

# ガス燃料エンジンの技術発展シナリオ

## 1. 現状分析

自動車用の石油代替燃料として期待されるガス燃料としては、主として天然ガスと水素が考えられる。このうち、天然ガスは、都市ガス、火力発電、工業用装置など、すでに多く使用されている。エンジン燃料としても、コージェネレーションのための発電用機関やヒートポンプエアコンの室外機に実用されている。特に東日本大震災以後は、環境保全とともにエネルギーセキュリティの観点から関心が非常に高まってきている。

### 1.1 天然ガス

天然ガス自動車は、図 1 に示すように、天然ガス専用車、天然ガスとガソリンを切替えて走行することが可能なバイフューエル車、天然ガスと軽油など2種類の燃料を同時に使用するデュアルフューエル車、ハイブリッド車など、いくつかの種類がある。いずれも圧縮天然ガス(CNG)を利用している。

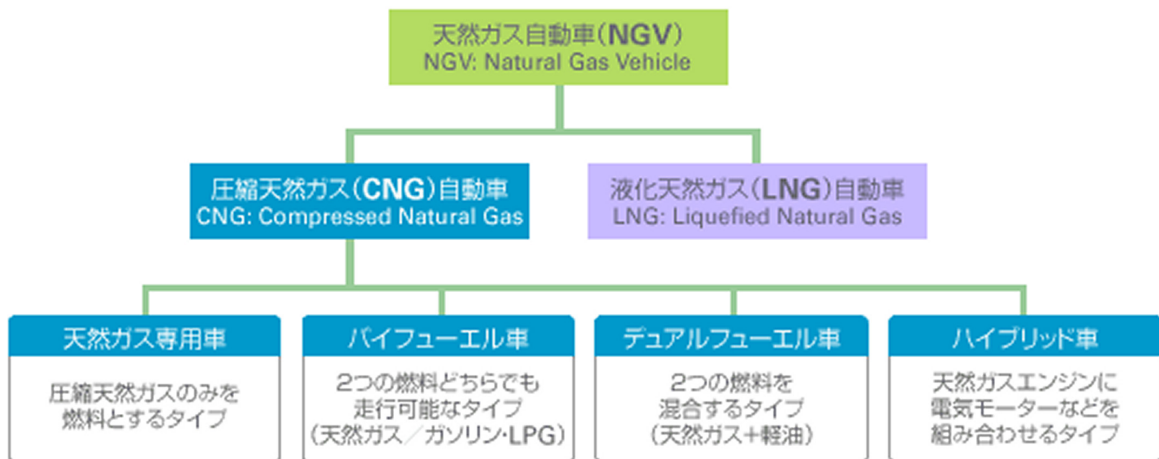


図1 天然ガス自動車の種類

天然ガス燃料の特徴は次のとおりである。まず、ガソリンと比較し、等発熱量当り、CO<sub>2</sub>の排出量が約20%低減できる。また、オクタン価が高いため、エンジンの高圧縮比化、大型化が可能であり、より高効率にすることが可能である。すでに、トラックやバスなどの大型エンジンを予混合火花点火方式とするとともに、理論混合比で運転することによって三元触媒の使用により排気ガスを浄化することができる。このような天然ガス燃料の特性に基づいて自動車用エンジンへの適合が図られている。図 2 に日本国内における普及状況を、天然ガススタンド数とともに示す。2010 年度末において、国内での天然ガス自動車の数は 40,429 台で、スタンド数は 333 ヶ所である。使用用途としては、軽乗用車、小型トラック等のガソリン代替車から導入が進められた。その後、中・大型ディーゼル車の代替として、天然ガス自動車の普及を大きく加速させたのは東京都が 1999 年から 2000 年に実施した「ディーゼル車NO作戦」であった。石原都知事は、ディーゼル車が排出した煤の入ったペットボトルを振りかざし、自動車公害対策の方向に関する活発な議論と、ディーゼル車のあり方を変える行動を都民と事業者に呼びかけた。この「作戦」の中で、ディーゼル車から黒煙を排出しない天然ガス自動車へ代替することも提案され、多くの天然ガス自動車導入された。1997 年、1998 年に

は年間 1,500 台程度であった天然ガス自動車の普及台数は 1999 年には 2,559 台、2000 年には 4,201 台となりその後数年間 4,000 台程度の普及が進んだ。

一方、世界では 2010 年度末において約 1,300 万台の天然ガス自動車が普及している。世界の天然ガス自動車普及上位五カ国の普及状況は表 1 のとおりであり、いずれも 100 万台以上の天然ガス車が走っている。これらの国々に共通した事情として、自国に豊富な天然ガス資源を持っている点である。天然ガス資源の国内での有効活用を主目的に、天然ガスの価格がガソリンや軽油に対して安価に設定されており、国民が天然ガス自動車を進んで導入するような政策誘導が行われている。これらの自動車はガソリンエンジンに CNG キットを併設した廉価なシステムを持つガソリン/CNG の Bi-fuel 車が主流であり、インフラの課題も回避できる合理的なシステムである。

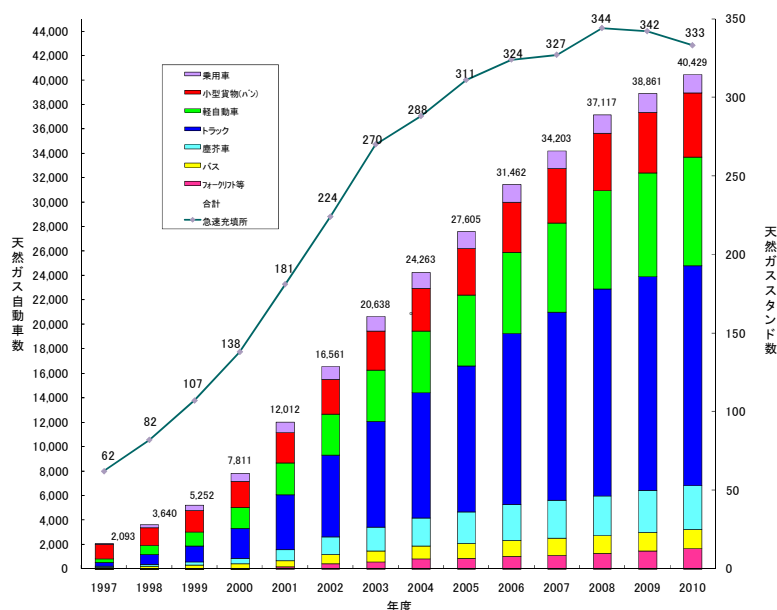


表 1 天然ガス自動車普及上位 5 カ国 (NGV Journal ホームページ/ Worldwide NGV statistics より)

順位	国名	普及台数
1	パキスタン	2,850,500
2	イラン	2,070,930
3	アルゼンチン	1,953,002
4	ブラジル	1,672,302
5	インド	1,100,000

図 2 日本での NGV と天然ガススタンドの普及推移

米国では、最近シェールガス等非在来型の天然ガスが経済的に採掘できるようになり、約 63 年と言われている可採年数が 4 倍以上延びる可能性が示唆されている。価格についてもリーマンショック以降原油価格が上昇しているにも関わらず、米国の天然ガス先物市場ではリーマンショック以降も低位に推移している。このようなことから、2011 年 3 月 30 日に国内での燃料の増産、天然ガスやバイオ燃料の使用拡大及び自動車の燃費改善により石油輸入量を 2025 年までに 3 分の 1 削減するという計画 ‘BLUE PRINT FOR A SECURE ENERGY FUTURE’ をオバマ大統領が発表し、この日行った演説の中で天然ガス自動車普及推進法案への支持を表明した。米国エネルギー省エネルギー情報局は、2009 年から 2035 年までの輸送用分野でのエネルギー消費の年平均伸び率を 0.6% と予想しているが、天然ガス自動車向けの圧縮天然ガスの需要は年平均 7.4% の伸び率で増大していくものと見込んでいる。こうした動きを受けて、自動車メーカーやインフラ事業者の動きも加速している。

このような世界の動きに比べて、日本での普及の程度が緩やかである理由としては、(1) ガス充填所数が不十分で、待ち時間や営業時間の問題、(2) 一充填走行距離が短い、(3) 車両価格が高い (改造費が高い)、(4) 車両重量が重い (CNG 関連の部品が重い)、(5) 大都市部に偏っていることなど

がある。燃料価格の問題と車両価格の問題は、規制緩和や税制など国の施策によって改善の余地が十分にあると思われる。また、充填所数の問題は、燃料電池自動車用水素ガススタンドと同様の問題で自動車の普及と合わせて、経営が成り立つように徐々に増加させる工夫が必要である。いずれにしても、国や自治体の姿勢が重要であり、今後の発展の鍵となる。

## 1.2 水素

水素は、酸素と反応して二酸化炭素を排出しないことと、再生可能エネルギーをはじめとして多くの燃料(エネルギー)からの変換が可能であることから、将来の導入が期待されている。現在、燃料電池車FCVの実用化を目指すプロジェクトが多く推進されている。とくに、2010年に自動車メーカーによる各種FCVの開発、リース販売、走行試験に対応するとともに、将来の普及シナリオの実現に向けて、水素を分散供給するためのインフラ構築の方法が検討され、さまざまなオンサイトおよびオフサイト充填設備を有する水素ステーションの実証プラントが経済産業省主導で進められている。自動車メーカー3社及び水素供給事業者10社がFCVの国内市場導入及び水素供給インフラの普及開始に向けて共同で取り組むことに合意し、共同声明を公表した。本格導入が開始される2015年には、自動車会社がFCV量産車を販売するほか、これらFCVの販売に先立ち、エネルギー事業者が東京、愛知、大阪及び福岡の4大都市圏を中心として、FCV量産車の販売台数の見通しに応じて必要な規模(100箇所程度)の水素ステーションを先行的に整備することを目指すことが示されている。

一方、水素エンジンについても精力的に開発が進められている。水素エンジンは既に1970年代に本格的な実験が開始され、それ以来、種々の形式、制御方法、運転条件において研究が行われ、多くの知見が蓄積している。水素が燃焼する際の特徴としては、可燃範囲が広いことと最小点火エネルギーが小さいことが挙げられる。そのため、安定した着火が可能であり、希薄混合気でも安定した燃焼が可能で、燃焼変動が少ない。すなわち、超希薄燃焼が可能となり、低NO<sub>x</sub>化を実現することができる。その反面、欠点としては、水素を吸気管から吸入するとその分空気量が少なくなると、出力が抑制されることになる。また、高負荷では、逆火、過早着火、ノックという異常燃焼が発生しやすく、出力および運転条件が著しく制限される。また、熱損失が増大するため、熱効率も比較的低い。

これらの欠点を補いながら長所を生かすために、筒内直接噴射機関の開発が行われている。吸気弁を閉じてから高圧水素を噴射すれば、逆火を防止することができ、また十分な空気量が確保できるので高出力が得られる。ただし、高圧水素噴射システムの開発が必須であるが、近年の技術的進歩によって可能性が拓けてきた。さらに、水素燃料特有の燃焼特性を最大限に活用する様々な展開も図られており、現時点で水素エンジン自体の実用化は今後の耐久性や信頼性向上に期待するところである。さらに、従来から水素ロータリーエンジンの開発が行われており、ガソリンとの切り替えが可能なエンジンとして実際に自動車が販売されている。

## 1.3 LPガス

LPガス自動車の普及状況としては、世界では約1460万台強(2008年)、日本では約28万台(2010年6月)である。国内ではタクシー用が主であるが、最近では台数が微減している。一方で、LPガス自動車用燃料供給施設導入促進対策事業(資源エネルギー庁石油流通課補助金制度)においてクリーンなLPガス自動車への燃料供給設備に対して補助が出されている。エネルギー源の多様化という観点からも今後のLPガス利用の自動車の普及に期待がかかる。

## 2. 発展シナリオ

### 2.1 天然ガス

自動車の直面するエネルギー・環境問題のうち、近年はまず地域環境問題がクローズアップされ、これまでは大気汚染改善を目指して国および自治体による自動車排ガスに対する規制が強化されてきた。しかし、燃料噴射、各種の可変機構、後処理技術などの実用化が進み、エンジンからの排気ガスのクリーン化が達成され、大気中の有害物質濃度の自動車からの排出寄与が減少するに伴い、地球環境問題に係る CO<sub>2</sub> 低減、すなわち燃費改善対策が重要となり、さらに 2030 年頃にはエネルギー問題への対応に迫られ、脱石油系燃料としてのガス燃料の重要度が高まることが予想されるといわれてきたが、その時期が早まる可能性がある。

ここで、注目すべきレポートがある。IEA（国際エネルギー機関）は毎年 11 月に「World Energy Outlook（以下：WEO）」を公表しているが、2011 年版の発行に先行して 2011 年 6 月 6 日に「Are we entering a golden age of gas?（ガス黄金時代は来るか?）」という特別レポートを発表した。このレポートで報告されている「ガス黄金時代シナリオ（以下：ガスシナリオ）」は昨年版の WEO2010 の、「具体的な実施措置が未定なものを含め、世界各国の広範な政策公約・計画を考慮した場合の今後のエネルギー需給のシナリオ」である「新政策シナリオ」を出発点に昨今の変化・進展を新たな前提として加えたシナリオであり福島第一原発事故も織り込まれている。

この「ガスシナリオ」の主な前提条件としては、「中国の第 12 次 5 カ年計画による天然ガス比率の拡大」、「原発の役割の変化による天然ガスの需要増」、「シェールガスをはじめとする非在来型天然ガスの供給拡大」、「非在来型天然ガス供給拡大に伴うガス価格の低下」等があるが、「天然ガス自動車普及台数の大幅な増加」もシナリオの前提条件の一つとして盛り込まれた。

昨年版の「新政策シナリオ」においては天然ガス自動車の普及拡大は緩やかなものと想定されていたが、今回のシナリオでは天然ガス自動車について「現実味のある技術がありながらガスの利用が進んでいないガス利用分野」と表現されており、天然ガス価格と石油価格の差の拡大と政府の支援を受けて、2035 年の天然ガス自動車の普及台数は、「新政策シナリオ」で想定していた 3 千万台から今回の「ガスシナリオ」では 7 千万台へと 2 倍以上に上方修正されている。

さらに、「影響が大きい可能性は低い」シナリオ、「High-Impact Low-Probability」シナリオも想定されており、このシナリオでは 2035 年時点で世界の自動車販売台数に占める天然ガス自動車の割合が 10%と想定され、2035 年の天然ガス自動車の普及台数は 1 億 8,600 万台と想定されている。

ガスシナリオでの世界の燃料別一次エネルギー需要は図 3 の通りであり、2030 年までには天然ガスの需要は石炭を抜き、天然ガスのシェアは 2008 年の 21%から 2035 年には 25%になると想定されている。図 4 に ガス燃料自動車の発展シナリオを示す。

天然ガス車は、今後も都市内および都市間輸送用として、2 次粒子生成および光化学オキシダント抑制の観点からディーゼル車およびガソリン車代替車の役割を果たすと期待される。天然ガスは軽油やガソリンと比較して水素／炭素比が大きく、CO<sub>2</sub> 排出量が少ない特性を持つ。ただし、メタン自体の温暖化係数が高いので、ライフサイクルとしてメタン排出の抑制も課題となろう。

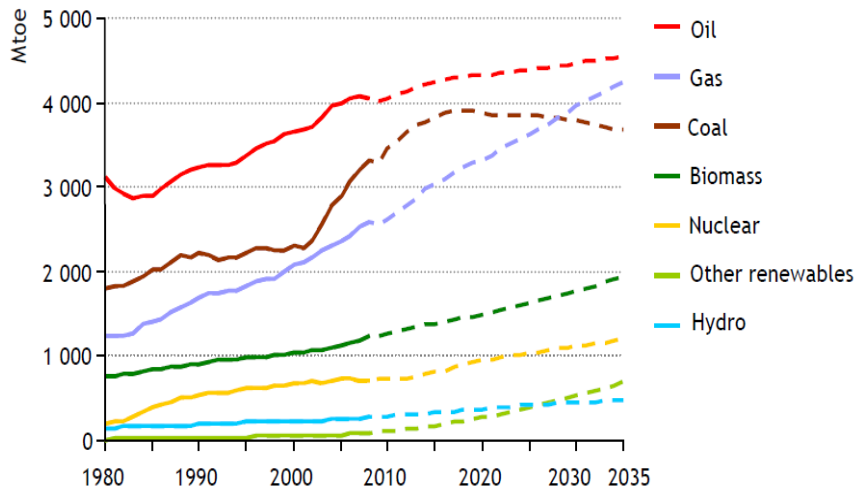


図3 世界の燃料別1次エネルギー需要(WEO2011から)

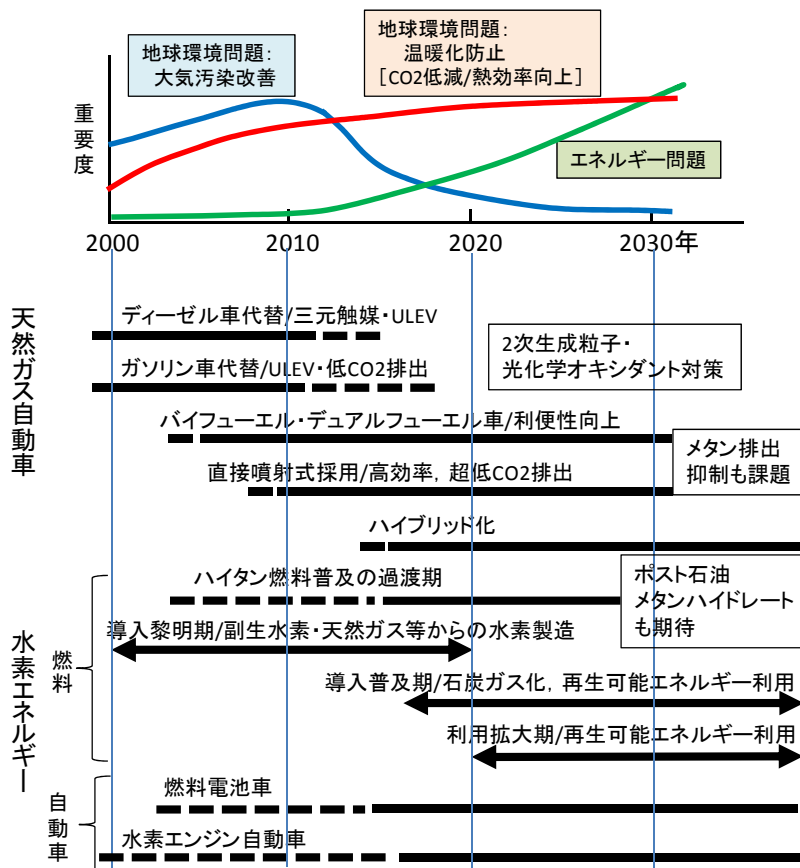


図4 ガス燃料自動車の発展シナリオ

技術的な課題としては、ディーゼル・デュアル・フューエル (Diesel Dual Fuel : 以下、DDF) 化である。現在国内で走行している天然ガス自動車のエンジンはガソリンエンジンと同じオットーサイクルエンジンであるが、オットーサイクルエンジンはディーゼルエンジンに比べて効率が低い。DDF エンジンは、ディーゼルエンジンの構造をほぼそのまま利用し、吸気に天然ガスを混

合し、少量の軽油をディーゼルエンジンと同様にエンジンの圧縮工程において噴射し、この軽油の自発火により天然ガスに点火するものである。DDFエンジンは、ディーゼルエンジンと同様の高効率で、燃料の60～85%を天然ガスとすることで、軽油のみを使用する場合に比べて、10～20%程度CO<sub>2</sub>発生量を削減することができる。天然ガスがなくなっても、軽油のみでの走行が可能であり、天然ガススタンドのネットワークが不十分な地域でも利用することが出来る。欧州メーカーは、長距離用トラックをDDF化し、熱効率を火花点火方式よりも30～40%程度高めて、CO<sub>2</sub>排出量はディーゼル車よりも10%削減でき、2011年から本格的に生産を開始する。

天然ガスと水素の混合気体であるハイタンの利用も水素利用の高まりとともに期待される。また、長期的には日本近海にも多く存在するポスト石油燃料としてメタンハイドレートの利用も考えられる。

近年、燃料消費量が少なく温室効果ガスの排出量が少ないことからハイブリッド車が乗用車を中心に普及している。ハイブリッド乗用車はガソリンエンジンを電気モーター・発電機と組み合わせ、減速時のエネルギーを回収することにより、同クラスのガソリン車に比べて燃料消費量を約5割削減できる。このガソリンエンジンを天然ガスエンジンとすれば、CO<sub>2</sub>排出量をさらに2割程度削減することが可能である。韓国では、バスを天然ガスと電動モーターのハイブリッドとし、2011年7月より30台の試験走行を実施し、2012年から大量生産に入る予定である。

## 2.2 水素およびバイオガス

一方、水素に関しては、FCV主導で水素ガススタンド設置が計画されている。2015年を目途に、水素スタンドの設置およびFCVの量産化を目指すプロジェクトが既にスタートしている。水素スタンドが普及して、かつ水素タンクが量産化されれば、水素エンジンの実用化も近くなる。

さらに、再生可能エネルギー利用の例として、種々のバイオマスからバイオガスを取り出して地域分散型エネルギーとして活用し、その一環として自動車用燃料として利用する動きもある。例えば、スウェーデンでは、ストックホルム市が下水処理場の消化ガスを利用し、ゴミ収集車や路線バスにバイオガス車を導入、マルメ市でも2015年に市バスをバイオガス車への転換により化石燃料ゼロにし、市の公用車の75%をガス車にしていく目標を立てている。

## 3. 課題

以上の技術発展シナリオに基づく課題として、まず天然ガス自動車については筒内直接噴射式の実用化のための技術開発が挙げられる。そのためには、高圧噴射弁、昇圧ポンプ、着火方法の確立などが必要になる。また、ガソリンエンジンやディーゼルエンジンで培われた各種可変機構、過給、EGR技術、新燃焼法の利用、DDF化など、最近目覚ましい発展を遂げている新規エンジン技術およびハイブリッド化などを天然ガスエンジンにも適用する必要がある。

天然ガス自動車はこれまで、ディーゼル車に比べて大気汚染物質の排出量が少ない「低公害車」として評価され普及が進んできた。しかし、度重なる排出ガス規制の強化によりディーゼル車からの窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)や粒子状物質(PM)の排出量は飛躍的に減少し、1998年の規制値に比べて2009年の規制値はNO<sub>x</sub>が約7分の1、PMが25分の1となり、ディーゼル車からの排出ガス問題はほぼ解決されたといえる。こうした状況を受けて、天然ガス自動車の普及意義はこれまでの「低公害」から本来の目的である「エネルギーセキュリティ(非石油系燃料の利用)」と「地球温暖化ガスの削減」に大きくシフトしたと言える。

非在来型天然ガスの開発の進展により、今後はこれまで以上に天然ガスが世界の基幹エネルギーとして大きな役割を果たしていくことが期待され、自動車交通部門でも天然ガスの利用が拡大していくことが世界的に見込まれている。天然ガス自動車の普及の目的の第一義は既に述べたとおり、運輸部門におけるエネルギーの多様化、エネルギーセキュリティの強化であるが、まさに今、この普及の意義の原点に照らして天然ガス自動車を見つめなおすことが必要である。天然ガス自動車の普及は、国の強い政策誘導の下、自治体、自動車メーカ、自動車ユーザ、燃料供給事業者、ガス業界等の関係者が協力し合って進めていくことが必要である。

また、水素エンジンについては、異常燃焼の回避と急激燃焼の適切な制御方法の確立が求められており、筒内直接噴射式エンジンが期待される。

さらに、水素の有効利用の立場からは、低温改質触媒および高効率熱回収システムの開発に基づき、排熱利用を前提としたオンボード改質技術の実用化開発が望まれる。

水素を二次エネルギーの核とした社会については、図5の下部に示したような3段階の変遷を想定し、現在の技術開発から市場投入、市場拡大のフェーズを経て、2030年頃からの実用を目指している。ただし、導入普及期が5年前の見積もりから5年遅れており、あまり進んでいないことも事実である。これらは各技術の挑戦的目標に対して産官学の協働が最大限に発揮された場合、達成可能と見積もられたものであり、必ずしも導入見通しではない。しかし、エネルギー資源に乏しい我が国においては、有効なエネルギーキャリアである水素をいかに有効に活用できるかが、将来にわたる発展の鍵となろう。

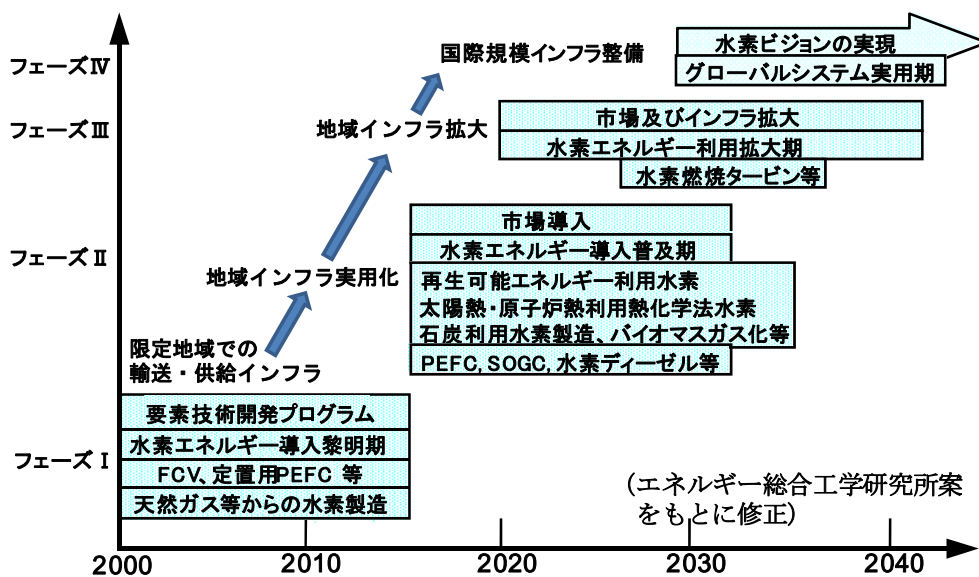


図5 水素社会実現までのロードマップの例

[ガス燃料エンジン部門委員会]