

見聞録

WHEC2008における水素利用技術に関する見聞録

山根 公高

武蔵工業大学 工学部 総合研究所 水素エネルギー研究センター
東京都世田谷区玉堤1-29-1

E-mail: yamane@herc.musashi-tech.ac.jp

水素の利用技術と言え、小生は、主に交通機関に対し関心が強いので、その分野について紹介し見聞録とする。

【燃料電池を動力源とする交通機関】

オーストラリアのパスで行われた、燃料電池水素バス運行試験⁽¹⁾について紹介する。運行試験は、2004年から2007年の4年間で燃料電池水素バスを4台EcoBusと称して、バラード社のHy-205 P5-1 (2台のMk9スタックからなる)燃料電池を搭載したドイツのメルセデス-ベンツのCitaroと呼ばれる燃料電池バス(最大出力205kW電気モータ搭載)を使用した。このバスに関しては、ダイムラーライスラーがあらゆる責任をもち、そのコストも購入料に含めたそうである。バスの水素は、350barの圧力で充填され全水素量は44kgでその水素タンクはバスの屋根に設置してある。一充填の走行距離は、250kmである。水素の供給は、KwinanaのBP製油所から隣接したBOCのサイトまでパイプラインで移送し、PSAで99.9999まで純度を上げ、圧縮機で160barまで昇圧して、9本の高圧タンク(全重量350kg)を搭載したトレーラーでKwinanaからPathのバス運営会社のデポまで66kmを水素を運んだ。そこで再度昇圧してバスに充填した。主な成果は次の通りであった。

1. 4台の全走行距離260,000km, 全消費水素量47ton, 全乗車人数325,000人以上, 信頼性90%以上であった。
2. 燃料消費率は、パスの交通で使用しているディーゼルバス並みであった。しかし、CNGバスのそれと比較するとそれを下回った。
3. 水素ステーションでのトラブル以外では、バスは止まらなかった。
4. 今回使用した水素は、石油精製プロセスから得たもので、および石炭火力からの電気を使用していることから、今回の水素燃料電池バスのGlobal Warming Potential評価は、ディーゼルエンジン並みであった。CNGバスのほうが優勢であった。

5. コスト評価では、ディーゼルエンジンバスが最も低コストであった。その理由は、低いもと金とディーゼル燃料が安いからである。

燃料電池バスも世間で騒がれているほど必ずしも高い効率で運用はできていないことがわかった。よって、このような実証試験を行うことの意義を痛感した。

もう一つ小生の目を引いたのは、米国の炭坑用燃料電池鉄道の発表⁽²⁾である。従来使われていたバッテリーを用いた炭坑用鉄道より、出力、燃料充填時間および重量の面から優れた性能を示したと報告された。将来は、液体酸素を積んで水素を満たした鋼管トンネルを、鋼管トンネル中の絶対圧1barの水素を吸い込んで燃料電池の燃料として利用、ターボプロップで推進する鉄道を走らせる計画が披露された。従来のように空気の中を進むとその音速(346m/s)を超えて走行することは大変なことであるが、水素の中を走行すれば水素の音速は1310m/sであることから、空気の音速で走っても水素の音速を超えないことから346m/s以上の速度で衝撃波の発生なしに走行できる。この場合、燃料電池の排出物である水蒸気は、水にして車両中に貯めて置くとしている。これには、燃料電池からの廃熱処理、車両がトンネル内を進むときに必要な水素ガスベアリング、鋼管トンネルの破壊等いろいろ解決すべき問題点があるとも指摘している。

【内燃機関を動力源とする交通機関】

ここでは、水素内燃機関を取り上げる。水素内燃機関の利用法としては、大きく分けて従来のガソリンエンジンと同じように、燃料である水素を吸気管内に供給する外部混合方式とディーゼルエンジンのように、エンジンに酸化剤である空気を取り入れ、吸気弁を閉じた後に燃焼室内に高圧水素を噴射弁から供給する内部混合方式がある。

前者の方法は、水素燃料の酸化剤となる空気と燃料である水素を同時に燃焼室に吸い込む結果、一定の容積を持った燃焼室は、水素ガスによりその容積の一部を占拠されそ

の酸化剤である空気が入らなくなる。一方、後者は酸化剤である空気をまず燃焼室に投入した後、吸気弁を閉じて水素を高圧で燃焼室内に供給するので、燃焼室いっぱい空気が入りその割合で水素燃料も多く投入できるので後者ほうが前者より約1.5倍の出力が得られる。しかし、後者の方式を取るためには、燃焼室圧力より高い圧力で燃焼室に水素を供給する必要から高圧水素ガスが必要となる。一方、前者の方式では、水素圧0.4~0.6MPa水素を吸気管内に噴射することで低圧で水素を供給することが可能である。これは、現在天然ガスエンジンで実用化されている燃料供給装置をそのまま利用できる比較的簡単なシステムであり、安価でもある。しかし、この方式は自然吸気ガソリンエンジンの出力と比べると最も出力がでる理論混合比での運転でもガソリンの75%の出力しか得られない。加えて、バックファイヤ、過早着火等の異常燃焼が起こる。加えて、理論混合比に近い運転では、水素エンジン唯一の公害物質であるNO_xは、4~5ppmにもおよび多量排出される。そのため、NO_x排出量がゼロに近くなるまで混合比を薄い状態にして運転する。その結果、出力は自然吸気ガソリン運転の約半分以下の出力で運転せざるを得ない状況であった。BMW社は、エンジン排気量を大きくして要求出力を稼いでいる。最近では、希薄運転から電子制御で理論混合比運転に切り替え高出力化を図っている。そのときのNO_x処理方法は、ガソリンエンジンで使われている排気ガス三元触媒を利用してNO_xゼロで運転をすることができると発表している。

ブリスバーンのWHEC2008では、高出力、高効率、ゼロエミッション化に向けた発表があった。

メルボルン大学が発表^④した「Development of a Variable Geometry Turbocharged, Throttless, Jet Ignited, Hydrogen Fuelled I. C. Engine」は、外部混合方式、希薄燃焼、高過給、ジェット点火、絞り弁なし水素エンジンである。この目的は、高過給で高出力化、希薄燃焼でNO_xゼロ化、希薄化による燃焼速度低下を補うため火花点火の代わりに、着火力増強と着火後の乱れを大きくすることにより燃焼速度を大きくする目的でジェット点火を取り入れ、フォード社の4リットル、ターボ過給付6気筒ガソリンエンジンを水素エンジンに改造して高出力化、高効率化、ゼロエミッション化をめざした実用エンジンの研究開発を開始している。過給器に可燃ノズル付ターボ過給器を採用していることがとても興味を引かれた。希薄燃焼水素エンジンの高

出力化にはとても有効な手段である。

ベルギーのジェント大学が発表^④した「Impact of Variable Valve Timing on the Performance of a Bi-Fuel Gasoline/Hydrogen Engine」は、ガソリンと水素を別々に吸気管に噴射をする外部混合方式で、水素運転による異常燃焼を抑え高出力化を図る目的で研究を行っている。要は、吸気弁および排気弁の開閉時期を任意に決められるガソリンエンジンを使って、異常燃焼発生と高出力化の可能性を調査した研究である。実験の結果、最適開閉時期を選ぶことにより空気量が増えて高出力化が図れたが、NO_xも多く排出した結果となった。

京都大学が発表^④した「Ignition and Combustion Characteristics of Unsteady Hydrogen Jet」は、ディーゼル燃焼のように高圧水素を高圧、高温場に噴射して圧縮着火を起こさせる研究である。定容容器に水素、天然ガスとメタンガスを高圧で噴射して着火遅れ、熱発生率の解析を行いその結果、水素ガスの圧縮着火は空気を900Kまでエンジンで断熱圧縮しないと着火遅れの少ない着火をするのは無理で、安定した着火を行うためには、圧縮着火ではなく別の着火源が必要であることを結論つけている。これも何とか内部混合方式で水素燃料を使うことが合理的であるという考えから、水素燃料の圧縮着火が実用エンジンで可能であるかどうかを基礎実験から示したすばらしい研究である。

武蔵工業大学も世界の水素エンジン開発の1パイオニアとして、最も優れた実用水素エンジンはどのようなエンジンであるかというテーマにもとづいて研究開発を続けてきた。その結果、液体水素を車載してそれを高圧水素ポンプにて車上で噴射圧力の水素ガスを製造して、電子制御された高圧水素噴射弁で燃焼室に吸気弁が閉じた後から圧縮上死点の間に1回から複数回高圧噴射を行い、適正着火時期に点火することにより、異常燃焼無しで高出力と高効率を実現できるエンジンを実現できるのではないかと考えており、その1部の成果として、今回次のような研究発表を行った。

1. 「An Experimental Study for Large Output Power and Near Zero-Emission by Using a Small Hydrogen Fuelled IC Engine with Direct Injection, Spark Ignition, Super-Charging and No Exhaust Gas Catalyst After-treatment」^④; 排気触媒なしで希薄燃焼を用いてNO_x低減をはかり、希薄燃焼による出力低下を過給と内部混合によりどれくらいカバーができるかを、実験的に調査した。実験の狙いは、どこまで

過給を実施すればガソリンエンジンを謳歌できる出力と排気清浄化触媒を用いなくて、ニアゼロエミッションと見なせる排出特性が得られるかを調べた。通常は、過給を行えば其の分燃焼温度が上昇し、NO_xの排出量が多くなると思われていたが、均一混合気ではNO_xの生成は過給圧力にはほとんど影響を受けず、空気過剰率λによる影響を大きく受けることがわかり、今回用いた最大過給比2において、軸出力は、自然吸気ガソリンエンジンの1.25倍、NO_x排出は排気濃度で10ppm (約0.07g/kWh)、正味熱効率は35%と総排気量660ccの小型エンジンでは、優秀な性能を示すことができた。均一希薄燃焼と過給を組み合わせることにより、実用性の高い水素エンジンが可能であり、実用性の高い水素エンジンの1候補になると考えている。

2. 「Performance of a Common-rail Type High Pressure up to 10 to 20 MPa Hydrogen Gas Injector Developed for DI Hydrogen Fuelled Engines」⁹⁾ 高出力、高効率、低NO_xを実現する為には、前述したごとく電子制御できる高圧水素噴射弁の開発が必須条件である。ディーゼルエンジンでは、其の目的の為にコモンレール方式燃料噴射弁を実用化している。水素エンジンでも其の要素技術を利用して、高圧水素を燃焼室に噴射圧力20MPaで直接噴射できるコモンレール方式高圧水素噴射弁を開発した。最大流量は、1.7msec.の噴射期間(エンジン回転数3000rpmで30度まわるのに必要な時間)に1噴射で400cc(Normal)の多量な水素を燃焼室に噴射できる能力を持つ高圧水素噴射弁を開発した。最も悩まされたのは、弁先からの水素の漏れであった。完全には漏れ量をゼロにはできていないが、実用上問題のないレベルまで漏れを抑えることができた。加えて、コモンレール方式駆動装置を利用していることから、120MPaの作動油圧を利用している。それにより、十分大きい弁駆動力が得られ、圧縮行程に3から4回の連続噴射が可能であることもわかった。

3. 「Potentiality of High Pressure Direct Injection Hydrogen Engines for High Efficiency and Low NO_x Emission」⁹⁾ 武蔵工業大学が独自で開発した上記コモンレール方式高圧水素噴射弁を単気筒エンジンに取り付けて、エンジン実験を行った。実験では、点火時期と噴射時期の組み合わせによる安定に着火し運転できる組み合わせを求めた。その結果、吸入弁を閉じた直後に水素を噴射することにより、点火までに時間を稼ぎできるだけ均一混合気にて点火する前期噴射、圧縮行程後期に水素を噴射して、其の直後に点火する後期噴射噴射ジェット先端点火、圧縮行程後期に水素を

噴射し噴射終わりに点火する3方法を試みた。その結果、最も良い燃焼をしたのは、3番目の圧縮後期噴射終わり点火であった。しかし、良い燃焼をしているためNO_xの濃度は、3つのうちで最も高い値を示した。NO_xの低減方法で行われているEGRを行うことによりNO_xは、低いレベルまで低減できた。ここで使用したコモンレール式高圧水素噴射弁は、十分機能をなし、約48時間の運転にトラブルなしで供された。

オーストラリアは、水素にもう少し積極的だと思っていたが、よく考えてみると彼らは資源輸出国であり、それに加え自然豊かな十分広い国土と少ない人口を持つ国であるため、日本のように何事に対してもあくせくする必要がない国であった。

参考文献

- (1) Luke O'Donoghue, "Overview of the Perth Hydrogen Fuel Cell Bus Trial 2004-2007", WHEC2008-CD, No.321
- (2) Arnold R. Miller, "Hydrogen Fuel Cell Rail Vehicles: Past, Present and Future", WHEC2008-CD, No.323
- (3) A. A. Boretta, et al, "Development of a Variable Geometry Turbocharged, Throttless, Jet Ignited, Hydrogen Fuelled I.C. Engine", WHEC2008-CD, No.322
- (4) S. Verhelst, R. Sierens, "Impact of Variable Valve Timing on the Performance of a Bifuel Gasoline/Hydrogen Engine", WHEC2008-CD, No.611
- (5) Dung Ngoc Nguyen, Akihiko Fujita, and Msaahiro Shioji, "Ignition and Combustion Characteristics of Unsteady Hydrogen Jet", WHEC2008-CD, No.704
- (6) Kenji Nakagawa, et al, "An Experimental Study for Large Output Power and Near Zero-Emission by Using a Small Hydrogen Fuelled IC Engine with Direct Injection, Spark Ignition, Super-Charging and No Exhaust Gas Catalyst After-Treatment", WHEC2008-CD, No.607
- (7) Masakuni Oikawa, et al, "Performance of a Common-Rail Type High Pressure up to 10 to 20 MPa Hydrogen Gas Injector Developed for DI Hydrogen Fuelled Engines", WHEC2008-CD, No.608
- (8) Akira Katohno, et al, "Potentiality of High Pressure Direct Injection Hydrogen Engines for High Efficiency and Low NO_x Emission", WHEC2008-CD, No.601