

エネルギー安全保障に向けて  
電気自動車社会へ

エネルギー自給と地球環境保全へ  
まずプラグインハイブリッド自動車を！ その効果は

原子力システム研究懇話会 堀 雅夫

自動車のパワートレインとエネルギー

日本のエネルギー消費の中で輸送部門は4分の1を占めており、この大部分はガソリン、軽油などの石油系燃料によって賄われている。石油などの化石燃料ベースの炭化水素燃料に代わるクリーンで効率的な自動車用のエネルギー・キャリアーとしては、電気と水素が有望視されている。図1により、自動車用へのエネルギーの流れをパワートレイン別に説明する。

内燃機関自動車、ハイブリッド車

現在主流を占めているガソリンや軽油を燃料とする内燃機関自動車(ICEV)およびそれを高効率化したハイブリッド自動車(HEV)は、ガソリンや軽油などの炭化水素燃料を使用するので、その元の一次エネルギーとしては化石燃料に頼ることになる。最近では、バイオマスからつくるエタノールなどのバイオ燃料の利用も始まっているが自動車用燃料に占める再生可能エネルギーの割合は量的に小さい。

電気自動車、燃料電池車

これに対して、充電電池による電気自動車(BEV)と水素燃料による燃料電池車(FCV)が研究・開発・導入されている。自動車用のエネルギー・キャリアーが電気や水素になれば、図1に示すように、自動車用の一次エネルギーとして化石燃料に加えて再生可能エネルギーと原子力の利用が可能になる。

とくに原子力は、発電においても水素製造においても、長期・大量の持続的供給が可能で、炭酸ガスを排出しないので地球環境に優しく、エネルギー密度が高くエネルギー・セキュリティに優れているなどの特長から、日本のエネルギー自給と地球環境の保全に効果がある。

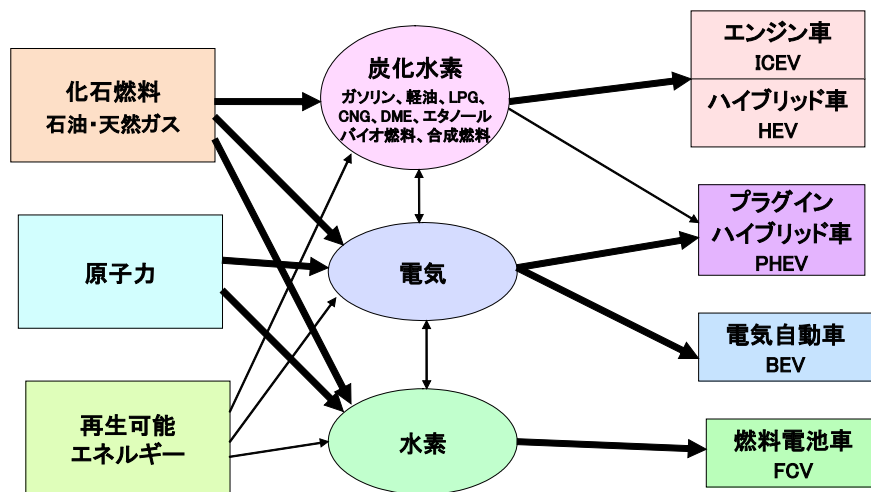
プラグインハイブリッド車

図1の自動車の中で、高燃料効率のハイブリッド車の技術を発展させたプラグインハイブリッド車(PHEV)への期待が、最近急速に高まっている。プラグインハイブリッド車は、技術開発やインフラ整備などの障害が燃料電池車に比べて小さいためより早く導入でき、またこれが普及した場合には電気自動車や燃料電池車の場合と同様に、石油消費を節減出来、輸送部門のエネルギーの効率化、多様化、クリーン化を図ることが出来ると見込まれている。

わが国のエネルギー自給と地球環境保全の観点からすれば、ガソリンや軽油を燃料とする内燃機関自動車から、夜間電力を有効活用できる充電電池による電気自動車へのシフトが

エネルギー資源のないわが国の必然的な課題といえる。とはいえ、電気自動車社会の構築にあたっては、イノベーションすべき課題も残されており、まずはブッシュ大統領も一般教書演説で普及を推奨したプラグインハイブリッド車を「過渡期の自動車」と位置付け、その世界的な開発競争でリードする必要があるだろう。そこで、プラグインハイブリッド車導入の狙い、その動向、導入の効果と課題、エネルギー利用効率、プラグインハイブリッド車の位置付け、今後の方向などを展望する。

図1 各種パワートレインの自動車へのエネルギーの流れ  
二次エネルギー                      エネルギー・キャリアー                      パワートレイン別自動車



プラグインハイブリッド車導入の狙い

ハイブリッド車とプラグインハイブリッド車の特徴を表1に示す。プラグインハイブリッド車は、大容量の電池と商用電源から充電するための差込み(プラグ)を備えたハイブリッド車で、ある距離までは充電電力のみで走行し、電池容量を超える距離はガソリンで走行する。

プラグインハイブリッド車の導入への動きは、米国が最も活発である。その狙いは、米国の車の大型車を除く半数は一日当り走行距離は 20 マイル以下であり、既存のハイブリッド車に電池を増設して充電可能にするなどの改造により、ガソリン消費を相当量減らすことが出来、充電の電気代を入れても燃料費用の節減が可能なことにある。

米国では、石油の大部分が輸送部門で消費されており、また米国の電力の電源構成は、石炭火力 50%、原子力 20%、石油火力は僅か 2%なので、輸送部門での石油節減は米国における目下の最大関心事である輸入石油削減に最も効果がある。

プラグインハイブリッド車を、輸送部門の石油消費削減に同様な効果のある水素燃料電池車などの他の方法と比較した時、プラグインハイブリッド車は燃料配送インフラの整備が不要で、その他の障害も小さく、より早い時期に達成が可能で費用対効果が良い方法と期待されている。

表 1 ハイブリッド車とプラグインハイブリッド車

<b>ハイブリッド自動車</b> HEV (Hybrid Electric Vehicle)	<b>プラグインハイブリッド自動車</b> PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ハイブリッド自動車とは、複数の動力源で駆動する自動車。動力源の主流は、ガソリンエンジンと電気モーター</li> <li>✓ エンジンで機械エネルギーに変換して車を駆動。その一部を電気エネルギーに変換して電池に貯蔵。車の走行状態に応じて電気モーターで駆動</li> <li>✓ ブレーキ時に失われる運動エネルギーを電気として回収利用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ プラグインハイブリッド自動車は、ハイブリッド車に外部から充電するための差込みプラグを備え、車を使用しない夜間などに商用電源から電池を充電</li> <li>✓ ハイブリッド車より電池容量と電力走行機能を増強</li> <li>✓ 走行時には、ある距離までは電池駆動の電力走行をし、電池の充電量が減少すると、エンジン駆動の走行に切り替え</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 走行のエネルギー源は、全部ガソリンなどの内燃機関の燃料</li> <li>◆ 元の一次エネルギーは全部化石燃料</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 走行のエネルギー源は、充電電気とガソリンなどの内燃機関の燃料</li> <li>◆ 元の一次エネルギーは、電源を構成する各種一次エネルギーと化石燃料</li> </ul>

**プラグインハイブリッド車開発・導入への動き**

プラグインハイブリッド車導入に関する米国と日本における主な動向を表2に示す。

**カリフォルニア大学、電力研究所**

プラグインハイブリッド車は、カリフォルニア大学 Davis 校の Frank 教授が古くから研究してきており、ここ 15 年間に 8 台の車を試作して性能を調べている。

また、電力会社系の研究機関である電力研究所(EPRI)が、数年来、プラグインハイブリッド車について、広範な調査・研究・開発プロジェクトを実施し、米国におけるこの分野の大きな推進力になっている。

**ダイムラー・クライスラー社**

DaimlerChrysler 社は、電力研究所と協力して配達用の商用バン Sprinter をプラグインハイブリッド化した車(写真1)を発表し、ドイツと米国で 6 台の試験走行を実施している。これらの試験車両は、電力走行距離 20 マイルのニッケル水素またはリチウムイオン電池と、2.3liter5 気筒ディーゼルまたは 2.7liter V6 ガソリンのエンジンを組み合わせたものを動力源としている。

最近、DaimlerChrysler 社はこの Sprinter を米国国内(40 台まで)および世界各地で走行試験のために顧客に提供することを発表した。プラグインハイブリッド車でこのような実走行テストを行うのは、自動車メーカーでは今のところ DaimlerChrysler のみである。

### CalCars、プリウス+、改造キット

米国では各種の団体、組織がプラグインハイブリッド車の導入促進の運動をしているが、その情報交流の中心になっているのはシリコンバレーにあるカリフォルニア・カーズ・イニシアティブ (CalCars) という団体で、電池会社の Electro Energy と協力してプリウスを改造した「プリウス+」と称するプラグインハイブリッド車 (写真2) をつくり実際に公道を走らせている。

ハイブリッド車をプラグイン化する改造キットは、EDrive Systems からプリウス用が、またカナダの Hymotion からプリウスと Ford 車種用が発表されている。

### ロビー活動、全国キャンペーン

一方、輸入石油を削減してエネルギー自給を確立する国家安全保障の立場から、プラグインハイブリッド車などの省石油自動車導入の政策化を図るロビー活動も活発に行われている。この一環として、「米国安全保障のための自動車・燃料選択法案」が上下両院で提出されている。

また、テキサス州のオースチン市やオースチン電力が中心になって、プラグインハイブリッド車の導入促進を図る Plug-in Partners という組織が結成され、全国的なキャンペーンを行ってきている。

今年の 1 月下旬には、この Plug-in Partners が中心になってプラグインハイブリッド車関係の団体を集めて、ワシントンで導入促進のためのプレス会見を行って、政府への働きかけや広報活動を行った。

### 大統領の新エネルギー・イニシアティブ

プラグインハイブリッド車導入への大きな弾みになったのは、今年 1 月末の大統領一般教書で発表された「新エネルギー・イニシアティブ」である。これは、2025 年までに中東石油への依存度を 75%削減するという国家目標を設定し、この中の自動車への燃料供給目標の 1 番目に、充電電力のみで 40 マイル走行可能なプラグインハイブリッド車用の新型電池技術の開発を挙げている。

その他としては、2012 年までに植物繊維からつくるエタノールのコスト競争力を向上させるための技術開発助成、2020 年までに水素燃料電池自動車を選択可能にするとした目標の加速、を挙げている。

大統領はその後も各所での演説でプラグインハイブリッド車への期待を述べており、新聞、雑誌、テレビなどのメディアも多く取り上げているため米国でのこの車型の認知度は高い。

### 経済産業省の動向調査

日本では、経済産業省が昨年 11 月から「プラグインハイブリッド車に関する動向調査」を委託事業として始めている。

この調査の目的の中で、プラグインハイブリッド車について「CO<sub>2</sub> 排出量が昼間に比べて比較的少ない夜間電力等を有効利用することで、省エネルギー・CO<sub>2</sub> 削減・エネルギー転換 (脱石油) ・大気環境負荷低減等を同時に促進しようというものであり、エネルギー政策上の多くの課題もある程度同時に解決するという効果が期待されている」、また「HEV 技術については現在日本が世界をリードしており、日本の新規産業育成にも貢献してきているが、今後も HEV 技術における日本がイニシアチブをとっていくためには、この様な先進的な HEV 技術の開発動向の現状把握が必要である」と述べている。

### プラグインハイブリッド車ワークショップ

今年の2月には、日本自動車研究所の主催のもと、自動車メーカー、電池メーカー、電力会社、大学、研究所、経済産業省、米国国立研究所、仏国環境エネルギー管理庁などが参加して、プラグインハイブリッド車のワークショップが開催され、電池技術、電気自動車・ハイブリッド車の現状、エネルギーシステムにおける役割などプラグインハイブリッド車の重要課題について講演・討論が行われた。

表2 プラグインハイブリッド車に関する主な動き

<p><b>米国</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>◇ カリフォルニア大学(Davis 校)、米国電力研究所(EPRI)などが研究(2000年以前より)</li><li>◇ 環境保護活動家などが着目(2004年)</li><li>◇ エネルギー自給推進の団体などが政策化へのロビー活動(2005年)</li><li>◇ Daimler-Chrysler が EPRI と共同研究のプラグインハイブリッド車 Sprinter を発表(2004年)、米国で走行試験を開始(2005年)</li><li>◇ プラグインハイブリッド車の導入促進団体(CalCars)がプリウスを改造したプラグイン車を製作・走行、EDrive が改造キットを発表(2005年)</li><li>◇ 電力会社、地方自治体などが導入促進のためのキャンペーンを開始(2005年)</li><li>◇ 電池、自動車パーツの企業がプラグインハイブリッド車への参入を表明(2005年～)</li><li>◇ 大統領一般教書の「新エネルギーイニシャティブ」で新型電池開発の推進を発表(2006年1月)</li><li>◇ ブッシュ大統領が各所の演説でプラグインハイブリッド車への期待を表明(2006年2月～)</li></ul>
<p><b>日本</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>◇ 経済産業省がプラグインハイブリッド車の委託動向調査を公募(2005年11月)</li><li>◇ 日本自動車研究所が「プラグインハイブリッド車ワークショップ」を開催(2006年2月)</li></ul>

写真1 DaimlerChrysler の Sprinter PHEV (EPRI の資料より)

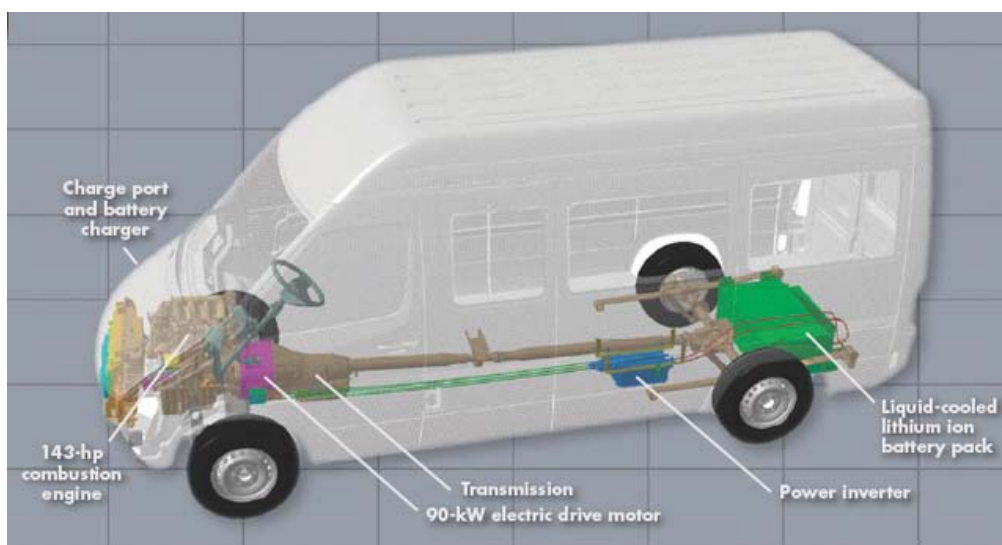


写真2 CalCars のプリウス改造車 Prius+  
(ホワイト・ハウスの新エネルギー・イニシアティブのホームページより)



### プラグインハイブリッド車導入の効果と課題

プラグインハイブリッド車を導入した場合のエネルギーに与える効果については、本誌の昨年 8 月号に、米国における試算結果とそれと同様の手法による日本での試算結果を紹介した。その主な結果を、表3に要約する。

#### 石油の 7 割を節減

この結果から判るように、数十kmの航続距離を持つ電池を搭載することによって、距離の割合にして平均 70%程度の電力走行が可能になる。すなわち、70%程度のガソリンの消費節減ができることになる。その分炭酸ガス排出は削減されるが、代わりに使用する電力の電源構成による炭酸ガス排出分が加わる。

### 電力走行費用は 1/3～1/5

走行費用に関しては、電力走行はガソリン走行に比べて 1/3(米国)および 1/5(日本)程度と安い。日本の場合はガソリン税が高いが税金分を除いた計算でも 1/2.8 となり、走行経費に関しては電力走行の方が経済的である。

### 夜間の電力需要が増大

対象としている車種の現在の保有台数が仮に全部プラグインハイブリッド車になったとして、この充電を夜間 8 時間で行う場合の必要電力を計算すると、米国 422 GW、日本 35 GW(1 GW は 100 万 KW)となる。

米国では現在の昼夜の需要差などの設備余力を考慮しても 200 GW 程度の新規設備は必要であり、これを原子力発電かその他の環境負荷の小さい発電で行うのが望ましいとしている。

### 電源構成のシフト

日本では、この充電電力は現在の昼夜の最大需要差より小さいので、量的には新たな発電設備は必要ない。しかし現在の深夜時間帯電力の相当部分は、原子力発電の定格負荷運転により供給されているので、新たな需要は化石燃料による火力発電の夜間運転を増やすことにより供給することになる。それ故、エネルギー自給と地球環境の点からは、プラグインハイブリッド車の導入と並行して、電源構成を化石燃料から原子力発電や再生可能エネルギーなどにシフトしていくことが望ましい。

### 実用化の課題:電池

このようにプラグインハイブリッド車は、エネルギー、環境、経済性などで大きな効果が期待できる車であるが、電池の性能・コストに解決すべき課題があるため、多くの自動車メーカーは市場に提供するまでにはまだ相当時間がかかるという慎重な見方をしている。

前出のワークショップでも、トヨタ自動車はプラグインハイブリッド車に対するスタンスとして、

- ◆ 長期的には CO<sub>2</sub> 削減と燃料消費削減効果が既存インフラ活用の範囲で期待でき、将来のエネルギー多様化対応として注目すべきハイブリッド派生技術
- ◆ 但し、電池に関する課題(寿命、容量、コスト)のブレークスルーが不可欠であり、最新技術のレベルを用いても現時点での実用化は困難

と述べている。

表3 プラグインハイブリッド車導入の効果(試算結果)

	米国	日本
対象車種 保有台数	軽量自動車 乗用車、軽量トラック、SUV ピックアップ、など 合計 2億 2500 万台(2004 年)	自家用乗用車 登録車 4262 万台 軽自動車 1182 万台 合計 5400 万台(2003 年度)
一日当りの 平均走行距離	(半数の車は 20 mile 以内)	実働 1 日当り 登録車 41 km 軽自動車 28 km
電池による 航続距離(想定)	35 mile	登録車 60 km 軽自動車 35 km
石油節減効果	74% 削減	70% 削減
電力走行費用	ガソリン走行の 1/3 程度 (ガソリン\$2/gallon 内税金\$0.35 電力料金\$0.089/KWh)	ガソリン走行の 1/5 程度 (122 円/リットル、内税金 53.8 円 深夜電力料金 10 円/KWh)
全必要電力 (夜間 8 時間充電)	422 GW	35 GW
新規必要設備容量	200 GW	特になし (現在の昼夜需要差の範囲内)
参考	R. Uhrig, Trans. of the ANS, June 2005, Volume 92 p.86- 87	堀 雅夫「月刊エネルギー」 2005 年 8 月号 p.36-39 (車両効率など一部変更)



## 自動車のエネルギー利用効率

### エネルギー効率の向上

地球環境保全の見地から、一次エネルギーとして、当面は炭酸ガスの大気中排出を抑制しつつ化石燃料を利用するとしても、長期的には再生可能エネルギーと原子力の利用を増やしていくことになる。

今世紀中は、これら全ての一次エネルギーを並行的に使用していくことになると考えられるが、その際に環境、資源、経済の何れの面からもエネルギー利用効率の向上が重要になってくる。

### 化石燃料ベースの利用効率

一次エネルギーとして化石燃料を使用する場合について、各種パワートレインの自動車のエネルギー利用効率の値を表 4 に示す。

この表には石油井・天然ガス田からタンク・電池までのエネルギー効率(Well-to-Tank 効率、燃料効率)、およびタンク・電池から車輪までのエネルギー効率(Tank-to-Wheel 効率、車両効率)、さらにこれらを総合したエネルギー効率(Well-to-Wheel 効率、総合効率)に分けて示してある。(これらの数値は概略・推定値で、その出典、根拠は表の注釈に記載してある。プラグインハイブリッド車については、参考値として、電気自動車とハイブリッド車の値に電力走行割合と重量増を考慮したものを示してある)

表 4 のエネルギー利用効率から見て、化石燃料ベースの場合は将来のパワートレインの究極的な方向としては、電気自動車、燃料電池車へ向かうのが望ましいと考えられる。

### 原子力ベースの利用効率

一次エネルギーとして原子力を使用する場合を想定して、原子力による発電・水素製造による電気と水素を電気自動車と水素燃料電池車に供給する時のエネルギー効率の値を表 5 に示す。原子炉から自動車へのエネルギーの流れにおいては、原子炉からタンク・電池までを燃料効率、タンク・電池から車輪までを車両効率、これを総合した原子炉から車輪までを総合効率とする。

原子炉として実用になっている軽水炉(温度は約 300℃)と、高温を利用して発電および水素製造効率を高めた高温ガス炉(開発中で温度は約 900℃)の2炉型について、それぞれ代表的なプロセスを用いて原子炉の熱エネルギーを電気および水素に転換する場合の効率を示してある。

軽水炉の場合は蒸気タービンによる発電、およびその電気からの電気分解による水素製造、高温ガス炉の場合はガスタービンによる発電、および高温原子炉熱を用いた熱化学法による水素製造について、それぞれ電気を電気自動車へ、水素を燃料電池自動車へ供給する場合の効率である。

### 将来の可能性

表 5 から判るように、原子力ベースの場合の総合効率は、化石燃料ベースの場合とは逆で、電気自動車の方が燃料電池車より高くなる。化石燃料の場合には発電は熱機関サイクルを経るが水素製造は化学プロセスによるのに対して、原子力の場合はその熱エネルギーを電気や水素に転換するときに両方とも熱機関サイクルを経るので熱力学的効率の制限を受けするため、車両効率の良い電気自動車の方が燃料電池車より総合効率が高くなる。

将来、化石燃料ベースおよび原子力ベースの場合でも、プラグインハイブリッド車から電気自動車、燃料電池車への移行、さらにバイオ燃料、合成炭化水素燃料、あるいはこれらのハイブリッドなど、自動車の用途や走行パターンによって、多様な可能性が想定される。

なお、水素を利用する場合には、化石燃料ベースの場合は炭酸ガス回収・貯蔵を伴うため、また原子力ベースの場合は製造規模が大きくなるため、何れの場合も将来は集中型水素製造になり、パイプラインなどの水素流通ネットワークの整備は必須と考えられる。原子力は水素供給においても、電力供給の場合と同様にエネルギー密度、供給可能量から見て、ベースロード(基底負荷)の役割を担うことになる。

表 4 自動車の総合エネルギー効率 -- 化石燃料ベースの場合

	燃料効率 Well to Tank		車両効率 Tank to Wheel		総合効率 Well To Wheel	
ガソリン車 ICEV	石油井	88 %	タンク	16 %	ホイール	14 %
ガソリンハイブリッド車 HEV		88 %		32~37 %		28~32 %
プラグインハイブリッド車 PHEV						(28~29 %)
電気自動車 BEV	天然ガス井	50 %	배터리	70 %		35 %
水素燃料電池自動車 FCV		58~70 %	タンク	50~60 %		29~42 %

- ICE-V, HEV, FCV(ハイブリッド仕様)の値はトヨタ自動車2003年資料による。P-HEV、B-EVは試算値
- EVの電力は天然ガス改良型複合発電、原料利用率95%、発電効率55%(LHV)、送配電ロス5%を仮定
- EVの車両効率はUhrig(ANS, 2005)による値(車重増15%考慮)。P-HEV総合効率はEV走行75%を想定

表 5 自動車の総合エネルギー効率 – 原子力ベースの場合

	発電/水素製造方法 自動車駆動方式	燃料効率 原子炉→ 電池・タンク	車両効率 電池・タンク →車輪	総合効率 原子炉 →車輪
軽水炉	発電 電気自動車	30%	70%	21%
	発電→電解水素製造 燃料電池車	23%	50～60%	12～14%
高温ガス炉	発電 電気自動車	45%	70%	31%
	熱化学水素製造 燃料電池車	45%	50～60%	23～27%

- ◇ 発電効率：軽水炉 32%、高温炉 47%
- ◇ 水素製造効率(LHV基準)：電気分解法 80%(電気から)、熱化学法 50%(熱から)
- ◇ 電力送配電ロス：5%、水素圧縮配送ロス：10%

### プラグインハイブリッド車の位置付けと今後の方向

今後、ピークオイルへの懸念、原油の値上がり、地球温暖化などの世界規模の問題と、エネルギー確保・自給への各国の対応がより切迫してくることが想定される。このような中、他の代替燃料車と比べて実用化への障害が比較的 low、かつ省石油、省エネルギー効果が大きいと考えられるプラグインハイブリッド車への期待は高まっていくと考えられる。本格的な市場への投入は 2015～2020 年頃との予測もあるが、その時期は電池などの技術開発とともに、国の推進政策によって左右されると考えられる。

前出のワークショップのパネルセッションで、経済産業省(自動車課)からプラグインハイブリッド車の位置付けについて、次の主旨のコメントが述べられた。すなわち、プラグインハイブリッド車はハイブリッド車の電気自動車化を推し進めるもので、ハイブリッド車の更なる省エネ化、エネルギー源として電気を利用することによる石油代替効果、電気自動車実用化へのブリッジ効果、燃料電池自動車の実用化への波及効果の点で大きな意義がある。しかし、この実用化には電気自動車と共通する、電池の性能向上とコストダウン、規格の標準化などの課題を解決する必要がある。

プラグインハイブリッド車は、電池の性能・コストの課題が解決できれば、燃料電池車などに比べて早い時期の実用化が期待できる。日本はハイブリッド車技術で先頭を行っているため、プラグインハイブリッド車においても国際競争力の更なる向上のために、技術開発と普及促進への国のインセンティブ政策を期待したい。

プラグインハイブリッド車は、石油消費の削減、車のエネルギー利用効率の向上、電力需要の平坦化に効果があり、この導入と並行して電源構成を自給可能でクリーンな発電に

シフトしていけば、日本のエネルギー自給と地球環境の保全に資するものである。

長期的には、プラグインハイブリッド車から、電気自動車、燃料電池車、あるいはバイオ燃料、合成燃料、それらのハイブリッドなど、効率化、クリーン化に向かった多様なアプローチが期待できる。