

Micro Review

低温温排水からの蒸気生成吸着式ヒートポンプの提案

Proposal of Adsorption Heat Pump for Generating Steam from Waste Water at Low Temperatures

九州大学大学院工学研究院 深井 潤
Kyushu University Jun Fukai

More reduction in energy consumption is requested for the industry section because a large quantity of waste water at low temperatures is released in the industrial processes. It has potency and possibility for contribution in the energy saving if the waste water can be regenerated to be steam again. To recover waste heat at a low temperature from hot water, adsorption heat pump system can be used as of its advantages. Though most of existing heat pump is indirect heat exchange type, it has some problems such as low heat exchange rates and high capacities of heat exchanger. In this study, the direct heat exchange type which took out heat by contacting directly zeolite and water is proposed. The adsorption heat pump using zeolite-water is theoretically investigated based on adsorption isobar curves. As a result, the ratio of the amount of recovered steam of 140 °C to input waste water of 80 °C is more than 0.55 when adsorption process is only considered. On the other hand, the ratio is 0.038 when desorption process is also considered as heat source. From these calculations, the heat pump system has potential to reduce the energy of 1.4 million ton of crude oil especially for the field of ironworks.

1. はじめに

化石燃料の資源的制約および地球温暖化問題などを背景として、省エネルギーの更なる要請はますます強まっている。石油危機を契機として、産業部門のエネルギー消費は、ほとんどゼロ成長であるものの、全消費量の過半数を占めている¹⁾。このため、産業部門にはこれまで以上のエネルギー消費削減が求められている。

エネルギー消費量の大きい鉄鋼分野に着目すると、製鉄所では転炉フード、連続鋳造設備のモールド、鋼材加熱炉のスキッドなどで使用される冷却水の出口温度は60～90℃と低く、従来の技術では回収が難しいため排熱として捨てられている。このような未利用温水廃熱は粗鋼生産量1000万t/年規模の製鉄所において1000～2000t/h発生している。その一方で、NEDOの大きな戦略的事業の一つとしてCOURSE50が進められている。この中で実用化の期待が大きいアミン法では、アミン液を再生するために120℃以上に加熱する熱源が必要になる。COURSE50が目標とするCO₂分離で10%以上のCO₂削減を達成するためには、粗鋼生産量が1000万t/年規模の製鉄所において200万t-CO₂/年以上のCO₂を分離する必要がある²⁾、それには、新たに140℃の蒸気に換算して180万t-蒸気/年相当の熱源が必要になる。この蒸気量は現在製鉄所で使用される総蒸気量とほぼ等しく、既に回収可能な排熱の大半を蒸気で回収済みの国内製鉄所では、従来技術で更なる蒸気を回収し、CO₂分離に必要な量を確保することは不可能である。また、化学産業分野でのエネルギー消費量は、鉄鋼分野に次いで多く、なかでも石油化学産業でのエネルギー消費量は、化学産業の53%を占めている。また、CO₂排出量は全体の6%に及んでいる³⁾。しかし、石油化学業界の製造プラントのエネルギー効率は世界最高レベルにあるため、革新的な省エネルギー技術開発が喫緊の課題となっている。NEDO平成21年度エコイ

ノベーション推進事業「石油化学業界における革新的エネルギー変換に関する探索研究」⁴⁾によると、石油化学製品製造プラントで使用された温度領域別エネルギー量は、143℃以上の蒸気のエネルギー利用量が極めて大きい。また、同様の石油化学製品製造に係る排温水と排ガスの排熱量に関する排出温度領域別データからは、30～50℃の排温水と80～150℃程度の排ガスが主要な未利用廃熱であり、温水と排ガスの基準温度をそれぞれ30℃と80℃とすると、そのエネルギー量は製造時に使用した蒸気エネルギーの74%にも相当することが報告されている。

以上のような現状から、50～100℃の未利用廃熱から150℃以上、理想的には180℃程度の蒸気生成技術のニーズは極めて高い。

本稿では、まず、既存の蒸気生成技術を述べ、著者が目指す吸着式ヒートポンプを利用した蒸気生成システムの概要を説明する。さらに、本システムの性能評価の一例として、温排水(100℃以下)から150℃以上の蒸気生成の性能を解析する。最後に、製鉄所における省エネルギー効果を示す。

2. 既存の蒸気発生技術

既存の蒸気生成技術としてはボイラーが一般的である。しかし、ボイラーは省エネルギー性が低い(COP<1)、その利用では化石燃料消費およびCO₂排出削減を達成できない。このほか、圧縮式ヒートポンプが挙げられるが、120℃レベルの開発研究が進行中で、COPは3～6程度であるが汎用機で生成できる温度レベルは100℃以下である。150℃以上の蒸気発生を行うには、更なる研究期間が必要となる。圧縮式ヒートポンプ開発の問題点としては、冷媒の選定、メカニカルシールの耐熱・耐圧性などがある。さらに、水を冷媒として用いるのであれば、圧縮比が大きくなってしまふこと、メカニカルシールと

水との相性、不凝縮ガスの混入などの問題も解決しなければならない^{5)~8)}。

蒸気再圧縮回収機(Vapor Recompression, VRC)も蒸気コンプレッサーによる排蒸気の回収・再圧縮を行い、蒸気を再生する⁹⁾。現時点では、圧縮式ヒートポンプと同様に高温生成は難しく、低圧低温の蒸気をせいぜい100℃から110℃へ加熱するために用いられている。

また、吸着式ヒートポンプの昇温モードによる蒸気生成技術も考えられる。しかし、実際には、代表的な吸着剤である臭化リチウム水溶液では120℃までの実績しかない。それ以上の温度では腐食速度が大きくなり、耐食性の素材の開発が必要となる¹⁰⁾。

3. 蒸気生成吸着式ヒートポンプの概要

吸着式ヒートポンプは、これまで冷熱生成技術として注目され、多くの研究が報告されている¹¹⁾。著者らの知る限り、昇温モードを利用して蒸気生成を試みているのは、三輪の報告であるが、その内容は基礎研究に留まっている¹²⁾。

冷熱生成、温熱生成を問わず吸着式ヒートポンプの実用化への関門の一つは、如何にして吸着材と冷媒の熱交換速度を高く維持するかということである。すなわち、粒子状の吸着材を反応器内に充填した場合、粒子充填層の有効熱伝導率は10⁻⁴W/(mK)オーダーと非常に小さい。これが、熱交換器を介して吸着材内に蓄積された熱エネルギーを熱媒体に伝える際に、十分な熱交換速度が得られない原因となる。そこで、熱交換器の伝熱表面に吸着材を塗布・固着するなどの技術が開発されている¹³⁾。また、経験的に気体の流通経路を確保するための通気管を設置したり¹⁴⁾、熱伝導率の高い材料を添加するなどしている。しかし、いずれにしても、反応器内に熱交換器および気体流路を設置することは、装置の有する顕熱を増やす結果になるので望ましいことではない。

一方、ここで注目する蒸気発生システムでは、水系の吸着を利用すれば、熱媒体も水(蒸気)であるので、熱交換器を介さずとも良いことがわかる。本稿では、本システムの可能性を示すため、水系の吸着材として代表的なゼオライトを用いることにする。シリカゲルも有力な吸着材候補であるが、一般的に耐水性・耐熱性に問題があり、水との接触で180℃の蒸気生成を考える場合、反応器内の局所温度が200℃以上になると予想されるため、シリカゲルの使用は現状では難しい。

図1および2に、ゼオライトの吸着等圧線図およびヒートポンプサイクルの概略を示す。ゼオライト粒子を充填した蒸気生成器を考える。ゼオライトは初期状態(状態1)にあるとする。蒸気生成器に温水を導入し、温水の一部をゼオライトに吸着させ、その吸着熱で生成器内温度を上昇、および、一部の温排水を蒸気させる。その結果、蒸気生成器の温度は蒸気温度 T_2 、および水蒸気分圧 p_2 (状態2)まで上昇する(A:予熱工程)。その後、さらに蒸気生成器内に温水を導入し、吸着熱で目的温

度の蒸気を生成する(B:生成工程)。このときゼオライト吸着量は最大(状態3)に達する。以上の操作は主に蒸気生成器内の圧力を制御することで行う。その後、蒸気生成器の弁を開放し、生成器内を減圧させ(減圧工程)状態4に達した後、ゼオライト粒子を、加熱した乾燥空気に接触させて脱着させ、状態1に戻す(C-D:再生工程)。

吸着式ヒートポンプはバッチシステムなので、連続的に蒸気を発生させるために実際には多塔式のシステムとなる。

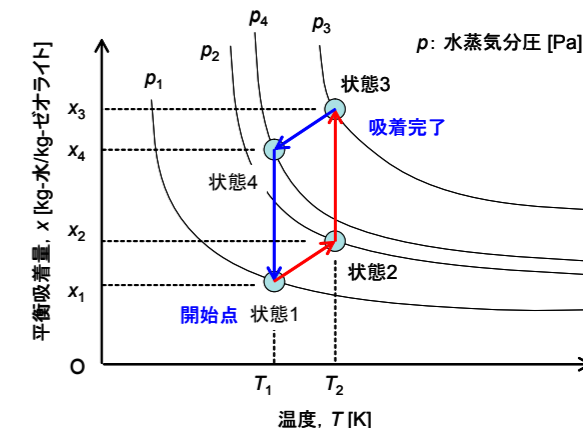


図1 吸着等圧線と基本サイクル

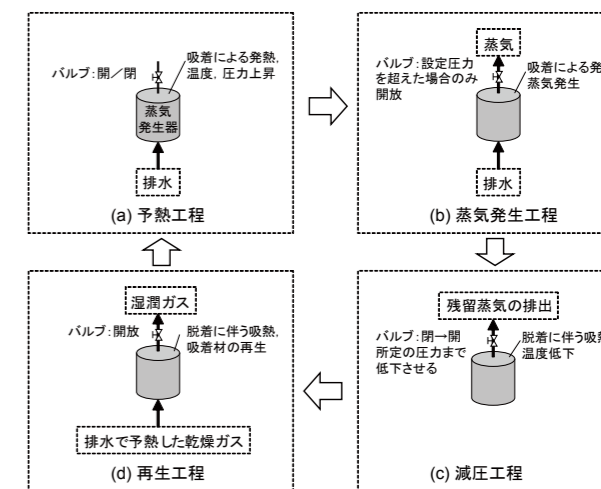


図2 システムの概略

4. 性能の予測

1000kgの13Xゼオライト粒子を円筒ステンレス容器に充填した実機を想定し、上述の各工程における物質収支とエネルギー収支に基づいて性能予測を行った。収支式中、ゼオライトと蒸気の吸着平衡を仮定し、反応器が有する熱容量を考慮している。また、ゼオライトを再生に使用する空気の昇温は、排水で加熱するとしている。モデルの詳細は参考論文15)に掲載されている。

80℃の排水温度から180℃の蒸気を発生させた場合を例として、初期吸着量 x_1 と蒸気発生量および脱着必要熱量の関係を