

2003 ECI Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning:
Fundamentals and Applications

Fouling Mitigation Using Helixchanger Heat Exchangers

ヘリックス熱交換器を用いた汚れの低減

Bashir I. Master
Krishnan S, Chunangad
Venkateswaran Pushpanathan

Lummus Heat Transfer
Lummus Heat Transfer
Lummus Heat Transfer

三重機械鉄工株式会社は Lummus 社と技術提携により HELIXCHANGER[®] を提供いたします。

三重機械鉄工株式会社

三重県四日市市楠町小倉 1701

TEL : 059 - 345 - 2312

Fax : 059 -346-8383

URL : <http://www.miekikai.co.jp/>

要 約

熱交換器の操作と同様にデザインにおける主な不確実の 1 つは選んだ熱交換器の幾何形状による運転サイクル間の汚れの割合である。熱伝達面の汚れた膜の蓄積に起因する熱交換器の性能の段階的な悪化は、汚れ抵抗としてたびたび説明されるか、又は授与比熱に対する必要な伝熱面積を決定するための汚れ係数として一般的に知られています。

より多くの場合、熱交換器の性能の悪化の原因である汚れのメカニズムは、流速に依存しています。劣った熱交換器の幾何形状に起因する流れと乱流跡と渦の不均衡配分は、熱交換器の性能と信頼性に有害な影響を及ぼします。

Helixchanger 熱交換器は、運転中の熱交換器の汚れの作用における著しい改良を実証しました。Helixchanger 熱交換器では、四分円形のバッフルプレートは、螺旋形のフローパターンを作成するチューブ軸への角度で整えられます。等速度、そして Helixchanger 熱交換器の中で達成されたプラグ・フロー条件の近くで、管束の予定洗浄期間より長い連続運転時間を示す低い汚れ特性を提供します。

本稿は熱交換器の速度に依存する汚れを減少させる際に Helixchanger 熱交換器の選択を示します。

序 論

熱交換器の汚れは今日、産業への主要な経済的損失を引き起こします。ほとんどの工業先進国では、これらの損失は、国民総生産 (GNP) (ESDU アイテム 00016、2000 年) の 0.25 ~ 0.30 パーセントに達します。熱交換器の汚れに関連する経費は、過度なサイジングに反映され、資本の増加だけではなく、設置費用、操業経費、保全維持、不稼働コストが、熱交換器の最初の購入価格の 2.5 ~ 3.0 倍に驚異的に増します。

世界的な伝熱プロセスに使用される 35 ~ 40% 以上の熱交換器は、シェル&チューブ形です。これはシェル&チューブ形熱交換器で可能な保全維持とアップグレードの容易さと同様に主として強い構造形状のためです。

シェル&チューブ形熱交換器において従来の欠円形バッフル形状は、より高い汚れの主原因となります。欠円形熱交換器の胴側に発生する不均一な流速分布、逆流と渦は、管束により高い汚れとより短い稼働期間での洗浄とメンテナンスをもたらします。

Helixchanger 熱交換器は、従来の欠円形バッフルプレートを管束を通して均一な速度での螺旋状の流れを引き起こす役割をするチューブの軸に対してある角度に置かれた四分円形のバッフルに取り替えました。プラグ流に近い流れの条件は、Helixchanger 熱交換器においてわずかな逆流と渦を発生させるだけです。熱交換器連続運転時間は、従来のシェル&チューブ形熱交換器の 2 倍から 3 倍に増やされます。熱交換器の性能は、Helixchanger 熱交換器群を所有して、操作するための総ライフサイクルコスト (TLCC) における必然的におきる結果の節約と共に、長い期間より高いレベルに維持されます。

後述の HELIXCHANGER 熱交換器フィードバックは、Helixchanger の熱交換器を用いることによって成し遂げた改善された性能および経済的利益を例証するために示します。

汚れの特性

汚れの主要なメカニズムは以下の通りであると報告されます：

- ・ 流れにおける粒子状物質
- ・ 結晶作用
- ・ 化学反応
- ・ 腐食のプロセス
- ・ 生物学的大規模蓄積

本論文は、製油所及び石油化学プラントのプロセスで使用されたシェル&チューブ形熱交換器の伝熱能力と経済上での胴側の汚れの影響をカバーしている。

製油所への適用

一般に、汚れの堆積物は高分子量ポリマーを原油で予熱するシステムの状態において発生する。腐食と無機塩類の製品は、ポリマーと混ざって、汚れの堆積物の量を増やします。

製油所における熱の投入量の大部分は、原油を更に高い温度まで加熱する加熱炉へ入る前の熱交換器列で予熱される crude unit(蒸留装置)で使われます。。図 1 を見てください。精油所の総出力は望ましい流速で一貫した出口温度がある crude unit の平均操作に依存します。従って、予熱する熱交換器の機能は下流の加熱炉での燃料消費量を減らすために、そして必要な運転周期の間、加熱炉に一定の原油量を供給するために不可欠である。

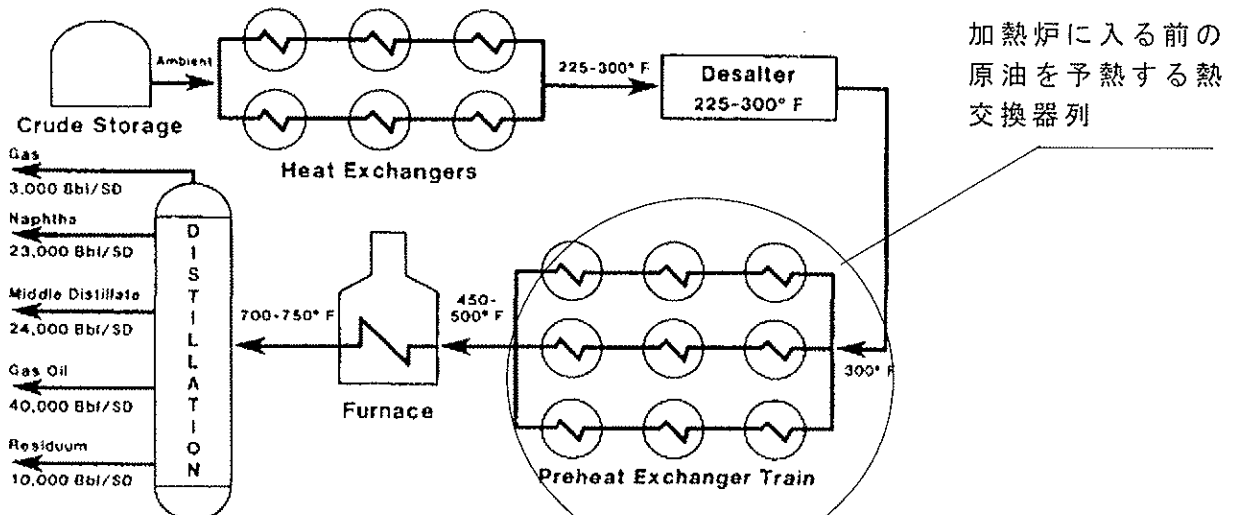


Fig. 1 Schematic of a Crude Unit

図 1 蒸留装置の概念図

製油所で 2 番目に重要なプロセス装置は、水添処理装置です。水添処理装置のプロセス流は、高い温度と圧力で触媒がある状態で水素と反応し、硫黄と窒素を除去します。このユニットにおける主要な汚れは、フィード(ナフサ)/ 流出物エフルエントの熱交換器に生じます。これらの熱交換器において、冷たいナフサの供給側は、熱い製品流出物を使って予熱されます。図 2 を参照して下さい。フィード/ エフルエントの熱交換器の汚れは、ナフサの出口温度を減少させ加熱炉のより多くの燃料消費またはナフサの流量の減少を引き起こす。

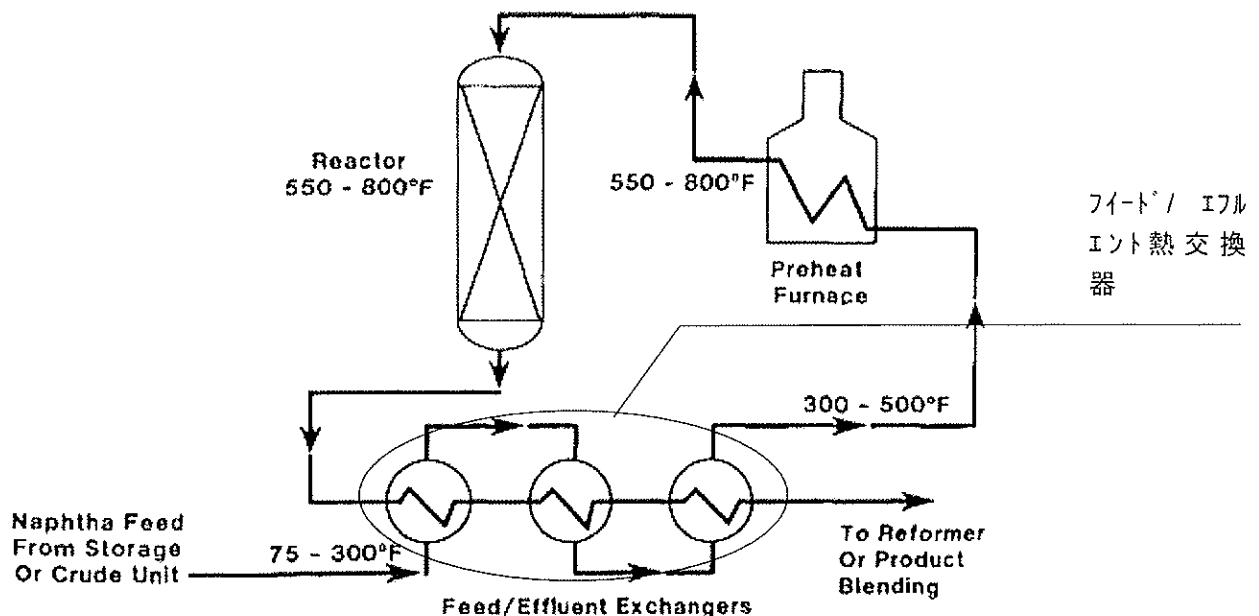


Fig. 2 Schematic of a Hydrotreater Unit

図 2 水添処理装置の概念図

フィード/エフルエント熱交換器として使用される最後の製油所プロセスは、改質装置です。この装置の概略図は、図 3 を参照して下さい。改質はナフサをアンチノック性の品質を高めるように設計されている触媒作用プロセスである。この装置の脱水素は、ナフテンを芳香族留分に変えます。

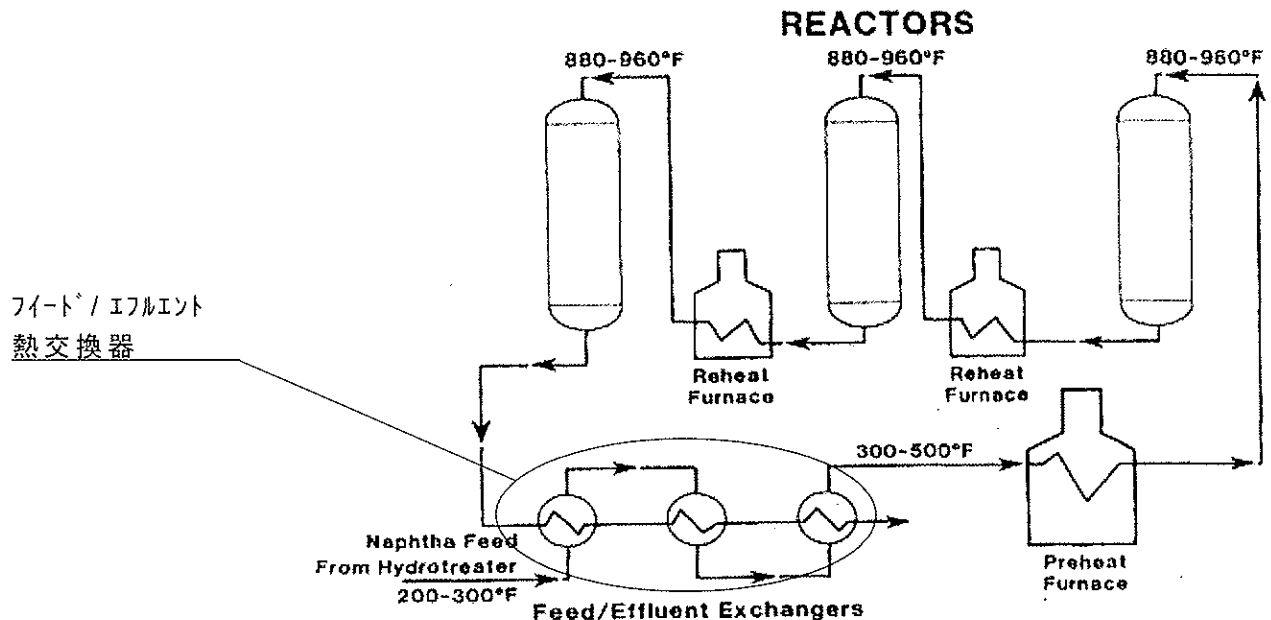


Fig. 3 Schematic of a Reformer Unit 図 3 改質装置の概要図

予熱器における汚れは、運転後たびたび 3 ヶ月で 25 ~ 30%、6 ヶ月で 50% も伝熱係数を減らす不可欠な役割をする。熱交換器のメンテナンスと洗浄コストと同様に下流の加熱炉の追加燃料経費は、プラントの運転費用に影響を与えます。汚れ防止の薬剤は、汚れの傾向を減らし、プラントの経済性を改善するためにたびたびプロセス流に加えられます。

アメリカだけで主な製油精製装置の汚れに関連する経費は年間およそ 14 億 US ドルであると推定されます。主な先進工業国の汚れに関連する総経費は 44 億 US ドルを毎年 (ESDU アイテム 00016、2000 年) 超過すると推定されます。

製油所の汚れの関連経費がすべての産業のマイナーな部分を表すと考えれば、汚れを低減する技術は、より大きな注目に値します。

汚れ低減技術

TEMA 規格は、ケルンとシートン (1959) によって記述されるように漸近的な汚れモデルに基づく複数の流体について汚れ係数を示唆します。このモデルでは、競合する汚れのメカニズムは汚れの更なる増加が起こらない漸近的な汚れ抵抗に結びつきます。従って、漸近の値が TEMA 規格の設計の汚れ係数として推奨されます。このアプローチは、たとえば原油予熱器列の温端側で汚れが漸近的挙動を示さないときから、特に汚れの現象に対処していない。

Ebert および Panchal (1997) は、2 つの競合している条件 (すなわち堆積条件と減少条件) の結果として与えられた条件の下での平均 (線形) を汚す割合として表現される汚れモデル紹介しました。

$$\text{Fouling Rate} = (\text{deposition term}) - (\text{anti-deposition term})$$

$$\text{汚れの率} = \text{堆積条件} - \text{反堆積条件}$$

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta Pr^\delta \exp\left(\frac{-E}{RT_{\text{film}}}\right) - \gamma \tau_w \quad (1)$$

ここで、 α 、 β 、 γ および δ が回帰によって決定されたパラメーターで、 τ_w はチューブ壁の剪断応力、 T_{film} は原油の境膜温度 (バルク温度と壁温の平均) です。

式 (1) の関連は、汚れる割合が無視できる温度および速度のの組み合わせを特定する可能性を指します。Ebert および Panchal (1997) は、「許容限界状態」としてこれを示します。

式 (1) のモデルは、表面及び境膜の温度、速度および剪断応力に影響を与える "許容限界" の下で状態を維持するために熱交換器の幾何学的形状がある特定の熱交換器で 効果的に適用することができることを示します。

熱交換器において、四分円形のバッフルプレートは連続したパターンでチューブ軸にある角度に配置されます。そして、チューブバンドルを通して螺旋形の流れ経路をつくります。図 4 を参照して下さい。

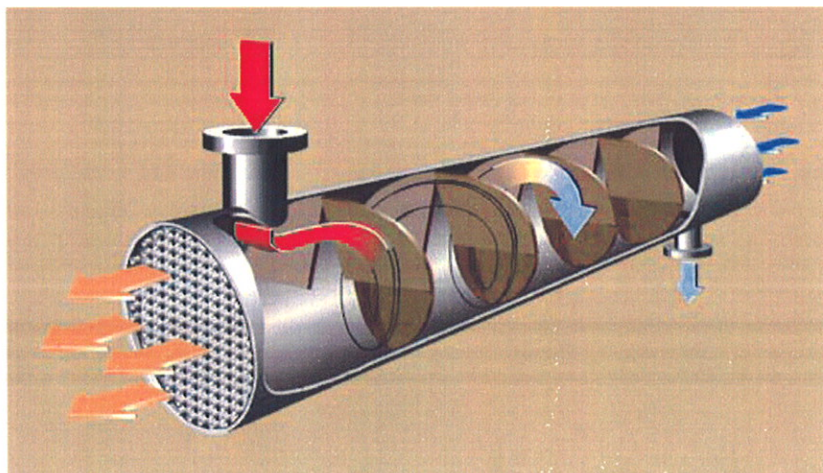


図 4 HELIXCHANGER 熱交換器

バッフルプレートは、従来の熱交換器のように流路の形成ではなくむしろ案内羽根のような役割をします。Helixchanger の熱交換器の提供で達成された均一なより高い流速は、対流熱伝達係数を高めます。図 5 を参照して下さい。

螺旋状バッフルは、主として熱交換効率を減少させる原因となる流れの分散を減らすことによって、胴側の流動の熱力学的な解決の役割をしている。

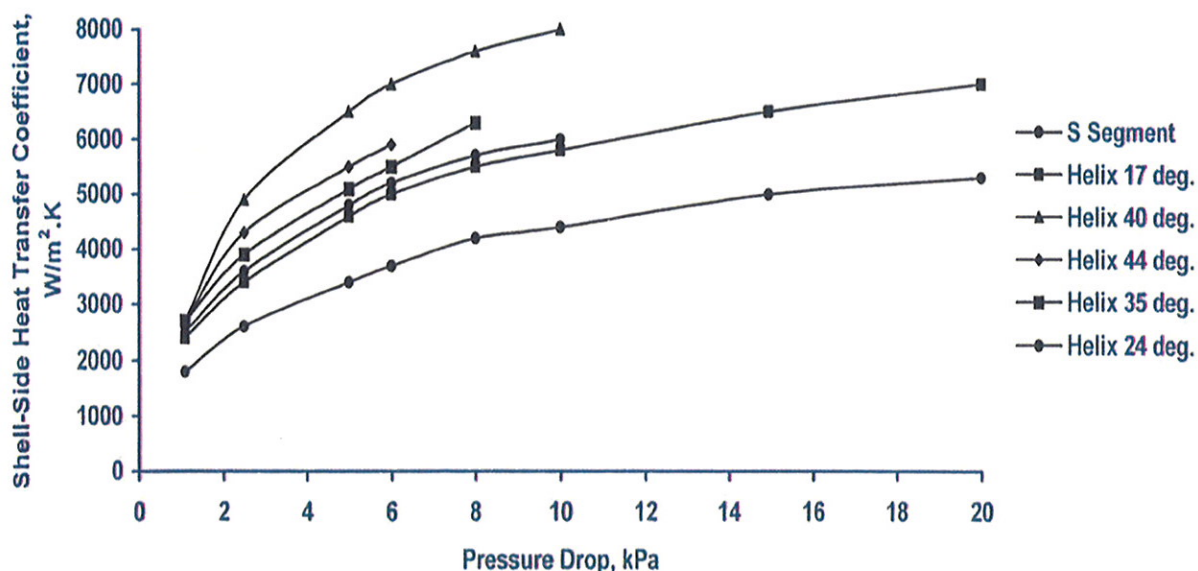


図 5 胴側の伝熱係数 対 圧力損出

最少の分散 (大きい Peclet 数= Pe^*) は、螺旋状のバッフルアレンジメントアプローチで、熱交換器 (Kral 他、1996) の高い熱の有効性をもたらすプラグ流の状態のものを達成しました。図 6 を参照して下さい。 $* [Pe = Re \cdot Pr = (D G / \mu) \cdot (c \mu / \kappa) = D \cdot G \cdot c / \kappa]$

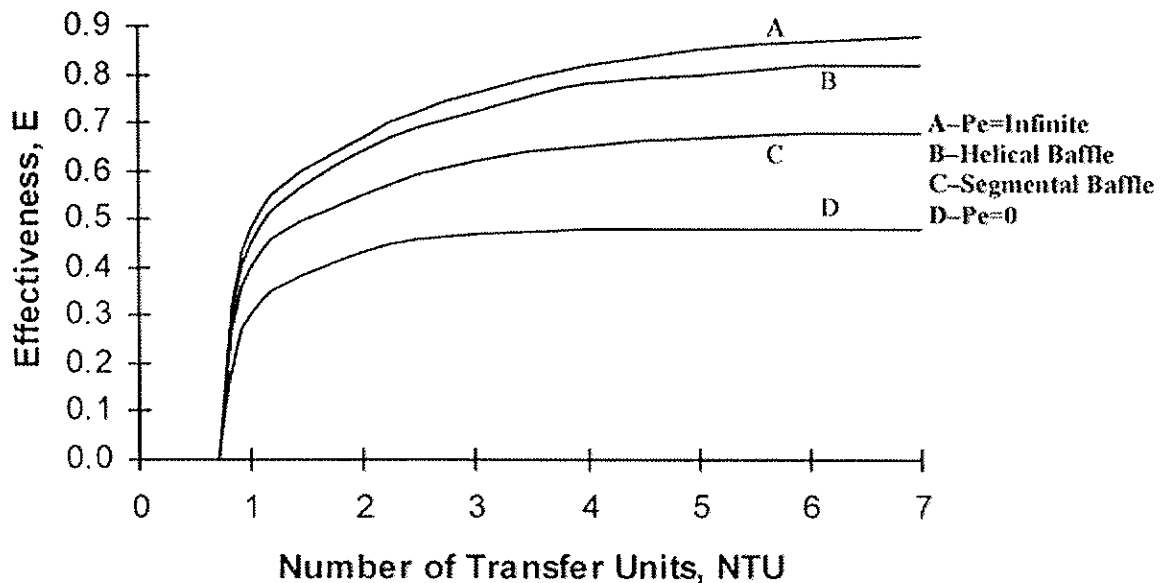


図 6 異なる形状に対する熱交換率

A : $Pe = \infty$ B : 螺旋形バッフル C : 欠円形バッフル D : $Pe = 0$

Helixchanger 熱交換器の最適な設計は、以下の特徴を提供します：

- ・ 均一な境膜とメタル温度を提供する管束を通しての均一な流速
- ・ 逆流と渦の除去
- ・ 胴側の流れは、温度推進力を向上させているプラグフロー状況に近づく
- ・ より高い流速は同じ圧力損失で達成され、その結果、伝熱表面で剪断応力を向上させる。
- ・ Helixchanger 熱交換器で成し遂げられる縮小された胴寸法は、第 2 の利益としてより高い管側流速をもたらし、同様に管側汚れを減少させる。

Helixchanger 熱交換器において達成された上記の特徴はすべて、汚れる割合を引き下げて、従来の熱交換器と比較して、より長い稼働サイクルにわたるより高いパフォーマンスを維持することに著しく貢献します。

HELIXCHANGER 熱交換器フィードバック

Case 1: Crude Preheat Train, Refinery in USA

ケース 1：原油予熱器列 (群)、USA の製油所

この適用は、直列の 2 台の熱交換器の 2 つの並列した列から成ります。、脱塩された原油は、この熱交換器により更に加熱するための加熱炉に送る前に 680 °F のタールによって 450 °F から 500 °F に予熱されます。それは汚れに非常に影響されやすい適用です。既存のセグメンタルバッフル熱交換器は、1 年に一度洗浄することを必要としました。図 7(a) は最後のオペレーション・サイクルにこれらの熱交換器の性能を示します。1998 年中頃に洗浄にした後に、これらの熱交換器で達成された熱授受は 1999 年中頃に、およそ 24MMBtu/hr から 17MMBtu/hr の間を変化しました。

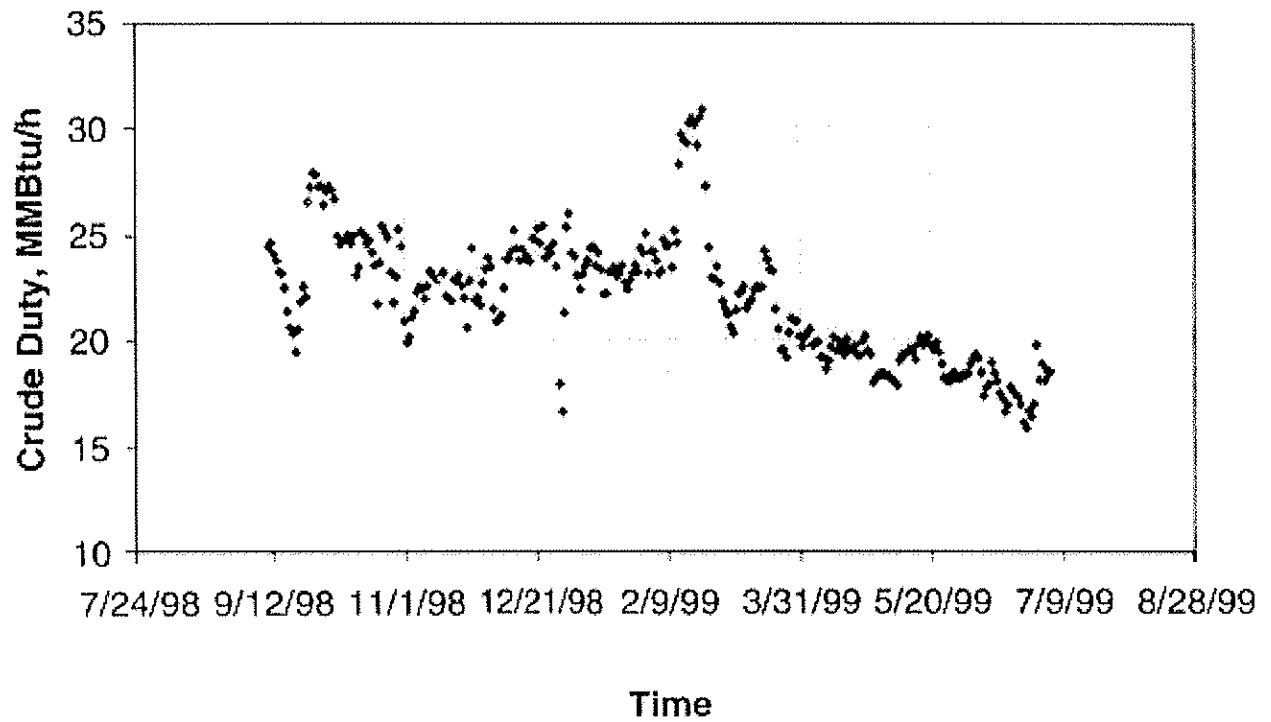


図 7 (a) ケース 1 : セグメンタル形バンドルの性能

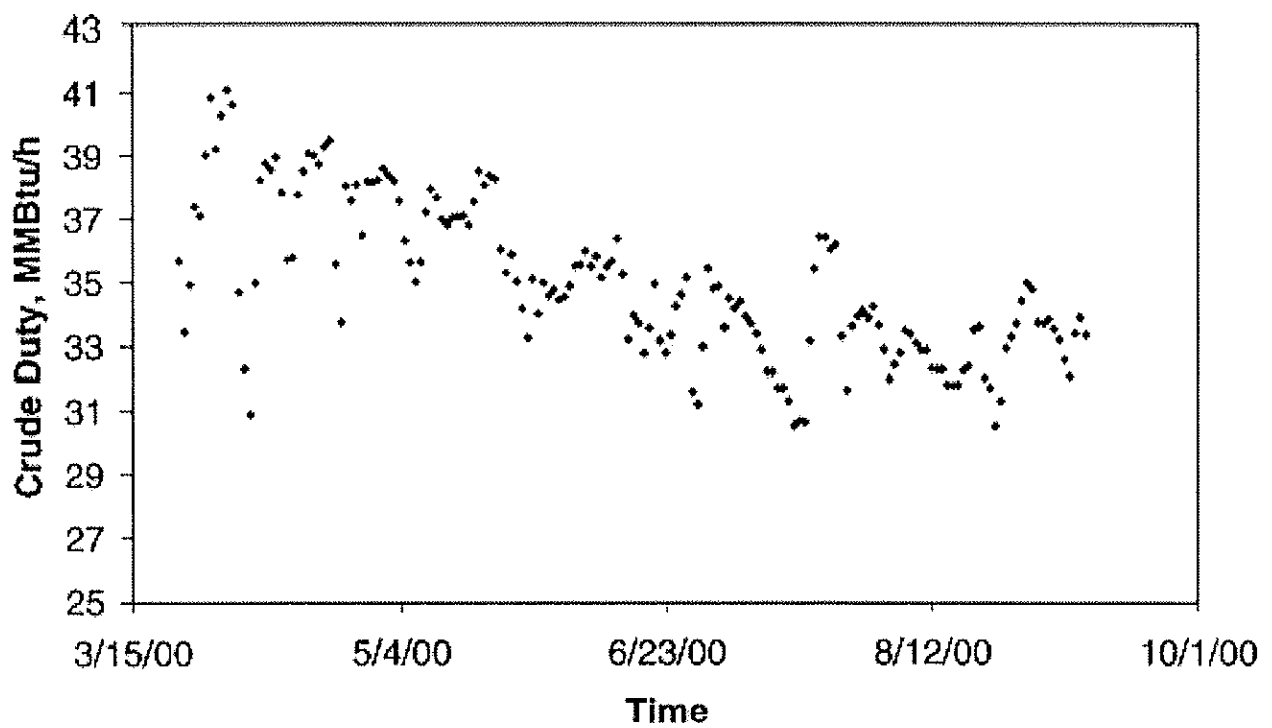


図 7 (b) ケース 2: HELIX バンドルの性能

HELIX バンドルの最初のセットは 1999 年中頃に設置されました。図 7(b)は、運転 6 ヶ月以上後の HELIX バンドルの性能を示します。2000 年 3 月から 2000 年 9 月の間で、HELIX バンドルにおいて達成した熱授受は、37MMBtu/hr から 33MMBtu/hr の間を変化しました。2001 年中頃には、HELIX バンドルにおいて達成した平均的な熱授受は 29MMBtu/hr でした。明白であるように、HELIX バンドルは、平均して、以前のセグメンタルバンドルより 50%以上高い熱の授受を実現しました。これは伝熱面の上のかなり減らされた汚れの堆積と HELIX 設計において成し遂げられる増強された伝熱性能の結果でした。HELIX バンドルにおける典型的な 2001 年中頃データの評価は、汚れ抵抗の合計はおおよそ $0.022 \text{ ft}^2 \text{ }^\circ\text{F} / \text{Btu}$ を示しました。それは、セグメンタルバンドルで観測された汚れ抵抗の 50%未満でした。HELIX バンドルの、より高い平均的な熱伝達性能は川下の加熱炉の燃費の有益な節約をもたらしました。2002 年前半の HELIX バンドルの点検は、ほとんど伝熱面の汚れを示しませんでした。要約すると、HELIX バンドルは、洗浄～洗浄間で、以前のセグメンタルバンドルより強化された伝熱性能を達成してる間、2 ～ 3 倍のより長い連続運転時間を実現しました。適用のフィードバックはこの処理装置の異なった設備で多くの原油の予熱器列における HELIX バンドルの採用に結びつきました。

Case 2: Crude Unit, Refinery in Canada

ケース 2：原油装置、カナダの製油所

22 基の HELIX 熱交換器；原油予熱サービスの 14 基及び原油の O.H 凝縮器の 8 基；がこの製油所で稼働中です。取り替えの HELIX バンドルは、14 基の原油予熱用熱交換器の最初の熱授受を目標とすることが提案された。取り替え前のセグメンタルバンドルは、毎年掃除を必要としました。2003 年 3 月現在、HELIX バンドルは 2 年以上の連続の強化された伝熱性能を示しました。図 8 (a) 及び (b) は、原油予熱熱交換器の最も熱い 4 基におけるセグメンタルと HELIX バンドルの間の時間と総括伝熱係数の変化のサンプルデータを示します。

熱交換器のこのセットでは、原油は $540 \text{ }^\circ\text{F}$ の減圧重質軽油 (HVGO) を用いておおよそ $370 \text{ }^\circ\text{F}$ から $475 \text{ }^\circ\text{F}$ へ予熱されます。予熱温度は、温度交切によって制限されます。12 月 1 日以降の 図 8(b)ヘリカルデータは、HVGO の入口温度の $25 \text{ }^\circ\text{F}$ の低下に連動して、原油流量の突然の 25%低下に対応しており、考慮から除外されるべきである。グラフから HELIX バンドルが初期の段階に時間とともに総括伝熱係数の低下にわずかな改善を示すのが観測されるが、その以降は従来のセグメンタルバンドルの性能レベルよりもはるかに高い漸近的かつ持続的な性能を達成している。伝えられるところによれば、HELIX バンドルが 3 年間以上の連続操作を達成すると予想され、それにより、連続運転時間を 3 倍増加させます。

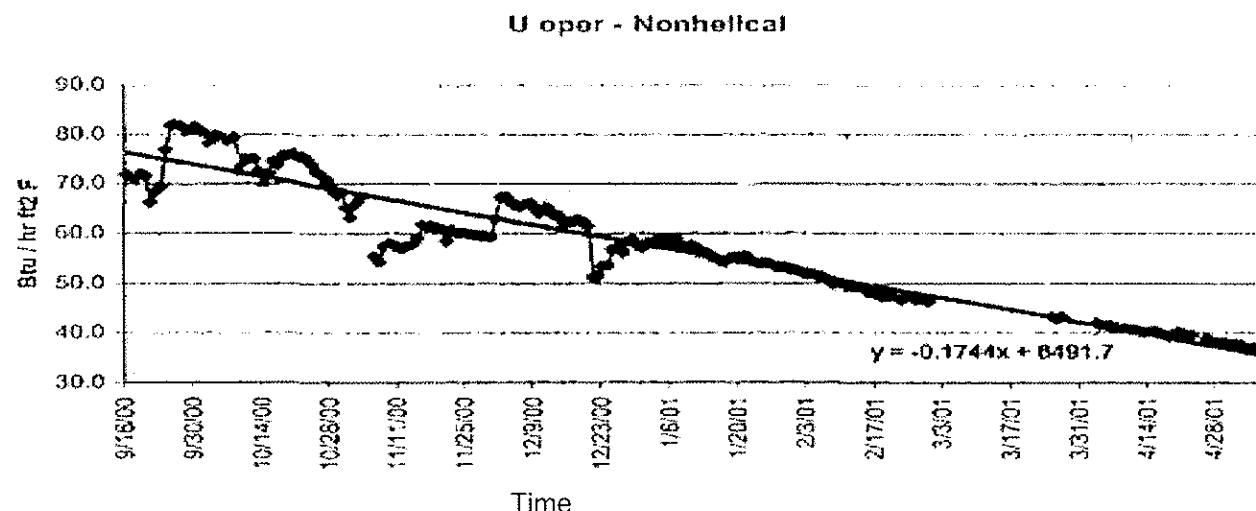


図 8(a) ケース 2: セグメンタル形バンドルの性能

U opor - Helical

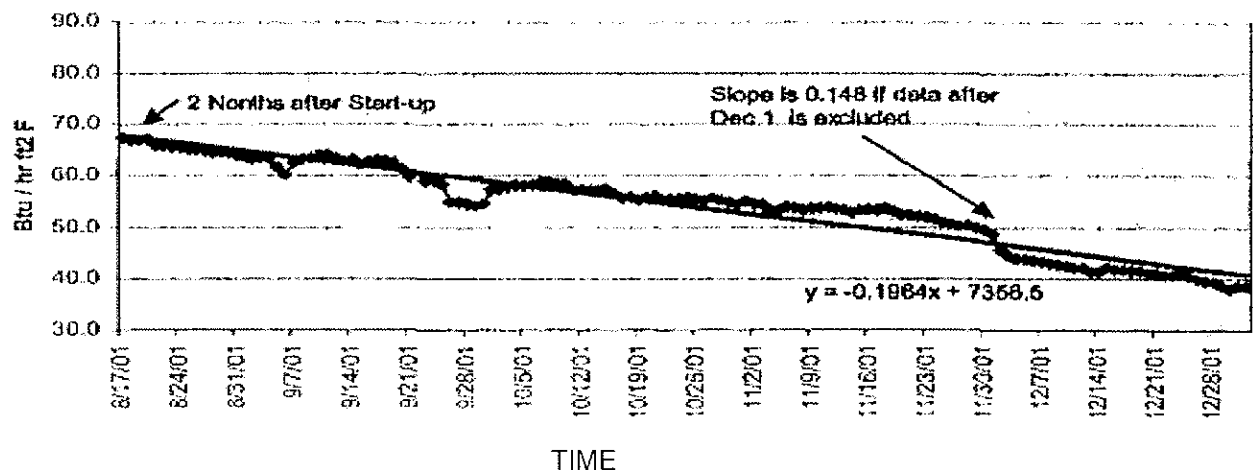


図 8(b) ケース 2 : HELIX バンドルの性能

原油の O.H.コンデンサーへの適用は、2つの直列のシェルを並列に4列に構成されています。50%の能力アップは、制限された胴側圧損範囲内でローフィンチューブでヘリカルバップルを用いたこのサービスに対して提供されました。プラントが能力アップを達成したことを確認して、2003 年 3 月現在、これらの HELIX バンドルで 2 年以上の成功した連続運転を報告しました。以前のセグメンタルバンドルは、この期間に 2～3 回洗浄を必要としました。HELIX バンドルはかなり強化された伝熱性能を達成して、長期間この性能を維持しました。3～4 倍長い稼働期間は、もうすでに HELIX バンドルで達成しています。

Case 3: Feed/Effluent Exchangers, Hydrotreater Unit, Refinery in the Netherland

ケース 3 : フィード/エフルエント熱交換器、水素処理装置、オランダの製油所

このアプリケーションは、直列 4 基の TEMA タイプ『BEU』のシェルから成ります。胴側の供給流体(フィード)が蒸発し、管内の反応器からの流出物(エフルエント)が凝縮します。既存のセグメンタルバンドルは、年に二回洗浄を必要とする厳しい胴側の汚れであった。取り替え用の HELIX バンドルは、このアプリケーションに供給された。それは 1998 年に据え付けられた。図 9(a)と(b)は、1 年運転後の最も熱いそして最も冷たい HELIX バンドルの写真を示す。わずかばかりの汚れが冷たいバンドルに、そして一方、均一なスケールタイプの汚れが熱いバンドルの伝熱面に観察された。

この装置の稼働期間は HELIX バンドルで 3~4 倍延長された。これらのバンドルは、水力制約制限内で、25%のより大きな処理能力を達成しました。また、HELIX バンドルのかなり高められた熱伝達性能が下流のヒーター修正を必要としないことによりかなりの追加節約を提供したと報告された。



図 9 (a) ケース 3 : 最冷端側ヘリックスバンドル

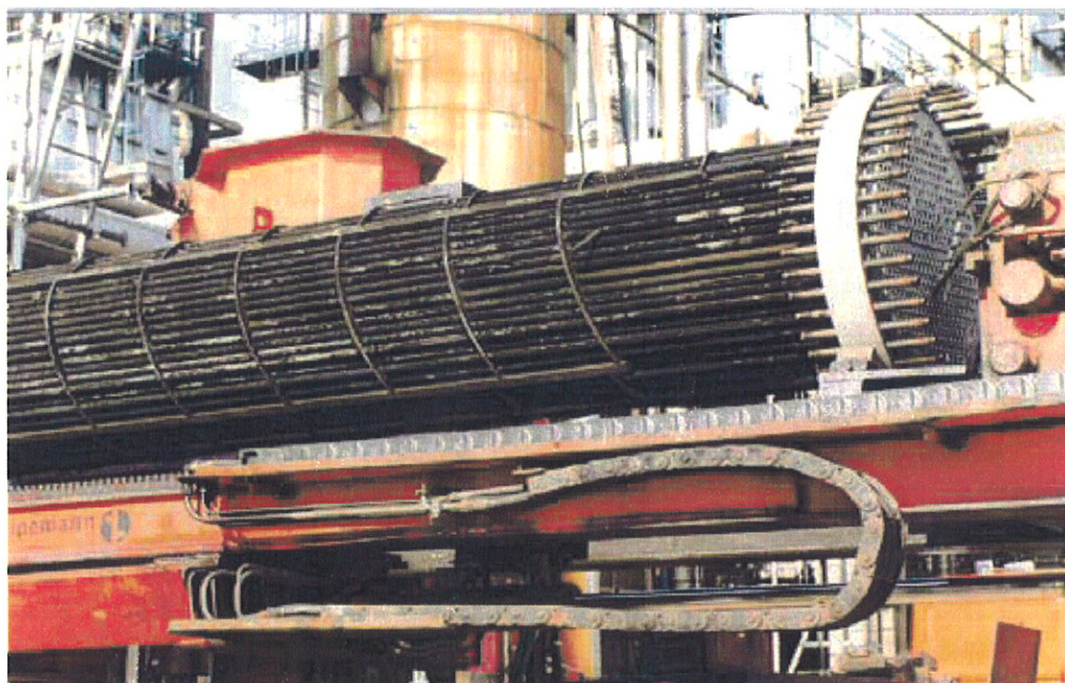


図 9 (b) ケース 3 : 最温端側ヘリックスバンドル

Case 4: Feed/Effluent Exchanger, Unifining-Platforming Unit, Refinery in Italy

Case4: フィード／エフルエント熱交換器、接触改質装置-プラットホーミング、イタリアの製油所

このフィード／エフルエント熱交換器は、胴側がフィードの蒸発での 4 直列配列のシェルで管内はエフルエントの凝縮です。既存のセグメンタルバンドルは、バンドルへのアクセスに対して厳しいでこぼこのある汚れのためにシェル胴を切断を行った。

図 10(a) は、胴半割切断したシェルの中のひどく汚されたセグメンタルバンドルを示す。取替用の HELIX バンドルは、2000 年にこの装置の 2 番目に熱いシェルに据え付けられました。

図 10(b) は、伝熱面上に一様に分散した汚れであるこの HELIX バンドルの U-曲がり部の写真を示す。その信頼できる運転と低減した汚れ特性とその一貫した強化された伝熱性能によって、かなりの経費の削減がこの装置における HELIX バンドルの採用によって成し遂げられました。



図 10(a) ケース：セグメンタルバンドルの激しい汚れ

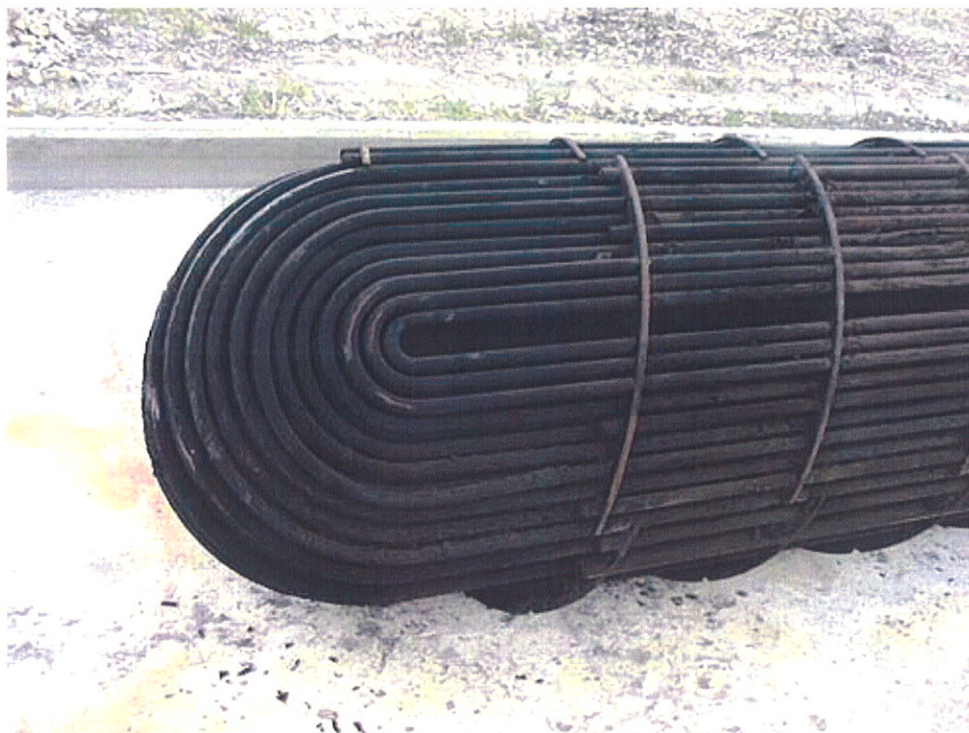


図 10(b) ケース 4：ヘリックスバンドルの一様に分散した汚れ

結 論

熱交換器の汚れは、それに関連付けられる運転と維持コストと同様に熱交換器群の資本コストに関しても企業に非常に高くつきます。HELIXCHANGER 熱交換器が典型的な汚れのサービスに採用されるときに、かなりの汚れの率を低減することに非常に効果的であることが証明されました。3〜4 倍より長い連続運転時間が、バンドル洗浄作業間で達成されます。

適切な注意は、温度および速度の境界が熱交換器幾何学的形状に高度に依存しており、原油の予熱操作の熱い端に置かれた熱交換器を設計する際に必要である。螺旋形バッフルの設計は、望ましい流速と温度プロファイルを維持するために最適の螺旋角度を選ぶ際に” 汚れのしきい値” 以下の条件を保つために大きな柔軟性を提供します。

NOMENCLATURE

E	activation energy, J/mol K
Pr	Prandtl number
R	gas constant, J/mol K
Re	Reynolds number
Rf	fouling resistance, m ² K/kW
t	time, s
T	temperature, K
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	constants in Eq. (1)
τ_w	Wall shear stress, Pa