

多管式熱交換器における管側伝熱促進素子“hiTRAN”の役割 (その6)超小型高性能熱交換器の開発とその性能評価実験

渡部 高司* 酒井 昭二**

1. はじめに

近年の省エネルギーの機運のもと、国土交通省(水管理・国土保全局 下水道部)は「低炭素街づくりにおける下水熱利用」と銘打って平成27年3月には「下水熱利用マニュアル(案)」を発表¹⁾している。これは年間通じて15~25℃と安定している下水から、熱交換技術、ヒートポンプ技術を用いて熱エネルギーを再生しようとするものであり、多くの自治体、社団法人、関連技術を持つ企業が活動している。

一方、経済産業省(資源エネルギー庁エネルギー対策課)は「ZEH(ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス)普及に向けて~これからの施策展開~」を発表²⁾し、ハウスメーカー・工務店の2020年までに達成すべき指針を示そうとしている。具体的には躯体の高断熱化を満たした上で、設備の高効率化(空調設備、換気設備、照明設備、給湯設備等)により、20%以上の省エネをZEHの基準としている。ここでは1世帯当たりのエネルギー消費量は年々増加してきたが、1990年から2013年には10%の減少になったとしている。

図1を見れば明らかなように、38GJ/世帯の内、給湯部分が30%前後と非常に大きく、これが下水となって国土交通省の提案する下水熱利用に繋がっている。例えば、風呂のみに着目すれば、筆者の自宅では毎日38℃以上のお湯を200L程度捨てている。このお湯の熱量は18℃の水道水を温めたものとする、熱エネルギー4,000kcal(16MJ)となり、省エネには程遠い。

本報ではこのお湯を捨てる前に熱を回

収できる超小型熱交換器の可能性について検討した具体的な実験結果を報告したい。

2. 設計の考え方と製作

2-1. 管側と胴側の境膜伝熱係数

小型の熱交換器としては前報の表3³⁾で報告した中部電力様向けデモ用熱交換器のデータが参考になる。この表1から明らかなように、hiTRANを挿入した場合、Shell側の h_o をもっと向上することができれば、さらにDuty(熱交換能力)を大きくできる。

2-2. バンドル形状

先のデモ機場合、バッフルを固定するためのロッド2本を使用し、かつShellとバンドルはエポキシ樹脂注型によって固着したが、開発品はTubeODが6mmΦを使用することで、30本を52mmΦの透明塩

表1 デモ用熱交換器データ抜粋

	hiTRAN	Empty
Duty [kW]	3.5	2.1
U 値 [$W/m^2 \cdot K$]	1798	679
h_o Shell 側	3048	2982
h_i Tube 側	6635	1058
Re 数 Shell 側	1933	2001
Re 数 Tube 側	1348	1308

Shell: ID 52mmΦ, バッフル 2, 透明塩ビ管

Tube: OD 7mmΦ, $t=0.5$ mm, 17本×320mmL, SUS

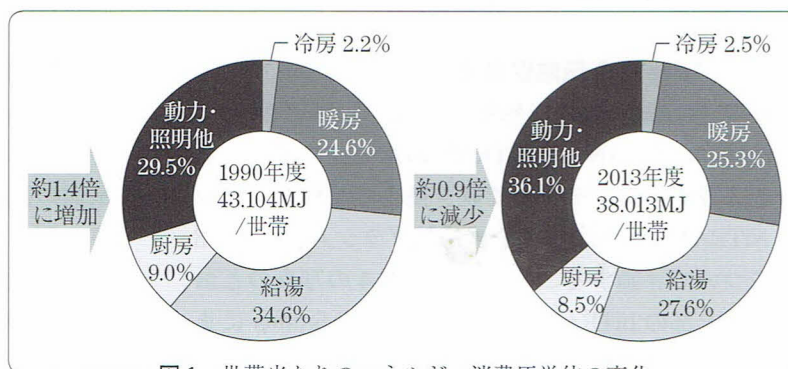


図1 世帯当たりのエネルギー消費原単位の変化
(家庭部門のエネルギー消費状況②の一部抜粋)

*Takashi WATABE: aPEC(株) 代表

E-mail: watanabe@a-pec.jp

**Shoji SAKAI: 同社 業務部長

E-mail: sakai@a-pec.jp

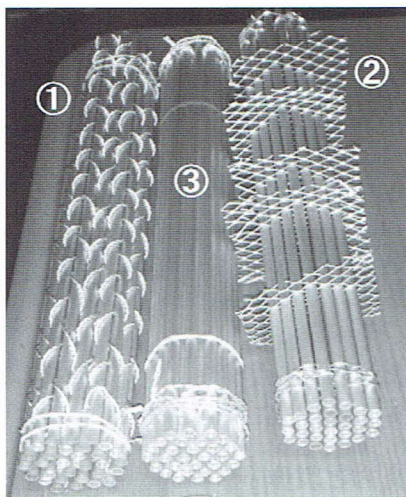


図2 30本バンドルの実物写真

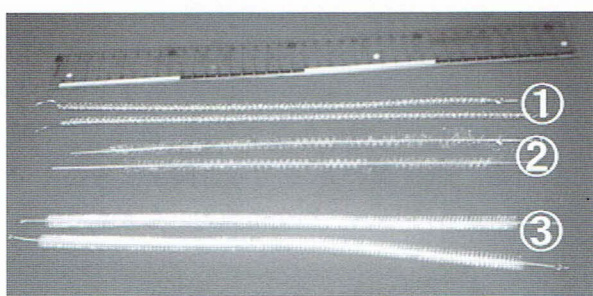


図4 3種のTube挿入体

ビ製のShellに挿入することができた。さらにShell側の境界伝熱係数 h_o を向上させるため、図2の左に示したように、①1.0mm ϕ のアルミワイヤー2本を撚った撚り線を、Tube外表面に10回程度巻き付けたバンドル (Twist Wire)⁴⁾、右端のように、②アルミのエキスバンドメタル5枚を通したバンドル (ExpandM)、そして比較として中央部の③邪魔板のない (Plane) の3種を用意し、検証実験を実施した。

図3は図2のバンドルを透明塩ビShellに挿入し、Shellとエポキシ樹脂で一体化した熱交換器の写真である。このShellの両端に図5のようにTube用のヘッド (頭部) を装着して熱交換器が完成する。

3-3. Tube挿入伝熱促進体

Tube内に挿入する伝熱促進体は、①SUS製ID=6mm用のhiTRAN、②hiTRANのループワイヤー部分を3号ナイロンテグスで置き換えて手作りした仮称NiTRAN、③特注のナイロン製ブラシNbrushの3つについて評価することとした。図4の写真のとおり、再上部のhiTRANは6mm Φ 用をID5mm ϕ にまで絞り込んだため、一番細くなっている。ナイロンテグスのNiTRANとNbrushは柔らかいので、Tube

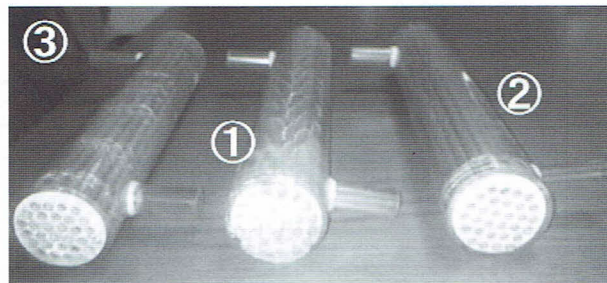


図3 エポキシ固着後の一体型熱交換器

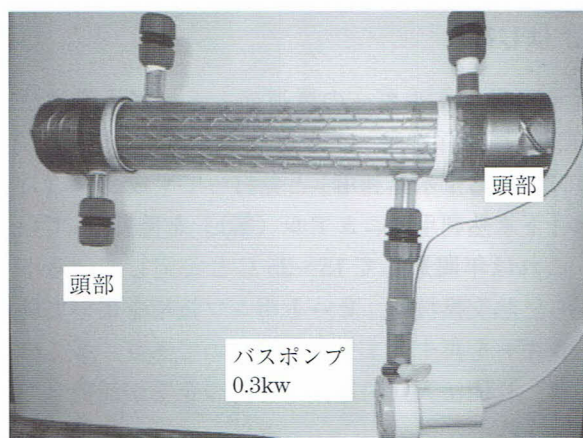


図5 頭部とポンプの取り付け写真

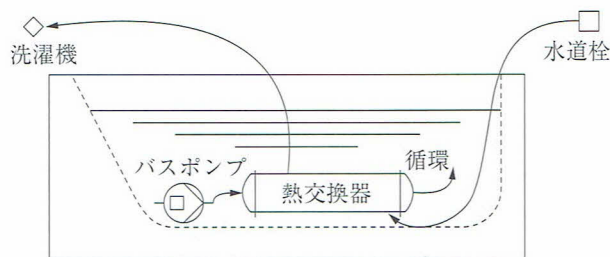


図6 全体実験フロー図

径より太い形状でも簡単に挿入できる。

4. 実験方法

図5は熱交換機本体に頭部をつけ、Shell側にバスポンプを取り付けた写真である。図6はバスタブに沈め、残り湯を循環して水道水と熱交換するフローのイメージ図である。

実験は温水を循環するHot Tube、Hot Shellの両方で実施した。温度の測定は熱電対式データロガーで、それぞれの入口、出口温度を測定した。また温水側の流量は、バスポンプ能力の成り行きとし、水道水側は2, 4, 6L/min目標としてロータメーターを見て元バルブで調節し、実際の流量は一定容積に達する秒数を実験毎に測定して計算した。実験の水の温度は、高温側入口温度が $38 \pm 2^\circ\text{C}$ 、低温側のそれは $18 \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲内で実施した。

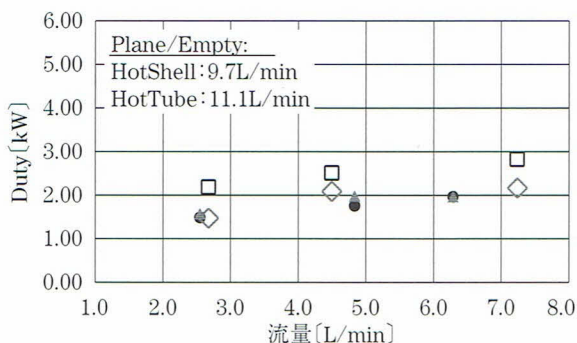


図7 Plane/Empty の性能曲線

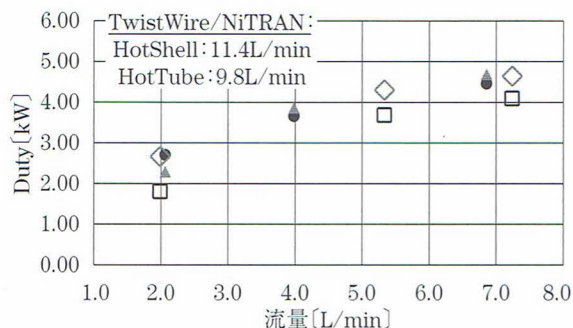


図8 Twist Wire/Empty の性能曲線

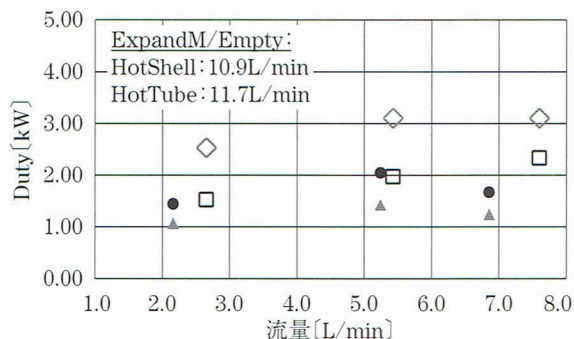


図9 ExpandM/Empty の性能曲線

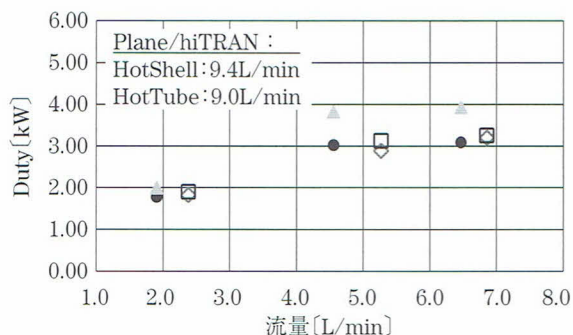


図10 Plane/hiTRAN の性能曲線

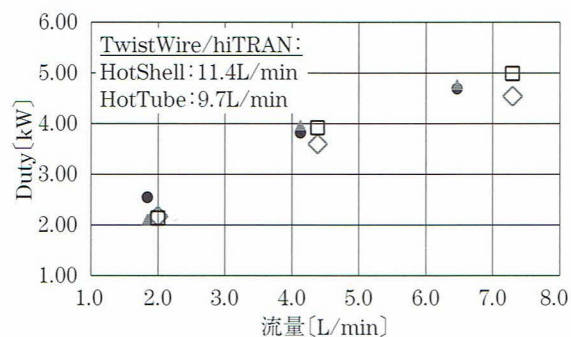


図11 Twist Wire/hiTRAN の性能曲線

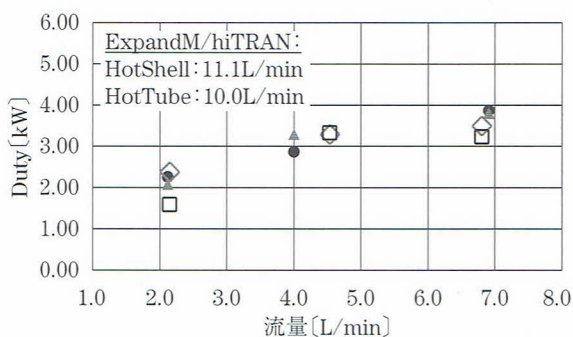


図12 ExpandM/hiTRAN の性能曲線

4. 実験結果および考察

4-1. Shell 側バッフルの影響

図7, 8, 9にはTube側には何も挿入しない(Empty)の状態、Shell側のバッフル形状の異なる場合の実験結果を、流量変化に対する熱交換能力(Duty=kW)で整理した結果である。

図中の塗りつぶしプロットはHot Shell、白抜きはHot Tubeの実験結果である。同一流量にある2つのプロットは、熱量計算をするときの、Hot側基準とCold側基準であり、実験誤差を見るため、あえて平均をせずにプロットしてある。◇と●がCold側基準で、□と▲がHot側基準である。またポンプ(0.3kW)側の成り行き流量(Hot側)は図中に記載したとおりで、どちらも10L/min程度である。

* 圧力損失に関して、

Hot ShellとHot Tubeの流量がほぼ同じであるということは、同じポンプを使っているのだから、圧力損失もほぼ同じである。最大のShellとTube側の流量比は14%程度の範囲に納まっている。

* Dutyに関して、

図9のExpandMのみがバラツキが大きい、全般的にHot Tube側のDutyが若干高い傾向がありそうである。この3つのDutyを流量6L/minで比較すると、Plane:2.1, Twist Wire:3.0, ExpanM:2.5程度を読み取れ、明らかにTwist Wireに促進効果がある。また表1のEmptyのDutyが2.1であることと比較すると、伝熱面積が1.8倍(30本/17本)となっている割には面積効率が悪いという結果が得られているが、これは表1の実験条件では、温度差

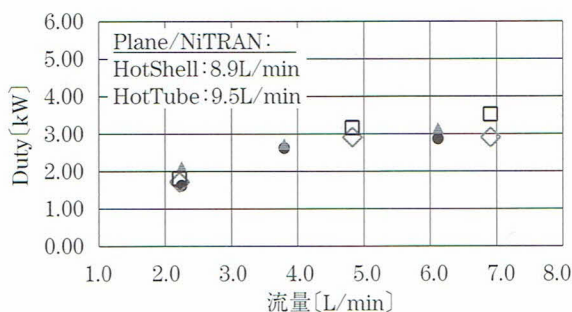


図 13 Plane/NiTRAN の性能曲線

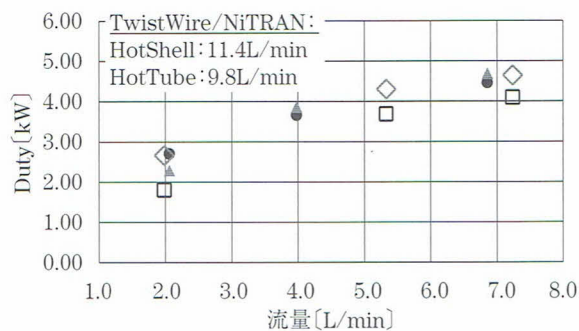


図 14 Twist Wire/NiTRAN の性能曲線

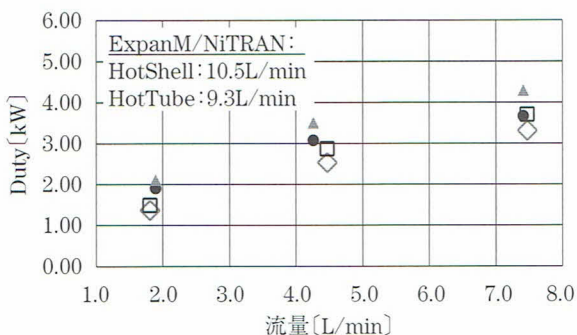


図 15 ExpandM/NiTRAN の性能曲線

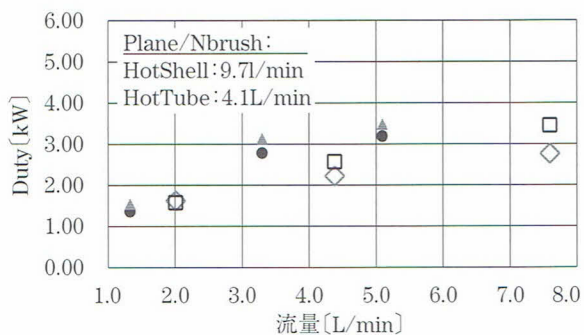


図 16 Plane/Nbrush の性能曲線

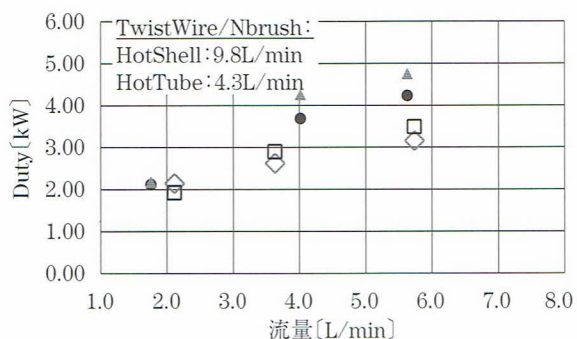


図 17 Twist Wire/Nbrush の性能曲線

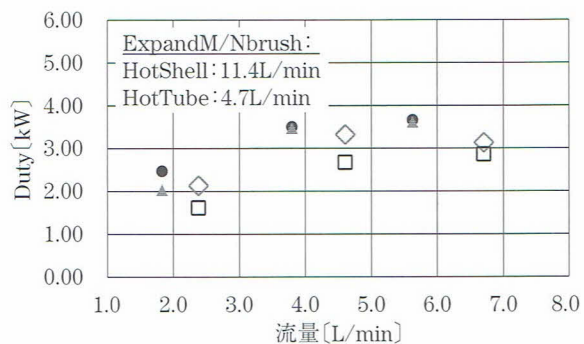


図 18 ExpandM/Nbrush の性能曲線

(LMTD) が大きい (高温側 63℃/低温側 25℃) である。

4-2. Tube 側伝熱促進体との組み合わせ。

Tube 側の hiTRAN, NiTRAN, Nbrush 挿入体と Shell 側の Plane, Twist Wire, ExpandM の組み合わせた実験の結果を以下順に示す。

図 10, 11, 12 は hiTRAN との組み合わせ結果からは、6L/min の流量で Plane と ExpandM が 3.5kW であるのに対し、Twist Wire は 4.3kW と 20 % 以上の Duty 向上が認められた。これは Twist Wire の Shell 側境界膜伝熱係数 h_o の向上効果が最も高いということである。ExpandM が Plane と同等の Duty であることは少し期待外れであった。Hot Tube 側の流量は誤差の範囲で一定であり、Empty よりも 10 % 程度

小さくなっている。

図 13, 14, 15 はループワイヤーをナイロンテグスとした NiTRAN の組み合わせである。hiTRAN の場合と同様に Twist Wire の Duty が最も大きい。そして ExpandM と Plane の関係も同じ傾向を示している。Hot Tube 側の流量も hiTRAN と同等である。Duty が Twist Wire の方が ExpandM より大きいということは、撚り線の方が外側界面更新の効率が良いということであろう。

図 16, 17, 18 はいわゆる棒ブラシであって、Hot Tube 側の流量が約 40 % であることから判るように、圧力損失がかなり大きくなっている。そして白抜きの Hot Tube よりも塗りつぶしの Hot Shell の方がいずれも Duty は少ない。

ブラシの場合、コアワイヤーに締め付け固定さ

表2 熱交換能力 Duty [kW] の比較

Tube Shell	Plane	Twist Wire	ExpandM
Empty	2.1	3.0	2.5
hiTRAN	3.5	4.3	3.5
NiTRAN	3.3	4.3	3.8
Nbrush	3.3	4.5	3.8

表3 18℃低温水の到達温度(高温側38℃)

Tube Shell	Plane	Twist Wire	ExpandM
Empty	23.0℃	25.2℃	24.0℃
hiTRAN	26.4℃	28.3℃	26.4℃
NiTRAN	25.9℃	28.3℃	27.1℃
Nbrush	25.9℃	28.8℃	27.1℃

表4 HotTube の流量 [L/min] (バスポンプ一定)

	Plane	TwistW	ExpdM	平均
Empty	11.1	11.4	11.7	11.4
hiTRAN	9.0	9.7	10.1	9.6
NiTRAN	9.5	9.8	9.3	9.5
Nbrush	4.1	4.3	4.7	4.4

れた短繊維のテグスは放射状に広がり、外周部に比べて中心部のテグス密度が上がるため、圧損は大きくなると思われる。壁面での界面更新はブラシ毛先のみとなるため、効率は悪そうである。

これまでの結果を6L/minでの代表値を採って一覧したのが表2である。Nbrushは圧損が大きすぎ、伝熱促進材として不適であるが、参考として入れている。

同様に、高温水側が38℃のとき、6l/minの18℃の低温水が何℃まで上がるかを計算したのが、表3である。表3から明らかなように、Twist Wire/NiTRANの組み合わせで、38℃のお湯10L/minと18℃の水を熱交換することで、28.3℃の6L/minのお湯が得られた。hiTRANも同等であるが、挿入作業性が悪かった。

4-3. 省エネ効果(回収熱量)

以上の実験の結果4.3kWの熱交換能力(Duty)を持つ熱交換器を用いた場合の残り湯200L当たりの熱交換量は以下のように計算できる。

$$(4.3 - 0.3) / 3 = 1.33 \text{ kW} = 1.33 \times 3.6 = 4.8 \text{ MJ}$$

*0.3はバスポンプ動力、1/3は運転時間20分

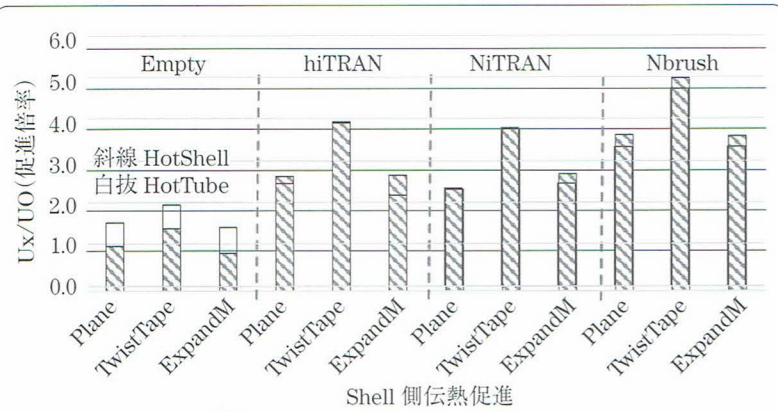


図19 HTRI 計算 U 値による伝熱促進倍率

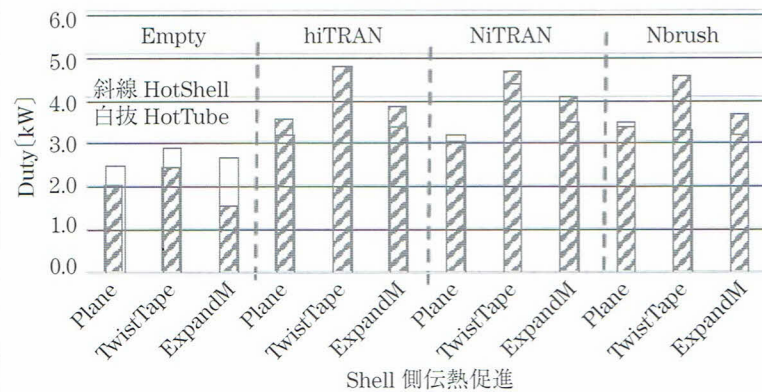


図20 HTRI 計算の Duty 比較

これは最初に述べたように、そのまま捨てる熱量の約30% (4.8/16) に相当する。また家庭用貯湯電気温水器の供給水として用いると、

$$1.33 \text{ kWh} \times 330 \text{ 日} = 439 \text{ kWh/年}$$

となり、年間電力使用量の1カ月分(≒13,000円)に相当する。

洗濯用水として用いる場合には、直接の省エネ換算はできないが、風呂の残り湯と熱交換した暖かい水道水(18↗28℃)が使えれば、洗濯とすすぎの効率は上がるものと期待される。

4-4. HTRI による解析

熱交換器のHTRIには管外側のExpand Metalをバップルとするオプションはあるが、外径6mmφには対応していない。さらに管側についてもCalGavin社のhiTRAN.SPをHTRIにアドインすることで設計とhiTRANのParts No.を提供してくれるが、これも内径5mmφには対応していない。しかしShellとTubeに伝熱促進した実験データをHTRIに入力しRating計算することで、この熱交換器のGeometryに対応したPlaneとEmptyの計算結果を出力してくれる。この時のOver Designは伝熱促進効果のある

場合、マイナスとなるが、これに変えて、Required U /Actual U =伝熱促進倍率と定義し、その値を計算した結果を図 19 に示した。

この図から Tube 側 Empty では Shell 側伝熱促進は 1.0~1.5 と小さいが、Tube 側伝熱促進と組み合わせることで、4~5 倍となることが判る。そして Twist Wire が最も高い倍率を示している。

図 20 は同じように HTRI で計算した Duty を示した。図 19 では Nbrush の促進倍率が他より大きいように見えるが、Duty で比較すると圧損によって流量が低下しているため、同レベルとなっていることに留意すべきである。

4-5. Tube 側伝熱促進体の圧力損失

Tube 側伝熱促進体のバスポンプによる流量についてはすでに示しているが、Tube 挿入体の圧力損失を推定するために再度表 4 に整理した。

表 3 の平均値を見ると、hiTRAN と NiTRAN の流量は Empty の 84 % に対し、Nbrush は 38 % となっている。この時の Empty Tube の圧損は HTRI によって 7.5kPa と計算されており、圧損は流速の 2 乗に比例することから、それぞれの圧損は、hiTRAN : 10.6, NiTRAN : 10.8, Nbrush : 50.3kPa と推算される。Nbrush は圧損が大きすぎることを、SUS ループワイヤーの hiTRAN は挿入時の作業性が悪いことから、挿入時の作業性の良い NiTRAN が最適である。

4-5. まとめ

小口径 Tube 用の hiTRAN のループワイヤーに変えてナイロンテグスのような柔軟なモノフィラメントを用い、かつ Tube 外側の境膜伝熱係数を上げるための撚り線 (Twist Wire) を巻き付けることで、従来技術の約 2 倍の Duty (熱交換能力) を持つ超小型熱交換器の可能性を確認することができた。この

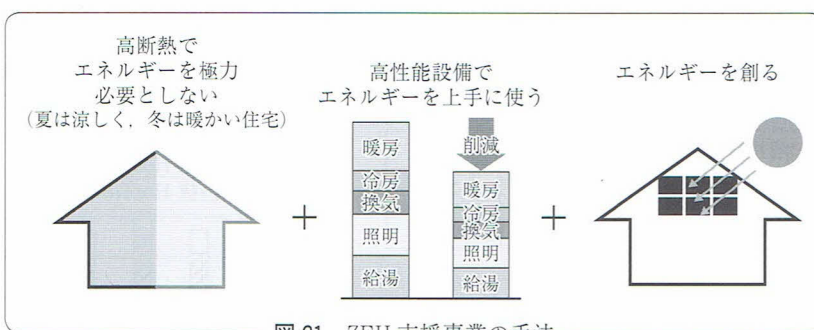


図 21 ZEH 支援事業の手法

高効率の小型熱交換器は、家庭内で無駄に捨てられている風呂の残り湯からの熱回収に力を発揮すると期待される。

また現在は使用材料がアルミと塩ビパイプであるため、用途は温水と冷水に限られるが、材料を選定すれば、より効率の高い熱交換器の用途も見えてくるものと考えている。

5. あとがき

平成 28 年度より ZEH 支援事業を推進しているが、その手法は図 21²⁾のようにまとめられている。

本開発の熱交換器は図 21 中央の“エネルギーを上手に使う”に該当するもので、普及のためには、既存の技術とうまく組み合わせることが必要であると考えており、異業種関連企業との協業を期待している。

今回は石油精製に使われる大型熱交換器を例にして、hiTRAN 設計のまとめとフィージビリティスタディをもって本連載の最終回としたい。

〈参考文献〉

- 1) http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/mizukokudo_sewage_tk_000458.html
- 2) http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/zeh/
- 3) 渡部, 酒井, 駒田: 化学装置, Vol.61. No.2., p.69(その 2)
- 4) 特開 2016-217540
- 5) 渡部, 駒田, 酒井: 化学装置, Vol.61. No.4, p.58(その 3)

◇投稿歓迎◇「化学装置」は読者からの投稿を歓迎します。

小誌は、化学工学に関わる技術や粉体工学に関する技術、あるいは食品産業や医薬・化粧品、先端材料、機能材料などの技術情報からマーケティング、マネジメント、海外の技術情報まで幅広い内容を網羅した総合的な情報誌を目指しています。

- ・化学、粉体、食品、医薬、化粧品などの技術知識
- ・化学、食品、医薬・化粧品業界の経済、社会の動向

- ・新製品、新技術 (機器・装置) の紹介記事
 - ・製造現場からの声 (改善・改良、トラブル対策)
 - ・趣味・趣向的な記事、コラム、読後のコメント
- などの記事・情報をお送りください。掲載誌と社内規定の原稿料 (図書券またはカード) をお送りいたします。

(株)工業通信「化学装置」編集部まで
(issniki@kic-densen.com)