

建築設備を活用した電力需給調整に関する研究 ～貯湯槽を有する給湯システムの利用可能性評価～

(株)四国総合研究所 土木技術部 藤井 良平
四国電力(株) 土木建築部 天野 雄一郎

キーワード： デマンドレスポンス
建築設備
給湯設備
貯湯槽

Key Words : Demand response
Building services
Hot water supply system
Hot water storage tank

**Study on adjustment of electricity supply and demand by building services
- Assessment of the availability of storage type hot water supply system as a DR resource -**

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Ryohei Fujii

Shikoku Electric Power Co., Inc., Civil & Architectural Department

Yuichiro Amano

Abstract

Demand Response (DR) is a concept that changes the pattern of consumer demand for electricity, depending on supply. It is expected to play a role in the further expansion of renewable energies and the stabilization of electricity supply and demand. Batteries and generator equipment are considered the most important resources, but we think that building services can be used.

This paper focus on the evaluation of availability of hot water supply system as a DR resource, including an actual measurement result of hot water supply demand and heat loss.

1. はじめに

東日本大震災に伴う電力需給のひっ迫を契機とし、国策として再生可能エネルギーの普及・拡大が推進された。2012年7月から始まった「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法（FIT法）」の経済的インセンティブ付与もあり、再生可能エネルギーは急速な普及・拡大を見せた。しかし、代表的な再生可能エネルギーである太陽光・風力は出力が天候に左右され、供給量が制御しづらいという性質を有しており、導入量が増えるにつれ、電力需給上の大きな課題として顕在化するようになった。

このような背景から、従来所与のものとして考えられていた電力需要を供給事情に合わせて調整するデマンドレスポンス（以下DR）の概念が登場し、一般送配電事業者が公募する電源I'（厳気象対応調整力）や容量市場（発動指令電源）において下げDR（需要抑制）が調整力として扱われるようになった。

また、近年のカーボンニュートラル化を背景とした諸制度においてもDRが重要な施策として位置付けられ、例えば改正省エネ法（2023年4月施行）では、「電気の需要の最適化」として大規模需要家のDRの取り組みについて実施回数が評価される他、再エネ出力制御や需給ひっ迫など需給状況に応じて1次エネルギー使用量換算係数が調整されるなど、DRを促進する制度設計が進められている¹⁾。

DRの代表的な手法としては蓄電池設備・自家発電設備の稼働を調整することが挙げられるが、本研究では空調設備・給湯設備といった建築設備をDRに用いる可能性に着目している^{2,3)}。かつて電力負荷平準化・夜間電力の活用を目的として普及が進んだ蓄熱式空調システムは、蓄熱槽がバッファとなり熱需要と熱供給の発生タイミングを一致させなくてもよいという性質を有していることから、DRとの親和性が高いと考えられる。貯湯槽を有する給湯システムについても同様のことがいえる（図1）。

本報では、実際の建物を題材として、貯湯槽を有する給湯システムのDRリソースとしての利用可能性の評価や、DRを可能とする運用方法について検討した結果について述べる。

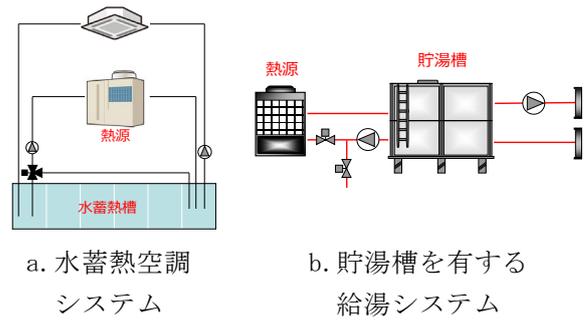


図1 本研究で対象とする建築設備

2. 検討概要

貯湯槽を有する給湯システムが採用された温浴施設を題材とし、給湯システムの運用によってDRに対応できるかどうかを評価する。稼働中の施設における実証実験が困難であったため、シミュレーションによる検討を行うこととした。

DRへの利用可能性を評価するには、電力消費量の発生パターンを変化させられることに加え、給湯負荷（湯の使用量）に対して湯切れを生じさせないこと、循環配管等から生じる損失熱量に対して貯湯槽の温度（条例により一般に60℃）を維持することなど、制約条件を満たしているかを考慮する必要がある。シミュレーション検討に先立って、実測調査により給湯負荷や損失熱量の定量化を図り、計算に用いることとした。

3. 実測調査

3.1 対象建物

徳島県に位置する日帰り温浴施設のうち、浴室のシャワーやレストランの厨房、トイレの手洗い等（以下、シャワー他系統）に湯を供給する給湯システム（図2）を対象とする。主要な機器の仕様は表1に示す通りである。給湯機は給湯運転と保温運転の2つの運転パターンで動作する。前者では上水を加熱し貯湯槽に供給するため、貯湯槽の残湯量が増加するが、後者では貯湯槽内の湯を昇温するだけで残湯量には変化が生じない。

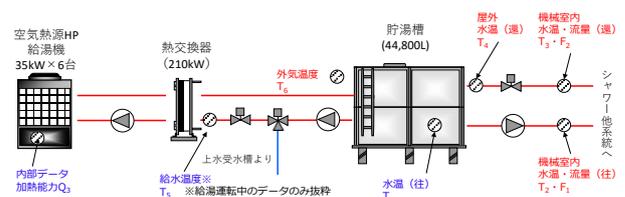


図2 対象とする給湯システムと計測点

表 1 主要機器仕様

項目	仕様
給湯機	空気熱源ヒートポンプ給湯機 6台
	冬期貯湯加熱能力 35.0kW/台
	冬期貯湯消費電力 10.7kW/台
	冬期保温加熱能力 13.0kW/台
冬期保温消費電力 5.0kW/台	
熱交換器	プレート式、向流型、交換熱量 200kW
貯湯槽	開放型 FRP パネル貯湯槽
	容量 44,800L ポリスチレンフォーム 50mm 保温

3.2 調査結果

(1) 給湯負荷

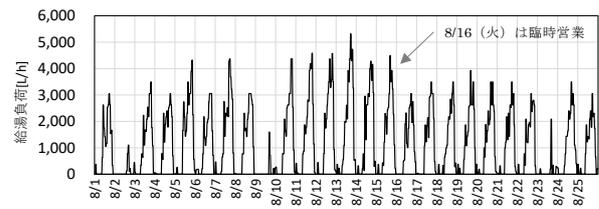
給湯システムのコントローラでは、各部の温度や流量、貯湯槽の水位など運転管理のため様々なデータが集積されている。これを利用し、シャワー他系統の給湯負荷を分析した。一例として2022年8月、12月の給湯負荷実測値を図3に示す。週に1日、給湯負荷が極端に小さい日が出現しているのは、毎週火曜日が温浴施設の定休日になっているためである。施設の利用者の入浴スケジュールが給湯負荷の変動に影響していると考えられ、概ね17時～20時に給湯負荷がピークを迎える日が多い。得られた給湯負荷の時系列データはシミュレーションの与条件として利用する。

(2) 損失熱量

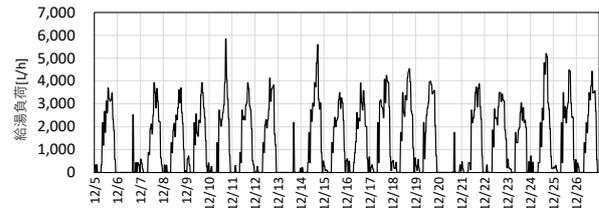
湯の循環に伴って生じる損失熱量の定量化を試みる。実測調査は2022年11月29日から2023年1月28日にかけて行い、既設の計測点を補う形で計測点を充実させ、コントローラから直接的にデータが得られる給湯機の生成熱量 (Q_3) 以外は式1～6により算出する。 Q_5 は貯湯槽からの損失熱量、給湯機と熱交換器およびその間の配管からの損失熱量の和であるが、今回の計測では両者を区分し個別に把握することが困難であったため両者の和を Q_5 として扱い、期間積算値により評価を行った。

(a) 往流量 F_1 、還流量 F_2

往流量 F_1 、還流量 F_2 の日積算値を図4に示す。 F_1 は日によって比較の変動が大きく、後述の使用熱量 Q_2 と似た傾向を示した。 F_2 が大きい日はいずれも温浴施設の定休日であるが、 $F_1 < F_2$ となること



a. 2022年8月1日～25日



b. 2022年12月5日～26日

図 3 給湯負荷実測値

$$Q_1 = Q_{1i} + Q_{1o} \quad \text{式 1}$$

$$Q_{1i} = (T_2 - T_3) \times F_2 \times \rho c \quad \text{式 2}$$

$$Q_{1o} = \{(T_1 - T_2) \times F_1 + (T_3 - T_4) \times F_2\} \times \rho c \quad \text{式 3}$$

$$Q_2 = T_2 \times (F_1 - F_2) \times \rho c \quad \text{式 4}$$

$$Q_4 = T_5 \times V \times \rho c \quad \text{式 5}$$

$$Q_5 = Q_3 + Q_4 - Q_1 - Q_2 \quad \text{式 6}$$

ここに、

Q_1 : 貯湯槽を含まない負荷側の損失熱量[kW]

Q_{1i} : Q_1 のうち建物内での損失熱量[kW]

Q_{1o} : Q_1 のうち屋外での損失熱量[kW]

Q_2 : シャワー他系統での使用熱量[kW]

Q_3 : 給湯機の生成熱量[kW]

Q_4 : 補給される上水が 0°C 基準で有する熱量[kW]

Q_5 : 貯湯槽を含む熱源側の損失熱量[kW]

T_1 : 貯湯槽温度[°C], T_2 : 機械室内往温度[°C], T_3 : 機械室内還温度[°C], T_4 : 屋外還温度[°C], T_5 : 給水温度[°C]

F_1 : 往流量[L/min] F_2 : 還流量[L/min]

ρ : 水の密度[kg/m³], c : 水の比熱[kJ/kg°C], V : 補給水量

[L/min]

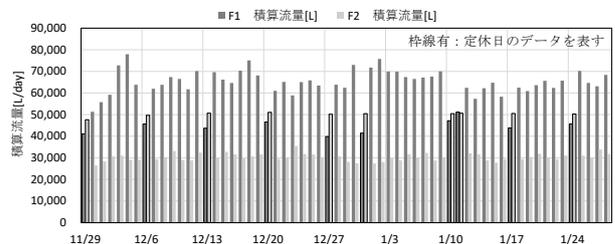


図 4 F_1 、 F_2 日積算値

から、混合栓等から上水が給湯系統に混入していることが疑われる。

(b) 貯湯槽を含まない負荷側の損失熱量 Q_1

Q_1 を Q_{1i} 、 Q_{1o} に分け、日平均外気温とともに日積算値を集約した結果を図5に示す。定休日の Q_{1i} が大きく算出されているのは、図4で示したように定休日の F_2 が大きいためである。定休日を除外し Q_{1i} 、 Q_{1o} と日平均外気温の相関を確認した結果を図6に示す。いずれも日平均外気温が高いほど損失熱量が小さくなるという傾向が見られ、屋外の損失熱量である Q_{1o} が外気温とより強い相関を示したのは妥当な結果であるといえる。

(c) シャワー他系統での使用熱量 Q_2

Q_2 を日単位で積算した結果を図7に示す。外気温との相関は特に見られなかった。 Q_2 が極小、または負となっているのはすべて定休日であり、 $F_1 < F_2$ となることが原因である。

(d) 全体の熱収支

計測期間全体の給湯機の生成熱量 (Q_3)、補給される上水の保有熱量 (Q_4) の和に対し、シャワー他系統で使用される熱量 (Q_2) は65%、負荷側での損失熱量 (Q_1) は23%、貯湯槽を含む熱源側での損失熱量 (Q_5) は12%という割合となった(図8)。

(e) 損失熱量推定式

シミュレーション上で損失熱量を妥当に扱うことを目的として、実測値あるいは計算値が得られるものを説明変数とした回帰式により、損失熱量の推定を試みる。ここまでの分析により定休日と営業日で損失熱量の傾向に差があることがわかっているが、営業日でも営業時間帯(10:00~21:00)か否かで Q_1 の傾向が大きく異なることが確認されたため、表2の通りに時間帯を3区分し Q_{1i} 、 Q_{1o} それぞれに q と ΔT の2つを説明変数として重回帰分析により推定式を作成した。推定式による Q_1 の推定値と実測値を比較した結果を図9に示す。一部範囲で誤差が大きいのが、概ね精度よく再現できており、全データ ($n=87,840$) のRMSEは11.48であった。

貯湯槽を含む熱源側での損失熱量 Q_5 については、厳密には Q_1 と発生タイミングが異なると考えられるが、便宜的に Q_1 と Q_5 の期間積算値の比率から Q_1 に定率(12/23)を乗じて設定することとし、 Q_1 、 Q_5 の和を給湯システム全体の損失熱量として計算に組み込む。

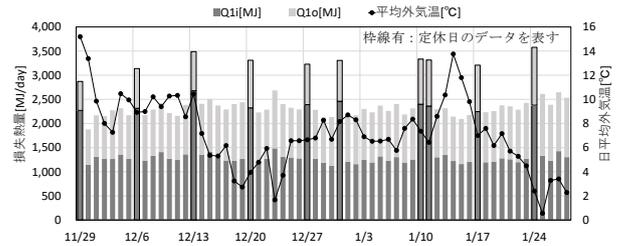


図5 Q_1 日積算値と日平均外気温

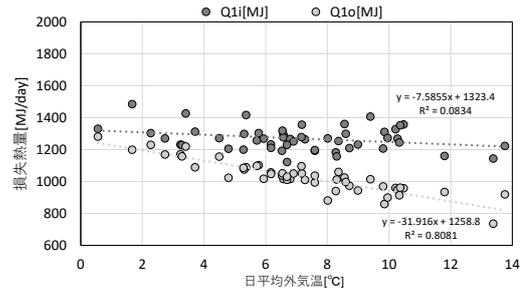


図6 Q_{1i} 、 Q_{1o} 日積算値と日平均外気温の比較

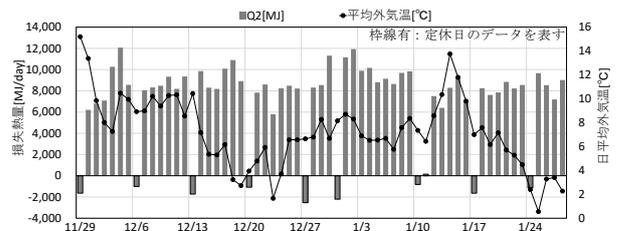


図7 Q_2 日積算値と日平均外気温

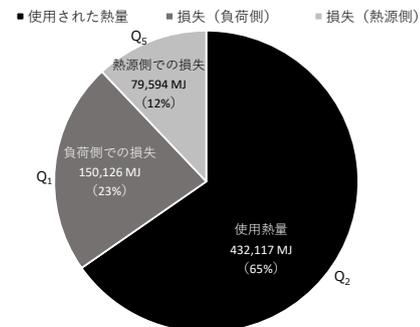


図8 Q_1 、 Q_2 、 Q_5 の比率

表2 時間帯区分と損失熱量推定式

時間帯	推定式
営業日	$Q_{1i} = 0$ ($F_2=0$ の時間帯が多いため) 式7
10-21	$Q_{1o} = -8.313 + 0.086 \times q + 0.286 \times \Delta T$ 式8
営業日	$Q_{1i} = 22.213 + 0.119 \times q + 0.027 \times \Delta T$ 式9
21-10	$Q_{1o} = -17.014 + 0.132 \times q + 0.545 \times \Delta T$ 式10
定休日	$Q_{1i} = 26.486 - 0.195 \times q - 0.005 \times \Delta T$ 式11
	$Q_{1o} = -16.226 + 0.094 \times q + 0.499 \times \Delta T$ 式12

ここに、 q :給湯負荷[L/min]、 ΔT :貯湯槽と外気の温度差[°C]

4 シミュレーション検討

4.1 機器のモデル化

(1) 給湯機

空気を熱源としたヒートポンプ機器は一般に外気温が高くなるほど効率が上昇し、温水の出口温度が高くなるほど効率が低下するという特性を有する。外気温や水温等を説明変数とした多項式によりこのような特性を表現したシミュレーションツールの例として LCEM ツール⁴⁾が挙げられる。

LCEM ツールの空調用空気熱源ヒートポンプの機器特性に関する多項式をベースとし、実測データを用いて係数を調整することで、給湯機の特性を再現する多項式を運転種別ごとに作成した。COP（給湯機の効率を表す指標、加熱能力を消費電力で除して算出する）の推定精度を図 10 に示す。

実測データの分析結果を踏まえ、給湯機の加熱能力は給湯運転中には外気温に応じて 35kW、37kW、40kW のいずれか、保温運転中には 13kW で安定するものとし、加熱能力を COP で除して消費電力を計算する。

(2) 熱交換器

熱交換器の伝熱に関する基礎式を式 13 に示す。熱交換器出入口温度、給湯機流量の実測データを基に、熱交換器の特性を表す伝熱係数 KA を求めた結果、31,596 と同定された。計算上は給湯機の加熱能力が熱交換器での交換熱量に一致するものとし、貯湯槽側流量は給湯運転時には出湯温度設定により変流量、保温運転時には 4,500L/h で一定とした。貯湯槽側入口温度は給湯運転時には上水温度、保温運転時には貯湯槽温度になるものとし、交換熱量および流量、伝熱係数から残り 3 点の温度を計算する。

(3) 貯湯槽

1 質点モデルとして水量収支およびエネルギー収支から残湯量、貯湯槽温度の計算を行う。

4.2 計算フロー

計算間隔は 30 分とし、時刻ごとの給湯機制御設定値（給湯開始/終了水量、保温開始/終了水温）と貯湯槽残湯量、水温の関係に基づき給湯機の運転を決定し、電力消費量を計算する。貯湯槽については、給湯機の運転と給湯負荷、損失熱量から次時刻の貯湯槽残湯量、水温を計算する。これらを繰り返し、時系列の計算を行う。

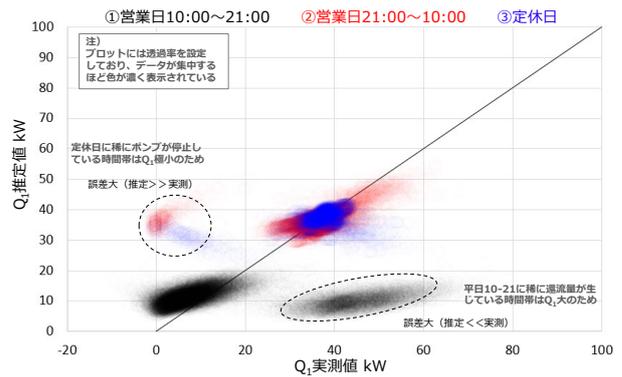


図 9 損失熱量推定式による Q₁ 推定精度

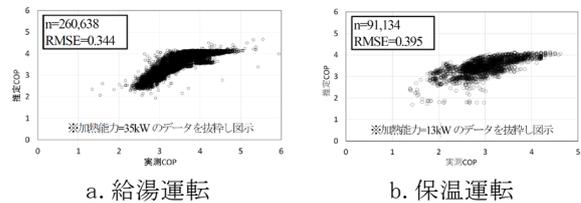


図 10 給湯機 COP 推定精度

$$Q = K \times A \times \Delta T_{LMTD} \quad \text{式 13}$$

ここに、Q: 交換熱量[W], K: 熱通過率[W/m²K], A: 伝熱面積[m²], ΔT_{LMTD} : 対数平均温度差[K]

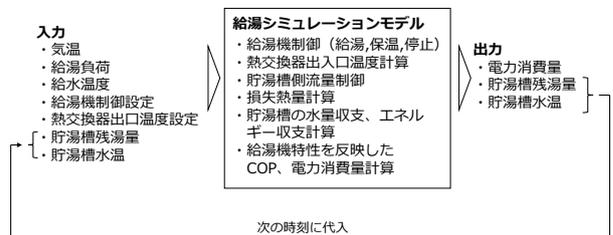


図 11 計算フロー

4.3 DR を想定した運用

電力需給ひっ迫時に電力需要を低減させる「下げ DR」を対象として、DR の 3 時間前に指令を受けてから、貯湯槽温度の維持や湯切れ防止といった制約条件を満たしつつ 3 時間連続の下げ DR を成立させられるかを検討する。

計算は 30 分間隔で行い、High 4 of 5（当日調整あり）により設定されたベースライン⁵⁾に対して DR 時間帯に低減できた消費電力（以下、DR 量）を DR 成否の評価指標とする。

(1) 冬期の下げ DR を想定した検討

12 月 5 日～12 月 26 日を計算期間とし、下げ DR の時間帯は過去の四国エリアの電力需給データ⁶⁾

表3 計算期間とDR日の設定（冬期）

月	火	水	木	金	土	日
12/5	12/6	12/7	12/8	12/9	12/10	12/11
12/12	12/13	12/14 ^{*1}	12/15	12/16	12/17	12/18
12/19 ^{*2}	12/20 ^{*3}	12/21	12/22	12/23	12/24	12/25
12/26 ^{*3}	下げDRの時間帯 *1:17:00～20:00 *2:16:00～19:00 *3:9:00～12:00					

から冬期に予備率が低くなりやすい、すなわち需給ひっ迫が生じやすい時間帯を確認したうえで複数パターンの設定を行うことを意図して計4回の下げDRを設定した（表3）。

通常日の日中（9:00～20:00）に給湯機が稼働していなければ、DR実施日に給湯機を停止できたとしても下げDRが成立しない。そのため、通常日は主に日中に貯湯を行う設定とした（表4）。給湯負荷（図3a）や外気温は実測値を入力条件とし、計算開始時の初期条件は残湯量 40,000L、貯湯槽温度 60℃とした。

期間中設定した計4回の下げDRについて、DR量の計算結果を図12に示す。DR対象の時間帯のほとんどで給湯機を停止させられ、電力消費量が生じていないことがわかる。12月20日の10:30～12:00は保温運転を行わざるを得ず、他と比べてDR量が低下した。24コマの平均値は107.8kW、最低値は79.8kWであった。ベースラインが若干変動しているのは外気温による給湯機のCOP変動が計算に含まれているためである。残湯量・貯湯槽温度の計算結果は図13に示す通りで、湯切れを生じさせず、貯湯槽温度を60℃以上に維持できていることがわかる。

(2) 夏期の下げDRを想定した検討

8月1日～8月25日を計算期間とし、この間6回の下げDRが生じるものとして設定した（表5）。下げDRの時間帯は過去の四国エリアの電力需給データ⁶⁾を参照し、前項と同様に需給ひっ迫が生じやすい時間帯を確認したうえで複数パターンの設定を行うことを意図した。冬期と比べ午前中の給湯負荷が少ない日が多く、午前中の給湯運転が行われにくいと考えられたため、前項での給湯機の運用設定（表4）から、通常日9:00～20:00に貯湯運転を開始する残湯量を90%に変更することとした（表6）。給湯負荷（図3b）や外気温は実測値を入力条件とし、計算開始時の初期条件は残湯量 40,000L、貯湯槽温度 60℃とした。

期間中設定した計6回の下げDRについて、DR

表4 運用方法についての設定（冬期）

区分	運用方法
通常日	<ul style="list-style-type: none"> 9:00～20:00 残湯量 80%未満で貯湯運転開始 貯湯槽入口 80℃設定 20:00～9:00 残湯量 40%未満で貯湯運転開始 60%回復で停止 貯湯槽温度 60℃未満で保温運転開始、63℃到達で停止
定休日	<ul style="list-style-type: none"> 前日 22:00～22:00 残湯量 40%未満で貯湯運転開始、60%回復で停止 貯湯槽温度 60℃未満で保温運転開始、63℃到達で停止
DR日	<ul style="list-style-type: none"> DR3h前に貯湯運転開始 貯湯槽容量100%で停止、満水の場合保温運転に切替 DR時間帯は残湯量 20%未満で貯湯運転開始 その他の時間帯は通常日および定休日の設定を適用

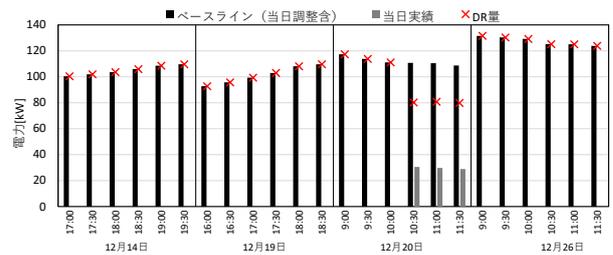


図12 DR量の評価結果（冬期）

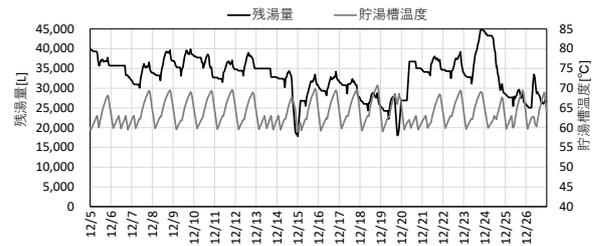


図13 残湯量・貯湯槽温度計算結果（冬期）

表5 計算期間とDR日の設定（夏期）

月	火	水	木	金	土	日
8/1	8/2	8/3	8/4	8/5	8/6	8/7
8/8 ^{*1}	8/9 ^{*1}	8/10	8/11	8/12	8/13	8/14
8/15 ^{*2}	8/16 ^{*2}	8/17	8/18	8/19	8/20	8/21
8/22	8/23 ^{*1}	8/24	8/25 ^{*2}			

下げDRの時間帯 *1: 9:00～12:00 *2: 17:00～20:00

表6 運用方法についての設定（夏期）

区分	運用方法
通常日	<ul style="list-style-type: none"> 9:00～20:00 残湯量 90%未満で貯湯運転開始、貯湯槽入口 80℃設定 20:00～9:00 残湯量 40%未満で貯湯運転開始、60%回復で停止 貯湯槽温度 60℃未満で保温運転開始、63℃到達で停止
定休日	<ul style="list-style-type: none"> 前日 22:00～22:00 残湯量 40%未満で貯湯運転開始、60%回復で停止 貯湯槽温度 60℃未満で保温運転開始、63℃到達で停止
DR日	<ul style="list-style-type: none"> DR3h前に貯湯運転開始 貯湯槽容量100%で停止、満水の場合保温運転に切替 DR時間帯は残湯量 20%未満で貯湯運転開始 その他の時間帯は通常日および定休日の設定を適用

量の計算結果を図 14 に示す。DR 対象の時間帯のほとんどで給湯機を停止させられ、電力消費量が生じていないことがわかる。給湯機が稼働した 8 月 9 日、23 日はいずれも貯湯槽温度が 60℃を下回り保温運転が行われていた。外気温の差により夏期の方が COP が高い分、冬期と比べ給湯機の消費電力が減少したため DR 量も減少し、36 コマの平均値は 68.2kW、最低値は 50.6kW であった。残湯量・貯湯槽温度の計算結果は図 15 に示す通りで、湯切れを生じさせず、貯湯槽温度を 60℃以上に維持できていることがわかる。

5. まとめ

本報では、主にシミュレーションにより貯湯槽を有する給湯システムを下げ DR に用いる可能性を評価した。冬期・夏期の下げ DR への適用を想定した検討では湯切れ防止、貯湯槽温度の維持といった制約条件を満たしたうえで一定の DR 量を抛出できるという結果が得られた。

[謝辞]

本研究は、四国電力㈱土木建築部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：「改正省エネ法におけるディマンドリスポンス（電気の需要の最適化）の促進について」, 2022.11
- 2) 福庭彬大, 住吉大輔, 天野雄一郎, 藤井良平：「建築設備を活用した電力需給調整に関する研究（その 6）水蓄熱槽を利用した電力需給調整の手法検討と広域ポテンシャルに関する研究」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2022.9
- 3) 藤井良平, 天野雄一郎, 赤井仁志, 猪俣海斗：「建築設備を活用した電力需給調整に関する研究（その 7）給湯システムを活用した需給調整に関するケーススタディ」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2022.9
- 4) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：「ライフサイクルエネルギーマネジメント（LCEM）」, https://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku_lcem_lcem.html



図 14 DR 量の評価結果（夏期）

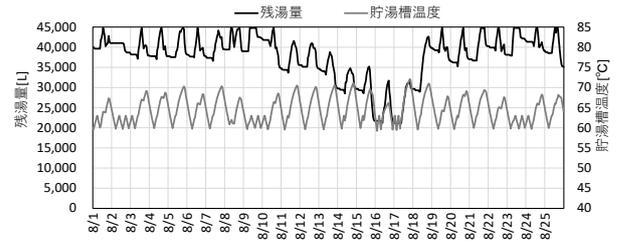


図 15 残湯量・貯湯槽温度計算結果（夏期）

- 5) 経済産業省資源エネルギー庁：「エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネスに関するガイドライン（令和 2 年 6 月改訂版）」, 2020.6
- 6) 四国電力送配電株式会社：需給関連情報（需給実績）の公表について, https://www.yonden.co.jp/nw/renewable_energy/data/supply_demand.html