

圧縮機を利用した化学プロセスの省エネ化 — 蒸留，乾燥，分離プロセスへの適用 —

Energy Saving Chemical Process by Self-Heat Recuperation Technology

村 本 知 哉 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部
 西 山 裕 一 IHI INC. Technical Research, Business Development
 奥 野 真 也 技術開発本部総合開発センター化学システム開発部
 上 野 俊 一 朗 技術開発本部総合開発センター化学システム開発部 課長

化学プロセスの省エネ化技術として，自己熱再生法が注目されている。自己熱再生法は，化学製品を製造する工程などで処理ガスを圧縮し，その際に生じる温度上昇を利用して排熱の大部分を回収する技術である。アミン法による CO₂ 回収プロセス，汚泥乾燥プロセス，海水淡水化プロセスへの適用を検討した結果，シミュレーションで 20～95%の省エネが可能であるとの試算結果が得られた。自己熱再生技術の有用性が確認できたため，今後はさまざまな加熱・蒸発プロセスへの適用を図る。

Self-heat recuperation (SHR) is an emerging energy-saving technology for chemical processes. All waste heat can be recycled by process gas compression. When the process gas is compressed, the process gas temperature or its evaporation temperature rises. This rise in temperature is used as a heat exchange temperature difference to efficiently recover waste heat. SHR technology is being applied to CO₂ capture processes, sludge drying and seawater desalination. Our chemical process simulations showed that a 20-95% reduction in energy consumption can be achieved. This promising SHR technology has great potential to be applied to various heating and evaporating processes.

1. 緒 言

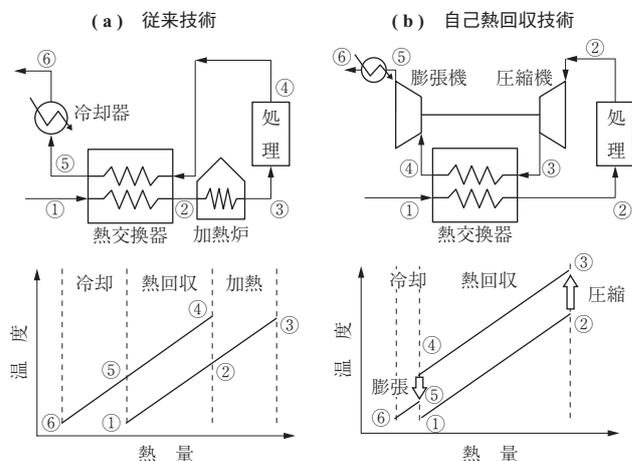
化学産業は日本の製造業エネルギー消費の 40%を占めており⁽¹⁾，常に省エネ化への努力が求められている。さらに，そのうちの 40%が蒸留分離プロセスで消費されているともいわれている⁽²⁾。つまり，加熱・蒸発プロセスの省エネ化を進めることが重要であると考えられる。

堤らは加熱・蒸発プロセスの省エネ化に適した技術として，自己熱再生法を提案している^{(3)～(5)}。詳細については 2 章で述べるが，本手法は圧縮機を用いて熱再生を行うものであり，エネルギー消費量を 1/22～1/2 に削減でき⁽³⁾，省エネに有効な技術として有望視されている。

これまで製品の差別化を目的として，自己熱再生を各種製品に適用する検討をしてきた。ここでは，検討結果の一部について報告する。

2. 技術の概要

自己熱再生法による熱回収原理を第 1 図に示す。従来技術（第 1 図 - (a)）ではプロセスのエネルギー効率を上げるため，排熱の熱回収を行っている。熱回収するため



(注) 図とグラフの番号は対応する。

第 1 図 自己熱再生法による熱回収原理
 Fig. 1 Basic concept of SHR

には，余剰熱をもったプロセス流体と加熱が必要なプロセス流体を熱交換するために熱交換温度差が必要である。この温度差に相当する熱は燃焼などによって同量を外部から熱供給する必要がある。

一方，自己熱再生法（自己熱回収技術（第 1 図 - (b)））では，余剰熱をもったプロセスガスを圧縮することで断熱

温度を上昇させる、または沸点上昇させることで熱交換温度差を生み出すことができる。さらに、熱回収後のプロセスガスから圧力エネルギーを回収することができる。そのため、従来法と比べてわずかなエネルギーの投入で大きな熱回収をすることが可能になる。

熱力学の観点からは、従来法で使う燃焼加熱は不可逆プロセスであるのに対し、自己熱再生法で使う圧縮は可逆プロセスであり、エクセルギー損失が最小化される。

自己熱再生法の名称の由来は、自分の熱は自分で回収する、という点にある。あるプロセス流体を蒸発させる処理があった場合、同じ流体を凝縮させる処理が同じプロセス内にあるはずである。このとき、蒸発に必要な熱量と凝縮で生じる熱量は等しいため、この二つの処理を本章で述べた方法で熱回収する（ペ어링と呼ぶ）ことによって、熱の余剰や不足が生じることなくプロセスを組むことができる。

なお、圧縮機を使った類似の熱回収技術として、ヒートポンプや蒸気再圧縮法が挙げられる。比較表を第1表に示すが、それぞれに利点・欠点があり、適用するプロセスに応じて最適な手法を選ぶことが必要である。

3. 製品への展開

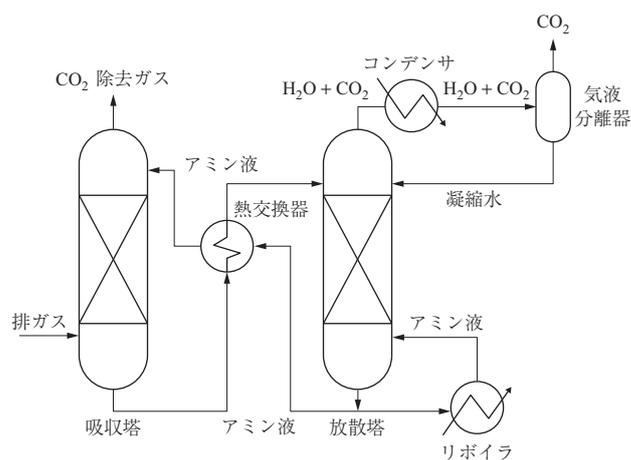
ここでは、アミン法によるCO₂回収装置、汚泥乾燥装置、蒸発法海水淡水化プロセスに自己熱再生技術を適用検討した事例を紹介する。

3.1 CO₂回収装置

アミン法によるCO₂回収は、火力発電所のCO₂排出量を削減する手段として開発が進められている。第2図に従来型アミン法CO₂回収プロセスを示す。CO₂回収工程では、アミン溶液を加熱するために多量のエネルギーを要することが分かっており、吸収液の改良などによって消費エネルギーの削減が進められている。プロセスの改善によって消費エネルギー削減を試みた例として、Kishimoto⁽⁶⁾による製鉄プロセスを主な対象としたCO₂吸収プロセスへ、自己熱再生の適用の検討が挙げられる。本検討では、石炭焼き火力発電所の排ガスを対象としている。

第1表 自己熱再生法と類似技術の比較
Table 1 Comparison between SHR and similar technologies

	回収熱	圧縮媒体	特徴
自己熱再生	潜熱+顕熱	プロセス流体	効率が高い
ヒートポンプ	主に顕熱が対象	CO ₂ 、フロンなど	汎用性が高い
蒸気再圧縮	主に潜熱が対象	プロセス流体（水蒸気）	実績が多い



第2図 従来型アミン法CO₂回収プロセス
Fig. 2 Conventional CO₂ capture by amine absorption

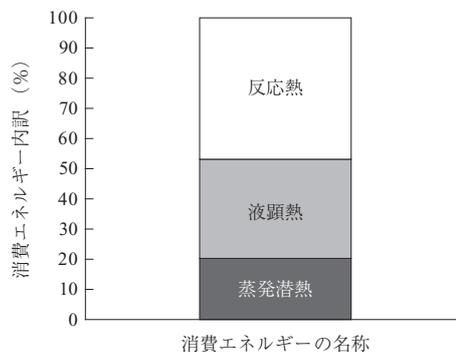
アミン法CO₂回収における消費エネルギーの内訳を第3図に示す。図に示すように、リボイラで消費されるエネルギーは、(1)水蒸気の蒸発に使われる潜熱(2)アミン溶液の加熱に使われる顕熱(3)アミンからCO₂が解離する反応熱、の三つで構成される。自己熱再生法では、熱回収元と熱回収先を対応付けてプロセスを作ることが重要であるため、三つの熱それぞれについて熱回収方法を検討した。

(1) 水蒸気潜熱の回収

放散塔の塔頂ガスは回収されたCO₂と加熱によって生じた水蒸気が含まれる。従来プロセスではコンデンサを設置することで水蒸気を凝縮させていた。ここで凝縮によって捨てられていた熱を回収する。回収方法としては、塔頂ガスの凝縮温度がリボイラの加熱温度以上になるように圧縮して熱交換を行う。なお、圧縮機を200℃以下で運転するため、3段に分けてガスを圧縮する。

(2) 液加熱顕熱の回収

吸収塔は低温で、放散塔は高温で運転されるため、循環するアミン溶液の顕熱分を加熱・冷却する必要



第3図 アミン法CO₂回収における消費エネルギーの内訳
Fig. 3 Sources of energy consumption in CO₂ capture by amine absorption

がある。その大部分は二塔間の熱交換器で熱回収されるが、熱交換温度差分は熱回収できない。そこで、塔頂ガスの余熱を使い放散塔に供給されるアミン溶液を加熱することで、液顕熱の加熱に相当する分を補てんする。

(3) 反応熱の回収

アミンが CO_2 を放散する際、吸熱反応が起こる。この熱を補うには、 CO_2 吸収時の発熱を回収することが必要である。ヒートポンプなどを用いることで熱回収は可能であるが、吸収塔と放散塔の運転温度の差が大きいため、熱回収効率が悪い。ここではコストパフォーマンスの観点から、反応熱の回収は行わない。

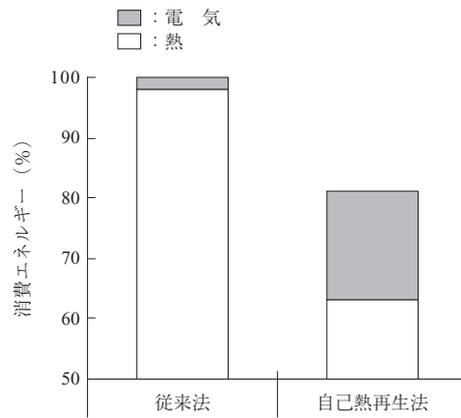
以上の検討に基づいて作成した自己熱再生 CO_2 回収プロセスを第4図に示す。本章で述べたように、塔頂ガスを圧縮することで、蒸発潜熱の回収とアミン溶液顕熱分の補てんを行うプロセスになっている。

本プロセスでは、従来プロセスと比較して、リボイラでの加熱量は低下するが、圧縮機を駆動する電力が消費エネルギー増加要因となる。そこで、トータルでのエネルギー消費量を試算した(第5図)。従来法と比べて20%削減できるとの試算結果が得られた。

現在は、小規模装置での検証が完了しており、今後大規模装置での検証を経て、商用化へつなげていく。

3.2 汚泥乾燥

汚泥、褐炭、バイオマスなどの乾燥では、通常、熱風などを被乾燥物に当てて水を蒸発させるが、熱回収はほとん



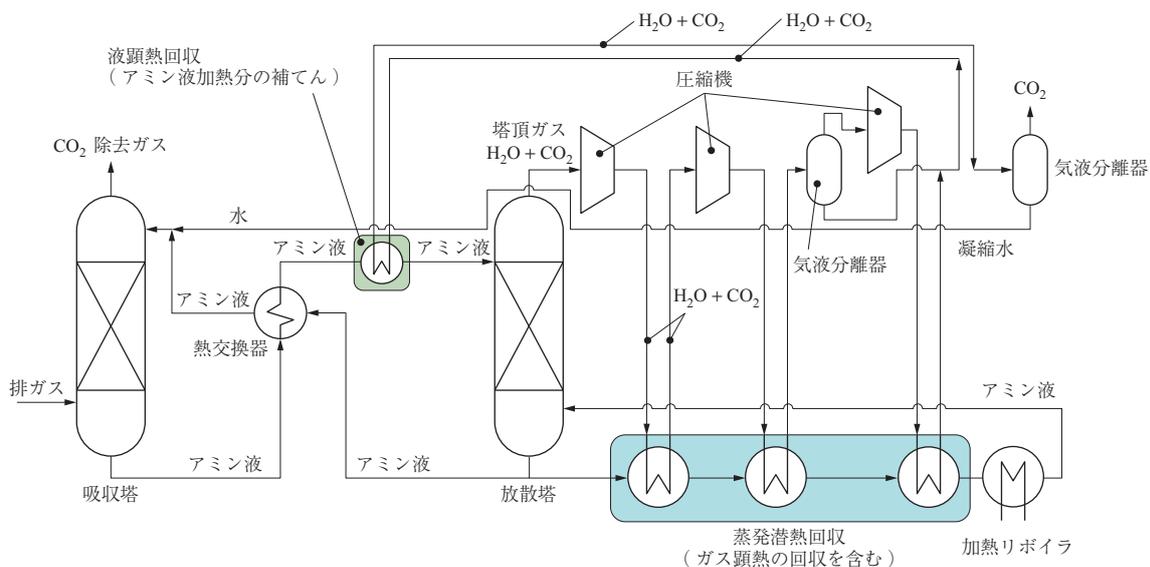
(注) 従来法を 100 とした相対値で示す。
条件
・最小熱交換温度差: 10℃
・圧縮機断熱効率: 72%

第5図 自己熱再生 CO_2 回収のエネルギー

Fig. 5 Energy consumption estimations for CO_2 capture processes

ど行われていない。蒸発した水蒸気は潜熱を保有しているものの空気で薄められており、凝縮熱の回収が難しいためである。乾燥プロセスに自己熱再生技術を適用することで、蒸発潜熱の回収を含む省エネプロセスの構築を行った。

伏見ら⁽⁷⁾は褐炭乾燥工程への自己熱再生適用について報告しており、乾燥プロセスへの適用に当たっては被乾燥物中の固体分と水分のそれぞれについて、自己熱再生による熱回収を行うプロセスを提案している。ただし、既存の乾燥プロセスを改善する形で自己熱再生化を行っているが、本稿では一から最適プロセスの形を検討することにした。



第4図 自己熱再生 CO_2 回収プロセス

Fig. 4 SHR CO_2 capture by amine absorption

乾燥物の対象として汚泥を想定し、回転式加熱炉を用いた自己熱再生乾燥プロセスを第6図に示す。本プロセスのポイントは、① 炉体に原料（固体）を入れ、回転軸に加熱または熱回収流体を流すことで間接加熱方式を実現し、蒸発した水蒸気と加熱ガスの混合を防ぐ② 固体である乾燥物からの熱回収に空気を用い、これを圧縮して原料（固体）を加熱する熱源として用いる③ 回転式加熱炉はガスと固体の流れを対向流として熱交換効率を上げる、の3点である。

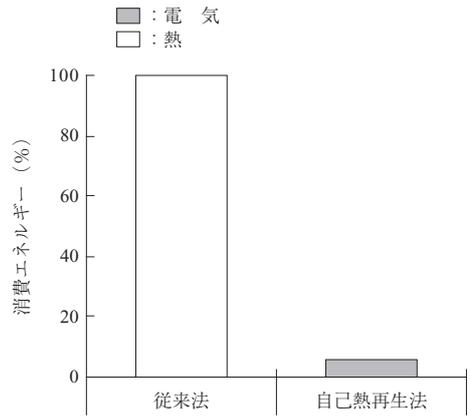
本プロセスおよび熱回収を行わない従来方式の消費エネルギーをシミュレーションで計算した結果を第7図に示す。従来方式と比べて自己熱再生法の適用によって消費エネルギーは95%削減できるとの計算結果となった。

ただし、固体の乾燥では熱伝達を良好にする必要があり、装置形状や熱交換温度差などを十分に検討したうえで、コスト評価と併せて最終的なプロセスを決定する必要がある。

3.3 海水淡水化

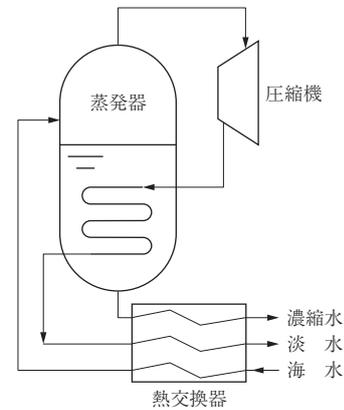
海水淡水化法には大きく分けて蒸発法と膜分離法がある。蒸発法としては多段フラッシュ法（MSF）や多重効用法（MED）が、膜分離法としては逆浸透膜（RO膜）法が代表例として挙げられる。近年はRO膜法の省エネ化が進み、シェアを大きく広げている。しかし蒸発法には、得られる淡水の純度が高い、高塩濃度の海水も処理できる、といった特長がある。ここでは、蒸発法による海水淡水化に対して自己熱再生法の適用を検討する。

海水淡水化に自己熱再生を適用したプロセスを第8図

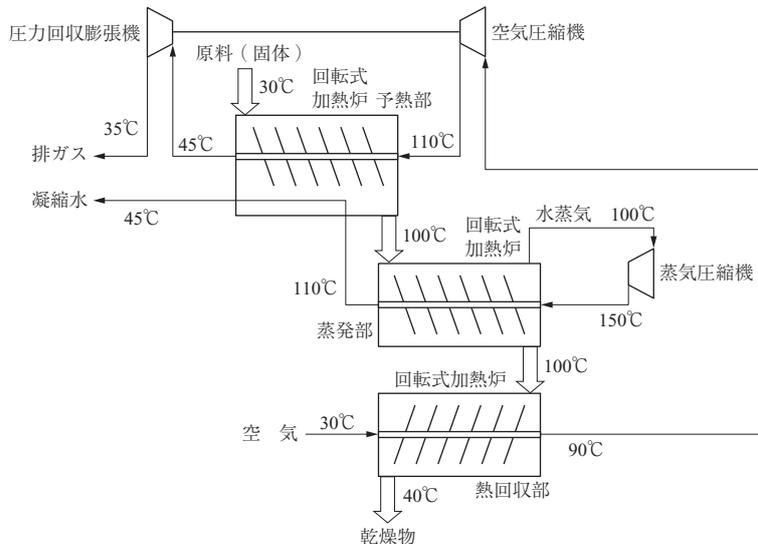


(注) 従来法を 100 とした相対値で示す。
条件
・最小熱交換温度差: 10℃
・圧縮機断熱効率: 72%

第7図 自己熱再生乾燥のエネルギー評価結果
Fig. 7 Energy consumptions for the SHR dryer process



第8図 電動圧縮機を用いた蒸発法自己熱再生海水淡水化プロセス
Fig. 8 SHR seawater desalination using a mechanical compressor



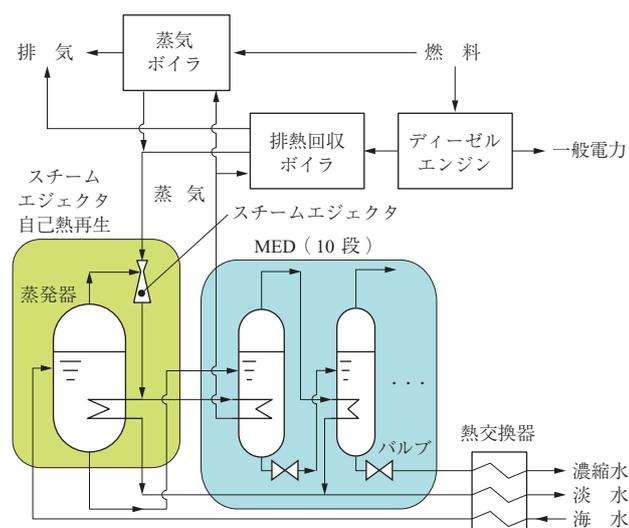
第6図 自己熱再生乾燥プロセス
Fig. 6 SHR dryer process

に示す。蒸発器で海水の一部を蒸発し、蒸発した水蒸気を圧縮することで蒸発熱源として用いる。また、淡水および濃縮水の熱を回収して海水の予熱に用いる。なお、従来法の一つである蒸気再圧縮法と比較すると、蒸発潜熱を回収する点は同じである、しかし淡水および濃縮水の顕熱回収を最適化しないため、別途外部から熱供給する必要がある点が異なっている。

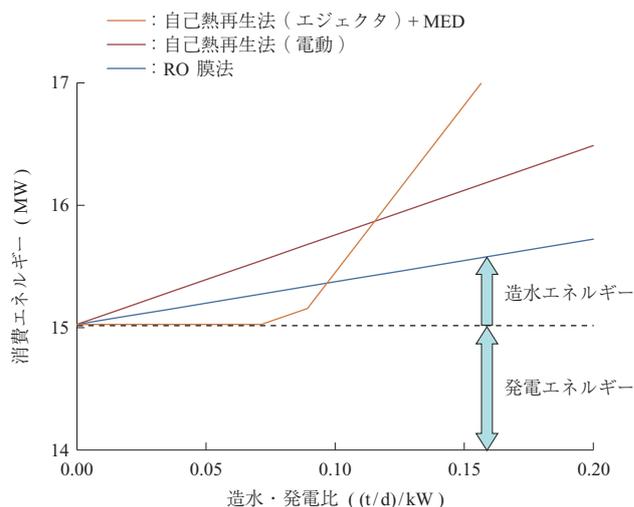
本方式は、従来の蒸発法と比較すると 50% 程度の省エネ化が可能であるとの試算結果がでた。しかし、RO 膜法と比べると消費エネルギーは 2 倍程度大きいことが分かった。

そこで、水蒸気の圧縮方式として、電動圧縮機ではなく、スチームエジェクタを用いた自己熱再生法の適用を検討した。スチームエジェクタとは、高压の駆動蒸気を供給して、低压蒸気を中圧蒸気に昇圧するものである。スチームエジェクタを用いた蒸発法自己熱再生海水淡水化プロセスの検討結果を第 9 図に示す。ここでは、高压駆動蒸気の供給源として、ディーゼルエンジンの排熱回収ボイラを想定した。また、熱バランス上、中圧蒸気が余るため、余った中圧蒸気は多重効用海水淡水化を併設して利用するプロセスとした。

このプロセスの消費エネルギーを試算した結果を第 10 図に示す。併せて、同じ電力および造水需要を想定し、造水方式を RO 膜法または電動圧縮自己熱再生法に変更した場合についても第 10 図に示す。RO 膜法または電動圧縮自己熱再生法を用いる場合は、ディーゼルエンジンの出



第 9 図 スチームエジェクタを用いた蒸発法自己熱再生海水淡水化プロセス
Fig. 9 SHR seawater desalination using a steam ejector



(注) 最小熱交換温度差 5℃で計算

第 10 図 海水淡水化プロセスのコスト比較

Fig. 10 Energy consumption comparisons between seawater desalination processes

力を上げて、余剰電力を使って造水すると想定した。所要電力消費エネルギーは、ディーゼルエンジンでの送電量を 5 800 kW で固定し、造水量を変化させたときに消費される燃料（軽油）の量を高位発熱量換算したものである。

造水量と発電量の比率によって消費されるエネルギー量が変わり、発電量に対して造水量が少ない場合には、RO 膜法よりも省エネになるとの試算結果が得られた。これは、ディーゼルエンジンの排熱で造水できる範囲では追加エネルギーが不要であるためである。造水量が多い場合は、蒸気発生に蒸気ボイラを運転する燃料が必要になるため、エネルギー消費量が大きくなる。

以上の検討から、運用条件によっては RO 膜法よりも省エネで造水できる可能性があることを示すことができた。ただし、冒頭で述べたような特性も含め、消費エネルギー、コスト、水の品質、取水条件、運用条件（発電との併設など）といった点を総合的に考慮したプロセス選定が必要である。

4. 結 言

本稿では、CO₂ 回収、汚泥乾燥、海水淡水化に自己熱再生法を適用した事例を検討した。いずれの例においても、自己熱再生法を適用することで、従来法と比べて省エネになる可能性が得られた。なお、ここで示した事例に限らず、加熱や蒸発を伴う多くのプロセスに自己熱再生法を適用することが可能であり、プロセスの実機化と合わせて多様なプロセスへの展開を検討していく。

— 謝 辞 —

自己熱再生法の技術指導および CO₂ 回収装置への適用に当たっては、東京大学堤敦司教授に多大なご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：エネルギー白書 2011 2011 年 10 月 p. 85 (オンライン) 入手先 <<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2011energyhtml/2-1-2.html>> (参照 2013-04-10)
- (2) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：「内部熱交換による省エネ蒸留技術開発」事後評価報告書 2006 年
- (3) J. Mitrovic : Heat Exchangers-Basics Design Applications InTech (2012. 3)
- (4) Y. Kansha, N. Tsuru, C. Fushimi and A. Tsutsumi :

- Integrated Process Module for Distillation Processes Based on Self-Heat Recuperation Technology
Journal of Chemical Engineering of Japan Vol. 43 No. 4 (2010. 7) pp. 502 - 507
- (5) Y. Kansha, N. Tsuru, C. Fushimi, K. Shimogawara and A. Tsutsumi : An Innovative Modularity of Heat Circulation for Fractional Distillation Chemical Engineering Science Vol. 65 No. 1 (2010. 1) pp. 330 - 334
 - (6) A. Kishimoto et al. : CO₂ Chemical Absorption Based on Self-Heat Recuperation Technology for Pre-Combustion Process Chemical Engineering Transactions Vol. 25 Spring Meeting and Global Congress on Process Safety (2011. 3)
 - (7) 伏見ほか：自己熱再生方式による革新的バイオマス乾燥技術の開発 SCEJ 75th Annual Meeting 2010 年