

展望

水素エネルギー社会の実現に向けて

—水素利用技術の現状と展望—

Realizing the Hydrogen Energy Future

—Present Status and Future Perspective of Hydrogen Utilization Technologies—

大角泰章

Yasuaki Osumi

水素エネルギー技術コンサルタント
前鹿児島大学 教授

1 はじめに

近年、1年間に使用する石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料中の炭素量は数十億トンと言われ、それに伴う二酸化炭素 (CO₂) の放出量は地球のもつ処理能力をはるかに超え、CO₂の濃度は370ppmにまで上昇している。特に火力発電所から放出されるCO₂や、ガソリンを燃料とする自動車の排ガスなどで地球温暖化や環境汚染が急速に進んでおり、この問題を解決するには長期的な地球規模での対策が必要である。国内における2001年度の温室効果ガスの総排出量は、CO₂換算で約12億9,900万トンである。CO₂排出量を1990年レベルに戻すという、京都議定書目標を達成するには現状の排出レベルを11%削減する必要がある。

環境汚染や地球温暖化に併せてエネルギー源の枯渇化を考慮すると、図1に示すような水素利用クリーンエネルギーシステムの社会への導入が要望される。太陽光、風力、地熱、水力などの自然エネルギーから得た電力で水を電気分解した水素、バイオマス・廃棄物から得た水素、コークス炉ガスから得た副生水素などを水素吸蔵合金や燃料電池との組み合わせることにより循環型水素利用クリーンエネルギーシステムの構築が可能となる。

現在、水素エネルギーはロケット燃料として直接使用されている他、事業所用リン酸形燃料電池、水素吸蔵合金を用いたニッケル水素化物電池、ニッケル水素化物電池搭載電気自動車やハイブリッド電気自動車、オンサイト用水素製造装置、水素燃料容器などが商品化されている¹⁻³⁾。

国内で2002年12月に販売された純水素燃料電池車は排出するのは水だけというクリーンな車で、その普及には水素インフラストラクチャー (社会的経済基盤、以下水素インフラと略す) の整備が必要である。現在燃料電池車の導入に伴い自動車用水素供給ステーションの建設が進められている。さらに、固体高分子形燃料電池を用いた家庭用コージェネレー

ションシステム及び携帯電話やノートパソコンなど電子機器に使用できる小型燃料電池の開発が各企業において進められており、2004～2005年の実用化を目指している。

水素吸蔵合金を用いた技術としては水素貯蔵・運搬容器、ニッケル水素化物電池で走る高性能電気自動車やハイブリッド電気自動車、フロンを用いない冷凍機・冷暖房空調器などの開発が進められている^{1,3)}。

本稿では、水素エネルギー社会の実現に向けていま注目さ

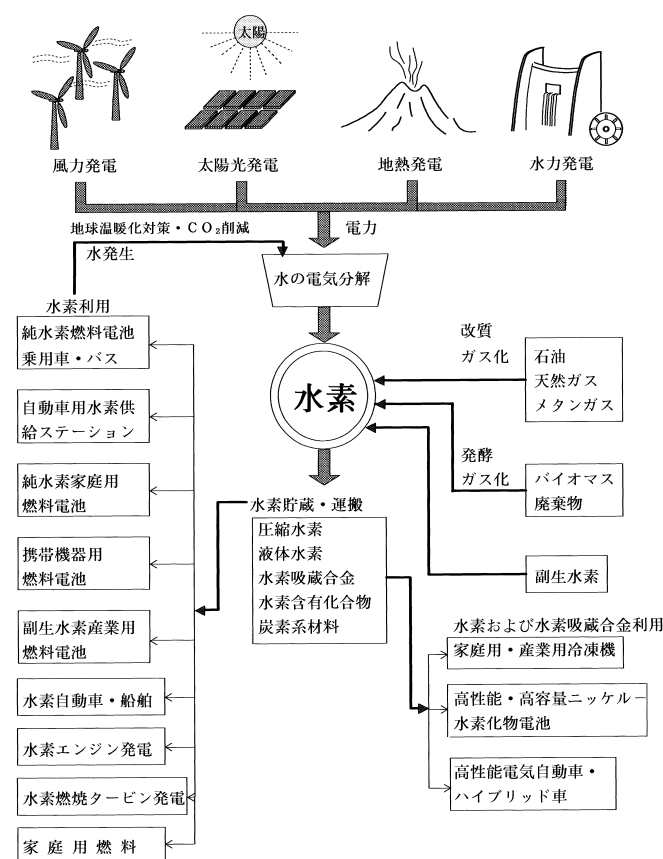


図1 水素利用クリーンエネルギーシステム

れている幾つかの水素利用技術の現状と課題及び今後の展望について紹介する。

2 水素貯蔵・運搬技術の現状

水素を燃料とする自動車の走行距離を長く確保するには、少しでも多量の水素をより安全に貯蔵・運搬する技術や、それを支える水素貯蔵材料の開発が重要である。表1に主な水素貯蔵法の比較を示す。

圧縮水素ガスによる方法については、アルミニウム、プラスチックあるいは高密度ポリエチレンライナー（枠）を炭素繊維とエポキシ樹脂で強化した35～70 MPaまで耐圧可能な軽量水素貯蔵タンクが製作され、燃料電池車に搭載されている。35 MPaの圧縮水素タンクでも走行距離は350 km程度で、通常の乗用車の500 km以上と比べて短い。しかも高圧のため水素ガス漏れなどの安全性に対する注意が必要である。

液体水素による方法では、タンクが小型・軽量にできるが、沸点－253℃の液体水素は常にボイルオフ（自然蒸発、1日当たり3％以下の実績値）やフラッシュ（移送中の蒸発）を起こすため、ガスの損失に対する対策が必要である。ボイルオフガスの損失を防ぐ高真空多層断熱構造をもつ自動車搭載用液体水素タンクが開発されている。

水素吸蔵合金を用いる方法は、LaNi₅、MmNi₅（Mm：ミッシュメタル、希土類金属の混合物）、TiFe、TiMn_{1.5}など

の合金を用いることにより、気体水素や液体水素よりも高い水素密度で水素を貯蔵することができる。合金と水素の反応は、可逆的に水素を吸蔵・放出し、反応速度も大きく、反応熱も大きい特長をもっている。気体の水素は高圧ボンベに詰めると体積を約1/200に、液化すると約1/800に縮小することができる。水素吸蔵合金は気体の水素を吸蔵して固形化して貯えるもので、標準状態（0℃、0.1 MPa、1atm＝0.101 MPa）の水素の体積の約1/1000にまで縮小することができる。このことから、水素吸蔵合金を用いて水素を貯えることは、よりコンパクトで、より安全な貯蔵方法といえる。しかし、合金自体の重量が重いので、タンクの重量が増し、圧縮水素や液体水素に比べて不利となる。

表2に主な水素吸蔵合金の特性を示す。水素は合金中のある定まった結晶格子間隙に原子状態で侵入し、水素（H）と金属（M）の原子比（H/M）が1である金属水素化物を生成する。水素吸蔵量は合金の構成原子の種類により決まり、軽い金属からなる合金ほど大きい水素吸蔵量を有している。水素吸蔵合金は、安定な水素化物を生成しやすい金属元素A（希土類金属La、Pd、Ti、Zr、Mgなど）と水素化物を生成しにくい金属元素B（Fe、Ni、Co、Mnなど）から構成されており、B元素がA元素と水素との結合性を弱める働きをする。現時点では、約100℃以下の温度で水素を3 wt％程度吸蔵・放出するTi-Cr系多元合金やTi-V系多元合金が見いだされている。小型・軽量の水素貯蔵タンクとしては、分割セル構造や一体化セル構造をもつアルミニウム合金製水素吸蔵

表1 主な水素貯蔵法の比較

方法	技術内容	長所	短所
圧縮水素ガス	・球形タンク、円筒タンク 50～700m ³ 内容積、10atm ^{*1} ・ボンベ、コンテナ、スライドローダー 600～1,500Nm ³ 、150～200atm ^{*1} ・アルミニウム製軽量耐圧容器 35MPa、22.6kg/m ³ 、 水素貯蔵量8.5～11.3wt％	・一般的な普及貯蔵技術 ・低エネルギー消費	・高圧 ・低体積 エネルギー密度 ・容器が重くかさばる ・小中型貯蔵容器向き ・安全性に劣る
液体水素	・沸点－252.8℃、密度70.8kg/m ³ ・真空断熱容器（タンクまたはデュワー） ・最大容量（タンク） 国内 540m ³ 、7kgf/cm ² G ^{*2} 国外 NASA 3,218m ³	・高重量エネルギー密度 ・体積密度も大きい ・大量貯蔵が可能	・電力と費用が大 ・ボイルオフ（蒸発） ・フラッシュ（蒸発） ・安全性に劣る
水素吸蔵合金	・合金水素化物の形態で貯蔵 常温、常圧付近で使用できる ・熱交換器方式の反応容器 ・合金、水素貯蔵容器などの商品化	・安全性が高い ・高体積エネルギー密度 ・熱で水素が吸蔵・放出 ・所要動力が小さい ・長期貯蔵が可能	・合金が重い ・合金が高価 ・微粉化と被毒
炭素系材料	・極低温・高圧 －200℃～室温、50～100atm ^{*1} ・物理吸着と圧縮充填による貯蔵 ・実験室・研究開発中	・圧縮水素ガスより高密度 ・軽量材料	・冷却剤が必要 ・容器の耐圧が必要 ・かさ密度が低い
水素含有化合物	・可逆的水素含有化合物の形態で貯蔵・輸送 ・可逆的錯体型水素化物 ・シクロヘキサン、デカリン	・水素への変換率が大きい ・輸送効率が低い ・液体で貯蔵・輸送	・脱水素化にエネルギーが必要

* 1 : 1 atm = 0.101325 MPa
* 2 : 1 kgf/cm² = 9.80665 × 10⁴ Pa = 0.0980665 MPa = 0.967841 atm

表2 主な水素吸蔵合金の特性

型	合金	水素吸蔵量 wt％	水素放出圧 （温度） MPa（℃）	水素化物の生成熱 （エンタルピー変化） ΔH（kJ/mol H ₂ ）
A B ₅	LaNi ₅	1.4	0.4（50）	－30.1
	MmNi ₅	1.4	3.4（50）	－26.4
	MmNi _{4.5} Mn _{0.5}	1.5	0.4（50）	－17.6
	MmNi _{4.5} Al _{0.5}	1.2	0.5（50）	－29.7
	MmNi _{2.5} Co _{2.5}	1.2	0.6（50）	－35.1
	CaNi ₅	1.2	0.04（30）	－33.5
A B ₂	TiMn _{1.5}	1.8	0.7（20）	－28.5
	TiCr _{1.8}	2.4	0.2～5（－78）	－
	ZrMn ₂	1.7	0.1（210）	－38.9
	ZrV ₂	2.0	10 ^{－9} （50）	－200.8
A B	TiFe	1.8	1.0（50）	－23.0
	TiFe _{0.8} Mn _{0.2}	1.9	0.9（80）	－31.8
A ₂ B	Mg ₂ Ni	3.6	0.1（253）	－64.4
B C C 固溶体	V-10at％Ti-12.5 at％Cr-3at％Mn	2.64	0.01（100）	－
	Ti _{1.6} Mn _{0.9} V _{1.1}	2.0	－	－
	Ti ₂₄ Cr ₃₆ V ₄₀	2.77	0.1（100）	－

1 atm = 0.101325 MPa

合金タンクが製作され、燃料電池車に搭載されている。

水素吸蔵合金技術に関して今後必要な開発課題は、合金中の可逆的な水素吸蔵量の増大化（3 wt %以上、自動車用は5 wt %以上）、常温で水素を吸蔵し、100℃以下で水素を放出できる新規合金の開発、合金の安定化と長寿命化（5,000サイクル以上）、合金の低コスト化などである。

その他の水素貯蔵材料として、可逆的錯体型水素化物（ケミカルハイドライド）は NaAlH_4 、 Na_3AlH_6 、 NaBH_4 などの熱分解や加水分解により水素を発生させるが、水素放出速度は速いが可逆的な反応が必ずしも円滑に進まないようである。カーボンナノチューブなどの炭素系材料は極めて多量（5～10 wt %）の水素を吸着することで注目されたが、水素吸着量にかなりのばらつきが見られ、実験の信頼性の向上が望まれる。シクロヘキサン（ C_6H_{12} ）やデカリン（ $\text{C}_{10}\text{H}_{18}$ ）など有機ハイドライドは、輸送効率が高く、液体で大量かつ安全に輸送できるが、反応物から水素を分離・回収することや水素化と脱水素化が必ずしも円滑に進まない問題点もある。

3 携帯機器用ニッケル－水素化物電池の開発現状

1990年に世界で初めて我が国で希土類系水素吸蔵合金を用いた小型密閉型ニッケル－水素化物電池が商品化された。この電池は、従来電池の2倍以上の大容量で、安定性が高く、クリーンであることから、携帯電話、ノート型パソコン、ビデオカメラ、コードレス電話などの各種携帯機器用電源やシェーバその他の家電及び電動工具などの電源として普及が著しく進展している。2000年度ではニッケル－水素化物電池の生産量が10億個と小型二次電池の半分を占めるまでになっている。

現在生産されている小型密閉型ニッケル－水素化物電池は、金属缶ケースからなる円筒形と角形である。円筒密閉型電池は、親水性を付与したスルホン化ポリオレフィン不織布のセパレーターを介して、ニッケル酸化物 $[\text{Ni}(\text{OH})_2]$ 水酸化ニッケル/ NiOOH オキシ水酸化ニッケル正極板と水素吸蔵合金 $\text{MmNi}_{5-x-y-z}\text{MnxAl}_y\text{Co}_z$ （ $0.2 \leq x \leq 0.4$ 、 $0.1 \leq y \leq 0.3$ 、 $0.3 \leq z \leq 0.75$ ）の基本組成の合金水素化物（MH）負極を渦巻き状に巻き付けた構造で、電解液は6～7.2モル濃度のKOH水溶液にLiOHを添加したアルカリ水溶液を使用した電池である。

図2に示すように、充電時には負極で水の電気化学的還元反応で水素原子と水酸イオンが生成し、この水素原子が合金中に侵入して合金水素化物を生成して合金中に貯蔵される。正極では $\text{Ni}(\text{OH})_2$ から引き抜かれた水素が水酸イオンと反応して水となる。放電時にはその逆の反応が起こる。負極で

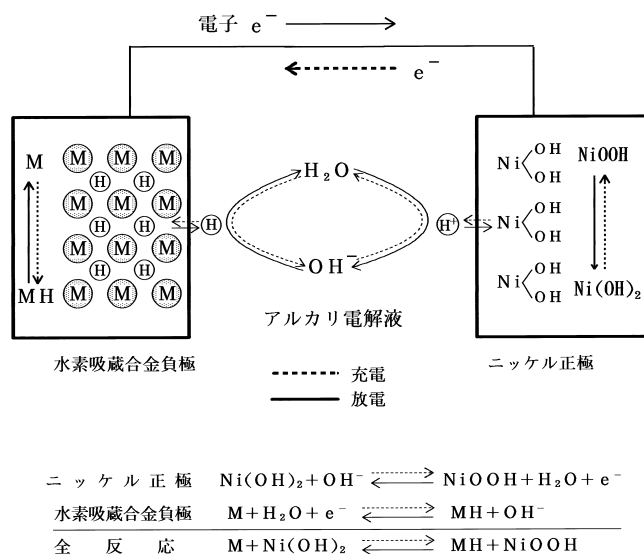


図2 ニッケル－水素化物電池の充放電反応

は合金水素化物（MH）中の水素原子が酸化されて水になり、正極では NiOOH が $\text{Ni}(\text{OH})_2$ に還元される。全電池反応は正極と負極の間を水素が移動するだけであり、水は見かけ上関与しないので、充放電に伴う電解液の濃度は変化しない。ニッケル－水素化物電池の体積当たりのエネルギー密度は317Wh/lでリチウムイオン電池（300～350Wh/l）と同等となっている。一方、重量当たりのエネルギー密度は80Wh/kgまで向上しているが、まだリチウムイオン電池に比べて重く、エネルギー密度は約30%低くなる。この電池は、リチウムイオン電池に比べて、価格は半分以下、多少重いが安全性、出力特性、寿命特性にも優れ、充放電制御が容易であり、急速充電性が良いなどの利点がある。Ni-Cd電池の通常タイプの約2倍のエネルギー密度をもち、500回の完全充放電サイクルが可能である。しかし、2001年度では、IT不況などにより出荷数量（6億4,770万個）は前年度に比べて約36%減少している。環境対策からNi-Cd電池の代替電池として欧米向けの携帯機器に装填され輸出されている。今後は、大容量・高性能な電池の開発のためには、水素吸蔵量の大きい新規水素吸蔵合金の開発が重要である。

4 電気自動車とハイブリッド 電気自動車への水素吸蔵合金の応用

電気自動車（EV）は、電池のみで駆動する無排気車両（ZEV、Zero Emission Vehicle）と、エンジンと電池で駆動するハイブリッド電気自動車（HEV、Hybrid electric vehicles）に大別される。1990年、米国カリフォルニア州で、大気汚染規則法案が成立し、自動車メーカーにZEV、HEVの販売を義務づけるようになった。これをきっかけに、電気自

動車用高性能二次電池の開発が活発化し、我が国では電気自動車用の大型ニッケル水素化物電池が世界に先駆け実用化された。1996年、従来の鉛電池に比べて2倍の走行が可能な大型電池を搭載したZEVの生産が開始され、走行試験が行われた。しかし、電池を搭載したZEVは、走行距離が短い、充電時間が長い、電池のコストが高いなどといった実用性の観点から問題が多い。自動車メーカーはZEVを生産すると経済的な損失が発生するため、ZEVの生産及び販売には消極的である。その代わりに1997年に低燃費で、排気ガス1/10のニッケル水素化物電池搭載のHEVが市販された。現在ニッケル水素化物電池は、ZEV、HEVにとって主流電池となっており、MmNi₅系多元水素吸蔵合金は負極材料として最も重要な役割を果たしている。

図3にハイブリッド電気自動車システムの一例を示す⁴⁾。HEVはガソリンエンジンと二次電池、および走行時の発電で動くモーターを搭載している。電池の充電量が少なくなればエンジンを動かして蓄電し、ブレーキ時に発生するエネルギーも電気に変えて蓄える。発進や加速の時にその電力でモーターを動かし、ガソリンの消費量を抑える仕組みとなっている。国内ではトヨタ自動車、本田技研工業、日産自動車などがZEVやHEVを販売しており、2001年度におけるHEVの売上台数は1万9000台に達している。2003年9月に改良したHEVはガソリン1l当たり35.5kmの低燃費を実現しており、1カ月の受注は1万7000台と目標の6倍近くになっている。

EV用ニッケル水素化物電池は、エネルギー密度60～70Wh/kg、150～170Wh/l、出力密度200W/kg、430～480W/l、サイクル寿命1000回以上、充電時間8時間^{*1}、コスト10万円/kWhなど良好な性能を得ている。今後の課題

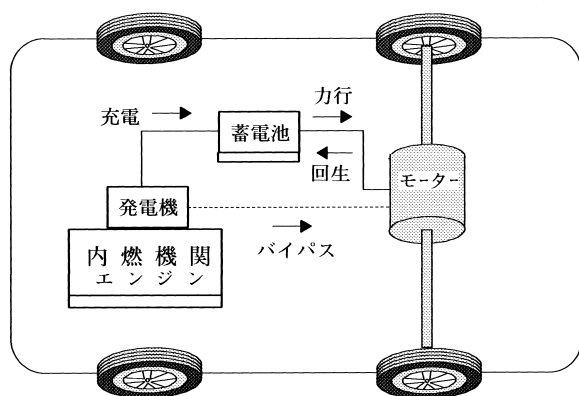


図3 ハイブリッド電気自動車システム⁴⁾
(ベースは電気自動車、エンジンで発電し電力を供給するシステム)

は、電池コストの低減である。電池の長寿命化によってサイクル当たりのコストを低減することができる。将来究極のクリーンな自動車はZEVと純水素燃料電池車になると考えられる。

5 脱フロン冷暖房・冷凍システムへの水素吸蔵合金の応用

水素吸蔵合金は水素吸蔵時に発熱し、水素放出時に吸熱する。この性質を利用すると太陽熱や工場廃熱を用いて暖房・冷房用ヒートポンプや冷凍機が実現できる。水素吸蔵合金を用いたヒートポンプは、平衡水素圧の異なる2種類以上の水素吸蔵合金を1対として組み合わせ、この圧力差によって水素を一方の合金から他方の合金へ移動させ、その際の吸蔵時の発熱と放出時の吸熱を利用するものである。合金水素化物の生成過程と分解過程を2種類の水素化物の間に起こさせて、熱あるいは冷熱を発生させる。この反応を連続的に行わせるために、2種類の合金対を2組以上組み合わせ、交互に反応熱が得られるようにする。合金間で単位時間当たりに流すことのできる水素量の多い少ないが、ヒートポンプの性能の良さを決める鍵となる。図4に水素吸蔵合金を用いたヒートポンプの室内冷房の過程図を示す。冷熱過程では第1容器のMbH (Mb合金の水素化物) は吸熱反応により水素を放出する。この時の吸熱作用により水が冷やされ冷水が得られる。この冷水により室内の冷房が行われる。一方、昇温過程は、上述の過程の逆の作動をしたもので、高温側のMa合金が水素を吸蔵する時の発熱を利用したものである。

1990年代に入ってからフロン規制に伴い、水素吸蔵合金を用いた冷凍機が試作されている。日本製鋼所は、フロンを

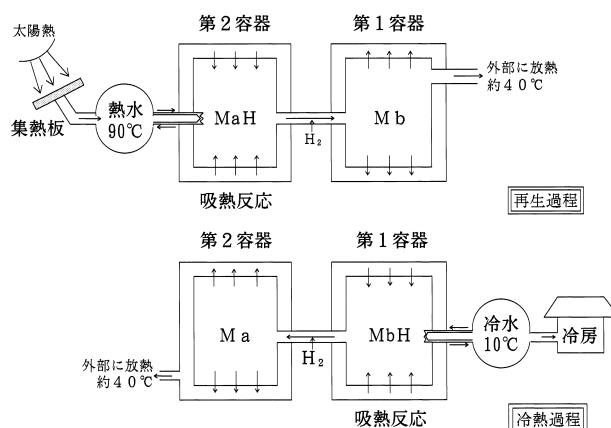


図4 水素吸蔵合金を用いたヒートポンプの室内冷房の過程図
平衡水素圧：合金Mb>合金Ma

*1 充電時間8時間は、USABC (米国の次世代電池開発組合) の中期目標をほぼ達成している。

使わずTiZr (CrFe)₂系多元合金と水素との反応熱を冷熱源に用いた水素吸蔵合金冷凍システムを開発している。この冷凍システムを室内容積が110 m³の1万kcal/hr級の冷凍庫に接続し、庫内温度を-30℃程度まで低下することを実証している。成績係数(ヒートポンプの熱効率：出力と入力エネルギーの比)は0.35を達成している。最近、日本製鋼所がメタン発酵ガスの燃焼による280℃の廃熱と西条市の地下水を利用した水素吸蔵合金冷凍機を試作し、F級(-20℃以下)とC級(0℃)の冷凍出力を得るアドバンス型ハイブリッド冷凍システム⁵⁾の実証試験を行っている。このシステムは、フロンを使用しない、廃熱や地下水の有効利用ができる、電力消費が少ない、CO₂の削減ができるなどの特長がある。

今後期待される冷凍システム技術としては、高効率の水素吸蔵合金充填容器(熱交換器)、廃熱をうまく使える環境技術、高水素量の水素貯蔵材料の開発などがある。

6 水素で走る燃料電池車の開発現状と課題

燃料電池車は、燃料電池を駆動電源として発電しながら電気モーターで車輪を駆動させて走行する電気自動車で無排気車である。水素を燃料とするため排出されるのは水だけであり、エネルギー効率が低い、水素源が多様、騒音が少なく静かななどといった高効率でクリーンな究極の車として注目されている。図5に純水素型燃料電池自動車システムを示す。燃料電池車はエンジンを燃料電池に置き換えた構成になっており、低負荷時と高負荷時の効率の悪いところだけは二次電池でモーターを駆動する仕組みになっている。ブレーキ時に発生するエネルギーも電気に変えて蓄え、エネルギー効率を高めることができる。HEVの車両効率及び総合効率が32%、28%に対して、燃料電池車のそれは50%、29%である。

燃料電池車の中心部は燃料電池本体である。この電池は水素と酸素(空気)を固体高分子電解質によって隔てられた負

極と正極に供給する。電解質にはプロトン(H⁺)導電性のイオン交換膜(ナフィオン)を用い、電極はカーボンに白金系貴金属触媒を担持したガス拡散電極を用いる。この構成単位をセルという。1組の燃料電池は1枚の電解質膜を2枚のセパレータで挟んだ構造になっており、1セルが2~3 mm程度の厚さである。図6に固体高分子形燃料電池の仕組みを示す。まず負極に供給された水素が触媒により酸化され、水素イオンと電子を生ずる。水素イオンは電解質膜を通して正極に達し、触媒によって酸素ガスと反応し水を生成する。その際、電子は外部回路を通ることにより、電流が取り出される。全反応は水素の燃焼反応となる。

純水素燃料電池では、反応温度が25℃の場合、理論電圧は1.23 V、理論効率は83%となり、内燃機関の効率40~50%と比べて非常に高い。実際の電池で電流を取り出すと、電流増大とともに電圧は過電圧などにより理論電圧より低下する。1つの単セルで発生する電圧は約0.7 Vで、実際の燃料電池ではこのセルを400セル直列につないで二百数十Vの電圧を得ている。固体高分子形燃料電池は、高出力密度が得られ、常温~80℃で作動するので、コンパクト性と始動性に優れているなど多くの特長がある。

国内では、燃料電池実用化推進協議会が2010年には燃料電池車5万台、定置用燃料電池210万kW(約120万世帯分)を、2020年には、燃料電池車500万台、水素供給ステーション4,000カ所、定置用燃料電池1,000万kW(約570万世帯分)を導入目標としている。2002年12月にトヨタ自動車と本田技研工業が世界で初めて圧縮水素方式(35 MPa)の純水素燃料電池車の実用化に成功し、限定販売を始めた。現在、国内と米国で年間20~30台を目標に官公庁や電力・ガス会社などの企業向けに限定してリース方式で販売されている。そのうち7台は政府公用車として使用されている。これらの車は固体高分子形燃料電池(出力：トヨタ90 kW、本田78 kW)とニッケル-水素化物電池を搭載し、300~355 km以上の走行距離を達成している。トヨタ自動車と日野自動車が共同で開発した圧縮水素方式(35 MPaタンク5本搭載)の

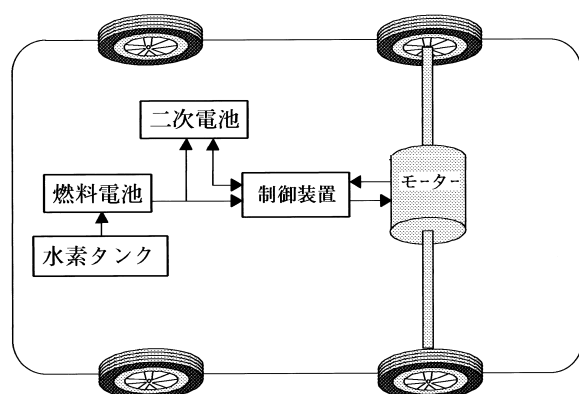


図5 純水素型燃料電池自動車システム

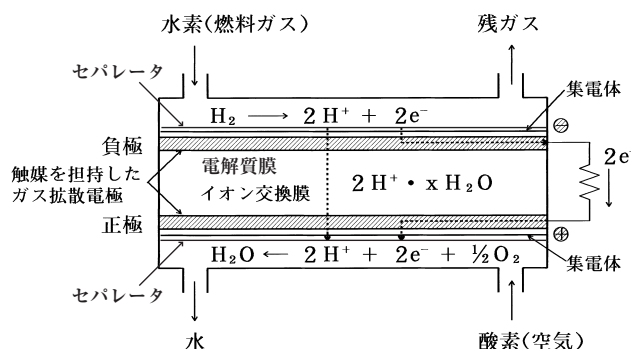


図6 固体高分子形燃料電池の仕組み

燃料電池バスを東京都営バスの路線で国内で初めて2003年8月から運行を始めている。

国外でも数多くの純水素燃料電池車^{*2}やバスが開発されている。Daimler-Chrysler社は、圧縮水素タンク(35 MPa)とニッケル-水素化物電池搭載の純水素燃料電池車を開発し、1回の充填で約150 km走行できる。同社は燃料電池車の市販めどを2004年としており、燃料電池バスを欧州に限定して市販する計画を進めている。また、今後各国の都市(16カ国、24都市)が2005年までに圧縮水素搭載燃料電池バスを導入すると発表している。GM社は2001年に液体水素タンク(68ℓ、4.6 kg)搭載の燃料電池車Hydrogn3を開発し、走行距離400 kmを達成している。Ford社は2002年に圧縮水素タンク(35 MPa)を搭載した燃料電池車FocusFCVも開発している。

純水素型燃料電池車の水素搭載方法には、圧縮水素、液体水素、水素吸蔵合金がこれまで選択されてきているが、現状では各搭載方法の将来の方向がまだ決まっていない状況にある。ただし、最近、35 MPa、70 MPaの高圧軽量圧縮水素容器が実用化されたことで、開発は圧縮水素方式に絞られてきているのが現状である。

表3に燃料電池車の市場導入に向けた技術的課題を示す^{6,7)}。低温-10℃以下で燃料電池の出力は大幅に低下する。これは低温で発電したときに発生する水がセル内部で部分的に凍るためと考えられている。実際の自動車は-40℃での保証が必要である。本田技研工業は、低温でも導電性の高い電解質膜とプレス加工した金属で製造したセパレータを採用し、-20℃以下でも始動できる燃料電池を開発している。最大の課題は低コスト化で、目標6,000円/kW(50ドル/kW)は量産効果だけでは達成が不可能であり、技術的ブレークスルーが必要である。白金触媒使用量の低減や貴金属を用いない触媒の開発が重要である。今後の開発が期待される自動車

表3 燃料電池車の市場導入に向けた技術的課題^{6,7)}

走行距離	目標500km。水素搭載技術の開発。
耐久性と信頼性	長期の検証が必要。電池寿命5,000時間、起動停止数万回。5年で10万km保証。
軽量・コンパクト化	燃料電池の出力密度の向上(1.75~2.2kW/ℓ)
安全性・法規制	安全性の確立と法規制の緩和。
水素インフラ	水素供給のためのインフラの整備。
燃料電池システムの低コスト化	目標6,000円/kW。白金触媒使用量の低減。
環境適合性	低温(-10℃以下)での環境適合性の向上。 -40℃での使用保証。低温起動時間の短縮(2分以内)

用水素搭載技術としては、安全な70 MPa高圧軽量・圧縮水素容器、水素吸蔵量5 wt%以上の水素吸蔵合金と小型・軽量合金タンク、ボイルオフの少ない液体水素タンクの開発などがある。

7 水素インフラ整備の開发现状

現在、世界各国において燃料電池車用水素インフラの技術開発や実証試験が行われている⁸⁾。水素燃料電池車を社会に普及させるためには、自動車の開発だけでなく、水素供給ステーションの整備が必要である。図7に各種水素源と水素供給ステーションシステムを示す。

国内で短期に利用できる水素源としては、化石燃料の改質、水の電気分解、バイオマス・廃棄物の発酵やガス化による水素の製造、製鉄所のコークス炉や食塩電解工場から発生する副生水素、石油精製プロセスからの副生水素などがある。これらのうち副生水素の供給可能量は最大でも年約93億m³であり、利用できる可能性のある副生水素発生量は食塩電解工場で年12億Nm³、コークス炉工場で年53億Nm³と推定されている。両者を合わせた年65億Nm³は500万台の燃料電池車に供給可能な量に匹敵している。現在副生水素は外販圧縮水素、工業原料や工場の燃料などに利用されている。外販圧縮水素は副生水素を工業用に精製し、高圧容器に充填したものである。

水素供給ステーションは、ステーションにおいて天然ガスやメタノールの改質、水電解により水素を製造して供給するオンサイト方式と、工場で製造した水素、液体水素や副生水素を運搬・貯蔵して供給するオフサイト方式があり、設置場所や使用条件や水素源に応じてその特長を生かした最適な型式が選択される。水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術計画(WE-NET計画)第Ⅱ期(1999~2003年)では、天然ガスの水蒸気改質により水素を製造する天然ガス改質型と、オフピーク電力を利用した固体高分子電解質水電解型の2つのオンサイト方式水素供給ステーション(水素製造能力30Nm³/hr、実用規模の約1/10、水素純度99.99%)が2001年に大阪と高松にそれぞれ設置され、その実証試験が行われた。図8に固体高分子電解質水電解型の水素供給ステーションシステムを示す。また、副生水素輸送・貯蔵型のオフサイト方式水素供給ステーションが2002年に横浜に設置された。ソーダ工場の副生水素(99.99%以上)を2,600 m³型20 MPaトレーラーを用いてステーション内に輸送・貯蔵し、圧縮水素を燃料電池車に充填させる。

水素・燃料電池実証プロジェクト(2002~2004年)では、

*2 純水素燃料電池車：一般に燃料改質型燃料電池と区別するために用いている。

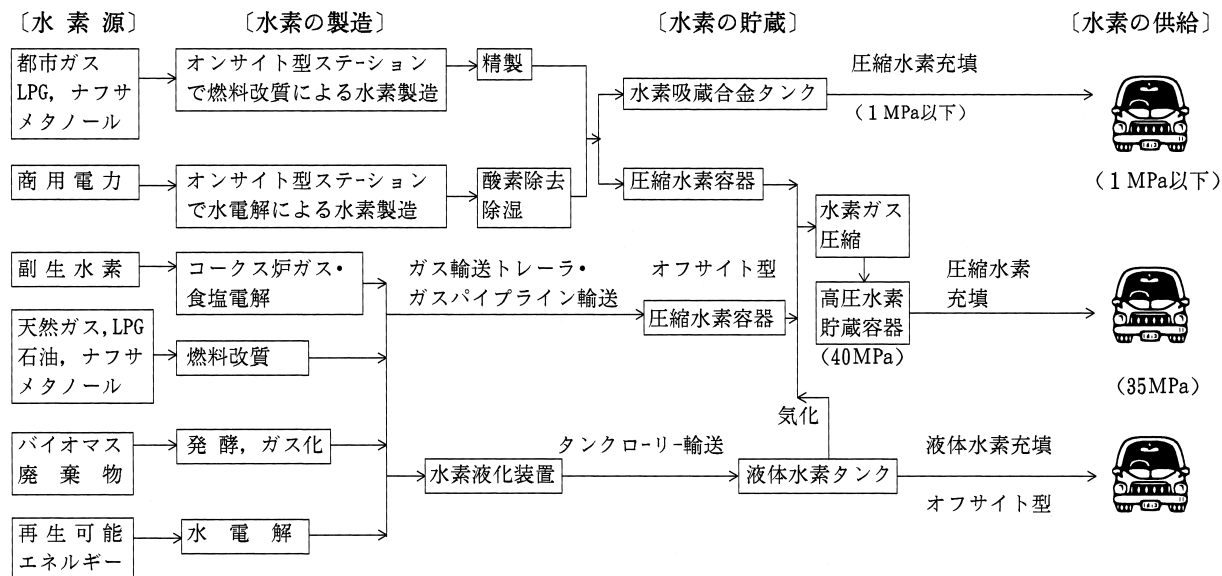


図7 水素源と水素供給ステーションシステム

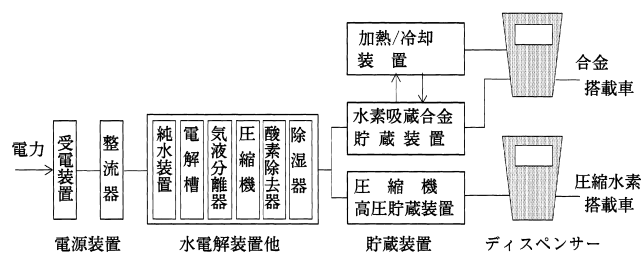


図8 WE-NET計画における固体高分子電解質水電解型水素供給ステーションシステム

水素製造能力30Nm³/hr、水素純度99.99%、
 水素吸蔵合金貯蔵装置30Nm³×2基
 高圧貯蔵装置250L×3本、圧力40MPa
 充填圧力 合金搭載車1MPa以下、圧縮水素搭載車25、35MPa
 WE-NET：World Energy Network、
 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術計画

脱硫ガソリン、ナフサ、LPガス、メタノールの改質型、液体水素輸送・貯蔵型や移動式（政府公用車用、圧縮水素貯蔵）の各種水素供給ステーションが2003年に首都圏に完成し、その後はトヨタ自動車、本田技研工業、General Motors、Daimler-Chryslerの燃料電池車の走行試験とこれらのステーションの実証試験が併せて行われている。車への水素の充填にかかわる安全性や信頼性の検討を行うのが目的である。

各種水素供給ステーションの特徴は次の通りである。燃料改質型では、既製のインフラが利用できるのも、水素コストが比較的安価であるが、起動に3～5時間を要するので連続運転が望ましい。水電解型では、起動時間が数10分と短く操作性が良く、オフピーク電力の利用が可能である。液体水素輸送・貯蔵型では、大量貯蔵が可能であるが、ボイルオフガスの回収が必要である。高圧水素輸送・貯蔵型では、既存のインフラの副生水素を有効利用することが可能で、設備費

が安価で運転が容易である。

今後の開発が期待される水素供給ステーション技術としては、低コストの小型燃料改質装置や精製装置、低コストで長寿命の固体高分子電解質水電解装置、加熱・冷却エネルギー消費の少ない水素吸蔵合金貯蔵装置、水素吸蔵合金利用の水素圧縮機、高圧水素（70 MPa）を急速充填するための充填制御機器などがある。水素供給ステーションの市場の導入・普及を図るためには、安全対策、法規制の緩和、設備コストの低減、国の政策的支援、技術基準の策定、国際標準化、一般市民の教育・啓蒙などの課題の解決が必要である。

水素エネルギーと燃料電池の社会への導入の成否は、燃料電池車のコストと水素のコスト低減ができるかどうかにかかっている。水素供給ステーションで製造する水素コストは、オフサイト方式の副生水素（ガス）輸送方式で41.5円/Nm³、副生水素（液体）輸送方式で67.6円/Nm³、オンサイト方式の天然ガス改質方式で45.4円/Nm³、メタノール改質方式で52.8円/Nm³、固体高分子電解質水電解型方式で95.2円/Nm³と試算されている⁷⁾。現状では、副生水素（ガス）と天然ガス改質水素が比較的に安価である。

コストの試算によると水素が石油燃料と競合できるためには、水素コストは小型乗用車で76～100円/Nm³、バスで45～59円/Nm³まで落とす必要がある。石油燃料コストは小型乗用車（ガソリン）で105円/L、バス（軽油）で84円/Lとなっており、水素コストが100円/Nm³以下であると石油燃料車の燃料費と競合が可能である⁷⁾。また、水素ステーション1カ所当たりの設備投資は、1日車240台に給水素するステーション規模において、目標の設備投資額を200～250百万円とした場合、導入目標の4,000カ所分のステーションコストは約1兆円と試算されている⁷⁾。

8 家庭用・携帯機器用燃料電池の開発現状

我が国の家庭でのエネルギー消費量は増大し続けており、2000年度では全エネルギー消費量の14%にまで達している。このため家庭での省エネルギーの必要性やCO₂排出量の少ないエネルギー機器の導入が要望されている。現在、国家的プロジェクトとして家庭用及び定置用固体高分子形燃料電池コージェネレーションシステムの実用化が進められている。

家庭用燃料電池コージェネレーションシステムは、天然ガス改質器、燃料電池スタック、インバータ、貯湯槽とバックアップ給湯器を一体化した排熱回収装置及び周辺機器により構成されている。このシステムでは、発電の際に発生する熱を暖房、給湯などに利用することで、電気と熱を合わせた総合熱効率が70～80%となる。大型火力発電所の発電効率は40～50%程度であり、これに比べて省エネルギー効果は極めて高い。コージェネレーション発電設備を身近に設置して効率良く温水を輸送するため、発電設備を電気や熱の需要に合わせて数kW～数千kWに分割する必要がある。現段階では家庭用燃料電池は都市ガス（天然ガス）やプロパンガスを燃料にして改質水素を製造しているが、発電所から家庭までの送電ロスがないことや、排熱回収の温水を暖房や給湯に使うことで、省エネルギー効果が期待されている。将来はローカル水素パイプラインを用いたCO₂を伴わない純水素家庭用燃料電池の開発が望まれる。

メーカーが掲げている家庭用コージェネレーション発電システムの性能目標は、システム発電効率が32%、総合効率が70%、耐久性は10年間（正味運転時間は4万時間）で自動車用の5,000時間に比べて長く、システム価格は30～50万円/kWなどである⁹⁾。家庭用の場合、当面の目標として100万円/kW、長期的には30万円/kWとしているのに対して、自動車の場合、6,000円/kWがコスト目標と言われており、自動車の方がコスト低減に対して極めて厳しい。

現在、国内の多くの企業が固体高分子形燃料電池による家庭用及び定置用コージェネレーションシステムの商品化を2005年に実現することを目指して研究開発を進めている。図9に家庭用コージェネレーションシステムの設置例を示す。このシステムは、発電量よりも供給温水熱量の方が大きくなっている。発電電力量と熱供給量のすべてを消費する運転が望ましいので、家庭における温水需要に合わせた運転モードが必要になる⁹⁾。貯湯槽が一杯になった時点でシステムの運転を終了し、その後の電力需要は系統連係電力から導入するような運転モードが好ましいことになる。

NEDO（新エネルギー・産業技術開発機構）では、日本ガ

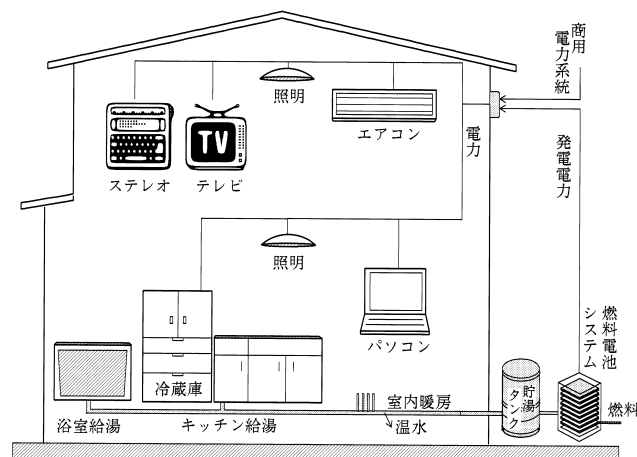


図9 家庭用コージェネレーションシステムの設置例

ス協会に委託して2000～2004年の計画で定置用固体高分子形燃料電池システムの実用化を目指した事業を進めている。各社が供試した燃料電池システム（定格出力0.7～5.0kW）の実証運転試験により、性能や安全性に関するデータ収集を行い、試験及び評価方法を確立し、標準化や法規制の見直しなどの検討を行っている。

家庭用コージェネレーションシステムの市場導入に向けた技術的課題は、発電効率と総合効率の改善、起動性・応答性の確保、安全性・簡単な操作性の確保、耐久性と信頼性の向上、コスト削減などがある。

最近、携帯電話や携帯情報端末（PDA）、ノートパソコン、デジタルカメラ・ビデオカメラ、携帯液晶テレビのような携帯用小型電子機器に使用できる数W～数十W級の超小型燃料電池の開発が各社において進められており、2004年～2005年の商品化を目指して激しい競争を繰り広げている。

携帯用小型燃料電池には、改質形あるいは水素吸蔵合金形マイクロ燃料電池と常温で発電する直接メタノール形燃料電池¹⁾がある。前者については、メタノール改質器と水素燃料の固体高分子形燃料電池を小型化したマイクロ燃料電池システムの開発が進められている。この電池はメタノール以外の炭化水素系燃料が使えるが、メタノール改質には、200℃以上の温度が必要である。カメラ一体型VTRやノートパソコンに内蔵できる小型固体高分子形燃料電池と水素吸蔵合金タンクが試作されている。

直接メタノール形燃料電池は、メタノールを水素ガスに改質せずに直接水素イオンに変換する方式で、固体高分子電解質膜であるフッ素樹脂系のイオン交換膜の両面に正極と負極（白金触媒担持）を接合した膜・電極接合体からなる構造である（図6参照）。電池の負極側に燃料としてメタノール水溶液を入れ、正極側には空気を入れる。負極でメタノールが酸化され、水素イオン、二酸化炭素と電子に分けられる。水素

イオンはイオン交換膜内を通して正極に移動し、酸素と反応する。電子は外部回路を通して正極へ移動する。その際、電流が取り出される。この燃料電池の重量当たりのエネルギー密度（約1,300Wh/kg）は現在のリチウム二次電池（130Wh/kg）の値の約10倍に達すると試算されている。メタノールの一部が電解質膜を透過し、正極に達し燃焼するため、燃料利用率が低下し、電池電圧も低下するという課題がある。直接メタノール形燃料電池は、システム全体が小型軽量化、簡素化できること、燃料の貯蔵性や搭載性が優れているなどの特長をもっている。国内外において多くの企業が燃料電池を内蔵したノート型パソコン、携帯電話、小型音声自動翻訳機、小型ロボットなどの携帯用小型電子機器の開発が進められている。

携帯用燃料電池は、高分子膜の使用量が少なく、耐久性もそれほど求められず、コスト面では自動車用や家庭用に比べて有利な条件にある。超小型化セルスタック・システム構造、低温対策、安全性（メタノールの毒性、水素の可燃性）、メタノール透過の少ない膜、常温でメタノール酸化活性の高い電極触媒などの課題が解決すれば、燃料電池の携帯機器への普及は早いとみられる。

9 水素エネルギー社会の実現への展望

近未来において水素エネルギー社会がどのような姿で実現しているかを考えてみることにしよう。水素は海洋上において太陽エネルギー発電プラントを用いて海水より多量に製造される。また、水力や太陽光など再生可能なエネルギーに恵まれた地域で、効率的な水電解技術によつて安価に水素を製造し、液体水素など輸送に適した形態に変換した後、エネルギー消費地域へ輸送・貯蔵される。消費地のエネルギーセンターでは、液体水素の貯蔵施設、圧縮水素や水素吸蔵合金貯蔵システムが開設されているであろう。水素源として副生水素、改質水素、電解水素及びバイオマス（生物資源）、ゴミや汚泥などの廃棄物、太陽光や風力などの自然エネルギーから得られる水素が利用される。

各地域においては、水素を用いた分散配置型発電所が開設され、燃料電池発電システムが都市部やその近郊に数多く設置され、一般家庭、工場などへの電力の供給、地域冷暖房と給湯システムやホテル、学校、病院、マンション、コンビニなどの自家発電用として電気と熱を併給するシステムが普及されてくるであろう。また、水素吸蔵合金の吸熱機能を利用した産業用冷凍機や冷凍輸送自動車あるいは船舶が実用化さ

れ、生鮮食料品の冷凍輸送にも大いに役立っているものと考えられる。

軽量圧縮水素タンクあるいは水素吸蔵合金タンクを搭載した燃料電池車や都市バス、水素エンジン車が水素ステーションで給水素を行い、高速道路や都市を走行している。電気自動車やハイブリッド電気自動車も普及し、排ガスによる大気汚染が解消され、都会からも青い空が望める。そして、見上げた青い空には水素を燃料とする超高速の飛行機が飛んでいることであろう。

一方、われわれが快適な生活を送るためには、熱エネルギーは欠かすことのできないものであり、現在の都市ガスやガソリンに代わる燃料として水素が登場しているであろう。各家庭には水素が供給されて水素貯蔵タンクに蓄えられる。必要に応じてオープン、レンジなど調理用燃料として用いられる。小型の水素燃料電池があり、電気とお湯をまかなう。太陽電池、燃料電池あるいはニッケル-水素化物電池などの電力を補助エネルギーとして水素吸蔵合金を利用したノンフロン家庭用ヒートポンプを動作させ、冷暖房、給湯、床あるいは壁暖房や冷蔵庫、アイスボックスなどに利用されているであろう。また、クリーンで長持ちする効率の良い超小型燃料電池が身近なものとなり、出張時でも携帯用小型電子機器が長時間連続で利用できるようになる。究極の水素エネルギー社会は2020年～2030年頃に到来するであろう。

参考文献

- 1) 大角泰章：水素エネルギー利用技術，アグネ技術センター，(2002)，1.
- 2) 大角泰章：クリーンエネルギー・水素，アグネ技術センター，(1992)，3.
- 3) 大角泰章：新版 水素吸蔵合金—その物性と応用，アグネ技術センター，(1999)，1.
- 4) 高橋 収：MH利用開発研究会，第2回研究会資料，(2002)，13.
- 5) 福島健次：MH利用開発研究会，第1回研究会資料，(2003)，21.
- 6) 杉山雅彦：化学と工業，56，(2003)，869.
- 7) 岡野一清：(株)技術情報センター講習会テキスト，(2002)，48.
- 8) 岡野一清：化学と工業，56，(2003)，861.
- 9) 本間琢也：化学と工業，56，(2003)，865.

(2003年12月2日受付)