

# センサ誤差やシミュレーションモデル精度が 冷却水サブシステムの電力消費量に与える影響評価

矢島和樹\*<sup>1</sup>  
前田龍紀\*<sup>2</sup>

福井雅英\*<sup>1</sup>

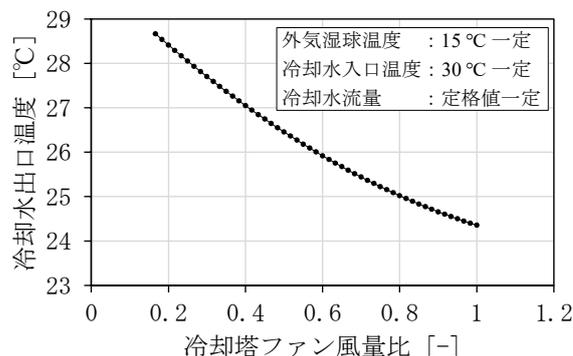
水冷式の冷凍機、冷却塔、冷却水ポンプで構成される冷却水サブシステムを対象として、効率的な運用方法が検討されてきた。一方で、冷却水サブシステムを構成する冷却塔は、外乱の影響が大きくシミュレーションなど机上の検討と実システムとの乖離が他の機器に比べて大きくなりやすい。そこで、空調システムシミュレーションを用いて、センサ誤差がある場合やシミュレーションモデルの精度に誤差がある場合を想定し、それがどの程度電力消費量に影響を及ぼすか把握した。また、冷却塔ファンの制御方法について、冷却水温度設定にもとづき制御する場合と冷却塔ファン周波数の設定にもとづき制御する場合を比較し、その違いを定量的に評価した。

## はじめに

2050年の脱炭素社会の実現に向けて、熱源・空調システムの効率的な運用による省エネルギー化・CO<sub>2</sub>削減への取り組みは重要である。その中でも冷却水サブシステムは、執務環境側（冷温水や2次側空調システム）への快適性に影響を与えることなく、効率向上の検討・実施が可能のため数多くの研究開発・事例が報告されてきた。例えば、冷却水温度や冷却水流量を最適に制御する方法として、外気湿球温度の関係式で求める方法<sup>1)</sup>、テーブルデータ化する方法<sup>2)</sup>、AI (Artificial Intelligence) を用いる方法<sup>3)4)</sup> などがある。

一方で、冷却水サブシステムを構成する水冷式の冷凍機、冷却塔、冷却水ポンプのうち、冷却塔は次に示す特徴から、シミュレーションなど机上の検討と実システムとの乖離が他の機器に比べて大きくなりやすい。

- 1) 冷却塔は、屋外に設置されているため秒単位で変化する外部風速・風向などの影響を受ける。
- 2) 性能の評価や制御に用いるためのセンサ、例えば外気湿球温度の計測箇所が各冷却塔の入口近傍ではなく、建物の代表点1か所に設置など情報が不足している。
- 3) 冷却水出口温度の低下と冷却塔ファン風量の増大がリニアな関係ではなく(図-1)、回転数制御では消



注 空調システムシミュレーションを用いた冷却塔単体の計算値  
図-1 冷却塔ファン風量比と冷却水出口温度の関係

費電力とファン風量の3乗が比例する。そのため、冷却塔ファン風量比が大きい範囲で、冷却水温度の変化に対して消費電力の変化が大きい。

以上の特徴から、わずかな誤差で冷却水温度制御における机上検討と実システムとの乖離につながる。

本研究では、空調システムシミュレーションを用いて、外気湿球温度や冷却水温度などセンサの計測箇所のズレ・計測値に誤差がある場合や、シミュレーションモデルの精度に誤差がある場合を想定して、意図的に誤差を与えて計算した。この計算結果から、誤差の無い理想的なシミュレーションにもとづいて導出された冷却塔ファンの制御に、誤差がどの程度影響を及ぼすか把握した。影響の把握は、本研究の対象システムを電気式熱源とし

\*<sup>1</sup> 三菱冷熱工業(株)

\*<sup>2</sup> (株)竹中工務店

たため、電力消費量で行った。ある一定の外気・負荷条件において、冷却水温度設定値のみを変えて計算した冷凍機と冷却塔の電力消費量の例を図-2に示す。冷却水温度の設定値が低くなると、冷凍機の電力消費量は小さくなり、一方で冷却塔の電力消費量は大きくなる。設定値が21℃以下では、冷却塔のファン回転数が最大となつて、冷却水温度が設定値まで下がらず一定となるため、冷却塔、冷凍機ともに電力消費量は一定となる。前述の最適制御などでは、図-2中の矢印部の冷却水温度を目標にしているが、誤差により目標から左右に外れてしまい、本研究で評価を行う「外れる度合い」によっては最適制御の電力消費量が従来の一般的な制御より増加する可能性がある。

また既往研究<sup>9)</sup>にて、冷却塔ファンの制御を行う際に、冷却水温度を設定値とするよりも冷却塔ファン周波数を設定値とするほうが前述した誤差等の影響を受けにくいと報告した。電力消費量への影響の把握では、これらの設定値にする項目の違い、設定値の決め方なども複数検討し、定量的な評価を行った。

## 1. 対象システムと制御方法

### 1.1 対象システム

インバータターボ冷凍機2台と冷却塔2台で構成されたシステムを対象とした。検討に使用したシミュレーションモデルは、LCEM ツール (Ver310) にて作成した。対象システムを構成する機器の仕様を表-1に、概略図を図-3に示す。冷却塔ファンは回転数制御とし、既往研究<sup>6)</sup>の変風量対応オブジェクトの計算方法を用いた。

### 1.2 比較する制御方法の概要

#### (1) 冷却水温度設定

冷却水冷凍機入口温度を制御する方法は、ファンのON/OFF 制御、冷却水のバイパス制御、冷却塔の台数制御、ファンの回転数制御などがある。本研究では、冷却水冷却塔出口温度が設定値になるように、インバータによるファンの回転数制御を行う方法を検討対象とした。冷凍機の冷却水下限温度以下に低下するのを防止する方法として、冷却水のバイパス制御を行う。後述する1.3の設定値で制御するため、冷却塔の台数は、常に全台運転とした。

#### (2) 冷却塔ファン周波数設定

冷却塔ファン周波数を設定値とする方法で、冷却水温度を設定値とする方法と同じく、冷却水冷却塔出口温度を変化させることが目的である。冷却塔ファン周波数を直接指定するので、冷却水冷却塔出口温度が成り行きとなるため、本研究のような計算・実システムへの導入問

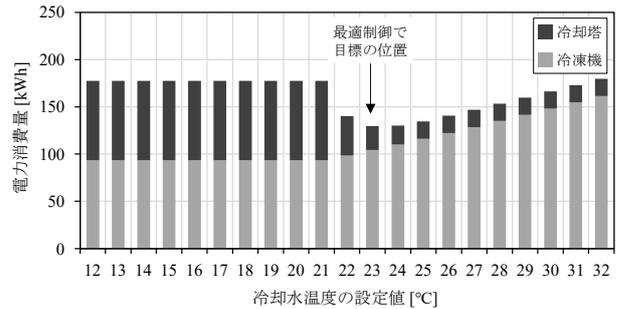
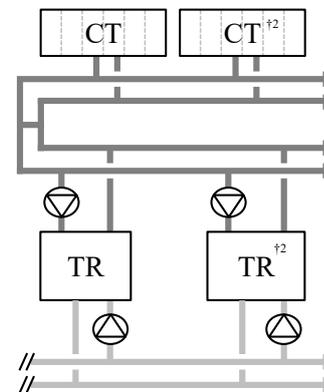


図-2 冷却水温度設定値別の電力消費量

表-1 機器の定格仕様一覧

インバータターボ冷凍機	2 台
定格冷凍能力	400 USRt
定格消費電力	226.4 kW
定格冷水流量	2,500 L/min
定格冷却水流量	4,695 L/min
冷却塔	2 台 <sup>†1)</sup>
定格消費電力	33.0 kW
定格冷却水流量	6,566 L/min
冷却水ポンプ	2 台
定格消費電力	52.8 kW
定格冷却水流量	4,695 L/min
定格揚程	460.6 kPa
冷水ポンプ	2 台
定格消費電力	14.9 kW
定格冷却水流量	2,500 L/min
定格揚程	254.8 kPa



注 <sup>†1)</sup> 1台につき6セル。冷却塔台数制御は2セルごとに可能  
<sup>†2)</sup> TR：冷凍機、CT：冷却塔

図-3 対象の熱源システム概略図

わず、冷却水冷却塔出口温度の上下限値を別途保障する必要がある。例えば、冷却水冷却塔出口温度が上下限値を逸脱するときには冷却水温度制御に移行する、冷却水冷却塔出口温度が上下限値を逸脱するときは強制的に冷却塔ファン周波数を上限値(下限値)にする、などである。本研究では、冷却水冷却塔出口温度が上下限値を逸脱するときは、冷却塔のファン周波数を上限値(下限値)にして計算した。冷却塔の台数は、全台運転とした。

### 1.3 設定値の決め方

既往研究<sup>5)</sup>と同様に、外気条件と負荷条件を離散的に与えて計算し、冷却水温度および冷却塔ファン周波数の最適な設定値を求め、設定値を決める重回帰式(式(1)、式(2))を作成した。これらの式を用いて、冷却水温度の設定値と冷却塔ファン周波数の設定値を決める。最適な設定値とは、表-1、図-3に示す機器の合計電力消費量が最小となる設定値と定義する。

$$T_{Opt} = (a_{11}q_r^2 + a_{12}q_r + a_{13})T_{WB}^2 + (a_{21}q_r^2 + a_{22}q_r + a_{23})T_{WB} + (a_{31}q_r^2 + a_{32}q_r + a_{33}) \quad \dots\dots (1)$$

$T_{Opt}$  : 冷却水温度の設定値 [°C]  
 $q_r$  : システム負荷率<sup>†3</sup> [%]  
 $T_{WB}$  : 外気湿球温度 [°C]  
 $a_{ij}$  : 定数 [-]

$$F_{Opt} = (b_{11}q_r^2 + b_{12}q_r + b_{13})T_{WB}^2 + (b_{21}q_r^2 + b_{22}q_r + b_{23})T_{WB} + (b_{31}q_r^2 + b_{32}q_r + b_{33}) \quad \dots\dots (2)$$

$F_{Opt}$  : ファン周波数の設定値 [Hz]  
 $b_{ij}$  : 定数 [-]

注 <sup>†3</sup> (冷凍機2台の製造熱量)/(冷凍機2台の定格冷能力)

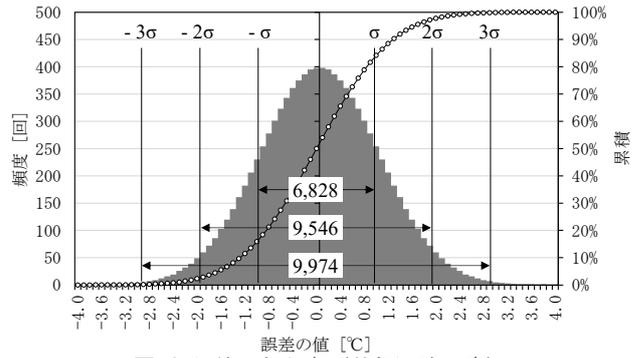
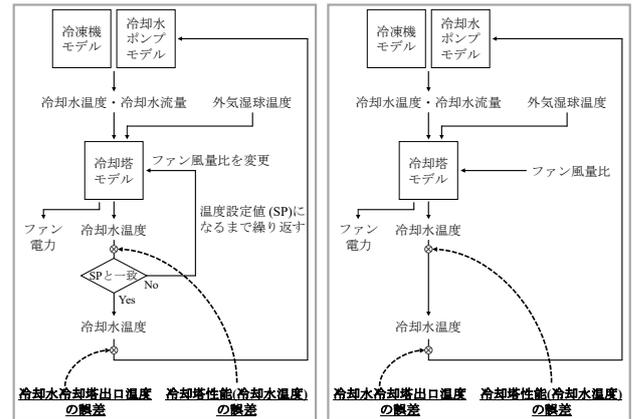


図-4 誤差の与え方 (外気湿球温度)



(a) 冷却水温度設定の場合 (b) ファン周波数設定の場合

図-5 冷却水温度と冷却塔の誤差を与える冷却水温度の箇所

## 2. センサ誤差やモデル精度の影響把握

### 2.1 センサ誤差やモデル誤差の与え方

外気湿球温度、システム負荷率<sup>†3</sup>(以下、負荷率)、冷却水冷却塔出口温度、冷却塔性能(冷却水温度)の4項目について、誤差は正規分布に従うものとし、10,000回の試行を行った。外気湿球温度の例を図-4に示す。誤差を与える4項目は、実システムでは正規分布に従って誤差が変動するわけではなく、ある一定の誤差が継続、または正規分布とは関係なく誤差が変動することが考えられる。しかし、誤差の大小や真値からの正負は予測できず、偏りなく発生する可能性があると考えられる。したがって、本研究では誤差の大小や正負に関係なく網羅的に評価するため、正規分布で誤差を与えた。

外気湿球温度は、外気乾球温度や外気相対湿度の測定誤差に起因するものであり、標準偏差は1°Cとし、既往研究<sup>5)</sup>等で得られた実測値のばらつきをもとに求めた。負荷率は、冷凍機の冷水出口温度・入口温度や冷水流量の測定誤差に起因するものであり、標準偏差は10%とし、実測値のばらつきをもとに求めた。冷却水冷却塔出口温度は、冷却水温度の測定誤差に起因するものであり、標準偏差は0.3°Cとし、実測値のばらつきをもとに求めた。外気湿球温度のほうが実測値のばらつきが大きいのは、

外気湿球温度は外気相対湿度の測定誤差が大きく、その外気相対湿度と外気乾球温度から計算されるためだと考えられる。冷却塔性能(冷却水温度)は、シミュレーションモデルの誤差に起因するものであり、標準偏差は0.3°Cとし、冷却水冷却塔出口温度と同じ値とした。外気湿球温度、負荷率、冷却塔性能の3項目は、誤差により最適運転など想定した運転から乖離することによる電力消費量の増減であり、冷却水冷却塔出口温度は、シミュレーションモデルの予測値の誤差による電力消費量の増減である。

なお、冷却水冷却塔出口温度と冷却塔性能(冷却水温度)は、どちらも冷却塔出口の冷却水温度である。これら2つの冷却水温度の誤差を与える箇所を図-5に示す。冷却塔ファン周波数の設定値を決める制御の場合には、冷却水温度にランダム要素はあるものの同一の誤差を与えることになるが、冷却水温度の設定値を決める制御と条件を合わせるため変えずにそのままとした。

また、上記4項目を組み合わせたケースについても検討し、次の合計9ケースの誤差を与えた。

- 1) a\_外気湿球温度                      標準偏差σ: 1°C
- 2) b\_負荷率                                標準偏差σ: 10%
- 3) c\_冷却水温度                         標準偏差σ: 0.3°C

- 4) d\_冷却塔 標準偏差  $\sigma$  : 0.3 °C
- 5) a + b
- 6) c + d
- 7) a + b + c
- 8) a + b + d
- 9) a + b + c + d

項目を組み合わせる 5) から 9) のケースの場合には、誤差を与えて試行する回数は変えずに、1) から 4) の各項目の誤差がランダムに組み合わせるようにした。実システムでも誤差はどれか 1 つの項目ではなく、複数の項目にわたって誤差が存在し、それが複合的に影響する。例えば、冷却塔ファン周波数の設定値を決める制御の場合に、c と d の誤差は同一であったが、c + d のケースでは冷却水温度のセンサ誤差と冷却塔モデルの冷却水温度の計算誤差が加算、または誤差の正負が逆であれば相殺されるなど複合要素が加味される。

モデル誤差は、はじめに述べたとおり、誤差が大きくなると考えられる冷却塔の冷却水温度に誤差を与えた。シミュレーションの結果と実システムの計測値を比較したとき、計測誤差を無視しても、シミュレーションモデルが実システムと完全に一致することはなく、必ず乖離が生まれる。このようにシミュレーションを活用する場面においては、シミュレーションの結果は真値からズレることを考慮する必要がある。本研究では、シミュレーションのみの検討であり、誤差を与える前のシミュレーション結果を真値とし、そこに意図的に誤差を与えることでシミュレーションモデル精度のばらつきを模擬した。

c, d の誤差の電力消費量への影響を整理すると、c は冷却水温度の設定値への制御（収束計算）後に誤差を与えるため、冷却塔への冷却水入口温度（冷凍機出口温度）が変わるものの冷却塔の電力消費量はあまり変化せず、一方で冷凍機の電力消費量が変化する。d は誤差を与えることで冷却塔にて所定の冷却水温度まで下げるのに必要なファン風量が変化するため、冷却塔の電力消費量が変化し、一方で設定値は変わらないため冷凍機の電力消費量はあまり変化しない。なお、本報では扱っていないが、設定値に対して同様の誤差を与えると、図-2 の横軸の位置が変化し、冷却塔と冷凍機ともに電力消費量が誤差によって変化する。

## 2.2 誤差による電力消費量の増減比較

9 つのケースごとに、2.1 に記載した誤差を与えてシステム合計の電力消費量を 10,000 回計算し、誤差がない場合に対する電力消費量の増減を求めた。

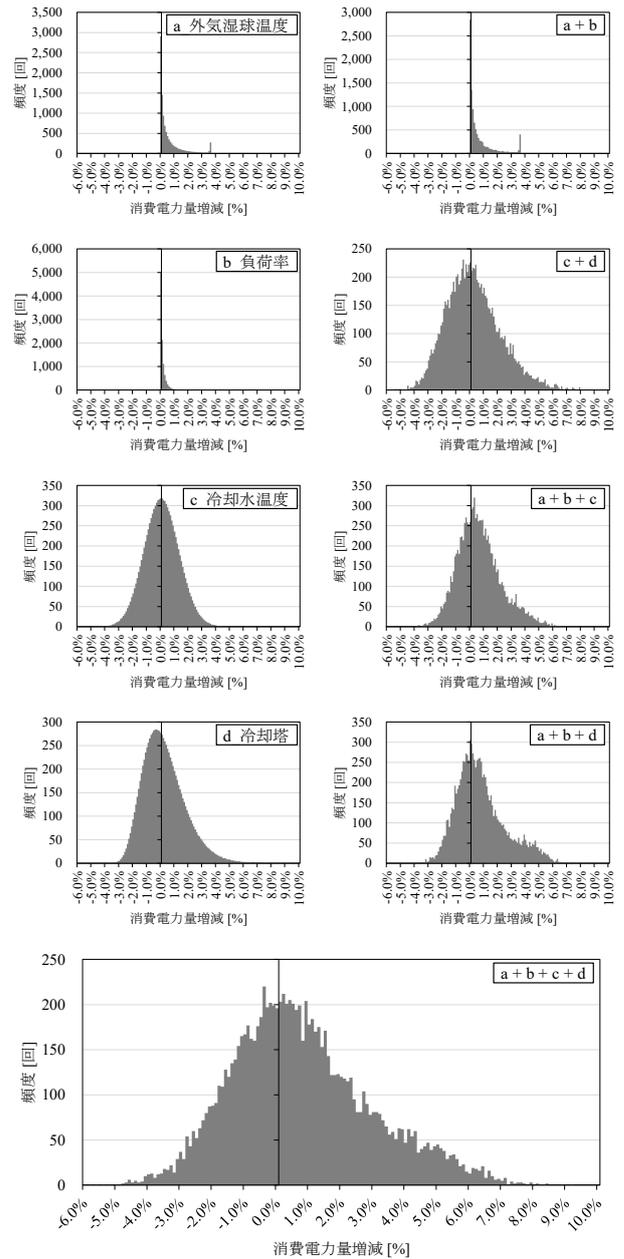


図-6 冷却水温度設定の電力増減頻度（夏期）

表-2 冷却水温度設定の電力増減の統計値（夏期）

	最小値	Avg. - $\sigma$	平均値 (Avg.)	Avg. + $\sigma$	最大値
a_外気湿球温度	-0.07%	-0.34%	0.53%	1.40%	3.54%
b_負荷率	-0.07%	-0.14%	0.08%	0.30%	2.81%
c_冷却水温度	-4.47%	-1.24%	0.01%	1.27%	4.83%
d_冷却塔	-3.39%	-1.32%	0.19%	1.70%	7.29%
a + b	-0.07%	-0.35%	0.60%	1.54%	3.54%
c + d	-5.47%	-1.76%	0.20%	2.16%	9.04%
a + b + c	-4.32%	-0.97%	0.60%	2.17%	6.86%
a + b + d	-4.47%	-1.08%	0.71%	2.49%	7.00%
a + b + c + d	-5.87%	-1.46%	0.71%	2.89%	9.14%

### (1) 夏期ピーク

式(1)で冷却水温度の設定値を決める制御における電力消費量の増減割合の頻度を図-6に、増減割合の最大・最小などの統計値を表-2に示す。計算に用いた外気条件・負荷条件は、夏期ピークを想定し、25.0℃WB、負荷率99.5%とした。式(1)の変数は、aの外気湿球温度とbの負荷率であり、式の計算結果である冷却水温度の設定値が誤差の影響を受ける。a, b, a+bのグラフや統計値から、電力消費量が減少することはほぼなく、最大で約3%の電力消費量が誤差により増える結果となった。a単独の電力増減に対し、a+bでは最小値・最大値は変わらないものの、Avg.やAvg.+σはbとの複合影響で増加したと考えられる。cの冷却水温度に関しては、図-5に示したとおり、式(1)の最適運転とは関係ない冷却水温度であることから、正規分布で与えた誤差に対して電力消費量の増減もほぼ正規分布となった。dの冷却塔に関しては、cと同じ冷却塔出口の冷却水温度であるものの、当該温度を設定値になるように制御することから、最適運転の效果に影響し、cに比べて電力消費量が増加する側に分布が偏った。d単独の電力増減に対し、c+dでは増加する側に分布が偏りつつ、電力増減の割合が全体的に大きくなった。4項目すべての誤差を与えたa+b+c+dでは、電力消費量の増減が、-5.87%から+9.14%であり、Avg.は+0.71%と増加する側に分布が偏った。最適運転に影響するa, b, dは単独よりも組み合わせさせたほうがAvg.は増加することがわかった。一方、最適運転に関係ないcは、他の項目と組み合わせると全体的に割合は大きくなるものの、Avg.は変化しない。

式(2)で冷却塔ファン周波数の設定値を決める制御における電力消費量の増減を図-7に、増減の最大・最小などの統計値を表-3に示す。計算に用いた外気条件・負荷条件は、図-6、表-2と同じ夏期ピークである。式(2)の変数は、式(1)と同様にaの外気湿球温度とbの負荷率であり、式の計算結果である冷却水温度の設定値が誤差の影響を受ける。a, b, a+bのグラフや統計値から、冷却水温度設定と異なり冷却塔ファン周波数設定では電力消費量の増減がわずかであった。dは冷却水温度設定では最適運転に影響するが、冷却塔ファン周波数設定では最適運転に影響を与えない誤差であるため、ほぼ正規分布になった。冷却水温度設定では電力消費量が増加する側に分布が偏ったdや4項目すべての誤差を与えたa+b+c+dでも、電力消費量が増加する側に偏ることがなかった。

以上の結果から、aやbのように最適運転の式の変数になっている項目の誤差は、電力が減少する側にはほぼならず、増加する側に影響する。dの冷却塔モデルの精

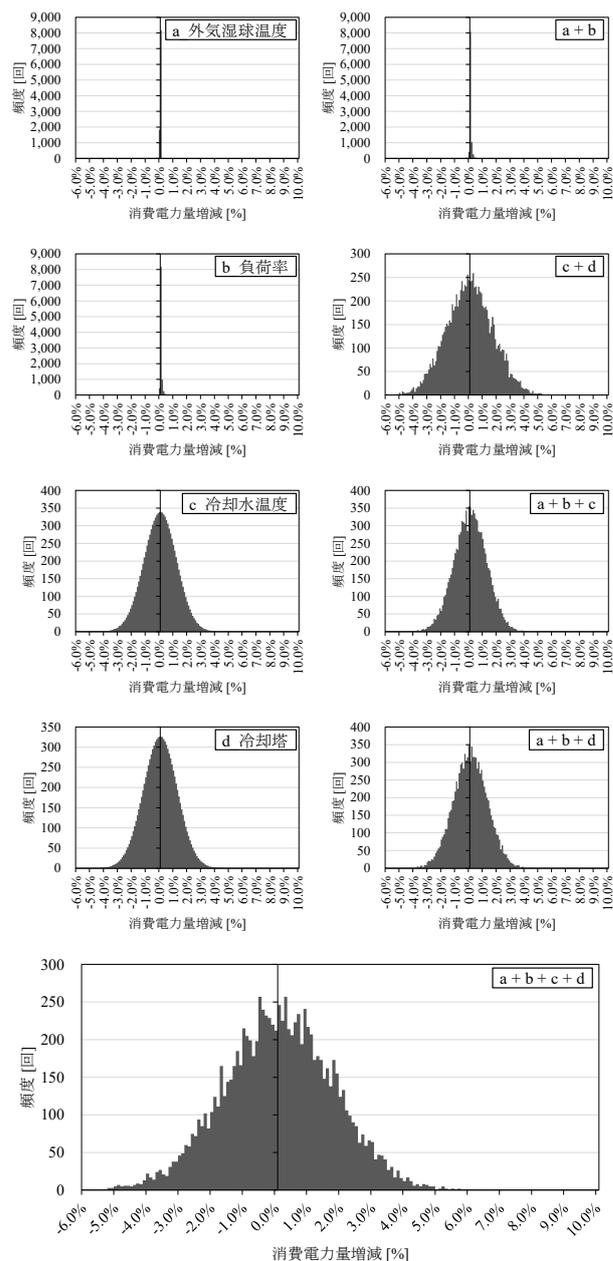


図-7 周波数設定の電力増減頻度（夏期）

表-3 周波数設定の電力増減の統計値（夏期）

	最小値	Avg. - σ	平均値 (Avg.)	Avg. + σ	最大値
a_外気湿球温度	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.01 %	0.03 %
b_負荷率	0.00 %	-0.02 %	0.05 %	0.12 %	0.98 %
c_冷却水温度	-4.45 %	-1.18 %	-0.01 %	1.17 %	4.29 %
d_冷却塔	-4.60 %	-1.22 %	0.00 %	1.22 %	4.48 %
a + b	0.00 %	-0.03 %	0.05 %	0.12 %	1.05 %
c + d	-6.49 %	-1.69 %	-0.01 %	1.67 %	6.41 %
a + b + c	-4.17 %	-1.13 %	0.04 %	1.22 %	4.28 %
a + b + d	-4.59 %	-1.18 %	0.04 %	1.27 %	4.45 %
a + b + c + d	-6.13 %	-1.67 %	0.04 %	1.74 %	6.79 %

度として与えた誤差は、式 (1) の冷却水温度設定のように最適運転と関係する場合には電力が増加する側に影響する。またこれらの誤差が複数存在すると、誤差同士で相殺されず電力の増加は加算されることがわかった。冷却塔ファン周波数設定と冷却塔ファン周波数設定との比較では、冷却塔ファン周波数設定のほうが誤差による電力の増加の影響は小さかった。さらに、冷却塔ファン周波数設定は、冷却塔モデルの冷却水温度の誤差と最適運転が直接関係せず、影響を受けなかった。なお、本研究では、冷却塔モデルに消費電力の誤差は与えていないが、c の冷却水温度の誤差と同様にモデルによる電力予測値が変化しただけなので、電力増減は正規分布に従うと考えられる。

## (2) 中間期

中間期を想定した外気条件 (16.7 °CWB) ・ 負荷条件 (39.1 %) で夏期ピークと同様の検討を行った。

式 (1) で冷却水温度の設定値を決める制御における電力消費量の増減割合の頻度を図-8 に、増減割合の最大・最小などの統計値を表-4 に示す。式 (2) で冷却塔ファン周波数の設定値を決める制御における電力消費量の増減頻度を図-9 に、増減の最大・最小などの統計値を表-5 に示す。夏期ピークに比べて誤差がない基準となる電力消費量が小さいため、電力消費量の減少・増加の割合が大きくなっている。電力消費量の傾向としては夏期ピークと同じであった。式 (1) や式 (2) の変数である a, b, a+b のグラフや統計値から、冷却水温度設定では電力消費量が減少することはほぼなく、最大で約 27% の電力消費量が誤差により増える結果となっており、冷却塔ファン周波数設定では電力消費量の増減がわずかであった。式 (1) の Avg. は、a, b, d 単独では正 (増加側に偏り) であり、組み合わせさせた a+b, a+b+d では単独時の Avg. よりも大きくなっている。最適運転と関係ない c が組み合わせさせた c+d, a+b+c, a+b+c+d は、c が組み合わせる前と比べて全体的に割合は大きくなるものの、Avg. は変化しない。

以上から、中間期のように負荷が小さいときのほうが、センサ誤差やシミュレーションモデル精度の影響を受けやすく、誤差に対して注意が必要である。そのような中間期の条件でも、夏期ピークと同様に冷却水温度を設定値とするよりも冷却塔ファン周波数を設定値とするほうが、誤差があっても、最適運転で想定した電力消費量に近い結果が得られることを確認できた。

## 3. 制御方法別の年間電力消費量の比較

2. ではセンサ誤差やモデル誤差を与えて 1 条件の外気・負荷に対して電力消費量の増減を把握したが、ここ

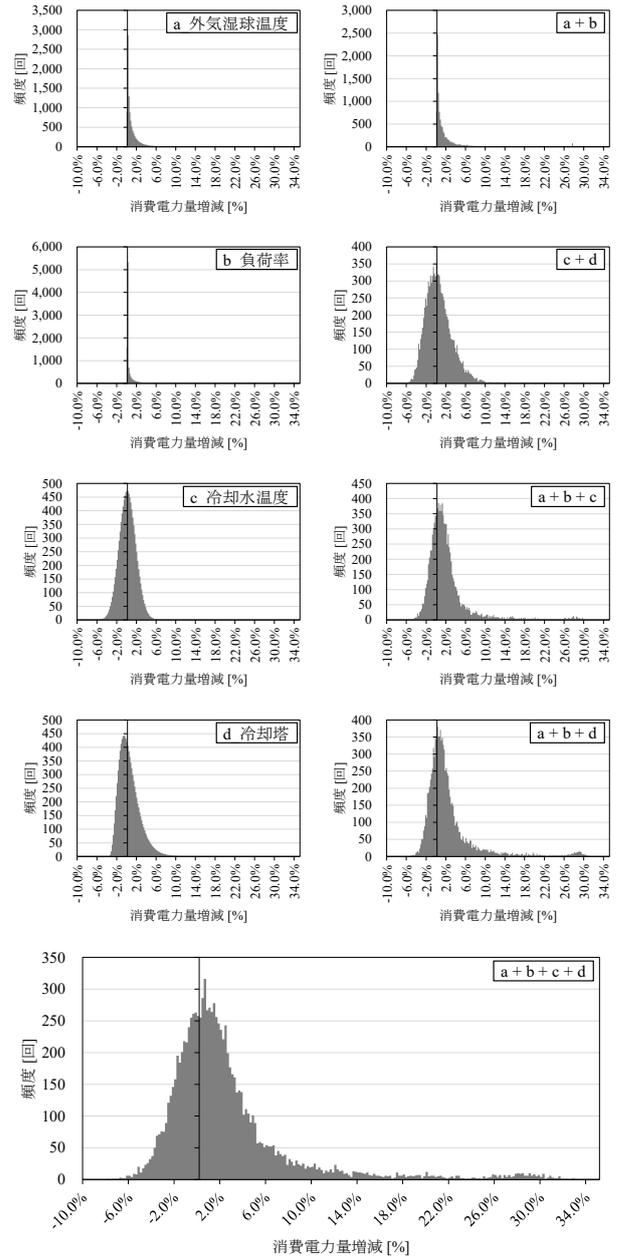


図-8 冷却水温度設定の電力増減頻度 (中間期)

表-4 冷却水温度設定の電力増減の統計値 (中間期)

	最小値	Avg. - $\sigma$	平均値 (Avg.)	Avg. + $\sigma$	最大値
a_外気湿球温度	-0.01%	-0.92%	1.05%	3.01%	27.56%
b_負荷率	-0.01%	-1.56%	0.71%	2.99%	27.60%
c_冷却水温度	-5.85%	-1.65%	0.03%	1.71%	6.62%
d_冷却塔	-3.57%	-1.73%	0.36%	2.46%	14.12%
a+b	-0.01%	-2.14%	1.95%	6.03%	27.60%
c+d	-6.77%	-2.30%	0.39%	3.08%	14.32%
a+b+c	-5.89%	-2.55%	1.97%	6.49%	31.69%
a+b+d	-6.49%	-3.02%	2.38%	7.77%	31.87%
a+b+c+d	-7.92%	-3.29%	2.38%	8.06%	34.08%

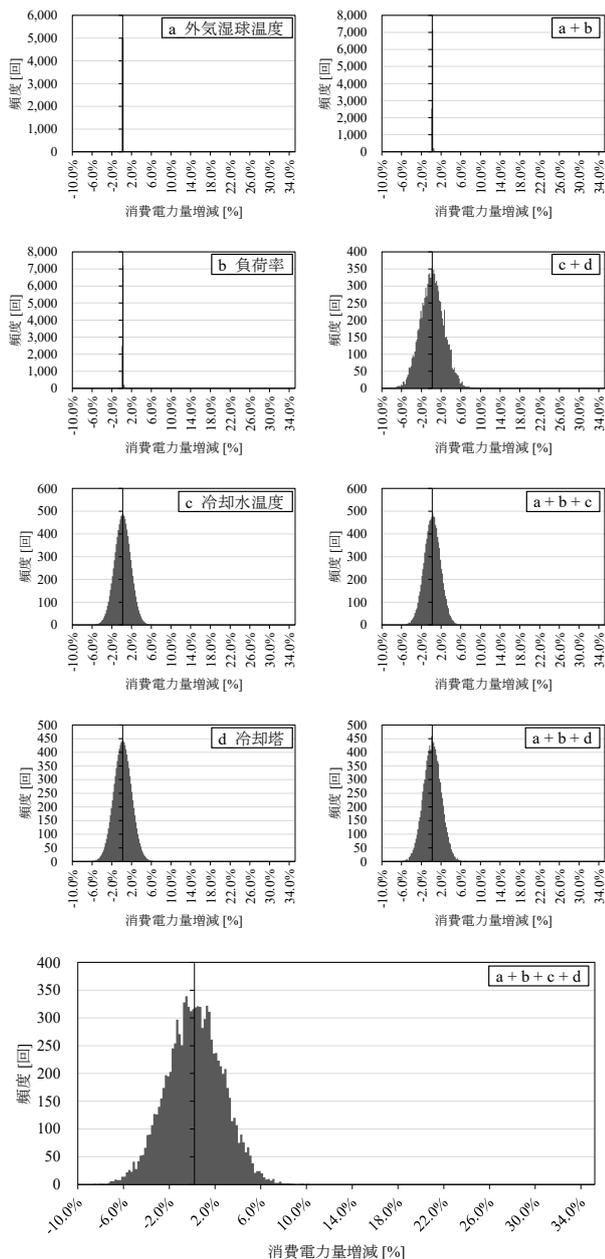


図-9 周波数設定の電力増減頻度（中間期）

表-5 周波数設定の電力増減の統計値（中間期）

	最小値	Avg. - $\sigma$	平均値 (Avg.)	Avg. + $\sigma$	最大値
a_外気湿球温度	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
b_負荷率	0.00%	-0.06%	0.03%	0.12%	1.98%
c_冷却水温度	-6.16%	-1.64%	0.00%	1.63%	6.04%
d_冷却塔	-6.67%	-1.80%	0.00%	1.80%	6.71%
a+b	0.00%	-0.06%	0.03%	0.12%	1.98%
c+d	-9.13%	-2.42%	0.00%	2.41%	9.31%
a+b+c	-6.10%	-1.62%	0.03%	1.67%	6.04%
a+b+d	-6.65%	-1.78%	0.03%	1.84%	6.76%
a+b+c+d	-8.68%	-2.44%	0.03%	2.49%	9.87%

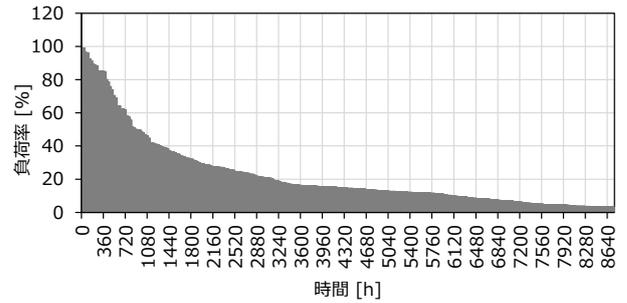


図-10 年間計算に用いた負荷持続曲線

表-6 年間電力量の比較ケース一覧

ケース名	設定値とする項目	設定値の決め方
T_32	冷却水温度	32℃一定
T_12	冷却水温度	12℃一定
T_WB	冷却水温度	(外気湿球温度の値 + 4)℃
T_Opt	冷却水温度	式 (1)
F_60	ファン周波数	60 Hz 一定
F_42	ファン周波数	42 Hz 一定
F_WB	ファン周波数	(外気湿球温度の値 + 32) Hz
F_Opt	ファン周波数	式 (2)

ではセンサ誤差やモデル誤差を与えて1年間の外気・負荷で計算し、誤差がない場合に対して年間電力消費量がどのように増減するか確認する。

### 3.1 比較概要

年間の電力消費量算出に用いた外気・負荷条件は、実在の建物のデータを活用し、負荷は対象システムの定格能力に合わせ定数を乗じて調整して用いた。月代表日の24時間(288h=24×12)で計算し、計算結果に月別の日数をかけて年間電力消費量を算出した。年間計算に用いた負荷を大きい順に並べた負荷持続曲線を図-10に示す。

センサ誤差とモデル誤差については、2.1で作成した4項目すべての誤差を与えたa+b+c+dの10,000回の試行のうち、288点を無作為に抽出して用いた。

年間電力消費量の誤差の有無に対する評価は、式(1)と式(2)を用いた冷却水温度設定と冷却塔ファン周波数設定だけでなく、冷却水温度の設定値が一定など一般的な制御も比較対象とした。比較対象とした制御方法を表-6に示す。

T\_WB, F\_42, F\_WBの設定値は、他に適切な値があるかもしれない(例えばT\_WBは外気湿球温度+3℃のほうが+4℃よりも電力消費量が小さい可能性があるなど)が、本研究の主題ではないため、恣意的に設定した。なお、T\_OptとF\_Optは、1.2に記載したように冷却塔は全台数運転であるが、それ以外の制御方法では冷却塔の電力消費量が過大となるため、冷却水流量に合わせて台数制御するものとして計算した。

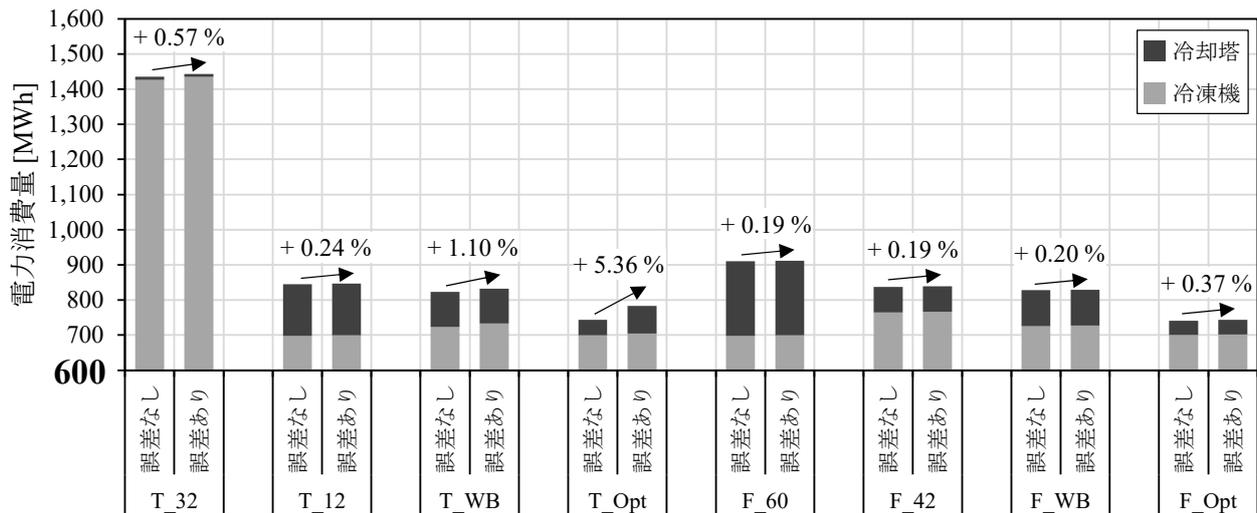


図-11 誤差の有無による電力消費量の比較

### 3.2 誤差の有無による年間電力消費量の増減

誤差を与えずに年間電力消費量を計算した場合と、前述の誤差を与えた場合の比較を図-11 に示す。冷却水ポンプと冷水ポンプは、どの計算結果も同じ値のため年間電力消費量には含めなかった。図-11 中に表記した割合は、誤差なしから誤差ありへの年間電力消費量の増加率である。

T\_32, T\_12, T\_WB, T\_Opt は冷却水温度設定であり、F\_60, F\_42, F\_WB, F\_Opt は冷却塔ファン周波数設定である。冷却水温度設定の中では、T\_32 や T\_12 と比較して、外気湿球温度が設定値を計算する式に含まれる T\_WB の誤差ありの増加率が 1.10% と大きく、外気湿球温度と負荷率が設定値を計算する式に含まれる T\_Opt の 5.36% と増加率が最も大きかった。冷却塔ファン周波数設定も増加率の数値自体は最大の F\_Opt でも 0.37% と小さいものの、設定値の決め方による傾向は冷却水温度設定と同じであった。

夏期や中間期の外気・負荷を想定し、同じようにすべての誤差を与えて計算した表-2 から表-5 の a + b + c + d の Avg. の結果よりも、図-11 の T\_Opt, F\_Opt の誤差による増加率の方が大きくなった。これは、図-10 に示したように年間の負荷は夏期（負荷率 99.5%）や中間期（負荷率 39.1%）を想定して与えた負荷よりも小さい時間が長いことに起因する。夏期と中間期の比較でも明らかになったように、負荷が小さいほうが誤差の影響が大きい。そのため、年間計算の結果では、誤差による影響がさらに大きく表れた。

既往研究でも冷却塔ファン周波数設定の優位性について言及しており、式 (1) や式 (2) が最適値を ”近似した” 式である影響に着目して、式の 2 つの変数 (a, b) に個別に一定の誤差を与え、冷却塔ファン周波数のほうが

誤差の影響を受けにくいことを明らかにした。本研究では、さまざまな値 (10,000 点の正規分布) の誤差を与え、式の変数だけでなく、それ以外の計測値の誤差やモデルの精度など新しい誤差を加え、それらの複合影響なども加味して検討した。その結果、2.2 節 (1) で述べたように、最適運転の式の変数 a, b の誤差は、電力が増加する側に影響し、d の冷却塔モデル精度の誤差は、最適運転と関係する場合には電力が増加する側に影響する。またこれらの誤差が複数存在すると、電力の増加は加算されることがわかった。既往研究でも言及した冷却水温度設定と冷却塔ファン周波数設定との比較では、さまざまな誤差の値、種類、組み合わせにおいても、すべての条件下で冷却塔ファン周波数設定のほうが誤差による電力の増加の影響は小さかった。また、T\_32 (0.57%) と F\_60 (0.19%)、T\_12 (0.24%) と F\_42 (0.19%)、T\_WB (1.10%) と F\_WB (0.20%) のように、式 (1) や式 (2) 以外の制御方法の比較でも、冷却塔ファン周波数設定のほうが誤差による電力の増加の影響は小さかった。これは、冷却水温度設定のように冷却水温度のフィードバック制御ではなく、冷却塔ファン周波数設定ではファン周波数を直接与えるため冷却塔モデルの精度 (冷却水温度) の影響を受けないことも一因であると考えられる。

### ま と め

冷却水サブシステムを対象として、外気湿球温度や冷却水温度などセンサの計測値に誤差がある場合や、シミュレーションモデルの精度に誤差がある場合を想定して計算した。正規分布の誤差に対する電力消費量の増減や、誤差の有無による年間電力消費量の比較を行い、想定した誤差による電力消費量の増減を定量的に評価した。電力消費量の増減を最大・最小や平均値などで比較した

ほか、年間計算では誤差なしに対し誤差ありのほうが、冷却水温度設定の最適運転では 5.36 %増加し、冷却塔ファン周波数設定では 0.37 %増加した。

冷却水温度設定と冷却塔ファン周波数設定の比較では、冷却塔ファン周波数設定のほうが電力消費量の誤差による増加が抑えられ、冷却塔ファン周波数設定を設定値とするほうがセンサ誤差やシミュレーションモデル精度に誤差があっても電力の増加がなく影響を受けにくいという仮説が裏付けられた。

本研究で示された冷却塔ファン周波数設定に関しては、実システムでの運用データが少ないため、今後実システムでの評価を行う予定である。評価時には、冷却塔ファン周波数設定のほか、開放式と密閉式(散水ポンプあり)の比較検証や、補給水の影響も加味した検討を行う。

## 謝 辞

本研究を進めるに当たり、須磨水族園再開発プロジェクトの Cx チーム(竹中工務店、新菱冷熱工業、アズビル、コミッションング企画(神戸製鋼、三菱重工サーマルシステムズ、川重冷熱工業))メンバーの方々から多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 矢島 他:熱源・空調システムの最適制御技術の導入に向けた研究,(第1報)冷却水温度の設定値最適化と実測による

効果検証,空気調和・衛生工学会論文集, No. 248(2017年), pp. 11-19

- 2) 吉田 他:大規模複合用途建物の熱源・空調設備改修プロジェクトのコミッションング,(第13報)冷熱源システムの最適運転法の手法と実装システムの開発,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,第8巻(2018年), pp. 77-80
- 3) 岡本 他:人工知能を用いた熱源システムの運用最適化技術の開発,(第2報)実証試験の概要と結果,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,第2巻(2017年), pp. 149-153
- 4) 矢崎 他:都市型地域冷暖房の省エネルギー手法に関する研究,(その5)AI技術を活用した最適設定自動化手法の改良と複数台熱源での評価,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,第2巻(2022年), pp. 125-128
- 5) 矢島 他:熱源・空調システムの最適制御技術の導入に向けた研究,(第2報)冷却塔ファン周波数の設定値最適化と実測による効果検証,空気調和・衛生工学会論文集, No. 254(2018年), pp. 33-42
- 6) 田中 他:ライフサイクルエネルギーマネジメントのための空調システムシミュレーションツール(LCEM ツール)の機能拡張に関する研究,(第1報)熱源機器および開放形冷却塔の特性式作成支援ツールの検討,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,第5巻(2021年), pp. 121-124

# Evaluation of the Impact of Sensor Error and Simulation Model Accuracy on the Power Consumption of the Cooling Water Subsystem

by Kazuki YAJIMA <sup>\*1</sup>, Masahide FUKUI <sup>\*1</sup> and Tatsunori MAEDA <sup>\*2</sup>

**Synopsis** : Cooling water subsystems, which consist of water-cooled chillers, cooling towers, and cooling water pumps, have been studied for efficient operation. On the other hand, the cooling tower, which constitutes the cooling water subsystem, is highly affected by external disturbances. Deviations between desk studies like simulations and the actual system tend to be larger than for other equipment. Therefore, we used system simulation to

understand the simulations were run to devise the control method for the system. The control method was introduced to an operational plant to verify the method and evaluate energy reduction effects. The post-implementation verification revealed points for additional improvement, leading to further efficiency of the energy performance.

---

<sup>\*1</sup> SHINRYO CORPORATION

<sup>\*2</sup> TOBU ENERGY MANAGEMENT CO.,LTD.