

FPSO船ダリア号における伝熱の改善

Total社のギニア湾で操業するFPSO船ダリア号に、熱交換器のサイズ、価格と“汚れ”の削減のために、胴側と管側の両方に伝熱促進技術が採用された。この両側への促進技術により満水重量269トン进行節約し、必要設置面積の75% (78m²) を削減した。

機器のサイズと重量を抑えることは洋上設備における信頼性を改善するために常に重要であり、操業会社は既存技術の限界に挑戦し続けなければならない。

最高の実例としてアンゴラ沖のギニア湾の海底油田のダリア号がある。ダリア号は最大十億バレルを埋蔵すると推定され水深1500m以上の230km²の海底の鉱区に展開して操業している。算出される原油は粘性が高く、酸性で、油田は700mを超える不安定な堆積物で覆われた複雑な地質構造の中に埋蔵されている。

世界最大級の、洋上・生産・貯蔵・出荷 (FPSO: Floating Production, Storage and Offloading) 船は8本のライザー管で海底と接続されている。長さ600m、幅60m、高さ32m、の416,000トンのFPSO船は最大190人の乗組員と、24万バレル/日の処理能力を持ち200万トンの原油を貯蔵する。この巨大な容量にも関わらず、他の洋上施設と同様、FPSO船における空間と重量は貴重なものである。

伝熱への挑戦

FPSO船に搭載されている油水分離プロセスは、とりわけ1,074t/hの含塩水原油を50.5°C から 60.7°Cへ加熱工程を含んでいる。これに要するエネルギーは分離工程から出てくる802t/hの脱塩水原油を87.5°C から 70.1°Cへ熱交換して冷却することで得られる。

この熱交換システムの設計者達は一つの挑戦に立ち向かった。利用できる圧力は胴側(含塩水原油)で2barの圧力損失、管側流体(脱塩水原油)で1.5barである。与えられた原油の高粘度な範囲(8~70cp)、これは乱流が維持できないことを意味している。そしてどのプロセス技術者も知っての通り、層流は不十分な伝熱を意味する。

従来の切欠き円バツフルで管内挿入体

の無い多管胴式熱交換器 (TEMA type BES) では9つの基数(並列に3セット、各セットは直列に3胴)が要求され、各々は5.25m長さで1,778本の管を含んでいた。同時に、9基の胴は401tの満水重量と105m²の設置面積を必要とした。

この従来法による設備構成は重くて馬鹿でかくなるだけでなく、胴側の低い流体速度は、“汚れ”の原因となる不十分な流動分布になることを意味している。予想される最終的な結果は、不十分な性能での長期運転か、あるいは洗浄のための頻繁な休止時間のどちらかであろう。本当により優れた解決法は存在するのであるだろうか?



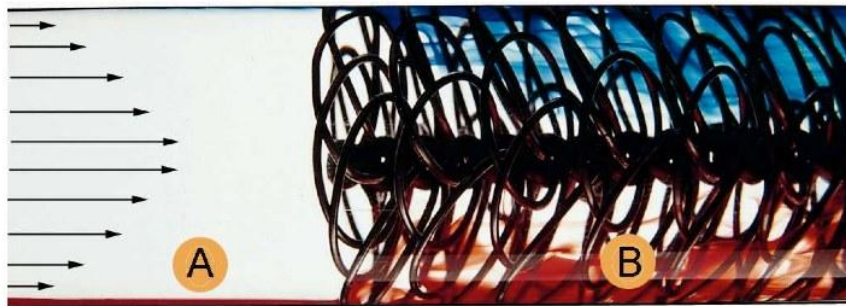
416,000トンのダリアFPSO船上には脱塩原油から油水分離器に入る湿った原油への熱移動のための熱交換器がある。伝熱促進技術無しではこれらのサイズは4倍になるであろう。写真: 全て Gonzalez Thierry

管側伝熱促進のためのhiTRAN®

多管胴式熱交換器設計では、胴側の伝達抵抗と管側のそれとが同じなることが良いとされているが、これを粘調流体で達成することは困難である。驚くにはあたらないが、ダリア号の熱交換器の従来設計では管側の伝熱性能によって大きく支配されていた。：胴側の熱伝達係数（HTC）が455 W/m²K であるのに対し、管側は95 W/m²K であった。

乱流領域でも、流体からあるいは流体への伝熱管を通しての熱移動には限界がある。問題は、管壁に摩擦と粘性力の結合から静止した流体層が形成されている。この管壁に存在する“境界層”を通しての熱移動の機構は熱伝導であり、油のような熱伝導度の小さい流体の場合、より低い伝熱速度となる。

伝熱促進技術として知られているCal Gavin 社のhiTRAN® 立体素子挿入体は、この問題を壁面管壁近傍の流速を増大させて、問題を起こす境界層を消滅させることで解決する。この図解が示すように、素子の無い空の管内（A）の管壁に密着して剥がれない青と赤の染料の流れは、hiTRAN®立体素子（B）に遭遇するや否や、素早く流体本体内に混合される。このことは管側の伝熱を改善するだけでなく、“汚れ：fouling” 傾向の減少にも繋がる。

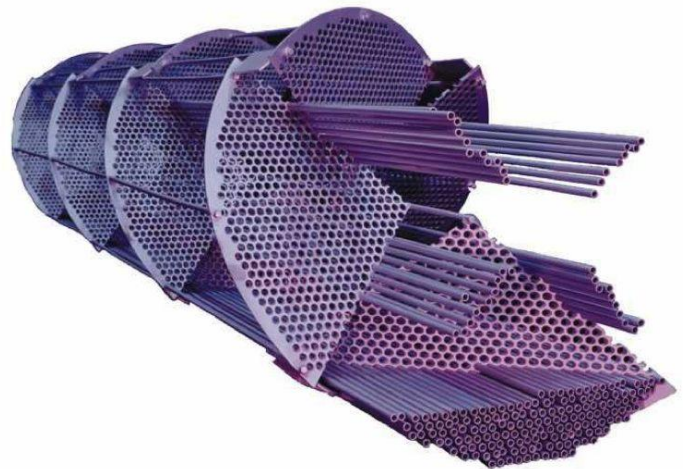


hiTRAN®挿入体は薄い染料層を管壁から流体本体内に移動させる。

胴側伝熱促進のためのHELIXCHANGER®

従来型の多管胴式熱交換器の問題点は管側のみならず、胴側にも、切欠き円バップルの欠陥が広く知られている。圧力エネルギーの多くがバップルを周回する流体の流動に浪費され、著しい量の流体はバップル、管と胴の間隔に押し込まれ、直接的に、あるいは不自然に歪められた胴側の温度プロファイルの両方により、伝熱速度が減少する。垂直バップルは滞留スポットを作り、その結果汚れや腐食の起こりやすい再循環領域を作ってしまう。

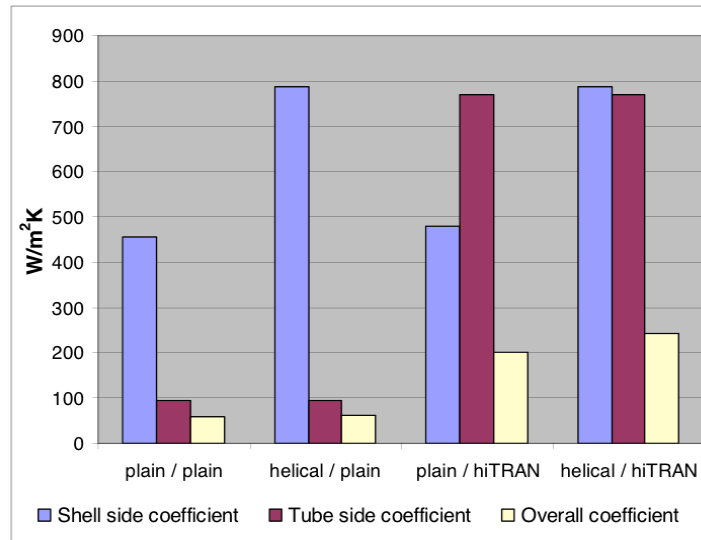
より良い解決法としての、HELIXCHANGER®設計はLummus Technology Heat Transferから販売されている。HELIXCHANGER®は、胴側の流体を四分円弧形状のバップルを用いて管束にラセン状に流体を導く。これは、停滞空間とバイパス流れの少ない均一な流速の栓流に近い流動状態を造る。結果は同一許容圧損で胴側に高い伝熱効果を与える。HELIXCHANGER®は熱交換器の胴側の洗浄期間が延びるため、従来の2, 3倍の運転時間が可能であることが工業的に実証されている。



従来型切欠き円バップルのように、胴側流体が180°で折り返す代わりに、HELIXCHANGER®は（ここに示す組み込み図のように）最小の圧損で最大の伝熱となるよう、伝熱管を横切って滑らかに流体を導く。

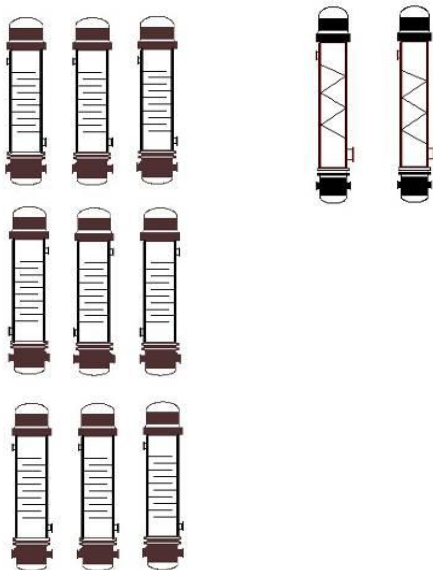
ダリア号の解決策

HELIXCHANGER® のヘリカルバップルとhiTRAN®立体素子挿入体を組合せたHELITRAN®設計が理想的にダリア号FPSO船の性能を実現した。伝熱促進技術の複合化は、胴側と管側の各々の伝熱係数の不一致を均一化して、総括伝熱係数（HTC）を4倍に押し上げた。どちらの技術でも単独ではこの数値を達成することは出来ないであろう。



ヘリカルバップルHELIXCHANGER®とhiTRAN®立体素子挿入体は胴側と管側両方の伝熱係数を上昇させ、両者の不均衡な不一致を取り除いた。実質的に4倍の総括伝熱係数に増大した。

改良された設計によりも元々と同一負荷（7.9MW）をたった2つの胴で達成した。胴当たりの管本数は同じで、管長さは5.25mと比べて6.1mである。HELITRAN®熱交換器に必要な設置面積は26m²、これは従来法に必要とした1/4、そして満水重量の131トンは従来法設計の1/3である。（表参照）



9基の従来型熱交換器（左）は2基のHELITRAN®（右）に置き換えられた。

改良された熱交換器設計は管側の平均速度が従来法の設計の半分であるが、管側の滞留時間は従来法の設計のわずか1/4となり、この改良された速度プロファイルのおかげで、管側の汚れ傾向は低い。胴側の旋回流速は同様の切欠き円バップル平均直流速よりも3倍以上となって、同様な効果があり、また滞留空間が全くない。最終的には、2つの胴による並列の流れは従来法の並列3基の胴と比較して不均衡配分を少なする意味を持ち、その結果汚れの軽減も図れる。

管側と胴側に2つの伝熱促進技術を適用することによって、一基の胴当たりのコストは高くなる結果を得たが、その改良設計の全投資額は、従来設計のわずか1/3である。なおその上に、熱交換器の胴数が減少することにより配管と計装に相当大きな節約をもたらす。ダリア号のように深海油田を操業するために必要な最新技術の多くと比較して、熱交換器の技術は十分に理解でき、あるいは詳細な設計に注力するには及ばないように思える。しかしながらこのケーススタディが示す

ように、各々2つの確立された熱交換器の伝熱促進技術は設備投資を大幅に削減し、必要空間と重量も小さくさせ、同時に運転操作性も改善した。

HELIXCHANGER®ヘリカルバップルとhiTRAN®立体素子挿入体の詳細な便益の比較

	従来型の平滑管と切欠き円バップルの 組み合わせ	hiTRAN® とヘリカルバップルの 組み合わせ	比率
総括HTC (W/m ² K)	59.9	242.7	4×
管側			
HTC (W/m ² K)	95	770	8×3
圧損dp (bar)	140	150	≒
流速 (m/s)	0.92	0.45	1/2
レイノルズ数	1680	800	1/2
滞留時間(s)	102	27	1/4
胴側			
HTC (W/m ² K)	455	789	~2
圧損dp (bar)	1.50	1.25	≒
流速(m/s)	0.41	1.3	2
レイノルズ数	250	635	
壁面温度 (°C)	59.2	65.6	
形状			
直列の胴数量	3	1	
並行な胴数量	3	2	
胴数の総量	9	2	~4
管経路長さ全長 (m)	94.5	12.2	1/8
管長 (m)	5.25	6.096	
管本数	16,002	3,640	~1/4
管側パス数	6	2	
総伝熱面積t(m ²)	6,420	1704	~1/4
所要面積 (m ²)	104.5	26.2	1/4
満水重量 (kg)	401,148	130,716	1/3
熱交換器相対コスト(%)	100	35	~1/3

ダリア号 : 深海のパイオニア

最大十億バレルの原油を採鉱するDalia号は世界最大級の深海分野開発の船である。ギニア湾の直下の水深は1,200~1,500mである。

Angolaの国営石油会社はSonangolが権益の所有者である。Total社はDalia号の40%操業する権益を所有している一方、StatoilHydro、Exxon、およびBPもまたそれぞれの権益を所有している。開発プロジェクトには、約40億ドルかかった。

2006年12月に操業開始し、Dalia号は現在1日あたり250,000バレルを生産し、約20年の概算埋蔵量を持っている。2013年までに、フィールドは37の揚水井、31の水圧入井、および3つのガス噴射井戸という形で1,000mの水平ボーリングを含む、平均3,500mになる約71の井戸を持つであろう。