

工業炉用汎用水素バーナの開発とその用途展開

川崎 久志・池田 勇・朝山 雄介・柳谷 貴哉・神戸 寿夫・友澤 健一

中外炉工業株式会社

〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町2-4

Development of general-purpose hydrogen burners and their applications for industrial furnaces

Hisashi KAWASAKI, Isamu IKEDA, Yusuke ASAYAMA, Takaya YANAGITANI,

Toshio KAMBE, Kenichi TOMOZAWA

Chugai Ro Co., Ltd

2-4 CHIKKO-SHINMACHI, NISHI-KU, SAKAI 592-8331, JAPAN

In 2018, Chugai Ro Co., Ltd., with Toyota Motor Corporation, succeeded in developing the world's first general-purpose industrial hydrogen burner. By changing the structure of the hydrogen combustion burner from the conventional burner, it became possible to slowly mix hydrogen and combustion air and suppress a local flame temperature rise. In addition, the amount of NO_x produced can be reduced to the less level than the conventional 13A combustion. Furthermore, in order to reduce the environmental load of the industrial furnace, we also developed a radiant tube and a superheated steam generator for this general-purpose hydrogen burner. By the development of the hydrogen combustion type radiant tube burner, it was confirmed that the temperature distribution performance and safety are the same as those of the conventional product, and the fuel conversion compatibility from the conventional product is possible. It was discovered that the superheated steam generator has the property of being able to change the atmosphere inside the furnace to an oxidizing/reducing atmosphere by changing the combustion ratio of hydrogen and Oxygen. We believe that the development of these devices has made great strides toward the construction of a carbon-free society.

Keywords: hydrogen burner, combustion, radiant tube, superheated steam, zero emission

1. 諸言

気候変動・環境問題が世界的な課題として注目され、社会的に温室効果ガスの1つであるCO₂排出を抑制する動きへの機運が高まってきている。特に2020年10月に菅首相（当時）が2050年カーボンニュートラル宣言をして以降、国内におけるCO₂排出抑制への動きはますます活発になってきている。工業用バーナにおいても燃料を水素やアンモニアなどへ転換するための研究が活発に行われている。

本稿では、世界初の工業用汎用水素バーナを開発した

経緯および、この汎用水素バーナを利用した設備の開発状況について紹介する。

2. 汎用水素バーナの開発

2.1. 工業用バーナの燃料に水素を利用してきた歴史

近年、広く利用されている13A都市ガスは、天然ガスが原料となるため、表1の燃料特性に示すように、メタンが主成分（約88%）である。1970年代ころは石炭を原料とした水素が主成分（約45%）の6C都市ガスも使用されていた。また、製鉄所構内ではコークス製造工程から

得られる水素が主成分（約50%）のークオープンガス（COG）が使用されている。つまり水素含有率50%程度の燃料であれば、工業用バーナにおける燃焼技術は確立していると言える。しかしながら、近年の水素燃料とは水素100%の燃料を意味し、上述の水素含有率50%程度の燃料とは明らかにその燃焼特性が異なる。そのため、新たな燃焼技術開発が必要になった。

表1. 各種燃料特性

燃料種		13A 都市ガス	6C 都市ガス	COG	水素
低位発熱量 (MJ/m ³ _N)		41.7	17.0	19.1	10.8
理論空気量 (m ³ _N /m ³ _N)		11.00	4.20	4.74	2.39
密度 (kg/m ³ _N)		0.841	0.705	0.467	0.09
構成成分	H ₂ (vol.%)	0	45	52	100
	CH ₄ (vol.%)	88	22	27	0
	N ₂ (vol.%)	0	10	5	0
	CO ₂ (vol.%)	0	10	3	0
	CO (vol.%)	0	5	10	0
	その他 (vol.%)	12	8	3	0

2.2. 燃料としての水素の特性と開発課題

水素と、一般的な工業用燃料である都市ガスの主成分メタンの物性値を表2.に示す。水素は広い可燃範囲をもち反応性に富んだ燃料であることから、燃焼反応を安定させやすい。その反面、燃焼速度が極めて速く逆火しやすい点や、リークしやすく最小着火エネルギーが小さいためガス漏れなどから火災が起きる可能性が高い点があり、安全管理面では注意を必要とする。また燃焼速度が速いことは局所的な温度上昇を引き起こしやすく、最高火炎温度も高いためサーマルNO_xの生成が促進されNO_x濃度が高くなりやすい。従って工業炉に適した火炎特性を持つ水素バーナの開発にあたり課題として以下

表 2. 水素とメタンの物理的特性 [1]

		水素	メタン
空気中における燃焼限界 (vol. %)	下限	4	5
	上限	75	15
燃焼速度 (cm/s)		265	40
着火温度 (°C)		572	580
最小着火エネルギー (MJ)		0.02	0.28
密度 (kg/m ³ _N)		0.08	0.65
低位発熱量 (MJ/m ³ _N)		10.8	35.8
理論空気量 (m ³ _N /m ³ _N)		2.39	9.57
断熱火炎温度 (°C)		2158	1967

の2点を設定した。

- ① 低NO_x化手法の確立
- ② 燃焼安全手法の確立

2.3. 工業利用の汎用水素バーナの開発

中外炉工業とトヨタ自動車（株）は2018年に世界で初めて工業利用を目的とした汎用水素燃焼バーナを開発した[2]。

水素バーナ実用化のためには、水素の非常に早い燃焼速度（メタンの約8倍の速度）に起因するバーナ燃焼筒内部での異常燃焼を防止し、断熱火炎温度上昇（メタンより150°C上昇）に伴い増加するNO_x生成量を低減する必要がある。なお、断熱火炎温度とは、外部への熱損失がないと仮定し、計算で求められる火炎温度のことである。図1.は従来型バーナで燃料のみ水素に転換して燃焼した時の写真である。通常であれば、図2.の従来型バーナで13A都市ガスを燃焼した時のように、バーナ燃焼筒が赤熱することはない。しかし、水素の早い燃焼速度により、バーナ燃焼筒内部での異常燃焼によりバーナ燃焼筒の赤熱が起こった。



図1. 従来型バーナでの水素燃焼



図2. 従来型バーナでの13A都市ガス燃焼

上記の課題解決のために、バーナ燃焼筒内部での水素と燃焼空気の混合状態の最適化を進めた結果、バーナ燃焼筒内部での異常燃焼を防止しかつNO_x生成量を低減できるバーナ構造を確立した。図3.にバーナ構造の模式図を示す。技術的なポイントは以下の3点である。

- ・水素と燃焼空気を平行に吐出する
- ・水素と燃焼空気の吐出口の距離を離す
- ・水素の吐出速度を高める

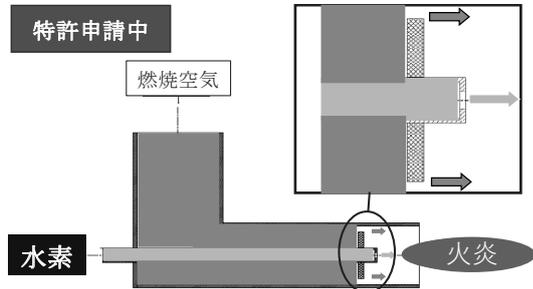


図3. 汎用水素バーナの構造

図4.に示すように、このバーナ構造を採用することで水素と燃焼空気の混合が緩慢に、かつ、局所的な火炎温度上昇を抑制することが可能となり、その結果バーナ燃焼筒の赤熱も無くなった

また、NOx生成量も13A都市ガスを燃焼した場合と同等以下にまで低減可能となった（グラフ1.：燃焼量100%で13A都市ガス29ppm O₂=11%換算、水素19ppm O₂=11%換算）。

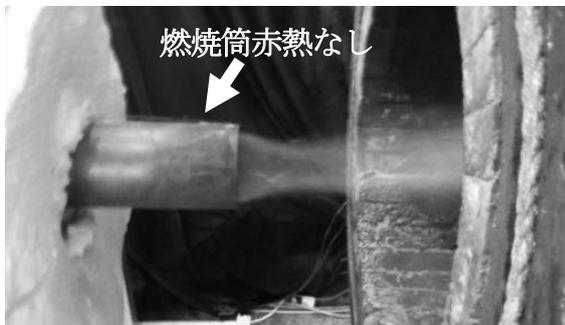
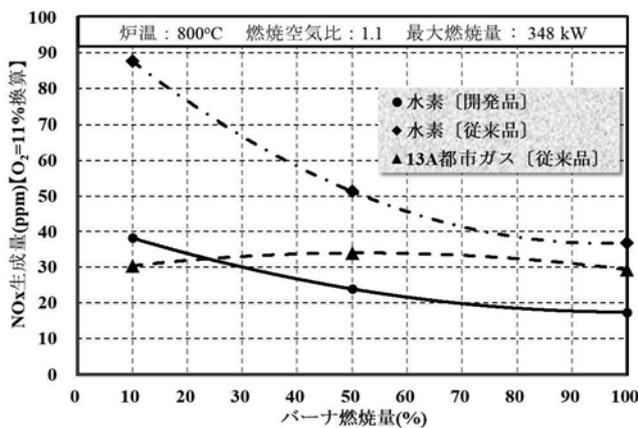


図4. 汎用水素バーナの火炎



グラフ1. 汎用水素バーナのNOx生成量特性

3. 水素燃焼式ラジアントチューブバーナの開発

3.1. 熱処理炉用RTバーナ

前章にて述べた、汎用水素バーナを当社製品の1つである金属熱処理炉に適合させるべく、実用化に向け、更なる開発を行った。金属熱処理炉とは、処理材料に機械的な性質を与えるために加熱・冷却を行う設備である。処理目的に応じ、加熱温度及び保持時間、加熱・冷却速度、雰囲気条件を制御する機能を持ち、多種少量生産に適したバッチ式と、少品種多量生産に適した連続式がある。

金属熱処理炉において雰囲気処理を伴う場合は、ラジアントチューブバーナ（以下RTバーナと表記する）を使用した間接燃焼方式が一般的である。RTバーナおよび炉内循環ファンの使用により、チューブ輻射とファンによる対流で炉内の加熱を行い、燃焼ガス・燃焼排ガスが処理材料に直接接触することなく加熱が可能となる。さらに、加熱しつつ、炉内の炭素濃度（カーボンポテンシャル）や窒素濃度（窒素ポテンシャル）を制御することが可能となる。

今回、水素の実用化を目指した製品は大容量W型RTバーナ（以下WRBGと表記する）である。WRBGは、炉内の空間が狭く高出力を必要とする場合に適しており、当

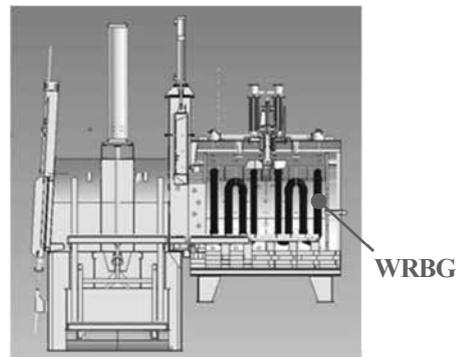


図5. バッチ式ガス浸炭炉（ハイ・シフター®）イメージ

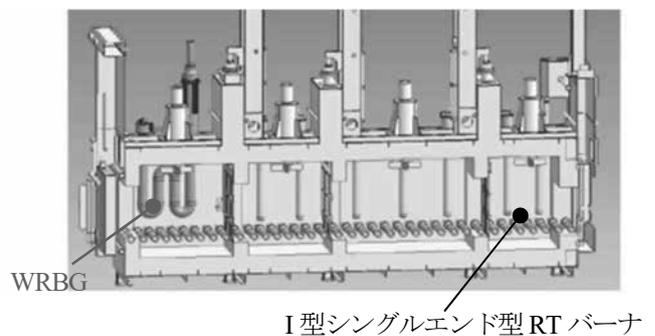


図6. 連続式ガス浸炭炉（CCF）イメージ

社主力製品のバッチ式ガス浸炭炉（ハイ・シフター：図5.）や、連続式ガス浸炭炉（CCF：図6.）の昇温帯等において使用される。

3.2. 新型WRBG型H₂バーナ 概要・性能

今回開発した新型WRBG型H₂バーナ（以下WRBG-H₂と表記する）とラジアントチューブの構造概略図を図7.に示す。W型ラジアントチューブの片側はバーナ、もう片側は熱交換器が接続されており、従来の都市ガス対応燃焼器（RBG型バーナ）と同じ燃焼器+レキュペレータの構成となっている。

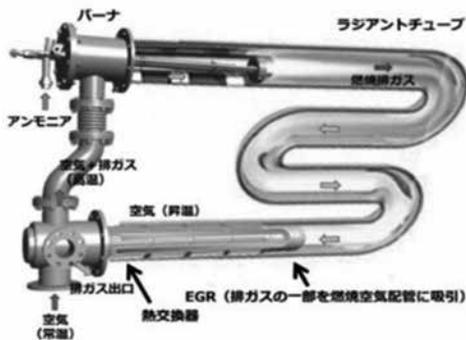


図7. 新型WRBG型H₂バーナ (WRBG-H₂)

WRBG-H₂では、燃料ガス・燃焼エア混合部を適正化し、高効率で低NO_xを可能とするため、新型のレキュペレータとEGR（排ガス再循環部）部の機構を刷新し、水素での利用を実現した。

以下の項目でWRBG-H₂の特徴・性能を説明する。

① 燃焼量の大容量化

チューブ径毎の対応可能な燃焼容量を図8.に示す。

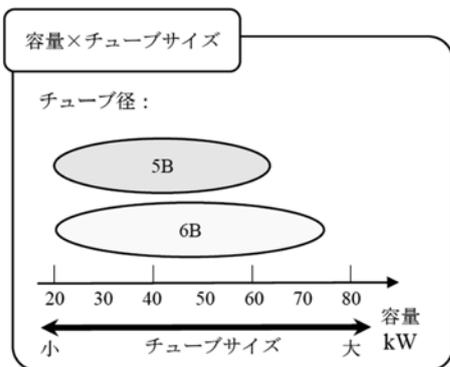


図8. ラジアントチューブサイズに対応する燃焼容量

WRBG-H₂のチューブ径は5B又は6Bというサイズのラ

インナップがあり、燃焼容量は22~75 kWといった幅広い燃焼容量に対応可能である。

これまでI型の小容量シングルエンド型RTバーナは当社・競合他社も含め製品化・実証段階にあると発表されているが、大容量の水素燃焼対応W型チューブ形状は業界初となる。WRBGは、小容量の燃焼器に比べ、炉内・炉外の設置スペース・コスト面で有利なため、狭い空間で高出力が必要なバッチ炉や連続炉の昇温帯に多数採用されている。このような理由から、WRBG-H₂の開発により、新設炉はもちろんのこと、既設炉に対しても、脱炭素化に向けた水素燃料への転換が可能となった。

② 高い省エネ性能

図9.にWRBG-H₂にて使用している熱交換器（レキュペレータ）の構造を示す。従来型のレキュペレータより熱交換部を凹凸の形状とし、伝熱面積を広くすることで、熱交換性能が向上した。従来型レキュペレータの場合、炉内温度950°C時、排ガス温度は700°C弱程度であったものが、新型レキュペレータの場合、600°C弱程度となり、100°C近く排ガスの顕熱が減少し排ガス損失基準の有効熱量（AH）で約5%程度改善し、省エネルギー性能が向上する。例えば、WRBG-H₂をハイ・シフターに適用した場合、有効熱量（AH）が5%改善すると、水素燃焼時は年間約100万円、13A燃焼時は年間約20万円のランニングコスト減（燃料代）につながる。（年間24時間×300日操業、水素単価100円/m³Nとした場合）

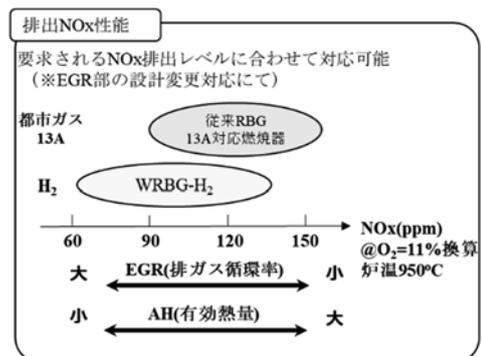


図9. 新型高効率熱交換器（レキュペレータ）

③ 低排出NO_x性能

WRBG-H₂の排出NO_x性能を図10.に示す。

WRBG-H₂は炉温950°Cにおいて11%O₂換算値で数10ppm~150ppmまで対応可能であり、水素燃焼時でも都市ガス燃焼時と同等以下の排出NO_x性能となる。水素燃焼の特

徴として、燃焼反応速度が速く、火炎温度が高いことがあり、一般的にサーマルNOxの排出量は高くなる傾向がある。さらに、間接燃焼の特徴として、チューブ内での狭空間燃焼であるため、燃焼排ガスを火炎内に巻き込むことによるNOx低減効果が見込めず、直火燃焼と比べ排出NOxは高くなる傾向にある。各自治体にもよるがNOxの排出規制値は、総排ガスで150ppm以下(11%O₂換算値)というところが多く、水素社会の普及に向けては、水素燃焼時のNOxの低減が急務である。もし従来型と同燃焼器構成で水素燃焼を行う場合、都市ガスの2~3倍程度の排出NOx(300~400ppm(11%O₂換算値))が発生し、排出規制値を大きく超過する。



図10. WRBG-H₂の排出NOx性能

今回、WRBG-H₂では、燃焼器の燃料ガス・燃焼エア混合部において多段燃焼を行う構造を採用して水素燃焼への最適化を図り、また、燃焼空気を自己循環した燃焼排ガスと混合させ、燃焼空気中のO₂濃度を薄めることによる燃焼の緩慢化により低排出NOxを達成した。なお、燃焼空気への排ガス循環率の増加に伴うデメリットとして有効熱量の低下による省エネ性能の悪化が考えられるが、前述の説明のように新型レキュペレータによる高い熱交換性能で省エネ性能も同時に実現している。

④ 温度分布性能

燃焼時の温度分布性能は、処理材料の品質やラジアントチューブの耐久性に影響を与える重要な指標である。従来の都市ガス仕様と同等の炉内・チューブ温度性能が求められる。しかしながら、上述のように水素の理論断熱火炎温度は都市ガスよりも高く、従来型と同様の燃焼方式では、ラジアントチューブ火炎介在部の温度が高くなり、炉内温度分布の悪化や変形や焼損によるチューブ寿命の短命化が懸念される。そのため、W型ラジアントチューブの温度分布測定を行った。図11.にW型ラジアントチューブの概略図、グラフ2.に水素燃焼時と都市ガス燃焼時それぞれのラジアントチューブ温度分布を示す。

チューブ温度を熱電対にて計測した結果、WRBG-H₂のラジアントチューブにおける温度分布は、従来型であ

る都市ガス仕様と同等であることが確認された。また、開発当初より懸念していたW型チューブでは燃焼器から第一ベンド(曲がり)までの間での局所的な高温化は、今回開発したWRBG-H₂では見られなかった。このため、チューブ温度は都市ガス時と同等以下となり、局所的な高温化もないため、チューブ寿命の短命化は起きないと考えられる。

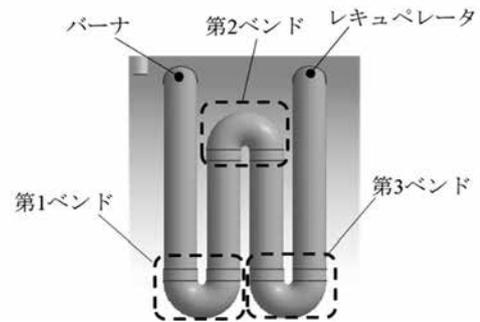
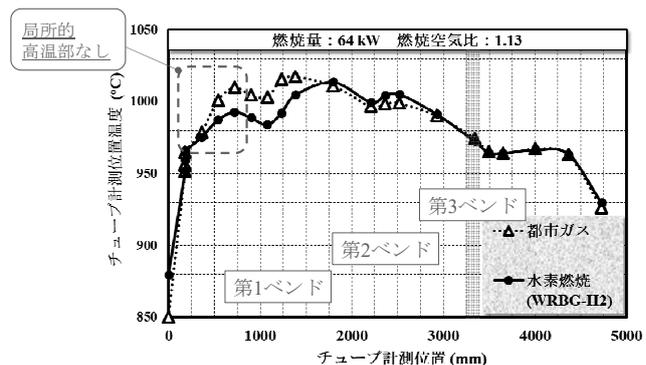


図11. WRBG-H₂の排出NOx性能



グラフ2. WRBGチューブにおける温度分布

⑤ 燃料転換対応・安全性

本バーナは、13A都市ガスにおいても、従来RBG型バーナより新型WRBGに更新することで、有効熱量(AH)が向上する。炉温、制御方法等にもよるが、一般的に、従来バーナ燃焼器単体比で、AHは5%程度向上するため燃料節約率で約7%程度、CO₂量も加熱源分で7%程度削減することが可能である。さらに将来的に水素が普及すれば比較的低コストかつ簡便に燃料転換も可能となる。

WRBG-H₂は、上述図3.のようなバーナ構造(ノズルミックス構造)を採用しており、燃料はノズルから供給後に燃焼エアと混合する構造である。これによりノズルの燃料供給側は燃焼範囲に入らないため、逆火が発生せず安全に燃焼が可能である。さらに、低燃焼時(ターンダウン、燃焼負荷33%)でも火炎が大きく形成されるため、都市ガスで使用する汎用的なウルトラビジョン(火炎検

知器) で安定した火炎検知が可能となった。

3.3. WRBG-H₂を用いた水素燃焼実証炉

前述のWRBG-H₂と同時に実用化したI型水素ラジアンチューブバーナを実装させた水素燃焼試験炉を紹介する。装置概略を図12.に示す。

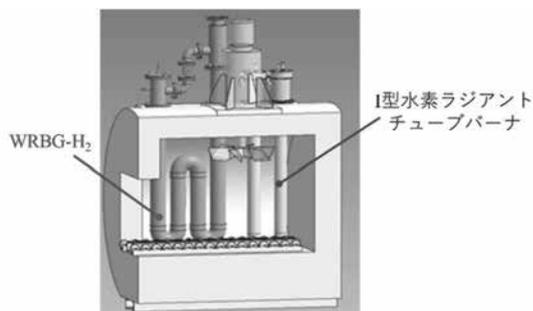


図12. 水素燃焼試験炉概略図

試験炉には、前方にW型RTバーナが左右に2式、後方にI型RTバーナが2カ所×2式=4本が設置されている。当社のスタンダードなハイ・シフターと同じサイズの加熱室(有効寸法610 x 920 x H580 mm)を有し、自動での点火・燃焼・温度制御機能を備えている。

上記設備を用いて、空炉時における昇温能力の確認を行った。常温から浸炭炉の操業温度である940°Cとなるまでの昇温時間を測定した結果、水素燃焼仕様での昇温時間は都市ガス燃焼仕様時と同等となり、燃料の違いによる昇温能力の差異はないことが確認された。

さらに、治具と熱電対を用い、温度分布測定を行った。治具は金属丸棒を用い作った直方体状で、熱電対は直方体の頂点および中心部の9点に設置し、温度分布測定を行った。表3に窒化炉の操業温度である550°Cと、浸炭炉の操業温度である940°Cで測定を行った結果を示す。

表3. 炉内温度分布測定結果

項目	従来13A	H ₂
炉温 550°C時	N/D (データ無し)	巾6.0°C (均熱1時間後)
炉温 940°C時	巾5.1°C (均熱1時間後)	巾9.4°C (均熱1時間後)

※仕様中は各温度 10°C以内

両条件共に均熱後の温度差は従来都市ガス燃焼炉と同等の10°C以内に抑えることができ、従来と同等の温度分布性能を持つことを確認した。温度分布が従来炉より

やや悪化している影響としては、W型とI型が混在している構成の影響が大きいと考えられ、通常では、混在させて使用することはないため、同等の性能を有していると考えられる。

本章で記述した新型WRBG型H₂バーナは、従来の13A用RBG型燃焼器に対する燃焼容量・排出NO_x性能・省エネ性能の3点に対する有利性と、従来品と同等の温度分布性能・安全性、そして従来品からの燃料転換対応性が確認された。燃焼炉に適用した時の使用性も良好であり、実用可能な段階にあることが確認された。このような大容量のW型と小容量のI型での水素適用化により、幅広い用途の金属熱処理炉に対して加熱源の水素燃焼化が可能になったと言える。

4. 水素燃焼式過熱水蒸気発生装置の開発

4.1. 燃焼式過熱水蒸気発生装置の開発経緯

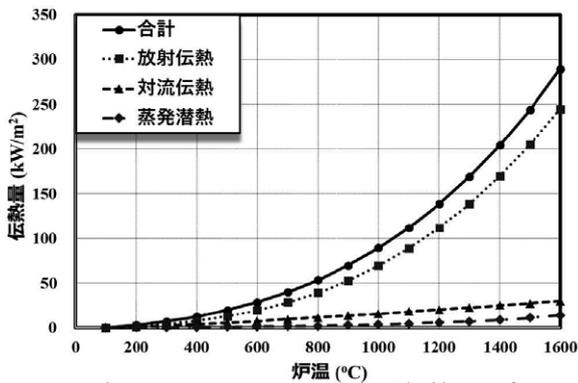
前章で述べた、RTバーナに加え、水素燃焼の利用普及や新加熱用途開発を目指し、当社では、水素を利用した『過熱水蒸気』にも着目し開発を進めている。

過熱水蒸気とは、沸点以上に加熱した水蒸気を指し、2000年代前半には食品の加熱利用でオープンレンジに機能搭載され脚光を浴び、近年では一部の工業用途にも利用されている。一般的に、過熱水蒸気の利用により、酸素濃度が極めて低い状態で、非加熱材を短時間で均一に加熱が可能である。一方で、過熱水蒸気は酸化力が非常に強く、ステンレスであっても600°C前後で酸化してしまう[4] ため、過熱水蒸気発生装置内や炉への導入配管の材料選定が難しい。そのため1000°C以上の過熱水蒸気を発生させる装置の開発は困難とされていた。

このような過熱水蒸気を発生させる過程での問題に対して、当社では水素燃焼技術を用いて解決できないかと考えた。水素：2と酸素：1の当量比で完全燃焼させると、燃焼ガスはH₂Oガスつまり水蒸気のみであり、また水素×酸素燃焼における断熱理論火炎温度は2900°C以上となるため、非常に高温の過熱水蒸気を生成可能である。グラフ3.に過熱水蒸気を用いた際の伝熱計算結果を示しているが、低温域では通常の過熱水蒸気発生装置同様に凝縮潜熱により材料加熱を早め、高温域では水蒸気の高い放射伝熱により加熱が可能である。

本章では、水素と酸素の燃焼により発生する過熱水蒸気を利用した加熱試験装置の概要を紹介するとともに、

装置の性質・材料への効果についても述べる。



グラフ3. 炉温に対する各種伝熱量の変化

4.2. 過熱水蒸気試験装置の構造

過熱水蒸気試験装置の構造および外形を図13.に、燃焼時の炉内写真を図14.に示す。試験装置は図13.の左側から水素バーナ、燃焼室、加熱室の3カ所から構成されている。水素バーナにて水素2：酸素1の割合で燃焼させ、発生した燃焼ガスの過熱水蒸気が燃焼室を通り、加熱室内のワーク (□150mm×50mmH以内) を加熱するという構造である。また、バーナ中心部より水を噴霧することが出来る構造となっており、火炎温度や炉内温度、過熱水蒸気発生量の調整が可能である。さらに、過熱水蒸気は100°C (飽和水蒸気量) 以下になると、たちまち凝縮してし

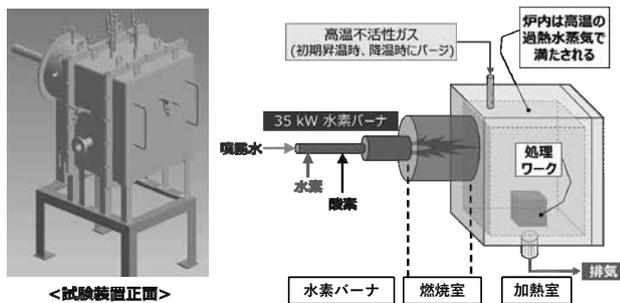


図13. 過熱水蒸気試験装置概略図

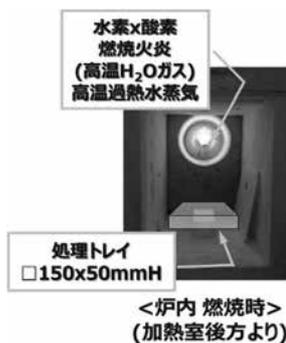


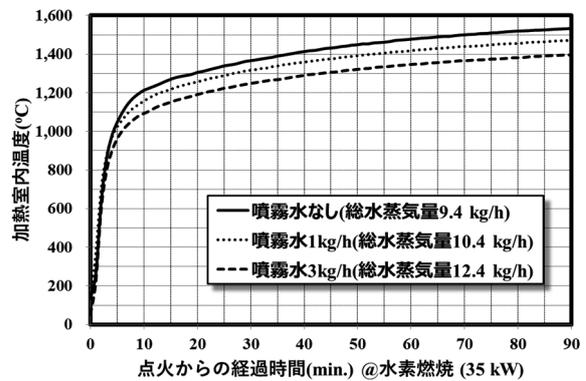
図14. 燃焼時における過熱水蒸気試験装置内写真

まうため、炉の昇温時や材料投入時、加熱終了後の降温時には処理材や炉体・配管にて結露してしまう懸念がある。

そのため、試験装置上部より高温の不活性ガスにて予熱・脱ガス (脱気) し、結露の懸念がある温度帯で過熱水蒸気が炉内に侵入しないような構造とした。

4.3. 過熱水蒸気試験装置の性能

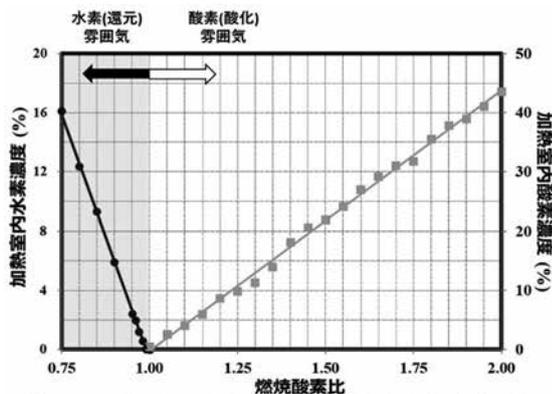
空炉にて炉温および雰囲気ガスの測定を行った結果をグラフ4、グラフ5.に示す。グラフ4.は水素と酸素を35 kWにて燃焼させ、点火からの経過時間に対し炉温を測定した結果、および同様の方法で、燃焼中、バーナ中心部からの水を噴霧した結果を示す。噴霧水の有無に関わらず、点火より5~10分で加熱室内の温度は1000°Cに達し、点火より90分後には噴霧水なしで1532°Cまで、3 kg/hの水を噴霧した際には1396°Cまで昇温した。加熱室内の温度を下げるために燃焼量を減らすと発生する水蒸気量も低下してしまうが、グラフ4.の結果より、水噴霧量の増減を利用し、加熱室内の温度を変えることが可能であるということが分かる。



グラフ4. 経過時間における加熱室内温度の変化

グラフ5.は、炉温1100°C一定で水素バーナの燃焼酸素比を変化させたときの加熱室内水素濃度および酸素濃度を測定した結果である。燃焼酸素比が1.00のときは、当量比で水素：酸素=2：1で燃焼しており、加熱室内の残留水素、残留酸素濃度ともに0%の完全燃焼状態となった。燃焼酸素比が1.00より小さくなればなるほど、水素リッチで燃焼し、1.00より大きくなればなるほど酸素リッチで燃焼する。水素と酸素の流量バランスが完全燃焼時の当量比から大きく外れるとバーナが失火する可能性があり、燃焼酸素比0.75~2.00の範囲内で試験を実施したところ、炉内の水素濃度は0.0~16.1%の範囲で、酸

素濃度は0.0~43.6%の範囲で加熱処理をすることができた。これにより1つの炉で多品種の材料処理行いたい場合や、温度帯によって雰囲気を変化させたい場合（酸化→還元や還元→酸化など）、また、様々な用途での使用が可能となる。



グラフ5. 燃焼酸素比変化時の加熱室内水素/酸素濃度

さらに上記空炉での試験に加え、材料を入れ加熱試験も行った。鋼片に熱電対を付けたものを4個用意し、図15.のように配置、加熱を行った結果をグラフ6.に示す。バーナ側を材料温度1とし、90°間隔で時計回りに材料温度2・3・4、材料温度1の昇温速度は10°C/min.とした。加熱

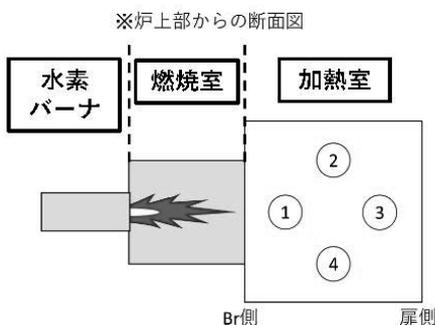
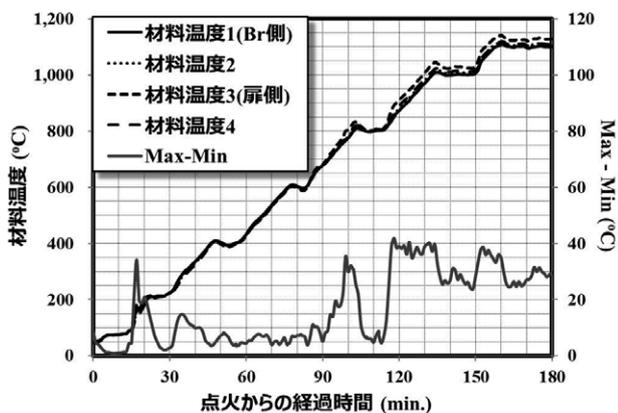


図15. 炉内の材料温度配置図



グラフ6. 経過時間時の材料温度と燃焼量の変化

室内での最高温度と最低温度の偏差は200°Cから600°Cでの昇温時は15°C以下(±8°C以下)、1100°Cでの高温保持時は8°C以下(±4°C以下)と温度分布は非常に良好であり、また800°Cの昇温時は温度差が付くものの、高温保持時は温度分布が600°C以下と同等であるため、昇温速度を下げれば温度偏差15°C以下が可能と考えられる。また800°Cから1100°Cでは昇温時は40°C以下(±20°C以下)、高温保持時は30°C以下(±15°C以下)と高温でも良好な温度分布となった。通常のバーナ加熱では、火炎に近い側の温度が高いが、このような温度分布の向上が見られたのは、水蒸気の均一的に短時間で加熱が可能という点に加え、燃焼室・加熱室を分割した構造としたためであると考えられる。

4.4. 13A都市ガス燃焼による過熱水蒸気発生

4.4.1. 水素と13A都市ガス燃焼の比較

ここまで、水素燃焼により発生させた過熱水蒸気の利点を示してきたが、前述の通り、水素は現時点に於いては汎用可燃ガス(都市ガスなど)と比較して高価な燃料であるため、各社の導入障壁が非常に高いのが現状である。表4に水素と13A都市ガスのコストおよび低位発熱量を比較した結果を示す。

表4. 水素と13A都市ガスのコストおよび燃焼量比較

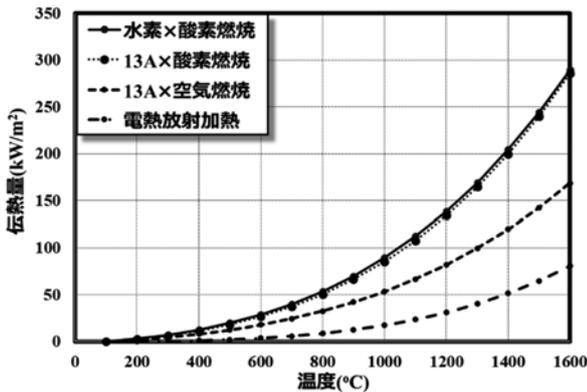
	2020年	2030年	2050年	低位発熱量
水素	100 円/m ³	30 円/m ³	20 円/m ³	10.8 MJ/m ³ N
13A(都市ガス)	60 円/m ³	60 円/m ³	60 円/m ³	40.6 MJ/m ³ N
同燃焼量での燃焼時の水素/13Aコスト	6.3倍	1.9倍	1.3倍	-

現在、13A都市ガスの価格が60 円/m³Nであるのに対し水素は100 円/m³N、また低位発熱量は13A都市ガスが40.6 MJ/m³N、水素が10.8 MJ/m³Nであるため、発熱量等価とした場合の水素のユーティリティーコストは13A都市ガスの6.3倍となる。一方で政府の指針では、水素の価格は2030 に30 円/m³N、2050年に20円/m³N [5]となるため、将来的な水素コストは、13A都市ガスの1.3倍と、漸近していくと予想される。

そこで、13A都市ガス燃焼による過熱水蒸気発生にも着目し検討を行った。13A都市ガスは酸素との燃焼反応により、二酸化炭素(CO₂)と水(H₂O)を生成するため、水素燃焼と比較して水蒸気分圧が下がる。さらに水素燃焼と同様に中心部より水を噴霧することで、火炎温度

や炉内温度、過熱水蒸気発生量の調整が可能である。

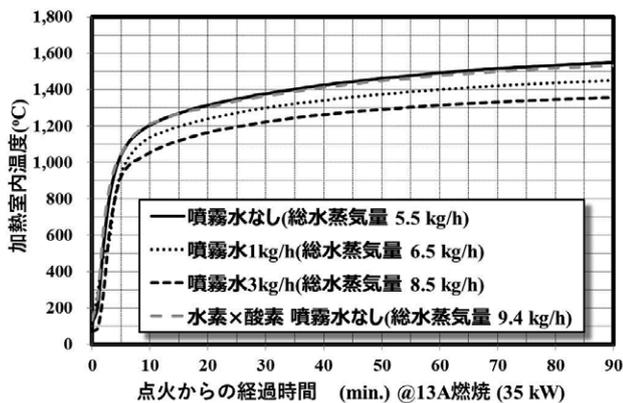
また、グラフ7.に水素燃焼と13A都市ガス燃焼の伝熱量を計算した結果を示す。ここでは水素×酸素燃焼、13A都市ガス×酸素燃焼、13A都市ガス×空気燃焼、電熱加熱の4つの加熱方式について比較を行った。水素×酸素燃焼と13A都市ガス×酸素燃焼の伝熱量はほぼ同等であり、13A都市ガス×空気燃焼の1.5~2.0倍、電熱加熱の3.5~4.0倍熱効率が良い計算結果となった。



グラフ7. 温度変化時の各加熱方法における伝熱量変化

4.4.2. 13A都市ガス燃焼による過熱水蒸気生成

上述の結果を踏まえ、水素と同様に35kWにて13A都市ガスを燃焼させ、点火からの経過時間に対し炉温を測定した。その結果をグラフ8.に示す。



グラフ8. 経過時間における加熱室内温度の変化

点火より5~10分で炉温は1000°Cに達し、点火より90分後には噴霧水なしで1550°Cまで、3 kg/hの水を噴霧した際には1358°Cまで昇温可能であった。水素燃焼と同様に、水の噴霧量によって、加熱室内の温度変化が可能であるということが分かった。また、前章にて計算結果から水素×酸素燃焼と13A都市ガス×酸素燃焼の伝熱量が近

いことを示したが、この試験からも同様の結果が得られた。この結果から、水素×酸素燃焼のように、炉内水素・酸素濃度の調整は不可能であるが、超高温の過熱水蒸気の発生は可能である。次世代材料の試験については、水素燃焼で検討を進め、足下の社会実装化については、13A都市ガス燃焼を利用するなど、用途、目的に応じた使用方法を検討することで過熱水蒸気による加熱技術の利用が拡大していくことを期待する。

4.5. 開発品を用いた試験実施例と今後の展望

最後に、本過熱水蒸気試験装置を用いて行った試験実施例である車載用廃リチウムイオンバッテリー（以下廃LiBと称す）加熱試験と今後の展望について述べる。

図16.に過熱水蒸気にて車載用廃LiBを加熱処理した試験前後の写真を示す。今後、スマートフォンやハイブリッド車、電気自動車などで使用されたLiBの廃棄量増加が予想される中、LiB内に含まれるニッケル、コバルトなどのレアメタルは枯渇資源であり、資源の取れない我が国にとって電池製造上の戦略資源でもあることから、廃LiBからニッケル、コバルトなどを回収、リサイクルし再度LiB製造に利用する動きが注目されている。通常、廃LiBリサイクルを行う工程として廃LiBを放電・簡易解体を行った後、熱処理により無害化し、熱処理済みLiBを破砕・選別処理し、ニッケル、コバルトなどを含む粉末（ブラックマス）を得る『前工程』、ブラックマスから乾式精錬・湿式精錬などによりレアメタルを抽出する『後工程』に大きく分別される。前工程の加熱時、大気中で熱処理を行うと電解液の有機溶剤及びセパレータ樹脂、他付随する樹脂が大気中の酸素と反応し、炉内温度が著しく上昇し制御が困難になる。このような理由から、廃LiBの前工程では、炉内に窒素などの不活性ガスを入れ、炉内酸素濃度を一定以下にして熱処理を行うか、又は、廃LiBを安全に処理できる状態になるまで放電・解体した

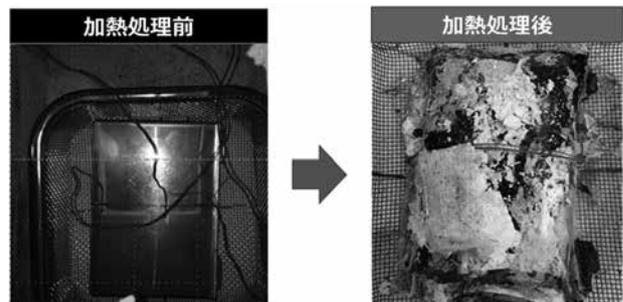


図16. 加熱処理前後における廃LiBの状態変化

後に熱処理をする必要がある。

今回、過熱水蒸気を用いて加熱試験を実施したところ、前工程の破碎処理を行う前まで一貫で安全に熱処理を行うことが可能であると分かった。これは炉内が過熱水蒸気で満たされることで、炉内の残留酸素濃度が1%以下であるが水蒸気による酸化反応が起こり、電解液の有機溶剤やセパレータ樹脂などを自燃させずに処理が可能となったためであると考えられる。また、セパレータ等の炭素分は水との反応で分解され、有価金属のみのリサイクルしやすい形となる。このような800~1000°C付近で起こる炭素と水の反応は、一般的に水性ガス化反応と呼ばれており、石炭のガス化等で利用されている。[5] この反応が利用できることも、水素燃焼での過熱水蒸気発生の利点であると考えられる。

この水素燃焼式過熱水蒸気発生装置を用いることで、CO₂を排出しない環境問題解決の加熱装置としてだけでなく、電池の安全なリサイクルや新規機能性材料の加熱、鋼材の高速昇温、セラミックスの脱脂焼結の一貫処理など、現状の加熱装置ではできないニーズに応える新技術として商品化に向けた開発を加速していくことが期待できる。

5. おわりに

2018年に当社は、トヨタ自動車(株)とともに、世界初の工業用汎用水素バーナを開発に成功した。水素燃焼バーナの構造を専用化することで、水素と燃焼空気中の酸素との混合が緩慢に、かつ、局所的な火炎温度上昇を抑制することが可能となった。また、NO_x生成量も従来の13A燃焼と同等以下にまで低減可能となった。さらに、工業炉の環境負荷低減に向け、この汎用水素バーナの用途開発拡大を目的としてラジアントチューブおよび過熱水蒸気発生装置の開発も行った。水素燃焼式ラジアントチューブバーナの開発においては、従来品と同等の温度分布性能・安全性、そして従来品からの燃料転換対応性が確認された。燃焼炉に適用した時の使用性も良好であり、実用可能な段階にあることが確認できた。水素燃焼後の排ガスが水蒸気のみということに着目した過熱水蒸気発生装置では、水素と酸素の供給比率を変えることで炉内雰囲気を変化・還元雰囲気に振ることが可能な性質を持つことを発見した。いずれの開発も、脱炭素社会の構築に向け大きく前進できると考えている。当社は、

2050年の温室効果ガス実質排出ゼロに向けて、関連技術の研究開発を加速して行く所存であり、本稿で紹介させて頂いた、試験設備はいずれも当社研究所内に設置しており、見学や試験を行うことが可能である。

参考文献

1. 井上雅弘、水素の安全利用、電気設備学会誌:263-266、2016
2. トヨタ自動車株式会社ニュースリリース
<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/25255692.html>、2018年11月8日
3. 中外炉サーモテックニュース Vol.03 (2020年3月)
https://chugai.co.jp/wp/wp-content/uploads/2019/12/CRTTN_03.pdf
4. 諸石 大司; '防食技術'、25、97-104(1976)
5. 経済産業省 「今後の水素政策の課題と対応の方向性中間整理(案)」 2021年3月22日
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/025_01_00.pdf
6. 森田 義郎; '燃料協会誌'、53、564、(1974)
『ハイ・シフターは中外炉工業の登録商標です』

筆者紹介

1. 川崎 久志 (KAWASAKI Hisashi)
中外炉工業株式会社 商品開発部 開発探索課
<https://chugai.co.jp/> Email: hisashi_kawasaki@n.chugai.co.jp
[趣味] 鉱物収集、旅行
2. 池田 勇 (IKEDA Isamu)
中外炉工業株式会社 プラント事業本部
サーモシステム事業部
Email: isamu_ikeda@n.chugai.co.jp
3. 朝山 雄介 (ASAYAMA Yusuke)
中外炉工業株式会社 熱処理事業本部 開発部
Email: yuusuke_asayama@n.chugai.co.jp
4. 柳谷 貴哉 (YANAGITANI Takaya)
中外炉工業株式会社 熱処理事業本部 開発部
Email: takaya_yanagitani@n.chugai.co.jp
5. 神戸 寿夫 (KAMBE Toshio)
中外炉工業株式会社 商品開発部 開発探索課
Email: toshio_kambe@n.chugai.co.jp
6. 友澤 健一 (TOMOZAWA Kenichi)
中外炉工業株式会社 商品開発部
Email: kenichi_tomozawa@n.chugai.co.jp