九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

高効率インバータ冷凍機を導入した空調用熱源システムの省エネルギー性能

桑原，康浩
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻博士後期課程

赤司，泰義
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

黒江，大亮
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻修士課程

宋，永学
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻博士後期課程

https://doi.org/10.15017/19066

出版情報：都市・建築学研究. 8, pp.109-114, 2005-07-15. Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

都市・建築学研究　九州大学大学院人間環境学研究院紀要　第８号，2005年７月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.8, pp. 109～114, July. 2005

高効率インバータ冷凍機を導入した空調用熱源システムの省エネルギー性能

Energy Performance of Cooling Plant System with High-efficient Inverter Chiller for Building Air-conditioning

桑原康浩*，赤司泰義**，黒江大亮***，宋　永学*
Yasuhiro KUWAHARA, Yasunori AKASHI, Daisuke KUROE and Young-hak SONG

The purpose of this paper is to clarify energy performance of cooling plant system for building air-conditioning using actual measured operating data and numerical simulation analysis. The cooling plant system is installed in an industrial building and has some high-efficient technologies which are high-efficient inverter chiller, integrated cooling tower and free-cooling system for fresh water used in the production area. The high-efficient inverter chiller is one of refrigerating machines with the state-of-the-art technology which has recently been put on the market. The maximum chiller COP reaches about 18 under a condition of the partial load rate and the cooling water temperature. The simulation results show that the cooling plant system can cut down annual electric power consumption about 51% compared with conventional cooling plant system.

Keywords: *Cooling plant system, High-efficient inverter chiller, Measurement, Simulation, Energy performance*
熱源システム，高効率インバータ冷凍機，実測，シミュレーション，省エネルギー性能

1. はじめに

一般的な事務所建築における熱源システムのエネルギー消費量は，空調用エネルギー消費量の半分以上を占める．地球温暖化の温室効果ガス削減目標を定めた京都議定書が2005年２月に発効するなど，建築空調の省エネルギー推進は極めて重要な課題である．筆者らは，これまでも熱源システムにおける高効率化技術の有効性について検討を重ねてきたが，本報と既報[1)2)3)]との大きな違いは，新たに高効率インバータ冷凍機を採用している点である．高効率インバータ冷凍機は，ここ数年の間に市場に投入された最新の熱源機器であり，その省エネルギー性能を定量的に評価した研究はこれまでほとんどない．さらに，この冷凍機は従来の冷凍機と大きく異なる性能特性を持っており，その特性を十分に活かすには，これまでの冷凍機運用と異なる運用が必要になる．

本報は，既報で提案した従来の高効率化技術に新たな高効率インバータ冷凍機を組み合わせて導入した熱源システムを対象に実測とシミュレーションを行って，その省エネルギー性能を定量的に明らかにするものである．

*　空間システム専攻博士後期課程
**　都市・建築学部門
***　空間システム専攻修士課程

2. 熱源システム概要

宮城県多賀城市に位置するソニー株式会社仙台テクノロジーセンター（記録メディア製造工場，以下，仙台TEC）の熱源システムが対象である．図１に熱源システ

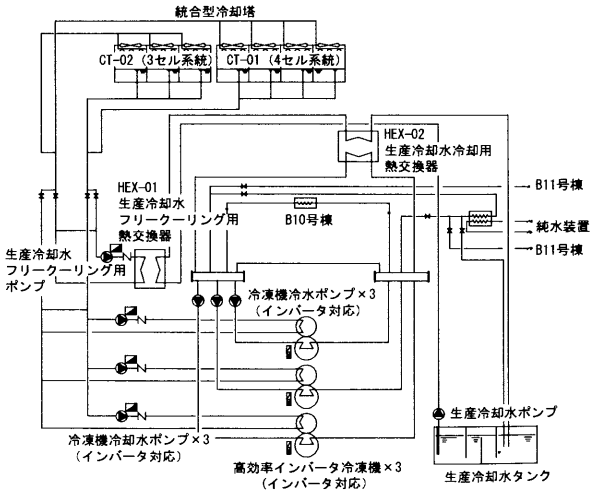


図１　熱源システム系統図

ム系統図，表1に設備機器表を示す．熱源システムは，主に統合型冷却塔，高効率インバータ冷凍機，生産冷却水冷却用熱交換器，生産冷却水フリークーリング用熱交換器によって構成され，年間365日24時間稼動する．高効率インバータ冷凍機，冷水・冷却水ポンプは，いずれもインバータにより制御される．以下に，熱源システムに採用された高効率化技術について概説する．

2.1 高効率インバータ冷凍機

高効率インバータ冷凍機の部分負荷運転時における成績係数（COP）は非常に高い（図2）．冷水出口温度7℃，冷却水入口温度 13℃で部分負荷率 45%のときに最大COP18.3（設計値）という高い値を示す．従来の冷凍機では，冷却水入口温度に関わらず全負荷（部分負荷率100%）に近いほど高い COP となるが，一般には最大COP5 程度である．高効率インバータ冷凍機では，冷却水入口温度によって最大 COP が発生する部分負荷率が異なるために，冷却水入口温度における最大COPの80%以上を維持する部分負荷率を運転範囲とし，その範囲を超える場合は冷凍機台数を増台，下回る場合は減台する制御が行なわれる．

2.2 統合型冷却塔

従来は冷凍機1台に対して冷却塔1台が設置されるが，外気冷却限界まで冷却水を冷却するために，冷却塔及び冷却水系統を全体統合した統合型冷却塔を採用している．冷却塔は2系統（3セル系統×1，4セル系統×1）で構成される．冷却水流量により系統ごとの発停制御が行われ，冷却水出口温度条件による各系統の冷却塔ファンの2段階制御が行われる．図2に示すとおり，高効率インバータ冷凍機は冷却水入口温度が低いほど高いCOPを示し，統合型冷却塔における低温冷却水の製造が冷凍機の高効率運転に大きく寄与することが推察される．

2.3 生産冷却水フリークーリング

生産冷却水とは空調システムの建物側（2次側）で使用する当該施設特有の上水の冷却に用いる冷却水である．通常，生産冷却水は高効率インバータ冷凍機が製造した冷水との熱交換により冷却される．しかし，中間季や冬季においては，統合型冷却塔による低温冷却水の有効利用が期待でき，統合型冷却塔の冷却水出口温度が23℃以下の場合は，高効率インバータ冷凍機で製造した冷水との熱交換の前に，統合型冷却塔の冷却水と熱交換を行なって，冷凍機の処理熱量の低減を図ることができる．

3. 実測結果

熱源システムで得られた実測値（2004 年 4 月～2005年3月）を基に考察を行なった．

3.1 高効率インバータ冷凍機

図3に高効率インバータ冷凍機の部分負荷率，COP，冷却水入口温度の関係を示す．まず，冷却水入口温度が

表1 設備機器表

機器名称	機器仕様		台数
高効率インバータ冷凍機	冷却能力	2004kW	3台
	冷水流量	215m³/h(15℃→7℃)	
	冷却水流量	404m³/h(32℃→37℃)	
統合型冷却塔(4セル)	冷却能力	3448kW	1台
	冷却水流量	612m³/h	
	送風機	5.5kW×4台	
統合型冷却塔(3セル)	冷却能力	2669kW	1台
	冷却水流量	459m³/h	
	送風機	5.5kW×3台	
熱交換器(生産冷却水フリークーリング用)	交換熱量	1059kW	1台
	1次側冷却水流量	304m³/h(17℃→20℃)	
	2次側冷水流量	304m³/h(21℃→18℃)	
熱交換器(生産冷却水用)	交換熱量	1059kW	1台
	1次側冷却水流量	114m³/h(7℃→15℃)	
	2次側冷水流量	304m³/h(21℃→18℃)	
冷却水ポンプ	冷却水流量	403m³/h (インバータ対応)	3台
冷水ポンプ	冷水流量	215m³/h (インバータ対応)	3台
生産冷却水フリークーリング用ポンプ	冷却水流量	304m³/h	1台
生産冷却水用ポンプ	冷却水流量	304m³/h	1台

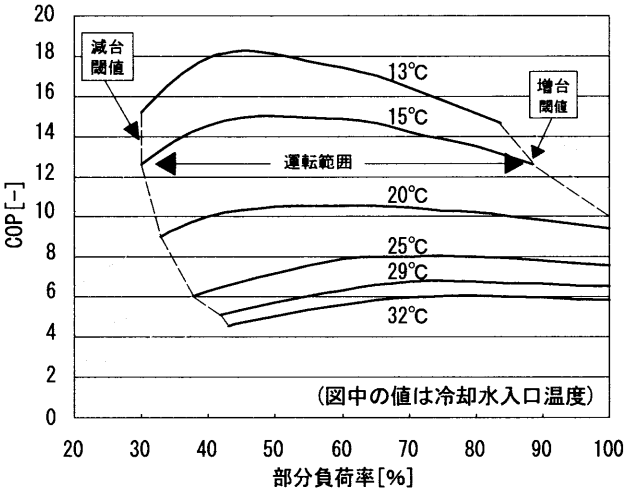


図2 高効率インバータ冷凍機性能曲線（冷水出口温度 7℃）

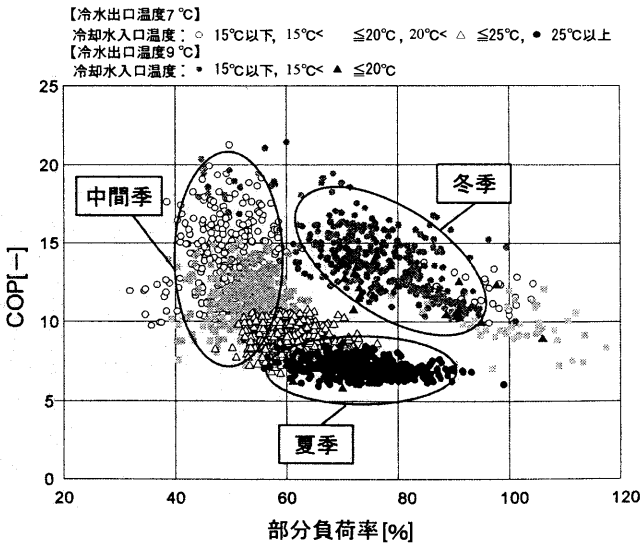
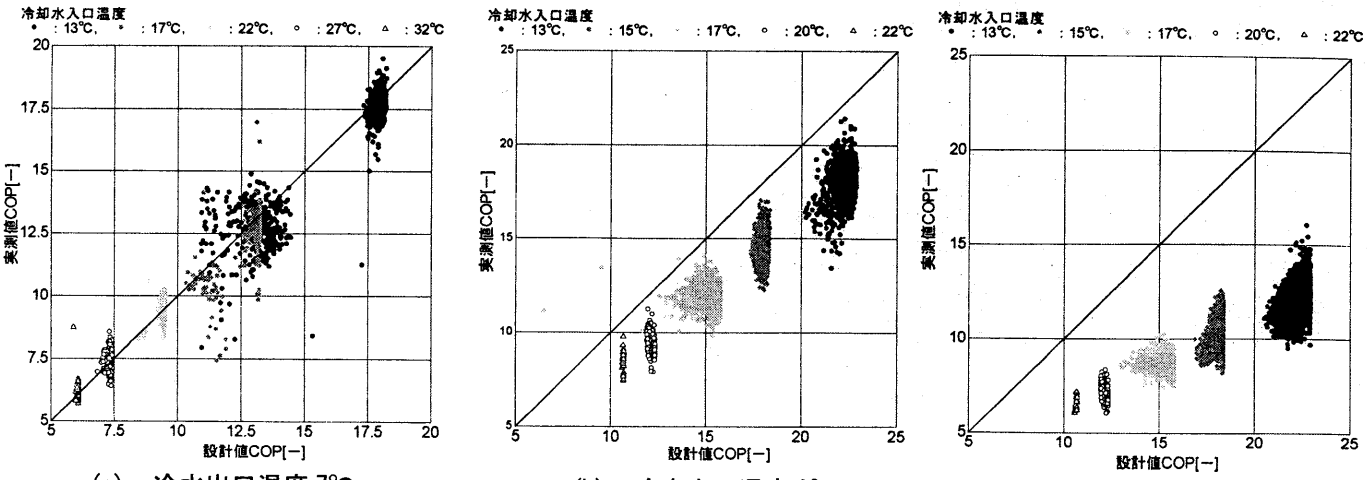


図3 高効率インバータ冷凍機の部分負荷率，COP，冷却水入口温度の関係



(a) 冷水出口温度 7℃
(2004 年 5 月～12 月)

(b) 冷水出口温度 9℃
(2005 年 1 月～3 月)

(c) 冷水出口温度 9℃
(2004 年 4 月)

図 4 高効率インバータ冷凍機の実測 COP と設計 COP の比較

低下するほど高効率インバータ冷凍機 COP は上昇し，部分負荷率 40%～60%の間で COP の変化が大きくなる(中間季，2004 年 4 月～5 月，10 月～11 月)．逆に冷却水入口温度が高くなると COP は低くなり，COP の変化は小さくなって，部分負荷率 50%～90%に広く分布する（夏季，2004 年 6 月～9 月)．中間季・夏季いずれも冷凍機 2 台運転で制御されているが，冬季については負荷が小さくなり 1 台運転となって冷凍機の部分負荷率は夏季に比べて上昇する．一方で，冬季の冷却水入口温度は外界条件により夏季よりも大きく低下し，部分負荷率が小さくなるにしたがって COP が上昇する(冬季, 2004 年 12 月，2005 年 1 月～3 月)．これらの状況は，図 2 に示した高効率インバータ冷凍機の性能曲線に対応して理解することができる．

図 4 に実測値と設計値から得られる高効率インバータ冷凍機 COP（実測 COP，設計 COP）の比較を示す．図 4 (a)は冷水出口温度が 7℃の場合(2004 年 5 月～12 月)，図 4 (b) は 9℃の場合（2005 年 1 月～3 月）である．冷水出口温度 7℃では，実測 COP は概ね設計 COP と一致する．一方，冷水出口温度 9℃では，実測 COP は設計 COP よりも低い値となった．図 4 (c) は冷水出口温度 9℃（2004 年 4 月）の実測 COP と設計 COP を比較したものである．この時期は冷却水汚染による熱交換効率の悪化が生じ，実測 COP が設計 COP よりも大きく低下した．

3.2 統合型冷却塔

図 5 に季節別の外気湿球温度と冷却水出口温度の相関を示す．外気湿球温度と冷却水出口温度は比例関係を示し，冬季には，冷凍機の凍結防止のために設けられた下限値 13℃まで低下した冷却水が製造される．

3.3 生産冷却水フリークーリング

表 2 に生産冷却水フリークーリングを行なわなかった

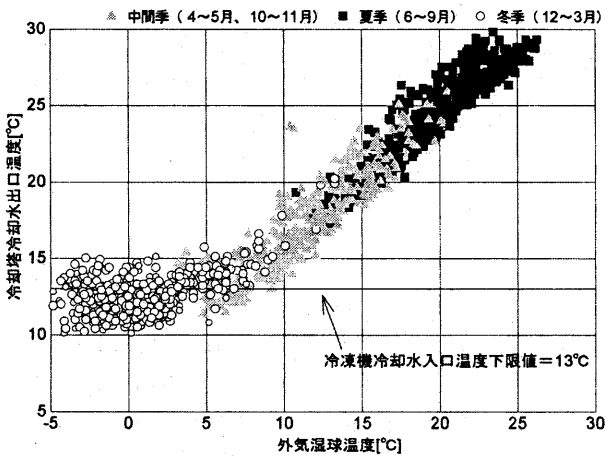


図 5 外気湿球温度と統合型冷却塔冷却水出口温度

表 2 生産冷却水フリークーリング運転有無の比較

	1月6日～12日 運転無し	1月14日～20日 運転有り
平均高効率インバータ冷凍機 冷却水入口温度[℃]	13.8	13.8
2次側負荷[GJ]	1239	1452
積算高効率インバータ冷凍機 電力消費量[kWh]	19963	19439
積算生産冷却水フリークーリング用 ポンプ電力消費量[kWh]	0	2350
積算統合型冷却塔 ファン電力消費量[kWh]	2894	3495
積算生産冷却水 ポンプ電力消費量[kWh]	4406	4398
積算冷却水ポンプ電力消費量[kWh]	6420	6353
積算冷水ポンプ電力消費量[kWh]	3708	2894
積算熱源システム電力消費量[KWh]	37391	38929

2005 年 1 月 6 日～12 日と行なった 2005 年 1 月 14 日～20 日の各 1 週間の比較を示す．結果として，生産冷却水フリークーリングによる熱源システム電力消費量の削減は見られなかった．効果が現れなかった要因として，高効率インバータ冷凍機の性能があげられる．生産冷却水フ

表3　熱源システム全体の年間実績

	2004年4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	2005年1月	2月	3月
月積算2次側負荷[GJ]	5132	5525	6685	8186	7810	7212	6160	5527	5119	4855	4834	5847
月積算高効率インバータ冷凍機電力消費量[kWh]	115506	151820	214881	320721	295162	265020	174403	135566	117306	77846	66293	104953
月平均高効率インバータ冷凍機冷却水入口温度[℃]	14.6	19.7	23.3	27.0	26.7	26.1	19.2	17.0	14.1	13.8	13.8	14.0
月平均高効率インバータ冷凍機部分負荷率[%]	49.0	61.8	64.1	74.9	72.0	68.9	57.9	62.9	87.2	74.1	72.5	83.1
月積算ポンプ電力消費量[kWh]	63208	67346	85098	98598	111987	108669	97627	81356	69546	68807	67002	78525
月積算ファン電力消費量[kWh]	23009	21655	23922	25778	24587	23000	25093	22254	16869	13428	12383	16346
月平均高効率インバータ冷凍機COP[－]	12.8	10.3	8.8	7.1	7.4	7.3	10.0	11.9	12.3	14.6	14.9	12.1
月平均熱源システムCOP[－]	7.1	6.4	5.7	5.1	5.0	5.1	5.8	6.4	7.0	8.4	9.2	8.1

リークーリングが許可されるのは統合型冷却塔の冷却水出口温度が低い場合で，そのときは高効率インバータ冷凍機 COP も比較的高い．よって，生産冷却水フリークーリングが行なわれなくても，冷凍機の電力消費量は小さく抑えられており，生産冷却水フリークーリングが行なわれる際のポンプ電力消費量の増分が冷凍機の電力消費量の削減分を打ち消してしまうためと考えられる．

3.4 熱源システム全体

表3に熱源システム全体の年間実績を示し，図6に高効率インバータ冷凍機の月平均部分負荷率と月積算2次側負荷，図7に月平均の高効率インバータ冷凍機 COP と冷却水入口温度及び熱源システム COP を示す．月平均の高効率インバータ冷凍機 COP は，中間季 10.0～12.8，夏季 7.1～8.8，冬季 12.1～14.9 と大きく変化し，冷却水入口温度の低い冬季に高い COP を示した．それに伴い熱源システム COP も冬季に高い値（2005年2月に9.2）を示している．ここで2005年の2月と3月を比較すると冷却水入口温度がほぼ同じであるにも関わらず，3月の高効率インバータ冷凍機 COP と熱源システム COP は低下している．これは，外界気象に伴う2次側負荷の増加から冷凍機2台運転で制御されるべきところを冷凍機1台運転となっていたことによるもので，部分負荷率の適正な運転範囲を逸脱したために高効率インバータ冷凍機の効率が低下したことが大きな原因の1つである．次章のシミュレーションによる検証において，あらかじめ決められた制御方法にしたがって冷凍機の増減台を判断すれば，3月はほとんどが冷凍機2台運転となる．仮に冷凍機1台運転で試算して，両者を比較したところ，冷凍機2台運転の方が高効率インバータ冷凍機，熱源システムともに電力消費量は少なかった．

3.5 既報[1)2)3)]との比較

仙台 TEC を対象とした今回の研究に先行して，既報で述べた熊本テクノロジーセンター（熊本 TEC）の熱源システムを対象とした研究を行なっている．熊本 TEC には，高効率インバータ冷凍機は採用されていないが，その他の高効率化技術は同様に採用されている．熊本 TEC の熱源システム COP は，中間季 3.0～3.2，夏季 3.2～3.6，冬季 2.5～2.9 となっており，冷凍機のインバータによる制御が行なわれないために，仙台 TEC とは逆に部分負荷率が大きい夏季に高い COP を示した．しかしながら，仙台 TEC の熱源システム COP は比較的低い夏季でも 5.0～5.7 に達し，冬季には 7.0～9.2 という高い COP となる（表3）．仙台 TEC の規模が熊本 TEC と比べて小さく，気候の違いもあるので実測値からの厳密な比較はできないが，高効率インバータ冷凍機の大きな省エネルギー効果が現れていると考えられる．

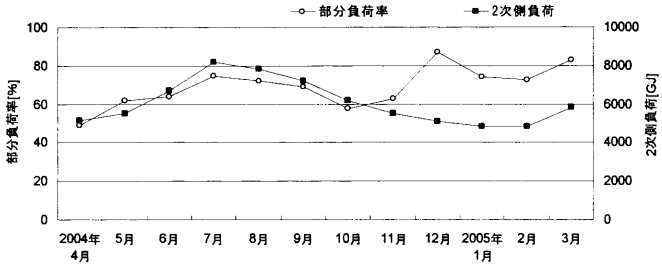


図6　高効率インバータ冷凍機の月平均部分負荷率及び月積算2次側負荷

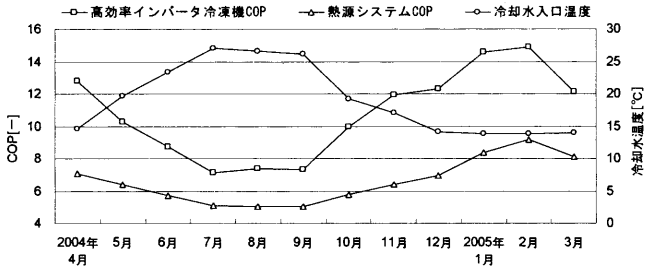


図7　月平均の高効率インバータ冷凍機 COP と冷却水入口温度及び熱源システム COP

4. シミュレーションによる省エネルギー性能評価

熱源システムに導入されている高効率化技術の有効性を評価するために熱源システムのシミュレーションモデルを構築し，計算を行なった．入力値には，2004年4月～2005年3月における2次側負荷，2次側冷水流量，気象条件，生産冷却水温度の実測値を使用した．

4.1 シミュレーションモデルの計算精度確認

構築したシミュレーションモデルの計算精度を実測値と比較することにより確認した．図8に統合型冷却塔冷却水出入口温度と高効率インバータ冷凍機冷水出入口温度を示す．実測値に見られる短周期の振動現象までは再現できていないが，平均値としては，計算値は実測値をよく捉えており，シミュレーションによる計算結果は十分な確度を持つものと推察される．

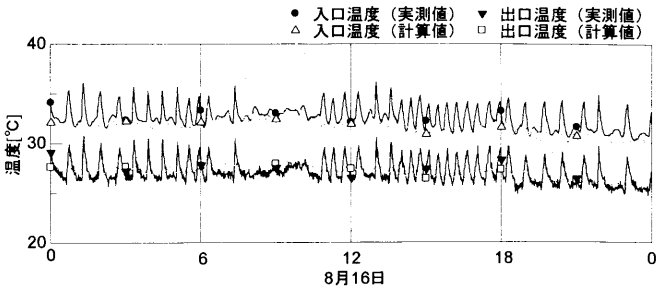
4.2 検討ケースの設定

従来型の熱源システムモデルを Case1 とし Case2～Case4 にそれぞれ高効率化技術を順次導入した熱源システムを想定した．Case4 が仙台 TEC の熱源システムに相当する．また，高効率化技術の組み合わせによる効果の検証を行うため，Case2～Case4 の高効率化技術の導入順序を変えた CaseA～CaseC を設定した．各ケースの電力消費量削減率を比較することで各高効率化技術の有効性を検証する．表4に検討ケースの一覧を示す．なお，従来型熱源システムモデル（Case1）は，既報（熊本 TEC）の研究で用いられたものを基に設定した．

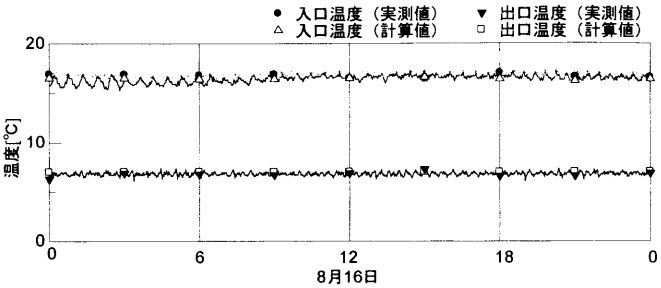
4.3 シミュレーション結果

表5にシミュレーション結果，図9に Case1～Case4 の年間電力消費量，図10に CaseA～CaseC の年間電力消費量をそれぞれ示す．仙台 TEC に相当する Case4 の熱源システムの年間電力消費量が 3025MWh（表5），実績値からの年間電力消費量が 3286MWh（表3から算定）であることから，このシミュレーション結果は実態を十分に捉えていると判断される．Case1 では冷却塔の冷却水出口温度が 32℃以下になると冷却塔ファンを停止するため，ファンの電力消費量は全ケース中最も小さい．しかし，冷凍機冷却水入口温度が 32℃以下にならないために，冷凍機の効率は向上せず，ポンプもインバータによって制御されていないために，冷凍機 COP，熱源システム COP はともに全ケース中最も小さくなった．Case2 では統合型冷却塔を採用し，冷却水を 32℃以下まで冷却する．冷却塔のファンの電力消費量は増加したが低温冷却水により冷凍機の効率が高くなり，熱源システムの電力消費量は Case1 に対して 9%の削減となった．Case3 では生産冷却水フリークーリングを許可した．中間季・夏季・冬季いずれも，生産冷却水フリークーリングに必要なポンプの電力消費量の増加に対して十分な効果が得られず，年間の熱源システムの電力消費量は Case2 に比べて僅かな減少に留まった．Case4 では高効率インバータ冷凍機を採用するとともに，冷水・冷却水ポンプもインバータ制御とした．年間を通して高い削減率を示すが，特に冷却水温度が低下する冬季に 66%という高い削減率となり，Case3 に対して熱源システムの電力消費量は年間 42%の削減率を示した．従来型熱源システム Case1 と仙台 TEC に相当する熱源システム Case4 を比較すれば，年間で 51%の電力消費量削減が得られている．既報の熊本 TEC における熱源システムの電力消費量削減は従来型熱源システムに比べて 31%であり，実測と同様にシミュレーションによっても高効率インバータ冷凍機が電力消費量削減に大きく寄与していることが裏付けられた．

次に高効率化技術の導入順序について検討を行った．CaseA は Case1 に高効率インバータ冷凍機のみを採用した場合である．高効率インバータ冷凍機冷却水入口温度が高温でも従来型冷凍機よりも高効率なので，熱源システムにおいて年間で 28%の電力消費量削減を示した．また，冷却水温度の下限値が 32℃に制限されているために，年間を通じて電力消費量削減率の大きな変化は見られない．CaseA に統合型冷却塔を追加導入した CaseB では，



(a) 統合型冷却塔冷却水出入口温度



(b) 高効率インバータ冷凍機冷水出入口温度

図8 実測値と計算値の比較

表4 シミュレーション検討ケース

分類	導入技術	詳細説明
Case1	従来型熱源システム	従来型冷凍機を用いる（冷却水入口温度32℃，冷水出口温度7℃，部分負荷率100%の時に冷凍機COP4.9）
		個別冷却塔方式とし，冷却水出口設定温度を32℃としそれ以下の場合ファンの運転は行わない
		生産冷却水フリークーリングの運転を行わない
Case2	統合型冷却塔	冷却塔及び冷却水系統を統合し，送水温度限界までの低温冷却水を作る
		その他はCase1と同様
Case3	生産冷却水フリークーリング	冷却塔冷却水出口温度により生産冷却水フリークーリングを許可する
		その他はCase2と同様
Case4	高効率インバータ冷凍機	高効率インバータ冷凍機を採用し，冷水・冷却水ポンプをインバータ制御する
		その他はCase3と同様
分類	高効率化技術の組み合わせ	
CaseA	Case1に高効率インバータ冷凍機のみを導入する	
CaseB	CaseAに統合型冷却塔を導入する	
CaseC	CaseBに生産冷却水フリークーリングを導入する（Case4）	

表5　シミュレーション結果

		熱源システム			高効率インバータ冷凍機		
	検討ケース	電力消費量 [MWh]	COP [−]	対Case1削減率 [%]	電力消費量 [MWh]	COP [−]	対Case1削減率 [%]
年間	Case1	6188	3.3	-	4794	4.2	-
	Case2	5639	3.6	8.9	4151	4.9	13.4
	Case3	5618	3.6	9.2	4136	4.9	13.7
	Case4	3025	6.7	51.1	1956	10.4	59.2
中間季	Case1	2015	3.1	-	1545	4.1	-
	Case2	1799	3.5	10.7	1297	4.9	16.1
	Case3	1795	3.5	10.9	1292	4.9	16.4
	Case4	882	7.2	56.2	522	12.1	66.2
夏季	Case1	2431	3.4	-	1905	4.4	-
	Case2	2392	3.5	1.6	1837	4.5	3.6
	Case3	2418	3.4	0.5	1862	4.5	2.2
	Case4	1543	5.4	36.5	1107	7.5	41.9
冬季	Case1	1743	3.3	-	1344	4.3	-
	Case2	1447	4.0	17.0	1017	5.6	24.3
	Case3	1406	4.1	19.3	982	5.8	27.0
	Case4	599	9.6	65.6	328	17.5	75.6
		熱源システム			高効率インバータ冷凍機		
	検討ケース	電力消費量 [MWh]	COP [−]	対Case1削減率 [%]	電力消費量 [MWh]	COP [−]	対Case1削減率 [%]
年間	CaseA	4455	4.6	28.0	3510	5.8	26.8
	CaseB	3016	6.8	51.3	1993	10.2	58.4
	CaseC	3025	6.7	51.1	1956	10.4	59.2
中間季	CaseA	1405	4.5	30.2	1110	5.7	28.2
	CaseB	850	7.4	57.8	493	12.8	68.1
	CaseC	882	7.2	56.2	522	12.1	66.2
夏季	CaseA	1812	4.6	25.4	1414	5.9	25.8
	CaseB	1519	5.5	37.5	1083	7.7	43.1
	CaseC	1543	5.4	36.5	1107	7.5	41.9
冬季	CaseA	1238	4.6	29.0	986	5.8	26.6
	CaseB	647	8.9	62.9	417	13.8	69.0
	CaseC	599	9.6	65.6	328	17.5	75.6

年間で 51%の電力消費量削減率を示し，特に冬季には CaseA で 29%だった電力削減率が 63%まで上昇する．統合型冷却塔と高効率インバータ冷凍機の組み合わせが極めて効率の良いものであることが確認できる．CaseC は，CaseB に生産冷却水フリークーリングを追加導入した場合であるが，冬季以外は電力消費量が上昇しており，年間でも若干の増加が見られた．前述の従来型冷凍機に生産冷却水フリークーリングを導入した場合（Case3）と同様，生産冷却水フリークーリングによる冷凍機処理熱量低減による電力消費量の減少を生産冷却水フリークーリング用のポンプによる電力消費量の増加が上回ったためだと考えられる．

5. おわりに

本報では．高効率化技術を導入した熱源システムの省エネルギー性能を実測値とシミュレーションにより定量的に明らかにした．高効率インバータ冷凍機を用いた本熱源システムは，従来型の熱源システムに比べて年間の電力消費量を約 51%削減することができる．今後は，熱源システムの継続的な性能評価を行なうとともに，モニタリングシステムとシミュレーションを活用した性能維持手法について検討を行なう．

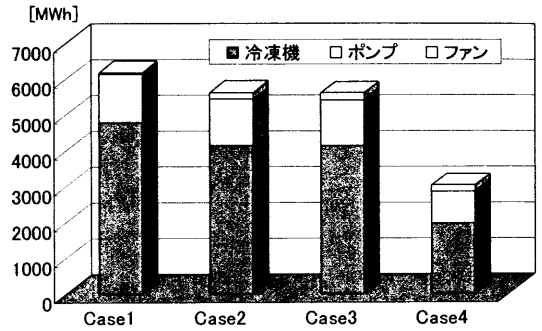


図9　年間電力消費量比較（Case1～Case4）

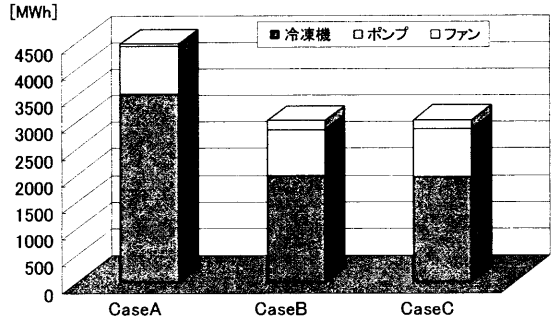


図10　年間電力消費量比較（CaseA～CaseC）

謝辞

本研究の遂行にあたり，ソニー株式会社，ソニーファシリティマネジメント株式会社，高砂熱学工業株式会社の関係者の方々に多大なご協力とご支援を頂きました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 宋　永学，赤司泰義，渡辺俊行，岡部洋一，小島昌一，林　徹夫：産業用熱源システムにおける高効率化技術に関する研究，都市・建築学研究，九州大学大学院人間環境学研究院紀要，第 2 号，pp.49-56, 2002.7.

2) Young-hak Song, Yasunori Akashi, Yasuhiro Kuwahara, Yoshiyuki Baba and Masatake Iribe: Evaluation on Energy Performance of Heating Plant System Installed Energy Saving Technologies, Proceedings of the Fourteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, pp.7-18, 2004.5.

3) 宋　永学，渡辺俊行，林　徹夫，赤司泰義，小島昌一，桑原康浩，馬場敬之，入部真武，河野朋子：産業用熱源システムにおける高効率化技術の有効性に関する研究　その 5　通年実績及び計算によるシステム性能検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1369-1370，2004.8.

（受理：平成 17 年 6 月 9 日）