

このファイルは自動車技術会の転載許諾条件により印刷不可に設定してあります

プラグインハイブリッド車導入の環境・エネルギーへの効果*

堀 雅夫¹⁾

Plug-in Hybrid Electric Vehicles for Energy and Environment

Masao Hori

The plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) can contribute to petroleum saving, overall energy efficiency and economy, electric power demand flattening, and, by shifting the electric power source to self-sufficient and cleaner energies, energy security and environmental conservation. Average fractions of travelling by the electric vehicle mode are estimated for capacity of equipped battery based on the statistical date on daily travel distance of Japanese vehicles. The favorable effects of PHEV introduction are discussed quantitatively.

Key Words: Energy, Efficiency, Environment, Plug-in, Hybrid Vehicle, Electric Vehicle ①

1. ま え が き

全エネルギー消費の中で輸送部門の消費は日本では約4分の1を占めており、このエネルギーの大部分がガソリン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が、電気自動車 (BEV) はその価格と航続距離などに課題があり、また水素燃料電池車 (FCV) は価格とインフラ整備などに課題があり、これらを一般的な用途へ実用的に導入するまでには未だ時間が掛かると見られている。これに対して、ここ1~2年とくに米国で輸入石油削減のために注目されているのが、プラグインハイブリッド車 (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) である。これはエンジンと電気モーターを有するハイブリッド車 (HEV) の電池の容量を大きくして、外部から充電するための差込プラグを備えた車である。車を使用していない夜間などに商用電源から電池を充電し、走行時には最初の一定距離は電池と電気モーターによる電力走行をし、電池の充電量が一定値まで減少した後はエンジン駆動のハイブリッド走行に切り替わる⁽¹⁾。

使用するエネルギーで見ると、ガソリンエンジンの HEV の場合は駆動するエネルギー源はすべてガソリン (石油) であるのに対して、PHEV の駆動エネルギー源は、ハイブリッド走行時は石油であるが、電力走行時は充電電力の電源構成 (化石燃料、原子力、再生可能エネルギーなど) による。 (Fig. 1)

米国の電源構成は、石炭 50%、原子力 20%、石油は僅かに 2% であるために、PHEV 導入の石油削減効果は大きい。PHEV のエネルギー効率、一般にエンジン車 (ICEV) より高いので、高効率によるエネルギー節減・炭酸ガス

排出削減も期待でき、充電電力に占める再生可能エネルギーや原子力の割合がさらに大きくなれば、その分炭酸ガス排出が小さくなる。

米国の車 (大型を除く) の半数は一日の走行距離が 20 マイル以下なので、適当な容量の電池を搭載した PHEV を使用することにより、相当量の石油削減が期待できる。例えば、軽量輸送用自動車 (乗用車、軽量トラック、SUV、バン、ピックアップなど 2004 年現在の保有台数は 2 億 2500 万台) に 35 マイルの航続距離の電池を搭載して PHEV にした場合には、石油消費量を平均 74% 削減できるという試算が出されている。また、電池の充電は、家庭のコンセントから夜間電力を使用して容量的にも問題なく出来る、電力走行の費用はガソリン走行の 1/2~1/3 と安価になる、などの考察も行っている。PHEV は現在検討されている FCV などの他の方法に比べて、インフラ整備も必要なく、より簡易で、より早く達成でき、費用対効果も良いと結論している⁽²⁾⁽³⁾。

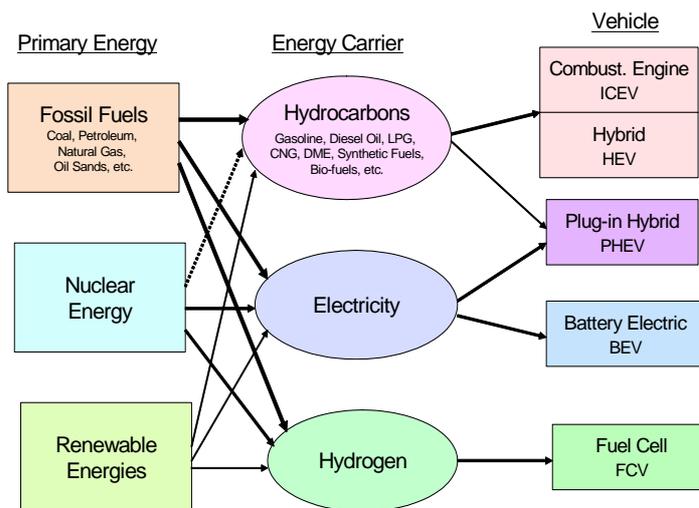


Fig. 1 Energy Flows to Vehicles with Various Drive Trains

* 2006 年 7 月 11 日受理。2006 年 5 月 24 日自動車技術会

¹⁾ ユニバーサルエネルギー研究所 (105-0001 港区虎ノ門 5-3-20) (Email: mhori@mx.mesh.ne.jp)

このファイルは自動車技術会の転載許諾条件により印刷不可に設定してあります

このように期待されている PHEV であるが、自動車メーカーから発表されているのは、ダイムラー・クライスラーが米国電力研究所 (EPRI) と共同開発した配達用の商用バン「スプリンター」(米国で数台試験走行中) のみである。その他、米国では、大学や小企業が既存のハイブリッド車に電池増設などの改造をした車の走行や、改造キットの発表などを行っている。PHEV の商業的導入には、使用する電池 (リチウムイオン) のコストや、PHEV 使用条件 (大きい充放電深度や高い入出力) における寿命などの課題を解決する必要があると言われている。

米国では、2006 年 1 月に発表された新エネルギー・イニシアティブでバイオ燃料の活用とともにハイブリッド車・電気自動車用の新電池の技術開発が強調されており、議会における石油削減のための自動車・燃料選択法案の審議や、地方自治体や電力会社などの PHEV の導入促進キャンペーンなど、PHEV の開発・導入への動きが活発化している。

PHEV の導入によって運輸部門の石油消費を削減する方法は、わが国においても輸入石油依存から脱却してエネルギー・セキュリティを向上させ、また炭酸ガス排出を削減する上で、効果的な方法と考えられる。

以下、日本に PHEV を導入した場合のエネルギー・環境への効果に関する評価について報告する。

2. 評価の想定と結果

PHEV を日本に導入した場合の評価には、前章で引用した Uhrig の文献を参考にし、同様の手法を用いた。

2.1 対象とした車種

本評価で PHEV を導入する対象とした車種は、「自家用乗用車」(これを普通車・小型車などの「登録自動車」、および「軽自動車」に分類) とし、これら対象車種の保有台数、走行に関するデータは、国土交通省・陸運統計要覧の 2003 年度統計データから、Table 1 に示す値を使用した。

2.2 PHEV 性能の仮定

本評価においては、ICEV の車両効率 (タンク、エンジン、から車輪までのエネルギー効率) として 16%、これに相当する同条件での BEV の車両効率 (充電器、電池、モーターから車輪までのエネルギー効率) として 70% を想定した。PHEV は大容量電池の搭載により重量が増加するので 15% の燃料消費率の補正を行った。これらの仮定は、ICEV の車両効率 (Uhrig は 20% と仮定) 以外は Uhrig の試算と同じである。使用した PHEV (電力走行) /ICEV の車両効率の比は、この想定では 3.8 となる。

2.3 一日当りの走行距離分布の推定

対象とした登録自動車と軽自動車の実働一日当り平均走行距離の分布については、国土交通省の自動車輸送統計報

告書の自家用乗用車・距離帯別輸送人員の統計データ⁽⁴⁾から、Fig. 2 に示す関係を推定した。

この統計の元データは、無作為に抽出した自動車の一定期間内各日の走行距離、走行目的、乗車人員などの調査であるが、現在入手可能な公開データはこれらを計算処理して走行距離帯別の輸送人員に整理したものである。本評価では実働している車の一日当り走行距離の分布が必要なので、統計データから計算される平均走行距離が Table 1 の実働一日当り平均走行距離と合うように補正することによって、距離帯別の車両数の推定を行った。(走行距離帯別車両数のデータを入手できれば、より確実な推定が可能になる)

2.4 電池容量と電力走行割合の関係

登録自動車および軽自動車について、上記統計データから推定した、電池容量 (航続距離) と電力走行割合 (全走行距離に対する電力走行の距離の割合) を、Fig. 3 に示す。なお、公表されている走行距離の頻度データは、10~100km が毎 10km、100km 以上が毎 100km の距離帯別に整理されているため、この推定のために先ず回帰曲線を求め、その後毎 1km 距離帯の数値積分を行った。

Table 1 Data Used for Evaluation of PHEV

	Registered Vehicles	Light Vehicles
Number of cars	42,620,000	11,820,000
Average distance traveled per day worked per car, km	40.7	27.9
Working ratio *	66.9	72.7
Average distance traveled per day per car, km	27.2	20.3
Average distance traveled per year per car, km	9,900	7,400
Fuel consumption per car per Km **, liter/km	0.12	0.09

* Working ratio = (Working days x cars / Existing days x cars) x 100
** Gasoline engine

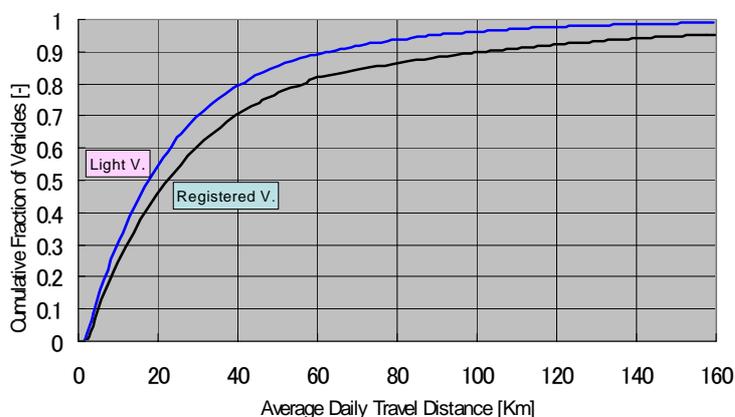


Fig.2 Driving Patterns of Japanese Passenger Vehicles
-- Registered Vehicles and Light Vehicles --

一日当り平均走行距離と車両数割合分布の関係 (Fig. 2) から、電池容量と電力走行距離割合分布の関係 (Fig. 3)

このファイルは自動車技術会の転載許諾条件により印刷不可に設定してあります

を求めるには、次の関係式を使用した。

Electric-Run Fraction (for battery capacity = X) = $\frac{\sum\{X * \Delta V\} \text{ (for } X=0 \text{ to } X) + (1-V) * X}{\sum\{X * \Delta V\} \text{ (for } X=0 \text{ to maximum)}}$

X: Travel distance, also battery capacity in distance [Km]

V: Cumulative fraction [-] of vehicles to distance X (Fig.2)

ΔX : Increment of distance = 1 [Km] in this evaluation

ΔV : Fraction [-] of vehicles between X and X+ ΔX

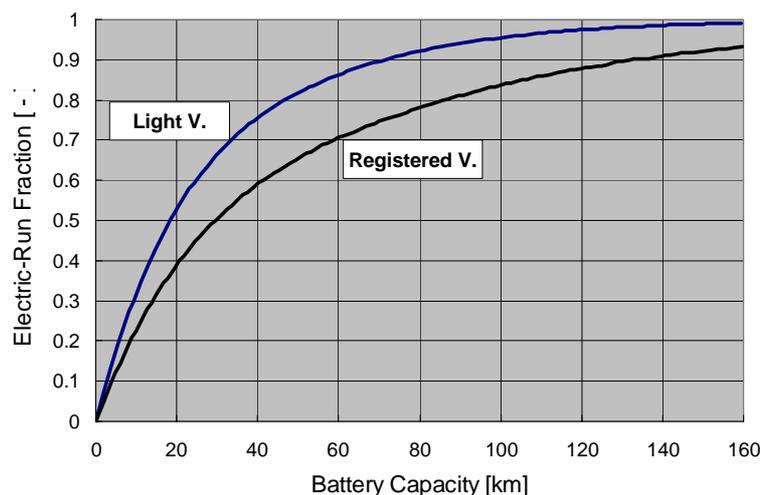


Fig.3 Electric-Run Fraction vs. Battery Capacity in Distance -- Registered Vehicles and Light Vehicles --

Fig. 3 から、登録自動車には 60km の航続距離の電池、軽自動車には 35km の航続距離の電池を搭載することにより、電力走行の距離の割合は約 70% になると推定される。電力走行はすべて充電電力によるので、その分のガソリン消費を削減できることになる。

因みに、米国における同様の推定 (1995 年 NPTS データ基準) では、70%電力走行には航続距離が約 55mile の電池 (EPRI の MWP 法) または約 80mile の電池 (SAE 小委の Utility 法) が必要となる⁶⁾。米国の自家用車は実働 1 日当りの平均走行距離が日本より長いので、同じ割合の電力走行をさせるにはより長い航続距離の電池が必要になる。

日本の軽自動車は 1 日の走行距離が短く、且つ軽量のため、比較的小容量の電池でも電力走行割合を高くできるので、早い時期の導入が可能と考えられる。パワートレインも、パラレル・ハイブリッドやフル・ハイブリッドよりシンプルなシリーズ・ハイブリッドにしたり、ユーザーの走行パターンにあった容量の電池を注文に応じて搭載するなど、重量増を抑える方法も考えられる。

2.5 充電に必要な電力

使用後の充電は 23 時～7 時の深夜電力帯の 8 時間に行うとして、必要電力は登録自動車が容量一杯の 60km 走行の場合には 100V・23A、軽自動車が容量一杯の 35km 走行の場合には 100V・10A

となり、通常の家計の設備容量の範囲内である。

対象とした登録自動車と軽自動車の 2004 年の保有台数 (合計で約 5400 万台) が将来 PHEV 化した時に深夜 8 時間で充電するとして、このために新たに必要となる電源容量は約 35GW (100 万 KW 発電所 35 基相当) と計算される。現在のピーク電力と深夜時間帯の電力需要の差は～50GW 程度なので、量的には新たな発電所の建設は必要なく、昼間と深夜の負荷が平坦化され、発電プラントの稼働率が向上する。

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賄うことになる。それ故、エネルギーセキュリティ・地球環境の観点からは、PHEV の導入に伴って電源構成を化石燃料発電から原子力発電や再生可能エネルギーなどの自給可能・クリーン発電にシフトしていくことが望まれる。

2.6 電力走行のコスト

PHEV 電力走行の走行コスト (1km 走行当りの電力料金) を ICEV ガソリン走行のコスト (1km 走行当りのガソリン費用) と比較してみる。充電は 23 時～7 時の時間帯に行うとして深夜電力料金 10 円 /KWh (実際は基本料があるため使用量により料金が変わるが充電に使用する電力量の範囲での大凡の平均値) を用い、ガソリン費は 122 円/リットルを用いた。

	PHEV 電力	ICEV ガソリン
登録自動車	3.0	14.6
軽自動車	2.3	11.0

[円/km]

その結果は上の比較のように、エネルギー費用に関しては、PHEV 電力走行は ICEV ガソリン走行の約 1/5 と経済的である。この差はガソリン税 (53.8 円/リットル) に因るところが大きい。ガソリン税を除いた金額で比較すると電力走行はガソリン走行の約 1/2.8 となり、一般的に電力走行の方がエネルギー費は安い。

PHEV の平均的走行条件を 70%電力走行・30%HEV 走行とすると、走行費用は登録自動車 4.3 円/km、軽自動車 3.2 円/km となり、HEV のそれぞれ 6.3 円/km、4.8 円/km より経済的である。なお、HEV の車両効率 37%、PHEV の重量増による燃料消費率補正 15% を仮定した。

2.7 炭酸ガス排出低減

PHEV 導入による炭酸ガス排出の低減効果は次のように評価した。

PHEV 電力走行では、車からの排出はゼロで、使用した電力の発電時の排出を計上する。この発電に伴う排出は使用する一次

このファイルは自動車技術会の転載許諾条件により印刷不可に設定してあります

エネルギーの構成や発電効率などによって変動するが、ここでは年間平均の炭酸ガス排出原単位 0.381 kg-CO₂/KWh (東電2004年度の実績) を用いる。なお、電力の炭酸ガス排出原単位は削減努力が続けられており、2010年度には全電力平均で 0.36 kg-CO₂/KWh に下がる見通しが示されている。ガソリンの炭酸ガス原単位として、環境省ガイドラインの 2.32 kg-CO₂/liter を用いる。これらの原単位と、PHEV/ICEV の車両効率の比 (3.8) および燃料消費率から、下のように PHEV 電力走行時の炭酸ガス排出量は ICEV ガソリン走行の 1/2.4 程度の低い値となる。

	PHEV 電力	ICEV ガソリン
登録自動車	0.115	0.28
軽自動車	0.087	0.21

[Kg-CO₂/km]

70%電力走行・30%HEV 走行の PHEV の炭酸ガス排出量は、HEV の炭酸ガス排出量がもともと低いので、上記の PHEV 電力走行の場合とほぼ同じ低い値になる。

Table 2 Energy Utilization Efficiency for Various Power Train Vehicles 'Well to Wheel' Efficiency -- Fossil Fuels

	Well to Tank Efficiency	Tank to Wheel Efficiency	Well To Wheel Efficiency
Gasoline Engine Vehicle ICEV	Oil Field 88 %	Tank 16 %	Wheel 14 %
Gasoline Hybrid Vehicle HEV		32~37 %	
Plug-in Hybrid Vehicle PHEV	Natural Gas Field 50 %	Battery 70 %	(29~30 %)
Battery Electric Vehicle BEV		35 %	
H ₂ Fuel Cell Vehicle FCV		Tank 50~60 %	29~42 %

- > The values for ICE-V, HEV, FCV are from a Toyota Motors's 2003 presentation. The values for FCV are for the hybrid specification.
- > Electric Power for BEV is based on the natural gas ACC power generation of 55% thermal efficiency, 5% loss from well to station, and 5% loss for electricity transmission and distribution.
- > EV battery-to-wheel efficiency is based on Uhrig (ANS, 2005).
- > PHEV adds 15% to the energy required by weight increase. PHEV well to wheel efficiency is estimated for 70% EV run.
- > The heating values are based on the Lower Heating Value (LHV).

3. 自動車のエネルギー利用効率に関する考察

自動車用の一次エネルギーとしては、当面は石油などの化石燃料を炭酸ガスの大気中排出を抑制しつつ使用していくとしても、長期的には地球環境保全とエネルギー自給の見地から再生可能エネルギーや原子力の利用を増やしていくことが必要と考えられる。

實際上、当分の間は化石燃料、原子力、再生可能の一次エネルギーを並行的に使用していくことになり、その際自動車のエネルギー利用効率を向上させることは、環境、資源、経済の何

れの面からも重要と考えられる。

3.1 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を Table 2 に示す⁽⁶⁾。

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た。PHEV については、HEV と BEV の値から電力走行割合と重量増を考慮して推定したものを参考値として示してある)

Table 2 の HEV, PHEV, BEV, FCV のエネルギー利用効率はどれも 30%~40%台の高い値を示している。これら効率の値には幅が

あるので、パワートレインによる差異は効率の値の差より、むしろ、HEV が石油ベースであるのに対して、PHEV, BEV, FCV はエネルギーキャリアーとして電力、水素を使用するので、ベースとなる一次エネルギーの多様化が図れる点にあると言える。

3.2 原子力ベースの利用効率

一次エネルギーとして将来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・水素を電気自動車・水素燃料電池車に供給する時のエネルギー利用効率の値を推定する。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⁽⁷⁾。

原子炉として実用になっている水冷却の軽水炉 (LWR, 温度は約 300°C), ウラン利用効率の良いナトリウム冷却高速炉 (SFR, 温度は約 550°C), 高温を利用して発電・水素製造効率を高めた高温ガス炉 (VHTR, 温度は約 900°C) の 3 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 (推定値) を Table 3 に示す。

軽水炉の場合は蒸気タービン発電およびその電気から水の電気分解による水素製造、ナトリウム炉の場合は蒸気タービン発電および中温の原子炉熱を用いた天然ガス水蒸気改質法による

このファイルは自動車技術会の転載許諾条件により印刷不可に設定してあります

水素製造、高温ガス炉の場合はガスタービン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 (BEV) へ、水素を燃料電池自動車 (FCV) へ供給する場合の効率である。

Table 3 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異なり、BEV の方がFCV より高効率である。化石燃料の場合、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カルノーサイクルを最大とする熱力学的効率の制限を受けるため、車両効率の良い BEV (電力走行割合の大きい PHEV も同様) の方が FCV より総合効率が高くなる。ただし、原子力加熱・天然ガス水蒸気改質法水素製造の場合は、化石燃料からの場合と同様に熱機関サイクル効率の制限外のため、燃料効率が高くなり、総合効率も FCV の方が BEV より高くなる。

将来、化石燃料ベースおよび原子力ベースの何れの場合においても、HEV, PHEV, BEV, FCV, さらにバイオ燃料, 合成燃料, あるいはこれらのハイブリッドなど、自動車の種類・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、一次エネルギーを電気, 水素, 合成燃料などに転換する際に、将来は化石燃料ベースでは炭酸ガス回収・貯蔵の必要性から、また原子力ベースでは経済規模から、何れも規模の大きい集中型のエネルギー転換プラントになると考えられる。そのため、電力網と同様に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なり、原子力は電力と同様に水素の供給においても、そのコスト構造・供給可能量などからベースロード (基底負荷) の役割を担うことになると考えられる。

4. 結 語

プラグインハイブリッド車 (PHEV) は、石油消費の削減, 車のエネルギー利用効率の向上, 電力需要の平坦化などに効果があり、さらに PHEV の導入に伴って電源構成を自給可能・炭酸ガス排出削減可能な原子力発電などにシフトしていけば、日本のエネルギーセキュリティと地球環境の保全に貢献できる。

現在は、PHEV 用電池の技術やコストに課題があるが、各国で開発加速の動きがあり、燃料電池車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おり、これを本格的な PHEV に発展させる素地は十分にあると考える。

自動車の総合エネルギー効率から見ると、長期的には PHEV か

らさらに、電気自動車, 燃料電池車, あるいはそのハイブリッドなど、より高度な目標に向かっていくことになると思う。

Table 3 Energy Utilization Efficiency for Electric and Fuel Cell Vehicles 'Nuclear Reactor to Wheel Efficiency'

Nuclear Reactor	Electricity / Hydrogen Vehicle Power Train	Efficiency Reactor → Battery/Tank	Efficiency Battery/Tank → Wheel	Overall Efficiency Reactor → Wheel
LWR	Steam Turbine BEV	30%	70%	21%
	Electrolysis FCV	23%	50~60%	12~14%
SFR	Steam Turbine BEV	39%	70%	27%
	Nuclear-Heated Steam Methane Reforming FCV	77%*	50~60%	38~46%*
VHTR	Gas Turbine BEV	45%	70%	31%
	Thermochemical FCV	45%	50~60%	23~27%

▶ Thermal efficiency: For LWR steam turbine 32%, for SFR 41% and for VHTR gas turbine 47%
 ▶ Efficiency of H₂ production: By electrolysis 80% from electricity and by thermochemical 50% (LHV)
 ▶ Efficiency of H₂ production by reforming 85% (* Based on the sum of both primary energies, LHV)
 ▶ Transmission & distribution loss for electricity: 5%, Compression & transportation loss for H₂: 10%

[参 考 文 献]

- 堀 雅夫：従来ハイブリッド車 vs プラグイン・ハイブリッド車, 月刊エネルギー, Vol. 38, No. 08, p.36-39 (2005)
- Robert Uhrig: Using Plug-in Hybrid Vehicles to Drastically Reduce Petroleum-Based Fuel Consumption and Emissions, The Bent Of Tau Beta Pi, Spring, p.13-19 (2005)
- Robert Uhrig: Nuclear Generated Electricity for Hybrid-Electric Vehicles, Transaction Of the American Nuclear Society, Vol. 92, p.86-87 (2005)
- 国土交通省総合政策局情報管理部：自動車輸送統計報告書, 2004年2月分, 6月分, 10月分 (2005)
- Robert Graham: Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options -- Final Report, EPRI-1000349, Electric Power Research Institute (2001)
- 堀 雅夫：まずプラグインハイブリッド車を！その効果は, 月刊エネルギー, Vol. 39, No. 05, p.29-35 (2006)
- 堀 雅夫：プラグインハイブリッド自動車導入の効果 - 輸送部門への原子力エネルギー供給, 日本原子力学会「春の年会」予稿集, E26 (2006)