

[R1.1.4] 高効率プレート熱交換器技術の研究開発

(高効率プレート熱交グループ) 田中正則、山下武士、 奥山隆史

1. 研究開発の目的

近年地球温暖化防止などの目的から省エネルギーは国際的な問題となっている。

石油業界においても 2010 年度までに 1990 年度比で製油所エネルギー消費原単位 10%削減を目標に環境負荷の低減と省エネルギーを推進している。

製油所における省エネルギーへの取り組みの一環として一般的な多管式熱交換器から新規技術であるより高効率な熱交換器への置換えることにより、熱回収率の増加による環境負荷低減が指向されている。

高効率プレート熱交換器は既存の多管式熱交換器より熱回収効率が優れているプレート(波板)を利用した熱交換器である。特に高温流体から低温流体への熱回収が極めて高効率で可能であり、熱回収を増加することにより次のセクションである加熱炉の負荷が低下することで大幅な省エネルギーが達成できる技術である。

これまで高温 3 流体熱交換にプレート熱交換器を導入する場合、既存技術である 2 流体のプレート熱交 2 基を組み合わせる使用ケースを検討することが一般的であるが、コスト高と用地確保の困難性から投資を見合わせる実状であった。

今回開発する高効率プレート熱交換器技術により、熱交換器 1 基で複数の高温流体を効率的に熱交換可能となり、設置基数の減少による投資コスト圧縮、及び省スペース化が図られることとなる。

これらの優位性により、省エネルギー効果の大きな高効率熱交換器の適用範囲が拡大し、今まで実施に至っていなかった、省エネルギー対策の実現、環境負荷低減(CO2 削減)に大きく寄与できる。

開発目標としては以下の通りとした。

高効率プレート熱交換器を実用化例の無い高温 3 流体熱交換器への適用検討

高温 3 流体条件下におけるプレート熱交換器の熱応力解析

必要な強度を確保した高温 3 流体プレート熱交換器の設計・製作

設置エリアのコンパクト化による省スペースな配置

高効率プレート熱交換器を導入し、熱回収効率が優れていることを確認し、接触改質装置のエネルギー使用量を燃料年間 8,900KL の削減

2. 研究開発の内容

2.1 石油精製プロセスにおける対象装置の選定

原油を処理して各種の石油製品を製造するプロセスを石油精製プロセスと言う。製油所には蒸留装置、改質装置、分解装置、水素化脱硫装置、硫黄回収装置等の装置があり、それぞれ取り扱う油の性状や、温度、圧力等の運転条件が異なる。高効率プレート熱交換器を導入する上で石油精製プロセスにおいて最適な装置について検討し、選定した。

2.2 高温 3 流体プレート熱交換器の開発

接触改質装置においてプレート熱交換器を導入する場合は 2 流体のプレート熱交換器を 2 基設置するのが通常であった。一方、3 流体以上のプレート熱交換器の実績はあるが、いずれも設計温度は 100 以下であり、高温 3 流体は今回が初となる。

(1) 熱交換器のプロセス設計

接触改質装置コンバインドフィード熱交換器における流体のプロセス性状、流体条件からプロセス上の設計を行った。

(2) 熱交換器の強度設計

必要な強度を確保するため、高温 3 流体下におけるプレート熱交換器のバンドル(波板)及び上下部に接合するヘッダー部の熱応力解析を実施。

2.3 熱交換器シェルの開発

下記項目について検討を行い、熱交換器シェルの開発を行った。

(1) 熱交換器シェルの材質選定

接触改質装置に導入するプレート熱交換器シェルについては高温水素侵食による損傷の恐れがあるため、API Publication 941(最新版)に規定されたデータに基づき、シェルの材質を選定した。

(2) 熱交換器シェル設計温度の決定

プレートバンドルのメタル温度プロファイルを線形と仮定し、プレートバンドルとシェルとの温度差を 50 と仮定することで、シェル運転メタル温度を推定した。この結果を基に、適切な区分で設計温度を変化させて、必要十分な強度的余裕を持つようにシェル設計温度を決定した。

2.4 その他プロセスの設計

実機における実証化時においては現有設備内への設置となるが、用地確保に対する制約が多い日本の製油所においては設置面積が少ないコンパクトな配置が必要不可欠となる。今回開発するプレート熱交換器については設置基数を 1 基とすることや縦型とすることで設置面積を少なくしているが、それに付随して配管のレイアウト、機器の配置など用地確保の制約回避に向けたコンパクト化に対する検討を行った。

2.5 高効率プレート熱交換器導入による他プロセスへの影響評価

高効率プレート熱交換器の導入により熱回収が増加することにより、省エネルギー効果が期待される一方で下流プロセスへの影響もあるため、導入後の問題点について検討を行った。

(1)ハザードマップの作成

高効率プレート熱交換器を導入した際に想定される懸念事象を抽出し、対応方法を検討するためにハザードマップを作成した。

(2)加熱炉負荷の低下

高効率プレート熱交換器の出口温度が上昇して加熱炉の負荷が低下することによるヒーターの操作性への影響について検討を行った。

(3)下流エアークーラーにおける塩酸露点腐食

高温側流体(被冷却物)の出口温度が低下することにより、触媒再生運転時にエアークーラー内部において露点に達した場合は、材質が炭素鋼であることから酸露点腐食が懸念される。ここでは、導入後のエアークーラー入口、出口温度を算出することで、エアークーラー内部で露点に達するかどうか検討し、また過冷却を回避するために閉止する必要があるチューブバンドルの数について検討を行った。

3. 研究開発の結果

3.1 石油精製プロセスにおける対象装置の選定

プレート熱交換器に用いられるバンドルは構造上の制約からメンテナンスがほとんど出来ないため、使用環境に制約があり、著しい腐食環境やスケールの発生及び持ち込みが懸念されるプロセスには適用不可となる。よって、適用装置については省エネルギー効果による経済性と使用環境の観点から接触改質装置におけるコンバインドフィード熱交換器を選定した。当該部の流体は脱硫ナフサであり、腐食雰囲気では無く、また、過去の検査結果においても腐食は検出されなかった。(表 1.参照)

表 1. 接触改質装置コンバインドフィード熱交換器の使用環境

使用環境	流体は脱硫ナフサであり、腐食雰囲気ではない。
腐食状況	当該部の検査結果から腐食は確認されなかった。
スケールの生成	原料ナフサは軽質な炭化水素であり、かつ水素リッチな雰囲気下にあるため、スケール生成は殆ど無い。
スケールの持ち込み	原料ナフサの配管にフィルターを設置し、スケールの持ち込みを防止する。

3.2 高温3流体プレート熱交換器の開発

(1)熱交換器のプロセス設計

上記の理由から接触改質装置への適用を検討し、熱交換器設計におけるプロセス上の設計を行った。プレート式熱交換器における通油種は以下の3流体である。

< 低温側流体 >

- ・ Combined Feed(Heavy Naphtha(HN) ,Recycle Gas 1 の混合物)
- ・ Recycle Gas 2

< 高温側流体 >

- ・ Reactor Effluent

各流体のプロセデータを基に熱交換器の設計を行い、現状の多管式熱交換器よりも10%熱回収に優れた熱交換器の設計、製作を行った。

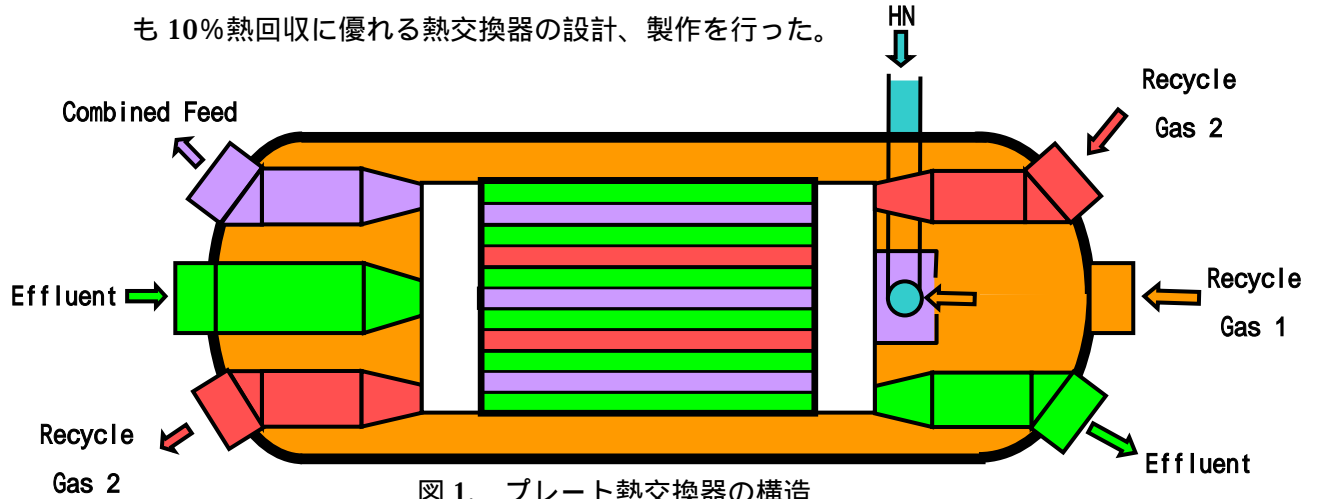


図 1. プレート熱交換器の構造

プレート熱交換器は上図のように高温側、低温側流体毎に交互に積み重なった構造となっている。高温側流体(Effluent)、低温側流体(Combined Feed , Recycle Gas 2)の入口温度条件、許容される差圧を設定して熱交換器の設計を行った。(図 2、表 2 参照)

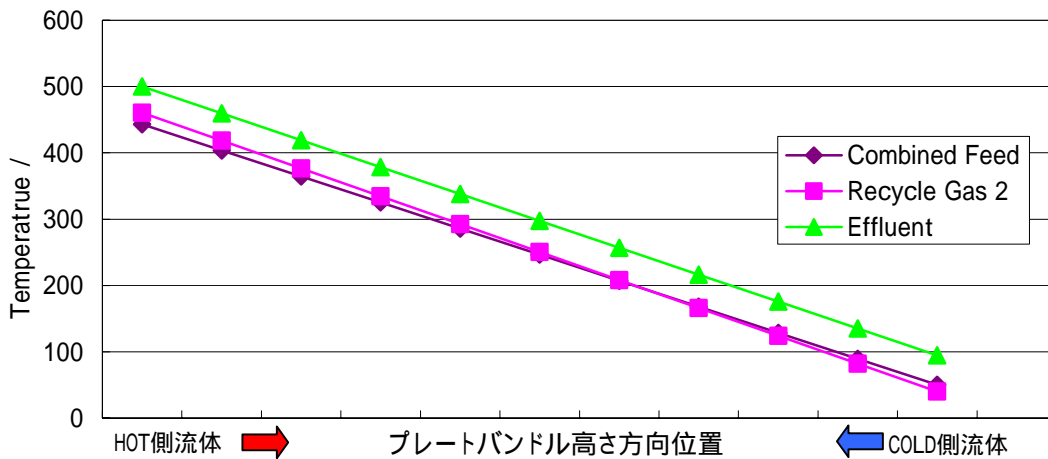


図 2.Heat Transfer Curve

各流体の露点(DEW POINT)は以下の通り。

- ・ Combined Feed 156.6
- ・ Effluent 113.8

上図より、高温側流体、低温側流体ともほぼ線形な温度推移となっていることから、乱流による効率的な熱交換を示している。

表 2. プレート熱交換器の設計条件

Description	COLD STREAM				HOT STREAM	
	Combined Feed		Recycle Gas 2		Effluent	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
Temperature ()	50	443	40	461	500	94.5
Flow Rate (kg/h)	177,020		55,320		233,360	
Vapor (wt%)	45.19	100	100	100	100	85.2
Pressure (MPa)	2.52	2.46	2.28	2.22	2.03	2.01
Duty (MW)	70.23		28.84		99.07	

プレート熱交換器導入前後における熱回収量、低温側流体(被加熱物)入口・出口温度、高温側流体(被冷却物)入口・出口温度の比較を表 3 に示す。高温側流体の出口温度が低下した結果、熱回収量は 90.05MW から 99.07MW と約 10%向上している。

表 3. 導入前後における熱回収量比較

		導入前	プレート熱交導入後
熱回収量	MW	90.05	99.07
< HOT SIDE >		Effluent	
入口温度		501	500
出口温度		133	94.5
DUTY	MW	90.05	99.07
< COLD SIDE >		COMBINED FEED	
入口温度		51	50
出口温度		407	443
DUTY	MW	63.84	70.23
< COLD SIDE >		Recycle Gas 2	
入口温度		39	40
出口温度		426	461
DUTY	MW	26.21	28.84

(2)熱交換器の強度設計

高温 3 流体プレート熱交換器は 2 流体の熱交換器 2 基を一体化した構造となるため、熱応力解析が複雑化する。

- ・プレートバンドル Combined Feed - Reactor Effluent
- ・プレートバンドル Recycle Gas 2 - Reactor Effluent

ここでは高温3流体プレート熱交換器のバンドル(波板)及び上下部に接合するヘッダー部の熱応力解析結果を示す。

(イ)プレートバンドル波板

(a)解析対象部位

: 波板プレートバンドル中の2枚から切り出した部分
全体中の2枚を抜き出し、高低圧の圧力差の最大差圧を用いて解析することで安全側となる。

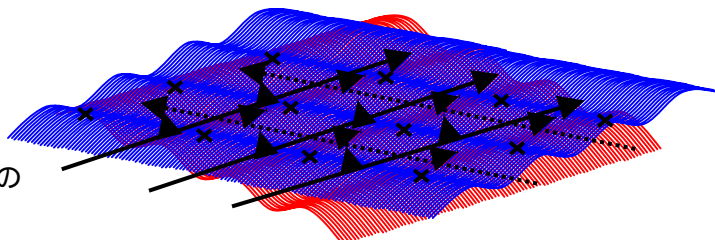


図3. プレートバンドル波板概略図

(b)応力評価法

設計基準

J I S B 8 2 8 1 - 1 9 9 3

(圧力容器の応力解析及び疲労解析) 手法を採用

(c)評価結果

高压側流体と低压側流体の圧力差の最大差圧を用いた(安全側)有限要素解析により計算した評価結果より、プレートバンドルの波板における強度は、2枚のプレートが接触する点の最大応力強さが、SUS321 ステンレス鋼製の設計温度における材料の許容応力値以内にあり強度上問題無いことが分かった。

(ロ)上部、及び下部ヘッダー

(a)解析対象部位

: 上部、及び下部ヘッダー接合部(図4太線)(2ヶ所)

(b)応力評価法

設計基準

J I S B 8 2 8 1 - 1 9 9 3

(圧力容器の応力解析及び疲労解析) 手法を採用

(c)評価

有限要素解析により計算した上表評価結果より、プレートバンドルヘッダーの強度は、ノズル接合部を含むヘッダーにおける局部応力が、材料の許容応力値以内にあり強度上問題が無いことが分かった。従って、プレートバンドルヘッダー形状及び熱膨張差による一次応力及び一次応力プラス二次応力は、温度に依存する使用材料の基本許容応力値に左右される。トップヘッダー評価温度 538 / 500 、ボトムヘッダー評価温度 288 / 69 における基本許容応力値であることから、設計温度 538 で強度上問題無い。

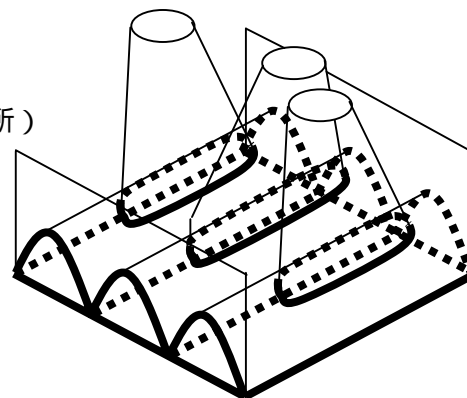


図4. 上部ヘッダー部の概略図

3.3 熱交換器シェルの開発

(1) 熱交換器シェル材質選定

接触改質装置に導入するプレート熱交換器シェルの考えられる損傷は高温水素侵食があり、支配する主な因子として次のものがある。

(イ) 水素分圧

(ロ) 温度（水素の解離と炭素拡散）

(ハ) 暴露時間

(ニ) 炭化物の安定性（成分、金属組織、熱処理）

最初の2つの因子はプロセス上の要求により支配され、初期損傷までに要する時間は、機器の設計寿命より長いので、高温水素侵食を防ぐ唯一の方法は、炭化物の安定化である。Cr, Moのような合金元素は、炭化物を安定化させ、高温水素侵食を発生し難くする。

よって、API Publication 941に記載されたネルソンカーブより、機器の最高使用温度を20℃安全側に考慮した2 1/4Cr-1Mo鋼（低合金鋼）を採用することで、耐高温水素侵食対策を行った。

(2) 熱交換器シェル設計温度の決定

(イ) プレートバンドルのメタル温度プロファイルを線形と仮定

(ロ) プレートバンドルとシェルとの温度差を50℃程度と仮定

プレートバンドル自体には必ずその高さ方向に温度分布が生じ、それをういて高さ方向のシェル温度分布を推定できる。これによって、ある高さ区分毎のシェル最高温度は安全側に決定できる。従って、上記2項より、シェル運転メタル温度を推定し、これに余裕を見てシェル設計温度を4分割：538 / 499 / 338 / 288℃として決定した。（図5.参照）

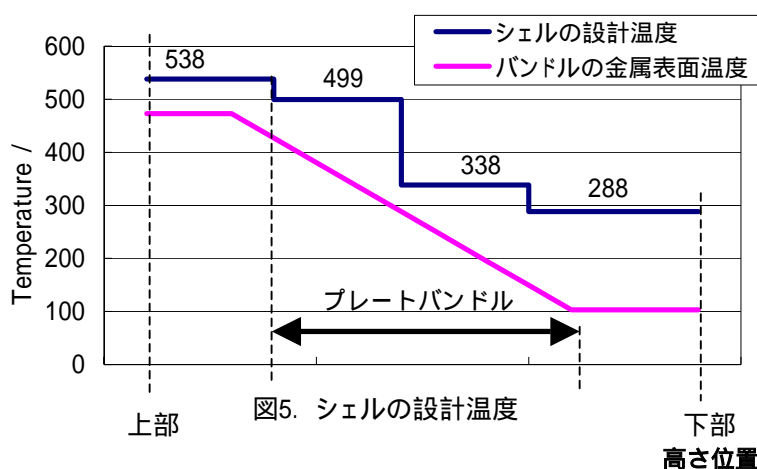


図5. シェルの設計温度

3.4 その他プロセスの設計

現有設備内への導入の際には用地確保に対する制約が問題となるため、コンパクトな配置に対する検討を行った。

(1)配管耐震設計

接触改質装置に導入するプレート熱交換器導入による高圧ガス配管系の耐震性能評価結を行い、適用範囲、適用法規・基準、地震力より耐震性能評価を実施。

(イ)適用範囲

プレート熱交換器導入に伴う高圧ガス対象配管

(ロ)適用法規・基準

(a)適用法規 高圧ガス保安法

(b)適用基準 高圧ガス設備等耐震設計基準（許容スパン法）

(ハ)地震力

耐震設計用の地震力の算定に用いる諸係数を以下に示す。

(a)重要度係数 1 : 0.50（重要度）

(b)地域係数 2 : 1.0（千葉県 特A）

(c)表層地盤増幅係数 3 : 2.0（第4種地盤）

(ニ)耐震性能評価結果

対象各高圧ガス配管は、配管スパン長評価及び変位吸収能力評価いずれも前述の評価基準式を満足する結果となった。

従って、耐震性能評価結果から、法遵守、熱交換器同様の省スペース化（配管レイアウト検討）を図った高圧ガス対象配管の最適な耐震性能評価が出来たと言える。

(2)配管強度計算

接触改質装置に導入するプレート熱交換器のその他プロセス設計としてプロセス配管（ナフサ、水素ガス/ナフサガス、水素ガス/改質ナフサガス）の強度検討を行い、使用肉厚に対する最小必要肉厚を算出した。算出結果から得られた配管の必要最小肉厚値よりも厚肉とし、内圧による破損はなく、また腐食代も考慮することで内部流体環境により発生する腐食の余裕度を見て、強度上最適な肉厚とした。

3.5 高効率プレート熱交換器導入による他プロセスへの影響評価

(1)ハザードマップの作成

高効率プレート熱交換器を導入した際に懸念される事象を想定し、対応方法を検討するためにハザードマップを作成して懸念事項を抽出し、対応策について検討した。

(2)加熱炉負荷の低減による影響

高効率プレート熱交換器は熱回収率に優れることから、下流にある4基の反応器予熱用加熱炉の負荷が低下する。プレート熱交換器導入前後における加熱炉負荷を図6.に示す。

加熱炉 2 及び 4 の負荷は変化しないが、加熱炉 1 及び 3 の負荷は大幅に低下する。

バーナーの最小燃焼容量はバーナーの性能曲線より 0.3MW となるため、加熱炉 1 においては 24 本中約 10 本のバーナーを消す必要があるが、均一な加熱が行われるようにバーナーを間引けば伝熱、燃焼上の問題は無い。

一方、加熱炉 3 の運転温度は現状の運転温度と設計条件の間にあるため、問題は無い。よって、上記理由により加熱炉負荷の低減に伴う運転上の問題は発生しない。

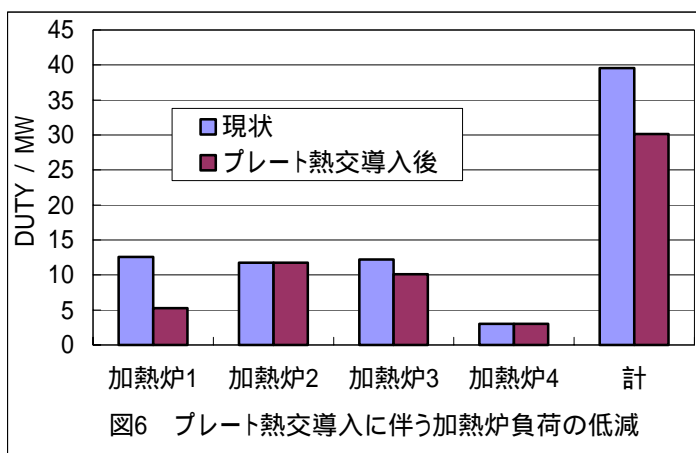


図6 プレート熱交導入に伴う加熱炉負荷の低減

(3) 下流クーラー冷却能力

プレート熱交換器導入により熱交換量が増大することで、下流に位置するエアークーラーにおいて入口温度が低下することで触媒再生運転時にエアークーラー内部で露点以下となることによる塩酸露点腐食が懸念される。ここではエアークーラーの冷却能力から以下の項目について評価を行った。

- ・エアークーラー内部で露点以下となるか。
- ・エアークーラー出口温度を現状と同等とするために必要な閉止チューブバンドル数

エアークーラー入口温度

プレート熱交換器導入後の触媒再生運転時におけるエアークーラー入口温度は 100 と予想され、現状より 12 低くなる。(表 4、表 5 参照)

表 4. 触媒再生運転時のプレート熱交換器運転条件

Process Data	Combined Feed		2 nd Recycle Gas		Reactor Effluent	
	In	Out	In	Out	In	Out
Flow Rate(kg/h)	28,222		23,829		51,964	
Temperature()	77	340	58	330	370	100
Press Drop(MPa)	0.024		0.024		0.021	

表 5. エアークーラー入口温度の比較

	導入前	プレート熱交導入後	
エアークーラー入口温度	112	100	12

自然通風時のエアークーラー出口温度

エアークーラー出口温度が低下することにより、冷え過ぎを懸念した場合にファンは停止する必要がある。エアークーラーのファン停止時の自然通風による冷却能力を伝熱性能の面から計算した結果、空気量は 64,800kg/h であった。

上記空気量にてプレート熱交換器導入後のエアークーラー出口温度を算出した結果 30.6 (現状では 32.5)となった。これに対して露点は 11.5 であり、エアークーラー内部で露点に達していない。

管束の閉止による冷却能力制限

エアークーラー入口、出口温度が低下することについて、現状の出口温度(32.5)と同等にするために必要となる管束の閉止数について検討を行った。その結果、8 管束中の 1 管束を閉止することで、出口温度が 34.0 となると推定される。(表 6.参照)

表 6. エアークーラーファン停止時の冷却能力検討結果

		現状	プレート熱交換器導入後	
			自然通風時	1 管束閉止
プロセス流量	kg/h	52,626	52,626	52,626
入口温度		111.7	100	100
出口温度		32.5	30.6	34.0
外気温		10.4	10.4	10.4
空気流量	kg/h	64,800	64,800	56,700
空気出口温度		77.2	69.0	74.0
平均温度差		18.5	16.0	16.3
総括伝熱係数	W/m2	53.7	54.5	58.1
管束数	本	8	8	7
最低管壁温度		15.6	13.6	15.7

エアークーラー入口温度は 12 低下するが、エアークーラーでの空気温度との差が小さくなるため、エアークーラー出口温度及び最低管壁温度は約 2 低下するのみである。この条件においても最低管壁温度約 14 であり、露点(約 11.5)よりも高い。

4.まとめ

4.1 平成15年度の研究開発

高温2 流体プレート熱交換器の技術は確立しており、製油所、石油化学工場において多くの事例が見られる。一方、高温3 流体プレート熱交換器は現在までの所実用化に至っておらず、本論において開発するに至った。熱交換器1基で複数の高温流体を効率的に熱交換可能である高温3 流体プレート熱交換器を開発し、設計・製作を行い、この結果、次の成果を得た。

経済性、コンパクト化

高温3 流体プレート熱交換器1基の方が高温2 流体プレート熱交換器2基よりも経済性に優れ(初期投資の圧縮)、設置面積減少によりコンパクト化につながることを示した。

プレート熱交換器

プレートバンドル、上下部ヘッダーの熱応力解析より、必要な強度を有したプレート熱交換器を設計し、製作した。

熱交換器シェル

プレートバンドルのメタル温度プロファイルを線形と仮定し、プレートバンドルとシェルとの温度差を50℃と仮定することで、シェル運転メタル温度を推定し、シェル設計温度を決定した。

当初の目標では以下の3点を本年度の目標としていた。

- ・高温3 流体下の熱応力解析の実施
- ・必要な強度を確保したプレート熱交換器の設計・製作
- ・設置エリアのコンパクト化による省スペースな配置

上記の通り、応力解析を実施し、必要な強度を確保したプレート熱交換器の設計製作を行った。また、省スペースな配置とすることで、本年度の目標は達成されたと言える。

4.2 今後の課題と来年度の重点事項

来年度は実機における実証化について重点的に研究を行うこととなる。高効率プレート熱交換器を接触改質装置へ導入し、設計の妥当性を検証するとともに、実機における省エネルギー効果の確認を行う。

また、運転開始時、運転初期のみならず運転中期における熱回収量評価を行う。併せて、広範な運転条件への対応を可能とするため、運転条件変更時の評価を行い、実用化における技術的な完成度向上へ向けた研究を実施する予定である。