

●(一財)省エネルギーセンター最優秀賞 ●改修設備部門

熱回収型ターボヒートポンプを用いた 既設暖房設備の省エネ化

設備施工者：三菱重工冷熱(株)

設備所有者：トヨタ自動車北海道(株)

建物の概要

名称 トヨタ自動車北海道(株) 原動力棟 所在地 北海道苫小牧市字勇払145-1
概要 建屋：地上 延床面積：2,000m² 構造：RC造 用途：工場(機械室)

1. 技術開発の目的と経過

目的：工場空調用ボイラの燃料使用量を削減する目的で、空気圧縮機の冷却水排熱を回収するシステムを新規に組み入れ、暖房熱源として利用することで、省エネルギー化とCO₂排出量削減を目指した。なお、排熱を回収する機器として熱回収型ターボヒートポンプを採用した。

経過：2018年8月～(提案、設計等)：工場全体の省エネ・CO₂削減の検討において、化石燃料を多く使用する燃焼式暖房熱源をターゲットとして抽出。暖房シーズンの熱需要量と排熱量を定量的に把握し、機器選定と動作回路の設計を行った。また、CO₂削減効果など、想定されるメリットを試算した。
2021年1月～(試運転、引渡し等)：1月末に試運転を実施し、2月初旬にお引き渡しを完了した。一方、省エネ効果を確認するための計測機器を設置し、既設中央監視設備による温度、流量、消費電力などの計測データと併せて運転状況の分析を行った。

2. 設備・システムの概要

1) 既設設備の概要

- ・本工場は温水循環式中央熱源方式を採用している。熱供給棟から各工場に送水される温水は、暖房需要エリアに設置された空調機にて放熱し、放熱(冷却)後に熱供給棟へ返送される。
- ・熱供給棟では、蒸気熱交換器で約45℃の温水を発生させており、熱源としては①コージェネ排ガスボイラ、②重油ボイラ、③ガスボイラ(13A)の3種類で構成されている。
- ・このうち②と③で製造した蒸気は混合されているが、①で製造された蒸気は系統が独立しており、蒸気熱交換器も専用のものが設置されている(図1)。
- ・なお、今回導入する設備(以下、本設備)の熱源として利用する空気圧縮機からの冷却水排熱は、地下の二槽式冷却水槽を経由して屋上の冷却塔で大気中に放熱している(図1)。

2) 改修設備の概要

- ・今回の改修では、図1に示す設備フロー図の破線部を増設した。
- ・熱回収型ターボヒートポンプ(以下、ヒーポンターボ)は、二槽式冷却水槽の高温側から冷却塔に送水される冷却水から熱を回収し、高効率で温熱を供給する。この温熱は、各工場の空調機から返送された温水の加熱に利用する。
- ・ヒーポンターボは、上記②と③による混合蒸気が供給される蒸気熱交換器より上流に設置されているた

め、常に蒸気熱交換器より優先して温熱を供給することになる（ベースロード）。このことにより、上記②と③から供給される蒸気使用量、延いては化石燃料の消費量を低減することが可能となる。

・但し、上記①から供給される排熱の利用は、ヒーポンターボよりも省エネ性が高く最優先とする必要があるため、①の専用蒸気熱交換器の温水系統上流には、ヒーポンターボで加熱された温水を接続しない構成としている。

・その他、より省エネ性を高める方策としていくつかの工夫を取り入れた。以下a)、b) に一例を示す。

a) ヒーポンターボは1日当たりの上限発停回数が設定されているため、中間期などの低負荷時に短時間で頻繁に発停すると、合計稼働時間が短いまま上限回数に達してしまう。すると、もし同日中に負荷が増大しても稼働できず、低稼働率により十分な省エネ性を発揮できない可能性がある。このことへの対策として、暖房負荷熱量の継続的な演算を行い、その熱量から上記①の発熱量を差し引き、残りの熱量がヒーポンターボの最低ロード率時の加熱能力よりも高い場合にのみヒーポンターボを稼働させる制御を取り入れており、ヒーポンターボの稼働率を高めている。

b) ヒーポンターボは、熱源側の温度が高いほど効率が高まる特性を持つため、熱源となる冷却水の温度を空気圧縮機の冷却に支障のない範囲でできるだけ高く保持するべく、冷却塔と冷却水ポンプの制御動作設定を変更した。

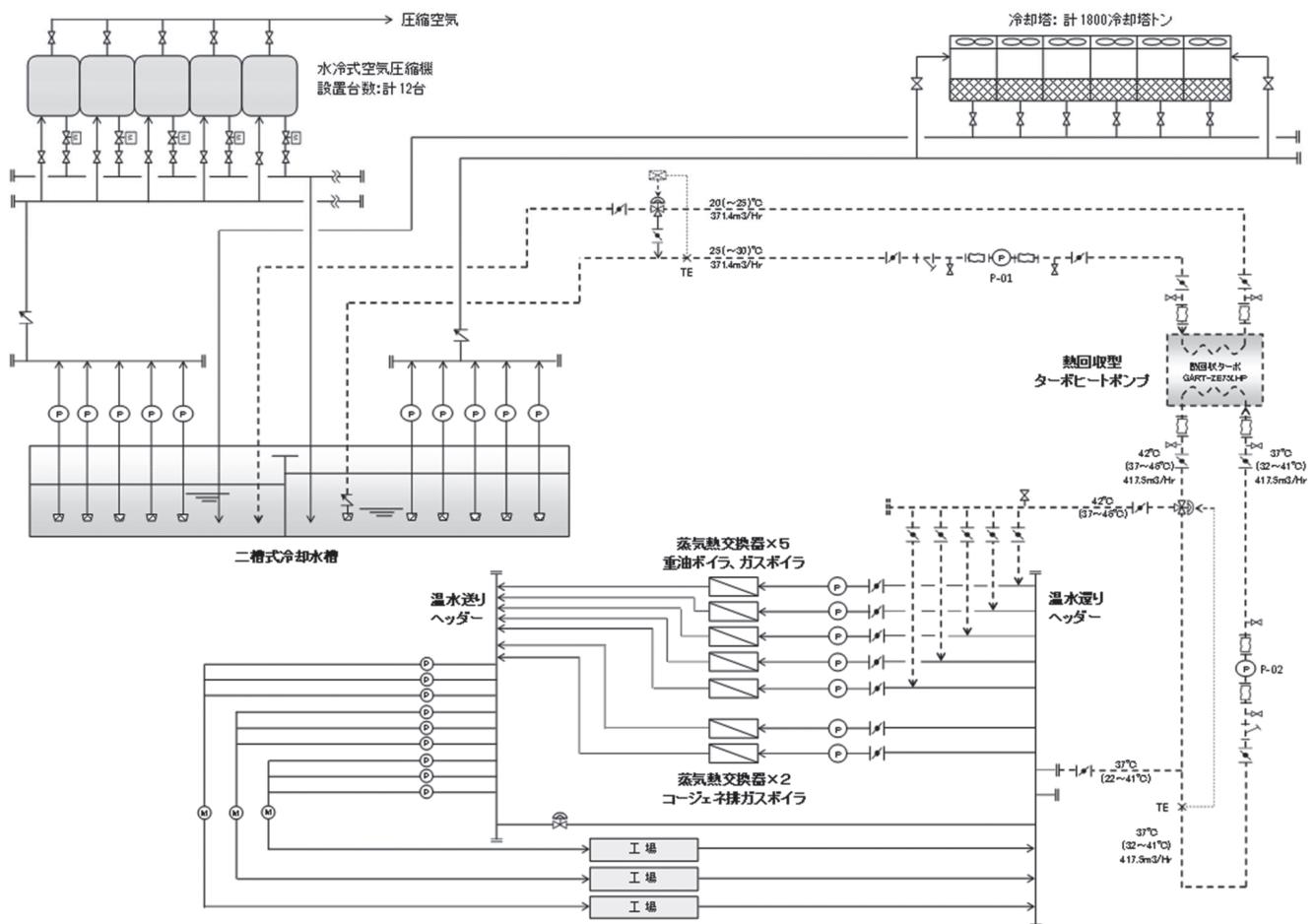


図1 設備フロー（破線記入箇所：今回増設部）

3. 着想

- ・当該工場は寒冷な立地条件にあり、暖房用ボイラの燃料消費量が非常に多いため、暖房用熱源機の効率改善によるCO₂排出量削減効果が大きく見込める点に着眼し、当該熱源機のヒートポンプ化を計画した。
- ・一方、ヒートポンプを設置する熱源棟には大型の水冷式空気圧縮機が計12台設置されており、年間を通して安定的に稼働していることから、排熱回収ヒートポンプの適用が最適と判断した。
- ・また、本工場の暖房用温水温度は45℃程度であり、空気圧縮機の冷却水排熱（30℃程度）と温度が近く、熱量規模も大きいことから、大型かつ低圧縮比での効率が高い三菱重工サーマルシステムズ製のヒーポンターボを採用する案で検討を進めた。その結果、過去の実データ（暖房負荷熱量、冷却水排熱量など）を基に試算したCO₂削減効果も十分に見込めたことから、今回実施に至った。

4. 効果（省エネルギー）

1) 省エネルギー効果（原油換算）およびCO₂削減効果の試算

- ・ヒーポンターボの運転データ実測期間である2021年2月9日0:00から3月6日23:00（26日間）と同期間の過去データに基づき、下記方法によって省エネルギー効果（原油換算）とCO₂削減効果を試算した。
- ・積算ヒーポンターボ加熱能力：1113.9MWh
* 重油ボイラとガスボイラの燃料実績値より
- ・A重油削減量：90.8kL
* 重油ボイラの燃料実績値より
- ・都市ガス削減量：39.9kNm³
* ガスボイラの燃料実績値より
- ・電力増加量：114.0MWh
* 設備全体（ヒーポンターボ+ポンプ等付帯設備）
ヒーポンターボ性能と過去の温水データを根拠としたシミュレーションにより試算

◇省エネルギー効果（原油換算）の試算

- ・A重油削減量_原油換算：91.7kL [=90.8kL×1.01kL/kL]
- ・都市ガス削減量_原油換算：46.3kL [=39.9kNm³×1.16kL/kNm³]
- ・電力増加量：28.3kL [=114.0MWh×(0.257kL/MWh+0.239kL/MWh)÷2]
* ヒーポンターボ稼働時間割合は、昼夜で各50%と仮定
- ・省エネルギー効果_原油換算：109.7kL [(91.7kL+46.3kL)-28.3kL]
* 削減率79.5%

◇CO₂削減効果の試算

- ・A重油_CO₂排出削減量：243.9ton [90.8kL×2.68577kg-CO₂/L]
* CO₂排出係数は、当該事業所の指定値を採用
- ・都市ガス_CO₂排出削減量：83.3ton [39.9kNm³×2.08963kg-CO₂/Nm³]
* CO₂排出係数は、当該事業所の指定値を採用
- ・電力_CO₂排出増加量：77.3ton [114.0MWh×0.6780kg-CO₂/kWh]
* CO₂排出係数は、当該事業所の指定値を採用
- ・CO₂排出削減量：249.9ton [(243.9ton+83.3ton)-77.3ton]
* 削減率76.4%

◇COPの試算

- ・平均ヒーポンターボCOP : 9.77 [1113.9MWh÷114.0MWh]
- ・*システムCOP (H)

2) 省エネルギー効果（原油換算）およびCO₂削減効果の実証結果

- ・表1、2および図2、3に、計画時における試算結果と実績の比較を示す。なお、省エネルギー性については、原油換算で定量化して削減量を求めた。

表1 ボイラ燃料削減量と電力増加量の計画に対する実績の比較

計 画							実 績							実績/計画			
ヒーポンターボ合計加熱量	A重油削減量	都市ガス削減量	A重油削減によるCO ₂ 排出削減量	都市ガス削減によるCO ₂ 排出削減量	電力増加によるCO ₂ 排出増加量	ヒーポンターボ合計加熱量	A重油削減量	都市ガス削減量	A重油削減によるCO ₂ 排出削減量	都市ガス削減によるCO ₂ 排出削減量	電力増加によるCO ₂ 排出増加量	ヒーポンターボ合計加熱量	A重油削減量	都市ガス削減量	電力増加量		
[MWh]	[kL]	[kNm ³]	[ton]	[ton]	[MWh]	[ton]	[kL]	[kNm ³]	[ton]	[ton]	[MWh]	[ton]	[kL]	[kNm ³]	[MWh]		
1113.9	90.8	39.9	243.9	83.3	114.0	77.3	80.5	34.6	216.2	72.4	136.2	92.4	88.1	88.7	86.7	119.5	

表2 省エネルギー・CO₂削減効果の計画に対する実績の比較

計 画							実 績							実績/計画	
A重油削減量	都市ガス削減量	電力増加量	原油換算削減量	原油換算削減率	CO ₂ 排出削減量	CO ₂ 排出削減率	A重油削減量	都市ガス削減量	電力増加量	原油換算削減量	原油換算削減率	CO ₂ 排出削減量	CO ₂ 排出削減率	原油換算削減量	CO ₂ 排出削減量
[kL]	[kL]	[kL]	[kL]	[%]	[ton]	[%]	[kL]	[kL]	[kL]	[kL]	[%]	[ton]	[%]	[%]	[%]
91.7	46.3	28.3	109.7	79.5	249.9	76.4	81.3	40.1	33.8	87.6	72.2	196.2	68.0	79.9	78.5

※電力消費量原油換算におけるヒーポンターボ稼働時間割合は、昼夜それぞれ50%と仮定。

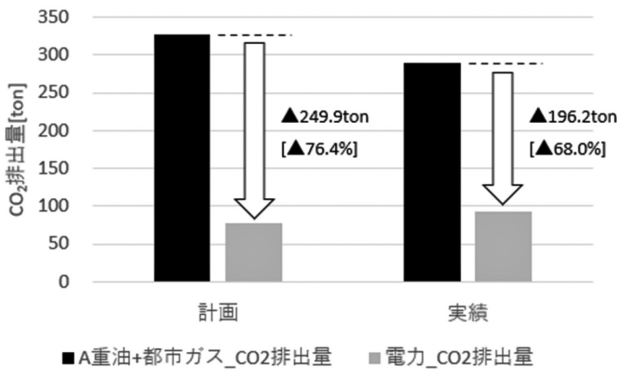


図2 CO₂削減効果実績

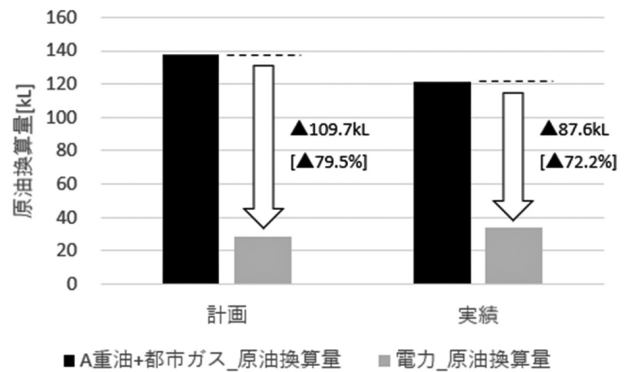


図3 省エネルギー効果実績

- ・表1、2および図2、3より、本設備の導入によって26日間で約196tonのCO₂排出量削減効果と、原油換算で約87kLの省エネルギー効果が得られることが確認できた。
- ・いずれにおいても実績が計画を下回った。この理由としては、ヒーポンターボ出口における熱源水温度の実績値が、計画値より平均で約3℃低かったことが挙げられる。このことによりヒーポンターボの低圧が下がり、消費電力が増加してCOPが低下したと考えられる。各システムCOPは、計画が9.77、実績ベースでは7.89 (▲19.2%) であった。
- ・しかしながら、計画に対する実績は最大でも22%以内に収まっており、当初期待した効果に概ね近いと言える結果が得られた。

5. 投資回収（省マネー）

- ・本設備は暖房用途のため、一年のうち冬期と一部の中間期のみ稼働となる。北海道という寒冷な立地により、10月から5月の8か月間は稼働するが、それでも年間稼働時間が限られる。
- ・また、前述のとおり2月9日から3月6日に渡る26日間のデータしかないため、ここで得られた省マネー結果を1シーズンの代表値として良いものか、推測の域を出ない。
- ・以上の前提条件を踏まえた上で、参考までに設置工事など状況に応じた要素を除いた場合におけるヒーポンターボ単体に対する投資回収年数を試算すると、実績ベースで約2.8年となった。

6. 他の建物への応用性

- ・今回採用したヒーポンターボはいくつかのラインアップがあり、最も小型の機種であれば40℃～50℃の温熱需要が約1500kW以上ある一方、水冷式機器の排熱を冷却塔で大気中に放熱している建物への適用検討が可能である。北海道に限らず、寒冷な地域における比較的大規模な事務所や工場への応用が考えられる。
- ・また、今回のように熱の需要と供給の場所が近いほど配管距離が短くなるため、導入時におけるインシヤルコスト低減、運用時におけるポンプ動力低減などが可能となり、より効果的に省エネルギー化とCO₂排出量削減を狙うことができる。
- ・ヒーポンターボは負荷変動が小さいベースロード用として利用することで、より効率良く運転できる。また、既存設備や他のヒートポンプ機器などとの併用により、ピーク負荷への対応も可能となる。
- ・実際の導入検討においては、負荷変動やピーク負荷への対応など、現状把握をした上での周辺設備を含めた適正化が必要になる。

7. 仕様又は開発製品等

- ・表3にヒーポンターボの仕様書を示す。
- ・冷媒には、低GWP冷媒であるHFO-1234ze (E) を採用している。地球温暖化係数 (GWP) が1未満のためノンフロン扱いとなり、フロン排出抑制法の適用対象外となる。
- ・圧縮機や蒸発器などをHFO-1234ze (E) に適した形状に改良し、高性能化を実現した。
- ・HFO-1234ze (E) は従来冷媒のR-134aと比較して冷媒体積が約1.3倍大きいのが、構成機器の小型化や配置の見直しなどによりコンパクト設計としている。

8. 環境保全等

- ・「4. 効果（省エネルギー）」に記載のとおり、2月～3月の26日間で原油換算87kL程度の省エネルギー効果が得られたことから、暖房期間中では原油換算で600～700kL程度の省エネルギー効果が得られるものと推察される。

9. 工夫した点、発想した点等

- ・ヒーポンターボを需要加熱源のピークに合わせた能力で選定した場合、ボイラを用いた場合に比べ加熱能力当たりの単価が高額なため経済的負担が大きくなり、設備投資を行う上で障害となりやすい。

表3 ヒーポンターボ仕様書

1. 基本仕様

冷凍機形式	GART-ZE75LHP
適用法規	高圧ガス保安法、冷凍保安規則
暖房能力	2404kW
設置場所/雰囲気	屋内/非防爆
冷媒	HFO-1234ze(E)
法定冷凍能力	273.9 冷凍トン
容量制御範囲	100%～30%

2. 熱源水・温水仕様

熱源水	入口温度	25℃
	出口温度	20℃
	流量	371.4m ³ /h
温水	入口温度	37℃
	出口温度	42℃
	流量	417.5m ³ /h

3. 電気基本情報

主回路電源	3φ AC, 400V, 50Hz
制御回路	3φ AC, 200V, 50Hz
出力	221.6kW
インバータ入力	258.1kW

- ・そこで本計画では、既存のコージェネ排ガスボイラに続く第2のベースロードとしてヒーターターボ（新規）をシステム内に組み入れ、コージェネ排ガスボイラとの高効率連携運転制御回路^{*1)}を新たに追加することで、高い稼働率が期待できる領域にて加熱能力を選定し、投資回収期間を短縮した。
- ・このように、省エネルギー設備では投資回収効果が重視される場合が多いため、本件に限らず産業用途でのヒートポンプの導入では可能な限り高稼働率での運用を目指す工夫が肝要と考える。
 - * 1) 高効率連携運転制御：第2のベースロードとして省エネ性が高まる運用となるように、ヒーターターボの発停タイミングや熱源水温度を適切に管理し、高稼働・高効率運転を行う制御方式。

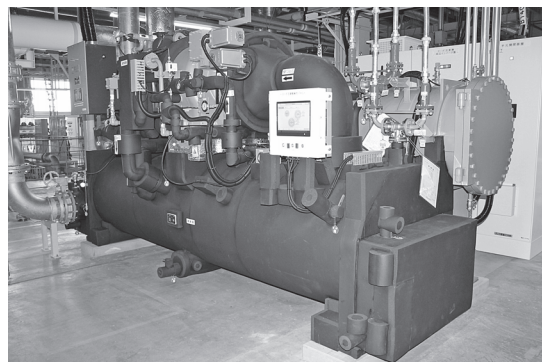
10. 市場性等

- ・暖房用熱源としてボイラや吸収式冷温水機などの燃焼式機器を備える一方、冷却塔によって排熱を大気中へ放熱している比較的大規模な事業所においては、本設備で採用したヒーターターボの市場性が見込まれる。
- ・暖房用温水は45℃程度であり、一般的な機器の排熱（30℃程度）との温度差が小さいため、低圧縮比での効率が高いヒーターターボを用いることで大きなメリットが期待できる。
- ・当社ではユーザー事情に合わせたフレキシブルな省エネシステムの企画・提案を行うため、今回採用したヒーターターボに加え、排熱回収型ヒートポンプ「エコウォーム」、業務用エコキュート「Q-ton」、循環加温ヒートポンプ「Q-ton Circulation」、空冷ヒートポンプチラー「MSV, MSV2」、高効率ヒートポンプ式熱風発生装置「熱Pu-ton」など、複数のヒートポンプ製品を揃えている。各ユーザーの課題を把握した上で最適な機器を選定し、システム設計も含めた提案をすることにより、今後も省エネ化とCO₂排出量削減に貢献していきたいと考えている。

11. 外観



外観



ターボ冷凍機

12. 講評

重油ボイラ、ガスボイラ、コージェネ排ガスボイラからなる工場空調用の熱源システムに対して、空気圧縮機の冷却水を利用した熱回収ヒートポンプを導入し、ベースロード負荷に効果的に対応することによって大きな省エネ、CO₂削減効果をあげた。既存熱源システムの運用状況を的確に把握し、配管長をできるだけ短くするような考慮も含めた適切なシステムを構築して、投資回収効果という点でも優れた経済性を示した。

寒冷地の大規模事業所において、燃焼から排熱利用の電気式ヒートポンプへの移行事例として、同様の事例の普及や展開に寄与するものとして高く評価された。