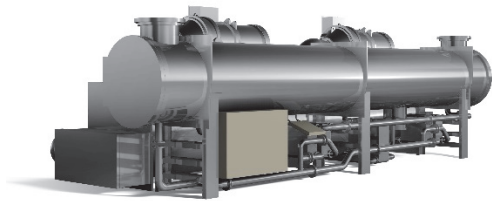


# 大幅な CO<sub>2</sub> 排出量削減を実現する大容量高効率ターボ冷凍機

## Large-capacity, High-efficiency Centrifugal Chiller That Enables Significant Reduction in CO<sub>2</sub> Emissions



谷村 裕太\*<sup>1</sup>  
Hiroataka Tanimura

李 眞雄\*<sup>1</sup>  
Jinwoong Lee

袖野 丈晴\*<sup>1</sup>  
Takeharu Sodeno

松尾 実\*<sup>2</sup>  
Minoru Matsuo

磯野 隼佑\*<sup>1</sup>  
Shunsuke Isono

西井 健一朗\*<sup>3</sup>  
Kenichiro Nishii

モントリオール議定書・キガリ改正により、HFC 冷媒の規制が進むものの、新興国においては削減がまだ開始されておらず、経済発展に伴う空調需要の増加により HFC 冷媒及び HFO 冷媒両方の使用量が増加すると考えられる。そのため HFC 冷媒と HFO 冷媒機において殆どの機器構成を共用した最大 5000Rt の大容量冷凍機を開発した。特徴として一つの冷凍機に圧縮機を2台直列に搭載したシリーズカウンターフロー（以下、SCF）配置による高効率化や、HFC 冷媒と HFO 冷媒の冷媒差によらない制御を組み込み、冷媒の変更にも容易に対応可能とした。

また専用の台数制御盤により2台の冷凍機を SCF 配置することで、プラント設備における高効率運用を可能とした。本報では、大容量高効率ターボ冷凍機の開発にあたり採用した技術について紹介する。

### 1. はじめに

地球環境を取り巻く世界情勢はオゾン層の保護と地球温暖化防止がメインテーマである。2016年に採択されたモントリオール議定書・キガリ改正で、特定フロン<sup>1</sup>の代替フロンである HFC (Hydro Fluoro Carbon: ハイドロフルオロカーボン) 冷媒の段階的規制を進めていくことが決定された。先進国においては2019年から削減スケジュールが開始され2036年以降85%の削減を目標としているものの、新興国においては2029年から削減スケジュールが開始され、80%の削減目標が設定されているのは2045年となる。この削減スケジュールが進む間にも新興国の経済発展に伴う空調需要の増加が見込まれており、二重結合のフッ素化合物である HFO (Hydro Fluoro Olefin: ハイドロフルオロオレフィン) 冷媒だけではなく HFC 冷媒需要も一定量継続するものと考えられる。また、都市部における大規模建物が増加したことによる空調需要増加により、大容量ターボ冷凍機のニーズも高まっている。高効率で環境負荷が小さい大容量ターボ冷凍機の導入は、東南アジア、中東、東アジア地区の都市部でのエネルギー消費量の削減による CO<sub>2</sub> 排出量削減とランニングコスト削減の一助となる。

そこで、HFC 冷媒と HFO 冷媒のどちらの冷媒にも対応できる大容量の高効率ターボ冷凍機を開発した。

\*1 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 大型冷凍機技術部

\*2 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 大型冷凍機技術部 主席

\*3 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 大型冷凍機技術部 主席チーム統括 技術士(機械部門)

## 2. HFC 冷媒と HFO 冷媒の比較

ターボ冷凍機に採用している HFC 冷媒の HFC-134a から、低 GWP (Global Warming Potential: 地球温暖化係数) である HFO 冷媒の HFO-1234ze (E) や HFO-1234yf へ転換する際には、次の項目を評価・比較して選定を行った。評価項目としては、環境性(オゾン層を破壊する物質でないこと、GWP150 以下の低 GWP 冷媒であること)、物性(HFC-134a と比べて、同等の冷凍サイクル効率を有し、機器設計圧力が著しく高くないこと)、入手性(ターボ冷凍機以外の用途があり、生産量が見込まれていること)、安全性(高圧ガス保安法に従い不燃と同等の取扱いが可能であって、かつ低毒性であること)であり、各項目を総合的に評価して採用する低 GWP 冷媒を選定した。選定した HFO-1234yf, HFO-1234ze (E) は、HFC-134a と比較的近い物性を持ち、GWP が 1 未満と非常に小さく、環境適合性に優れた冷媒である。

本報の対象機に使用される HFO-1234ze (E) は、理論 COP (Coefficient Of Performance: 成績係数) は HFC-134a とほぼ同等であるが、ガス比体積が HFC-134a に比べて約 20% 大きいことから、同じ冷凍能力を出力するには圧縮機、熱交換器、配管の容積を増加させる必要がある。設置面積の増加はコスト面で不利となるとともに、従来機器のリプレースも困難となることから、性能向上とともに省スペース、コンパクト化を狙った要素設計とその組合せ方に焦点を当てて、以下の設計検討を実施した。なお HFO-1234yf 採用機については別報“カーボンニュートラルに貢献する低 GWP ターボ冷凍機新シリーズ“JHT-Y””において紹介している。

### (1) 圧縮機の高性能、コンパクト化

冷媒ガスの比体積増加に対応するため、従来の羽根車に対して大風量となるように空力設計に留意した。設計風量を大きくすると断熱効率が低下する傾向があるため、CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) 解析を用いて羽根車翼の前縁、後縁形状や翼角分布、入口ガイドベーンなどの形状を最適化した結果、従来機に対し、同一羽根車径で断熱効率は維持したまま、風量を 23% 増加することができ、同一風量において圧縮機容積の低減を達成した。また、圧縮機小型化に伴い軸受、シール、ギア等も最適化し、損失の低減と信頼性の向上を図った。

### (2) 熱交換器の高性能、コンパクト化

熱交換器は大容量に対応するためシェルアンドチューブ型を採用している。熱交換器性能向上のために以下の点に留意した。

- ・ 蒸発器において、伝熱管部での熱交換効率が低下するドライアウトを抑制するために、CFD 解析を用いて局所的な熱流束の上昇を防止し、平均化できるように伝熱管配置を決定した。また、伝熱管群上部からの冷媒ガス噴出し流れにより、圧縮機が冷媒液滴を吸込むことを防止するために、蒸発器伝熱管の抜き列設置とデミスタ形状及び配置を最適化した。
- ・ 凝縮器内部での局所流速上昇に伴う圧力損失増加により、熱交換器性能が低下することを防止するため、蒸発器と同様、CFD 解析により伝熱管配置及び内部品形状を決定した。
- ・ 蒸発器出口及び凝縮器入口での冷媒ガス流速が速い箇所が発生する圧力損失低減のため、ベルマウス形状を最適化した。

以上により、熱交換器の小型化を図り、冷凍機設置面積を低減した。

### (3) 熱交換器と圧縮機の組合せ

冷凍機シリーズ設計において、HFC-134a 適用機と HFO-1234ze (E) 適用機に共通の熱交換器シェル径を採用し、熱交換器内部のチューブ本数と配置を能力と冷媒ごとに最適化することで、熱交換器以外の補器や配管レイアウトを共通設計とすることを可能とした。また、各補器や配管構造の簡素化でコスト低減を図った。さらに、共通のシェル径において、圧縮機の組

合せを変えることで、異なる能力や冷媒に対して効率やコスト面で最適な機器構成を選択できるようにした。

(4) 3種冷媒対応制御

3種類の冷媒対応を念頭に置き、圧縮機制御や膨張弁制御パラメータの特性を無次元数により整理することで、冷媒循環量や物性に差異が生じた場合でも、それぞれの冷媒での最適制御ができるようにし、広範囲域の運転と高効率特性を確保した。

(5) SCF 配置による COP 向上

大容量冷凍機において圧縮機を2台搭載する場合に、従来の圧縮機パALLEL (並列) 配置に対し、圧縮機を含むユニットを SCF (直列) 配置することで、上流下流の冷凍機の圧縮機にかかる断熱ヘッドを段階的に上昇させることにより、冷凍機全体の COP を向上させることが可能となる。次章よりその原理と効果について詳細に説明する。

### 3. SCF 配置による高効率化

冷凍機の COP は以下の式で表される。

$$COP(-) = \frac{\text{冷凍能力}(kW)}{\text{電動機入力}(kW)}$$

冷凍機の COP 向上のためには、上式より圧縮機の電動機入力を低下させる必要がある。圧縮機の電動機入力は圧縮機吸込み風量と断熱ヘッドに比例し、この断熱ヘッドは概ね冷却水出口温度と冷水出口温度の温度差相当の飽和圧力と等しくなることから、冷却水出口温度と冷水出口温度の差が小さいほど冷凍機の COP は向上することとなる。

図1に圧縮機パALLEL配置(以下、パALLEL機)と圧縮機 SCF 配置(以下 SCF 機)のイメージ図を示す。パALLEL機においては、2台の圧縮機が蒸発器及び凝縮器を共用することから、各々の圧縮機の断熱ヘッドは同一になる。その際、断熱ヘッドは冷却水出口温度と冷水出口温度の差と概ね等しくなる。

一方 SCF 機においては、蒸発器と凝縮器各々中間に仕切りを設けていることから、上流下流の熱交換器の冷却水出口温度と冷水出口温度の差は小さくなり、各々の圧縮機にかかる断熱ヘッドはパALLEL機に比べて小さくなる。その結果、図の黄緑色で示された部分の電動機入力が低減でき、COP が向上する。

具体的な例として冷水入口温度 13.3℃、冷水出口温度 4.4℃、冷却水入口温度 35.0℃、冷却水出口温度 41.0℃の一般的な中東エリアでの温度条件で、冷凍能力は単機圧縮機で 2400Rt、総熱負荷 4800Rt のモデルにおいてパALLEL機と SCF 機の COP を比較検討した。

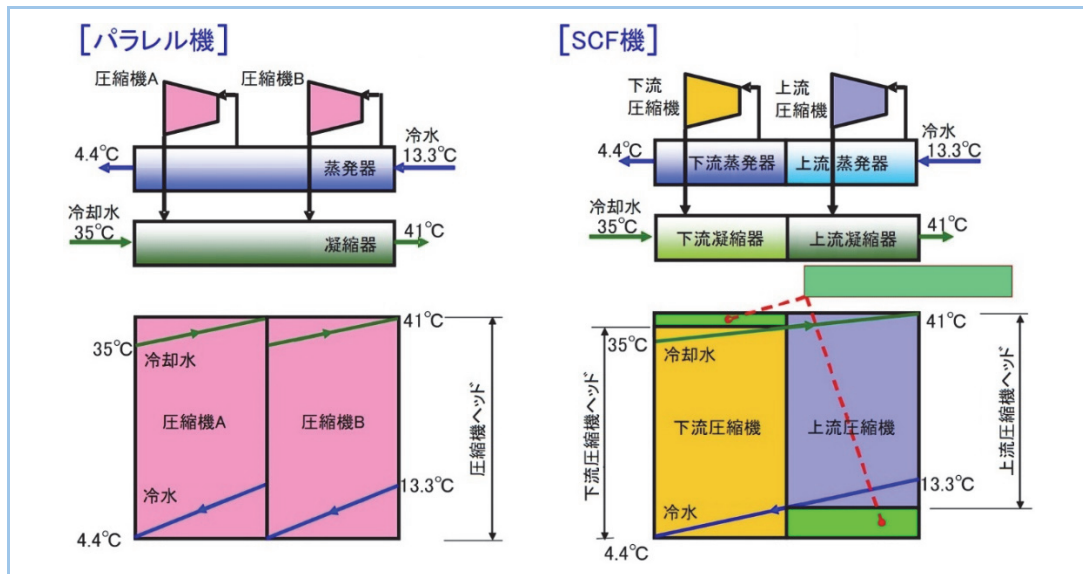


図1 パALLEL機と SCF 機のイメージ比較

図2に平行機とSCF機のCOP比較について示す。平行機の場合は各圧縮機の温度条件は同一で、冷却水出口温度と冷水出口温度の差は36.6℃となり、100%負荷時のCOPは5.16となることから、その際のシステムCOPも5.16となる。これがSCF機の場合は冷凍機中間の冷水温度が8.6℃、冷却水温度が37.9℃であり、上流側冷凍機の冷却水出口温度と冷水出口温度の差は32.4℃となり、下流側は33.5℃となる。平行機に比べてこの温度差が小さいため、上流側冷凍機のCOPは5.67、下流側は5.41と各々性能が向上していることがわかる。そのためシステムCOPは5.54となり、平行機に比べてSCF機の場合の方が7.3%の性能向上となる。

また、SCF機の平行機に対する優位性はCOPだけでなく、以下の点でも優位である。

- ・設置面積の低減
- ・設備配管レイアウトの簡易化

この効果はSCF機をさらにSCF配置にした場合にも適用できる。図3に、冷水、冷却水の温度条件は前ケースと同一で9800Rtの総熱負荷モデルでのSCF機のSCF配置と平行配置のCOP比較について示す。SCF機をSCF配置した場合のCOPは5.90で、平行配置の場合のCOP5.54に対して約6.5%の性能向上となり、SCF配置の有効性がわかる。

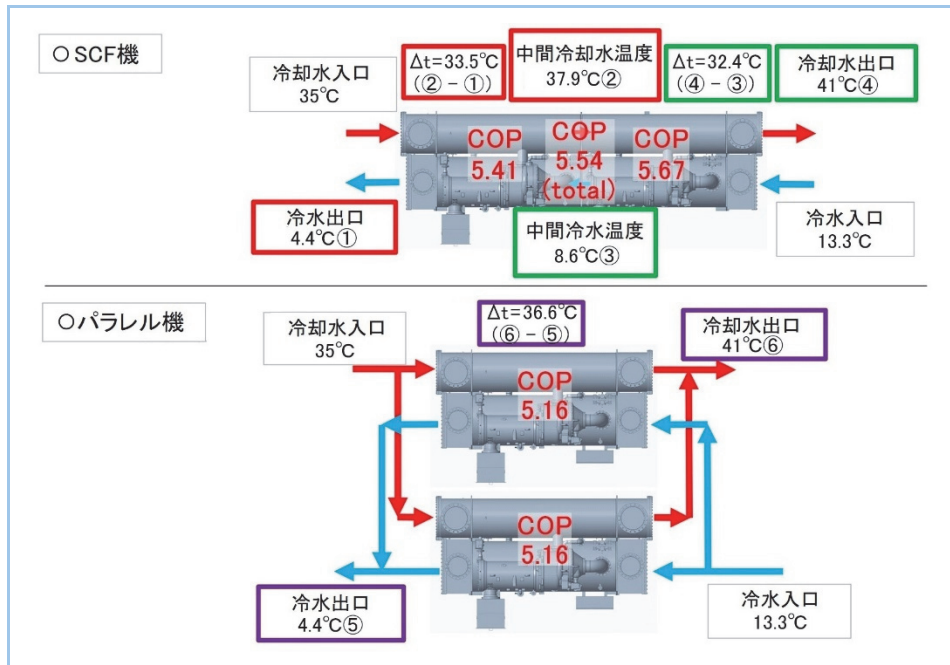


図2 SCF機と平行機のCOP比較

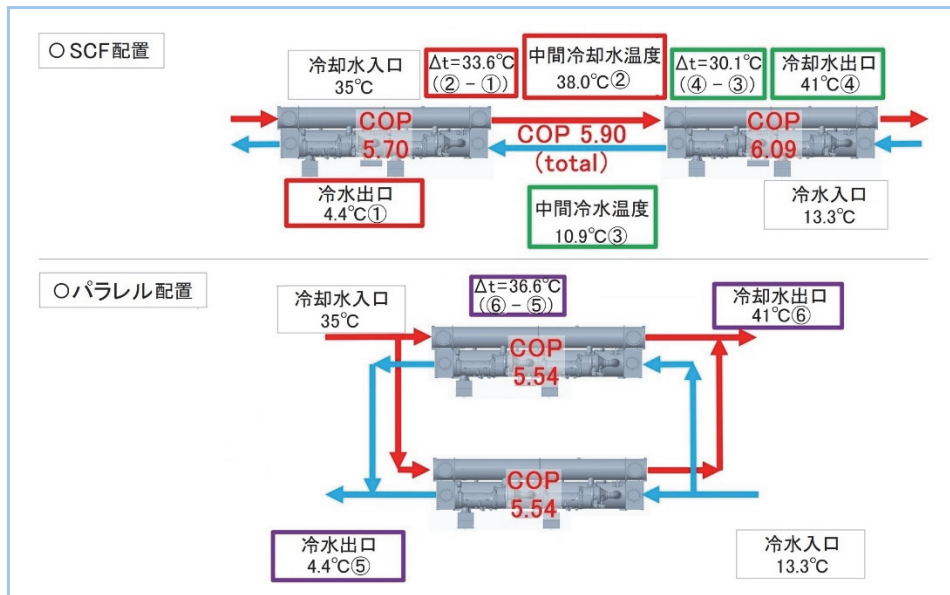


図3 SCF機のSCF配置と平行配置のCOP比較

## 4. 冷凍機の制御について

SCF 機における制御として、圧縮機台数制御と送水温度制御がある。

圧縮機台数制御は、負荷に応じて圧縮機の必要運転台数を決定し、SCF 配置された両方あるいは片方のみの圧縮機の運転を制御盤により指令する。また、圧縮機の必要運転台数が1台の場合に運転中の冷凍機に圧縮機停止が必要な何らかの異常が発生した際は、停止中の圧縮機を起動する故障バックアップ制御を行う。

送水温度制御では、圧縮機の運転状態、負荷に応じた演算結果によって、送水温度設定値を決定する。冷水入口温度が定格冷水入口温度よりも高い場合には、冷水入口温度一定格温度差が送水温度設定値となる。また、送水温度設定値は、冷凍機運転中は上昇、下降で各々の変化レートをもち、その変化レートを超えないように変化させる。自動モードにおける送水温度設定イメージは図4の通りである。この図において、下流側送水温度設定値は 4.4℃を目標としている。上流側の冷水入口温度が 13.3℃に下がるまでの間は、上流側定格温度差と下流側定格温度差の温度差を維持したまま、送水温度設定を行う。上流側の冷水入口温度が 13.3℃未満となると、最適負荷配分比率に基づいて、それぞれの送水温度を決定する。

実機での運転結果を図5に示す。この図において、冷水入口温度の変化に伴って、冷凍機への負荷変化が発生しているが、冷水出口温度が設定温度に短時間で追従していると共に、COP が高い状態を継続できており、送水温度制御が適切に行われていることがわかる。

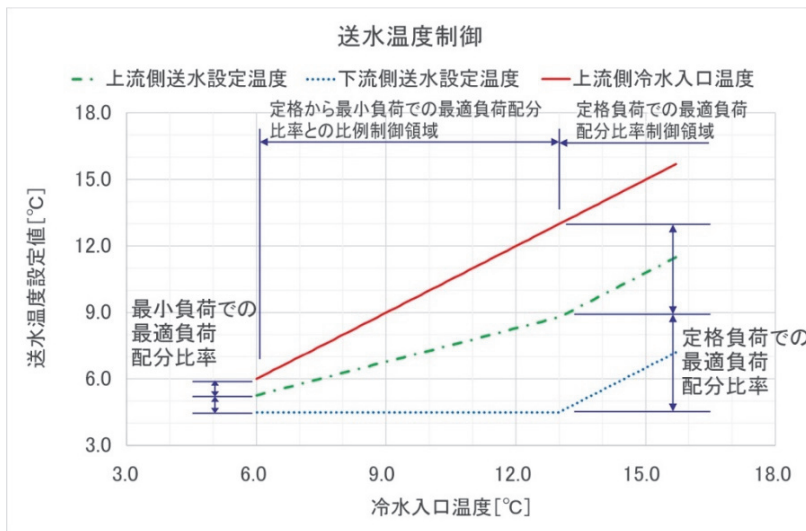


図4 送水温度設定イメージ

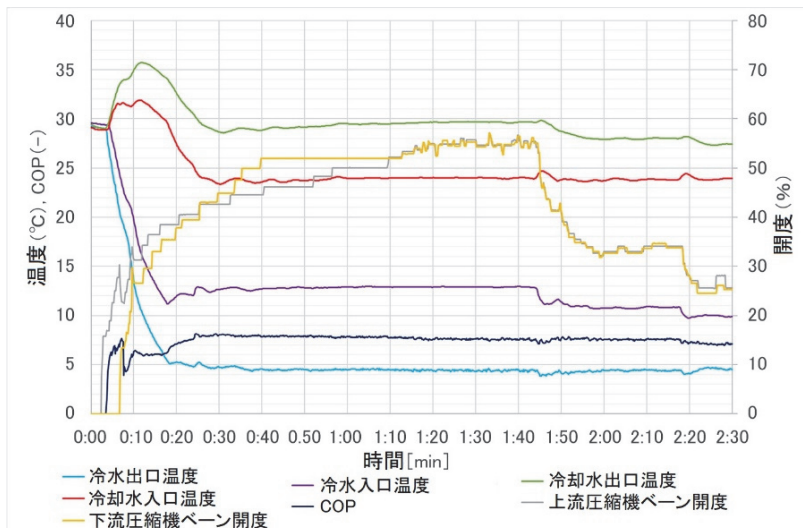


図5 負荷変化に対する制御性

## 5. 台数制御による更なる大容量対応

SCF 機単独の制御については4章に示したとおりであるが、SCF 機を更に SCF 配置することによって、更なる大容量の冷凍機として運用することが可能となる。このような運用を行うための専用制御盤として、SNCP(Small Number Control Panel)を開発した。SNCP における制御としては、SCF 機と同様に冷凍機発停制御、送水温度制御がある。発停制御及び温度制御については、SCF 機の圧縮機台数制御と送水温度制御と同様、各々事前に設定された最適負荷配分比率に基づいて、それぞれの送水温度を決定する考え方となっている。

また、SNCP の上位にエネコンダクタを設置し、SNCP で管理する複数の SCF 設置機を 1 台の冷凍機と同様に扱うこと(図6)により最大6セット、60000Rt までの SNCP 統合 SCF 設置機が制御可能なエネコンダクタを使った複数台の最適熱源制御システムの構築が可能となる。

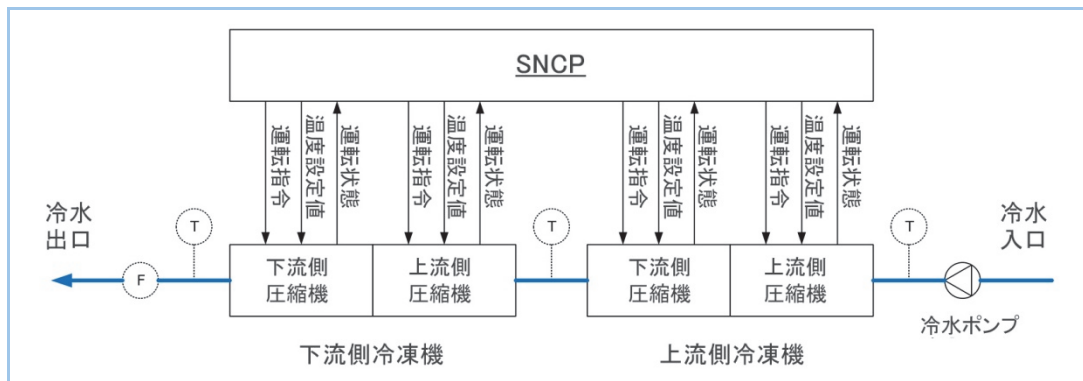


図6 SNCP 統合 SCF 配置

更に、エネコンダクタと分散型制御システム(DCS:Distributed Control System)である DIASYS Netmation®を組み合わせることによって、複数台のエネコンダクタの制御が行えると共に、エネコンダクタでは標準的に対応していない熱源設備構成要素(例えば蓄熱槽)や入出力点数の増加に対しても柔軟に対応できる。これにより、1プラントにおける熱源機の台数・容量における制約がなくなり、地域冷暖房や大規模工場への対応が可能となっている(図7)。

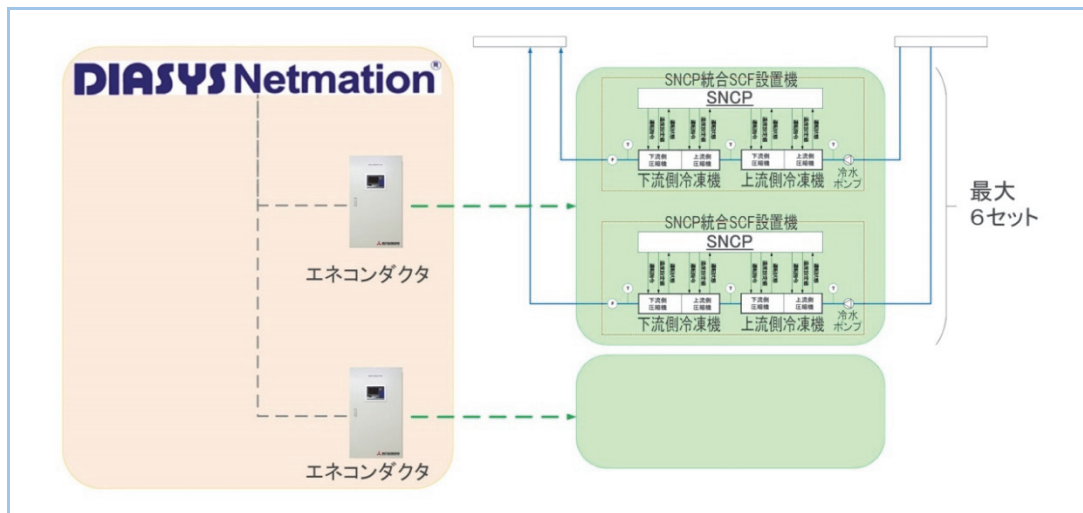


図7 エネコンダクタと DIASYS Netmation 構成

## 6. まとめ

今回開発した大容量高効率ターボ冷凍機は、SCF による大幅な効率向上を達成し、設置面積も小さく、設備配管を含めた設置レイアウトも小さくできることから新興国の新規、入替両方の大規模熱需要に対応できる機種となった。また HFC 冷媒と HFO 冷媒の両方に対応し、今後の HFC 冷媒の削減スケジュールの変化に対しても柔軟に対応できる機器構成を採用している。

また、日本工場、中国工場どちらの工場からも出荷できる体制も構築しており、納期面及び価格面についてもお客様のニーズに合った製品を選択可能となった。

加えて、SNCP を設置することで、2台の冷凍機をあたかも1台の大容量冷凍機として簡単に運用でき、さらにエネコンダクタを上位に設置することで、最大 60000Rt の大規模熱需要に対しても最適熱源制御が可能となり、消費電力の削減、CO<sub>2</sub> 排出量削減とランニングコスト削減が期待できる。

DIASYS<sup>®</sup>、Netmation<sup>®</sup>及び DIASYS Netmation<sup>®</sup>は、三菱重工業株式会社又は三菱パワー株式会社の日本及びその他の国における登録商標です。

## 参考文献

- (1) 梅野 良枝ほか、全容量域に低 GWP 冷媒を展開したターボ冷凍機“ETI-Z, GART-ZE/ZEI”, 三菱重工技報 Vol.54 No.2 (2007)
- (2) 下川 真琴ほか、カーボンニュートラルに貢献する低 GWP ターボ冷凍機新シリーズ“JHT-Y”, 三菱重工技報 Vol.60 No.2 (2023)