

高性能高温ガス輻射伝熱技術

Sophisticated Method for Radiative Heat Exchange between High Temperature Gases

越 後 亮 三*
Ryozo Echigo

1. 緒 言

一般に“熱交換”は加熱および被加熱（あるいは冷却および被冷却）媒体間でのエネルギーの輸送を行わせるもので、両媒体がそれぞれ気体、液体、固体の場合があり、伝熱現象としては両媒体間あるいは同一媒体内で伝導、対流、沸騰、凝縮、ふく射等が単独あるいは複合して用いられている。両媒体が対流の場合には直接接触等の特殊な場合を除けば固体の隔壁があり、それを貫流する熱通過係数Kは

$$1/K = 1/h_1 + 1/(kw/\delta) + 1/h_2$$

で表わされる。ただし、 h_1, h_2 は熱伝達係数、 kw, δ は隔壁の熱伝導率と厚さで、 K の大きさは流体の種

類、状態、伝熱現象によって様々な熱交換方法、熱交換器が用いられている。特に新しい材料の特徴を活した熱交換器が開発されているが、熱通過係数の大きさの概略を図-1に示す。本稿ではポーラス材料のもつ伝熱上の機能を活用し、高温におけるふく射を利用した新しい“熱交換器”について紹介し、新しい熱交換器、反応器等への応用に関する基本的な考え方について説明する。

2. ふく射伝熱の特徴

ふく射伝熱の特徴は、それが電磁エネルギーであることに起因して吸収～放射～散乱等を含めた輸送機構は伝導、対流とは異なり「遠距離作用」のあるこ

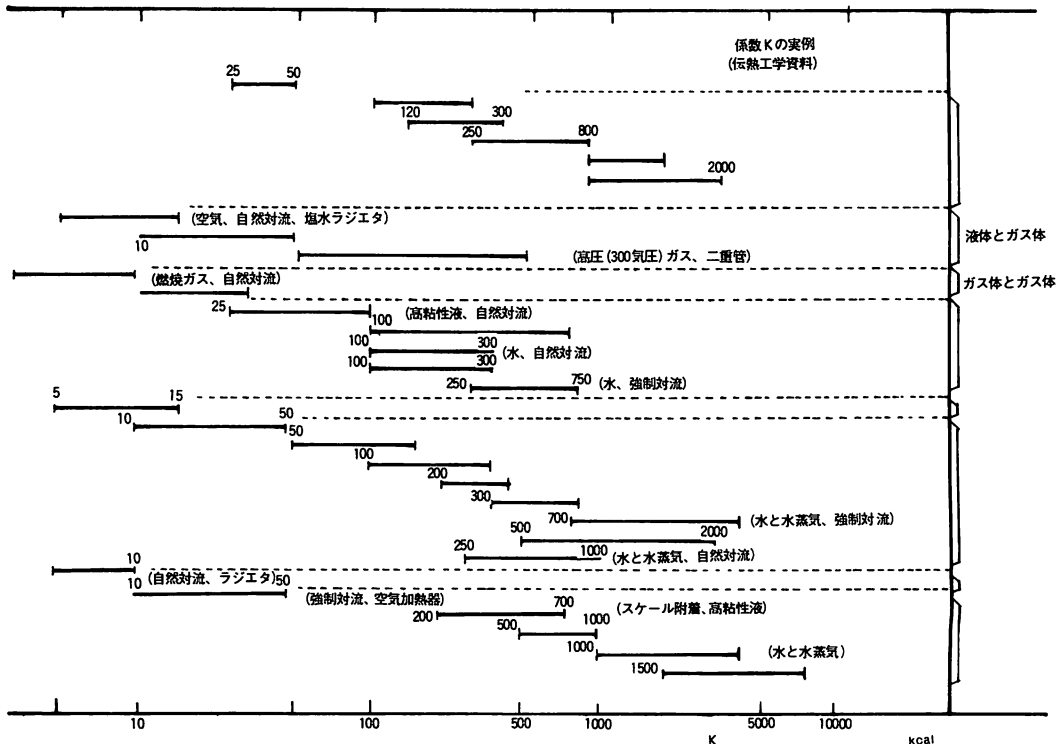


図-1 種々の熱交換器等における熱通過係数

* 東京工業大学工学部機械工学科教授
〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1

とである。すなわち離散媒体間で直接エネルギーの授受があり、途中にある媒体の状態（温度、圧力、流動等）によって直接的な支配は受けない。間接的な影響はもちろんあるが、離散した両媒体の吸収～射出特性が一義的な影響を持つ。図-2によって説明する。対流伝熱の場合、伝熱面から伝達された熱は、流れとともに輸送されると同時に熱伝導によって周囲にも伝えられ、決して飛び越すことはない。つまり、微分方程式によって定式化できる。また全体の伝熱量は伝熱面に接する流体側の温度勾配で決まってしまうのである。この温度勾配は近傍の流れ場が決定的な要素となるので、乱流促進体等はこの流れ場を介していかに急峻な温度勾配を作るかということを目的としている。ふく射伝熱では図に示すように伝熱面とそれに近接していない流体要素とも直接エネルギー交換があり、また壁面、流体要素間全域にわたって輸送現象があるので、定式化に際しては対流と併せて微積分方程式が必要となる。従ってふく射輸送が支配的な伝熱系では伝熱面と流体の吸収～射出特性のほかに系全体の温度分布が重要であって、伝熱面近くの温度勾配とか全体の流動状態（たとえば層流、乱流）が直接的な決定要因ではない。ふく射伝熱の特徴の一つに温度分布の平坦化を挙げることができる。これは上記の遠距離作用によって同じ区画内の温度を均一化するもので均一加熱を目的とする場合に適している。またふく射伝熱は電磁波の波長に強く依存するが、本稿ではこれに関連した説明は省略する。

3. ポーラス材と伝熱現象

3.1 一般的な現象

種々の耐熱合金、セラミックを用いてポーラス材を製造する技術が進歩し、最近では空隙率の極めて高いもの（金属の場合95%以上）、平均孔径の選定もかなり自由にでき、耐熱温度についてもムライト系で1,600℃以上、高純度アルミナで1,800℃強と優れたものが開発・市販されるようになった。ポーラス媒体中における流動、エネルギー輸送等の基本的な現象に関する研究は古くから行われているが、応用との結びつきは今後の重要な課題である。ポーラス材中の相変化（沸騰、凝縮）、ふく射エネルギー輸送、燃焼現象等自由空間における諸現象と較べて際立った違いが期待でき、さらに新しい技術の“核”となる可能性を持っている。ポーラス材の構造上の特徴は比表面積（ m^2/m^3 ）が平滑面と比較して桁違いに大きいこと、母材あるいは空孔の構成（代表）長さは非常に小さくできることにある。種々の伝熱現象をポーラス材の代表寸法程度の微細な規模にまで“切り刻む”と現象自身が著しく変化するのであろうことは容易に想像できる。単一球まわりの伝熱ではヌセルト数を N_{ud} とすれば

$$N_{ud} = h_m \cdot d/k \geq 2.0$$

となることはよく知られている。ただし、 h_m ：平均熱伝達係数、 d ：球の直径、 k ：流体の熱伝導率である。

d としてポーラス材の代表寸法として 10μ とすると、 h_m は代表的な流体に対して

$$h_m = \begin{cases} 10^3 \sim 10^4 \text{ kcal/m}^2 \text{ hK (気体)} \\ 10^4 \sim 10^5 \text{ kcal/m}^2 \text{ hK (液体)} \end{cases}$$

と通常の伝熱現象と較べてこれも桁違いに大きい。あるいは沸騰について考えてみると核沸騰領域では気泡の成長と離脱および発泡点密度が伝熱特性を決定づける重要な要素であるが、ポーラス材ではその基本的な機構が覆えてしまうであろう。もっと普遍化していえばポーラス材中での質量、運動量、エネルギー等の輸送現象は自由空間のそれと比較して著しく違ったあるいは根本的に違った現象が期待できるが、基礎研究の蓄積もまだ十分でなく、応用とか実用化への展望はさらに難しい。次項では高温におけるポーラス材中のふく射エネルギーの輸送にみられる新しい現象と応用研究を紹介する。

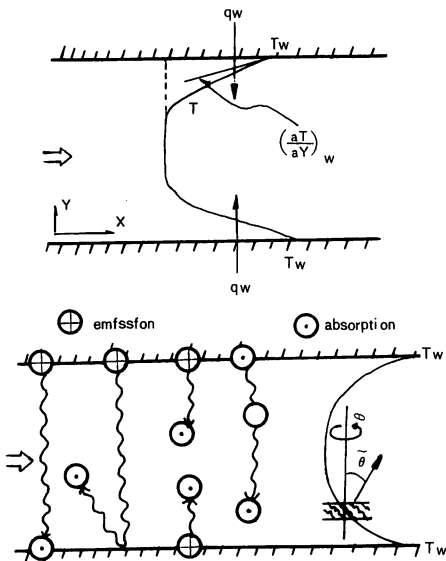


図-2 対流とふく射の伝熱機構

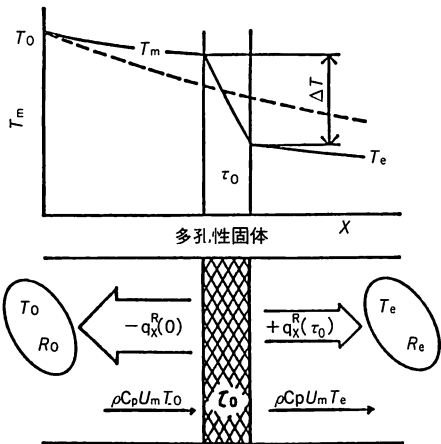


図-3 基本的現象

3.2 ふく射の輸送現象

図-3に示すように空隙率の大きなポーラス壁が設置されている流路を考える。このポーラス壁の光学的距離 τ_0 がある程度の大きさであればこの部分で高温の作動ガスは急激な温度変化 ΔT を示し、下流域で緩やかな変化に戻る。ここで、光学的距離とはポーラス体の一方から入射した光（ふく射）が減衰する割合を表わす尺度で、ポーラス体の材質、構造、平均孔径、幾何学的距離によって決まるものである。図中点線にてポーラス壁がない場合の温度分布を模式的に画いてある。具体的にはポーラス壁の幾何学的厚さが1cm程度で定常状態において $\Delta T = 300 \sim 400 \text{ K}$ ($T_0 = 1,300 \text{ K}$ の場合) にもなり、作動ガスの顕熱差はポーラス材から射出されるふく射に変換され、かつその主要部が上流側へ指向性を持って輸送される。このような現象の原理はまず固体のふく射に関する射出～吸収能が気体に比べてはるかに大きいことと、前述のようにポーラス材の特徴である桁違いに大きな比表面積と高い伝熱係数を機能的に活用しているためである。このガス顕熱からふく射エネルギーへの効果的変換の作動原理を図-4に示すが、経路を逆転させれば逆変換も効果的にでき

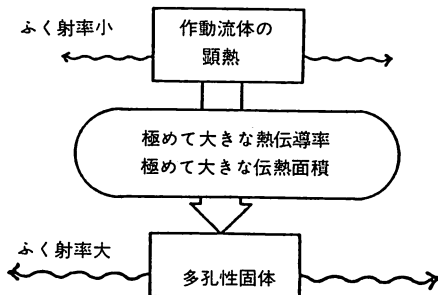


図-4 作動原理

る。変換されたふく射エネルギーが上流側へ強い指向性をもつのはポーラス体におけるふく射の伝搬現象に関連しているが、逆変換の場合にはポーラス壁はふく射の遮蔽体として機能し、これらの現象はポーラス材中におけるふく射の伝搬・輸送特性によるもので、厳密には微積分方程式を解かなければならない。

さらにこの現象が成立する諸条件（温度域、流速、入口と出口の熱的境界条件等）も含めふく射の伝搬を考慮した取り扱い文献¹⁾を参照されたい。またポーラス体は小さな熱容量のため「迅速な過渡応答性」があり、ポーラス体によって発生する圧損は一般に1～10mm Aqと小さいが、大きな流路内（例えば燃焼室など）の流量配分の適性化を含めた「流動制御」、燃焼設備では「末燃分低減」「燃焼促進」、「遮音効果」…等多くの機能があり、詳しくは筆者等の解説²⁾に記載されている。

3.3 温度の区画化技術 (zoning)

ポーラス材応用技術の一つに温度の区画化を挙げることができる。3.2項で説明したようにポーラス壁は上流側と下流側を熱的に遮断し、同一流体が流れていてもまったく異なった熱的環境（温度域、ふく射エネルギー密度）を設定することができる。しかも同一区画内においてはふく射エネルギー輸送のため均一な温度場が形成される点も重要である。具体的な応用は種々に考えることができるが、とりわけ反応系熱設備には従来多く利用されている管式加熱炉と較べて優れた特徴がある。たとえば図-5に示すように反応系の作動ガスをポーラス壁で区画された流路に流した場合、区画ごとに均一な温度になり、かつ温度レベルは区画内の吸・発熱量と伝熱量（加熱、冷却）等のバランスによって決まることになる。

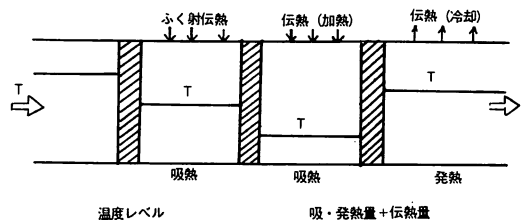
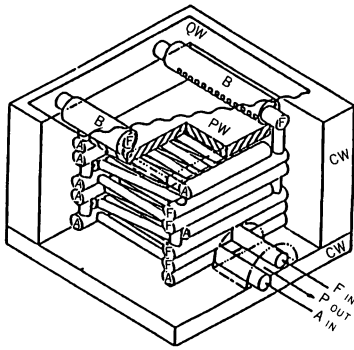


図-5 温度の区画化

4. ポーラス材を装備した熱交換器

4.1. 高変換効率ふく射加熱器³⁾

ポーラス材により変換された上流側に指向性をもつふく射をそのまま外部に導き、下流側に対流形熱交換



A 空気
B バーナ
CW 断熱材
F 部分子混合気
P 排気
PW 多孔性固体
QW 石英ガラス

図-6 高変換効率ふく射加熱器

器を組み合わせれば、高温気体の顕熱の大部分をふく射に変換する高変換効率ふく射加熱器を作ることができる。図-6は燃料の発熱量をできるだけ高い割合でふく射エネルギーに変換させるために試作したものの立体図で対向バーナで燃焼したガスはポーラス壁PWを通過し、PW下流部の熱交換器を経て外部に排気される。この熱交換器によって燃料と空気は予熱されるので、ふく射への変換は非常に高い割合で実現でき、上面が石英ガラス板の場合、変換割合は80~90%、ステンレス板でも80%以上の結果が得られている。本実験装置での燃焼負荷、ふく射熱流束は(4~5)×10⁶ kcal/m²hr, 2×10⁵ kcal/m²krとかなり高い値を示している。なお一つ重要な事項を付け加えておくと、PW下流部に熱交換器を設置してPW下流部を冷却してもPWの光学的厚さτ₀が大きければPW上流の燃焼状態は全く影響を受けない。つまりPWは熱的に遮断する機能を持ち、既に述べたように温度の区画化という意味で応用したいへん重要である。

4.2 基本概念と理論解析⁴⁾

図-7に示すようにポーラス体を隔壁(耐熱ガラス、薄い耐熱金属等)の両側に配置し、加熱および被加熱ガスを流した場合の熱交換を考えよう。通常の熱交換器の場合、隔壁熱伝導は大きな熱抵抗とはならず、両側あるいはいずれか一方の熱伝達係数(h₁, h₂)が熱抵抗となって総括伝熱係数を決定する要素となるが、ポーラス体の場合4.1で説明したようにh₁A₁, h₂A₂とも極めて大きな値になり、ポーラス体間のふく射伝熱支配となる。このような新しい構成の系における熱交換特性を評価する総括伝熱係数については妥当な指標はないが、従来の定義を踏襲して算出した計算例を表に示す。これは平板上のポーラス体が対向して、

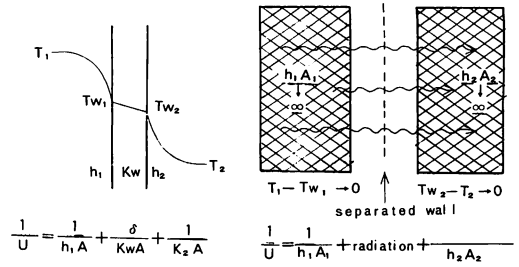


図-7 熱交換(通過)の比較

表 q: 熱流束(kcal/m²hr)
k: 括伝熱係数(kcal/m²hrk)

被加熱側温度(K)	1073		1273	
加熱側温度	q	k	q	k
◎ 1273	63,468	317.3		
◎ 1473	165,049	412.6	101,583	507.9
◎ 1673	317,611	529.4	254,145	635.4
○ 1873	535,893	669.9	472,428	787.4
○ 2073	836,504	836.5	773,037	966.3

◎国産で供給可能な材料 ○輸入品で耐熱可能な材料(カタログ値)

ふく射の形態係数が1の場合である。実用的には二重円筒形に配置し、外側を加熱側、内側を被加熱側とすれば半径比に応じた高熱流束が得られることになり、10⁶ kcal/m²hr程度の高熱負荷も実現できる可能性がある。このような熱交換特性を詳しく検討するため図-8に示すように、被加熱側流体の流れを逆転した2つのケースについて考える。ふく射の伝搬も一次元で近似し、作動ガスとポーラス体間の伝熱を考慮した連立のエネルギー式を導出し、数値計算を行った結果の一部を図-9に示す。左右の温度分布はそれぞれ被加熱、加熱側に該当する。ポーラス体の光学的厚さ以外に設

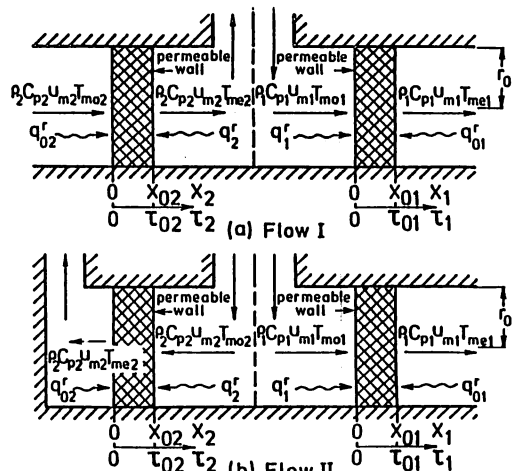


図-8 ポーラス形熱交換器の構成

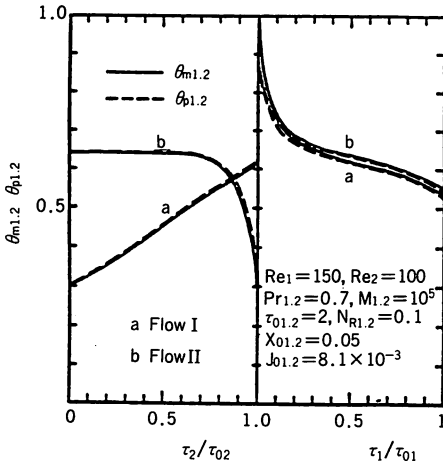


図-9 熱交換器における温度分布

定温度域加熱・被加熱側の作動ガスの流量比の影響等詳しく検討した結果、従来の熱交換器にみられない優れた特徴があり、加熱、熱交換設備への応用が考えられる。

4.3 実験装置と実験結果

(1) 平面系 図-10に平板系の実験装置の断面図を示す。加熱側ポーラス体 I は有効部の直径 138φの円板で、その上部空間は燃焼室にたっていて、円周部分にはバーナー管（部分予混合）と空气管（2次空気）が配置されている。燃焼室の上側には隔壁（石英ガラスまたは耐熱ステンレス）を介して受熱側のポーラス体 II が置かれ、その内部を直接被加熱作動流体が順方向、逆方向に流れるようになっている。この実験装置はポーラス体 II に触媒を担持させた場合の機能テストも含

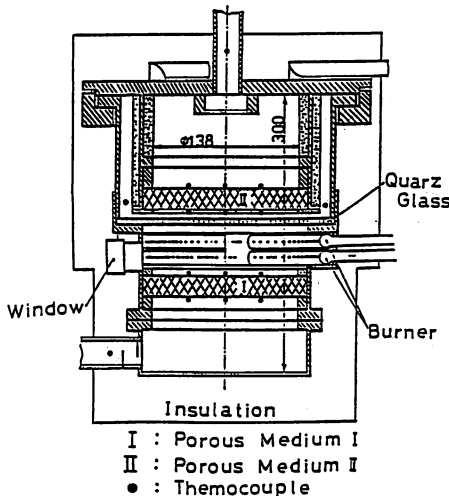


図-10 ポーラス機能材を装備した Integrated Reactor Unit

めた試験装置を意図して製作されたものであり、4.1の高変換率ふく射加熱器のようなエネルギー有効利用のための装備に対する考慮は払われていない。図-11, 12 に実験結果の一例を示す。

図-11 はポーラス体 I および II 内部の温度分布で、燃焼負荷を一定 ($CL = 134 \text{ kW/m}^2$) とし 2 次（冷却）側の空気流量を変えた場合の結果を示す。2 次側空気流量比（燃焼ガス流量に対する）が小さい時はポーラス体全域にわたって温度が上昇しているが、流量比が大きくなると $\tau = 10$ を過ぎたあたりから急激な温度上昇がみられ、かつ加熱側ポーラス体の温度は低下している。図-12 は 1 次側（加熱）、2 次側（冷却）ポーラス

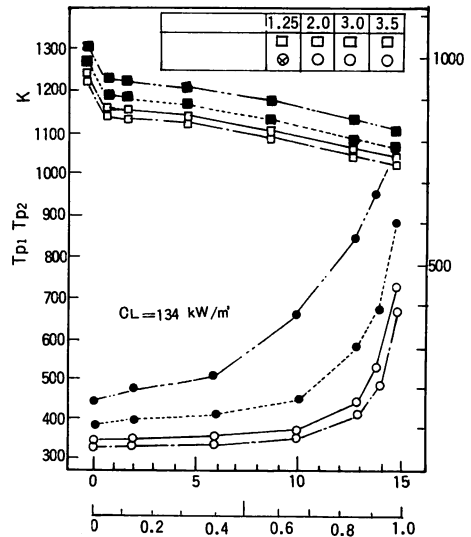


図-11 ポーラス体内温度分布

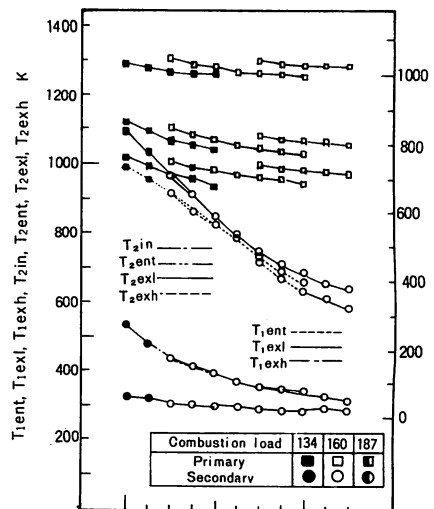


図-12 質量流比と温度

体の上・下流の温度(添字 ent, exit) 入口(同in), 排気(同exh) 温度等を1次と2次のガスの質量流比 M_{f2} に対して示す. 低い流量比の場合, 厚さ1~2cm 程度のポーラス体の中で 500 K以上もの温度上昇がみられる.

(2) 円芯円筒系 加熱側と被加熱側のポーラス体を円芯円筒系に配置し, かつ外側を加熱とした場合の実験装置を図-13に示す. ライン状バーナーを2次空気管とベアーで90度毎に4組垂直に立て, 平板系と同様石英ガラスまたは耐熱ステンレス円筒を隔壁として外側と内側にポーラス体を配置した. 図-14に1次, 2次

の流量比 m_{f2}/m_{f1} を変えた場合のポーラス体前後の温度を示す. (a)は燃焼負荷を変えた場合, (b)は空気比 m_1 及び隔壁の材質を変えた場合に対応する. 注目すべきことはこの程度の温度範囲(燃焼負荷)では隔壁のふく射に対する透過性はほとんど影響しないことである.

外側加熱—内側冷却は被加熱ガスを極めて高い温度に加熱したり, 吸熱量の大きな反応系に適しており, 逆の構成では大流量の気体の加熱等に応用できる.

5. 化学反応装置への応用

メタン, アルコール等を原料として水素を製造する高性能改質器の開発は燃料電池発電, 直接還元製鉄, 石油化学・精製, IC製造用オンサイト環元剤等多くのニーズがある. 特に燃料電池用改質器に要求される事項としてはエネルギー利用効率の高いことは勿論であるが, 動特性, コンパクト性等在来技術に比較してブレークスルーが必要である. ここでは前節で述べたポーラス体を装備した熱交換器を用い, 受熱側ポーラス体に触媒を担持した場合の化学反応の可能性並に特性試験とこれらを踏まえた新しい反応装置である Integrated Reactor Unit について述べる.

5.1 メタン—水蒸気改質反応

メタン—水蒸気の改質反応によって水素を作る場合の反応式は次式で表わされる.

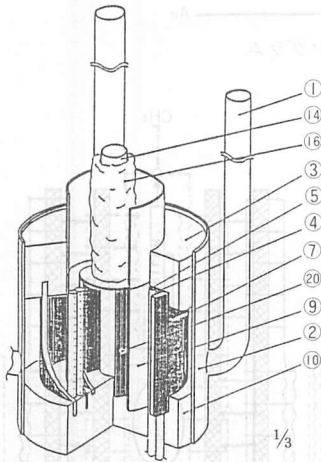
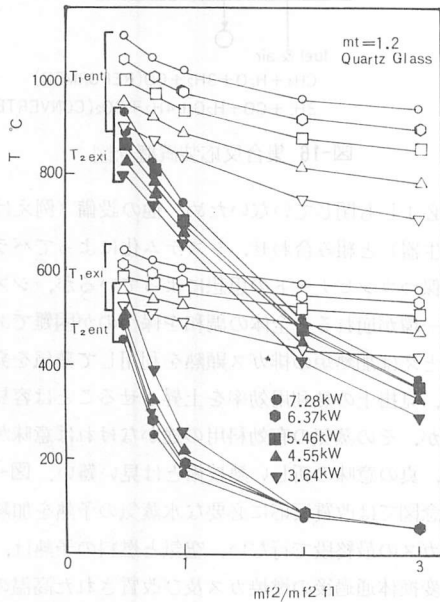
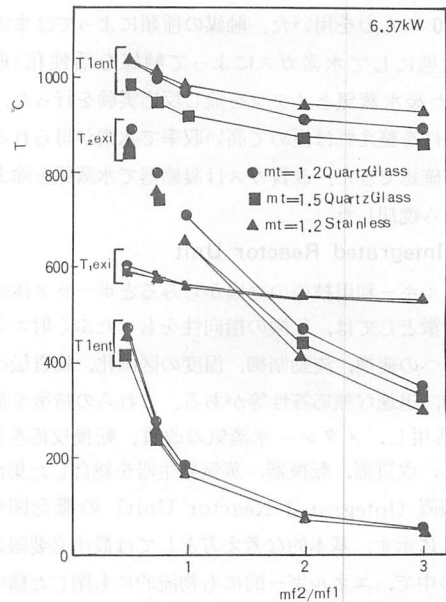


図-13 装置透視図



(a) 燃焼負荷の影響



(b) 隔壁の影響

図-14 質量流比と温度

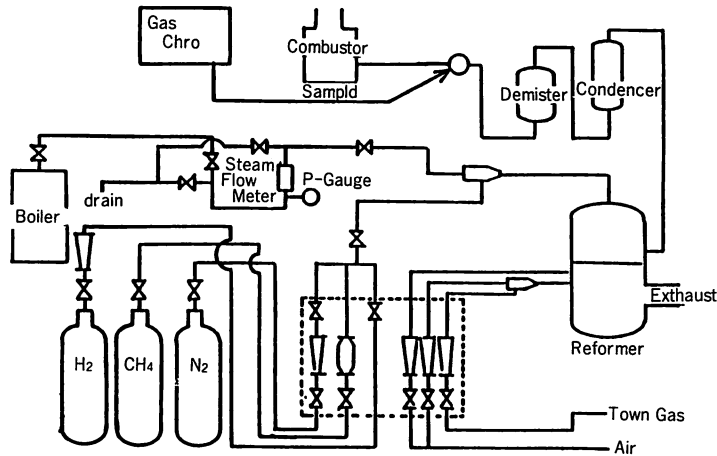
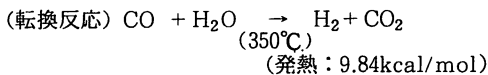
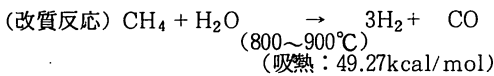


図-15 実験装置のフローダイアグラム



これらの反応で改質反応は温度範囲も高く、かつ吸熱量が非常に大きいので、ポーラス体のもつ高い伝熱特性と反応物と生成物の混合・攪拌による物質輸送現象の促進により在来型の管式加熱炉と比較して優れた特性が期待できる。本項では実際に化学反応の feasibility を主目的とした実験結果について述べる。図-15 に実験装置全体のフローダイアグラムを示す。改質器は図-10 のものを用いた。触媒の種類によってはまず昇温状態にして水素ガスによって触媒を活性化(還元)した後水蒸気とメタンを流し反応実験を行った。実験条件を整えれば極めて高い収率で水素が得られることが確認できた。改質ガスは凝縮器で水蒸気を除去してから焼却した。

5.2 Integrated Reactor Unit

エネルギー利用技術の立場からみるとポーラス体のもつ特徴としては、伝搬の指向性をもったふく射エネルギーへの変換、流動制御、温度の区画化、物質伝達の促進、迅速な熱応答性等がある。これらの特徴を最大限活用し、メタン-水蒸気の改質、転換反応を対象とし、改質器、転換器、蒸気発生器を総合した集合反応装置 (Integrated Reactor Unit) の概念図を図-16 に示す。基本的な考え方としては最小必要限の機器の中で、エネルギー的にも物流的にも閉じた構成になることを前提とした。

従来の熱設備は個々にはエネルギー的にも物流とし

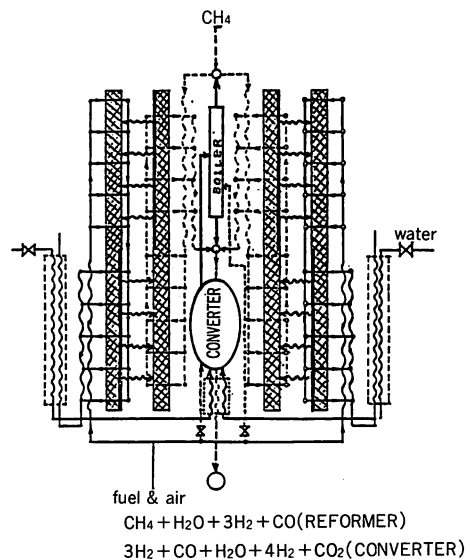


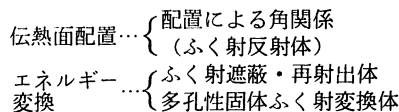
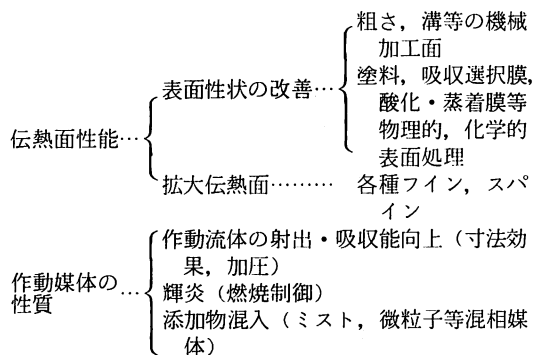
図-16 集合反応装置概念図

て必ずしも閉じていないため、他の設備(例えば蒸気発生器)と組み合わせ、システム化によってバランスを保つコンビナートの思想によっているが、システムの一環が崩れると全体の調和を保つのが困難である。たとえば加熱炉の排ガス頭熱を利用して蒸気を発生させ、見掛上の熱利用効率を上昇させることは容易であるが、その蒸気の有効料用の途がなければ意味がないし、真の意味の新しい熱技術とは見難い。図-16 の概念図では改質反応に必要な水蒸気の前熱を加熱側燃焼ガスの最終段で行ない、空気と燃料の前熱は、ふく射変換体通過後の燃焼ガス及び改質された高温の生成ガスとの熱交換によって適度に加熱し、温度区画化技

術を併用して、最終的には常温の反応物を反応装置に送入し、常温の生成ガス並に加熱用燃焼ガス温度をできるだけ下げ、投入エネルギーを正味の反応熱に可能な限り近づけることを目標としている。その際運転開始時、負荷変動時の過度応答性にもその特徴を發揮し得るよう配慮する。

6. 結 言

熱放射を伴う熱交換技術として伝熱促進法も含めると諸種のものが考えられ、実装置で既に利用されているものも多いが、ここでは特に触れなかった。主要なものを系統的に列挙すると次のようになる。



実際には上記の方法を併用してより高度な熱交換技術として確立していくことが必要であるが、本稿では最後のエネルギー変換法を中心に詳細に説明した。本手法は熱交換技術としては新しく、本格的な応用への展開は今後の開発にまたねばならないが、熱通過率の評価も含め学術的にもさらに検討すべき項目も多い。

参 考 文 献

- 1) 越後；日本機械学会論文集，48，435 B (1984-11) p. 2315
- 2) 越後，吉澤；日本機械学会誌，86，780 (1983-11) p. 1285
- 3) 越後，吉澤，富村；第21回伝熱シンポジウム講演論文集 (1984-5)，p. 385
- 4) 富村，越後，吉澤；第20回伝熱シンポジウム講演論文集 (1983-6)，p. 430

