### 未利用熱・再エネ利用に資するスケーリング抑制型熱交換器の開発

東北大学 多元物質科学研究所 丸岡 伸洋

### 1. 緒言

脱炭素社会の実現には、各種プロセスの高効率化、エネルギーカスケード利用による未 利用熱の有効利用などのエネルギーの高度利用技術の開発が必要である。鉄鋼排熱をはじ めとする未利用熱や、再エネの一種である温泉熱の利用には高効率な採熱方法が重要であ るが、無機物(スケール、スラッジ、湯の花など)や、有機物(バイオフィルム、貝類、 藻類など)などの固相が伝熱面を覆うことで時間とともに伝熱性能が低下する問題を抱え ている。この問題を解決するため研究者らは、「スケーリング抑制型熱交換器」の研究開発 を実施してきた<sup>16</sup>。図1に構造の概略図を示す。管形の熱交換器で、内側の伝熱管を回転 させ、回転伝熱管内外に隣接する固定羽根で伝熱面を掻くことで伝熱面に生成する固相を

除去する構造を持つ。その性能向上のメカ ニズムを図2に示す。伝熱面両端に存在す る温度境界層および伝熱面に生成したス ケール(固相)を図1の機構により除去す る(スケーリングを抑制)ことで伝熱の抵 抗を取り除き、伝熱性能を向上させる。管 型熱交換器の場合、伝熱性能の指標である 総括伝熱係数 U[W/m<sup>2</sup>K] は伝熱面への 固相生成のない清浄環境で 1.000~2.000 程度、固相生成がある環境では数十〜数百 程度と低値であるが、スケーリング抑制に より U は数千以上に向上する。なお、清 浄環境下で利用可能なプレート式熱交換 器は U は数千と高値であるが、汚濁環境 下では著しく低下する。 U の向上は熱回 収量の増加、熱交換器の小型化にともなう



図1 スケーリング抑制型 回転式熱交換器

初期コストの削減、伝熱面の固相除去はランニングコスト削減につながるため、温暖化対策防止技術の社会実装に重要である。



図2 伝熱性能向上のメカニズム

熱交換器はすでに多くの研究開発がなされており、社会実装もされている。他の熱交換 器との比較を図3に示す。清浄な環境では性能が高く、伝熱面積が大きいプレート式熱交



図3 各種熱交換器との比較

換器が良く使用される。プレート型が使用出来ない汚れ環境下ではシェルアンドチューブ 式(多管式)熱交換器や投げこみ式熱交換器が用いられる。従来の熱交換器と比較して、 本研究で開発中のスケーリング抑制型回転式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、図3の第2象限での活用が期待できる。これまでの適用範囲・設計思 想が異なる熱交換器で、使用場所の探索、適用プロセス毎の設計、技術開発などが必要で ある。また、他の熱交換器と比較して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。

開発中の熱交換器は、現状でも既存の熱交換器と比較して高性能な値を発現している。 しかしながら、図2の理論に基づき、温度境界層およびスケール層の厚み =0 とした場合 の U の理論最大値は、Al 材 肉厚 3 mm の場合 Umax = 10 万 W/m<sup>2</sup>K と非常に大きな値 を示し、まだまだ高性能化できる余地があることが示唆される。理論最大値との大きな乖 離の一因として、回転力による伝熱管内外の流れが影響すると予想しており、本研究では、 回転式熱交換器内側の流れ場を計測し、回転式熱交換器の開発の指針を得ることを目的と した。また、社会実装に必要な課題を抽出するため実操業環境下における長期の熱交換試 験を実施した。具体的には

1) 粒子画像流速計 (PIV) による回転円筒の流れ場計測装置の開発

2) 回転円筒内部の流れの定量化

3) 実環境での長期間熱交換試験時の課題抽出

を実施した。

# 2. PIV による流動計測実験

#### 2.1. 実験装置および手順

2 次元 3 成分粒子画像流速計測法(2D3C-PIV)を用いて回転円筒内の流速分布を計測 した。開発した流動測定用の可視化装置の外観および断面図を図4および図5に示す。回 転する円筒の内外に流体の流通可能な構造を持つ。円筒内部の観察が可能なように円筒を 透明アクリル(内径46mm  $\phi$ )で製作し、円筒内の光学的歪みを補正するため、水を満たし た矩形のアクリル容器内に浸漬させた。この回転円筒に10 µmのトレーサー粒子(蛍光粒 子)を分散させた水道水を流通させ、外側よりシート状レーザーを照射することで内部の 流れを可視化した。2 台の高速度カメラでレーザー励起された粒子像群を一定時間間隔で 撮影し、画像解析することで回転円筒内部の流速分布を求めた。



図4 流動測定用の可視化装置の概略図



図5 流動測定用の断面図

## 2.2. 結果と考察

実験装置の外観写真を図6に示す。シート状のグリーンレーザーを回転円筒に水平照射 することで、円筒内に分散したトレーサー粒子がレーザーシート面で励起発光し、円筒内 部の流れを可視化できるようになる。この粒子群を高速度カメラを用いて一定時間毎に撮 影した。



図6 計測装置の外観写真

撮影した粒子群像および画像処理の過程を図7に示す。本システムでは2台のカメラで 斜め方向から撮影するため図71段目の写真のように楕円形の像が2枚得られる。キャリ ブレーション用のプレートを同アングルで撮影し、画像処理(逆投影処理)することで図 72段目に示す円筒断面の投影像に変換する。高速度カメラで撮影した粒子群像は微小時 間(1/50~1/10000秒)経過後、若干移動する。この粒子群の移動距離から移動速度を求 めることで図73段目の速度ベクトル図が得られる。最後に左右の速度ベクトルを解析す ることで、図74段目の3次元成分(u,v,w)の速度ベクトルが得られる。円筒内に1L/min のトレーサーを分散させた水道水を流通させ、上述の手法を用いて円筒の回転数、羽根の 有無が内部流動におよぼす影響を調査した。



図7 流速分布の導出方法

回転円筒内部に羽根のない条件(内羽根:0枚)の計測結果を図8~図10に示す。円筒の右上90°分の領域のみの解析結果を示している。図8は50rpmで円筒を回転させた時

の uv 成分のベクトル図を示す。回転円筒近傍の速度が最も早く、円筒中心に近づくにつ れて速度が減衰していくことが確認出来た。図8に示した速度の等高線によると速度分布 は半径方向に一定間隔で変化しており、径方向距離によらず角速度は同一であることを示 している。つまり、円筒内部には流体(水)があるにもかかわらず、あたかも固体柱が回 転しているかのような、剛体流れを形成することが明らかになった。



図8 回転円筒内の速度分布の解析結果 (0 枚羽根)

図9に径方向の速度分布の回転数依存性を示す。中心のuv成分の流速は0で、外周部のuv成分の流速は円筒の回転速度に一致し、高回転ほど大きな値を持つ。回転数が50,100rpmの場合は直線関係が得られ、図8と同様、径方向に均等な速度分布を持つことが分かる。一方、200,400rpmでは直線関係は確認できず、円筒内部に均等な速度分布が形成されていないことが明らかになった。軸方向(w)の速度分布を図10に示す。無回転(0rpm)の場合は、本実験計では流れ場の発達が不十分であるものの、ハーゲン・ポアズイユ流れを示す、放物線形状の速度分布が確認出来た。回転数増加にともない、明らかに円筒中心の軸方向速度が加速した。一方、円筒近傍の軸方向速度は低下し、条件によっては負の値を示すことから逆向きに流れていることが明らかになった。なお、速度分布から算出した平均速度は円筒への供給水量(1L/min)とほぼ一致したことから妥当な値であると判断出来る。これらの結果は、円筒内に羽根がない条件では流れが円筒中心に集中することを意味している。伝熱速度試験の結果によると、伝熱管内に羽根を設置しない条件下では、回転上昇にともない伝熱性能はいったん低下し、その後なだらかに増加する傾向が得られており、本研究の結果と一致する。



図10 w成分の流速分布 (0枚羽根)

次に円筒内に羽根設置時(90°間隔、4枚)のuv成分ベクトル図を図11に示す。円筒 は反時計回りに回転しており、円筒の回転により円筒付近の流速が加速する様子が確認で きた。円筒近傍の流れは、①内羽根を通過することで概ね速度=0になり、その後円筒の回 転により加速し、②内羽根に到達することで円筒中心方向に急激に変化する。円筒中心方 向への流れはゆるやかに円筒外周の流れに合流し、③内羽根-内羽根の間の領域で循環する 流れ場を形成することが明らかになった。



図 11 円筒内部の流れ(4 枚羽根、100 rpm)

図 8~図 10 に示した内羽根が 0 枚の場合は、円筒近傍と円筒中心部の間の流体の移動 がほとんど無いが、図 11 に示した内羽根を設置した条件では回転円筒近傍の流体が内羽 根により剥ぎ取られ、円筒内側に供給され、循環することが明らかになった。この機能は 熱交換の高速化に重要で、引き続き詳細な検討を実施予定である。

#### 3. 長期熱交換試験

スケーリング抑制型熱交換器は回転をともなうことから伝熱管上下端に軸受け、流通し ている熱媒が漏れないように軸封を設置している。伝熱管の内側および外側に設置した固 定羽根を伝熱管に摺接させることで伝熱管表面の清浄性を保つ。これまでに長崎県雲仙市 の小浜温泉で1ヶ月間の温泉熱回収試験を実施し、カルシア・シリカ系のスケーリング抑 制効果を確かめた<sup>7</sup>。本研究では、軸受けや軸封などの回転機構や固定羽根などの長期運 転時における課題抽出のため、宮城県大崎市鳴子温泉川渡地区においてバイオマスボイラ の温熱( $60 \sim 80^{\circ}$ )により冷泉(約15°C)を加熱する試験を実施した。そこでは熱交換器 を温泉供給設備(協力:株式会社ウエスタ・CHP)の一部として設置し、1年間の実証試 験を実施した。その成果は下記の通りである。

- ・ 熱交換(加熱)に伴い、冷泉からは泥状の鉄系スケール(茶色)が生成した。
- ・ スケーリング抑制型熱交換器熱交換器により伝熱面からスケールを除去すること

で、冷泉の連続加熱に成功し、1年間の運転を実施した。

- ・ 温泉を供給するプロセスに回転式熱交換器を組み込むことで、実プロセスでの運用
   に必要な要件を明らかにした。
- ・ 1年間の試験期間中には上部の軸受け、軸封に異常は見られなかった。
- 下部軸受けのハウジングに振れが生じ、適切な材料に変更した。
- ・ 数種類の外羽根を試行し、最適な羽根材質、形状を選定した。
- ・ 1年間の実施により灯油 6000 L 相当の熱供給に成功した。

引き続き加熱試験を継続予定である。

# 4. まとめ

- スケーリング制御型熱交換器の高性能化のため、流れ場を計測可能な透明アクリル 製の回転円筒可視化モデル装置を開発した。
- 2) 2次元3成分粒子画像流速計測法(2D3C-PIV)を用いて回転円筒内部の流動を計測 し、各種因子が流動におよぼす影響を明らかにした。
- 3) 1年間の温泉加熱試験を実施し、長期運用のために必要な知見を得た。

### 謝辞

本研究は、(公財) JFE21 世紀財団 2021 年度技術研究助成の支援のもとで行った。また温泉熱交換試験は株式会社ウエスタ・CHP の協力のもと実施した。ここに感謝の意を表する。

# References

- <u>N. Maruoka</u>, T. Tsutsumi, T. Kanai, and H. Nogami: 'High Performance latent heat storage system by scraping solidified PCM layer', 3rd Japanese-German Workshop on Renewable Energies (JGW 2018), Tokyo, Japan, 2018.10.17-19, 2018, 2-14.
- <u>N. Maruoka</u>, A. Ito, M. Hayasaka, and H. Nogami: 'Acceleration of Heat Storage Rate in Latent Heat Storage Bath by Rotating Heat Transfer Tube', The Fifth International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems (IMPRES2019), Kanazawa, Japan, 2019.10.20-23, 2019.
- 3. <u>丸岡伸洋</u>, 埜上洋, 伊藤昭久, and 堤太一: '潜熱蓄熱装置', 日本, 2019.12.20, 2019.
- <u>N. Maruoka</u>, T. Tsutsumi, A. Ito, M. Hayasaka, and H. Nogami:
  "Heat release characteristics of a latent heat storage heat exchanger by scraping the solidified phase change material layer",

*Energy*, 2020, **205**, 118055.

- 5. <u>丸岡伸洋</u>,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', 22-28; 2021,日本工業出版.
- 6. <u>丸岡伸洋</u>,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:
   "回転円筒による高効率熱交換技術 伝熱面への無機マテリアル生成による伝熱性 能低下を抑制-",

Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, 2021, 28(28), 215-218.

N. Maruoka, T. Yamamoto, S. Endo, T. Aizawa, T. Ono, H. Sasaki, K. Ura, N. Ito, K. Oyama, and K. Maeda: 'Long-term experiment of hot spring heat recovery using a rotary heat exchanger by controlling precipitation', The First Symposium on Carbon Ultimate Utilization Technologies for the Global Environment, CUUTE-1, Nara, Japan, 2021.12.14-17, 2021, Iron and Steel Institute of Japan, 140-141.