脱炭素を目指したイノベーション施設の計画と検証
（第 3 報）3 管式ダイナミックレンジ冷熱源システムの
エネルギーシミュレーションと実験による事前評価

山　川　莉　加（新菱冷熱工業）　　坂　本　　裕（新菱冷熱工業）
福　井　雅　英（新菱冷熱工業）　　矢　島　和　樹（新菱冷熱工業）

本プロジェクトでは、従来の潜熱・顕熱分離空調方式より省エネルギー性能の高い冷熱源システムとして、高温用の機器と低温用の機器を直列に接続したシステム（以下、開発システム）を開発・計画した。本報では、開発システムの事前評価および制御システムの概要について報告する。

開発システムと一般的な熱源システムをエネルギーシミュレーションにて比較し、開発システムの性能を評価した。まず、開発システムの特長を次の 3 点にまとめ、各特長が活用される代表的な日時において省エネルギー効果を示した。(1) 熱源の中間温度を可変させる、(2) 低負荷時に単熱源に負荷を集約させる、(3) 冷却塔によるフリークーリング・予冷。次に、総合評価として年間消費電力量の比較を行い、41.4 %の省エネルギー効果が見込まれることを示した。

実運用でもシステムの特長を活用するため、「シミュレーションを用いた最適な熱源の設定条件を求める計算機能」と「中央監視装置」を連携させる制御システムを構築した。

開発システムを模擬した小規模な実験を行った結果、想定どおりの通水制御や負荷処理ができ、2 次側の要求冷水温度と流量を満たしながら熱源の中間温度を変更できることを確認した。

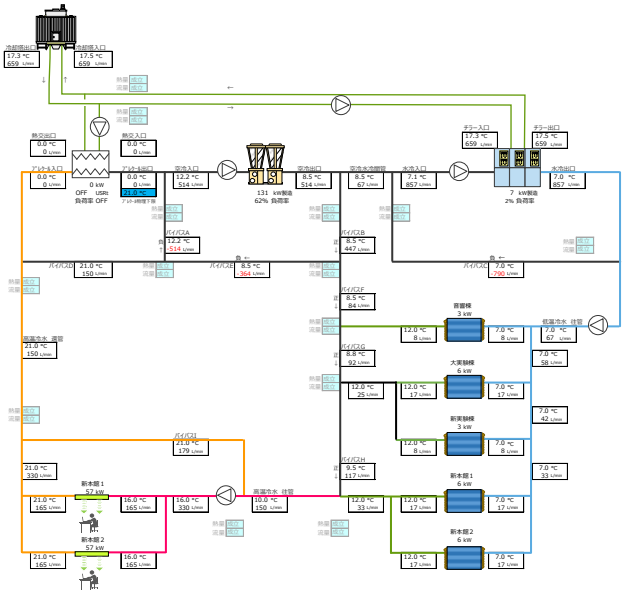
は じ め に

本プロジェクトでは、従来の潜熱・顕熱分離空調方式に対し、省エネルギー性の向上を追求した「3 管式ダイナミックレンジ冷熱源システム」（以下、開発システム）を考案し、計画している。

第 2 報 [1] では、開発システムの概要と省エネルギー性能向上のポイントについて示した。本報では、エネルギーシミュレーションによる省エネルギー性能の評価、構築する制御システムの概要、実験による事前評価について報告する。

1. エネルギーシミュレーションの概要

エネルギーシミュレーションソフトとして、LCEM ツールで使用されている計算式や独自の計算式を組み合わせ、表計算ソフトによる計算ツールを作成した。シミュレーションソフトの画面のイメージを図–1 に示す。配管各部の温度や流量は相互に影響するため、複数の配管が合流・分岐する部分は、温度・流量の収束計算が必要で



図–1 シミュレーションソフトの画面

ある。なお、本シミュレーションモデルは計画段階で作成したものであり、実装するシステムとは配管接続の細部が一部で異なる。

入力条件として、月代表日の 1 時間毎に外気や冷房負荷の条件を推定した。推定した負荷は当該施設の改修前の実績データを基に規模拡大や用途変更等の運用環境の変化を加味した。ただし、改修前の実績データは冷熱負荷であるため、高温冷水負荷と低温冷水負荷に案分した。二次側の熱媒条件は、便宜的に往還温度は一定（低温冷水：7 ℃送水／12 ℃還水、高温冷水：16 ℃送水／21 ℃還水）、流量は負荷に比例とした。

2. エネルギーシミュレーションによる性能評価

2.1 比較対象

開発システムの省エネルギー性能を定量的に評価するため、下記の 3 種類の冷熱源システムにおいてシミュレーションを行った。

1）標準熱源

概略フローを**図-2** に示す。熱源機は空冷ヒートポンプチラー（以下、空冷チラー）（定格能力 422 kW）とした。全熱を低温冷水（7 ℃送水／12 ℃還水）により処理するものとした。低温冷水負荷として、1 章で述べた低温冷水負荷と高温冷水負荷の合計値を与えた。

2）並列方式

概略フローを**図-3** に示す。熱源機は開発システムに合わせて、空冷式チラー（定格能力 211 kW）を 1 台、水冷式インバータスクリューチラー（以下、水冷チラー）（定格能力 352 kW）を 1 台とした。配管システムは低温冷水と高温冷水を別系統とした。外気条件によって、高温冷水は冷却塔によるフリークーリングもしくは予冷を行った。空冷チラーは高温冷水（16 ℃送水／21 ℃還水）、水冷チラーは低温冷水（7 ℃送水／12 ℃還水）を製造する。各冷水一次ポンプの流量、冷却水温度・流量は最適制御を想定した。

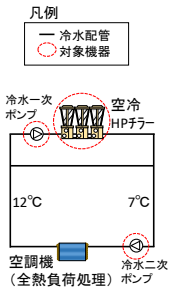


図-2 標準熱源の概略フロー

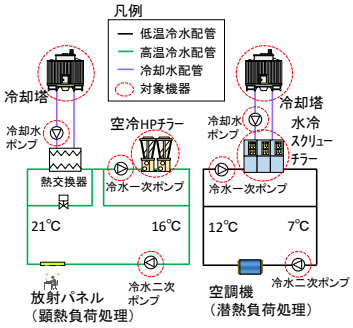


図-3 並列方式の概略フロー

3）開発システム

熱源機や冷却塔、二次側負荷の機器構成は並列方式と同様とした。**図-1** に示す配管システムとすることで、水冷チラーと併用の場合には、空冷チラーの出口温度（以下、熱源中間温度）を二次側の高温冷水送水温度と一致させる必要がない。そのため、熱源中間温度を最適な値に可変制御することができる。熱源中間温度の設定温度を、計算を簡略化するため、8.5, 10.0, 11.5, 13.0, 14.5, 16.0 [℃]とし、システム（熱源機、冷却塔、冷水一次ポンプを対象とする）の合計消費電力量を最小とする送水温度を最適な送水温度として探索し、送水温度に設定した。各冷水一次ポンプの流量、冷却水温度・流量は並列方式と同様に、最適制御を想定した。

2.2 システムの優位性の検証

(1) 熱源中間温度の可変による効果

熱源中間温度を可変させたことによる省エネルギー効果の例として、6 月代表日 16 時のシミュレーション結果を示す。外気・負荷の値を**表-1** に、消費電力量の合計を**図-4** に、熱源の負荷率と単体 COP を**表-2** に示す。

図-4 より、この条件では並列方式は標準熱源に比較して消費電力量が大きくなる。これは、**表-2** より、水冷チラーの負荷率が 10.6 %と低く、単体 COP が比較的低くなるためである。並列方式では低温冷水負荷を水冷チラーのみで製造し、低温冷水負荷が低いときには低負荷運転を行わざるを得ない。

一方、開発システムは並列方式に比較して消費電力量が小さくなる。これは、温度帯の異なる低温冷水・高温冷水の負荷を 2 台の熱源で分担できること、さらに熱源中間温度の最適化により水冷チラーの負荷率を向上させることで単体 COP を改善させることによる。

表-1 6 月代表日 16 時の外気・負荷条件

想定月時	外気条件		二次側負荷条件			
	乾球温度	湿球温度	低温冷水		高温冷水	
			負荷	流量	負荷	流量
6 月 16 時	23.3 [℃]	19.4 [℃]	37 [kW]	107 [L/min]	117 [kW]	336 [L/min]

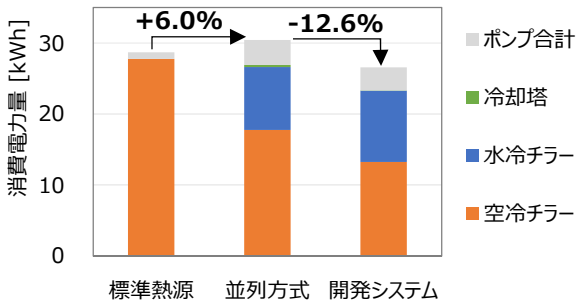


図-4 6 月代表日 16 時の消費電力量

表-2 6月代表日16時の熱源負荷率と単体COP

	空冷チラー			
	負荷率		単体COP	
標準熱源	36.6 %		5.57	
	空冷チラー		水冷チラー	
	負荷率	単体COP	負荷率	単体COP
並列方式	55.6 %	6.61	10.6 %	4.22
開発ｼｽﾃﾑ	41.4 %	6.61	19.1 %	6.69

(2) 低負荷時に単熱源に負荷を集約させる効果

低負荷時の例として9月代表日19時のシミュレーション結果を示す。外気・負荷の値を**表-3**に、消費電力量の合計を**図-5**に、熱源の負荷率と単体COPを**表-4**に示す。

表-4より、9月代表日19時は低温冷水負荷が非常に低いため、並列方式では、(1)と同様に水冷チラーが低負荷運転（負荷率1.6 %）を行わざるを得ず、単体COPが非常に低くなる（単体COP 0.57）。なお、水冷チラーは仕様上、負荷率1.6 %での連続運転は不可であり、負荷率20 %での間欠運転となることを加味した。その際、冷却塔のファンや冷却水ポンプは連続運転とした。一方、開発システムでは低温冷水・高温冷水の負荷を空冷チラーに集約できるため、空冷チラーの効率向上や水冷チラーの補機電力の削減に繋がり、システムの消費電力量は小さくなる。

表-3 9月代表日19時の外気・負荷条件

想定月時	外気条件		二次側負荷条件			
	乾球温度	湿球温度	低温冷水		高温冷水	
			負荷	流量	負荷	流量
9月19時	22.2 [℃]	20.8 [℃]	6 [kW]	16 [L/min]	64 [kW]	185 [L/min]

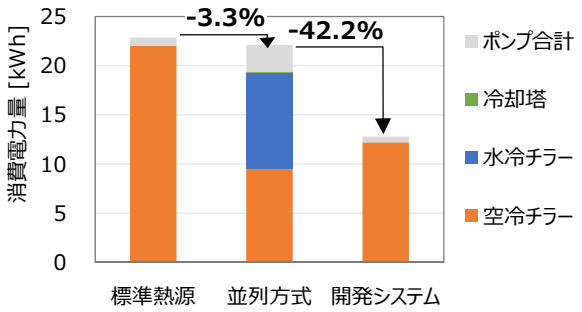


図-5 9月代表日19時に対する消費電力量

表-4 9月代表日19時の熱源負荷率と単体COP

システム名称	空冷HPチラー			
	負荷率		単体COP	
標準熱源	16.6 %		3.18	
システム名称	空冷HPチラー		水冷スクリューチラー	
	負荷率	単体COP	負荷率	単体COP
並列方式	30.6 %	6.80	1.6 %	0.57
開発ｼｽﾃﾑ	33.2 %	5.74	0 %	

(3) 冷却塔によるフリークーリング・予冷の効果

3, 4月代表日の終日や5, 10月代表日の夜間において、標準熱源に比較して並列方式・開発システムは消費電力量が非常に小さくなった。これは、標準熱源では還温度が14 ℃となるが、並列方式・開発システムでは二次側負荷の潜熱・顕熱処理を分離するため還温度が21 ℃となることにより、高温冷水のフリークーリングや冷却塔による予冷と空冷チラーによる冷水製造が可能となり、消費電力量が大幅に削減されるためである。

2.3 年間の省エネルギー効果

標準熱源と開発システムにおいて年間消費電力量を算出し比較した（**図-7**）。なお、冷房期間は3～10月とし、年間の外気・負荷の想定条件を**図-6**に示す。年間消費電力量は、月代表日の1時間毎の条件に対する消費電力量をシミュレーションで計算し、各月の平日数を乗算し、合計した値（計3,840時間）とする。

標準熱源に対し開発システムの省エネルギー効果は41.4 %であった。開発システムでは、2.2節で述べた効果により、年間で高い省エネルギー効果が得られることが示された。

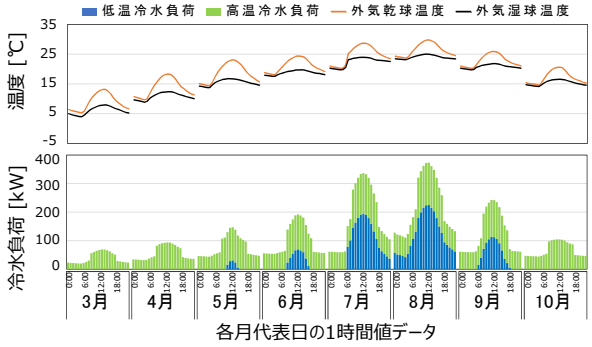


図-6 年間の外気・負荷の想定条件

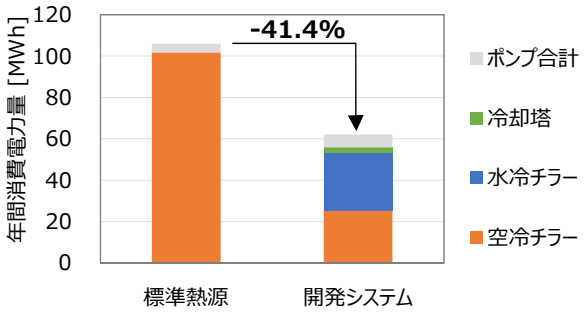


図-7 年間消費電力量の比較

3. 最適制御システムの概要

本プロジェクトの実際の熱源システムにおいて、2章で述べた省エネルギー効果を得るために、考案した制御方法を紹介する。1章で述べたとおり熱源中間温度の最

適値の算出には収束計算が必要となり、汎用の自動制御コントローラによる制御では対応が困難である。そこで、本プロジェクトでは、エネルギーシミュレーションの機能を含む最適計算プログラムを汎用の表計算ソフトを用いて作成し、中央監視装置と最適計算プログラムを連携させたシステム（**図-8**）を構築する。中央監視装置から計算に必要な情報を取得し、最適計算プログラムで運転機器の選択や熱源中間温度等の最適解を探索し、最適解を中央監視の運転指令や制御設定値に反映する。

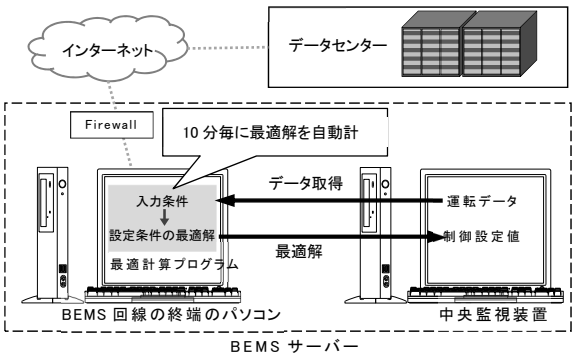


図-8 中央監視装置と最適計算プログラムの連携

4. 実験による事前評価

開発システムの配管経路では、低温冷水・高温冷水が同一系統内に混在する。シミュレーションと同様の経路で通水や負荷処理ができることを確認するため、開発システムを模擬した小規模な実験装置を製作し、事前評価を行った。実験装置の写真を**図-9** に、使用機器の一覧を**表-5** に示す。実験装置は、およそ W:10,000 mm, D:4,000 mm, H:2,000 mm とした。開発システムは冷熱源システムだが、容量や経済性の観点から実験装置は温熱源システムとした。加熱源は電気プラグヒーター、冷却負荷は FCU とした。本装置では、冷却塔によるフリークーリング・予冷の機能は模擬していない。

実験では、夏期・中間期・冬期や負荷の偏在の有無といったさまざまな条件を設定し実施した。ここでは、代表例として、夏期の条件における熱源中間温度の可変実験の結果を述べる。二次側の高温冷水負荷を定格能力の 100 %、低温冷水負荷を定格能力の 60 %として熱源中間温度を 45 ℃から 43 ℃に変更した実験を行った結果を**図-10**, 11 に示す。図中には測定した各部の温度・流量比の分布を示す。流量比は FCU の定格流量の 2 台分（28.0 L/min）に対する割合とし、同流量の部分を同色の矢印で示す。なお、「往還バランス管」とは、高温冷水負荷と低温冷水負荷の中間で熱源側と負荷側をつなぐ配管である。

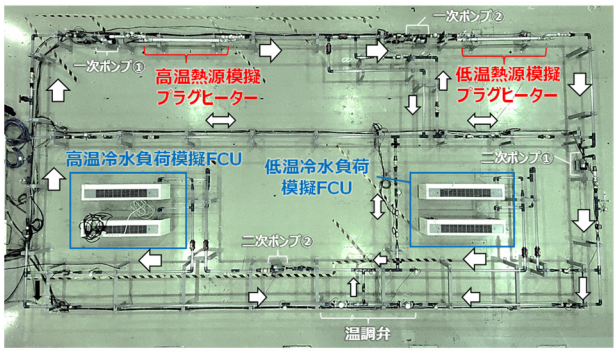


図-9 実験装置の全景写真

表-5 実験使用機器

機器名	仕様		数量
プラグヒーター	能力	15 kW	2 台
	制御	出口温度による自動制御 高温冷水模擬：41～49 ℃ 低温冷水模擬：50 ℃	
FCU	能力	5 kW	4 台
	風量	675 m3/h	
	流量	14.3 L/min	
	制御	自動制御：なし	
ポンプ	能力	揚程 2.0 m	4 台
	流量	30.0 L/min	
	制御	自動制御：なし INV 周波数：手動設定可能	
温調弁	制御	合流部温度による自動制御	1 対

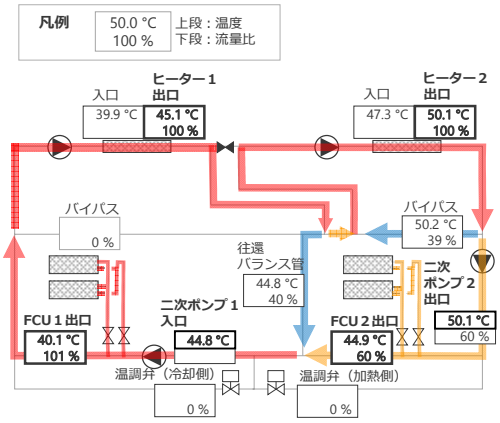


図-10 実験結果（熱源中間温度：45 ℃）

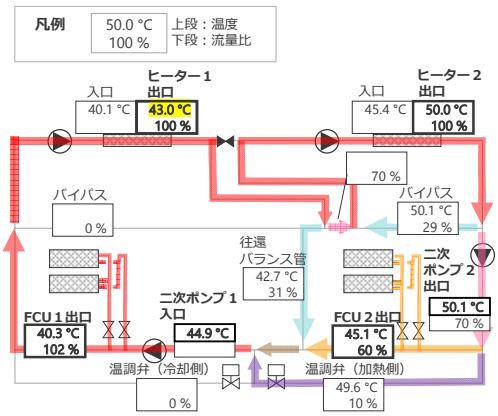


図-11 実験結果（熱源中間温度：43 ℃）

図-10, 11 に示す通水経路はシミュレーションと同様であった。また、熱源中間温度（図中の「ヒーター１出口」の温度）を 45 ℃から 43 ℃に変更しても、二次側の高温冷水負荷の送水温度（図中の「二次ポンプ１の入口」の温度）はほぼ変化していない。

このように、さまざまな条件で行った実験の結果から、開発システムの設計思想やシミュレーションの結果と同様に、通水制御や負荷処理が可能であることを確認した。また、往還バランス管やバイパス配管、温調弁を設けることによって、熱源中間温度の設定を変更しても二次側の熱媒条件を変化させずに負荷処理の対応が可能であることも確認した。

おわりに

本報では、開発した「3 管式ダイナミックレンジ冷熱源システム」について、下記の内容を示した。

- エネルギーシミュレーションの結果から、開発システムは標準的な熱源システムに比較して年間で 41.4 %の省エネルギー効果が見込まれる。
- 実際の熱源システムを最適な設定条件で運用するため、表計算ソフトを用いた「最適計算プログラム」と中央監視装置を連携する制御システムを構築した。
- 開発システムを模擬した小規模な実験を行った結果から、想定通りの通水制御や負荷処理ができ、二次側の熱媒条件を維持しながら熱源中間温度の設定を変更できることを確認した。

参　考　文　献

1) 福井, 他. (2023). 脱炭素を目指した次世代空調システムの計画と検証（第 2 報）. 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集