

論文の内容の要旨

論文題目 自己熱再生を用いた革新的海水淡水化プロセスの開発

氏名 水野 寛之

1. 緒論

世界では水不足が深刻な問題となっており、海水淡水化が大きな注目を集めている。現在、海水淡水化で広く利用されているのは蒸発法と膜法である。

蒸発法は海水中の水分を蒸発させ、発生した蒸気を凝縮することで淡水を製造する。蒸発法のメリットとして、膜法と比べて前処理負荷が小さい点、製品(淡水)の塩分濃度が工業用水として利用できるほど低い点が挙げられる。一方、エネルギー消費量が膜法と比べて大きいので、その省エネルギー化が求められている。同時に、淡水製造後の残渣となる濃縮海水の排出による周辺海域への悪影響が懸念されており、濃縮海水が排出されない蒸発法が求められている。濃縮海水の排出をなくすためには、水分を完全に蒸発させる必要がある。しかしながら、エネルギー消費量が大きく、また海水中の塩類が伝熱面に析出する問題がある。

本論文では、省エネルギーで蒸発法のメリットを有し、かつ周辺海域への影響が小さい革新的な海水淡水化プロセスを実現するために、海水淡水化プロセスをスケールの析出が生じない領域まで海水を蒸発させる濃縮プロセスと、海水を塩と淡水に分ける乾燥プロセスに分割し、それぞれについて基礎的な研究を行う。さらにそれら二つのプロセスを組み合わせ、革新的な海水淡水化プロセスの開発を目標とする。

2. 省エネルギーな濃縮プロセスの開発

省エネルギーな濃縮プロセスを実現するために、自己熱再生に基づく蒸発法の提案を行った。自己熱再生とは、堤らによって提案された省エネルギー手法である。プロセス内で流体の熱をすべて循環再利用することで、大幅な省エネルギー化を実現する。

自己熱再生に基づく海水淡水化プロセスを構築するとともに、プロセスシミュレーターを用いて、構築したプロセスのエネルギー消費量を試算した。さらに、蒸発法として最も広く利用されている多段フラッシュ法とエネルギー消費量を比較し、提案したプロセスの省エネルギー性能について検討を行った。提案したプロセスでは、発生した蒸気を圧縮機で断熱圧縮することで、蒸気が昇温され、流体の持つすべての熱を循環することが可能となる (Fig. 1)。シミュレーションの結果、提案したプロセス、多段フラッシュ

ユ法それぞれの単位製品あたりのエネルギー消費量は $70 \text{ [kJ kg-water}^{-1}]$ 、 $325 \text{ [kJ kg-water}^{-1}]$ となり、多段フラッシュ法に比べて提案したプロセスでは単位製品あたりのエネルギー消費量を $1/4$ 以下まで削減できることを明らかにした。また、提案したプロセスでは、多段フラッシュ法と異なり、回収率（供給する海水のうち淡水として取り出す割合）が大きいほど単位製品あたりのエネルギー消費量がさらに減少することを明らかにした。現状の蒸発法では回収率を高くすると伝熱面にスケールが析出するので、回収率は $0.1 \sim 0.5 [-]$ 程度である。

3. 濃縮排水を処理するための乾燥プロセスの開発

濃縮海水を処理するための乾燥プロセスとして、一般に多重効用法により省エネルギー化を図った晶析装置が利用されている。しかしながら、依然、エネルギー消費量が大きい問題や、伝熱面にスケールが析出するなどの問題がある。近年、省エネルギーでバイオマスや褐炭の乾燥を行うために、自己熱再生に基づく流動層を利用した乾燥プロセスが提案されている。このプロセスでは、流体のすべての熱をプロセス内で循環させることで大幅な省エネルギー化を達成する。また、流動層を利用するので層から被加熱材料への良好な伝熱が期待される。さらに、流動層では加熱された流動粒子と被加熱材料が接触することで対象物が乾燥される。したがって、流動層蒸発器を海水淡水化に利用すると、海水の蒸発は加熱された流動粒子の表面で起こるので、伝熱管表面にスケールの析出が生じず、伝熱速度の低下を抑制できると考えられる。

本研究では省エネルギー、かつ伝熱面へのスケール析出を抑制することが可能な乾燥プロセスを構築するために、蒸発器に流動層の利用を考案した。

3.1. 流動層蒸発器を利用した乾燥プロセスの検討

流動層を海水の乾燥プロセスに利用することが可能であるか、同時に海水の蒸発が可能な場合、そのスケール抑制効果について検討するために、流動層蒸発器で海水蒸発実験を行った。さらに既存の乾燥プロセスにおいて、海水の蒸発に伴う伝熱面へのスケール析出を確認するために、ビーカーに海水を入れ、その中にヒーターを浸し、海水の蒸発実験を行った。実験の結果、流動層で海水の蒸発を行うことが可能であり、また伝熱面へのスケール析出はほとんど生じないことを確認した。一方、既存の蒸発法を模擬した海水蒸発実験では、伝熱面にスケールが析出することを確認した。これらの結果から、

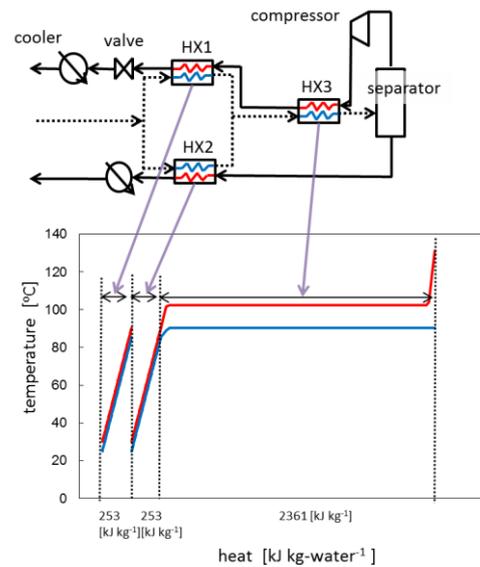


Fig. 1 Temperature and heat diagram of thermal process based on self-heat recuperation.

蒸発器に流動層を利用することで伝熱面へのスケール析出を抑制することが可能な新たな乾燥プロセスを実現できることを明らかにした。

3.2. 乾燥プロセスの安定した運転条件の明確化

流動層蒸発器を連続かつ安定的に運転することで、伝熱速度が低下しない省エネルギーな乾燥プロセスの実現が期待される。しかしながら、流動層に付着性物質が存在すると、流動粒子の凝集・堆積が生じ、最終的に層全体の流動化が停止する非流動化が発生する可能性がある。非流動化が生じると伝熱、蒸発速度が低下し、省エネルギーな乾燥プロセスを構築することが困難になる。実際、前述の実験では、流動層底部に凝集体が堆積することを確認した。そこで、非流動化が生じず、流動層蒸発器を連続、安定的に運転することが可能な条件を明らかにするために、凝集体の成長・堆積モデルの構築を行った。さらに、流動層で海水蒸発実験を行い構築したモデルの妥当性について検討を行った。また、このモデル、実験をもとに流動層蒸発器を安定的に運用できる条件の導出を行った。

凝集体の成長・堆積モデルを構築するために、流動層内の凝集体に働く力を分析し、液架橋力、固体架橋力、気泡の上昇によるせん断力の3力が支配的であることを明らかにした。そこで、この3力から凝集体の成長・堆積モデルを構築した。また、空塔速度、平均粒径、静止層高、海水供給速度、層内温度を変化させて実験を行い、実験結果と構築したモデルがよく一致することを確認し、構築したモデルの妥当性を示した。Fig. 2に構築したモデルの模式図を示す。液架橋力が気泡のせん断力よりも大きい場合、凝集体は破碎されず、層底部に堆積する。気泡のせん断力が液架橋力よりも大きいと、凝集体は破碎されるが、他の凝集体と接触することで成長し最終的に層底部に堆積する。以上の結果から、連続かつ安定的に運転することが可能な運転条件を明らかにした。

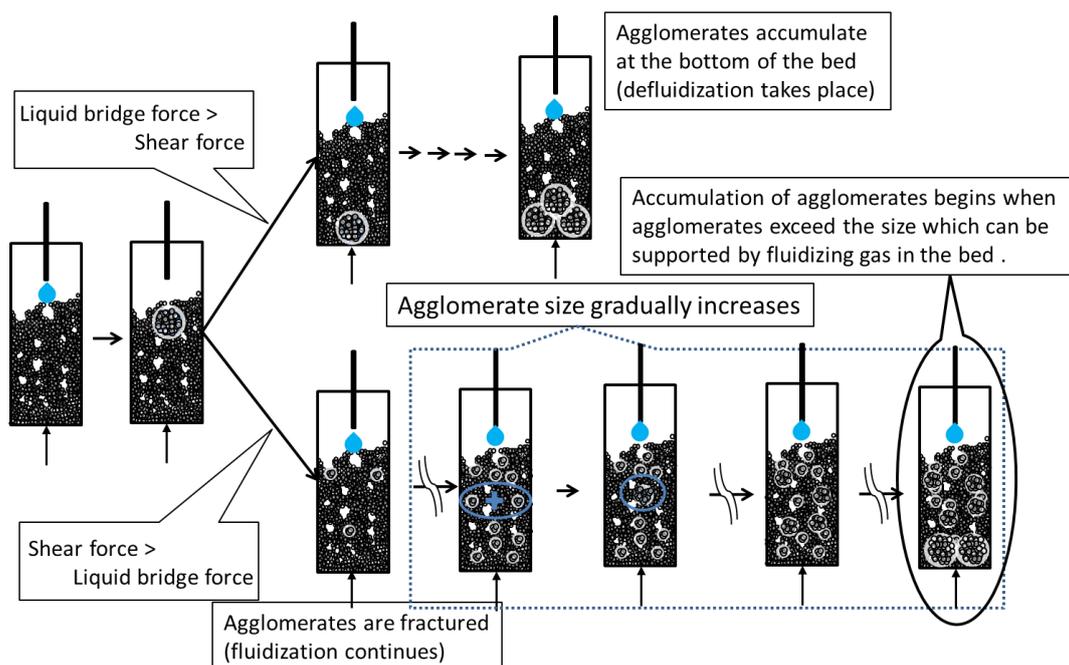


Fig. 2 Agglomerates growth and accumulation model.

3.3. 省エネルギーな乾燥プロセスの開発

乾燥プロセスの省エネルギー化を行うために、自己熱再生に基づく流動層を利用したプロセスを構築した。

Fig. 3 に流動化ガスとして過熱水蒸気を利用した自己熱再生に基づく乾燥プロセスのプロセスフロー図を示す。発生した蒸気を圧縮機で断熱圧縮し、流体の熱をプロセス内で循環させるとともに、過熱水蒸気の一部を流動化ガスとしてブローアで循環する。提案したプロセスの省エネルギー性を明らかにするために、従来技術に基づく乾燥プロセスとエネルギー消費量を比較した。シミュレーションの結果、提案したプロセスでは従来プロセスと比べて伝熱面へのスケール析出を抑制しながら 70%近くエネルギー消費量を削減できることを明らかにした。

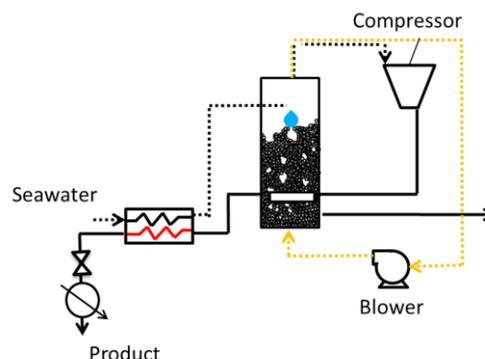


Fig. 3 Schematic configuration of self-heat recuperative seawater desalination process using fluidized bed (fluidizing gas: steam).

4. 省エネルギーで蒸発法のメリットを持ち排水が生じない海水淡水化プロセスの開発

省エネルギーで蒸発法のメリットを持ち排水が生じない海水淡水化プロセスを実現するために、自己熱再生に基づく濃縮プロセスと自己熱再生に基づく乾燥プロセスを組み合わせたプロセスを構築し、そのエネルギー消費量について検討した。さらにその結果を既存のプロセスと比較した。Fig. 4 に、自己熱再生に基づく濃縮プロセス、多段フラッシュ法、逆浸透膜法の回収率とエネルギー消費量の関係、また、自己熱再生に基づく乾燥プロセスと既存の乾燥プロセスのエネルギー消費量を示す。この図を用いて考察を行い、自己熱再生に基づく濃縮プロセスと自己熱再生に基づく乾燥プロセスを組み合わせたプロセスは、省エネルギーで蒸発法のメリットを有し、かつ周辺海域への影響が小さい革新的な海水淡水化プロセスを実現することが可能であることを明らかにした。

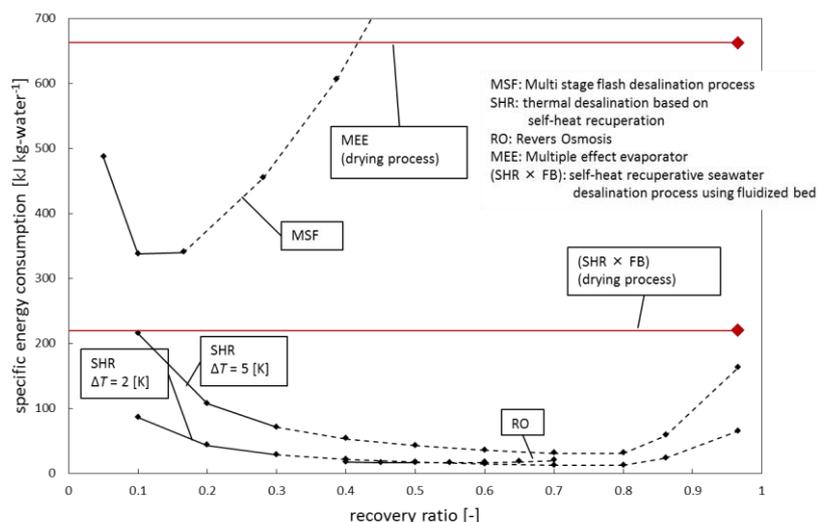


Fig. 4 Summary of energy consumption.