

最少の設備費と運転費を可能にする空冷式油冷却器の最適化

Peter Ellerby, Cal Gavin Limited
Johan van der Kamp, Bronswerk Heat Transfer b.v

はじめに

装置設計者の目標とする到達点は、制約された設置スペースと要求仕様条件の中で、設備費・固定費さらに運転費の全てに最適な解答を提供することにある。運転費の評価は、許容圧力損失のような任意あるいは経験則に基づくが、空冷式冷却器の設計において固有の空気側必要動力を用いて評価する。

ほとんどの空冷式熱交換器には、例外なく裸管に較べて管外面の伝熱面積を増大させるための形状が取り付けられている。空気側の伝熱係数は低い、伝熱面積のより拡張された管は、裸管に較べて大きな伝熱促進効果を生み出す。この分野の開発には、より効率的なフィン付き伝熱管とより低騒音の駆動ファンが含まれる。そして個別の事例の開発は、常にコスト/ 便益により判断される。

拡張された伝熱面積の採用は、裸管に比べて著しい基礎面積、設置面積、重量の軽減と削減をもたらす。しかし被冷却流体が高粘度な場合は、この空気側にもたらされたこの有利性は、管内側の低い伝熱係数によって制限される。管内側の流動状態が層流または遷移域の場合、流速を速くすることにより達成できる改善は、ポンプ動力費の増大に比べて低い。この種の問題は珍しいものではなく、一般的に空冷式熱交換器の応用分野に広く存在する。実際に、多くのターボ機械、変圧器油、大型エンジンの潤滑油冷却には冷却媒体として空気を用いる。もし冷却水が容易に入手できる場合には、高粘度の油は、その流動状態をより乱流化出来る、シェル&チューブ熱交換器の、胴側に流されることが普通である。



この設備に使用される空冷熱交換器において、管側の伝熱速度を増加させる促進技術の選択肢が存在する。この種の応用で広く採用されている hiTRAN 素子は、理想的な乱流を形成させる着脱可能なワイヤマトリックスであり、層流/ 遷移領域の状態、何も挿入していない平滑管に比べて、顕著で良好な伝熱促進と圧力損失の比率を示す。それらは管壁の流体を分配させ、乱流性を増加させる半径方向への攪拌を、推進する。hiTRAN の理想的な操作範囲はレイノルズ数が 100~5000 の範囲であるが、この範囲外においても効果的である。

空冷油冷却器は、使用する油の粘度とポンプ動力コストの制限の必要性から、上記のレイノルズ数の範囲内で運転されることが多い。管側の伝熱係数によって支配されるので、管側の伝熱促進が設置サイズと重量の軽減に寄与する、言い換えると伝熱面積の低減を提供することが可能となる。より小さなサイズである空気側の小さなファンを利用することは結果として省エネになる。また多くのプラントにおける重要な課題である騒音に対して、hiTRAN は、より小さなファンすなわち小さな空気流量で済むため、低騒音設計が可能となる。平滑管の場合このレイノルズ数領域での、伝熱性能の正確な予測を不安定かつ困難にするが、hiTRAN 挿入管は、迅速に確実な再現性をもって、予想通りの性能を発揮する。hiTRAN を挿入した油冷却器が、より優れた制御性と性能低下の無い特性を有していることを意味する。

削減量の数値化

削減量の比較を数値化して表現するため、hiTRAN 無しの平滑管と挿入した管を用いて同一の条件で最適化の設計を行なった。この要求仕様書は図1にまとめられている。これは比較的小さな管束であるが、ここで表示されている削減は評価出来るものであり、大きな熱負荷の際にも適用可能である。この熱交換器で冷却される油は標準 ISO VG46 規格の特性を持ち、このケースでは入口で 16cp、と指定された出口温度では 24cp の粘度である。この運転条件での粘度は、非常に大きな圧力損失が許容されない限り、流体は層流状態となる。

被冷却流体	Oil
流量 kg/h	12036
出口目標温度 °C	50
許容圧力損失 bar	0.75
伝熱負荷 kW	98
周囲空気温度 °C	38

各設計の基本特性値は図2に示す。

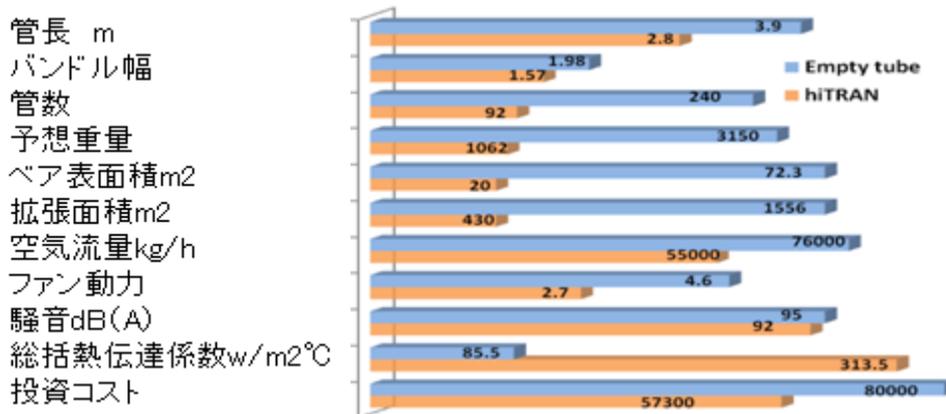


図2 hiTRAN システム装着管と平滑管の空気冷却器の比較

ここで注目すべき価値は、まず総括伝熱係数の増大であり、その増大効果によって、平滑管に比べて 30% も少ない伝熱面積の設計の選択肢を持つ。最終的に重量も初期の平滑管での設計を 33% も下回り、hiTRAN 素子を含めた熱交換器のコストも顕著に大きく削減した。明確なる初期設備コストと設置工事のコスト削減に加えて、運転コストもまた、hiTRAN 設計で必要とするファン動力は平滑管の設計に比較して約 50% に削減した。

この変更により 3dB(A) の騒音低下をすることが出来た。この低下量は規模が大きく、多くの空気式冷却器設計の重要な特性の一つであり、低騒音とすることは重要である。

これを如何にして達成するか！

この伝熱促進を理解するむずかしさは、伝熱促進を増大させることによって、常に圧力損失が増大するという直感的な感覚である。層流や遷移域の流れ状態での、hiTRAN 挿入と無しの平滑管の、伝熱/圧力損失の比率の差異から、便益をつくることのできる。図3の比較表を続けて見ることにより詳細にこの差異が理解できる。まず着目点は、両方の設計共、圧力損失が同じであることである。

図3 hiTRAN 挿入管と平滑管での設計での比較 (同一の伝熱負荷)

	平滑管	hiTRAN 装着管
管長 m	3.9	2.8
管束幅 m	1.98	1.57
管本数	240	92
予想重量 Kg	3150	1062
平滑管表面積 m ²	72.3	20
拡張面積 m ²	1556	430
空気流量 kg/h	76000	55000
ファン動力 kW	4.6	2.7
総括伝熱係数 W/m ² °C	85.5	313.5

我々は、hiTRAN 挿入管の運転条件における名目レイノルズ数が、平滑管の場合に較べて約 35% 低い、これは hiTRAN の存在による半径方向への攪拌効果によって、疑似乱流の状態になっていることに、注目する。平滑管の設計では、許容圧力損失内で、管パス数 16 で設計したが、層流状態での流速の増加による伝熱速度の改善には制限がある。hiTRAN を挿入した設計では、管側パス数 4 に変更したので、1 パス当りの管本数が増大するため、低い名目レイノルズ数になっているにもかかわらず、管側境界熱伝達係数は 5 倍にも増加した。しかし平滑管内の場合、管パスを流れる合計の流路長さは hiTRAN の 5.5 倍となるが、圧力損失は同一である。平滑管の伝熱抵抗の分布より、5 倍も減少した管側伝熱の効果は、図 4 に示すように総括伝熱係数に大きな影響を与える。(平滑管の設計の全抵抗は円全体で表示され、hiTRAN 設計の全抵抗は同じスケールの切欠き円で示され 各々の設計での抵抗の相対的なパーセントを示している)

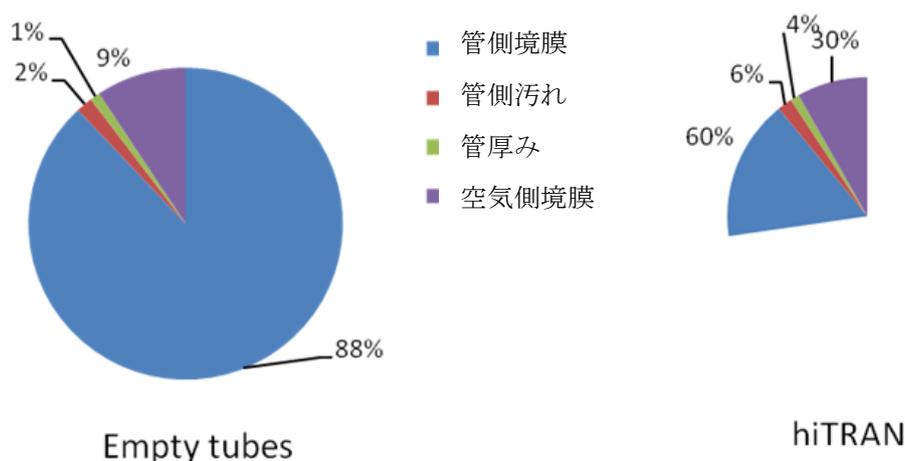


図 4 伝熱抵抗

hiTRAN 立体素子の一つの特長としては、それらが一種類、あるいは数種類の一定形状エレメントでは無いことである。その幾何形状は、仕様から要求される管径と、とりわけ要求される伝熱係数の数値、ならびに管の圧力損失によって、幾つかの方法で適合させることが出来る。これは管長さ、管パス配列の選択肢を考慮する上で、柔軟性を与える。

伝熱係数の増大による必要伝熱面積の減少は、管配列のために優れた選択肢を与える。ファン選定のための許容できる寸法を保持するために、管列の数は通常減らされる。この比較ケースでは平滑管の場合 8 列であったが、hiTRAN では 4 列に減少した。この減少の有利性は、空気側表面速度を維持しないしは増加させ、そしてファン動力を低減することが出来ることである。他のケースでは、6 列への減少が、設計制約のもとで、そして相対的な設備/運転コストに狙い付けて、より適切であろう。

この伝熱係数の増大が制約条件と管側の許容圧力損失を維持しながら、必要サイズ、重量、設備コスト、所要動力の削減を提供する効率的な設計が出来ることを、理解することができる。既に空気式冷却器の設計者と製作者は、油冷却器のような伝熱促進された設計・製作を、油冷却器のような最適応用例では標準設計品として、既に多数採用している。

hiTRAN のエレメント密度形状の選択と、管へ取付くフィン形状、管の配列、管長さおよび空気側の流れなど、最適化の検討項目が増加する。これらを単純化するために、Cal Gavin は、与えられた管の形状に適した最適 hiTRAN と、許容圧力損失を計算するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは hiTRAN.SP 設計で利用でき、HTRI と AspenTech の熱交換器設計評価ソフトウェアへのプラグインとして利用可能である。この利用により、熱交換器技術者はだれでも、完璧に最適化された熱交換器設計を創出する道具を持つことが出来る。

既設ユニット

hiTRAN 伝熱システムは新規製作品だけに限定されないで、既設の熱交換器の伝熱管にも容易に装着できる。高粘度流体で運転されている既設の空気冷却器は、管側の伝熱速度を増大させることにより便益が得られるであろう。もちろん用意周到に設計された熱交換器は、現行の熱負荷要求を満足い

る。しかしながらプラントの性能改善とかボトルネック解消など、今日のプラント運転に重大な影響を与える課題には他の方法もある。

周囲の環境温度の上昇、特に暑い夏季の期間には設計性能を満足させることが困難となる。また省エネと CO₂ 排出量削減の要請から、自動可変速度ファン（これは流体出口温度をファンの回転数により空気量を制御する）を多くのプラント運転者が管理している。このようなファンによる流量の減少により顕著な動力節減が可能となる。

hiTRAN 立体素子が、どのように既存のユニットに適用できるかを評価するために、平滑管での設計を事前に考察する。この場合は 8 管列と 16 パスの構造では、hiTRAN をそのままの管配列に挿入するという改造は、圧力損失の増大が誘起されるために実現が難しくなる。他のすべての外観形状を保持した、この熱交換器は、ヘッダーボックスの改造が可能ならば、現実には 8 パスとか 4 パスの変更の選択肢があり、パス配列の変更が可能となる。8 パスを選択すると、最低の圧力損失は、多くのプラントの許容上限を越す 1.15bar となる。hiTRAN 設計の柔軟性により、許容圧力損失（図 1 の 0.75bar）に合致させる 4 パスへの改造が可能である。4 パスの選択は 8 パスの選択に比較して若干優れた伝熱性能を提供する。

増加した伝熱係数は、周囲温度上昇によって減少した平均温度差を補うことが出来る。hiTRAN によって修正された管配列は、空気温度が 47°C まで上昇しても、油冷却の要求は満足する。

38°C の空気周囲温度を維持しながら空気流量の減少、その結果として動力ファンの特性と制御にゆだねられる動力の減少となる。この hiTRAN のケースでは、空気流量は 78000 から 18000kg/hr に減少することが出来る。これはファン運転における動力と騒音の低下の潜在的能力を提供する。

空気式冷却器の改造を考える時、構造上から採用できる選択肢が制約される事は認識しておくべきである。特に管パス数の修正は、ヘッダーボックスのカバープレートだけで簡単に実施できる。プラグ型ヘッダーの改修は、さらに重要である。しかし平滑管のバンドルを hiTRAN 装着バンドルに置き換えるような効果の大きい改造の場合、そのままベイとファンが再利用されるが、両項目とも hiTRAN を使用しなかった場合に要求される、追加のユニットのための支持構造物の著しい節約が出来る。顕著な削減が期待できる全ての選択肢は、考慮されるべきである。

潤滑油冷却器でない場合

本稿で考察した事例は潤滑油冷却器である、これはこの種の応用例として最適化の好事例であり、最初に取り上げた。これらの hiTRAN で最適化されたユニットは世界中に広く多数存在します。この事例にとどまらず、この技術は数多くのプロセス流体にも成功裡に採用されてきた。特に流れが層流または遷移域である場合、hiTRAN 立体素子が管内流動での挙動が理想的であるため、清浄な流体と同様に汚れた流体にも使用することが出来る。

空気による炭化水素の冷却でよく遭遇する問題は、流体のワックス化または固化である。これは、装置の地理的な場所によって決まる周囲の温度範囲によって悪化する。幾つかのケースでは、空気循環装置の設置による空気温度の正確な制御が必要となる。流動点が出口温度に比較的近い厳しいケースでは、ワックス化の可能性を回避する基準に適合して、経済性のある設計を実施することはかなり難しい。このようなケースでの鍵となる因子は、管壁温度を伝熱管のどの場所においても、流動点以上の快適な状態に維持することである。管側伝熱促進体の採用は、より小さなそして高い壁面温度となる設計が可能となり、顕著な有利性を提供することが出来る。再び図 4 を考察すると、平滑管での設計では大部分の伝熱抵抗が管側流体に依存しており、これは管側壁面温度が管内側温度よりも空気温度により近いことを意味している。hiTRAN の採用に伴い、その伝熱抵抗が移動することにより、バンドル全体の管内壁面温度が上昇する。このより小さな hiTRAN 設計の結果、より少量の空気量で通常冷却に到達することが出来、この冷却器の事例では 27%以上の削減であった。ここでの有利性は、バンドル上の各部の空気温度は平滑管の設計よりも急勾配となり、その結果として外側温度はバンドルを横断する壁面温度よりも高くなる。図 5 は既に議論したこの油冷却器のケースである。これらの利点にもかかわらず、より厳しいケースでは、少ないフィンあるいは平滑管ではもっ

と数少ない管列で済むように更なる革新が求められる。それでも hiTRAN の効果は非常に困難なケースの場合でも、実用性のある効率的な設計を見つけるために貴重である。

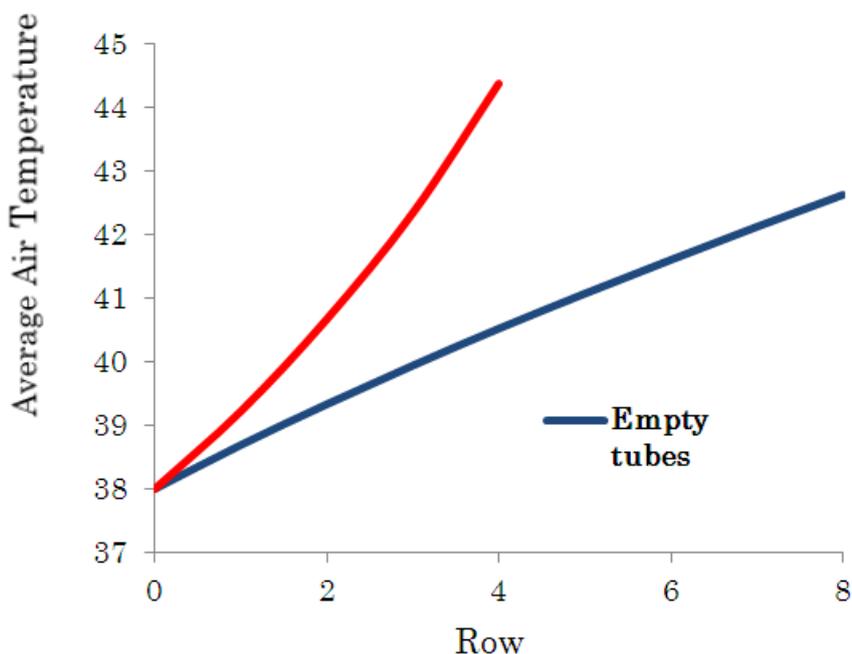


図5 管束の空気温度上昇 (hiTRANの有無)

もちろん”汚れ”は壁面温度だけではなく、管の流体動力学に関係している。管壁における長い滞留時間、低乱流状態と低い壁面せん断力は、汚れ生成速度の因子である。hiTRANの存在は、汚れの生成機構にも良い影響を与えることが明らかにされており、ここでもその効果は著しく、汚れの低減も可能である。

多数プロセスへの応用には、熱交換器の予測制御が重要であり、それがプラント全体の基本である。空気冷却器の制御は、空気流量制御の意味で典型的であり、もし熱伝達が強く管側で制御されるなら、それは正確で迅速な管側の条件を制御することを困難にする。熱伝達抵抗を管側から遠ざけることにより、このシステムは、より迅速に着実に空気流れの変化に反応する。また層流と乱流の間の熱伝達と圧力損失の著しい変化は、その地域で運転しているシステムの制御の問題を起こす原因となる。hiTRANが使われたところでは、その性能が流れの変化に対して安定しており、システムの因子の修正が滑らかで制御が容易である。

まとめ

コスト削減と省エネと、そして設置サイズ、重量、騒音の低減の強い要求の中で、熱交換器設計者は、利用可能な全てのプロセス手法を用いて最適化する必要がある。管内側と同様に管外側の増強も適用可能な様々な方法で便益を提供する顕著な役割を担っている。hiTRAN 立体素子は管に自由に着脱可能な乱流発生体であり、これを挿入することで、既存設備の改造ならびに新規設備にも便益を引き出すであろう。