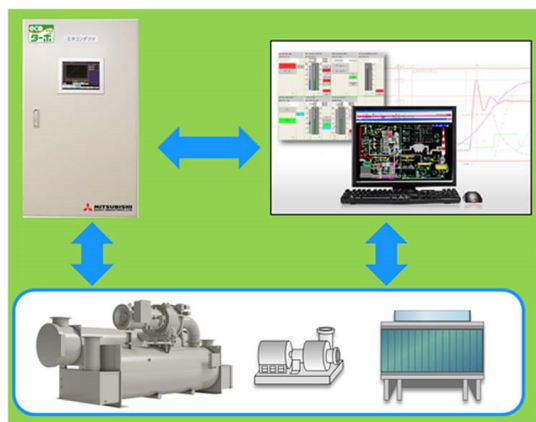


大規模地域熱供給に適した 熱源構成と最適システム制御の提案

Proposal of Heat Source Composition and Optimal Control System
Suitable for Large-scale District Cooling Plants



崔 林日^{*1}
Linri Cui

二階堂 智^{*1}
Satoshi Nikaido

三浦 貴晶^{*2}
Takaaki Miura

辻 清一^{*2}
Kiyokazu Tsuji

平山 裕^{*3}
Hiroshi Hirayama

近年、日本国内における熱供給事業は 2007 年前後をピークに減少傾向にあるものの、中東、アジア地区をはじめとする世界各国の大規模地域熱供給は依然として高い需要があり、多数の地域熱供給プラント(以下、地冷プラント)の建設と計画が進められている。しかし、各地域の気象条件と負荷特性を考慮した最適なプラント設計と運転方式は確立されていない。そこで三菱重工サーマルシステムズ(株)では、各地域の気候と負荷特性を考慮した熱源構成を提案し、従来システムと提案システムとの年間エネルギー消費量比較を行うことにより、気象条件に沿った適切な冷凍機の選定と最適台数制御を行うことが有効であることを確認した。

1. はじめに

地冷プラントは一般的に設備規模が大きく、建設コストとランニングコストは高額である。このため地域の気象条件や冷熱負荷の特徴を考慮した最適なプラント設計や運転手法の最適化による各コストの抑制がプラント建設及び運用の観点から重要である。

本稿では、大規模な地冷プラントが集中する中東やアジア地区に適した熱源構成と、最適ロジックを組み込んだ熱源総合制御システム“エネコンダクタ”を分散制御システム“Netmation”と連携させ、SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)システムとして構築することで地冷プラントを最適制御する手法を提案する。特に海外での地冷プラントなどへの実用化に向け、各地域の気候、負荷特性にあわせてエネルギー消費量の計算を実施し、その有効性を示す。

2. 気象条件と負荷特性

検討を行った各地域の気象条件と冷熱負荷特性を図1～3に示す。図1は各地域で想定される冷熱負荷パターンである。日本、東南アジア代表都市のシンガポール、中東地域代表都市のメッカについて各気象条件の比較を行い、その詳細を示す。

(1) 乾球温度

図2は、東京では季節ごとの乾球温度の変化が大きく(1月の平均乾球温度約6℃、8月の平均乾球温度約28℃)、その乾球温度差も大きいことを示している(約22℃差)。シンガポールでは乾球温度が高いが(年間の平均乾球温度約30℃)、一年を通じその変化は少ない(温度差

*1 三菱重工サーマルシステムズ(株)大型冷凍機技術部

*2 三菱重工サーマルシステムズ(株)大型冷凍機技術部 グループ長

*3 (株)MHPS コントロールシステムズ営業部 主幹

は約8℃)。一方で、メッカは日本では通常測定されない乾球温度 40℃を超える高い温度域である。また、季節ごとの乾球温度の変化が大きい(約 15℃差)。つまり、メッカは東京のように冬季と夏季における大きな乾球温度差とシンガポールのように高い乾球温度の両方の特徴を有する。

(2) 湿球温度

図3は東京では季節ごとの湿球温度の変化が大きいことを示している(約 25℃差)。シンガポールでは年間を通して湿球温度の変化がほとんどない(約2℃差)。また、メッカの湿球温度の変化は小さく(約 12~15℃差)、湿球温度はシンガポールに比べれば低いので、冷却水入口温度が低くなり、冷凍機の性能向上が期待される。

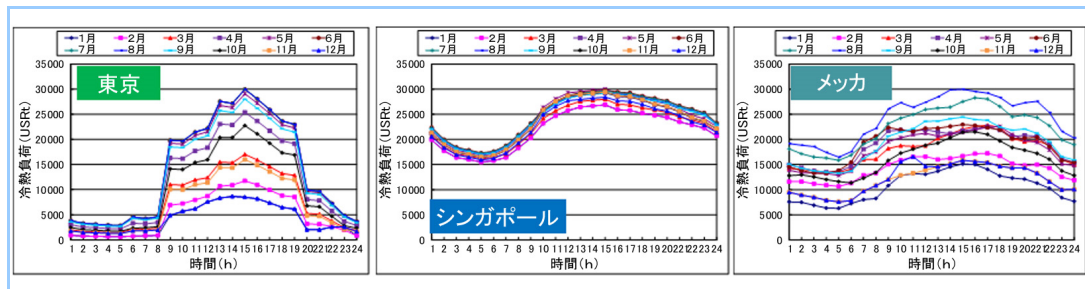


図1 地域別想定冷熱負荷

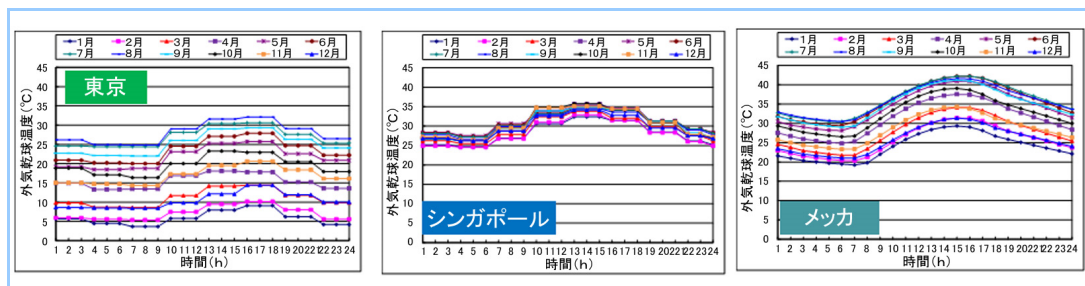


図2 地域別外気乾球温度

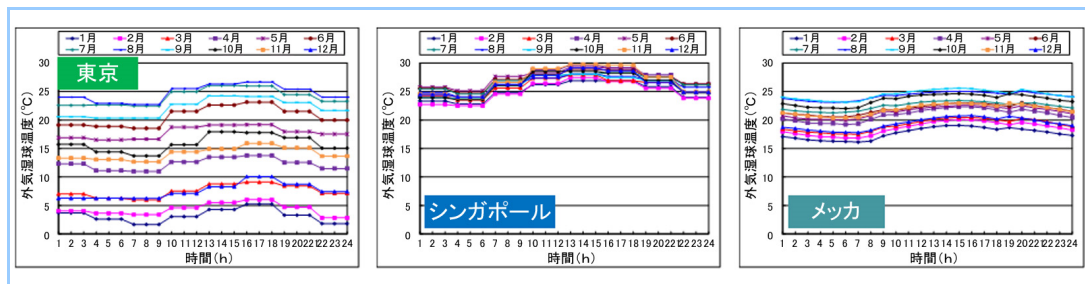


図3 地域別外気湿球温度

3. 大規模地冷プラントへの熱源システムの提案

地冷プラントの設計段階では 1) 建設コスト、2) 運用方式、3) 冷凍機単体性能と 4) 補機を含んだ全体システム性能を検討する必要がある。上記の項目を考慮し、中東地域を対象とする以下の冷凍機及びプラント設計を提案する。

3.1 中東地域における地冷プラント向け冷凍機設計

(1) 冷凍機設計コンセプト

以下の冷凍機設計コンセプトを提案する。

- ① 大容量の冷凍機能力を有する冷凍機(3000RT~6000RT)
- ② 省スペースな冷凍機
- ③ 高効率型冷凍機(中東地域運転条件下)

これらの冷凍機に対する設計コンセプトを満足させるために、以下の条件を満たす冷凍機が必要となる。

- ① 大容量圧縮機の適用(冷凍能力 UP)
- ② 1台の冷凍機に2つの圧縮機を搭載したパラレル型ユニット※¹(省スペース)
- ③ 1台のパラレル型ユニットもしくは、2台のシングル※²圧縮機ユニットで構成されたシリーズカウンター型※³(高効率型冷凍機)

※¹ パラレル型:1台の冷凍機に圧縮機を2台搭載して大容量化と省スペース化を図った冷凍機。

※² シングル型:1台の冷凍機に圧縮機を1台搭載した標準的な冷凍機。

※³ シリーズカウンター型:2台のシングル冷凍機をシリーズに配置し、冷水と冷却水の流れを逆(カウンターフロー)として大容量化と性能向上を図った冷凍機。

(2) 最適運転システム

運転コストを抑制するために、最適制御システムにより冷却水温度と冷熱負荷に従い、冷凍機運転台数、冷水流量と冷却水流量を制御するべきである。中東地域の運転条件において高いパフォーマンスを示す冷凍機を採用するだけでなく、補機を考慮した全体システムを考えた最適な運転によって効果的な運転コストの削減が可能である。

3.2 プラント仕様

本章ではターボ冷凍機とプラントの仕様について述べる。

(1) 30000RT プラント向け冷凍機仕様

プラント容量として 30000RT(1日[24 時間])に 30 000 トンの0℃の水を、氷にするために除去すべき熱量)を想定し、5000RT 冷凍機6台構成で検討を行う。定格点における固定速ターボ冷凍機(以下、固定速機)とインバータターボ冷凍機(以下、インバータ機)の場合のシステムパフォーマンスを表1に示す。インバータ機の COP(Coefficient Of Performance)は電気的な効率損のため、固定速機に比べ定格点で約3%性能が低下する。電動機入力、COP、冷却水流量以外の要素は同値である。

表1 固定速機とインバータ機のシステムパフォーマンス

型式	固定速	インバータ	
地冷プラント容量(USRt)	30000	30000	
冷凍能力(USRt)	5000	5000	大容量
台数	6	6	
電動機入力(kW)	3498	3680	
定格 COP	5.0	4.8	高効率
冷水出入口温度(℃)	4.4/13	4.4/13	
冷水流量(m ³ /h)	1655	1655	
蒸発器圧損(kPa)	53.4 ※ ¹	53.4 ※ ¹	低圧力損失
冷水ポンプ揚程(mAq)	13.0	13.0	
冷水ポンプ消費電力(kW)	90	90	
冷却水ポンプ出入口温度(℃)	43.5/35	43.5/35	
冷却水流量(m ³ /h)	2107.8	2170.6	
凝縮器圧損(kPa)	31.0 ※ ²	31.0 ※ ²	低圧力損失
冷却水ポンプ揚程(mAq)	20.0	20.0	
冷却水ポンプ消費電力(kW)	200	200	

※¹ 冷水ポンプ揚程=配管、弁類の圧損+ストレーナ(3mAq)+制御弁(3mAq)+蒸発器圧損

※² 冷却水ポンプ揚程=配管、弁類の圧損+ストレーナ(3mAq)+制御弁(3mAq)+開放式冷却塔(10mAq)+凝縮器圧損

図4は各冷却水入口温度と冷熱負荷の冷凍機 COP を示している。固定速機とインバータ機を比較し、より COP が高い冷凍機の値を図4に記載した。固定速機は冷却水温度と冷熱負荷が高い領域で性能が優位となる。図4より、東京はインバータ機、シンガポールは固定速機、メッカは固定速機かインバータ機を採用する方が優位になっている。

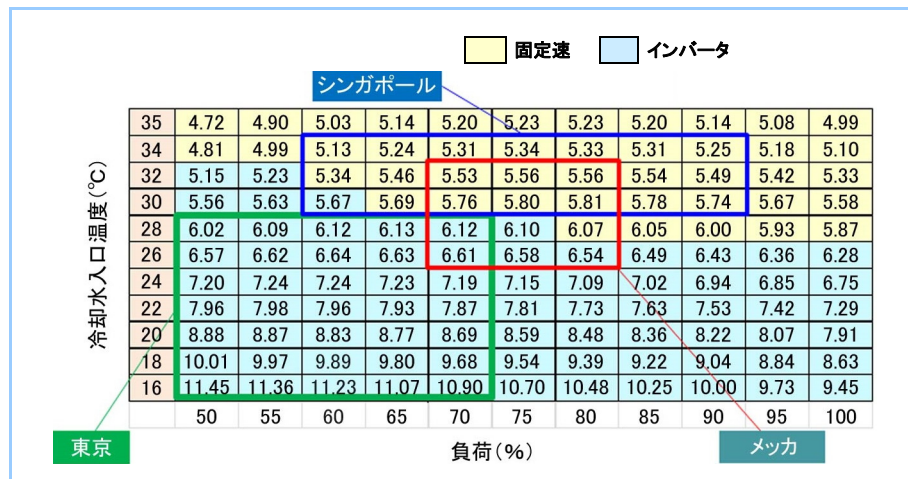


図4 固定速機とインバータ機との COP 比較

(2) プラント配置比較

図5に冷凍機の配置例を示す。図5(a)はシリーズカウンター型ユニットと平行型ユニットの配置である。両ユニットは 5000RT の冷凍能力を有し、同等の設置面積である。本稿では冷凍機台数を少なくし、冷凍機台数制御を簡易にするために平行型ユニットを、地冷プラントを構成する冷凍機として選択した。

平行型ユニット6台による 30000RT の冷凍能力を有するプラントにおいて、設置面積が最小となるように配置した配置図を図5(b)に示す。冷凍機1台に対し冷水ポンプと冷却水ポンプは1台、冷却塔が2台設置されることを想定した。

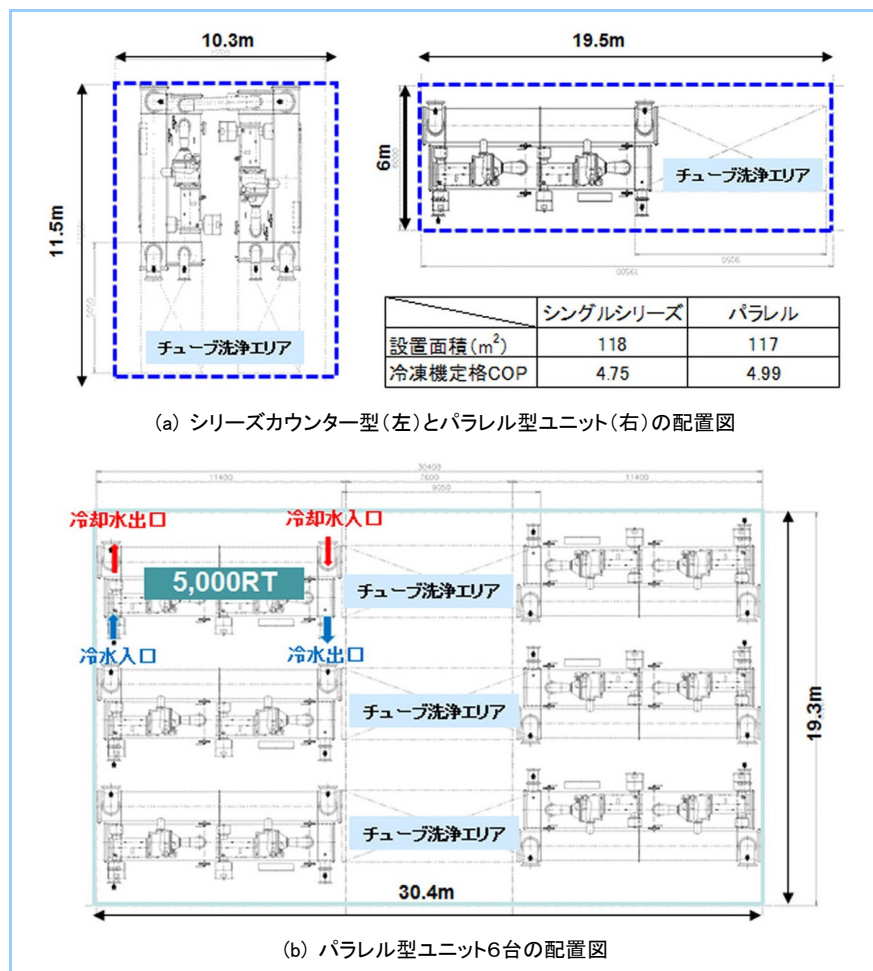


図5 冷凍機配置例

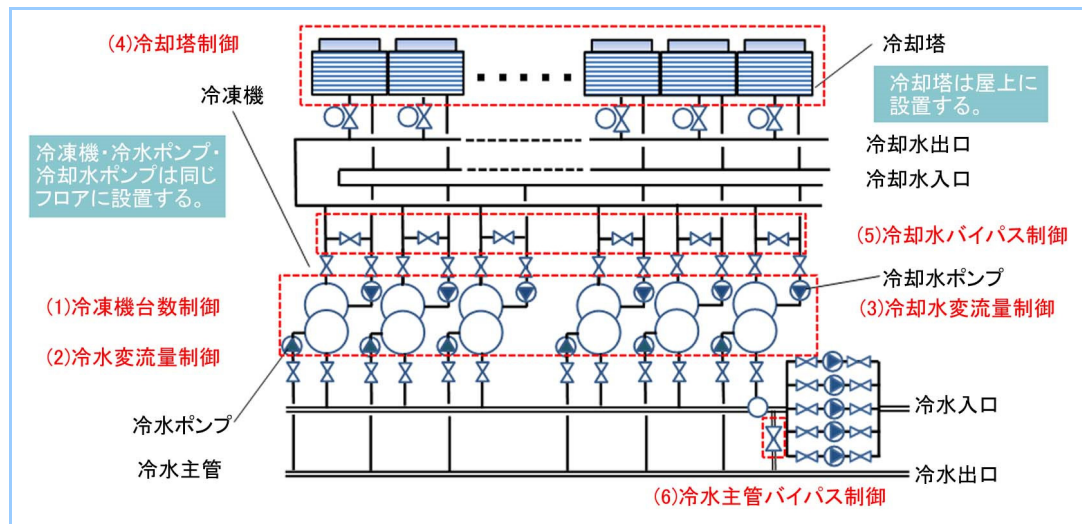


図6 地冷プラントシステムフロー

3.3 最適制御システムの概要

実プラントにおける熱源設備の最適化運転を行うため、前原ら⁽¹⁾⁽²⁾によるシミュレーションモデルにより、最適運転パラメータを決定していく手法を提案している。本稿では、エネコンダクタの最適制御プログラムを用いた熱源設備制御手法について説明する。最適制御システムは図6に示された(1)から(6)の項目の制御を行う。ここでは以下の3つの制御手法(1)冷凍機台数制御、(2)冷水変流量制御と(3)冷却水変流量制御について記述する。冷凍機COPとシステムCOPは主にこれらの制御によって影響を受ける。

(1) 冷凍機台数制御

図7に示すように冷凍機には各冷却水温度に対して最適負荷範囲が存在する。固定速機では定格点付近が最適な負荷範囲である(図7(a))。インバータ機では冷却水入口温度ごとに最適負荷範囲がある(図7(b))。その範囲は各冷凍機の操作パネルで計算され、最適制御システムに送られる。必要な冷凍機台数は冷熱負荷と各冷凍機の最適負荷範囲及び周囲補機仕様によって決定される。

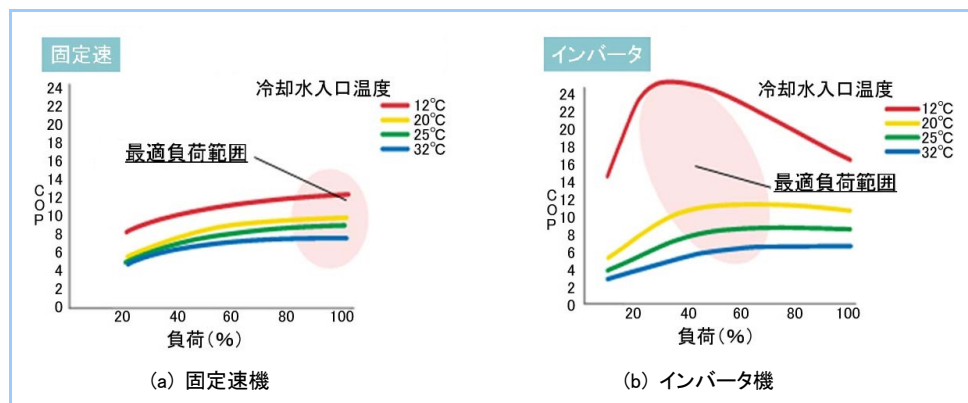


図7 固定速機とインバータ機の最適負荷範囲

(2) 冷水変流量制御

各冷凍機に対する冷水流量は図6に示す冷水主管のバイパス流量がゼロ、つまり主管バイパス弁が全閉となるようにポンプ周波数を指示して冷水送水流量を決定する。

(3) 冷却水変流量制御(図8)

冷却水の最適な流量は冷凍機負荷率と湿球温度によって、図8に示す各機器(冷却塔、冷却水ポンプ、冷凍機)のエネルギー消費(システム動力)が最小になるように決定される。

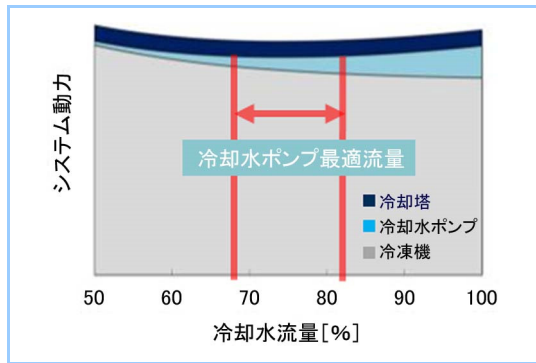


図8 冷却水変流量制御

4. 経済性評価

本章では以下にて、想定した地冷プラントの年間消費電力の計算結果について述べる。

(1) 東京

図9(a)に年間電力消費量と年間システム COP の比較を示す。従来制御でインバータ機の適用により固定速機と比較し約7%の年間電力消費量が削減される。さらに、インバータ機で最適制御の適用により従来制御に比べ約4%の年間電力消費量が削減される。上記より冷却水温度と冷熱負荷の変動がある東京ではインバータ機と最適制御を適用したシステムが最も年間電力消費量が小さい。また、図9(b)は東京において固定速機及びインバータ機を採用した冷凍機の各運転条件における年間システム COP を示している。東京は冷却水温度と負荷率は季節ごとに変化が大きいので、インバータ機の COP が大きく、全体システム COP が良くなる。

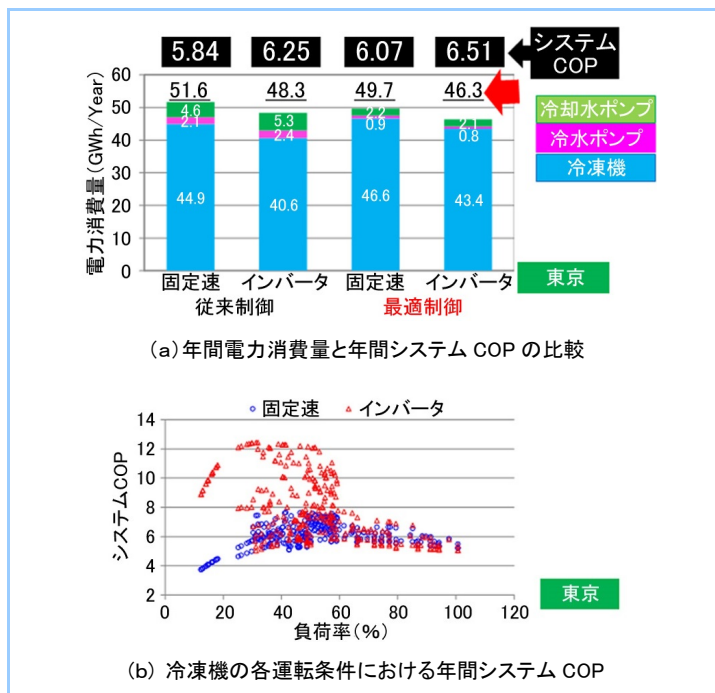


図9 年間電力消費量及び年間システム COP(東京)

(2) シンガポール

図10(a)に年間電力消費量と年間システム COP 比較を示す。シンガポールでは高性能な固定速機の導入が適切である。また、図10(b)はシンガポールにおいて固定速機及びインバータ機を採用した冷凍機の各運転条件における年間システム COP を示している。シンガポールは年間冷却水温度変化が小さいので、固定速機を使用する方が全体システム COP が高い。

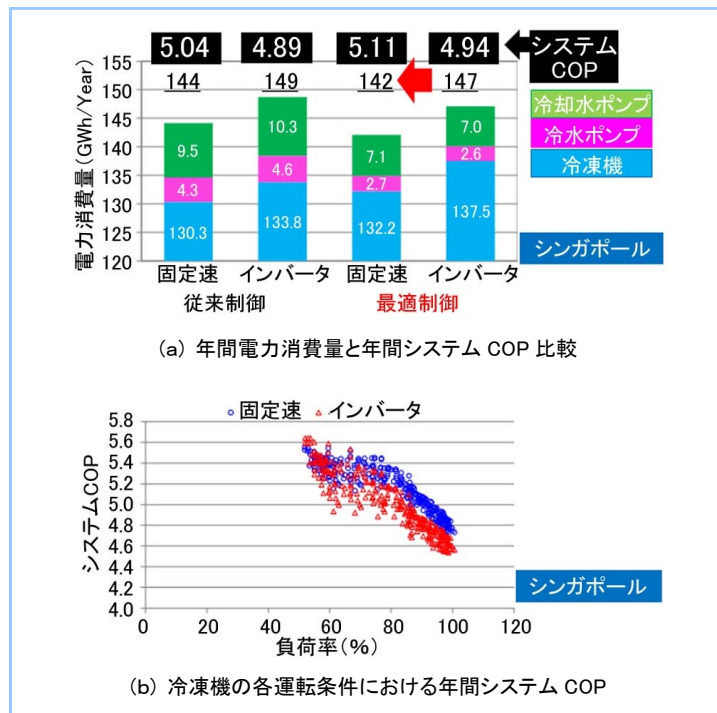


図 10 年間電力消費量及び年間システム COP(シンガポール)

(3) 中東(メッカ)

図 11(a)に年間電力消費量と年間システム COP の比較を示す。冷却水温度が高いため、典型的な中東地域であるメッカは固定速機と最適制御の組合せが優位である。図 11(b)はメッカにおいて固定速機及びインバータ機を採用した冷凍機の各運転条件における年間システム COP を示している。固定速機は負荷率 60%~100%で性能が高く、インバータ機は負荷率 60%以下で性能が高い。全体的にメッカはシンガポールと同様に年間冷却水温度が高く変化も小さいので、年間電力消費量がほぼ同等でインシャルコストが低い高性能な固定速機が適している。さらに最適制御システムの適用により、エネルギー消費は約3%削減される。

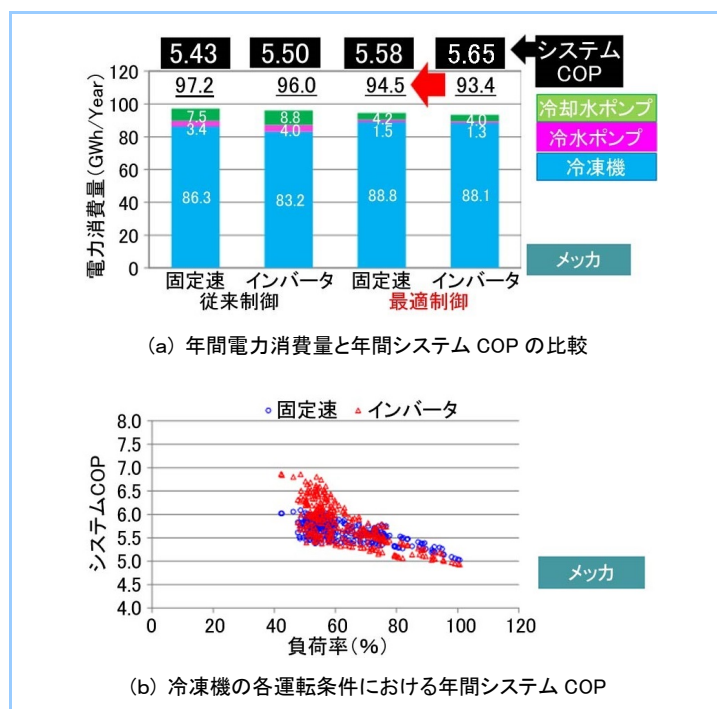


図 11 年間電力消費量及び年間システム COP(メッカ)

5. エネコンダクタと Netmation の連携による大規模 SCADA 実現

エネコンダクタは組込ソフトウェアに上述の制御機能を標準搭載した熱源コントローラであり、熱源システムの最適化を容易に実現可能としている⁽³⁾。更に大規模なシステムを念頭に、この上位に、発電を主力に幅広くプラント制御・監視で適用されている(株)MHPS コントロールシステムズ製の制御装置 Netmation を置き、三菱重工グループ一体で中東の地冷プラントに対して、エネルギー全体最適化機能を有した SCADA システムの提案を進めている。提案システム構成を図 12 に示す。Netmation は複数のエネコンダクタと通信で連携して、全体最適化制御を行いつつ、中央監視等の SCADA 機能も果たしている。

当該システム(中央監視機能除く)はインバータ機4台+固定速機4台の熱源設備を持つ国内半導体工場に初号機が導入されており、2016 年3月より運用を開始、安定運転を継続している。

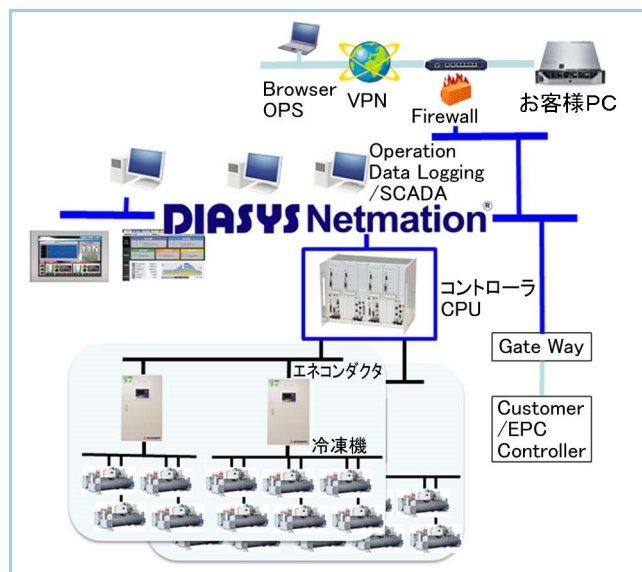


図 12 エネコンダクタ+Netmation のシステム構成

6. まとめ

- (1) 日本において年間を通じて気温の変化が大きい場合、インバータ機と最適制御システムの組合せが最適であり、地冷プラントの性能を約 10%向上させる。
- (2) 中東地域と東南アジアの地冷プラントでは、冷却水温度が高いため高性能な固定速機が適している。
- (3) 中東地域において冷熱負荷及び冷却水温度の変動が小さい場合、最適制御システムの適用により地冷プラントのエネルギー消費は約3%削減される。
- (4) 中東地域の地冷プラントでは、大容量、高性能で且つ設置面積を抑えるためパラレル型ユニット又はシリーズカウンター型ユニットの適用が有効である。
- (5) 中東地域の地冷プラントにおける大規模な最適制御を実現するため、最適ロジックを組み込んだエネコンダクタを Netmation と連携させることで SCADA システムとして構築することができる。

参考文献

- (1) 前原則保, 下田吉之 PSO (Particle Swarm Optimization) 手法による最適熱源探索, 空気調和・衛生工学会論文集(189), 11-20, 2012-12-05
- (2) 前原則保, 下田吉之 PSO (Particle Swarm Optimization) 手法による地域冷房プラントの最適運転制御手法の研究, 空気調和・衛生工学会論文集(209), 1-11, 2014-08-05
- (3) 二階堂智ほか, ターボ冷凍機からなる熱源システムを最適制御するコントローラ“エネコンダクタ”, 三菱重工技報 VOL51 No.2 (2014) p.4-9