

# 研究室訪問①

## エネルギー利用技術 にブレークスルーを

越後研究室  
機械工学科

太古の昔原始人類が火を手に入れて以来、燃焼現象と人間社会は切っても切れない関係にあった。18世紀の産業革命以後、化石燃料の消費は急激に増加し近代文明はエネルギーの大量消費の上に構築されている。

そして、2度のオイルショックを経験した現在でも、地球上で消費されるエネルギー量は増加の一途をたどり、その大部分は依然、化石燃料の消費をもって賄われる。

では、果たして人類は、有限なエ

ネルギーを有効に利用しているであろうか。

この大いなるテーマを追って、スタッフは燃焼学と熱伝達の研究に取り組んでおられる機械工学科の越後亮三教授の研究室を訪問した。

## ポーラス材によるブレークスルー

「ポーラス材を伝熱や燃焼の分野に応用することによって“ブレークスルー”が期待できます。」

越後先生は力強くこうおっしゃった。

“ブレークスルー”（直訳すると突破）とは、飛躍的、躍進的な改良を意味する。

従来、ガス状の物質を自力燃焼させる場合、少なくとも $1000\text{kcal}/\text{m}^2$ の発熱量が必要と言われ、かに改良を加えても $700\sim 800\text{kcal}/\text{m}^2$ のものを自力燃焼させるのが精一杯であった。ところが、ポーラス材を用いたかでは、 $100\text{kcal}/\text{m}^2$ のものでも自力燃焼が可能となる。液体や固体においても同様の効果が得られ、これによって、かつて廃棄物とされていた

ものの多くが、燃料として再び生を受けることができる。まさしくブレークスルーである。

そればかりでなく、新時代のエネルギーとして近年注目を集めている燃料電池をも、実用化に大きく近づけることができるという。

では、かくも驚異的な効果を示すポーラス材とは、一体どのようなものであろうか。

ポーラスとは多孔性のことでありポーラス材はもともと、防音材、断熱材、あるいは溶鉱のフィルターとして使われていた。材質は、かつては金属が主であったが、最近ではセラミックスを用いて耐熱性の高いものが作られている。形態は、気相が空間的に不連続か連続かで、大きく

2つに分けられるが、越後先生が主に扱っているのは後者で、その中にもスポンジ状、スードル状、網状な

ど種々の形状がある。

素人目には孔だらけの板に過ぎないポーラス材。これを世界に先駆け

てエネルギー技術に取り入れ文字通りのブレイクスルーを起こしつつある人、それが越後先生なのである。

## ポーラス材のもつ熱学的特性

高温ガス中にそれより低温の固体を入れた場合、単位時間に移動する熱量は次の式で表される。

$$Q = hS(T_G - T_w)$$

$h$  : 熱伝達率

$S$  : 固体の表面積

$T_G$  : ガスの温度

$T_w$  : 固体の温度

ただし、熱伝達率  $h$  は固体の形状や周囲の流れの状態等によって決まる係数で、例えば固体が球であれば、熱伝達率は半径に反比例する。

ポーラスの固体では、体積当たりの表面積はもちろん、熱伝達率も、平滑面に比べてけた違いに大きいので、移動する熱量もたいへんに大きな値になる。すなわち、ポーラス材は、迅速に熱を吸収するという点で驚くべき能力を発揮するのである。

それに加え、ポーラス材はガスに比べ、ふく射射出能がはるかに大きいことから、ポーラス壁を設置した

流路に高温のガスを通すと温度分布とふく射の状態は、およそ図1のようになる。ポーラス壁の内部では、温度勾配は極めて急になり、図中の  $\Delta T$  は、壁の厚さが1cm程度でも  $T_0 = 1000^\circ\text{C}$  に対して  $300 \sim 400^\circ\text{C}$  にも達する。この温度差はふく射エネルギーに変換され、その主要部が流れの上流方向に指向性をもつ。

図1のような状態が定常状態となりうることは、微積分方程式を解かなければならないので説明を省くが

ポーラス壁の上流域に高温で強いふく射空間が形成され、上流域と下流域が熱的に遮断されることは、理解されるであろう。このことが、ポーラス材によるブレイクスルーの基本的な原理になっているのである。

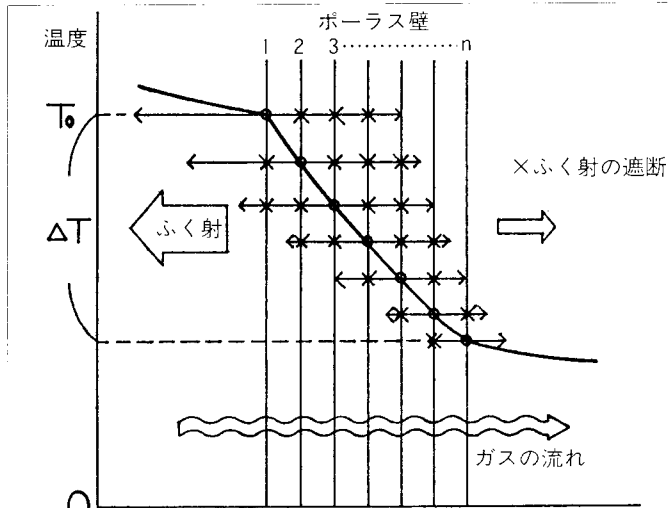


図1 ポーラス壁を設置した流路に高温ガスを通した場合の温度分布とふく射

図1.

ポーラス壁を  $n$  個の部分に区切って考えてみることにしよう。

壁1をガスが通るとき、その熱エネルギーは壁に吸収され、ガス自体の温度は下がり、壁1はふく射エネルギーを放出する。そのふく射は、ガスの上流側では遮断されないが、このポーラス材は光学的距離（光が遮られる割合）が十分大きいので、下流側のふく射は2番目以降の壁に遮断されて壁の熱エネルギーに変わる。

ガスは次に壁2を通過するが、その温度は既にぐんと下がっているの、他の壁からのふく射による熱を合わせても、壁2が吸収する熱エネルギーは壁1より小さい。そのため壁1の場合よりは小さなふく射エネルギーが放出される。上流側のふく射は壁1によって遮断されるのみであるが、下流側のふく射は3番目以降の壁に遮られて壁の熱エネルギーに変わる。

このようにして順を追って見てい

くと、下流の壁ほど、放出するふく射エネルギーは小さく、通過する気体の温度も低くなるのがわかる。そして、全体としては、上流側へのふく射は下流側より大きくなり、また、ポーラス材の極めて大きな伝熱面積と熱伝達率によって、図のように極めて急峻な温度勾配が現れる。

# 発熱量の小さい物質を自力燃焼させる

どんなに発熱量の小さい気体でも燃焼ガスからエネルギーを回収し、これにより未燃ガスを予熱することができるなら、理論上は自力で燃焼が可能である。実際は、燃焼ガスのエネルギーの多くが系外に放出されてしまうため、1000kcal/m<sup>3</sup>程度以上というようなかなり高カロリーの気体でないと、自力燃焼は難しい。

しかし、バーナーをポーラスの固体で囲めば、燃焼ガスの熱はふく射エネルギーに効果的に変換され、かなり発熱量の小さな気体でも自力燃焼が可能となる。さらに、ポーラス材を通過した気体から熱を回収し、バーナーに送りこまれる気体を予熱すれば、一層の効果が期待できる。

越後研究室では、このような超低カロリーガス燃焼器を試作し、都市ガスを空気中で希釈した気体を燃焼させる実験を行った。その結果、発熱量をわずか114kcal/m<sup>3</sup>まで落とした気体でも、自力で燃焼することが確認された。

このことは固体についても応用が可能で、ポーラス材を利用して炉を作れば、発熱量の非常に小さい固体

あるいは水分をたっぷりも含んだ固体をも、自力燃焼させることができる。現に研究室で試作された超低カロリー固体燃焼器（右上図2参照）は、砂95%に石炭の粉末5%を混ぜた、わずか347kcal/kgの低カロリー固体の自力燃焼に成功している。

このような炉を用いれば炭鉱で廃棄される岩石を含んだ低品位炭（ぼた・ずり）、あるいは下水の汚泥すら燃料資源となりうることになる。下水の汚泥は、完全に乾燥させれば約3300kcal/kgの発熱量をもつが、実際処理すべきものは80%もの水分を含んでいるため、現在は、機械的に脱水した後、燃料を混ぜて、すなわち余計にエネルギーを使って焼却するという処理方法が取られている。しかし、ポーラスの性質をうまく利用したなら、汚泥は機械的に脱水しただけで、それ自体が燃料になりうるのである。

これらの技術は、さらに、液体の燃焼に対しても応用されようとしている。既に研究室では、メタノールを水で希釈した低カロリー液体を自力燃焼させる実験が行われている。

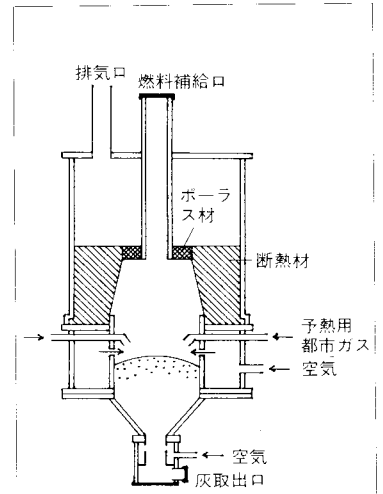


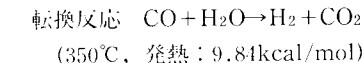
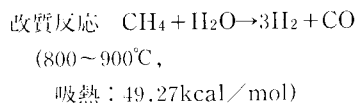
図2 超低カロリー固体燃焼器

近年、植物から抽出したアルコールなど、いわゆるバイオマスエネルギーを利用しようとする動きがあるが、アルコールの質が低く、水との分離が困難など、幾つもの問題点があり、現段階では、3割4割と石油を混入して利用している。ここに、ポーラスの特性をうまく応用することができれば、発熱量が小さくても自力燃焼が可能になり他の問題点も一挙に解消できると言われている。

# 燃料電池を実用化に一步近づける

新時代のエネルギー源として大きな期待がかけられているものに、燃料電池と呼ばれる発電装置がある。これは、水の電気分解の逆反応を利用する、すなわち、水素と酸素を反応させて水と電気エネルギーを得るものである。

そこで重要となるのは、水素を発生させるリフォーマーと呼ばれる装置で、現在はメタンと水蒸気を反応させるものが最有力視されている。反応式は次の2式である。



注目すべきことは、2つの反応の温度レベルが大きく違ううえに、上吸熱、発熱の違いがあることである。

そのため、従来のリフォーマーは大掛かりな装置にならざるを得なかった。現在、実用化されているボイラー型と呼ばれるリフォーマーは、長さが10m程もあり、エネルギーの利用効率が悪く、また必要なときに必要なだけ取り出せるというような“動特性”も著しく悪く、予熱するのに2~3日かかるものもある。

先に述べた原理から、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、温度とふく射の状態が全く違った環境を設定することができる。これは、温度の区画化技術（ゾーニング）と呼ばれるもので、これを応用して、コンパクトでしかもエネルギー利用効率、動特性、共に優れたリフォーマーを開発するというのが、教授が現在最も力を入れておられる研究課題なのである。

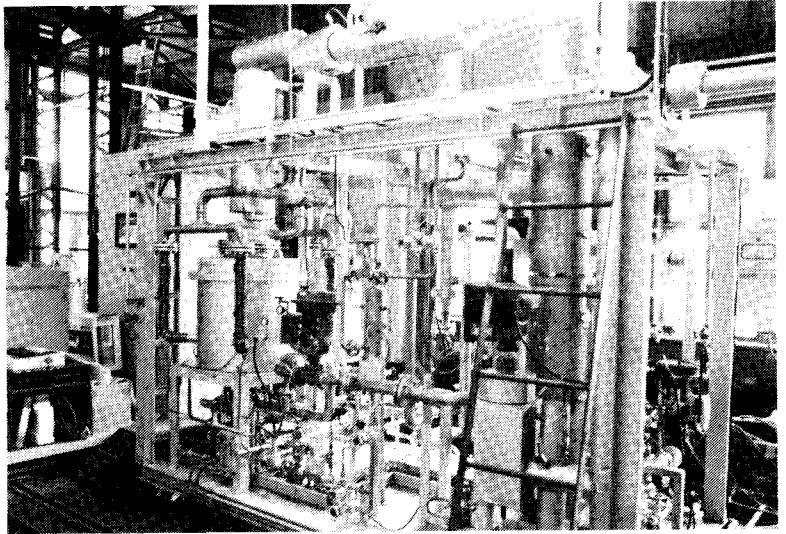


図 3

内部には、A、B、2つのポーラスの円筒が組み込まれている。AとBに挟まれた空間は、燃料の燃焼によって800~900℃の高温になり、改質反応に適した状態になるが、Bの内側はそれほど高温にならず、転換器を転換反応に適した温度に保つことができる。

メタンは、蒸気発生器によって作られた水蒸気を混合し、壁Bを通過して、AとBに挟まれた空間に送りこまれ、改質反応を起こす。そして、Bの内側にもどされた後、再び水蒸気と混合し、転換器で転換反応を起こす。その結果、水素と二酸化炭素が得られる。

燃焼ガスが、廃出される前に、未燃ガス、および後に気化される水を予熱していることも見逃せない。

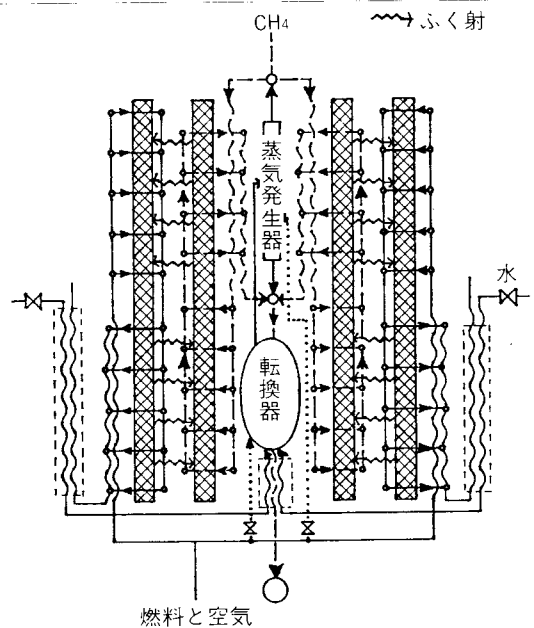


図 3 集合反応装置の概略

水素は、工業的には極めて有用な気体であり、燃料電池の他にも、石油化学工業、直接還元製鉄、IC基盤の製作など、様々な用途に用いられる。そのため高性能リフォーマーの開発に関しては産業界の関心も高く、教授のこの研究は、民間企業7社および文部省との共同研究になっている。

そのための実験設備であるが、これは大岡山キャンパスの正門のすぐ近く、熱工学第二実験室に設置されている。上の写真がこの設備で、向

かって左の大きなタンクのような部分が、改質器、転換器、蒸気発生器を総合した集合反応装置になっている。その構造と機能はおおよそ図3のようなものである。

なおこの設備は全体がコンピューターで制御されていて部分的なパーツの交換により、リフォーマー以外の様々な用途の実験もできるよう設計されている。教授はこの設備を用いて、ポーラスの応用技術に関する基本的なデータを、着実にそろえていく構えである。

## 技術開発で最も重要なのは基礎研究の充実である

これまでに述べたことから、越後先生の開発された技術が、いかにブレークスルーの名にふさわしいものか、お分りいただけたことと思う。では、このような全く前例のないユニークな発想は、どのようにして得られたのであろうか。

「私が九州大学の教授になりたての頃のことですが、大学院の演習問題に、多孔性固体に高温ガスを通したときの温度分布について出してみたいです。すると、ある学生が、彼は今、九大の助教授ですが、微積分方程式を使って解析した結果を持ってきました。それが急激な温度勾配を示すものだったんですよ。

「私も初めから自分の研究からある程度予想して問題を組み立てたのですが、早速、金網を重ねて簡単な実験装置を作ってみました。同じよ

うなのが今でも実験室にありますから、見たい人には実験してみせてあげますよ。それで、バーナーに火を入れて、みんなでじっと見守っていました。温度が上がりつつあるときははらはらした感じ、そして計算通りの結果が出たときのあの胸の高なりは、今でも生々しくよみがえってきますよ。」

先生は、よく極限というものについて考えると言う。例えば、熱伝達率は、固体を極限まで鋭利にすればその頂点で無限大になる。そして、燃焼を極限まで切り刻んだらどうなるかという着想が、先生をふく射エネルギーに注目させ、本稿で紹介した諸技術へと導いたとも言える。

「どのような原理を応用するにしても、まず大切なのは基礎を固めることです。基礎研究をしっかり固め

なければ、普遍的な法則は生まれてきませんから。」

先生は、基礎の重要性について、繰り返し繰り返し強調された。

「これからは、特に機械関係の分野が大きく変わっていくと思いますよ。通念を打ち破るような技術に対応するためには、やはり基礎に根差した考え方が絶対に必要です。それから、物事を自分自身の価値観で判断していくことも大切です。誰かがこういうことをしているから自分もこうする、ではなく、独自の思考、行動ができる確固たる価値観をもつことです。そうして、若い世代の皆さんには、在来技術を踏み越える新しい技術を、作ってってもらいたいですね。」



越後教授