

当社の水素関連事業への取り組み

Approach to Hydrogen Related Business by JSW



博士(工学) 伊藤 秀明*
Dr. Hideaki Ito



佐藤 慎也**
Shinya Sato



荒島 裕信***
Hironobu Arashima



服部 公治****
Koji Hattori



久保 和也*****
Kazuya Kubo



小田 知正****
Tomomasa Oda

要 旨

日本製鋼所は戦前より鋼中の水素に関する研究に取り組み、原子力機器用部材への参入や大型の石油精製用リアクターの製造に結びつけてきた経緯を持つ。近年は地球温暖化防止や化石燃料枯渇への対策として水素エネルギーを積極的に利用する動きが世界各地で進められている。当社では水素エネルギー社会の到来に備え、高圧水素蓄圧器やこれを圧縮機と組み合わせたシステムなどの燃料電池自動車用水素ステーション向けの機器、再生可能エネルギーを水素の形で低圧かつコンパクトに貯蔵する水素吸蔵合金タンクおよびこれを燃料電池と組み合わせた電源システムなど、今後伸長が期待される水素関連事業への取り組みを進めている。

— Synopsis —

JSW has been made the research concerned with hydrogen in steel from before World War II. It resulted the entry into nuclear equipment component business and production of large scale petroleum refining reactors. In recent years, movement to use hydrogen energy actively in order to prevent climate change or exhaustion of fossil fuel. To make provision for arrival of hydrogen society, JSW proceeds with approach to hydrogen related business through the development of hydrogen high pressure vessels, systems in combination with compressor, low pressure hydrogen tanks for storage renewable energy utilizing hydrogen absorbing alloy, and power supply systems equipped with hydrogen absorbing alloy tank.

*: 新事業推進本部
New Business Promotion
Headquarters

** : 水素事業推進室 室蘭分室
Hydrogen Business Promotion Office,
Muroran Branch Office

*** : 室蘭製作所
Muroran Plant

**** : 水素事業推進室 広島分室
Hydrogen Business Promotion Office,
Hiroshima Branch Office

***** : 室蘭研究所
Muroran
Research Laboratory

1. 緒 言

日本製鋼所は大型兵器の国産化のための高級特殊鋼および兵器を製造する製鋼所として設立された。戦前の主要製品としては、戦艦「陸奥」に搭載された41センチ砲などの大型火砲が良く知られる。火砲の材料は強度と靱性に富むNi-Cr鋼が古くから利用されてきたが、この材料は水素の残留により脆くなり割れを生ずる弱点を持っており、ヘアークラックや白斑と言われる割れが生じることがあった⁽¹⁾。その原因究明のための研究が積み重ねられ、1930年代に鉄鋼材料内に含まれる水素が主因であることが突止められた。当社は鋼中の水素の定量測定法を世界に先駆けて考案し、この水素分析法は「学振法」として標準化され⁽²⁾、これより鉄鋼と水素の研究で世界をリードし飛躍的に発展させることになった。

日本で最初の原子力発電商用炉である東海1号炉は、その原子炉容器用材料を英国から輸入したが、検査の結果水素起因と考えられる割れ状欠陥が多数発見され、全数廃却となった。この代品製造に名乗りを上げ、真空造塊技術により品質的に問題のない原子炉圧力容器用鋼板を1961年に製造・納入したこと⁽³⁾が、当社が原子力部材へ参入するきっかけとなった。その後、大型鍛鋼品の製造技術を生かした各種原子機器用材料の製造に結びついている。

石油精製に使用されるリアクターは、高温・高圧、高水素雰囲気中という過酷な環境下で使用される。炭素鋼およびNi鋼は高温・高圧下で水素起因の損傷を生じやすいため耐水素性の向上した材料としてCr-Mo鋼が一般的に用いられるが、石油精製用リアクターの製造は水素との戦いであった。水素損傷や水素脆化に対する耐性、母材とオーバーレイ材との界面の水素誘起剥離に関する材料や製造プロセスの研究開発が盛んに行われ、これらが各種大型リアクター製造の根幹をなす技術となった。

前述の鋼中に含まれる水素による水素脆化や高温・高圧水素環境下で生じる水素損傷とは異なり、常温の水素環境下にある材料が応力を受けた場合、変形により吸収された水素による脆化が生じる。この現象は水素環境脆化と呼ばれ、水素エネルギー社会に向けて水素雰囲気で使用される材料にとっては重要な特性となる。当社は様々な水素脆化に関する知見を基に2003年より新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の鋼製水素蓄圧器開発事業に参画してきた。2005年からは70MPa充填対応の蓄圧器開発を行い、国内で初めて70MPa対応の蓄圧器を実証ステーションに設置した。その後も鋼製蓄圧器の高耐久、低コスト化の開発を進め、2013年から開始された商用水素ステーションの整備事業に多くの鋼製蓄圧器が採用されている。

当社では、戦後間もない1949年より産業用往復動圧縮機の製造・販売を行っており、石油化学産業をはじめとする市場に累計1,700台以上の圧縮機を供給し、高い信頼性で評価を得ている。その実績と室蘭の水素材料研究に関する自社技術を背景に、国内の各種実証試験用水素ステーションおよび燃料電池自動車(FCV)や水素インフラの研究・開発設備を必要とする民間企業向けに、数多くの水素圧縮機を納入した。近年のFCVの市販開始と商用水素ステーションの整備計画の進捗に伴い、当社独自の技術とノウハウの蓄積を有しているダイヤフラム式圧縮機と水素蓄圧器とのパッケージ化を目指した開発を進めている。

1960年代後半に、ある種の合金が多量の水素を可逆的に吸放出することが見出され、水素吸蔵合金(MH)の研究開発が世界的に開始された。当社でも1980年よりも前からMHおよびこれを利用した応用システムの開発を行ってきた。従来の鉄鋼材料における金属と水素との相互作用の研究とは趣が異なり多量の水素を合金結晶中に取り込むことを目標に、種々の応用分野に適した特性を有する各種合金を開発した。また水素貯蔵タンク以外の応用システムとして、水素化の反応熱を利用したヒートポンプシステムや水素のみを吸蔵する特性を利用した水素精製システムなどを開発した。また応用システムの一つとしてMHキャニスターを搭載した燃料電池電源を開発している。燃料電池は化学反応を利用して、水素と酸素を電力、水、熱に変換する装置であり、環境負荷が少なく、発電効率も高いことなどから様々な分野での利用が期待されている。

近年は地球温暖化の防止や化石燃料の枯渇対策として水素エネルギー社会の到来に向けた動きが活発になっている。また、太陽光や風力エネルギーのような再生可能エネルギーを水素で貯蔵する実証試験も各地で行われている。当社は戦前から綿々と続く水素との関わりを有しているが、本稿では今後の水素エネルギー社会の到来に向けた水素関連事業への取り組みを紹介する。

2. 高圧水素蓄圧器

2.1 水素蓄圧器材料

水素ステーション用蓄圧器には容器全体の破壊につながる脆性破壊があってはならないことから、蓄圧器用鋼材は高圧に耐える強度と粘り強さ(靱性)を兼ね備えた材料特性が求められる。45MPa蓄圧器で使用されているJIS SCM435(SCM435)では、設計圧力が99MPaになると容器の肉厚が増加するため焼入性不足となり必要な材料特性が得られない。このため焼入性に優れる鋼種を選定するとともに、鍛造、熱処理により材料組織や結晶粒度を制御した鋼材を使用する必要がある。また、これまでの知見から水素ガス中で安全に使用するためには鋼材の清浄

度が重要であることがわかっている。同一強度に調質された低清浄度と高純度の高強度低合金鋼（ニッケルクロムモリブデン鋼）の、45 MPa 水素ガス中における低ひずみ速度引張試験 (SSRT) 結果を、図 1 に示す⁽⁴⁾。高純度鋼は水素ガス中でも延性が良好で最大荷重点を大きく越えて破断したのに対し、低清浄度鋼は最大荷重点付近で破断しており引張延性の低下が顕著であった。低清浄度鋼は P、Si、Mn、S などの不純物元素を含む非金属介在物が水素ガス中での破壊起点として早期に作用することが確認されていることから、蓄圧器の安全性を向上させるためには高純度の鋼材を使用すべきである。

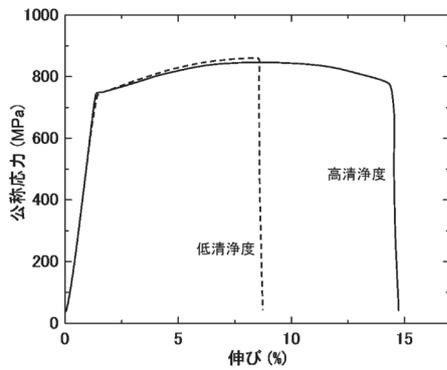


図 1 低清浄度および高純度高強度低合金鋼の水素ガス中低ひずみ速度引張試験結果

当社では蓄圧器材料として、SCM435 と同等の強度を持ち焼入性に優れる ASME SA-723M Grade3 (SA-723M) を使用している。SA-723M はアメリカ機械学会 (ASME) の圧力容器規格で使用が認められている材料であり、国内においても超高圧ガス設備の耐圧部材として使用実績がある。また、当社は発電機軸材や超高圧反応容器などで SA-723M 類似鋼の豊富な製造実績があり、組織制御された高純度の SA-723M が製造可能な技術を有している。図 2 に SA-723M で製造した蓄圧器の全厚硬さ分布を示すが全厚 90 mm でほぼ一定の硬さが得られており、SA-723M の優れた焼入性が確認できた。図 3 は SA-723M と JIS SNCM439 (SNCM439) における引張強さとシャルピー吸収エネルギーの関係を示す⁽⁵⁾。SA-723M はφ 1000 mm の丸棒であっても内部までの焼入が可能であり、蓄圧器の設計強度 930 ~ 1000 MPa において十分に高い靱性を有している。以上のことから、当社の蓄圧器は均質で強度靱性バランスに優れた信頼性の高い材料を用いた蓄圧器であるといえる。

水素に対する安全性を評価する上で重要な特性として、SSRT 特性に加えて疲労特性が挙げられる。水素ステーション蓄圧器は FCV へ水素を充填する際の減圧と蓄圧のための加圧が繰り返されることから、水素ガス中での耐疲労破壊特性が非常に重要である。図 4 に SA-723M

と SNCM439 の高圧水素ガス中疲労試験結果を示す⁽⁵⁾。ここで SA-723M は実機蓄圧器から採取した試験片で試験を行った結果である。実際に蓄圧器を運転する際に作用する応力振幅の 2 倍で 200 万回まで試験しても未破断であることから、SA-723M は十分な耐疲労特性を有しており、水素ガス中でも安全に使用可能な材料であることが判る。当社の SA-723M は高純度 (ASTM E45 で TypeB < 1.5) で品質管理しており、更に優れた耐水素脆性を確保するために当社独自の最適な熱処理条件により製造しているため、図 4 に示した優れた性能を発揮することが可能となっている。

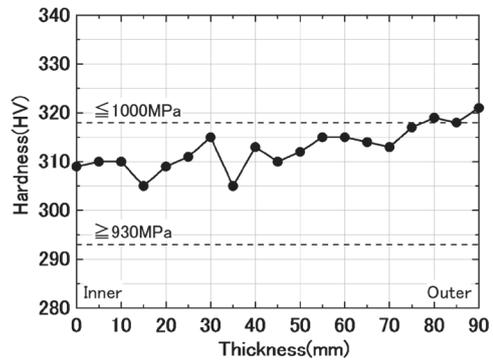


図 2 SA-723M 製蓄圧器の全厚硬さ分布

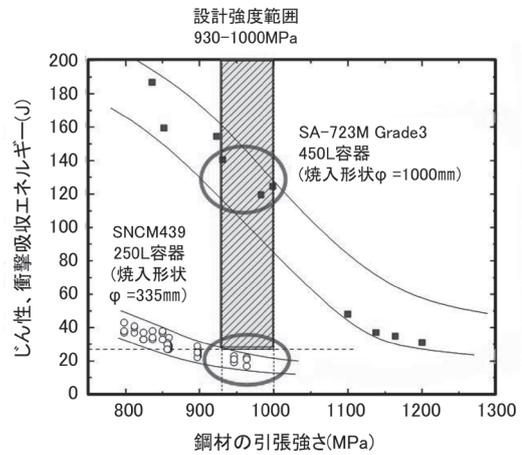


図 3 引張強さとシャルピー吸収エネルギーの関係

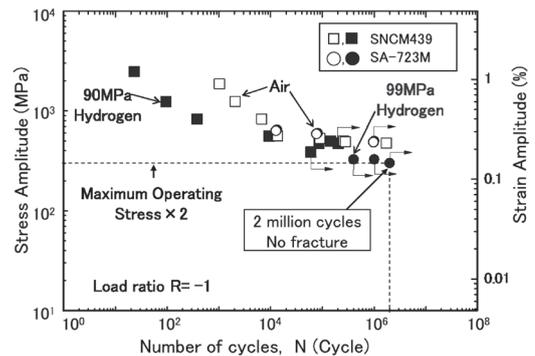


図 4 高圧水素ガス中疲労試験結果

2.2 水素蓄圧器の製造

(1) 製造工程の管理

安全性の高い水素蓄圧器を製造するために、当社では通常の圧力容器に要求される材料評価に加え、水素ガス中での各種安全性評価（機械的特性、疲労特性、疲労き裂進展特性等の試験及び解析）を行っている。材料に対する水素の影響を把握した上で、材料、構造、加工、検査の全ての製造工程において水素用に対応した独自の管理を行うことで、安全性と耐久性を高いレベルで満足させる蓄圧器を実現した。

(2) 耐水素脆性に優れる材料

蓄圧器に用いる材料は、溶解から熱処理までの素材製造段階で化学成分、不純物濃度、組織、強度、結晶粒度等をコントロールし、水素ガス中であっても大気中と同等の引張強さ、疲労限度を確保し、信頼性の高い材料を製造している。

(3) 信頼性の高い蓄圧器構造

蓄圧器をストレート構造とすることで、水素と接する部分において構造不連続部や応力集中部をなくし、製造時や供用中の検査においても内面の精密検査が可能であるという特徴を持たせている。また、高圧を保持するためのカバー、グランドナット構造は、耐圧容器用として実績のある構造をベースに設計されており、より多くの繰り返し圧力サイクルに耐えるように改良している。

(4) 高耐久性を実現する加工技術

水素ガスと接する内表面において厳しい表面仕上げ基準を設け、水素の影響を受ける要因を極力排除し、高圧水素ガス中において加速する疲労き裂の進展を抑制するため、内表面に高耐久化施工を実施した。その結果、蓄圧器の許容繰返し回数は、35 MPa～87.5 MPaの広い運転圧力範囲であっても10万回を優に上回り、蓄圧器の高寿命化が達成されている。

(5) 安全性を担保する非破壊検査技術

製造時の検査は水素ガスと接するボディ内表面の欠陥を高精度で検出する必要があり、図5に示す半自動の磁粉探傷試験（MT）装置を蓄圧器専用開発した。このMT装置を用いて検査することで内表面の微小な欠陥の検出を可能とし、き裂進展の起点となりうる箇所の残留がないことを最終的に確認している。また、鋼製蓄圧器は供用中においても高圧水素ガスを貯留した状態で全ての部位を外面からの超音波探傷試験により検査できる蓄圧器であるため、ステーションの運用を止めることなく定期的に検査を行うことで高い安全性を維持できる蓄圧器である。

(6)

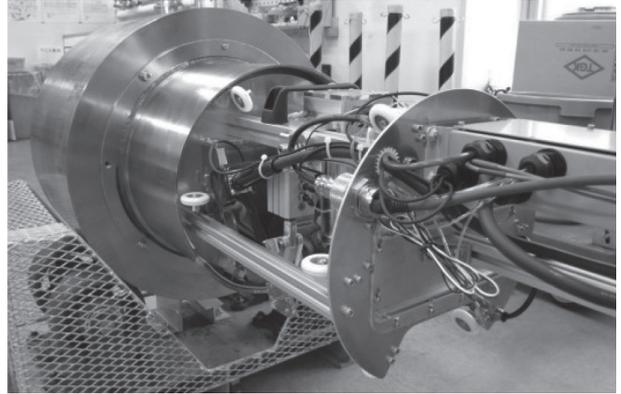


図5 開発した水素蓄圧器専用 MT 装置

(6) 鋼製蓄圧器の仕様

表1に内容積0.3 m³の水素蓄圧器の標準仕様を示す。鋼製蓄圧器は設計規格が確立し設計により安全性を担保することが可能なことから、表に示す蓄圧器以外に、当社では設計圧力が100 MPaを超える水素蓄圧器や、図6に示す内容積0.45 m³の大型蓄圧器の製造実績⁽⁵⁾も有している。

表1 0.3 m³ 鋼製水素蓄圧器の仕様

	国内仕様	海外仕様	短尺モデル
外径	φ420 mm	φ446 mm	φ525 mm
全長	4,890 mm	4,900 mm	3,790 mm
重量	2,910 kg	3,590 kg	4,020 kg
設計圧力	99 MPa	99 MPa	99 MPa



図6 0.45 m³ 水素蓄圧器

3. 水素圧縮機

3.1 ピストン式圧縮機

当社の水素ステーション向け圧縮機への取組みは、2002年にNEDOのWE-NET（水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発）プロジェクトにて高松市に建造された国内最初の実証用水素ステーション⁽⁶⁾に遡る。本件の要求仕様は当社の圧縮機製品のラインナップよりも

小型なものであったため、国内圧縮機メーカーと協力して、当時のFCVの燃料タンクに35 MPaで水素を充填するため吐出圧力40 MPa、圧縮能力30 Nm³/hのピストン式圧縮機ユニットを納入した。低圧段には効率が高く大容量化に適するピストンリング式を、40 MPaまで水素を圧縮する最終段には高压用途で実績豊富なダイヤフラム式を採用したハイブリッド構造とし、その後の水素・燃料電池実証プロジェクト(JHFC)の実証用水素ステーション向けなどに累計5台を納入した。

並行して、FCV普及期を想定した商用規模水素ステーション向けに、圧縮能力300 Nm³/hクラスのピストン式圧縮機を開発した。低圧段にはピストンリング式を、高压段にはプランジヤ式を採用することで吐出圧力40 MPaまで無給油で水素を圧縮可能な構造であり、駆動部を含め自社製である。NEDO事業「水素安全利用等基盤技術開発」における「水素インフラに関する安全技術開発」において2003年に製作したピストン式圧縮機の外観ならびに主な仕様を図7に示す。本圧縮機は、その後4年間の実証試験に供され、水素ステーション向け圧縮機の商用運用を想定した安全基準策定に資する各種データ取得に利用された⁽⁷⁾。

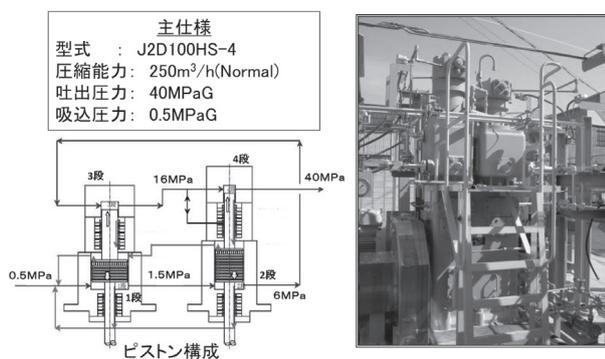


図7 ピストン式圧縮機

3.2 ダイヤフラム式圧縮機

実証用水素ステーション向けの小型圧縮機に適した製品ラインナップを充実させるため、2003年より米国・PDC MACHINES社と提携して、小型ダイヤフラム圧縮機とその周辺システムまで含めたユニットとして市場に提供する事業を展開した。ダイヤフラム式圧縮機は、小型化や高压化が比較的容易なため実証規模水素ステーション向け圧縮機に最適な方式であると同時に、ピストン式と比較して摺動部がないためガスの外部リークや汚染がない、圧縮比を大きくできるため圧縮段数(シリンダ数)の少ないシンプルな構造となるなどの利点を有する。当社では、JHFC実証用水素ステーションや企業・研究機関による独自の水素ステーション実証設備向けに、2008

年までに累計15台のダイヤフラム式圧縮機ユニットを納入した。前述のように当時は吐出圧力40 MPa、圧縮能力30～100 Nm³/hのものが主流であったが、現在のFCVの充填圧力である70 MPaに対応した吐出圧力が80 MPaを超える圧縮機についても、いち早く市場に供給し、その一部は現在も稼働中である。

上記事業と並行して、PDC社製ダイヤフラム圧縮機の実証設備を広島製作所内に設置し、ダイヤフラム圧縮機の安全かつ安定した運用技術、ならびに信頼性向上技術に関する当社独自の技術開発を実施した。実証設備の外観と設置された圧縮機の主仕様を図8に示す。累計約5,000時間の検証運転を通して、圧縮機の起動・停止やインターロックなどの最適運転ロジック、各種消耗部品の寿命検証によるメンテナンスの最適化などの運用技術を開発した。併せて、ダイヤフラムの長寿命化や、油圧回路の最適設計などの技術開発を行い、当社既存の圧縮機技術と融合させることで、高度なダイヤフラム圧縮機技術を確立した⁽⁸⁾。

以上のように、自社製ピストン式圧縮機による商用規模水素ステーションへの対応と、PDC社製ダイヤフラム圧縮機による小規模水素ステーションへの対応による事業展開⁽⁹⁾を図ることで、当社の水素圧縮機は、2005年に開催された愛知万博(愛・地球博)における燃料電池バスの運用をはじめとする多くの実証事業・研究開発に利用され、わが国の水素ステーション黎明期を支えた。



図8 ダイヤフラム圧縮機実証設備

3.3 FCHPTM

わが国の本格的な商用水素ステーションの整備は、2013年度から「水素供給設備整備事業」として国の助成の下で進められている。その普及に向けた喫緊の課題は建造コスト、ならびに運用コストの低減である。当社では、FCV普及過渡期においては現行よりも小規模な水素ステーションの建造によるコストの最小化が有効と考え、小規模水素ステーション向けパッケージユニット⁽¹⁰⁾「FCHPTM」(商標登録出願中)(Flexible Compact Hydrogen Package)の販

売を開始した。「FCHP™」は、ダイヤフラム圧縮機と鋼製蓄圧器を中核に、水素ステーション運用に必要な周辺機器や安全装置一式をコンパクトに一体化することで、設置面積を最小化したパッケージユニットである。「FCHP™」の外観を図9に、主な仕様を表2に示す。

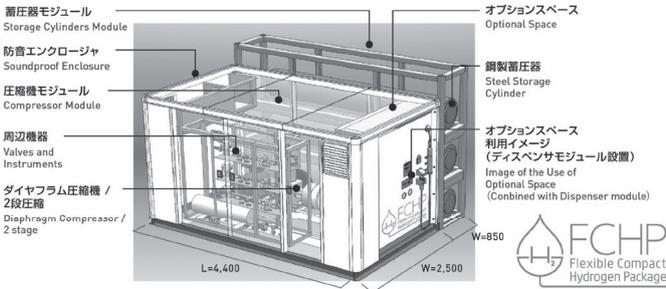


図9 FCHPの外観と構成

表2 FCHPの主要仕様

圧縮機	型式	ダイヤフラム式圧縮機
	製造者	米国・PDC MACHINES 社
	構成	2 段圧縮
	水素圧縮能力	55 Nm ³ /h
	水素受入圧力	4 MPa
蓄圧器	水素吐出圧力	82 MPa
	型式	Type I 鋼製蓄圧器
	製造者	日本製鋼所
	容積	300 L × 3 基または 4 基
	バンク構成	3 バンク構成
	水素貯蔵圧力	82 MPa
	水素払出能力	商用充填レートに対応

PDC 社製ダイヤフラム圧縮機は、水素圧縮能力が 55 Nm³/h であり、これは 1 時間当たり 1 台の FCV を満充填する量に相当する。圧縮機の仕様を絞り込むことで、既存の商用水素ステーションで運用されているピストン式圧縮機と比較して小型、かつ圧縮段数が少なく、設備費、およびメンテナンス費用をはじめとした運用費の両方の削減を実現した。また、上述した当社独自の開発技術を融合させることで、より信頼性を向上させたものとなっている。

一方で、蓄圧器は従来の水素ステーションと同等の構成とすることで、来場した FCV に対しては「3 分で 5 kg」と表現される急速充填を JPEC-S0003 (2014) などの商用充填プロトコルに対応した充填レートで行うことができるため、商用運用が可能である。また、圧縮機は周辺機器と共に防音エンクロージャ内にコンパクトにモジュール化し、蓄圧器モジュールと組合せた場合の設置面積は最小タイプで 2.9 m × 4.4 m (約 13 m²) となっており、狭い用地にも設置可能である。さらに、圧縮機モジュール内にはオプションスペースを設けており、ディスペンサをはじめとする水素ステーション構成機器のさらなる一体化が可能となっている。加えて、図 10 に示すように、圧縮機モジュールや蓄圧器モジュールの増設・更新によって、FCV 普及に合わ

せた水素ステーションの能力増強にも対応可能な拡張性を有している。

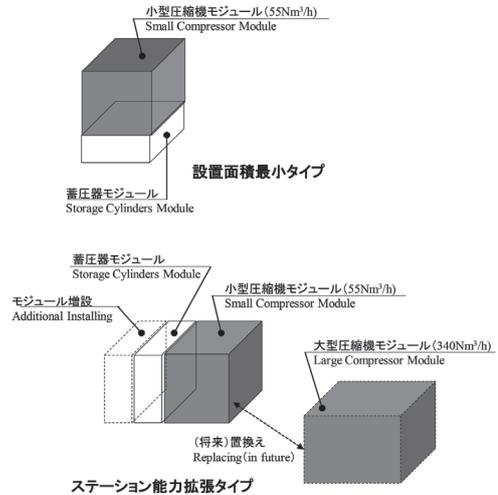


図10 モジュール化による拡張性

当社では広島製作所内に「FCHP™」のデモ機を設置している。デモ機および周辺設備の外観を図 11 に示す。デモ機は FCV への水素充填は行わないが、定置式商用水素ステーションの技術基準である高圧ガス保安法 一般則 第 7 条の 3 に準拠して設計・製造・検査がなされたものである。さらに、実際の水素ステーションにおける運用を模したデモ運転を行うための周辺設備 (ディスペンサ、プレクーラ除く) も含めて、上記技術基準による小規模水素ステーション設備のコンパクト性を模擬展示したものとなっている。2017 年度より、上述の水素供給設備整備事業において、助成の対象となる設備の水素供給能力が従来の「100 Nm³/h 以上」から「50 Nm³/h 以上」に拡張された。これに伴い、「FCHP™」への市場の注目も高まっている。

水素パッケージユニット設備仕様

- ・プロセスガス：水素ガス
- ・圧力：吸込 4.0 MPa → 吐出 82 MPa
- ・圧縮能力：55 Nm³/h (FCV 1 台/時間)
- ・貯蔵能力：948.9 m³

小規模水素ステーションのPR設備

- ・ディスペンサを除く水素ステーション設備を完備

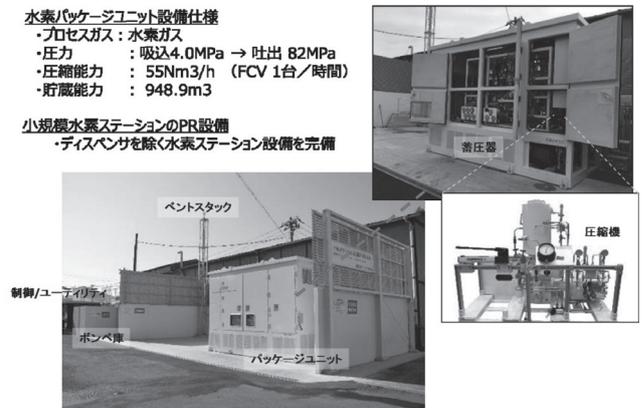


図11 広島製作所内のFCHP デモ設備

4. 水素吸蔵合金とそのタンク

4.1 水素吸蔵合金と応用システム

MHは常温・常圧で大量の水素を吸放出可能な金属であり、10気圧以下の低圧で安全に水素を貯蔵できること、および体積あたりの水素貯蔵密度が大きくコンパクトな水素貯蔵が可能であることを特徴とする⁽¹¹⁾。図12に各種水素貯蔵方法における重量貯蔵密度と体積貯蔵密度の関係を示す。MHによる水素貯蔵は圧縮水素や液体水素などと比較して重量貯蔵密度が低いため、車載用や輸送用といった利用方法には不向きである一方、体積貯蔵密度は最も高いことから、限られたスペースに大量の水素を貯蔵する利用に最適である。このように、低圧で安全かつコンパクトに大量の水素を貯蔵可能なMHによる水素貯蔵方法は、今後水素の利活用が推進されていく中で、様々な用途に使用されることが期待される。

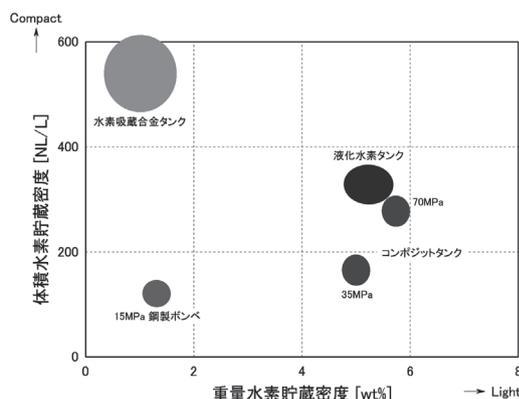


図12 水素貯蔵密度の比較 (容器を含む)

当社でのMH開発は1978年から始まり、LaNi₅に代表されるAB5型合金⁽¹²⁾、⁽¹³⁾、TiCr₂やTiMn_{1.5}に代表されるAB2型合金⁽¹⁴⁾、⁽¹⁵⁾、TiCrVに代表されるBCC型合金⁽¹⁶⁾、などの開発を実施し、実用上の特性を改善するとともに、様々な特性データの蓄積を行ってきた。更にMHが持つ特性を活かして、アクチュエータ⁽¹⁷⁾、ヒートポンプシステム⁽¹⁸⁾、水素純度向上システム⁽¹⁹⁾、ノンフロン冷凍システムとマイクロガスタービンを組み合わせたコージェネレーションシステム⁽²⁰⁾などのMH応用システムを開発するとともに、MHタンクそのものの改善を進めてきた⁽²¹⁾。このように当社では、広い温度域で使用可能なMHの技術を持ち、それを応用するシステム技術の蓄積を進めてきた。

4.2 ハイドレージ™

MHは水素吸放出に伴う大きな体積変化によって微粉化し、容器底部に溜まることでMHタンクの変形を引き起こすことが課題であった。また消防法上、従来のMH粉末は第2類(可燃性固体物質)危険物、水素化されたMH

粉末は第3類(自然発火性物質及び禁水性物質)危険物にあたることから指定数量が定められており、その指定数量以上を扱う場合には消防法で定められた規則に則った設備(保有空地の確保、消火設備等)が必要であることや、危険物取扱者による作業・監督や届出などが義務化されていた。当社のMH「ハイドレージ™」(商標登録第5899391号)は、水素吸放出速度を低下させずに従来のMH粉末を高分子材料と複合化する技術により作られた新規のMHであり、本技術によりMHを固定化させることで、MHタンクに生じる歪を低減させることに成功した。また「ハイドレージ™」は、第3類自然発火性試験、第2類小ガス炎着火試験及び引火点測定試験といった消防法危険性試験をクリアし、水素吸蔵状態でも非危険物としてデータベースに登録された(登録番号:2994X014729など)。これにより、輸送及び保管における法的な数量制限や届出の必要がなくなった。さらに「ハイドレージ™」技術により、MH合金の均一分散が可能となり、図13に示すように従来のMH合金と比べてMHタンクへの高密度充填が可能となり、水素貯蔵量の高容量化に成功した。このような「ハイドレージ™」技術の開発により、小型タンクのみならず大型の水素貯蔵用タンクにもMHを利用できるようになった。

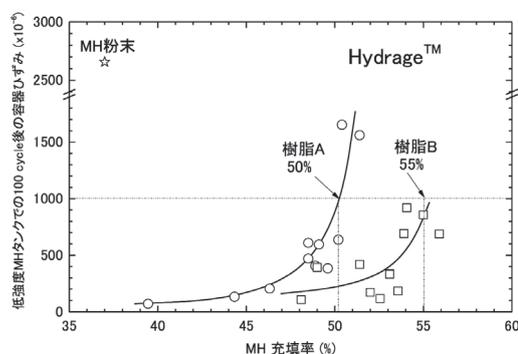


図13 MH充填率に対するひずみ測定試験結果

4.3 水素貯蔵タンク

少量の水素貯蔵用途として、図14および表3に示すMHキャニスターを製造・販売している。ポータブル電源やFCスクーター、FCフォークリフトなどへの利用が検討されている他、簡便に取り扱える水素源として実験室等で利用されている。性能の一例として、図15にMHCh-450Lによる20℃での水素放出特性を示す。2NL/minの一定速度で水素を放出させた際、ほぼ全量を放出することが可能であった。また、図15にはそれぞれ異なる20本のMHキャニスターで試験を行った結果を掲載しているが、全くバラつきがなく、どのキャニスターも同じ性能を示すことが確認された。



図14 MH キャニスター (60L、200L、450L)

表3 各種MH キャニスターの仕様

Type	MHCh-60L	MHCh-200L	MHCh-450L	MHCh-800L
水素量	62~65 NL	217~231 NL	450~474 NL	826~884 NL
サイズ(mm)	φ 50.0×L151	φ 54.0×L270	φ 81.0×L270	φ 88.9×L406
MH 合金量	0.43~0.45 kg	1.5~1.6 kg	3.1~3.3 kg	5.7~6.1 kg
総重量	約 0.9 kg	約 2.2 kg	約 4.5 kg	約 7.7 kg
容器材質	アルミニウム合金 (A6061-T6)			

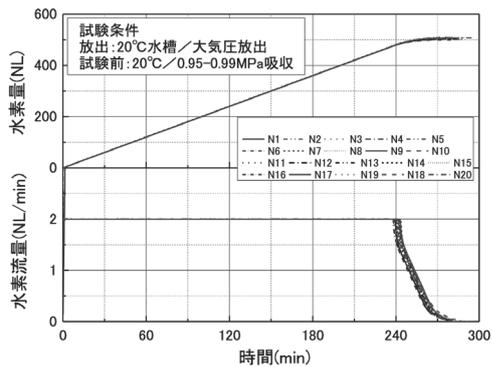


図15 MHCh-450Lの20°Cでの水素放出特性 (2 NL/min 一定速度)

一方、近年では大量の水素を貯蔵する用途においてもMH方式の水素貯蔵システムが検討・実証されている。太陽光などの再生可能エネルギーは出力変動が大きいため、短周期の需給調整に蓄電池が用いられることが多い。しかし中長周期の変動に対して、短周期対策と同様に蓄電池を用いるのではなく、一旦水素に変換して貯蔵する方法が検討されており、水素貯蔵方法として低圧で安全、かつコンパクトに貯蔵できるMH方式が採用されるケースが増えてきている。

2014年には、ビルディングの屋上に配置されたソーラーパネル群で発電した電力を中長期的な電力需給調整の目的で、水電解水素の形態で貯蔵するシステム⁽²²⁾の水素貯蔵装置としてMH方式が採用された。水電解装置の最大水素発生量40 Nm³/hに対応し、100 kgの水素を貯蔵できる水素貯蔵システムとして、図16のような二重管構造を持つMHタンク2本を1ユニットとし、それを19ユニット組み合わせたシステムを製造した。

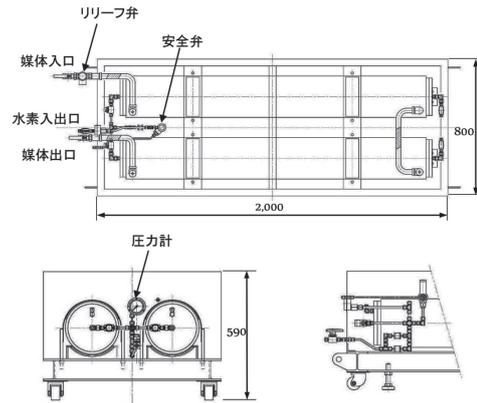


図16 MHタンクの基本構造と2本組ユニットの外観

また2016年には、日照時間が長い夏季に蓄えた太陽光発電の電力を冬季に消費するシステムの電力貯蔵方法として水素が用いられ、その水素貯蔵装置としてMH方式が採用された。このシステムでは水素吸放出速度が比較的遅い利用方法であったことから、MHタンクは前述の二重管構造の容器であるが径を太くして1本当たりの水素貯蔵量を増加させることによって、9本のMHタンクで約100 kgの水素を貯蔵できるシステムとした。図17にシステムの外観を示す。このシステムは幅1.8 m、長さ3.1 m、高さ約2 mの寸法であり、同量の100 kgの水素を1 MPa未満の気体で貯蔵する場合には長さ6 mのガスタンクを6セット使用して全長36 mの土地が必要となるのに比べて、大幅に設置スペースを削減することが可能となった。



図17 水素100 kgを貯蔵可能なタンクシステムの外観

近年、水素貯蔵装置に求められる水素吸放出速度が速くなってきており、新たな容器開発が必要となっている。当社では、図 18 のような自動車のラジエーターのような高い伝熱構造を持ったアルミプレートフィン型 MH タンクの開発も行っている。図 19 に 3 Nm³ アルミプレートフィン型試作 MH タンクの水素放出特性を示すが、およそ 5 分で容器の全量を放出できる特性を有しており、様々な用途に利用できる可能性が高いことから、現在このタンクの大型化に向けた開発を推進している。

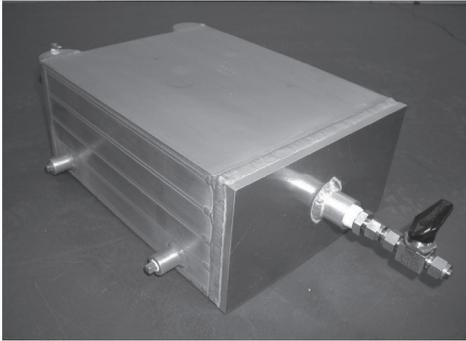


図 18 3 Nm³ アルミプレートフィン型試作 MH タンク

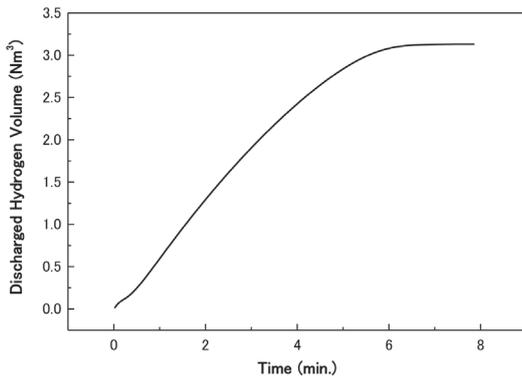


図 19 3 Nm³ アルミプレートフィン型試作 MH タンクでの水素放出特性

また、水素を燃料として使用するための貯蔵容器として MH タンクが検討されるケースが増えてきているが、これまでの MH タンクでは容器内の水素残量を知る手がかりが得られにくかった。マスフローメーターによる積算流量を用いる方法が一般的であるが、長期間の利用においては誤差の累積が課題となり用途によっては適用が難しい。そこで当社では、MH タンク用水素残量センサの開発も推進している⁽²³⁾。図 20 に水素残量センサの基本原則を示す。MH が水素を吸収するときに体積膨張し、水素を放出するときに収縮する性質を利用して、合金膨張・収縮に伴う体積変化を C 型管に高効率に伝達させ C 型管に発生するひずみを測定することで、MH の水素吸蔵量、すなわち MH タンク内の水素残量を計測するというものである。現在、計測精度の改善を図っており、早期に実用化できるよう開発を加速している。

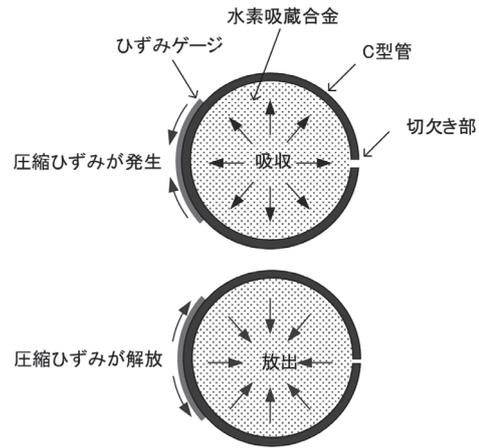


図 20 水素残量センサの原理

5. 燃料電池電源

5.1 ポータブル燃料電池電源

ポータブル燃料電池電源^{(24)、(25)}は、MH キャニスターのコンパクト性を活かした開発製品の一例である。ポータブル電源の分野では発動発電機やリチウムイオン電池など二次電池を用いたものが一般的であるが、燃料電池電源は両者の長所を兼ね備え、それぞれを補完できる可能性を有している。図 21 に電源の外観写真、図 22 に電源のシステム構成図を示す。燃料電池スタックには、システム簡素化のため、空冷式の固体高分子形燃料電池 (PEFC)、燃料ガスの貯蔵／供給には水素貯蔵量 450 L の MH キャニスターを採用した。電源の起動時ならびにキャニスター交換時の補助電源として二次電池を搭載し、電源の瞬時起動と連続運用を可能にした。定格出力を 100 W、初期発電容量を 1,000 Wh とし、40 W 程度の計測機器であれば、キャニスターの交換なしに 1 日程度の運用が可能仕様である。MH キャニスターからの水素放出時の吸熱反応に対しては、キャニスターとスタックを直接接触させて熱交換を行うことにより、キャニスターの加温とともにスタックの冷却も行い、更にはヒーターも内蔵することで -20℃ ~ 40℃ までの広い温度範囲での運転を可能とした。社内での実証試験により約 2,000 時間の耐久性も確認したが、MH キャニスターの軽量化ならびに電源システムのコンパクト化に限度があり、限定的な販売に留まった。



図 21 ポータブル燃料電池電源の外観写真

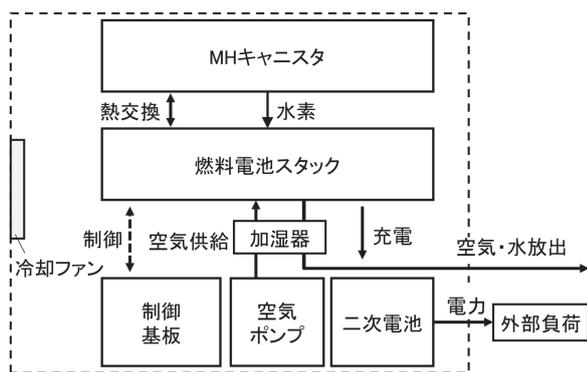


図 22 ポータブル燃料電池電源の構成図

5.2 交通信号機用燃料電池電源

2011年3月に発生した東日本大震災をきっかけとして、交通信号機に対する非常用電源設備が見直されている。非常用電源設備としてディーゼル式の発動発電機やリチウムイオン電池式の電源の設置が進んでいるが、稼働時間やサイズ・スペースの問題により設置数が伸びていなかった。そこで当社では、ポータブル電源の技術を水平展開させる形で交通信号機用の燃料電池電源を開発した⁽²⁶⁾⁻⁽²⁸⁾。図 23 に信号機用燃料電池電源の外観写真、図 24 に電源のシステム構成図を示す。発電構成については、ポータブル電源と同様とし、系統電力から二次電池への充電回路と無停電電源装置 (UPS) 機能を付帯することで非常用電源の機能を持たせた。UPS の給電方式としては、交通信



図 23 信号機用燃料電池電源の外観写真

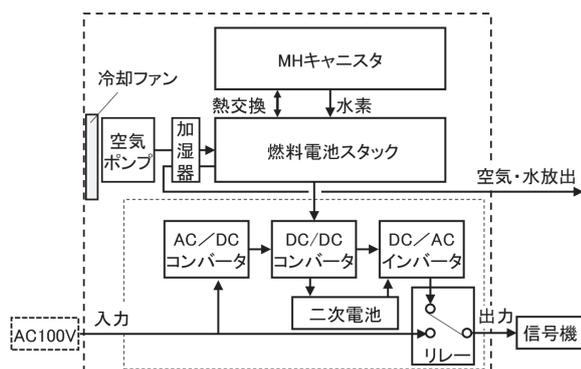


図 24 信号機用燃料電池電源の構成図

号機では外部負荷が信号灯であり、数ミリ秒の瞬時停電は許容されているため、変換ロスが少なく且つ長寿命な常時商用給電方式を採用した。定格出力を 400 W、450 L の MH キャンスターを 3 本搭載することで発電容量を約 1,500 Wh に拡大し、一般的な交差点で約 7.5 時間の運用が可能な仕様とした。また、ポータブル電源と同様にキャンスターの交換による連続運用方式を採用することで、大規模停電時においても非常用電源としての機能を十分に担保できるようにした。

交通信号機では、耐環境仕様として $-10^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$ が規定されており、直射日光なども考慮すると、同用途ではポータブルの用途よりスタックの温度が高くなることが予想される。一般的に空冷式の燃料電池スタックでは、特に高温環境時において、スタックの冷却が不足すると、ドライアップ現象が発生し、スタックの劣化が早まると言われている。それに対して、本システムでは、MH キャンスターとスタックの直接接触によるスタックの能動的冷却に加えて、スタックで発生した排熱を空気ガスの供給側に積極的に戻すことで、スタックの出入口の温度差を低減し、ドライアップ現象を抑制した。更には、筐体内部の温度を監視して、筐体内部が規定温度以上になると冷却ファンを稼働させ、外気を取り込むとともに天板には炎天下時の直射日光を遮熱するような構造も採用した。信号機用燃料電池電源については、過去に数十台が設置され、現在も改良タイプを開発中である。

5.3 非常用燃料電池電源

現在、信号機用燃料電池電源の電力仕様を 2 倍、即ち発電出力：800 W、発電容量：約 3,000 Wh に拡大した非常用燃料電池電源を開発中である。燃料電池スタックには、世界中で数多くの導入実績のある Ballard Power Systems (BPS) 社製の FCgen[®]-1020ACS、空冷式のスタックを採用した。燃料電池スタックから AC100V 出力を変換するパワーコントロールユニット (PCU) については、自社の共振回路技術などを用いて内製化した。図 25 に非常用燃料電池電源の外観写真、図 26 に電源のシステム構成図を示す。BPS 社のスタックは、アノード側はデッドエンド方式、カソード側はカソード開放ならびに自己加湿方式を採用しているため、スタックへの酸素供給とスタックの冷却を同一ファンで行えるなど、スタックを動作させるためのシステム補機を少なくできる特徴を有している。MH キャンスターには信号機用燃料電池電源と同様の 450 L 容器を採用し、ワンタッチカプラで容易にキャンスターを交換できる構造を採用した。PCU は、共振回路技術を用いて、インバータの高調波成分のリップルを低減するとともに、スイッチングロスの低減ならびに PCU の小型化も図った。また、インバータを双方向で使用するにより、系統電

力から二次電池への充電と非常用電源から外部負荷への放電を一つのインバータで行うなど変換ロスの低減を図った。更には、燃料電池スタックと二次電池を併用出力することにより、電源の安定起動を可能にし、急峻な負荷変動にも対応できるようにした。UPSの給電方式は、信号機用燃料電池電源と同様の方式を継承し、商用給電中の待機電力の低減も図った。非常用燃料電池電源については、今年度中にサンプル販売を開始していく予定である。



図 25 非常用燃料電池電源の外観写真

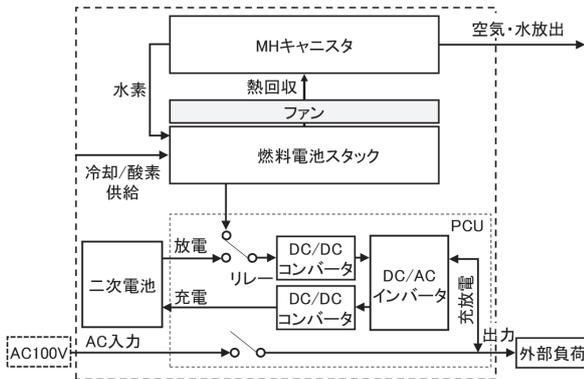


図 26 非常用燃料電池電源の構成図

6. 結 言

当社では、長年培ってきた水素に関する材料技術や機械制御技術を適用し、燃料電池自動車用水素ステーション向けの機器や水素吸蔵合金応用システムの開発に取り組んでいる。水素は可燃性ガスであり広い爆発限界を示すため、安全を第一に信頼性の高い機器システムを提供することが重要となる。長年培ってきた水素に関する技術をさらに高め、いずれ到来するであろう水素エネルギー社会に向けた技術開発をさらに進める所存である。

謝辞

蓄圧器開発における水素ガス中のデータ等は、NEDOの支援を受けた委託事業の結果得られたものであり、感謝申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 下川義雄：鉄と鋼、第57年、第12号(1971), p.1792-1819
- (2) 小林佐三郎、木村熊太郎：学振第19特殊鋼材小委員会、第1分析方法研究会提出報告(1936)
- (3) 高市利夫：日本原子力学会誌、Vol.33, No.6(1991), p.21
- (4) NEDO平成17年度～平成19年度成果報告書・水素社会構築共通基盤整備事業・水素インフラ等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発・「水素インフラに関する安全技術研究」(2005), 非公開
- (5) NEDO平成20年度～平成24年度成果報告書・水素ステーション機器要素技術に関する研究開発・「低コスト型70MPa級水素ガス充填対応ステーション機器に係わる研究開発」(2013), p.86-206
- (6) 福田健三：NEDO FORUM資料(2015年2月東京国際フォーラム), p.10
- (7) NEDO平成15年度～平成16年度成果報告書・水素安全利用等基盤技術開発・水素インフラに関する研究開発・「水素インフラに関する安全技術研究」(2005), p.370-415及びp.495-612
- (8) 服部公治、溝口真一郎、藤後宏之：日本製鋼所技報、No.57(2006), p.90-96
- (9) 日本製鋼所技報、No.55(2004), p.194-195
- (10) 日本製鋼所技報、No.67(2016), p.89-90
- (11) 大西敬三：水素吸蔵合金のおはなし、日本規格協会(1993)
- (12) 小川孝寿、大西敬三、桃野正、三沢俊平：日本金属学会誌、Vol.51(1987), p.102-110
- (13) 兜森俊樹、小川孝寿、手代木邦夫、大西敬三：日本金属学会誌、Vol.51(1987), p.157-164
- (14) 兜森俊樹、高橋俊男、竹田晴信、脇坂裕一：日本製鋼所技報、No.53(1997), p.21-30
- (15) 青木康祐、室正彦、山田人久：日本金属学会誌、Vol.69(2005), p.1031-1038
- (16) 久保和也、伊藤秀明、荒島裕信、高橋俊男、兜森俊樹：日本製鋼所技報、No.55(2004), p.14-22
- (17) 脇坂裕一、竹田晴信、室正彦、大西敬三：日本製鋼所技報、No.46(1992), p.71-76
- (18) 竹田晴信：省エネルギー、Vol.47(1995), p.48-49
- (19) 竹田晴信、兜森俊樹、脇坂裕一、西村勇作、神木常喜、佐藤純一、春木仁朗、藤田鉄博：火力原子力発電、Vol.49(1998), p.1162-1170
- (20) 岩本隆志：ボイラ研究、No.314(2002), p.45-51
- (21) 吉永泰、河原崎芳徳、小野信市：日本製鋼所技報、No.55(2004), p.105-110
- (22) E. Gray, J. Webb, J. Andrews, B. Shabani, P. J. Tsai, S. Chan：International Journal of Hydrogen Energy, Vol.36(2011), p.654-663
- (23) 時田大樹、河原崎芳徳、久保和也、河合政征：日本製鋼所技報、No.67(2016), p.38-45
- (24) 小田知正、河原崎芳徳、岩本隆志、佐藤幸司、深津佳昭：第51回電池討論会要旨集, p.338
- (25) 小田知正、河原崎芳徳、岩本隆志、佐藤幸司、深津佳昭：第52回電池討論会要旨集, p.430
- (26) 小田知正、河原崎芳徳、佐藤幸司、深津佳昭：第53回電池討論会要旨集, p.440
- (27) 小田知正、河原崎芳徳：第54回電池討論会要旨集, p.511
- (28) 小田知正、河原崎芳徳、河合政征：第21回燃料電池シンポジウム予稿集, p.83-85