

1) はじめに

前回演習（2）では Xace の Sample HTRI と Gas-Liquid の Economizer（鋼管型熱交換器）について計算を実施した。Economizer の応用例としては、ボイラー燃焼や鉄鋼排ガスによる空気予熱（Recuperator）があげられる。今回はこの Gas-Gas 熱交換器のチューブ側に hiTRAN を採用した Recuperator の最適化設計を試みた。

2) 基準 Recuperator の設計

FlueGas の設計流量は 40,000Nm<sup>3</sup>/h、入口温度は 800℃、予熱用 Air は 36,000 Nm<sup>3</sup>/h、入口温度 25℃とした。FlueGas の組成は空気比 1.2 の天然ガス燃焼排ガスとし、25℃の Air が約 600℃まで熱回収出来るような Recuperator の Geometry を図 1 に示したように Air 側 4pass で決定した。

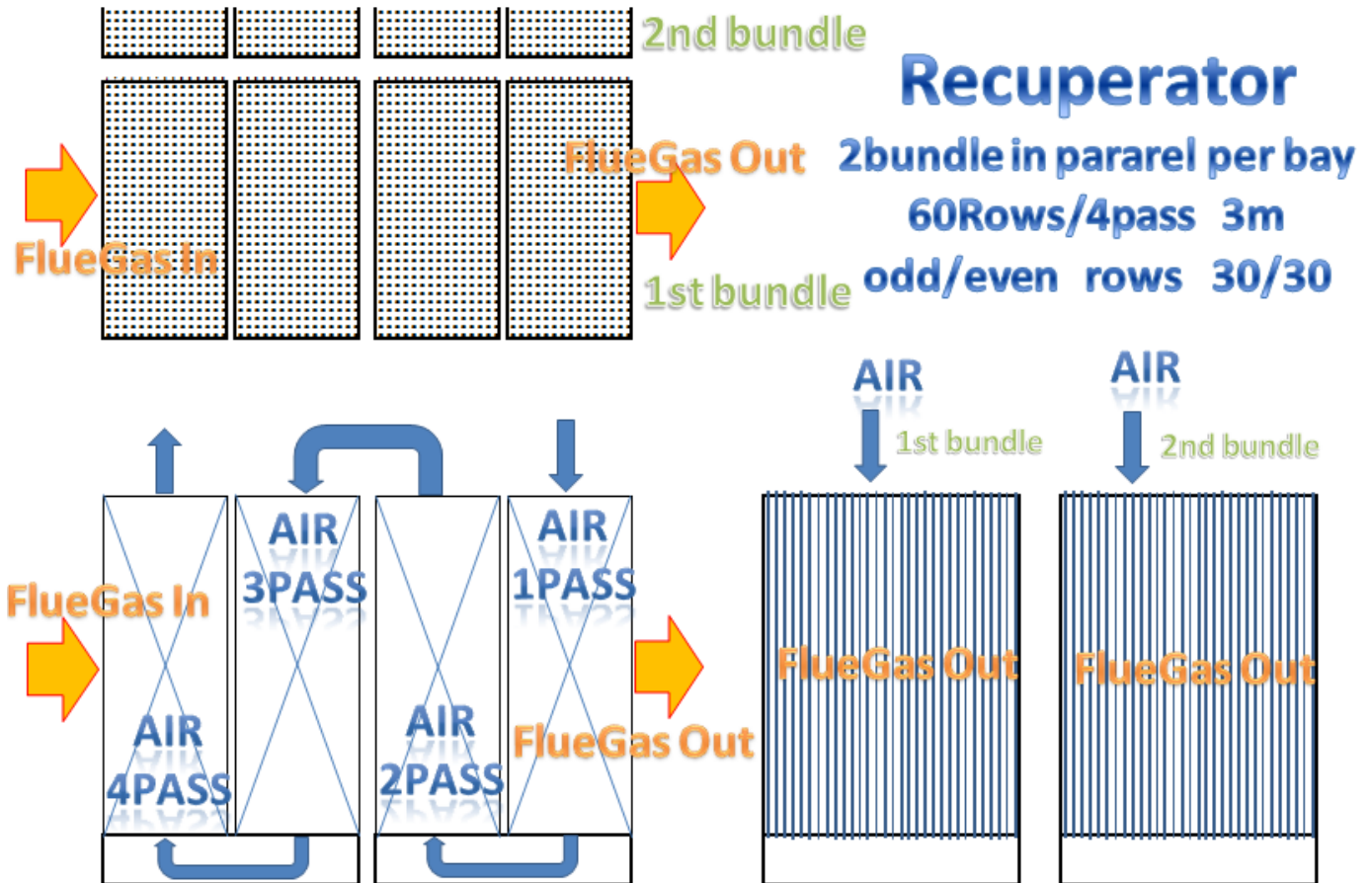


図 1. 標準的な Recuperator の仕様図

この Recuperator の Rating 計算結果（Output Summary）Appendex1 に示す。表 1 には同様に Pass を変更したときの結果を一覧する。Rating 計算では Duty を一定にしているのので、FlueGas Air の Out Temperature は同じとなる。

4Pass では OverDesign は-0.88 と Duty7.83MegaWatts を満足しているが、2Pass では-38%、1Pass では-68%と大きく減少する。6Pass では OverDesign が 20%まで向上するが、Tube 側圧力損失は当然非常に大きくなる。Tube 側 Pass 数の増加は Tube 側の流速、境膜伝熱係数、EMTD の全てをおおきくするが、圧力損失も同時に大きくする。

当然のことながら Outside 側の圧力損失と境膜伝熱係数には変化は認められない。総括伝熱係数 U は（1）式で表わせるから、U は Tube 側の境膜伝熱係数の低下に引きずられて大きく悪化する。

$$1/U = 1/h_{out} + 1/k*t + 1/h_{tube} \dots (1)$$

ここで U は総括伝熱係数、 $h_{out}$  は外側境膜伝熱係数、k は管の熱伝導度、t はその壁の厚み、 $h_{tube}$  は管側境膜

伝熱係数である。

この式を見れば判るように、管の厚みと外側の伝熱係数が変わらない場合、総括伝熱係数 U は管側の境膜係数の低下に大きく影響される。4Pass の場合には内外の境膜伝熱係数はほぼ等しく、優れたバランスの熱伝達を示している。

表 1. Plain Tube Recuperator の Pass 数と Rating での OverDesign

	Unit	6pass		4pass		2pass		1pass	
		FlueGas	Air	FlueGas	Air	FlueGas	Air	FlueGas	Air
Total flow rate	(kg/s)	13.85	12.77	13.85	12.77	←	←	←	←
Temperature, In	(Deg C)	800.0	25.0	800.0	25.0	←	←	←	←
Temperature Out	(Deg C)	343.0	607.5	343.0	607.5	←	←	←	←
Pressure, Inlet	(kPa)	100	200	100	200	←	←	←	←
Pressure drop, Total	(kPa)	0.129	5.582	0.128	2.054	0.127	0.747	0.125	0.549
Midpoint velocity	(m/s)	6.69	19.16	6.69	13.03	6.77	7.21	6.39	2.99
Outside film coef.	(W/m2-K)	58.77		59.0		59.06		57.86	
Tubeside film coef.	(W/m2-K)	71.1		51.0		28.35		14.84	
Actual U	(W/m2-K)	29.104		24.5		17.0		10.3	
Required U	(W/m2-K)	24.209		24.8		27.5		32.8	
EMTD	(Deg C)	244.5		239.1		214.9		180.3	
Duty	(MegaWatts)	7.83		7.83		←		←	
Overdesign	(%)	20.2		-0.88		-38.41		-68.49	

Geometry: TubeOD=42.7mm,t=3mm,Length=3m,Pitch=75x75mm,( 60 x30)x2bundle,1800 本、Area1323m2

hiTRAN エレメントは流速の小さい領域 (=レイノルズ数の小さい領域) で管内の境膜伝熱係数を向上させる機能を持つものであり、低 Pass 領域での性能向上が期待できるので、4Pass 以下のケースを検討した。

### 3) hiTRAN の適用

hiTRAN.SP の HTRI アドインでは、Tube 内側の許容圧損 (Pressure drop/Allow) によって hiTRAN Parts Number を決定する仕組みとなっている。表 1 の計算結果に余裕率をみて、目標の許容圧損を Outside で 0.23kPa、Tubeside で 2.3kPa として計算することとした。最も圧損の小さい hiTRAN エレメント Type を用いても、許容圧損よりも大きくなる場合には、hiTRAN.SP ではその Type での圧損を計算するようプログラムされており、計算結果は得られる。4Pass の場合全てに hiTRAN を挿入すると圧損が 10kPa を超し過大となってしまうので、図 2 のように HTRI の入力画面で、TubeType を 4 つに分け、hiTRAN を一部のみに挿入するケースを計算した。LT25%、50%とは低温側に、HT25%、50%とは高温側に夫々 hiTRAN を挿入したときの計算である。

Tube Types			
	Tube Name	Tube Type	Tube Internal
1	TubeType1	Plain	hiTRAN Insert
2	TubeType2	Plain	None
3	TubeType3	Plain	None
4	TubeType4	Plain	None
5			
6			
7			

図 2 HTRI の TubeType 入力画面

さらに TubePass を 2Pass、1Pass とした場合には、圧損が小さくなるので、hiTRAN を 100%挿入した Rating 計算を実施した結果を表 2 に一覧する。表 2 には Duty 等の計算結果は省略した。

表 2 から明らかのように、4Pass では Tube Air 側の圧損が大きくなりすぎ、低温側の 1/4 に挿入するのがやっつこの様である。挿入位置が低温 (LT) 側か高温側かは微妙なところであるが、若干低温側が良さそうである。

表 2. hiTRAN 挿入 Recuperator の性能向上

		4Pass LT25%	4Pass HT25%	4Pass LT50%	4Pass HT50%	2Pass 100%	1Pass 100%
Pressure drop, Total (FlueGas)	(kPa)	0.131	0.126	0.131	0.125	0.127	0.126
	(Air)	3.364	4.647	5.287	6.863	2.298	1.159
Midpoint velocity (FlueGas)	(m/s)	6.86	6.52	7	6.37	6.75	6.48
	(Air)	13.54	12.39	14	12.29	7.24	2.99
Outside film coef	(W/m <sup>2</sup> -K)	58.4	58.9	58.5	58.6	58.0	58.2
Tubeside film coef	(W/m <sup>2</sup> -K)	63.2	63.0	77.8	77.7	118.7	107.7
Actual U	(W/m <sup>2</sup> -K)	27.5	27.4	30.3	30.3	35.7	34.5
Required U	(W/m <sup>2</sup> -K)	24.7	27.9	24.8	24.9	27.4	33.8
EMTD	(Deg C)	239.2	238	239	237.6	215.8	175.3
Overdesign	(%)	11.0	10.3	22.2	21.6	30.2	2.3

hiTRAN100%の場合は 2Pass で最も大きな OverDesign を示し、1Pass では Tube 側境膜伝熱係数は変わらないが、EMTD が小さくなるために OverDesign はむしろ小さくなる。1Pass で許容圧損 2.3kPa に選択された hiTRAN エレメントは、製造可能な最大密度のエレメントであり、圧損は許容圧損を大きく下回っている。

式  $Q=U \cdot A \cdot \Delta T_m$  で伝熱面積: A および移動熱量(Duty): Q が一定の場合、 $\Delta T_m$  の大きい 2Pass の方が 1Pass の方が性能が出るケースである。hiTRAN の効果で Tube 側の境膜係数は十分大きいので、さらに性能を向上させるためには、外側 (FlueGas) の境膜伝熱係数を改善する必要がある。

#### 4) FlueGas 側の境膜係数の改善

Outside 側の境膜係数を大きくするには、開口部面積 (間口) を小さくして流速を上げるしかないが、圧損が大きくなる。しかし Tube の列側 (FlueGas の流路方向) の長さを短くすることで圧損を小さくすることが可能である。また図 3 イメージ図のように外側の FlueGas 流路の開口部は、Pitch と Tube 外径を比で表わされる。これらを考慮して、Tube の Pitch や配置 (格子 : inline、と千鳥 : staggered) の外側の境膜係数への影響を検討し、性能向上の結果を最適化した結果を表 3 にまとめる。

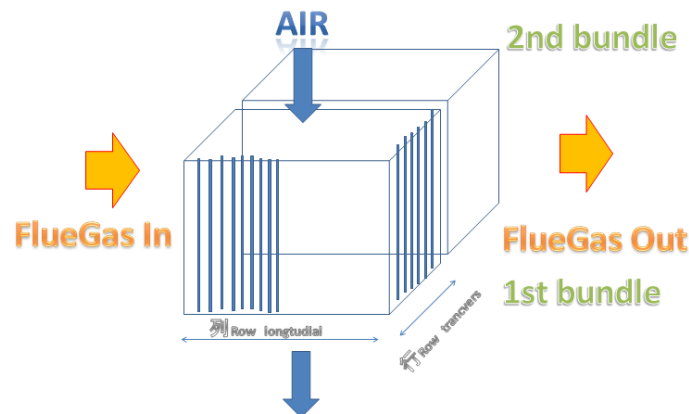


図 3. 2-bundle parallel per Bay のイメージ図

表 3 Bundle Outside の Geometry と OverDesign

			Plain	2Pass hiTRAN100%		最適化	
Geometry (TubeOD =42.7mm, t=3)	Tube 配列		格子	格子	千鳥	千鳥	千鳥
	列 (rows)		60 列	60 列	60 列	50 列	50 列
	行 (odd/even)		30/30	30/30	30/30	30/30	30/30
	Pitch(mm)	Trans/Long	75/75	75/75	70/60.6	70/60.6	73/60.6
Pressure drop, Total	(FlueGas)	(kPa)	0.128	0.127	0.343	0.286	0.226
	(Air)	(kPa)	2.054	2.298	2.272	2.276	2.275
Midpoint velocity	(FlueGas)	(m/s)	6.7	6.8	8.0	8.0	7.2
	(Air)	(m/s)	13.0	7.2	7.3	8.7	8.7
Outside film coef		(W/m <sup>2</sup> -K)	59.0	58.0	71.6	71.7	67.6
Tubeside film coef		(W/m <sup>2</sup> -K)	51.0	118.7	117.8	90.9	90.9
Actual U		(W/m <sup>2</sup> -K)	25.5	35.7	40.3	36.1	35.0
Required U		(W/m <sup>2</sup> -K)	24.8	27.4	27.4	32.9	32.9
EMTD		(Deg C)	239.1	215.8	215.8	215.7	215.7
Overdesign		(%)	-0.9	30.2	46.9	9.5	6.3
Area		m <sup>2</sup>	1,323	1,323	1,323	1,103	1,103
Weight Bundle		kg	68,113	79,205	65,540	52,851	53,912
Total Weight		kg	136,227	158,409	131,081	105,702	107,823
Tube Count		pcs	1,800	1,800	1,800	1,500	1,500
Bundle Width		m	2.2	2.2	2.2	2.1	2.2

表3より明らかなように Outside 側の境膜係数は、格子(inline)から千鳥(staggered)にするだけで23%向上し、OverDesign は 46.9%まで向上する。しかし Outside と Tubeside の許容圧損 (0.23 と 2.3kPa) を越しているの  
で、pitch と列数の調整を実施、最適化した結果、hiTRAN 設計では、伝熱面積 20%、重量して 30%近くに小型  
化出来ることが判った。

#### 5) 負荷 (Duty) 変動の影響

鉄鋼業界の Recuperator は低負荷から高負荷の範囲で、バッチ工程のように大きく変動するのが一般的の様  
である。hiTRAN 挿入によって小型化された Recuperator が負荷変動で性能がどのように変化するかを HTRI で  
検証した。また PlainTube で設計した Recuperator も同様に計算して比較した結果を表 4、5 に示した。

FlueGas の流量負荷が 50%から 200%に変動した場合、および FlueGas と Air の温度が変化した場合を想定  
し計算してみたが、表 4、5 に示すように負荷に応じた Duty を示し、PlainTube 設計と hiTRAN 設計の間の  
Recuperator には何ら性能の有意差は現れない。

#### 6) まとめ

Recuperator の Tube 側に hiTRAN を採用し、Tube2Pass とすることで、圧力損失が標準の PlainTube と同  
等の性能(圧力損失、Duty 同等)を伝熱面積 20%、重量 30%減の小型軽量化を達成することが出来た。Recuperator  
の運転条件は変化が大きいと、熱応力等の対策を十分取る必要はあるが、hiTRAN の採用によってコストダウ  
ンの方向が見えてきた。

表 4 最適化された hiTRAN Recuperator の Duty 変動による性能変化

			hiTRAN2PassOptimizedSimulation				
			Min(50%)	Normal	FlueTemp	Air Temp	Max(200%)
Total flow rate	(FlueGas)	(kg/s)	6.9	13.9	←	←	27.7
	(FlueGas)	Nm3/h	20000	40000	←	←	80000
Total flow rate	(Air)	(kg/s)	6.4	12.8	←	←	25.5
	(Air)	Nm3/h	18000	36000	←	←	72000
Temperature, In	(FlueGas)	(Deg C)	→	800	700	800	←
Temperature,Out	(FlueGas)	(Deg C)	300.6	334.6	296.3	323.2	373.8
Temperature, In	(Air)		→	25	←	5	25
Temperature,Out	(Air)		652.4	617.0	533.4	6109.0	572.3
Pressure drop, Total	(FlueGas)	(kPa)	0.057	0.225	0.205	0.222	0.877
Pressure drop, Total	(Air)	(kPa)	0.955	2.299	2.182	2.243	7.371
Midpoint velocity	(FlueGas)	(m/s)	3.5	7.2	6.6	7.1	14.7
Midpoint velocity	(Air)	(m/s)	4.6	8.8	8.0	8.7	17.2
Outside film coef	-	(W/m2-K)	45.8	67.4	63.6	67.0	100.9
Tubeside film coef	-	(W/m2-K)	60.9	91.4	89.1	90.5	136.6
Actual U	-	(W/m2-K)	23.8	35.0	33.6	34.8	51.5
EMTD	-	(Deg C)	162.2	204.6	184.5	211.1	255.5
Duty	-	(MegaWatts)	4.24	7.97	6.79	8.13	14.65

表 5 PlainTube 4 Pass Recuperator の Duty 変動による性能変化

			Plain4PassSimulation				
			Min(50%)	Normal	FlueTemp	Air Temp	Max(200%)
Total flow rate	(FlueGas)	(kg/s)	6.9	13.9	←	←	27.7
	(FlueGas)	Nm3/h	20000	40000	←	←	80000
Total flow rate	(Air)	(kg/s)	6.4	12.8	←	←	25.5
	(Air)	Nm3/h	18000	36000	←	←	72000
Temperature, In	(FlueGas)	(Deg C)	→	800	700	800	←
Temperature,Out	(FlueGas)	(Deg C)	316.8	343.0	302.8	333.2	376.7
Temperature, In	(Air)		→	25	←	5	25
Temperature,Out	(Air)		634.1	607.4	526.9	600.6	568.8
Pressure drop, Total	(FlueGas)	(kPa)	0.028	0.128	0.119	0.128	0.576
Pressure drop, Total	(Air)	(kPa)	0.969	2.054	1.969	2.067	6.328
Midpoint velocity	(FlueGas)	(m/s)	3.3	6.7	6.1	6.6	13.6
Midpoint velocity	(Air)	(m/s)	6.7	13.0	12.0	12.8	25.2
Outside film coef	-	(W/m2-K)	38.7	59.0	55.6	58.7	93.4
Tubeside film coef	-	(W/m2-K)	29.0	51.0	5055.0	50.2	85.9
Actual U	-	(W/m2-K)	14.9	24.5	23.8	24.3	39.6
EMTD	-	(Deg C)	209.9	239.1	212.2	247.3	278.6
Duty	-	(MegaWatts)	4.11	7.83	6.70	7.99	14.56

以上