

# 第2報 食品工場を対象としたCO<sub>2</sub>削減効果の推定 水素エネルギー利用システムの建築物への導入シミュレーション

## Part 2 Estimation of CO<sub>2</sub> Reduction Effects in a Food Factories

### Simulation of hydrogen energy utilization system installation in buildings

今井 彩恵\*, 池 開成\*, 湯浅 和博\*\*, 垂水 弘夫\*\*\*, 北川 遼\*\*\*\*, 下田 英介\*\*\*\*

Sae Imai, Kaisei Ike, Kazuhiro Yuasa, Hiroo Tarumi, Haruka Kitagawa, Eisuke Shimoda

keywords: Hydrogen Energy, Food Factory, Simulation, CO<sub>2</sub> Emissions

水素エネルギー、食品工場、シミュレーション、CO<sub>2</sub> 排出量

### 1. はじめに

本報では食品工場のエネルギー消費実態に基づき、水素エネルギー利用システム（以下、水素システム）の導入シミュレーションを行い、生産量に応じて変化する熱需要を考慮した設備構成と運用方法を明らかにすることを目的とする。

### 2. 水素エネルギー利用システム

図1に、本報で検討する水素システムの設備構成とエネルギーフローを示す。PV 余剰電力を WE に供給して水素を製造し、MH に貯蔵する。建物の電力・熱需要に対して PV 電力が不足する場合、MH の水素を FC と HB に投入し、電力と熱を供給する。補助熱源として都市ガス利用 SB を設定した。

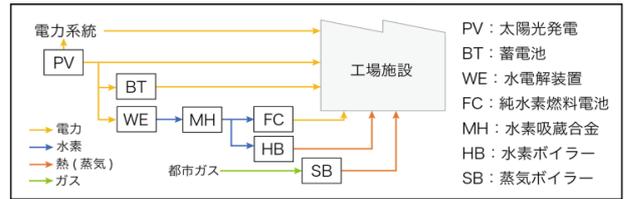


図1 水素エネルギー利用システム

表1 建物概要及び設備機器一覧

建物概要	所在地：関西エリア 建物用途：食品工場 延床面積：約7,000㎡
受変電設備	高圧 6,600V 一般動力 750kVA 一般電灯 200kVA 生産動力 750kVA × 3
空調方式	外気処理空調機 + 空冷ヒートポンプパッケージ方式 外気処理空調機用 冷熱源 空冷ヒートポンプチャージ 30HP 消費電力30kW 温熱源 蒸気ボイラーより分岐供給
蒸気設備	蒸気ボイラー 3t × 4台 (現在 2台運転) 将来1台追加
給水設備	受水槽 + 加圧給水方式 加圧給水ポンプ 4.4kW
給湯設備	局所方式 ガス給湯器 32号
排水設備	一部 ポンプアップ排水あり 約11kW
ガス設備	都市ガス 13A 引き込み 供給先 ガス給湯器、蒸気ボイラー

### 3. 食品工場のエネルギー消費量

#### 3.1 建物概要

表1に建物概要と設備機器、図2に現状エネルギーフローを示す。本工場は関西エリアに立地しており、2023年10月から2024年9月の1年間の電力・都市ガス消費量の時間変動を把握した。電力は高圧受電し一般電灯、一般動力、生産動力に分配する。都市ガスは蒸気ボイラーと給湯器に供給、蒸気は製造プロセスと暖房に利用される。

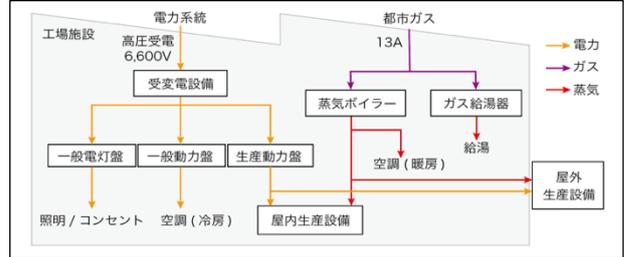


図2 現状のエネルギーフロー

#### 3.2 エネルギー消費量の変動

図3に一次エネルギー消費量の年間変動（日別）を示す。一次換算係数には電力 9.76MJ/kWh、都市ガス 45MJ/m<sup>3</sup>を用い、給湯器の都市ガス消費量は含まない。一次エネルギー消費量は冬期と夏期にピークを有し、原単位は 3266MJ/m<sup>2</sup>・年である。図4に中間期（5月）代表日の電力・熱消費量時刻変動を示す。生産のない休業日に熱消費量は生じず、電力消費量 150kWh/h が継続的に認められる。稼働日では 7-19 時において電力消費量が最大 250kWh/h、熱消費量が最大 2700MJ/h であった。

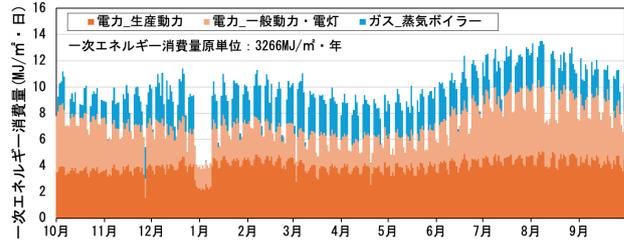


図3 一次エネルギー消費量の年間変動

#### 3.3 PV 発電量と電力・熱消費量

前章のエネルギー消費量を持つ工場への水素システム導入に向け、PV 定格出力 1000・2000・3000kW として検討する。

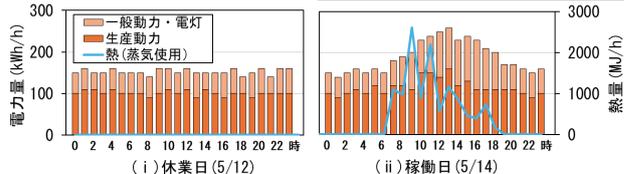


図4 中間期（5月）代表日の電力・熱消費量時刻変動

\*東京科学大学 修士課程 \*\*東京科学大学 准教授・工博 \*\*\*金沢工業大学 名誉教授・工博 \*\*\*\*清水建設株式会社

\*Graduate Student, Institute of Science Tokyo\*\*Assoc. Professor, Institute of Science Tokyo, Dr. Eng.

\*\*\* Professor Emeritus, Kanazawa Institute of Technology, Dr. Eng. \*\*\*\*Shimizu Corp.

対象建物の建築面積と敷地面積を考慮して2000kWを基準とする。電力消費量に加えて熱消費量への対応も踏まえ、HB 熱供給時に必要な水素量を製造する場合の WE 電力消費量 (以下、BPH) を考慮する。水素の発熱量 10.78MJ/Nm<sup>3</sup>を用い、BPHは式 (1) で算出した。

$$BPH \text{ (kWh)} = \frac{\text{熱消費量 (MJ)}}{10.78 \text{ (MJ/Nm}^3\text{)}} \times 5 \text{ (kWh/Nm}^3\text{)} \quad (1)$$

図5に代表月における日別の PV 発電量<sup>1)</sup>、電力消費量、BPH の関係を示す。12月の PV 発電量は小さく、3000kW の場合でも、電力消費量と BPH の合計より小さい日が多い。5月は2000kW で月の半数、3000kW では大部分の日で電力消費量と BPH の合計を上回る発電量となる。

図6に年間月別の PV 余剰電力量 (PV 発電量-電力消費量の値、BPH は考慮しない) と BPH の関係を示す。PV 定格出力が1000kWの場合、図5(ii)に示した休業日の余剰電力は生じて、月ごとに集約すると年間を通して余剰電力量は BPH より小さい。2000kW の場合は5,6,8,10月、3000kW の場合は3-10月で BPH を賄うことが可能となり、さらなる余剰電力を水素として貯蔵し11月以降に利用すれば、長期間の水素貯蔵を含むシステム運用となる。

### 3.4 PV 余剰電力量の発生頻度

図7に PV 定格出力2000kW 時の PV 余剰電力量の頻度分布を示す。PV 余剰電力量の最大値は1637kWh/h であるが、1500kWh/h を超える時間は少なく、累積相対度数は750-1000kWh/h で80%以上、500-750kWh/h で約70%になる。WE 定格出力1637kW 以上では PV 発電量の多い中間期、夏期の余剰電力を全て水素製造に利用し売電抑制が可能であるが、通年での稼働率は低下する。

## 4. 最適運用シミュレーション

### 4.1 シミュレーション概要

Pythonを用いた線形計画法に基づき、水素システムの最適運用を解く。前章のエネルギー消費量をエネルギー需要として年間時刻別シミュレーションを行い、目的関数はCO<sub>2</sub>排出量最小化とした。買電電力 E<sub>buy</sub>、都市ガス消費量 H<sub>G</sub>、CO<sub>2</sub> 排出係数<sup>2)</sup>を用いて式 (2) となる。

$$m = \sum (E_{buy} \times 0.360 + H_G \times 2.05) \quad (2)$$

表2にシステム構成機器の性能と容量の設定を示す。BT、WE、FC、MH の定格出力/容量を設定し、システムの1時間ごとの運転スケジュールを最適化する。PV を2000kW に固定し、BT と FC は3段階、WE と MH は4段階の容量を設定した。その際予備シミュレーションを行い、CO<sub>2</sub>削減率<sup>3)</sup>が50%以上となる容量設定とし、基準システムの機器容量構成を[BT:200 FC:50 WE:1000 MH:30000]とした。

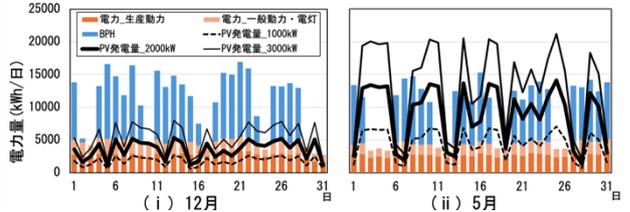


図5 PV 発電量と電力・熱消費量の関係

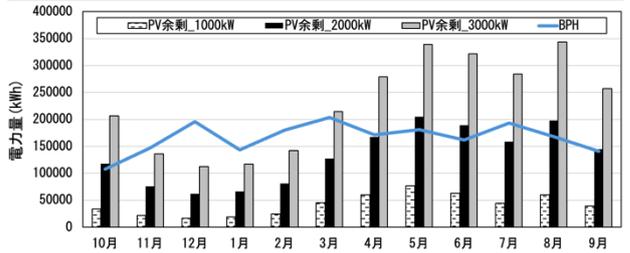


図6 年間月別の PV 余剰電力量と BPH

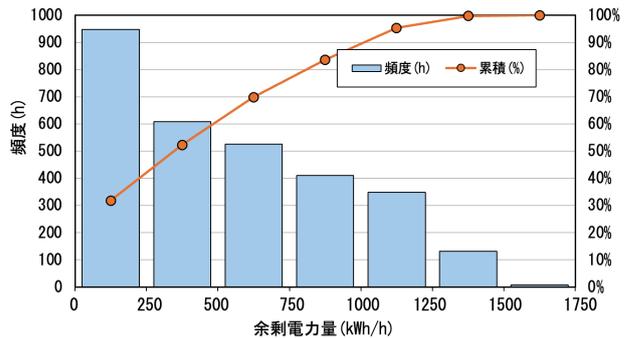


図7 PV 余剰電力量の頻度分布

表2 システム構成機器の性能と容量の設定

モジュール	出力 面積	0.34 kW/枚 1.68 m <sup>2</sup> /枚	PV
PV	変換効率 (PV/PCS)	0.20/0.99	定格出力 2000kW
	損失係数	0.87	BT
	温度係数	0.98	定格出力 100kW   容量 0,200,400 kWh
BT	充電効率	0.85	FC
	自己放電率	0.0015/h	定格出力 0,50,100 kW
WE	電解効率	0.2 Nm <sup>3</sup> /kWh	WE
FC	発電効率	1.67 kWh/Nm <sup>2</sup>	定格出力 500,1000,1500,2000 kW
HB	熱効率	0.97	MH
			容量 10000,30000,50000,70000 Nm <sup>2</sup>

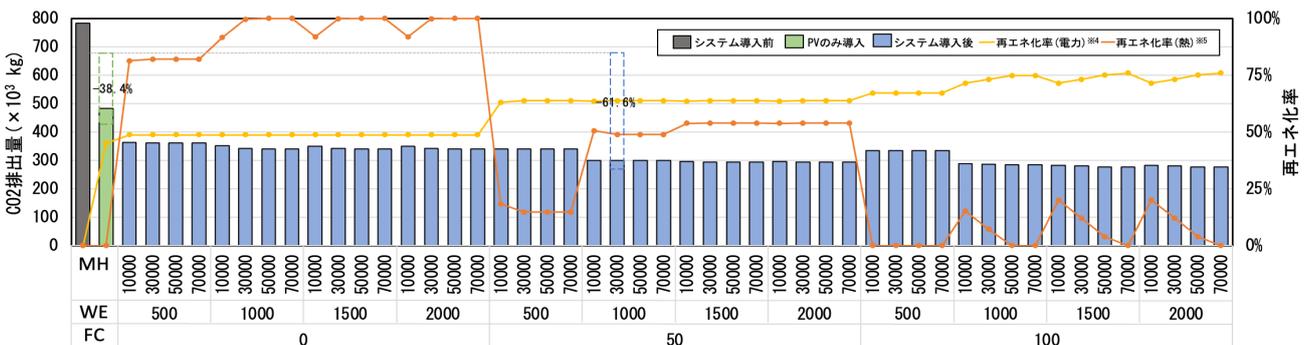


図8 システム導入前後の CO<sub>2</sub> 排出量と再エネ化率 (BT:200)

#### 4.2 CO<sub>2</sub> 排出量と再エネ化率<sup>4)5)</sup>

図8に現状（水素システム未導入）、PVのみ導入、水素システム（BT200kWh）導入時48ケースの年間CO<sub>2</sub>排出量と再エネ化率を示す。現状のCO<sub>2</sub>排出量は782.7×10<sup>3</sup>kg/年、PVのみ導入時のCO<sub>2</sub>削減率は38.4%である。基準システム導入時のCO<sub>2</sub>削減率は61.6%で、PVのみ導入時より20%以上向上する。CO<sub>2</sub>削減率が最大となったのは容量構成[BT:400 FC:100 WE:2000 MH:70000]で66.4%である。再エネ化率（電力）は機器容量増大に伴って増大するが、再エネ化率（熱）はFC定格出力の増大に伴って減少する。CO<sub>2</sub>排出量最小化のため貯蔵水素がHBよりFCに優先的に供給される運用となり、式（2）のCO<sub>2</sub>排出係数の影響である。

#### 4.3 基準システムの年間運用

基準システムの年間運用について、図9に電力需給の年間変動を示す。冬期はPV発電量が少なく電力需要中の買電比率が増加する。3月以降売電が生じるのは、PV余剰電力に対してWE定格出力が不足するためである。

図10に月別水素製造量、FC/HBへの利用量、MH貯蔵量の年間変動を示す。8-10月に水素製造量が利用量を上回り、貯蔵水素を11-2月に利用するシーズンシフトが確認された。MH容量30000Nm<sup>3</sup>に対し最大貯蔵量が14053Nm<sup>3</sup>と小さいのは、年間を通してFC稼働率が高く水素が短期間で消費されるためである。

#### 4.4 電力CO<sub>2</sub>排出係数による運用方法の変化

表3に水素1Nm<sup>3</sup>をFC/HBに利用した場合のCO<sub>2</sub>排出削減量を示す。電力CO<sub>2</sub>排出係数が0.360kg-CO<sub>2</sub>/kWhではFC利用の削減量が大きい。0.332ではFCとHB利用の削減量は同じとなる。以下、グリーン電力購入等を想定し、電力CO<sub>2</sub>排出係数を0.330とした試算を行った。

表4は基準システムの電力CO<sub>2</sub>排出係数の違いによる結果の比較である。HBへの水素優先供給により、排出係数0.360→0.330で再エネ化率（熱）は48.9→99.6%と増大、再エネ化率（電力）は63.9→52.5%と減少した。

図11に排出係数0.330における月別水素製造量、FC/HB利用量、MH貯蔵量の年間変動を示す。8-10月貯蔵、11-3月消費のシーズンシフトがより顕著となった。0.330ではHB優先供給となり、11月には冬期の熱需要に備えてMH定格容量30000Nm<sup>3</sup>の貯蔵が発生した。

### 5. 生産量に伴う熱需要増大の影響

#### 5.1 基準システムの運用比較

対象工場では図3、図4の通り、生産動力は年間を通して安定しているが、生産量に応じて熱需要は変化する。以下、6-8月と11-1月の熱需要を1.5倍、2倍とした試算を行った。

図12に標準時と増大時の熱需要年間変動、表5に基準システムの最適運用結果、図13にMH貯蔵量年間変動の比較を示す。買電量と売電量は標準時と同じであるが、都市ガス使用量増大のため、CO<sub>2</sub>削減率は標準時61.6%から1.5倍で59.5%、2倍で57.4%に減少した。

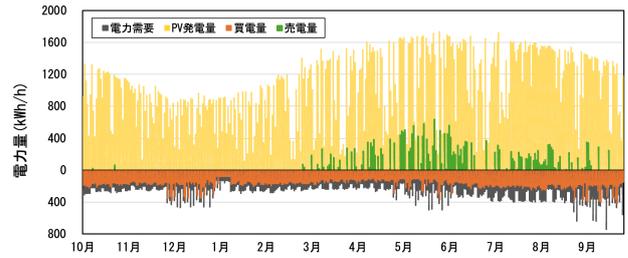


図9 電力需給の年間変動

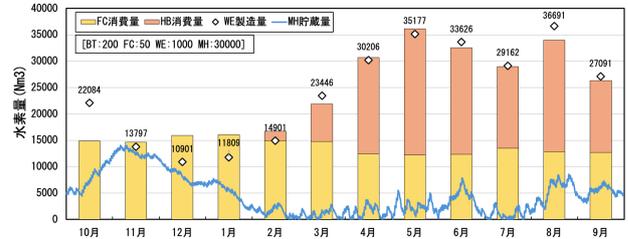


図10 水素製造/利用量とMH貯蔵量の年間変動  
(電力CO<sub>2</sub>排出係数0.360)

表3 水素1Nm<sup>3</sup>の利用により削減可能なCO<sub>2</sub>排出量

水素1Nm <sup>3</sup>	削減可能な買電電力/都市ガス量	電力/ガスCO <sub>2</sub> 排出係数	CO <sub>2</sub> 排出削減量(kg)
FC投入	1.667 kWh	0.360 kg-CO <sub>2</sub> /kWh	0.6000
HB投入	0.27 Nm <sup>3</sup>	2.05 kg-CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	0.5535

※電力CO<sub>2</sub>排出係数が0.5535/1.667≒0.000332以下の場合、FC投入によるCO<sub>2</sub>排出削減量がHB投入によるCO<sub>2</sub>排出削減量を下回る

表4 システム導入後の諸量

排出係数	CO <sub>2</sub> 削減率(%)	再エネ化率(%)		買電量(kWh)	売電量(kWh)	都市ガス使用量(Nm <sup>3</sup> )
		電力	熱			
0.360	61.6	63.9	48.9	669130	64290	28960
0.330	60.2	52.5	99.6	879538	64290	215

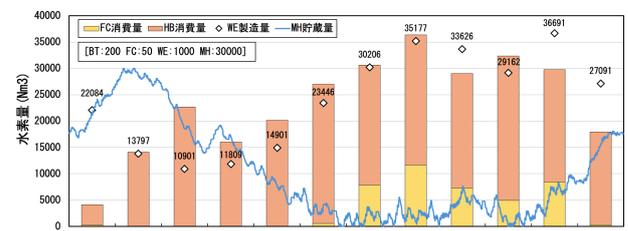


図11 水素製造/利用量とMH貯蔵量の年間変動

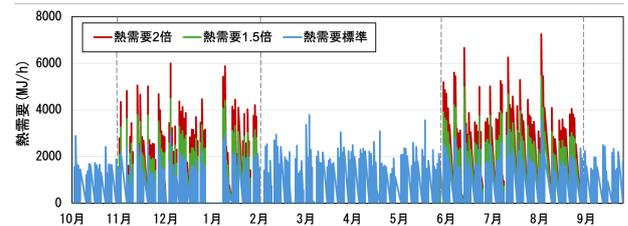


図12 熱需要の年間変動（標準/増大）

表5 熱需要増大時の諸量

熱需要	CO <sub>2</sub> 削減率(%)	再エネ化率(%)		買電量(kWh)	売電量(kWh)	都市ガス使用量(Nm <sup>3</sup> )
		電力	熱			
1.5倍	59.5	63.9	39.1	669130	64290	43001
2倍	57.4	63.9	32.7	669130	64290	57044

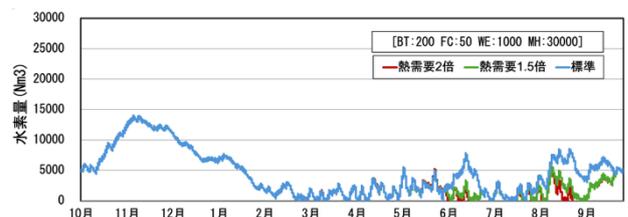


図13 熱需要増大時のMH貯蔵量

## 5.2 FC を含まない水素システムの運用比較

熱需要に対する水素の代替性を明確にするため、基準システムから FC を除いた容量構成[BT:200 FC:0 WE:1000 MH:30000]を検討した。図 14 に標準時の電力需給、図 15 に水素製造量、FC/HB 利用量、MH 貯蔵量を示す。水素利用が HB に限定され、図 9 と比べて 3-9 月の売電量は増加する。

熱需要増大時の最適運用結果を表 6 に示す。熱需要増大に伴い、売電量は減少し都市ガス消費量は増大する。再エネ化率(熱)は 1.5 倍で 91.2%、2 倍で 77.6%に減少するが、CO<sub>2</sub>削減率の変化は小さい。図 16 に MH 貯蔵量の年間変動の比較を示す。標準では 8-10 月貯蔵/11-3 月消費のシーズンシフトが確認された。熱需要増大により水素消費が早まり、4-5 月貯蔵/6-7 月消費のシーズンシフトも発生し、中間期→冬期と中間期→夏期の年 2 回のシーズンシフトを伴う運用となる。

## 6. 水素貯蔵時間

4 章のシミュレーションにより得られた基準システムの時刻別水素製造量および利用量を基に、各時刻における MH 内の水素について、経過時間ごとの貯蔵量を算出した。なお、水素の消費にあたっては、より新しく製造されたものから優先的に利用するものとする。

図 17 に、電力 CO<sub>2</sub> 排出係数 0.360 及び 0.330 における水素貯蔵時間/貯蔵量の年間変動を示す。いずれの場合にも、特定の経過時間を有する水素の貯蔵量が横ばいとなる期間が見られた。これは水素の製造量が利用量を上回り、比較的新しく製造された水素を優先的に消費した結果、古い層の水素が使用されずに残存し続けたことによるものである。

排出係数 0.330 の場合、最も長時間貯蔵されていた水素は 3 月 27 日 7:00 時点で確認され、その貯蔵時間は 5877 時間(約 8 か月)であった。エネルギーの長期貯蔵において、時間経過に伴う水素の損失がほとんど生じない水素吸蔵合金の有効性が示唆される結果となった。

## 7. まとめ

- 1) 対象建物の現状の電力・熱消費量と PV 発電量(定格出力 1000kW/2000kW/3000kW)との関係を明らかにした。
- 2) 対象工場の CO<sub>2</sub> 排出量は PV 導入により 38.4%削減されるが、水素システム[BT:200 FC:50 WE:1000 MH:30000]導入により 61.6%削減まで向上する。
- 3) 電力 CO<sub>2</sub> 排出係数の低下により水素の優先供給先が FC から HB へ切り替わり、再エネ化率(熱)が増大、再エネ化率(電力)が減少することが示された。
- 4) FC を含まない構成、熱需要増大時に中間期→冬期と中間期→夏期の年 2 回の水素利用のシーズンシフトが確認された。
- 5) 水素貯蔵時間の分析により、水素吸蔵合金の特性を活かしたエネルギー長期貯蔵手段としての水素の有効性が示された。

### [謝辞]

本研究は清水建設株式会社との共同研究の成果であり、ここに記して感謝の意を表します。また、各種データをご提供いただきました食品工場の皆様に厚く御礼申し上げます。

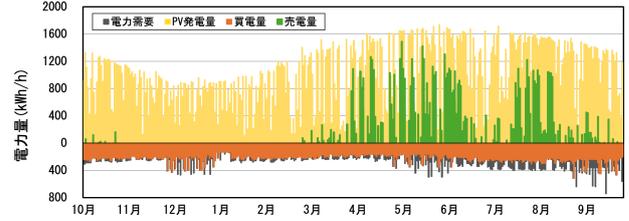


図 14 電力需給の年間変動 (FC なし)



図 15 水素製造/利用量と MH 貯蔵量の年間変動 (FC なし)

表 6 熱需要増大時の諸量 (FC なし)

熱需要	CO <sub>2</sub> 削減率 (%)	再エネ化率 (%)		買電量 (kWh)	売電量 (kWh)	都市ガス使用量 (Nm3)
		電力	熱			
標準	56.3	48.8	99.6	948038	269793	215
1.5 倍	56.4	48.8	91.2	948038	92531	6186
2 倍	54.8	48.8	77.6	948038	64290	18942

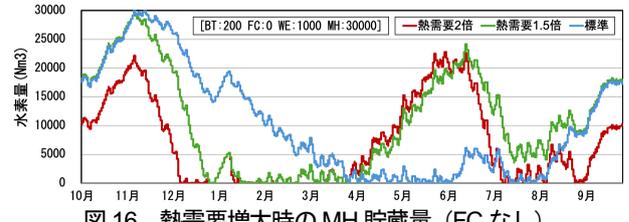
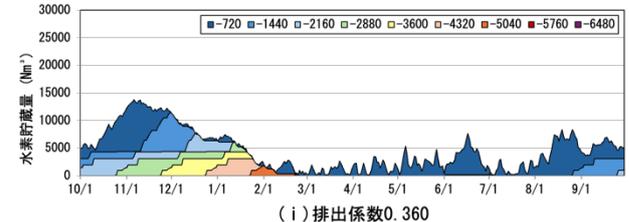
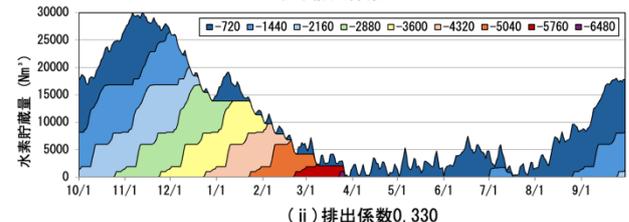


図 16 熱需要増大時の MH 貯蔵量 (FC なし)



(i) 排出係数 0.360



(ii) 排出係数 0.330

図 17 水素貯蔵時間の年間変動 (電力 CO<sub>2</sub> 排出係数 0.360/0.330)

### [注釈]

- 1) PV 発電量(kWh) = 日射量(MJ/m<sup>2</sup>) × パネル総面積(m<sup>2</sup>) × 変換効率 × 温度係数 × 損失係数 3.6
- 2) CO<sub>2</sub> 排出係数 電力: 0.360kg-CO<sub>2</sub>/kWh、ガス: 2.05kg-CO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup>
- 3) 建物の電力・熱需要を全て買電電力/都市ガスで供給する際の CO<sub>2</sub> 排出量を 100%とする
- 4) 電力需要のうち PV 発電電力(直接利用/BT 放電/FC 発電)が占める割合
- 5) 熱需要のうち HB による供給熱量が占める割合

### [参考文献]

- 1) 気象庁 Web 「地域気象観測システム(アメダス): 日射量」
- 2) 日本機械学会 「蒸気表(1999 年)」
- 3) 環境省 Web 「温室効果ガス排出量: 排出係数一覧」
- 4) 下田ら(2018), 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, 清水建設研究報告, 第 96 号.
- 5) 瀬川ら(2021), 再エネ余剰電力を有効活用する水素利用システム「Hydro Q-Bic®」の実証と商品化, 清水建設研究報告, 第 99 号.