

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1)伝熱促進の基本原理と新設熱交換器 OilCooler の hiTRAN 設計

渡部 高司*¹⁾ 酒井 昭二*²⁾ 駒田 信二*³⁾

1. はじめに

矢野経済研究所の市場調査報告「2017年度版 高効率熱交換器市場の現状と将来展望」¹⁾によると、自動車用ラジエーターなどを除く発電プラントや工場、空調（加温・冷却）、熱回収などに使われる2016年度の市場規模は725億円、2020年度は787億円に堅調に推移としているが、水素関連や未利用熱活用などの新しい用途にシフトするとしている。主要メーカーは東南アジアへの海外展開が加速。プラント向けは石化関連が伸び悩むが、電力分野の多様化に伴い好調となろう、としている。一方(株)グローバルインフォメーションの実施した熱交換器の世界市場予測²⁾は年間成長率8.3%で、2022年には206億米ドルに達するとしている。

日本の産業構造が大きく変化している中、新しい用途開発を求められつつも、熱交換器の市場は将来も堅調であるとの予測は、古典的なこの技術分野に携わるものとして心強い。

3次元伝熱素子 hiTRAN の管側伝熱促進効果については、2015年7月より5回にわたって連載^{3)~7)}した。今回はその後の日本での普及活動を中心に、応用事例を数回にわたって連載して行きたい。まずは hiTRAN 設計の基本の考え方を前回とは異なる視点で解説し、具体的には汎用 OilCooler の設計例を提示したい。

2. hiTRAN 設計の基本

hiTRAN の伝熱促進原理を一言でいえば、“管内流体の運動エネルギーを使って、流れを乱流化する”ことであるといえよう。さらに詳しくは、図1の写真に示したように、管壁面に接するループワイヤーによって、管壁境界膜の破壊によって、境界膜伝熱係数を大きくするものであって、層流から、 Re 数4000以下の乱流への遷移領域で特にその効果を発揮する。

図1にいろいろなサイズの hiTRAN の写真を示した

*¹⁾aPEC 株式会社 代表 渡部 高司

E-mail: watanabe@a-pec.jp

*²⁾同社 業務部長 酒井 昭二

E-mail: sakai@a-pec.jp

*³⁾同社 技術部長 駒田 信二

E-mail: komada@a-pec.jp

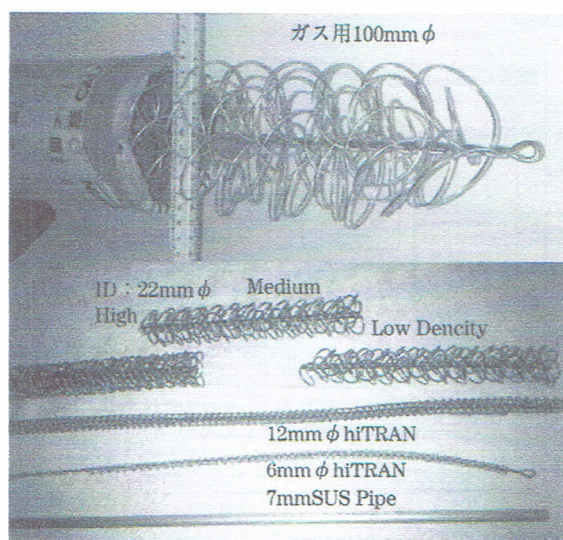


図1 サイズの異なる hiTRAN 素子

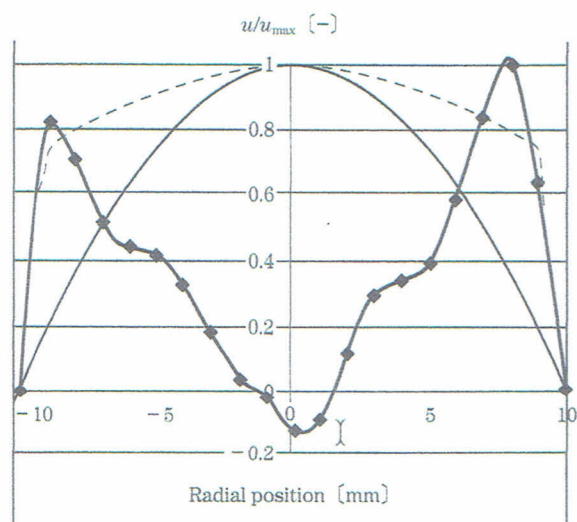


図2 hiTRAN 挿入した場合の断面速度の実測プロフィール
(鎖線：乱流，細線：層流の理論値)

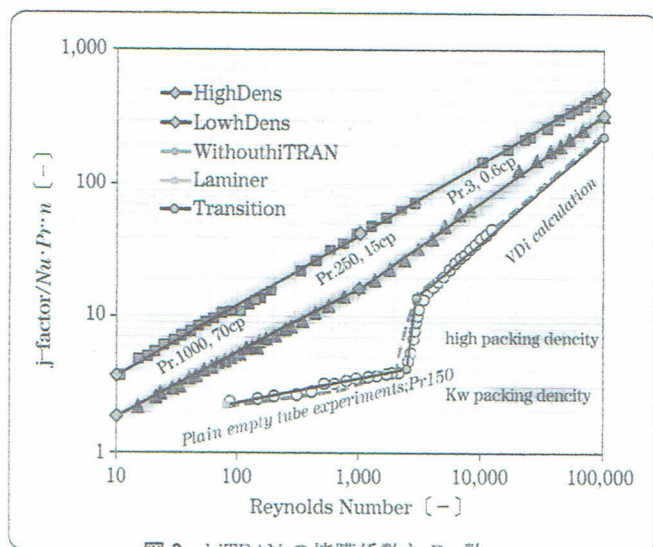


図3 hiTRANの境膜係数とRe数
(直線は近似曲線：下段は空洞管)

が、最大サイズは排熱ガス用の100mmφであり、最小直径は6mmφである。

このhiTRANが挿入された管内断面の速度分布を、CalGavin社のP.Droegmuller等⁸⁾は、レーザー・ドップラー速度測定法を用いて、図2に示したようにRe数500におけるhiTRAN挿入位置のすぐ下流の速度を測定している。この図の縦軸は流速比($u/u_{\max}$)であり、挿入されたhiTRANのループワイヤーが接触している壁面で乱流相当となり、中央部にはコアワイヤーがあるため、流速はゼロと観察されている。

また彼らは同時にループワイヤーが最高密度と最低密度のhiTRANの伝熱性能を提示⁸⁾している。図3は彼らの図に直線を書き込み、その近似式を求めたもので、高密度は1本、低密度は2本。空洞管は3本の直線で表される。

この図から判るように、層流あるいは乱流との遷移域においてhiTRANは管側の境膜係数 h_i を向上するが、乱流域ではその効果は明らかに小さい。このことをさらに良く理解するために、筆者らはこの近似式を用いて図4、5を作成した。図4は流速が同じ場合の境膜係数 h_i の倍率、図5は同じ境膜係数 h_i を得るための流速倍率をhiTRAN(最高密度と最低密度)と空洞管とを比較したものである。

もう少し説明すると、図4は、式(1)で表されるRe数が同じ場合、hiTRANによって得られる境膜伝熱係数 h_i の倍率を示しており、図5は同じ h_i を得るための管内流速比を表している。

$$Re = U \cdot D \cdot \rho / \mu \quad (1)$$

ここで、 U ：流速、 D ：管直径、 ρ ：密度、 μ ：粘度

これらの図から、hiTRANは低Re数領域で、より効果を発揮するものであって、管側の流速は遅くてもhiTRAN素子によって圧損が発生するが、それ以上に境膜係数 h_i が上がる効果を得ることになる。hiTRANの密度によって圧損は変化するが、hiTRAN設計では管パスは1パスとして、最高密度hiTRANを用いるのが基本である。もう一つ忘れてはならないのは、図4、5は管側境膜係数 h_i の倍率を表したものであって、熱交換器の性能を表す総括伝熱係数 U は式(2)で表され、胴側の境膜係数 h_o にも関係する。ここで F_i 、 F_o は内外の汚れ係数(抵抗)で、ここではゼロとすると、総括伝熱抵抗($1/U$)は境膜抵抗($1/h_i$ 、 $1/h_o$)と管厚みの伝熱抵抗(t/k ：厚み/伝熱係数)の和である。

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

ここで重要なのは、 h_i が改善されても、 h_o が小さ

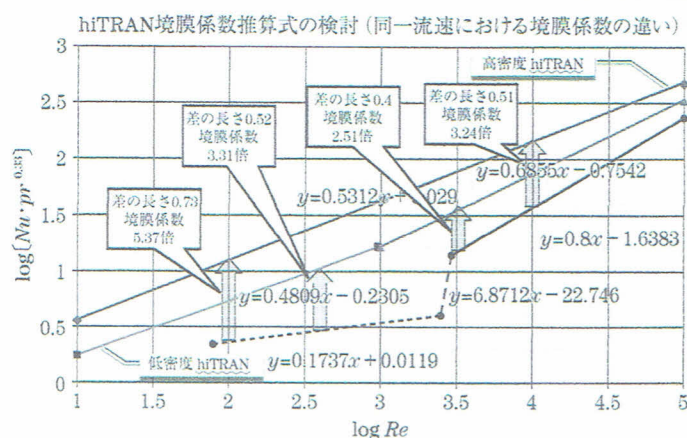


図4 同じ流速の場合の境膜係数 h_i の倍数

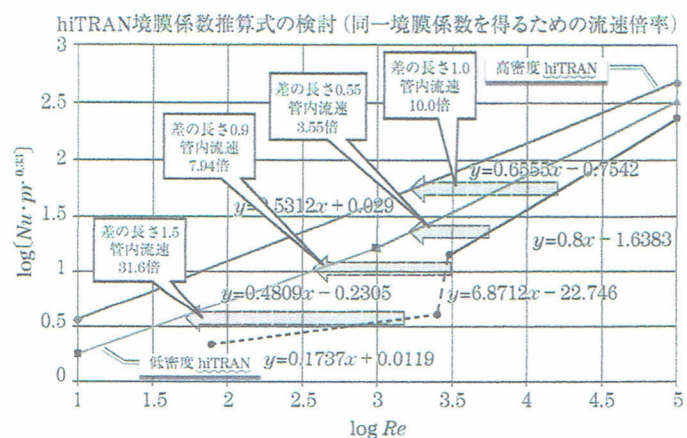


図5 同じ境膜係数 h_i を得るための流速倍率

ければ、 U 値は h_o に引きずられて大きな改善が得られないという事実である。hiTRAN で管側 h_i を改善する場合、低 Re 数となる流体を管側とするのが基本となる。以下具体的な hiTRAN 設計で検証してみる。

3. hiTRAN 設計

3-1. 新設熱交換器の hiTRAN 設計の考え方

新規に熱交換器を設計する場合の期待効果は、小型化、あるいは性能向上である。hiTRAN 素子のコスト上昇分、小型化・性能向上によって熱交換器本体あるいは運転のコストが低下することが必要であろう。このコスト低下分と hiTRAN 素子のコストが見合うものでなければならない。

hiTRAN の挿入によって圧力損失は大きくなるが、空洞管が管側パス数の増加することで流速を上げて得られる伝熱性能 ($h_{i\text{empty}}$) と、圧力損失のバランスに比べて、低パス数 (1パスが最適) で hiTRAN 挿入した場合の圧力損失が同等以下で、伝熱性能 ($h_{i\text{hiTRAN}}$) が勝っていないければ hiTRAN のメリットはない。

それではどの程度の効果が期待できるのかを産業機械用の汎用の Oil Cooler を例に検証してみよう。

3-2. 水冷式 Oil Cooler

産業機械用の水冷 Oil Cooler は、交換熱量に応じた標準機が用意されており、用途に応じて機種を選定¹⁰⁾ するようになっている。胴径は 125A から 300A で長さは 60~150cm の大きさで、交換熱量は 5kW から 150kW 程度まで広範囲の標準機が用意されている。これらの中から、胴径 125A、管長 0.9m を選定し、hiTRAN 設計を実施してみた。

(設計条件)

プロセス：

高温潤滑 Oil 55℃ ISOVG32 相当 20~80L/min
低温冷却水 30℃ 120L/min (60L/min)

Geometry (形状)：

胴側：125A、内径 133mm、クロスパス 7
管側：12.7mmΦ $t=0.8$, Copper, 長さ 0.9m
管パス 4 まで：最大本数は変化

(計算結果と考察)

市販標準品の場合は、高温 Oil を胴側 (hotShell) としているが、空洞管 (Empty) の管側は 4 パスまでを計算した。この場合、パスレーンによって設置

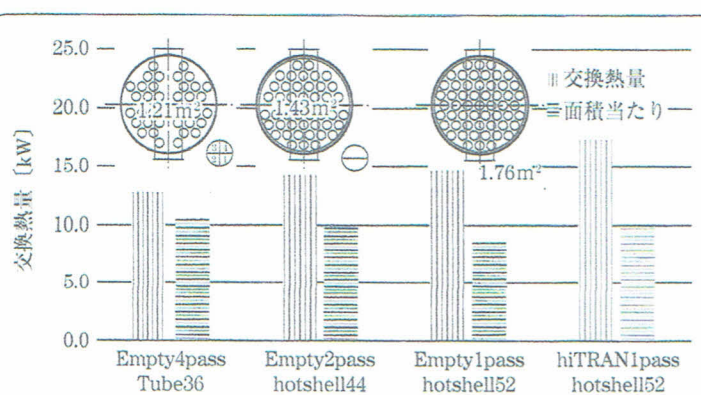


図6 管パスと交換熱量 (hotshell)

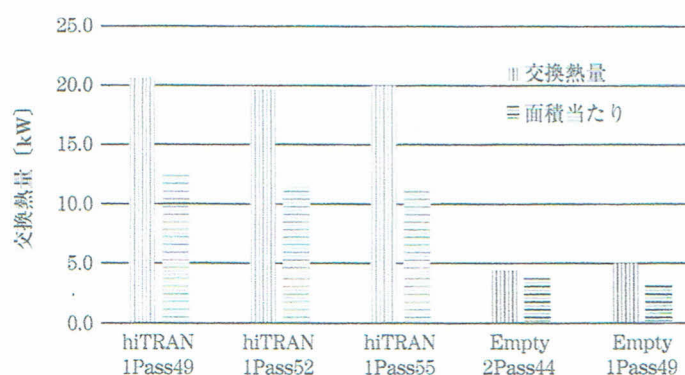


図7 hiTRAN 交換熱量 (hotTube)

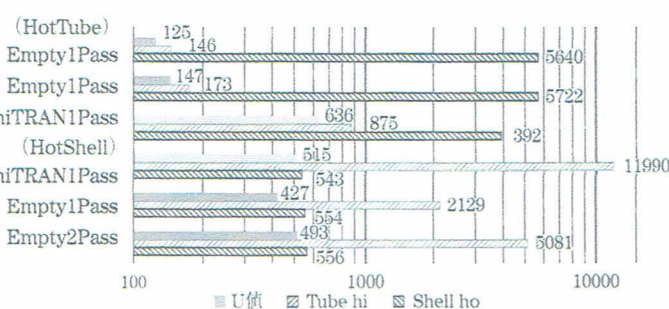


図8 hotTube と hotShell の h_o , h_i と U の値の関係

可能な管本数が変化する。図6には hotShell の場合の交換熱量 (Oil : 80L/min, 冷却水 : 120L/min) を比較した結果を示す。Empty の場合、管 Pass 数を増加するとパスレーンによって管の配置本数 (伝熱面積) が少なくなるため、面積当たりの交換熱量は増加するが、全体の熱交換量は低下する。管側の流速増加による h_i の増加が伝熱面積の低下 (69 %) を補うほどではないということである。hiTRAN の交換熱量増加は 115 % と、大きな伝熱促進効果は認められない。

図7は hotOil を管側に入れ替えた hiTRAN を挿入した場合の交換熱量を評価した結果である。管はパスレーンが無いいため 49, 52, 55 本まで挿入可能なので、計算している。本数増加の効果は小さいが、

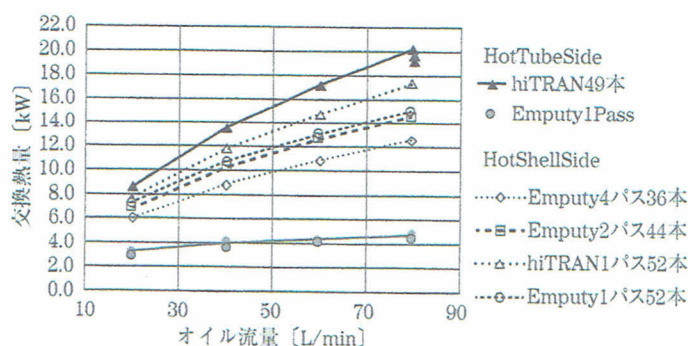


図9 hotShell と hotTube の hiTRAN 効果

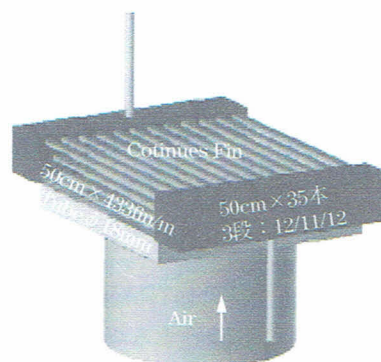


図10 標準的な AirCooler の形状

hiTRAN の伝熱促進効果は図6よりも133%と大きくなっている。しかし hotTube が Empty の場合、当然交換熱量は大きく低下し、通常設計では hotShell としているのは正しい。

図8はそれぞれ hotShell と hotTube の h_i , h_o と U 値のグラフであり、横軸は対数目盛になっている。そして数字は h_i , h_o [$W/m^2 \cdot K$] である。

この図から、hiTRAN の h_i は hotTube の場合が875に対して、hotShell の h_i は11,990に達している。それに対し、hotTube 側の h_o は4000、hotShell 側では550程度と小さい。 U 値は h_i , h_o の小さい方に引きずられるので、この場合は hiTRAN の効果の出やすい高粘度側の hotTube とするのが正しい選択である。管内外の h_i , h_o をバランスよくすることで hotOil が Tube 側の方が大きな U 値が得られる例でもある。

図9は市販標準品と同じように、Oil 流量と熱交換量の性能曲線として表現したものである。

市販標準品の2パス、 $1.5m^2$ は、本図の Empty2パス (44本= $1.48m^2$) と同様の性能曲線であった。一番性能の高い hiTRAN は133%の性能向上が認められ、全体として小型化された標準品のラインアップが可能となるが、hiTRAN の採用によるコストアップと見合うことが必要となる。

3-3. 空冷式 OilCooler

汎用の空冷式 OilCooler に対する hiTRAN の効果は既に前回の連載の中で詳しく報告⁶⁾している。本報では図10の形状を持つ空冷式 OilCooler の hiTRAN および Twist Tape の性能向上計算結果を報告する。

図11および図12は Air 量 $5.2m^3/s$ 、Oil 流量 $150L/min$ の条件で、3種の Oil の性能を計算した結果である。

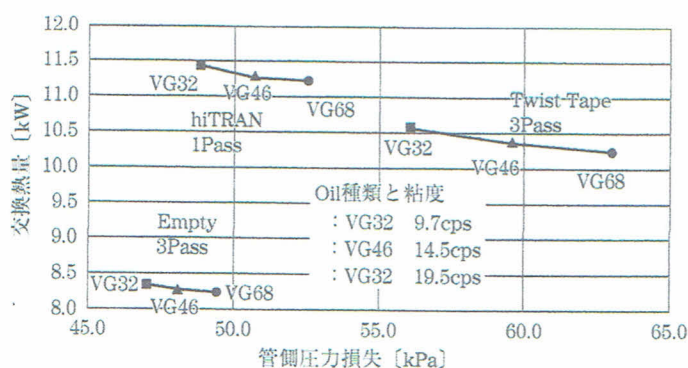


図11 管側圧力損失と交換熱量

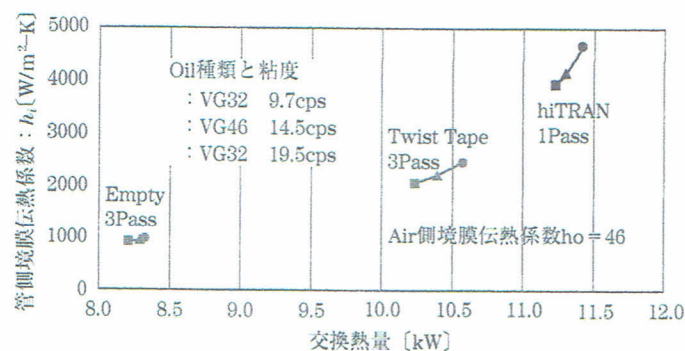


図12 管側境膜伝熱係数 h_i の比率

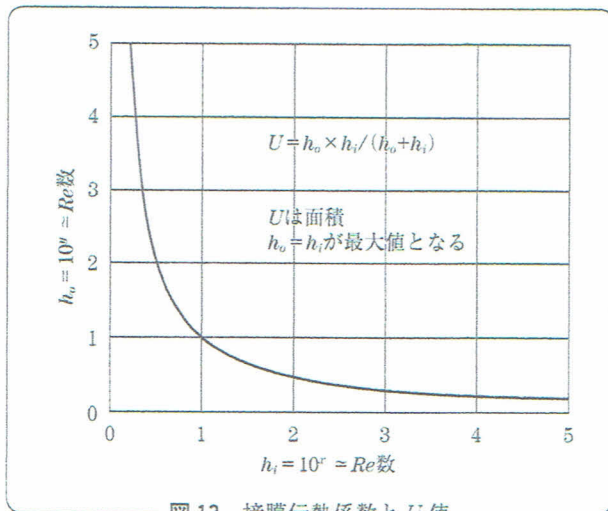
図11から hiTRAN の交換熱量は Empty に比べ、136%、Twist Tape に対しても110%であり、圧力損失は1パスなので Empty の3パスに近い。Oil 粘度は圧力損失には大きく影響するが、性能 [kW] への影響は小さい。図12は管側境膜伝熱係数 h_i と性能の関係を示したもので、hiTRAN の管側伝熱促進が重要であることが判る。

4 あとがき

今回は管側が粘度の高い Oil である hiTRAN 効果の出やすい設計事例であるが、次回は管内外の両流体が水である小型高性能熱交換器の設計とその実施事例について報告したい。

表1 胴側クロスパスを変更した場合の HTRI 計算結果

流体流量 (Oil=1, 水=2: kg/s)	流体配置	Empty (従来設計) 管 4 パス						hiTRAN (設計) 管 1 パス		
		HotShell			HotTube			HotTube		
胴側クロスパス (クロスパス数)		7	5	3	7	5	3	7	5	3
出口温度 (入口 55℃→) [℃]		48.6	49.8	51.0	30.6	30.6	30.6	32.5	32.5	32.4
出口温度 (入口 30℃→) [℃]		31.5	31.2	30.9	52.5	52.5	52.4	44.5	44.5	44.6
Shell 側圧損 [kPa]		8.4	6.1	5.1	11.0	7.3	5.7	10.4	7.9	6.3
Tube 側圧損 [kPa]		49.0	49.0	49.0	39.7	39.8	39.5	23.0	23.1	23.1
Shell h_o [W/m ² -K]		530	411	297	5715	5047	4577	5788	5719	5144
Tube h_i [W/m ² -K]		10306	10287	10266	229	231	243	886	886	887
Actual U 値 [W/m ² -K]		500	393.	287	194	195	203	682	681	673
Duty (交換熱量) [kW]		12.6	10.3	7.8	4.9	5.0	5.1	20.7	20.6	20.4
Shell Re 数 [-]		245	191	142	9684	7144	5310	9100	7495	6341
Shell 流速 [m/s]		0.42	0.26	0.13	0.71	0.44	0.23	0.65	0.43	0.25
Tube Re 数 [-]		32456	32370	32257	956	955	956	131	131	131
Tube 流速 [m/s]		2.31	2.31	2.31	1.5	1.5	1.5	0.24	0.24	0.24

図13 境膜伝熱係数と U 値

〈参考文献〉

- 1) <https://www.yano.co.jp/press/press.php/001709>
- 2) <https://www.gii.co.jp/search/advanced/>
- 3) 渡部, 酒井: 化学装置, Vol.57, No.7, p.60 (2015)
- 4) 渡部, 酒井: 化学装置, Vol.57, No.9, p.51 (2015)
- 5) 渡部, 酒井: 化学装置, Vol.57, No.12, p.53 (2015)
- 6) 渡部, 酒井: 化学装置, Vol.58, No.1, p.12 (2015)
- 7) 渡部, 酒井: 化学装置, Vol.58, No.3, p.54 (2015)
- 8) 渡部, 酒井: 化学装置, Vol.58, No.6, p.64 (2015)
- 9) p. Drogemuller et al: Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning-2013 (Peer-reviewed) June 09-14, 2013, Budapest, Hungary Published online www.heatexchanger-fouling.com
- 10) 例えば大生工業, 神威工業ホームページ
<http://www.taiseikogyo.co.jp/product/cooler/>
<http://www.kamui.co.jp/products/>

(補足資料)

hiTRAN 設計において, 両流体を Tube 側と Shell 側のどちらに配置すべきか (図8) について, その

原則を補足しておく。

総括伝熱係数は, 総括伝熱抵抗 ($1/U$) は両側の境膜伝熱抵抗 ($1/h_o$, $1/h_i$) と伝導抵抗および汚れ抵抗の和として (2) で表される。抵抗の小さい伝道と汚れを無視すると, U 値は図3内の式で与えられる。

すなわち U 値は $h_o \times h_i$ の面積であり, その最大値は $h_o = h_i$ である。一方 h_o , h_i は Re 数の関数 (図5) であり, 次式で表され, 粘性に反比例し, 流速に比例する。

$$Re = \rho v L / \mu = (\rho v^2) / (\mu v / L) \quad (3)$$

ここで,

v : 流体の平均速度 [m/s]

L : 流体の流れの長さ [m]

ρ : 流体の密度 [kg/m³]

μ : 流体の粘性係数 [kg/m·s]

すなわち, 管側伝熱促進材は, 粘度の高い Oil 側に使用することにより, より大きな hiTRAN 効果の得られることが期待される。管側の h_i の倍数は図4に示した通りで, Oil を管側に入れ替えた時の結果は図8のとおりであるが, 参考のために胴側のクロスパスを変えた場合の HTRI で計算した h_o , h_i と U 値の関係を表1に示す。

表1から, 従来設計では胴クロスパスと管パスを大きくとり, 高粘度の Oil を胴側に流すのが最適であるが, hiTRAN 設計では管側を伝熱促進するので, HotTube が最適で, クロスパスも大きくとる必要はない。圧力損失も管パスを1パスとすることで, 従来設計の半分程度に低下できることが明らかである。

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2) 温廃水からの熱回収用交換器の hiTRAN 設計と実施例

渡部 高司^{*1)} 酒井 昭二^{*2)} 駒田 信二^{*3)}

1. はじめに

前報¹⁾では hiTRAN 設計の原理と水冷、空冷の2つ汎用 Oil Cooler の設計事例について詳述した。今回は管内外の両流体が水の場合の hiTRAN の効果について、製作実施、試運転結果を含めて報告する。

温水と冷水の熱交換器はプラント全体の冷却水を海水で冷却する大型熱交換器の計算事例は前報²⁾で報告したとおり、設計余裕増が22%で、この余裕をポンプ動力低下に換算すると1,800万円/年であると試算した。このように両流体が同じ物性(粘度)の熱交換器では、Oil Cooler 程の伝熱促進効果が出にくいのも事実である。しかし温廃水からのエネルギー回収は、小型の温水ボイラーへの供給水の予熱用熱交換器として、温水を大量に使用する染色産業、食品工業等に広く使われている。近年はやりである都市型温泉スパ設備では、全体排水からの熱回収とは別に、個別温泉成分を含む湯船毎に、ろ過と殺菌処理後に冷めたお湯を熱交換器で熱水を用いて加温してリサイクルしている。今回の実施例が同様の設備を使用されている省エネ技術として参考になることを期待している。

2. つちゆ温泉エビ養殖用熱交換器

2-1. 事業計画

福島県中通りにある土湯温泉はこけしが名産の歴史ある温泉郷であるが、東日本大震災以降観光客は激減し、「エネルギーパーク」としての再生に挑戦されている。すでに地産地消のエネルギー生産システムとして、東鴨川の小水力発電所と温泉熱水を利用した源泉バイナリー発電所が稼働している。さら

にこの地熱を利用した事業のさらなる展開として、東南アジア原産の大型の淡水エビ(オニテナガエビ)の養殖事業を平成28年度の経済産業省の補助金を得て、「(株)元気アップつちゆ」社が事業主体として実施されたものである。福島県ではさまざまな復興事業が実施されているが、再生可能エネルギーの実証とその事業を公開する研修プログラムも実施されている情熱に敬意を表し、読者にはHP³⁾を訪問されることをお勧めしたい。

2-2. 熱交換器の役割と仕様

オニテナガエビの生育環境は28℃の淡水であり、バイナリー発電後の熱水で清水を加熱し、山中でエビの養殖を行い、地元の名産とする事業である。したがって峡谷にあるバイナリー発電所の近くの狭い場所に養殖用水槽と熱交換器を設置するため、極力小型でメンテナンスフリーであることが要求される。

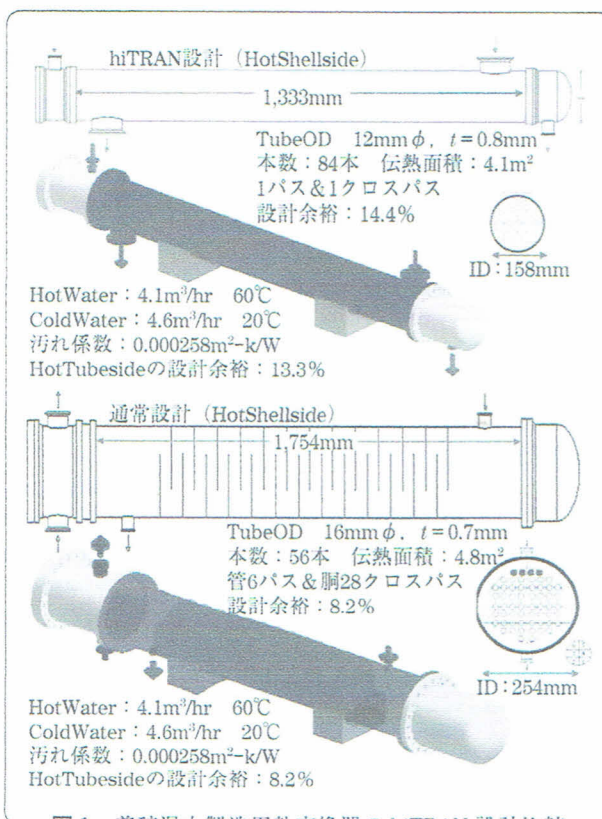


図1 養殖温水製造用熱交換器の hiTRAN 設計比較

^{*1)} aPEC 株式会社 代表 渡部 高司

E-mail: watanabe@a-pec.jp

^{*2)} 同社 業務部長 酒井 昭二

E-mail: sakai@a-pec.jp

^{*3)} 同社 技術部長 駒田 信二

E-mail: komada@a-pec.jp

表1 HTRIによる h_o 、 h_i と U 値おまの計算結果

	hiTRAN 設計	AES 通常設計
Shell 内径	158mm ϕ	254 mm ϕ
クロスパス/速度	1/0.12m/s	28/0.25m/s
レイノルズ数 Re	2,082	7,091
境膜伝熱係数 h_o	2,729 : W/m ² -K	2212 : W/m ² -K
Tube 外径/本数	12mm ϕ /84	16mm ϕ /56
管パス/速度	1/0.18	6/0.82
レイノルズ数 Re	1,786	11,930
境膜伝熱係数 h_i	6912 : W/m ² -K	3916 : W/m ² -K
総括伝熱係数 : U	874 : W/m ² -K	757 : W/m ² -K

結果として図1に示した通り、hiTRAN 設計は通常設計のバンドル容積の30% (26.1L/88.8L) まで小型化を達成できた。図1には設計段階での伝熱面積、設計余裕 (OverDesign) 他も記載している。

2-3. 設計の要点

通常設計の考え方は、境膜伝熱係数 (h_o , h_i) を大きくするために、Shell クロスパス、Tube パスを大きくして流速 (Re 数) を上げるのが基本である。一方 hiTRAN 設計では Tube 側 h_i は大きいので、Shell 側の h_o を大きくすることが重要となる。その方法として Shell 内のバッフル無しで管径を 16mm ϕ から 12mm ϕ とし、管配列のピッチ比も小さくして (1.375 $\rightarrow$ 1.28) Shell 側の流速を上げる工夫をした。図1のモデルで HTRI 計算した境膜伝熱係数と U 値は表1のとおりであり、Shell 側 h_o には管が高密度に充填された効果が表れている。

表1の計算値は HotShell の場合であるが、両流体の物性は同じなので、図1に示した通り HotTube でもほとんど変わりはない。また hiTRAN 設計が小さな Shell 内径に多くの管を組み込むことのできるの、管パスを区切るためのパスレーンの無駄のないことも非常に大きい。

2-4. 実機の製作・設置・試運転

hiTRAN 設計の 158mm ϕ の管板に 12mm ϕ の管 84 本を溶接固定することは困難である。そのため管板は片側 2 枚組とし、内部のシールパッキンで止水した。また管のたわみと振動防止のため、エキスパンドメタルを挟み込み固定している。メンテナンスのため、2 基 (A, B) の交互運転としているので、運転休止することなく、1 基は完全に分解洗浄が可能である。さらに hiTRAN 挿入管は管板に溶接されていないため、管の内外すべてを分解洗浄することも可能である。図2は現地の設置写真を示す。図中色の濃い配管 (耐熱塩ビ配管) が管側に繋がれており、

表2 運転データと U 値、汚れ係数計算

運転日	胴入出温	胴流量	管入出温	管流量
	℃ $\rightarrow$ /℃	m ³ /hr	℃ $\rightarrow$ /℃	m ³ /hr
3/21	25.3/31.5	5.1	62.8/28.6	1.15
4/04	25.9/31.0	4.8	63.0/27.9	1.26
4/27	19.9/29.4	6.0	61.0/27.0	1.64
運転日	総括伝熱係数 U 値		汚れ係数両側合算	
3/21	807 : W/m ² -K		0.00043 : m ² -K/m ²	
4/04	906 : W/m ² -K		0.00031 : m ² -K/m ²	
4/27	971 : W/m ² -K		0.00033 : m ² -K/m ²	

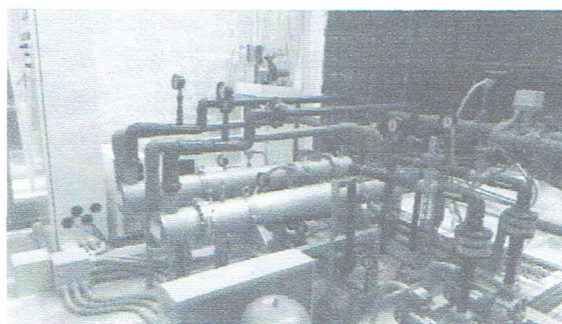


図2 エビ養殖用熱交換器設置写真

HotTube となっていることが判る。

現地据え付け後の表2の上段に示した運転データを見ると温泉水が当初計画の半分以下で目標の温度と流量の清水を得られていることから、十分な能力があることは明らかである。下段にはこのデータから計算される総括伝熱係数と汚れ係数を記載している。汚れ係数は設計段階で、図1に示した通り 0.000258×2 を想定していたが、運転データから計算されたその値は小さいことが確認された。

3. 中部電力様デモ用小型熱交の製作・展示

3-1. 展示の狙い

中部電力グループ様は、研究開発の中核として原子力安全技術研究所、電力技術研究所およびエネルギー応用研究所を技術開発本部¹⁾ (名古屋市緑区大高町) 内に擁されている。このうちエネルギー応用研究所はお客様のためのエネルギー利用技術の研究開発を目的としており、新しい省エネ技術の社内外の紹介と啓蒙活動も大きな部分となっている。そのエネルギー有効活用技術の一つとして、hiTRAN による伝熱促進技術を具体的なデモ装置として展示いただけることとなった。具体的には内部構造が見え、かつその効果が視覚的、直截的に理解できるデモシステムを設置することで社内外の技術者の参考とするためのものである。

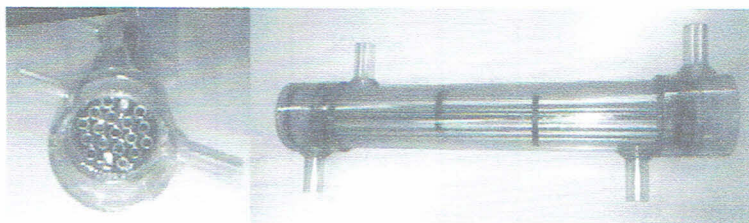


図3 デモ用熱交換器（端部管配列/長辺方向）

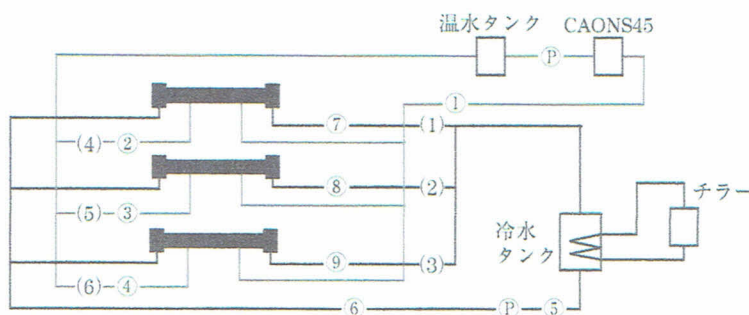


図4 デモシステムのフロー

3-2. 熱交換器とデモシステムの概要

熱交換器は、Shell に内径 52mmφ の透明塩ビ管を用い、Tube 側は外径 7mmφ（厚み=0.5mm）の SUS パイプを 17 本、バッフルを 2 枚とするクロスパス 3 の、図 3 に示すようなデモ用小型熱交換器を 3 台試作した。管と胴の分離は塩ビ管板を熱硬化性樹脂で封止する方法とした。

デモ機は、管内に hiTRAN 挿入、何も入らない Empty、および汚れとして、管外面にペイントを塗った fouling の 3 台を用意し、比較していただく。

中部電力で用意されたデモシステムのフローは図 4 のとおりで、15℃ のチラー冷水と 55℃ の温水を 6L/min で同時に熱交換する。図中①から⑨は温度の測定点、(1)から(6)は流量の測定点である。等流量の 3 台同時運転の他、1 台毎に最大流量 16L/min. の運転も可能である。

図 5 は実際にパネル上に取り付けた熱交換器と周辺設備の写真である。熱交換器よりもシステム配管の方が大きくならざるを得ない。

3-3. デモ機運転の結果と考察

本デモ設備の運転結果で得られたそれぞれデモ機の出入口温度と流量から熱交換量を計算し、測定時間（時刻）毎にプロットした結果を図 6 に示す。熱交換量は温水側（HotSide）と冷水側（ColdSide）と同じでなければならないが、平均をせずに実験誤差として併記してある。また同時に温水と冷水の入口温度も併せてプロットしておいた。

図 6 を見ると運転開始から 1 時間程度は徐々に熱

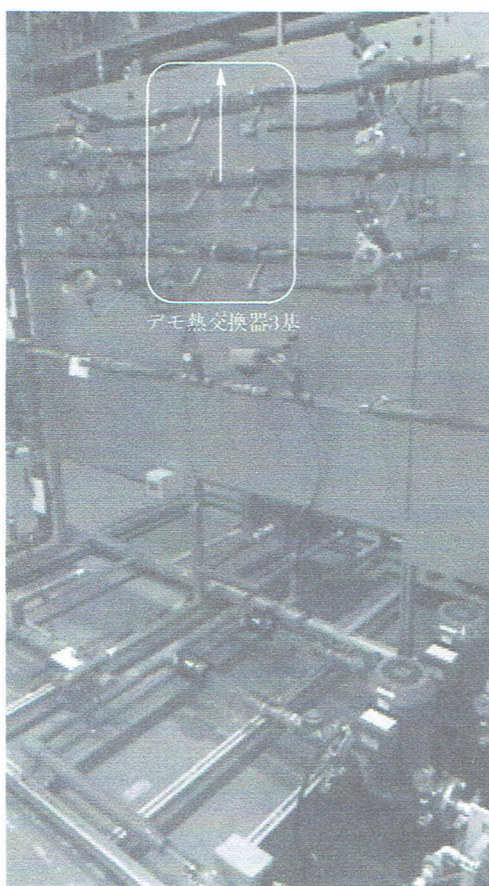
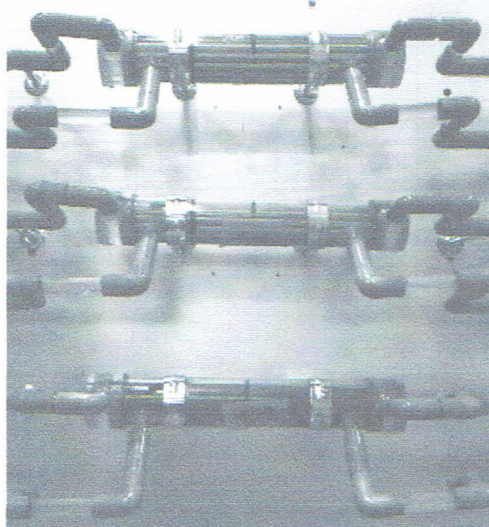


図5 デモシステムの現物パネル

交換量が増加している。そして併記した温水、冷水の温度も増加している。これはシステム全体の熱容量のバランスが取れるまでの時間遅れと推定できる。

この事実から運転後半のデータの平均値を基に 3 つのデモ機の熱交換量を比較したのが図 7 である。図 7 には設計段階で計算した HTRI による計算値も示してある。また図 8 には個別にその流量を 16L/min にまで上げた熱交換量の比較も示した。

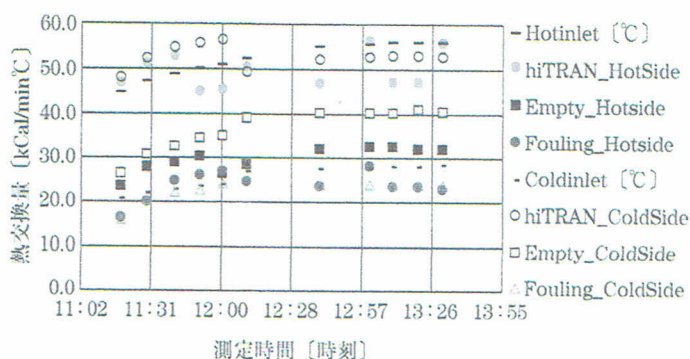


図6 熱交換量の時間推移

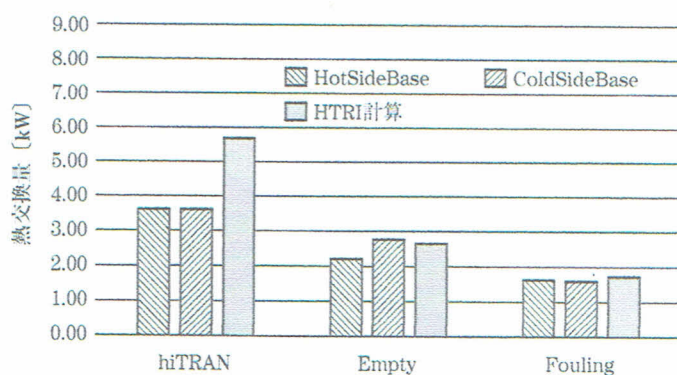


図7 6L/min 熱交換量の比較

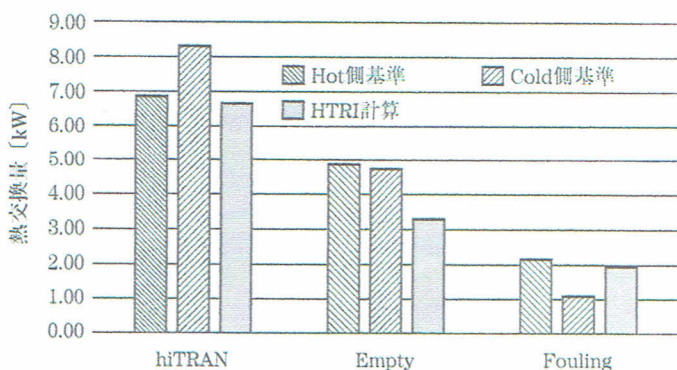


図8 16L/min 熱交換量の比較

図7のhiTRANはHTRI設計値よりも実績値がかなり小さいが、Emptyに比べると十分有意差はある。さらに流量の多い場合、実験値は計算値を上回っており、hiTRANの伝熱促進効果は間違いない。流量の小さい場合、その測定誤差も大きくなり、実験誤差となってしまうのは避けられないであろう。

この両方の実験データをHTRIにインプットして評定(Rating)モードで計算した結果を表3に示す。これはHTRI計算することで、境膜伝熱係数 h_o 、 h_i と U 値を予測する意味がある。

表3 HTRIによる伝熱係数計算値

	hiTRAN		Empty		Fouling	
流量	6L/m	16L/m	6L/m	16L/m	6L/m	16L/m
SinT	52.2	50.4	52.2	50.4	47.3	50.6
SoutT	43.8	43.8	47.5	46	44.0	48.5
TinT	26.7	25.1	26.7	24.7	21.6	21.9
ToutT	36.5	32.6	33.2	29	25.0	24.0
S_{h_o}	3.048	4.946	2.982	5.038	2.909	4.832
T_{h_i}	6.635	12.074	1.058	2.622	1.027	2.127
U 値	1.798	2.994	679	1474	513	694
S_{Re}	1.933	4.931	2.001	4.718	1.869	4.720
T_{Re}	1.348	3.826	1.308	3.893	1.352	3.890
Duty	3.5	6.9	2.1	4.8	1.4	2.2

流量: L/min, SinT: Shell inlet Temp. °C, SoutT: Shell outlet Temp. °C, TinT: Tube inlet Temp. °C, ToutT: Tube inlet Temp. °C, S_{h_o} : Shell 側境膜伝熱係数: W/m^2-K , T_{h_i} : Tube 側境膜伝熱係数: W/m^2-K
 U 値: 総括伝熱係数: W/m^2-K , S_{Re} : Shell 側レイノルズ数: Re , T_{Re} : Tube 側レイノルズ数: Re , Duty: 熱交換量 kW

6L/minの Re 値はShell, Tubeとも2,000程度の層流に近い遷移域, 16L/minでやっと乱流域に近づいている。hiTRAN挿入で h_i は5~6倍と計算されている。ペイントを塗ったfoulingはEmptyの50~70%以下に熱交換量の落ちていることが明らかである。

4. あとがき

熱容量の大きなお湯と水の熱交換における管側伝熱促進材hiTRANの効果について実施例を中心に報告した。水/水の場合にはOilCoolerのように粘度の高いOilを管側にすることによる200%以上に及ぶ劇的な性能向上は期待できず、良いところ150%程度である。しかしhiTRANの h_i 向上に対応できる胴側 h_o 向上の技術があれば、さらに U 値を上げられる期待が持てることが

明らかとなった。低温水は産業、民生を含めて非常に多く廃棄されており、ここからの熱回収は省エネルギーの大きなテーマであり、研究を続けたい。

今回は熱交換器の性能を低下させる汚れとその評価方法の歴史と、典型的な化学反応汚れと考えられる実プラントデータの解析結果およびその汚れの回避方法の方策について報告したい。

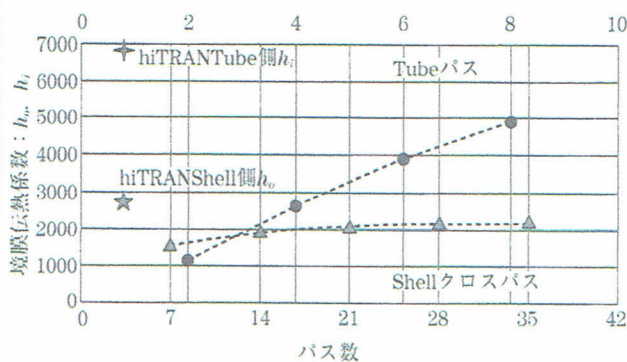


図9 Shell/Tube のパス数と h_o , h_i

〈参考文献〉

- 1) 渡部, 酒井, 駒田: 化学装置, Vol.60, No.12, p.57 (2018)
- 2) 渡部, 酒井: 化学装置, Vol.57, No.9, p.60 (2015)
- 3) <http://www.genkiupcity.jp/jigyo03.html>
- 4) <http://www.chuden.co.jp/>
http://www.chuden.co.jp/resource/corporate/stu_gijutsu_06.pdf

(補足資料)

通常設計 (先の AES) では流速を上げて h_o , h_i を大きくするのが常套手段であるが, 実際に Shell クロスパスと Tube パスを変化させた場合, どの程度の変化が起こるのかを HTRI で計算した。その結果は図9に示したとおり, Tube パスの効果の方がクロスパスよりも大きい。さらにつちゆ用に hiTRAN 設計した Tube 側と Shell 側の h_i と h_o も 1 パスの位置にプロットしておいた。

この図から hiTRAN 管側の h_i が非常に大きいこと, クロスパスを大きくすることなく, 今回設計のように Shell 側 1 パスでも管の充填密度を上げれば, クロスパス以上の h_o の得られることが明らかとなった。クロスパスの h_o に対する効率が悪いのは, 管 6 パスによるパスレーン配置のために, 管の充填密度が低下するためである。1 パスでさらに Shell 側の伝熱促進が図れれば, hiTRAN との組み合わせで促進効果はさらに大きくなる。ちなみに図9の Re 数は Tube パス 2~8 で 3,800~12,300, Shell 側のそれはクロスパス 7~35 で 2,400~8,400 にまで変化している。

図10にはパス数と OverDesign, 図11には U 値と

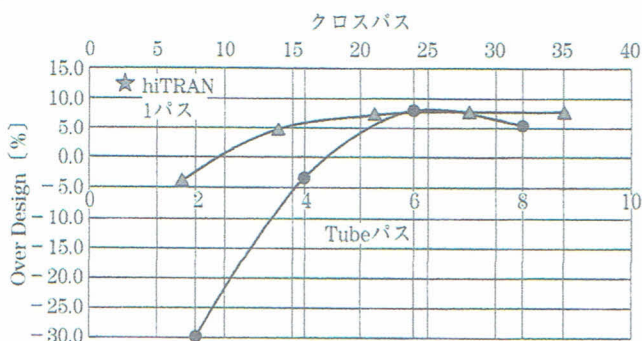


図10 Shell/Tube のパス数 OverDesign

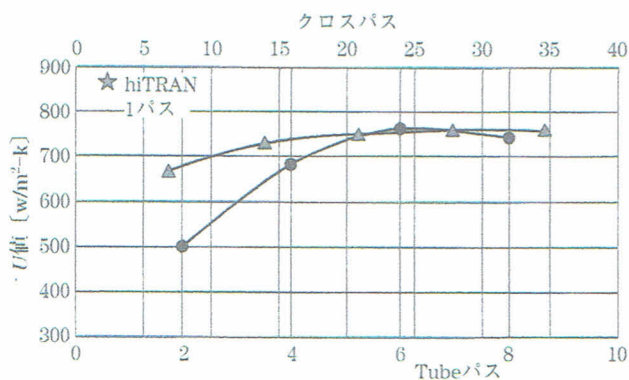


図11 Shell/Tube のパス数と U 値

の関係を示した。通常設計の場合, Tube パスの低下は大きな性能低下をもたらす, クロスパスを大きくしてもさほどの性能向上につながらないことが明らかである。それに比べて, hiTRAN 設計のつちゆ用熱交換器は 1 パスで十分な性能を達成している。hiTRAN は圧力損失が大きくなるとされているが, 今回の 6 パスの管側圧損が 13.6kPa であるのに対し, hiTRAN の 1 パスは 5.0kPa と小さく計算されている。言い換えれば同じ圧力損失で得られる境膜伝熱係数 h_i は Tube パスを大きくするよりもはるかに効果的であると言える。

hiTRAN の圧力損失と境膜伝熱係数の計算は HTRI と HTFS (aspen tech) の熱交換器設計ソフトウェアに hiTRAN.SP ソフトをプラグインすることで可能となる。このソフトは Calgavin.com に登録することによって誰でも無償で使用する事ができる。

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3)熱交換器性能を低下させる化学反応汚れのデータ解析と改善方法

渡部 高司* 酒井 昭二** 駒田 信二***

1. はじめに

静止機器である熱交換器はメンテナンスの容易な装置に分類されるが、伝熱面の汚れによってその性能は大きく低下する。この性能劣化は薬剤等による洗浄操作によってある程度は回復できるが、完全に回復するためには、熱交換器の分解掃除をも必要となる。この汚れの防止は、原油精製プラントでは重大な課題であり、数多くの開発研究がなされている。

3次元伝熱素子 hiTRAN の管側伝熱促進効果については、すでに事例を中心に紹介¹⁾したが、今回は実際のプラントの汚れ現象の解析と hiTRAN 設計による改善案について報告したい。

2. 交換器設計と汚れ係数

2-1. 汚れとその研究開発状況

熱交換器の汚れは、熱交換する両流体の熱量のみを交換する伝熱管の内外面に付着あるいは固着し、伝熱性能を阻害する物質であり、熱交換器の性能すなわち総括伝熱係数を経時的に低下させるものであって、汚れ物質によって、一般的に表1のように分類される。

これら汚れの中で最も重大で、よく研究されているのが、石油精製プラント内の原油予熱工程で観察される化学反応汚れである。先進国におけるこの汚れによる社会的損失は、GNPの0.25%にも達し、1992年では450億ドルに／年に達するとの報告もある²⁾。

この重要性に鑑み、1995年から熱交換器の汚れおよび洗浄 (Heat Exchanger Fouling and Cleaning) と題する国際会議 (Engineering Conferences

表1 汚れの種類

① 粒子沈降汚れ	浮遊固形粒子の沈降、堆積
② 結晶化汚れ	成分の溶解度変化による析出
③ 化学反応汚れ	反応による高分子成分の沈着
④ 腐食汚れ	錆の発生と堆積
⑤ 生物汚れ	微生物、藻などの発生と堆積
⑥ 凍結汚れ	凍結温度以下冷却され固着

近年ここでは自動車、発電、食品、その他産業で問題となっているあらゆる種類の汚れについて、その機構、抑制対策と洗浄に関する研究報告がなされており、たとえば2015年の報文は67件に達している³⁾。

International (ECI)) が2年おきに開催されている。この活動はWebSiteに公開されているので、参照されたい³⁾。

(<http://www.heatexchanger-fouling.com/index.htm>)

2-2. 化学反応汚れ (Ebert & Panchal モデル)

原油予熱工程の化学反応汚れの初期反応を、記述するための手法として、“汚れ閾値 (しきいち)”を提唱したのは、1995年に開催された先の国際会議³⁾である。その後のこのモデルの発展については、2015年の同会議でレビュー⁴⁾されている。

CalGavin社のhiTRANの汚れ防止効果も2013年の会議で報告⁵⁾されており、Ebert & Panchalの閾値モデルを図1のように説明しているのが判りやすい。そして汚れの速度は式(1)のように、発生速度から剥離速度を減じた形となり、発生速度は化学反応のアレニウスの式 (壁面温度)、剥離速度は壁面せん断応力 (流速) の関数である。

$$\text{汚れ速度} = \text{発生速度} - \text{剥離速度} \quad (1)$$

ここで、発生速度 $\propto$ 化学反応のアレニウス式

$$\text{剥離速度} \propto \text{壁面せん断応力}$$

である。

このような一次反応で、一般的な活性化エネルギーを持つ一次反応の反応速度は、10℃上がるごとに2倍になると計算されている。

* aPEC 株式会社 代表 渡部 高司

E-mail: watanabe@a-pec.jp

** (株)エプシロン 研究員 酒井 昭二

E-mail: sakai@a-pec.jp

*** 同社 技術部長 駒田 信二

E-mail: komada@a-pec.jp

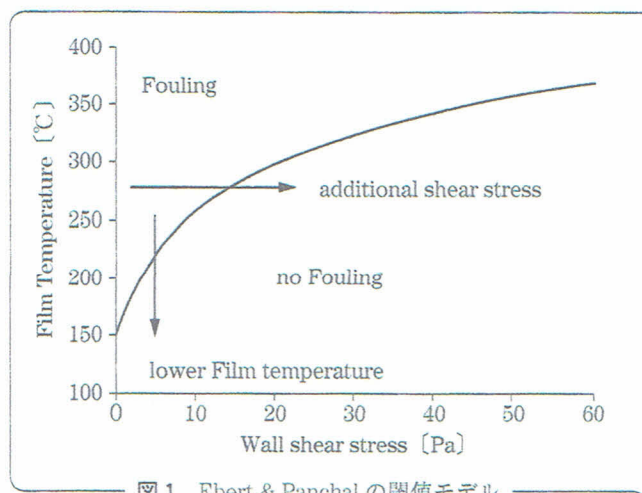


図1 Ebert & Panchal の閾値モデル

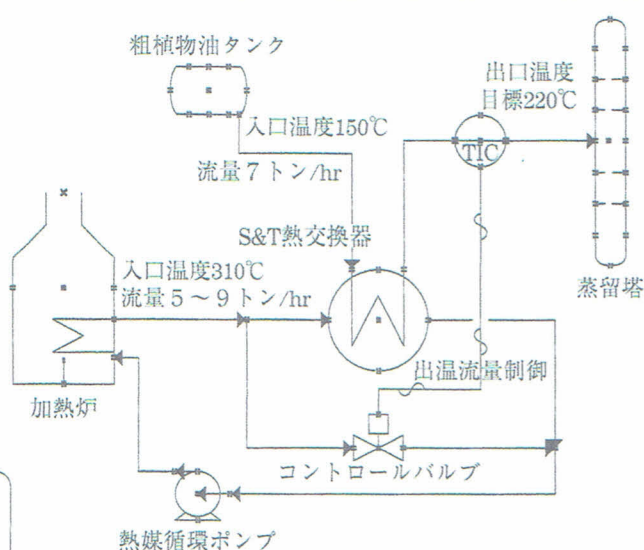
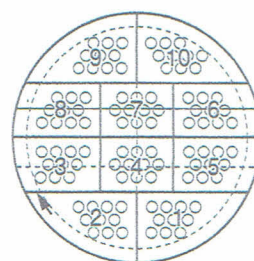


図2 粗植物油の精製工程



TEMA形式：AEL 管径：19mm
 胴径：400mm 管長：6 m
 クロスパス：29 本数：100本
 伝熱面積：35.5m² 管パス：10
 設計時汚れ係数：0.0022W/m²-K

図3 熱交換器の仕様

2-3. 汚れ係数の計算と実測

Duty (伝熱量) の与えられた熱交換器の設計段階で、汚れ係数 (= 抵抗) は流体の種類によって変わる経験値が用いられる。一方、理論計算から得られた $U_{required}$ 値と実際に製作する U_{actual} 値との設計余裕 (Over Design) [%] は、クリーンな状態での要求 U 値に対する余裕分という意味では同じと考えられる。具体的には予想される汚れ係数を含んだ上で、さらに設計余裕として 10~20 % を上乘せるのが一般的である。

総括伝熱係数は、その逆数である総括伝熱抵抗 ($1/U$) が、管内外の境膜伝熱抵抗 ($1/h_i$, $1/h_o$) と管肉厚の熱伝導抵抗 (t/k) と汚れ抵抗 (R_f) の和として次式で与えられる。

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

運転開始のクリーンな条件の総括伝熱係数を U_{clean} 、時間経過後を U_{dirty} とすると、運転経過後の R_f は式 (3) で、与えられる⁶⁾。

$$R_f = (1/U_{dirty}) - (1/U_{clean}) \quad (3)$$

すなわち、設計段階では R_f を見込んで計算するが、運転状態の R_f の変化は、プラント運転データから計算した U_d と U_c から得られる。 R_f の計算はプラントの両流体の温度と流量から (4) 式からも得られるが、筆者らはより詳細な情報 (境膜伝熱係数、パス毎温度など) を得るために、HTRI ソフトをあえて用いた。

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (4)$$

ここで Q : 熱交換量, U : 総括伝熱係数

A : 伝熱面積, ΔT_m : 両流体の対数平均温度差である。

3. 化学反応汚れのプロセス解析

3-1. プロセス概要

対象は原油予熱工程のような大型熱交換器ではなく、粗植物油を精留する前に熱媒油を用いて予熱するためのもので、プロセスの概要は図2のとおりである。

プロセスは出口温度を検出し、制御弁で熱媒油の流量を増減する方式で、汚れの進行に伴って胴側熱媒油流量が増加して行く。

熱交換器の諸元は図3のとおりで、設計時の汚れ係数は 0.0022 と大きく見積もっており、管パスは 10、クロスパスも 29 と大きい。

3-3. 運転データと汚れの推移

図4は胴側熱媒油と粗植物油の流量の推移で、4日目には熱媒油の流量が粗植物油の流量を追い越している。粗植物油の出口温度は、目標値の 220 °C より、どんどん低下し、16日目には洗浄作業のためのシャットダウンとなっている。熱交換器は A, B 2 台の交互運転であり、管側の洗浄作業は交互の休止中に、ケミカル洗浄 (薬液循環)、開放スチーム洗浄、

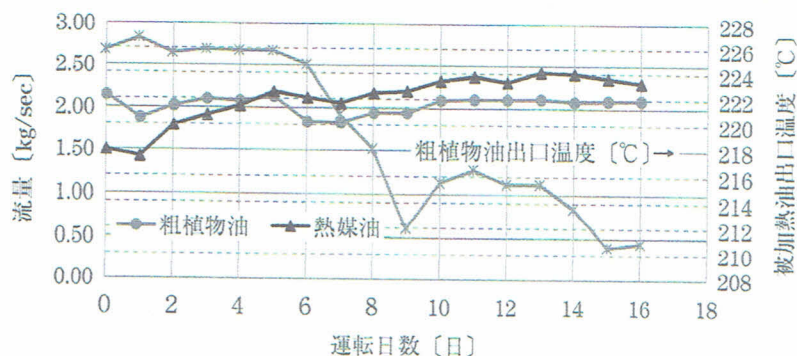


図4 粗植物油出口温度と熱媒油流量の推移

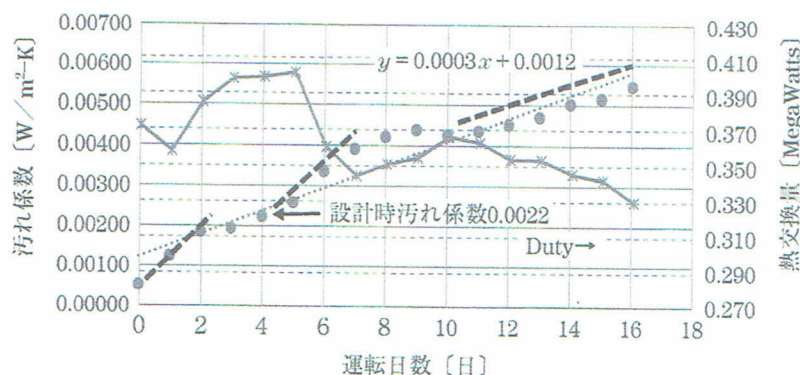


図5 汚れ係数と熱交換量の推移

高圧ジェット水洗浄からなる一連作業が実施されており、16日毎のメンテナンスの負担は非常に大きい。

図5は汚れ係数の変化と熱交換量 (Duty) の推移を示したものである。汚れ係数は熱媒油側の汚れ係数は一定 (0.000176) として、管側の汚れ係数を試行錯誤で入力し、設計余裕が $\pm 2\%$ となるまで、HTRI ソフトで計算して求めた。

汚れ係数の増加と Duty の減少は4日目以降ではよく一致している。汚れ係数の全体プロットが1次近似したときは図中の相関式のように、求められ、

汚れ速度は0.0003/dayとなっている。しかし速度は前半7日目までの2段階で、平均より2倍程度大きい (太い点線) と観察される。

最初の3日までの汚れ係数が小さいにもかかわらず、その Duty が4, 5, 6日目よりも小さい理由は、運転初期では高温胴側と低温管側の温度が逆転するという、いわゆる温度クロスが生じているためである。図6に0, 3, 8, 16日運転後の胴側と管側の温度を示す。この内部温度予測計算は HTIR を用いて現場データを解析しているから得られるものであって、大きな管パス数と大きな設計時汚れ係数を採用した場合に起こる現象である。

温度クロスが汚れによって解消された以降の5~7日目までの汚れ速度が大きいのは、図4に示したように、この間の粗植物油の流量が15%程度低下しているため、せん断力による剥がれが小さいためかもしれない。

この熱交換器の設計思想は、汚れの発生しやすい管側のせん断応力を上げるために、10パスとし、流速は1.4m/sに達している。しかしこの大きな管パス数と大きな両流体の温度差 (150℃ $\leftrightarrow$ 312℃) が汚れの小さい運転初期段階の温度クロスの原因となっている。

3-4. 温度クロスの回避

この温度クロスを根本的に解消するためには、管パスを完全向流の1パスとするか、交換器を分割し

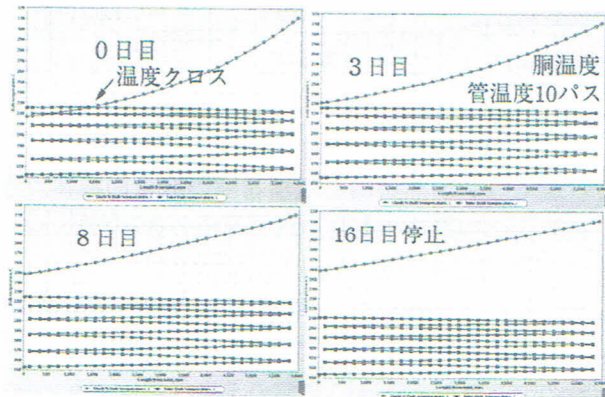


図6 各運転日数と内部の温度 (HTRI)

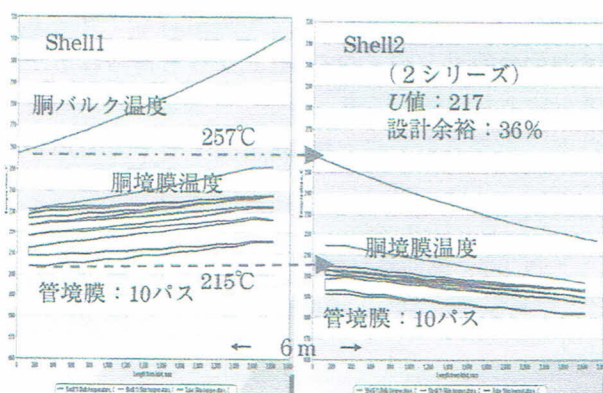


図7 3mの2シリーズ熱交とした場合

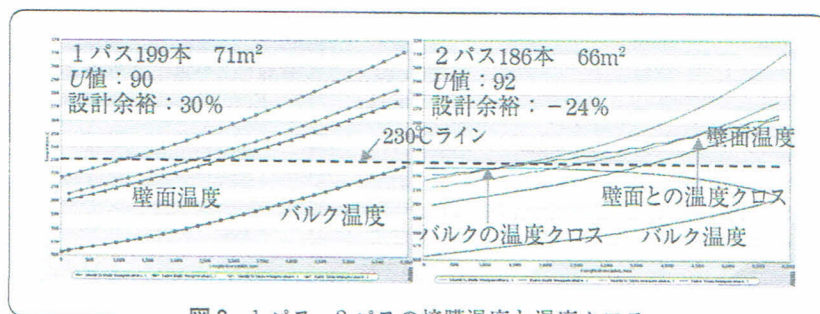


図8 1パス、2パスの境膜温度と温度クロス

てシリーズで運転するしか方法はない。図7は管長6mを2分割して直列（シリーズ）に繋いだ場合である。

その結果、温度クロスは解消し、35%の設計余裕が得られた。これにより図5の初期の汚れ速度も半分程度まで下り、高温側のShell1の汚れ速度は同等としても、低温側のShell2のそれは境膜温度が40℃以上低下するため、アレニウスの式に基づけばほぼゼロになると予測される。

もう一つの温度クロスの回避方法は、向流で管パスを1とすることである。胴内径400mmΦには、パスレーンが不要な1パスの場合、ピッチ比1.33で199本の管が装着可能である。2パスの場合、計算上は186本が装着可能である。図8には2つのケースのHTRI計算結果を示しておいた。1パスでは温度クロスは起こらず、設計余裕は30%を確保できるが、2パスは壁面温度とバルク温度との温度クロスが2パス目に生じている。設計余裕だけを見れば1パスでも良いが、流速は0.07m/sとなり、10パスの1.42m/sに比べて壁面せん断応力は小さく、汚れが堆積し易いと予想される。

以上のように、従来技術では10パスで管内せん断応力を高く保ちながら、管長6mを2シリーズに分割するのが最良の方法であろうが、この方法は熱

交換器の新規製作と入れ替え工事の投資が必要である。

4. hiTRAN 設計による改善

4-1. hiTRAN の汚れ防止効果

hiTRANを挿入した管断面の速度分布の実測値は前報⁷⁾でも報告したとおり、壁面部で最大値を示し、中央部はコアワイヤーがあるためゼロとなっ

ている。またスラリーの沈降実験¹⁾でもhiTRANの乱流効果による沈降防止が立証されている。hiTRANによる境膜伝熱係数の増加そのものが、壁面でのせん断応力の増加ではあるが、化学反応汚れの場合、アレニウス式からみて、加熱側温度を下げるのが最も効果的である。

図9には管長の異なるhiTRAN1パスの熱媒油入口温度と設計余裕の関係を示した。この図から6m長さでは熱媒温度は280℃にまで下げることが可能ことが判る。

図10は管長さ3~6mの熱媒油入口温度と管側境膜温度を管長に対してプロットしたものである。図中塗りつぶしプロットは境膜温度、上下にある白抜きプロットはそれに対応する熱媒油温度と粗植物油温度を示している。この図から例えば壁面の粗植物油

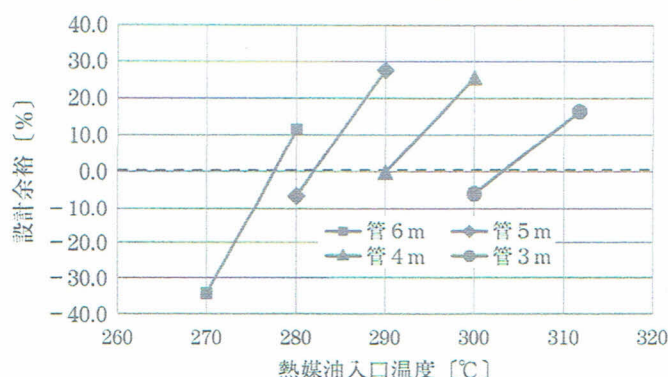


図9 hiTRAN1パスの熱媒温度と設計余裕

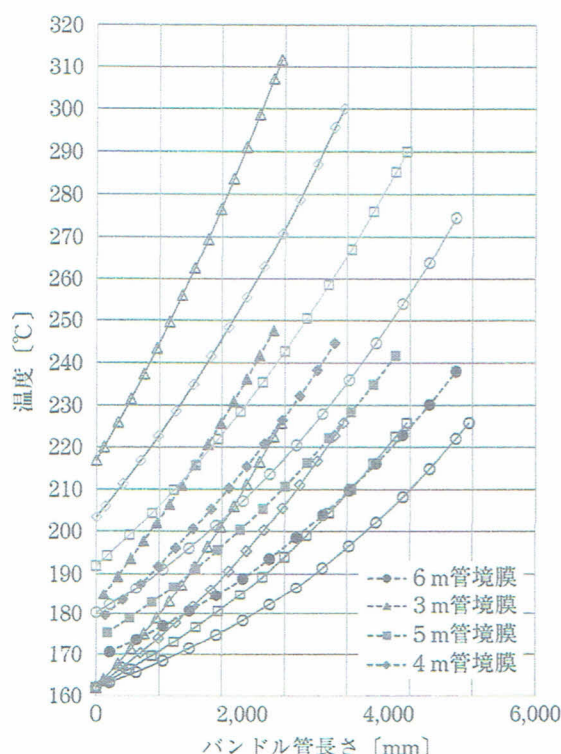


図10 管長さと管壁面温度

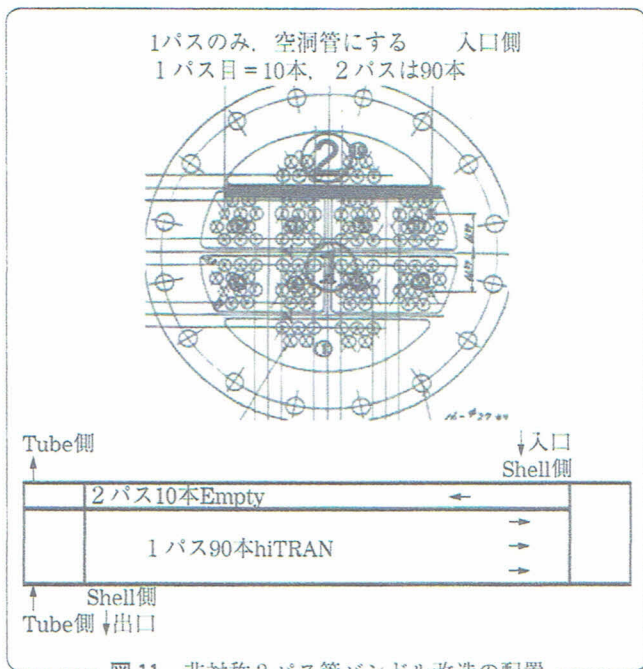


図 11 非対称 2 パス管バンドル改造の配置

温度が 230℃ 以上になる管長は、6m の熱交が最も短くなるため、化学反応汚れ速度は大きく改善すると期待できる。

このように hiTRAN の伝熱促進効果を利用して、汚れ速度の熱交換器システムの設計は可能であるが、現実に稼働している熱交換器の汚れ問題を解決するものではない。

4-2. 本熱交換器の効果的な改造

hiTRAN を用いて経済的にも現実的な解決策として、筆者等は非対称 2 パスバンドルへの改造を提案している。具体的には図 11 のように、100 本 10 パスの管配置を 1 パス目 90 本、2 パス目 10 本の非対称バンドルとなるよう改造するものである。この方式によれば、熱交換器への配管改造が全く不要で、頭部（ヘッド）のパスレーンの仕切りを取り除くのみと、分解洗浄後の空洞（Empty）管に hiTRAN の挿入操作のみで完了する。hiTRAN 挿入によって得られた設計余裕は胴側熱媒体油の温度低下に使用して、汚れ速度の低下に寄与させようとするものである。

図 11 は従来の 10 パス部を 2 パス目とし、①から⑨パス目を 1 パスとなるよう頭部を改造する。表 2 には HTRI にこの形状条件を入力し、運転初日の温度と流量条件で評定計算した結果を現状 10 パス、非対称 2 パスの hiTRAN なし（Empty）の結果と合わせて示す。

表 2 非対称バンドルの性能比較

	現状 10 パス Empty	非対称 2 パス Empty	非対称 2 パス hiTRAN
Shell $h^{*1)}$	419	326	331
Tube $h^{*1)}$	1115	233	1133
U 値 $^{*1)}$	224	106	197
設計余裕	0.3 %	-37.5 %	20.8 %
ΔP [kPa]	131	12.4	103 $^{*2)}$
熱交換量	0.37MegaWatts		
共通入力 項目	流量：Hot1.5/Cold2.14kg/s Hot 入出温：311.7/216.9℃ Cold 入出温：162.1/226℃ 汚れ係数：胴 0.00018 + 管 0.00052		

*1)：[$m^2 \cdot K/W$]

*2)：1 パス最高密度 + 2 パス最低密度挿入の圧損

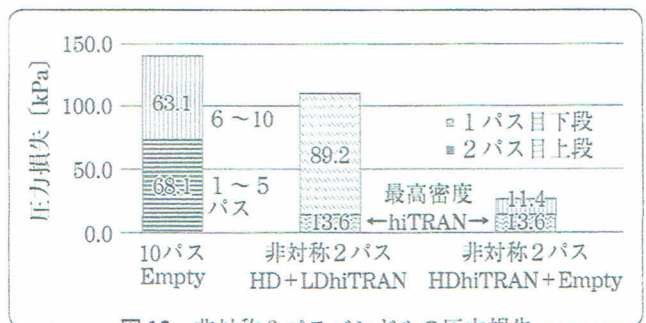


図 12 非対称 2 パスバンドルの圧力損失

表のとおり、熱交換器の頭部のみのパスの改造と最高密度（HD）の hiTRAN を挿入することで、20.8 % の設計余裕が得られる。hiTRAN を挿入することで管側の圧力損失を大きくするが、表 2 では 10 パスの現状よりも 3 割程度低い。これは流速の速い 2 パス目の hiTRAN の密度を最低（LD）としたため、その組み合わせの圧力損失は図 12 のとおりである。

またこの 2 パス目の熱交換量（Duty）は全体の 3 % 以下であり、図 13 に示したように、現状 10 パス Empty の 10 パス目とほぼ同じである。

4-3. 壁面温度の低下による汚れ防止

非対称 2 パスと hiTRAN の組み合わせで、洗浄運

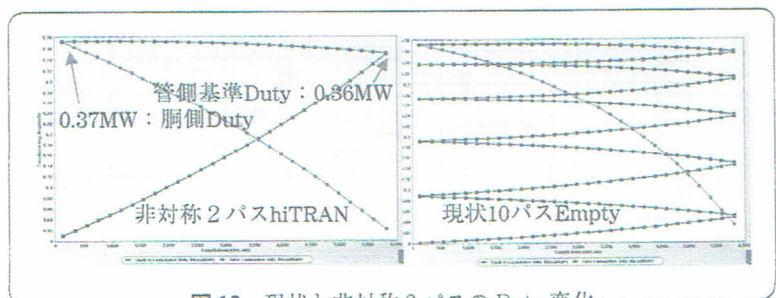


図 13 現状と非対称 2 パスの Duty 変化

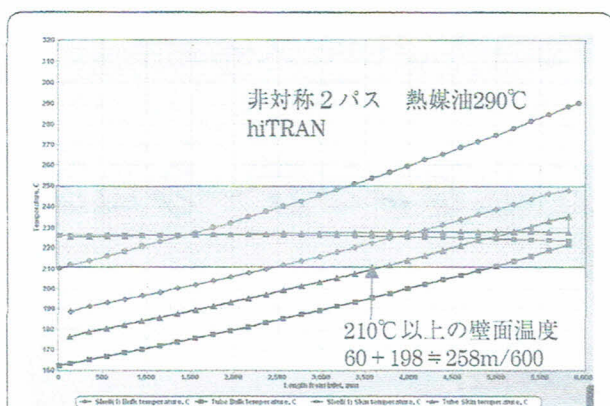


図14 高い壁面温度の管長さ：非対称2パス

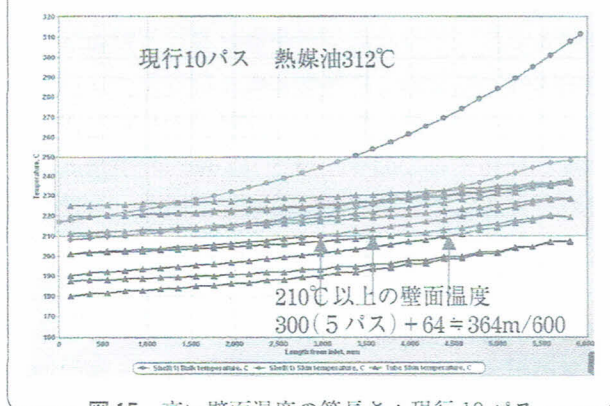


図15 高い壁面温度の管長さ：現行10パス

転初期の汚れ速度を小さくすることは可能であろうが、壁面温度を低下するのが最も効果的であることは Ebert & Panchal モデルから明らかである。hiTRAN によって得られた設計余裕を熱媒油温度低下に使うのが効率的である。図14は熱媒油290℃での非対称2パス hiTRAN の内部温度と管長さを示す。290℃の熱媒油温度で、表2の0.37MegaWattsを確保するためには熱媒流量を1.5から1.82kg/sに上げる必要があったが、熱媒油の可変量範囲内であった。

図14は熱媒油290℃の非対称2パス、図15は現行の10パス312℃のパス毎の壁面温度グラフであるが、これを用いて、210℃の管壁温度となる管長さを計算したところ、図中に記入したように、2パス目の10本×6mと矢印の210℃との交差点の右側（1パスの90本×2.2m）の計258mであった。これは同様に計算した現行10パスの364mの70%である。この高温壁面暴露面積の差がアレニウスの式と合わせ

て汚れ速度に寄与するであろう。もちろん先の理想的な1パス hiTRAN の場合は、さらに2パス目の60mがさらに小さくなる。

この汚れ速度の低減効果は、先の図2のように、熱媒システムがこの熱交換器単独であれば実施は簡単であるが、他の加熱システムと共用の場合には簡単ではない。他の熱交換器の下流出口の低温熱媒油を使用するのが現実的ではあるが、費用対効果には温度制御システムの改造費用を見込む必要がある。

5. あとがき

化学反応汚れ速度を低下させるには、壁面温度をできるだけ低くすることが重要で、1パス hiTRAN が温度クロスを避ける有効な手段であることが、プラントデータの解析から明らかにすることができた。さらに熱交換器の取り換えや配管改造なしで、hiTRAN の効果を発揮させる方法として、非対称2パスバンドルを提案することができた。この方式は2パス目を単純にリターン配管と考えるもので、問題のある既設の熱交換器の hiTRAN 設計への改造に対して有効な手段として適用が広がると考えている。

今回は化学反応汚れとは逆に、低温側に閾値のあると思われる熱交換器のプラントデータの解析事例について報告したい。

〈参考文献〉

- 1) 渡部, 酒井: 化学装置. Vol. 57, No9, p. 51 (2015)
- 2) Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications, Art. 43 (2003)
- 3) <http://www.heatexchanger-fouling.com/index.htm>
- 4) M. R. Malayeri, et. al: Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning-2015 (Peer-reviewed) June 07-12, 2015, Enfield (Dublin), Ireland
- 5) p. Drogemuller et. al.: Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning-2015 (Peer-reviewed) June 07-12, 2013, Budapest, Hungary
- 6) Akiya Kuboyama et. al.: Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning-2015 (Peer-reviewed) June 07-12, 2015, Enfield (Dublin), Ireland
- 7) 渡部, 酒井: 化学装置. Vol. 60, No. 12, p. 57 (2018)