

空冷式熱交換器の伝熱性能の向上と省エネルギー

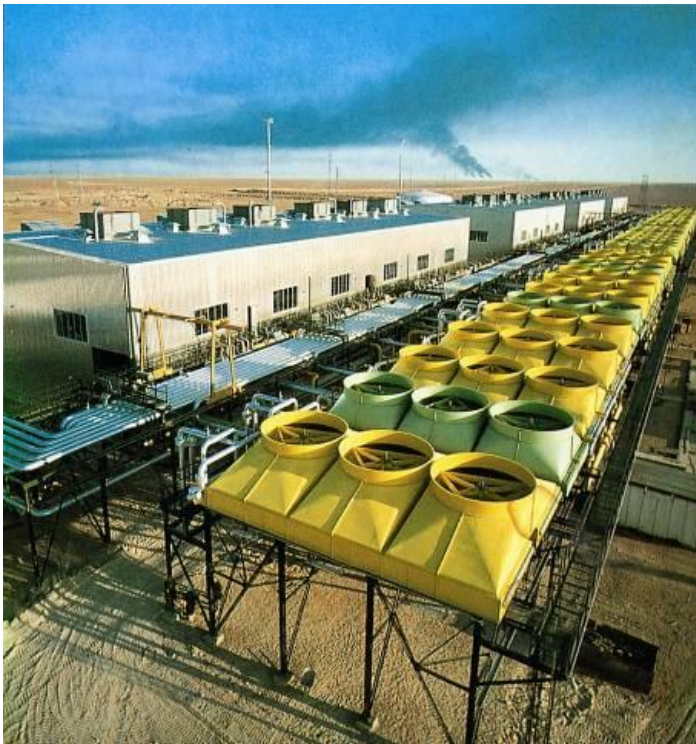
マーティン・J・ゴフ カルギャビン株式会社(英国)

イアン・ギッバード プログレッシブサーマルエンジニアリング(株)、(英国)

発表:中東ペトロテック 2010、第7回中東 石油精製と石油化学会議

空冷式熱交換器（以降は空冷熱交と略称）は、熱回収が困難な低温廃熱を環境へ排出するために、多くのプロセス産業において使用されている。特に水が冷却目的で供給されにくい地理的な環境下において、空冷熱交は熱除去の主要な技術であり、プロセスプラントはその性能に大きく依存する。

いくつかの異なる形式の空冷熱交の組立て可能であるが、すべての熱交換器は、チューブバンドル(管束)上をファンで空気を流動するように構成されている。プロセス流体は管束の管内側を流れ、管束の外側を流れる空気で冷却されます。このような熱交換器の冷却能力はその伝熱表面積だけではなく、管束に入る空気の温度によっても決定される。



操業中の多くのプラントは、空冷熱交の能力がプラントの全体能力を制限していること、あるいは建設時から空冷熱交がプラントの基本要求を満たしていないこと、またはそのプラントがその設計能力を超えて操業を求めているため、空冷熱交が全体のプラントの生産能力を制限していることがよく見受けられる。熱交換器の能力は、空気の温度の関数であり、このような制限は気温のピークとなる特定の期間（夏の午後など）で発生する傾向がある。いくつかのプラントではこの制限を低温時間帯（夜間）などに能力を増大することによって回避しているが、これは常に問題解決を提供するものではない。また多くのプラント稼働が地球温暖化の一つの要因であるとして、圧力のかかるのが時代の趨勢である。これら環境のもとで、プラント全体の能力増強や性能向上のために、空冷熱交の能力向上が期待されている。

あるプラントにおいて、その設計容量を超えた運転をしようとする、空冷熱交の性能を改善する必要性が明白となる。しかし、空冷熱交が設計能力以下であるため、プラントの性能を制限している事実は、一般的なこととして見出される。熱交換器は、様々な理由でその設計伝熱除去量を達成できてない。その最も一般的な理由は、次のとおりである。：

- 1.空冷熱交の元の要求仕様が、非現実的な冷却空気の温度に基づいている場合
(すなわち管束への実際の空気温度が最大設計温度よりも高い)
- 2.空冷熱交供給者が設計容量よりも実際の空冷熱交能力を小さくしていた場合
- 3.熱交換器の性能が、汚れなどによって低下している場合
- 4.プロセス流体の物理的性質が変更された場合、または正しく設計段階で予測されてなかった場合

いかなる要因により必要熱除去量が制限されているにせよ、冷却容量を増加するための解決策は見出さねばならない。最も明白な解決策は、熱交換器の管束に、より多くの空気を吹き込むことであり、通常はファンの速度を増すことにより行える。空気流量の増加は実際の性能向上に有効であり、ファン速度の顕著な増加は実現可能な方法である。しかしこれには"ファンの法則"を理解しておく必要がある。これらは回転の速度と任意のファンの性能を関連付ける単純な式で表せる。(囲みを参照)。

プレートフィン型

ファンの法則は、設置されたファンの速度を増加させる効果を単純に明示することが出来る。例えば、20%の空気流量の増加が望まれている場合は、この速度を必要とする容積流量との関係から20%増加すればよいことがわかる。この速度の増加は44% ($1.2^2 = 1.44$) の圧力上昇を招き、管束への余分な空気抵抗を増加させる代償が予測される。これは良いとしても、ファンの必要動力を計算すると問題点がより明白となる。速度の20%の増加は、必要動力の73%の増加 ($1.2^3 = 1.73$) が必要である。

ファンの法則		
容積流量	は速度に	正比例
圧力上昇	は速度の2乗に	正比例
所要動力	は速度の3乗に	正比例

ファン速度のわずかな増加に必要な必要動力の大きな増加は、この方法による性能向上が問題の多いことを示している。軸動力の要求は電動機自身に影響するだけでなく、減速機や電気ケーブル、モータースターターなどの他の付帯する構成部品にも顕著な影響を及ぼす。

追加動力が許容されたとしても、空冷熱交のファン速度増加は新たな問題点を生じる。ファンは環境衛生と職業病の両面から規制されている大きな騒音を発生する。このファンによって発生する騒音はファンの羽根先端速度に大きく依存し、ファン速度の増加は騒音発生の増加となる。ファン速度と騒音の関係は複雑であるが、通常以下のように単純化されて表現される。

騒音は 速度の6乗に 正比例

20%の高速化を例にとると、騒音の増加は3 ($1.2^6 = 3$) となる。これは騒音を通常表現する用語で、4.8デシベルの増加となる。ほとんどの場合、このような騒音の増加は規制値の限界を超え、労働者と地域環境被害を防止する法規制の限界を超えることになりそうである。

要約すると、単純にファンの速度を増やすことで空冷熱交の性能を改善しようとする、大抵は失敗する。以下に詳述するように、能力増強のために改良された他の方法が可能であり、機能的に最良な性能改善戦略

を決定し継続することである。この提案への道筋は次のような段階を踏みながら、満足な結果が得られるまで、検討を進めてゆく必要がある。

1. 既設空冷熱交の最適化
2. 空冷熱交の各部位における熱負荷を解析する
3. ファン効率のアップグレードを考慮検討する
- 4 既存の管束を高性能の管束に交換する
- 5 追加の空冷熱交設備を検討する

最後の選択肢は（追加空冷熱交設備の設置）は、そのための大きな設置面積が必要なため、通常は魅力的ではない。仮に設置場所があったとしても、初期コストが掛かるため最後の選択肢であろう。他の 4 つの選択肢は新たな設置場所を必要としない解決手段であり、最初に検討すべきである。

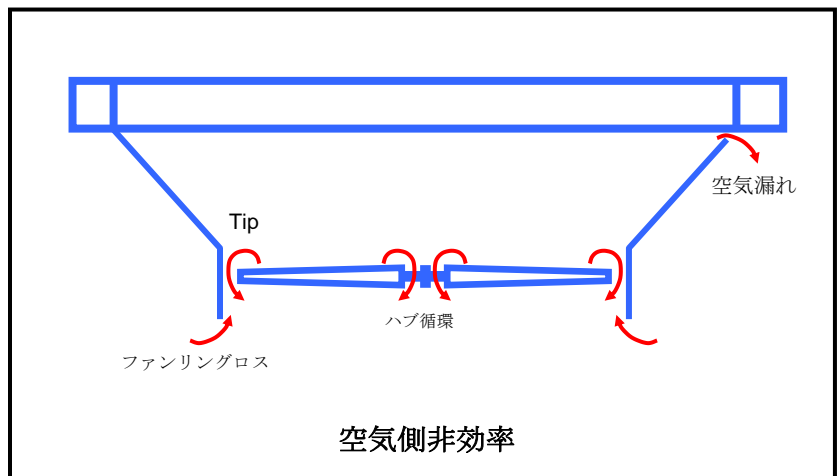
既設空冷式熱交の最適化

どの高性能化検討においても、最初のステップは、現在の熱交換器が、最大効率で運転されていることを確認することである。空冷熱交において多くの要因が効率に影響を与え、そして既存の空冷熱交の各部の検査は、維持管理や小さな調整が熱交換器の性能維持を実現化する範囲を明らかにしてくれる。

便益の確保が得られる 1 つの方法は、ファンモータに供給する電力が効果的に軸力に変換されているかを確認することである。モータの過熱または駆動ベルトのスリップや昇温、その他運転に必要な部品の劣化は非効率運転の原因となる。

可能な効率化の他の領域は、ファン軸動力が管束を通過する空気流れに確実に変換されることで達成される。たとえば、ファンの効率は、ファンに入ってくる滑らかな空気の流れによって加速され、**そしてファンリングの形状を修正することによって、押し込み通風型ユニットは増強される。**リング自体、あるいは滑らかな楕円形の導入形状とするための追加部品で置き換えられます。さらにはファンのブレードの角度を最適化、ファンが正しくファンリングに取り付けられているかによっても改善が可能となる。

さらなる効率の向上は、ファンからの空気が、確実に管束の中を通過するように確保することにより達成することができる。ファンによって流動される一部の空気が再循環や漏れや逆流の影響で失われる。ファンのブレード先端とファンリングとファンハブの隙間を最適化することで再循環を回避できる。安価なシール材でもチップとハブの再循環を防止するには役立つ。**管束を通過する空気の流れは、シールの**



効率化により、空気充満状態でプレナム（風洞）周りの空気の漏れ止め効果を高める。

空冷熱交の性能に影響を与えるもう一つの重要でよく見受けられる一般的な問題は空気側の汚れ(fouling)である。管束を横切る空気の一定の流れは、管束上のフィンの間隙に沈着する微粒子成分を運ぶ。これらの堆積物は管束への空気の流れを著しく制限し、一定の運転時間経過後には、性能回復するための洗浄が必要となる。しかしながらこれらの堆積物の除去は容易ではない。粗雑な洗浄方法は、しばしば逆効果となり、フィンに不可逆的な損傷を与える可能性がある。ジェット高圧水を使用すると、フィンを曲げてしまい、水噴射の冷却ショックでフィンとチューブの接合を緩めたりもし、質の悪い水の使用はフィンの下方の管の腐食を引き起こすこともある。

上記で強調された問題は既設の空冷熱交の効率を減らす要因ではあるが全てではない。最大の性能を回復・達成するため、検査は熱交換器の専門家にゆだねられるべきである。

空冷熱交の熱負荷軽減

多くの場合、空冷熱交は冷却工程においては最終的な熱交換器である。空冷熱交の上流工程にある他の熱交換器は、プロセス内の熱回収に用いられが、空冷熱交に導入されるプロセス流体の入口温度は、これらの熱交換器の性能によって決定される。

プロセス流体の最終温度により制限される空冷熱交においては、この空冷熱交の熱負荷を軽減するため、追加の熱回収が可能かどうかを考慮することが必要である。上流側の熱交換器の最適化、あるいは新規熱交換器の追加による方法が、より多くの場合既存の空冷熱交単独により必要な冷却負荷を達成するよりも効果的である。例えば"ピンチ解析"の応用はこの点において可能性がある有用なエネルギー最適化技術である。

この手法の利点は、プラント全体のエネルギー効率を増加させる。すべての空冷熱交は潜在的に有用なエネルギーを環境に捨てるものであり、空冷熱交の伝熱負荷の最小化は常に実施するべき価値のある対象である。

ファン効率の向上

通常、既設ファンの単純な速度増加は、消費電力は増加するけども必ずしも正比例しないので、空冷熱交内の空気流量を増加する有効な手段ではない。しかしファン効率の向上は、電力負荷の増大なしに、追加空気流量を増やすことが出来る。ファン効率は幾つかの要因に影響される。沢山のファン翼形状が使用できるが、その幾つかは他に比べてより高い効率である。しかしながら一般的に高効率型は複雑な翼形状のために製造費が高価となり、このことが空冷熱交製造業者に、これらを採用して製造することを躊躇させることになる。また、あらゆるファンの最大効率は小さい運転用の安全覆いによってもかなり制限される。悪い選択は理想的な範囲外で運転され、ファンの理論値を、はるかに下回る実効率となる可能性がある。

したがって、良好なメンテナンスや OEM によって供給された最適化設定でも、ファン効率が制限されることがあります。非効率的なファンが設置されている場合には、より効率的なユニットに置き換えることにより、空冷熱交の全体的な性能を改善する機会を与える。これにより過剰な電力や騒音の不利益なしに、管束を横切る全空気量の増加がおこなえる。

管束の交換

管束の洗浄を除外して、他の対策はこれまで 20%以上の全体的な性能改善をもたらす可能性は低いとされている。伝熱負荷に対してより本質的に改善するためには、熱交換器管束の改造が考えられる。実際には既存の空冷熱交の管束の組立てからの改造は非常に困難であり、通常は管束の改造よりも交換が考慮される。幸いなことに、管束の交換を意味する空冷熱交のモジュール組み立ては比較的容易であり、既存の設備部品（たとえば架構、ファン、電動機）を残し、再利用することでかなりのコスト削減ができる。

管束の交換目的は、熱交換器の伝熱面積を大きくすることだけではなく、効率も向上させる、あるいはその両方である。管束の交換から得られる空冷熱交の便益は、管束の管内側の伝熱抵抗である。

管束交換の決定がなされたならば、数多くのパラメーターが空冷熱交の性能目標に合致するように調整が試みられる。管束の長さや幅は保つ必要があるとしても、管のサイズと本数は変更でき、フィン構造と管側パス数も変更して最適化される。使用可能な空気流量の制約があるが、抜本的なボトルネック解消が可能となる。管束の管内側が伝熱支配している場合、hiTRAN 伝熱システムのような内部伝熱促進デバイスを使用すると顕著な便益効果が得られることが現実味を帯びてくる。管内側の伝熱係数が比較的低い液状炭化水素の流体においては特に顕著で効果的である。この場合は空気側の性能に着目するより、管内側の効率改善に狙いを定めるほうが効果的である。

以下に図示したケーススタディは、高性能な管束に交換した場合の実現化可能な改善規模と事例を示している。

ケーススタディ：空冷熱交のボトルネック解消

インドのある石油会社の製油所内プロセスユニットで、能力増強の改造が計画されていた。精留塔から、各留出油を冷却して貯蔵する為、空冷熱交を使用していた。安全上の理由で、100°Cを大幅に下回る迄冷却しない限り、各製品を貯蔵タンクに払出すことができないため、空冷熱交の性能が能力増強改造計画の成功の可否を握る重要な要因となった。

能力増強計画は、既存の空冷熱交に対して 38%の流量増加と 49%増の伝熱負荷を要求する結果となった。

この新しい変更条件での計算結果は、既設 4 ベイ冷却器そのままでは、過度の圧力降下が起き、また 101°Cの出口温度を満足できないことが計算で予想された。このことは既存のプラント設備の増強の要求を満足するためには空冷熱交の改造が必要であることを示している。

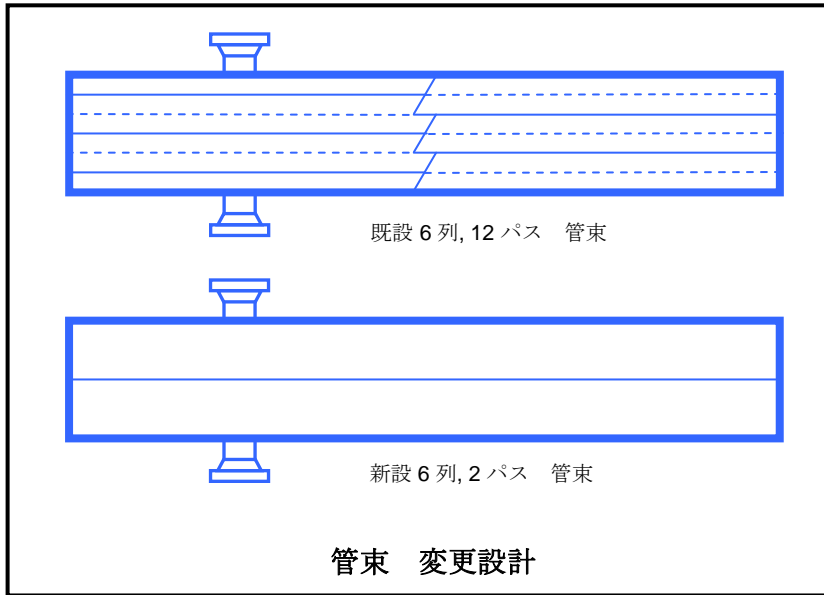
単純にファンベイの追加だけで冷却器を増設することは、現実的な解決策ではない。空冷熱交に 3 ベイを追加して、圧力降下を許容範囲内に収めた場合でも出口温度は 108°Cとなることが算出された。

設置面積が 75%増大し、それに伴う電力消費増加にもかかわらず、増強計画の負荷に到達することが出来なかった。

このケースの場合、本稿で提案する以外の問題解決策は見つからなかった。既設の空冷熱交は比較的新しく、良好な状態にあり、各種の対策による最適化により性能改善は困難であった。この熱交換器の負荷を肩代わりする他の方法もなく、さらに空気流量の増加も管側の熱伝達支配となっているので、ほとんど効果は期待できない。残された選択肢は管束の交換を検討するのみであった。

既設の下図のように管束は 6 列、12 パスユニットである。大きなパス数は管側速度の最大化を要求しており、増強後の大きな流量を流すとそのままでは過剰な圧力損失を招来する。12 パスの配置にもかかわらず、管内の高粘度プロセス流体は層流であり、その結果として低い伝熱係数であった。

もしも管側の熱伝達係数が増加するならば、冷却器の性能は劇的に改善すると期待できる。それゆえに圧力降下の問題を悪化させることなく、かつ熱伝達の速度を大きくする管内熱伝達促進デバイスを調査、検討することになった。



問題を解析した結果、カルギャビン社のエンジニアは hiTRAN[®]管側伝熱促進システムの利用を提案した。これらの管側伝熱促進デバイスは、層流あるいは遷移領域にある管側流体を混合させることにより、熱伝達速度を促進させるよう、特別にデザインされたものである。管束を 2 パスに変更して配置しても、管側の伝熱係数が 70%も増加するとともに、管側の圧力損失もプロセスの許容範囲内となった。この管側効率の増加によって、冷却器のサイズや過大な圧力損失もなく、プロセス

流体は 88℃迄冷却された。

必要とする管パスの配置は、既設の管束を改造することで達成されるが、実際にはこの機械的構造に改造することはかなり困難である。したがって改造は補修作業場にて改良部品に hiTRAN[®]を装着して新しい管束をつくることで成果を上げた。これは増強する空冷熱交へ新旧の管束の取換えの作業時間の短縮に有効であった。管束の交換による解決手法は、以下の表で採用可能な他の手法と比較できる。管束の交換による解決手法は全てのプロセス要求に合致し、追加の設置場所と電動機動力も不要である。

	既存の熱交	3 ベイの追加	取替 管束+ hiTRAN
プロセス流量, kg/hr	577,000	577,000	577,000
敷地スペース, m × m	24.8 × 12.6	43.4 × 12.6	24.8 × 12.6
全電動機容量, kW	256	448	256
出口温度, °C (規定値 / 実績値)	88 / 101	88 / 108	88 / 88
圧力損失, bar (規定値 / 実績値)	2.8 / 6.7	2.8 / 2.8	2.8 / 2.8

まとめ

既存の空冷熱交の性能をアップグレードは簡単ではなく、最適な解を見つけるため、多くの要因を考慮する必要がある。最もコスト効果の高い解決策を見つけることは熱交換器とファン性能の基本的な原理を理解しておく必要がある。改善要求を衝撃的に低価格で達成するには利用可能である全ての技術を検証し、構造的に評価・検討していくことより可能となる。

空冷熱交において伝熱負荷の増加は、冷却ベイの追加によって通常は達成することができるが。これは高価で、追加利用するための設置場所と電力が必要となる。本稿では、必要な空冷熱交換器の拡張に関し、考慮すべき技術の種類と増大範囲を提示した。以下の表に、負荷増大に対する考慮検討すべき各技術の効果とその大きさを指標としてまとめた。

適用する技術	伝熱負荷の一般的な増大
空冷熱交の最適化	0～10%
管束の洗浄	0～50%
伝熱負荷の軽減	0～20%
ファンの取替	0～10%
管束の取替	0～50%

表からわかるように、提示されたいずれの手法も改善を保証するものではないが、多くの場合、空冷熱交の負荷増大を達成するための現実的方法である。しかしながらこのような高コストとなる機能拡張は、最初に考慮すべき選択肢であることも示唆している。

おわり