

超過エンタルピー燃焼を用いた小型燃焼加熱器の 実用化に向けた研究

Practical Development of Small Heat Regeneration Combustors

高橋 克昌 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部
加藤 壮一郎 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 博士(工学)
水谷 琢 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部
須田 俊之 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 課長 博士(工学)

超過エンタルピー燃焼を用いた小型燃焼加熱器を開発した。2種類のコンバスタ（ディスク型、チューブ型）について試験を実施した結果、ディスク型では燃焼室の表面積／体積比を調整することで、70%以上の高い熱効率とCO排出濃度45ppmまでの低減を実現できた。また、チューブ型では全体を水中に配置した状態でも、高い熱効率とCO排出濃度の低減を可能とした。さらに、チューブ型コンバスタを搭載した業務用厨房機器（フライヤ）の試作機を製作し、展示会で好評を得ることができた。

Small heat regeneration combustors have been developed for use as heat sources by applying excess enthalpy combustion technology. Two types of combustors have been manufactured for evaluation, a disk-type combustor and a tubular one. By tuning the surface-to-volume ratio, the CO emission of the disk-type combustor could be reduced to less than 45 ppm with high energy efficiency. For the tubular combustor, which has been operated in water, high energy efficiencies and CO emissions below 35 ppm were confirmed. The tubular combustor also proved commercial levels of combustion properties in a test apparatus (fryer) built for kitchens. The combustor has attracted favorable attention at various fairs and exhibition events.

1. 緒 言

小型で数度単位での温度制御などが必要な加熱源には、電気ヒータを使用するのが一般的である。しかし、電気受電端効率は36.6%⁽¹⁾と低いため、電気加熱は膨大なCO₂を排出させていることになる。もし、熱から電気へのエネルギー変換などの発電の過程を介することなく、直接化石燃料の燃焼熱を加熱源として利用できれば、大幅な省エネルギー効果が期待できる。

これまで小型の加熱源に燃焼が利用されない原因の一つは、加熱スケールが小さくなるにつれて火炎から周囲壁面への熱損失が相対的に大きくなり、有害なCO（一酸化炭素）が発生し、火炎を維持することさえ困難になるためである。

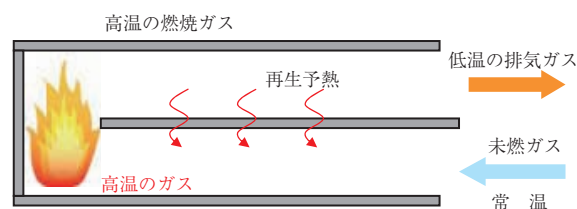
そこで、筆者らは超過エンタルピー燃焼を用い、これまで実現できなかった小型燃焼加熱器（マイクロコンバスタ）を開発した。

この超過エンタルピー燃焼とは、燃焼する前のガス（例えば、燃料と酸化剤の予混合ガス）が排気ガスからの熱（熱再生、再生予熱）を受け、高温に予熱されてから燃焼

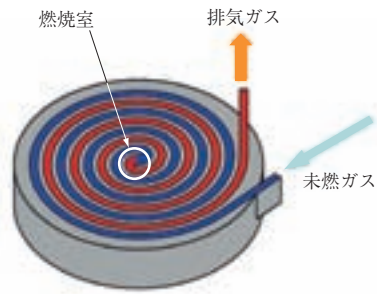
するものである。第1図に超過エンタルピー燃焼の原理を示す。燃焼に供される直前の未燃ガスを高温にすることによって、火炎を安定に形成することが可能となる。

これまでの研究開発⁽²⁾で、第2図に示すようなスイスロール型マイクロコンバスタを開発し、超過エンタルピー燃焼を用いた小型燃焼加熱器を実現した。さらに安定燃焼や高い熱効率が可能なことも示した。また次に、スイスロール型よりも燃焼器の投入エネルギーが大きく、一方の面を効率的に加熱できるディスク型のマイクロコンバスタ（第3図）を開発した。このマイクロコンバスタの開発とおし、CO排出濃度と燃焼器の圧力損失を大幅に低減し、投入できる熱量を倍増させることができた。

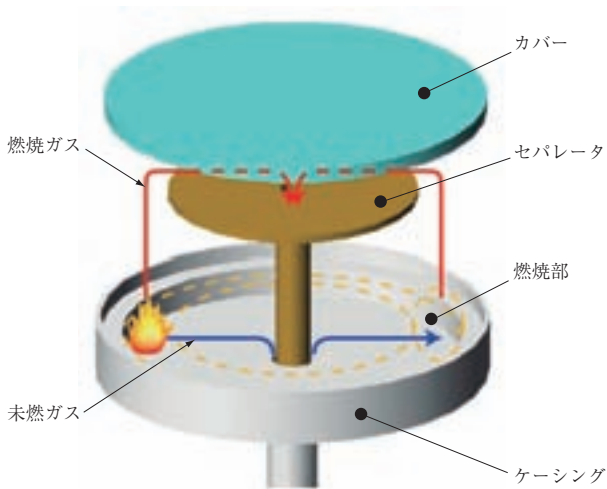
本稿では、実用熱源として供するため、CO排出濃度の



第1図 超過エンタルピー燃焼の原理
Fig. 1 Mechanism of excess enthalpy combustion



第 2 図 スイスロール型マイクロコンバスタ
Fig. 2 Swiss-roll type micro combustor



第 3 図 ディスク型マイクロコンバスタ
Fig. 3 Disc-type micro combustor

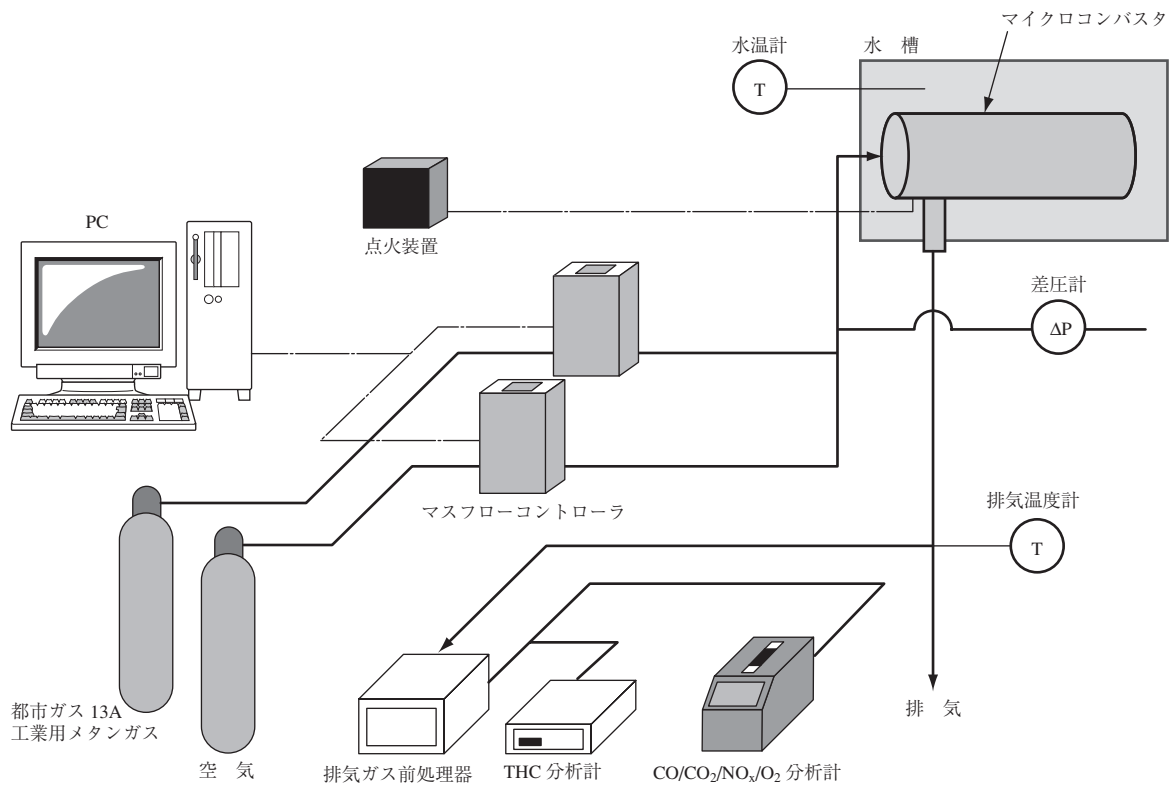
さらなる低減について報告する。そして、マイクロコンバスタを利用したフライヤ型業務用厨房機器の燃焼特性結果について報告する。

2. 試験装置および試験方法

試験には、東京ガス株式会社と共同で開発した 2 種類のマイクロコンバスタを用いて特性を調査した。一つは、前述のディスク型のマイクロコンバスタのカバー部に貯水槽を設けたもの、もう一つは、液体中での利用を想定したチューブ型マイクロコンバスタである。熱源として使用する状態により近づけるため、コンバスタを水冷して試験を実施した。これは、実際に被加熱物を加熱する場合、低温の被加熱物がコンバスタに接していることで壁面温度が空冷状態よりも低くなり、燃焼特性に大きく影響し CO 排出濃度が増加すると考えられるためである。

2.1 試験装置

第 4 図に試験装置の系統図を示す。試験装置は、マイクロコンバスタ本体、流量制御装置、温度計測装置、排気ガス分析装置から構成される。データ計測は条件変更（起動時間を含む）から 15 分後に行った。この時間を経過すると温度、排気分析結果ともほとんど変化しなくなるため、定常状態とみなせる。被加熱部分は、つねに水



第 4 図 試験装置の系統図
Fig. 4 Schematic drawing of test equipment

と接触させて試験し、評価した。

燃料には工業用メタンおよび都市ガス 13A を用いた。燃料および空気の流量制御は、マスフローコントローラを使用した。温度は、排気ガス、水温について計測した。

排気ガスは、THC（未燃炭化水素、メタン換算）、CO、CO₂、NO_x、O₂ の 5 成分についてドライベース（排気ガス中の水分を除去した状態）で分析を行った。CO に関しては、すべて 0% O₂ 換算を行った。

排気損失 (Q_{Loss}) は、排気温度から (1) 式を用いて算出した。なお、今回の試験条件では、排気ガス成分から換算出した燃焼効率は 99.99% 以上であったので、損失を計算する際の燃焼効率は 100% とした。

$$Q_{Loss} = \frac{Q_E}{Q_F} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

Q_E : ウェット ベース（生成物を水蒸気とした状態）の排気ガス顕熱

Q_F : 燃焼熱量（低位発熱量）

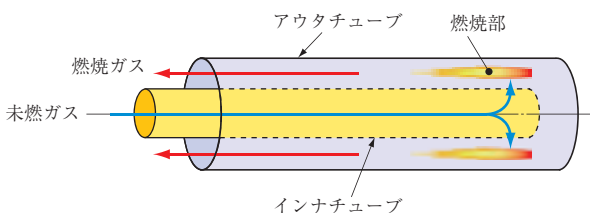
2.2 ディスク型マイクロコンバスタ

ディスク型マイクロコンバスタはケーシング、セパレータ、カバーの三つの部品から構成される。空気と燃料の予混合ガス（燃焼する前のガス）は、ケーシングとセパレータ間に供給され、外周に向かって流れが広がっていく。外周部の燃焼室で燃焼した後、排気ガスはカバーとセパレータ間を通り、中央部を通過して外部に排出される。セパレータを通して上下で排気ガスの排熱が予混合ガスに伝えられ、熱再生が行われる。この際、カバー上面には貯水部を設け、カバーを水冷できる構造とした。

試験は、カバーとセパレータ間隔を変え、燃焼ガスが水冷されている壁面に接触する割合（燃焼室の表面積/体積比）が異なる 3 種類のマイクロコンバスタについて行った。

2.3 チューブ型マイクロコンバスタ

チューブ型マイクロコンバスタの構造を第 5 図に示す。マイクロコンバスタは、アウトチューブとインナチューブから構成



第 5 図 チューブ型マイクロコンバスタ
Fig. 5 Tube-type micro combustor

されている。試験は、マイクロコンバスタ本体を水で満たした水槽内に設置して行った。供給された空気と燃料の予混合ガス（未燃ガス）はインナチューブ内を通過し、インナチューブ先端の噴射孔から半径方向に噴射される。噴射された未燃ガスがアウトチューブ内壁面で激み点（よどみ点）を形成し、ここに火炎が保持される。

排気ガス（燃焼ガス）はアウトチューブ内側とインナチューブ外側を通過し、排出される。熱再生はインナチューブの内外で行われる。このマイクロコンバスタは、構造がシンプルで、最外周部すべてを加熱面として用いることができる利点がある。

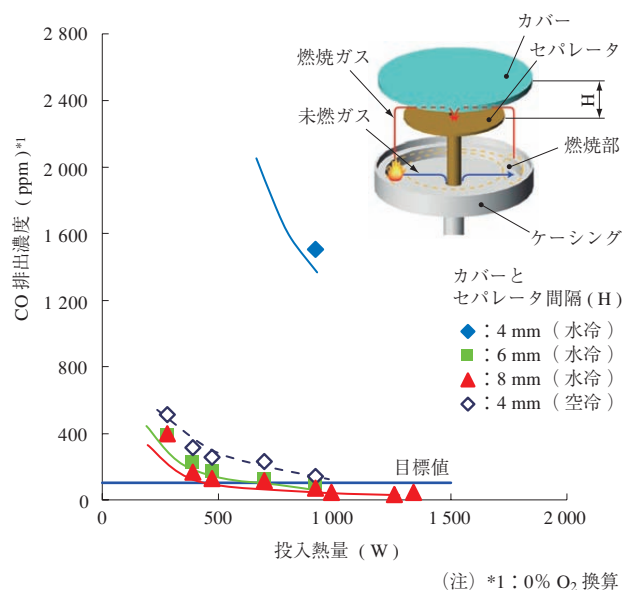
点火装置には、汎用のエキサイタ（点火装置）とガス給湯器点火プラグを用いた。着火は燃焼室に挿入したフレームロッドによって確認した。未燃ガスの噴射位置と激み点までの距離（アウトチューブとインナチューブの間隔）を変えるため、アウトチューブ径が異なる 3 種類について試験した。

3. 試験結果

3.1 ディスク型マイクロコンバスタ

第 6 図に投入熱量に対する CO 排出濃度の結果を示す。CO 排出濃度は、空冷よりも水冷してマイクロコンバスタ壁面温度を低下させたほうが増大する。また、カバーとセパレータ間隔が狭いほど高い値となる。特に、この間隔が狭い場合は、最小でも 1 500 ppm 程度排出され、このままでは実用熱源としては利用できない。

一方、間隔が広い場合は、投入熱量を増加させると



第 6 図 投入熱量と CO 排出濃度
Fig. 6 Exhaust CO concentration vs. input energy

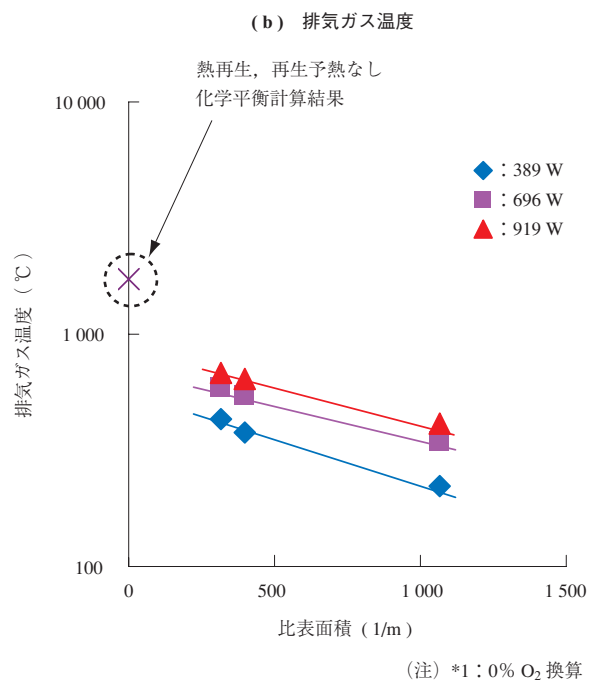
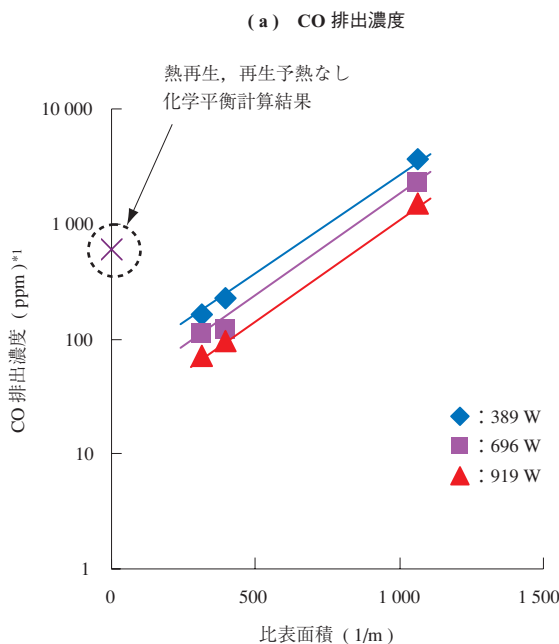
100 ppm 以下（ガス事業者の排出目標値）となる。これは、燃焼反応中のガスが低温壁面に接触すると燃焼反応が妨げられて不完全燃焼するため、CO が増加したと判断される。そこで、燃焼室の抜熱面（カバー部）の比表面積（表面積／体積比）が、この接触の度合を示す一つのパラメータであると考え、このパラメータで整理した。

第 7 図に比表面積と CO 排出濃度（-(a)）、排気ガス温度（-(b)）の関係を示す。図からマイクロコンバスタでは、比表面積の増加に伴って CO 排出濃度は増加するが、排気ガス温度は低下していくことが分かる。また、CO 排出濃度を化学平衡計算値よりも低減させることができる。これは、熱再生によって、燃焼前のガスが高温となり反応が促進されたためと考えられる。

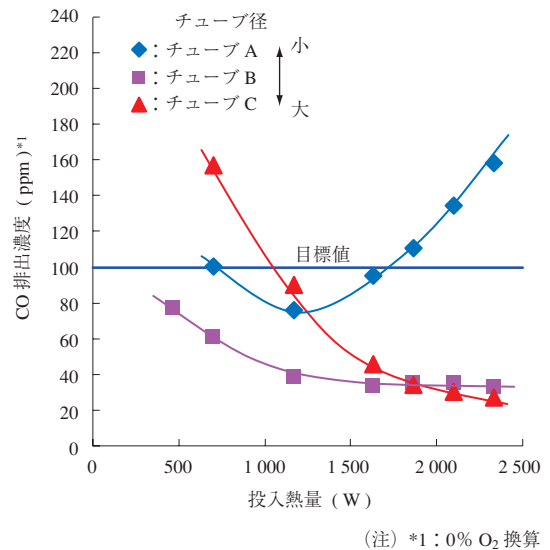
この結果、燃焼室の表面積／体積比を大きくすれば CO 排出濃度は低減できるが、一方で排気温度が上昇し、排気損失が増加することになり、設計時には最適な形状を探し出す必要があることが分かった。

3.2 チューブ型マイクロコンバスタ

アウトチューブ径を変更して CO 排出濃度を計測した結果を第 8 図に示す。アウトチューブ B では、投入熱量が 500 ～ 2 300 W で CO 排出濃度を 100 ppm 以下に抑えることができる。一方、アウトチューブ A, C では、投入熱量によっては CO の排出濃度が 100 ppm 以上となる。したがって、マイクロコンバスタの運転条件に応じて、アウトチューブとインナチューブの最適なサイズを選択する必



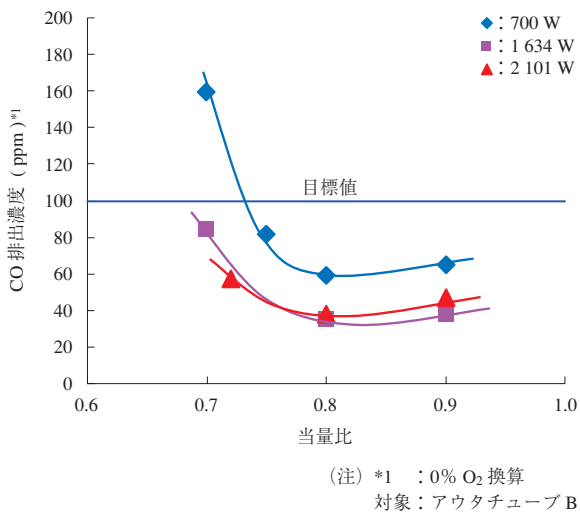
第 7 図 比表面積と CO 排出濃度、排気ガス温度の関係
Fig. 7 Effect of specific area on exhaust CO concentration and temperature



第 8 図 CO 排出濃度に対するアウトチューブ径の影響
Fig. 8 Effect of outer-tube diameter on exhaust CO concentration

要がある。

アウトチューブ B における CO 排出濃度に対する当量比の影響を第 9 図に示す。CO 排出濃度は、いずれの投入熱量の場合でも、当量比 0.8 の条件で最小値を通ることが分かる。また、当量比が 0.75 ～ 0.9, 投入熱量が 700 ～ 2 101 W の範囲で、CO 排出濃度が 100 ppm 以下となる。実用上の観点では、多少のガス濃度変動があっても CO 排出濃度が大きく変化しないことも重要であり、今回開発したコンバスタはその特性を備えているといえる。



第 9 図 CO 排出濃度に対する当量比の影響

Fig. 9 Effect of equivalence ratio on exhaust CO concentration

4. マイクロコンバスタを搭載した試作機

4.1 試作機の形状

東京ガス株式会社と共同で開発したフライヤ試作機を第 10 図に示す。フライヤではコンパクトで、上面から投影面が小さい熱源が求められており、マイクロコンバスタの長所を發揮できる。試作機は AC 100 V コンセントと低圧都市ガスラインのみで動作し、背面部にガス供給部（ガ

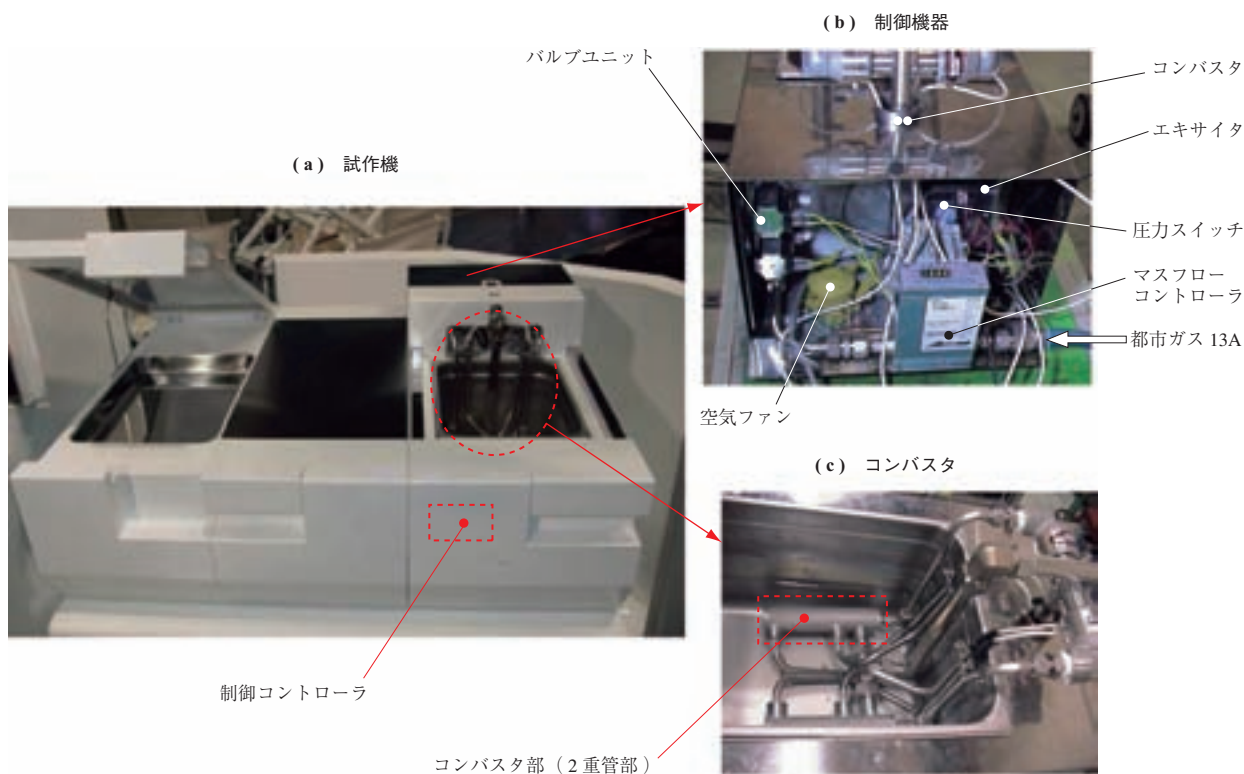
ス弁、空気ファン）、安全装置、エキサイタ（点火装置）を配置し、前面に市販ガス制御装置を備えている。また、ガスの使用流量を把握するためにマスフローメータを設置している。

試作機を評価するため、2 形態のチューブ型マイクロコンバスタを用いた。一つはコンバスタが可動するタイプ、もう一つはコンバスタが固定されているタイプである。可動タイプは、液槽の清掃性が向上するコンバスタを跳ね上げる機構（フライヤの液槽内に設置しているコンバスタを外部へ移動させる機構）をもつ。ただし、可動機構の関係上、可動タイプではコンバスタ長さ、排気管ともに固定タイプよりも短い。

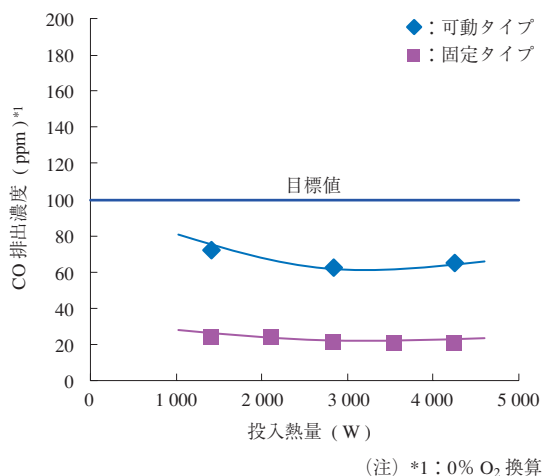
4.2 試作機の性能

第 11 図に試作機における CO 排出特性を示す。今回の試験範囲（1 400 ~ 4 200 W）では、可動、固定タイプいずれのコンバスタでも CO 排出濃度は 100 ppm 以下となる。ただし固定タイプより、可動タイプの CO 排出濃度が高い。これは、コンバスタ部の長さが固定タイプより短く、再生予熱量が少ないためと考えられる。

第 12 図に試作機における排気ガス温度の計測結果を示す。可動タイプの場合、投入熱量が 4 200 W で出口温度は 480℃程度と高く、排気損失は 22.4%となる。一方、固

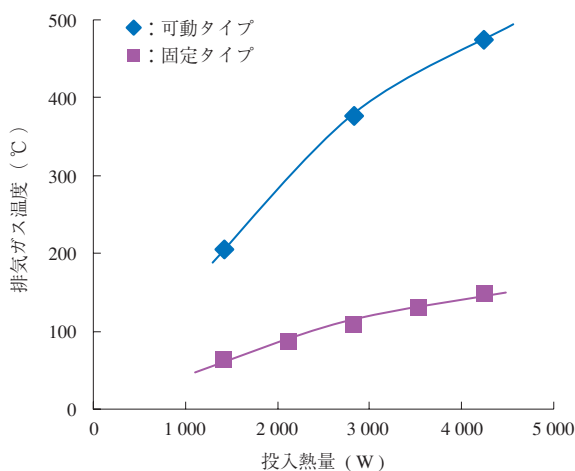


第 10 図 フライヤ試作機
Fig. 10 Fryer prototype



第 11 図 試作機における CO 排出濃度

Fig. 11 Exhaust CO concentration in prototype commercial unit test



第 12 図 試作機における排気ガス温度

Fig. 12 Exhaust temperature in prototype commercial unit test

定タイプの場合、出口温度は 150°C 程度で低く、排気損失はおよそ 9% である。可動タイプは、固定タイプと比較して排気管が短く、水との熱交換が不十分なためと考えられる。また、固定タイプは低出力時に 100°C を切る温度となっており、ドレン水が発生することもある。このため、排気管の長さも使用する条件によって設計を適当な値とする必要がある。

4.3 展示会への出展

従来の燃焼式フライヤでは、電気式フライヤにあるような加熱源（バーナ）を跳ね上げて液槽を清掃できる機構は設けることができない。これに対して、マイクロコンバスタは液槽内に、小型軽量の加熱源を設置でき、跳ね上げる機構も採用できる。

市場の意見を収集するため、厨房機器の展示会（第 8 回厨房設備機器展：2008 年 3 月 11 日～14 日、エネル

ギー環境フェア 2008：5 月 21 日～24 日、第 18 回西日本食品産業創造展'08：6 月 24 日～26 日）に、試作機（コンバスタ可動タイプ）を東京ガス株式会社と共同で出展した。跳ね上げ式のガス燃焼を用いた加熱源を設置した機器はこれまでなく、多くの来場者にマイクロコンバスタに興味をもっていただいた。

5. 結 言

2 種類のコンバスタ（ディスク型、チューブ型）について、水冷状態で燃焼特性を評価した。また、チューブ型マイクロコンバスタを利用して試作機を開発し、評価した結果、以下が明らかになった。

- (1) ディスク型マイクロコンバスタの燃焼室の表面積／体積比を調整することで、CO 排出濃度を低減できる。これは、低温壁面に熱が奪われることによって CO の酸化が阻害されていると考えられる。さらに CO 排出濃度と排気損失はトレードオフの関係にあるため、設計時には最適な表面積／体積比を探し出す必要がある。
- (2) チューブ型のマイクロコンバスタでは、CO の排出濃度は、アウトチューブとインナチューブの間隔に大きく依存する。また、当量比 0.8 の条件で CO 排出濃度は最小値となる。
- (3) チューブ型マイクロコンバスタを搭載した、業務用厨房機器（フライヤ）の試作機の CO 排出濃度は 100 ppm 以下となった。また、排気ガス温度 150°C、熱効率 93.3% を達成した。

— 謝 辞 —

本開発に当たっては、東北大学流体科学研究所 丸田 薫教授から、また、東京ガス株式会社から貴重なご助言、ご助力をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 財団法人省エネルギーセンター：用語集，受電端発電効率（オンライン）入手先 < <http://www.eccj.or.jp/> > （参照 2008-11-20）
- (2) 加藤壮一郎ほか：超過エンタルピー燃焼を用いた小型燃焼加熱器（マイクロコンバスタ）の開発 日本燃焼学会誌 第 48 巻 145 号 pp. 235 - 240