

伝熱面への固相付着を抑制する回転円筒式製塩技術

丸岡 伸洋

東北大学多元物質科学研究所

概要 製塩工程の濃縮、晶析、乾燥工程では水を蒸発させるために熱供給が必要である。しかしながら、晶析などの固相析出を伴う熱交換では、伝熱面に固相が付着し、強い伝熱抵抗を示すため効率的な熱交換は困難である。そのため、生産速度を確保するために過剰な高温熱を供給するが、適切な熱交換ができないため高温のまま排熱として放出する非効率操業をせざるを得ない点が問題である。著者らはこれまでに「固相生成制御型回転式熱交換器」を用いて、潜熱蓄熱の高速化および温泉熱の熱交換に取り組んできた。固相生成制御型熱交換器は、回転円筒を伝熱面とし、隣接する固定羽根で表面を常時更新する熱交換器で、高い伝熱性能を有する。製塩工程のような晶出を伴う系での熱交換速度、蒸発速度向上に有効と予想できるが、これまでに検討された例はない。そこで本研究では、溶液を入れた容器に固相生成制御型熱交換器を浸漬させ、容器下部より乾燥ガスを流通させることで溶液を蒸発させるシステムを提案し、その基礎知見を得るために溶液に水、乾燥ガスに窒素を用いた場合の蒸発速度を評価した。

実験では内径 96 mmφ の透明アクリル円筒水槽内に外径 60 mmφ および固定羽根 3 枚を有する回転式熱交換器を搭載した「回転円筒式製塩装置」を設計製作した。水槽に水を充填し、下部より窒素ガスを導入し、約 70°C の温熱供給を行った際の水の蒸発速度の計測および、吹き込みガスの分散挙動の観察を実施した。その結果、回転数増加に伴い気泡の上昇速度が低下し、滞留時間が増加することが明らかになった。さらに高回転域では気泡の微細化現象および上下方向の渦形成が観察された。低回転域では蒸発速度の回転数依存性は限定的であったが、高回転域では高速化することが明らかになった。引き続き蒸発速度向上にむけた支配因子の解明、構造の設計製作を実施する。本研究の成果により、100°C未満の低温熱源を用いた製塩の可能性が明らかになった。地熱や未利用熱などの化石燃料を用いない脱炭素型製塩が期待できる。

1. はじめに

製塩工程の濃縮、晶析、乾燥工程では水を蒸発させるために熱供給が必要である。しかしながら、晶析などの固相析出を伴う熱交換では、伝熱面に固相が付着し、強い伝熱抵抗を示すため効率的な熱交換は困難である。そのため、生産速度を確保するために過剰な高温熱を供給するが、適切な熱交換ができないため高温のまま排熱として放出する非効率操業をせざるを得ない点が問題である。著者らはこれまでに「固相生成制御型回転式熱交換器」^{1,2)}を用いて、潜熱蓄熱の高速化³⁾および温泉熱の熱交換⁴⁾に取り組んできた。固相生成制御型熱交換器は、

回転円筒を伝熱面とし、隣接する固定羽根で表面を常時更新する熱交換器で、高い伝熱性能を有する。製塩工程のような晶出を伴う系での熱交換速度、蒸発速度向上に有効と予想できるが、これまでに検討された例はない。そこで本研究では、溶液を入れた容器に固相生成制御型熱交換器を浸漬させ、容器下部より乾燥ガスを流通させることで溶液を蒸発させるシステムを提案し、その基礎知見をえるために溶液に水、乾燥ガスに窒素を用いた場合の蒸発速度を評価した。

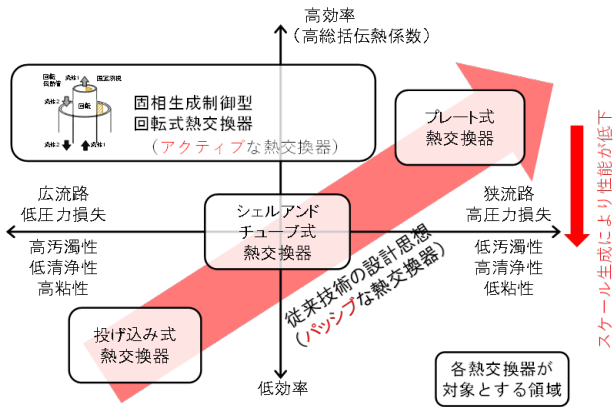


図 1 従来の熱交換器と固相生成制御型熱交換器の比較²⁾

2. 固相生成制御型熱交換器

まず、固相生成制御型熱交換器について概説する。一般に流通している熱交換器の比較を図 1 に示す^{5, 6)}。右上ほど単位面積当たりの伝熱性能 $[W/m^2K]$ が高く、かつ伝熱面積 $[m^2]$ が大きい高性能な熱交換器を示す。しかしながら、製塩プロセスでは伝熱面の塩の析出により伝熱性能が低下する。また、地熱・温泉熱利用では「スケール」⁵⁾、潜熱蓄熱では「凝固層」³⁾、排熱回収では「凝集堆積物」、化学プロセスでは「析出物」など、固相が伝熱面に生成する系では時間とともにその性能が低下してしまうため、選定・運用に制限が生じる。排水や温泉水との熱交換のように伝熱面に固相が生成するような非清浄環境で使用可能な熱交換器の開発により、熱エネルギーのさらなる高度利用が実現できる。

伝熱面の固相が伝熱を妨げる環境の場合、プレート式やシェルアンドチューブ式など従来型熱交換器は定期的な分解清掃・熱交換器の更新が必要でランニングコストが高くならざるを得ない。そのため伝熱面が汚れやすい系では性能こそ低いが清掃しやすい構造である投げ込み式熱交換器が選択されることが多い。したがって、連続使用可能なプロセス、さらに持続可能な社会創生のためには高性能、かつ低コスト(初期・運用)を実現する熱交換器が必要である。図 2 に示した従来の熱交換器と比較して、本研究で開発中の熱交換器は清浄性の低い環境下でも性能を維持できることから、本図の第 2 象限に位置する、これまでの適用範囲・設計思想が異なる熱交換器である。また、比較的太い直管型の熱交換器で熱媒流路が広い

構造のため圧損が低く、熱媒循環ポンプ動力の低減が期待出来る点も特徴の一つである。

一般的に流体の熱交換時には図 2 左に示すように伝熱面両端に境膜 (温度境界層) が存在し、伝熱を妨げることが知られている。この境膜を除去できれば、図 2 右に示すように 2 流体の温度差を有効に活かすことが可能になり、伝熱速度の向上が期待できる。その手法の一つとして、一関高専の千葉教授は境膜剥ぎ取り型熱交換器 (Double Film Robber heat exchange, DFR)⁷⁾ を提案している^{5, 6)}。この熱交換器は、伝熱面を円筒とし、その円筒伝熱管を回転させる。回転しない固定羽根を伝熱管の内外に近接配置し、固定羽根で回転伝熱管の表面を搔くことで、境膜を連続的に剥ぎ取る機構を持つ。水-水系の熱交換の場合、3000 rpm の回転付与により無回転と比較して伝熱性能が約 10 倍向上(総括伝熱係数が $10,000 W/m^2 K$ 以上)することが報告されている⁸⁾。この手法により管形熱交換器としては類を見ない伝熱性能を発現するが、プレート式熱交換器と比較し、総括伝熱係数 U は大きい、伝熱面積 A を拡大しにくい欠点を持つ。交換熱量 Q (伝熱速度) は次式で定義出来る。

$$Q = U A \Delta T \quad (1)$$

清浄環境下では A を大きく設定可能なプレート式熱交換器に軍配が上がる。一方、固相生成制御型熱交換器は伝熱面を機械的に連続更新するため、プレート式熱交換器では伝熱性能が時間とともに低下してしまう非清浄環境下において特に効果を発現する。例えば、「温泉熱回収」「ダスト含有排水」、「食品残渣」、藻類や貝類など「微生物が繁殖する環境」、析出物が生成する「反応系」、固液の相変態を伴う「潜熱蓄熱」¹⁾ など伝熱面に固相、堆積層が生成する様々な系での活躍が期待できる。

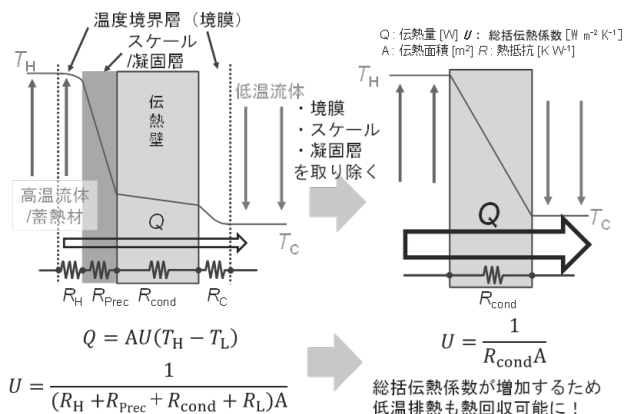


図 2 固相生成制御型熱交換器のコンセプト²⁾

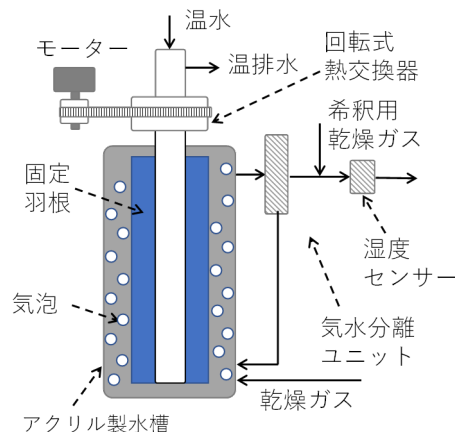


図 3 開発した固相生成制御型回転円筒式乾燥器

3. 固相生成制御型熱交換器を用いた製塩法

製塩プロセスは晶析を伴う熱供給プロセスである。常時伝熱面を更新可能な固相生成制御型熱交換器により以下の機能発現が期待できる。

- 1) 海水（希薄塩水溶液）の濃縮。
- 2) 晶出塩を含む濃縮海水の濃縮。
- 3) 回転力による乾燥用ガスの微細化，高速乾燥。
- 4) 伝熱面更新による高速かつ安定した熱供給。ドライアウトの抑制。
- 5) 強制沸騰を伴わない，低温（排）熱供給による濃縮・乾燥。

このなかで、特に5)は化石燃料を用いず排熱や温泉熱などの余剰熱による熱供給の可能性を示唆しており、脱炭素化社会の一助を担うと考えている。100°C以下の熱供給の場合は、水蒸気分圧分しか揮発しないため、乾燥空気を導入し、気液界面を効率良く形成する必要がある。固相生成制御型熱交換器は伝熱面が回転し、高回転時は強い剪断応力を有することから、気泡の微細化、分散化が期待出来る。本研究では、70°Cの温水を熱源として用いた場合の蒸発速度を調査した。

4. 実験方法

開発した固相生成制御型回転円筒式乾燥器を図 3 に示す。内径 96 mmφ の透明アクリル製円筒容器内に水を入れ、外径 60 mmφ の回転円筒および固定羽根 3 枚を有する固相生成制御型熱交換器を浸漬させた。熱交換器に 67°Cの温水を 1 L/min で流通させ、伝熱管を介して水槽内の水を加熱した。

水槽下部より乾燥ガスとして 1 L/min の窒素ガスを供給した。水槽内を気泡として上昇したガスは水から水蒸気および熱を受け取った後に、水槽上部より排出される。排出されたガスを気水分離ユニットで分離し、分離した水相は水槽に再循環させた。分離した気相は希釈用の乾燥窒素ガスを 3 L/min 混合することで管内結露を抑制した上で湿度センサーに導入し、ガス中の水分量を計測した。また、温水のおよび排出ガスの温度を計測するとともに、デジタルカメラで気泡分散の様子を記録した。

5. 実験結果

アクリル水槽内の気泡の上昇、分散の観察像を図 4 に示す。図中に回転円筒および固定羽根部分を図示した。本実験では 120 度刻みで 3 枚の固定羽根を設置しており、そのうちの 1 枚が本図では視認出来る。水槽下部より吹き込んだ N₂ ガスは気泡となり、水槽内を上昇した。伝熱管が無回転の場合は、気泡は左右に揺れながら上昇する、一般的な気泡上昇挙動を示した。100, 500, 1000 rpm の場合の気泡サイズは 0 rpm の時と概ね同一であるが、回転数増加にともない気泡の上昇速度は低下した。水槽からの排出される水の量も回転数増加にともない増加したことから、水槽内の気泡滞留時間が増加したと判断出来る。一方、2000 および 4000 rpm の時は明らかに気泡径が小さくなり、上下方向の渦が多数観察され、水槽中の気相分率が大幅に上昇している状態が観察できた。この傾向は高回転ほど顕著であった。

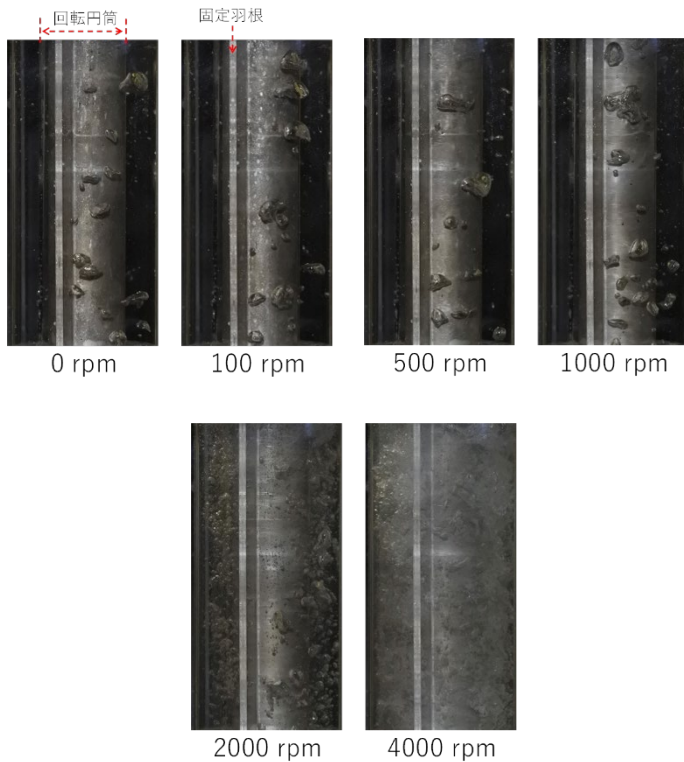


図 4 回転伝熱管による気泡分散

温水入口および出口温度、吹き込みガス出口温度の回転数依存性を図 5 に示す。熱交換器に供給された温水により水槽の水温は上昇する。高回転ほど熱交換器の総括伝熱係数は増加する(つまり熱交換器の性能が高くなる)ため、回転数増加に伴い排出ガス温度は高くなり、4000 rpm では温水の排出温度とほぼ同じ温度で排出された。

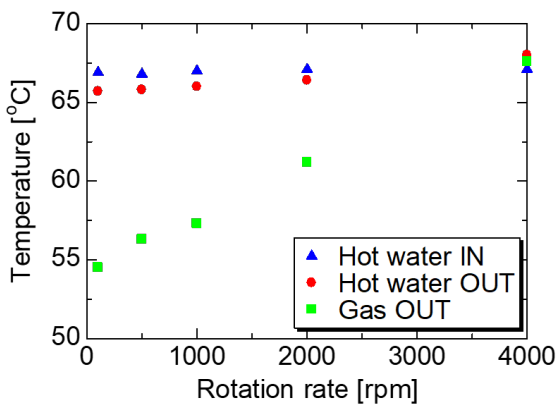


図 5 回転数の温度への影響

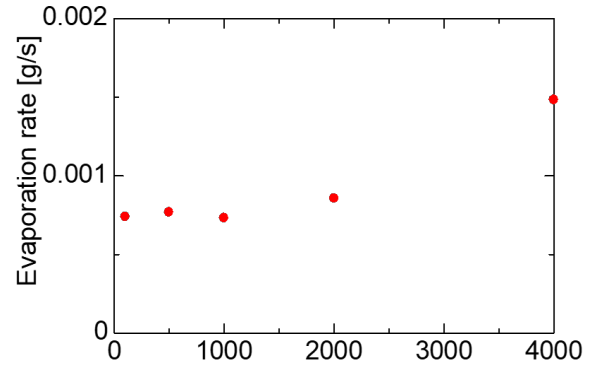


図 6 蒸発速度の回転数依存性

排出ガス中の水分量より算出した蒸発速度の回転数依存性を図 6 に示す。1000 rpm 以下は回転数の依存性は小さいが、2000 rpm 以上では回転数増加に伴い蒸発速度は増加する傾向を示した。これは図 4 に示した気泡の分散状態の結果に対応すると推察できる。したがって気泡の微細化、渦生成による滞留時間の増加が蒸発速度の増加に寄与すると予想できる。引き続き各種因子の蒸発速度に及ぼす影響を計測するとともに、蒸発速度増大に必要な機構の作り込みを実施する。

6. まとめ

回転式熱交換器を用いた蒸発器を開発し、実験的に蒸発速度を評価し、以下の知見を得た。

- 1) 伝熱管回転数増加にともない、気泡の滞留時間が増加した。
- 2) 伝熱管回転数が 2000 rpm 以上では気泡の微細化現象が確認された。
- 3) 伝熱管回転数の増加にともない、熱交換が促進され排出ガス温度が上昇した。
- 4) 伝熱管回転数が 1000 rpm 以下は蒸発速度への回転数の影響が限定的であったが、2000 rpm 以上では蒸発促進効果が確認できた。

7. 文献

- 1) 丸岡伸洋, 小野寿光, 遠藤聡, 相澤直信, 山本卓也, 佐々木裕, 高島正, 小山克博, and 前田圭一郎: Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, 28(2021), 215
- 2) 丸岡伸洋, 小野寿光, 遠藤聡, 山本卓也, 佐々木裕, 高島正, 小山克博, and 前田圭一郎, 伝熱面を機械的に更新する, 熱交換技術~温泉水, 汚濁排水,

- 潜熱蓄熱等の環境下における熱交換の性能低下を抑制可能～, in クリーンエネルギー. 2021, 日本工業出版. p. 22.
- 3) N. Maruoka, T. Tsutsumi, A. Ito, M. Hayasaka, and H. Nogami: *Energy*, 205(2020), 118055.10.1016/j.energy.2020.118055
 - 4) N. Maruoka, T. Yamamoto, S. Endo, T. Aizawa, T. Ono, H. Sasaki, and K. Oyama: *ISIJ Int.*, Submitted),
 - 5) 丸岡伸洋, 小野寿光, 山本卓也, 佐々木裕, 遠藤聡, 相澤直信, 高島正, 小山克博, 前田圭一郎, 今野政憲, 浦啓祐, and 伊藤伸広:
 - 6) 国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構イノベーション推進部, 固相生成制御型回転式高耐久・高速熱交換器の研究開発, in NEDO 先導研究プログラム 2019～2020. p. 52.
 - 7) 千葉陽一, 境膜剥ぎ取り熱交換器とそれを使用した熱交換方法. 2005: Japan.
 - 8) H. Nogami, K. Aonuma, and Y. Chiba: *ISIJ Int.*, 50(2010), 1276.10.2355/isijinternational.50.1276

Salt Manufacturing Technology Using Rotating Cylindrical Heat Exchanger by Preventing Solid-Phase Adhesion on the Heat Transfer Surface

Nobuhiro Maruoka

Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University

Summary

Heat supply is necessary to evaporate water during the salt manufacturing process's concentration, crystallization, and drying processes. However, in heat exchange involving solid-phase deposition such as crystallization, efficient heat exchange is difficult because the solid phase adheres to the heat transfer surface and exhibits strong heat transfer resistance. The problem is that the excess high-temperature heat is supplied to ensure the production rate, but the heat cannot be adequately exchanged, so the high-temperature gas is released as waste heat, resulting in inefficient operation. The authors have been developing the acceleration of heat exchange in latent heat storage systems and in hot springs by using a "rotating cylindrical heat exchanger by preventing solid-phase adhesion on the heat transfer surface" This heat exchanger is that in which the rotating cylinder is used as the heat-transfer wall and the surface is constantly renewed by the fixed blades attached to heat transfer wall, and has high heat-transfer performance. It is expected to effectively improve the heat transfer rate and evaporation rate in systems with crystallization, such as salt manufacturing processes. In this study, we proposed a system in which a rotating cylindrical heat exchanger by preventing solid-phase adhesion on the heat transfer surface is immersed in a vessel containing a solution and dry gas is injected from the bottom of the vessel to evaporate the solution.

In this experiment, we designed and lab-scale "rotating cylindrical salt manufacturing device" equipped with a rotating heat exchanger with an outer diameter of 60 mm ϕ and three fixed blades immersed in a transparent acrylic cylindrical water tank with an inner diameter of 96 mm ϕ . Water was filled into the tank, and nitrogen gas was introduced from the bottom to measure the evaporation rate of water and observe the dispersion behavior of the injected gas when the tank was heated by approximately 70°C heating medium. The results showed that the evaporation rate of water increased as the rotation rate of the heat transfer tube, and the rate of rising bubbles decreased and the residence time increased. In addition, at high rotation rates, the phenomenon of bubble split and the vertical vortices were observed. The dependence of the evaporation rate on the rotation rate was limited in the low rotation range, but it was found to increase in the high rotation range. We will continue to elucidate the controlling factors for improving the evaporation rate and to design and fabricate the structure. This research has revealed the possibility of salt production using a low-temperature heat source of less than 100°C. Decarbonized salt production without fossil fuels such as geothermal and unused heat can be expected.