

エクセルギーからみた伝熱技術

Heat Transfer Technologies from the Point of View of Exergy

亀山 秀雄*

Hideo Kameyama

1. はじめに

伝熱はエネルギー変換の上で不可欠な操作であり、従来から技術開発が多数進められ今日に至っている。しかるに、昨年の12月に開催された温暖化防止京都会議に象徴されるように、地球環境問題の観点から省エネルギー対策やクリーンエネルギー利用が活発に論議されるようになり、伝熱技術がトータルエネルギーシステムの中でのエネルギー有効利用技術として再度見直されるようになってきている。例えば、熱エネルギーのカスケード利用、熱エネルギーのリサイクル利用、熱エネルギーの貯蔵、輸送、改質などの技術開発が盛んに行われている。そのような開発の流れの中では、単に伝熱を促進する工夫から有効エネルギー損失の少ない伝熱システムの構築が求められている。

文部省重点領域研究「エクセルギー」の中に設置されたA04班の熱エネルギー班では、「熱エネルギーのエクセルギー低損失変換」という統一テーマを掲げて平成6年から4年間研究を行った。ここでは、それらの研究の基本的な考え方と成果の一部を紹介することにする。

2. 熱エネルギーの移動に関するエクセルギー損失

熱エネルギーが移動するプロセスで発生するエクセルギー損失 E_{loss} は、周囲温度 T_0 と、その操作で発生するエントロピー \dot{S}_p との間に(1)式の関係がある¹⁾。

$$E_{loss} = T_0 \cdot \dot{S}_p \quad (1)$$

伝熱操作でのエントロピー発生の原因として、次のことが挙げられる。

1) 高温から低温に熱が移動する。 2) 異なる温度の熱媒体が混合する。 3) 伝熱面と流体本体との温

度勾配により熱が移動する。 4) 周囲へ熱の漏れがある。 5) 濃度の異なる熱媒体が混合する。 6) 熱媒体による流動摩擦がある。

上記のエントロピー発生をそれぞれ計算して、(1)式を用いると、エクセルギー損失が計算できる。その際、伝熱や流動が3次元空間で発生している場合や非定常状態の場合は、位置や時間の関数としてエントロピーの発生を表現すれば、同様に(1)式からエクセルギー損失を求めることができる。

ここでは、伝導伝熱、対流伝熱、混合、流動について、簡単な1次元モデルを例にエントロピーの発生とエクセルギー損失を示すことにする。

2.1 伝熱におけるエクセルギー損失

図-1に示す伝熱モデルにおけるエントロピーの発生とエクセルギー損失を表1に示す。今、高温流体温度 T_H と伝熱速度 Q を一定とした場合で考えてみよう。エクセルギー損失を低減するためには、発生エントロピーを減少させればよい。それには、 ΔT を減少させることが必要である。 Q が一定であるので、 ΔT を減少させるためには、境膜伝熱係数(h_H, h_L)、熱伝導度(λ)、伝熱面積(A_H, A_L, A_m)を大きくすればよい。

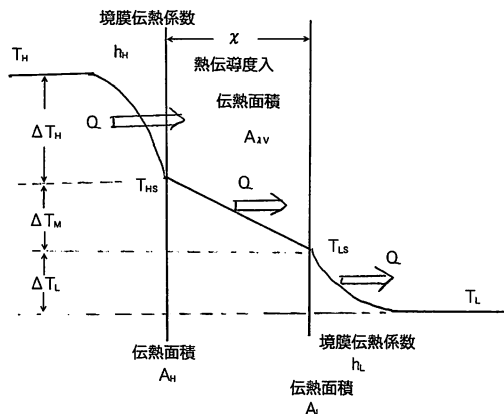


図-1 伝熱における温度降下の一次元モデル

* 東京農工大学工学部応用化学科教授
〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16

表1 伝熱過程におけるエントロピー発生とエクセルギー損失

項目	領域 I	領域 II	領域 III	領域 I ~ III
温度差 ΔT	$\Delta T_H = T_H - T_{HS}$	$\Delta T_M = T_{HS} - T_{LS}$	$\Delta T_L = T_{LS} - T_L$	$\Delta T = T_H - T_L$
伝熱速度 Q	$h_H A_H \Delta T_H$	$(\lambda/x) A_{av} \Delta T_M$	$h_L A_L \Delta T_L$	$U A_{av} \Delta T$
発生エントロピー \dot{S}_p	$Q \cdot \Delta T_H / (T_H \cdot T_{HS})$	$Q \cdot \Delta T_M / (T_{HS} \cdot T_{LS})$	$Q \cdot \Delta T_L / (T_{LS} \cdot T_L)$	$Q \cdot \Delta T / (T_H \cdot T_L)$
エクセルギー損失 W_{loss}	$T_0 \cdot \dot{S}_p$	$T_0 \cdot \dot{S}_p$	$T_0 \cdot \dot{S}_p$	$T_0 \cdot \dot{S}_p$

h_H, h_L ; 境膜伝熱係数 (熱伝達係数), U ; 総括伝熱係数, λ ; 熱伝導度, x ; 伝熱面厚み, A_H, A_L, A_{av} ; 伝熱面積, T_0 ; 周囲温度

重点領域研究 (エクセルギー) の A04 班では, ΔT を減少させ, エクセルギー損失を低減させる工夫として以下の提案を行っている。

内壁面冷却性能向上 (噴流衝突+縦渦), リブ付き沸騰伝熱向上, 融解熱伝達性能向上, 噴霧による蒸発効率向上, 伝熱面の触媒化による伝熱性向上, 伝熱促進材混入による充填層伝熱促進。

2.2 混合・物質移動におけるエクセルギー損失

伝熱操作の過程で温度のことなる熱媒体を混合させると, エンタルピーは保存されるが, エントロピーが増大してエクセルギー損失をもたらす。いま温度が T_H と T_L の同種の熱媒体が混合している場合を考えてみる。比熱を C_p , それぞれのモル流量を m_H, m_L としたとき流体混合によって発生するエントロピー mT は, 次式で与えられる。

$$\dot{S}_{mT} = C_p (m_H \ln(T/T_H) + m_L \ln(T/T_L)) \quad (2)$$

$$\text{ここで, } T = xT_H + (1-x)T_L \quad (3)$$

$$x = m_H / (m_H + m_L) \quad (4)$$

従って, 熱混合によるエクセルギー損失は, $T_0 \cdot \dot{S}_{mT}$ となる。混合する熱媒体の濃度や圧力が異なる場合にはさらに混合による濃度変化や圧力変化に起因するエントロピーの発生が付け加えられる。例えば伝熱操作の過程で, 等温, 等圧下でモル流量 m_1 と m_2 の異種の純粋気体が混合した場合, 発生するエントロピー \dot{S}_{mc} は, 次式で与えられる。

$$\dot{S}_{mc} = -Rm (x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2) \quad (5)$$

$$\text{ここで, } m = m_1 + m_2 \quad (6)$$

$$x_1 = m_1 / (m_1 + m_2) \quad (7)$$

$$x_2 = m_2 / (m_1 + m_2) \quad (8)$$

エクセルギー損失は, $T_0 \cdot \dot{S}_{mc}$ で与えられる。

伝熱過程で吸収や反応を伴う場合, 伝熱面付近や反応面付近で濃度勾配を生じる。この濃度勾配の存在は, 温度勾配の場合と同様にエントロピーの発生を生む。この濃度勾配によるエクセルギー損失を減少させるためには, 温度勾配の場合と同様に濃度勾配を減

少させる工夫を行えばよい。それには, 境膜物質移動係数や接触面積を増大させればよい。

A04 班では, このような観点から, 混合・物質移動に関して, 吸収場でのミスと化, 反応場での液膜分離, 多孔質化による物質移動の促進によるエクセルギー損失の低減が試みられている。

2.3 流動摩擦損失によるエクセルギー損失

伝熱操作において, 熱媒体が熱交換器やパイプを流動する場合に, 摩擦損失によるエントロピー発生がある。これがエクセルギー損失につながる。

今, 断面積 A , 浸辺長 L , 管摩擦係数 f の管内を密度 ρ , 質量流速 m の熱媒体が等温 T で流れている場合, 単位長さ当りのエントロピー発生は次式で与えられる²⁾。

$$\dot{S}_f = 2 m^3 f / (\rho^2 T D A^2) \quad (9)$$

$$\text{ここで, } D = 4 A / L \quad (10)$$

従って, 伝熱係数や物質移動係数や伝熱面積を大きくするために流速を速くしたり, 複雑な流路を作るとそのために圧力損失に起因するエントロピー発生が起り, エクセルギー損失を招くことになる。

A04 班では, 圧力損失の多い充填層型触媒反応器に替わって, 伝熱面を触媒化した低圧力損失構造 (ハニカム, 網目, プレートフィン構造) の触媒反応器を提案している。

以上, エクセルギー損失低減のために A04 班で行った研究内容を表 2 に示す。次にこの中から, 伝熱性を重視して設計したアルマイト触媒について, 成果の概要を紹介する。

3. 高伝熱性触媒の熱交換型反応器への応用

一般的に反応熱の大きな反応を扱う場合, 反応熱の除去や供給用に熱交換器を充填層型触媒反応器内に組み込んだ複雑な構造を持つ反応器が使われている。しかし充填層内の伝熱性が低いために反応の熱供給や除去のスピードに限界があり, 層内の温度制御が難しく,

表2 熱エネルギーのエクセルギー低損失変換班の研究

研究番号	対象機器	対象システム	提案技術	エクセルギー損失低減分野		
				伝熱	混合物質移動	流動
A04-1	熱交換器	流動層+セラミック熱交換器	フィン付き伝熱管 管内リブ+乱流促進体挿入	○	○	○
A04-2	ガスタービン翼	高温ガスタービン	噴流衝突+縦渦	○		○
A04-3	ガス吸収器	排熱回収+環境影響物質の回収	凝縮・ミスト化(ガス吸収促進)	○	○	
A04-4	熱交換器	動力プラント, 冷凍器, ヒートポンプ	高サブクール, リブ付き沸騰伝熱面	○		○
A04-5	熱交換器	氷蓄熱+スラッシュアイス	直接接触固・液・気三相流動層	○		○
A04-6	蒸発器	メタノール水蒸気改質器+蒸発器	微粒化噴霧気流+多段ヒーター	○	○	
A04-7	熱交換器	蒸気圧縮式混合冷媒サイクルの凝縮器・蒸発器	混合冷媒最適組成比	○	○	
A04-8	気液触媒反応器	有機反応系ケミカルヒートポンプシステム	液膜式反応様式+プレート触媒	○	○	○
A04-9	気液触媒反応器	有機反応系ケミカルヒートポンプシステム	液膜式反応様式	○	○	
A04-10	充填層気体反応器	無機反応系ケミカルヒートポンプシステム	膨張化黒鉛担持反応固体	○	○	

ホットスポットを生じやすい。これらは、反応器でのエクセルギー損失を大きくする原因になっている。また化学反応を利用して熱エネルギーを化学エネルギーに変換し、貯蔵、再利用するシステムにケミカルヒートポンプ (CHP) がある³⁾。有機物の脱水素、水素化反応を利用したものは、80℃レベルの排熱を200℃レベルまで昇温するアセトン/2-プロパノール系CHP、200℃レベルの排熱を350℃レベルまで昇温するベンゼン/シクロヘキサン系CHPなどがある。これらCHPは排熱を伝熱に伴う温度低下によるエクセルギー損失を極力少なくして付加価値の高くなった熱エネルギーを取り出せる新しいタイプの触媒反応器の出現が必要である。

3.1 伝熱を重視した触媒体

陽極酸化の皮膜構造を利用し、さらに水和処理と焼成処理とを組み合わせることでアルミニウムの表面に多孔質なアルミナ層を形成させ触媒担体として利用する方法を開発し、アルマイト触媒体¹⁾と呼んでいる。調製手順を図-2に示す。このアルマイト触媒体は、母材に伝熱性に優れたアルミニウムを有していることから、伝熱面と反応面を表裏一体化することで、反応場となる触媒層(触媒が担持されたアルミナ層)に、速やかに熱を供給・除去できる高伝熱性触媒という特長を持たせることができる。また、高度なアルミニウム加工技術と複雑な構造体を陽極酸化処理する技術により、図-3に示すように様々な形状の触媒体を調製することができる。

図-4は、厚さ3mmのアルミニウムの表面を陽極酸化・水和処理し、焼成して多孔質なアルミナ層を形成させた板の熱伝導度と膜厚の関係を示したものである。

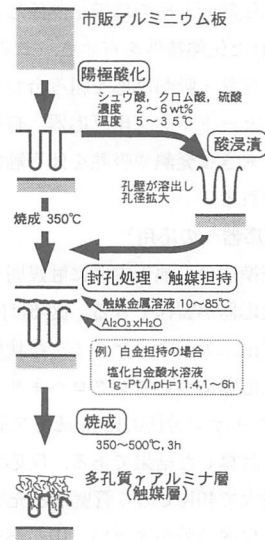


図-2 陽極酸化皮膜による連続触媒体調製法

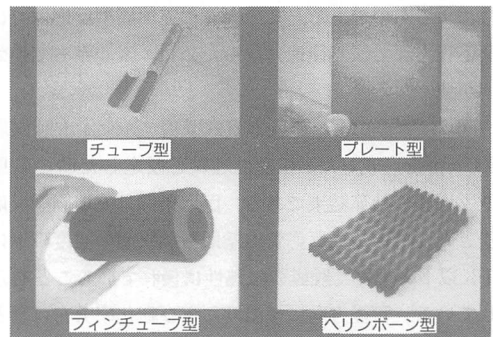


図-3 新しく開発された高伝熱性触媒

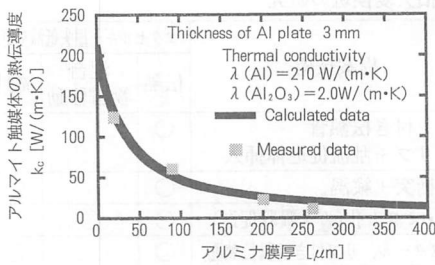


図-4 アルマイト触媒の熱伝導度とアルミナ膜厚の関係

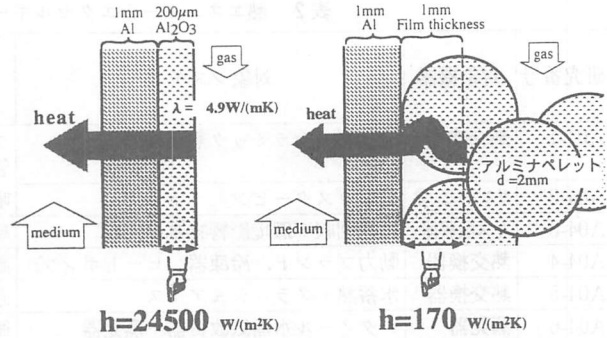


図-5 管壁型触媒反応器と充填層型触媒反応器の伝熱係数の比較

アルミニウムよりやや劣るものの熱交換器型触媒反応器に十分使用できる熱伝導度を持つことがわかる。従来の粒状触媒を用いた充填層型反応器と比べて図-5に示すように伝熱面近傍の境膜伝熱係数は、充填層の約140倍と優れた伝熱特性を有する。このため排熱利用の反応器、発熱・吸熱反応を組み合わせる熱回収を行うケミカルヒートポンプ用反応器、有機排ガスの燃焼や改質など大きな発熱や吸熱を伴う触媒反応器への利用が期待される。

3.2 管壁型反応器への応用⁵⁾

多管式熱交換器の伝熱管内壁に触媒層を形成することで管壁型反応器が製作できる。図-6は内径25mmの円管に粒径3mmの白金/アルミナ粒状触媒を充填した充填層型反応器についてシクロヘキサン流量0.04m/s、シクロヘキサン分圧0.1atmとして管内の温度、転化率分布を計算した結果である。反応管中心部分の温度降下は最大で40Kであり管壁部と充填層中心部の温度および転化率の差が大きい。中心部分では温度の低下によって反応がほとんど停止しており、この部分での温度と転化率の向上は反応管半径方向の伝導と拡散によるものである。このように充填層型反応器では反応管内部で伝熱律速になるためにエネルギー変換効率が悪くなる。

図-7は管径10mmの反応管内壁にアルマイト触媒層300μmを形成した高伝熱性触媒を仮定した時の管壁型反応器の計算結果である。反応条件は充填層型反応器と同じである。反応管内壁即ち触媒面の温度降下は1K以下と小さく触媒の伝熱性に優れていることを示している。管径方向には温度および転化率分布はほとんどない。また管壁型反応器は反応管内部に充填物がないので反応管の圧力損失も図-8に示すように充填層型反応器に比べて二桁から三桁小さい。これは反応器全体の消費エネルギーの低減につながり装置の運転効

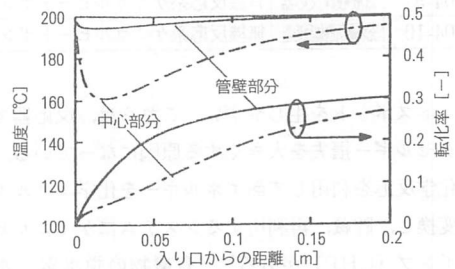


図-6 充填層型反応器内部の温度分布と転化率分布

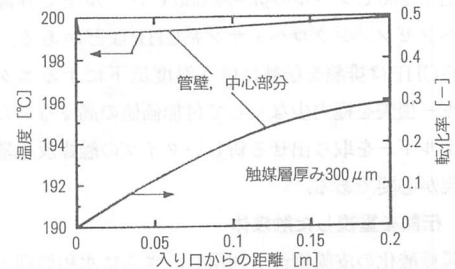


図-7 管壁型反応器内部の温度分布と転化率分布

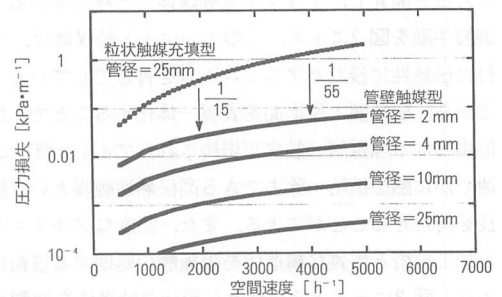


図-8 触媒の形式による圧力損失の違い

率の向上が見込まれる。最近では、反応物質が液体で反応生成物が非凝縮性もしくは沸点が反応温度より高

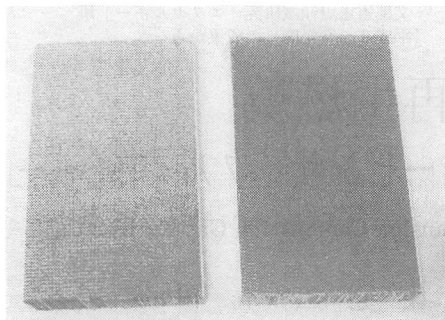


図-9 アルミニウム製ハニカム構造体 (左) とそのアルマイト触媒体 (右)

い場合、触媒表面に反応液を膜状に流し、生成物を液膜を分離膜として触媒面から取り去ることで、平衡転化率を越える分離型触媒反応器もこのアルマイト触媒を用いて研究室レベルで実証されている。

3.3 アルミハニカム型触媒反応器⁹⁾

図-9に示すのは、左がアルミニウム製のハニカム構造体で、右はそれを触媒化したものである。大きさは、縦30cm×横50cm×高さ15cmで、このような構造体を丸ごと触媒化する技術が確立された。コージライト系のハニカム触媒では製作できない大きな構造体もアルミニウム製なら可能であり、製造コストも安いと見積もられている。

5. 結言

紙面の関係で、研究成果のごく一部しか紹介できない

かったが、A04班では、エクセルギー低減のための多くのアイデアを提案し、4年間の研究で実証を試みた。すでにいくつかのものは、他方面での転用も検討されている。また、液膜式反応器の提案のように、平衡転化率を超えるデターが出始めており、非平衡非定常型の反応操作として従来の技術の壁を打ち破る可能性が示され、今後期待できる技術の芽が育っているのも喜ばしい。これらの研究成果が、各方面の支援により地球環境問題で日本が国際的に公約した6%のCO₂削減率を達成するための革新的伝熱技術として育っていくことを期待したい。

参考文献

- 1) James E. Funk ; Exergy and Efficiency in Chemical Heat Pump and Other Energy Conversion Processes, 文部省科学研究費補助金重点領域研究「エクセルギー再生産の学理 (エクセルギー)」Newsletter, Vol. 3, No. 2, November 29, pp. 2. 25 (1996).
- 2) Adrian Bejan ; Entropy Generation through Heat and Fluid Flow (1982), Wiley-Interscience Pub, Co.
- 3) 亀山秀雄 ; 化学蓄熱, 冷凍, 71 (823) 5月号476-477 (1996).
- 4) 亀山秀雄 ; アルマイト触媒体, 表面技術, Vol.48, No.10, pp.48-51 (1997).
- 5) 村田 究, 亀山秀雄 ; 陽極酸化プレートの管壁型触媒への応用, 表面技術, Vol.42, No. 2, pp.173-177 (1996).
- 6) Intan E. Suugkono, H. Kameyama and T. Koya ; Developmant of Catalytic Combustion Technology of VOC Materials by Anodic Oxidation Catalyst, Applied Surface Science, 121/122, pp.425-428 (1997).

協賛行事ごあんない

「圧縮空気エネルギー貯蔵発電セミナー」

ーパイロットプラント建設の現状と関連基盤技術ー

1. 主催 財団法人 新エネルギー財団
2. 協賛 (株)土木学会, (株)日本機械学会等
3. 期日 平成10年11月18日(水) 9:30~16:00
4. 会場 石垣記念ホール (三会堂ビル)
(東京都港区赤坂 1-9-13)
5. 参加費 30,000円 (テキスト代, 昼食代含む)
6. 参加定員 130名

7. 申込・問合せ先

東京都千代田区紀尾井町 3-6
(秀和紀尾井町パークビル 6階)
(財)新エネルギー財団
エネルギー貯蔵技術本部
担当: 杉原 聡
TEL03-5275-9826 FAX03-5275-9831