

# 特別寄稿 地球環境保全を目指して

## – 長期的な低炭素社会実現のための次世代自動車技術 –\*

### Toward Global Environmental Preservation

#### –Next-generation automotive technology to realize a low carbon society in the long term–

石谷 久  
Hisashi ISHITANI

#### 1. はじめに

世界の環境問題を考えるとき、我々日本人はまず反射的に地球温暖化問題とこれに対応するための低炭素社会の実現が念頭に浮かぶが、世界全体では所得格差の拡大や取り残された最貧国の増加、これらの地域の劣悪な衛生問題、健康、医療の窮状、更にこれがもたらす各種環境破壊などより深刻な課題も多い。幸い日本ではこれらの問題はさほど深刻ではないが、同様に大きな課題として世界的な水不足、水質劣化も深刻であり、その造水のためのエネルギー消費増加の懸念も深まっている。こういった環境問題や現在の格差拡大は現存技術のみでは解決困難で革新的な技術開発が不可欠であるが、地域固有の問題も多く、我が国だけの R&D では解決は困難である。国際的な視野による研究開発、あるいは研究協力が必要な部分も多い。他方、日本は従来からものづくりの技術が優れているといわれているが、特に製造技術に卓越した能力を発揮、その製品品質、信頼性など同じ原理の製造プロセスを稼働させても不断の改善とオペレーションに優れた能力を発揮、結果として製品の機能・性能ばかりでなくその品質を格段に上げてきたことも周知のことである。この中で我が国はエネルギー環境技術、特に省エネ、新エネなど地球環境対策技術開発にも率先して取り組んできたが、その重要な一分野である、道路交通の CO<sub>2</sub> 削減をテーマに問題の背景と開発経緯、並びにその実現への課題と対応策を示す。

なお水問題に関して、我が国は豊富な降水量に恵まれ、また河川の延長も短かく基本的に水質も優れていて世界的な水問題とは縁が少なく高度な水供給システムを構築する必要も低い。このために淡水化の膜技術や浄水の個別技術には優れているが、システム化とかビジネスに関して欧州の企業に遅れをとったと指摘されている。現在、産業政策として単に個別要素技術・製品のみならず、これを統合するシステム化技術や総合的システムなど付加価値の高い産業、製品を育成・確

立して今後の技術主導権を取って行くべきという機運が高まりつつある。一方で地域固有の課題の少ない地域でこれを解決するシステムを構築することは困難であって、そういった要請のあるフィールドで初めて技術、システムが育つという点も否めない。

これに対して自動車はある地域で技術が育成されればそれが優れたものである限り、世界に通用し、またその結果ますます生産規模が広がり量的にも技術的にも競争力が強化される。逆に世界市場に通用する自動車などの技術イニシアティブをとることは日本のような独自の地域環境にある極東の島国にとっては極めて重要な課題といえる。

#### 2. 低炭素社会実現のための技術革新

周知のように地球温暖化は 88 年、トロントサミットで初めて議題として取り上げられ、その後 94 年 FCCC（気候変動枠組条約）が発効、翌年から締約国会議（COP）で具体的な対応策が検討されてきた。更に 97 年、第 3 回京都会議で京都議定書が締結された後、2008 年に実際の削減約束期間が始まった。議論が始まってから実に 20 年近く経って実際の対応行動が国際的に開始されたことになる。その間、その問題を科学的知見に基づいて議論するため IPCC（気候変動に関する政府間パネル）が設立されて温暖化の可能性と原理、地球規模気候モデルの構築とその検証、更に影響、対応策（技術的、政策的）の検討などが勢力的に進められた。最近の IPCC 第 4 次評価報告書に至って、極めて慎重な表現ながら人類の排出する GHG（温室効果ガス）が気候システムに致命的に影響する可能性を否定できないと結論付け、併せてその影響の深刻さを警告した。更にその IPCC のノーベル賞受賞はこのような危機感を反映したものであり、そのころ発表された英国のスターンレポートなども温暖化の経済的損失を警告するなど、世界的に温暖化への懸念が深刻に論じられるようになった。実際には京都議定書締結以降、実質

\* 2009 年 10 月 30 日 原稿受理

的に温暖化削減義務を負った（米国をのぞく）OECD諸国（西欧、日本）などでは徐々に具体的な温暖化防止の対応、政策が実施、強化されてきたが、最近はその緊急性が急速に認識されてきた。実際に気候変動の影響が顕在化し、またそのモニターシステムも整備されてきてその影響が実証、実感されてきたこともこの動きを加速するのに貢献している。

この中で我が国では06年5月には地球環境とエネルギー安全保障を見据えた新・国家エネルギー戦略を策定、更にこれに基づいて基本的なエネルギー政策（エネルギー基本計画、長期エネルギー需給見通し）の見直しをあいっいで行った。従来の短期的、趨勢延長のエネルギー政策にとどまらず、極めて長期的な目標、見通しのもとで2030年に至る省エネ、エネルギー転換などの数値目標を設定してCO<sub>2</sub>削減の道筋を示したところにその特徴がある。ちなみに道路交通に関しては上記の問題意識から石油消費の削減転換を目標に上げ、エネルギー全体の依存度、交通関連燃料の依存度を共に20%低減することを明示した。更にFCCCの京都以降の2020年の削減目標（中期目標）として具体的に2005年ベースで15%削減を打ち出したが、今回の政権交代以降これは大幅に強化され、90年比-25%が新たに打ち出されたのは記憶に新しい。その間、07年5月にはサミットに向けて、“2050年に世界全体のCO<sub>2</sub>排出量を

半減する目標（クールアース50）”が首相談話として発表された。その後もこの世界全体のCO<sub>2</sub>排出の抜本的な削減の必要性はサミットのたびに日本が継続的に主張してきたが、現在これは広く認められていわゆる低炭素社会の実現が長期的な目標となった。しかし現時点で人口あたり世界平均の2倍を排出している我が国は、更にその半分の25%程度への削減が求められることを覚悟しなければならない。このような思い切った削減目標を現在の技術で生産・消費構造や生産・生活水準を維持して実現することはどんなに努力しても不可能であって、抜本的な技術革新と生産・消費構造の変革が不可欠である。

このような認識の元で経済産業省では将来の環境エネルギー革新技術の検討を進めてきたが、07年3月Cool Earth – エネルギー革新技術計画を発表（Fig. 1）、この結果はそのまま洞爺湖サミットを控えた08年5月に総合科学技術会議の環境エネルギー技術革新計画としてまとめられた。後者は前者をほぼそのまま包含し、更に経済的手段や海外への技術協力など政策面での対応も織り込んでいるが、技術要素としてはほぼ前者を継承している。

この中で現在、先進諸国で排出量の25～40%を占める自動車交通からの排出削減技術のR&Dも重視され、特に次世代自動車として期待の大きい電気自動車、

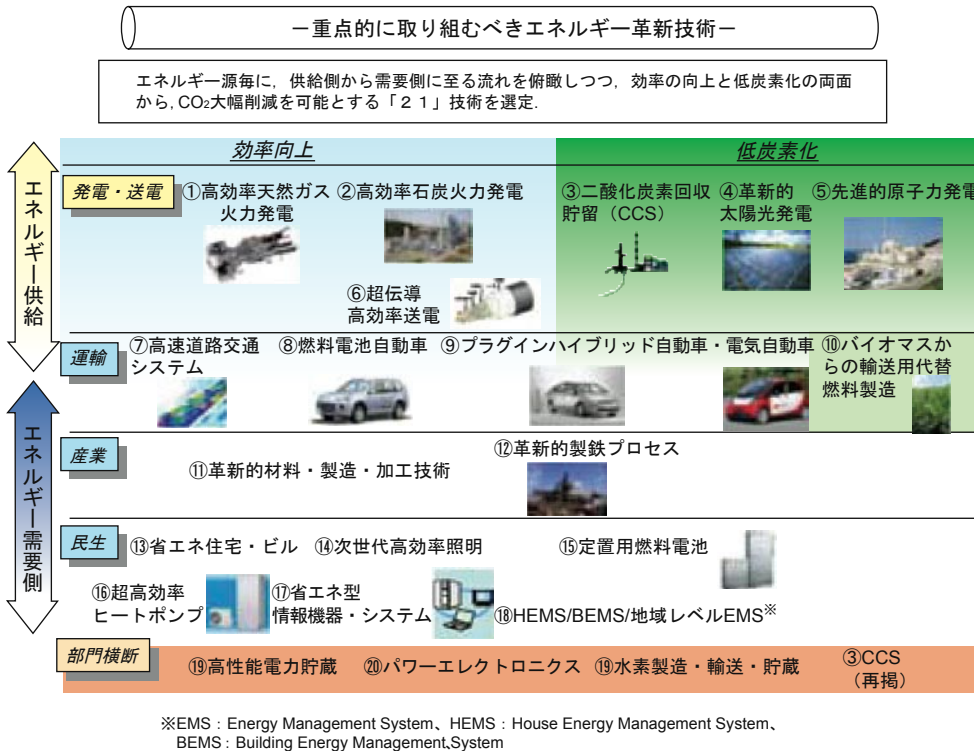


Fig. 1 Cool Earth – エネルギー革新技術計画で抽出された重点技術

その核心技術である高性能電池、電動車両の一種である燃料電池車と燃料電池、更にそのインフラとなる水素技術などがあげられている。産業技術は厳しい経済性追求により省エネ、CO<sub>2</sub>削減技術は進んでいて更なる削減は困難なため、全般に需要サイドの効率向上、革新的な材料、システムによる抜本的変革が対象となっている。

### 3. 道路交通における技術課題と自動車のオプション

陸上交通は徒歩から公共交通など多様な手段・システムが存在するが、この中でも自動車交通は移動の自由度（ドア to ドア輸送、任意時点の移動の可能性）などの利便性に加えて快適性、適当な速度と移動可能距離から現在、途上国、先進国を問わずそのシェアを確実に伸ばし、これが効率のよい公共交通を駆逐すると共にエネルギー消費量を急速に押し上げている。公共交通は必然的にアクセス点が限定された線状の交通サービス提供となるが、人口集積の大きい大都市部では集積密度も高まり利便性も許容範囲にあって需要も十分存在して経営が成立する。これに対してわずかな人口が2次元的に散在する地方、あるいは北米、豪州など新大陸諸国では上記の移動の自由度により自家用自動車に優位性を持つことは明らかで、ひとたび自動車を保有すればこれに完全に依存することになる。この結果公共交通の需要とサービスレベルはいつそう低下して更に自動車普及が促進されるというのが先進国の大都市を除く世界の趨勢である。

周知のように自動車は基本的に石油起源の液体炭化水素燃料を利用した内燃機関自動車（ICEV）が実質的に100%を占める。自動車が発明された当初こそ電池による電気自動車（EV）も利用されたが、電動スタータの発明と、以後の内燃機関（ICE）の技術革新により1900年以後現在まで100年以上、ICEに代わる自動車駆動源は実現しなかった。いくつかの理由があるが、まず液体燃料の取り扱いの容易さ、液体炭化水素のエネルギー密度の優位性があげられる。電気自動車の最大の課題である電池のエネルギー密度を考えると、液体燃料に依存するICEがいかに有効かを改めて感じさせられる。液体炭化水素はエネルギー密度が高く、しかも常温液体でいかなる容器にも容易に格納可能、その保存、輸送など取り扱いはきわめて容易、また安全に管理できる。他方で燃焼に必要な気化も容易で、その制御も簡単である。ICEの基本的反応である燃焼は燃料を大気中の酸素で酸化、その本質的な排ガスで

あるCO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oを空中に放出するため、関連物質全重量の22%程度（排ガスも考慮すれば更にその1/2）に過ぎない炭化水素燃料のみを携帯すれば良い。その反面で排ガスとして上記の他に不完全燃焼によるCO、燃料不純物の酸化物（SO<sub>x</sub>、重金属類）、更に空気中に含まれる窒素の酸化物などを発生するが、これは長年にわたる燃料のクリーン化、テールパイプによる除去、燃焼技術の改善でクリーン化されてきた。これに加えて爆発燃焼であるICEの小型高出力特性、即応性などが起動停止の多い自動車には適当であり、またそれを目指した技術開発の結果として他に追従できない性能を実現した。この中で一つだけ解決できないのが、主要排出物のCO<sub>2</sub>の削減であって、これは効率化でその排出量を削減する以外に手段がない。以上のような経緯で一方では世界的にICEVは爆発的に数量を増やしそのエネルギー消費も順調に伸びている反面で、道路交通の課題も次第に顕在化してきた。この中で当初の騒音、振動などの近隣環境問題は技術的に既に解決、上記の排ガスによる環境問題も先進国ではほぼ技術的に解決された。しかし近年はより本質的、かつ解決困難な以下の二つの課題が顕在化、重視されるようになった。

#### (1) エネルギー資源問題（安全保障問題）

石油の消費絶対量の急速な増加（特に新興途上国）と資源価格高騰などの長期的な需給逼迫への懸念。これは逆に石油起源液体燃料利用のICEVの絶対的優位性と技術的に代替困難な事実を反映している。更に石油資源の偏在や産油国の政情不安など安定供給が懸念されるエネルギー安全保障の課題でもある。長期的にはオイルピーク論など資源枯渇の懸念も浮上している。

#### (2) 地球環境問題

液体炭化水素燃料使用増大のためCO<sub>2</sub>排出抑制は不可避であるがその代替は困難で革新的エネルギー源代替技術の模索とR&Dが必要とされる。

以上いずれもその解決には既存の液体燃料に依存するICEVに代わる革新的な代替技術が必要となる。

このような問題を対処するには直接的な自動車単体の個別システム改善からモータルシフトなど総合的な交通体系変革を考慮した広範な政策による解決までいくつかのレベルの対応が考えられる（Fig. 2）。当然、各レベル毎の改善は必要であるが、問題解決に当たっては全体の可能性をすべて考慮した上でもっとも効果的な対応を取ることが望ましい。（部分（局所）的最適化は全体の総合的最適化のサブセットに過ぎない）。他方で対象範囲を広げるほどステークホルダーが増加、

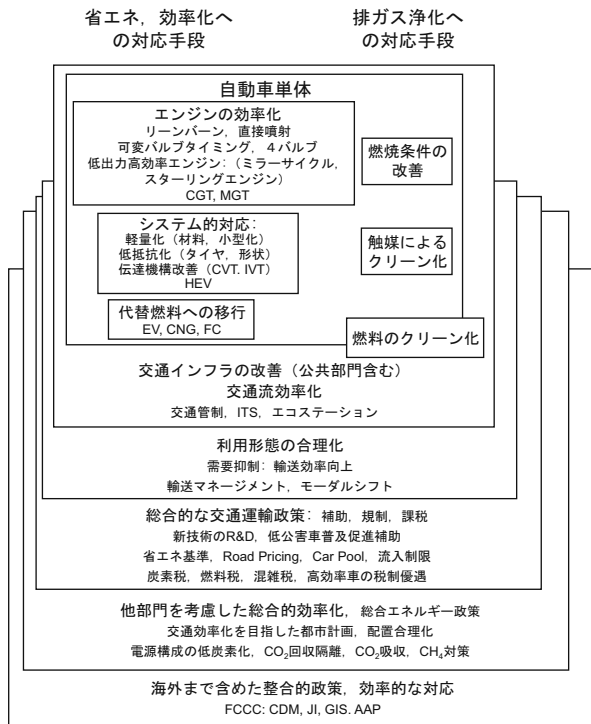


Fig. 2 道路交通の各種課題解決手段の階層構造

解決策の実施は困難となるが、上記の思い切ったCO<sub>2</sub>削減は自動車単体のみで解決することは不可能であり、自動車技術を基本にしつつも総合的な対応策を同時に考慮することが不可欠である。

まず自動車単体、特に既存のICEVは長い改良の歴史の中で最近の課題に対応するための省エネ高効率化も精力的に進めてきた。我が国ではトップランナー基準などの強力な推進努力もあって基準策定以来10年間で平均22%の向上が達成され、更に今後10年間で23%の効率向上を目指している。他方で道路の改善、あるいは混雑税などの走行規制政策によって道路の最適利用(ほぼ設計容量)を図れば混雑時の平均走行速度を2~3倍程度に引き上げることは可能で、状況にもよるがICEVの燃費を50~100%程度改善することも可能である。輸送原単位の異なるモーダルシフトによれば輸送効率を一気に5倍以上も改善可能である。

このように効率改善の対応策は多様に存在し技術的にも経済的にも容易なものも数多く存在する。しかしながら前述の本質的課題を解決するためにはやはり究極的なCO<sub>2</sub>零排出技術は不可欠であって、長期的にはその開発、実現、転換が必要になる。これは世界の趨勢ともいえ、その技術、関連産業を育成して世界的に優位に立てる技術、製品を保持することは、資源を本質的に海外に依存する我が国の経済・生活を維持するためにもきわめて重要である。

以下、本文では最終的なCO<sub>2</sub>零排出技術に至る各種オプションの概要とその可能性、並びにその実現のための各種の課題と対応策を示すが、これは究極の技術目標ともいえるもので、現在のICEVをすべて代替できるわけではないことを認識しておく必要がある。CO<sub>2</sub>零排出、石油代替の対策技術、システムに完全に移行すればその分野のCO<sub>2</sub>零排出や石油依存離脱が可能であるが、現在普及しているICEVは他の代替技術との競争の結果、あらゆる利用条件に適用可能な万能のシステムとして確立したものである。他方で代替技術も実用化、改善によって性能も向上して適用可能な範囲も拡大する。また当初問題となる経済性も炭素コストなどが内生化されればその経済性は人為的に修正されてその代替は加速される。こういった条件の変化も考慮して長期的視点で将来にわたって基本となる本質的な技術オプションを把握、特定し、その技術開発、実用化を推進していくことが現在、必要とされる。

#### 4. CO<sub>2</sub> 零排出の自動車技術

ICEVの代替車両としては唯一、1900年以来社会から忘れられてきた電気自動車(EV)があげられる。電気自動車は排ガスが問題になった1970年代に見直されて研究開発が進められたが、当初から問題であった電池の本質的課題、即ちエネルギー密度、コスト、耐久性に加えて電動駆動系自体も性能が不十分で実用には遠く及ばなかった。更に1990年代からスケジュールにあがったカリフォルニア州の零排出車規制に対応するために90年代後半から大手自動車メーカーが本格的にEVを開発したが、やはり航続距離、コスト、電池寿命など、電池に由来する限界を超えられず当初目標の実現は断念された。この間、改善された電動車両技術は日本でハイブリッド車(HEV)として実現され、また従来夢と考えられてきた燃料電池車(FCV)がドイツのダイムラー社によって実現されて、1900年後半には熾烈なFCVの開発競争が進められた。

なおここで電気自動車(EV)の定義を示す。EVは本来電池を搭載、これに充電された電力で駆動する電動車両を指す用語であったが、最近HEV、FCVなど他の電動車両が現れたため、電動駆動の自動車を指す総称にも用いられ、本来の電池電動車両はバッテリーEV(BEV)と呼ばれることもある。ただし一般社会の混乱をさけるため、EVはBEVを表し、電気駆動車両の総称は電動車両と呼ぶことを国際規格として提案している。

電動車両は当初、排ガス対策としてR&Dが推進されてきたが、90年代後半からはCO<sub>2</sub>排出削減も大きな

動因となり、発電にまでさかのぼってエネルギーパス全体のCO<sub>2</sub>排出量を検討するいわゆる Well to wheel (WtW) の評価が行われるようになった。このような化石燃料中心のエネルギー資源から自動車燃料までの変換、輸送を経て最終的な自動車走行に至るエネルギーパス全体を考えた各種自動車のオプションとして現在想定されている技術としては Fig. 3 のようなパスが考えられる。

Fig. 3 では左側にエネルギー資源（上部は海外に存在する化石エネルギー資源）、右側に最終利用である各種形態の自動車を示し、その途中の多様なエネルギー転換ルート、即ちエネルギーパスのオプションを示す。前述のように現在は海外の石油を輸入、国内に輸送してからガソリン、ディーゼル油などの液体炭化水素燃料に転換した上、ICEVで利用するパスが基本である。これに対してICEVに電池、及び電動駆動系を搭載したパラレルハイブリッド車（HEV）がわずかに市場に浸透し始めた。なお HEV の効率は格段に改善されるが、自動車燃料までのパスは従来のICEVと変わらず、現存インフラにそのまま依存できることもスムーズな実現普及が達成された大きな理由となった。

これに対して究極的なCO<sub>2</sub>削減技術としてのCO<sub>2</sub>零排出パスはエネルギー資源から燃料まで Well to Tank

(WtT), 並びに自動車走行 Tank to Wheel (TtW) いずれもがCO<sub>2</sub>フリーでなければならない。まずCO<sub>2</sub>零排出自動車として、充電電力によるEVか水素燃料によるFCVが考えられるが、いずれも電動駆動車両である。即ちICEに代わる駆動系は電動機のみが対象となる。更にWtTパス、即ちエネルギー源からCO<sub>2</sub>零排出で電力、あるいは水素を得るパスを実現する必要がある。

CO<sub>2</sub>零排出の電力として原子力、及び自然エネルギー電力が存在する。また化石燃料による火力発電もCCS（炭素回収固定）を利用する場合にはCO<sub>2</sub>零排出パスとなり、近年はこれも含めた検討が行われる。CCSは移動する自動車単体で個別に行うことは非現実的で、電力、あるいは水素に変換する過程で大規模にCCSを適用するのが現実的である。この結果、現在はEV、あるいは水素直接利用のFCVが有力な候補となる。なお水素はエネルギー媒体であって資源として存在しないがCO<sub>2</sub>フリー電力からの電解水素は零排出パスとなる。更に化石燃料からの水蒸気改質などはCCSの適用が可能でこれも零排出の候補となり得る。このような水素を用いたICEVも零排出パスであるが、EVなどに比べて効率は非常に悪く、CO<sub>2</sub>以外のエネルギー有効利用の観点からの評価も必要である。

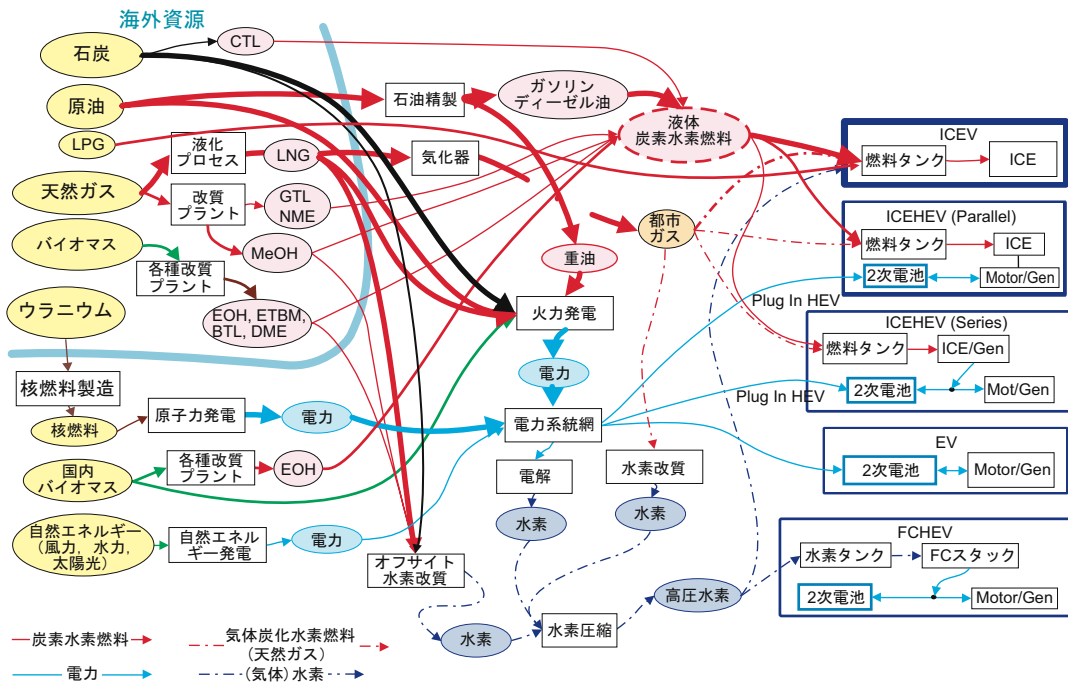


Fig. 3 各種自動車のエネルギーパスのオプション

このほかにバイオマスはカーボンニュートラルとみなされるのでこれをエネルギー源とする各種パス、即ち発電、水素製造、あるいは液体炭化水素燃料製造のパスはCO<sub>2</sub> 零排出パスを構成する。特に液体バイオ燃料は既存のICEV がほぼそのまま適用可能であって、技術的にはもっとも容易であるが、バイオ燃料製造効率が低く、また世界的には供給制約が懸念されており、地域固有の条件に左右される可能性が高い。特に日本では供給困難と認識されているが一部地域で小規模な適用は期待されている。

前述のようにこれらの究極的なCO<sub>2</sub> 零排出パスは当然ながらCO<sub>2</sub> 削減にはもっとも有効であるが、前述のようにCO<sub>2</sub> 以外の選択基準、あるいは性能などの諸制約からすべてのICEV を代替することは不可能であり、また必然性もない。当然、既存のICEV を中心とした適当な役割分担があるが、長期的にはCO<sub>2</sub> 零排出技術を育成し、少しでも転換の可能性を広げていくことが必要であり、その候補としての電動車両の育成は極めて重要である。

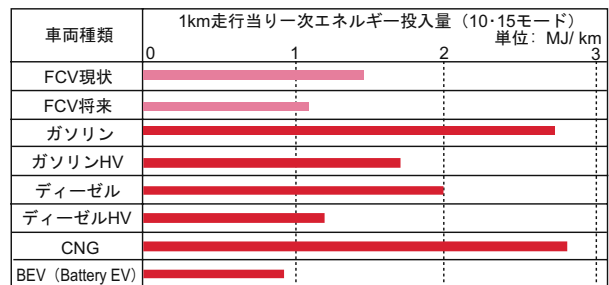
以下に各技術の本質的な課題を要約する。

- (1) EV: 電池コスト, エネルギー (重量, 容積) 密度, 耐久性, 信頼性, 電池, モーターなどの素材資源問題, 希土類金属
- (2) FCV:
  - FC スタック: コスト, 耐久性, 触媒用貴金属類の偏在や供給力などの資源問題,
  - 水素タンク
- (3) バイオ燃料: 供給ポテンシャル, コスト, セルロース分解の技術確立, 総合効率改善
- (4) 水素ICEV: FCV に比べて総合的に低効率, 航続距離, 燃料コスト問題, 自然エネルギー電力起源水素は, EV に比べて効率大幅低下, 資源有効利用の課題
- (5) 水素インフラ: インフラ・水素コスト, WtT 効率, 製造法, 輸送・貯蔵技術, 規制, 安全性確保
- (6) CCS: 地域ポテンシャル, 社会的許容, 海洋貯蔵は環境評価とPA

上記の個々の課題解決にはそれぞれ本格的なR&Dが不可欠であるが、特に性能、信頼性など技術的限界とコストの課題は深刻であって今後の技術開発が期待される。同時にこのような各種制約の中で適用可能な需要、ユーザを開拓、推進加速することも重要な政策課題である。

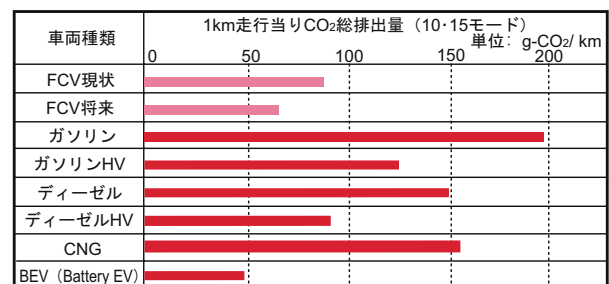
各種の自動車の中で既存車を含めて代表的な数種についてWtWの総合効率 (1 km 走行に必要なエネルギー資源の総量), 並びにCO<sub>2</sub> 排出量の比較の一例を示す (Figs. 4&5)。前述のように温暖化防止としてはCO<sub>2</sub> 排出抑制がもっとも重要であるが、資源の有効利用という意味では総合効率も同時に配慮する必要がある。なお前提条件によりこの結果は容易に変化することに注意する必要があるが、一般的に電動車両は高効率のディーゼルHEV以上に効率が良くまたCO<sub>2</sub> 排出が少ないことが示される。(FCVは天然ガスからの改質, EVは日本の電力ミックスを前提) 更に原子力などのCO<sub>2</sub> フリーの電力を前提とした場合にはEV, FCVのCO<sub>2</sub> 排出量は限りなく零に近づく可能性を持っている。他方で、電解水素を前提とする場合にはFCVの総合効率は複雑に変化することに注意する必要がある。

EV, FCVなどの電動車両はコスト、性能、インフラなどの課題はあるが、化石燃料起源のエネルギーパスでも既存のICEV に比べて相当の効率向上, CO<sub>2</sub> 削減が可能であり、長期的に電力が原子力や自然エネルギーなどに移行した場合 (前述のように長期的には抜本的



FCV現状: 「水素ステーション」「FCV」データはJHFC実証結果トップ値, その他データは文献トップ値により算出  
 FCV将来: FCVの将来FCシステム効率60%と文献トップ値により算出  
 電力構成: 日本の平均電源構成, 原発も火力相当発電効率仮定

Fig. 4 Well to Wheel エネルギー総合効率 (JHFC 資料より引用)



FCV現状: 「水素ステーション」「FCV」データはJHFC実証結果トップ値, その他データは文献トップ値により算出  
 FCV将来: FCVの将来FCシステム効率60%と文献トップ値により算出  
 電力構成: 日本の平均電源構成

Fig. 5 Well to Wheel CO<sub>2</sub> 排出量 (JHFC 資料より引用)

な CO<sub>2</sub> 削減が必要とすれば不可欠の電源となる)には完全に零排出になる可能性があるという点は長期的視点からはきわめて重要である。将来の零排出電源として何を期待しているかは各国の事情によるが、例えば日本、フランスなどは原子力と一部自然エネルギー、米国では CCS 石炭火力とバイオ燃料、またドイツ、北欧などは自然エネルギー、とりわけ風力を重視している。いずれにしろ将来の抜本的な CO<sub>2</sub> 削減を考えたとき、上記の各種電力は重要なオプションとなる。これらの零排出エネルギー源を有効に活用できる電動車両の性能向上、コスト削減などの課題を克服してその適用可能性を拡大しておくことが極めて重要であり、そのためには技術開発が欠かせない。なお CO<sub>2</sub> 零排出エネルギー源として電力が基本となった場合はこれを直接、有効に利用可能であり、基本的には既にインフラが十分整備された家庭で充電可能な EV の重要性が一層増すことに注意しておく必要がある。

なお零排出エネルギー源から始まる各種エネルギーパスのオプションではパスの途中でエネルギー損失が相当発生しても最終的に零排出パスとなるが、その効率に注意する必要がある。現在、バイオ燃料、クリーン電力起源の電解水素を用いた ICEV などは CO<sub>2</sub> 零排出であるが、他のパスを通るオプションに比較して総合効率は相当低く、将来的にこれを用いるには相当の効率改善が必要である。将来のエネルギーシステムを念頭に置いた上で、各オプションの適用可能性、インフラ整備などに加えてエネルギー資源の有効活用も重要な評価基準となる。

## 5. 電動車両の特性と課題

ここで長期的に見て今後もっとも有望な零排出車両オプションである各種電動車両の特性を要約する。

- (1) まず電動機（モータ）は、現在、サイズ、コスト、出力レベル、応答特性などの諸性能から ICE に代替可能な唯一の移動体用動力源であり、規模は異なるが既に電気鉄道で技術は確立している。
- (2) 電池への充電電力利用により完全密閉システムとなって走行時零排出という本質の特徴がある。
- (3) 駆動原理は可逆性の電磁力変換によるため、
  - a) 機械的な接触部、摺動部が不要で効率がよく騒音も低い。更に ICE と異なり高温作動も必要ない。
  - b) 軸対象構造で高効率・連続的トルクを発生可能、静粛、低振動、高効率を可能とする。しかも原理的に最大許容トルクで起動可能なため、起動が容易でアイドル不要、スムーズな発進が可能と

なって移動体の頻繁な起動停止に適している。

c) 回生制動可能でこれも高効率化に貢献する。

その反面で電池の性能上、搭載エネルギー密度に限界がありこれが航続距離制約という致命的な障害となる。更に電池のコスト、及び大深度充放電による電池寿命に課題が残る。以上の二つは EV 実現の最大の障害であり、この解決が今後の普及実現の根本的課題である。また利用上の課題として高効率のために損失がなく、熱源が不足して暖房時に外部エネルギーが必要でこれが効率低下を招く。一方、コイルによる界磁発生は重量増を招いたが強力な永久磁石採用で改善された。

これらの課題から EV は過去何回も推進の機運がありながら結局近年に至るまで一度も市場化は実現しなかった。一部繰り返しになるがその経緯は以下に要約される。

### 5.1 1970 年代の排ガス問題解決のための EV 開発

1970 年マスキー法に代表される排ガス規制を受けて我が国でも 71 年から 5 年間にわたる電気自動車研究開発プロジェクト（大プロ）が実施された。その間 72 年には第 1 次石油危機も勃発して石油代替技術としての関心も高まった。その結果を受けて 76 年には日本電動車両協会が設立され、以後 EV の普及を手がけてきた。現実には鉛蓄電池を用いた当時の EV は性能（特にレンジ、動的特性）が劣悪、コスト高で市場化は問題外であり、その反面で排ガス問題は ICEV の技術開発で克服、石油危機は通り過ぎて EV 推進の機運は事実上、終焉した。

### 5.2 90 年代の米国カリフォルニア州

#### ZEV Mandate（零排出車導入義務規制）のスケジュール入りによる EV 開発の加速

米国カリフォルニア州は州、特に南部、の深刻な排ガス改善のために本格的な EV 導入義務規制を計画、直接規制対象となる大手自動車メーカーは対応を迫られ、初めて本腰を入れて開発を開始した。この結果、自動車としての動的性能は相当向上したが、電池の性能制約から同地ではレンジ不足、コストも問題外でこれらの現実的障害から規制は繰り返し再検討され実施は延期された。結局、実施スケジュールは大幅に後退、修正され、大手メーカーの EV 開発も減速、断念され、EV 普及は実現できなかった。電池もコスト面から性能の低い鉛酸バッテリーが利用された。なお現在、中国上海では排ガス問題から ICE のスクーターの登録が禁止されて、鉛酸電池の電動スクーターが大量に普及している。

### 5.3 代替技術としての HEV の実現と FCV の開発競争

この時期、電池をのぞいた EV の要素技術、特に電動駆動システムは相当の進歩を遂げ、他のオプションの模索が続いた。その中でトヨタ社が先鞭をつけた HEV の実用化は初の電動車両市場投入という意味で画期的な転機となった。その後、HEV はトヨタ、ホンダが独走し、米国の DOE (エネルギー省) はそれ以来、米国メーカーの技術開発の支援を継続的に進めることとなった。

他方、HEV 開発に遅れたダイムラー (DCX) は FCV を実現し、その R&D と実用化を PR した。その積極姿勢に押されて他の主要メーカーもその技術開発競争に参入、世界的に FCV の期待が一気に高まった。これに応じてカリフォルニア州政府も規制に FCV の優遇策を取り込み、併せて水素インフラの整備を積極的に推進するなど、EV をあきらめて明確に FCV 推進にその軸足を移した。

### 5.4 最近の EV (PHEV 含む) の見直し風潮

その後、主要メーカーはそれぞれの地域の政府の強力な支援を得て激しい開発競争を演じたが、FCV の実用化の障害、特にコスト低減の課題が予想以上に解決困難なことから改めて基礎的研究までさかのぼった R&D が必要という認識に至った。そして当初の予定、00 年代中頃の実用化目標は約 10 年ほど延期されて 2015 年頃までに解決、実現の可否判断を行うという理解が一般的となった。他方で前述の次世代自動車への要請は一段と高まってきたが、この間の電池技術、特に大型 Li-Ion 電池の実現は再び EV の実現への期待をかき立てた。上記の温暖化対応の強化、WtW 評価による EV 優位性の確認、並びに米国における HEV の実用化普及と石油消費削減のためのプラグインハイブリッド車 (PHEV) 推進も強力な動機となっている。

これらの電動車両は前述の様にエネルギーパスによっては WtW の CO<sub>2</sub> 排出を画期的に削減できるが、それぞれの課題をかかえ、またエネルギーの有効利用という意味での総合効率にも差が残る。個々の技術は既によく知られていて改めて示す必要も無いと思われるが、この中で PHEV はその実用性という意味で非常に現実的な技術と期待されている。

周知のように古くから HEV にはパラレルタイプ、シリーズタイプの 2 種が存在し (Fig. 6)、トヨタのプリウスはかなり複雑な両者の特徴を兼ね備えているが、基本的にはパラレルタイプとみなされる。

このうちシリーズタイプは EV の単純な延長、即ち

EV にエンジン / 発電機を追加してバッテリー電力を補充するもので、FCV はその一種である。EV の延長として比較的単純な構造であるが、駆動系としては完全に EV を引き継ぎその特徴をそのまま継承する。他方でパラレルタイプは構造複雑な反面で、電動モータと ICE の二つの駆動源が存在し、基本はあくまでも ICEV であるが、電動車両の特徴である回生制動、アイドリング停止に加えて、モータの容量によっては電動駆動が可能で強力な加速力やエンジン動作点の最適化などが可能となり、効率も格段に改善される。小容量の電池で SOC (充電レベル) のごくわずかな変動域を利用して電池を痛めず EV のメリットを活用できる極めて巧妙なシステムである。当然エネルギー源は従来のガソリンのみであって燃料補給の問題もなく、効率が良くしかも動的特性も優れた環境対応車ということで短時間に世界的に広まったものである。

最近話題となってきたプラグインハイブリッド車 (PHEV) は原理的にはこの電池容量を増加して外部充電を可能とし、まず充電電力で走行後、バッテリーがつかた後は従来のハイブリッド走行を行うという単純な発想から期待されてきた。事実、プリウスなどが米国で普及するとともに、その電動走行能力を補強するため、ベンチャー企業がこれに追加電池を搭載して PHEV として売り出したのが、最近のブームの端緒となったものである。これは EV 実現が困難と思われた米国で特に関心を呼び、過去 EV を開発推進してきたグループなどのロビー活動の結果、06 年新年の大統領教書に取り上げられて、以後一気にブームとなり、結果として DOE も正式に研究開発対象として取り上げた。

この PHEV は形式的には単に HEV の電池を拡大するだけに見えるが、技術的には HEV が巧みに避けた EV の問題点に再び直面することになり、“見かけほど簡単ではない”というのが開発関係者の認識である。特に EV と同様に充電電力で電動走行をすることに意義

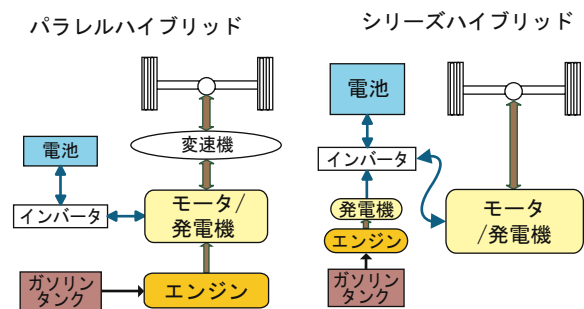


Fig. 6 ハイブリッド車両の基本構造



があるために深い充放電を繰り返す必要があつて電池寿命に深刻な影響を与える。また効率、CO<sub>2</sub>削減効果を比較する対象が必然的に HEV となるので、そのメリット、即ち高価な電池追加の価格性能比は厳しいものがある。

多くの未解決の課題にもかかわらず前述の背景から電動駆動は単に効率が良いばかりでなく、CO<sub>2</sub>削減にも効果があり、更に石油消費の削減が可能となる。近年の米国では CO<sub>2</sub>問題以上に中東石油への依存度低下は大きな政治的課題となっており、国内石炭火力発電による電動走行によって輸入原油消費を削減できれば CO<sub>2</sub>排出以上に評価される風潮がある。その意味で米国では PHEV は電力消費を無視したガソリン燃費のみが評価対象となることが多い。電力は多様な種類があり、最終的に CO<sub>2</sub>フリーの原子力、自然エネルギーに収束するとこれが CO<sub>2</sub>排出量を示すという見方もあるが、この点は注意する必要がある。

この PHEV の見直しと共に PHEV の評価として実際に自動車はどう使われるかも検討の対象となった。これは Utility Factor と呼ばれて実際に 1 トリップでどの程度走行、エネルギーを消費するかの統計値で全体の効果を評価する。日本でも同様な検討が進んでいるが、当然日本は遙かに平均走行距離が短く、一日の走行距離は 30 km 以下が 80% を占めるとするデータも提示されている。これに対して走行距離の長い米国ですら、50 マイルもあれば十分とする意見も多く、これは毎日通勤に使う米国では通勤時間帯の道路渋滞状況と通勤に許容される時間を考えると納得できる数値といえる。従つてこれらの距離を電動走行できれば、前期のガソリン燃費削減、あるいは CO<sub>2</sub>削減に大きな効果が期待できる。

これらの複雑な状況の正確な評価は、その条件に大きく依存するので、注意が必要であるが、筆者らは HEV などで実測値と照合し、また専門家の意見などを採り入れて開発した自動車モデルを用いて、これらの各種自動車の CO<sub>2</sub>削減可能性とコストのおよその評価を行った。なおコスト評価は電池のコスト次第で将来の予測はつきにくいいため、逆に電池追加をした場合にガソリン代と電力料金の差額でペイバック可能な電池価格を算出してその可能性を理解する。対象は軽自動車クラスの EV と ICEV、小型自動車クラスの HEV と PHEV を比較して鍵となる電池のペイバックコストを比較している。PHEV の燃費や CO<sub>2</sub>排出の算定は自動車のモデルを確定しても、走行条件、特に一日当たりの平均走行距離と、電力のタイプに依存するために極

めて複雑となるので、多様な走行条件を試行錯誤的に算定してその上下限を示した。(Y. Baba & H. Ishitani, Applicability and Environmental Effects of Plug-in HEV in Japanese Condition, EVS23, Session 3A-2, Anaheim, CA USA, 2007/12 参照)

この試算の結果は以下に要約される。

- (1) PHEV は電力走行可能距離の倍程度までの走行では大きな環境改善効果があり、ガソリン消費、CO<sub>2</sub>排出ともに HEV の 1/2 程度に削減される。
- (2) 日本の電力ミックスを考えると、一般的走行距離であれば 3 kWh の電池容量は環境影響を改善するのに充分効果的と考えられる。
- (3) PHEV 用電池のペイバックコストはガソリンと電力価格に依存する。日本では 2007 年におけるガソリン価格と昼間電力料金に対してエネルギー型電池で約 3 ～ 5 万円 / kWh となる。しかしながら既存の HEV 電池（出力型電池）を活用して更に追加した場合にはペイバックコストは 5 ～ 9 万円 / kWh 程度にあがる。しかし要求されるサイクル寿命と信頼性を考慮すると、いずれの場合も実現は容易ではなく、相当の努力が必要と思われる。従つて、近い将来これらの要求を達成するために電池の R&D を促進することが強く要請される。
- (4) 他方で軽車両クラスの ICEV に対する EV 用電池（エネルギー型電池）のペイバックコストは 5 ～ 9 万円 / kWh となる。ただし電池を多量に必要とするために初期コストは大きい。

なおここでバッテリーサイクル寿命 2000 サイクル、電池の SOC 有効利用率 70%（PHEV は 60%）を前提とした。ガソリン、電力価格は石油高騰時期だったので、それぞれ 130 ～ 180 円 / ㍉㍉、20 円 / kWh と仮定している。

後述の将来コスト目標では、低速走行では EV はペイバック可能、ただし、高速走行の利用環境では回収は困難である。都市内の一般利用では HEV はもとより PHEV、EV でもペイバック可能となる。他方で高速走行の可能な地域ではペイバックは HEV でも困難で、この場合には PHEV の方がコスト性能比が高い。従つて欧州のような高速走行地域では HEV と並んで PHEV は有望といえる。

いずれの場合も走行距離が延びればペイバックは容易である。その半面で EV はレンジが限定されて使用しにくい、PHEV はレンジ制約が無く、個人ユーザも安心して使用可能である。

以上の特性から明らかなように PHEV は現在唯一市場に実現している HEV を基本として電池コスト、利用

条件に応じて付加電池を拡大し、地域の需要、条件、経済性に合わせながらEVの方向に進んでその環境性能を改善可能である。しかもEVの最大の課題となる走行制限をユーザに感じさせることなく市場に浸透できるという非常に現実的なオプションといえる。これらの現状を最終的な目標コスト、更に環境性能としてCO<sub>2</sub>排出量を現存のICEVを基本に表すとFig.7のようになる。途中プロセスをみると、他のオプションであるEV、FCVに比べてきわめて現実的であり、構造は複雑であるが我が国固有の技術となった感のあるパラレルタイプのHEVをベースとしたPHEVの進展を期待したいものである。

### 6. 電動車両実現上の課題と対応

前述のように現時点で再度、見直されたEVはICEVの汎用性に比べれば多くの制約、課題があるものの用途を限定すればそれなりの活用が可能である。更に長期的視点では理想的なCO<sub>2</sub>零排出車であって世界的にもその実用化競争は激化しつつある。こういった状況を察知して経済産業省は06年、次世代自動車用電池の開発促進のため「新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会」を設置し、技術の現状を分析、今後の自動車用電池の技術開発に関する課題と対応を検討、06年8月に「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」をとりまとめた。そして次世代自動車用電池の開発に向けた二つのアクションプラン、研究開発戦略、並びにインフラ整備戦略を提示した。

前者では自動車用大型電池として現在のリチウムイオン型電池を中心とする短中期的目標、並びに究極的にEVを実現可能とするような長期的研究目標を定めた(Figs.8&9)。その具体的な数値目標は図に示されるようにいずれも極めて意欲的な数値であるが、これはあくまでも研究目標、あるいは要求仕様であって完全に達成できなくてもこれを目標とした研究が必要という位置づけである。これに就いてNEDOは本年度から7年計画で革新型蓄電池先端科学基礎研究を開始した(Fig.8)。なお現在技術の延長上にあると想定される2015年の先進型電池の目標でも相当に大胆な数値目標であるが、現実に改良型の先にある前述のペイバック価格が達成されれば電動車両の自律的普及の可能性が高まるので、そこに一刻も早く到達することが極めて重要である。そのためにも研究開発目標としてはこれを超える十分に高い数値を掲げて極限までの性能向上を目指すことが望ましい。

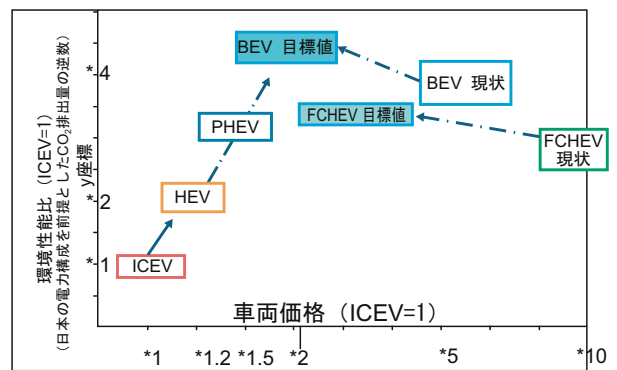


Fig.7 各種電動車両のコスト性能（現状及び将来目標）

### 次世代電池の技術開発戦略

○ さらに、研究開発戦略を ①改良 ②先進 ③革新 の3フェーズに分け、次世代自動車用電池の開発の目標を明確化。  
○ 開発目標をベースにNEDOで2007年度から技術開発プロジェクトを開始。

＜パッケレベルでの電池の性能目標＞ ※重量エネルギー密度で比較

	現状	改良型電池 (2010年)	先進型電池 (2015年)	(2020年?)	革新的電池 (2030年)
性能※	1	1	1.5倍	3倍	7倍
EV用 重量エネルギー密度 [Wh/kg]	100	100	150	—	700
EV用 重量出力密度 [W/kg]	400	1000	1200	—	1000
HV用 重量エネルギー密度 [Wh/kg]	70	70	100	200	—
HV用 重量出力密度 [W/kg]	1900	2000	2000	2500	—
コスト	1	1/2倍	1/7倍	1/10倍	1/40倍
	20万円/kWh	10万円/kWh	3万円/kWh	2万円/kWh	0.5万円/kWh
開発体制	民主導	民主導	産官学連携		大学・研究機関
技術開発プロジェクト (NEDO)	2007年度予算：約17億円 (2007年度～2011年度までの5年間実施)		要素技術開発		次世代技術開発

Fig.8 次世代電池の技術開発戦略（目標性能並びに目標時期）(METI 研究会資料)

他方、既に実現している性能の Li-Ion 電池でもコストさえ下がれば現実に EV、あるいは PHEV が利用できる市場が存在し、最近の動向から近い将来のコスト低下を見込んで内外に多くの市場化計画が発表されている。しかしこれを実現するには前述の技術的課題以外にも多くの課題があり、インフラ整備戦略はこのような現在の状況において限定された性能、市場における EV や PHEV 立ち上がりに必要な諸条件を分析してその市場化、将来への発展をスムーズに推進するための方策を検討したものである。ここでは特に以下の点に注意した対応策、推進策が必要と指摘している。

EV は走行距離が比較的短く、効率の上でも起動停止の多い都市走行に適したものであるが、レンジ確保のために一定量以上の電池搭載が必要である。一般の使用条件、特に交通事情が悪く走行距離が限定された都市内生活利用では電池のサイクル寿命に至らず、初期コストが上昇、ペイバックの障害となる。これらの点から都市内の一定範囲のみを移動、しかも総走行距離の大きい都市内ビジネス、特に各種サービス業務と定常配達業務用が有利である。他方、乗用目的で十分な走行距離がでない場合には電池の徹底利用システム、即ちリース、再利用、などが必要である。そのためには電池の有効活用のための診断技術、保守技術なども必要とされる。更に電池容量を極力削減する代わりに緊急時の支援、例えば急速充電インフラを整備するなどの方策もある。

このような現状の状況にもかかわらず将来のために EV/PHEV を推進する場合、それぞれの地域で固有の課題もあり、また地方が一丸となって推進しなければ、全

国一律の基準、方策で市場を確立、推進することは困難という判断がある。METI（経済産業省）は前記の検討会のもとにインフラ整備検討 WG を組織して具体的な EV/PHEV 推進方策の検討を進め、その報告書に基づいて 08 年度には EV/PHEV タウン構想を発表、それに基づいて都道府県単位で地域の実情に応じた工夫とインフラ整備をすすめるタウンプロジェクト提案を公募した。この結果、首都圏を始め 8 都道府県を対象とした EV/PHEV タウンモデル地域が選定された。現在、これを実現するアクションプランがまとめられており、09 年度後半から EV/PHEV が実際に投入され、今後その成果を評価しながら市場立ち上げを促進していくことが計画されている。

このように現在、世界的に電動車両への期待はふくれあがり、自動車、電池産業の将来をかけてこれを推進する動きが広がっている。一時の FCV の推進ブームに類似しているが、本格的な R&D を必要とした FCV に比べて、不十分ながら現実に存在する技術、システムであり、市場化も近いと予想されるためにより熾烈な競争が展開される様相を示している。更にこの技術は電動車両実現の重要な要素技術とみなされるばかりでなく、今後、原子力電力の平準化、自然エネルギーの安定化等にも必要とみなされ、スマートグリッドの要素技術としての期待も大きい。次世代自動車も含めて、より広い範囲のエネルギーシステムの変革・構築も視野においた技術推進の動きも出ており、今後、単なる電池技術の実用化を越えた環境、エネルギーに関する技術・産業両面の政策として世界各地域での開発競争と標準化などの動きが加速すると考えられる。

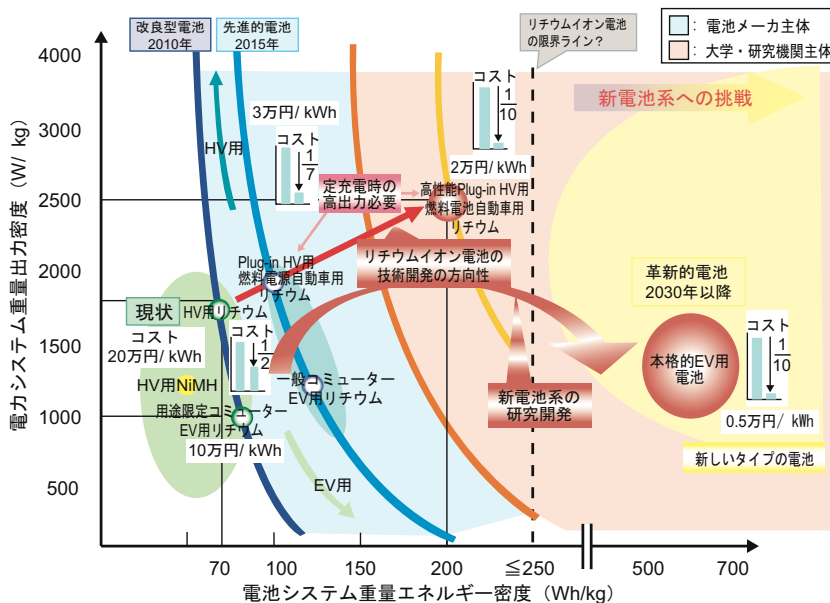


Fig. 9 自動車用電池の開発目標（重量当たりエネルギー並びに出力密度）（METI 研究会報告より）

## 7. おわりに

電動車両は電池と自動車は技術的にも産業としても容易に分離でき、従来のピラミッド型の産業構成、業界系列が抜本的に変化して、過去に実績のない企業、あるいは国が台頭しやすいという意見が多い。確かに日本的な自動車—電池の産業・企業が密着した技術開発や生産の拡大発展は、電池を外部に依存しながら電動化を進める海外企業とは異なるものがある。また電池の供給者が自動車メーカーと明確に区別される欧米では製品取引に必要な標準化に対しての要請も強く、姿勢が異なる面もある。

しかしながらその標準化や、電池のシステム化においては電池メーカー、いわゆる Tier 1 企業、更に自動車メーカーのあいだでも厳しい主導権争いがあり、既にそれぞれの企業も将来は自己企業内に電池システム化技術を取り込みたいという希望は強く、現在、海外で見られる分業自体も安定的かどうかは不明である。技術的には電池、駆動系から車体まで一体化して総合的に最適な設計、製造を実現する方がより高度な製品を実現可能なことは明らかで、我が国の固有の方式は海外の

分業体制に対して製品品質で差別化可能であろう。当然数が物をいう電池製造は量産化の容易な分業体制のほうが個別部品のコスト低減はより早く達成される。特に欧米の自動車メーカーと中国、韓国の電池メーカーが、開放された市場で、一定の標準の元で自由な製品取引を開始した場合には日本の産業に取って大きな脅威となる。しかしながら日本には電池—自動車産業が密接な関係で技術開発を進める一方で、市場を海外に求めようとする電池メーカーも存在し、多様なアプローチを指向する企業が幅広く存在しているので、それぞれの特質を生かした発展が期待できる。

いずれの場合にもこれまで自動車メーカーや個別部品業界が協力して確立してきた高品質の車体製造、システム化技術、あるいは駆動系システムの個別部品、制御システム、機械伝達部品などの開発、製造においては従来の技術蓄積が有利にはたらくことは疑問のないところである。これらの技術を生かして高効率、かつ安全快適な電動車両の製造技術を確立し、対外的な競争力を一層高められることを期待したい。



### <著 者>



石谷 久  
(いしたに ひさし)  
新エネルギー導入促進協議会  
代表理事

昭和 44 年、東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。工学博士、東京大学宇宙航空研究所、同先端科学技術研究センター、同工学系大学院教授（地球システム工学専攻）、慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科教授等を経て、平成 21 年から（社）新エネルギー導入促進協議会代表理事。

東京大学名誉教授。エネルギー資源学会会長。文部科学省科学技術・学術審議会委員（資源調査分科会）、資源エネルギー総合エネルギー調査会委員（省エネ部会他）など歴任。現在経済産業省産業構造審議会委員、総合エネルギー調査会臨時委員、総合科学会議基本政策推進専門調査会専門委員など。