

| | |
|------|-------------------------------|
| 氏名 | 菅 薫 寂 樹 |
| 所属機関 | 東京大学 |
| 研究題目 | 流動層蒸発器におけるエクセルギー損失最小化のための基礎研究 |

1. 研究の目的

近年、社会の低炭素化・省エネルギー化が強く求められている。オイルショック以降、プラントの省エネルギー化を図る目的で熱回収技術などが提案されてきた。しかしながら、今後更なる省エネルギー化を行うためには、エネルギーを再度見直すことが重要視されている。その中で、実社会（標準状態）を基準に、あるエネルギーから私たちが取り出せ、利用できる最大の仕事量、エクセルギー（有効エネルギー）を用いることが提案されている。

助成対象者は、このエクセルギーによる評価を用いて、2009年にプロセス流体のもつ熱エクセルギーを再生し、プロセス外から熱を加えずプロセス内で再生した熱を循環再利用することで、プロセスのエネルギー消費を大幅に削減する自己熱再生技術を提案した。

自己熱再生技術によりプロセスを効率的に省エネルギー化するには、熱交換温度差を小さく、かつ、交換熱量を大きくするのが良いことが分かっている。そこで、伝熱係数が大きいこと、さらには原料液に含まれる固体分の析出を抑制する効果があると考えられる流動層を用い、自己熱再生を利用して、プロセス流体自身の熱を交換することで省エネルギーとなる蒸発器を提案した。実際に、流動層蒸発器においては、熱のエクセルギー損失は小さくなることがわかっているが、層内の粒子を流動化するための流動化ガスが必要となること、層内粒子の量を増やすことで伝熱は良くなるが、粒子の重量が圧力として層の底部にかかることが知られている。

そこで、本研究では、熱と圧力のエクセルギー損失をともに考慮し、流動層蒸発器のさらなる省エネルギー化のための基礎研究を行い、エクセルギーに基づく流動層蒸発器の設計手法の確立を目指す

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

流動層蒸発器における熱交換は、他の熱交換手法にくらべ熱のエクセルギー損失が小さくなることがわかっている。しかしながら、層内の粒子を流動化するための、流動化ガスが必要となること、層内粒子の量を増やすことで伝熱は良くなるが、粒子の重量が圧力として層の底部にかかることが知られている。これら二つの理由から圧力損失が大きくなる。つまり、熱のエクセルギー損失を小さくするかわりに圧力のエクセルギー損失が増大したといえる。さらには、蒸発が流動媒体表面で起こること、また、流動媒体が層内を動くことで、原料流体に含まれる固体成分の析出が伝熱管表面でおこらず清浄であり、ファウリングが起こりにくくなるということが分かっている。そのため、高い伝熱能力を維持するために、圧力のエクセルギー損失が大きくなったといえる。

これらの現象を確認するために、実際に流動層蒸発器(図1)を設計し、その伝熱特性と流動媒体の状態について調べた。このとき、流動化ガスとして空気を流動媒体としてガラスビーズを用いている。層内温度は140℃となるように運転している。

本流動層の特徴として、最小流動化ガス速度は0.0821 m/sである。流動層では、ガラスビーズの量を大きくし、層高を高くすることで、層内の圧力損失は大きくなるが最小流動化ガス速度は変化しない。

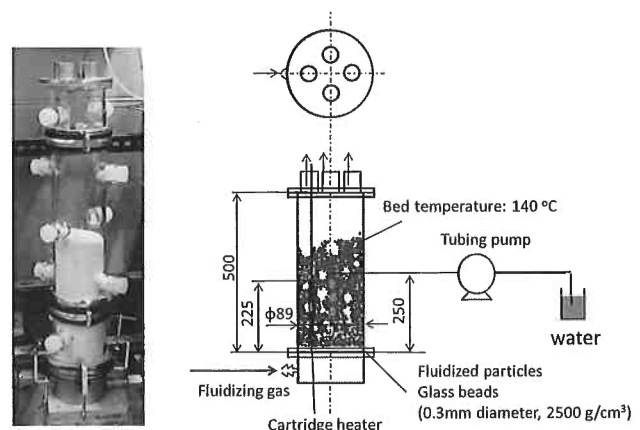


図1. 流動層蒸発実験装置

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

実験とシミュレーションによるエクセルギー損失の計測

圧力損失により失われた動力量が、圧力によるエクセルギー損失に相当することから、実験より圧力損失を導出し、定常的に流動化を行うために必要となるブロー動力を算出すると6.2Wであった。

この値をシミュレーションに導入し、全体のエネルギー消費量を計算した。このとき、蒸発させる水の30%は自己熱再生の濃縮器で、残りの70%を提案する流動層蒸発装置に導入した場合、水の蒸発量に対し、300 kJ/kgのエネルギーが必要となる。このエネルギー消費量に占めるブロー動力は1.1%程度と非常に小さい。

本装置において、伝熱のエクセルギー損失は、シミュレーション結果から圧力のエクセルギー損失であるブロー動力の50倍程度と計算される。圧力損失から熱交換を行う際の伝熱速度が向上したと考えられるが、ヒーター内部の温度を計測できていないこと、装置サイズの変更が難しいことから、ブロー動力と伝熱速度の関係に関しては、さらなる実験を行い今後導出したいと考えている。

流動層内における凝集体の形成

流動化ガス速度を0.13m/sとした流動層蒸発実験装置内へ蒸留水を供給した場合と塩類を溶解させた模擬海水を供給した場合の圧力損失と時間の変化を図2、3に示す。二つの図を比べると分かるように、図2においては、圧力損失はほぼ一定となっているのに対し、図3においては圧力損失が減少していることがわかる。これは、供給した水と流動媒体であるガラスビーズが凝集体を形成し、その凝集体が流動層底部にたまり、その部分において非流動化がおこっていることに起因している。

粘性流体においては、非流動化が起こることは容易に予想され、本システムには不向きである。しかしながら、塩類を溶解させた粘性係数が低い模擬海水においても条件次第では、非流動化が起こることを確認した。非流動化を引き起こすと、流動層を用いても、効率良く熱を伝熱することができず、結果として装置全体のエネルギー消費量の増大を招くことから、種々の実験により凝集体の形成及びその成長メカニズムの解析を行った。

その結果、蒸留水を原料流体として供給した場合においても初期に液架橋力により凝集体を形成しているが、水の蒸発に伴い凝集しなくなる。しかしながら、模擬海水を原料流体として供給した場合においては、溶解している塩類による固体架橋力により凝集体として層内に存在し、ある一定以上の大きさのものはそのまま底部にたまり非流動化現象を引き起こすことが分かった。

これらの結果から、本装置を省エネルギーの観点から最適に運転するには、熱のエクセルギー損失と圧力のエクセルギー損失のトレードオフが重要なパラメータとなるが、それ以外にも原料内に含まれる物質のふるまいを考慮に入れた運転システムの構築が必要であることが分かった。

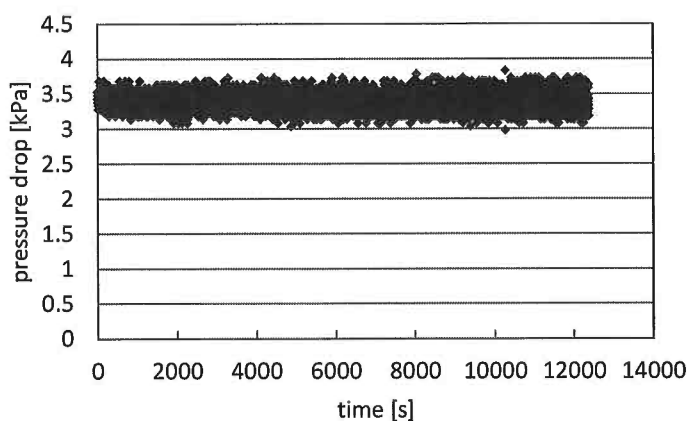


図2. 圧力損失と供給時間 (蒸留水)

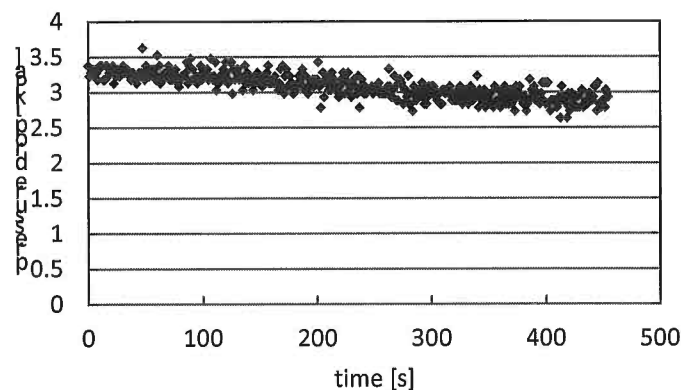


図3. 圧力損失と供給時間 (模擬海水)

3. 研究の結論、今後の課題

これまでの実験とシミュレーションから、伝熱のエクセルギー損失に比べ、圧力のエクセルギー損失は小さいことがわかった。この結果をそのまま導入すると圧力のエクセルギー損失を増やすことで伝熱のエクセルギー損失を大幅に削減できることになるが、流動層を用いることによる伝熱速度の促進効果と伝熱のエクセルギー損失の削減効果には限りがある。そのため、実験装置を改良して本研究を継続し、伝熱速度の促進効果を定量的に測定することで、さらに詳細なプロセスと運転システムの設計が可能となる。

また、今回の研究を通して、原料流体によっては蒸発が流動媒体表面で起こること、流動媒体が層内を動くことで、原料流体に含まれる固体成分の析出が伝熱管表面でおこらず清浄を維持すること、粘性により非流動化を起こすことの確認がなされた。さらには流動層内にて流動媒体と水により凝集体を形成し状況に応じてその凝集体が非流動化を引き起こすこと、凝集体を破碎するためにも圧力のエクセルギーが使われていることが明確となった。今後、さらに詳細な凝集および破碎メカニズムを解析することができれば、本研究において得られた成果はエクセルギーによる流動層蒸発器の設計手法の確立のみならず、流動層を用いた食品の製造や、汚泥の乾燥、海水淡水化、さらには石油精製や石油化学で用いられる流動接触分解装置の基礎データとして利用可能と予想される。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

本研究は濃縮・脱水プラント用の流動層を用いた蒸発器のエクセルギーに基づく最適設計を対象としている。そのため、本研究の成果は海水淡水化や製薬・製剤業における濃縮・脱水プロセスだけではなく、排水処理施設などすべての水処理施設に適応できれば、水を社会全体で循環することができ、水問題の根本的な解決につながると考えている。

また、ここで得られる結果は、副次的ではあるが、食品の製造への適用可能性がある。さらには、汚泥の乾燥や重質油処理といったエネルギー分野にも適用できる可能性があり、省エネルギーにエネルギーを創出する(エネルギーを高効率に転換する)ことで、持続可能な社会へと変容する鍵となると考えている。

4. 2. 学術的価値

本研究成果は、工学分野の中でも、物理化学、プロセスシステム工学、流体工学といった広い分野をカバーしている。特に、プロセスのエクセルギー解析はこれまでも行われてきたが、エクセルギーに基づいてプロセスを設計するという考え方は申請者らが提唱したのがはじめてといえる。さらには、ここで得られる結果によっては、理論検討である物理化学を直接的に産業分野に利用する新規の工学分野が生まれる可能性もあると考えている。例えば、従来のプロセス設計は、通常、製品を生成する反応器、その後、未反応物のリサイクルや、製品の精製のための分離器を先に設計し、その後、各流れの最適化を行ってきた。しかし、申請者は最適化の観点からプロセスを設計し、そのための反応器・分離器を設計するプロセスシステムオリエンティッドなプロセス設計を提唱したいと考えている。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

1. Mizuno, H., Kansha, Y., Ishizuka, M., Tsutsumi, A., A Novel Thermal Desalination Process Using Fluidized Bed, Chemical Engineering Transactions, 39, 181-186, 2014
2. Mizuno, H., Kansha, Y., Ishizuka, M., Tsutsumi, A., Agglomeration behavior in fluidized-bed evaporator for thermal seawater desalination, Applied Thermal Engineering, in press
(DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.011)

その他、国際学会にて3件、国内学会にて2件の成果発表を行った。また、本研究関連の内容で2件の招待講演を行った。