の開始時には577Nm³まで減少しており、年度を超えて電力が融通されている。年度を超えた蓄エネルギーにより、複数年度で外部受電をゼロにするためには蓄電池は821kWh、水素貯蔵は5283Nm³の容量が必要であった。

7. 技術進展による蓄エネルギー容量の低減効果の検討

最後に技術進展による蓄エネルギーの必要容量の低減効果の検討を行う。想定する技術進展を表-5に示す。PV, FCの発電効率は10%の向上を想定した。蓄電池の充放電効率は90%, 水電解装置の製造効率は4.3kWh/Nm³（2030年目標値を想定）とした。電力需要は定常的に発生する電力量（ベース負荷）と執務者の

表-5 想定する技術進展ケース

Table 5 Technological progress cases

ケース	項目	現状	進展仕様
PV	発電量	—	△10%
蓄電池	充放電効率	80%	90%
水電解装置	製造効率	6.5kWh/Nm³	4.3kWh/Nm³
FC	水素消費量	3.0Nm³/h	2.7 Nm³/h
ベース負荷	電力需要	—	▼10%
活動負荷	電力需要	—	▼10%

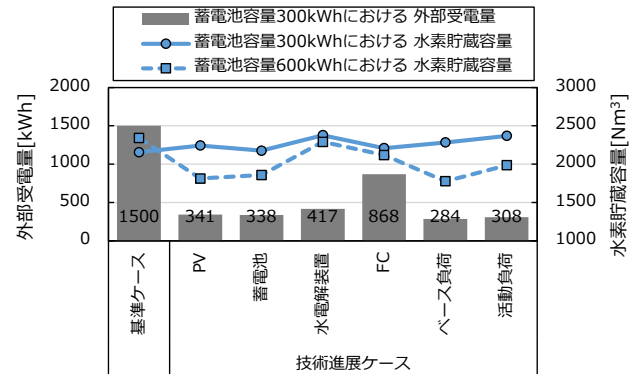


図-10 各技術進展に対するシミュレーション結果
 Fig.10 Simulation results for each technological progress cases

活動時間に発生する電力量（活動負荷）を区別し、それぞれ10%の省エネルギー化を想定した。表-1の仕様の基準ケースに対し、技術進展ケースでは対象技術のみを進展仕様とした。

各ケースに対して蓄電池容量を300kWh, 600kWhとした場合の外部受電量と最大水素貯蔵量を推計した結果を図-10に示す。蓄電池容量を600kWhとした推計では、水素貯蔵容量2500Nm³があれば外部受電をゼロとできるため（表-4を参照）、技術進展により外部受電をゼロとする必要水素貯蔵量の削減量を評価した。その結果、必要水素貯蔵量は「PV」「蓄電池」と「ベース負荷の省エネ化」のケースで300Nm³ほど減少し、必要容量の低減を確認した。「水電解装置」と「FC」の

ケースが他の技術進展ケースよりも低減の効果が少ない理由は、水素貯蔵される電力量がPVの発電量や蓄電池の充放電量よりも少ないためである。蓄電池容量を300kWhとした推計では技術進展による外部受電量の削減量を評価した。その結果、外部受電量は基準ケースと比較して「PV」「蓄電池」「水電解装置」と「省エネ化」のケースで1000kWhほど低減できた。

8. まとめ

蓄電池と水素設備を用いた蓄エネルギーシステムの検討として、時刻毎の電力の余剰/不足に対して充放電を模擬し、外部受電ゼロに必要な蓄エネルギーの容量を推計した。水素設備の稼働については蓄電池の残量が一定の閾値を下回るときにFCの稼働、上回るときに水電解装置の稼働を決定した。年間の電力需要55.5MWh、発電量84.6MWhである建物に対してシミュレーションを行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 蓄電池と水素設備を組み合わせて外部受電をゼロとするケースでは蓄電池の容量は560kWh、水素の貯蔵容量は2444Nm³が必要となった。エネルギー収支では、総発電量84.6MWhのうち70%を蓄エネルギーとして利用した。
- 2) 5年間を通して外部受電をゼロとするケースを試算した結果、年度を超えた需給調整が必要となり蓄電池は821kWh、水素貯蔵は5283Nm³の容量が必要であった。
- 3) 各設備の技術進展効果を検討した結果、蓄電池容量300kWhを導入したときの外部受電量は「PV」

「蓄電池」「水電解装置」と「省エネ化」のケースで1000kWhほど基準ケースより低減できた。

本シミュレーションは建物や施設、地域など様々な需要家単位における最適な蓄エネルギー導入容量や運用方法の計画に活用できると考える。

注

- 注1) 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター,“蓄電池システム (Vol.7) -蓄電システムの経済性の考察 (現状の効率, コストと今後の課題) -”を参考に決定(<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2019-pp-01.pdf>)
- 注2) 神鋼環境ソリューション,水電解式高純度水素(酸素)発生装置のカタログ参照 (https://www.kobelco-eco.co.jp/product/pdf/hhog/hhog_catalog.pdf)
- 注3) Panasonic,純水素燃料電池のカタログ参照 (https://panasonic.biz/appliance/FC/pdf/catalog/jun_suiso_10_08_02.pdf)

参考文献

- 1) 馬上丈司：再生可能エネルギー電気の固定価格買取制度以降の日本における太陽光発電事業の現状, 千葉大学人文社会科学研究所, 第28号, p73-85, 2014.
- 2) 経済産業省：エネルギー供給強靱化法案について, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/pdf/022_02_00.pdf, (参照 2022-07-14).
- 3) 経済産業省：水素・燃料電池戦略ロードマップ, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryoku/roadmap_hyoka_wg/pdf/001_s02_00.pdf, p.12, (参照 2022-05-13)
- 4) 熊谷智夫, 梶山隆史, 張本和芳, 市原真希, 田中拓也, 川瀬貴晴：都市型ZEBの実証・評価に関する研究 (第1報) 実証建物概要と年間エネルギー収支の試算, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第10巻, p41-44, 2015.