

多管式熱交換器における管側伝熱促進素子“hiTRAN”の役割 (その4)抽出液予熱工程の低温汚れ解析とhiTRANの逆効果

渡部 高司* 駒田 信二** 酒井 昭二***

1. はじめに

前報¹⁾では典型的な化学反応汚れの場合のhiTRANの効果について述べたが、今回は結果として低温側に閾値のあると思われる新しい種類の汚れ現象について報告する。前報¹⁾の熱交換器のDuty(熱交換量)は0.37MegaWattsで、大きさもφ400mm×6mと小型で、2台の交互運転で、分解掃除のスペースも小さく作業負担も軽いものであったが、本報のそれはDutyが4.2MegaWattsで、φ1000mm×5mのサイズに8つの熱交換器が直列に繋がった大規模なものである。

結論を先に述べると、この熱交換器群の汚れは、低温側に発生し、hiTRANの高温側への挿入は、汚れの速度を大きくする逆効果をもたらし、化学反応汚れとは逆の低温側に閾値を持っていることを確認した。この汚れを低減するための解析と最適なhiTRAN適用について次報と2回に分けて報告したい。

2. アロマ回収プロセス

図1の概略プロセスフローのとおり、Cガスに含まれている有用成分(アロマ)を低温の油(オイル)で抽出し、回収するプロセスである。

吸収塔で有用成分Aを吸収した含Aオイルは回収塔においてA成分と脱Aオイルに分離されるが、回収塔底部の高温脱Aオイルで回収塔に供給する含Aオイルを予熱するプロセスである。回収塔のボトム温度は約180℃で、熱回収量が多い程、後工程にある加熱炉の燃料原単位が良くなるというプロセスである。高温の

脱AオイルはO/O熱交と海水熱交を経てタンクに戻ってゆく。低温の含Aオイルは、まずV/O熱交で、回収塔から出るA成分の蒸気を冷却した後、O/O熱交で熱を受けたのち、さらに加熱炉で加熱されて、回収塔に導入される。

3. hiTRANのテスト導入

3-1. No.3熱交へのhiTRAN挿入テスト

O/O熱交は図2のように8連で構成されており、熱交2連のNo.1からNo.4ユニット毎に出入口温度が測定できるようになっている。このデータからU値が管理されており、このU値の低下を観測することで、数カ月毎に行う汚れ洗浄のタイミングを決定している。洗浄方法は化学洗浄(ケミカルクリーニング)が基本である。低温の含AオイルはShell側、高温の脱AオイルはTube側で、その流量は90ton/hrである。

hiTRANの伝熱促進効果をテストするため、まずは1つのユニットでテストを開始することとなった。圧力損失を考慮して、hiTRANの密度は低密度、挿入位置は化学反応汚れを想定して高温側のNo.3ユ

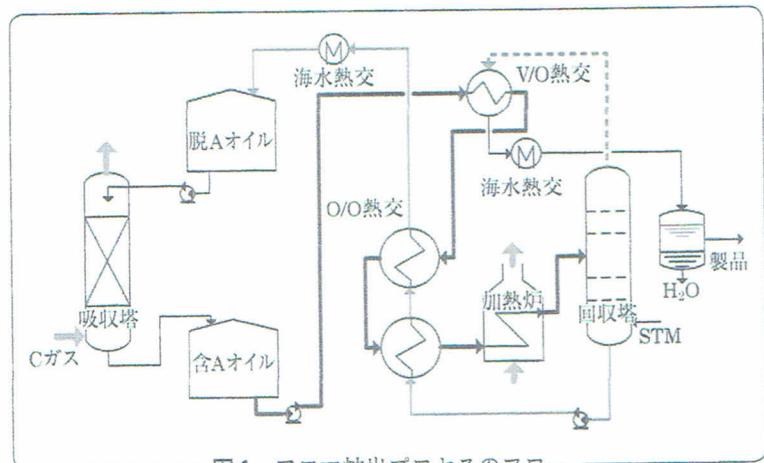


図1 アロマ抽出プロセスのフロー

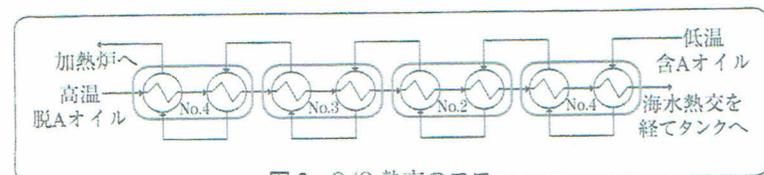


図2 O/O熱交のフロー

* aPEC 株式会社 代表

E-mail: watanabe@a-pec.jp

** 同社 技術部長

E-mail: komada@a-pec.jp

*** 株式会社エプシロン 研究員

E-mail: sakai.shoji@epsilon-global.com

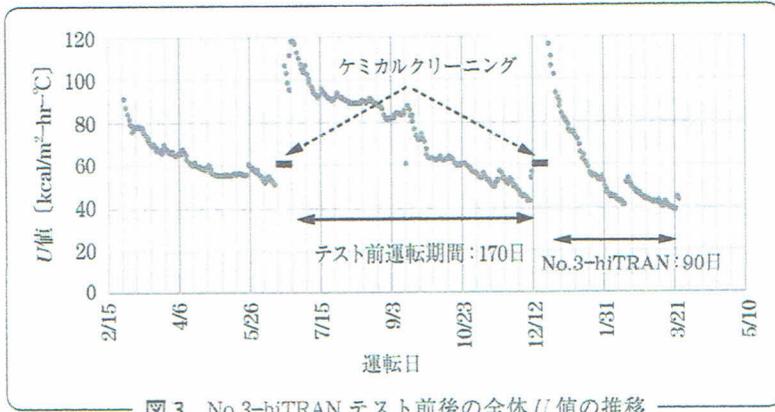


図3 No.3-hiTRANテスト前後の全体U値の推移

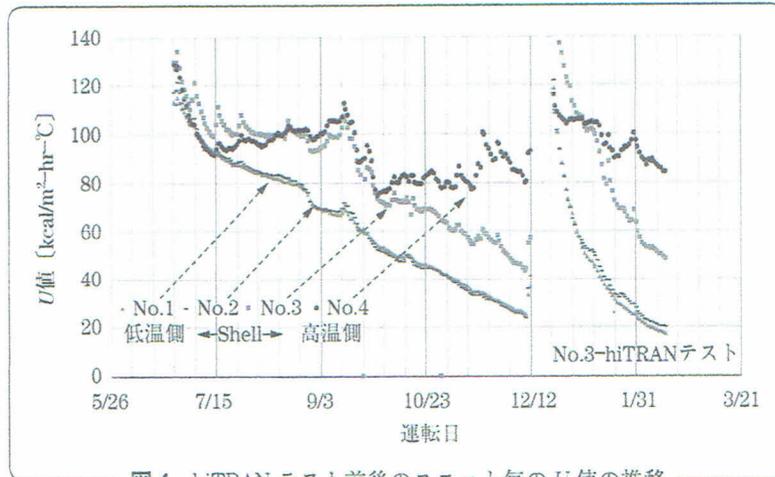


図4 hiTRANテスト前後のユニット毎のU値の推移

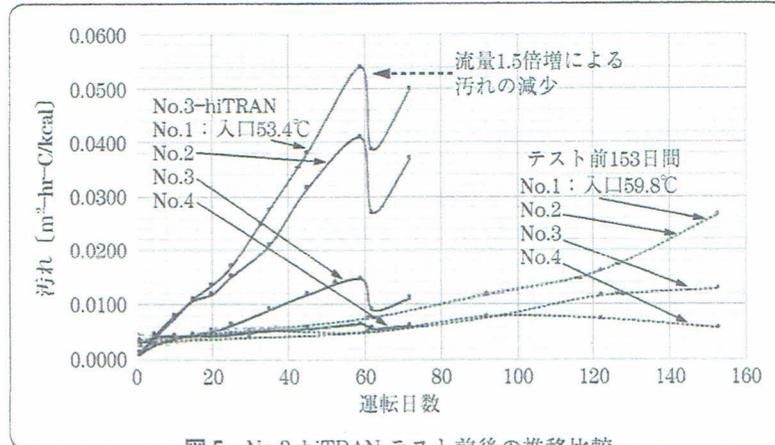


図5 No.3-hiTRANテスト前後の推移比較

ニットと決定した。

3-2. 運転結果とその解析

図3に示したNo.3-hiTRAN挿入テスト前後の運転のO/O熱交全体U値の推移から判るように、ケミカルクリーニング後、No.3ユニットのみにhiTRANを挿入したテストの汚れによる全体U値の速度低下は、挿入しない通常運転のそれよりも明らかに大きい。

さらにこの現象を熱交No.1~No.4ユニット毎に計算したU値の結果を図4に示した。この図からもNo.3-hiTRANテスト後のU値の速度低下が大きな

っていることが明らかである。

ユニット毎に見るとShell側が低温の含AオイルであるNo.1とNo.2のU値の低下挙動は、ほぼ同じであり、高温側のNo.3とNo.4も同じように大きなU値の低下は途中までないが、低温側U値が60以下になるとNo.4の方がNo.3よりもU値が大きくなっている。そしてNo.3-hiTRANテストでは明らかに低温側U値の低下が加速されている分、No.3とNo.4のU値の交点出現も早くなっているが、高温側と低温側の挙動は同じように推移している。

このように、汚れの速度が低温側で起こっていること、そして高温側No.3へのhiTRAN挿入が、全体の汚れの生成速度を期待とは反して促進する結果となった。

3-3. HTRIによる汚れ係数の計算

ユニット毎の汚れ係数は両流体の温度と流量の測定値をHTRIに入力し、OverDesignが±2%以下となるような汚れ係数をトライアルエラーで求めることができる。図5にNo.3-hiTRANテスト前後の汚れ係数の推移を示した。この図から期待とは逆にhiTRANの挿入が著しく低温側の汚れ速度を大きくしていることが明らかである。そしてこの汚れはほとんど低温側で起こっている。しかし前報¹⁾表1の汚れの種類に記載した、「凍結汚れ」とは明らかに異なる汚れであると思われる。

また図5の中の汚れ係数の極端な減少とその後の増加は、数時間の流量増加テストの結果である。この現象は汚れの成分あるいは状態が、流速変化によって容易に壊れることを示唆している。

図6にはNo.3-hiTRAN挿入テストの前後の、運転を開始して数日経った後5日間のユニット出入口温度とユニット前後のDutyの平均値を示した。図の線とプロットが温度、棒グラフ(Duty)の右側がテスト後である。

高温側の汚れが大きいと予想して高温側No.3に挿入したhiTRANの伝熱促進効果によって、No.3のDutyは23%程度向上している。その結果かどうかは定かではないが、季節変動も加わって、低温側の入口温度が60℃から5℃程度低くなっている。もし

高温側の汚れが大きいと予想して高温側No.3に挿入したhiTRANの伝熱促進効果によって、No.3のDutyは23%程度向上している。その結果かどうかは定かではないが、季節変動も加わって、低温側の入口温度が60℃から5℃程度低くなっている。もし

低温側に閾値をもつ新しい汚れ現象であるなら、長期的なプラントデータの解析と研究が必要であろう。そしてこの汚れが低温側に起こっていることから、Shell 側の汚れであることは明らかである。

3-4. 長期運転データの解析

図4と図5を比べれば明らかなように、 U 値に比べ汚れ係数あるいは汚れ速度 [F /day] によって管理する方が理解しやすい。前報¹⁾では汚れ係数 F は式(1)で表現できるとしても、正確な $(1/U_{\text{clean}})$ を実測することは困難であるとした。

$$Rf = 1/F = (1/U_{\text{dirty}}) - (1/U_{\text{clean}}) \quad (1)$$

そこで筆者らはこの $(1/U_{\text{clean}})$ を求める方法として、HTRI で求められる h_i と h_o から求める方法を採用した。熱交換器固有の相関曲線(図7)から実測 U 値を抽出し、 U_{clean} を求める式(2)に落とし込めば、汚れ係数 F に換算できると考えた。

$$1/U = 1/h_i + 1/h_o + t/k \quad (2)$$

このデータ換算を実施し、4年間の U 値と F 値の推移を表したのが、図8である。図では右下がりな U 値、右上がりな F 値のケミカルクリーニング以降の推移を表している。

図8の2015年12月以降がNo.3-hiTRANテスト以降で、 U 値の低下、 F 値の上昇が低温部において特に著しい。この図から、No.3に挿入したhiTRANが

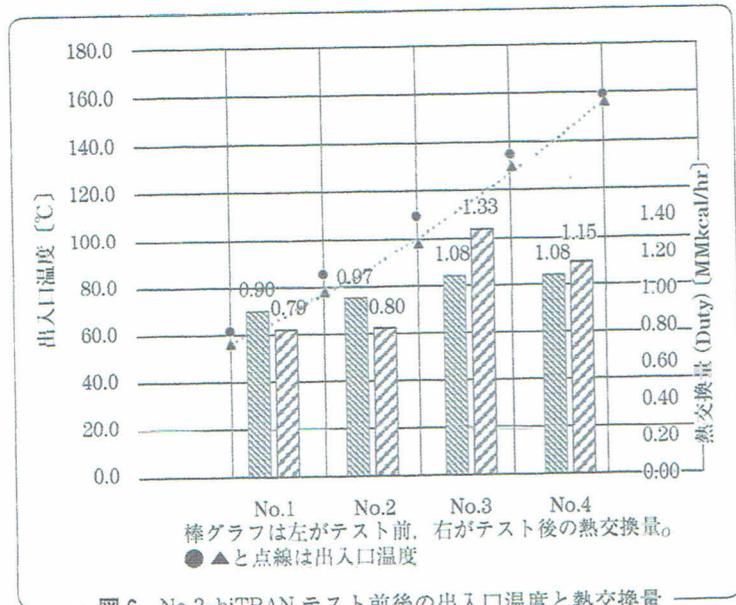


図6 No.3-hiTRAN テスト前後の出入口温度と熱交換量

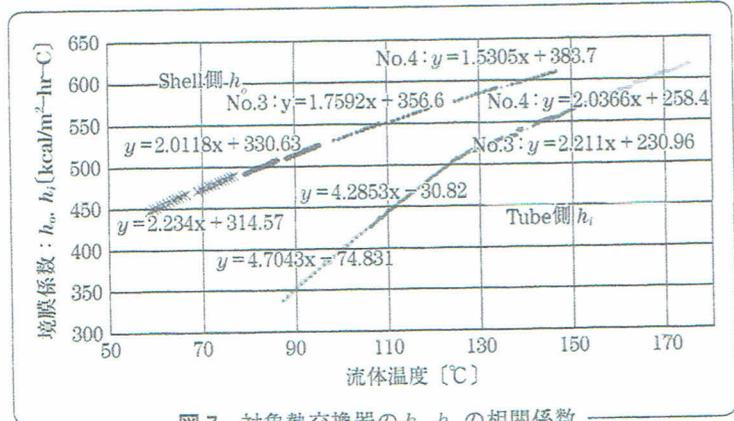


図7 対象熱交換器の h_i , h_o の相関係数

汚れ低減に逆効果であることが明らかとなった。その理由は先に述べた通り、高温脱Aオイルの熱量をNo.3ユニットで取りすぎ、No.1, 2ユニットに入る脱Aオイルの温度が110°Cから98°Cまで下がって

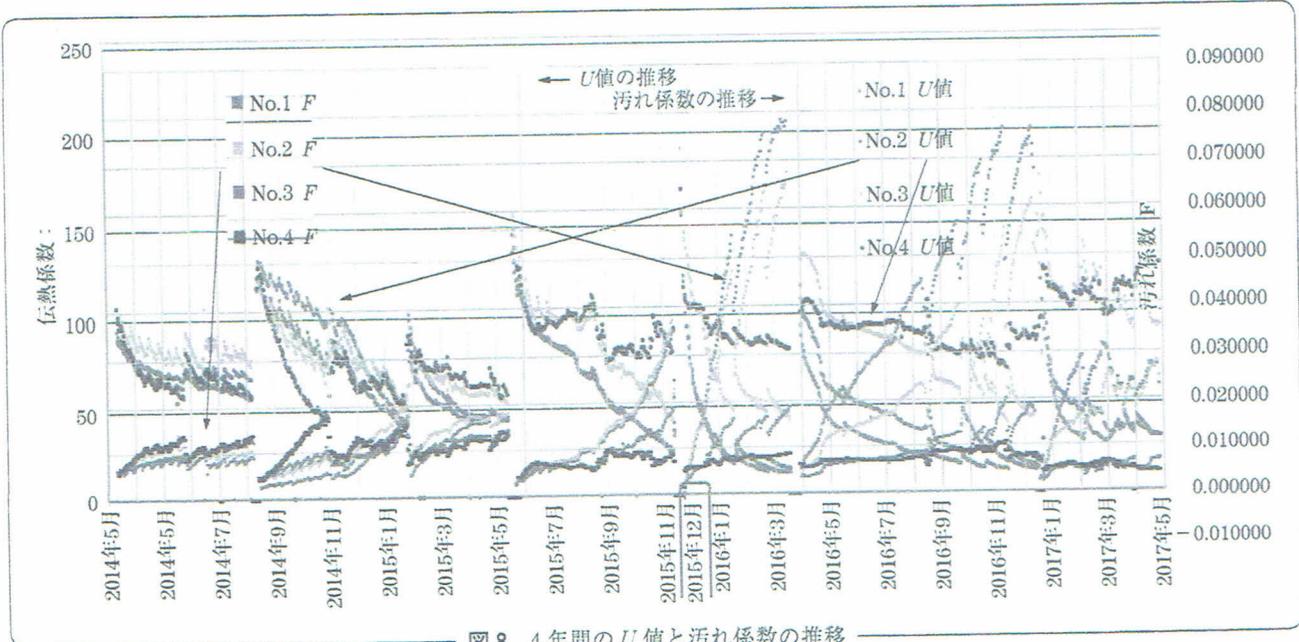


図8 4年間の U 値と汚れ係数の推移

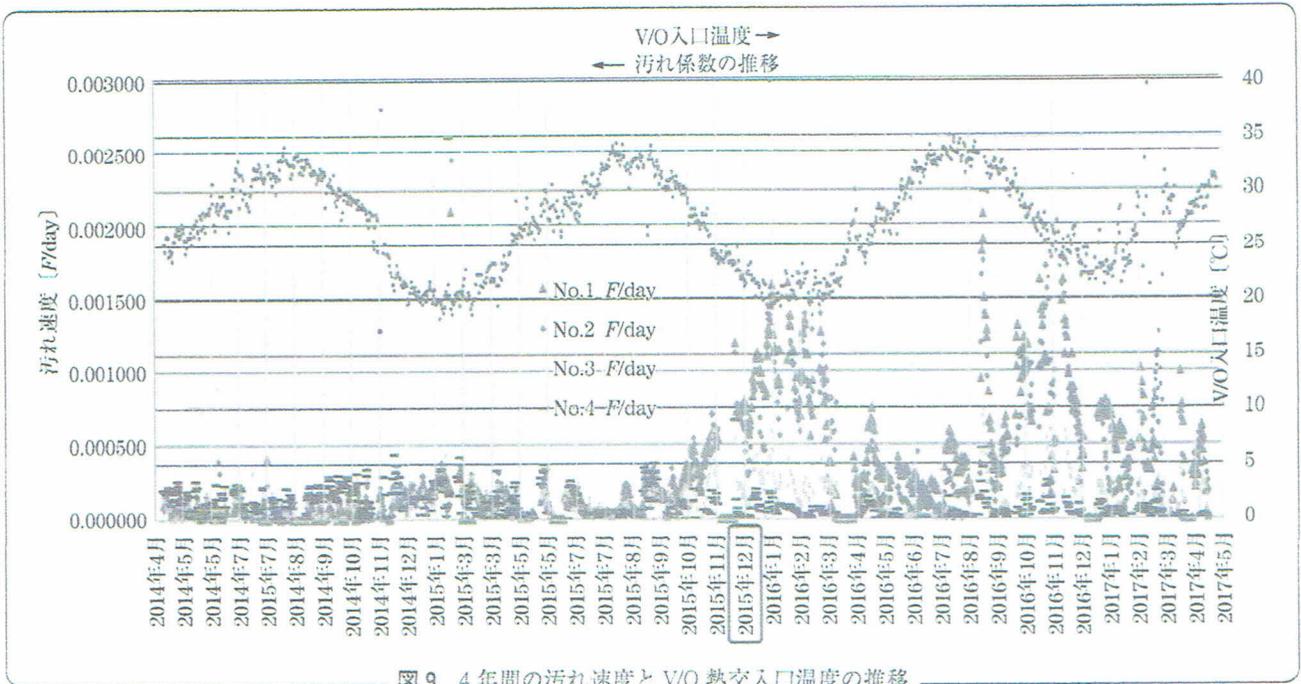


図9 4年間の汚れ速度とV/O熱交入口温度の推移

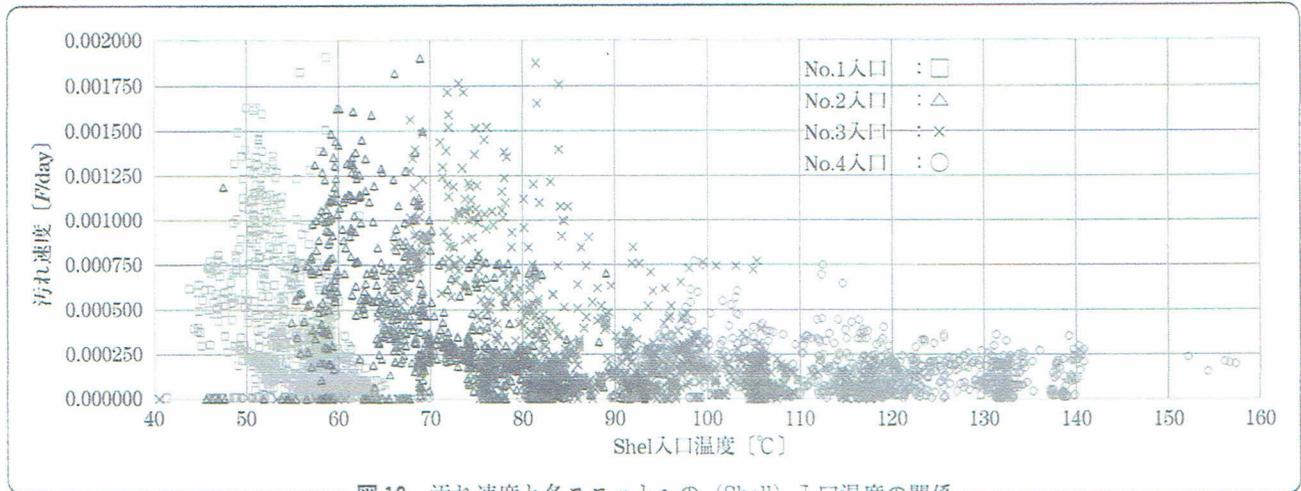


図10 汚れ速度と各ユニットへの(Shell)入口温度の関係

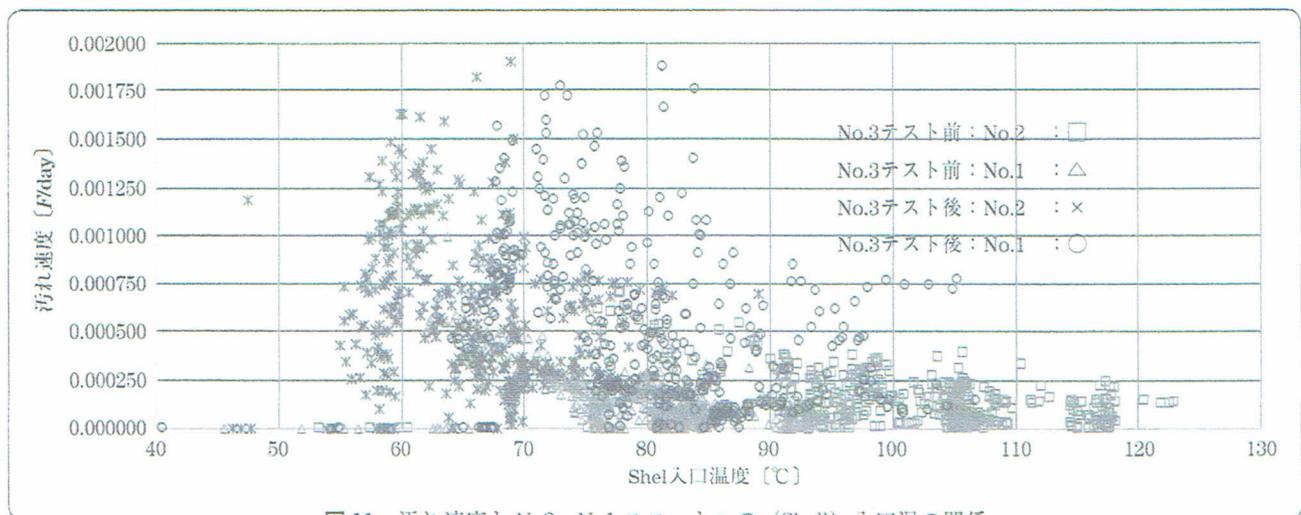


図11 汚れ速度とNo.2, No.1ユニットへの(Shell)入口温の関係

ること(図6)が関与しているようである。

しかし図8からO/ONo.1入口温度の季節要因も疑われるため、図9にO/O熱交の前段のV/O熱交の入口

温度と汚れ速度の推移を示した。汚れ速度(F/day)は熱交換後1週間の移動平均で表現している。No.1入口温度の変動は季節変化も受けており、高温側No.3へ

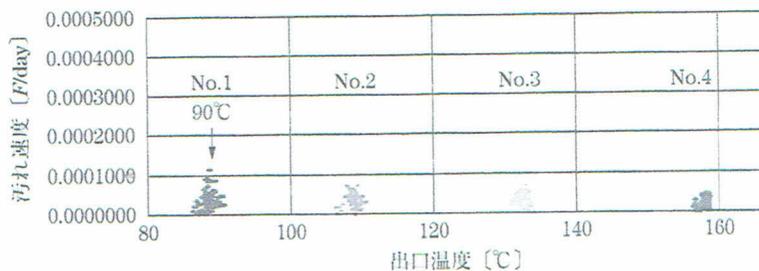


図12 hiTRANのNo.1ユニットの入れ替え後の汚れ速度

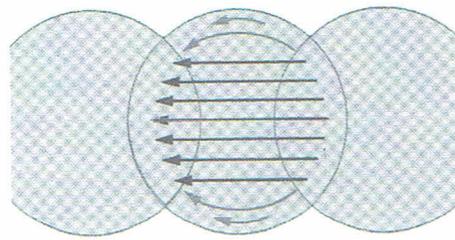


図14 Shell内のクロスフローイメージ

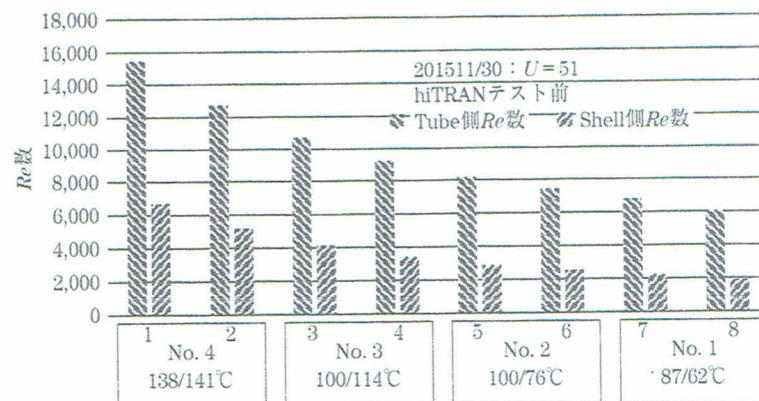


図13 各ユニットのRe数と出入口温度

なので、No.1ユニットに移設することになったが、低温で圧損が大きくなるために、その半量を向流パスのみに挿入することになった。

図12はNo.1に移設後の運転データであって、データ数は少ないが、No.1入口温度は90℃で、低温状態の場合よりはるかに小さな汚れ速度(0.0001/day以下)に納まっている。そしてわずかではあるが、高温側の汚れ速度が小さいように思われる。ただし結果は、この新しい汚れの抑制に対してhiTRAN

が積極的な効果を示すものではない。

3-6. 低温閾値の仮説

このO/O熱交の低温に閾値が有るように見える汚れ現象は、凍結汚れとは全く異なるものである。

筆者らはこの現象がShell側の低温流体の非ニュートン性に起因するのではないかと考えている。

図13はこの各熱交ユニットのShell側とTube側のRe数と流体温度である。4パスであるTube側のRe数は低温側においても6000と乱流領域にある。しかし、Shell側はNo.3においてすら遷移領域にあり、No.1とNo.2は層流領域にある。

図14の矢印はShell側のバッフルカットを流れるクロスフローの速度分布をイメージしたものであるが、中心部が最大流速であるのに対し、両サイドの流速が小さいと予想される。もしも低温のShell側流体が揺変性(チキソトロピー性)を示すような流体であると仮定するならば、汚れ速度の低温側での上昇は次のように説明できる。

「低温でチキソトロピー性を示す含Aオイルは流速の低いShellの外側から粘度が時間と共に上昇し、この粘度上昇がさらに h_o の低下を増幅するため、流体

の伝熱促進材の挿入はNo.1熱交の温度を下げる方向に働き、汚れ速度の増大を助長したものと推察される。

図10にはNo.3-hiTRANテスト以降を含む各ユニット全体の入口温度との相関を、図11には同じくNo.3-hiTRANテスト前後の低温側ユニットの結果のみを図示した。この2つの図からみると、汚れ速度は90~100℃以上では非常に小さくなり、閾値を持つように思われる。

3-5. hiTRANの移設

No.3に挿入したhiTRANは汚れに悪影響するのみ

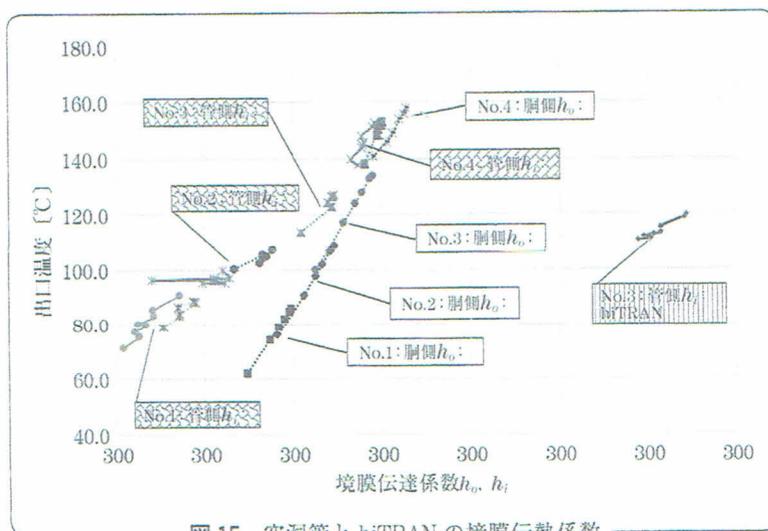
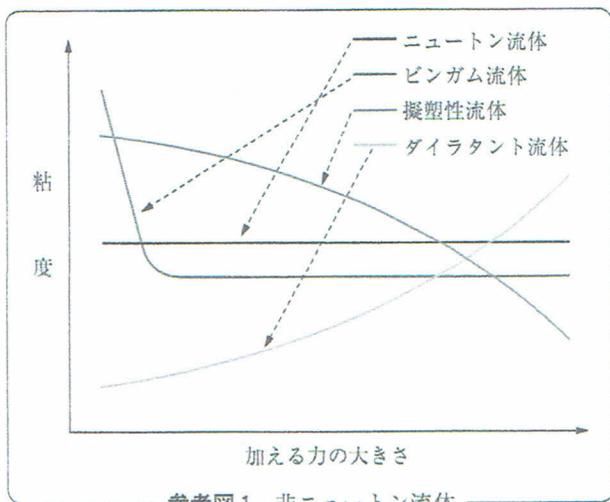


図15 空洞管とhiTRANの境膜伝熱係数



参考図1 非ニュートン流体

が中央部のみをショートパスしているような状態」ここで言うチキソトロピーとは時間の経過に対して粘度が上昇する現象を意味する。そして図5に示した短時間の流量増加による汚れ係数の低下は、チキソトロピー性の破壊の結果であると推察している。

3-7. No.3-hiTRAN 挿入の逆効果

図15はNo.3-hiTRAN挿入テスト時の汚れ係数をHTRIで計算したときの各ユニットの境膜伝熱係数である。hiTRANを挿入したNo.3の h_i は空洞管(Empty)のその2倍近くに達している。この伝熱促進効果が低温No.1側の低温化を助長し、汚れ速度の増大につながったと言える。

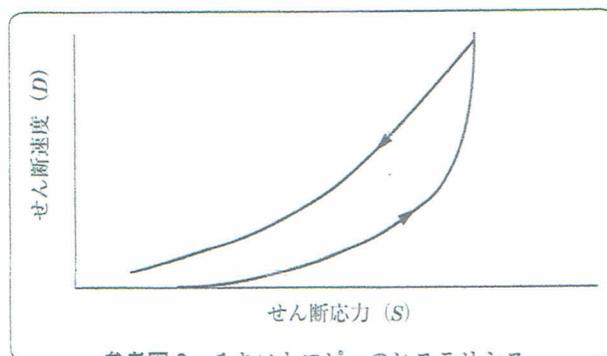
低温側No.1 O/OへのhiTRANの半量移設に伴い、hiTRANの逆効果は防止できたが、汚れの解消あるいは減少には全く繋がっていないし、Dutyの増加にもほとんど寄与していない。

4. 今後の解析と改善の方向

図1のプロセスから判るように、含Aオイル流体はO/ONo.1熱交の前段にあるV/O熱交(凝縮器)のTube側で蒸気を冷却したのち、O/O熱交で高温の脱Aオイルで加熱されている。また図9に示したようにV/OOの入口温度は季節温度のとおり推移しており、それがO/Oの汚れ速度と連動している。このHotShellの凝縮器(V/O熱交)の汚れを解析し、汚れ防止のヒントを掴むことが重要であろう。

5. あとがき

低温側で汚れ速度が大きくなるという汚れは初めてのことである。HTRIで非ニュートン流体を扱うことはできず、CFDの市販ソフトも調査したが、今のところこの現象を解析する手段は無さそうである。



参考図2 チキソトロピーのヒステリシス

次号ではV/O熱交の汚れを中心に解析した結果を報告し、この新しい汚れの防止方法を提案したい。

〈参考文献〉

- 1) 渡部, 酒井, 駒田: 化学装置. Vol.61.No.4, p58 (2018)

(補足資料)

非ニュートン流体とは、大きく分けると参考図1のように3つに分類されます。通常の水、有機溶媒はニュートン流体、ビンガム流体とはバターのように流動するまでの降伏値を持ち、流動後はニュートン流体となる、擬塑性流体とは力が加わると粘度が下がる流体で、ケチャップやマヨネーズのような流体、ダイラタンシーは水溶性片栗粉のように強くかき混ぜると固化します。チキソトロピー(揺変性)とは水性塗料によくみられる現象で、蓋を開けると固まっているように見えますが、強くかき混ぜると粘度が下がり、さらに時間の経過に伴って、徐々に粘度が上がるものです。すなわち参考図2のように時間の経過とともにヒステリシスを持ちます。一般にこのような現象はスラリーに起こりやすく、粒子間の緩やかな結合(ブリッジ)が強いせん断力で破壊されるために低粘度化し、ゆっくりとした時間経過と共に、再びブリッジを形成されるため(チキソトロピービルドアップ)と説明されます。

引用: 文系でもわかるレオロジー

http://www.primix.jp/mixer_lecture/vol2/03.html

このチキソトロピーによる増粘は強い攪拌や温度上昇によって破壊され、時間の経過によって再びブリッジが形成されます。したがって分子運動のエネルギーの大きい高温状態でチキソトロピーが観察されることはありません。筆者らが本報で汚れ現象を流体のチキソトロピー性によるとの仮説を立てた大きな理由です。