



液体水素搭載高温超電導モーター駆動 電気自動車への道

—液体水素配送タンクローリーの活用—

畑 良輔*・磯 嶋 茂 樹

The Road to Liquid Hydrogen Electric Vehicle Powered by High-Temperature Superconducting Motor – Utilizing Tank Trucks to Deliver LH₂ – — by Ryosuke Hata and Shigeki Isojima — The 21st century is “the era of energy, resource and environment.” In the near future, an increasing population and advanced civilization will urge us to rely on solar-derived new energy sources. More specifically, hydrogen (H₂) energy generated by photovoltaic power will assume an important role and start powering the blessings of modern civilization, vehicles. The H₂ energy will be delivered in liquid form by a tanker to H₂ stations, where the liquid hydrogen (LH₂) will be supplied to every automobile.

Meanwhile, high-temperature superconducting (HTS) materials and technologies have markedly developed. By utilizing its application technologies, such as Sumitomo Electric’s cutting-edge BSCCO, an ideal hybrid electric vehicle (HEV) will be practical. LH₂, which produces 20 K cool energy, can act as a coolant itself for an HTS motor and original cooling equipment will not be necessary any more.

Thus, LH₂ holds high potential for the realization of an energy-efficient environmental-friendly compact HEV and LH₂, besides high-pressure H₂ gas, should be developed for an HEV under a specific target.

Keywords: HTS HEV, sun-originated LH₂, LH₂ tank-truck, LH₂ station, LH₂ HTS HEV

1. 緒 言

自動車は近代文明が生み出した最高の利器の一つであり、今日人口の増加と発展途上国の活発な経済活動の下に、急速にその数を増やしてきている。一方、「エネルギー・資源・環境」の観点からは、燃料として用いる化石燃料の消費増加による資源枯渇の問題と、排気ガスとして放出する温暖化ガス（自動車が排出するCO₂は、総排出量の約1/4に相当）による環境悪化が急速に進展してきており^{(6)~(8)}、今日では殆どすべての自動車メーカーが、資源と環境に配慮して“電気モーターを活用したEV (Electric Vehicle) 又はHEV (Hybrid Electric Vehicle)”を開発・実用化してきている^{(4)、(9)}。その究極の姿が、水素 (H₂) を燃料とした「燃料電池 (Fuel Cell : FC) 電気自動車」又は「水素エンジン自動車」とされている^{(9)、(10)}。一方、ここの所急速に「高温超電導技術 (HTS : High Temperature Superconductivity)」が進展してきている^{(1)~(3)、(16)、(17)}が、電気抵抗が殆どゼロのHTS線材を巻回した電気モーターを用いれば、強力なトルクをコンパクトで省エネルギーの下に得ることが可能となり、移動体駆動用モーターとして最適であることが判明してきた^{(4)、(14)}。既に第一世代HTS線材 (DI-BSCCO®) を用いた、液体窒素 (Liquid or Liquefied Nitrogen : LN₂) 冷却HTSモーターが試作されて、船舶用途⁽⁵⁾あるいは自動車用途⁽¹¹⁾に試験されつつある。

HTS線材は、冷却温度を下げるとその許容通電電流 (I_c : Critical Current <臨界電流>) を大幅に増加させることが可能である⁽⁷⁾。既に液体窒素温度 (77K=-196℃)

で1本のHTS線材 (≒1mm²) 当りのI_c=200A級のDI-BSCCO®が開発されている^{(2)、(16)}が、このHTS線材を液体水素 (Liquid or Liquefied Hydrogen : LH₂) 温度 (20K=-253℃) で冷却すると、I_cはおおよそ6倍 (200A×6 > 1KA) に増加させることが可能となり⁽⁷⁾、「A・T (Ampere×Turn)」で決まる出力 (トルク) を、超コンパクト性を保ちつつ損失極小の下に高めることができるので、理想的に高いエネルギー効率のモーターが実現可能である。しかしながら、これまでは、HTSモーターをこのLN₂/LH₂温度まで冷却し、それを維持するシステムに課題が残っていた。

一方、水素資源を活用した「FC車」や「水素エンジン車」を普及させてゆくには、(ガソリンステーション又はスタンドに相当する水素供給の)「水素ステーション (スタンド)」インフラの整備が必須である。この分野で先行するEUや北米の現況を見ると、各地に点在する水素ステーションへの水素の補給は、ガソリンと同様、オフサイトで製造される水素を、「液体水素 (LH₂) タンクローリー」を用いて配送するシステムの実用性と実現性が最も高いものと考えられる。一方、持続的 (Sustainable) エネルギーとしての水素の発生を考えると、オフサイトで副産物として生産される水素、あるいは新エネルギー (主として太陽電池電力) を用いて集中的に生産される水素に依存せざるを得ない時代が遠からず到来する点が指摘されており^{(7)、(8)}、いずれにせよ水素ステーションには「LH₂が供給さ

れる」可能性が高いものとする。この「LH₂ステーションインフラ」と「HTSモーターのLH₂下での活用」を結合させると、「液体水素搭載高温超電導モーター駆動電気自動車 (LH₂ HTS HEV)」のコンセプトが浮び上がってくる。持続的エネルギー、すなわち太陽起源の水素を用いた、完全にクリーンでグリーンかつ省エネルギーでコンパクトな自動車と (液体) 水素ステーションは、未来の人類に対して、尚、利便的で必須の自動車をコアとする社会システムの維持を継続的に保証するものとする。

本論文では、LH₂ HTSモーターの高効率化に加えて、LH₂ステーションインフラ整備にスポットライトを当てて、日本の未来の水素自動車の開発に、「高圧常温水素ガス搭載車」だけではなく、「液体水素搭載車」も加えることによって、HTSという革新的技術との統合による、より理想に近い車社会の早期実現を促したい。

2. 自動車技術の変遷と未来展望

図1に、本論文で論じたい「自動車技術の変遷と未来展望 (究極の未来車への道)」を、その技術の必要な理由、及びそれをサポートする革新技術と併せて示す。20世紀に於ける人口増加、経済活動の進展と共に、ガソリン自動車の数は激増した。その結果、化石燃料の消費と地球温暖化ガス (CO₂) の排出も急増し、これらを改善する必要から、図2の通り、京都議定書が合意された⁽⁶⁾ 1997年 (12月10日) に、電気モーターとガソリンエンジンを複合したHEVが出現した。その後更に、エネルギー効率を上げてCO₂を排出しない電気モーター駆動車EVが開発されて、本年 (2009年) には型式認定車として上市される予定である。EVの特色は、低速大トルク発生と共に、自動車の制動 (ブレーキ) 時にモーターを発電機に変えて、エネルギー

を再生できることにある。一方、並行して電気抵抗ゼロのHTS技術も急伸してきており^{(1)~(3)}、銅線を用いた電気モーター (通電ロスによる発熱を強制水冷して使用) を、液体窒素 (LN₂で77K) 冷却下でHTS DI-BISCCO[®]に置き換えたHTSモーターが開発されて、図2の通り、京都議定書が発効した2005年 (2月16日) にまず船舶用HTSモーターとして試験された^{(4)、(5)、(11)}。HTSモーターのコンパクト性と高エネルギー効率性は、表1に示す通り、すべての移動体に共通して云えることであり、住友電工^(株)は、後述する通り、2008年の洞爺湖サミットに世界初の「HTS EV」を試作出展し試走させた。一方、21世紀に入ってから、益々化石燃料資源の (Peak-outから) 枯渇の問題とCO₂排出量増加による地球温暖化の問題が厳しくなってきた^{(6)~(8)}、先進各国政府及び自動車工業界は、クリーンでグリーンな最終エネルギー資源と目される、「H₂を用いたFC車あるいは水素 (エンジン) 車」の開発と実証試験を繰り返す様になってきた^{(9)、(10)、(15)、(19)}が、この時点では、自動車と水素ステーションインフラは、必ずしも統合して開発されている訳ではなく、むしろ各々独立して展開されているのが実情であると云える。特徴的なこととして、日本のFC車はすべて「高圧 (300~750気圧) 常温水素ガス搭載」を目標にしているのに対して、例えば独BMWの開発する水素 (エンジン) 車は「液体水素搭載型」である点である。又、欧米の水素ステーションは、「液体水素及び水素ガスの両方供給型」が多い⁽¹⁴⁾のに対して、日本ではFC車に合わせてすべて「水素ガス供給ステーション」になっていることである。LN₂冷却HTS EVは原則冷凍機を搭載する必要があり、これがかなりのハンディーになっている。しかしながら、もし自動車も水素ステーションもLH₂で統一されるとすれば、LH₂の温度が20K (-253℃) 故、HTS DI-BISCCO[®]線材のI_cは略6倍に増加

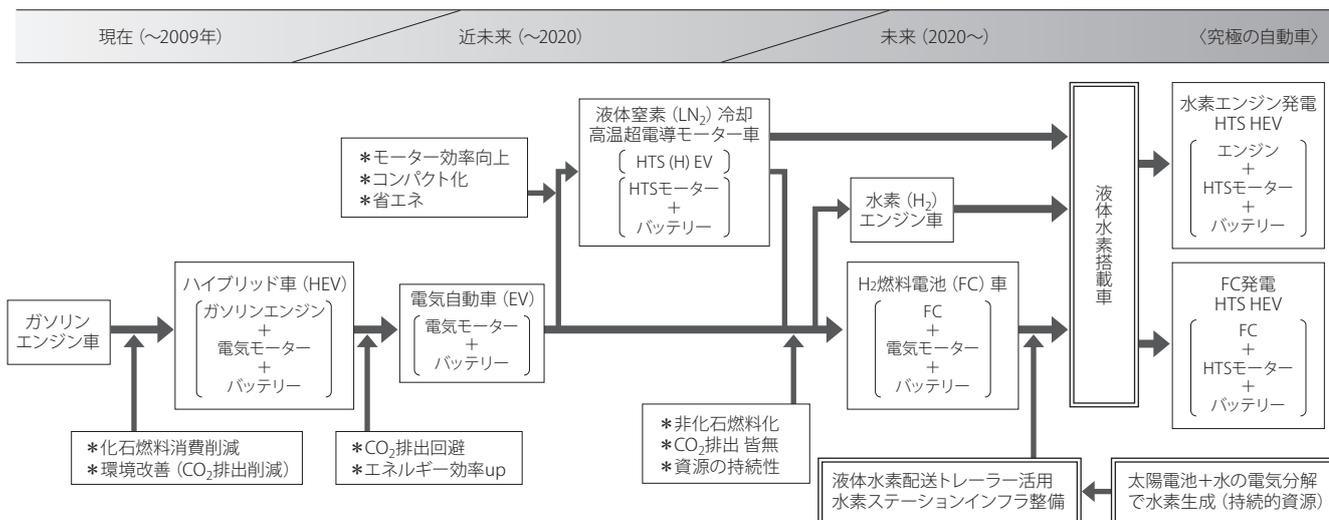


図1 自動車技術の変遷と未来展望 (究極の未来車への道)

表1 超電導機器のメリット

応用例	内 容	低 口 ス	小 型	軽 量	大 トル ク	高 磁 場	高 精 度	静 粛 性	保 守 性	安 定 性	総 合 経 済 性	備 考
MRI (医療用)	高磁場発生源	○	○	○		○			○	◎	○	高温超電導化で僻地でも利用可能に
NMR	超高磁場発生源	○				◎					○	高機能機種 (>1GHz)
ケーブル (交流、直流)	小さな直径で大電力、低ロス	◎	◎							○	◎	電力会社、米国政府プロジェクト、 自然エネルギーとの組合せ、鉄道
変圧器	新幹線用		○	◎								軽量化が至上課題
	電力用	◎	○								○	地下変電所向けなど
限流器	事故電流抑制	○								○	○	既設電力網に導入可能
SMES	磁場エネルギー貯蔵	○				◎						系統安定性
移動体	リニア新幹線		○	◎					◎	◎	◎	信頼性向上、総合経済性
	船舶用モーター	◎	◎	◎	◎			◎	◎	◎	◎	産学共同、400kW機開発
	航空機推進	○	○	◎				○			◎	米空軍
	自動車	◎	◎	◎	◎						◎	液体水素燃料にて効果大
容湯の固化制御	高磁場で対流抑制	○				◎				○		次世代大型単結晶炉、鉄鋼の生産
ロボットアーム	可動部分の軽量化、高精度化		○	○	◎		○					関節の先の方で有効
工作機器	大トルクのためギアレス・高精度化、保守性向上			○	○		◎		◎			超高精度製品を安定に製造するため
磁気分離	医薬品、廃水浄化	○				◎				○	○	製紙工場で実績積みつつある
風力発電機	ナセル構造の簡素化		○	◎	○			○			○	軽量・静音化

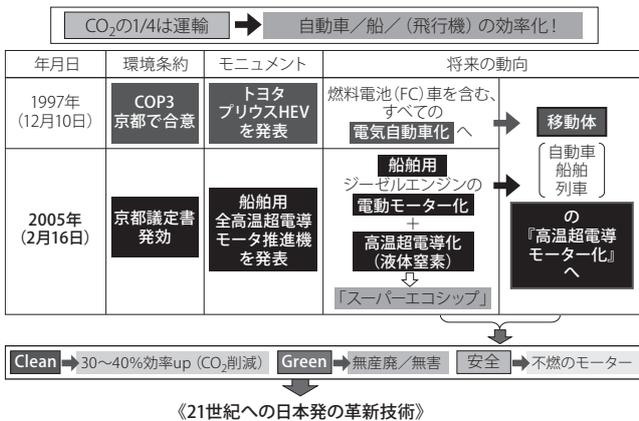


図2 全高温超電導モーターの歴史的意義

し⁽⁷⁾、LN₂冷却に比して、よりコンパクトで高効率のHTSモーターが達成されるのみならず、自動車に冷凍機を搭載する必要性が無くなる。つまり、燃料としてのLH₂の低温度をそのままHTS線材の冷却に併用すれば済むことになり、一気に前記ハンディを克服した冷凍機非搭載の“理想の車”が実現することになる。他方、太陽起源のエネルギーでH₂を得て、LH₂タンクローリーでLH₂を水素ステーションに配送すれば、自動車駆動エネルギー資源の持続性と、インフラとしての水素ステーション整備への道が拓かれることになる。従って、我国も図1に従って、欧米

に技術開発の先行を許すことなく、「(高圧H₂ガス搭載型FC EV)のみならずこれに加えて、「LH₂搭載型FC EV又はH₂エンジンHEV」も開発のテーマとすべきことを強く主張したい。

3. 高温超電導技術開発の歴史と現況

1986年に発見された高温超電導現象は、その後様々のHTS材料の発見につながったが、今日、商用ベースで実用化されているのは、1988年に日本で発見されたセラミックス材料からなる“第一世代のBSCCO”を商用化した住友電工(株)製のDI-BISCCO®のみである^{(1)、(2)、(7)}。但し、目下、1987年に米国で発見された“第二世代のYBCO”について、日米両国で開発・商用化競争が繰り広げられており、これに成功した暁には、第一世代のBSCCOに比して、より高性能で安価なHTS線材が供給される見込みである。高温超電導の“高温”の意味は、空中に無尽蔵に存在し、抽出・液化の容易な、従って安価(ミネラルウォーターが約100円/ℓに対してLN₂は略50円/ℓ)で無害、かつ絶縁特性に優れた窒素(N₂)ガスを77Kで液化して冷媒として用いた時、材料が超電導となる場合を表わしており、Tc(超電導臨界温度)が77K以上を示す。一方、これらHTS材料は、過冷却すると許容臨界電流(Ic)が増加してゆることが知られている。この冷媒温度とIcの関係をまとめると、図3の通りとなる。LN₂は入手し易く冷却し易い点で

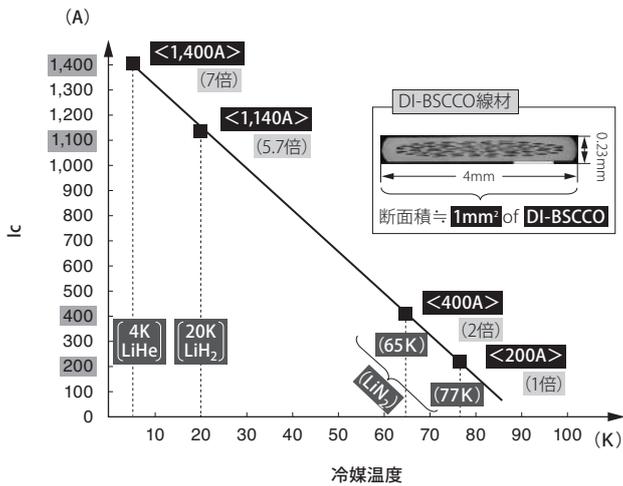


図3 高温超電導線 (BSCCO) の冷媒温度と臨界電流 (Ic) の関係

POD推進装置の構造

■第1次試作モーター諸元		■二重反転モーター諸元	
冷却方法	液体窒素循環冷却	冷却方法	液体窒素循環冷却
超電導線	DI-BSCCO	超電導線	DI-BSCCO
出力	12.5kW (過負荷62.5kW)	出力	365kW
回転数	100rpm	回転数	250rpm
サイズ	0.6m×0.6m	サイズ (直径×長さ)	1.2m-0.8m
ポットサイズ	0.8m×2m	重量	4.4ton

図4 船舶推進用超電導モーター

は優れた冷媒であるが、燃料資源とはならない。これに対してLH₂は、冷却するのは容易とはいえないが、一度液化すると冷媒温度が20Kとなり、HTS線材のIcをLN₂より5.7倍大きくとれること⁽⁷⁾と、LH₂それ自身がグリーンかつグリーンで良好なエネルギー資源となる点は、何物にも代え難いメリットとなる。超電導とは、電気抵抗がゼロになることであり、産業应用上は、その高電流・高磁界かつ超低損失 (省エネ) の特性が利用される。その適用候補は、表1に示されているが、その一つ一つが実現されてゆけば、周辺技術の進歩と共にHTS線材の量産化が進み、自ずとその応用分野は拡大するものとする^{(3)、(16)、(17)}。HTSの応用は、大電流通電・低損失性より、まず電力ケーブル (HTS AC Cable) で先行し、米国ニューヨーク州都Albany市では、2006年7月に世界で初めて約7万世帯に商用電力を送電するまでに至った⁽¹³⁾。日本でも現在東京電力(株)の旭変電所に実証試験線を建設する計画が進められている。

少なくとも、「エネルギー・資源・環境の世紀」、「水素の時代」、「直流の時代」と云われるこの21世紀の革新技術をリードする重要な素材がHTS線材であり、この応用技術開発で世界をリードしてゆくことは、日本にとっても非常に重要であるとする。現在までの所、DI-BSCCO[®]ではIcで略200A超、線長で1~2kmを達成している。

4. HTSモーターの開発

比較的低速回転で大出力を必要とし、駆動装置の負荷率 (使用される割合) も高い船舶が、国交省のスーパーエコシップ (電気モーター駆動2重反転プロペラ推進システム) 政策もあり、又機器類の据えつけスペースが十分あると共に、駆動システムのコンパクト性が経済性に大きく効いてくることもあって、HTSモーターの適用第一候補となった^{(4)、(5)、(11)}。図4に試作されたHTS船舶推進電気モーターと、その適用

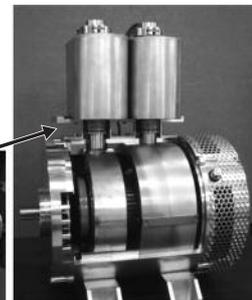
表2 車両への高温超電導モーターを適用した場合のメリット

超電導モーターの特徴		輸送機械への適用メリット
エンジンに比べて優位な点	静粛 (騒音・振動)	早朝・深夜の配送 宅急便・コンビニなど近隣対策
	高効率	CO ₂ 排出量削減
常電導モーターに比べて優位な点	低速域で大トルク	変速機不要 (ダイレクトドライブ) POD推進型 (船外機)
	小型化	車両の小型軽量化→低燃費 客室、荷室のスペースに余裕



■超電導自動車諸元

冷却方法	液体窒素浸漬冷却
超電導線	DI-BSCCO [®]
最高出力	31kW (3,100rpm)
最高トルク	120Nm (1,500rpm)
最高速度	85km/h
バッテリー	144V, 60Ah
走行可能距離 (30km/h一定)	60km



自動車用超電導モーター

図5 世界初の高温超電導モーター駆動自動車 (HTS EV)

最終形態と考えられる「POD型推進装置」の構造を示す⁽¹⁶⁾。米国でも、海軍が全艦艇の電気モーター推進化政策を示す中、駆逐艦用36.5MW級のHTSモーターが試作されている。表1の適用一覧の中で、HTSモーターのコンパクト・省エネ性の活用の第二候補として、EV用モーターのHTS化が採り上げられた⁽¹¹⁾。車両にHTSモーターを適用した場合の一般的なメリットを取り纏めると、表2の通りとなる。このFeasibilityを確認するために、住友電工(株)では、2008年6月の洞爺湖サミット記念環境総合展に出展することを目標にして、図5のHTS EVを試作し試走に成功している。このケースでは、冷凍機は搭載せずに、LN₂をモーター部分に直接注入してHTSモーターを冷却し、そのLN₂が気化し終えるまでの数時間走行が可能となる“HTS直流モーター”を採用した。この試作・試走によりHTS EVは十分にFeasibleであることが判明した^{(11)、(16)}。

5. 高温超電導モーター車のメリットと課題

現在考えられている電気モーターを活用する車種は、EV、HEV、FC HEV、PHEV (Plug-in-HEV) である。いずれのモーターもそれ自体HTS化の対象となる。銅線を巻回してなる常電導モーター車とHTSモーター車を、その基本的構成部分で比較し、そのHTS化のメリットを記すと、図6の通りとなる。但し、H₂ガスを燃料として、FCではなくロータリー・エンジンで発電機を回し、得られた電力でモーターを駆動するHEVは、日本のマツダ(株)が既にリース販売を開始しており、1回の給水素で約200kmの走行距離を有していることが発表されている⁽²¹⁾。図6より、HTS EVのメリットと課題を列記すると以下の様になる。

- (1) 常電導モーターの性能向上のためには、モーターをコンパクト化し大トルクを得るために、その回転数を例えば10,000rpm以上に上げることであるが、モーター回転数は結局の所印加電圧に比例するので、モーター電圧を高くする必要がある。現在までの所、HEVで約500Vまで昇圧されているが、こうすると1~3V

内外の車載・バッテリー（電池）を非常に多く“直列接続”する必要がある。二次電池の場合、その充放電範囲を適性に保つことが寿命に大きく響いてくるが、多段直列の場合はそれらを均等に充放電する管理が難しくなってきた、いわゆる「パワーマネジメントシステム」が必要となる。それでも現在のHEVは、144~288Vまでのバッテリー直列接続電圧からモーター印加高電圧を得るために、モーターと直列電池間に、図6の通り、「昇圧コンバーター」を挿入する必要がある。従って、

- (イ) 多段直列の二次電池が必要となる。
 (ロ) 昇圧コンバーターが必要となる。
 (ハ) パワー半導体を多用する必要がある、これらは強制水冷される必要がある。
 (ニ) モーター自身も強制水冷される必要がある。

等のシステム上の問題が指摘される。これを図6の通りにHTSモーター化すると、HTS線材では大電流・低損失通電が可能なることから、トルクを生ずるモーターの「A・T (Ampere × Turn)」の電流 (A) を大きくとれるので、巻回HTSコイルのターン数 (T) を小さくすることができる。従って、必要なモーターへの印加電圧を大きく下げることが可能となる。LN₂冷却のHTSモーターでは数10V以下で十分であるので、まず二次電池を1個当りで大容量化して、均等作動管理の容易な並列使用メインに代替させることができる。又、昇圧コンバーターも不要となるばかりか、パワー半導体自身及び周辺機器も高電圧化対応しなくて済ませることが可能となる。

- (2) 前記(1)で述べたが、多用されるパワー半導体は、強制水冷効率を上げてコンパクト化する(数を減らす)ためにも、現在はSi系パワー半導体を許容温度のほぼ上限(100℃超)で使用しなくてはならない。所がHTS EVでは、LN₂で77K、LH₂で20Kの冷媒が活用できるので、この低温度までの範囲でパワー半導体を

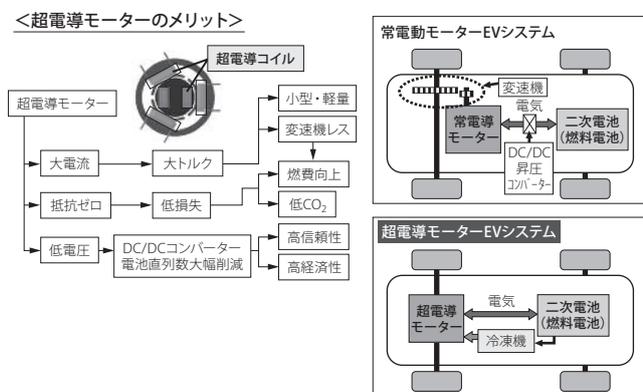


図6 超電導モーターの車両への適用

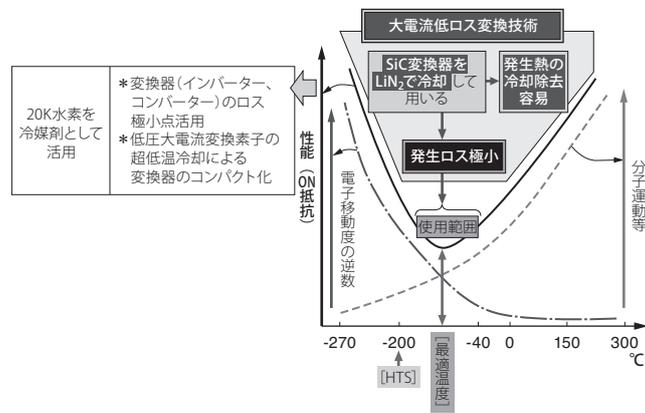


図7 パワー半導体のON抵抗と冷却温度の関係

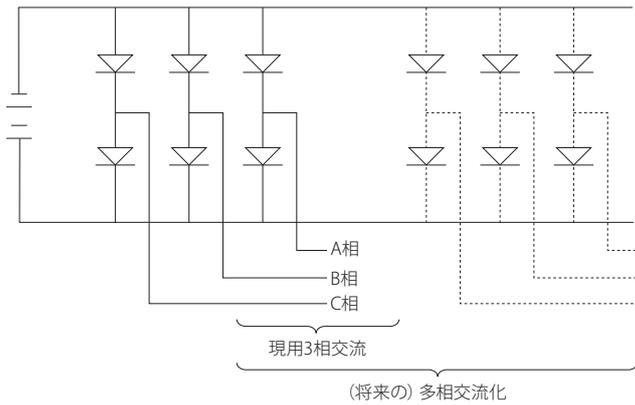


図8 多相交流の活用

冷媒冷却することができる。パワー半導体のロスを決める「ON抵抗」は、図7に示す温度依存性から、まず現用の高温使用より大きく低下させ得る。絶対零度では電子の移動が無くなる（ON抵抗無限大に相当）ので、明らかにマイナス冷却温度のある点が最適温度（ON抵抗最小）になる筈である⁽⁷⁾。住友電工(株)の予備調査では $-40 \sim -50^{\circ}\text{C}$ 位に最小点がありそうなデータも出ているが、参考文献⁽¹⁸⁾によれば、Si MOSFETで、 $40 \sim 80\text{K}$ ($-233 \sim -193^{\circ}\text{C}$) に最小点がありそうなこと、及び LN_2 (77K) では常温に比してON抵抗を約1/7に下げられるとのデータが示されている。この様にHTS用冷媒冷却法をパワー半導体に適用すれば、

- (イ) ロス発生そのものを大きく下げられる。
- (ロ) 大電流通電時の発熱も冷却処理できるので、パワー半導体1個当りの処理能力を大幅に上げられる（コンパクト&シンプル化）。
- (ハ) LN_2 は良好な絶縁液体（ LH_2 も同じく絶縁液体）なので、（低温 N_2 及び H_2 ガスと共に）直接パワー半導体を冷却することが可能となる。

のメリットが得られることになる。

又、パワー半導体にかかる電圧も、(1)の(二)で述べた様に、低くなるので、半導体自身も製造し易くなり、恐らくHTS用冷媒冷却大容量パワー半導体は、それに適した専用設計のものが新たに開発されるものと期待される。又、必要パワーに対して、パワー半導体1個で処理すべき電流を極端に大きくしない手段の一つとしては、交流用モーターに対しては、図8に示す様に、多相モーターの採用があげられる。現用の3相平衡交流ではなくて“4、5、6・相平衡交流化”を試みれば、一つのパワー半導体の必要容量を小さくでき、又、HTSコイルの“均流化”もより実現し易くなることが考えられる。（あるいは逆に、HTSモーターのパワーアップの一つの手段にもなり得るものと考える。）

(3) 現用EVの常電導モーターを小型コンパクト化するには、逆に必ずモーターを高速回転しなければ必要なトルクが得られない。従って車を必要速度とトルクで駆動するには、「変速機」が必須となる。変速機自体かなり大型で複雑な機器であるばかりか、変速時には無視できない量（8～10%）のロスを生じる。これをHTS化すると、そもそもHTSモーターの[A・T]が大きく、低速で大トルクが効率よく得られるので、図6に示す様に、変速機を不要にすることが可能となり、大きなメリットを引き出すことができる。このコンセプトは、図5の洞爺湖サミット用試作HTS EVで採用されている。

(4) H_2 を燃料とするFC車の場合、1セル当りの発電電圧は約0.8V程度が実力である。この場合、常電導モーター印加電圧を得るためには、数百セルの直列使用が必要となる。例えば“GM Hydrogen 4”では、440段のFCスタックを搭載している（0.8V/セルとして略350V）が、FCの場合にもこの様な多段シリーズ（直列）活用には、その運用と信頼性と寿命とメンテナンスの面で高度の技術と厳しい管理が要求される⁽¹⁵⁾。これがHTSモーターで、もし LH_2 (20K) 運用可能となると、モーター駆動に必要な印加電圧を低く抑えることが可能となる。二次電池にせよ、FCにせよ、多数段のシリーズ接続に比して少数段シリーズ接続の並列活用の方が、はるかにその運用が容易になるばかりか、並列使用に適した大容量化（電極の面積化等）については、技術的対応がむしろ容易になるものと考えられるので、経済性の高い二次電池やFCのユニットをEV専用開発・製造できる可能性が出てくるものと考えられる。これはEVにとって、大きな魅力になるものと考えられる。

(5) 常電導モーターの場合、磁性体の上に銅導線が巻回されてコイルが形成されるが、磁性体には磁気飽和現象があり、いくら通電電流を増やしてもある量以上に大きなトルクが得られない限界が存在する。又、モーターの高速回転と変速機で低速・高トルクを得る手段にも、自ずと限界を生ずる。一方、HTSモーターの場合は、磁性体を用いない空心形コイルでも「A・T」のA（通電電流）を大きくとれるので、この様な“大トルクを得る”ための限界は理論上無いことになる。仮に実使用上限界があったとしても、その限界は常電導モーターに比して遙かに高いと考えられるので、車載型大トルクモーターを実現することが可能となる。

(6) 以上(1)～(5)では、常電導モーターに対してHTSモーターが優れている可能性について述べたが、HTSモーター搭載EVの最大の課題は、HTS状態を生ずる低温をEVの中でどう生成し維持するかにある。HTSモーターの場合、冷媒は断熱した閉鎖（closed）システムで用いられるが、モーター自身の発熱（特にAC

表3 HTS EVでの低温生成・維持方法

冷凍機搭載	冷凍機非搭載
EVの中に冷凍機を設置し、バッテリー電力で常時(但し間欠的に)運転	カートリッジに入れた液体冷媒を必要時取り替え(又は冷媒をガソリン並に必要時注入)
すべての車種に対応可能	*バス *宅配搬送車(宅急便) *建機、フォークリフト *長距離トラック
当面	*稼働率が高く *始動大トルクが必要な車がHTS EVに適する

モーターの場合)と外部からの侵入熱により冷媒温度は徐々に昇温してゆくの、間欠的にはあっても、いずれにせよわずかつづ冷媒を再冷却することが必要となってくる。表3は、“冷凍機搭載EV”と“非搭載EV”について取り纏めて比較したものである。液体冷媒(LN₂/LH₂)を必要時外部から再注入する“冷凍機非搭載”型も、例えば、運転基地を持つバスや使用場所と時間が限定される建機やフォークリフト等では、極めて簡便で容易な手段として捨てきれないものがある。一方、冷凍機搭載型は、HTS EV一般に適用可能であるが、車の使用状況にかかわらず(従って停車中でも)常時(間欠的に)冷凍機を動かしていなければならない点は、車のエネルギー効率を考える場合課題となる。従って、特に実用化が早いと考えられるLN₂冷媒活用のHTS EVのケースでは、表2又は表3に示す通り、当面“稼働率が高く”、“変速頻度が大きく”、“始動大トルクの必要”な車種から実用化されてゆくものと考えられる。具体的には、バス、宅急便、建機、フォークリフト、長距離トラック等が対象になり、その後自家用車等の汎用化に入るものと考えられる。(冷凍機搭載型HTSバスを、常電導モーター搭載のHEV及びEV型バスと比較した一例では、HTSバスの走行エネルギー効率の方が、各々約25%と13%良いとの検討結果も出されている。しかしながらHTS EVの効果の検討はこれからの課題である。)

6. 液体水素冷却HTSモーター(究極の未来車)

第1~2章では、「エネルギー・資源・環境」面より、水素をエネルギー源とする車が未来車として生き残るとの見解が一般的であることを述べた。

一方、第5章の(6)では、HTS EVにとって車載冷凍機が大きな課題になることを指摘した。この課題を克服する最高の手段が、「冷媒と燃料を兼ねるLH₂を搭載したHTS EV」を実現することである。もし長期的保存に耐えうる車載LH₂貯蔵タンクに蓄えられたLH₂の冷熱をHTSの冷却に用いるとすれば、車載冷凍機は不要になり、かつ20Kの低温とI_c≒6倍のHTSメリットが同時に得られることに

なる。LH₂搭載のEVとしては、図9の2形態が考えられる。国内では(A)のLH₂ FCの試作例は無いが、海外では例えばGMが試作した例がある⁽¹⁹⁾。(B)のLH₂シリーズHEV(燃料で発電機駆動エンジンのみを動作させるハイブリッド電気自動車)は、未だ試作された例が無い。しかしながら、図10に示す通り、BMWが既に“LH₂搭載水素(エンジン)自動車”を開発し、その試作車はミュンヘンをはじめ各地でこれまでに150万km超の試走を行っている。BMW Hydrogen 7はBMWのホームページ情報によれば、水素貯蔵タンクの高圧化を可能にすることによって、“Boil-off(LH₂の気化流出)”の課題を克服すると共に、同一タンクで“液体水素/高圧水素ガス”の両方を搭載可能にしている。図10の通り、LH₂/ガソリン両タンクを用いると、現試作車で400マイル(640km)以上走行させることができるが、LH₂のみでは125マイル(200km)走行となっている。但し、現在試作中の10kg LH₂貯蔵タンクでは、350マイル(560km)超の走行が可能になることを示している。(燃料車載時の影響は“重量”になるが、水

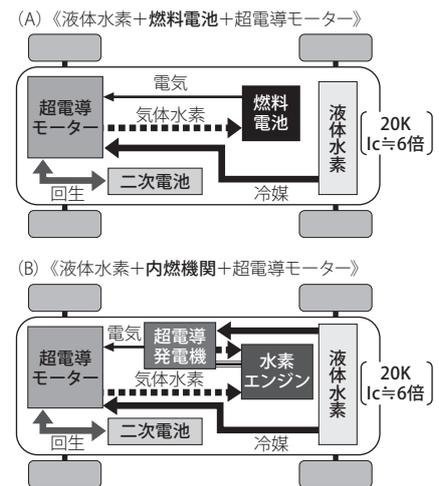


図9 液体水素冷却HTS EV



(出典:山根 健, BMW Japan Corp. ゼロエミッションシンポジウム2007)

図10 BMW Hydrogen 7.車両概要

素は最も軽い分子であるので、LH₂に関する“燃料のエネルギー重量密度”は、ガソリン比2.7となる。一方、エンジンでの燃焼は、LH₂をガス化して行われるので“エネルギー容積密度”が重要になるが、H₂ガスはガソリン比1/4となる。水素を自動車に用いる場合、この両効率を勘案して設計される。)BMWのLH₂搭載水素エンジン車の存在は、**図9**の(B)に示した「LH₂搭載水素エンジン・HTSシリーズHEV」のコンセプト実現に対して、有力な技術ステップになるものと考えられる。

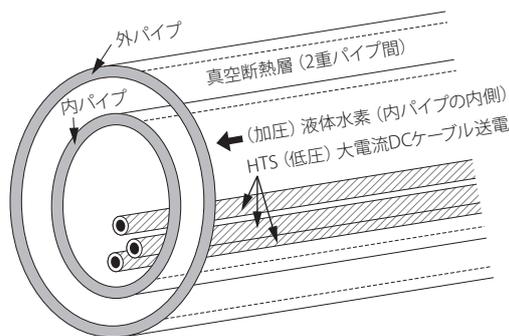


図13 液体水素移送用パイプ内HTS DCケーブル送電複合システム

7. 液体水素の生成と移送と“水素ステーション”

第1～2章で、現在の自動車の燃料となっている化石エネルギー資源がPeak-outし、枯渇してゆくことに触れたが、それを分かり易く示したのが**図11**である。同図は長期的視野に立てば、人類は太陽起源の新エネルギーの有効活

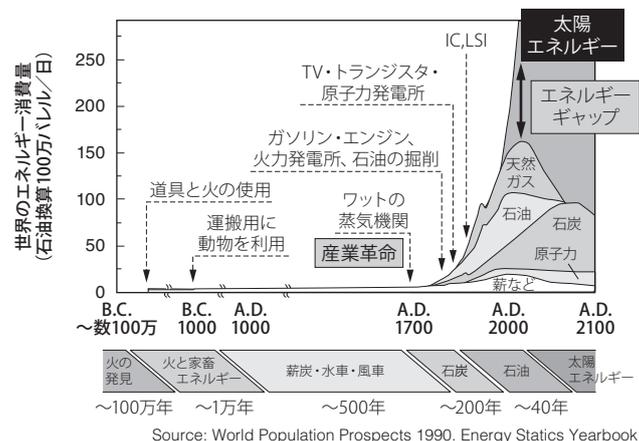


図11 人類のエネルギー消費の歴史

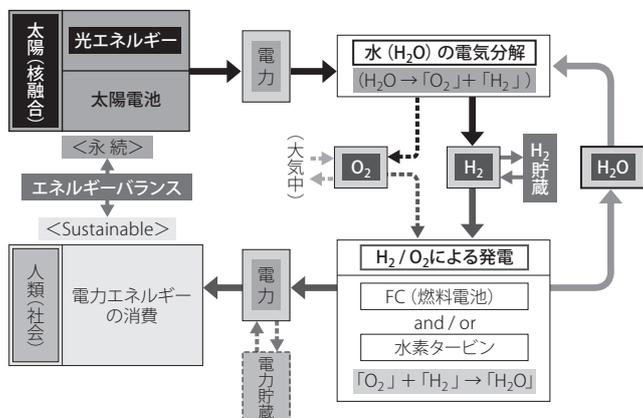


図12 太陽エネルギーの獲得と水(H₂O)の循環—永続的なエネルギーのバランス—

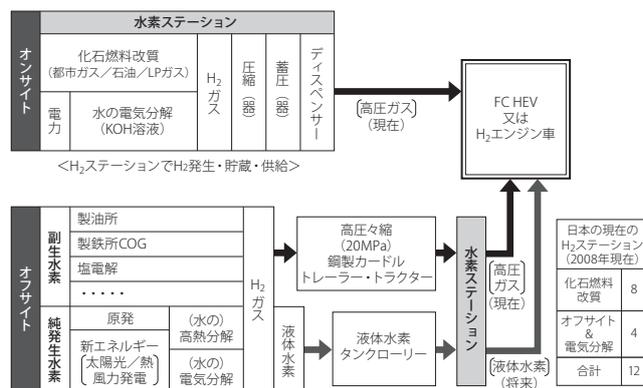


図14 水素ステーションへの“水素供給元”について

用に向わざるを得ないことを示している^{(7),(8)}。

図12は、太陽電池をメインとしてH₂を生成し貯蔵して、再度そのH₂を使って電力を取り出す仕組みを示したもので、太陽起源のエネルギー資源を実際の量で“貯蔵しつつ活用する”ことを考えた場合、最も有力な手段の一つと考えられるものである⁽⁸⁾。主として太陽電池発電と貯蔵が展開される砂漠地帯から、この2つのエネルギー資源（LH₂と電力）を消費地に移送させる手段としては、**図13**に示した様な、内部に高温超電導直流ケーブル（HTS DC Cable）を複合させた“LH₂移送パイプ”の布設が検討されている⁽¹⁰⁾。（この“送LH₂パイプ”の内部温度は20K以下となるので、HTS DCケーブルは、低電圧でも大電流が送電できることになる。）この構想が展開されると、HTS EVが走る消費地の『水素ステーション（又は水素スタンド）』では、太陽起源のSustainableでCleanかつGreenな水素と電力が自動車に供給できるようになる。水素ステーションの現状を取り纏めると、**図14**の通りとなる^{(10),(19)}。オンサイト（水素ステーション）で、化石燃料を改質してH₂を得る方法は、エネルギー資源のSustainabilityの観点からは本質的な解決策とはならない。ここではオフサイトで製造したH₂、中でも前記の通り、太陽起源のH₂を搬送

して各地の水素ステーションに供給するシステムが、より実際的でかつSustainableなものになるものとする。先行する欧米では現在およそ60づつ水素ステーションが存在、又は建設(計画)中であり、LH₂と高圧ガスH₂の両方を供給できる体制をとっているケースが多い。又、LH₂発生工場も米国では約10カ所、EUでは各国に1~2カ所存在する。ここで、LH₂と高圧ガス水素を比較すると、表4の通りとなる。この中で、将来各地に多数設置されるであろう水素ステーションへの水素の配送を考えると、欧米の先例から判断しても、現在のガソリンのタンクローリー配送と同じく、「LH₂のタンクローリー配送」の方が優れており、かつ実際的であるとする。仮に、「H₂の配送(インフラ)は、LH₂タンクローリーになる」とすれば、各水素ステーションでの水素の保管も、LH₂の方が容積的にも好ましくなる。とすれば、その後、図14のオンサイトの図に示す様に、水素ステーションでエネルギーを消費して、水素を気化させかつ高圧化することは、エネルギー的にもステーション現場での操作性や運用性からも、好ましいものとは考えられなくなってくる。以上の議論をベースにして、「水素(&電力)の発生・貯蔵・移送と『水素ステーション』」の関係を取り纏めると、図15の通りとなる。図15では、水素ステーションで、水素と電力の両方を自動車に供給する形を示している。又、一応“高圧ガスH₂”も供給可能な図になっているが、LH₂のまま水素ステーションで一時保管後、LH₂のまま自動車に供給する形の方が、より好ましいものとする。この様に、エネルギー資源の発

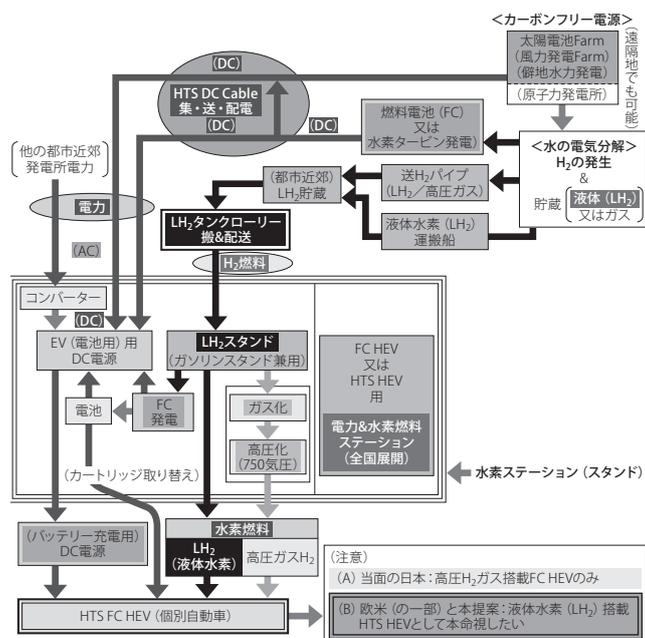


図15 水素 (& 電力) の発生・貯蔵・移送と『水素ステーション』

生(オフサイト僻地)から末端活用までを一貫して考えた場合、将来の自動車はLH₂を供給するのが最適であるとする。この場合は、LH₂の冷熱が活用可能になるので、電気モーターは20Kの大電流通電可能なHTS化が可能となり、しかもHTS(H)EVで最大の課題であった、車への冷凍機搭載も不要にすることができることになる。H₂を使った車内での電力発電は、FCと水素エンジン発電機の2ケースが考えられるが、FCには白金触媒を不要にする等の更に革新的技術開発が要求されるのに対して、水素エンジンは既に汎用化された技術に属するものと云える。一方、水素エンジンそのものを駆動力として走る水素車では、発電機(=モーター)が無いので、車の制動(ブレーキ)時の回生エネルギーの活用ができず、やはりエネルギー効率的には一段劣るものとなる。従って、ここではH₂配送インフラの観点からLH₂がベストであり、LH₂をH₂スタンドから供給されて搭載する車では、『LH₂搭載HTS HEV』が理想的な技術になることを指摘しておきたい。従って日本においても「高圧H₂ガス搭載型FC HEV(ここでのHは、「燃料電池(FC)と二次電池」のHybridを意味する。)」に加えて、「LH₂搭載HTS HEV(FCに加えてH₂エンジン発電も含む)」の検討・研究・開発・実用化を図ってゆくべきとする。

8. 結 言

図16に本論文のエッセンスを示し、その中で、現状の自動車から将来あるべき理想の車としての「液体水素(LH₂)搭載HTS HEV(FC又は水素エンジン発電)」へ至る道筋

表4 液体水素(LH₂)と(高圧)水素ガスの比較

項 目		液体水素(LH ₂)	(高圧)水素ガス
設 備	冷凍機	必要	不要
	高圧化ポンプ	不要	必要
	高圧貯蔵タンク	不要	必要
	冷凍貯蔵タンク	必要	不要
利 便 性	貯蔵密度	○(大)	△(小)
	H ₂ 燃料のステーションへの配送	◎	×
	ステーションでの貯蔵保管の容易性・安全性	○	△
	車搭載の容易性	?	?
	搭載量と走行距離	○	△
	車での危険性(事故時等)	○	△(?) 〔超)高圧 ガスボンベ搭載〕
機 能 性	高温超電導(HTS)適用の有利性	◎ 〔臨界電流(Ic)は LN ₂ の約6倍〕	×
	非HTS	BMWの水素車	日本(トヨタ、ホンダ)のFC(H)EV
実 績	HTS	(参考) 住友電工(株)試作車 LN ₂ HTS EV	—

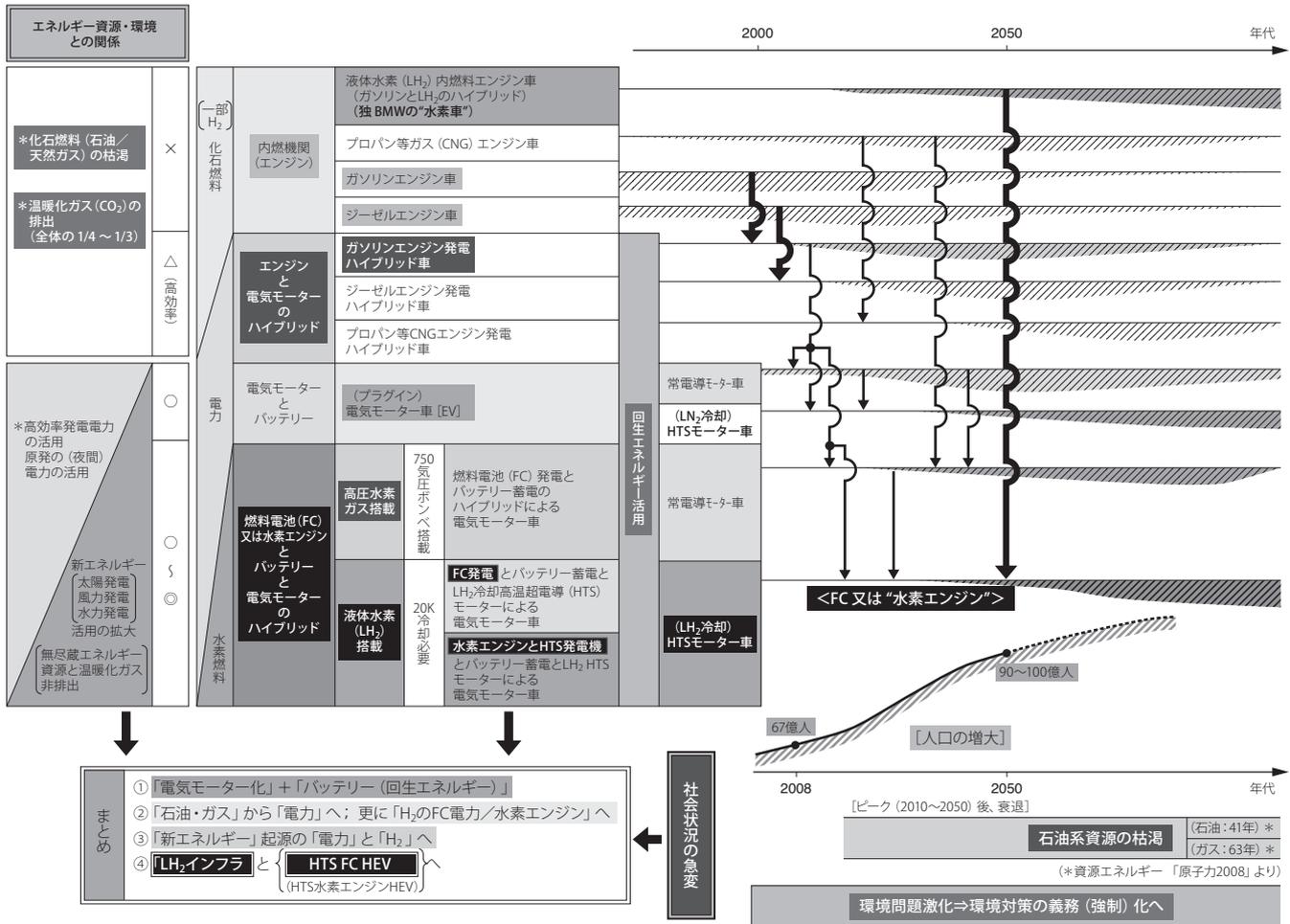


図16 液体水素搭載高温超電導モーター駆動電気自動車(HTS FC HEV又は水素エンジン・シリーズ・HEV)への道(Road-map)

をまとめて示す。近代文明の最大の利器の一つとして、自動車の数とその役割は、人口が増え文明が進展する今世紀以降も益々大きくなってゆくものと考えられる。その時、エネルギー資源と環境の観点から、太陽起源のSustainableでCleanかつGreenな水素資源が、自動車燃料の主流に置き換わってゆくことは必然と考える。水素の発生から末端の水素ステーション(スタンド)までのインフラを一貫して考えた時、高圧H₂ガスよりLH₂の方が実際の(現実的)になってくるのは明瞭である。一方、内燃機関(エンジン)のみからなる車と、再生エネルギーが使用可能なEV(又はHEV)を比較すると、(H)EVの方がエネルギー効率の観点から有利な状況は将来も不変であると考えられる。この二つの流れに、近年目覚ましい技術発展を遂げつつある高温超電導(HTS)の技術を組合せると、車載冷凍機不要のまま、EVにとっては“理想的な「HTSモーター、バッテリー及び変換器」の統合システム”が、『LH₂搭載HTS HEV』という具体的な形で展開可能になってくる。これら(日本発の)革新的な技術をベースにした“未来車”を実現するために、現在日本では「高圧H₂ガス」のみしか検討の対

象になっていない事実を改めて、(それに加えて)「LH₂」も対象にする開発基本方針を確立することが、何にも益して重要であることを指摘しておきたい。

参考文献

- (1) 加藤他、「革新的ビスマス系高温超電導線(DI-BSCCO®)の開発」、SEIテクニカルレビュー第168号(2006年3月)
- (2) 綾井、畑他、「臨界電流200A級高温超電導線の開発」、SEIテクニカルレビュー第169号(2006年7月)
- (3) 「20年の時を経て高温超電導線が現実に—ビスマス系線材の実用化迫る—」、日経エレクトロニクス(2005年2月28日)
- (4) 岡崎、「移動体の超電導駆動による高効率化検討」、SEIテクニカルレビュー第168号(2006年3月)
- (5) 岡崎他、「電気推進船用超電導コイルの開発」、SEIテクニカルレビュー第167号(2005年9月)
- (6) 畑、「『京都議定書』と北東アジアエネルギー・資源・環境・経済圏—国際連系直流送電システムの検討—」、SEIテクニカルレビュー第167号(2005年9月)
- (7) 畑、「GENESIS計画と高温超電導直流ケーブル—究極の持続可能な『新エネルギー』の活用について—」、SEIテクニカルレビュー第172号(2008年1月)

- (8) 畑、「GENESIS計画と持続可能なエネルギーの活用」、OHM Vol.96 No.1 (2009年1月)
- (9) 山根、「BMWの水素自動車プロジェクト」、ゼロエミッションシンポジウム2007 (2007年11月28日)
- (10) 山地、「水素エネルギー社会」、エネルギー資源学会発 (2008年5月26日)
- (11) 尾山他、「超電導電気自動車の開発」、SEIテクニカルレビュー第173号 (2008年7月)
- (12) 杉本他、「高温超電導電動機の試作」、電気学会全国大会 (2005年3月17日)
- (13) 湯村、畑他、「長尺三心一括型高温超電導ケーブルによる世界初の実線路建設と商用運転 (Albany プロジェクト)」, SEIテクニカルレビュー第170号 (2007年1月)
- (14) 「ハイブリッド・電気自動車のすべて2007」、日経BP社
- (15) 「燃料電池車・電気自動車の可能性」、グランプリ出版
- (16) 「超電導！ 電気抵抗ゼロの世界へようこそ!!」、住友電工製高温超電導パンフレット (2009年3月)
- (17) 北澤、「超伝導技術の未来 ～超伝導ネットワーク～」, Journal of the Cryogenic Association of Japan (2007)
- (18) 根本、渡辺、菊川、「高温超電導線を添えてオンの抵抗を小さくした並列接続MOSFET」、第79回 2008年度秋季低温工学・超電導部会、加速器/周辺技術 (2) 3B-a05 (2008年)
- (19) 「燃料電池車の開発最前線」、OHM (2009年1月号)
- (20) P. M. Grant, "The Super Cable: Dual Delivery of Chemical and Electric Power", IEEE Trans. Appl. Super.15, 1810 (2005)
- (21) 「マツダ水素HEVリース販売開始」、朝日新聞朝刊 (2009年5月27日)
- (その他、ここに記さない資料としては、関係各機関、あるいはメーカーのホームページからの資料を用いた。)

執筆者

畑 良輔* : 元 常務執行役員 博士 (工学)
エネルギー・資源・環境分野の
研究・開発に従事



磯嶋 茂樹 : 材料技術研究開発本部 技師長
兼 電力・エネルギー研究所 所長

*主執筆者