

# 水素燃焼式過熱水蒸気発生装置の 開発と工業利用

川崎 久志\*  
明賀 法之\*\*  
神戸 寿夫\*\*\*

## 1. はじめに

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CO<sub>2</sub>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月に菅前首相が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CO<sub>2</sub>排出抑制への動きはますます活発になってきている。

そのような中、CO<sub>2</sub>を排出しない燃料の1つとして水素が注目されている。弊社でも、2018年11月にトヨタ自動車株式会社殿と共に、工業用汎用水素バーナを開発した。しかしながら、現時点に於いては水素製造コストが非常に高価であること、また、漏洩・爆発防止などの観点から、水素を日常的に利用していないユーザーには、化石燃料（石油、都市ガス、LPGなど）からの燃料転換が加速的に進んでいないのが現状である。そこで、水素燃焼の利用普及や新加熱用途開発を目指し、弊社では、水素を利用した『過熱水蒸気』に着目した。

過熱水蒸気とは、沸点以上に加熱した水蒸気を指し、2004年頃に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、非加熱材を均一に短時間で加熱することが可能である。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℃前後で酸化してしまう<sup>1)</sup>ため、過熱水蒸気発生装置内や炉への導入配管の鋼材選定が難しい。そのため1000℃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、筆者ら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H<sub>2</sub>O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計算上2900℃以上となるため、非常に高温の過熱水蒸気を生成することが可能である。なお、断熱理論火炎温度とは、外部

---

\* 中外炉工業株式会社 商品開発部 開発探索チーム 主任 H.Kawasaki E-Mail : hisashi\_kawasaki@n.chugai.co.jp  
\*\* 同 同 主任 N.Myoga  
\*\*\* 同 同 課長 T.Kambe

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。

本稿では、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ていく。

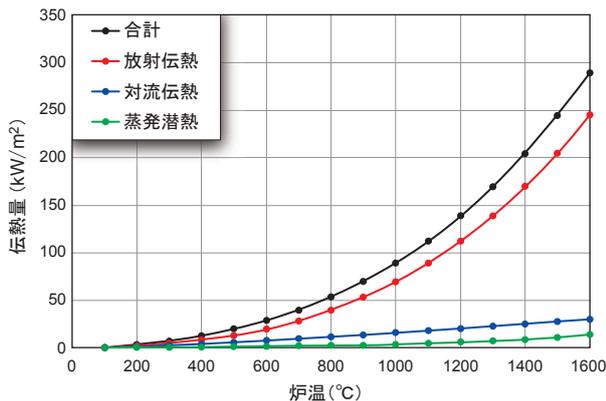


図1 炉温に対する各種伝熱量の変化

## 2. 水素燃焼での過熱水蒸気発生について

### 2.1 過熱水蒸気試験装置の構造

過熱水蒸気試験装置の構造及び外形を図2に、燃焼時の炉内写真を図3に示す。試験装置は図2の左側から水素バーナ、燃焼室、加熱室の3カ所から

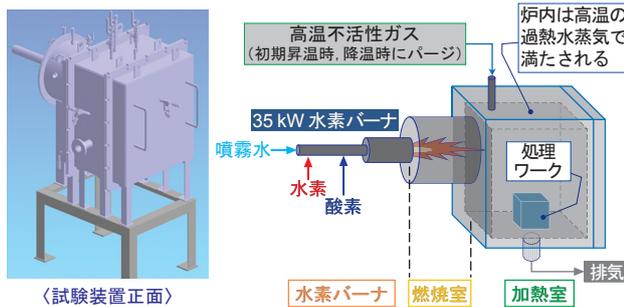


図2 過熱水蒸気試験装置概略図

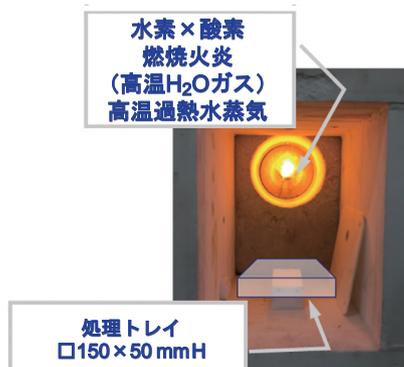


図3 燃焼時における過熱水蒸気試験装置写真

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（□150 mm × 50 mm H 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℃以下になると、たちまち凝縮してしまうため、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。

### 2.2 試験装置の性能

空炉にて炉温及び雰囲気ガスの測定を行った結果を図4, 5に示す。図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及び同様の方法で、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℃に達し、点火より90分後には噴霧

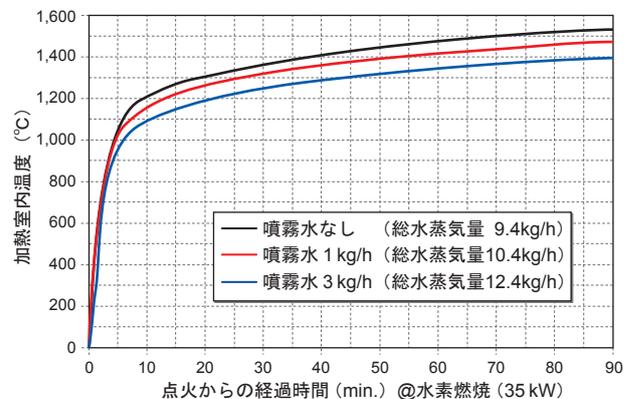


図4 経過時間における加熱室内温度の変化

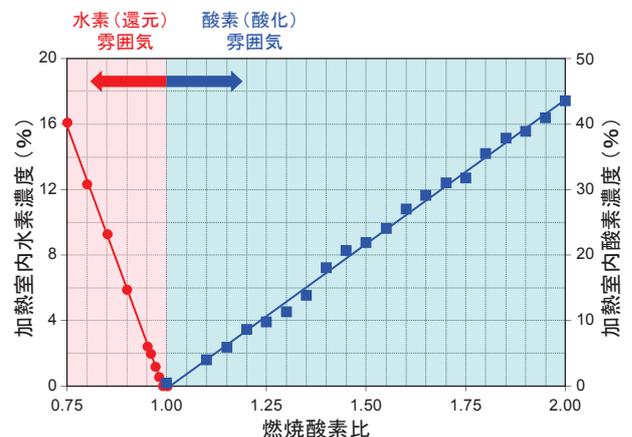


図5 燃焼酸素比の変化による加熱室内水素・酸素濃度

水なしで1532℃まで、3kg/hの水を噴霧した際には1396℃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、図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った。

図5は、炉温1100℃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及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。

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。鋼材片に熱電対を付けたものを4個用意し、図6のように配置、加熱を行った結果を図7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℃/minとした。加熱室内での最高温度と最低温度の偏差は200℃から600℃での昇温時は15℃以下(±8℃以下)、800℃での高温保持時は8℃以下(±4℃以下)と温度分布は非常に良好であり、また800℃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℃以

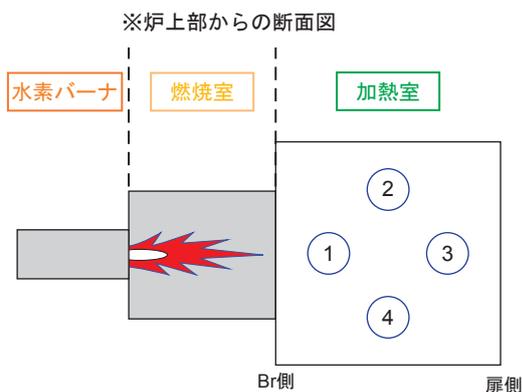


図6 炉内の材料温度配置図

下と同等であるため、昇温速度を下げれば温度偏差15℃以下が可能と考えられる。また800℃から1100℃では昇温時は40℃以下(±20℃以下)、高温保持時は30℃以下(±15℃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、水蒸気による均一かつ短時間で加熱することが可能という特性に加え、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。

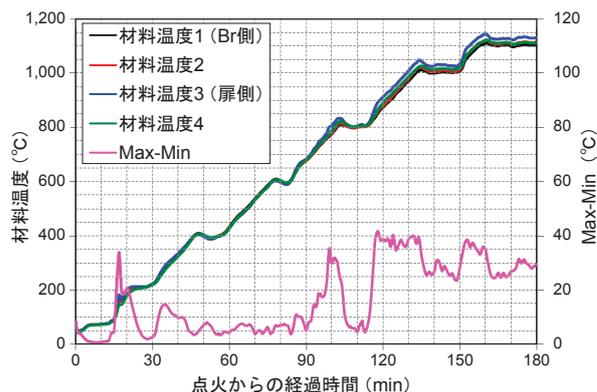


図7 経過時間における材温と燃焼量の変化

### 3. 13A 都市ガス燃焼の過熱水蒸気発生について

#### 3.1 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1に水素と13A都市ガスのコスト及び低位発熱量を比較した結果を示す。現在13A都市ガスの価格が60円/m<sup>3</sup><sub>N</sub>であるのに対し水素は100円/m<sup>3</sup><sub>N</sub>、また低位発熱量は13A都市ガスが40.6MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>、水素が10.8MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>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クストは13A都市ガスの6.3倍となる。一方で政府の目標では、水素の価格は2030年に30円/m<sup>3</sup><sub>N</sub>、2050年に20円/m<sup>3</sup><sub>N</sub>となるため、この場合水素の

表1 水素と13A都市ガスのコスト及び燃焼量比較

	2020年	2030年	2050年	低位発熱量
水素	100円/m <sup>3</sup>	30円/m <sup>3</sup>	20円/m <sup>3</sup>	10.8MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
13A(都市ガス)	60円/m <sup>3</sup>	60円/m <sup>3</sup>	60円/m <sup>3</sup>	40.6MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
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	—

今後の水素政策の課題と対応の方向性 中間整理より  
2021年3月22日  
経済産業省 資源エネルギー庁 新エネルギーシステム課/水素・燃料電池戦略室

実質コストは、13A 都市ガスの 1.3 倍と、ほぼ同等となる。<sup>2)</sup>

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 都市ガスは燃焼すると、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) と水 (H<sub>2</sub>O) を生成するため、水素燃焼と比較して水蒸気の分圧が下がる。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、図 8 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。

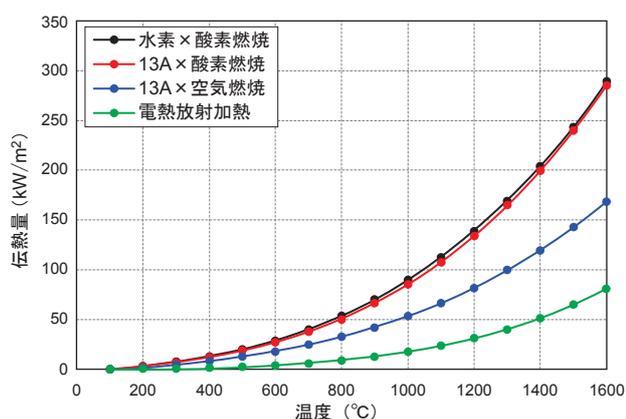


図 8 温度変化による各加熱方式における伝熱量の変化

### 3.2 13A 都市ガス燃焼による過熱水蒸気生成

上記の結果を踏まえ、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。その結果を図 9 に示す。点火

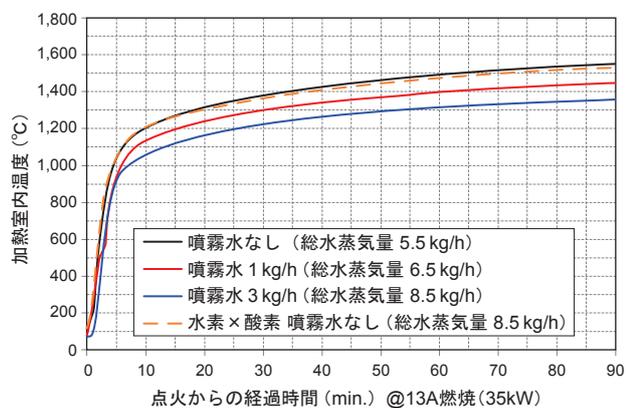


図 9 経過時間における加熱室内温度の変化

より 5～10 分で炉温は 1000℃ に達し、点火より 90 分後には噴霧水なしで 1550℃ まで、3kg/h の水を噴霧した際には 1358℃ 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×酸素燃焼の伝熱量に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. 試験実施例と今後の展望について

最後に、この過熱水蒸気試験装置を用い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 10 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りチウムイオン電池 (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活発化している。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 を破碎・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

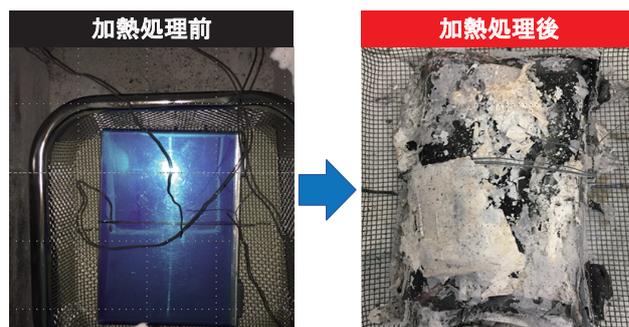


図 10 加熱処理前後における廃 LiB の状態変化

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、または、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手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℃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。<sup>3)</sup> 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特長であると考えられる。

この燃焼式過熱水蒸気発生装置は水素と酸素を燃料として利用しているため、CO<sub>2</sub>を排出しない脱炭素の加熱装置である。今後、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。

#### — 参考文献 —

- 1) 諸石 大司：防食技術，25，97-104（1976）
- 2) 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](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/025_01_00.pdf)
- 3) 森田 義郎：燃料協会誌，53，564，（1974）