

# E & Gハイブリッド式過熱水蒸気発生器の開発

中部電力株式会社 技術開発本部  
東京ガス株式会社 産業エネルギー事業部  
直本工業株式会社

おき 長伸朗 三摩達雄  
野田博和 坂野亮太  
山本正 金岡明男  
大山敏弘 橋本遼

## 1 はじめに

過熱水蒸気とは、沸点を超えた温度の高温の水蒸気のことであり、通常は 200℃～400℃程度の温度で使用される。この過熱水蒸気は、加熱調理時に無酸素状態で食品のうま味を閉じ込めることによる風味向上効果や、金属や樹脂・セラミック等の非金属を短時間で加熱できるといった特長があり、工場や家庭の加熱装置やオーブン等で利用が拡大されている。開発品は、この過熱水蒸気を発生させる装置である。

工業用途で用いる過熱水蒸気発生器は、電気式とガス燃焼式があり、電気式は精密な温度制御が可能であるが、消費電力が大きくなることが課題であった。一方で、ガス燃焼式はランニングコストが小さくなるが、温度制御性が課題であった。

世界初の電気とガスのハイブリッド式過熱水蒸気発生器である本開発品は、工場の生産ラインで主に使用されてきた電気式の従来品と比較して、

大幅なCO<sub>2</sub>排出量およびランニングコストの低減を実現した。また、電気とガスの負荷分担を最適制御するシステムとコンパクトなガスユニットの開発により、従来は困難であった消費電力の抑制と精密な温度制御の両立を実現した。

## 2 開発品の概要

### (1) 開発品の基本構成

開発品の外観写真・構造・仕様を、**図 1**・**図 2**・**表 1**に示す。開発品は、以下の二種類のユニットで構成される。

- ①**ガスユニット**…ガスバーナが内蔵されている。ボイラと直列に連結されており、ボイラから供給された 120℃程度の低温の飽和水蒸気を加熱し、200～350℃程度の過熱水蒸気を製造する機能がある。
- ②**電気ユニット**…電気ヒータが内蔵されている。ガスユニットと直列に連結されており、ガス

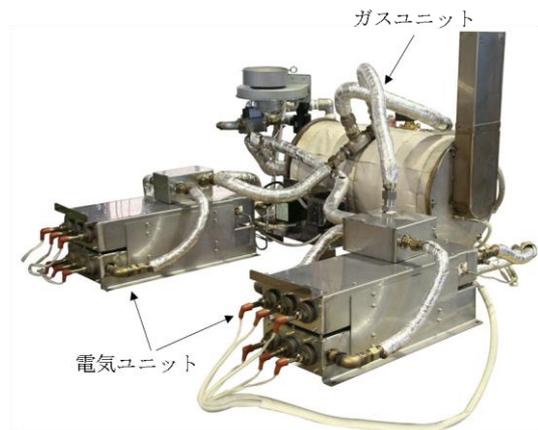


図 1 開発品の外観

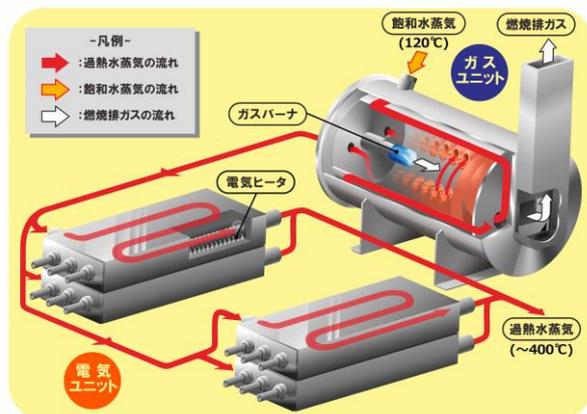


図 2 開発品の構造

ユニットから出た過熱水蒸気を250～400℃程度まで再加熱する機能がある。

## (2) 開発品の用途

### ①食品工場での加熱調理

食品に過熱水蒸気を吹き付けて加熱調理すると、食品のうま味を閉じ込めることができ、

表 1 開発品の標準仕様

項目		数値
型式		HYD-100SHS-TC
ガス ユニット	種類	都市ガス13A
	定格ガス流量	1.9m <sup>3</sup> /h
	寸法(W×D×H)	330×910×660mm
	重量	37.8kg
電気 ユニット	定格電圧	AC200V 3相
	電気容量	7.2 kW (1.8kW×4台)
	寸法(W×D×H)	185×610×80 mm×4台
	重量	10.8kg×4台
過熱 水蒸気	最高温度	400℃
	最大圧力	0.2MPa
	最大蒸気量	120kg/h



図 3 食品工場向け大容量オーブン

従来の熱風による調理に比べて、食品の味が格段に向上する。図 3 のような大容量のオーブン内に過熱水蒸気を供給して、食品を加熱調理し、図 4 のような食品を製造する。競争の激しい食品業界において、付加価値の大きい食品づくりに役立てられている。

### ②機械工場での金属の加熱

図 5 のような加熱装置を用いて、図 6 のような複雑な形状の金属部品に過熱水蒸気を噴射して加熱すると、従来の熱風に比べて加熱時間を大幅に短縮できる。例えば、金属部品の洗浄後に、過熱水蒸気を吹きつけて乾燥させる場合、熱風では4時間を要していた約30cmの寸法の薄肉の金属部品を、過熱水蒸気により3分で乾燥できた事例もある。

## 3 開発にいたった経緯

直本工業株式会社は、平成14年に電気式の過熱水蒸気発生器を搭載した各種のオーブンや機器の販売を開始し、店舗向けと工場向けに1万台以上の販売実績を有する。大手コンビニチェーンや



図 4 過熱水蒸気で加熱調理した鶏と魚



図 5 機械工場向け急速加熱装置

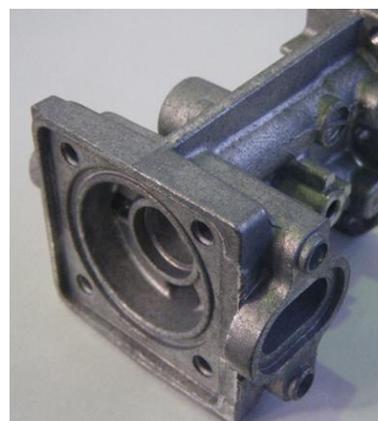


図 6 複雑形状の金属部品

ファストフードチェーンを含む食品工場や店舗を中心に、過熱水蒸気式のオーブンや調理機器の納入実績がある。また、食品向けだけでなく、ガラスや金属向けの過熱水蒸気式の加熱装置の納入実績もある。

平成24年に中部電力株式会社に対して、CO<sub>2</sub>排出量と消費電力量の削減について技術的相談を行った際に、中部電力株式会社が電気とガスを融合したハイブリッド式機器の着想を得た。そして、平成25年に中部電力株式会社から東京ガス株式会社に共同研究を持ちかけたところ、東京ガス株式会社も共同研究の趣旨に賛同し、三社で共同研究を実施する運びとなった。

#### 4 技術の独創性・新規性

開発品の独創性は、異なる形態のエネルギー（電気とガス）を組み合わせるという新しい発想によって、省エネ性を向上させた点にある。

電気とガスを組み合わせた工場向け生産設備は、過去にもあった。それらは、例えばガス燃焼炉の後段に赤外線式加熱炉を配置するなど、単に従来の電気設備とガス設備を組み合わせただけであった。これらに対して、開発品では、電気とガスのそれぞれの特性を考慮して、省エネ性や温度制御性等の観点から、装置構造と電気とガスの分担割合を最適化している。この点が、従来式に対する新規性である。

開発品は、電気とガス燃焼のそれぞれの特長を活かし、ハイブリッド方式とすることによって、省エネ性の大幅な向上を実現した。なお、本共同開発は、国内の工場での付加価値の高いものづくりや低コスト化に貢献するために、工場向けの機器の開発を、電力会社とガス会社とメーカーが、初めて共同で手がけたものである。

### 5 電気とガスのハイブリッドの概念

電気とガス燃焼の長所・短所とハイブリッドの特長を表2に示す。

#### (1) 電気とガス燃焼の長所・短所

##### ①熱出力0～100%の安定的な発生

ガスバーナは、定格の4分の1程度以下の低負荷時は、火炎が不安定となり、所定の熱を得られない場合がある。これは「ターンダウン」と呼ばれる。一方、電気ヒータは、0～100%の全範囲において、安定して熱を発生できる。

##### ②一次エネルギー効率

電気は、発電時や送電時に相当量のエネルギー損失が発生するため、発電所で消費する一次エネルギー（火力発電所の燃料等）のうちの37%のみが、工場や家庭などの消費端での実際の電気エネルギーとなる。一方、ガス燃焼では、消費端でバーナを燃焼できるため、エネルギー損失が比較的小さい。すなわち、電気は一次エネルギー効率が低く、ガス燃焼は一次エネルギー効率が高い。

表2 電気とガス燃焼の長所・短所とハイブリッドの特長

項目	電気	ガス燃焼	ハイブリッド
①熱出力0～100%の安定的な発生	【長所】電気ヒータは、0～100%の全範囲において、熱を安定的に発生できる。	【短所】ガスバーナは、定格の4分の1程度以下の低負荷では、火炎が不安定となり、所定の熱を得られない場合がある（ターンダウン）。	低負荷時は電気により熱を発生させ、高負荷時はガスによって熱を発生させれば、0～100%の全範囲において熱を安定的に発生できる。
②一次エネルギー効率	【短所】電気は、発電時や送電時に相当量のエネルギー損失が発生するため、発電所で消費する一次エネルギー（火力発電所の燃料等）のうちの37%のみが、工場等の消費端での実際の電気エネルギーとなる。すなわち、電気は一次エネルギー効率が低い。	【長所】ガス燃焼では、消費端でバーナを燃焼できるため、エネルギー損失が比較的小さい。すなわち、ガス燃焼は一次エネルギー効率が高い。	一次エネルギー効率はガスが優れるため、可能な限りガスの比率を高めることで、省エネ性を高めることができる。例えば、熱負荷の8割以上をガスが負担し、2割未満を電気が負担する。
③温度制御性	【長所】電気は細かな電気入力の制御が可能であり、設定温度に対して±5℃以内の精密な温度制御が可能である。	【短所】条件によっては、ガスの着火に時間がかかる場合があるため、温度制御幅が±20℃になる場合がある。	ベース負荷をガスが負担し、負荷変動分を電気が負担することで、常に±5℃以内の温度制御が可能となる。

### ③温度制御性

一般に、電気は細かな電気入力制御が可能であるため、設定温度に対して±5℃以内の精密な温度制御が可能である。ガス燃焼は、条件によっては、ガスの着火に時間がかかる場合があるため、温度制御幅が±20℃になる場合がある。

## (2) 電気とガスのハイブリッドの概念

電気とガスのハイブリッドにより、電気とガスのそれぞれの長所が互いの短所を補って、機能を向上できると考えられる。具体的には、表2のような3点においてメリットが出るが、これらの3点を可能とする技術開発が必要となる。

### ①熱出力0～100%の安定的な発生

前述のとおり、ガスバーナは、低負荷時は火炎が不安定となるが、電気とガスのハイブリッド化によって、低負荷時は電気により熱を発生させ、高負荷時はガスによって熱を発生させれば、0～100%の全範囲において熱を安定的に発生できる。なお、熱出力の全範囲において安定的に熱を発生させるためには、電気とガスの熱負荷の分担割合を細かくチューニングする必要がある。

### ②一次エネルギー効率

一次エネルギー効率はガスが優れるため、電気とガスのハイブリッドにおいては、可能な限りガスの比率を高めることで、省エネ性を高めることができる。例えば、熱負荷の8割以上をガスが負担し、2割未満を電気が負担する。

### ③温度制御性

ベース負荷をガスが負担し、負荷変動分を電気が負担することにより、常に±5℃以内の温度制御が可能となる。

## (2) 電気とガスの連携制御

開発品は、低負荷時は電気ヒータで単独運転し、高負荷時はガスバーナと電気ヒータを併用で運転するなど、どのような運転条件でも、条件に合わせた最適な電気とガスの負荷分担で、高精度温度制御と省エネ性（一次エネルギー効率の向上）を両立できる制御を実現した（特許出願済：特願2015-165825）。

具体的には、表3に分類される運転パターンによって、ハイブリッド式高温流体発生器の電気とガスの容量配分などを制御する。

### ①起動モード

工場の朝の操業開始時などにおいて、夜の停止時に温度が常温近くまで低下した機器を暖機する運転モードである。重量が1トン近いオーブンなどの加熱装置を常温から200～400℃程度に暖機する必要があるため、3種類の運転モードの中では、エネルギー消費量が最も大きい。従来の電気式では、消費電力がこの運転モードで最大となる。従って、消費電力量の抑制のためには、この起動モードでの電力を抑える必要がある。

具体的には、暖機時には精密な温度制御は必要ないので、ガスの熱出力を最大限にし、電気の熱出力を0とする。

### ②高負荷モード

加熱対象物が消費する熱負荷が大きいモードであり、製品の投入量が多い場合や加熱温度が高い場合である。例えば、食品調理ではハンバーグを350℃で加熱する場合や、熱処理でアルミを200～500℃程度に加熱する場合である。

高負荷モードでは、熱負荷全体の10～30%程度

## 6 開発内容

### (1) 現状の過熱水蒸気発生器の課題

工業用途で用いる過熱水蒸気発生器は電気式とガス燃焼式があり、電気式の場合は精密な温度制御が可能であるが、消費電力が大きくなることが課題であった。一方で、ガス燃焼式の場合はランニングコストが小さくなるが、温度制御性が課題であった。

表3 運転モード

運転モード	分担割合		機能・効果
	電気	ガス燃焼	
起動モード	0%	100%	最もエネルギー消費が大きい起動時の消費電力を大幅に圧縮
低負荷モード	100%	0%	ガスバーナが苦手な低負荷領域は、電気でカバー
高負荷モード	10～30%	70～90%	ガスをベースとして、消費電力を抑えつつ温度精度を確保（±5℃）

を電気が負担し、ガスが70~90%を負担する。

開発品では、過熱水蒸気はガスユニットで加熱された後に、電気ユニットで加熱される。仮に、ガスユニット出口の過熱水蒸気の実際の温度幅が、設定温度に対して $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 以上に大きくなっても、その過熱水蒸気は電気ユニットでの再加熱で精密な温度制御ができるため、最終的な過熱水蒸気の温度は $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内を確保できる。

### ③低負荷モード

加熱対象物が消費する熱量が小さいモードであり、製品の投入量が少ない場合や加熱温度が低い場合である。例えば、食品調理では野菜を $150^{\circ}\text{C}$ で蒸す場合や金属部品を $100^{\circ}\text{C}$ 程度に加熱する場合である。

低負荷時にバーナを運転すると、ターンダウン以下となり、稼働不可となる。このため、ガスによる加熱能力は0となるため、電気のみによる加熱となる。電気のみのため、精密な温度制御が可能である。

### (3) ガスユニット

図2に示すように、ガスユニットは円筒状である。円筒は二重構造になっており、外側の円筒に、水蒸気が通過する空間がある。その空間の内側には、図7に示す二重螺旋状の配管がある。この二重螺旋配管は、2本の配管が交互に組み合わせられており、この二重螺旋配管内も水蒸気が通過するようになっている。これらの外側円筒と二重螺旋配管は連結されており、外部から供給された飽和水蒸気は、まず外側円筒を通過した後に、二重螺旋管内を流れるようになっている。

また、図8に示すメタルニットバーナを採用し、効率的に燃焼排ガスと飽和水蒸気が熱交換できるようバーナ形状を新たに考案した。メタルニットバーナとは、燃焼面が耐熱金属繊維の織布で構成される高効率な表面燃焼ガスバーナであり、被加熱物に応じて最適な形状にできるなど自由度が高いというメリットがある。

このような構造を考案することによって、次のように、放熱の有効利用と機器のコンパクト化を実現できた（特許出願済：特願2015-167281）。



図7 二重螺旋構造蒸気配管



図8 メタルニットバーナ

- ・燃焼部の外筒部に最初に飽和水蒸気を通して予熱を行うことにより、燃焼室の放熱を回収できるようになった。
- ・ガスユニット内の蒸気配管を二重螺旋構造にすることで、伝熱面積を確保しつつコンパクト化を実現した。
- ・メタルニットバーナは火炎長が短いため、燃焼室をコンパクトにできた。

### (4) 電気ユニット

電気ユニットは、図9と図10のように、配管の中にフィン付の電気ヒータが挿入された構造である。配管の内側と電気ヒータの外側の空間に水蒸気が流れ、水蒸気を加熱することで過熱水蒸気を生成する。



図9 電気ユニットの外観



図10 フィン付電気ヒータ

## 7 効果

従来の過熱水蒸気発生器としては、電気式とガス燃焼式があったが、ガス燃焼式は大容量で設置スペースが大きいことから、工場のほとんどでは電気式が使用されてきた。このため、開発品の環境負荷やエネルギー消費の削減等については、従来の電気式に対して比較を行った。

### (1) コンパクト化

ガスユニットをコンパクト化したことによ



図11 加熱装置への開発品の収納

表4 試算条件

項目	値	備考
① 定格蒸気量[t/h]	0.120	表1
② 負荷率[%]	70	工場の実態
③ 運転時間[h/年]	5,500	同上
④ 蒸気量[t/年]	462	=①×②×③
⑤ 蒸気昇温の必要熱量[kJ/kg]	577	蒸気表
⑥ 蒸気昇温の必要熱量[GJ/年]	267	=④×⑤

表5 従来品のCO<sub>2</sub>排出量

項目	値	備考
① 蒸気昇温の必要熱量[GJ/年]	267	表4の⑥
② 熱効率[%]	95	測定値
③ 消費電力量[kWh/年]	78,100	=①÷②
④ CO <sub>2</sub> 排出係数[kg/kWh]	0.509	中部電力
⑤ CO <sub>2</sub> 排出量[t/年]	39.8	=③×④

表6 開発品のCO<sub>2</sub>排出量

項目	値	備考
① 蒸気昇温の必要熱量[GJ/年]	267	表4の⑥
② ガス 蒸気昇温の必要熱量[GJ/年]	214	=①×80%
③ 熱効率[%]	59	測定値
④ ユニ 発熱量[MJ/m <sup>3</sup> ]	45	東京ガス
⑤ ンニ 燃焼消費量[m <sup>3</sup> /年]	8,060	=②÷③÷④
⑥ ット CO <sub>2</sub> 排出係数[kg/m <sup>3</sup> ]	2.19	東京ガス
⑦ CO <sub>2</sub> 排出量[t/年]	17.7	=⑤×⑥
⑧ 電気 蒸気昇温の必要熱量[GJ/年]	53.4	=①×20%
⑨ 熱効率[%]	95	測定値
⑩ ユニ 消費電力量[kWh/年]	15,600	=⑧÷⑨
⑪ ット CO <sub>2</sub> 排出係数[kg/kWh]	0.509	中部電力
⑫ CO <sub>2</sub> 排出量[t/年]	7.94	=⑩×⑪
⑬ CO <sub>2</sub> 排出量[t/年]	25.6	=⑦+⑫

って、図11に示すように、開発品を加熱装置の中に収納できるようになった。工場では一般に設置スペースが少ないため、加熱装置と過熱水蒸気発生器の一体化による省スペース化は、大きなメリットとなる。

### (2) 消費電力の削減

開発品の定格電力は7.2kWであり、従来品の21.6kWに対して67%削減できた。高負荷モードでは、消費電力を従来品に対して70~90%削減できる。起動モードでは、消費電力は0にできる。

### (3) 環境負荷の削減効果 (CO<sub>2</sub>排出量削減)

CO<sub>2</sub>排出量の試算条件および従来品と開発品の試算結果を、表4・表5・表6に示す。開発品のCO<sub>2</sub>排出量は、従来品に比べて36%減と大幅に削減できる。

### (4) エネルギー消費の削減効果

従来品と開発品の省エネ性能の比較表を表7に示す。従来品の一次エネルギー効率は35%であった。これに対して、開発品の一次エネルギー効率は54%であった。このため、開発品の一次エネルギー消費量は、従来品に対して35%減と大幅に削減できる。

### (5) コストダウン効果

ランニングコストの従来品と開発品の試算結果を、表8および表9に示す。開発品の年間ランニングコストは、従来品に比べて32%削減できる。

イニシャルコストの回収年数の試算結果を表10に示す。直本工業株式会社の従来品の電気式の過熱水蒸気発生器に対して、イニシャルコ

スト回収年数は1.6年であり、導入する工場では十分なメリットがある。

### (6) 技術の発展性・汎用性

前述のように、電気とガスをそれぞれ過不足なく最適に負荷分担させ、消費電力を抑えつつ精密な温度制御を可能とする連携制御システムを開発した。この連携制御システムは、他の電気とガスのハイブリッド機器にも応用できる基本的な技術であり、今後の電気とガスのハイブリッド機器の基幹となる汎用的な技術である。

また、開発品によって発生された過熱水蒸気は、食品・機械・金属素材等の様々な工場において、加熱調理・金属の急速昇温・洗浄・乾燥等の多様な用途での活用が期待されている。

このように、開発品の技術と用途は、大きな発展性と汎用性を備えている。

で、日本のものづくりの高付加価値化と生産性向上に貢献していきたい。

表7 エネルギー消費の従来品との比較

項目		備考		
①	一次エネルギー効率	従来品	35	熱効率の測定値95% ×送電端効率37%
②	[%]	開発品	54	
③	削減率[%]		-35	= (開発品の一次エネルギー消費量) ÷ (従来品の一次エネルギー消費量) = (Q/②) / (Q/①) ここにQは過熱水蒸気発生器の発生熱量

表8 従来品のランニングコスト

項目	値	備考
① 蒸気昇温の必要熱量[MJ/年]	267	表4の⑥
② 熱効率[%]	95	測定値
③ 消費電力量[kWh/年]	78,100	=①÷②
④ 単価[円/kWh]	15	中部電力
⑤ 電気代[千円/年]	1,170	=③×④
⑥ ランニングコスト[千円/年]	1,170	=⑤

## 8 販売実績および利用状況

### (1) 販売実績

平成27年11月の販売開始から約1年間で32台を受注しており、平成28年9月現在で既に10台を納入済みである。また、複数の大手食品工場および自動車関係工場より引き合いを多数受けている状況である。

### (2) 利用状況

開発品は大手食品工場で採用されている。これらの工場において、開発品を搭載したオーブンで生産された弁当および惣菜は、大手コンビニチェーンの店舗を通じて広く流通している。なお、コンビニ業界は競争が激しいが、過熱水蒸気によって調理された弁当などが、競争力の向上に役立てられている。

表9 開発品のランニングコスト

項目	値	備考
① 蒸気昇温の必要熱量[MJ/年]	267	表4の⑥
② ガス 蒸気昇温の必要熱量[MJ/年]	214	=①×80%
③ 熱効率[%]	59	測定値
④ ユニ 発熱量[MJ/m <sup>3</sup> ]	45	東京ガス
⑤ ャニ 燃焼消費量[m <sup>3</sup> /年]	8,060	=②÷③÷④
⑥ ャニ 単価[円/m <sup>3</sup> ]	70	東京ガス
⑦ ャニ 燃料代[千円/年]	564	=⑤×⑥
⑧ 電気 蒸気昇温の必要熱量[MJ/年]	53.4	=①×20%
⑨ ャニ 熱効率[%]	95	測定値
⑩ ャニ 消費電力量[kWh/年]	15,600	=⑧÷⑨
⑪ ャニ 単価[円/kWh]	15	中部電力
⑫ ャニ 電気代[千円/年]	234	=⑩×⑪
⑬ ランニングコスト[千円/年]	798	=⑦+⑫

表10 イニシャルコスト回収年数

項目	従来品	開発品	差	備考
① イニシャルコスト[千円]	2,400	3,000	600	直本工業
② ランニングコスト[千円/年]	1,170	798	372	表8と表9
③ 回収年数[年]	-	-	1.6	=差①÷差②

## 9 おわりに

開発品の効果および特徴をまとめると、表11のとおりとなる。

開発品は、蒸気関連装置の中堅メーカーである直本工業株式会社から、「ハイブリッドSHS」の商品名で販売されている。今後は、食品オーブンや自動車工場等の金属加熱等に普及を図ること

表 1 1 開発品の効果および特徴

項目	開発品
①環境負荷の削減効果 (CO <sub>2</sub> 排出量の削減)	従来品に比べて <b>36%減</b> と大幅に削減できる。
②技術の新規性・独創性	<p>開発品の<b>独創性</b>は、異なる形態のエネルギー（電気とガス）を組み合わせるという新しい<b>発想</b>によって、省エネ性を向上させた点にある。</p> <p>電気とガスを組み合わせた工場向け生産設備は、従来にもあった。それらは、例えばガス燃焼炉の後段に赤外線式加熱炉を配置するなど、単に従来の電気設備とガス設備を組み合わせただけのものであった。これらに対し、開発品では、<b>電気とガスのそれぞれの長所と短所を考慮して</b>、省エネ性や温度制御性等の観点から、<b>装置構造と電気とガスの分担割合を最適化</b>している。この点が、従来に対する<b>新規性</b>である。</p>
③エネルギー消費の削減効果	従来品に対して <b>35%減</b> と大幅に削減できる。
④技術の発展性・汎用性	<p>電気とガスをそれぞれ過不足なく最適に負荷分担させ、消費電力を抑えつつ精密な温度制御を可能とする連携制御システムも開発した。この連携制御システムは、<b>他の電気とガスのハイブリッド機器にも応用できる基本的な技術</b>であり、今後の電気とガスのハイブリッド機器の基幹となるものである。</p> <p>また、開発品によって発生された過熱水蒸気は、食品・機械・金属素材等の様々な工場において、加熱調理・金属の急速昇温・洗浄・乾燥等の<b>多様な用途での活用が期待</b>されている。このように、開発品の技術と用途は、大きな発展性と汎用性を備えている。</p>
⑤コストダウン効果	<p>年間ランニングコストは、従来品に比べて<b>32%削減</b>できる。</p> <p>イニシャルコストは若干増加するが、従来品の電気式の過熱水蒸気発生器に対して、イニシャルコスト回収年数は<b>1.6年</b>であり、導入する工場では十分なメリットがある。</p>