

(解説)

「ハイブリッド型水素ガス供給システム」によるボイラ・工業炉での水素利活用

今用浩司^{*1}・田中孝二^{*2}・香川公伸^{*3}・松岡 亮^{*4}(博士(工学))・村上和希^{*4}・藤澤彰利^{*4}(博士(工学))

Hydrogen Utilization in Boilers and Industrial Furnaces Using Hybrid Hydrogen Gas Supply System

Hiroshi IMAYO・Koji TANAKA・Kiminobu KAGAWA・Dr. Akira MATSUOKA・Kazuki MURAKAMI・Dr. Akitoshi FUJISAWA

要旨

脱炭素手段としてCO₂フリー水素が注目されている。水素社会への過渡期において、大規模な水素供給インフラが整備されるまでは、オンサイトで再エネ電力を使って水素を製造し、その場で利用する「地産地消型の水素利活用」が現実的である。しかし、再エネ電力は安定確保に課題がある。そこで、当社では安定した水素供給を実現するため、「再エネ電力由来の水素」と「貯蔵した液体水素」の二つの水素供給源を併せ持った「ハイブリッド型水素ガス供給システム」の開発、実証を進めている。

また、水素を利用する設備においては、既存設備の大規模な改造や更新を行うのではなく、既存設備を最大限活用しながら燃料転換することが現実的である。

このように水素社会への過渡期においては、水素の供給側と利用側の双方の視点で現実的な水素供給・利用の始め方を考えていくことが重要であり、当社高砂製作所において、水素の製造、供給から、ボイラおよび加熱炉での水素利用までの一連の実証を進めることで、水素社会実現への貢献を目指している。

Abstract

CO₂-free hydrogen is attracting attention as a decarbonization measure. In transitioning to a hydrogen society, the use of hydrogen in a local production for local consumption model, utilizing electricity derived from renewable sources for on-site production and utilization of hydrogen, is a realistic solution until a large-scale hydrogen supply infrastructure is established. However, electricity derived from renewable sources faces the challenge of ensuring a stable hydrogen supply. To counter this, Kobe Steel is developing and demonstrating a hybrid hydrogen gas supply system that combines two hydrogen supply sources: hydrogen derived from renewable energy sources and stored liquid hydrogen.

In addition, it is more realistic for facilities that use hydrogen to convert fuel while making the most of existing equipment rather than undergoing large-scale modifications or renovations. Therefore, in transitioning to a hydrogen society, it is important to consider how to start a realistic hydrogen supply and utilization system from the perspectives of both hydrogen suppliers and users. Kobe Steel's Takasago Works strives to realize a hydrogen society by demonstrating a series of steps, from hydrogen production and supply to hydrogen use in boilers and heating furnaces.

検索用キーワード

水素、水電解式水素発生装置、液化水素気化器、運転マネジメントシステム

ま え が き = 2020年10月、日本政府は、2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロとする「カーボンニュートラル」を目指すことを宣言した。さらに、2023年6月には「水素基本戦略」が改訂され、水素の社会実装に向けた方針や、水素産業の競争力強化に向けた方向性が示された¹⁾。同戦略では、水素の供給コスト目標として、2030年に30円/Nm³、2050年に20円/Nm³が設定されている。また、これまでの取り組みとして、豪州において水素の製造が進められ、2022年2月には世界初の液体水素運搬船による日本への大規模海上輸送が成功を収めた。

現在、国内に供給される一次エネルギーの約90%は化石資源に依存しており、その約40%は熱エネルギーとして消費されている。さらに、その熱エネルギーの約40%が産業部門で使用されており、カーボンニュートラ

ル(CN)の実現には、電力の脱炭素化に加え、熱エネルギーの脱炭素化も重要な課題となっている。熱エネルギーの脱炭素化の手段の一つとして、CO₂フリー燃料への転換が求められている。本稿では、CO₂フリー燃料として現時点において有望と考えられている水素に着目し、1章にて着目した理由を後述する。CO₂フリーな水素としては、再生可能エネルギー由来の電力を用いて、水電解式水素発生装置(以下、水電解装置)で製造される「グリーン水素」や、炭化水素系の化石燃料を改質して製造された水素のうち、製造時に発生したCO₂を回収、貯留または再利用することでCO₂排出量を抑えた「ブルー水素」がある。しかし、グリーン水素については国内の再エネ電力が普及の途上であるため、確保できる量が限られ、調達も容易ではない。また、都市ガスなどの既存燃料と比較して大幅にコストが高いのが現状である。

^{*1} 機械事業部門 新事業推進本部 新事業企画部(現 機械事業部門 技術本部 回転機・機器技術部) ^{*2} 事業開発部

^{*3} エンジニアリング事業部門 新規事業推進室 ^{*4} 技術開発本部 機械研究所

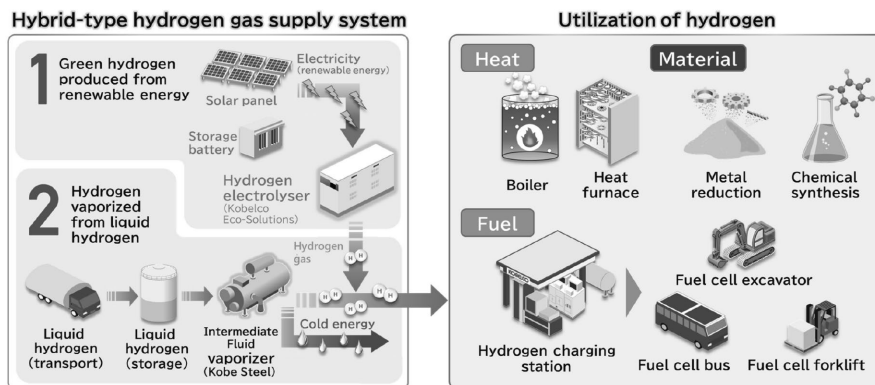


図1 ハイブリッド水素ガス供給システム
Fig.1 Hybrid-type hydrogen gas supply system

ブルー水素については前述の豪州の取り組みの様に、海外から液体水素として安価で国内に輸入されることが期待されているが、2030年代以降と予測されている。したがって、エネルギーの安定供給が求められる産業部門においては、現時点で供給インフラが整備されていないCO₂フリー水素への燃料転換は容易ではない。

そこで本稿では、水素供給、利用を段階的に拡大していく具体的な方策として、図1に示すとおり、まずはオンサイトでの水電解装置による再エネ電力由来のグリーン水素製造から開始し、液体水素（グリーン水素またはブルー水素）の安定、安価な調達が可能となった段階から、液体水素を併用していくハイブリッド型水素ガス供給システム（2章）を提案する。

当社高砂製作所（兵庫県 高砂市）では、鋳鍛鋼・チタン・鉄粉などの素材系事業とエネルギー関連機器などの機械系事業の生産拠点であるため、多数のボイラや加熱炉で消費している化石燃料のCO₂フリー燃料への転換が求められるいっぽう、お客様の脱炭素に貢献できる製品・技術の提供も求められている。そこで、当社と、(株)神鋼環境ソリューション、(株)コベルコE&Mの技術と製品を組み合わせ、水素を「使う」側と「創る」側が連携した水素利活用の検討および実証試験を進めている²⁾。

1. 高砂製作所における水素利活用ポテンシャル

多くの企業でCO₂削減の取り組みが始められており、オンサイトPPA「Power Purchase Agreement」（需要家の敷地内に第三者である発電事業者が太陽光発電設備を導入し、需要家が発電事業者から消費電力量に応じた電気料金を支払う）を活用した再エネ電力の導入といった「電力のCN化」は検討が進んでいる。しかし、800℃～900℃以上の高温域で使用される工業炉では、電化は炉内循環用のRCファンの耐熱性などにより困難であるため、「熱エネルギーのCN化」においては、水素やアンモニアなどのCO₂フリー燃料への燃料転換が脱炭素の有効な手段の一つになる。

現時点でどのCO₂フリー燃料が優位になるか見極めることは困難であるが、「①水素はバーナ開発が先行し、水素ガス焚きボイラが商品化されていること」、「②水素は燃料用途以外にも様々な用途に使用できること」、「③

水素は多様な調達先（国内の再エネ電力由来の水電解水素、海外から調達するブルー水素またはグリーン水素、国内の副生水素など）から確保できるため、エネルギーセキュリティの安定化に寄与できること」、「④アンモニアは毒性ガスのため臨海地にある発電所など人を隔離できる場所では使用できるが、内陸地の工場では漏洩した場合のリスクが高く、MCHは水素を取り出すために大量の熱エネルギーが必要」の4点の理由から、産業部門においては水素による燃料転換に取り組むことが現時点においては有望と考えられる。

当社高砂製作所は、素材系および機械系事業の多種多様な工場があり、燃焼容量および稼働パターン（連続運転や間欠運転、運転時の負荷変動など）の異なるボイラ、加熱炉を100基以上運用している。多拠点かつ多種多様な水素の利活用先を対象とした水素供給、利活用モデルの検討結果は、自社のCN化に貢献するだけでなく、国内での様々な業種の工場のCN化の検討に寄与することが期待できる。そこで、稼働中のボイラ、加熱炉、金属還元設備、産業車両などの現在のエネルギー需要をベースに、各設備でのCO₂フリー水素（アンモニア、MCHなどの各種水素キャリアを含む）の利活用ポテンシャルを把握するとともに、CO₂フリー水素の調達・貯蔵・供給・利用の一連のモデル設定および必要な費用の概算を行い、水素利活用拡大に向けた課題の抽出と解決方針の検討を行った。³⁾

試算の結果、アンモニアは水素キャリアの調達と需要家受入設備の費用が最も低く、水素利活用モデルの総費用も最安となることが示された。ただしアンモニアは、前述のとおり内陸地の工場ではリスクがある。いっぽう、液体水素はアンモニアと比較して輸送や貯蔵の技術成熟度が低いものの、将来的なコストダウンの余地が大きいと考えられ、アンモニアと液体水素の費用差は縮小する可能性がある。最適な水素キャリアを選択するためには、工場が立地する地域の水素キャリア導入方針も重要なポイントとなる。水素サプライチェーン構築の検討が進んでいる神戸・関西圏に位置する当社高砂製作所においては、将来の水素供給網の拡大を見据え、水素による工場の熱エネルギーの燃料転換に向けた検討を進めている。

2. 水素を創る

水素の供給方法は、水素の需要規模、需要パターンおよび燃料転換の程度に応じて適切に選択する必要がある。例えば、数台の燃料電池式フォークリフトへの水素供給であれば、水素カードルを用いた供給で十分と考えられる。いっぽう、ボイラや加熱炉の燃料として利用する場合、水素ガスパイプラインによる供給体制、液体水素サテライト基地（液体水素を貯蔵し、必要に応じて工場へ供給する設備）などの大規模供給設備の設置が必要となる。しかし、水素価格が高く、供給インフラが不十分な黎明（れいめい）期では、水素を利用する工場は限定的であると考えられる。水素需要が小規模な段階では、大規模な水素製造設備や供給設備の構築が進まず、供給インフラのコストダウンも進まないため、水素への燃料転換が停滞する可能性がある。したがって、中長期的な視点で燃料転換を推進するためには、水素需要の創出と水素供給インフラの構築を連携させ、段階的に水素需要を拡大していくことが水素サプライチェーンの確立において重要となる。

現在、国内で入手可能な液体水素はLNGを改質して製造されたグレー水素のみであり、海外から安価なCO₂フリー水素が本格的に輸入されるのは2030年代以降と予測されているため、水素供給網の整備が進み内陸部での利用が可能になるまでには、さらに時間を要すると考えられる。それまでの水素利用導入期においては、水電解装置と太陽光発電などの地域の再エネ電力を活用し、オンサイトでグリーン水素を製造・利用する「水素の地産地消」が現実的な選択肢となる。また、オンサイトの水素製造設備は、電力需要に対して余剰となった再エネ電力を水素に変換し貯蔵、利用できるため、地域同一性・時間同時性が求められる再エネ電力の調整力としても期待できる。

また、時間経過とともに水素利用量が増加してきた際に、再エネ電力由来の水素だけでは供給が不足し液体水素の併用が必要になると考えられる。将来的に海外からCO₂フリーの液体水素が輸入されるようになっても、各工場が個別に液体水素の貯蔵、気化、供給設備を保有することは多大な費用負担となり、導入が進まない可能性が高い。そこで、複数の工場や工業団地で共有の液水設備を導入することで個々の企業の負担を軽減でき、水素利用の拡大が期待されると考えている。

以上のように、水素サプライチェーンの構築に向けては需要拡大と供給設備構築の歩調を合わせて進めていくことが重要であり、まずは地域の再エネ電力を活用した水電解によるオンサイト水素製造・利用を行い、不足する水素は国内グレー水素などの液体水素で補完、将来的に液体水素には国内外のグリーン水素へと切り替えていく方針が水素導入期には有望である。本章では、このような水素導入期における水素供給を見据えた「ハイブリッド型水素ガス供給システム」の概要、構成する製品・技術について紹介する。

2.1 「ハイブリッド型水素ガス供給システム」の概要

当社では、“再エネ電力由来の水電解による水素製造プロセス”と“貯蔵した液体水素の気化プロセス”の二つの供給システムを併せ持ち、2システムをつなぎ合わせ最適に制御するための“運転マネジメントシステム”を有する「ハイブリッド型水素ガス供給システム」を考案し、技術開発および実証試験を行っている⁴⁾。本システムは、水素利用が普及し始める期間（導入期）および水素利用が拡大する期間（拡大期）の両フェーズに対応できる水素供給プロセスと考えており、以下に当社が想定している水素供給プロセスの導入モデルを示す。

まず、導入期ではCO₂フリーの液体水素が安定・安価に供給されていないため、再エネ電力にてCO₂フリーな水素が製造できる水電解装置からの水素供給となる。そのうえで、工場の安定操業が最優先事項であるため、導入期では水電解装置の信頼性と運用のしやすさが特に重要となる。また、水電解装置の運転に必要な電力については、オンサイトの再エネ電力は天候に左右され不安定であるため、再エネ電力が電力需要に対して余剰となる場合には蓄電池に充電し、再エネ電力が電力需要に対して不足する場合には系統からの電力（再エネ証書付き電力や安価な時間帯の電力）を受電することが重要となる。そこで、水電解装置にて再エネ電力を最大限活用しながら、安定かつ安価に電力を確保する電力制御機能を有する“運転マネジメントシステム”開発を進めており、2.1.3項にて後述する。

拡大期では、CO₂フリーの液体水素の供給が開始されているため、工場の水素利用率拡大に伴う設備増強において、既設の水電解装置由来の水素に加え液体水素を併用する水素供給システムにアップグレードさせる。貯蔵しておくことで供給量の調整が容易な液体水素を併用することにより、水電解装置から供給されるCO₂フリー水素の不安定性を解消する。また、液体水素の気化時に発生する冷熱を工場内設備冷却や空調、ヒートポンプなどに利用できるため、お客様のプロセス効率向上・省エネルギー化にもつながる。加えて、水電解装置由来の水素と液体水素を併用することで、海外から調達する液体水素だけでなく、水電解装置の水素は国内で生産されたエネルギーにて国内で製造しているため、地域のエネルギーセキュリティの強化にも寄与できる。

水電解装置由来の水素と液体水素を併用するうえで、水素ガスの需要量に対する両者の供給量のバランスが重要となる。そこで、水電解装置へ供給する系統電力の単価、液体水素の単価、CO₂排出量原単位に応じて、ランニングコストもしくはCO₂排出量をお客様のニーズに合わせ、選択的に最小化し得る制御機能についても“運転マネジメントシステム”の機能として開発を進めている。

図2に示すハイブリッド型水素ガス供給システムの実証設備を2023年3月に完成させ、実証試験を進めている。図3に本実証設備のフロー図を示す。水電解装置には、(株)神鋼環境ソリューション製のHHOG[®]（2.1.1項にて詳述）を導入し、液体水素気化器には当社の中間媒体式気化器（2.1.2項にて詳述）を導入した。また、再

エネ電力設備としては、太陽光発電設備（2.1.1項にて詳述）および蓄電池を設置した。加えて、本実証設備は水素ステーション建設の実績を通して各種水素関連設備のノウハウを有する(株)コベルコE&MがEPC（プラント設計・設備調達・建設）を担った。次に本システムを構成する主要機器と運転マネジメントについて述べる。

2.1.1 再生可能エネルギーを活用した水電解装置

(株)神鋼環境ソリューションでは、固体高分子電解質膜を用いた水電解装置 HHOG[®]（High-purity Hydrogen and Oxygen Generator）の技術開発に取り組んできた。

これまで電子産業や金属工業等の製造工場といった産業用プロセスガス用途を中心に納入してきたが、近年CN化の手段として太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを用いて製造された水素の利用が注目されており、水素ステーションや燃料電池、水素ボイラといったエネルギー用途としても幅広く活用されるようになってきている。

水電解装置の稼働にはユーティリティとして水道水、電気のほかに、窒素ガス、冷却水、計装用圧縮空気の使用されるが、これらのユーティリティが設置場所周辺にない場合には、水電解装置に加えてユーティリティ設備の導入が必要となり、お客様にとって障害となっていた。そこで、必要なユーティリティのうち、水道水と電気以外を不要とした「オールインプラン機」を2023年3月に商品化している。

詳細な内容については、本号p.50「HHOGユーティリティレス機「オールインプラン」の開発」をご参照いただきたい。

だきたい。

単独の試運転評価を終えた「オールインプラン機」の実証機は、当社高砂製作所に移設後、ハイブリッド水素ガス供給システムの実証に活用している。また、夏場および冬場での健全性を確認するため、現在も長期運転を継続するとともに、導入を検討されているお客様に太陽光電力で運転している様子を見学いただく場としても活用している。

本実証設備に導入した太陽光発電設備は、公称最大出力が105 kWであり、水電解装置の実証機のフル負荷消費電力50 kWの約2倍の出力とした。太陽光発電量は、図4に示す本実証で得られた運転実績のとおりに、パネルの設置状況、日射量、日射角度の影響により日中に大きく変動するため、夜間や曇天等で発電できる時間が限られるいっぽうで、晴天時のピーク出力が非常に高くなってしまった。したがって、水電解装置のフル負荷消費電力を太陽光発電の最大出力より低く設定することで、発電量が少ない時間帯にも再生可能エネルギーの利用割合を高めることができる。

前述のとおりに、水電解装置のフル負荷消費電力を太陽光発電の最大出力より低く設定しているため、晴天時には水電解装置の必要電力を上回り、余剰電力が発生するいっぽう、曇天時には発電量が大きく低下し、水電解装置の必要電力を下回ることがある。また、日射角度が低くなる冬には、太陽光パネルへの照射角度が悪くなり、発電量が全般的に低下する。このように、太陽光発電は季節や天候の影響を受けやすく、水電解装置にとって不

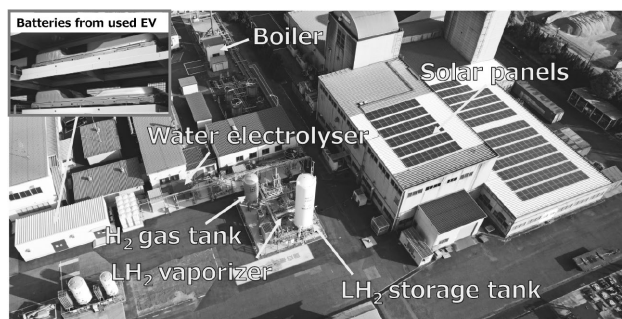


図2 ハイブリッド水素ガス供給システム実証設備（高砂製作所）
Fig.2 Hybrid-type hydrogen gas supply system demonstration facility (Takasago works)

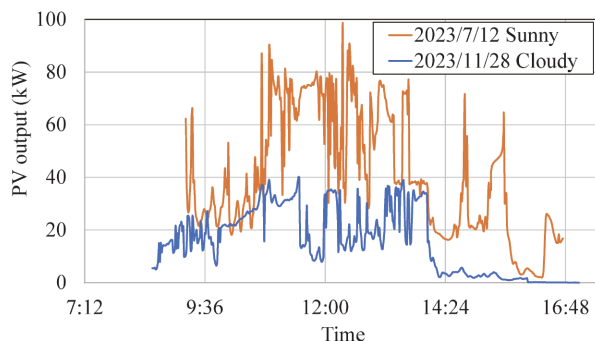


図4 太陽光発電量の代表例
Fig.4 Typical examples of solar power production

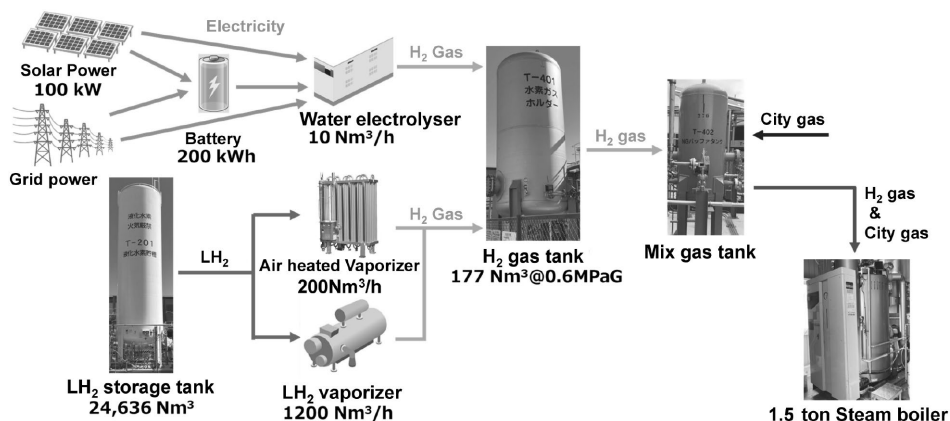


図3 実証設備の概要
Fig.3 Overview of demonstration facility

安定な電力供給源である。そのため、前述のとおり、不安定な太陽光発電を時間帯や天候に応じて蓄電池や系統電力でバックアップすることに加え、液体水素気化プロセスも併用し安定、安価かつ低炭素な水素を供給することが重要となる。上記を実現するための制御システムである“運転マネジメントシステム”（2.1.3項）で説明する。

2.1.2 中間媒体式の極低温液体水素気化器

グリーンイノベーション基金事業「大規模水素サプライチェーンの構築」において、CO₂フリー水素の海外からの輸入が検討されている。水素は気体状態では密度が非常に小さいため、ガスの状態では輸送に不向きであり、-253℃で液化して気体状態の1/800の体積に縮小した液体水素での海上輸送が検討されている。輸入された液体水素は真空二重保冷された液体水素貯蔵タンクに貯蔵され、需要に応じて気化して供給される。水素ガスの液化には多くの電力が使用されており、気化時に冷熱として回収、利用することができれば、省エネ、CO₂削減に寄与することができ、水素発電などで大量に使用されるようになれば、液体水素の冷熱回収・利用は必須と考えられる。

液化天然ガス（LNG）気化器のトップメーカーである当社は、国内外へ多数の納入実績があり、気化時の冷熱回収に適した中間媒体式気化器（IFV：Intermediate Fluid type Vaporizer）をラインナップしている。

そこで、当社ではLNG気化器で培った技術を活用したIFV方式の液体水素気化器を国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業において開発した⁵⁾。詳細な内容については、本号p.54「3タイプの液化水素（LH₂）気化器における実証試験の紹介」をご参照いただきたい。

2.1.3 水素を“創る・使う”を監視制御する運転マネジメントシステム

運転マネジメントシステムは、3種類の電力供給源（太陽光発電、蓄電池、系統電力）を持つ水電解装置にて製造した水素ガスと液体水素を気化した水素ガスの供給量のバランスを制御するとともに、水電解装置への電力供給を制御することにより、CO₂排出量および水素の供給コストを抑制し、かつ2系統の水素供給源が水素需要に対して補い合うように制御することで、水素ガスを安定的に供給させるシステムを目指している。インプット情

報（翌日の需要量、天候、原単位、運転モードなど）から事前に作成した供給計画（水電解装置への電力供給バランス、水素製造量、液体水素の気化量など）をもとにした自動運転制御、運転監視を行うシステムの構築を進めている。以下に、実証を完了した内容および今後の開発内容について述べる。

水電解装置を供給計画に沿って運転するために必要な電力供給バランスを制御するシステムについて実証を行い、図5に水電解装置での運転結果を示す。2.1.1項で示したとおり、水電解装置のフル負荷消費電力（50 kW）を太陽光発電の最大出力（105 kW）より低く設定しているため、本実証設備では、水電解装置の電力需要に対して太陽光発電量が余剰となった際には蓄電池に貯蔵でき、太陽光発電量が不足となった際には蓄電池から放電してバックアップ供給ができ、それでも不足する場合は系統電力から電力供給し得るシステムを構築した。これにより、不安定な再エネ電力を蓄電池および系統電力で補い、水電解装置に供給する電力を安定化させることができる。また、水電解装置に供給する電力（太陽光発電、蓄電池、系統電力）の優先順位を手動で選択できる機能を導入しており、再エネ電力を優先的に使うことでCO₂削減量を最大化する運転が基本となるが、電力が安価な時間帯においては系統から安価な電力を優先的に供給する運転を選択可能とした。図5に示すとおり、余剰電力が発生する時間帯は蓄電池に蓄電し、水電解装置への供給電力が太陽光電力だけでは不足する時間帯は第二優先の蓄電池から放電している。さらに、蓄電池残量が下限値を下回れば第三優先の系統電力からも受電し、安定的に水電解装置を定格運転していることが分かる。

運転監視システムについても実証を行い、図6に示すとおり、水素の製造・貯蔵・供給の状況をリアルタイムで監視できる画面を実証設備に導入した。また、供給した水素のCO₂排出量とコストを計算し、日報や月報の形で出力も可能とした。これにより、水素供給プラントのCO₂排出量のモニタリングを簡易化し、コスト構造（系統電力価格、液体水素価格など）の明確化による水素の普及、拡大に応じた水電解設備、液水設備、再エネ設備等の設備投資におけるデータに基づいた意思決定を可能とする。

今後は供給計画作成機能の実証を計画しており、「CO₂

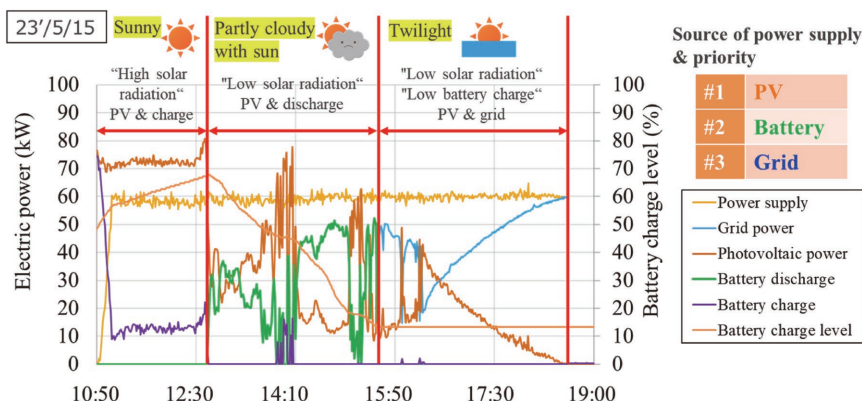


図5 水電解装置への電力供給の一例
Fig.5 Examples of power supply to electrolyser

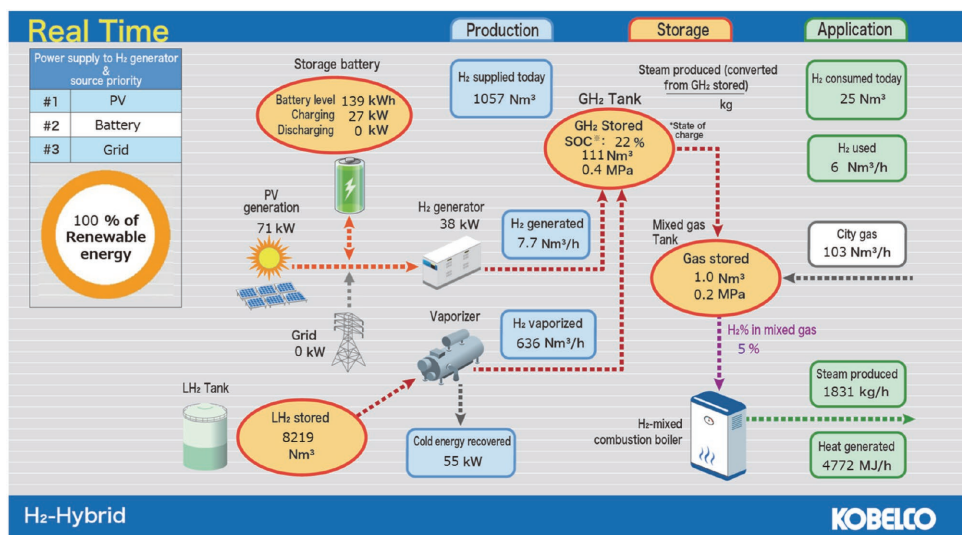


図6 運転マネジメントシステム リアルタイム画面
Fig.6 Real time monitor of operation management system

削減効果優先モード」と「コスト優先モード」から選択されたモードに応じて、事前にインプットされた水素ガス需要の計画値から水素供給計画を自動計算し、水素供給設備を自動制御する機能の開発を進めている。水素供給計画を作成する機能には、日射量予測データに基づく太陽光発電量予測技術を用いた蓄電池の充放電量の計画値を算出する機能を組み込むことにより、日射量の予測値が高い時間帯に蓄電の余力を確保し、太陽光発電の余剰電力を最小化させる。また、昼間の系統電力の受電電力量を予測できるため、必要量だけ蓄電しておいた安価な深夜電力を昼間に放電することで、昼間の受電電力量を最小化する。加えて、CO₂排出量もしくはコストのどちらかを最小化するように、昼間の蓄電余力と夜間の蓄電量のバランスを計算する機能も併せ持つ。

3. 水素を使う

近年、水素利用機器として水素専焼ボイラや水素混焼ボイラが発売され、工業炉においても水素バーナの開発が進んでいる。しかし、産業部門では安定操業やコスト削減が優先されるため水素の供給が安定せず、コストも高い黎明期において多額の設備投資を伴う水素への燃料転換を進めることは困難である。この課題を克服するためには、既存設備を活用することにより段階的に水素利用を拡大することで、設備投資額を抑えることが重要である。そこで、以下に水素利用側における既存設備を活用した水素への燃料転換の方策について示す。

既存の燃料である都市ガス13Aからの水素への燃料転換において、水素と都市ガスでは発熱量、燃焼速度、火炎温度が異なるため、都市ガス13Aから水素に完全に切り替えるためには水素燃焼に対応したバーナなどを搭載した設備に置き換える必要があり、既存設備が活用できない。そこで、図7に示す通り、水素が普及し始める導入期の段階的な燃料転換として、都市ガス13Aと水素の混焼が現実的な選択肢であると考えた。都市ガス13Aへの水素混合割合が20 vol%程度であれば、都市ガス13Aの燃焼特性規格範囲内⁶⁾となるため、都市ガ

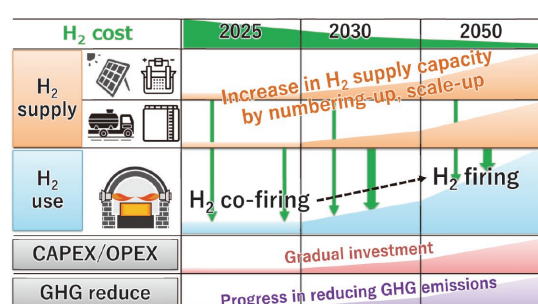


図7 段階的な燃料転換シナリオの概要
Fig.7 Overview of phased fuel conversion scenarios

ス13A用バーナ搭載の既存の燃焼設備でも水素混焼は可能と考えられる。

既存燃焼設備での水素混焼利用では、水素の供給が不安定化しても都市ガスによる運用に戻し生産活動を維持できるため、導入期の水素利用の有効な手段となり得る考えた。

その後の水素普及拡大期においては、段階的に水素用バーナ搭載の燃焼設備を導入することが現実的である。この場合も既存設備を残したうえで、水素設備を併用することが操業へのリスクヘッジ面では有効であるが、多くの工場では設置場所の確保が問題になると思われ、設備更新の時期も見据えた燃料転換計画が重要である。

当社高砂製作所では、水素の利用先となる様々な燃焼容量をもつ約100基のボイラ、工業炉を使用しており、既設の都市ガスボイラ、工業炉を活用した水素利用、水素燃焼に替えた場合の加熱特性および被加熱物への水素の影響などを検証するための実証に取り組んでいる。⁷⁾

3.1 燃焼式ボイラでの水素利用

多くの工場で使用されている小型貫流ボイラは、既に水素専焼タイプが発売されているが、黎明期においては水素の確保が課題になる。例えば、蒸発量2 ton/hの水素専焼ボイラ1台の定格運転には約400 Nm³/hの水素が必要であり、CO₂フリーの液体水素が安定、安価に供給されない段階ではオンサイトでCO₂フリー水素を製造することになる。そのため、400 Nm³/hの水素を製造でき

る大規模な水電解装置を導入し、2 MW クラスの再エネ電力（水電解装置の消費電力 5 kW/Nm^3 として計算）を確保する必要がある。これに対応する太陽光パネル設置には約 $10,000 \text{ m}^2$ （東京ドームのグラウンド程度）の設置場所が必要であるが、多くの工場では確保することが困難である。仮に太陽光パネルを設置できても年間平均稼働率は15%程度であり、安定して水素を製造してボイラへ供給するためには系統から再エネ電力を調達する必要がある。さらに、複数台の小型貫流ボイラを台数制御している工場であれば、必要な設備はさらに大規模となり、水素専焼ボイラを導入できる工場は限定されると考えられる。

水素の安定確保には課題があるが、前述のとおり、既存の都市ガスボイラでの水素混焼運転が可能であれば、再エネ由来水素の確保が難しい工場においても CO_2 削減を進めることができる。そのため、都市ガスボイラで水素混焼させる場合の課題を明確にする必要がある。そこで、既設の都市ガス焚き小型貫流ボイラを用い、水素混焼試験を実施した⁸⁾。

図8に当社高砂製作所のハイブリッド型水素ガス供給システム実証設備とボイラのレイアウトを示す。所定の体積比で都市ガスと水素を混合し、ボイラに供給する構成となっている。ボイラには、(株)サムソン製の都市ガス用小型貫流ボイラ（都市ガス用）NFBS-1500PN（換算蒸発量 1.5 ton/h ）を使用した。このボイラの運転負荷調整は、高/低燃焼モード、停止の三位置制御であり、バーナの燃焼方式はノズルミックス方式（燃料と空気を

別々に供給し、バーナ先端の火口で混合して燃焼させる）である。

都市ガスやプロパンガスは、ガス小売り事業者から安定した成分で需要先に供給される。いっぽう、水素混焼を行う場合、都市ガスと水素の混合はボイラ利用側で行うことになる。ボイラ運転中に水素混合率が変動すれば適正な燃焼条件から逸脱し、不完全燃焼や NO_x 量増加といった問題が生じる可能性があり、水素混合率を安定的に維持できることが求められる。

図9に本実証設備の水素混合システムの概要を示す。都市ガス/水素混合ガスタンクの圧力測定値と設定値の差に応じて水素ガスおよび都市ガスのタンクへの流入流量が調整されるカスケード制御方式とした。この時に水素ガス流量センサの設定値QHおよび都市ガス流量センサの設定値QCは、所定の都市ガス/水素混合率に応じた比率 α となるように設定されることで、都市ガスと水素の混合率が一定に維持されるようにした。都市ガスと水素は単位体積あたりの熱量が異なるため混合ガスの熱量から混合率を算定できるので、タンクの出口に熱量センサを設置し、水素混合率を監視した。

図10に、30 vol% 水素混合ガスを供給しボイラ負荷を変動させながら運転したときの混合ガス流量と熱量の経時変化を示す。ボイラの負荷変動に応じて混合ガス流量は変動するが、混合ガス熱量は一定である。構築した水素混合システムを用いることでボイラの負荷が変動し、燃料ガス消費量が変動する状態であっても一定の組成で都市ガスと水素の混合ガス供給を行えることを確認した。

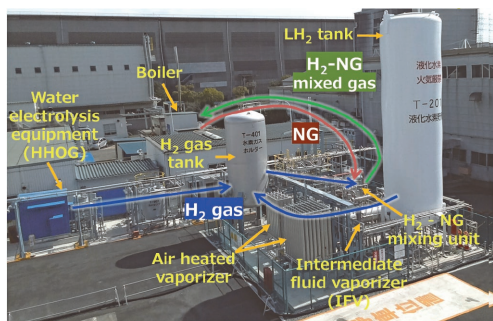


図8 実証設備と小型貫流ボイラ
Fig.8 Demonstration facility and small one-through boiler

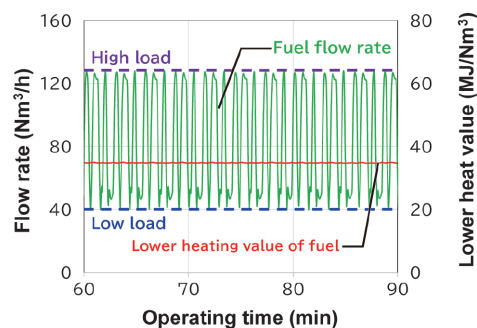


図10 水素30 vol% 混合時の混合ガス供給
Fig.10 Evaluation of supply stability of 30 vol% H_2 mixed gas

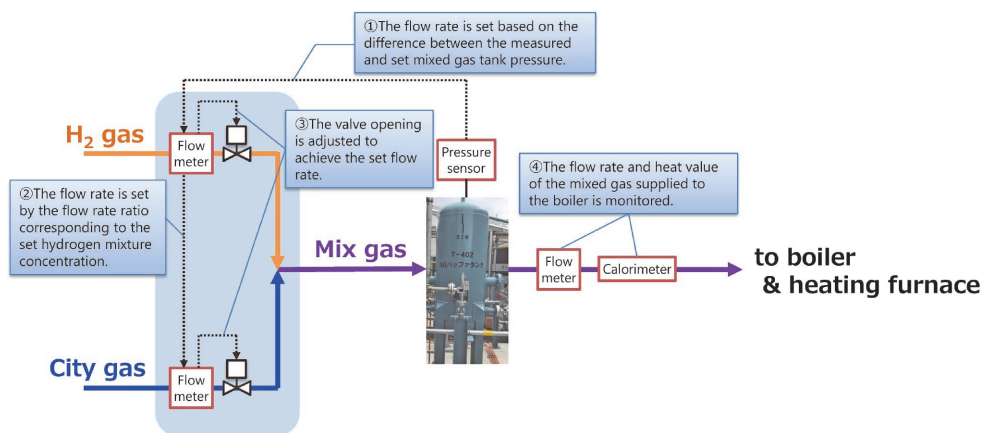


図9 水素混合システムの概要
Fig.9 Overview of hydrogen mixing system

表1に水素濃度0～30 vol%混合における定格負荷運転時のボイラ性能を示す。いずれの水素濃度においてもボイラ効率は都市ガス専焼と同等であった。また、排ガスについてもNOx濃度やO₂濃度も同等であり、本ボイラの自治体と協定の最大NOx濃度60 ppm（O₂濃度5%換算）以下となった。

この実証から、都市ガスボイラであっても、水素30 vol%までの水素混焼は可能であることが明らかとなった。しかし、水素混焼による火炎温度の上昇や、それによるバーナやボイラ缶体等の長期的な劣化有無は確認できておらず、今後検証していく必要がある。また、ある特定メーカのボイラでの実証結果であり、他メーカのボイラでも同様に水素混焼が可能であるかどうかは、各ボイラメーカへ確認が必要である。なお、主要な貫流ボイラメーカへのヒアリングを進めており、都市ガス用ボイラでの水素混焼の可否についてはメーカによって異なる見解が得られている。ただし、水素混焼ボイラの開発⁹⁾や都市ガス用ボイラのパーツ交換により水素混焼ができるようにする¹⁰⁾など、ボイラメーカにおいても水素混焼への対応が進められている状況である。今後ボイラメーカとの対話を継続し、水素供給側と利用側の双方の視点で合理的な水素利用の開始、拡大方法について検討していく。

3.2 加熱炉での水素利用

図11に当社高砂製作所で稼働している加熱炉の容量別設置台数の分布を示す。燃焼容量が1 MW～3 MWの加熱炉が多く占め、国内の加熱炉も同規模サイズが多数を占めていると考えられる。したがって、まずは2 MW級の加熱炉を対象とした水素への燃料転換を検討しており、当社の既設の加熱炉を活用した実証試験と新設の試験炉での実証試験を進めている。以下に、2種の実証試験について説明する。

2章にて段階的な燃料転換シナリオを示したが、安定・安価な水素が供給されるまでには時間が掛かるため、

燃料転換の初期の段階では水素専焼炉に置き換えるのではなく、既設の加熱炉が活用可能な水素混焼から水素利用を開始することが重要と考えている。例えば、水素専焼にて2 MWの燃焼容量を満たすには667 Nm³/h（水素の低位発熱量10.8 MJ/Nm³）の水素供給が必要となり、安定・安価な水素が流通していない段階では、安定的な運用が難しいと考えられる。また、既設加熱炉の活用であれば、水素の供給が不安定化した場合でも都市ガスによる運用に戻すことができ、加熱炉の操業を維持できる。そこで、当社高砂製作所の、設置から50年近く経過する既設の加熱炉（図12）を活用し、改造の必要が無い水素混焼比率および水素専焼を行うために必要な改造範囲を調査するため、水素混焼および水素専焼試験を進めている。

また、加熱炉において燃料を水素へ転換する場合、水素と既存の化石燃料（都市ガスなど）は燃焼特性（燃焼速度、火炎温度）や燃焼雰囲気ガスの成分（水蒸気分圧など）が大きく異なる。特に製品（被加熱物）が高温の水素燃焼雰囲気に曝される直接加熱炉では、製品への品質影響（スケール、脱炭、水素量）、製品への加熱特性（伝熱量/温度分布）を十分に検証しておく必要がある。そこで、当社高砂製作所にて、水素混焼および水素専焼時の燃焼特性、加熱特性、製品への品質影響の詳細なデータ分析を行うため2 MW級の水素実証炉を新たに設置し、水素混焼および水素専焼試験を進めている。

当社は高砂製作所含め500台以上の加熱炉を保有しており、それぞれの加熱炉は被加熱物の金属種、処理温度、加熱方式が異なるため、当社内に多様なスペックの加熱炉が存在している。そのため、2 MW級、直接燃焼式の加熱炉を対象とした実証試験を進めているが、横展開を見据えた技術開発（燃焼シミュレーションの構築、材料評価技術の構築など）を実施している。

水素供給側と水素利用側の双方の視点で実証を行うことで、利用側（加熱炉）の水素需要変動に対する供給側（気化器、水電解装置）の追従性や起動発停の影響に関するノウハウ蓄積など、水素供給側、水素利用側が一体となった技術課題の抽出、技術開発を進めている。

既設の加熱炉を活用した燃料転換の実証試験に加え、新設の試験炉での水素混焼および水素専焼の実証試験を行うことで、水素利用が普及し始める期間（導入期）および水素利用が拡大する期間（拡大期）の両フェーズに

表1 水素混合率を変えた場合のボイラ性能比較
Table 1 Comparison of boiler performance at various H₂ conc.

H ₂ conc.	0%	10%	20%	30%
Boiler efficiency [%]	91.3	90.3	90.7	90.5
Exhaust gas NOx conc. [ppm, 5%-O ₂]	48.5	46.2	47.9	47.0
Exhaust gas O ₂ conc. [vol%]	3.8	3.3	3.7	3.6

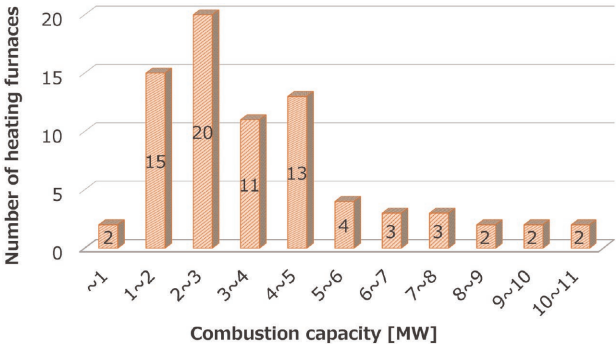


図11 加熱炉の燃焼容量の分布
Fig.11 Distribution of combustion capacity of heating furnaces



図12 改造予定の加熱炉
Fig.12 Heating furnace scheduled for modification

対応できる燃料転換についての知見が得られ、加熱炉での水素利用が広がると考えている。

むすび＝カーボンニュートラルの実現に向け、水素サプライチェーンを構築するためには水素供給側と水素利用側の双方が連帯して取り組むことが必要不可欠である。様々な規模のボイラ、工業炉を操業している当社高砂製作所において、水素による燃料転換の課題を明らかにし、課題解決に向けた検討、実証を進めることは、自社のカーボンニュートラルだけでなく、得られた知見や実績は熱エネルギーを使用する産業部門での脱炭素の取組みにも寄与できると考えている。

また、当社グループは今中期経営計画（2024～2026年度）においては、当社グループが魅力ある企業へと変革していくために取り組むべき変革を総称して「KOBELCO-X」と名付け、七つのXを設定している。本稿で紹介した水素利活用に関する取組みは、以下のAX, GXの一例と考えている。

■AX（Ambidexterity：両利きの経営／既存事業の深化×新規事業機会探索）

機械・エンジニアリング系部門（ハイブリッド型水素ガス供給システムの開発）と素材系部門（加熱炉での水素利用）が連携し、水素利活用の実証を加速

■GX（Green Transformation）

CO₂フリーな水素供給技術の高度化および熱エネルギーとしての水素利用推進による脱炭素への寄与

最後に、これらの成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業「水素社会構築技術開発事業」（JPNP14026）により得られた成果であり、ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 内閣官房 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議資料
2023年6月6日。
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy_kaitei.pdf (参照2024-12-13)。

- 2) 「KOBELCOグループが提案する液体水素利活用システム「ハイブリッド型水素ガス供給システム」を用いた水素供給・燃焼試験開始について」
神戸製鋼所, 2023年9月14日。
https://www.kobelco.co.jp/releases/1213956_15541.html
(参照2024-12-13)。
- 3) 「NEDO「水素社会構築技術開発事業」に採択～「熱によるエネルギー消費が主体の工場の脱炭素化に向けた水素利活用モデルに関する調査」～」
神戸製鋼所, 2022年5月19日。
https://www.kobelco.co.jp/releases/1210226_15541.html
(参照2024-12-13)。
- 4) 「KOBELCOグループが提案する液体水素利活用システム「ハイブリッド型水素ガス供給システム」の実証試験開始について」
神戸製鋼所, 2022年5月19日。
https://www.kobelco.co.jp/releases/1210227_15541.html
(参照2024-12-13)。
- 5) 「NEDO「水素社会構築技術開発事業」に採択～「液化水素冷熱の利用を可能とする中間媒体式液体水素気化器の開発」～」
神戸製鋼所, 2022年5月19日。
https://www.kobelco.co.jp/releases/1210224_15541.html
(参照2024-12-13)。
- 6) 矢田部 隆志, “低炭素社会の実現に向けた水素エネルギーについて(3)－熱需要におけるCO₂フリー水素による化石燃料代替－”, 「特定非営利活動法人」国際環境経済研究所, 2017-05-17。
<https://ieei.or.jp/2017/05/exp170517/?type=print>
(参照2024-12-13)。
- 7) 「NEDO「水素社会構築技術開発事業」2023年度第1回公募に採択～熱エネルギー消費が主体の工場の脱炭素化に向けた燃焼式工業炉での水素利活用の実証～」
神戸製鋼所, 2023年9月14日。
https://www.kobelco.co.jp/releases/1213954_15541.html
(参照2024-12-13)。
- 8) 村上和希, 化学工学会第55回秋季大会, 講演番号K116, 2024-9-11/12/13。
- 9) 「潜熱回収や水素混焼にも対応可能なガス焚小型貫流ボイラ「スーパーエクオス EQO-2000シリーズ」販売開始のお知らせ」株式会社日本サーモエナジー, 2024年10月01日。
<https://www.n-thermo.co.jp/topics/detail.php?pkId=97>,
(参照2024-12-13)。
- 10) 「主力製品ガス焚きボイラSQが水素混焼可能に！」三浦工業株式会社, 2024年7月10日。
<https://www.miuraz.co.jp/news/newsrelease/2024/1633.php>,
(参照2024-12-13)。