

## 温暖化対策—水素社会に向けた BMW の取り組み

山根 健

ご紹介ありがとうございました。BMW の山根と申します。こういった場で私どもの研究活動の発表の機会を与えてくださって感謝申し上げます。

それでは、私ども BMW が現在進めております水素自動車のプロジェクトについての説明をしたいと思います。

本日は、まず水素自動車開発の歴史と現状、背景についてご説明した後、現在の Hydrogen 7 プロジェクトの内容、そして今後の取り組みについてご説明いたします。

まず、最初に、簡単に水素自動車の開発の背景の中で、BMW という会社がどういう会社で、何を目指しているかをちょっと簡単に触れてみました。BMW は、乗用車とオートバイをつくっている会社として、基本的に、過去、現在、未来にわたって個人のモビリティ手段を提供し続けるとともに、その運転する方々に走る喜びを実現することを目標としております。この提供し続けるということが重要でありまして、さまざまな条件変化があっても、個人のモビリティの実現のための最大限の努力をしていきたいと考えています。

ちょっと大きく構えてしまいますけれども、モビリティについて BMW が考えていることを説明いたします。有史以前から人類というのは生きるために移動していました。その移動の手段というのは長い間人力、それから動物の力、そして自然力、こういったものが主なものだったんですけれども、近代に至って動力機械による移動手段の発明が行われることによって、これまでにない高速で、しかも大量の、そしてその後は個々の人の自由な移動が可能となりました。個人の自由な移動の手段としての自動車、特に乗用車は、それぞれの人々の自由な移動の範囲を拡大してきたと思っております。

モビリティとともに考えなくちゃいけないことは、そのモビリティを実現するためには当然エネルギーが必要なわけです。エネルギーは、その移動だけではなくて、さまざまな生活、文明のために重要なものでありました。長い間、そのエネルギーの源というのは、いわゆる手近にある自然エネルギーだったんですけれども、航海技術の発展、植民地政策、そして産業発展に伴ってエネルギー革命が数次にわたって行われ、それによって急速にエネルギーの消費量が増えています。それが近代、大量の石油、化石燃料の消費に伴う大気汚染とエネルギー枯渇問題が大きくエネルギー問題に影を落としていると考えています。

自動車にかかわるさまざまな問題、エネルギー、モビリティについて考えますと、まず、一番最初に問題になってきたのが大気汚染の問題でした。これは、先ほども触れられていましたけれども、マスキー法案であるとか、さまざまな大気汚染に伴っての規制も行われ、また自動車メーカーとしても自主的にさまざまな取り組みをしてきました。その結果、自動車の重量や性能は年々向上しているにもかかわらず、いわゆる大気汚染物質というのは、その規制が始まると同時に大幅に低下してきました。現在も、主に自動車メーカー、そして燃料供給メーカーなどの努力によって、その汚染物質の低減というのは順調に進んでおりまして、大体 2010 年ごろには、いわゆる自動車からの汚染物質の排出というのはほぼなくなる、少なくとも問題でなくなるレベルに達すると思っております。

これは先ほどから講師の方々が繰り返し触れられていることですが、唯一自動車から排出され、このままでは解決できない問題として、地球の温暖化への影響があります。これは、自動車にとってみると、一番大きな要因としては CO<sub>2</sub> の排出による地球温暖化へ

のいわゆる悪影響があると考えています。

もう一つ自動車にとって、またほかのエネルギー問題にとって大きなこととしては、いわゆる化石燃料の枯渇があると思っています。当然今、産業の発展、それからモータリゼーションの発展によって、いわゆるエネルギーの消費量というのはどんどん増えています。これをどんどん改善していったとしても、いつかは、いわゆる化石燃料の採掘、経済的に採掘できる時代は終わってしまうと考えています。

今まで、ここ 20 年ぐらいにわたってさまざまな研究機関がエネルギー消費と採掘可能な化石燃料の量を予測していたんですけども、それは主に現在先進国と呼ばれる国々の状況を見た予測値でした。ところが、ここ数年にわたって、特に中国、次いでインドなどの国々のモータリゼーションの発達が非常にクローズアップされてきました。ここに示しましたのは、いわゆる人口と現在の車の保有台数、そして人口当たりの車の保有台数です。ここに示しましたように、いわゆる先進国の人口当たりの保有台数というのはほぼサチュレートしつつありますけれども、実は中国、インドといった国は今まさにこの自動車の保有が急速に伸びているところ、すなわち、これだけ大きな人口を抱えた国々が、いわゆる先進国並みの保有率になったときに、自動車のトータルの保有台数というのは爆発的に伸びてしまうという予想がされます。したがって、これによる化石燃料の増加、そして大気汚染の問題というのは新たに付け加えられるべき数字として挙げられてきました。

実は、これはまだ中国、インドといった国の伸びを十分に織り込んでいないときに立てた予測ですけども、今のままの文明の進歩、人口の増加を考えますと、2000 年を 100 としますと、2040 年には約倍のエネルギーのデマンド、これは自動車だけではなくて、さまざまなエネルギーのデマンドになりますけれども、約倍になってしまう。現在のエネルギーソースのミックスのままでは当然成り立ちませんので、さまざまな新しいエネルギーの開発が必要となってきます。したがって、自動車メーカーとしても、これらの将来のエネルギーのデマンドがどう動くのかというのは非常に大きな要素となってきます。

BMW では、こういった問題に短期、中期、長期にわたってどう取り組むべきかということ、特に 21 世紀が始まる直前に、まずパワートレインの研究部門からスタートして、自動車全体にわたる長期のプランを立ててきました。その中で立てたスローガンは、ここに挙げました「Efficient dynamics」というスローガンであります。当然、排出ガスの問題はいわゆる必須事項としてクリアするとして、よりエフィシエントであるためには、パワートレイン車両の軽量化がより進められるべきである。そして、燃費は大幅に改善しなければいけない。ただ、パワーも同時に改善していかなければいけない。この 3 つを同時にインテリジェントに解決するというのが私ども BMW の目標でした。

この目標を立てるに当たってもう一つ重要なこととしては、一部の車に適用すべき技術ではなくて、生産しているすべての車に適用できる技術を最優先に開発するということがこの開発スローガンを立てる上での共通の理解でありました。

これが BMW のヨーロッパにおけるトータルのフリート燃費の推移を示したものです。1990 年を 100 として、実は 2005 年に至るまでの間の 15 年間にほぼ 30% のトータルの平均燃費の改善を見ています。もちろんさまざまな要素があります。例えば、ヨーロッパで走っていますので、ディーゼル車の比率を大幅に増したこと、そしてエンジン自体の効率の改善、そういったさまざまな要素によって、いわゆる現行技術の改良による積み上げで 30% の効率改善を見ることができました。

その実現のためには、エンジンだけではなくて、ボディーに新材料を使ったり、これは直噴ですけれども、ガソリンの直噴や、私どものフル可変バルブタイミングシステム、そしてより効率のいいエンジンや発電機の使い方などによって上手な車のトータルなエネルギー管理をすること、そしてハイブリッドに代表されるような電気駆動動力系の採用、こういったもので、いわゆる近未来の燃費改善を図っています。

現状のものに対して、まず現行車の効率を改善すること、そして、いわゆる実走行燃費を改善するためのハイブリッドを代表とするような効率の改善手段を今進めていますけれども、もう一つ先にあるべきもの、長期にわたる開発目標としては、究極の燃料、究極の動力機構を目標として定める必要がありました。

これがその検討をしたときの1つの例ですけれども、どういった燃料を使うべきなのか、どういった動力発生装置を使うべきなのか、それを実際に具体的に実現するに当たっては何をすべきかといった検討を行いました。このときに、それぞれの要素について現状の技術レベル、そして将来10年、20年後にどういった技術レベルになっているのかといった予測を立てながらの検討を行いました。

これが、いわゆる将来に比較するための点取り表です。

そういった検討をしていった中で、最終的に非常に重要なことが幾つか挙げられました。まず、最終的な車として絶対にあるべきことは、CO<sub>2</sub>の排出をゼロとすること。そして、その燃料供給が持続的であること。もちろん、エネルギー供給が可能であること、そして排出ガスが当然クリーンでなければいけない、そういったことを検討してまいりました。

そうした検討の中で、最終的にクローズアップされてきたのが、水素を燃料とした自動車であります。いろいろな要素がありますけれども、一番大事なところは、水素を燃料とすることによって、現在自動車メーカーとして苦勞しているCO<sub>2</sub>の問題から、カーボンフリーな燃料に切りかえることによって完全にCO<sub>2</sub>問題から抜け出せるということ。そして、もう一つ大事なことは、水素というのは自然界から採掘するのではなくて、さまざまなソースから人類がみずからの手でつくり出すことのできるエネルギーキャリア、燃料であるということです。

繰り返しになりますけれども、自動車にとって古くから排出ガス問題、そして地球温暖化問題、エネルギー枯渇問題、そういったものがありましたけれども、それらをひっくり返して解決できるものとしては、カーボンフリーな燃料である水素を使うということを最終的に目標としました。それによって、これから20年、30年後のモビリティを確保していけると考えているわけです。

これはちょっと脱線してしまいますけれども、自動車用のエネルギー源として何を使うべきかというのをもう一度整理してみました。現在自動車用のエネルギー源としているものは、いわゆる消費型のエネルギー源、いわゆる埋蔵されている化石系の燃料を中心として、それを液体またはガスの燃料として車に使うことを考えています。それに対して、再生可能なエネルギーを使う場合には、当然それをベースにもう一度燃料として生成するか、電力とするかが主に考えられますけれども、将来こういった、特に再生可能エネルギーを使うとなると、さまざまなソースから1つの統一されたエネルギー源として使うべきこと、そして先ほどの炭素フリーという考え方を使いますと、蓄電池と水素がクローズアップされてくると考えています。もちろん、これらさまざまな有用な燃料もありますけれども、最終的にあるべき姿は、カーボンフリーで、しかも再生可能型のエネルギー源を使える燃

料であるというふうに考えています。

これは、いわゆる自然エネルギーから水素をつくるサイクルを簡単に模式に示したものですけれども、この水素エネルギーサイクルというのは、実は、ある意味、日本が非常に進んでいた時期があると考えています。WE-NET というプロジェクトが長年研究されてきましたけれども、まさに自然エネルギーから水素を生成し、それを長距離輸送して消費地に運ぶ。例えば、赤道直下の国々で自然エネルギーを使って水素をつくり、それを液化して消費地である日本に運び、その液体水素を消費するということがかなり具体的に研究されていたと思いますけれども、それをモデルとして BMW もさまざまな方式を考えてきました。

これは BMW が独自にやったものではないんですけれども、1つの有望な例として注目していた1つの案です。これは、アメリカのカリフォルニアのモハベ砂漠に実際につくられている太陽熱での実用発電設備です。たしか十数メガワットの発電所だったと聞いております。

水素というのは、いわゆる民生用の燃料として考えると全く新しいものなんですけれども、実は、石油工業とか化学工業では、当然大量に製造され、使われております。

ただ、最終的に自動車として使うべき燃料源、水素のソースとしては、当然再生エネルギーからつくられるべきと考えております。

それでは、実際に BMW がどういった取り組みをしていたのか、水素自動車の開発について触れたいと思います。BMW は、1975年ぐらいから本格的な水素自動車、水素エンジンの研究を進めてきました。そして、最初の車がこの1979年につくられた水素自動車です。

最初の4世代の水素自動車というのは、いわゆる研究用の車として数台限定でつくられておりました。この第4世代の水素自動車は、1990年代初めにつくられたもので、南バイエルン州水素プロジェクトのメンバーとして、実際に太陽光発電でつくられた水素を使って実用走行も行っています。この車は、1997年のCOP3のときには京都にも持ってまいりました。これらの4世代の研究の結果から、水素自動車そのものをお披露目をして、世の中に知らしめて、水素自動車というのがもうかなり完成の域に達しているということを証明するために、第5世代の水素自動車は15台以上つくりまして、それを実際にさまざまなシーンで使い、また世界じゅうをツアーしてデモンストレーションも行いました。この車のうちの5台は2001年に日本でデモ走行を行っております。この5世代の水素自動車をつくることによって、BMW が次にやるべきことは、もう量産をして、まず水素自動車というのが世の中に実際に存在すること、もう走れるということをデモンストレーションすべき時期が来たと考えました。量産化する意味というのは、まず一番大事なことは、水素自動車を実際に世の中で走らせるためには、車そのものだけではなくて、それを取り巻く法規制、また水素の供給のインフラストラクチャーそのものもつくり上げなくてははいけない。車をつくることは自動車メーカーとしてももちろんできるわけですが、インフラストラクチャーや法規制というのは、自動車メーカーにとどまらずにさまざまな政府機関、その他さまざまな産業と共同でなければできないということで、量産をすることによってさまざまなそういった機関、企業との連携を深めることにしました。

これが、昨年ヨーロッパで発表した、いわゆる量産型の水素自動車です。

それでは、量産型の水素自動車 Hydrogen 7 そのものについて少し紹介したいと思います。

これが BMW の Hydrogen 7 という車の車両概要になります。基本は、7シリーズのモデ

ルをそのまま使い、エンジン部分に水素の噴射システムを使ったこと、そしてガソリントankとともに液体水素のタンクをトランクルームに搭載しているというのがこの車の主要な特徴です。

量産するということは、今までのプロトタイプとは全く異なった開発、製造のプロセスをとっています。今までの開発車というのは、それぞれの部品は1個1個手づくりで、吟味しながら車に搭載すればよかったですけれども、量産車というのは、仕様書をそれぞれのパーツサプライヤーに出し、それがそのままラインで組み立てられるようになっています。この車そのものも、実はこの7シリーズを量産しているラインの上でそのままつくられている車です。しかも、さまざまな使用条件で、いわゆるプロフェッショナルでないドライバーがさまざまな運転をしても十分に実用にたえなければいけないのが量産車の特徴です。

その量産車の今までのガソリン車との違いがここに示されていますけれども、このブルーの部分が水素自動車として新規につくられたものです。エンジンでは水素の噴射システム、そして車体そのものでは水素の警報システムがあり、ほとんど新規でつくられているのはこの燃料タンクの部分のみです。

この水素自動車にとって最も大事なことは、量産型として世の中に出て、もし1件でも水素に絡む事故または爆発のようなことが起きた場合に、水素社会そのものの進歩に大きな障害となると考え、安全についてはできる限りすべての検討と対策を行いました。

これはその安全対策の1つの例ですけれども、車両には5カ所の水素の漏洩センサーがついています。水素の可燃範囲というのは4%から七十数%までの範囲ですけれども、大体0.8%ぐらいの水素がもし車室内またはセンサーに検知されると、警報が鳴ります。そして、2%程度の水素が検知されたら、即座にすべての水素の作動を停止して窓を開くといったことをやっております。

これが水素のエンジンです。12気筒の6リッターというわりあい大きなエンジンを使っていますけれども、水素はこの吸気のポートから噴射し、ガソリンは筒内直噴の方式をとっています。そのエンジンの出力は260馬力、トルクは390ニュートンメートル。これはガソリンでも水素でも同じ出力性能を示すようになっています。

これは水素エンジン用のピストンです。ほとんどガソリン用と変わりませんが、若干このピストンリングの部分を冷やすための冷却通路が追加されている等のわずかな変更が施されています。

これはエンジンとしては唯一最大の変更点ですけれども、吸気マニフォールドの途中に水素の噴射弁が12個設けられています。水素タンクから来た水素は、圧力調整弁を経て、水素のレールに入り、このインジェクターから吸気マニフォールドに噴射されています。

これがこの水素の噴射弁を示したものですけれども、吸い込まれた空気と噴射された水素が混合されてエンジンに吸入されます。

これがエンジンの出力です。残念ながら、この260馬力、390ニュートンメートルというのは、出力でガソリンエンジンの、ベースのエンジンの65%程度でしかありません。これは、実は先ほどお示ししましたように、水素のガスを、吸い込む空気と一緒にエンジンに供給するために、噴射された水素のガスの容積分だけは空気が入らないために、このような特性になっています。

水素エンジンが完全にエミッションフリーかということ、実は、残念ながら、エンジンで

燃焼しますと、どうしても高温になって、運転条件によっては窒素酸化物が発生してしまいます。これは、水素と空気の混合割合に対してどのぐらいの窒素酸化物が出ているかというのを示したものですけれども、この 1.0 というのは、理論的に一番よく燃える部分ですけれども、これより少し薄目のところで非常に大量の窒素酸化物が出てしまいます。そのために、実は、いわゆる窒素酸化物が大量に発生する部分では、このエンジンは運転しません。より濃い場所とより薄い場所での運転を行っています。この、より濃い場所では、触媒によって窒素酸化物は処理されます。そして、薄い部分ではほとんど窒素酸化物が出ないというような特性になっています。

これがその触媒によってエンジンそのものから出てきた窒素酸化物が減少されていることを示します。

これが実際に、いわゆる排出ガスをテストしたときの排出ガス特性ですけれども、炭化水素、一酸化炭素については検知不能なレベル。これはヨーロッパ、アメリカのテストですけれども、検知不能なレベル。窒素酸化物は、いわゆるヨーロッパでの規制値の 2%、アメリカの、窒素酸化物に対して厳しい運転条件でも、水素運転では規制値の 10% という低い値にとどまっております。

次に、水素の貯蔵について簡単に触れたいと思います。これが燃料のエネルギーの密度になりますけれども、ガソリン、軽油、そして液体水素を比べたものになります。実は、水素というのは、重さ当たりのエネルギーは非常に高く、その意味では非常に優秀で、重さ当たりのエネルギーが高いということが実は宇宙ロケットに使われる燃料が液体水素である最大の理由になっていますけれども、それに対して、もう基本的な特性として、容積当たりのエネルギーは水素としては一番すぐれている液体水素の状態でも、ガソリン、軽油に対して数分の 1 になってしまいます。そのために、この水素のタンクをどうするか、どこに、どのように水素を蓄えるかというのが水素自動車開発にとっては一番の課題となっております。

これが BMW で今使っている液体水素のタンクです。ステンレスの二重管で、その間を真空にして、 $-253$  度の液体水素を蓄えている、巨大な魔法瓶のような構造になった液体水素タンクを使っています。

水素タンクを含め、車両全体の安全性というのは最も重要だと先ほども申しましたけれども、その安全性の確認にはあらゆる試験を行いました。タンクそのものを火にくべて長時間燃やしてみたり、いろいろなクラッシュをしてみたりして安全性を確認しています。

これもそうですね、火にくべているところや、衝突試験などが行われています。

こういった、いわゆるコンポーネントの試験のほかに、さまざまな実走行の試験を行っています。実は、この水素自動車 Hydrogen 7 は、100 台を量産しましたけれども、その前の段階で十数台のプロトタイプをつくり、それでのテストを行いました。超高速の走行から極寒地、熱地、そしてさまざまなユーザー想定の実験も行っています。これまでに約 150 万キロ以上の試験走行を行っています。日本でも、実は 2 台のテストカーを今持ってきておりまして、7 月から現在に至るまで約 2 万 5,000 キロぐらいの試験走行を行いました。

それでは、ちょっと簡単にムービーを紹介したいと思います。

(クリックしてみてください。)

(ムービー上映開始) これは、実際にミュンヘンにあるパブリックな水素ステーション

に車を入れたところでは、ヨーロッパでは、燃料の補給というのはユーザーが自分でやるものです。したがって、この車においても、実際にユーザーが普通にスタンドに入り、自分で給油します。この水素の補給カップリングというのは、もちろん BMW だけではなくて、水素を供給するメーカー、ガソリンスタンドを運営する会社、そしてさまざまな液体水素を使う可能性のある自動車メーカー、その中には日本の自動車メーカーさんも含まれますけれども、そういったさまざまな企業または団体と協議を重ねた上で、共同で開発されたシステムです。したがって、これからつくられる液体水素のステーションはすべてこのシステムを採用します。-253 度という極低温の水素ですので、当然外気からは完全に遮断され、しかも断熱されていますので、非常に低い温度の液体水素は直接車両の奥にある水素タンクの中に直接補給されます。こうやって長いパスを通るのも、水素の配管がなるべく熱伝導で水素タンクの外部とつながらないように構成されています。この車では、液体水素をそのままエンジンに供給するのではなくて、蒸発した水素のガスの部分をエンジンに入れるために、この状態がいわゆる満タン状態です。タンクのすべてを占有はしません。

これは、水素の補給が終って、ステーションのカップリングが車から離れるところでは、エンジンは、スイッチを押すことによって自動的に水素モードでスタートします。水素ガスがタンクから出て、配管を通してエンジンに供給されていきます。

空気がエンジンに吸い込まれる途中で、空気作動弁によって水素が吸気管のほうに供給されていきます。空気と水素の混合されたガスがシリンダーの中に入っていきますと、通常のガソリンエンジンと同じようにシリンダーの中で点火されて、燃え、それがエンジンのパワーとなっていきます。

(ムービー上映終了)

ちょっとムービーとまってしまったんですけども、この車は水素でもガソリンでも走れるようになっていますので、スイッチを押すことによって、ガソリンと水素をいつでも走っている状態に変えることができます。したがって、水素が供給できないような場所でも自由にこの車は走ることができます。現在水素ステーションは非常に少ないので、ガソリン・水素両方で走れるというのは量産車としては非常に重要なことですし、逆に、内燃機関を使うアドバンテージになっています。

それでは、次に、今の Hydrogen 7 の次の取り組みについて紹介したいと思います。

先ほどちょっと触れましたように、実は、現在の水素エンジンの一番の欠点は、パワーが現在のガソリンエンジンより劣るということです。ただ、それは水素エンジンそのものの持つ固有の欠点ではなくて、今のシステムに起因するものでありますので、次の世代は、少なくともガソリン、ディーゼル並みのパワーレベルを目標としています。

これが現在のガソリンの出力に対して、理論的にも、今の水素エンジンの出力というのは 20% ぐらい落ちてしまいます。

それに対して、水素の供給を極低温を例えば吸気管に噴射するとか、直噴にすることによってさらに上がるポテンシャルを持っています。

さらには、液体水素を直噴にすると 1.6 倍のパワーが出るというふうに確認されています。

さらには、それに過給を組み合わせることによって、現在のガソリンエンジンの約 2 倍

となる。ここまで実は既に試験エンジンでは確認を行っております。

こういった極低温の水素を噴射する、または直噴にするといった技術を現在次の世代のエンジンとして開発を進めています。

また、水素をシリンダーの中に直接噴射することによって、実はさまざまな燃焼制御を行えることも確認しています。

現時点での水素エンジンのパワーレベルというのはこの位置にありますけれども、実はもう既にベンチ実験では、このポートに液体水素を噴射したり直噴にすることによって現在の約3倍の出力のポテンシャルを持つということが確認され、このエンジンを次の量産エンジンとして考えています。

したがって、今12気筒6リッターで発生している300馬力弱のエンジンが、次の世代では2,000ccのエンジンで実現できると考えています。

もう一つ重要な問題としては、水素のタンクが非常に大きくて重いということがあります。それについてもさまざまなアプローチを行って開発を行っています。

現在の圧縮水素のレベルがここにあります。それに対して、その約倍の圧縮水素の場合には、150リッターのタンクの容量で、中に約6キロの水素が蓄えられます。現在私どもが使っている液体水素のタンクですと、同じ容量で8キログラムの水素が収容できます。今、次の世代として考えている水素タンクは、そのさらに2割ぐらい多い容量を考えています。これはさらに軽量化も果たしています。これは、例えば、700気圧の圧縮水素に対して7割近い容量を示します。さらに、実は次世代の水素の貯蔵システムとして、液体けれども、圧縮して超臨界状態に蓄えるという技術を現在開発中です。それによって、より大容量の水素を蓄えることができると考えています。

今まで述べましたように、エンジンの性能改善、タンクの改善、そしてエンジンのさまざまなコントロールをすることが、今自動車メーカーとして取り組んでいるさまざまな次世代の水素自動車のアプローチですけれども、もう一つ、実は一番大事で、なぜ今水素自動車をBMWでアピールしているかということ、水素自動車はもう技術的にはほぼ完成に近くなっています。ですから、逆に、次世代のサステイナブルなモビリティをつくるためには、早く水素をつくり、そして車に供給できるインフラをつくり上げることがこれから最も大事なことだと思っています。現在、そして次世代の水素自動車をもって、より早い水素社会の実現のために、ほかの自動車メーカー、そしてエネルギー供給メーカーと共同で開発を進めたいと考えております。

以上で、BMWの水素自動車の紹介を終わりたいと思います。どうもありがとうございました。