

## 第1章 ヒートポンプ

### 第1節 圧縮式ヒートポンプの動作原理と産業排熱の 効果的活用に向けた開発指針

早稲田大学 齋藤 潔

#### はじめに

ヒートポンプの技術は、家庭用のエアコン、給湯機、業務用のエアコン等に広く活用されてきた。また、「クールアース-エネルギー革新技术計画」において我が国が重点的に取り組むべき21のエネルギー革新技术の一つにも取り上げられている。この中では、「超高効率ヒートポンプ」が取り上げられており、2030年にヒートポンプの効率を現状COP比で1.5倍、コストを3/4倍、2050年に効率を現状COP比2倍、コストを1/2倍まで向上させる目標が掲げられている。

ルームエアコンや給湯機器では、トップランナー制度が導入され、産官あげてその性能向上にさまざまな努力がなされてきた。このため、すでに日本では世界をも圧倒するような非常に高い技術を有するところまできている。現状のルームエアコンの効率がAPF(年間を通じた運転性能)で7を超え(限界がおおよそ8.0程度との報告もある)、給湯機も年間給湯保温効率で3を超えている(こちらもほぼ限界値に近い)現状からすると掲げられている数値は大変ハードルの高い目標である。このような高い性能を得るためには、システム単体の性能向上だけでは目標達成がほぼ不可能であると考えられている。このため、再生可能エネルギーや排熱の活用まで含めたシステム化による更なる効率向上が求められている。

産業分野では、大きな設備を導入しやすいため、排熱や再生可能エネルギー等は比較的活用しやすい状況である。特にこの分野では、いまだ使われていない排熱が多く存在している。これらを活用した高効率なヒートポンプの導入が進めば、省エネルギーに大きく貢献できる。そこで、ヒートポンプによってどのようにすれば排熱の有効活用ができるかを解説したい。

具体的には、まず圧縮式ヒートポンプに採用されている代表的なサイクルについてその動作原理を説明する。これは排熱を有効活用していくためには、ヒートポンプの動作原理の理解が必要不可欠だからである。次に、排熱を活用することによりどのようにしてヒートポンプの性能向上が図れるのか、さらにはどの程度まで実現可能なのかについて述べる。そして、排熱を活用するヒートポンプの現状と技術的課題を明らかにするとともに、それらを解決することにより、今後ヒートポンプにはどのような可能性があるのかについて述べる。

## 1. 圧縮式サイクル

現在、ヒートポンプとして主に利用されているサイクルは圧縮式サイクルである。この原理を用いているのが、暖房運転時のエアコンや近年急速に普及した「エコキュート」の愛称でおなじみのCO<sub>2</sub>ヒートポンプ式給湯機である。

ヒートポンプは通常は冷媒の蒸発潜熱を利用して外部の低温部(低温熱源とも呼ばれる)から吸熱し(通常のエアコンではこれは外気となる)、冷媒の凝縮潜熱を利用して高温部の被加熱流体を加熱する。被加熱流体を空気とし、これを加熱して室内に送っているのが暖房運転時のエアコンであり、被加熱流体を水とし、これを加熱しているのがヒートポンプ給湯機である。CO<sub>2</sub>ヒートポンプ式給湯機は、冷媒の凝縮潜熱を利用せず、超臨界域にある冷媒の熱を用いることになるため(遷臨界サイクルと呼ばれる)、運転状態が若干異なる。この動作原理は以降で改めて示すこととする。ここでは、まずはエアコンの暖房運転時を想定してその動作原理を簡単に説明する。

図1に示すようにヒートポンプは蒸発器、圧縮機、凝縮器、膨張弁を基本として成立している。図2にはヒートポンプの運転状態をP-h線図に示している。

圧縮式サイクルの運転状態が示されるP-h線図では、横軸を冷媒の比エンタルピーとし、縦軸を冷媒の圧力としている。また、内部には、冷媒の等温度線、等比エントロピー線、等比体積線等が示されている。中心に示されてい

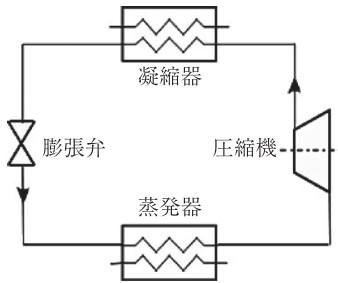


図1 ヒートポンプフロー

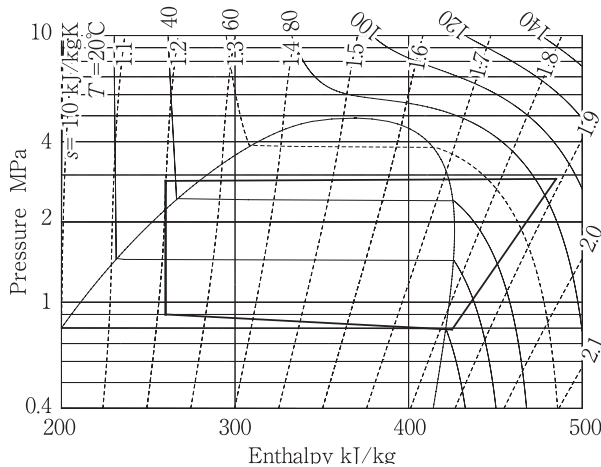


図2 ヒートポンプの運転状態

## 第2節 廃熱輸送システムに向けた潜熱輸送スラリーの検討

神戸大学 鈴木 洋

### 1. 未利用廃熱の熱ギャップ

電力プラントや工場、ゴミ処理・汚泥処理施設等の大型施設のみならず、マイクログリッドを形成する燃料電池・ガスコージェネレーションシステム等において、大量に熱エネルギーが排出される。一般に200℃以下の熱は、利用することが難しい熱として定義され、未利用廃熱と呼ばれる。しかしながら積算エネルギー量は大きく、年間2 EJ(エクサジュール)にも達するといわれている。したがってこれらの熱を利用することが、総合的省エネルギーに結びつくので、近年盛んにその利用が検討されている。

これらの廃熱は温度レベルが低いため、応用例としては冷暖房システムや農業・漁業生産、温水プール等と現在のところ限定的である。したがって廃熱源の近く、例えば電力プラント内で廃熱利用を考えると、プラント内の冷暖房のみではすべてを利用することができず、大量に熱が余るため、結局、廃熱として処理するしかない。加えて海洋環境を維持するためには、廃熱を低温化する必要があるため、大量の水と混合して捨てている現状がある。一方で都市部・商業地区等では特に日中に大量に冷暖房に熱を費やしている。冷暖房に費やすエネルギーは年間3 EJ以上といわれている。それらのうち、電力によってまかなわれている割合は小さくはなく、原子力発電の維持が争点となる現社会において、大きな問題となっている。そのため廃熱や太陽エネルギー等を利用して発電し、電力不足を補う検討がなされている。例えば200℃レベルの廃熱を電力に変換するバイナリーシステムと呼ばれる発電方式が商品化されている。太陽電池による発電方式も普及が進んでいる。しかしながらバイナリーシステムのエネルギー変換効率はせいぜい5%であり、太陽電池の効率についても実情せいぜい20%止まりである。太陽エネルギー等で集熱を行うシステムでは容易に80%のエネルギーが得られることを考慮すれば大量にエネルギーを無駄にしているということがわかる。つまり熱は熱のまま利用することがもっとも省エネルギーとなるのである。

しかしながら前述のように現状熱を輸送する手段がなければ、廃熱源近く以外では熱を十分に利用することができない。つまり「空間的熱ギャップ」である。地域冷暖房システムと呼ばれる広域な熱利用システムでは、水を利用して熱を輸送する。この場合、水の比較的大きな顕熱を利用している。この地域冷暖房システムでは廃熱源近傍から熱を利用したい場所に送るため、この未利用廃熱を利用することが可能となる。しかしながら水を用いた顕熱輸送ではポン

ブ動力が非常に大きいため、現行のシステムでは有効性が小さい。また昼間と夜間では熱需要が大きく異なるが、廃熱源は必ずしも熱需要に応じた運用ができるわけではない。すなわち「時間的熱ギャップ」である。この「時間的・空間的熱ギャップ」を解消する技術(Thermal Gap Solution : TGS)がここで紹介する蓄熱・潜熱輸送技術である。

蓄熱については次節で詳細に解説するが、夜間電力を利用して氷を生成させる氷蓄熱や、吸収冷凍機・ケミカルヒートポンプ等の廃熱利用型冷凍機や廃熱回収ボイラーを利用して冷水・温水を生成させる水蓄熱等が、冷暖房用に実用化されている。その他製造業や植物工場等の園芸農業等で、さまざまな温度域に対応した蓄熱システムが実用化されている。また建築分野では、家屋やビルの外装に蓄熱材を封入する試みがなされている。燃料電池を核としたコージェネレーションシステムでは、蓄熱システムを導入することでエネルギー効率が飛躍的に向上することも示されている<sup>1)</sup>。これらの蓄熱システムを利用し、熱を貯めることで、廃熱生成と熱需要の「時間的熱ギャップ」を小さくすることが可能となるので、熱機器の部分負荷問題が大きく削減される。加えて温度を維持することが可能となるので、温度維持が重要な化学や醸造プロセスでは、温度管理が容易となり、システム全体の効率を高めることが可能となる。

こういった定置型の蓄熱方式は時間的不均一な熱需要に対応する手段として有効であるが、空間的熱ギャップ、すなわち広い範囲の熱需要に供することができない。貯められた熱を広い範囲で利用するためには、熱輸送手段が必要である。従来、水あるいは水蒸気を用いた熱媒体を用いて輸送されていたが、前述のように水を用いた顕熱輸送では、熱損失による熱媒体の温度低下が著しく、末端で利用可能な温度を維持するために、大量の熱媒体を循環させる必要がある。また水蒸気のような気体による熱輸送は熱密度が小さく、多くの熱が運べない。そこで潜熱輸送技術が必要となる。

## 2. 潜熱輸送スラリーの有効性

潜熱を保有する微粒子を水等の媒体に混入したものをここでは「潜熱輸送スラリー」と呼ぶ。別名ダイナミック蓄熱とか相変化スラリーと呼ばれることもある。この潜熱輸送スラリーを熱輸送媒体として用いた場合、二つの大きなメリットがある。一つ目は熱密度が大きいということである。例えば氷を水に約20 wt%程度混入した潜熱輸送スラリーは、水と比べて約3倍の熱を運ぶことが可能である。そのため熱輸送媒体の流量を3分の1に低減させることが可能であり、輸送のためのポンプ動力を大きく削減することができる。二つ目は、温度維持性である。潜熱輸送スラリーは相変化による熱吸収・放出時での温度変化が小さい。この温度維持性のため、必要な温度を末端に送付することができることに加えて、熱交換時や熱使用時の温度差が

## 第5節 乾燥工程への排熱回収型ヒートポンプシステムの適用事例

(株)高岳製作所 渡辺 則之

### はじめに

(株)高岳製作所生産本部小型変圧器部では主に、柱上変圧器  
他各種変圧器を製造し、電力会社や民間企業における各地域の  
電力安定供給の一端を担っている。



図1 柱上変圧器

### 1. 製造工程と抱えていた課題

変圧器は積層したけい素鋼帯を矩形に成形し、焼鈍炉にて焼き鈍しを完了させた鉄心、及び加熱により接着する樹脂を塗布した絶縁紙と銅線を交互に巻き込んだコイルを組み合わせたものが変圧器の中身となる。変圧器の中身を乾燥炉(図2)で乾燥処理を行い、ケースに収納後、絶縁油を注入して完成となる。

この製造工程において、コイルに使用している絶縁紙の水分量と接着強度が重要な管理項目のひとつとなっている。従来は、絶縁紙の水分除去と、接着強度を確保するため、変圧器の中身完成品状態で乾燥炉に入れ、炉内温度を120℃の高温に保っていた。この方法では、鉄心も同時に加熱するため、多くの熱エネルギーと時間を要し、乾燥工程だけで製造リードタイムの2~3日を占めていた。また、乾燥工程はバッチ処理であったことから次工程への供給ロスが発生していた。このため、製造リードタイム削減や生産性を高める上で中身乾燥工程はボトルネック工程であった。

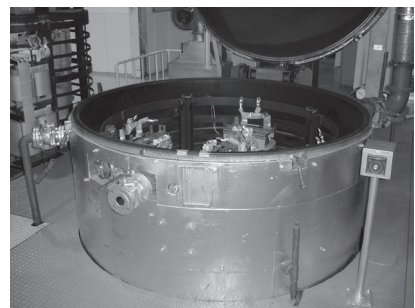


図2 従来の乾燥炉

## 2. 排熱回収型ヒートポンプシステムの導入経緯

平成20年9月に東京電力(株)の推進する電化ファクトリー化を目指したテーマについて蒸気、排熱の使用状況における共同調査の打診があり、同年9月より調査を開始した。

これまで、乾燥炉の熱源はガス焚きのボイラーで発生させた蒸気を使用しており、熱交換器で発生させた熱風を乾燥炉内に送り、使われた熱風は排熱としてそのまま屋外に排出していた。同様に鉄心を焼き鈍しする焼鈍炉も排熱は屋外に排出していたことから、この排熱を再利用しエネルギー及びCO<sub>2</sub>の削減ができないか、夏季、冬季の排熱エネルギーの調査と小型ヒートポンプ設置によるデータの蓄積等、検証による試行錯誤を行った。

その結果、従来の蒸気に代わる熱源として、東京電力(株)より乾燥炉と焼鈍炉から屋外へ放出していた排熱を利用し、高温・高圧水を発生させる排熱回収型ヒートポンプシステムの採用が可能であるとの提案を受け、変圧器中身乾燥工程を含めた製造工程と工場レイアウトの見直しを開始した。

製造工程では、コイル単体乾燥方式の採用に伴う、絶縁紙の水分量と接着強度確保に要する乾燥時間の管理値や組立工程の見直し及び、乾燥時間短縮による他工程への影響等の問題点について検証試験により妥当性評価を行った。

また、工場レイアウトでは、コイル単体乾燥炉、排熱回収型ヒートポンプシステムの設置に伴う製品物流の影響及び、課題であった作業効率の向上を含めた製造ラインの見直し、工事期間中の品質や安全の確保等の問題が解決可能であることがわかった。

これらの効果を総合的に評価した結果、平成22年7月から平成23年10月にかけて、工場レイアウト変更を含めた排熱回収型ヒートポンプシステムを導入し、同年11月に総合運転を開始した。

## 3. 排熱回収型ヒートポンプシステムの構成と概要

乾燥設備は、排熱回収型ヒートポンプ(加熱能力627kw)(図3)、焼鈍炉用排熱回収装置(図4)、コイル単体乾燥炉用排熱回収装置(図5)蓄熱槽(20 m<sup>3</sup>)(図6)、コイル単体乾燥炉(図7)で構成される。

排熱回収型ヒートポンプシステムで最高温度136℃の高温・高圧水(0.5 MPa)を発生させることにより、コイル単体乾燥炉内の温度は蒸気熱源と変わらない

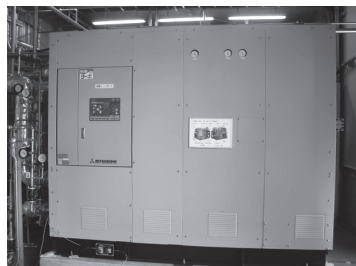


図3 排熱回収型ヒートポンプ

## 2.7 バイナリー発電システムの導入時の注意点

### 2.7.1 熱源温度と熱量

バイナリー発電システムは作動媒体を蒸発、凝縮させて発電させる原理であることから、それら温熱源と冷熱源の温度差と量が発電力に大きく影響してくる。温泉熱や工場排熱では、太陽光発電や風力発電に比べて安定した稼働率になるが設置計画の際には温度と量の十分な確認が必要である。フロン系作動媒体を用いたランキンサイクルでは、温熱源が90℃以下の場合には必要量が急激に増えると共に80℃以下では十分な性能は得られにくい傾向がある。

将来的には新作動媒体の開発とさらなるシステムの効率化により、広範囲に適用可能なバイナリー発電システムが期待される。

### 2.7.2 冷熱源の確保

バイナリー発電システムは温熱源のみならず冷熱源が必要であるが、冷却塔から冷水を確保する場合にはその施設費と電気料金が必要になる。冷熱源を水道水で賄う場合は一般的には発電だけでの費用対効果が少なくなる。また、河川から水を採取する場合には取水権、水利権に注意すると共に、冷却によって温度上昇した排水への対応が必要になる。

### 2.7.3 周辺機器の消費電力と送電端出力

バイナリー発電システムは膨張機、発電機、蒸発器、凝縮器、作動流体ポンプが基本構成となるが、作動流体ポンプは電力を消費し、その他内部の電気機器もロスがあるために、発電機から出る発電端出力に対して、送電端出力と呼ばれるシステムからの出力は目減りすることになる。

さらに、一般的にはシステムの外部に温熱源、冷熱源からの供給用ポンプが必要でこれらも電力を消費する。熱源までの距離が長かったり揚程が大きければ、それらのポンプは大型化し消費電力が大きくなるために実際に得られる電力は少なくなってしまふ。また、冷熱源に冷却塔を用いる場合には、その消費電力も加味する必要がある。

一般的には、少なくとも発電出力の20～30%程度の電力が周辺機器で消費されるといわれる。バイナリー発電システムの作動サイクルはシンプルであるが、用途に応じて外部の周辺機器が必要になることから、実際には導入費用がかさむと共に実際の出力はシステムの送電端出力よりも目減りすることになる。

### 2.7.4 間接熱交換

小型バイナリー発電システム内の蒸発器、凝縮器は熱効率を高めるためにプレート式熱交換

器を用いることが多い。プレート熱交換器は小型高効率であるがフロン等の作動流体が流れているために簡単には分解メンテナンスができない。

一般的に温冷熱源には不純物が混ざっており定期的なメンテナンスが必要になることから間接熱交換の方式が用いられる。

間接熱交換はバイナリー発電システムの一次側にもう一つ熱交換器を配置し、熱源を一次側熱交換器で別の伝熱媒体(たとえば水等)に熱を与え、その熱をバイナリー発電システム内部の熱交換器に伝える方式である。バイナリー発電システム内部の熱交換器には不純物がないために基本的にメンテナンスは不要となり、一次側の熱交換器は分解掃除が可能な熱交換器を用いることで定期的なメンテナンスが可能となる。

## 2.7.5 メンテナンス

小型バイナリー発電システムは定期的にメンテナンスが必要な機械である。膨張機(タービン)、作動流体ポンプには軸受やシールが使われており、発電機や発電機器にも消耗部品、交換部品があるために定期的なメンテナンスが必要である。

また、周辺機器では、間接熱交換器にスケールや不純物が堆積することから、定期的な洗浄が必要になる。

導入の際には初期費用のみならず維持管理費用を加味したうえで費用対効果を判断しなければならない。

## 2.7.6 発電電力の利用方法

2012年7月に再生可能エネルギー固定価格買取制度が施行された。地熱・温泉熱(15,000 kW未満)による発電電力であれば1 kWあたり42円(40円+税)で期間15年の買取条件が設定されている。地熱・温泉熱の買取条件は再生可能エネルギーの中でも高く魅力があるが、制度適用に伴う必要機器及び手続きの煩雑さから投資回収効果を慎重に判断しなければならない。

一方で工場排熱では再生可能エネルギー買取制度の対象にならず売電での償却期間が長くなるために、売電せずに系統連系から独立させた方法や電力購入量を減らすアシスト方式での利用も導入されている。この場合、系統連系に伴う機器設備と手続きが不要であることから売電でのメリットは生まれませんが、設備導入費が安価になる。

## 2.7.7 電気事業法

2012年4月に、バイナリー発電設備に関する規制改正がされ、次の条件を満たす小型のバイナリー発電設備に係るボイラー・タービン主任技術者の選任、工事計画届出、溶接事業者検査



## 第2節 焼却炉からの未利用排熱を活用した 小型バイナリー発電設備の導入について

第一実業(株) 南保 幸宏

### はじめに

近年、地球温暖化を始めとする地球環境問題や、エネルギーの安定供給等のエネルギー問題、大気汚染やヒートアイランド等の地域が抱える環境問題等を改善していく為の方策の一つとして、今日、未利用排熱の活用やそれを可能とする排熱利用技術のさらなる導入促進が注目を集めている。

未利用排熱の種類としては、工場排熱、一般焼却排熱、地熱等があげられる。

### 1. バイナリー発電について

#### 1.1 バイナリー発電とは

バイナリー発電とは、熱を回収した媒体を、そのまま発電に利用するのではなく、さらに別の媒体(二つ目の媒体)を介して発電する為、バイナリー(二つ)発電という。

媒体には低沸点の媒体：15℃(大気圧下)を使用する為、これまで未利用であった「100℃未満の排温水」及び「150℃以上の排ガス」を利用して発電することが可能である。冷媒は、万一想定外の漏洩があっても人体に影響がなく、引火の危険性がない代替フロンを採用している。

バイナリー発電の冷媒サイクルは蒸発器にて温水(蒸気)を使用し媒体を加熱することで蒸発させる。その後、蒸発し膨張した媒体はタービンを回転させ、発電を行う。タービンから出てきた媒体は凝縮器にて冷却水を使用し媒体を冷却することで液体に変わり、レシーバータンクに貯留され、冷媒循環ポンプよりポンプ用インバータの制御によって必要量の媒体が供給される(図1)。また図2に発電フローの例を示す。

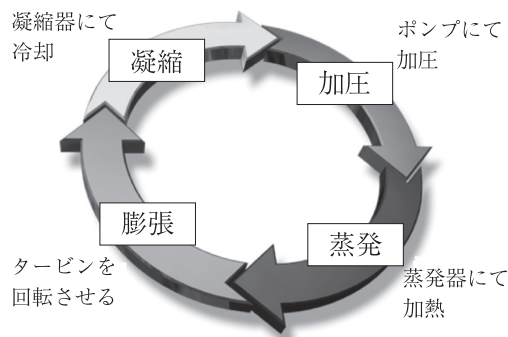


図1 バイナリー発電媒体サイクル

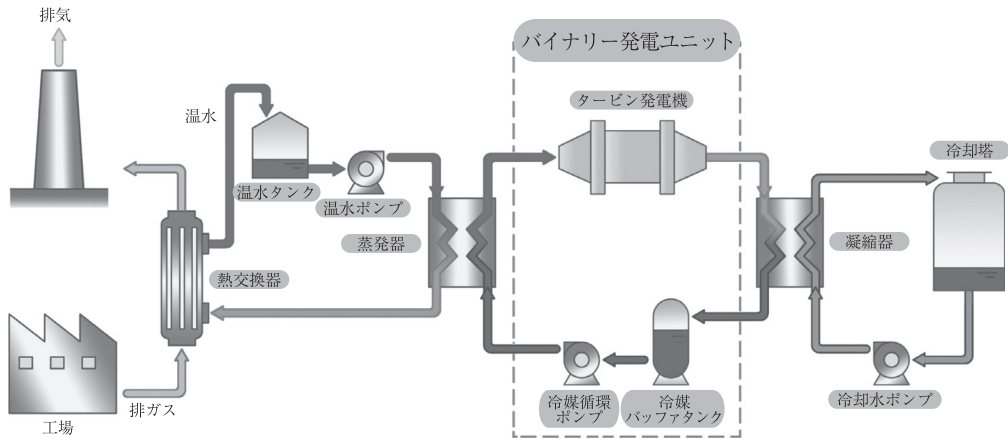


図2 バイナリー発電 発電フロー

## 2. ACCESS ENERGY 社製バイナリー発電機

### 2.1 機器仕様

図3はACCESS ENERGY社製 Thermapower 125MTのユニット外形図である。ACCESS ENERGY社では対象温度の異なる2種類の発電ユニットを取り扱っており、それぞれの機器仕様は表1の通りである。

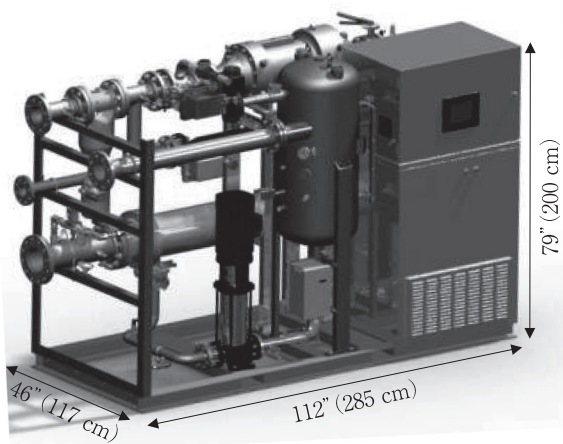


図3 ACCESS ENERGY社 Thermapower 125MTユニット外形図

## 第4章 工場排熱利用に向けた熱電発電システムの開発と 工業炉への導入事例

(株)TESニューエナジー 藤田 和博

### はじめに

工場排熱を電気に変換する熱電発電システムが二酸化炭素削減の有望な技術として期待されてから久しいが、いまだ実証段階で市場創出と技術普及には至っていない。ここでは熱電発電システムの新たな開発の試み及びその実証と課題について述べる。

工場は排熱の宝庫であり、色々なプロセスで熱が生み出され使われ、そしてほとんどの熱は未利用のまま大気中あるいは冷却水中に捨てられている。しかし一旦希薄化した熱は集めることが難しく、できるだけ排熱の高温側で回収し有効利用することが望ましい。

いままで200℃以下の排熱に対しビスマス・テルル材料を使った熱電発電システムが考案され、国内外を問わず数多くの実証試験があった。しかし高温耐久性を持つ酸化物材料から作られた熱電モジュールを使った熱電発電システムの開発及び実証は事例が少なく、今回この高温の工場排熱システムを開発しその実証を行った。

高温耐久性を持つ酸化物熱電モジュールは、その材料としてp型に $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 、n型に $\text{CaMnO}_3$ を使用した。また今回開発した熱電発電システムは、1種類の材料からなる熱電発電システムでは無く、高温側及び低温側の発電特性を向上させる為に、低温側にビスマス・テルル熱電モジュール、高温側に酸化物熱電モジュールを用いたカスケード構造の熱電発電システムである。

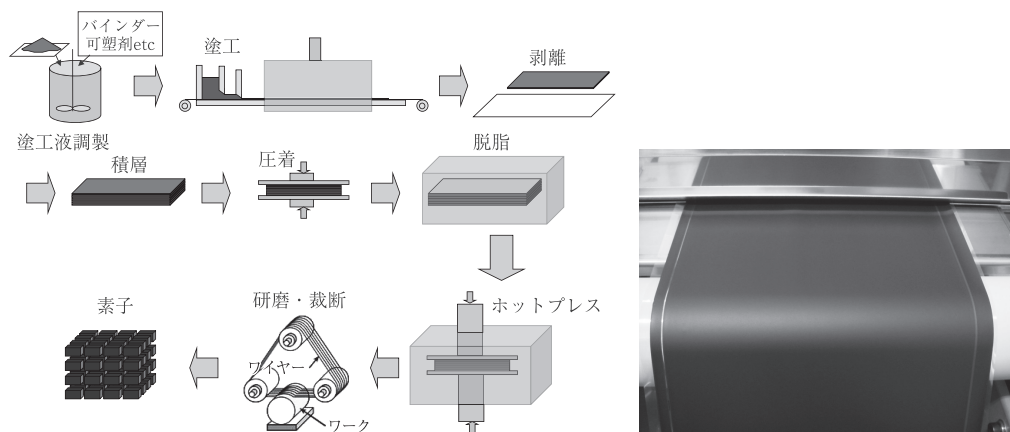
### 1. 工業排熱における熱電モジュール

酸化物熱電素子はシート成形により作製した(図1)。この方法は、粒子の配向性を高め、発電特性を高めることができる。

開発した高温対応のカスケードモジュールを図2に示す。低温側にビスマステルルモジュール、高温側に酸化物モジュールを配置している。

ビスマステルルモジュールは200℃付近まで耐久性を持ち、高温200℃及び低温25℃で数～10 Wの発電性能があり(図3)、このモジュールは200℃以下の排熱に使われている。

酸化物モジュールは900℃程度の耐久性を持ち、600℃以上の高温において高い発電特性を示す(図4)。



素子 シート成形工程

シート成形

図1 酸化物熱電素子のシート成形

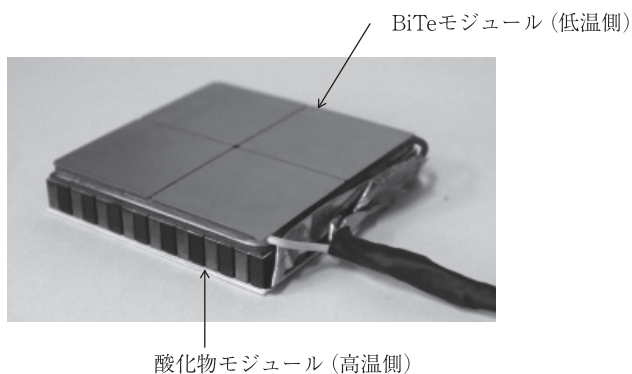


図2 カスケードモジュール

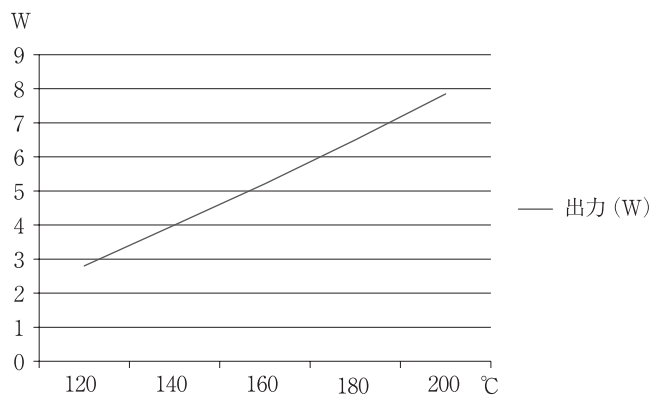


図3 BiTeモジュール出力

今回、開発に使用したビスマステルル材料と酸化物材料で構成したカスケードモジュールの性能を図5に示す。これらの熱電モジュールを直列及び並列に組み合わせて熱電発電システムを構築する。

熱電モジュールを複数個組み合わせて出力させる場合に並列及び直列に接続して出力確認を行った。カスケードモジュールは材料の異なるモジュールの組み合わせであり、そのモジュール抵抗が大きく異なる為、発電及び電気回路シミュレーションを行い、システムを設計した。

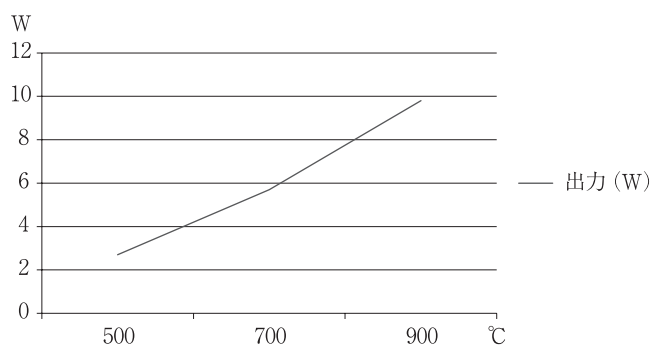


図4 酸化物モジュール出力

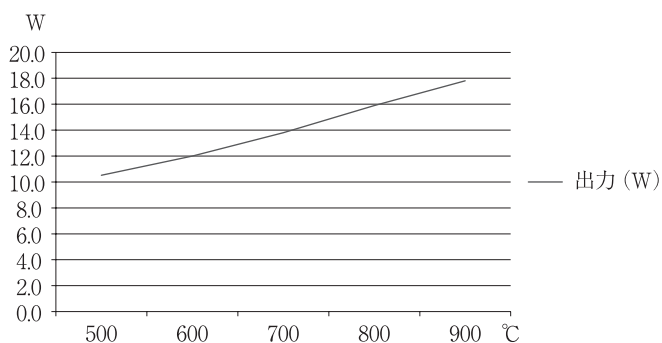


図5 カスケードモジュール出力

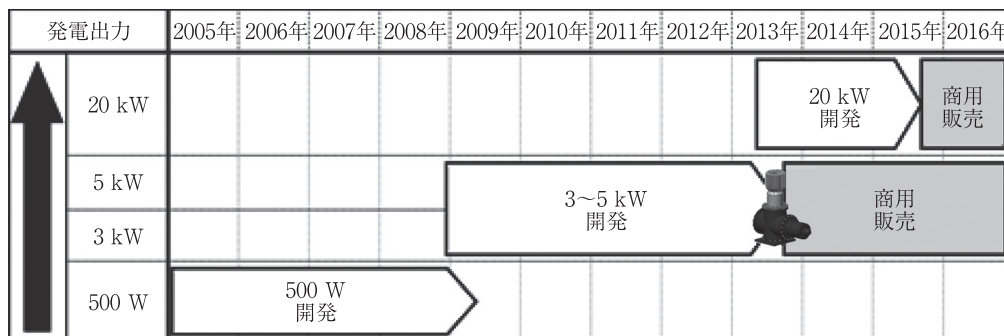
## 2. 熱電発電システムの設計

工場排熱は色々な場所で生み出されており、それぞれの排熱場所に対応するシステム形状及び排熱温度設計が必要である。その意味ではオーダーメイドのシステムになる。排熱場所にどのように取り付けるか、取り付けた時にどれくらいの熱量があり、システムにどれくらい熱が

### 3. (株)eスターにおける排熱利用スターリングエンジンの導入事例

(株)eスターは、発電出力500 Wの小出力エンジンで技術蓄積をしながら、導入現場の要望である発電出力の大出力化を目指してきた。(株)eスターの開発及び商品化の系譜を表4に示す。開発当初、(独)海上技術安全研究所らとともに発電出力500 Wエンジンを開発し、船舶等の排気ガスでの排熱利用エンジンの基礎技術を蓄積してきた<sup>5)</sup>。船舶での実証結果を受け、船舶だけでなく、工場向けの排熱利用として必要な要素技術の構築ならびに発電出力を3 kW、5 kWに向上させたエンジンの開発に繋げた。現在は発電出力20 kWエンジンの開発を実施中である。

表4 排熱利用エンジンの開発・商用化系譜



#### 3.1 排熱利用スターリングエンジンの設備への導入

(株)eスターの開発した排熱利用スターリングエンジンのスコッチヨーク機構は潤滑オイルが飛散しない構成のため、エンジンの設置方向を設置現場に合わせて柔軟に変更させることができる。例として、図1はヒータ挿入方向が縦方向の設置とすると、ヒータ挿入方向を横方向にしたエンジン設置例を図6に示す。このように、本エンジンは排熱源及び周囲の環境に合わせた設置方向での導入が可能となる。

(株)eスターの導入システムの代表例を図7に示す。

まず、排熱源にヒータ部を挿入可能な取り付けダクトを検討する。その際取り付け部を含む排気ガス通路の圧力損失が、工場の排気ファンの負荷として問題のないレベルにあることを確認する必要がある。取り付けダクトへのヒータ挿入時に、事前に排気ガス通路での圧力損失の分析を熱流体解析を用いて行う。同時に、圧力損失条件の下、発電電力が大きくなるようなヒータ形状を決定する。次に導入先の工業用水をエンジンのクーラ部に供給する。工業用水の水質

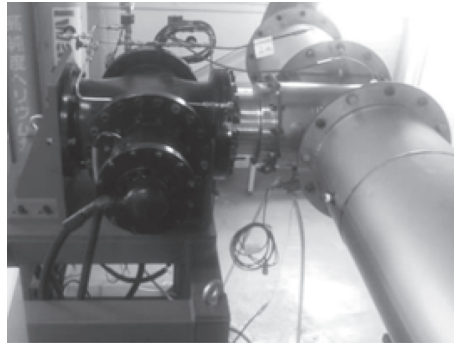


図6 排熱利用スターリングエンジンのヒータ水平方向設置例

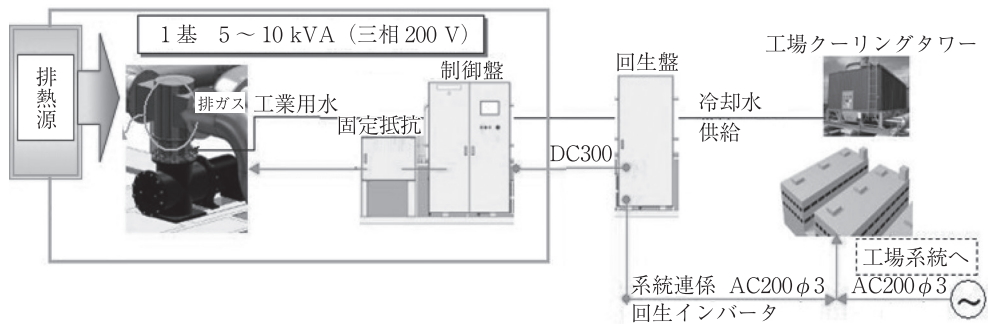


図7 導入システム(系統連系システム)

は、クーラの水通路での閉塞等がないように、水質分析結果を事前に確認しておく。必要であれば、異物及び腐食成分除去のため、水質浄化装置等の設置を行う。図7の導入システムにおける5~10 kWの発電エンジンの場合は45℃以下で20 L/min以上の冷却水量を供給する必要がある。

エンジン制御は、制御盤の操作モニター内にあるPLC(プログラマブルロジックコントローラ)制御によって、エンジンの起動・発電・停止まで、自動運転が可能になっている。

発電電力を生み出すために、高効率IPM(Interior Permanent Magnet Motor: 永久磁石同期電動機)発電機がエンジンのクランクシャフトに直結されている。排熱熱源の温度・流量の変化によって、電圧、電流、周波数が変動する。そのため、制御盤はエンジン制御用インバータ出口でDC300 Vに直流化し、回生インバータにより整流された三相AC200 Vを系統連系する。

万一、制御盤のインバータ及びシーケンス制御等が故障した場合は、エンジンは均圧バルブを開放することで、エンジンは緊急停止をする。緊急停止までの間、発電電力は固定抵抗で消費する。また、系統側の停電時も逆潮流しないように、エンジンが自動で緊急停止をし、緊急

## 第6章 廃温水熱利用による蒸気生成システムの開発

三浦工業(株) 大下 悟

### はじめに

一般工場において、生産工程で100℃程度の温水が発生する工場は数多く存在するが、その熱を回収できているところは多くない。その廃温水の熱量は年間約20,000 TJと想定され<sup>1)</sup>、これを原油換算すると年間約700,000 klに相当する。そのため、この熱量を有効に回収することができれば、工場の省エネに大きく貢献することができる。しかし、従来の熱回収では100℃程度の廃温水では温度が低いため温水回収しかできず、工場での用途が限られていることから、未利用のまま捨てられている場合が多かった。

また、東日本大震災によりエネルギー供給の体制が見直され、その普及拡大が大きなテーマとなっているコージェネレーションシステム<sup>2)</sup>も温水熱の有効利用が着目されている。エンジンの冷却水の回収熱量はエンジン入熱の1～2割程度と大きいにもかかわらず、一般工場同様に用途が限られているため有効な熱回収ができない場合が多かった。この熱を有効に回収できれば、システム効率を大きく向上させ、コージェネレーションシステムの普及拡大に貢献することができる。

そこで100℃程度の廃温水の熱を利用し、より需要のある蒸気を作ることができる廃温水熱利用蒸気発生装置VS-400を東京ガス(株)と共同で開発している。本装置は、一般工場の製造工程等から排出される廃温水、及びガスエンジンコージェネレーションシステムのエンジン冷却水の熱回収も視野に入れており、ガスエンジンから出る廃熱を全て蒸気として回収する、全蒸気回収ガスエンジンコージェネレーションシステムとして、日本ガス協会が掲げる2030年ビジョンにも明記されたテーマである<sup>3)</sup>。

本章では、VS-400の構造や特徴、VS-400を利用したシステムの紹介を行う。

### 1. 蒸気の生成方法

温水から蒸気を生成する方法はさまざまあり、例えばボイラをはじめとする熱交換器、フラッシュタンク、ヒートポンプ等がある。この中から本装置に採用する方法を検討するうえで次の点に留意した。

- ・本装置は省エネ機器であるため、燃料や電力の過度な使用は避けてランニングメリットを



増加させるとともに、初期投資費用を抑え、投資回収年数を短くする必要がある。

- ・エンジンの冷却水は、エンジン出入口の温度差が5～10℃程度で循環している。そのため、エンジン冷却水の熱回収を行うことを想定した場合、熱源の温水温度と蒸発温度の温度差は数℃しかなく、低温度差で蒸発を行う必要がある。
- ・エンジン冷却水の熱回収を行う場合、冷却水をそのまま蒸発させるとエンジン内の冷却水の循環量が低下し、冷却能力が低下、エンジンに悪影響を及ぼしてしまう。そのため、間接的に水を蒸発させる必要がある。

上記の点から、本装置では熱交換方式を採用した。図1に熱交換器の概略図を示す。本装置の熱交換器は、シェルアンドチューブ式を基本構造とし、チューブの中に廃温水を通し、そのチューブ表面に水をシャワー状に噴霧することで蒸気を発生させている。この構造により熱交換器の効率を大きく向上させることが可能である。図1の方式と、同構造の熱交換器でチューブが完全に水に浸かった状態の図を

図2に、両者の性能の比較を図3に示す。図より、Bの方式の熱通過率が680 W/m<sup>2</sup>K程度であるのに対してAの方式は熱通過率が1,150 W/m<sup>2</sup>K程度と約1.7倍の性能差がある。これは、Aの方式では、シャワー噴霧とすることでチューブ表面に薄い液膜を形成することができ、チューブが水に浸かっている場合と比較して、チューブにかかる水頭圧を低減させ、廃温水との温度差を大きくすることができるためと考えられる。表1に、試験条件におけるチューブ表面の飽和温度の比較を示す。Bの方式ではチューブに水頭圧が加わるため、チューブ表面の温度がAに比べ増加する。その結果、熱源である廃温水入口温度との温度差が小さくなり、交換熱量が減少してしまう。一方Aの方式ではチューブにかかる水頭圧を低減させることが

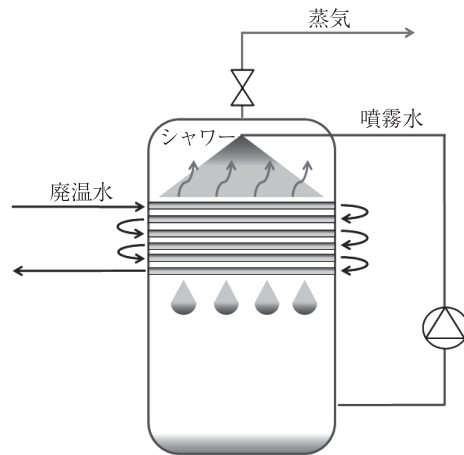


図1 熱交換器の概略図

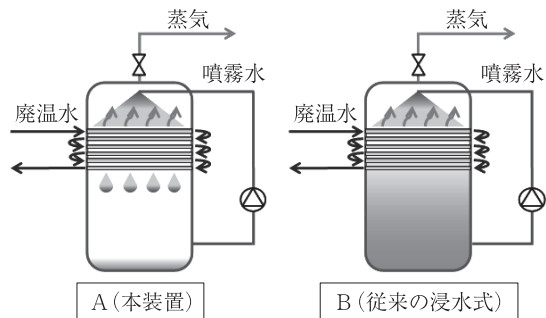


図2 性能比較を行った熱交換器の概略図