

地域冷暖房プラントにおける蓄熱システムの運転評価手法に関する研究 Operation Assessment Method of Thermal Energy Storage System in District Heating and Cooling Plant

学生会員 ○熊田 瑤子 (大阪大学) 正会員 相良 和伸 (大阪大学)
正会員 山中 俊夫 (大阪大学) 正会員 甲谷 寿史 (大阪大学)
正会員 三浦 光城 (関西電力) 正会員 丹羽 英治 (日建設計総合研究所)

Yoko KUMATA^{*1} Kazunobu SAGARA^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Hisashi KOTANI^{*1}
Mitsuki MIURA^{*2} Hideharu NIWA^{*3}

^{*1} Osaka University ^{*2} The Kansai Electric Power Co., Inc. ^{*3} Nikken Sekkei Research Institute

Recently, the number of thermal energy storage system has increased for its economic advantage. It is important to operate the system properly for receiving the benefits, and many methods have been tried to investigate the actual condition of the system. This paper reports the results of operation assessment of a thermal energy storage system using the measured data of a district heating and cooling plant.

1. はじめに

安価な夜間電力を利用する蓄熱システムは、経済性、環境面において優れており、採用される事例が増えている。蓄熱システムが十分に性能を発揮するためには、最適な設計だけでなく適切な運転制御が必要であるため、運転状況の分析、評価が欠かせない。運転評価手法に関する様々な研究が行われている中で、中井ら¹⁾は熱源容量、蓄熱槽容量の異なる蓄熱システムを同一の指標で評価する方法を提案した。前報²⁾では、温度成層型蓄熱槽を持つ地域冷暖房プラントの実測データにこの指標を適用して運転評価を行った。本報では、運転評価の結果分析と、流量データを用いずに槽内温度の計測データと熱源の定格能力、発停情報から評価する簡易手法により同様の評価を行い、比較した結果について報告する。

2. 蓄熱システム概要

本研究の対象施設は、大阪にある某地域冷暖房プラントである。設備の概要を表-1に、システム系統図を図-1に示す。蓄熱槽の水深は9mであり、4槽ある蓄熱槽のうち、第1槽と第2槽は冷水蓄熱槽、第3槽と第4槽は冷温水蓄熱槽となっている。図-1に示すように、4つの槽にはそれぞれ槽底面より450mmの高さから900mm毎に10点、槽内温度測定点が設置されている。

3. 運転評価手法

データの実測期間は2004年4月1日から2005年3月31日の1年間であり(欠測の2004年8月9日、10日を除く)、測定は1時間間隔で行われた。中井ら¹⁾による評価手法(以下、ここでは基本評価法と呼ぶ)で用いた実測データを表-2に示す。*が付いている項目が簡易評価法においても用いた実測項目である。

以下に表-2の実測データを用いる基本評価法を示す。

実測データと水の密度 ρ [kg/m³]、比熱 c_p [kJ/kgK] から時刻 $T1 \sim T2$ における熱源積算生産熱量 $G_{T1/T2}$ [kJ] (以下、熱量の単位は全て [kJ] である) と積算負荷 $L_{T1/T2}$ は、次式のように算出される。

表-1 設備概要

項目		能力	
熱源	空気熱源ヒートポンプ (DBR) (熱回収型)	冷却 7,857MJ/h 加熱 7,916MJ/h	} ×2台
	空気熱源ヒートポンプ (DBR) (熱回収型)	冷却 7,593MJ/h 加熱 5,404MJ/h	
	電動ターボ冷凍機 (TR)	冷却 7,593MJ/h	×2台
	計	冷却 38,493MJ/h 加熱 21,236MJ/h	
冷水蓄熱槽		4,600m ³	
冷・温水蓄熱槽		1,700m ³	

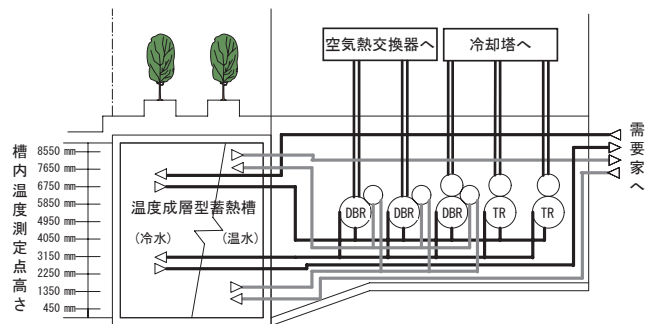


図-1 システム系統図

表-2 用いた実測データ

時刻 t における熱源第 m 系統入口温度	$\theta_m^{G,in}$ [°C]
時刻 t における熱源第 m 系統出口温度	$\theta_m^{G,out}$ [°C]
時刻 t における熱源第 m 系統流量 (*)	V_m^G [m ³ /h]
時刻 t における2次側第 n 系統送水温度	$\theta_n^{L,in}$ [°C]
時刻 t における2次側第 n 系統還水温度	$\theta_n^{L,out}$ [°C]
時刻 t における2次側第 n 系統流量	V_n^L [m ³ /h]
時刻 t における第 i 槽第 j 点蓄熱槽内温度 (*)	θ_{ij} [°C]

※簡易評価法において、熱源第 m 系統流量は流量の値ではなく熱源の発停を判断するために用いた。

$$G_{T1/T2} = \sum_{t=T1+1}^{T2} \sum_{m=1}^M \rho c_p V_m^G (\theta_m^{G,in} - \theta_m^{G,out}) \quad \dots \text{式 (1)}$$

$$L_{T1/T2} = \sum_{t=T1+1}^{T2} \sum_{n=1}^N \rho c_p V_n^L (\theta_n^{L,in} - \theta_n^{L,out}) \quad \dots \text{式 (2)}$$

データの計測間隔が1時間であるため、時刻 t に計測されたデータを用いて計算した値を時刻 $t-1$ から時刻 t までの積算値として扱う。また、熱源生産熱量を計算する際に、流量が $50\text{m}^3/\text{h}$ 以下の場合には熱源機が停止しているとし、その時刻における生産熱量を 0kJ/h とした。次に、基準蓄熱量 U は対象となる蓄熱槽に最大限蓄えることができると想定される蓄熱量を近似的に表し、以下のように定義する。

$$U = \sum_i \rho c_p V_i |\theta_{i,d,ave} - \theta_{i,c,ave}| \quad \dots \text{式 (3)}$$

$$\theta_{i,d,ave} = (1/V_i) \sum_j \theta_{i,j,d} v_{i,j} \quad \dots \text{式 (4)}$$

$$\theta_{i,c,ave} = (1/V_i) \sum_j \theta_{i,j,c} v_{i,j} \quad \dots \text{式 (5)}$$

$\theta_{i,d,ave}$ は第 i 槽の放熱完了温度、 $\theta_{i,c,ave}$ は第 i 槽の蓄熱完了温度を示し、式 (4)、(5) による槽内平均温度である。 $\theta_{i,j,d}$ と $\theta_{i,j,c}$ は評価期間における最高・最低槽内温度分布時の第 i 槽第 j 点における槽内温度である。なお、温度成層型蓄熱槽では、上下方向に設置された各温度測定点の中間位置で槽容積 $V_i[\text{m}^3]$ の蓄熱槽が $v_{i,j}[\text{m}^3]$ に分割されているとする。また、槽保有熱量 $Q_i^\#$ は時刻 t において槽に蓄えられていた熱量であり、 $\theta_{i,d,ave}$ を用いて次式のように定義する。

$$Q_i^\# = \sum_i \sum_j \rho c_p |\theta_{i,d,ave} - \theta_{i,j,t}| v_{i,j} \quad \dots \text{式 (6)}$$

以下に、本報で用いたピークシフト評価指標の定義を示す。

(1) 熱源夜間移行率 S_0

熱源夜間移行率 S_0 は熱量基準の熱源夜間移行率を評価するものであり、次式で定義される。

$$S_0 = G_{y,22/8} / G_{y,22/22} \quad \dots \text{式 (7)}$$

式 (7) は昼間熱源運転の程度を確認する指標である。

(2) 夜間蓄熱過不足率 S_1

夜間蓄熱過不足率 S_1 は夜間における熱源発停適性を評価する指標であり、次式で定義される。

$$S_1 = (Q_8 - Q_{8,req}) / U \quad \dots \text{式 (8)}$$

式 (8) は8時における目標量に対して過不足となっ

た蓄熱量を基準蓄熱量の比として表したものである。8時蓄熱量 Q_8 は、次式によって算出される。

$$Q_8 = Q_{y,22}^\# + Q_{y,22/8} \quad \dots \text{式 (9)}$$

夜間蓄熱量 $Q_{y,22/8}$ は次式によって算出される。

$$Q_{y,22/8} = G_{y,22/8} - L_{y,22/8} \quad \dots \text{式 (10)}$$

8時目標蓄熱量 $Q_{8,req}$ は、基本的にはその日の昼間負荷 $L_{8/22}$ となるが、蓄熱槽が小さい場合には基準蓄熱量 U 、熱源容量が小さい場合には熱源を夜間の10時間フル運転して蓄熱できる熱量 ($Q_{y,22/8,hp} + Q_{y,22}^\#$) となる。したがって、 $Q_{8,req}$ は次式のように定義される。なお、式中の $\min(*, *)$ は括弧内の要素から最小のものを選定する演算子である。

$$Q_{8,req} = \min(L_{8/22}, U, Q_{y,22/8,hp} + Q_{y,22}^\#) \quad \dots \text{式 (11)}$$

熱源フル運転夜間蓄熱量 $Q_{y,22/8,hp}$ は、熱源瞬時生産熱量の評価期間最大値 G_{max}^* を用いて次式から算出される。

$$Q_{y,22/8,hp} = 10G_{max}^* - L_{y,22/8} \quad \dots \text{式 (12)}$$

夜間蓄熱過不足率 $S_1 < 0$ の場合は、より多くの夜間蓄熱ができたことを、夜間蓄熱過不足率 $S_1 > 0$ の場合は、必要量以上の熱量を夜間に蓄熱したことを示す。

(3) 過剰蓄熱率 S_2

過剰蓄熱率 S_2 は熱源の夜間蓄熱運転および昼間の追い掛け運転による過剰蓄熱の程度を評価するものであり、次式で定義される。

$$S_2 = Q_{22,over} / U \quad \dots \text{式 (13)}$$

過剰蓄熱量 $Q_{22,over}$ は、本来ならば評価対象日22時～翌朝8時の夜間において蓄熱すべきであったにも関わらず、先に昼間 ($S_0 = 1$ の場合は夜間) の熱源運転によって蓄熱された熱量を表し、次のように定義する。

$\min(U, L_{n8/n22}) \leq Q_{22/n8,hp}$ の時 (蓄熱槽容量、もしくはは負荷に対して熱源容量が大きい場合) は、

$$Q_{22,over} = Q_{22}^\# \quad \dots \text{式 (14)}$$

$\min(U, L_{n8/n22}) > Q_{22/n8,hp}$ の時 (蓄熱槽容量、もしくはは負荷に対して熱源容量が小さい場合) は、

$$Q_{22,over} = Q_{22}^\# - \{\min(U, L_{n8/n22}) - Q_{22/n8,hp}\} \quad \dots \text{式 (14)'} \\ (\text{ただし、} Q_{22,over} < 0 \text{ の時は } Q_{22,over} = 0)$$

ここで、 $Q_{22/n8,hp}$ は翌日の熱源フル運転8時蓄熱量であり、評価対象日22時～翌朝8時まで熱源が10時間フル運転した場合の蓄熱量のことを指す。

ピークシフト評価指標を表-3にまとめる。

4. 基本評価法による運転評価結果の分析

4.1 熱損失に関する検討

本システムでは、冷水から温水への切り替え時期に自然放熱によって温度をある程度上昇させてから温水蓄熱を開始している。よって、冷温水切り替え時期における自然放熱量から本蓄熱槽における熱損失量を求めることができる。第3槽、第4槽において蓄放熱運転の行われていない期間における自然放熱量と、各槽の基準蓄熱量 U に対するその割合を求めた結果を表-4

表-3 ピークシフト評価指標

	指標名称	定義
S_0	熱源夜間移行率	$S_0 = \frac{\text{夜間熱源生産熱量}}{\text{一日熱源生産熱量}}$
S_1	夜間蓄熱過不足率	$S_1 = \frac{8:00\text{蓄熱量} - 8:00\text{目標蓄熱量}}{\text{基準蓄熱量}}$
S_2	過剰蓄熱率	$S_2 = \frac{22:00\text{過剰蓄熱量}}{\text{基準蓄熱量}}$

に示す。また、温水から冷水への切り替え時期に運転していなかった日の夜間における自然放熱量と基準蓄熱量 U に対する割合も併せて示す。

表-4より、第4槽において10月21日の自然放熱量が最大となっている。本蓄熱槽は4槽とも水深が等しいので、どの蓄熱槽でも熱損失量が等しいとしてこの値を本蓄熱槽における熱損失量とすると、基準蓄熱量 U に対する熱損失量の割合が1.35%とかなり小さいことがわかる。10月21日の日平均外気温は18.5℃、夏期の最も暑い日の日平均外気温が31.2℃であったことから、夏期における熱損失は2.5%程度であると予想される。また、温水蓄熱槽の熱損失も夜間の10時間においてのみの値であるが、1.39%と小さい値となっている。本施設の蓄熱槽は水深が9mと深く、表面積が小さいため、熱損失が通常の蓄熱槽よりも少ないと考えられるので、蓄熱過剰となっても特に問題はないと言える。

4.2 夏期（7月25日～7月31日の1週間）に関する検討

夏期の代表的な運転状況である7月25日（日）～7月31日（土）の1週間における運転評価結果を表-5に、運転状況を図-2に示す。本システムでは、熱源容量、蓄熱槽容量が十分に大きいので、常に8時目標蓄熱量 $Q_{8,req}$ は昼間負荷 $L_{8/22}$ と、過剰蓄熱量 $Q_{22,over}$ は22時槽保有熱量 $Q_{22}^{\#}$ と等しい値となっている。

表-5の熱源夜間移行率 S_0 より、土日は夜間のみ熱源運転を行い、平日は昼間も運転を行っていることがわかる。平日では、1日の熱源生産熱量のうち1、2割程度

表-4 熱損失量

	第3槽における 自然放熱量 [MJ/日]	第3槽の基準蓄熱量 に対する割合 [%]
11月21日	601	1.44
11月22日	547	1.32
4月9日	383*	0.90

	第4槽における 自然放熱量 [MJ/日]	第4槽の基準蓄熱量 に対する割合 [%]
10月19日	85	0.30
10月20日	340	1.20
10月21日	383	1.35
10月22日	297	1.04
5月1日	468*	1.39

*...MJ/10時間

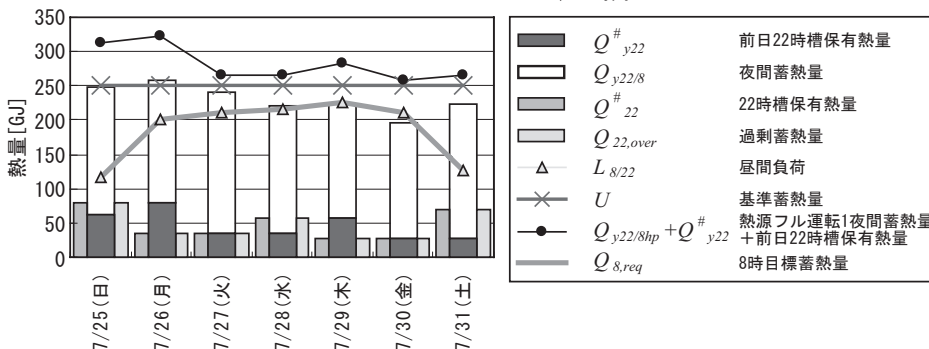


図-2 運転状況 (7/25-7/31)

を昼間に生産している。夜間蓄熱過不足率 S_1 は25日（日）の値が最も大きく、30日（金）に向けて値が小さくなり、31日（土）で再び値が大きくなっている。これは、8時蓄熱量 $Q_8 (= Q_{y22}^{\#} + Q_{y22/8})$ には平日と土日の差が見られないが、土日は昼間負荷 $L_{8/22}$ が小さいために8時目標蓄熱量 $Q_{8,req}$ が平日の6割程度となるためである。過剰蓄熱率 S_2 は、25日（日）、28日（水）、31日（土）において大きい値となっていた。25日（日）、31日（土）の土日は、昼間負荷 $L_{8/22}$ が小さいため夜間に蓄熱された熱量の多くが使われずに22時まで残っている。28日（水）の値が大きくなったのは、夜間蓄熱過不足率 S_1 の値が0.01と小さいために昼間に追い掛け運転を行って熱量を生産した結果、22時の槽保有熱量 $Q_{22}^{\#}$ が多くなったためであると考えられる。図-2より、負荷の大きい平日は蓄熱量の大部分を利用しており、効率的な運転を行っていると言える。また、本施設では土日の間に多めに蓄熱された熱量が平日に使われているが、本蓄熱槽では熱損失が極めて少ないことから、土日の蓄熱過剰は特に問題とはならず、適正な運転がなされていると言える。

なお、本報で用いた一連の運転評価手法にはピークカットを評価する指標も含まれているが、夏期対象期間のピーク時間帯において熱源運転が行われていなかったためピークカット評価は行っていない。

5. 簡易評価法の検討

簡易評価法として、槽内温度の計測データと熱源の定格能力、発停情報のみを用いてピークシフト評価を行い、基本評価法と比較した結果を示す。表-6に基本評価法より変更した点を挙げる。熱源生産熱量を求める際の定格能力は、表-1の熱源能力の値を用いた。これらの変更点により、用いるデータ数を減らしても同様の評価が可能であるかを検討する。

図-3に、表-6に挙げた熱量の基本評価法と簡易評価法の計算方法による1年間分の値を比較した結果を示す。図-3より、3)の夜間負荷以外の熱量の関係ではデータが直線上に分布しており、相関のあることがわかる。夜間負荷に関しては、夜間生産熱量と8時蓄熱量の値のずれによりばらつきが大きくなって

表-5 ピークシフト評価結果 (7/25-7/31)

	S_0	S_1	S_2
7/25(日)	1.00	0.52	0.32
7/26(月)	0.88	0.23	0.14
7/27(火)	0.87	0.12	0.14
7/28(水)	0.79	0.01	0.22
7/29(木)	0.85	-0.01	0.11
7/30(金)	0.86	-0.06	0.11
7/31(土)	1.00	0.39	0.27

いる。また、簡易評価法による熱量を用いた7月25日～7月31日の1週間の運転状況を図-4に示す。図-2と比較すると、昼間負荷 $L_{8/22}$ の値が全体的に大きくなっており、熱源フル運転8時蓄熱量($Q_{y22/8,lp} + Q_{y22}^{\#}$)が小さくなっていることがわかる。熱源フル運転8時蓄熱量の値が小さくなったのは、熱源瞬時生産熱量の評価期間最大値 G_{max}^* が基本評価法では定格能力よりも大きくなっていったためである。図-5に、基本評価法と簡易評価法により算出したピークシフト指標値の相関図を示す。図-5において、熱源夜間移行率 S_0 はよく一致していることがわかる。夜間蓄熱過不足率 S_1 は全体的に簡易評価法の値が基本評価法よりも小さくなっている。過剰蓄熱率 S_2 は昼間負荷よりも熱源容量が小さく式(14)'が適用される場合があった。 S_1 、 S_2 の値は0に近いほど良好な運転となるため、負荷が大きめに算出される簡易評価法では多少評価が甘い側となるが、実測データの数を減らしても概ね同様の評価ができると言える。

6. 終わりに

本報では、温度成層型蓄熱槽を持つ地域冷暖房プラントの実測データを用いて蓄熱システムの運転評価を行い、簡易的な評価手法を用いて評価が可能であることを検討した。本施設はコンピュータセンターを有するビルにエネルギーを供給しているため、常に蓄熱量を確保していることが望ましい。したがって、熱損失の少ない蓄熱槽において蓄熱量が多いのは良好な運転であると言える。また、槽内温度の計測データと熱源の定格能力、発停情報のみから熱量を計算する簡易的手法を用いても十分運転状況を把握することができることがわかった。

【熱量記号表】

$G_{y22/8}$: 夜間熱源生産熱量	$Q_{y22/8,lp}$: 熱源フル運転夜間蓄熱量
$G_{8/22}^{\#}$: 昼間熱源生産熱量	$Q_{22/n8,lp}$: 翌日の熱源フル運転夜間蓄熱量
$G_{y22/22}^{\#}$: 一日熱源生産熱量	Q_8 : 8時蓄熱量
G_{max}^* : 熱源瞬時生産熱量の評価期間最大値	$Q_{8,req}$: 8時目標蓄熱量
$L_{y22/8}$: 夜間負荷	$Q_{22,over}$: 過剰蓄熱量
$L_{8/22}$: 昼間負荷	$Q_{y22}^{\#}$: 前日22時槽保有熱量
$L_{n8/n22}$: 翌日の昼間負荷	$Q_{22}^{\#}$: 22時槽保有熱量
$Q_{y22/8}$: 夜間蓄熱量	$Q_8^{\#}$: 8時槽保有熱量
	U : 基準蓄熱量

表-6 評価法の変更点

	基本評価法	簡易評価法
1) 8時蓄熱量 Q_8	式(9)より算出	槽内温度から求める $Q_8^{\#}$ とする
2) 熱源生産熱量 $G_{T1/T2}$	式(1)より算出	定格能力×運転時間
3) 夜間負荷 $L_{y22/8}$	式(2)より算出	夜間生産熱量-夜間蓄熱量 = $G_{y22/8} - (Q_8^{\#} - Q_{y22}^{\#})$
4) 昼間負荷 $L_{8/22}$	式(2)より算出	放熱量+昼間生産熱量 = $(Q_{y22}^{\#} - Q_8^{\#}) + G_{8/22}$

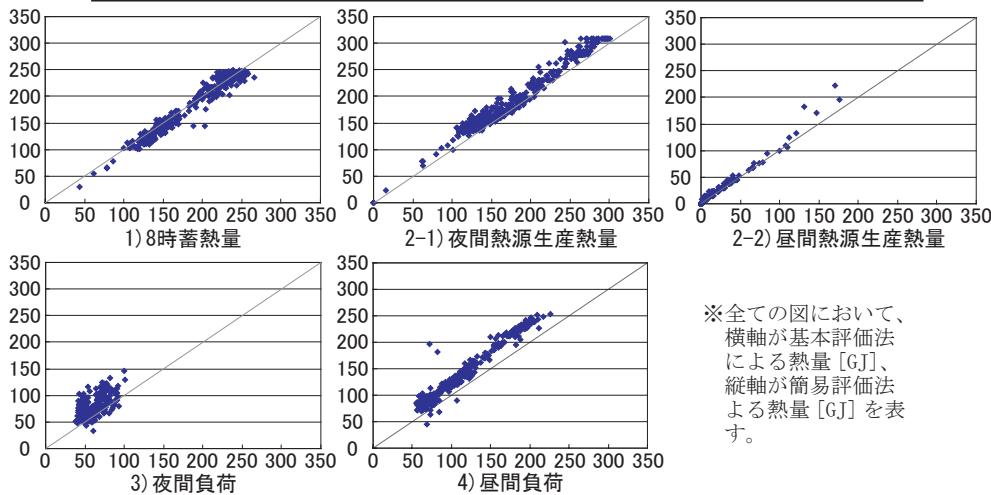


図-3 評価法による熱量の差異

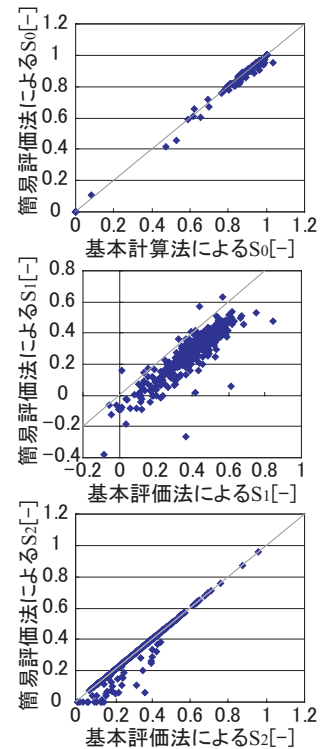


図-5 評価法による指標値の差異

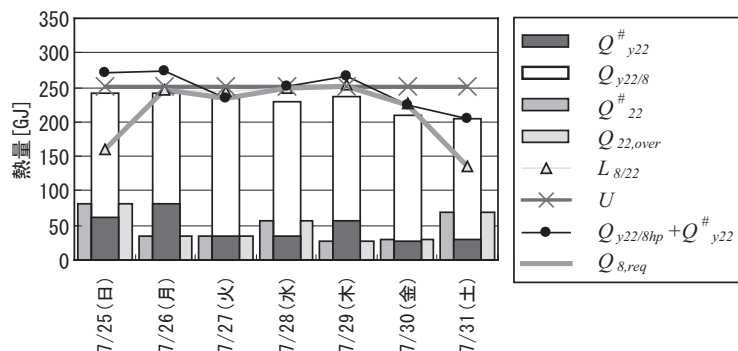


図-4 簡易評価法による運転状況 (7/25-7/31)

※全ての図において、横軸が基本評価法による熱量[GJ]、縦軸が簡易評価法による熱量[GJ]を表す。

【謝辞】

本研究を行うにあたり御協力頂いた吉川貴雄氏(当時 大阪大学大学院生, 現 株式会社 大林組)、データを御提供頂いた関電エネルギー開発(株)の関係者各位に心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 中井, 北野, 祝, 相良: 蓄熱式空調システムの熱源運転評価に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 74, pp. 37-46, 1999年7月
- 2) 熊田, 相良, 山中, 甲谷, 吉川, 三浦, 丹羽: 地域冷暖房プラントにおける蓄熱システムの運転評価, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp. 57-60, 2007年3月