

電気自動車の普及と自動車の Well to Wheel の

CO₂ 排出量低減の施策

Promotion of Electric Vehicles and Measures to Reduce Well to Wheel CO₂ Emissions of Vehicles

畑村 耕一

Koichi Hatamura

広島大学大学院工学研究科客員教授

Visiting Professor at Hiroshima University

1. まえがき

過去に世界的な電気自動車 (EV) ブームが2回あって、今回は3期目のブームが起こっている。第1, 2期はそれぞれ「マスキー法 (排ガス規制)」と「ZEV (ゼロエミッション) 規制」に端を発したものだが、今回は「CO₂ 規制強化」への対応として始まったものだ。最近の新聞報道にあるように、2010年代に入って急速にEVの普及が始まっているだけでなく、欧州の一部の国ではエンジン車を締め出そうとの政治的動きもある。

EVには価格や充電設備などの多くの問題が指摘されているが、ここではより本質的なCO₂ 排出量について考える。図1は2030年ころをイメージして再生可能エネルギー (再エネ) 発電が大量導入された電力網とEV, ハイブリッド車 (HEV), 天然ガス自動車 (NGV) のCO₂ 排出量を描いたものだ。EVについては、発電所毎にCO₂ 排出量を記述した。EVのWell to WheelのCO₂ 排出量として、一般的に電源平均の値80g/kmを使っているため、EVが普及すれば自動車のCO₂ 排出量は減少すると評価されている。

電気には色が付いてないのでどの発電所の電気で充電しているかは自由に決めることができるように思われるが、電力需要が増減した場合にどの発電所の電力が増減するかが分かると、充電に利用している発電所を特定できる。例えば、EVの普及を中止して充電需要がなくなった場合に石炭火力を止めると、走行と電池製造を合わせて192 (=182+10) g/kmのCO₂ 排出量が減少する。代わりにHEVが走ると129g/kmのCO₂ が発生する。結果、CO₂ 排出量は192→129g/kmとなって67% (約2/3) に減少することになる。CO₂ 削減を優先する場合 (石炭火力を止める) は、EVではなくHEVを普及させる方が、CO₂ が減少するという重要な事実がここにある。本報告では、EVが本格的に普及した場合の実際のCO₂ の排出量を算出して、それを効果的に削減する方策について考えてみたい。

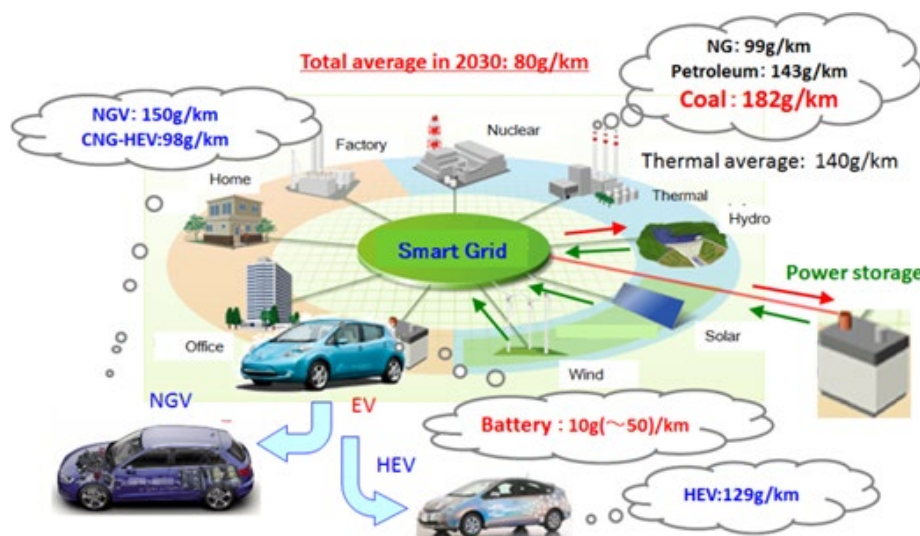


図1 電力網とEV, HEV, NGVのCO₂ 排出量

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 6 2019

2 EVの魅力と課題

筆者がEVと出会ったのは40年以上前、東洋工業（現マツダ）に入社して間もないころ。当時は第1期のEVブームで各社がEVの試作車を作っていた。マツダの試作車は荷台の下に鉛蓄電池をびっしり積み込んだ軽トラックだった。当時の電池の性能では実用化には程遠かったが、その静かでスムーズな走りの快適性に筆者は惚れ込んだ。エンジン車は低速トルクのないエンジンをトランスミッションでつなげて駆動力カーブを作っているのに対して、EVは停止時からトルクを発生して車速が増えても変速がない。電動車両のプロジェクトが中止になってエンジン設計に異動になったあとも、その走りの快適性をクルマの理想として追い続け、「エンジンはないほうがいい」という言葉を筆者のエンジン哲学とした。当時の電池ではエンジンをなくすのは無理なのでせめて小さく、過給ダウンサイジングエンジンの開発に没頭した。

筆者は自動車雑誌の記事を書くために、毎月新車を借り出して東京―箱根を往復して評価している。第3期のEVブームのおかげで最近ではEVに乗る機会が増えた。電池容量30kWhと40kWhのリーフにも乗ったが、先月乗った90kWhのジャガーのI-PACEでは電池の残量を気にすることなく20kWh位を残して往復出来た。リーフもI-PACEも走りは素晴らしく、アクセルの応答性、静かでスムーズな加速、加減速を制御するアクセルペダル、特にI-PACEはエンジン車ではとても太刀打ちできない高級スポーツカーの走りを見せてくれた。EVに乗り慣れると、様々な加減速ショック、高回転のエンジン騒音、アクセル応答の遅れがあるエンジン車は「20世紀の遺物」と言いたくなってしまふ。

現時点において、EVは価格（コスト）が高だけでなく、走行距離と充電時間などの技術的問題、給電施設などインフラの問題があって普及に対して懐疑的な意見も多いが、電池の技術革新は目覚ましく、将来的にそうした問題点は一つずつ解決されて行くだらう。残るのは価格が高い問題だが、電池のコストが急速に低下してきているので、EVの快適な走りを買うと考えれば遠くないうちに納得できる価格になってくる。EVの普及に補助金は必要ない。

これから大衆車からSUV、スポーツカーまで魅力的なEVの導入計画が図2のように目白押しだ。このまま推移すれば、EVが相当数普及するのは時間の問題だと筆者は考えている。これまでは「エンジンはないほうがいい」と言ってきたが、本当になくなりそうな気配になってきた。筆者は最近「エンジンはなくならない（なくしてはならない）」と宗旨替えをした。その理由を次節で述べることにする。



図2 続々と登場するSUVとスポーツカーのEV

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 6 2019

3 EVの真の問題、CO₂削減効果はあるか？

発電所からのCO₂排出係数（総排出量を需要端の総電力量で割った値 kg-CO₂/kWh）を図3に示す。2009年に電力中央研究所がまとめた各発電方式別の平均CO₂排出係数と、2030年の電源構成から求めた平均排出係数を示している。この値にEVの電費(kWh/km)を掛けると、EVのCO₂排出量(kg-CO₂/km)が求まって、他のパワートレイン車とのWell to WheelのCO₂排出量の比較ができる。

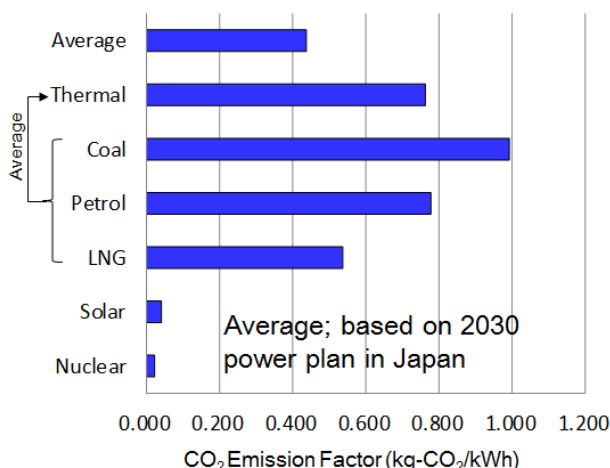


図3 発電方式別のCO₂排出係数

自動車のCO₂排出量算出の元になる燃費（電費）の数値には、各種補正が行われて実際の燃費値との乖離が少ない、米国のEPAが公表する2016年モデルの米国販売車両の複合燃費値を使った。各種パワートレインの車のCO₂排出量を求めた結果を図4に示す。これらの値は、燃料の採掘・輸送から発電所などの設備の建設・廃棄、燃焼・廃棄物処理までのCO₂排出を含むWell to WheelのCO₂排出量を示している。また、EVの電池製造には大量のエネルギーを使ってCO₂を排出しているので、その量をkm走行あたりに換算して追記した。製造時のCO₂排出量は文献によって10~50g/kmという大きな幅があるが、ここでは最小の10g/kmの値を使った。

この図から、EVのCO₂排出量はどの発電所からの電力を充電に使っているかによって大きく異なることが分かる。例えば、石炭火力発電所の電力を使うとEVのCO₂排出量は従来エンジン車とほとんど変わらない。火力発電平均では、HEVより多く、NGV(CNG-GEV)と同等になる。ここには示していないが、原発と再エネの場合はほぼゼロとみなせる。原発と再エネが半分近くを占める2030年の電源平均を使うと、EVのCO₂排出量は最も少ない値を示す。参考に燃料電池車(FCV)のCO₂排出量も水素の製造法別に示した。

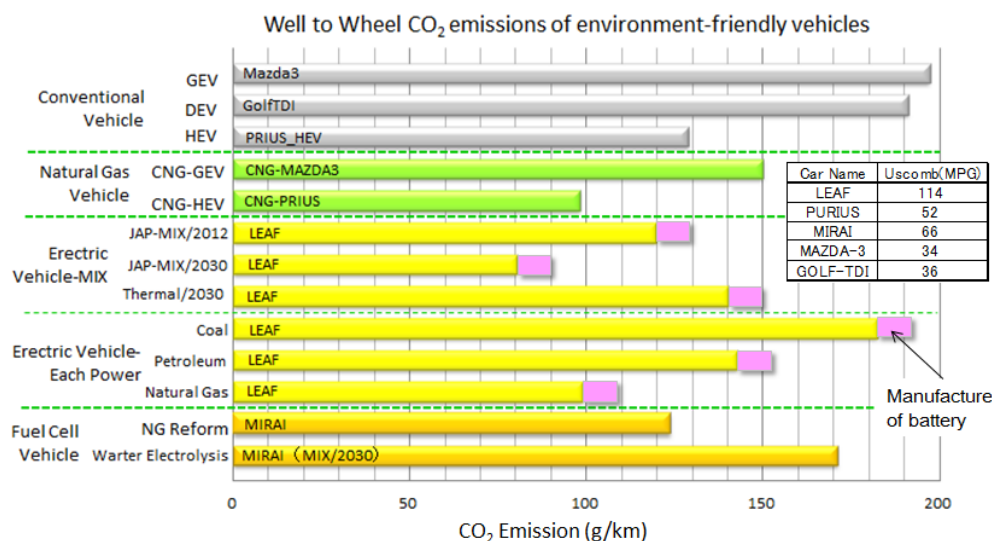


図4 次世代環境自動車のCO₂排出量の算出

単純に「EVのCO₂排出量」を求める場合は電力平均のCO₂排出係数を使うのが一般的であるが、EVが普及した場合の「EVと電源を含む総合的なEV走行システム」として捉えると、EVのCO₂排出量を求めるのは発電方式が関係するので簡単ではない。そこで、原点に帰ってEVのCO₂排出量の定義を考えてみよう。図5に日本の環境省が示す2030年の電力需給見通しに基づく、発電方式別の電力量とCO₂排出量を示す。仮にEVが1200万台相当（EV600万台、PHEV900万台）普及していると仮定すると、そのための電力需要は220億kWhで総電力の2.2%を占める。ここでEVの電力需要がなくなった場合は電力需要低下分の発電を停止するのでCO₂排出量が減少する。

各発電方式を一律に2.2%ずつ停止するというのが電力平均の排出係数を使う場合の計算で、現実にはありえない仮定である。実際はEVの電力需要の特性から経済合理性に照らして電源構成が変化する。新しい電力構成からのCO₂排出量を算出して、EVの電力需要がなくなった場合のCO₂排出量の減少分がEVの充電に伴って排出されるCO₂排出量に相当する。その値をEVの総走行距離で割ると、EVのCO₂排出量（kg/km）が算出できる。

電力需要が減少した場合にどの発電所の発電を減少または停止するかを決めることに関して、実際にコジェネ（コジェネレーション）発電のCO₂削減効果の計算に使われている方法がある。2000年代に大阪ガスが提案して電力業界との議論の末採用されるようになった方法で、「マージナル電源」という概念を用いている（付録参照）。マージナル電源とは電力需要が増減する場合に発電量を増減する電源のことを指す。図6に示すように、系統電力を削減した場合、原子力や水力などの発電コストが安価な発電は残して火力発電を減少することが想定されるので、火力発電がマージナル電源に相当する。コジェネのCO₂削減効果の算出に火力発電平均の排出係数を使うことで、当時の発電構成の平均計算の約2倍のCO₂削減効果として計算され、コジェネの普及に大きく貢献した。最近では国の地球温暖化対策計画においても、コジェネ、再生可能エネルギー発電などの系統電力削減効果の評価に火力発電平均の係数が用いられている。

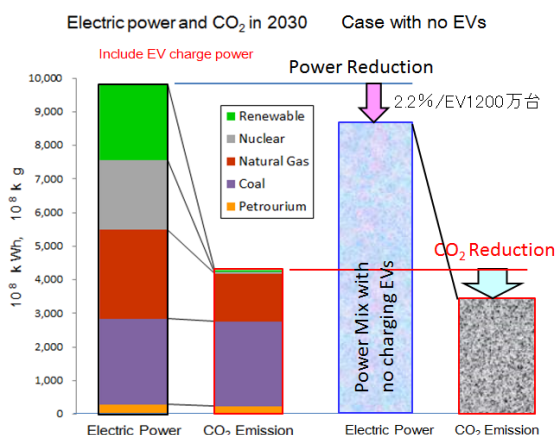


図5 EVのCO₂排出量の定義と電源構成

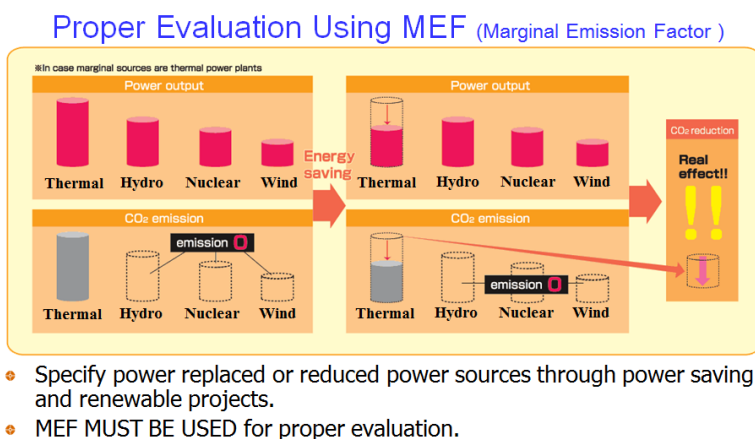


図6 マージナル排出係数を使う算出法

“Japanese Gas Industry and Its Efforts in Reducing CO₂ Emission”
by Japan Gas Association, COP10 in 2004 より引用

国際的にもこの考えが認知されており、2007年に発行された「GHGプロトコル」に、系統電力削減によるCO₂削減効果の算出には電源平均でなくマージナル電源を使うべきことが明記されている。この中で、既存発電所の発電量の増減を評価する短期的なマージナル電源（OM/Operational Margin）と電源設備の建設と廃棄を考慮した長期的なマージナル電源（BM/Built Margin）が示されている。例えば、EVの充電時間の違い（夜間または昼間）によるCO₂排出量を比較評価する場合は、短期的マージナル電源を使うことが適切である。一方、EVの普及を中止した場合の影響を検討するには、電源設備への影響を考慮した長期的マージナル電源を特定する必要がある。一般的に、短期的マージナル電源は運転コスト（≒燃料費）が高い電源であり、長期的なマージナル電源は設備費を含む総コストが高い電源が相当する。

ここでは、EVの充電需要の特殊性からさらに掘り下げて考える。EVの電力需要は曜日、天候、季節による変動が少なく安定しているだけでなく、価格政策によってある程度需要の時間をずらすことが可能な便利な電力需要である。そのためEVの電力需要があれば、需要を平準化して夜間の最低需要を嵩上げできるので、経済性原理に従えば、高稼働率の場合の発電コストが低いベースロード電源設備（原子力と石炭火力）を増やすことになる。原子力

は別の政策で決まるので、EVの需要の有無で発電設備を増減する長期的マージナル電源は主として石炭火力になると考えられる。

どの発電がマージナル電源になるかについては、対象とする電力網の条件やCO2削減に関する電源政策によって変化するので、専門家を交えた個別の検討が必要になるが、近い将来、本格的な炭素税などCO2削減を優先する政策が導入されて石炭火力の発電コストが上昇すると、ほとんどの場合石炭火力がマージナル電源になる。ここでは、EVの夜間充電の長期的マージナル電源は石炭火力で、石炭火力のCO2排出係数を使ってEVのCO2排出量を計算するのが適切であるとの考えを元に以下の考察を進める。マージナル電源の特定の考え方と関連する文献については、参考文献6)で詳しく紹介しているので参照されたい。

4 EVの普及をCO2削減に結びつけるには

図7は2030年に東北電力と東京電力管内で248万台のEVが普及した場合に、5月の天気の良い休日を想定して、電力の安定性を確保するために電源の稼働をどうするかについて検討したものだ。EVの充電需要（緑で図示）が大きい夜間には石炭火力発電がフル稼働していることが分かる。また、電力需要を昼間に誘導したり揚水発電をフル稼働しても、昼間の電力は余剰になって再エネ発電を抑制さざるを得ないことが示されている。電力が余る昼間に火力発電が稼働しているのは、不安定な再エネ発電の突然の供給停止に備えて最低限の火力発電を運転するためである。

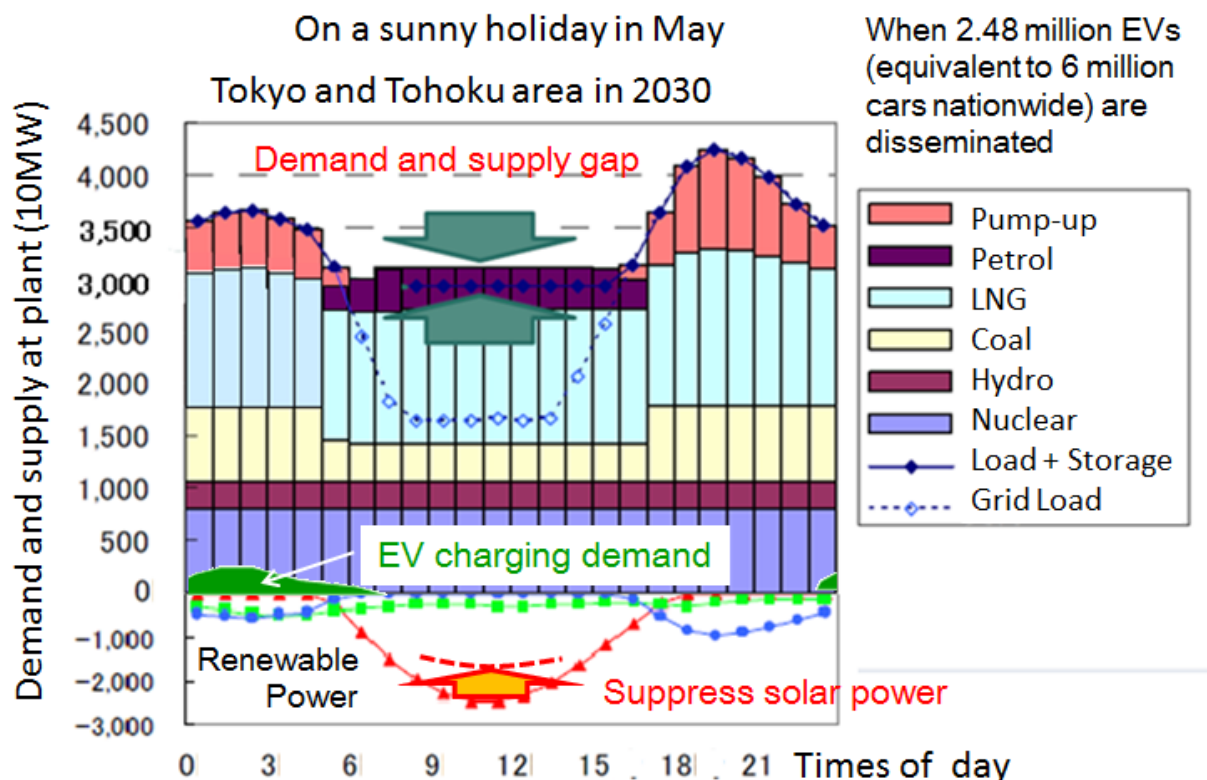


図7 2030年の電源構成と余剰電力の発生

荻本他「長期の電力需給計画における再生可能エネルギー大量導入の課題解決の可能性検討」から作成

このことから、昼間の余剰電力分の再エネ発電を抑制せずEVの充電に使うことができれば、再エネ発電がマージナル電源になるので、CO2排出量がほぼゼロというEVが本来目指しているカーボンニュートラル走行が実現できる。一方、余剰電力が生まれにくい気象条件の昼間の充電については、需給調整に使うLNG発電がマージナル電源に相当し、CO2排出量は比較的小さい。EVの充電が昼間に行われる仕組みと優遇政策の整備が望まれる。ここで単純に考えると、昼間の余剰電力を蓄電して夜間のEV充電需要に当てればカーボンニュートラル走行が実現できるはずである。ところが、蓄電した電力はEVの充電に使わなければ火力発電を止めることによってCO2削減ができるので、実際はカーボンニュートラルとは言えない。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 6 2019

以上述べたように、昼間の余剰電力（電力系統に止めることができる火力発電がない）を使ってEVを充電すればEVはカーボンニュートラル走行が可能になる。一方、夜間充電では石炭火力がマージナル電源となってEVのCO₂排出量は従来エンジン車と同等である。この場合、EVに代えてHEVを走らせるとCO₂排出量は約2/3に減少する。従って、余剰電力でEVの電力需要の1/3をまかなうことができれば、EVの普及はHEVと同等のCO₂排出量の低減効果になる。1200万台のEVが普及してもその充電需要は全電力の2.2%なので、その1/3を余剰電力で充電するのは、余剰電力発生時に充電する仕組みが定着すれば、将来的には十分可能なレベルである。

ここまでは日本の電力事情について考えてきたが、先進国では石炭火力から撤退する動きが加速している。2030年以降になると思われるが、石炭火力がなくなればEVの夜間充電の短期的マージナル電源が石炭火力からLNG火力に代わることになる。ただし、石炭火力が全廃になるまでの期間はEVの電力需要が石炭火力の廃止速度を緩めると考えると、EVの長期的マージナル電源が石炭火力であることに変わりはない。一方、デンマークやスペインのように、国や地域によっては風力発電が増加して夜間に余剰電力が生まれる時に充電すればカーボンニュートラル走行になるので、EVの普及がCO₂削減に有効である。ただし、広域的に考えると、EVでなくHEVを普及して、余剰電力は隣国に輸出して石炭火力を停止する方が、総合的にCO₂が減少することも明記しておきたい。

5 再生可能エネルギーを利用してカーボンニュートラルの自動車走行を実現する

再生可能エネルギーが十分に普及すると電力に対する考え方が大きく変わってくる。2018年のドイツでは再エネ発電が総発電量の40%を超え、天気の良い風の強い日は電力を周辺国に輸出しても電力が余り、電力取引所での価格は一時期マイナス（お金を払って使ってもらう）になるという状況が発生している。日本でも、今年の5月に九州で再エネ発電が電力需要の8割程度になって、太陽光発電を抑制するということが実際に起こっている。

2050年のドイツでは、電力需要の40%近い大量の余剰電力が生まれるとAUDIが予測している。揚水発電や蓄電設備を増強しても量的に対応できないが、水の電気分解で電力エネルギーを水素の化学エネルギーに変換すれば大量のエネルギーを貯蔵できる。これが水素社会の意味で、この水素をFCVに使えば、カーボンニュートラル走行が実現できる。さらにAUDIが実施しているように、大気中に廃棄しているCO₂を集めて水素と反応させれば天然ガスの主成分のメタンが製造できる。また、水素とCO₂から液体燃料を製造する開発も進められている。将来的に余剰電力で燃料を製造するようになれば、カーボンニュートラル走行するエンジン車が実現できる。誌面の都合で割愛するが、詳しくは参考文献7を参照して欲しい。

以上述べたようにカーボンニュートラル走行は、燃料を搭載してそれを燃焼させて走るエンジン車でも実現可能である。逆にEVがカーボンニュートラル走行をするわけではないことも述べた。加えて、カーボンニュートラルの燃料を既存の燃料供給インフラに混入すれば、現在走っている大量の自動車からのCO₂排出量の削減にも貢献できることを評価する必要がある。インフラ整備にかかる費用に加えて、車の価格上昇に伴うユーザー負担（補助金含む）の合計額を合わせた社会的総費用とCO₂排出量削減量を算出して、コスト/効果比を評価した上で次世代環境車の普及政策を定めていくことも重要な視点である。

エンジン車のCO₂排出量の低減については、日本のハイブリッド技術が着実に進化しており、欧州車のPHEVに乗ってみるとその技術の差がよく分かる。このことから、欧州が政策的に「充電走行はCO₂を排出しない」という計算法を導入して、国を挙げてPHEVとEVの導入に走り出したのは、HEVでは技術的に日本に太刀打ちできないという政治的判断があると筆者は考えている。石炭火力が主力電源の中国とインドがEV普及策をとっているのも自国の産業政策としか考えられない。日本としても、国の産業政策として、EVではなくHEVの普及を促進する施策を実施する必要があると思うが……。

6 まとめ

自動車からのCO₂排出量の算出方法と、排出量を効果的に削減する方策について筆者の考えるところを述べた。一般的に考えられていることと現実が大きく異なることを理解していただくと幸いである。要点をまとめると以下のようになる。

- (1) EVは価格が高だけでなく、走行距離と充電時間などの技術的問題、給電施設などインフラの問題があるが、その走りの快適性は素晴らしい。多くの人がEVに乗ってその魅力を実感すれば、魅力的なEVが続々と導入されていることと合わせて、EVは多くの専門家が予測しているより急速に普及すると筆者は考える。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 6 2019

- (2) 発電所を含めた EV の Well to Wheel の CO₂ 排出量は、どの発電所からの電力で充電するかによって大きく異なる。一般的な電源平均の CO₂ 排出係数で算出する方法は実際の排出量の増減を適切に算出できない。EV の充電需要の有無によって発電量が増減する発電所をマージナル電源と呼び、EV の普及の有無による CO₂ 排出量の評価にはマージナル電源の CO₂ 排出係数を使って算出する必要がある。
- (3) 一般的な EV の夜間充電の場合は長期的には石炭火力がマージナル電源になる可能性が高い。また、炭素税など CO₂ 削減を優先する政策が導入されると、ほとんどの場合石炭火力がマージナル電源になる。その結果、EV が普及しても CO₂ 排出量は従来エンジン車と変わらない可能性が高い。
- (3) 屋間に余剰電力が大量に発生する状況になれば、その電力で充電することで EV のカーボンニュートラル走行が実現できる。余剰電力がない場合でも、屋間のマージナル電源は LNG 発電となって CO₂ 排出量は夜間充電より大幅に小さくなる。このことから、余剰電力が発生する屋間に EV を充電する仕組みを導入することが CO₂ 削減に向けての重要な施策になる。
- (4) 屋間の余剰電力で EV を充電する仕組みを構築した上で、余剰電力の発生量を予測して、それに合わせて EV の充電需要（普及台数）を制限することで EV の CO₂ 排出量を削減できる。例えば、屋間充電の仕組みが定着して、EV を余剰電力で充電すれば EV はカーボンニュートラル走行ができる。充電需要の 1/3 を余剰電力で充電するようになれば、EV は HEV と同等の CO₂ 削減を実現できる。
- (5) 余剰電力や再生可能エネルギーから燃料を製造するようになると、従来エンジン車でもカーボンニュートラル走行が可能になる。再生可能エネルギーから燃料（電力）を製造する手段の普及に合わせて、EV だけでなく、HEV を中心とした次世代環境自動車の効率向上と普及を進めて行く必要がある。その際、CO₂ 削減に伴う社会的費用と削減効果を評価して方向づけする視点が重要である。

以上述べたように、筆者の考察では、電力政策を現計画のまま進める場合は EV の普及は CO₂ 削減に貢献しない。補助金を出して EV の普及を図ることは、HEV の普及を妨げて逆に CO₂ を増加する結果になる可能性が高い。自動車からの CO₂ 排出量の削減を考えるとき、単にどのような自動車を普及するかを考えるのではなく、走行に使う燃料（電力）の元になるエネルギーがどこから来ているのか、それらの製造過程までさかのぼって CO₂ 排出量を算出するとともに、燃料（電力）を製造する設備の展開計画を含めて自動車からの CO₂ 排出量の削減を検討する必要がある。

この報告は、この数年かけて筆者の専門外である電力について EV との関連を調査研究した結果をまとめたものである。電力の専門家の方たちに本報告を読んでいただき、ご批判・ご意見を伺いたいというのがこの報告をまとめた動機になっている。この機会に電力分野と自動車分野の専門家が集まって、「EV と発電システム」からの CO₂ 排出量削減について情報交換・議論し、EV の普及を実際の CO₂ 削減に結びつけるための具体的な方策を見出した上で、他の次世代自動車も合わせて自動車からの CO₂ 排出量を削減する政策を考えていきたい。

【参考文献】

もっと詳しく知りたい方は、以下の論文と記事を参照されたい。

1. 畑村耕一：次世代環境対応車としての小型天然ガス自動車の可能性、第 27 回内燃機関シンポジウム講演論文集（2016）
2. 畑村耕一：電気自動車を普及させた場合と天然ガス自動車を普及させた場合の CO₂ 排出量の比較、第 27 回環境工学総合シンポジウム講演論文集（2017）
3. 畑村耕一：究極のエコカー？EV は矛盾を乗り越えられるか、読売新聞深読みチャンネル、2017/11/18、（2017）
<https://www.yomiuri.co.jp/fukayomi/ichiran/201711220-OYT8T50020/>
4. 畑村耕一：電気自動車は本当に地球にやさしいか、モーターファンテック 2018/1/4、（2018）
<https://motor-fan.jp/tech/10002239>
5. 畑村耕一：本当に環境にやさしい車とは何か、日刊自動車新聞 2018/6/25、（2018）
6. 畑村耕一：電気自動車 (EV) のカーボンニュートラル走行を実現するための条件、自動車技術会論文集 50 巻 2 号 p564-569、（2018）
https://www.istage.jst.go.jp/article/jisaeronbun/50/2/50_20194263/article-char/ja/
7. 畑村耕一：カーボンニュートラルを実現する燃料 水素と CO₂ から合成する e-fuel に注目、モーターファンテック 2019/1/3、（2019）
<https://motor-fan.jp/tech/10007346?page=2>

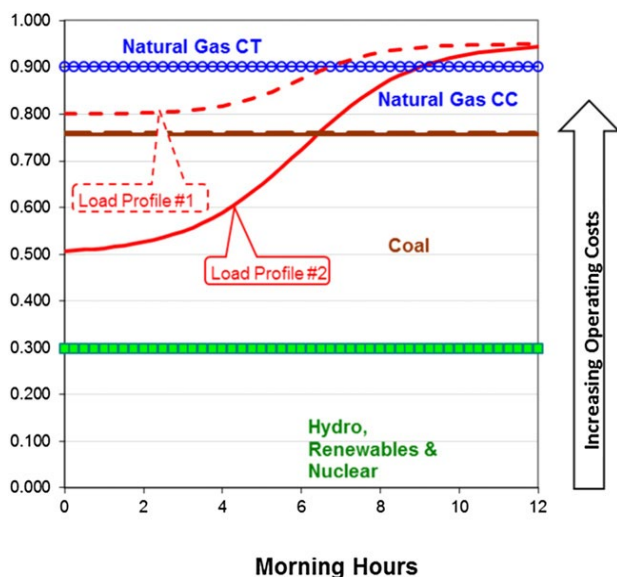
<付録>マージナル電源とは、

電力需要が増加する場合に最後に稼働する電源、減少する場合に最初に停止する電源がマージナル電源になる。短期的には限界コスト（運転費用）が最も高い電源が短期的なマージナル電源（OM）相当する。限界コストは、高いものから石油火力>天然ガス火力>石炭火力>原子力>再生可能エネルギーの順になる。

図A-1は、電源需要の増加に合わせて発電所の稼働状況を表すもので、需要0（下端）からフル稼働（上端）まで発電コストが低い順に稼働することを示している。深夜から昼にかけて電力需要が増加（昼から深夜にかけては対称に減少する）する二つのパターン#1、#2について考えると、新しくコージェネなどの外部電力によって電力需要減少した場合に#1では6時以前は天然ガスプラントCCが、それ以降は天然ガスプラントCTが停止または出力を減少して対応する。#2の6時以前は石炭火力が停止または出力を減少する。これらの電源をマージナル電源と呼び、追加された外部電力による系統電力のCO2排出量削減効果はマージナル電源の排出係数を使って算出できる。

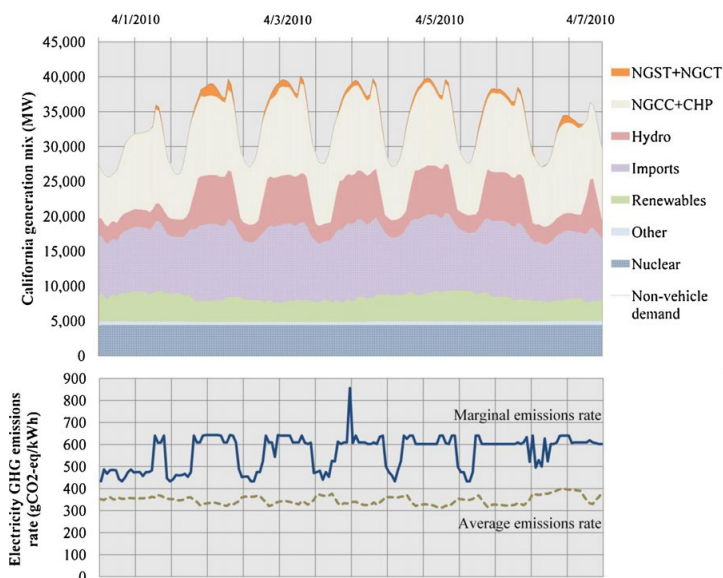
EVの充電需要に対するカリフォルニア州のマージナル電源について検討された例がある。図A-2は2010年の電源構成を元にしており、日本の近未来を考えると参考になる。横軸に一週間の時間を取り、上図は縦軸に発電方式毎の発電量を示している。電力需要の増加に伴って限界コストが高い電源が発電量を増加する傾向が読み取れる。下図には電源平均とマージナル電源のCO2排出係数の推移を示している。両者の値は大きく異なっているので、電源平均の排出係数ではEVのCO2排出量を適切に評価できないことが分かる。

このような短期的マージナル電源（OM）を使うこと、EVの充電時間の違い（夜間または昼間）によるCO2排出量を比較評価できる。この場合は夜間充電の方がCO2排出量が少ない。ただし、EVの普及の影響を評価するためには、発電構成の変化を考慮した長期的マージナル電源（BM）を使う必要がある。設備の建設・廃棄を含む総コストが最も高い長期的電源がマージナル電源（BM）に相当する。総コストは稼働率が関係するので、長期的マージナル電源（BM）は単純には決まらない。



図A-1 発電コストが決めるマージナル電源

C. E. (Sandy) Thomas: US marginal electricity grid mixes and EV greenhouse gas emissions, international journal of hydrogen energy Vol. 37, Issue 24, pp. 19231-19240, (2012) より引用



図A-2 電源平均とマージナル電源のCO2排出係数

Ryan McCarthy, Christopher Yang: Determining marginal electricity for near-term plug-in and fuel cell vehicle demands in California: Impacts on vehicle greenhouse gas emissions, : Impacts on vehicle greenhouse gas emissions, Journal of Power Sources, (2009) より引用