

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5)抽出液回収全体プロセスの低温汚れ改良へのhiTRAN効果の期待

渡部 高司*1) 駒田 信二*2) 酒井 昭二*3)

1. はじめに

前報¹⁾では低温になるほど汚れ速度が増大する新しい分類の汚れ現象を確認し、8連 O/O 熱交の高温側の一部に伝熱促進材 hiTRAN を挿入することが、この汚れに対して逆効果になることを報告した。すなわち、最低温側熱交の Shell 側に入る流体の入口温度が低くなるほど汚れ速度が増す現象である。このため、高温側熱交の管側に挿入された hiTRAN の伝熱促進によって、高温側流体は低温側入口に到達したときの温度が低くなるために、低温側汚れ速度が大きくなることとなった。

筆者らは、この O/O 熱交の入口温度を決定する前段の凝縮器 (V/O 熱交) の汚れ速度を解析し、さらに O/O 熱交の汚れ速度と比較することによって問題の解決策を見出し、ユーザーに提案した。本報では、提案に至った考え方やその内容について報告する。

2. アロマ回収プロセス

図1は前報¹⁾にも示したプロセスフローであり、O/O 熱交の Shell 側入口の前に低温の含 A オイルは V/O 熱交の Tube 側を通り、回収塔の上部から出た A 蒸気を凝縮し、自身は加温されて O/O 熱交の Shell 側に到達する。したがって、O/O 熱交を含めた全体プロセスの低温汚れの増加を抑制するには、V/O 熱交の汚れ解析が必要不可欠である。

ちなみに、図1のプロセスは2系列が稼働 (処理能力比 1/1.33) しており、O/

O 熱交のケミカルクリーニング頻度は3ヵ月前後に、V/O 熱交のクリーニングは10~12ヵ月にそれぞれ1回である。

3. V/O 熱交の解析

3-1. V/O 熱交の諸元とフロー

O/O 熱交の前段の V/O 熱交は図2に示すように2連の凝縮器からなり、Shell 側に回収塔からの A 蒸気が入り、冷却用の含 A オイルは Tube 側を流れて蒸気を冷却し、O/O 熱交に導かれる。熱交の大きさは同じであるが、Tube 側パス数が V/O が6に対して O/O のそれは4と少ない。

V/O 熱交の汚れが進むと蒸気側下流の海水熱交に負荷がかかり、回収 A 成分の原単位が小さくなる。

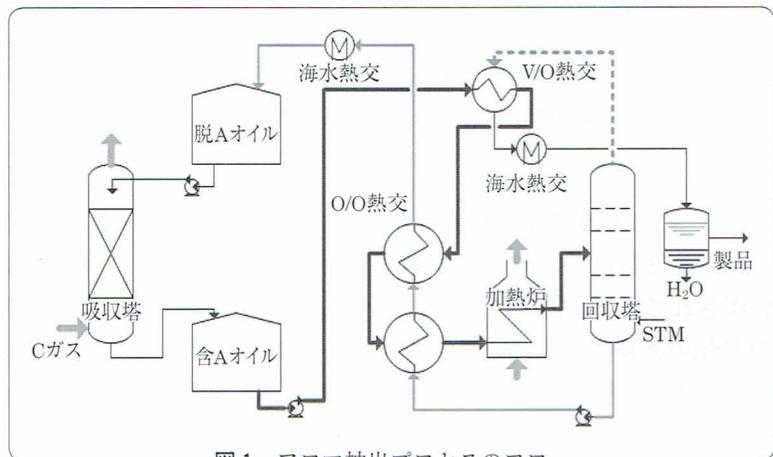


図1 アロマ抽出プロセスのフロー

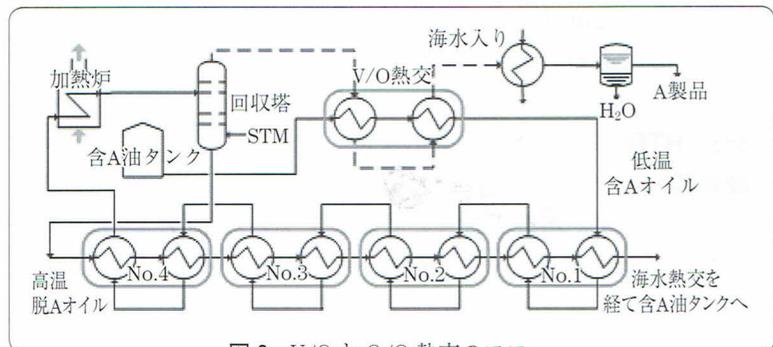


図2 V/O と O/O 熱交のフロー

*1) aPEC 株式会社 代表

E-mail: watanabe@a-pec.jp

*2) 同社 技術部長

E-mail: komada@a-pec.jp

*3) 株式会社エプシロン 研究員

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

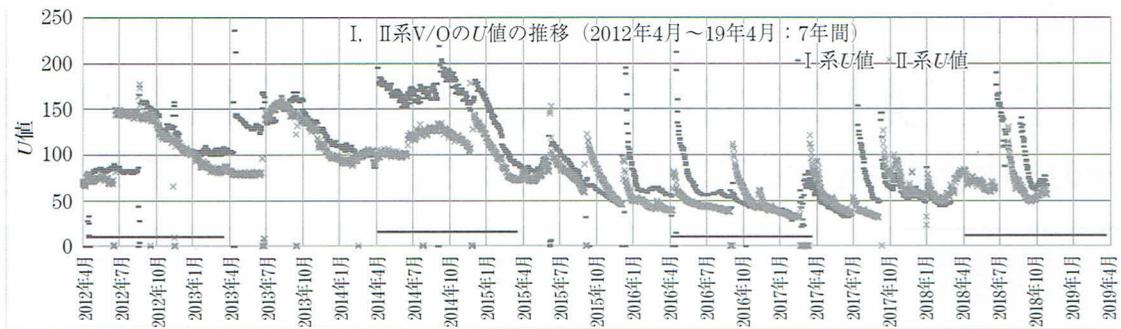


図3 I, II系V/O熱交の長期(7年間)のU値変化

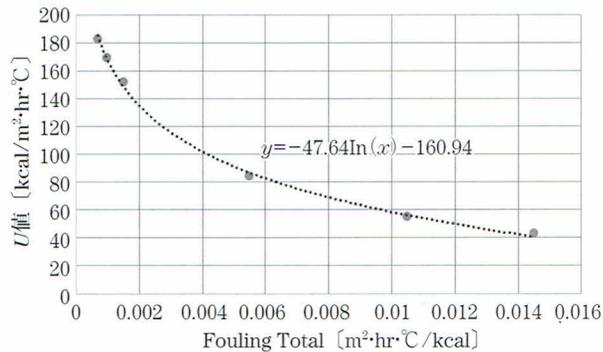


図4 U値と汚れ係数F値の関係

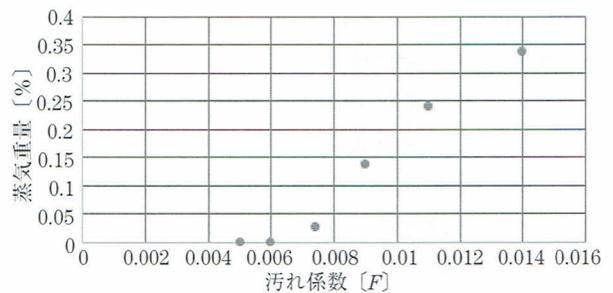


図5 汚れ係数と出口蒸気分率の関係

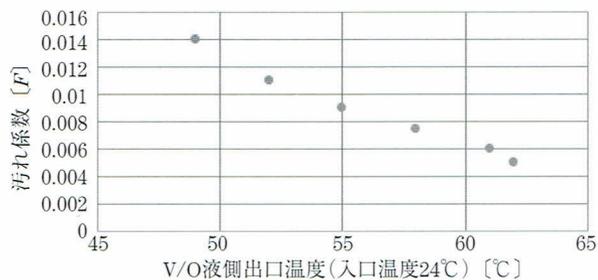


図6 汚れ係数とV/O含Aオイル出口温度



図7 V/O熱交F値の推移(10ヵ月)

3-2. V/O熱交の汚れ解析

V/O熱交運転の管理はO/Oと同じように、U値で管理されている。図3はI, II系V/O熱交の7年間のU値の推移であり、下部の横線は1年間を示している。図3から判るの、U値の初期値は150~200以上にも達しているが、急激に低下した後、50程度で推移しており、O/Oの初期値100~150よりも大きいことと、洗浄のサイクルが10ヵ月以上にも達していることである。

3-3. HTRIによる汚れ係数の決定

凝縮器の場合、蒸気凝縮側の境膜伝熱係数 h は比較的大きく、また汚れも付きにくいと考えられるので、蒸気側の汚れを一定(0.0005)と仮定し、現場の温度、流量データをHTRIに入力し、汚れ係数を計算した。具体的にはTube側の汚れ係数をTry &

errorで入力して、HTRIで定義されている設計余裕(Over Design = $(U_{calc}/U_{real}-1) * 100$)がほぼゼロ($\pm 2\%$)となる汚れ係数の値を求めた。図4には、II系V/Oの両側汚れ係数の和とHTRIで計算したU値の関係を示す。この相関係数を用いてV/Oの膨大なプラントデータのU値をF値に換算した。

凝縮器の場合、汚れ係数が大きくなると凝縮量が小さくなり、出口の蒸気分率が大きくなる。V/O熱交の場合、図5に示したようにF値が0.007以上、すなわちU値が65で蒸気分率が増加し始める。

同様にV/Oの出口温度(=O/O低温側入口温度)と蒸気分率の関係を図6に示した。この図から、汚れの少ない場合には含Aオイルは60°C以上に温められるが、V/Oの汚れの進行に伴ってO/Oの入口温度は10°C近く変化することが明らかである。

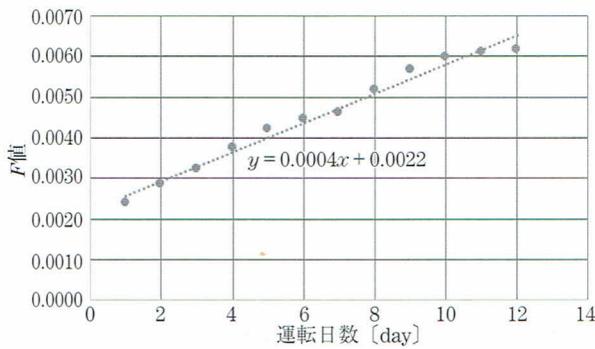


図8 V/Oの初期汚れ

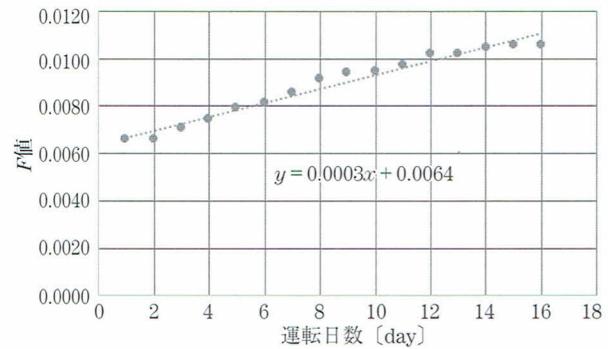


図9 V/Oの中期の汚れ

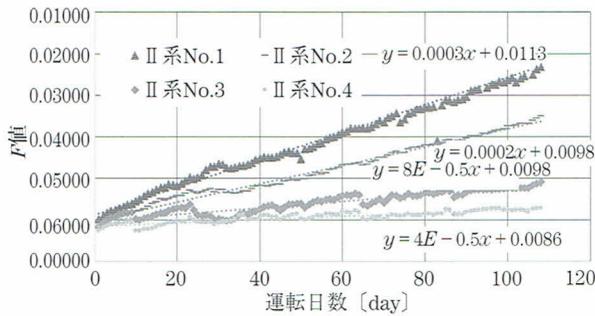


図10 II系O/O熱交の汚れ速度

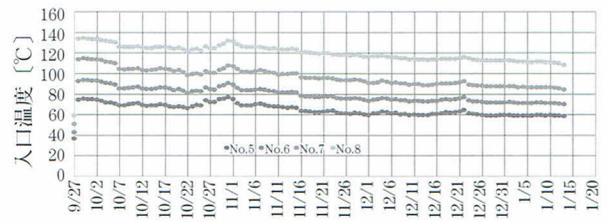


図11 汚れに対応する各ユニットの入口温度

3-4. V/OのF値の推移

図7は、F値の10ヵ月の推移である。このF値は、プラント管理のためのU値から、図4の相関式を用いて計算した。

図7の中で、最初(左側)の矢印はV/O洗浄直後のFの変化であり、最初のU値は128であった。2番目(右側)の矢印のU値は78と、数日前の57からかなり改善されている。この2ヵ所の汚れ速度を比較したのが、図8と図9である。

この2つのグラフから、初期のV/Oの管側の汚れ速度は最大で0.0004F/dayと、O/Oの低温(≒60℃)側のそれである0.0003より大きいことが判る。しかし図7のとおり、その後0.001Fの近くで、安定(F値の増加が無い)している。また図9に示した中期の速度は、何らかの原因(ポンプの再起動?)でいったん0.006にまで回復したF値が増加する速度は、0.0003F/dayを示した。その後は0.012以上に増えることなく、0.007近くの値が6ヵ月以上続いた。この汚れ速度の平衡値に達するかのような挙動は、O/O熱交とはかなり異なると考えられるので、同時期のII系O/O熱交の汚れ挙動を精査した。

4. V/O, O/O熱交汚れの仮説

4-1. O/OとV/O熱交の汚れ速度比較

図10に、hiTRANテストを実施していないII系の

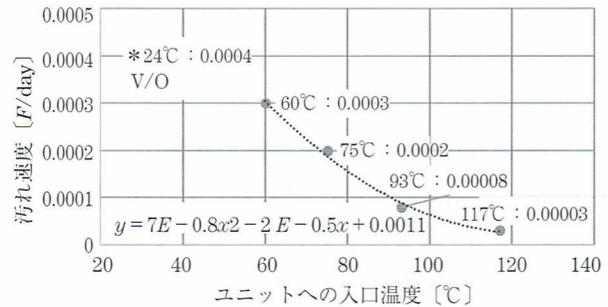


図12 O/O熱交入口温度と汚れ速度

O/O熱交の各ユニットのスタートから、ケミカル洗浄のために運転停止するまでの3ヵ月間の汚れの経時変化を示した。汚れ速度F/dayは低温側No.1ユニットから順に小さくなっており、最も高温のNo.4ユニットの汚れ速度はNo.1の1/10となっていることが判る。

図11は、同期間の入口温度の変化である。運転開始から停止までに最大18℃の違いはあるが、各ユニットの中央値を採用して、汚れ速度と熱交含Aオイルの入口温度の関係を示したのが図12である。また、先に計算したV/Oの最大汚れ速度も、入口温度24℃の位置にプロットしてある。

前報¹⁾では汚れ速度が閾値を持つことを報告したが、図12を見ると温度に対して2次関数で近似できることが判る。入口温度が24℃であるV/Oの汚れ速度は最も大きいですが、O/Oの汚れ速度の延長線よりは明らかに低い位置にある。この理由はO/Oの低

表1 O/O, V/O の流れ状態の比較

		V/O 熱交	O/O : 低温側
流体 : Shell : 温度		A 蒸気 90℃	含 A オイル 58℃
: Tube : 温度		含 A オイル 24℃	脱 A オイル 97℃
流速 : Shell	m/s	2.74	0.20
: Tube	m/s	0.75	0.44
Re 数 : Shell	-	8000~14000	1700~2150
: Tube	-	2500~3500	6160~6400
h_o : Shell	* 1	2437	448
h_i : Tube	* 1	242 (6パス)	358 (4パス)
汚れ係数 F	* 2	0.0145	0.0112
U 値 (総括)	* 1	42.9	55.6
伝熱抵抗 (%)	* 3	0.0233 (63%)	0.0180 (62%)
停止時 F	* 2	≒0.012	≒0.046
汚れ/運転日数		最大/300日	3日/108日

* 1 : (境膜) 伝熱係数 h_o, h_i, U 値 : kcal/m² · hr · °C
 * 2 : 汚れ係数 F 値 : m² · hr · °C/kcal
 * 3 : U 値の逆数 (総括伝熱抵抗) の内の汚れ抵抗の%

温の含 A オイルが Shell 側に、V/O が Tube 側にそれぞれ流れていることと大いに関連していることが容易に推測できる。

4-2. O/O, V/O 熱交の流れ状態の比較

表1には、HTRIで計算したV/OとO/Oの最低温箇所の流速、 Re 数などを示した。ここでのV/O熱交は図7の10ヵ月間の最大値、O/O熱交は図10に示した最も低温側になる洗浄後の再スタートから3日目である。洗浄による運転停止は108日で、そのときの汚れ係数は0.049 (U 値=20)である。

表1の含Aオイルに着目すれば、V/OのTube側とO/OのShell側の Re 数は同じレベルで、層流と乱流の遷移領域にある。HTRIが計算した液体側の境膜伝熱係数 h_i は、ほぼ同じレベルである。伝熱抵抗(%)とは総括伝熱抵抗(=1/ U)に対して汚れ抵抗が占める割合であるが、ほぼ同じ値を示していることに意味は無く、O/Oの場合、ケミカルクリーニング後も除去し切れない汚れが残っていると考えられる。

Shell側とTube側の流れの状態について、定性的な観点からも考えてみる必要がある。

4-3. ShellとTube内部の流速分布

O/OとV/Oの汚れ挙動の違いを考えるうえで考慮すべきことは、Shellを流れる含Aオイル(O/O)とTubeを流れる含Aオイル(V/O)の流速の分布であろう。V/O熱交は汚れ速度が大きいものの、一

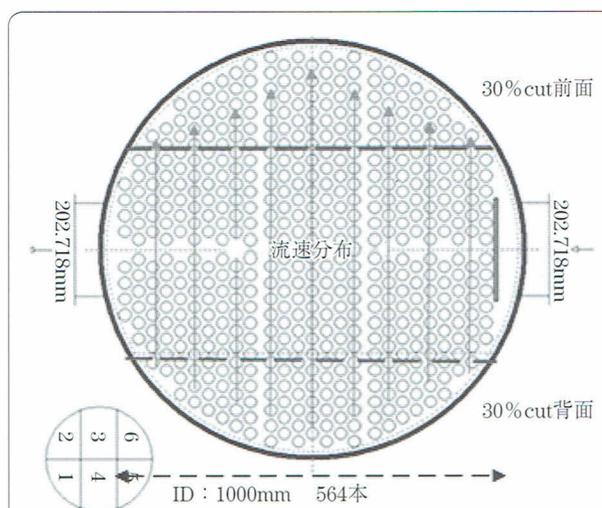


図13 O/O熱交 Shell側の流速分布

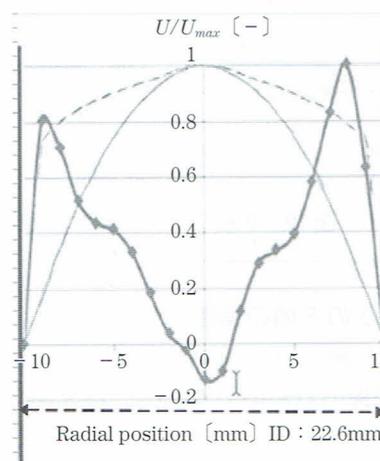


図14 Tube内部の流速分布

定期間後に汚れ係数 F が0.01前後で落ち着くのに対し、O/O熱交の場合の汚れ速度は流体の温度に大きく依存し、汚れ速度が低下することなく、100日程度(F 値0.046)で運転停止となる。

前報¹⁾ではこの現象をチキソトロピー性流体の時間的な粘度上昇による中央部だけのショートパスと説明したが、Shell側とTube側の流れを模式図で比較してみたい。

図13は内径の熱交換器の断面で、Shell側を流れる流体はTubeを横切って流れ(クロスフロー)、次のバッフルで囲まれたセル(空間)では流れ方向は逆転する。一つのセル内では流速分布があり、中央部より両側部の速度は小さいと推測される。

一方、図14はTube断面で、前報²⁾と同じID22.6mmφのものである。V/OでTube内を流れる層流(実線)と乱流(破線)、hiTRANを挿入したTube内の流速分布のレーザー Doppler 法による実測値(太線)をそれぞれ表している。層流の場合、

最大流速は平均速度の2倍であるが、遷移領域にある含Aオイルもまたチキソトロピー性を示すなら、壁面と中央部の速度差は時間経過とともに層流以上となることが予想される。

実際には壁面からの熱移動、それに伴う温度変化に因る粘度低下が起こるので、予想することは難しい。しかし、V/Oの初期で汚れ速度が増大するのは、チキソトロピー性に基づいて壁面の流速が低下することでTube全体の流れとバランスが崩れて生じる結果だと思われる。そして一定の期間後、汚れ係数が不安定になるのは、ID22.6mmφを流れるすり応力によってチキソトロピー性が破壊されることを示していると考えられる。

これに対して、Shell側を流れるO/O熱交の場合には直径が1mであり、バッフルカット部分と同様の流速分布になってくる。このため、チキソトロピー性の破壊が起りにくくなることから、汚れ速度は低下することなく、早期の運転停止に至っていると考えられる。

4-4. hiTRAN への期待

Tube内の低温含Aオイルの汚れ速度が、ある一定の条件で平衡値に到達するのであれば、O/Oの低温流体をTube側に切り替えることで、その汚れ速度は改善できるはずである。そして、Tube側に挿入されたhiTRANには、伝熱促進とは別の機能が期待される。

図14に示したhiTRAN挿入の場合の流速分布を見れば、hiTRANの挿入によって壁面速度が乱流以上になると推測される。このhiTRANの挿入によって、壁面近くのチキソトロピー性を破壊する効果への期待は大いに高まる。

このプロセスは、汚れさえなければ全体として十分な性能を持っており、汚れ速度を低下できれば、大幅なエネルギー原単位の改善と、運転時間の延長が期待できる。

V/O熱交の場合、図5に示したとおり汚れを0.006以下に抑えれば、A蒸気はV/O内でほとんど凝縮し、含Aオイルの出口温度が60℃となることで、O/O熱交の汚れ速度の低下に好影響を与えるであろう。

O/O熱交の場合、汚れ速度を半分以下にできれば、ケミカルクリーニングに入るまでの運転期間は200日を超えることが期待され、大幅なコストダウンを見込める。

以上の汚れの解析結果から、

① V/OのTube側の一部にhiTRANの挿入テストを

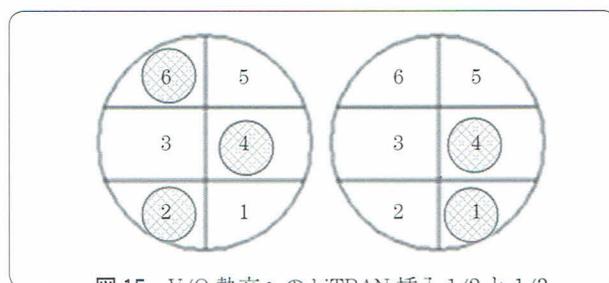


図15 V/O熱交へのhiTRAN挿入1/2と1/3

実施すること、

②既に低温側の半分にhiTRAN挿入してあるO/O熱交は、低温側の含AオイルをTube側に変更することを提案した。この2つのテストによって、hiTRANのチキソトロピー性の破壊効果のプラント実証が可能になる。

hiTRANの伝熱促進の効果を期待する場合、圧力損失の増加を伴うことから、前報³⁾で示したような圧損減少のための非対称バンドルへの改造を必要とする。しかし、このテストの場合、hiTRANのチキソトロピー性破壊の効果を確認するために全TubeへhiTRANを充填する必要は無く、ポンプ許容動力内のパス毎にhiTRANを挿入すれば十分である。なぜなら、破壊されたチキソトロピー性は回復までに時間を要するので、全体に挿入する必要が無いと考えられるからである。図15に、部分挿入の例を示す。

5. あとがき

低温汚れの減少がhiTRANによって解決できる目途をつけることができた。本テスト運転は、次回以降の定期改修の時期に実施される計画である。生産を続けながらのテスト運転はリスクが高く、長期化せざるを得ないし、その他の要因による問題の発生も想定できることから、慎重かつ大胆な決断が望まれる。

今回は低温の廃水から熱を回収するプラスチックShell製の高性能小型熱交換器の開発について報告したい。

〈参考文献〉

- 1) 渡部, 酒井, 駒田: 化学装置, Vol.61.No.5,p.55 (2019) (その4)
- 2) 渡部, 酒井, 駒田: 化学装置, Vol.60.No.12,p.57 (2018) (その1)
- 3) 渡部, 酒井, 駒田: 化学装置, Vol.61.No.4,p.58 (2019) (その3)