

# BMW Hydrogen 7プロジェクト 水素社会の実現を目指して

山根 健

ビー・エム・ダブリュ株式会社 エンジニアリング・ディビジョン

261-0023 千葉県美浜区中瀬1-7-1 住友ケミカル・エンジニアリングセンタービル23階

## BMW Hydrogen 7 Project To Realize Hydrogen Society

Ken YAMANE

BMW Group Japan Engineering

1-7-1 Nakase, Mihama-ku, Chiba 261-0023

The BMW Hydrogen 7 is the world's first premium saloon with a bi-fuel (gasoline and hydrogen) internal combustion engine that has undergone the series development process. During its development, the features of the hydrogen energy source were underlined and a safety-oriented development process was carried out, which also took account of contextual factors such as filling stations and garages. During vehicle testing over one and half million kilometers including tests in Japan were covered under the most diverse everyday stresses. The Hydrogen 7 enables drivers to experience the advantages of the virtually emission-free hydrogen mode in a premium-class vehicle, while promoting the necessary networks in industry, research and politics. Hydrogen 7 is an important milestone to realize hydrogen society.

**Key words:** passenger car, engine, liquefied hydrogen gas, road test, safety/series development

### 1. 緒 言

近年の地球温暖化対策の重要課題の一つとして、脱化石燃料の動きが強まってきている。自動車用動力源にも急務の課題として現在のガソリン、ディーゼルエンジンに代わるべき「再生可能・炭素フリー」燃料を用いたものの開発が行われてきている。

これまでも、自動車は排出ガスによる大気汚染、原油価格の高騰や枯渇への不安といった問題に直面し、その対応策としてさまざまな代替動力システムや代替燃料が研究・開発されてきたが、今日まで内燃機関（ガソリン、ディーゼルエンジン）がその主役の座を保っている。

より深刻になることが予想される地球温暖化、今後

更に増加することが予想される自動車用燃料の需要に対応するためには「再生可能・炭素フリー」燃料と、それをういた自動車の開発が急務であり、BMWは水素こそが究極の自動車用燃料と考え、長年継続して開発を行ってきた、水素燃焼内燃機関を用いた自動車の開発を一層推進し、量産車としての開発を行い、Hydrogen 7を発表した。

水素を燃料するにあたり、内燃機関を採用した背景としては：

- ・ 車両の大半が既存の自動車技術で製造することが出来、コスト面、製造技術面での障害が少ない。
- ・ 動力性能面でもこれまで培ってきたBMWの「走る歓び」を維持することが出来る。
- ・ 燃料として水素のほかにガソリンも使用すること

が出来るため、水素供給インフラが整備される前から水素自動車の普及を先行することが可能で、「水素社会」への呼び水としての役割を担うことができる。

30年あまり、五世代の水素自動車研究を経てBMWは通常の量産車の開発、製造プロセスによるHydrogen 7を量産し、実用走行を開始した。

## 2. BMWの水素自動車研究開発

大気汚染問題に端を発して自動車の排出ガス規制対応の開発が自動車業界にとって重要な課題であった1970年代には、さまざまな将来型エンジン研究が行われていた。BMWでは汚染物質を排出しない水素エンジンが有望と注目し、その研究に着手した。

ガソリンエンジンをベースに水素を燃料としたエンジンを実現するためには、水素燃料供給システム用コンポーネントの開発、混合気の生成および燃焼の制御等の課題を一つ一つに乗り越えていく必要があった。

水素エンジンを車両に搭載して「水素自動車」を構成する段階になって、燃料の搭載、充填そして車両の安全性の確保といった車両側により多くの重要な課題があることが明らかになってきた。



図1. BMWの水素自動車 (1979～2002年)

図1に五世代の水素自動車プロトタイプを示す。

これらの車両は共通し水素を極低温の液体水素の状態を搭載している。初期の液体水素タンクは、トランクスペースを全て占領し、その充填には5時間ほどを要するものだった。第4世代の車両に用いた液体水素タンクは、タンクメーカーや自動車認証機関などと協同でさまざまな安全性確認試験が行われた。

BMWではより近未来の代替燃料として天然ガスにも

注目し、天然ガス自動車を約1000台生産し市販した。当時、天然ガスのスタンドは期待していたほどは設置されず、ユーザーの利便性に制約が見られた。その時の経験から、特に新燃料の自動車を市販する場合は燃料供給のインフラ整備が必須であり、自動車メーカーとして「待つ」だけでなく、積極的に働きかける必要があると認識した。

## 2.1 クリーンエネルギー・ワールドツアー

BMWは1999年に15台の第5世代水素自動車を生産し、公道走行を開始した。ミュンヘン空港には初の公共水素ステーション(液体水素および高圧水素燃料を使用する乗用車およびバスに水素を充填する)が設置され、BMWの水素自動車およびMAN製の水素バスが試験運用された。

このミュンヘン空港のステーションでは液体水素の充填には全自動水素充填装置が採用された。

この第5世代水素自動車の使命は、世界中のさまざまな運転条件下での実用性を確認することと同時に、水素インフラ整備に向けての礎を築くことがあり、2000年にミュンヘンで開催されたHYFORUM2000では空港とフォーラム会場間のゲスト送迎を行うなどさまざまな活動を行った。

2001年にはクリーンエネルギー・ワールドツアーと銘打ち、世界各国にこの水素自動車を持ち込み、水素自動車の実用化が近いことをアピールした。図2にワールドツアーで回った各国の様子を示す。日本では5月31日に日本自動車研究所の高速試験路で公開された。



図2. クリーンエネルギー・ワールドツアー (2001年)

## 2.2 速度記録車H2R

水素自動車の性能ポテンシャルを実証するために乗用

水素自動車の性能ポテンシャルを実証するために乗用車のほかに速度記録車が作られた。この車両は水素専用で改造したエンジンを搭載している。また水素タンクも軽量化されたものが搭載された。この車両で2004年9月に速度記録挑戦を行い、9つのFIA公認速度記録を樹立している

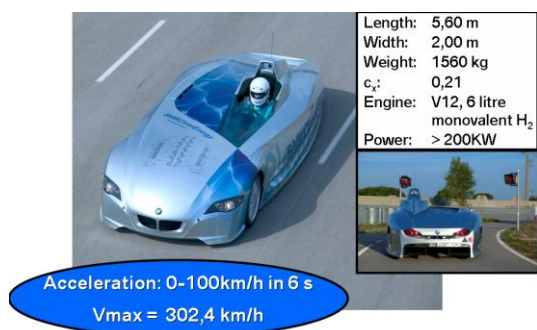


図3. 水素エンジン速度記録車 H2R



図4. Hydrogen 7の車両構成

### 3. Hydrogen 7の開発

これまでの実験車両およびプロトタイプ水素自動車の開発経験を基に量産型水素自動車としてHydrogen 7を開発した。設計、試験、部品製造、車両製造および完成検査といった全てのプロセスを通常の量産車のそれに則って行うことにより、水素自動車が既に量産車のレベルに到達していることを実証するとともに、実際にさまざまなユーザーに手渡しての一般走行に供することを目的に100台を量産し、2006年末からリース提供することとした。

Hydrogen 7は、新型7シリーズの派生モデルに位置づけられ、ボディはそのロングホイールベース車を使用した。水素燃料タンク搭載にかかわる部分以外に大きな相違は無い。

### 4. 水素エンジン



図5. 水素エンジンの外観

#### 4.1 基本構成

水素エンジンのベースにはV型12気筒ガソリンエンジンN73型を用いた。水素燃料での使用の外、ガソリンでの運転も可能とするため、ガソリンエンジンとしての基本構成に水素燃料供給系を追加、水素燃焼に伴う変更を施した所謂バイ・フューエルエンジンを形成した。

図5にエンジンの外観を示す。

エンジンの基本諸元を表1に示す

表1. 水素-ガソリンバイ・フューエルエンジン基本諸元

エンジンデータ	ガソリン (ベース)	水素Bi-Fuel
基本型式	V12-60deg	
点火順序	1-7-5-11-3-9-6-12-2-8-4-10	
排気量	5972 cc	
ボア / ストローク	89 / 80 mm	
ボアピッチ	98 mm	
弁数	気筒あたり 4 弁	
吸気弁径	35 mm	
排気弁径	29 mm	
吸気弁リフト	0.3~9.85 mm (variable)	
排気弁リフト	10.3 mm	
圧縮比	11.3:1	9.5:1
コンロッド長	140 mm	138.5 mm
使用燃料	RON 98	H2 or RON 98



## 4.2 主要構成部品

水素の燃焼速度はガソリンより速いため、予混合水素燃焼の場合、筒内燃焼圧力が高くなる傾向がある。そのため、圧縮比をベースのガソリンエンジンより低めに設定(11.3→9.5)すると同時に、ピストンに変更を加えた。

水素エンジン用ピストンにはピストンリング部の冷却とトップランド部の温度管理を考慮して油冷クーリングチャンネルが設けられている。ピストン頂部の形状は、ガソリン筒内直噴燃焼と予混合水素混合気燃焼両方に対応するものとなっている。

## 4.3 水素噴射系

図6に水素燃料供給系を示す。

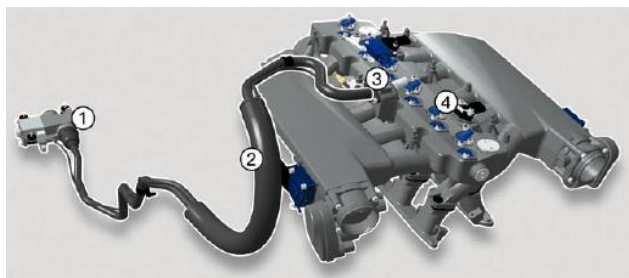


図6. 水素燃料供給系

- ① は電磁式水素燃料圧力レギュレーター
- ② は水素供給パイプ(一部フレキシブルチューブ)
- ③ はインテークマニフォールド
- ④ は水素噴射弁を示している。

水素供給パイプはフレキシブル部分を含め二重管構造となっており、万が一内側の管に微量の漏れがあっても漏れ検知装置を介して安全に処理されるよう構成されている。

噴射弁は自動車用ガス燃料噴射弁の一般的な形態のものが採用された。最適な混合気供給のため噴射期間を短く出来るよう大流量特性のものが選定された。

この水素噴射系の燃料一次供給圧力は液体水素タンクの圧力を用いており、ポンプは使用していない。タンクの圧力維持にはエンジン冷却水を用いたタンク加熱方式が採用されている。

## 4.4 エンジン性能

図7に水素エンジンの全開性能を示す。

最高出力は5100rpm時に191.2kW、最大トルクは4300rpm時に390Nmを発生している。

この性能値は、ベースとなったガソリンエンジンに対し出力で40%(ベース：327kW)、トルクで35%(ベース：600Nm)低い値となっている。この性能差の最大の要因は吸気管に常温の水素ガスを噴射しているため、水素流量分吸入空気量が減少することにある。理論空燃比での総吸気量に対する水素の体積は約30%になる。

ガソリンでの運転時には水素より高い性能ポテンシャルはあるが、この車両が水素燃料を主体としていること、変速制御や燃料切り替え時にもスムーズな運転性を確保する観点からも水素運転時と同一になるように制御を行っている。

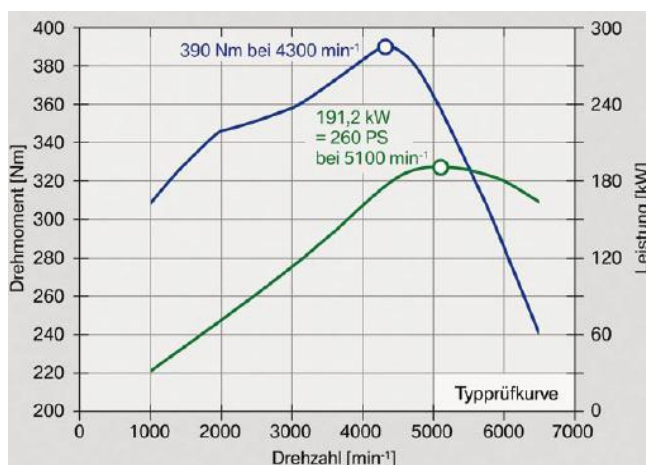


図7. 水素エンジンの性能

## 4.5 排出ガス

水素燃焼では燃料自体には炭素を含まないため、HCやCO、CO<sub>2</sub>は基本的には排出されないが、NO<sub>x</sub>については発生する可能性がある。特に予混合燃焼では空気-水素混合気の燃焼速度がガソリンのそれより速い傾向にあり、特に理論空燃比近辺と若干薄め領域での燃焼に伴うNO<sub>x</sub>生成量が多い。(図8)

そのため水素燃焼制御は高負荷領域では理論空燃比または若干過濃混合比で運転し、生成されたNO<sub>x</sub>は触媒によって十分に低いレベルにまで浄化される。低負荷領域では非常に薄い(λ = 2以上)混合比での運転を行うことによりNO<sub>x</sub>生成が非常に少ない領域でのみ運転することが出来る。水素では安定した希薄燃焼を行うことができる。

欧州NEDCモードにおけるNO<sub>x</sub>排出量は0.0015g/km(規制値の2%)、米国SULEV IIに対してはガソリンと水素両方を使用した運転モードで0.006g/Mile(規制値の30%)、水素のみの運転で0.002 g/Mile(規制値の10%)と低

い値を示している。

実際の走行条件での排出ガスを測定すると僅かなCO<sub>2</sub>が検出される (NEDCモードで約5g/km)。これは、シリンダー内の潤滑油が燃焼によるものとガソリンタンクから発生するガソリン蒸気処理することにより発生したものである。

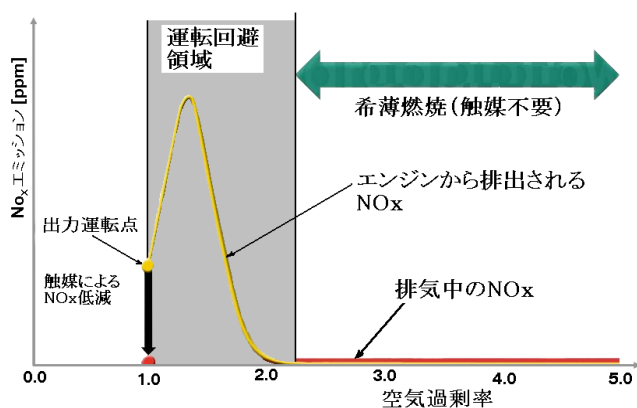


図8. 水素エンジンのNO<sub>x</sub>排出特性

## 5 液体水素タンク

### 5.1 水素燃料の貯蔵

水素自動車、特に乗用車の場合、水素燃料の搭載は最も重要かつ困難な課題の一つに挙げられる。

水素は重量あたりのエネルギーは非常に高い(ガソリンの3倍弱)反面、体積あたりのエネルギーはもっとも有利な液体水素ですら非常に低い(ガソリンの1/4弱)。このため、水素タンクはガソリンより大きなものになる。

水素の貯蔵には圧縮貯蔵、液化貯蔵、水素吸蔵合金などさまざまな形態が考えられる。BMWでは液化貯蔵が車載用として最も有望と考えて早い時期から液体水素タンクを採用してきた。

液体水素はその液化温度が-253℃という極低温であるため車載用タンクとしては非常に高い断熱性能が要求される。ステンレス二重構造の容器の内外殻間を高真空とするとともにその真空空間に多層の輻射熱遮断フォイルを充填することにより長時間にわたって液体水素を保持するタンクを実現することが出来た。

### 5.2 車載液体水素タンク

図9に Hydrogen 7に搭載されている液体水素タンクを示す。このタンクは後席の後ろ、トランクスペースの前方に搭載されている。この図は車載状態の斜め前方か

らの外観を示したもので、本体はステンレス製の二重構造俵型容器であり、図の左上方に示す充填装置部分から液体水素が補充され、タンク内の気相部分から水素ガスを手前に示した制御ボックスを介して温度、圧力を調整したうえでエンジンへと供給される。

タンク内の水素が消費されると、気体部分の消費と液体水素の気化潜熱によりタンク内の圧力が低下する。本システムではエンジンの水素噴射はタンクの水素圧力に依存しているため、その値を一定以上に保持する必要がある。タンク内の気相部分の一部を取り出し、エンジン冷却水で加熱してタンクに戻すことにより、タンク内の圧力を一定範囲(約0.5~0.8MPa)に保持している。

逆に、水素がまったく消費されない状態で長時間放置されると、外部からの入熱によりタンク内の圧力は徐々に上昇する。一定値を超えると水素を抜き出して内圧が維持される。抜き出される水素は触媒燃焼により水蒸気となって車外に放出される。



図9. 車載液体水素タンク

### 5.3 水素充填部

極低温の液体水素をステーションから車両に補充するために特殊なカップリングが開発された。まず、ステーションと車両とのフランジ及び外管が結合され、気密状態が確保された後に液体水素を供給する内管(コールド・フィンガー)がステーション側からタンク本体近くまで挿入され、液体水素の充填が開始される。このシステムは液体水素を車両の燃料として考慮する多数の企業が共同で検討し、開発されたものである。

## 6. 車両

### 6.1 車両仕様、性能

表2にHydrogen 7の車両仕様、性能を示す。

表2. Hydrogen 7の車両仕様, 性能

最高出力	191 kW/5100 rpm
最大トルク	390 Nm/4300 rpm
加速性能 0->100km/h	9.5 sec
最高速度	230 km/h
使用可能充填水素量	7.8 kg LH <sub>2</sub>
水素消費率 (欧州テスト条件下)	3.6 kg/100 km
水素での航続距離(欧州テスト)	> 200 km
CO <sub>2</sub> 排出量	5 g/km
他の排出レベル	<< EU4 規制値

## 6.2 車両安全

新しい燃料を使用する量産車を開発するに際しその安全性の確保にはあらゆる状況を想定し、対策を施した。

まず、水素タンクの安全確保が図られた。

- 水素貯蔵空間に酸素(空気)が入らないこと。
- 決して爆発しないこと。
- 車両衝突時に水素が放出されないこと。
- 万が一タンクの断熱機能が低下したり、失われたりしてもタンク内の圧力が過上昇しないこと。

こうした必要要件に則り、タンクの搭載位置、形状、車体への取り付け、タンク自体の強度、安全弁の位置と特性、タンクに取り付けられている配管や弁の位置や特性が決められた。

タンク内の液体水素の貯蔵圧力が低く、タンク自体が二重構造であることもあり、さまざまな試験下でその安全性が確認された。

車室内への水素の漏洩は最もあってはならないことであり、水素タンクや配管部とは気密構造で隔離された上で、更には車室内に高感度の水素センサーが設置され、水素可燃割合の20%の水素が検知されると警報が、40%を超えると強制的に窓を開き、換気が行われる。水素センサーは、エンジンルーム、水素補給口、トランクルーム、タンクスペースにも設置されている。

## 6.3 開発試験

Hydrogen 7は、通常の量産車として開発されており、その試験も通常の試験を全て行っている。

衝突試験に際しては標準の試験に加え、水素燃料タンク真横への衝突試験も行っている。

一般走行耐久試験、高速連続耐久試験、ラフロード試験、極寒地試験、熱地試験等走行試験は150万kmを超え

ている。

開発最終段階の試験では実際のユーザーによる使用を想定したさまざまな検証が行われた。水素補充の頻度や駐車場所、時間の確認を行うと同時に、さまざまな操作ミス等によっても安全性が確保されていることの確認も行われた。

## 7. 今後の展望

### 7.1 エンジン性能

4.4で述べたように、このHydrogen 7に使用したエンジンは吸気マニフォールドに常温の水素ガスを噴射する方式を採用したため、吸入空気量が通常のカソリンエンジンに対し劣ったものとなっている。しかし、この比出力は水素エンジンとしての限界を示したものではない。

BMWでは社外研究機関とも協同で次世代の水素エンジンシステムの開発を行っている。現在取り組んでいる次世代の水素エンジンシステム二例を示す。

#### (a) 極低温水素ポート噴射

この方式は、液体水素タンクから液体水素または極低温のままの水素ガスを吸気ポートに噴射するもので、先ずポートに噴射される水素の体積が非常に小さくなることにより空気の吸入が阻害されない。(200°Cのガスの場合、常温の1/4の体積) さらには、噴射された極低温の水素により吸入空気が冷却され密度が上がることにより、より多くの空気が吸入される。これらの効果によってガソリンエンジンを大幅に上回る比出力を得ることが出来る。

#### (b) 水素筒内直接噴射

水素を筒内に直接噴射すれば(a)と同様に空気の吸入が水素によって阻害されない。更に、液体水素を筒内直接噴射すると筒内の温度が低下し、(a)以上に吸入空気量を増加させることが出来る。

筒内直接噴射により燃焼の制御自由度が増し、水素の最適の燃焼を行うことが可能となり、最良の燃焼効率を達成することが出来る。

いずれの場合も過給することにより一層の比出力向上が得られる。

現状のHydrogen 7に使用されているガソリン・水素両用エンジンの比出力は32kW/l、極低温水素ポート噴射(a)は自然吸気で62 kW/lと約2倍、更に液体水素筒内直噴(b)+過給で95 kW/lと約3倍の比出力が確認されている。これ

は、現在6000ccのHydrogen 7用エンジンで発生している出力を2000ccのエンジンで得ることが出来ることを意味している。

### 7.2 水素貯蔵

現在Hydrogen 7に搭載している液体水素タンクは工業用としても確立されている形状、形態のものを使用している。

水素タンクの容積はいずれの水素の形態でもガソリンよりはるかに大きく、特に乗用車への搭載では車両の設計自由度を高める意味でも自由な形状が可能になることが望まれる。

また、液体水素を高断熱容器で蓄えているため、長時間の保存では液体の気化→タンク内圧の上昇→内圧保持のための一部水素の放出は避けられない。その対応策としてさまざまなものが考えられている。

BMWが現在水素貯蔵方式として取り組んでいるものの一つに、超臨界液体水素貯蔵方式がある。[3]

この方式は、液体水素を圧力下で貯蔵することにより超臨界状態で安定させ、ボイルオフを大幅に遅らせることが出来ることを狙ったもので、断熱性と耐圧性を持つ容器が必要となる反面、水素の容積あたり搭載量が増加する。

図10に各水素貯蔵方式の貯蔵容量，貯蔵圧力を示す。

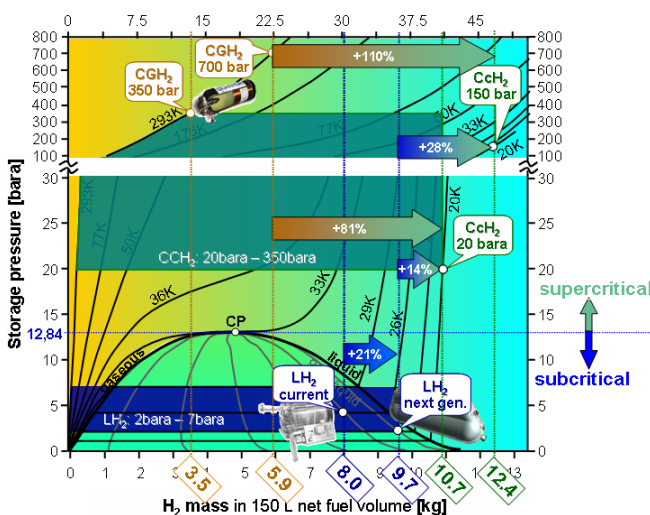


図10. 水素貯蔵方式比較

この超臨界液体水素貯蔵方式が、より大容量の水素をボイルオフなく貯蔵でき有望であることがわかる。また、この方式を用いることにより、より小型の車両への液体水素搭載が容易になると間上げている。一方、タンクの

車載にはその形状が自由に設計できることが好ましく、材料、構造や断熱技術を集約し、搭載性の優れたタンクが検討されている。

車両のサイズ、使われ方に応じた最適の水素貯蔵システムを今後も引き続き開発していく。

ここで述べた次世代の水素エンジンと水素貯蔵システムを用いることにより、次世代の水素自動車は専用設計されたより水素の利点を生かしたものになるだろう。

### 7.3 水素供給インフラ、法規の整備

これまで水素自動車技術について解説してきたが、水素自動車の普及に水素のインフラ整備は欠くことのできないものである。水素のインフラが整備されるまでの間は、Hydrogen 7で採用したように水素とガソリンのバイフューエル方式が自由なモビリティを提供することになる。

水素自動車の初期の普及には自動車メーカーと車両認可組織が最も重要な役割を持つが、幅広い普及には水素を充填するステーションの整備が不可欠である。水素の製造、運搬そして充填といった水素供給インフラの構築にはさまざまな分野の公的機関や、産業が協力する必要がある。

自動車用として新しい燃料である水素を広く使用するに際しては、水素の特性にあった新たな基準が必要で、各方面でその活動が行われている。密接な情報交換と国際協調が望まれる。

### 参考文献

1. Fuerst, S.; Graeter, A.; Pehr, K.: BMW Hydrogen 7: the first premium saloon with a bivalent internal combustion engine, JSAE Annual Congress 2007, 20075338
2. Enke, W.; Gruber, M.; Hecht, L.; Staar, B.: Der bivalente V12-Motor des BMW Hydrogen 7, MTZ 06/2007
3. Brunner, T.; Kircher, O.: Cryogenic Hydrogen Vehicle Storage – a Variable Option for Future Serial Application?, JSAE Annual Congress 2007, 20075303