

図3に示す。これより、ゼオライトの初期吸着量を出る限り小さくすることが重要である。そのためには、脱着工程に使用する乾燥ガスの水蒸気分圧を極力小さくする必要がある。図中には初期吸着量に対応した脱着空気の水蒸気分圧  $p_1$  も併示している。すなわち、80℃の排水で  $x_1=0.1$  を得るには、空気の水蒸気分圧は55.2Pa (= 露点温度-26℃) である。デシカント空調機などで、露点温度-60℃の空気を再生できることを考慮すれば、この乾燥空気の製造は実現可能であると考えられる。

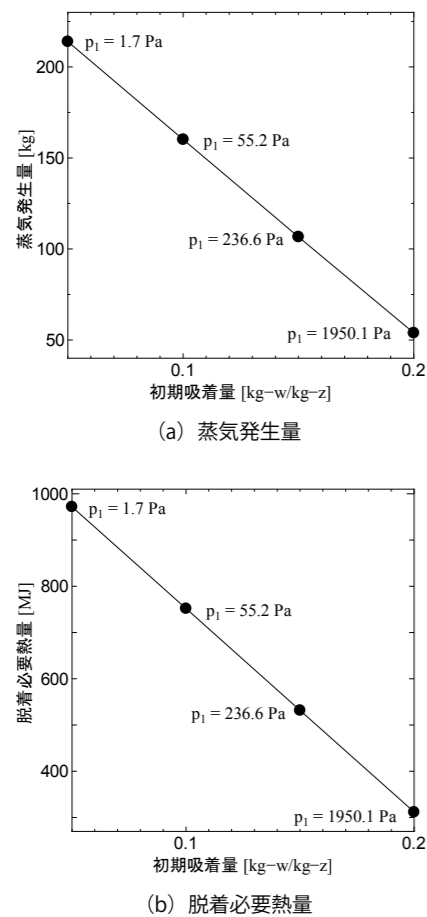


図3 初期吸着量が蒸気発生量および脱着必要熱量へ及ぼす熱量の比較

次に、排水温度と生成蒸気温度が蒸気発生量と蒸気発生熱量に及ぼす影響を図4および5に示す。各図の縦軸は投入水量(熱量)で規格化してある。まず、蒸気温度より排水温度の方が発生蒸気量・熱量に大きく影響することがわかる。また、排水温度が90℃の場合、排水量の約5%が蒸気に再生され、同温度が50℃の場合でも、1%は蒸気に生成できる。工場では膨大な低温排熱が放出されていることを考慮すれば、この数値は決して低い値ではない。さらに、排水温度80℃、蒸気温度140℃のとき、質量比で約0.038、熱量比では約0.57である。これは、排水温度が50℃の場合でも、排水が有する熱量の5-6割は再生できることを示している。この熱損失は主にゼオライトの顕

熱分である。ただし、熱量は基準温度に左右されるので、この数値は参考である。

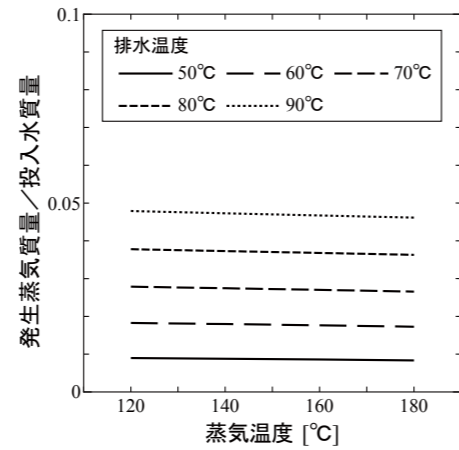


図4 蒸気発生量比(蒸気発生量/投入水量)に及ぼす蒸気温度と排水温度の影響

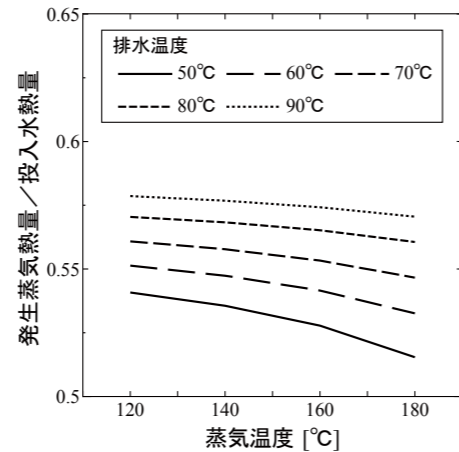


図5 蒸気発生熱量比(蒸気発生熱量/投入熱量)に及ぼす蒸気温度と排水温度の影響(基準温度=20℃)

## 5. 省エネルギー・CO<sub>2</sub>削減効果の予測

### 5.1 CCS導入時のCO<sub>2</sub>分離のエネルギー源として活用

以上の計算を基に、本システムを製鉄所へ適用する場合を試算した。製鉄所へCO<sub>2</sub>分離・回収技術の適用する際の最大の課題は分離に必要なエネルギー源の確保になる。そこで国内の主要製鉄所(10製鉄所-12地区)において、NEDOのCOURSE50プロジェクトの大きな成果の一つとして期待されるアミン法を適用すると仮定し、そのCO<sub>2</sub>分離に必要なエネルギーを本研究で提案する水蒸気回生システムで賄うものとする。具体的には、国内の10製鉄所(12地区)へ、未利用低温排熱の高温蒸気回生システムで賄える150万t/年・地区規模のCO<sub>2</sub>削減システムを導入する場合を考える。これは、国内全体で1,800万t-CO<sub>2</sub>/年の削減となる。これを実行するのに、COURSE50の開発目標であるアミン液120℃以上への加熱と2.0GJ/t-CO<sub>2</sub>

が達成されたとして、蒸気温度140℃(2.8GJ/t-蒸気)、熱交換器効率80%を仮定すると、必要な蒸気は、1,800万t-CO<sub>2</sub>/年×{(2.0GJ/t-CO<sub>2</sub>)/2.8GJ/t-蒸気}/0.8=1,600万t-蒸気である。この蒸気を未利用の低温排熱から再生して回生する。仮に、分離後のCO<sub>2</sub>を地下貯留せずに大気放散したとしても、省エネとCO<sub>2</sub>削減が達成される。その理由は、製鉄所では高炉ガスを発電燃料として使っており、CO<sub>2</sub>を除去した高炉ガスを用いることで、ガスタービンコンバインド発電の効率が48から52%程度へ向上できることが最近の研究で明らかにされている<sup>14)</sup>。ちなみに、10製鉄所(12地区)で副生ガスによる総発電量は300億kWh/年以上であることから、CO<sub>2</sub>分離に未利用の排水を使えば、仮に分離したCO<sub>2</sub>を地中貯留せずに、大気放散しても、25億kWh/年の電力が創出でき、大幅な省エネとCO<sub>2</sub>削減になる。この創出電力は、COURSE50で実施されている物理吸着法によるCO<sub>2</sub>分離および貯留の際のエネルギー源として使うことができる。

もし水蒸気回生技術を用いない場合、化石燃料焼きボイラーを用いて、蒸気を発生することになる。燃焼ボイラーの熱効率を96%とすると、1,600万t/年の蒸気発生に必要なエネルギーは原油換算で、1,600万t-蒸気×2.8GJ/t-蒸気/0.96/(38.2GJ/kL×0.95)=129万kL/年となり、CO<sub>2</sub>の分離・回収では石油燃料焼きボイラーを熱源にした場合、約130万kL/年の化石燃料の消費を増やし、それに伴うCO<sub>2</sub>排出量が約340万t-CO<sub>2</sub>/年増加する。これはエネルギーの使用合理化に反し、エネルギー資源輸入国である我が国ではエネルギーコストの増加を招き、産業競争力が低下する。

### 5.2 燃料による低圧蒸気の発生削減

製鉄所では鉄鋼生産に0.2t-蒸気/t-steelが消費されており、その殆どは排熱回収によって得られているが、約10%は燃料を燃焼するボイラーにより得ている。この量は、0.2t-蒸気/t-steel×0.1×8000万t-steel/年=160万t-蒸気/年となる。この160万t/年の蒸気発生に必要な熱量は、燃焼ボイラーの熱効率を96%とすると、原油換算で、160万t-蒸気×2.8GJ/t-蒸気/0.96/(38.2GJ/kL×0.95)=13万kL/年である。燃焼ボイラーによる発生蒸気は、本未利用低温排熱の高温蒸気回生システムで代替すれば削減可能となる。但し、蒸気単価を2000円/tとすると、従来からの指標である蒸気代替用途および燃料削減の単純省エネ効果だけでは、経済性効果のポテンシャルは32億円/年程度のため、省エネおよびCO<sub>2</sub>排出量削減に対する戦略的な価値は極めて過小評価されてしまうことになる。このことから、本技術の価値は前項で示したように、他のエネルギー消費設備と組み合わせたシステムを構成して、未利用低温排熱の利用を積極的に拡大することによって、新たな革新的省エネルギー技術を生み出すために、コアとなる省エネ要素技術といえる。

## 6. おわりに

本稿では、提案する蒸気生成ヒートポンプの性能と省エネルギー効果を試算し、本ヒートポンプが開発されれば大きな波及効果あることを示した。ただし、ここでの性能予測は、吸着量の平衡状態を仮定しており、速度論を考慮していない。実験により吸着工程と脱着工程を実験的に検討した結果、吸着工程では発熱に起因した極端な非平衡現象が確認されている。また、脱着工程における時間の短縮、乾燥空気の製造方法が課題である。さらに、多筒式による連続蒸気生成も必要で、その最適操作の課題も残っている。

約3年間、当研究室で基礎研究を行ってきたが、周辺設備を含めた課題を解決し実用化を図るために、3大学3企業の共同で申請した課題がNEDO「省エネルギー革新技術開発事業(H23-24)」に採択された。今後の研究開発の進展に期待したい。

### 参考文献

- 1) 経済産業省, エネルギー白書2010 (2010), 160.
- 2) 中川二彦, ガス分離を用いた高効率エネルギー回生, エネルギー・資源学会論文誌, 32-4, 1-3 (2011).
- 3) 環境省地球環境局地球温暖化対策課・経済産業省産業技術環境局環境経済室, 地球温暖化対策推進法に基づく温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度による平成19(2007)年度温室効果ガス排出量の集計結果(2009), 17.
- 4) 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」(平成21年度成果報告書09002771-0, 09002773-0).
- 5) H. Endou; Improvement of Compression Heat Pump Performance, Proceedings of 3rd IEA Heat Pump Conference, (1990), 797-806.
- 6) I. Tamura, H. Taniguchi, H. Sasaki, R. Yoshida, I. Sekiguchi and M. Yokogawa, Energy Convers. Mgmt. 38, 1007 (1997).
- 7) 遠藤尚樹, 矢部 彰, 山下 巖, 日本機械学会論文集B, 64, 2991 (1998).
- 8) 尾崎浩一, 遠藤尚樹, 矢部 彰, 小林敏雄, 日本機械学会論文集B, 57, 202 (1991).
- 9) 例えば E. R. Canales and F. E. MdrquezInd, Ind. Eng. Chem. Res. 31,2547 (1992).
- 10) 加藤之貴, 安永裕幸, 柏木孝夫監修, 化学工学会エネルギー部会・骨太のエネルギーロードマップ第2版 (2010), 239-244.
- 11) 小倉 裕直, 金森 道人, 松田 仁樹, 架谷 昌信, CaO / H<sub>2</sub>O / Ca(OH)<sub>2</sub> 化学工学論文集, 19, 941 (1993).
- 12) 三輪輝之男, 化学工学, 46, 347 (1982).
- 13) H. Tanaka, I. Ando, Y. Hirota, T. Sumiya, N. Kobayashi, M. Hasatani, Proceedings of International Symposium on EcoTopia Science 2007, 376 (2007).
- 14) 辻 康範, 芝 世式, 中川二彦, 日本機械学会2010年次大会講演論文集3, 13 (2010).
- 15) 中曾浩一, Erfina Ochteriani, 野田敦嗣, 板谷義紀, 中川二彦, 深井 潤, エネルギー・資源学会論文誌, 32, 316 (2011).