

# 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6報) 冷却水システムの省CO<sub>2</sub>運転に向けた補給水の影響評価

○尾形 甫 (新菱冷熱工業)  
矢島 和樹 (新菱冷熱工業)

福井 雅英 (新菱冷熱工業)

2050年に脱炭素社会を実現するため、CO<sub>2</sub>排出量の削減が不可欠であり、熱源・空調システムにおいても対応が求められている。これまで、熱源・空調システムの高効率運転については、省エネルギーを主眼として数多くの研究が進められてきたが、主な評価指標は電力とガスの一次換算エネルギー消費量であった。脱炭素の取組みには、評価指標をCO<sub>2</sub>排出量としたうえ、電力とガス以外のCO<sub>2</sub>排出源も加え、総合的にCO<sub>2</sub>排出量を捉える必要がある。そこで本報では、熱源設備で消費される電力およびガスのほか、冷却塔の補給水も対象に加え、熱源設備のCO<sub>2</sub>排出傾向および補給水が運転コストに与える影響も評価し、省CO<sub>2</sub>運転と経済性を両立できる可能性を模索した。その結果、補給水量がCO<sub>2</sub>排出量に与える影響は小さいが、運転コストに与える影響は大きいと判明した。さらに、吸収式冷凍機と定速ターボ冷凍機は、省CO<sub>2</sub>運転の効果がきわめて限定的であることが示唆された。一方で、インバータターボ冷凍機は、運用方法を変えることでCO<sub>2</sub>排出量を削減できる可能性があると判明した。

## 1. はじめに

2050年に脱炭素社会を実現するためには、CO<sub>2</sub>排出量の多いエネルギー分野における取組みが重要である。製造側では非化石エネルギーへの転換や高効率化が、需要側では、使用量のさらなる削減や未利用エネルギーの活用が求められている。需要側にあたる空調設備では、エネルギーの大部分を熱源設備で消費しており<sup>1)</sup>、熱源設備の高効率運転は重要な課題である。

既報<sup>2)</sup>では、電力とガスの一次換算エネルギー消費量を評価指標とした制御方法と、制御方法の導入効果についてまとめた。一方、脱炭素の取組みには、評価指標をCO<sub>2</sub>排出量とすることが望ましい。また評価指標には、電力とガス以外のCO<sub>2</sub>排出源も加え、網羅的にCO<sub>2</sub>排出量を捉えるべきである。

そこで本報では、熱源設備から排出されるCO<sub>2</sub>が最小量となる運転条件を調査するため、シミュレーションによる検討を行った。CO<sub>2</sub>排出源として、熱源設備で消費される電力およびガスのほか、冷却塔の補給水も対象とした。さらにSDGs<sup>3)</sup>では、「社会・経済・環境に統合的に取り組む」と定められているため、省CO<sub>2</sub>運転が運転コストに与える影響についても評価した。

## 2. シミュレーションモデル

### 2.1. システム構成

検討には、LCEM ツール (Ver3.10) を用いた。対象のシステムは、冷凍機、冷却塔および冷却水ポンプがすべて1台で構成されるシステムとし、冷凍機の機種

ごとに三つのシミュレーションモデルを作成した。冷凍機の機種は、ガス直焚吸収冷温水機 (以下、AR)、定速ターボ冷凍機 (以下、TR) およびインバータターボ冷凍機 (以下、ITR) とし、冷凍能力はおのおの500 USRtとした。冷却塔および冷却水ポンプは、各冷凍機の放熱量および冷却水流量に見合う機種を選定し、それぞれインバータ搭載機<sup>4)</sup>とした。各モデルの機器仕様を表-1に示す。

表-1 機器仕様

		AR	TR	ITR
冷凍機				
能力	USRt	500	500	500
	(kW)	(1,758)	(1,758)	(1,758)
ガス	Nm <sup>3</sup> /h	106.3	-	-
電力 (主)	kW	-	295.0	304.0
電力 (補)	kW	10.0	5.0	1.2
冷水	°C	7	7	7
	L/min	5,040	5,040	5,040
冷却水	°C	32	32	32
	L/min	8,333	5,878	6,167
冷却水ポンプ				
流量	L/min	8,333	5,878	6,167
電動機	kW	75	45	45
揚程	kPa	210	210	210
開放式冷却塔				
水量	L/min	10,667	8,000	8,000
電力	kW	22.0	16.5	16.5
風量	m <sup>3</sup> /min	6,080	4,560	4,560

### 2.2. 補給水量の計算

熱源システムでは、冷熱を製造した際にシステム内で発生した熱や、負荷として回収した熱を冷却塔から大気

に放出している。冷却塔<sup>5)</sup>は、循環水と大気の間で顕熱および潜熱(循環水の一部が蒸発し、外気へ移動)による熱交換を行っている。空調設備で広く採用される開放式冷却塔の概要図を図-1に示す。開放式冷却塔は、冷却塔上部に設けたファンにより強制的に塔内を通風し、蒸発を促進させる方式である。また、冷却塔を継続的に稼働させるには、式(1)で示す補給水量の確保が必要である。

$$W_r = W_e + W_s + W_c \quad \dots\dots (1)$$

$W_r$  : 補給水量 [m<sup>3</sup>]  
 $W_e$  : 蒸発した水量 [m<sup>3</sup>]  
 $W_s$  : 機外に飛散した水量 [m<sup>3</sup>]  
 $W_c$  : ブロー水量 [m<sup>3</sup>]

蒸発した水量は、塔内で循環水の一部が蒸発し、塔外に水蒸気として放出される量である。したがって、冷却塔出入口空気の絶対湿度差と風量から求めることができ、式(2)で表される。

$$W_e = (D_{out} - D_{in}) \times Q \times \rho_a \div \rho_w \quad \dots\dots (2)$$

$D_{in}$  : 入口空気の絶対湿度 [kg/kg(DA)]  
 $D_{out}$  : 出口空気の絶対湿度 [kg/kg(DA)]  
 $Q$  : 冷却塔の風量 [m<sup>3</sup>]  
 $\rho_a$  : 空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_w$  : 水密度 [kg/m<sup>3</sup>]

出口空気の状態は、次の条件を満たすように表計算ソフトの機能による収束計算で求めた。

- 1) 冷却塔出入口空気の比エンタルピー増加量は、冷却水が失ったエネルギー量に等しい
- 2) 冷却塔出口空気の乾球温度は、冷却水入口温度より低い
- 3) 冷却塔出口空気の相対湿度は、100%RH未滿

機外に飛散した水量は、冷却塔の上部水槽から下部水槽へ循環水を滴下した際に、水滴のまま塔外へ飛散する水量であり、本報告では一律で循環水量の0.1%とした。水の蒸発によって、循環水のミネラル成分が濃縮されると、機内や管内にスケールやスライムが発生し、機器の性能低下を招く恐れがある。一般的な対策として、循環水のブローを実施する。ブロー水量は、循環水のミネラル成分の濃度を一定の管理値まで希釈するために必要な水量であり、式(3)で表される。

$$W_c = (EC_p - EC_s) \div (EC_s - EC_b) \times V \quad \dots\dots (3)$$

$EC_p$  : 現在の導電率 [mS/m]  
 $EC_s$  : ブロー停止導電率 [mS/m]  
 $EC_b$  : 補給水の導電率 [mS/m]  
 $V$  : 系統の保有水量 [m<sup>3</sup>]

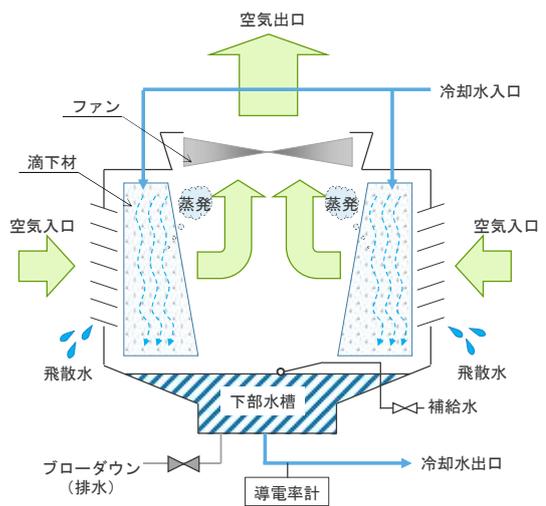


図-1 開放式冷却塔の概要図

### 3. CO<sub>2</sub> 排出状況の把握

熱源設備のCO<sub>2</sub>排出量と運転コストを把握するため、外気条件、負荷条件および運転パラメータを変数にシミュレーションを行った。CO<sub>2</sub>排出量と運転コストの算出には、シミュレーションで得られた電力量、ガス使用量、給水量および表-2の換算係数<sup>6)</sup>を用いた。なお、運転コスト換算係数は、東京都内における供給事業者の公表値を使用した。

#### 3.1. シミュレーション条件

シミュレーションは、次に示す値の組合せで行った。なお、冷却水設定温度とは、シミュレーション内の冷却水温度目標値である。冷却水温度は、冷却水設定温度が冷却塔ファンの制御範囲内であれば、冷却塔設定温度と等しくなる。制御範囲内になければ、ファンがフルロード運転した状態の値が返される。

外気乾球温度	: 10~35℃	5℃ごと
外気相対湿度	: 10~100%RH	5%RHごと
冷凍機負荷率	: 10~100%	5%ごと
冷却水設定温度(AR,TR)	: 20~32℃	1℃ごと
冷却水設定温度(ITR)	: 12~32℃	1℃ごと

冷却水流量は、冷凍機出入口温度差5Kの可変流量で、下限流量は50%とした。また冷水供給温度は、一定で7℃とした。

表-2 換算係数

	電力	ガス	水
CO <sub>2</sub> 換算係数	0.457 kg/kWh	2.19 kg/Nm <sup>3</sup>	0.253 kg/m <sup>3</sup>
コスト換算係数	16.1 円/kWh	79.8 円/Nm <sup>3</sup>	404.0 円/m <sup>3</sup>

#### 3.2. 結果と考察

乾球温度25℃、相対湿度60%RHかつ冷凍機負荷率80%の結果を抜粋し、図-2に示す。冷却水設定温度が23℃以下では、冷却水温度が設定値を満たさず冷却塔フ

アンがフルロード運転しており、すべて同じ結果である。CO<sub>2</sub>排出量は、AR、TRは25℃設定、ITRでは23℃設定がもっとも少なかった。冷却塔における消費電力と補給水から算出されるCO<sub>2</sub>排出量は、システム全体の10%未満であった。運転コストは、AR、TRは28℃設定、ITRでは26℃設定がもっとも少なかった。冷却塔における消費電力と補給水の運転コストは、システム全体の20~35%であった。CO<sub>2</sub>排出量と運転コストは、冷却水温度を高くするほど、冷却塔電力と補給水で減少し、冷凍機のガス消費量または電力量が増加する傾向であった。またすべてのモデルで、CO<sub>2</sub>排出量を最小にする冷却水温度は、運転コストを最小にする冷却水温度に比べ、低い結果であった。

次に、乾球温度10℃、相対湿度20%RHかつ冷凍機負荷率20%の結果を抜粋し、図-3に示す。CO<sub>2</sub>排出量は、3モデルともに下限設定値でもっとも少なく、設定値が高

くなるほど増加する傾向にあった。ARとTRの運転コストは、CO<sub>2</sub>排出量と同様に下限設定値でもっとも低く、設定値が高くなるほど増加する傾向にあった。ITRの運転コストは、13℃設定で最小となり、CO<sub>2</sub>排出量が最小となる設定値より1℃高いが、12℃設定の運転コストと13℃設定の運転コストに大きな違いはなかった。

これまでの傾向より、補給水量がシステム全体のCO<sub>2</sub>排出量に与える影響は小さいが、運転コストに与える影響は大きい。これは、水1m<sup>3</sup>当たりの換算値に起因している。水1m<sup>3</sup>のCO<sub>2</sub>排出量に相当する電力量は0.6kWhであり、水1m<sup>3</sup>の運転コストに相当する電力量は25.1kWhである。よって、システム全体のCO<sub>2</sub>排出量を削減するには電力の重みが大きくなり、運転コストを削減するには水の重みが大きくなる。そのため評価指標により、異なる制御方法を採用する必要がある。

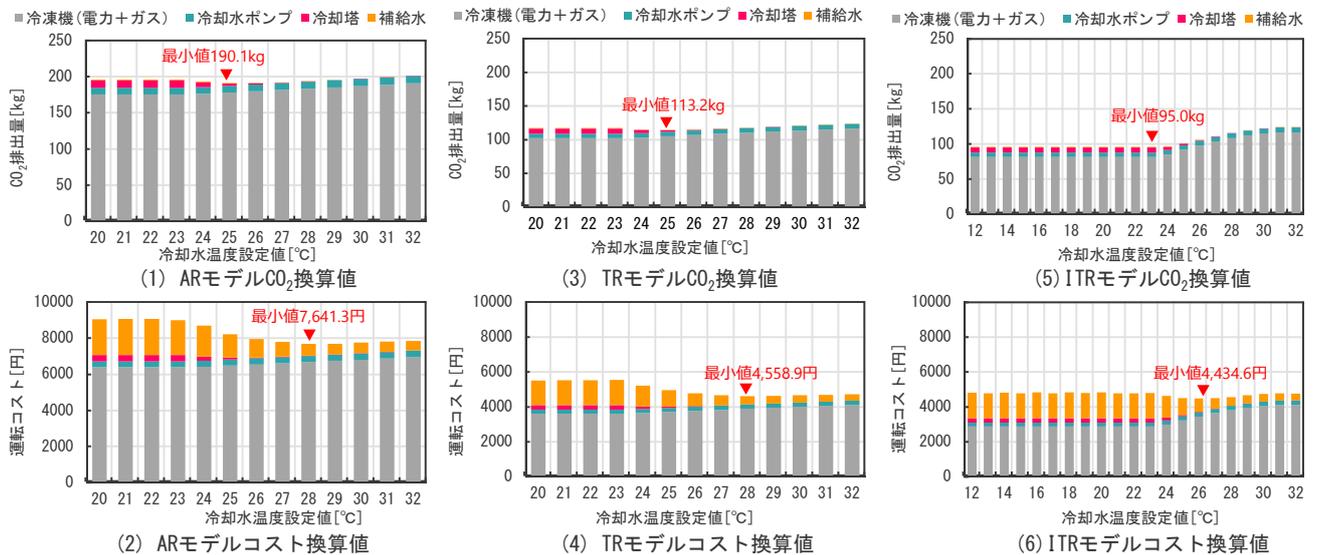


図-2 25℃ 60%RH 負荷率80%の結果

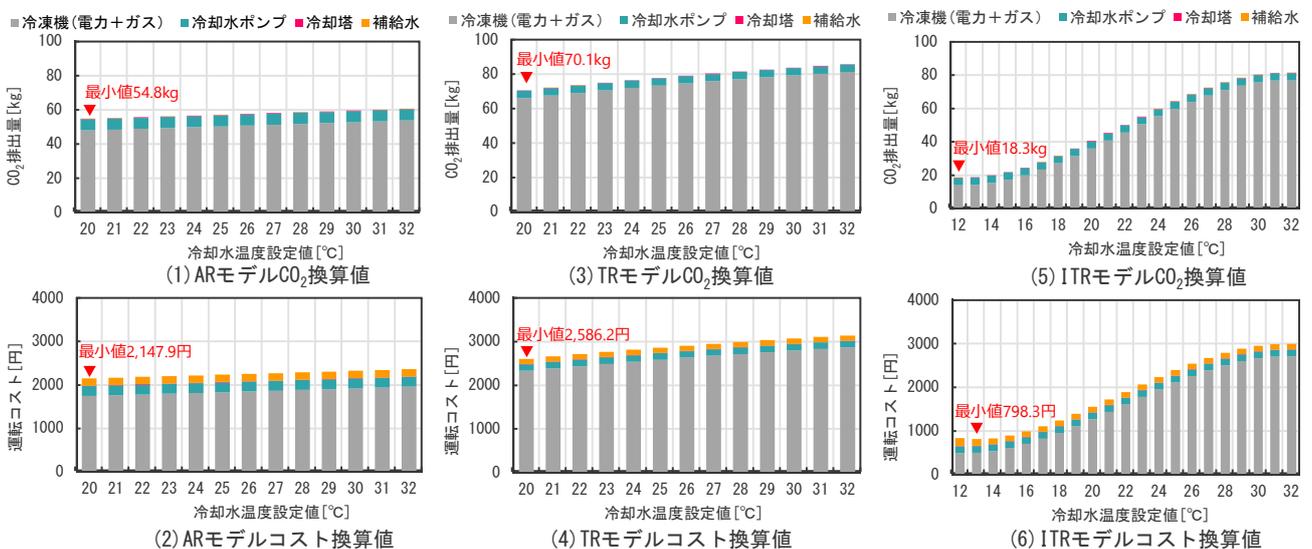


図-3 10℃ 20%RH 負荷率20%の結果

#### 4. 省 CO<sub>2</sub> 運転の効果

省 CO<sub>2</sub> 運転の効果を定量的に評価するため、年間の外気・負荷条件を想定した検討を行った。また、省 CO<sub>2</sub> を目的として運転した場合に、運転コストにどのような影響を及ぼすか検討した。

##### 4.1. シミュレーション条件

外気・負荷条件は、実建物における月代表日の 24 h データを用いた。月間の試算は、シミュレーション結果に月ごとの日数を乗じた。なお、負荷は、対象システムの冷凍能力に合わせた定数を乗じ調整した。冷却水下限温度は、3.1 節と同様の範囲で、0.2 °C 刻みとした。冷却水流量と冷水温度の制御は、3.1 節と同様である。

また、一般的に広く用いられる省エネルギー制御である冷却水出口温度と外気湿球温度の差（アプローチ温度）を一定とする方法を比較対象とした。比較対象の冷却水温度の設定値は外気湿球温度+4 °C とした（以下、一般）。

##### 4.2. 結果と考察

表-3 に月間の CO<sub>2</sub> 排出量と運転コストの比較を、図-4 に年間の CO<sub>2</sub> 排出量を示す。CO<sub>2</sub> 最小化の値は、各外気・負荷条件ごとにシステム全体の CO<sub>2</sub> 排出量が最小となった結果を求め、積算したものである。

ITR の CO<sub>2</sub> 排出量は、年間を通じて削減されており、削減率は-6.9%であった。とくに中間期では、10%超であり効果大きい。運転コストは、4, 7, 8, 11 月でわずかに増加しているが、年間では-1.5%であった。

AR と TR の CO<sub>2</sub> 排出量は、4 月から 11 月にかけて削減されるが、冬期には効果がなかった。また、年間の削減率は 1%未滿とわずかであった。AR の運転コストは、年間で-1.2%であった。運転コストが増加した月は、10 月のみであった。TR の運転コストは、年間で-0.3%であった。しかし、多数の月で運転コストが増加しており、省 CO<sub>2</sub> と経済性の両立が困難であると推測される。

ITR のみ中間期や冬期で、CO<sub>2</sub> 排出量の削減が確認できた要因として、冷却水温度下限値の違いが考えられる。中間期や冬期は、外気の乾球温度が低く、湿球温度も低い。そのため、容易に冷却水温度を下げられるが、AR と TR は 20 °C が下限のため、調整の余地がなかったと推察される。

#### 5. まとめ

本報では、熱源設備から排出される CO<sub>2</sub> 排出量が最小となる運転条件と運転コストへの影響を調査するため、シミュレーションを行い、以下の知見を得た。

- 1) 水の消費量が、システム全体の CO<sub>2</sub> 排出量に与える影響は小さい。
- 2) 水の消費量が、システム全体の運転コストに与える影響は大きい。

3) ITR は、省 CO<sub>2</sub> 運転の効果大きい。AR と TR

は、夏期を中心にわずかな期間しか効果がない。

今後は、複数台の冷凍機と冷却塔で構成された複雑なシステムでの検討を行う。また実態調査を行い、シミュレーション精度の評価と防食剤の消費量などその他の CO<sub>2</sub> 排出源を調査する予定である。

表-3 CO<sub>2</sub> 排出量と運転コストの月積算値比較

	AR				TR				ITR			
	CO <sub>2</sub> 排出量[t]		コスト[千円]		CO <sub>2</sub> 排出量[t]		コスト[千円]		CO <sub>2</sub> 排出量[t]		コスト[千円]	
	一般	CO <sub>2</sub> 最小化	一般	CO <sub>2</sub> 最小化	一般	CO <sub>2</sub> 最小化	一般	CO <sub>2</sub> 最小化	一般	CO <sub>2</sub> 最小化	一般	CO <sub>2</sub> 最小化
1月	20.6	20.6	865	865	40.9	40.9	1,527	1,527	18.4	18.4	740	738
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.3%	-0.3%	-0.3%	-0.3%
2月	19.6	19.6	817	817	36.9	36.9	1,382	1,382	16.1	16.1	650	648
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.3%	-0.3%	-0.3%	-0.3%
3月	25.6	25.6	1,080	1,075	41.1	41.1	1,574	1,574	16.4	16.4	695	687
	0.0%	0.0%	-0.5%	-0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.5%	-0.5%	-1.2%	-1.2%
4月	32.1	32.0	1,358	1,341	45.5	44.7	1,762	1,770	17.8	16.7	771	782
	-0.4%	-0.4%	-1.2%	-1.2%	-1.8%	-1.8%	0.5%	0.5%	-6.1%	-6.1%	1.4%	1.4%
5月	41.1	40.9	1,716	1,698	52.2	51.4	2,019	2,041	30.4	25.7	1,242	1,192
	-0.4%	-0.4%	-1.0%	-1.0%	-1.5%	-1.5%	1.1%	1.1%	-15.3%	-15.3%	-4.0%	-4.0%
6月	50.6	50.4	2,072	2,062	57.4	56.6	2,209	2,227	43.6	37.9	1,722	1,646
	-0.4%	-0.4%	-0.5%	-0.5%	-1.5%	-1.5%	0.8%	0.8%	-13.0%	-13.0%	-4.4%	-4.4%
7月	92.4	91.9	3,883	3,795	71.9	71.3	2,907	2,881	67.3	64.3	2,772	2,784
	-0.5%	-0.5%	-2.3%	-2.3%	-0.8%	-0.8%	-0.9%	-0.9%	-4.5%	-4.5%	0.4%	0.4%
8月	107.1	106.6	4,530	4,418	77.4	76.9	3,171	3,127	75.3	73.0	3,133	3,143
	-0.5%	-0.5%	-2.5%	-2.5%	-0.7%	-0.7%	-1.4%	-1.4%	-3.1%	-3.1%	0.3%	0.3%
9月	61.5	61.2	2,513	2,495	61.8	61.0	2,393	2,397	53.1	47.8	2,092	2,037
	-0.4%	-0.4%	-0.7%	-0.7%	-1.3%	-1.3%	0.2%	0.2%	-9.9%	-9.9%	-2.6%	-2.6%
10月	37.1	37.0	1,508	1,509	51.4	50.5	1,941	1,958	29.6	24.5	1,167	1,081
	-0.4%	-0.4%	0.1%	0.1%	-1.8%	-1.8%	0.9%	0.9%	-17.2%	-17.2%	-7.4%	-7.4%
11月	28.1	28.0	1,171	1,161	42.9	42.6	1,633	1,641	16.4	16.2	694	703
	-0.1%	-0.1%	-0.8%	-0.8%	-0.7%	-0.7%	0.5%	0.5%	-1.3%	-1.3%	1.3%	1.3%
12月	22.9	22.9	954	954	40.9	40.9	1,537	1,537	17.3	17.3	707	704
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.3%	-0.3%	-0.4%	-0.4%

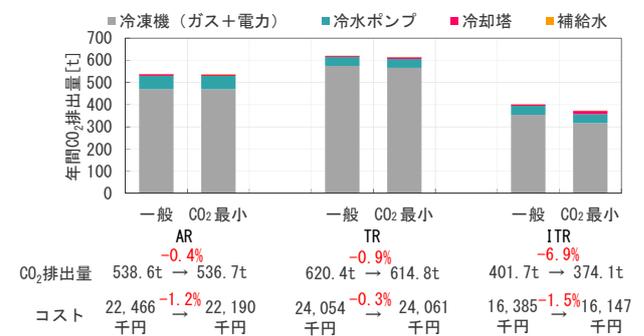


図-4 年間の CO<sub>2</sub> 排出量

#### 参考文献

- 1) 省エネルギーセンター編. オフィスビルの省エネルギー. 2009年, pp3-4
- 2) 矢島, 他. (2014~2016). 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~第3報). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集.
- 3) 国際連合広報センター. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. p.3
- 4) 田中, 他. (2021). 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 (LCESM ツール) の機能拡張に関する研究 (第1報). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集.
- 5) 内田秀雄. 湿り空気と冷却塔 (改訂版), 裳華房, 1972年, pp.156-182
- 6) 東京都水道局編. 環境報告書 2020. 2020年. p.69