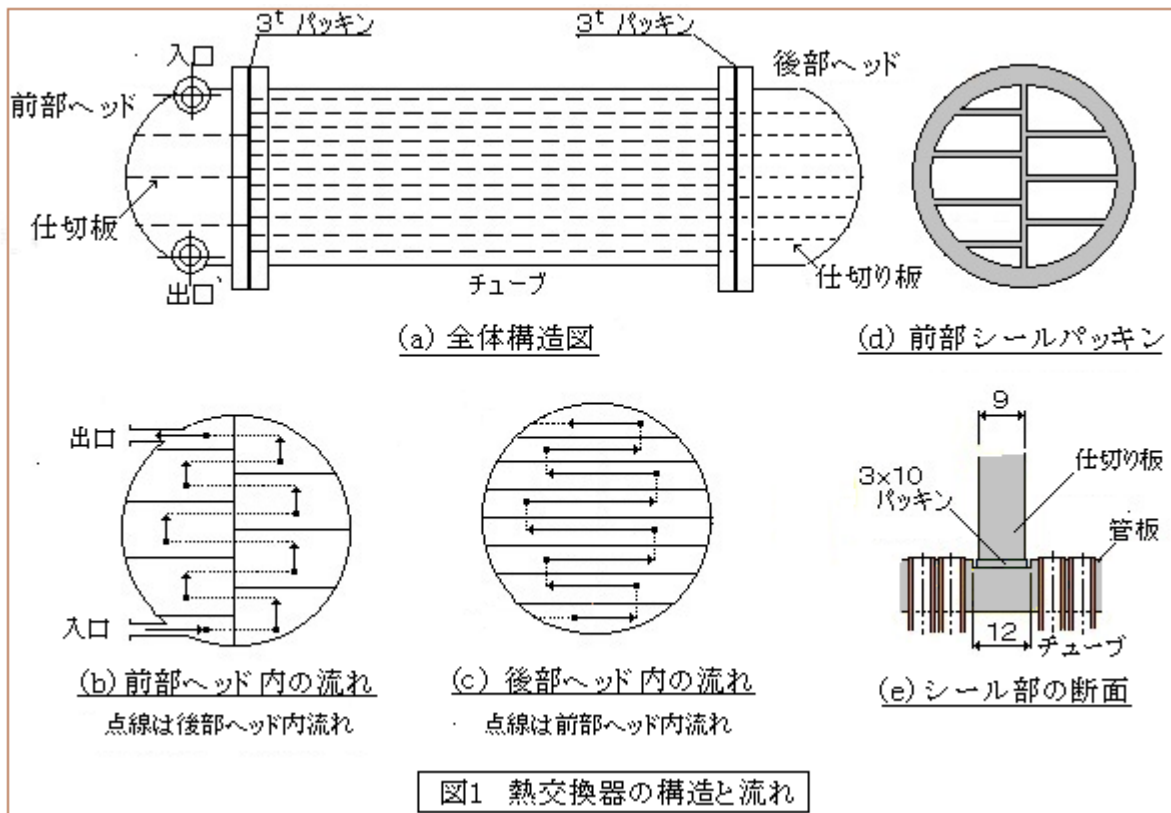


【整番 FE-09-TC-002】	【標題】 熱交ヘッド(仕切室)のパッキン損傷に関する検討
分類：流れ(剥離渦)/種別：トラブル事例	作成年月：H1.3/改訂：Ver.0.0 (R02.5)
	作成者：N. Miyamoto

全 5 枚

ある化学プラント設備の定期点検で、プロセスラインにある 2 基の多管式熱交換器のヘッド～管板のシールパッキンが内側の嵌め込み溝部分で摩滅して消散していることがわかった。工程的にシールパッキンの更改が急がれるので分析に依ることなく、損傷状況の観察から事故原因を推定し対処したが、その後のクレームを聞かないので事故対応としては問題なかったように記憶している。もう 30 年以上も前の話なので時効成立と思うが、流体問題としては多少特異性があるので何かの参考になればと思い、古いメモ書きを手繰って TS にしてみた。以下



1. 損傷熱交の構造と流れ

損傷熱交の全体構造を図 1(a)に示す。横置きで前後ヘッド(チャンネル)-管板-チューブ-胴から構成されている。チューブ流れはマルチパスになっており、ポンプから送られた流体は前部ヘッド(チャンネル)下部の仕切室に入り、前後ヘッド間のチューブを 8 往復して、前部ヘッド上部の仕切室から出ていく。チューブ通過のプロセス流体は固-気-液 3 相流れ、流量は 50-60m³/hr 程度、温度は 90℃程度である。

前後ヘッドは各室に仕切られている。前部ヘッドの各仕切室内の流体は、図 1(b)に示すように下側のチューブから流れでてすぐ折り返し上側のチューブに流れ込む(縦方向流れである)。一方、後部ヘッドの各仕切室内の流体は、図 1(c)に示すように左右何れかのチューブから流れ出て左右何れかのチューブに流れ込む(横方向流れである)。

前後ヘッドと管板の間のシールパッキンは管板上の溝に敷かれ各仕切板で圧縮されて各水室をシールし密閉している。パッキンの外形とシール状態を図 1(d)(e)に示す。ヘッド/管板の材料はステンレス系、

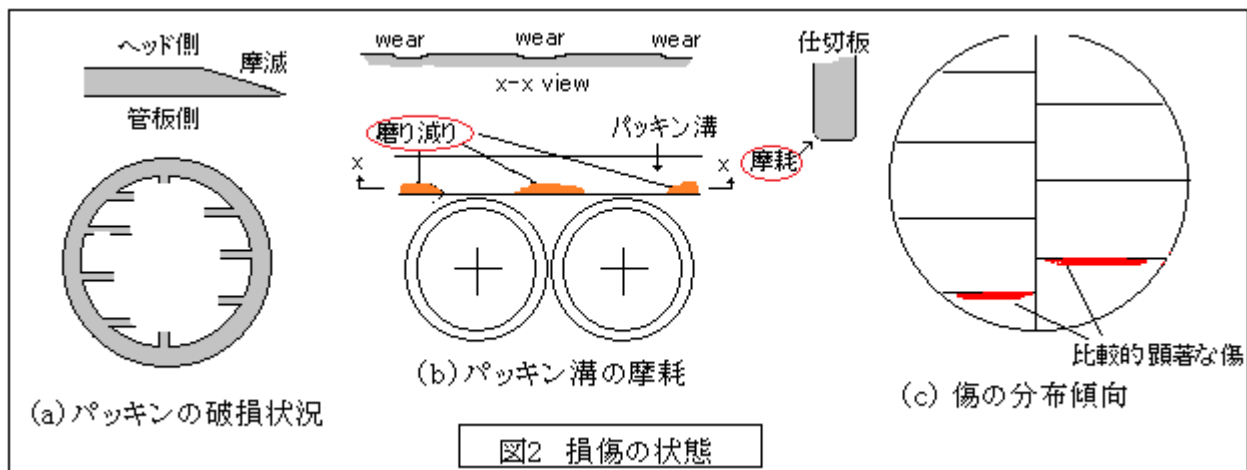
パッキンは純テフロンシートだったと思う。

2. パッキンなど損傷の状況

現場報告に基づきシートパッキン等の損傷状況を要約すると次のようになる(図2にその様子を示す)。

- ① 損傷は2基の熱交とも前部ヘッドで起きている。後部ヘッドでは起きていない。
- ② パッキンの摩滅は管板の管板の溝部分中央でおきている。周辺のフランジ部分では起きていない。
図2(a)に示すようにパッキン周の内部は大部分、欠損して無くなっている(消滅/流失?)。
- ③ パッキンは摩滅したようになっており、表面は滑らかでスクラッチ傷はない。図2(a)のように摩滅は管板側でなくチャンネル側(流体側)から深さ方向に進行しているように見える。
- ④ 金属部分の管板溝や仕切板にも減肉の痕が見られる。溝部分では特にチューブ穴の中間位置で肉減りが目立っている(図2(b)参照)。また仕切板はパッキンとの当たり面の角で丸くなっている(なめ傷?)。概して、下部のパッキン溝や仕切板で著しい肉減りが見られる(図2(c)参照)。

以上は、現場の目視観察によっており、かなり感覚的で観察の抜け落ちも多々あると思われる。



3. 損傷メカニズムの推定

(1) 損傷の原因につながるものとして次のような因子が考えられる。

- ① シールパッキンの材質欠陥や取付け不良
- ② シールパッキンの隙間腐食
- ③ キャビテーションエロージョン
- ④ スラリーエロージョン
- ⑤ ヘッド内の流れ状態、特に仕切板廻りの流況

もともと高温耐食材であり、略 90℃の当該使用温度での材質劣化は考えられない。また嵌込み溝にセットされるもので運転時の外部漏れなどの異常も観察されていないので、取付け不良はまず考えられない。仮に組み立て時、溝部の幅 10mm のパッキンに切傷ができて、仕切板で押え込まれているのでその大半が喪失することは考えにくい。またテフロンシートは摺動材やライニング材などに使用されており隙間腐食(通気差腐食)で問題がおきた事例は聞かない。従って①②は除外できる。

また製品につながる流体のため流体物性がクリアでないが、混合流体の通念から考えてキャビテーションの発生は考え難く、損傷状態からみてもキャビ・エロの痕跡はない。従って③も除外できる。

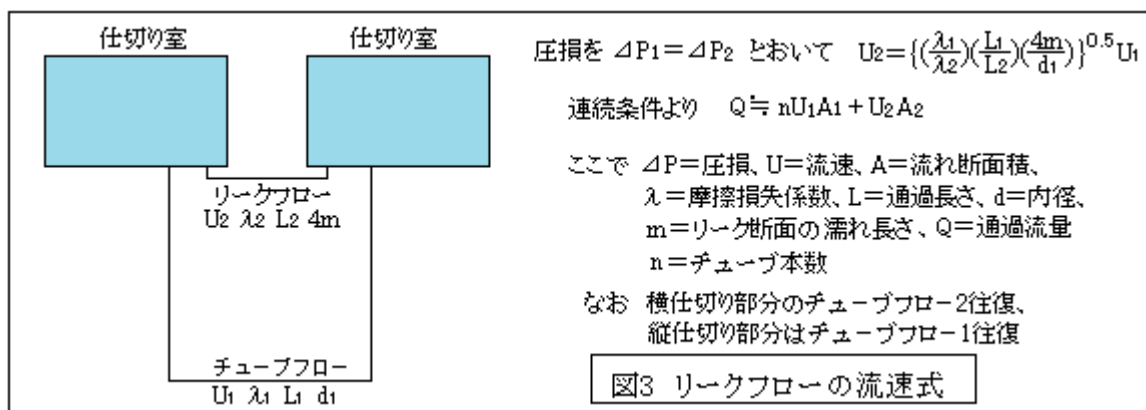
④については、パッキンにもパッキン溝や仕切板の角にも滑らかな摩耗/摩擦が残っている。流体が固・気・液 3 相流れであるところから微細化した固体によるスラリーエロージョン(サンドエロージョン)の疑いがもたれる。パッキン溝に残る摩耗は、**甌穴現象(*)**の痕跡かも知れない。

⑤については、ヘッド内の流れがかなり複雑で、仕切板-パッキン-溝でリークフロー(洩れ)が予想されるから、きわめて重要である。

従って、④+⑤の形で何かが起きていたと見るのが妥当と思われる。

(*) 甌穴は、谷川の流れに面した岩の窪みに礫が入り、流れから剥離した回流渦によって窪みがえぐられて大きな穴に成長したもの。各地の急流で散見される。

(2) 仕切板で抑えられた 10mm 幅シールパッキンの gross な摩滅は恐らくスラリーエロージョンによるものとみていいと思う。パッキンはフランジのボルト締めで圧縮される形になっているが、締付けはフランジ間の円周部分に集中し中心に向かうほど緩みが強まったとみていい。これは図 2(a)からも予想できる(中心部分の消失)。おそらく仕切板先端の直下では締付け面圧の低下で、微少なリークとリークフローが起きていたと考えられる。リークフローは圧力の高い上流の仕切室から隣接する下流の仕切室に流れる。この状態をモデル化すると下図のようになる。



図中のチューブフローは前部ヘッドから後部ヘッドに流れて、そこから折り返す往復流れである。リークフローとチューブフローの圧損は等置できるので、リークフローの流速 U_2 は図中の式で計算できる。{ }内の流路長さ比の (L_1/L_2) が圧倒的に大きいため、リーク流速はかなり早くなりチューブ内流速は 1m/s を大きく越える。パッキンの摩滅するにつれリーク量は増加して熱交換器としての熱効率はかなり低下していたと思われる。ただこのリーク現象には次の 2 つの疑問が残る。

- どうして当初の微少流れが深さ 3mm のフルフローに成長できたのか?
- 圧損の違いはあるものの、何故、前部ヘッドに起き後部ヘッドに起きなかったか?

(3) これらの疑問に対する解は現場観察で得られたパッキン溝の摩耗の痕跡から得られるのではないかとと思われる。(2)でも述べたように中央寄りにパッキン部分の締付けは弱まるが、テフロン反発があるので実質上の隙間はゼロに近いと思われる。ゼロ隙間が実質的な隙間に広がるには、たとえば以下のようなきっかけと、プロセスが必要である。

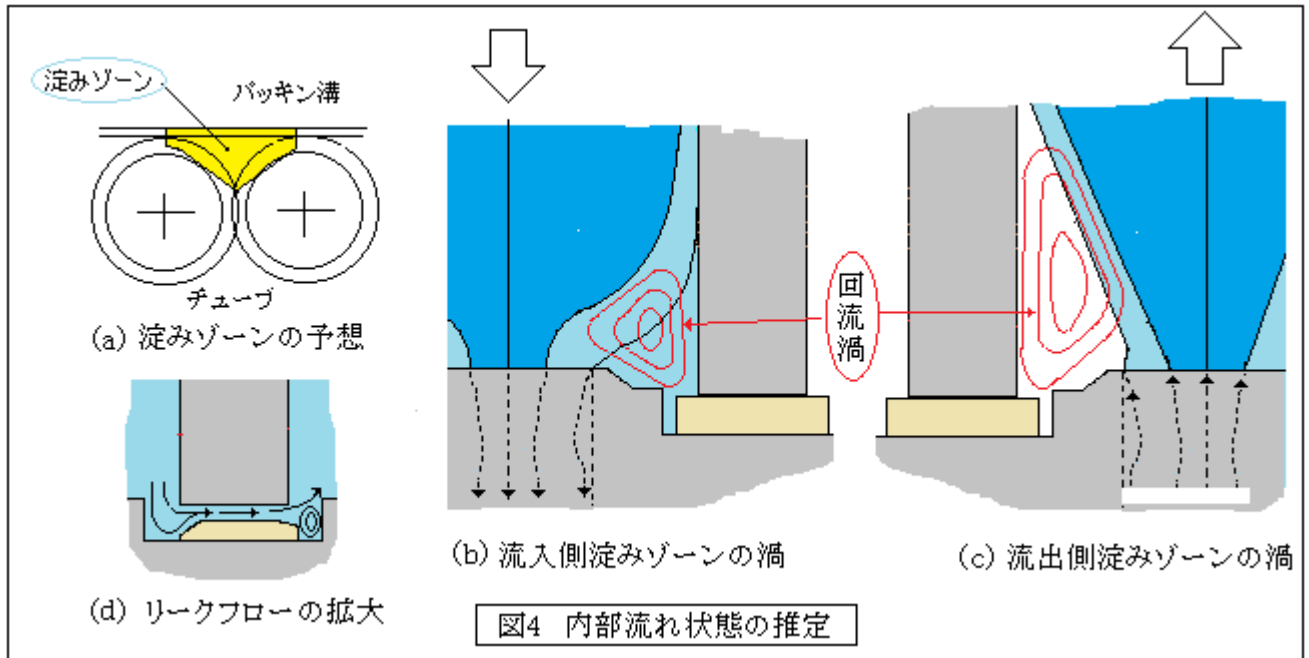
仕切板寄りのチューブホールへの流入/流出ゾーンには図 4(a)に示すような**淀み空間**が存在すると思われる。そしてこの淀み空間中央には図 4(b)(c)に示すような渦の発生が予想される。流入側では吸い込み流線の外面に沿って/流出側では流出噴流の外面に沿って連続した剥離渦ができて淀み空間

全域に回流渦が形成され仕切板から降りる渦線の前端がパッキン溝まで延びたのではないかと。その場合、流体に含まれる微少な固体粒子によって溝に嵌め込まれたパッキンが削りとられる可能性がある(→甌穴現象)。そして面取りも含め 2mm 程度の狭隘な部分でパッキン縁が摩滅し、渦とリークフローと繋がって渦の回流を強め、**図 4(d)**のような隙間流れに成長したのではないかと。高速の隙間流れができればスラリーエロージョンによって速やかにパッキンの摩滅が進む。即ち

剥離渦→回流渦の形成→甌穴現象→パッキン損耗→リークフロー+回流渦→

隙間流れ→スラリーエロージョン→パッキンの摩滅(消失)

以上の推論にはかなり仮説が含まれるが、現場観察の結果(図 2(b))は一応説明できると思う。



(4) さて後部ヘッドの仕切板越しの圧損はチューブフローが1往復のため、前部ヘッドの圧損に較べ少ない。そのためリークフローの流速は小さくなりパッキンの摩耗は遅れ場合によって停顿してしまうことも考えられる。しかしきっかけとしての甌穴現象の発生は同じであるからパッキン縁の摩滅の跡は何らかの形で残るのではないかとと思われる。然るにこの痕跡は報告されていない。痕跡がないのが事実であれば、図 4(b)(c)に示されるような回流渦は発生していないということになる。

この原因として、仕切室内の流れの違いが考えられる。図 1(b)(c)に示すように同じ室内で一方のチューブ群から流出した流れは室の上部スペースでターンして他方のチューブ群に流入する。前部ヘッドではその流れは仕切板に直交する。一方、後部ヘッドではその流れは仕切板に並行する。この場合、前部ヘッドでは十分に図 4(a)の淀みゾーンが成立するが、後部ヘッドでは仕切板に沿う横流れが予想できるので図 4(a)の淀みゾーンは成立しにくい。多分、後部では強い回流渦は存在せず、顕著なパッキン縁の摩耗(→グロスなリーク現象)は起きなかったと思う。

4. 結論

このトラブルはプラント設備の改造前には観察されていない。改造によって運転は安定したようであるが、流体性状の変化や流量の増加がありまた多少脈動傾向が残ったようである。流体性状の変化で固形分が増え定常流速や脈動による瞬間流速が増加してパッキン廻りの甌穴現象やリークあるいは摩滅が一気に顕在化したのではないかと。

「甌穴現象の発生→リークフローの肥大化」はあくまで仮説に留まる。チューブ流入側の渦の形成や狭隘な溝隙間への渦の攻撃が、流体トレースによる流れ解析などで確認されれば多少実証性がでてくるのかも知れない。

ヘッド/管板形状の改造は時間的に無理で、結局、パッキンシートの要部を金属で被覆することになったようだ。結果は聞いていないが、多分効果があったと思われる。

以上