

氷蓄熱式チルドタワー®の開発

Development of Chilled-Tower with Ice Storage System

田中 敏男* Toshio Tanaka
大槻 賢治* Kenji Ohtsuki
五十嵐正史** Masashi Igarashi
菊原 修二*** Shuji Kikuhara

地球環境保全の観点から、各企業においては省エネルギー・省資源への取り組みが盛んに行われている。一方、産業分野にあつては生産装置の高精度化・高密度化に伴い15 ～ 25 程度の冷却水の需要が増大している。

このような背景を受けて、従来のチラーシステムなどに替えて、極めて省エネルギー性の高い当社の「チルドタワー®（補助チラー内蔵型密閉蒸発式冷却塔）」が多くの工場や研究施設に採用されている。

今回、チルドタワーの省エネルギー性を生かしながら、外気温の高い夏季のピーク電力の抑制を目的に、チルドタワーと氷蓄熱槽を一体化した『氷蓄熱式チルドタワー』を東京電力株式会社殿と共同で開発したので紹介する。

From the perspective of environmental conservation, many companies are actively pursuing their approach towards "Conservation of Energy and Resources". In the industrial sector, there is an increasing demand for cooling water (15 ～ 25) as an influence of adoption of high accuracy & precision manufacturing equipments.

With this back-ground, the conventional chiller systems were replaced by our highly energy conservative "Chilled-Tower" which is increasingly being adopted by factories and research facilities.

This time, making the most out of the energy conservation characteristics of the Chilled-Tower, and with a purpose of suppressing the peak electric power during the hot summer season, we developed "Chilled-Tower with Ice Storage System", a combination of Chilled-Tower and ice-heat storage tank, jointly with Tokyo Electric Power Company.

① 緒 言

冷却水は、冷却する機器と用途によって異なる温度範囲の冷却水が使用される。冷却塔では30 以上、チラーでは17 以下の範囲の冷却水を供給するのが一般的である。近年、産業分野にあつては生産装置の高精度化・高密度化の影響で15 ～ 25 程度の中・低温の冷却水の需要が増大し、通常、チラーユニットに熱交換器を組合わせたシステムや冷却塔と地下水を組合わせたシステムが採用されている。

当社は、1989年より省エネルギー型中・低温冷却水供給機「チルドタワー®（補助チラー内蔵型密閉蒸発式冷却塔）」の販売を開始した。チルドタワーは密閉式冷却塔と補助チラー部を併せ持った構成で、外気による冷却を主とし年間を通して冷凍機の稼働を極力抑え省エネルギーを図っている。1992年には「省エネバンガード21」、1995年には「優秀省エネルギー機器表彰」を受賞し、その省電力、省スペース、省力などの経済性は評価されている。

近年、地球温暖化防止、資源の有効利用の意識が急速に高まり、生産装置用の冷却水供給機として、きわめて多くの工場や研究施設に採用されてきた。しかし図1に示すように、チルドタワーは外気温度が25 以上になる夏季には、冷凍機の稼働率が急激に上昇し、電力デマンドを押し上げる要因となっている。

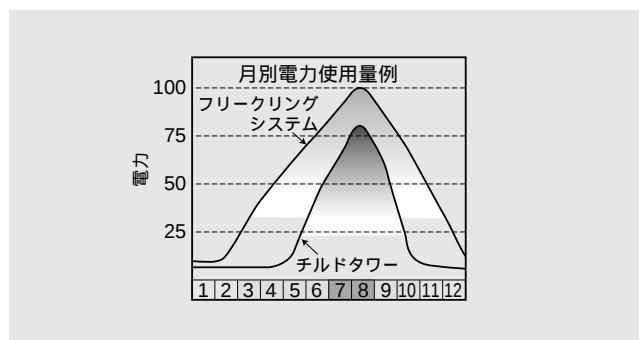


図1 チルドタワーの電力使用量例

Fig. 1 Example of the consumption of electricity

* 株式会社桑名クリエイト 中部エンジニアリング

** 日立金属株式会社 配管機器カンパニー

*** 東京電力株式会社

* Chubu Engineering Division, Kuwana Create Co., Ltd.

** Piping Components Company, Hitachi, Metals, Ltd.

*** Tokyo Electric Power Company

また、夏季の電力の需要は図2に示すように昼間に集中し、電力会社にとっては大きな問題となっている。そこで、チルドタワーの省エネルギー性を生かしながら、電力需要の拡大（夜間負荷の造成とピーク時間以外の需要開拓）、およびピーク負荷の抑制（ピークカット）を目的に、「チルドタワー」と「氷蓄熱槽」を一体化した『氷蓄熱式チルドタワー』を東京電力株式会社と共同で開発した。

本稿では氷蓄熱式チルドタワーの概要、試験結果および省エネルギー性・経済性について報告する。

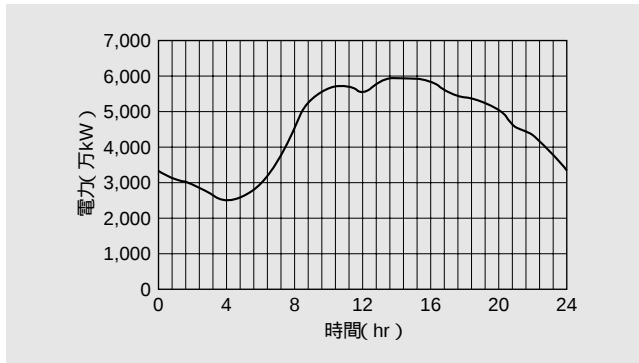


図2 夏季の1日の電力需要

Fig. 2 Demand for electricity at one summer day

② 氷蓄熱式チルドタワーの概要

2.1 システム構成

システム系統図を図3に示す。氷蓄熱式チルドタワーは従来の水冷チルドタワー内に氷蓄熱用冷凍機を配置し、氷蓄熱ユニット、循環ポンプ、制御用三方弁および攪（かく）拌ポンプによりシステムを構成している。チルドタワー部は、上部には密閉蒸発式冷却コイルと冷凍

機の凝縮器を一体とした渦巻き多管式銅コイルを配置し、コイル上部に配置した送風機と散水槽からの散布水により冷却される。下部機械室には負荷対応用冷凍機と氷蓄熱用冷凍機を搭載している。

設備負荷へ供給する水温に比べて外気の湿球温度が低いときには、密閉蒸発式冷却コイルで冷却（フリークーリング）され、負荷対応用冷凍機は運転しない。この場合の冷却水出口水温は、送風機をインバータによる回転数制御を行い所定の温度に制御し、併せて送風動力も低減される。外気温度が上昇し密閉蒸発式冷却コイルだけでは冷却しきれないときは、負荷対応用冷凍機を必要台数運転し所定の温度を維持する。外気の湿球温度が設備負荷からの戻り水温より高い場合には、密閉蒸発式冷却コイルで温められるため、冷却コイルを通過させず負荷対応用冷凍機だけで冷却するバイパス機能も備えられている。

夏季（6月～9月）のピーク時間調整契約の適用期間は氷蓄熱システムを用い氷蓄熱ユニットの冷水と負荷からの戻り水を制御用三方弁により混合して供給水温を維持しながらチルドタワーを全停止してピークカットを行っている。

2.2 氷蓄熱システムの構造と作動

システム構成の項で説明したように氷蓄熱式チルドタワーには負荷対応用冷凍機と氷蓄熱用冷凍機を搭載している。システム系統図に示すHICS-1000H型では出力7.5kWの圧縮機を10台搭載し、そのうち8台は負荷対応用、2台を氷蓄熱用として運転する。氷蓄熱用冷凍サイクルの凝縮器には、負荷対応用と同様、蒸発式凝縮器を採用し、凝縮温度を低下することによって、COP（成績係数）の高い運転を実現している。

蓄熱槽は、槽容量15m³水量13.2m³、蓄熱容量3,014MJ、IPF（氷充填（てん）率）44%の直膨アイスオンコイル式を採用している。

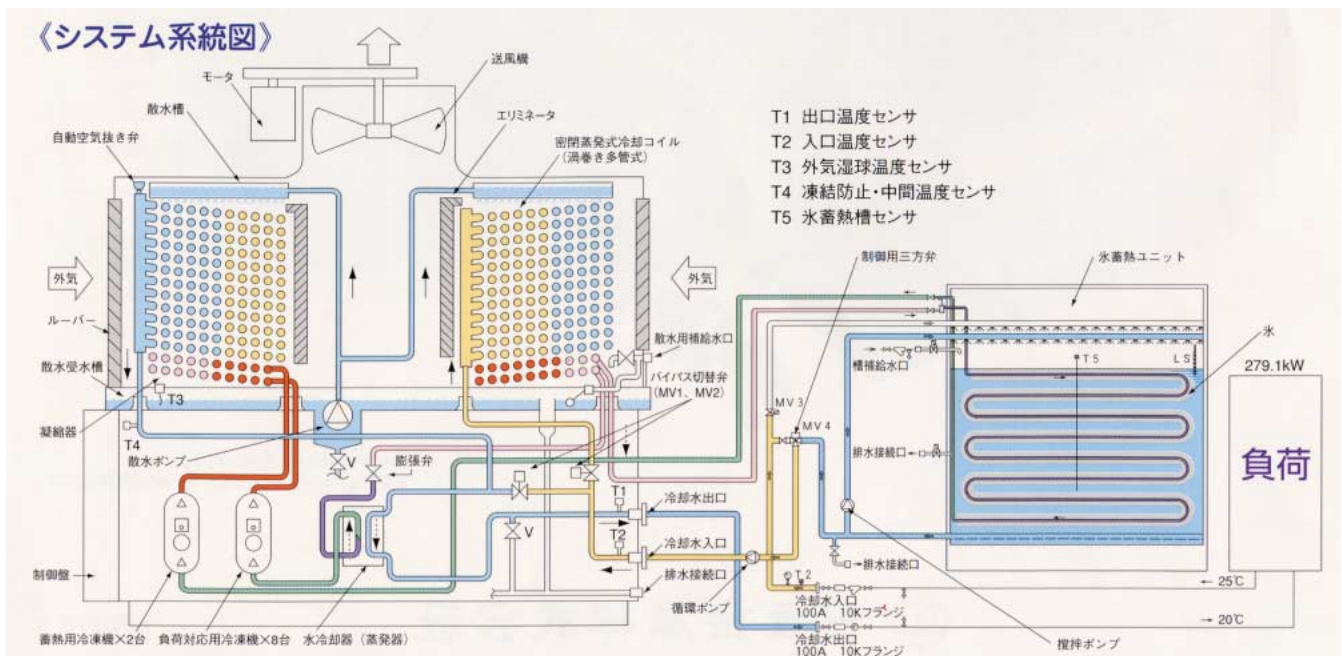


図3 氷蓄熱式チルドタワーのシステム系統図

Fig. 3 System flow of "Chilled-Tower with Ice Storage System"

図4にHICS-1000H型の代表的な運転パターンと消費電力の推移を示す。16時より翌日の13時までの21時間は、チルドタワーでの負荷対応運転と蓄熱運転を行い、13時より16時の3時間はチルドタワーを全停止し、蓄熱分を放熱して運転する。放熱時の運転は負荷からの戻り水を蓄熱コイル上部より散水して解氷し、得られた冷水と戻り水とを制御用三方弁で混合して供給水温を維持する方式を採用している。放熱時には、循環ポンプと攪拌ポンプ以外の機器は運転しないため、大幅なピークカットを実現している。16時の蓄熱開始時に最大電力96.6kWを示す。蓄熱利用時の電力14.1kWとの差は82.5kWとなり、この値が、ピーク時間調整契約の対象となる。この例の場合、ピーク時間調整契約と産業用蓄熱調整契約の適用による電力料金の割引額は、約100万円/年となる。

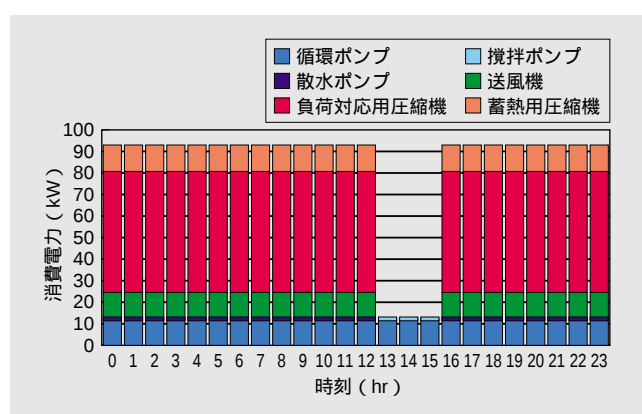


図4 運転パターンと消費電力の推移

Fig. 4 Operating pattern and change of the consumption of electricity

③ 実証試験

3.1 試験研究モデル

実証試験の試験研究モデルとして、氷蓄熱式チルドタワーHICS-1000H型の半分の大きさのものを製作した。具体的には、出力7.5kWの圧縮機を5台搭載し、そのうち4台は負荷対応用、1台を氷蓄熱用として運転する。

蓄熱槽は、槽容量7.5m³、水量6.6m³、目標蓄熱量1,507MJ (IPF43.4%)の直膨アイスオンコイル式とした。コイルは管径9.53mmの銅管とし、有効長はやや少なめと思われる383mとして、量産時の必要コイル長さを見極められる仕様とした。

着氷量の算定は、水槽上部に設けた水位センサによって水面の上昇を読み取り、水が凝固するときの体膨張率を用いてIPFを求めて行った。着氷コイル各部には、熱電対を計60ポイント用意し、蓄熱時・放熱時の温度の変化から氷の成長・溶解の状況が読み取れるように配置した。

模擬負荷としてボイラーを設置し、解氷試験時に利用するとともに、蓄熱運転時の凝縮圧力調整にも利用し、夏季の運転条件を再現した。蓄熱槽からの冷水と負荷からの戻り水を混合し供給温度を調整する三方弁と、ボイ

ラーからの温水と供給水とを混合し、戻り水温度を調整する三方弁とを設け、運転条件を設定できるシステムとした。図5に試験研究モデルの設備系統図を示す。

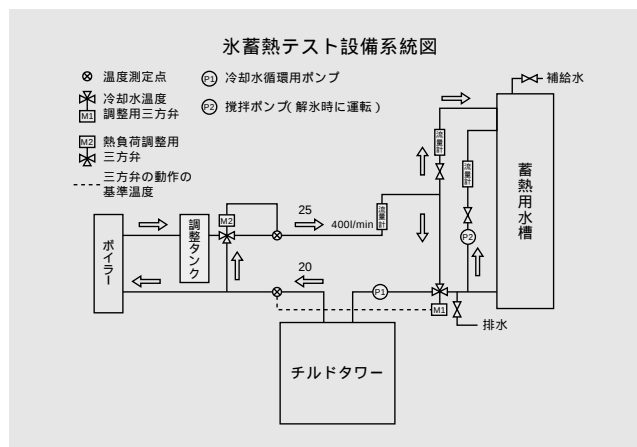


図5 試験研究モデルの設備系統図

Fig. 5 Systematic diagram of experimental setup

3.2 試験結果

蓄熱槽に装着した攪拌ポンプの運転により、水温がほぼ20℃均一になった時点で蓄熱運転を開始し、21.5時間運転した結果を図6に示す。

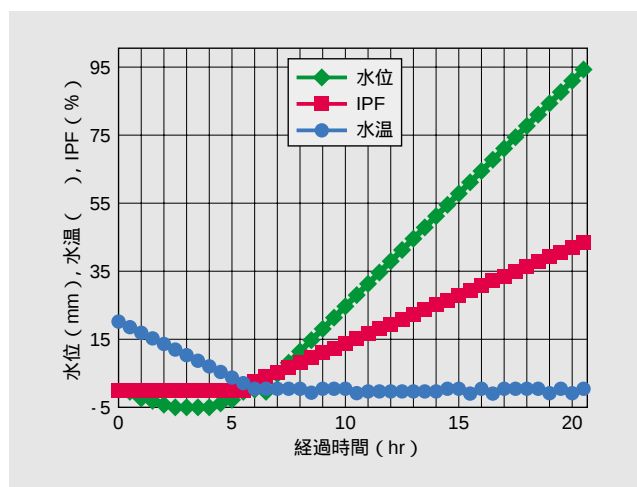


図6 蓄熱運転試験結果

Fig. 6 Experimental result of storage mode

水温は運転開始から低下を始め、5時間後に4℃、7時間後に0℃に達した。その後の運転終了まで、0℃前後を保っている。水位の変化を見ると、水温の低下とともに低下していくが、4時間後に最低値を示した後上昇に転じている。この時点から、一部のコイルに着氷が開始された。水温が0℃となった7時間後以降はほぼ直線的に水位が上昇していった。IPFの変化は、水温が0℃となった7時間後以降、直線的に上昇していき、21時間後にはIPF42%、21.5時間後には目標値であるIPF43.4%を超えてIPF43.8%に達した。

蓄熱時の圧縮機消費電力は、運転開始直後、水温を低下している時点は6.4kWを示したが、水温低下とともに消費電力も低下していき製氷運転時は6.0kW前後で推移

した。この期間の平均消費電力は6.08kWとなり、平均COPを計算すると3.28になった。

放熱時の運転状況を図7に示す。循環ポンプによって負荷から過熱された25℃の冷水を循環し、三方弁の混合によって蓄熱槽の冷水を利用して出口温度20℃を保つ。蓄熱槽に設けた搅拌ポンプを運転し、氷の溶解を促進した。

利用開始から3時間までは、出口水温が 20 ± 0.7 ℃、入口・出口温度差5Kを維持しており、循環水量 $24 \text{ m}^3/\text{h}$ であることから、放熱量139.5kW、全放熱量1,507MJを放熱した。心配していた「3時間でとかわせるか」という点については、特に問題なく溶解させることができた。冷媒としてR407Cを採用したため、冷媒が蒸発開始するコイル上部の氷が厚くなり、下部が薄く着氷することが、溶解時に幸いしたといえる。IPFを大きくするとコイルの上部では氷どうしが接触するまで成長するが、溶解時には高温の水がこれにかかり、急速に溶解し水の通り道を形成する状況が観察された。

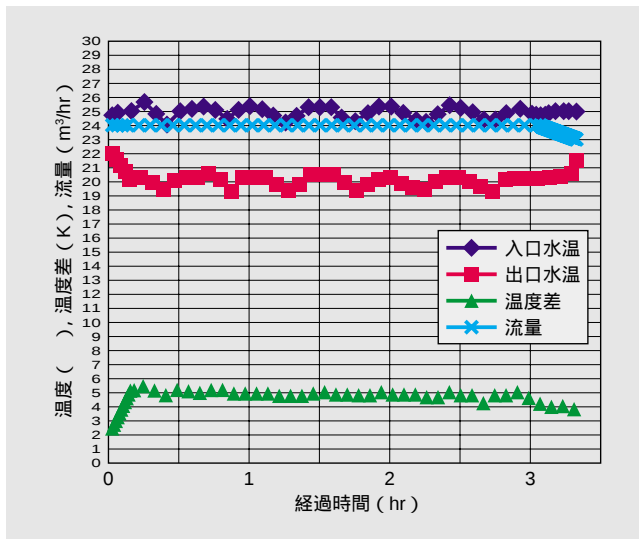


図7 放熱運転試験結果

Fig. 7 Experimental result of heat release mode

④ シミュレーションシステム

4.1 シミュレーションの目的

規模的、経済的な点から、環境試験室などで任意の温度条件の下で実験を行うことが困難な、氷蓄熱式チルドタワーを効率的に開発するには、精度の高いシミュレーションシステムの確立が不可欠であった。

まず、基本シミュレーションを作成し、実験結果と合致するようにパラメータの調節をし、冷凍サイクルの経時変化や断熱の影響などを考慮してシミュレーションの精度を向上させた。このシミュレーションを応用し、量産型の蓄熱槽およびコイルの設計に役立てることがシミュレーションシステム確立の最大の目的である。

4.2 基本シミュレーション

2種類の異なる物質による同心円の円筒の内外を隔てる壁面（この場合、銅管および水）を通過する伝熱の理論式および冷媒R407Cの温度勾配を考慮し、1パス全長24mの伝熱コイルを1mごとに分割計算し、その伝熱量から表面温度を求め、表面温度0℃以上なら顕熱のみの移動、0℃未満なら潜熱（氷の成長）および顕熱の移動であると判定し、その状況に応じて計算を進めるものとした。上記の計算を、コイル全体の熱の移動と圧縮機能力のバランスする蒸発温度にもとづき計算し、1分間後の水温の変化、あるいは氷の成長度合いを求めこの条件を次の1分間の基準とし、同様に1分ごとの計算を繰り返して経過時間分の蓄熱の状態を計算できるシミュレーションを作成した。

4.3 シミュレーションの精度向上

基本シミュレーションに、実験により得た影響因子を盛り込み、以下の変更、追加を行い精度の向上をはかった。

- ・実験から得たコイル内の冷媒圧力損失値やコイル後の圧力損失値から、冷媒R407Cの特性により生ずるコイル入口冷媒温度や出口冷媒温度および圧縮機蒸発温度の関係を見直した。
- ・表面熱伝達率の適正化をはかった。
- ・水温が約0℃に落ち着いた後、壁面からの熱損失の影響

表1 CO₂排出量の比較例

Table 1 Comparison with CO₂ emission of this system and the other

	項目	単位	氷蓄熱式 チルドタワー	空冷チラー	水冷チラー	ターボ 冷凍機	ガス焼き 冷温水発生器
1	設備電力	kW	96.1	129.6	103.1	99.5	36.0
2	年間消費電力量	kW・h	259,200	830,200	724,300	717,900	315,400
3	年間ガス消費量	Nm ³	0	0	0	0	156,900
4	年間水消費量	m ³	5,010	0	5,730	5,650	8,780
5	年間CO ₂ 排出量	kg-CO ₂	148,200	445,700	397,600	394,000	648,100
		%	100	301	268	266	437

25 → 20℃ 循環水量 48m³/h 冷却熱量 279.1kW(240,000kcal/h)

- 響で冷媒がドライアップしている部分を考慮し、コイル長さのうち、 $\frac{1}{8}$ を熱の授受に寄与しないと仮定した。
- ・槽の断熱特性をふまえた、壁面からの熱損失の影響を考慮した。
 - ・蓄熱初期の水温が高い間は蒸発温度が高い運転となり、本来なら圧縮機は大きな能力を発揮するが、膨張

弁の制御容量を超えるために冷媒循環量が制限され、過熱度が高くなって冷却能力が抑えられる点を考慮した。

結果として、量産型蓄熱槽およびコイル設計に有効なシミュレーションを確立することができたが、本報告においては詳細説明を省略する。

表2 氷蓄熱式チルドタワー仕様表

Table 2 Specifications of "Chilled-Tower with Ice Storage System"

(50Hz/60Hz)

項 目				単 位	形 式	
					HICS-500H	HICS-1000H
熱 源 ユ ニ ツ ト	性能	入口水温25	定格冷却能力	kW	139.5	279.1
		出口水温20	定格冷却水量	m³/h	24	48
		機内圧力損失(流量)			kPa(m³/h)	83.3(24)
	法定冷凍能力			トン	14.55/17.55	29.1/35.1
	高圧ガス保安法適用区分				製造届不要	製造届必要
	外形寸法	幅		mm	2,200 + 215(制御盤)	4,400 + 215(制御盤)
		奥行		mm	2,200	2,200
		肩までの高さ		mm	3,074	3,099
		ファン高さ		mm	536	536
	送風機	型式			軸流ファン(Vベルト駆動方式)	
		送風機径		mm	1,200	
		電動機出力		kW(極数)× 台数	5.5(6)× 1	5.5(6)× 2
	散水ポンプ	型式			ステンレス水中ポンプ	
		電動機出力		kW(極数)× 台数	0.75(2)× 1	0.75(2)× 2
	圧縮機	型式			スクロール式全密閉型電動圧縮機	
		電動機出力		kW(極数)× 台数	7.5(2)× 5	7.5(2)× 10
		蓄熱用圧縮機台数		台(上記台数中)	1	2
	攪拌ポンプ	型式			モートルポンプ	
		電動機出力		kW	0.75(2)× 1	1.5(2)× 1
	冷媒の種類				R407C	
	冷却水系使用圧力(常用)			Mpa	0.7以内	
	散水補給水量			m³/h	0.71	1.41
	電気特性	定格蓄熱非利用運転消費電力		kW	48.5/49.5	96.1/98.2
		定格蓄熱利用運転消費電力		kW	7.2/7.3	13.6/13.7
	定格蓄熱利用運転維持時間			h	3	3
	電源	動力電源			3φ 200V 50/60Hz	
操作電源			1φ 200V 50/60Hz			
製品質量(運転質量)			kg	3,660(4,850)	6,980(9,500)	
蓄 熱 ユ ニ ツ ト	製氷方法				スタティック製氷	
	蓄熱容量	定格冷却熱量		MJ	1,507	3,014
	利用温度幅				10 ~ 30	
	外形寸法	幅		mm	1,621	3,061
		奥行		mm	2,260	2,260
		高さ		mm	2,767	2,767
	保有水量			m³	7	13
	IPF			%	44	44
	製品質量(運転質量)			kg	1,500(8,100)	2,200(15,400)

⑤ 省エネルギー性・経済性

氷蓄熱式チルドタワーは、上部に搭載した密閉冷却塔の自然冷却効果を効率よく利用して冷凍機の運転時間が短く、また冷凍機を台数制御しているため冷凍機の平均稼働率が低く抑えられる特長がある。供給水温が20の場合、従来のチラーシステムに比べて約60%のエネルギー削減を実現する。

冷媒にはオゾン層破壊係数『0』のR407Cを採用しており、省エネルギーとなる分CO₂排出量を抑制できる。原単位換算したCO₂排出量を比較すると、 $\frac{1}{3}$ 程度に低減が可能であり、地球温暖化防止にも貢献できるものである。

空冷チラー、水冷チラー、ターボ冷凍機およびガス焚き冷温水発生器の各システムと比較した省エネルギー比較例を図8に、CO₂排出量の比較例を表1に示す。

チルドタワーの省エネルギー効果とピーク時間調整契約などによる電気料金の割引額を合わせると、約640万円～870万円/年のランニングコスト低減となる。

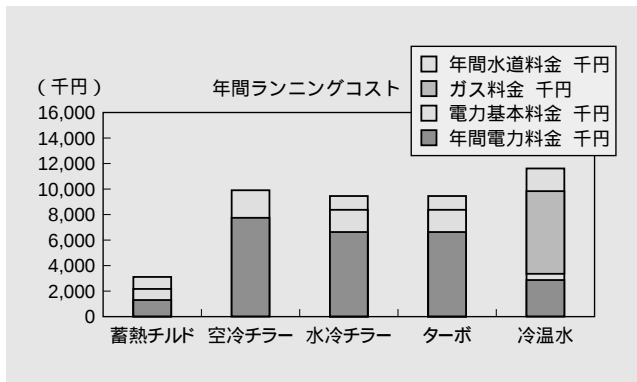


図8 省エネルギー比較例

Fig. 8 Comparison with energy-saving of this system and the other cooling system

⑥ 製品仕様

氷蓄熱式チルドタワー-HICS-500H、HICS-1000Hの2機種を製品化した。その仕様表を表2に、外形図を図9に、外観写真を図10に示す。

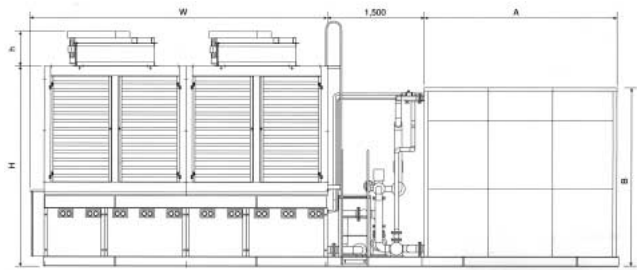


図9 氷蓄熱式チルドタワー外形図

Fig. 9 Schematic of "Chilled-Tower with Ice Storage System"



図10 氷蓄熱式チルドタワー外観写真

Fig. 10 View of "Chilled-Tower with Ice Storage System"

⑦ 結 言

夏季の電力需要の平準化という社会的要請に対応して、中・低温冷却水供給機「チルドタワー」と「氷蓄熱槽」を一体化した、省エネ+ピークカットを実現した『氷蓄熱式チルドタワー』を東京電力株式会社殿と共同で開発した。今後、信頼性の向上をさらに進め、市場の声に耳を傾け、よりよい製品にしていきたい。

参考文献

- 1) 五十嵐，菊原他：東京電力(株)，日立金属(株)共同研究報告書(2001)
- 2) 田中，大槻，他：日立金属桑名工場研究報告 第559号(2000)
- 3) 空気調和・衛生工学便覧 第12版：空気調和・衛生工学会(1995)