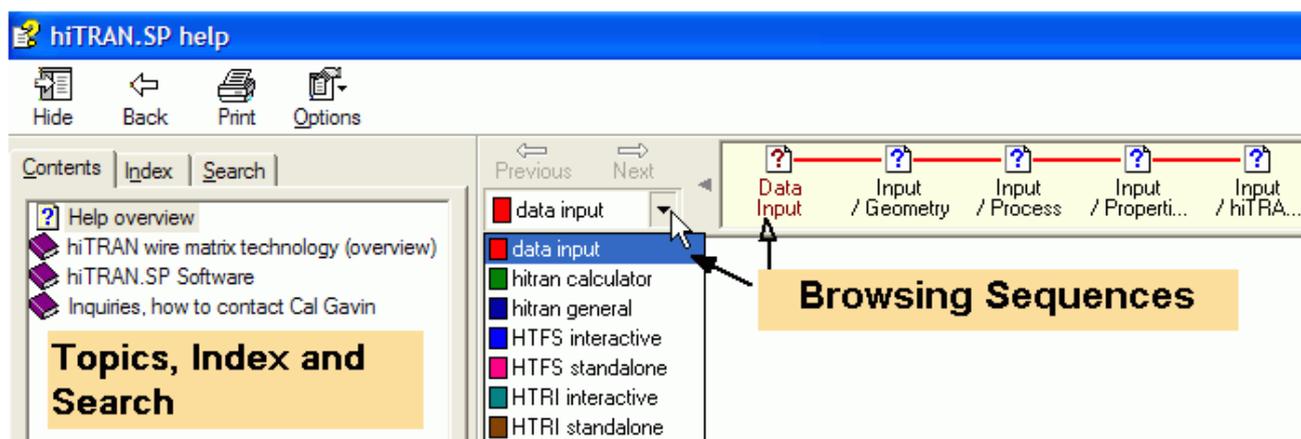


## ヘルプの（概要）

CalGavin-Japan



ここでは hiTRAN®ワイヤー3次元(乱流)素子の様相と、それを活用するためのソフトウェア hiTRAN.SP も別のトピックとして説明されています。

インデックスでは、ユーザーはさまざまなトピックに関連するインデックスキーワードのリストを見ることができます。いくつかのトピックは、(hiTRAN®計算機、データ入力など) ガイドを介してアクセスすることができます。

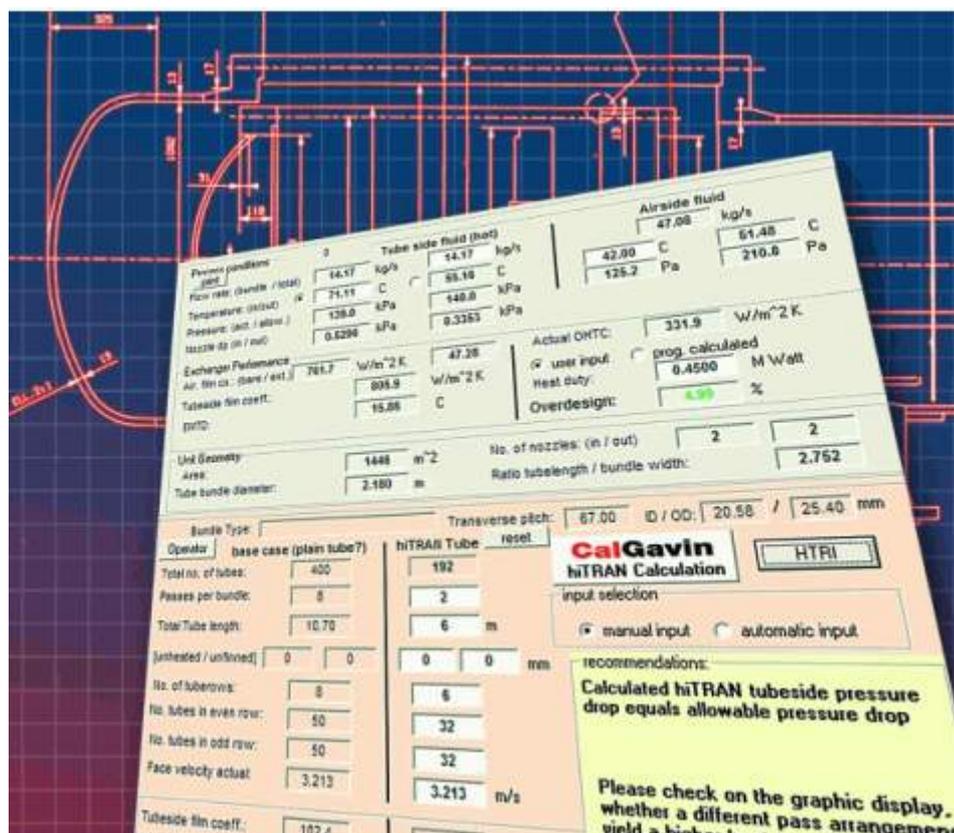
## 1. hiTRAN®ワイヤー3次元素子技術（概要）

このヘルプセクションは hiTRAN®ワイヤー3次元素子技術の概要を与えるために設計されています。詳細は、単相あるいは二相アプリケーションの性能を説明します。このセクションではさらに、設計オプションとインストール手順が詳細に説明しています。



## 2. hiTRAN.SP ソフトウェア

このヘルプセクションでは hiTRAN.SP における異なった計算オプションを説明します。多管式熱交換器および空気式冷却器の改造、新規設計について、ケーススタディを基にして、さまざまなシナリオを詳細に説明しています。このセクションは、HTRI と HTFS /Aspentech のユーザーの2つに分けられています。



## 1. hiTRAN®ワイヤー3次元攪拌素子技術（概要）

### 1) hiTRAN®一般的なプレゼンテーション

このセクションでは hiTRAN®ワイヤー3次元攪拌素子の背後にある物理学を説明しています。また、異なる設計のオプションと、設置の問題についても詳細に説明しています。

## 目次

### はじめに

1. 単相伝熱
  - 1.1 流体力学
  - 1.2 伝熱性能
  - 1.3 汚れ
  - 1.4 設計上の選択肢
    - 1.4.1 新規熱交換器の設計
    - 1.4.2 既存熱交換器の改善
    - 1.4.3 設計の可能性
2. 二相伝熱
  - 2.1 凝縮
    - 2.1.1 凝縮機構
    - 2.1.2 凝縮促進
  - 2.2 沸騰
    - 2.2.1 リボイラー
    - 2.2.2 気化器
    - 2.2.3 薄膜落下式蒸発器
3. 機械的取扱い
  - 3.1 製品仕様
  - 3.2 装着

## はじめに

伝熱促進のデバイスは、中、高粘度流体を取り扱う熱交換器のための標準になりつつあります。hiTRAN® 熱システムのワイヤー3次元素子は多管式熱交換器と反応器の伝熱性能を向上させるために効果的かつ経済的な方法として30年以上用いられています。このシステムを挿入した熱交換器の数は少なく見積もっても15,000を超えると推定されます。

hiTRAN®ワイヤー3次元攪拌素子（挿入体）を備えたチューブ内の流体力学の特徴は、基本的に平滑管設計の特性とは異なります。管側伝熱係数に影響を与える境界層の特性は、特に興味深いものです。

## 1. 単相流の伝熱

### 1.1 流体力学

平滑管の流体力学によって提供される条件は、加熱または冷却するためには理想的なものではありません。管壁に近い半径方向のわずかな動きしかない熱的に非効率的な境界層は、流体の壁に対する摩擦抵抗と粘性せん断力のために生成されます。この境界層が大幅にチューブ側の伝熱係数を低下させ、その結果全体の伝熱を減少させます。

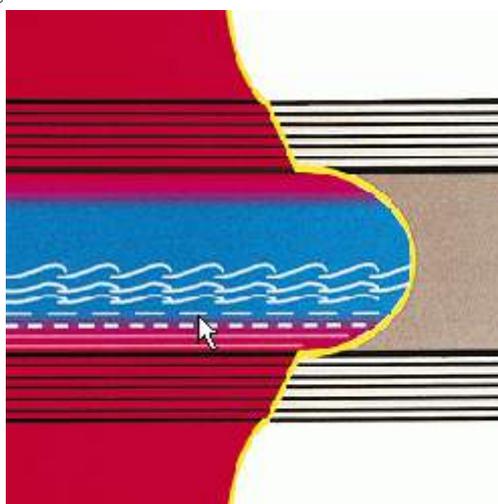


図1：平滑管内部の速度プロファイルのスケッチ

実験では、伝熱の改善に寄与するメカニズムの良好な画像を提供するため、管壁に染料液の注入を実施します。

hiTRAN.SPのユーザーであるあなたは以下のホルダーに管内流動（フロー）の状況を示す動画クリップを見つけることができます。

C:\Program files\ Calgavin ltd\literature and presentation\hiTran video.wmv

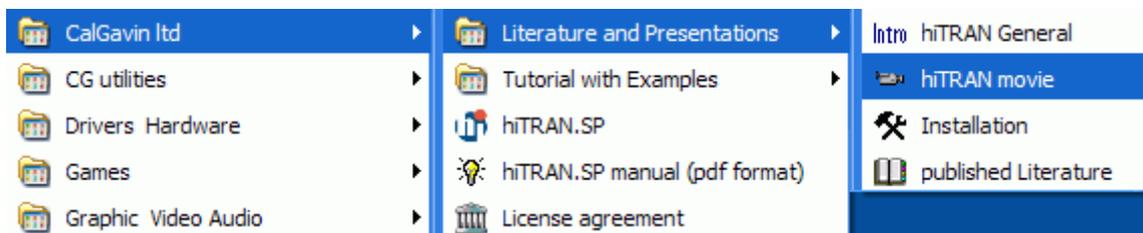


図2：ロケーションユーザーのマシン上のビデオのfile

層流領域において管壁の近くに注入されると、壁面境界に残ったまま（図3のA）ですが、hiTRAN®ワイヤー3次元素子（挿入体）にぶつかると、直ちに混合されます。（図3のB）



図 3 : 管壁染料流れのワイヤー3次元素子による混合

このビデオから観測されることは :

- ・ 流れが管壁から偏向させられ、中心部の全体流れと混合されます。中心からの流体は壁の方向に移動します
- ・ 壁面での流体の滞留時間が著しく低減されます。
- ・ 10,000 以上のレイノルズ (Re) 数においても、壁面の境膜流れは全体流れに混合されません。

PIV (粒子画像速度計) を使うと、管側の流れに対する hiTRAN®の影響がより詳細に可視化することができます。小型アルミレーザー粒子の動きが記録され、可視レーザー光シートを使用して、流体流れを可視化「することが出来ます。

図 4 の右側には Re 数 500 の平滑管の流れが示されている。カラースケールで示されているように、高い流体速度は赤い矢印として、青色の矢印は、低流速を示します。プレーン管の予想通り最大流速は、フローの中心で観察され、管壁で速度が 0 に近づきます。

after hiTRAN® 挿入管

Plain tube(平滑管)

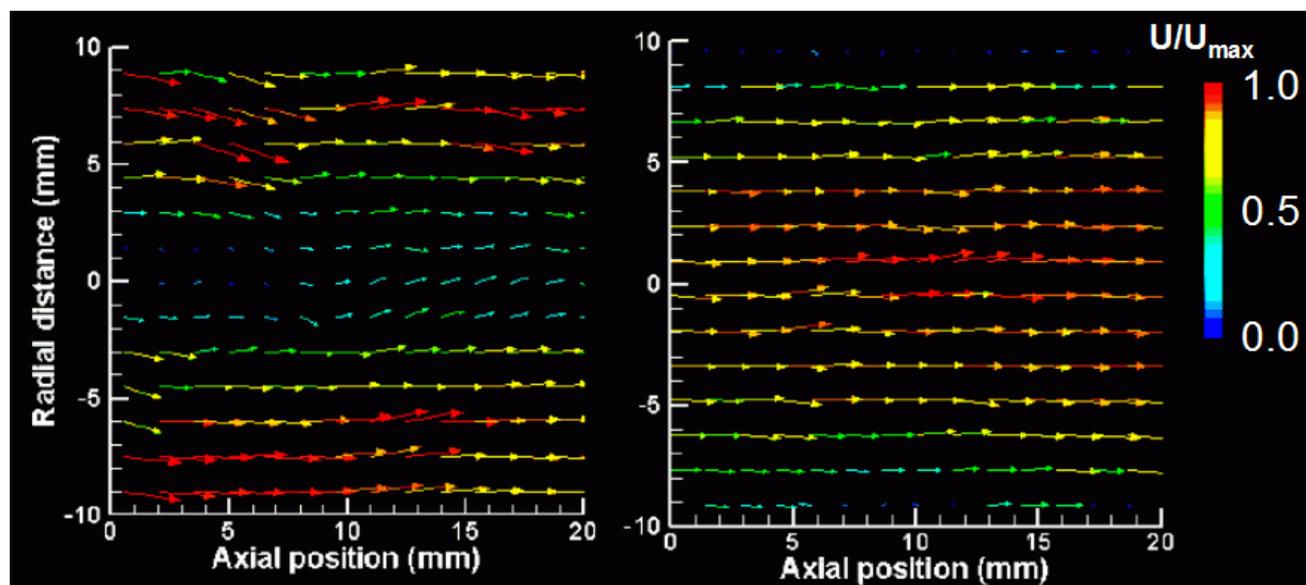


図 4: 平滑管と hiTRAN®素子装着管の PIV 測定結果

hiTRAN®ワイヤー3次元素子のすぐ後ろで測定したとき、逆フローパターンを観察することができる 0 軸位は、hiTRAN®ワイヤー3次元素子の下流 3 ミリメートルのところ。最小流速は、フローの中心で測定されますが、これは素子には芯線が存在するためと説明することができます。最大流速 (赤の矢印) が存在し管壁に近くにあります。誘導は壁近傍の粒子に対して、せん断力を増加させます。

また、矢印のいくつかの方向が流れの中心線に向かって指していることに注目できます。これら両方の観測結果は、伝熱の向上と汚れの減少に関して有益な効果を持つことを示しています。その結果、管側伝熱係数は平滑管に比べて、かなり高くなります。

## 1.2 伝熱性能

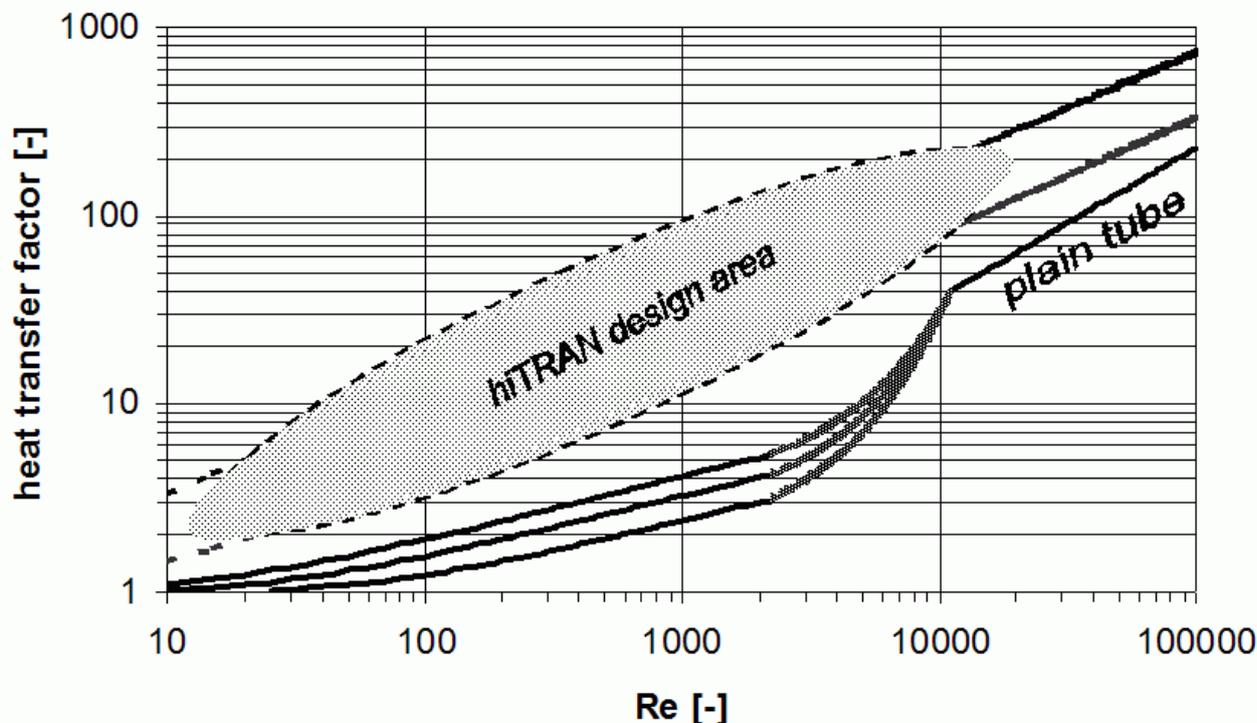


図 5: 平滑管と hiTRAN®素子装着管の熱交換性能範囲

図 5 には、いわゆる伝熱因子が Re 数の関数として表されています。

$$\text{伝熱因子} = \text{Nu} / (\text{Pr})^n$$

Sieder と Tate の平滑管層領域における関係と乱流での Dittus と Boelter による関係は図 3 に示されています。また、層流領域の伝熱係数は  $d/l$  比の影響を受けていることが注目されます。

点線で囲まれた領域は hiTRAN®設計範囲を表します。最高の伝熱の改善が高充填密度攪拌素子を挿入して達成されるのに対し、範囲の下限境界は、低充填密度の素子挿入によって達成されます。

平滑管に比べて、Re 数 100～2300 において、特に改善効果が発揮されます。

さらに乱流領域であっても管側伝熱係数に対する有意な改善が観察することができます。

図 6 には、ケーススタディが示されています。

Re 数 1,600 で運転されている 8 パス平滑管熱交換器は、約 1 バールの圧力降下で運転されています。この運転条件で、伝熱係数は 3.8 を実現しています。[1]

1 バールの最大許容圧力降下以下で hiTRAN®設計する場合、8 パスから 2 パスの修正となります。[2]

Re 数の 400 への低下の結果、圧力降下が約 1 バールで、伝熱係数は 5 から 20 となります。1 パスに変更した場合[2]、管側の伝熱係数は 3.5 倍となり、この場合の圧力降下は許容圧力降下の 5 分の 1 であることが注目されます。

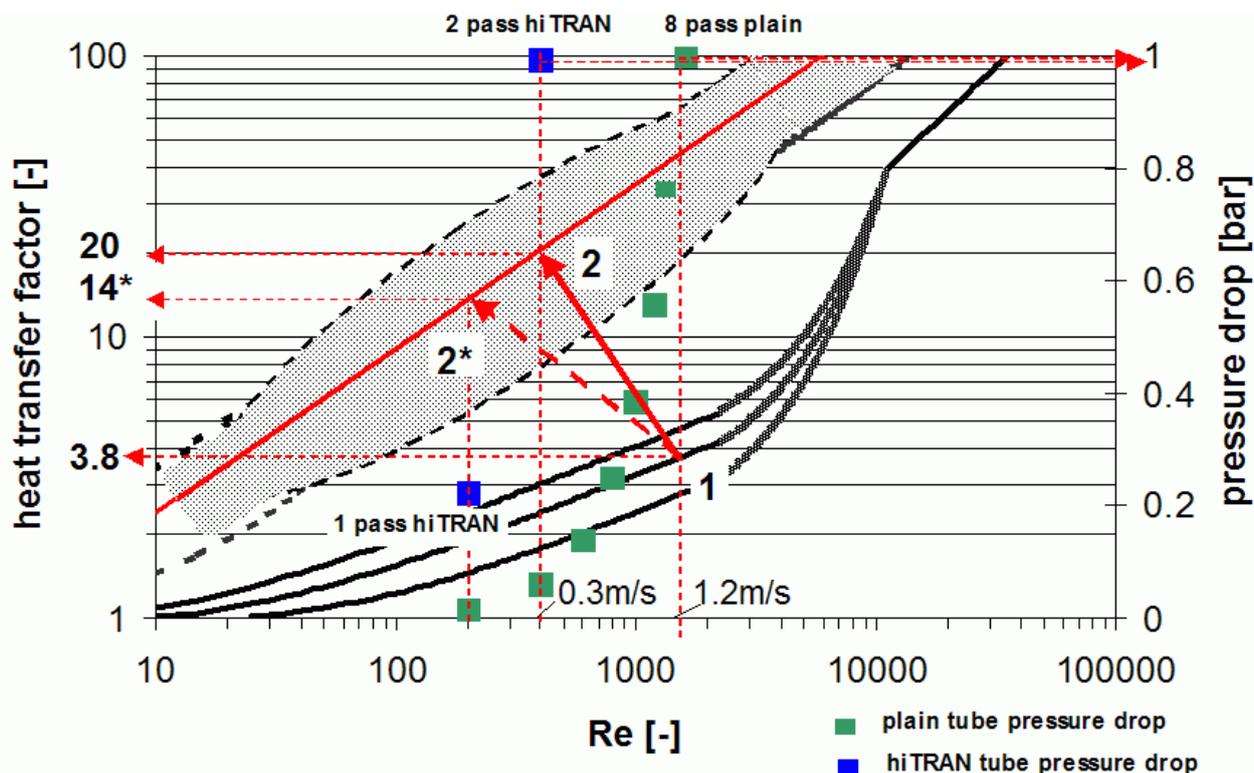


図 6 : 平滑管と hiTRAN®素子装着管の性能範囲のグラフィカル表示 - ケーススタディ

図 6 では、また、不安定な運転条件である遷移領域含む Re 数の広い範囲で伝熱因子が直線的に増加することを見ることができます。

主たる熱抵抗が管側にある場合、伝熱面積を大幅に低下出来ます。熱交換器選定の重要な要素である熱交換器重量、設置面積についても同じく低下出来ます。

総括伝熱係数の増加のために、プロセス流体内の EMTD は与えられた負荷に対して大きく低下します。一般的には管壁面と管中心との温度差が少ない方が、汚れの生成の少ない傾向があります。

#### どのように hiTRAN.SP は働くか

いわゆる hiTRAN®設計のすべての許容圧力降下は、管側の熱が伝達係数を最適化するために使用されます。ソフトウェア hiTRAN.SP は、すべての許容圧力降下のパス配列から最高の伝熱性能を得る、適切な hiTRAN®の形状を選択します。

## 汚れ条件下での hiTRAN®

### 1.3 汚れ

hiTRAN®ワイヤー3次元素子は、泡だて器（マッシャー）のような外観のため、汚れの状況を悪化させるのではと思われがちであるが、実際には汚れの改善を観察することが出来ます。

熱交換器の汚れは一般的に次のように分類されます。

- ・ 化学反応による汚れ
- ・ 粒子や堆積物による汚れ
- ・ 生物による汚れ
- ・ 腐食による汚れ

一般的に壁面付近の流体動力学と熱的条件が、汚れの発症と堆積速度を決定します。

#### 1.3.1 流体動力学

前章で示した hiTRAN®のビデオおよび PIV の測定は、hiTRAN®素子装着した管内の流体動力学は、平滑管の流動挙動に比べて大きく変化しています。

LVD 技術による管横断方向の速度分布の測定は、より詳細な管壁に近い流体動力学に関する情報を得るために用いられます。

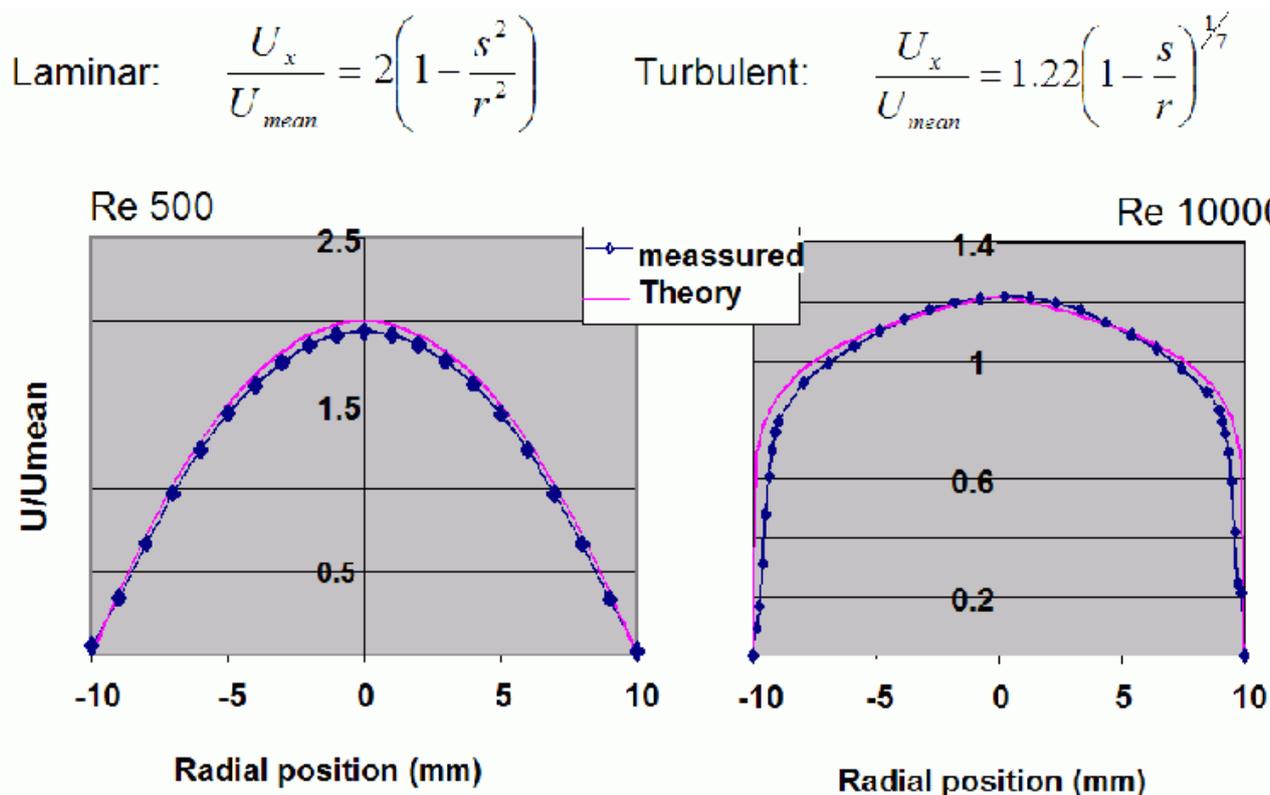


図 7: 平滑管の層流および乱流条件下での管横断方向の速度分布

図 7 では管横断方向の速度分布が測定され、層流条件下において、測定値はほとんど Hagen-Poiseuille の法則から得られる理論値に同じでした。放物線速度プロファイルは、この速度条件下では管壁付近では極わずかのせん断速度しか示しません。

乱流条件下でも理論曲線は測定結果が正しいことを示しています。しかしこの理論曲線は Re が 10000 以上においてのみ有効であることに留意しなければなりません。乱流条件下では管壁面近傍のせん断応

力は層流の時よりも大きくなります。これが高流速における急な速度勾配の理由です。この状況では追加の力が汚れに対して有利に働きます。

hiTRAN®装着管の速度分布について同じ測定手法を用いて測定したのが次の実験結果です。測定はhiTRAN®素子装着位置の3 mm下流で行っています。

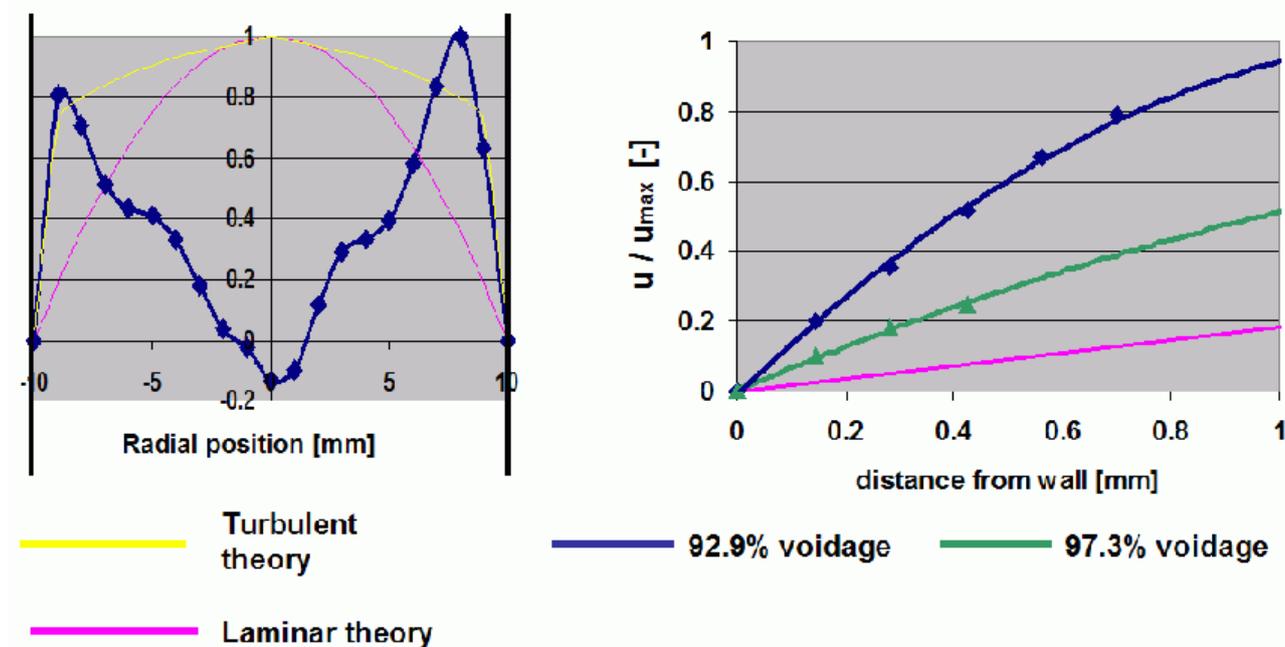


図 8：hiTRAN®素子装着管の管横断方向の速度分布(Re 500)

図 8 の左図に見られるように平滑管の速度分布に比べて歪んでいる。素子の中心部に芯線があるために、この位置での流れは無い。(実際測定位置から 3 mm 下流では逆流が観察される。)

壁面付近の速度分布は、Re 数が 500 を示しているにも関わらず、期待された通り完全な乱流状態に似通っています。

右側の測定結果は壁面から 1 mm 内側を拡大したものです。より高い充填密度 (約 7%) に伴いせん断速度の増加が測定されることが観察されます。平滑管に比較して 4 倍の速度が測定される。汚れに関係する 2 つの重要なメカニズムが観察されます。

- ・壁面近くのせん断応力を意味する高いせん断速度。より一層の力は汚れの発症を取り除き、加えて剥離速度の増加を期待することが出来る。

(粒子汚れにおいては、より一層の力は堆積を防止し、生物汚れでは、微生物は静かな領域を好むため)

- ・中心線を示す速度ベクトルに伴う大きくなった乱れは、化学反応汚れの場合、壁近くの反応物質の汚れの濃度の成長を平準化するのに好ましい。

Edinburgh 大学で行われた実験では、粒子沈降汚れに対して有益な効果を示しました。いわゆる水の懸濁液が流動の条件の影響を調査するために使用されました。粒径が約 50 ミクロンで、 $2500\text{kg/m}^3$  の濃度であった。実験は平滑管と hiTRAN®素子装着管を備えた中で、等温条件で異なった流速のもとで実施された。

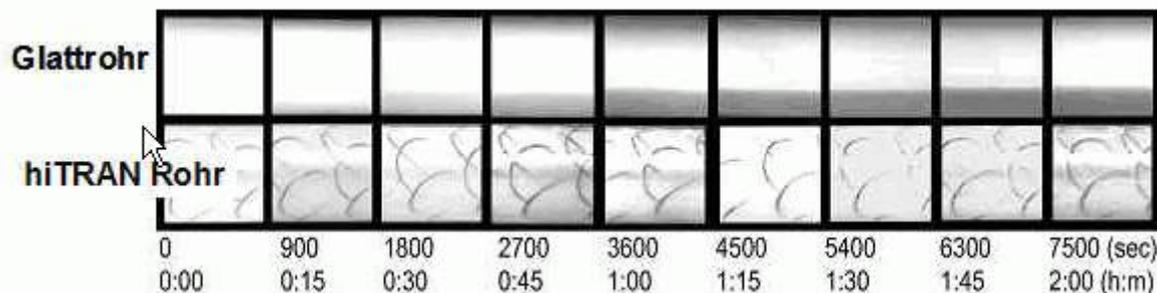


図 9: 平滑管と hiTRAN®素子装着管分散液の時間と粒子の堆積

この図において注目すべきは、管内の粒子は流れの中に保たれますが、平滑管において堆積の層は時間と共に成長します。より一層のせん断力が存在することを示し、またこの結果はその効果が装着素子の幾何学的形状に依存することを示しています。

### 1.3.2 汚れを防ぐための熱的条件

管壁面での乱流増加（疑似乱流）のために、管側伝熱係数は平滑管のそれに比べて著しく増加します。その改善は $\alpha$ ファクターによって表現できます

$$\alpha_f = h_i (\text{hiTRAN}^\circ) / h_i (\text{plain tube})$$

これは Re 数で表される流体条件と hiTRAN®素子の充填密度の関数です。平滑管と比べて最も顕著な伝熱の 20 倍以上の改善は Re 数が 200 から 2300 の範囲で観察されました。しかし高い乱流条件下の流体でもかなりの改善が観測されました。

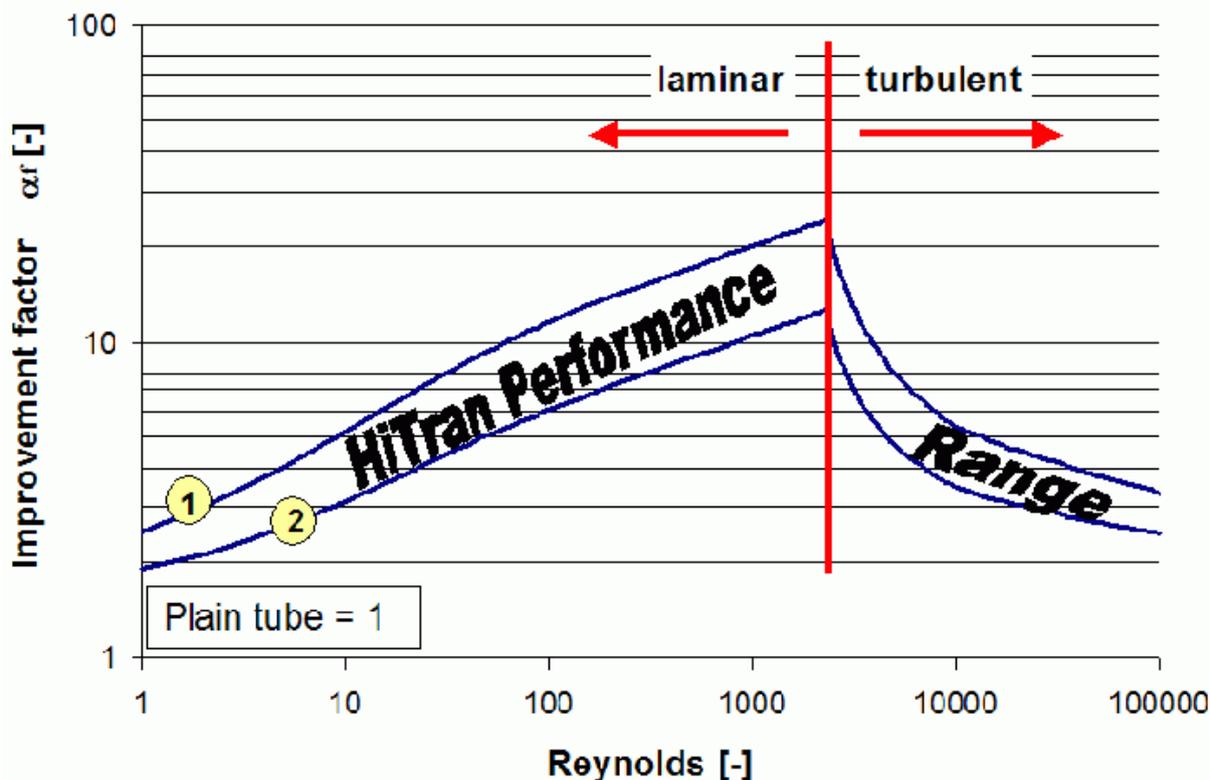


図 10: Re 数の関数としての hiTRAN®素子装着管の改善係数

図中の 2 つの曲線は hiTRAN®ワイヤー3 次元素子の最高密度①と最低密度②によって形成される。一定の Re 数においては高充填密度がより高い伝熱を達成しますが、より大きな圧力損失をもたらします。限界曲線内の充填密度は最大許容圧力損失に適合させるため、連続的に変更が可能です。

指定された熱交換器の負荷は以下のように決定されます。:

$$Q = k A dT$$

これは、管側流体が加熱される熱交換器において、要求される負荷(Q) に到達するために、胴側の温度を低下し、その結果壁面温度を低下することを示している。

管側を冷却する適用例には、管外面の温度を低下出来、壁面温度をより高く出来ます。(流動点の問題)

加えて、伝熱係数の増加のため、本体と壁の温度との間の温度勾配の減少が可能である。

### 1.3.3 壁面温度の影響

管側制御の熱交換器の場合、管壁と管内本体の温度は管側伝熱係数によって決定される。

これは次式で表現できる

$$t_w = t_o - \left( \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \alpha_o} \right) (t_o - t_i)$$

$t_w$  = 壁面温度

$t_o$  = 胴側流体本体温度

$t_i$  = 管側流体本体温度

$\alpha_i$  = 管側伝熱係数

$\alpha_o$  = 胴側伝熱係数

管側制御のシナリオでは、管側伝熱係数が非常に小さくなったとき ( $\alpha_i \ll \alpha_o$ )、壁面温度 ( $t_w$ ) は胴側流体本体温度 ( $t_o$ ) に到達することがこの式から理解できます。

hiTRAN®は数に示すよう、管側流体本体温度に向かってシフトするように作用します。空冷式熱交換器における流動点の問題、および多管式熱交換器における劣化の問題を最小化します。

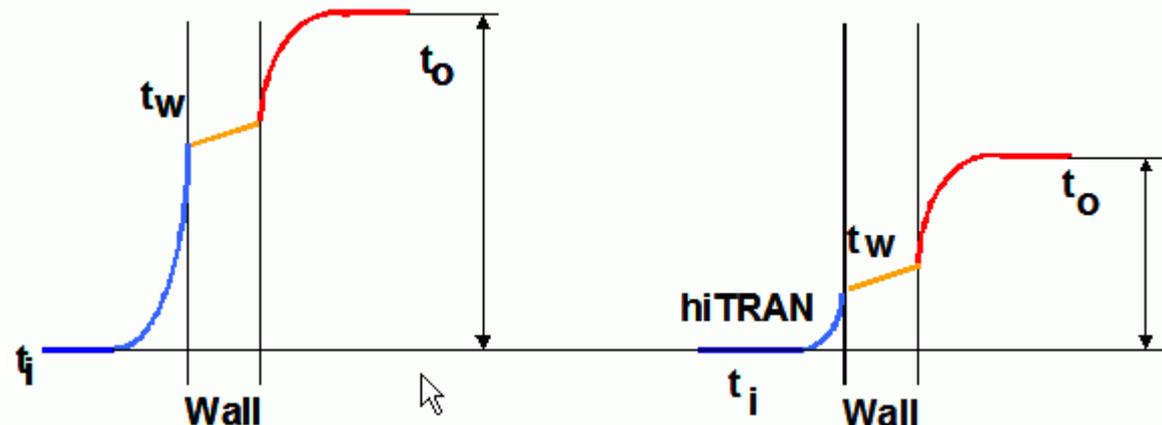


図 11: hiTRAN®を適用したときの管壁温度変化

化学反応の汚れの反応速度は、いわゆる Arrhenius のアプローチを用いて説明することができます。このタイプの汚れは、原油への応用例に存在しています。

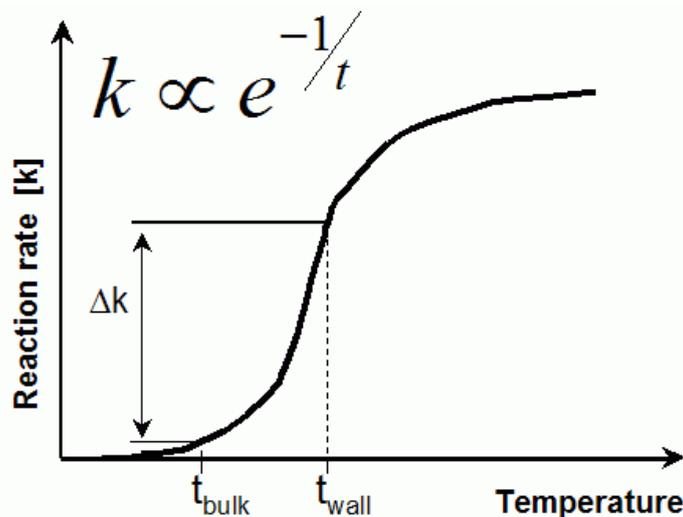


図 12: 化学反応汚れにおける温度の関数としての化学反応速度の Arrhenius 表現

活性化エネルギーに応じて、わずかな温度上昇が反応速度[k]（汚れ速度）のかかなりの増加となることが観察できます。しかしながら壁面温度の低下は化学反応汚れの可能性を抑制します。

また、液体が管壁の高温にどのくらい晒されているかは重要です。短い滞留時間は、反応汚れのリスクを低減させます。

先に示したように hiTRAN®ワイヤー3次元素子は管壁面での攪拌混合を増加させ、中心部の流体は壁面近くの流体と混合されます。それに加え、増加した伝熱係数のために、hiTRAN®設計による熱交換器は通常より小さく、コンパクトで滞留と残留時間が短くなります。

バース大学（英国）での実験研究で、これらの結果が確認できます。これらの実験中にアラビアンライト原油を加熱しました。これらの実験中に壁の温度は約 216°C でした。実験は普通の平滑管と充填密度の異なる hiTRAN®で実施されました。

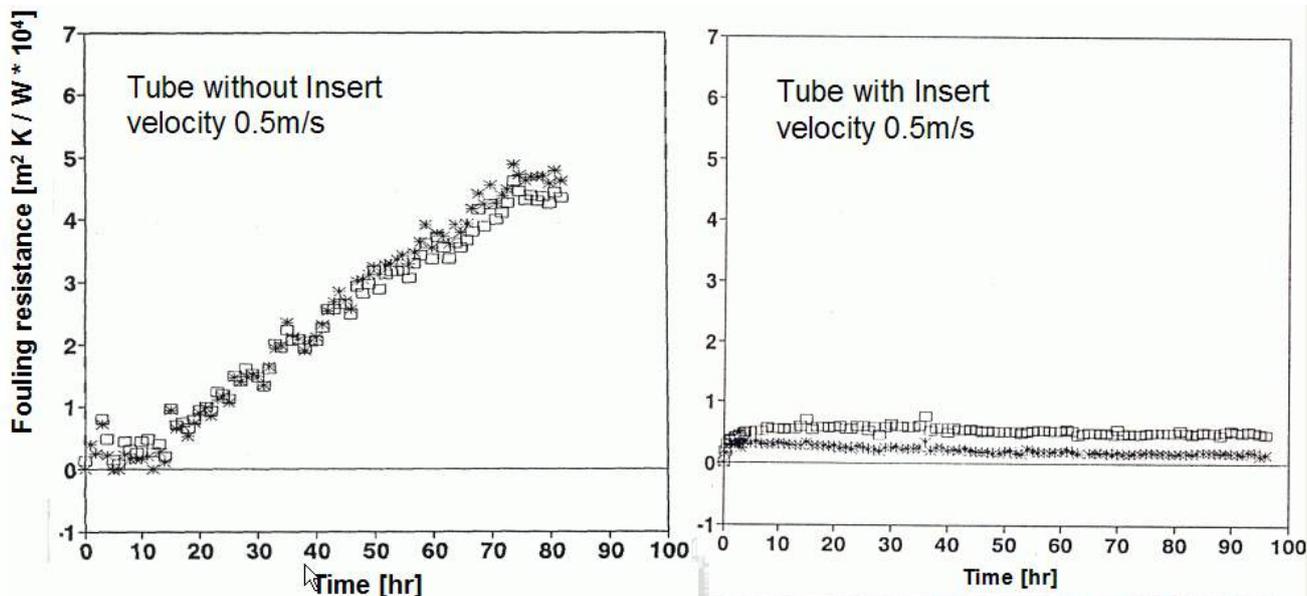


図 13: 平滑管と hiTRAN®素子装着管の汚れ抵抗と時間

平滑管の実験では、期待したとおり、いわゆる汚れ抵抗の一定または低下ともなう誘導時期の後に、汚れ抵抗は時間と共に直線的に増加した。そして 80 時間後には打ち負かされた。

hiTRAN®ワイヤー3次元素子装着管での繰り返しの実験では、全く異なった振る舞いが観察された。数時間後でも一定の値が測定された。この試験中、汚れ速度は挿入体の装着密度によってもえいきょうされることが結論付けられた。最適な充填密度以上で汚れ抵抗は、高い充填の挿入により低下した。これは、エンジンバラの実験や壁の剪断速度を測定した結果と一貫性がある。

有用有益な効果

- ・ 壁面でのせん断速度増加
- ・ 壁面流体滞留時間の減少
- ・ 流体本体温度より加熱された流体体積の減少
- ・ 表面での核抑制

## 1.4 設計オプション

### 1.4.1 新設熱交換器の設計

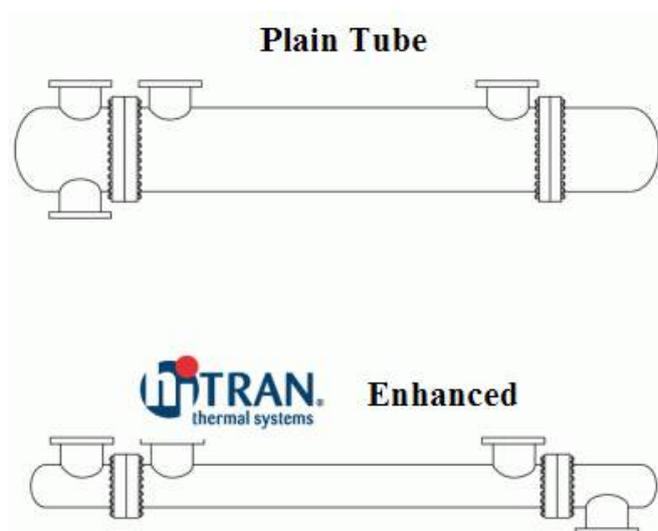
hiTRAN®ワイヤー3次元素子技術を用いて新しい熱交換器を設計する場合は、主たる熱抵抗が管側にあるかどうかを確認することが最も重要です。主たる抵抗が胴側にある場合には有益な効果は限られています。ただし例外があります。例えば熱交換器のバンドル内において、液分配の不良が発生した場合です。

**結論！** 主な抵抗が管側にある場合のすべての負荷は、hiTRAN®ワイヤー3次元素子によって向上させることができる。

hiTRAN®素子を使った場合の典型的な利点は：

- ・ 設置面積と重量が制限されている
- ・ 温度クロスが起りシングルパスを要求している
- ・ 僅差の温度アプローチが存在するか要求される
- ・ 平滑管条件下は、熱交換器が不安定な遷移領域で運転される
- ・ 高い壁面温度または低流速が存在する（汚れ）

以下の例は hiTRAN®ワイヤー3次元素子挿入体を用いた、重質サイクルガスオイル冷却器の設計の結果を示しています。



設計比較	平滑管	hiTRAN®増強
TEMA 形式	BEM	BEM
胴(シェル)直径(mm)	1524	689
管(チューブ)本数	1828	371
管(チューブ)のパス数	8	1
管(チューブ)長さ(mm)	6096	6096
フローパス長さ(m)	48.8	6.1
管(チューブ) 直径(mm)	25.4	25.4
有効表面積(m <sup>2</sup> )	874	178.5

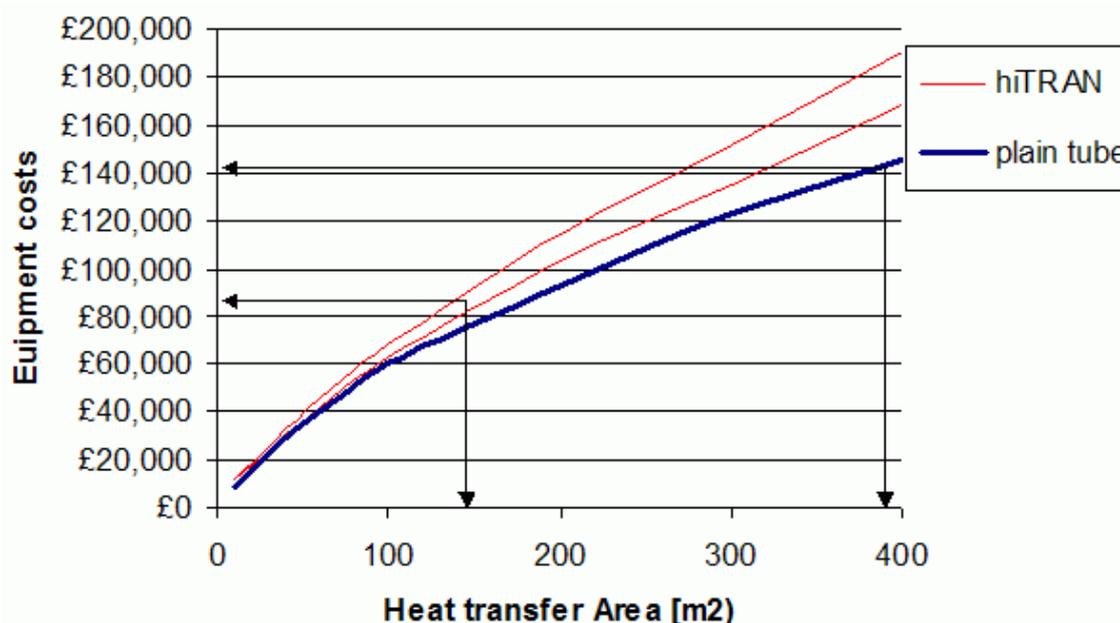
性能詳細	平滑管	hiTRAN®増強
プランツル数(入口／出口)	170/3800	170/3800
Re 数(入口／出口)	306/14	190/8
総括伝熱係数(W/m <sup>2</sup> K)	40	182
管側伝熱係数(W/m <sup>2</sup> K)	51	295
管側圧力降下(kPa)	70	70

次のような観察結果を得ることが出来る。

- ・ 同じ圧力損失で、同じ熱負荷を達成
- ・ 1 / 4 以下の効率的な伝熱面積で済む
- ・ 壁面での流体の滞留時間が減少する
- ・ 熱劣化による汚れのリスクが低下する

### コスト削減効果

下図は hiTRAN®素子を適用したときに、新規熱交換器のコストがどの位低下できるかの例示である。多管式熱交換器の装置コストはほぼ熱交換面積に比例して増加する。(青色曲線) 平滑管の熱交換器のコストは hiTRAN®素子装着によりサイズを小さくしたそれと比較される。



この例で熱交換器の負荷は、900kW である。胴側の HTC は 1500W/m<sup>2</sup> K そして EMTD は 15°C の運転。平滑管の設計は管側制御値 (170 W/m<sup>2</sup> K) である。同じ負荷での hiTRAN®設計は下表に示されている。

	plain tube	hiTRAN® tube
tube HTC [W/m <sup>2</sup> K]	170	600
dp [bar]	0.8	0.8
Area [m <sup>2</sup> ]	398	140
price [£]	142000	88000

管側の伝熱係数の増加のために、許容の圧力損失の範囲内で伝熱面積を減少出来ることは、注目できることである。hiTRAN®ワイヤー 3 次元素子のための追加のコストを考慮しても、熱交換器のより低い総コストの結果を導いた。

### 1.4.2 既存の熱交換器の改良

既存の熱交換器をアップグレードする場合は、hiTRAN®は優秀な改造とボトルネック解消の道具である。以下の式で見られるように、アップグレードシナリオでは熱交換器の伝熱面積は一定である。(A=定数)

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T_{eff}$$

hiTRAN®素子を考慮すれば、以下のゴールに到達するために使うことが出来る。

- ・ 高い熱負荷。  
(この場合には熱交換器の負荷は、全体の HTC (k) の増加に伴い増加する)
- ・ 高い／低い、出力温度
- ・ 要求される胴側の、加熱／冷却温度を、最小化／最大化することが出来る  
(この場合負荷は一定で残り、そのため  $\Delta T_{eff}$  は、総括 HTC が平滑管に比べ増加した場合に、減少できる)
- ・ 運転条件の改善
  - ・ 負荷変動による切り替え／転換  
遷移状態流れにおける熱交換器の運転の場合、制御は熱交換器の条件が予知できないため、困難であるが、hiTRAN®素子装着は流量と比例するため容易となる。
  - ・ 反応と結晶化の緩和と汚れ沈着防止  
壁面温度の低下と管側の疑似乱流増加のため
  - ・ より良い流体分布  
管束 (バンドル) 内で低圧運転の熱交換器は、しばしば厳しい流体分布不良に晒される。通常より高い管束内の高い圧力損失は、それぞれの管における、より良い流れ分布の原因となる。

### 1.4.3 hiTRAN®を用いた熱交換器の改良設計の可能性

新規または既存の熱交換器の場合、そのケースによって、異なった設計のオプションが使用される。

hiTRAN®素子は次のように装着できる：

- ・ 管の長さの、全てに、または部分的に
- ・ 1つまたはそれ以上のパスに
- ・ 全部の熱交換器に

通常の圧力の適用範囲内に収めるため、管のパスの数は、平滑管の設計に比べて小さくする必要がある。

## 二相流の伝熱

hiTRAN®ワイヤー3次元素子は、現在広く沸騰と凝縮伝熱に使用されます。

伝熱向上機能のメカニズムは、単相流に比べて各個別への応用となります。永年の hiTRAN®は、広範な改造計画の機会において、2相流へも適用できる、優れたボトルネック解消の道具であることが証明されました。

現在、ソフトウェア hiTRAN.SP は二相流をサポートしていません。将来的にはそれらのアプリケーションを計算する機能を実装することが計画されています。

次の章は、実質的に hiTRAN®の利点を提供するためのガイダンスです。

この応用が適用される場合には、より詳細な設計を実施するために CalGavin に連絡ください。

### 2.1 凝縮

#### 2.1.1 凝縮のメカニズム

##### ・ 単一成分子系

衝撃的な hiTRAN 素子の効果を理解するための、凝縮のメカニズムについての簡単な概要は以下の通りです。

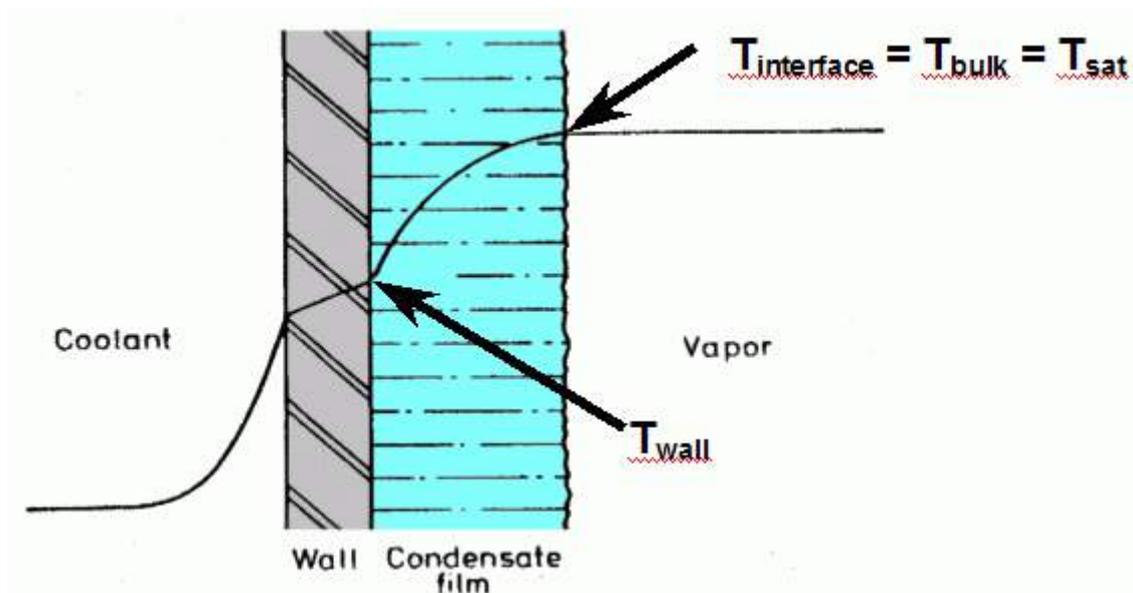


図 14: 凝縮における温度プロファイル (単一成分子系)

単一で純粋な成分の凝縮の場合、伝熱に対して凝縮液膜の中のもの、管側抵抗があります。この場合、液膜を通しての伝熱係数は以下に依存します；

- ・ 層流膜か乱流膜か——乱流膜は層流膜条件に比べて、ほとんど考慮する必要がない。
- ・ 流下膜の厚さ——層流膜条件下での伝熱係数は膜の厚みに比例する。
- ・ 波状流の影響——非常に低い Re 数においてのみ観察することが出来る。Re 数 30 以下で、管長を超える平均膜厚の影響に伴い、低い伝熱抵抗の低下とともに、最初の表面波が観察される。

### -多成分系

多成分系（不活性ガスを含む）において、蒸気相による追加の抵抗が下図に示したように存在します。

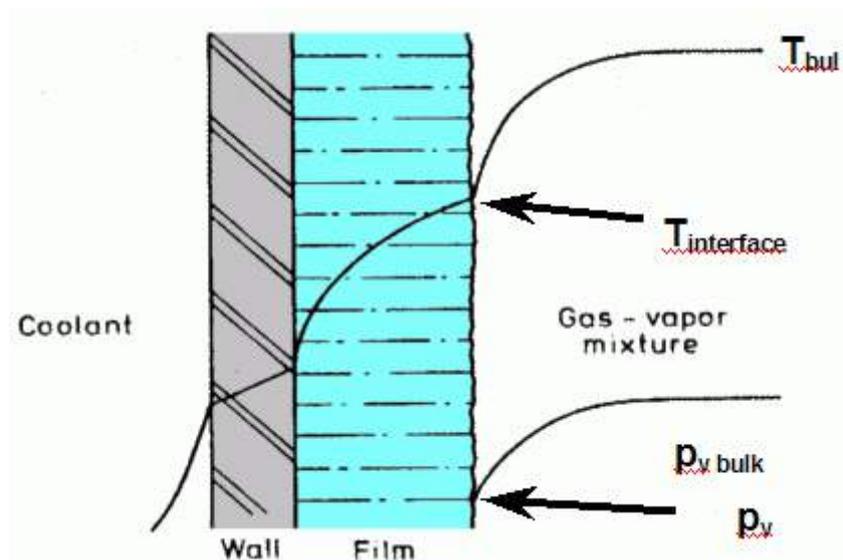


図 15: 凝縮における温度プロファイル（多成分混合系）

蒸気本体から凝縮膜への伝熱は以下によって影響されます。

- ・凝縮器の形状
- ・膜の組成（したがって、飽和温度）
- ・非凝縮性ガスの存在 e.g 空気
- ・蒸気速度／乱流／混合
- ・蒸気物質移動の特性

多成分混合物の膜を介して熱の移動は、純粋な液体に似ています。これは、凝縮液の物性とその蒸気のせん断によって影響されます。

！！多成分混合物で、一般的に言うことができることは

- ・膜伝熱係数は比較的高い
- ・蒸気伝熱係数は比較的低い

凝縮のメカニズムを考慮すれば、以下のような条件下で低い凝縮速度が期待できることが明らかです。

- ・厚い／層流膜
- ・高濃度の不活性ガスまたは広い凝縮範囲の混合物（大きな蒸気冷却負荷）
- ・低い蒸気速度

通常この条件は、凝縮器ユニットの終わりの方に見つけることができます。ここでは成分の大部分は凝縮され、厚い凝縮膜と低い蒸気速度に到達しています。

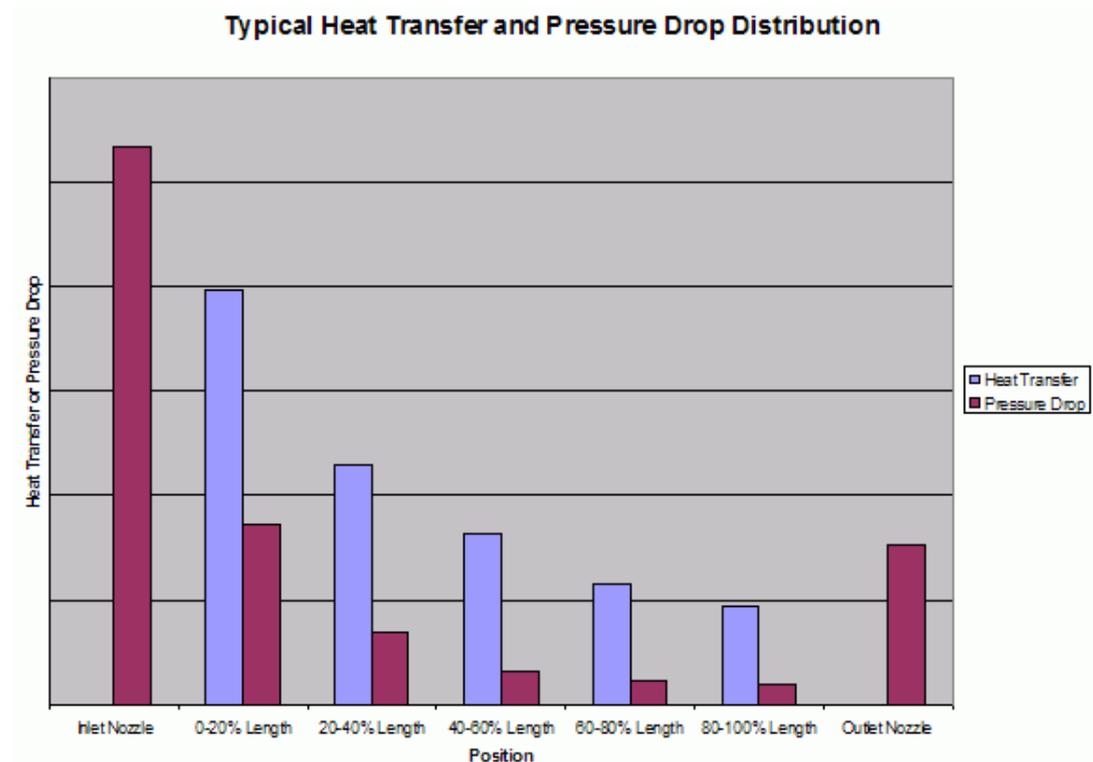


図 16: 垂直型凝縮器の管側伝熱係数と圧力損失の分布

凝縮器の垂直方向の還流の伝熱量および圧力降下分布は、図 16 のように表示されます。予想されたように伝熱量の大部分が熱交換器の上部にある場所（冷却負荷）となっています。ここでは蒸気速度が高く、凝縮膜厚が薄いところです。また、高い蒸気速度のための、最大の圧力降下が最もこのセクションで観察することができます。熱交換器の最後に向かって、伝熱率が大幅に低下しています。

### 2.1.2 凝縮器の改善強化

シミュレーションの結果は、熱交換器の底部に改善強化の機会のあることを示しています。次のように促進の効果を説明できます：

- ・膜の混合 —— 単相流では、壁面近くの流れは中心に向かって偏向される。
- ・膜の排水 —— 垂直方向の膜の流れは、右の写真に見られるように、挿入の芯線に向かってループ線を下り中心の芯線に向かって流れが観察できる。
- ・膜の薄膜化 —— 液体の排水効果のために一部の液体は芯線に搬送され、壁には薄い液膜となり、その結果、低い伝熱抵抗となる
- ・蒸気相の冷却改善 —— 混合物のため、凝縮の間に、凝縮温度に達するために、蒸気相は冷却される。このような状況下で、hiTRAN®は単相での応用と同じく、気相伝熱係数は向上する。
- ・相間物質移動速度を増加する —— 平滑管内の混合物では、液体と液体の界面での濃度勾配が形成され、蒸気液相と蒸気物質移動が制限されている。追加の乱流が hiTRAN®ワイヤー3 次元素子による濃度勾配の平準化によって、誘発される。



## 結論：

HiTRAN®は、液膜相と気相の伝熱機構の両方を強化することが可能です。強化改善の大きさの程度は通常蒸気相が最大です。強化の効果の出る目標は、蒸気相が伝熱を律速する凝縮器です。

hiTRAN®ワイヤー3次元素子は、既設の熱交換器の改造および新しい熱交換器の設計のために使用することが出来ます。

適用の目標は：

- ・ ベント凝縮器
- ・ 不活性成分を含む真空凝縮器
- ・ 広範囲の沸騰混合物の凝縮器
- ・ 還流凝縮器

研究は、マンチェスター工科大学 (Manchester) とクイーンメアリー大学、(London) で行われました。結果は以下の図 18 に示されています。

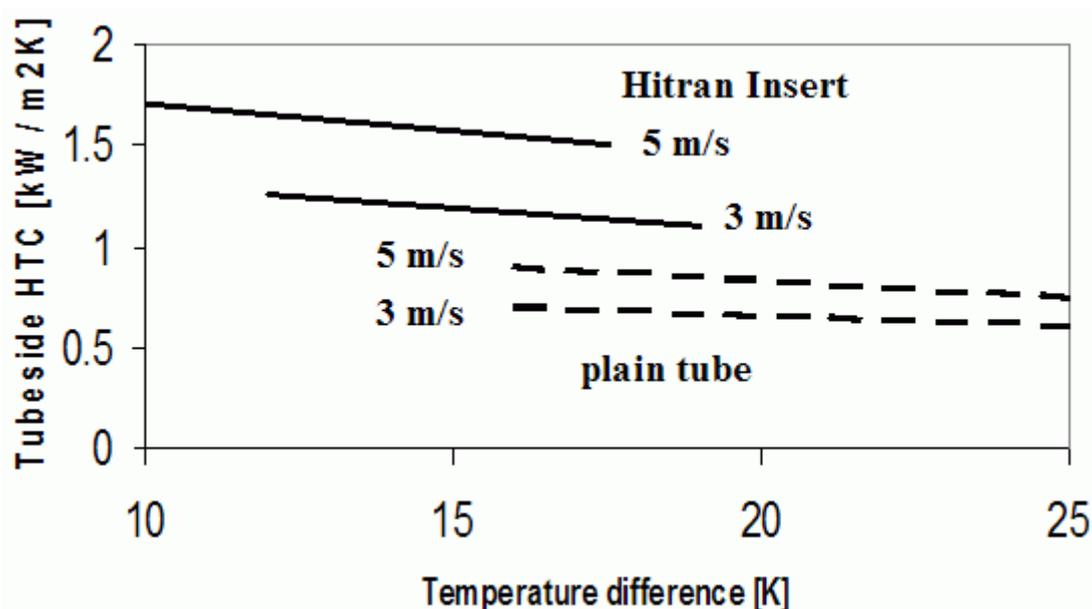


図 18: 温度差と蒸気速度の関数としての管側伝熱係数

純粋の R-113 垂直管で凝縮させました。高い温度差に伴い膜厚が増加するため、伝熱係数が低下します。平滑管と高い温度差が増加し、膜厚により伝熱係数が低下します。平滑管と hiTRAN®素子による伝熱促進管の伝熱係数は、蒸气流速にも依存します。

一般に 60~70%伝熱係数の改善が観察できます。

## 2.2 沸騰

hiTRAN®ワイヤー3次元素子は、二相沸騰伝熱用途に成功裏に適用されています。

これらの適用例では、沸騰が膜内で起こる場合と、入口領域で完全に満水している装置で行われる場合に分割することができます。

### 機構の概要。

管内沸騰上昇気流の状況は、下図のようにさまざまな段階に特徴付けすることができます。一般的にhiTRAN®ワイヤー3次元素子は、熱交換器の管の一部に適用される。

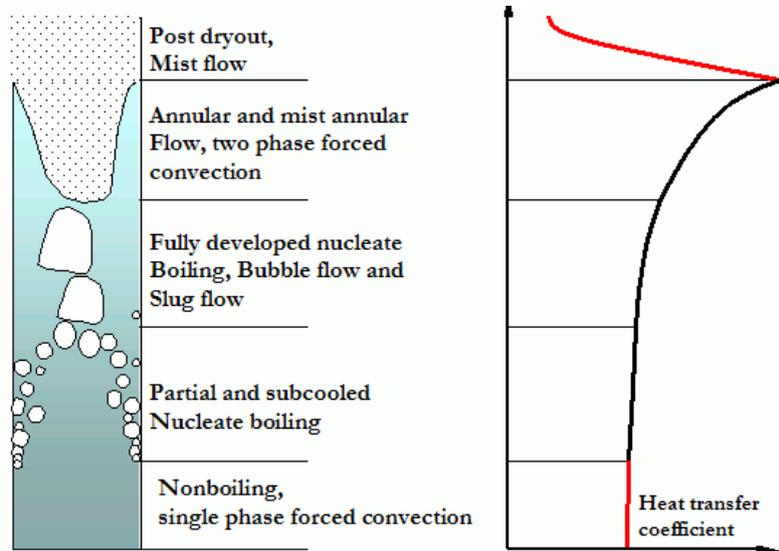


図 19: 管側沸騰の機構

図 19 には個別の沸点ゾーンが表示されています。右のグラフには、相当する伝熱係数が定量的に示されています。核沸騰機構のが支配的なゾーンでは、一般的に管側の伝熱が比較的高くなります。これは、管の両端に対流を向上させる気泡の動きが原因です。これ以上の強化は不要で、ここでは hiTRAN®ワイヤー3次元素子の装着は推奨されません。

以下の章ではどのような条件の下で hiTRAN®ワイヤー3次元素子推奨されるかが、詳細に説明されています。

### 2.2.1 リボイラー：入口ゾーン（非沸騰、単相強制対流）

特に減圧条件下の粘性の高い液体は、いわゆる“サブ冷却長さ”と呼ばれる相当な長さを持つ傾向があります。図 20 に示したように、これは沸騰状態のための液体加熱に必要な長さとして定義されます。

この長さは、熱管の長さの半分を取ることができる。挿入体を適用した場合、壁から液本体への管側伝熱が改善されます。その結果として沸騰条件下でのより多くの表面積が得られます。

挿入体を使用した場合、以下のことが観察できます。:

- ・ 沸騰対流速度を増加
- ・ 短いサブ冷却ゾーン長さ
- ・ より均質な管側の温度分布

典型的なアプリケーションのために

- ・ 粘性液体
- ・ 低温度差による駆動力

強制おけるおよび熱サイフォンリボイラー

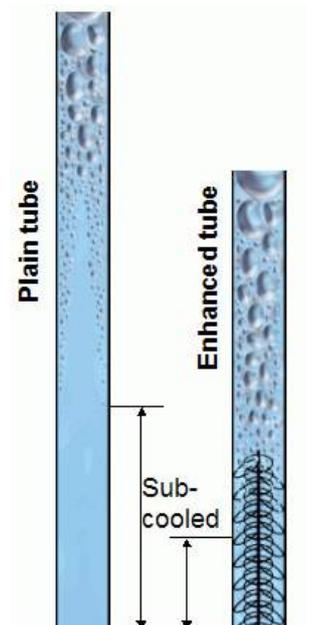


図 20: hiTRAN®によるサブ冷却長さの減少

### 2.2.2 気化器：

全蒸発の例では、図 19 に表示される出口部のフロー条件が遭遇する必要があります。

次節にさまざまな条件下での hiTRAN®ワイヤー3 次元素子の影響が記載されています。

#### ミスト流れの条件下

高い蒸気品質では、壁に残っている液体がミストとして蒸気バルク流に持ち込まれ、ミストが蒸気に変換するのが困難となるのは：

- ・ 蒸気への壁からの伝熱が悪い
- ・ 蒸気からミストへの伝熱はさらに非常に悪い
- ・ hiTRAN®は蒸気加熱を強化し、そして液滴を補充し、(デミスタ効果) 蒸発させる。加えて、壁の流体の分布は、乾燥パッチを回避するよう改善されている。

#### 膜沸騰

非常に大きな  $\Delta T$  は管壁とバルク液体の間の蒸気膜を作成することができ、これはあらゆる面での確かな推進力を作り出すことができる。このような環境下では、非常に低い伝熱係数が、高い壁温度の危険性ととも観察されます。

- ・ hiTRAN®が割り込んだ蒸気相では、液体が偏向されて壁に戻る。この例では、通常の挿入体は流れとは逆の方向に挿入される。その結果、膜沸騰の開始が延期されるか、または全体的に抑制される。

図 21: 蒸発器における hiTRAN®ワイヤー3 次元素子

#### 過熱部位での伝熱

蒸発器を離れたときに、その蒸気を過熱状態にする必要がある場合、低い伝熱係数がこの領域に存在することになります。過熱領域は非常に低い管側伝熱係数によって特徴づけられています。それゆえ全ての液体が、単相流体の伝熱の機構と同じように蒸発されます。

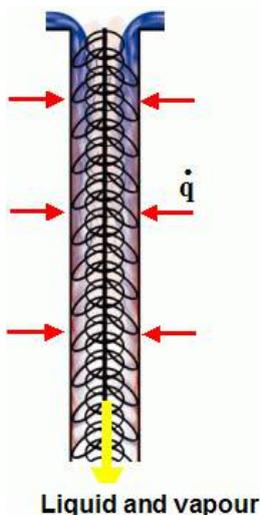
- ・ 過熱状態の流れの状況によるが、hiTRAN®ワイヤー3 次元素子は、単相伝熱と同様に改善が可能である。

#### 適用の事例：

液化天然ガス / LP ガス / エチレン蒸発器

### 2.2.3 落下膜蒸発器

左図に示してある管壁の液膜単一管の場合、既に挿入体が挿入されている。熱は外側から内側の落下膜に伝達される。適した分散板ユニットを熱交換器の上部に適用することにより、均質な液体膜が管壁面に生成される。ほとんどの適用事例では、液体と蒸気は装置の底部に残される。



落下膜蒸発器は以下によって性格づけられる：

- ・ 高い伝熱係数（落下膜厚みと流れ条件による）
- ・ 低温度差での運転（典型的には <6K）
- ・ 非常に短い滞留時間（典型的には <5sec）

管側強化は以下のために有効である

- ・ 負荷の増加
- ・ サブ冷却入口領域での粘性層膜のための伝熱増大
- ・ 液体混合物での伝熱増大
- ・ 液体分散の改善

図 22: hiTRAN®ワイヤー3 次元落下膜蒸発器

### サブ冷却の長さ：

粘性膜におけるサブ冷却入口領域の温度分布を図 23 で示します。

熱は壁を横切って流れ、放物線温度が入口領域で測定することができます。

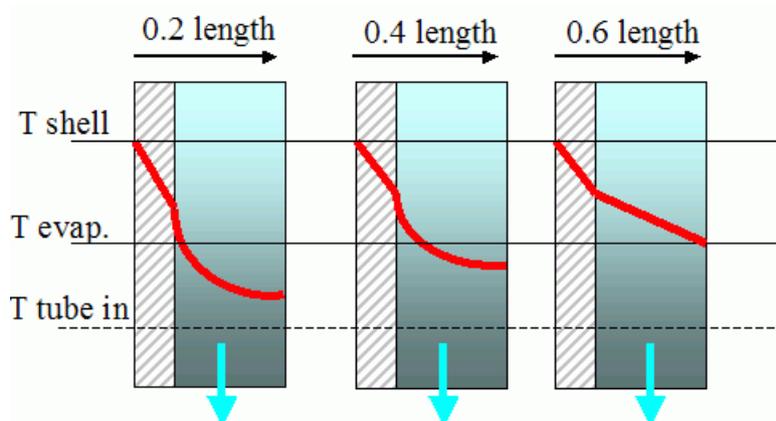


図 23: 落下膜蒸発器のサブ冷却領域入口の温度プロファイル

流体が管を流下するとき、膜表面の飽和温度に到達します。(T evap) 蒸気と液体は平衡状態にあり、蒸発が起きます。

この入口領域は管長さの 80%まで拡張が可能です。粘性液体の場合、この領域での伝熱は貧弱で、ほとんど蒸発は起こりません。

このシナリオで hiTRAN®ワイヤー3 次元素子はかなりこの領域を短縮し、蒸発が長いチューブ長さに亘って行われるため、蒸発器の負荷を増加させ、あるいはまたは EMTD を減らすことができます。

### 混合物の蒸発：

混合液が蒸発された場合、追加の物質移動抵抗が液界面に存在することになります。

図 24 には、これは 2 種混合物の場合を示しています。

$X_A$  の揮発成分、 $X_B$  は不揮発性成分が存在します。

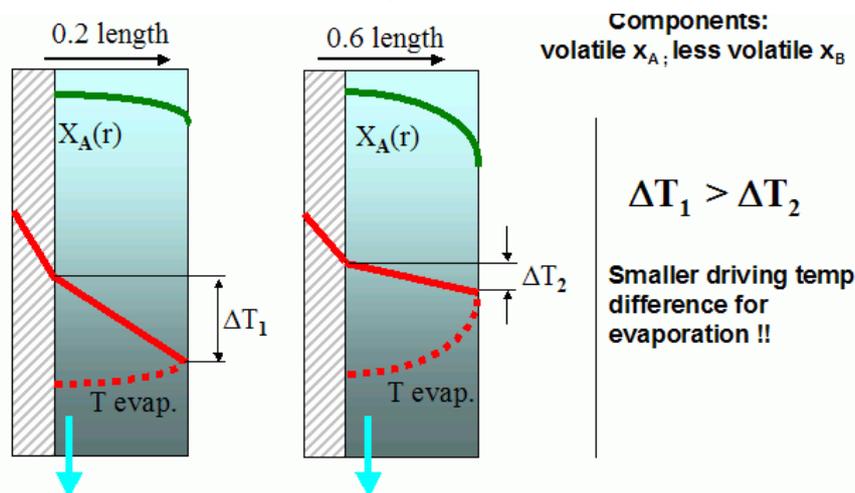


図 24: 多成分系混合物の落下膜蒸発器における濃度プロファイル

揮発性成分の多い状況で蒸発が行われるとき、膜を横断する濃度勾配が注目されます。膜表面において揮発分の少ない成分が蓄積されたとき、その膜を横断するより低い効率の温度差の結果として、その飽和温度はより高い温度に移動します。そしてより低い蒸発速度となります。

hiTRAN®素子が適用され、膜内の乱流が増加したためのシナリオにおいては、濃度勾配は最小化され、膜内および関連の移動速度は改善される。

### 2.2.3.1 挿入体のある流体力学

hiTRAN®ワイヤー3次元素子を適用したときの影響を理解するため、その流体力学的振る舞いを詳述する。

図 25 に見られるように、挿入体は流れの方向に対抗して装着されます。hiTRAN®ワイヤー3次元素子の  
上流には、波状層流の  $Re$  数の範囲で、平滑で透明な液膜（この場合水-グリセリン）が観察できます。

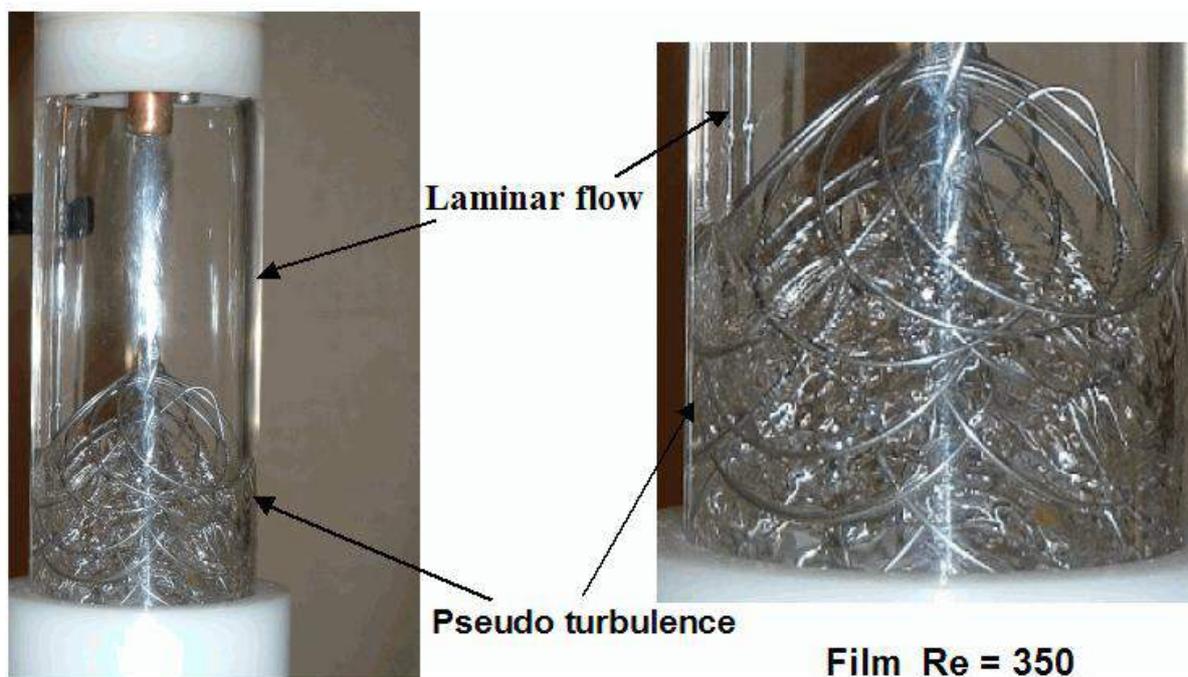


図 25: 波状層流における hiTRAN® 挿入体(膜  $Re = 350$ )

波状層流は疑似乱流に変化されます。加えて追加の液保持 (hold up) が観察されます。図 26 には膜流の  $Re$  数と挿入体の形状の関数として、膜厚を測定した結果を示します。

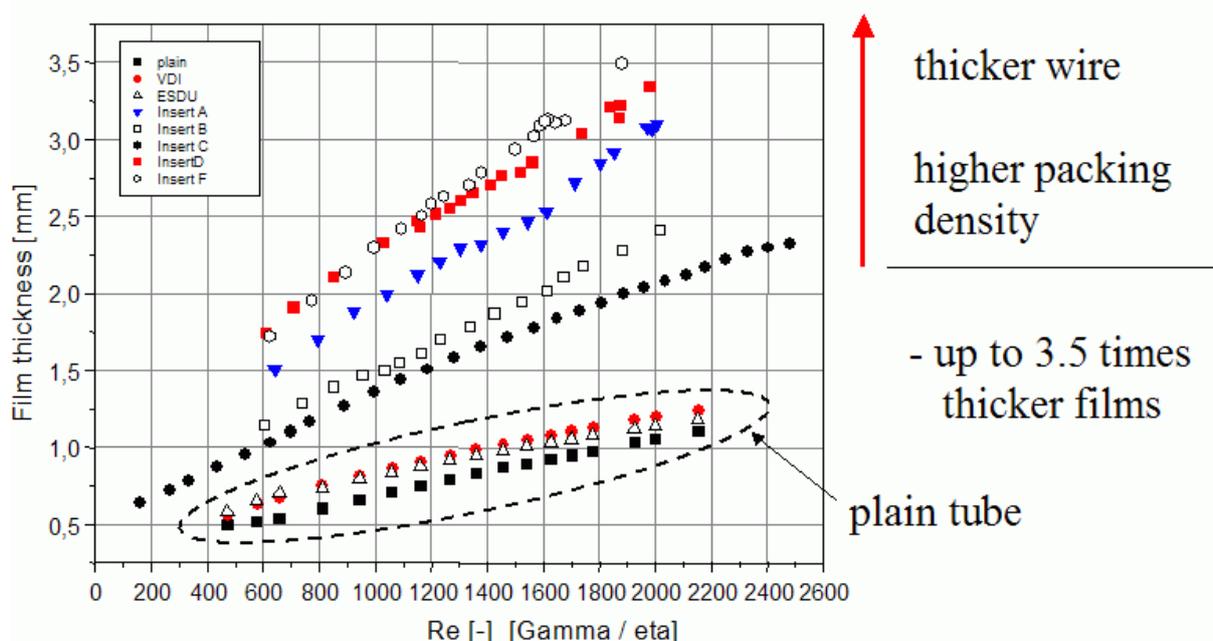


図 26: 形状の異なる挿入体の  $Re$  数と膜厚の関係

プレーン管のデータは ESDU と VDI 相関式との比較を行いました。結果は質量流量と共に、膜厚の増加

を示します。(膜 Re 数) 同じ観察結果は異なるワイヤー3次元素子の形状でも得られ、高い Re 数において大きな膜厚が測定されました。加えて膜厚（保持）はワイヤーの直径と充填密度で制御できます。

- ・一般的に hiTRAN®ワイヤー3次元素子を装着すると膜厚と保持が増加する。
- ・熱交換器の管内における反応の場合、挿入体形状により微調整が可能である。

## 滞留時間

図 27 には膜 Re 数 2500 における平滑管の滞留時間を示します。最初の振幅は蒸発器の塔頂の入り口を示し、底部の応答信号は、予想通りの遅れ時間で同じ形です。

hiTRAN®ワイヤー3次元挿入体は同じ応答を示し、平滑管に対して数秒の遅れを生じます。

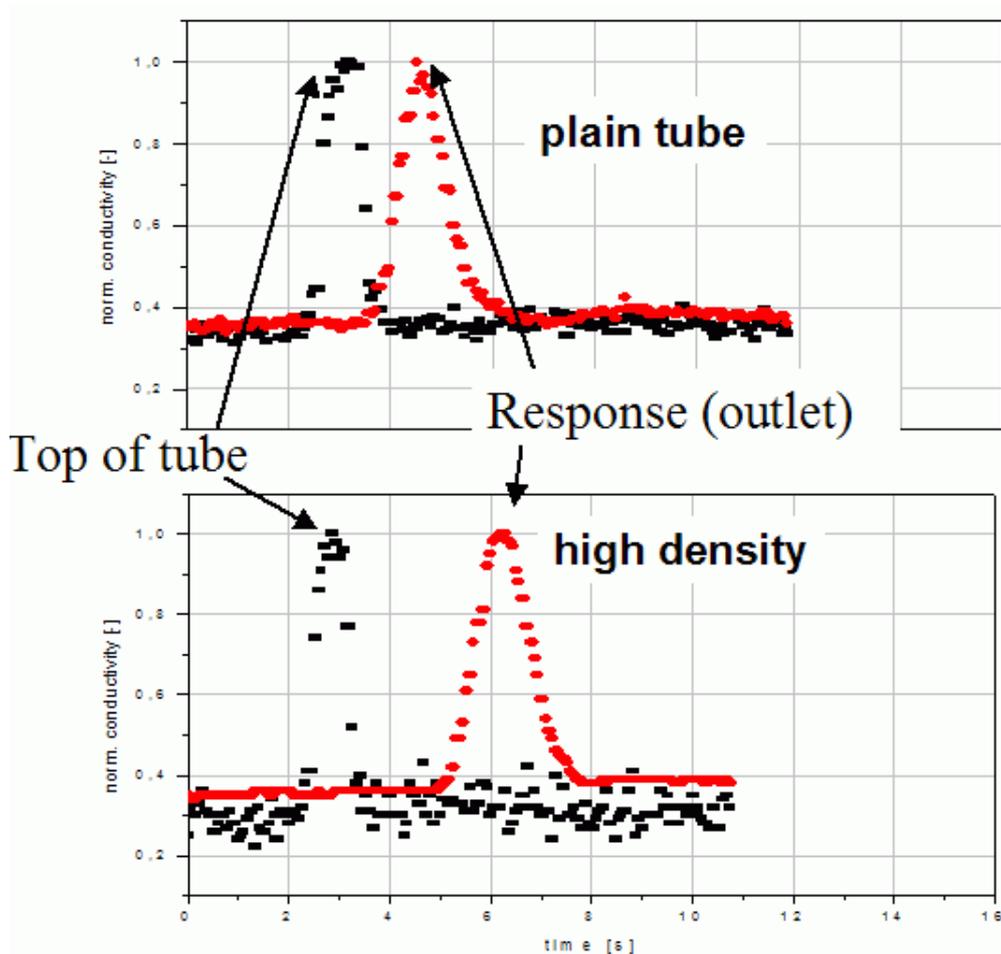


図 27: 乱流膜流れの滞留時間分布

同様の実験が Re 数=200 の波状膜層流域で繰り返されました。平滑管条件の応答は、入口の信号に比べはるかに広い時間分布を示すことが明らかになりました。これは層流条件のために、管壁近傍では液体が非常にゆっくり移動するためです。

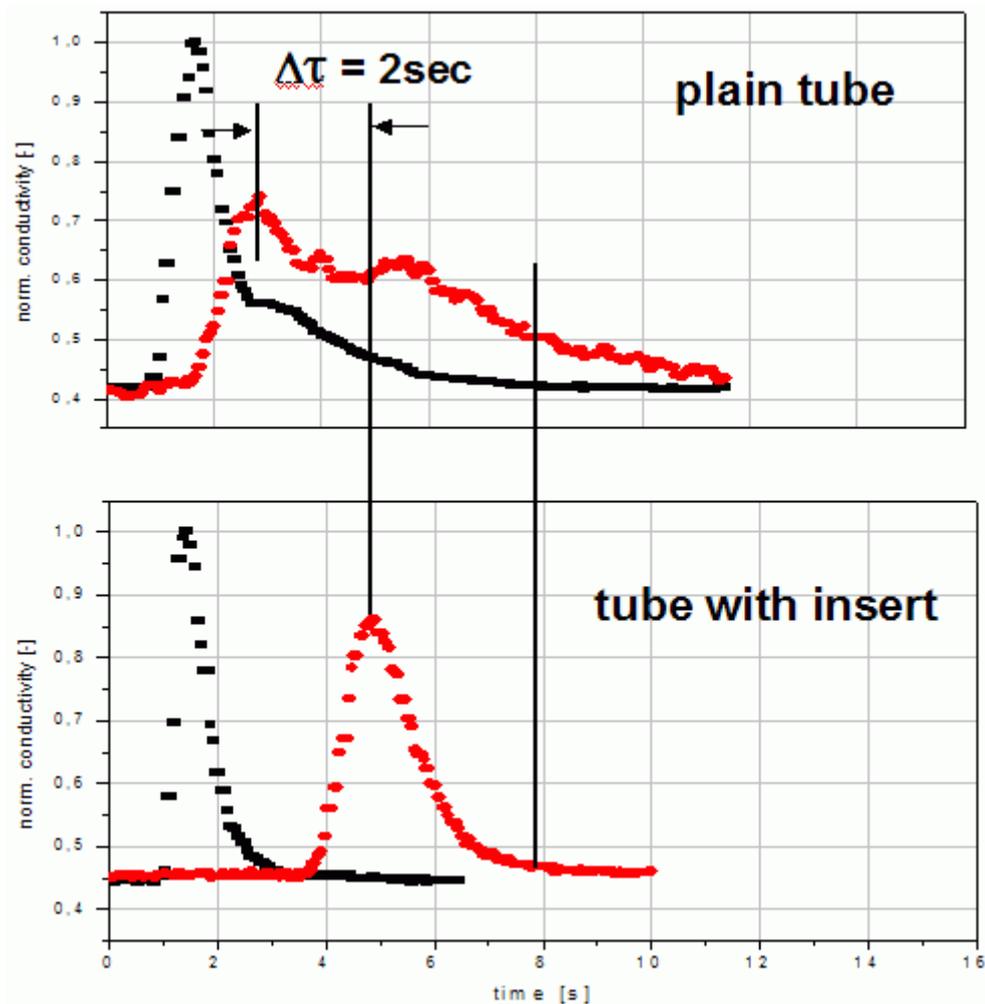


図 28: 波型層流膜流れの滞留時間分布

予想されるように、挿入体を用いることで平均の応答時間は再び遅延します。しかし平滑管に比較して、時間分布ははるかに狭くなります。これは壁での流体のよどみが中心部に向かって混合されることを示しています。

また平滑管条件下では流体のある部分は、温度の最も高い壁面に、より長い時間留まります。

## 伝熱

管側伝熱の測定は、 $Re$  の広い範囲にわたって、ある種の素子の形状のために改善されることを示します。平滑管に比べて管側伝熱係数は  $Re$  数 1000 以上で大きな増加をする。最も顕著な改善は  $500 < Re < 2500$  の範囲で 90% 以上の改善である。

これは測定した  $Re$  数の広い範囲にわたって改善の達成できることを示す。

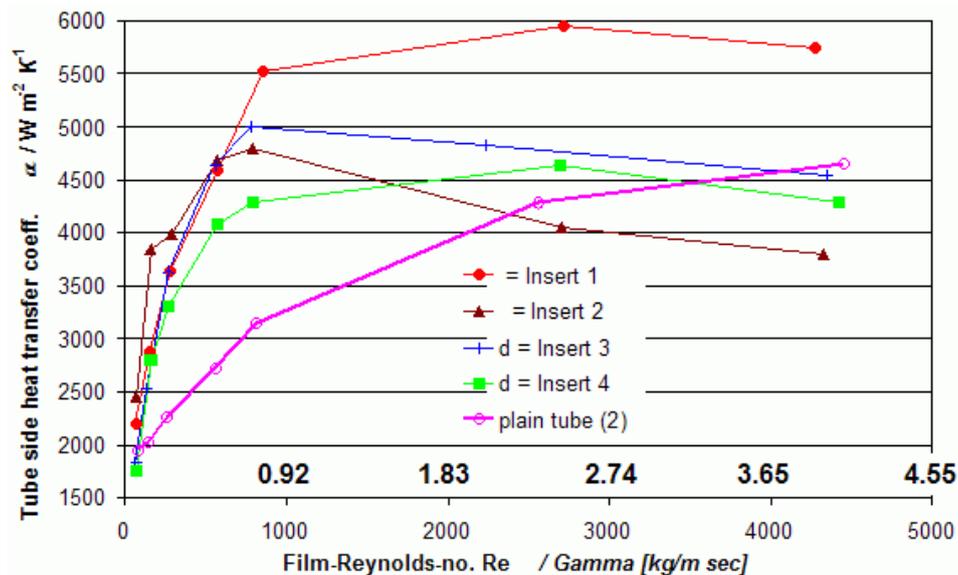


図 29: 挿入体の形状の違いによる Re 数と管側伝熱係数の関係

#### 結論:

- 新たな“保持(hold-up)”（薄膜流れの膜厚と滞留時間）を制御する可能性がある。
- より良い液の分布
- 高い保持(hold-up)での短い管壁滞留が観察される
- ワイヤー3次元形状によって、全て Re 範囲で 90%以上の管側減伝達係数の改善
- 乱流増加による粘性液体混合物からの蒸発に対する大きな可能性（短いサブ冷却長さ、膜内の濃度勾配の無さ）
- 真空条件下では圧力損失を考慮しなければならない。この場合膜が最も厚く蒸気速度が低いところへの部分挿入となる。（蒸発器の塔頂の入口領域）

### 3. 機械的取扱い

#### 3.1 製品仕様

hiTRAN®ワイヤー3次元素子は熱交換器の要求に合致するように製造される。したがって貯蔵品はない。

- 直径は 4 mm から 150 mm (3/16" から 6") が可能
- 長さは <math>< 50\text{mm}</math> から 18m が可能 (稀にそれ以上)
- 多管式熱交換器のすべてに適用可能
- 完全に脱着可能
- U字管そして空気冷却器のプラグヘッダー
- ワイヤーに伸ばせる全ての金属で作製可能

炭素鋼、銅、銅/ニッケル、アルミニウム、ステンレス鋼 (各種グレード)、Incolloy®、インコネル®、ニッケル、ハステロイ®、モネル®、チタン、タンタル....

炭素鋼は、最も一般的な材料として SS304 または SS316

#### 3.2 装着

hiTRAN®ワイヤー3次元素子は世界中の 5000 以上の熱交換器に装着され、ガイドラインに沿って実施する場合に非常に簡単である。要求があれば CalGavin は色々なタイプの熱交換器のための詳細な装着マニュアルを提供することが出来る。

- その現場で装着することができる
- 流れ方向に装着する
- 縮まりばめ
- チューブシートに位置する
- システムは、合わせて保持
- 取り外し可能

一般的に hiTRAN®ワイヤー3次元素子は、流れ方向に装着される、これは伝熱に最適な増加を提供する。

CalGavin が提供する特別な道具を使って、管内に引き込まれる。引き込む方法が利用できない特殊な場合、例えば U 字管熱交換器では、hiTRAN®挿入体は引き込まれずにその場所に押し込まれる。

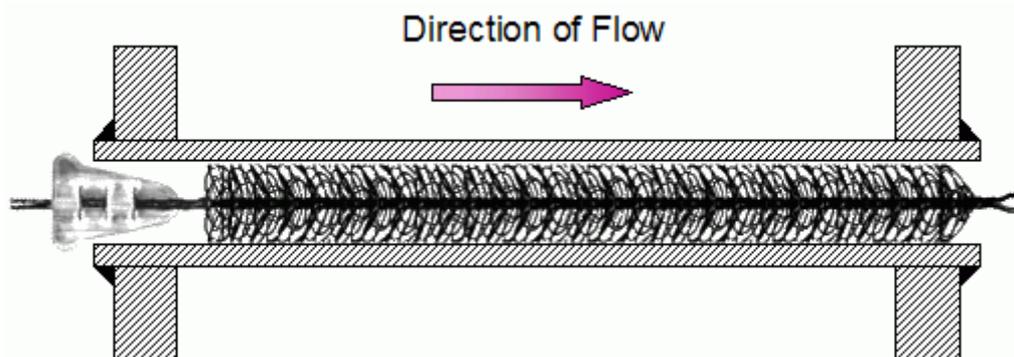


図 30: hiTRAN®素子の装着方向

設計性能に合致させるため、hiTRAN®のワイヤーループと管壁面の接触は流れの障害とならなければなりません。

hiTRAN®ワイヤーループは、壁管面近くの境膜の破壊を保証するにふさわしい堅固な圧力を管壁に加えられます。

hiTRAN®挿入体は極わずか大きめに製作されており、実際の管にきっちり合うように縮小します。— CalGavin その要求を達成するための特別の治具を用意しております。

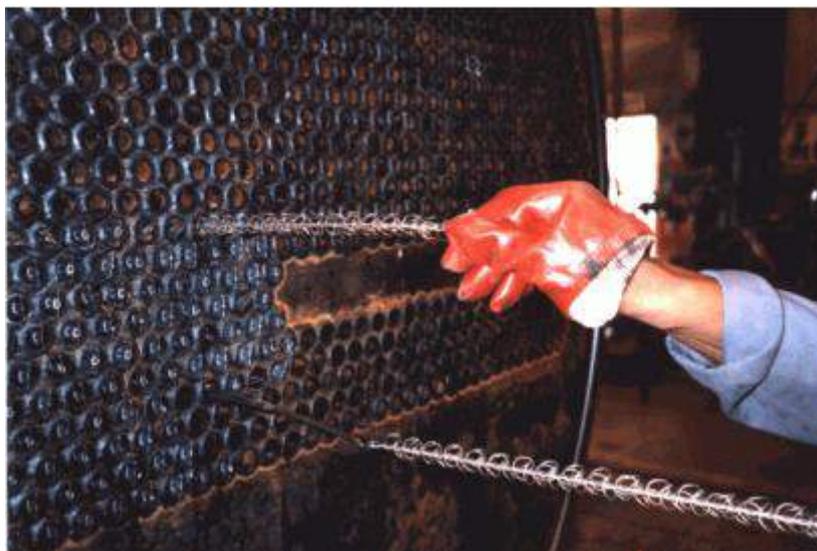


図 31: 改造工事での hiTRAN® 素子の装着

上の図 31 に見られるように hiTRAN®素子は"牽引フック"に付着しており、交換器の中を引っ張られる。装着された後は図 32 のようなクサビワイヤーを用いた保持方法が利用できます。



図 32: 装着はクサビワイヤーで保持される I

プラグインヘッド空気冷却器については別の保持方法があります。(図 30 に示すようないわゆるチャアアンカー[chore anchor])

hiTRAN®ワイヤー3次元素子をメンテナンスのために取り除く必要がある場合、保持具は簡単に取り除けます。そして挿入体をそれを装着したと同じ方向に引き抜くことが可能です。

以上