

港湾荷役

Cargo Handling JAPAN

NO.6 VOL. 66 2021



一般社団法人 港湾荷役機械システム協会

Japan Association of Cargo-handling Machinery Systems

【 技術紹介 】

水素内燃機

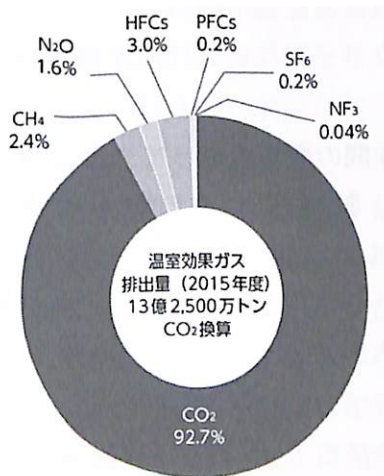
－カーボンニュートラルに向けたもう一つの選択肢－

小澤 衛¹⁾・山根 公高²⁾

Mamoru Ozawa・Kimitaka Yamane

1. まえがき

近年、人間活動の拡大に伴ってCO₂、メタン等の温室効果ガスが大量に大気中に排出されることで、地球温暖化が進んでいる。特にCO₂は、化石燃料の燃焼等によって膨大な量が人為的に排出されている。図-1に示す通り我が国が排出する温室効果ガスのうち、CO₂の排出が全体の排出量の約93%を占めている^[1]。



資料：環境省

図-1 日本が排出する温暖化効果ガスの内訳 (2015年単年度)

18世紀半ばの産業革命の開始以降、人間活動による化石燃料の使用や森林の減少などにより、大気中の温室効果ガスの濃度は急激に増加した。この急激な増加により、大気の温室効果が強まったことが、地球温暖化の原因と考えられている^[2]。大気中に含まれる温室効果ガスには、地

球の表面から地球の外に向かう熱を大気に蓄積し、再び地球の表面に戻す性質がある。その中でも最も影響の大きい温室効果ガスは、CO₂である。

図-2は、我が国の2019年度における日本の運輸部門からのCO₂排出量(2億600万トン)の内訳を示す。CO₂は排気ガス放出口より大気に放出し、その結果、それを改めて回収する場合は、大量のエネルギーが必要となる。

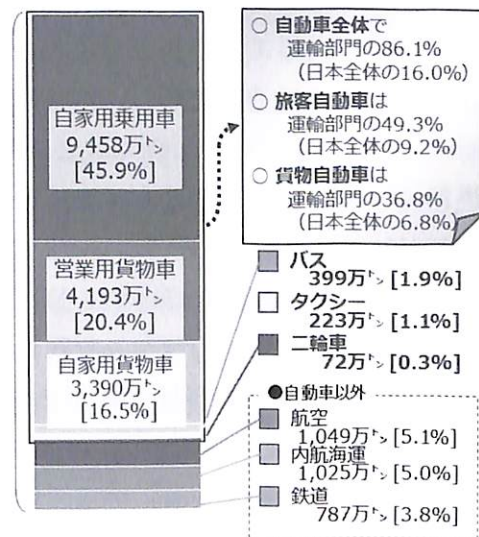


図-2 日本の運輸部門におけるCO₂排出量

運輸は、現代の我々社会の必需機能であり、将来も運輸という機能を維持してゆく必要がある。しかし、図-2に示したように、運輸部門からのCO₂排出量は、全体の18.6%に及び、かつその量は無視できない比率である。運輸部門の動力源排気出口からCO₂を放出しないエネルギーを使うことは地球規模で喫緊の課題である。

筆者：1) i labo株式会社 戦略企画本部
2) i labo株式会社 山根研究所

現在、動力源排気出口からCO₂を放出しないエネルギーとして、電気と水素があり、バッテリー電気自動車 (BEV)、水素からの化学エネルギーを燃料電池で電気に変え電気モーターで走る燃料電池自動車 (FCV) が、普及に向け官民挙げて推進している。水素と空気の混合気を燃焼させその熱エネルギーをピストンシステムで動力に変換する水素エンジン (H₂ICE) も、動力源排気出口からCO₂を放出しない動力源である。

2. 水素化の意義

2.1 BEV と FCV と同じように、H₂ICE は排気ガス出口でCO₂ゼロ

BEV、FCV の一次エネルギー源をどれにするかは、CO₂の大気放出に大きく影響を与える。化石燃料で電気や水素を作れば、いくら動力源でCO₂排出がゼロであっても、製造過程でCO₂を生み出している。そのことは、H₂ICE についての同じことが言える。太陽エネルギーを起源とする自然エネルギーからの製造した電気、水素を利用すれば、BEV、FCV、H₂ICE のCO₂はゼロである。

各種燃料による1MJ のエネルギーを得るために各種燃料がどれだけのCO₂を発生するかについて、ガソリンのそれを1とすると、石炭は、1.6、ディーゼル軽油とメタノールは、ガソリンと同じ、天然ガスは、0.8である。水素燃料は、ゼロである。これが、H₂ICE を利用する大きな意義の一つである。

2.2 実証済の希薄混合気 + 高過給排気ターボチャージャーのH₂ICE

H₂ICE の運転では、H₂ICE の排気ガス中の有害物質である窒素酸化物 (NO_x)、一酸化炭素 (CO)、ノンメタン炭化水素 (NMHC)、スス等粒子状物質 (PM) が規定以下、ほとんどゼロにすることが可能である。CO、NMHC および PM は、燃料の水素には存在しないが、H₂ICE は、エンジンの潤滑油の極少量がエンジン内で燃焼して排気ガス中に含まれ出てくる。また、潤滑油燃焼による極少量のCO₂も発生する。

H₂ICE のNO_x 生成については、一定以上の高

温燃焼時にエンジン内の酸素と窒素の反応によりNO_x が生成され排気ガスとして出てくる。そこで水素燃料と空気の混合気濃度を空気過剰率入 ($\lambda = 1$ が理論混合気、 $\lambda = 2$ は、空気を理論混合気の2倍入れた状態) を2以上に希薄化することにより、燃焼温度を一定以下に制御して、NO_x 排出量を抑制することが可能である。但し、大気圧下で混合気を希薄化することは、水素燃料が少なくなり、その分出力が低下してしまう。そこで、水素燃料量はそのままを確保し、吸入空気を排気ターボチャージャーで圧縮し空気密度を上げることで、水素燃料と高密度空気の混合をエンジンに供給する。これにより、希薄化が燃焼温度を低下させ極低NO_x 化を実現すると同時にベースディーゼルエンジンに近い出力を実現できる。出力およびトルクは、オリジナルディーゼルエンジンと比較すると低速側で差が大きい。高回転側ではディーゼルエンジンと同等レベルとなる。H₂ICE の排気特性は、高価な排気後処理なしにこのように非常にクリーンな排気性能が得られる。

2.3 150年間の歴史で培ってきたエンジン技術・人材、製造インフラの活用と、雇用維持

H₂ICE 車は、ディーゼルエンジン車を水素燃料の車両として利用できるように改造する。そのことからわかるように、150年もの間化石燃料エンジンで培ってきたあらゆる技術・人材、製造インフラを活用でき、その雇用も維持可能であることは容易に想像できる。

2.4 ディーゼルエンジン車両の水素化改造によるH₂ICE

BEV やFCV の大きな役目を担う「地球温暖化対策のもう一つの翼」として、ディーゼルエンジンを水素燃料で運転できるように改造する会社、i Labo 株式会社を2019年11月1日に設立した。特に多量のCO₂を放出してきた高出力を必要とする重量車、すなわち、中型から大型ディーゼルエンジン車、発電機、建機、船舶等、をH₂ICE 化するビジネスを展開する。

3. モビリティ分野の水素社会実現への課題

モビリティ分野に於ける水素社会の実現には、車両への水素供給インフラの整備が欠かせない。その為、官民あげての水素ステーション（水素ST）の拡充を全国規模で進めている。2020年末日現在、全国の水素STの数は137箇所と増加しているものの、ガソリンスタンドの29,637箇所^[3]と比較してもユーザー利便性を満足させるほどの数に至っていない。また、我が国は、水素ST整備事業費補助金として、補助率1/2～2/3補助上限額180～390百万円が、運営費支援として補助率2/3補助上限額16～26百万円の公的資金を投じている^[4]。

この状況下でも、2014年以降のFCV乗用車の累積販売台数は、2020年末時点で約4,700台^[5]であり、普通・小型乗用車の総販売台数に占める割合が約1/4,000台と極めてレアな車両である。上記から算出される1箇所の水素STあたりのFCVの台数は34台/水素STとなり、一般乗用車の年間走行距離、FCVのWLTCモード燃費からの水素消費量などから、水素STの稼働率を算出すると、1日あたりに訪れるFCV数は、0.84台/日と1台に満たない。一般的な水素STの充填能力である300Nm³/時から算出すると、稼働率は1.92%と極めて低いことがわかる。

経産省の試算によると、2019年の水素STの整備費は1箇所あたり4.5億円^[6]となっている。また、同資料から水素STの運営費は4,300万円/年^[6]である。ステーションの償却期間を15年とした場合、水素STの整備費用の減価償却費、運営費費用の年間費用を上記の稼働率をベースとし、仮に300円/kg^[7]で仕入れた水素を利用者に対して1,100円/kgで販売したとしても、実質の水素販売コストは47,000円/kgとなり、FCV乗用車の走行費用は、車両の償却費を除いても350円/kmとなる。このコストは、東京と大阪間を移動した場合片道17.5万円となり、新幹線による移動コストの約12倍であることを示している。この費用の大半は、国、自治体またはステー

ション運営者により負担されている状況であり、どの主体から資金が拠出されているかにかかわらず、経済性と言う視点からは、合理的な解となっていない。国家戦略として、原料である水素コストを如何に低減するかを輸入・国産の双方で進めているが、水素原料コストの低減が図られたとしても、ステーション稼働率の増加が実現できない限り、国民の税負担を伴わない自立型サプライチェーンの実現も、代替燃料としての水素社会の実現もほぼ不可能である。言い換えると、Well to Wheelの水素コストは、稼働率のファクターが水素原料そのもののコスト（グリーン水素、グレー水素製造、国産、輸入にかかわらず）と比較して遥かにインパクトが大きく、数十～数百円/kg単位の水素コスト低減の努力により技術的な革新が達成されたとしても、水素STの稼働率増加がなければ、焼け石に水の状況である。

4. 事業用向け水素STによる稼働率の増加

2002年の初代FCVデビュー以来約20年間官民あげての、一般消費者へのB-C型水素STを主とした水素戦略には大きな課題がある。消費者に対してFCV車購入を強いることも、FCV保有者に長距離走行や高稼働率を強いることもできない。経済合理性の視点から、B-C型の水素STモデルを中心に据える水素社会戦略には限界があると言える。一方、ターミナルを拠点として活動する事業用の車両、特にトラック、バスなどに於いては、移動するルートが車両によりある程度決められている為、ステーションの安定的な稼働と水素需要を見込める。また、乗用車の稼働は、年間約150時間と稼働率に換算すると1.72%と低い。一方、事業用の総重量8トンのトラック（以下「重量車」）は、1日の走行距離を90km、年間300日と見積もっても、稼働率は7.8%程度と乗用車との比較で6倍以上である。この重量車の稼働率をベースとして300Nm³/時のキャパシティを有する水素STの1箇所あたりに59台配置すると、稼働率は100%に達する。この条件の水素コストは、現状の約1/80となり、600円/

kg程度まで削減することが可能となる。但しこのコストでは、軽油の走行コストと比較してまだ割高である。経産省の見込によると2025年の水素ST整備事業費と運営費がそれぞれ、2億円、1,500万円/年^[6]まで低減するとしており、この条件が実現するとWell to Wheelベースの水素コストは軽油と同等の水準である400円/kgを補助金投入なしの自立型ステーションにて実現できると当社は試算する。この場合、正にモビリティ分野に於ける水素社会の実現となろう。

5. H2ICE コンバージョンによるCO2削減

前途の通り水素コストは水素STの稼働率が大きなファクターである。このファクターに加えて、ステーションに仕向けられる水素のそのもののコストが重要な要素となる。カーボンニュートラルに向けた水素社会実現の為には、再生可能エネルギーを利用したグリーン水素製造が理想ではあるものの、現時点では製造コストが相対的に高く、モビリティ分野に於ける化石燃料代替としての活用は経済受容性の観点から当面は困難と推測される。グリーン水素が燃料として経済受容性の条件を満たすまでの間、副生水素を燃料として利用することにより、H2ICEの重量車の普及を進めるべきと考える。副生水素の代表的なものとして、苛性ソーダの製造プロセスで発生する水素が挙げられる。食塩電解により苛性ソーダを製造する際に発生する副生水素は純度が高い。食塩電解により苛性ソーダ製造1トンあたり副生物として水素が280Nm³発生する。我が国の苛性ソーダの生産量（2020年度は396万トン）から計算すると、苛性ソーダ製造プロセスで発生する副生水素は約11億Nm³/年と推定される。

本稿では、苛性ソーダからの副生水素を燃料として利用した場合、軽油と比較してH2ICE重量車1台あたりの年間CO2削減量を算出する。Well to WheelのCO2排出量は、Well to TankとTank to Wheelの合計であるから、Well to Tankの0.209 (kg-CO₂/lit-軽油)^[8]とTank to Wheelの2.58 (kg-CO₂/ℓ-軽油)合計となる。よっ

てライフ・サイクル・アセスメント (LCA) 基準のWell to Wheelの軽油を燃料とした場合のCO₂排出量は、2.788 (kg-CO₂/ℓ-軽油)となり、重量車の実質の燃費を6 km/lit-軽油とすると、走行距離1 kmあたりのCO₂排出量は、0.465 (kg-CO₂/km)となる。図-3は苛性ソーダからの副生水素を利用した際のWell to WheelのCO₂排出量である。水素は、苛性ソーダ製造プロセスの副産物として得られるものであり、本稿では既に製造～圧縮出荷までの設備が稼働状態で、これらの設備を利用するとし、資本財・原材料・ユーティリティ、及び貯蔵・圧縮段階にかかる資本財に関するCO₂排出を考慮しないものとした。

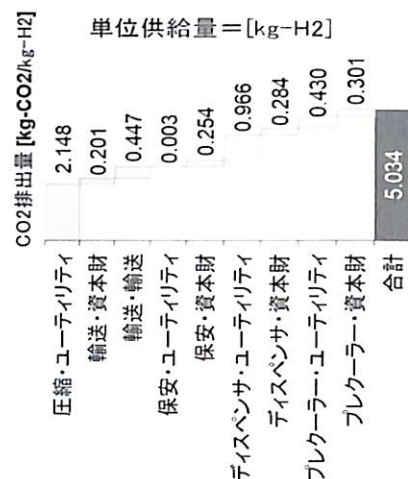


図-3 苛性ソーダの副生水素のWell to TankのCO₂排出量

H2ICEのTank to Wheel CO₂排出量はゼロである。よって、Well to Wheel=Well to Tankであるから、CO₂排出量は、5.034 (kg-CO₂/kg-H₂)となる。H2ICEに於いての熱効率を軽油と同等の40%として計算すると、走行距離1 kmあたりのCO₂排出量は、0.252 (kg-CO₂/km)となる。上記の軽油と水素を燃料とした場合を比較すると、1 km走行で削減できるCO₂は、0.213 (kg-CO₂/km)の軽油比較で約45%となる。当社のヒアリングによる大手宅配企業の重量車の1日走行距離=平均約90km/日、年間稼働日数=300日/年から、1台あたりの年間CO₂削減量は5.75 (t-CO₂/年・台)となる。現在、我が国の重量車の保有台数は、約70万台である。この

うち仮に1割の車両がH2ICEとして水素を燃料として走行した場合、年間約40万トンのCO2を削減できることとなる。これは、約13万世帯からの年間CO2排出量に相当する。

6. LCA 基準による H2ICE の優位性

LCAは、製品の生産から輸送、使用、廃棄まで含めた環境評価である。BEVは走行時にCO2を排出しない一方、製造時にエンジン搭載自動車(ICE)よりも多くのCO2を発生する。この製造時の過剰なCO2を相殺する唯一の方法はBEVの廃車までの生涯走行距離が如何に長距離であるか、また、どれだけ早く相殺できるかは電力の生産方法(電源構成)にかかっている。

LCA評価方法について、欧州議会は2023年までに法制化することを目指している。欧州はもとも自国に有利な国際標準や規制作りに長けている。LCAベースとなると製造時に消費するエネルギーがキーとなり、電源構成の9割近くを原子力や再エネが占めるフランスを抱える欧州は電力融通が容易であり、有利になることは間違いない。東日本大震災以降の我が国の電源構成が火力発電約8割と言う事情が、自動車や部品製造に於いてCO2削減のハンディキャップとなる。欧州は、この間詳細な分析を通して巧みな戦略を立案し、自国優先でルール作りを進めてきた。自動車業界の国際競争はエネルギー政策を巻き込んだ新たな段階に突入したと言え、このままでは日本が誇る重層的な自動車サプライチェーンが弱体化し、半導体、家電などと同様に我が国のモノづくりを崩壊させてしまうことは必至である。

当社が進める重量車のディーゼルエンジンを水素化するH2ICEコンバージョンは、我が国の電源構成の事情を考慮してもLCA基準で、大きなCO2削減効果をもたらす。表-1は、国内で製造された重量車について、我が国の各燃料・電力の排出原単位から、前途の1日走行距離、年間稼働日数で10年間運用した場合の、LCA基準で排出するCO2総排出量をICE、BEV、H2ICEコンバージョンのそれぞれについて算出したものである。

尚BEVのバッテリーは200kWhのリチウムイオンバッテリーを搭載するとした。BEVはTank to WheelのCO2排出量はゼロであるものの、電源構成が火力を主としていることからWell to TankのCO2排出量が高い。また、バッテリー製造に於いても大量のエネルギーに起因するCO2排出量も高い^{[9][10][11][12][13]}。LCA基準のCO2総排出量では、BEVはICEと比較してわずかにCO2排出量が少ないものの、カーボンニュートラルへ貢献度が高いとは言えない。また、重量車特有の運用方法を考慮すると長い充電時間、質量エネルギー密度が概ね200w/kg^[14]と相対的に低いことに起因するバッテリー重量が貨物積載量に影響を及ぼすことや車両自体の販売価格などを考慮すると、ユーザー受容性も高いとは言えない。

表-1 軽油・電力・水素のCO2排出原単位
電力は2017年排出原単位、水素は苛性ソーダの副生水素

	ICE	BEV	H2ICE コンバージョン
Well to Tank	9.4	74.5	68.0
製造	22.1	55.3	0.7
Tank to Wheel	116.1	0.0	0.0
廃棄	8.4	12.5	8.4
LCA基準CO2合計	155.9	142.3	77.0

図-4^[15]は、2017年時点の各国の発電CO2排出原単位の比較である。我が国の発電時のCO2排出量が突出して高いことがわかる。図-5は、ICE、BEV、H2ICEの重量車に関する走行距離に応じたCO2排出量を示すグラフである。我が国の電源構成で重量車BEVを製造した場合のLCA基準で車両製造時に排出されたCO2を、走行時のゼロエミッションで相殺するには、243,000kmの走行が必要となり、前途の宅配企業の重量車のケースである生涯走行距離270,000km時点では、BEVのCO2削減に効果はわずかである。当社が進めるH2ICEコンバージョンは、国内で製造されるICE、BEVと比較しても、生涯走行距離の長短にかかわらずCO2の排出量は大幅に低く、カーボンニュートラルへの効果は相当程度高い。また、保有される重量車

の有効活用と経済受容性と言う視点からも、環境の優位性に加えて、ユーザーメリットは大きい。

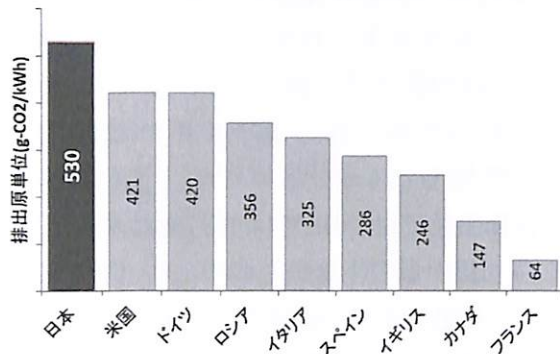


図-4 各国の電力CO2排出原単位 (g-CO2/kWh)

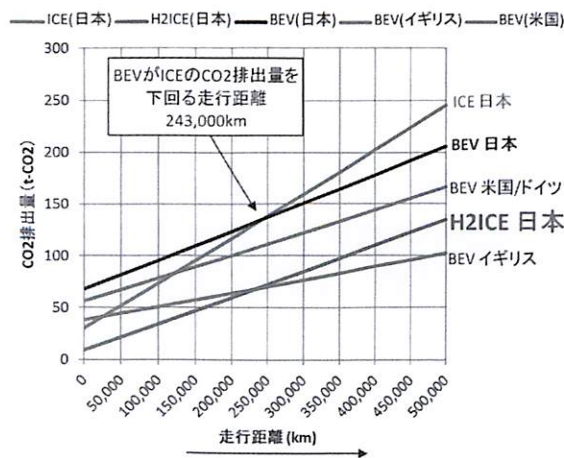


図-5 重量車ICE、BEV、H2ICEコンバージョンのLCA基準による走行距離とCO2排出量の関係

7. 電動化に向けた我が国の自動車産業競争力の行方

図-6は、我が国の国内で製造されるICE重量車とそれぞれの国から輸入されるBEV重量を我が国で利用した場合の比較に於ける、製造時・廃棄で発生するCO2排出量を相殺する距離を示す。充電の電力のCO2排出量が多くとも、BEVの製造国が日本以外であれば製造時のCO2排出量が相対的に少なく、結果、比較的少ない走行距離でも輸入BEVは国産ICEに対してCO2削減効果が出てくる。一方、ICEとBEVの双方が国産である場合を比較すると、ICEに対する効果がプラスとなる為の走行距離は24万km以上と長距離を要し、ICEに対して大きなプラス効果は生

じにくい。この図から、電力の排出原単位が低い国からの輸入されるBEVは短い距離で製造時のCO2を相殺できることとなり、LCA基準では国外で製造されるBEVが有利となる。このことが自動車の電動化による、我が国の産業の空洞化を生み出すロジックであり、その意味でも自動車業界の国際競争はエネルギー政策そのものであると言える。図-7は、上記同様の計算方法にて、ICEとBEVの双方が同国で製造され、それぞれの国にて走行されるケースを比較したものである。この図からフランスなどの極端なケースを例にとって見ると、BEV製造時でのCO2排出量も低く、また、充電される電力自体からのCO2排出量も低いことから、走行距離20,000kmを超えたあたりから既にBEVが有利となる。このように、フランスでは圧倒的にBEVがICEと比較して環境面で有利となり、加えて、島国日本と比較して、欧米などの大陸に於ける生涯走行距離は長く、この視点からも米国、欧州などがBEVを積極的に進めることがカーボンニュートラルに向けて効果的である。

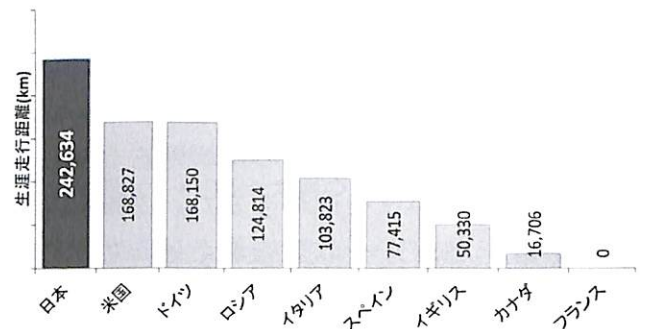


図-6 我が国で走行する場合、各国で製造された輸入BEVが、国産ICEと比較して、LCA基準のCO2排出量を下回る走行距離

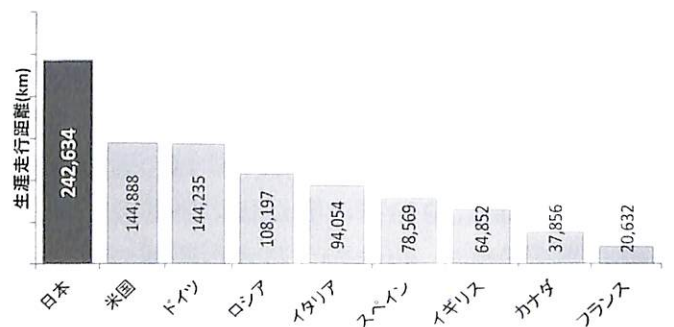


図-7 各国で製造されるICE、BEVが製造各国で走行した場合、LCA基準のCO2排出量を下回る走行距離

8. おわりに

我が国の自動車業界の中には一部、BEV、FCV、ICE、H2ICE が対立軸として捉える傾向がある。グローバル市場で我が国の競争力を辛うじて維持する為には、このような不毛な議論を超えて、社会全体のエネルギー戦略と並行して、様々な異なる技術的アプローチが相互に補完しながら脱炭素化を強力に進める必要がある。かつて輝きを放った半導体産業や家電産業衰退の轍を踏む余裕は我が国には残されていない。1989年～1992年まで1位であった我が国のIMD世界競争力ランキングは、2020年には調査対象63か国中34位と凋落したことから見て取れるように、近視眼的な俗論に終始している状況ではない。我が国の電力からのCO₂削減にはかなりの長期間とコストを要し、世界的な流れである自動車の電動化によるCO₂削減効果を短期間で引き出すことが出来ない。その間に自動車産業そのものの衰退をもたらす可能性すらある。化石燃料を多量に消費する高出力を必要とする重量車、すなわち、ディーゼルトラック、発電機、建機、船舶等のディーゼルエンジンを動力源とする車、装置をH2ICEによって、短期間で、かつ安価な動力源の供給と併せ水素の需要拡大、それに伴う水素の低価格化促進、結果大きな二酸化炭素削減につながることを期待できる。CO₂排出量が電源構成に大きく左右されないH2ICEコンバージョンも他の技術と併せて社会全体の脱炭素化に貢献すると考える。

引用文献

- 1 「地球温暖化問題の現状」、平成28年度環境省環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書
- 2 「地球温暖化の原因」、気象庁ホームページより
- 3 「揮発油販売業者数及び給油所数の推移（登録ベース）」令和2年7月31日 経済産業省資源エネルギー庁資源・燃料部石油流通課
- 4 「燃料電池自動車の普及促進に向けた水素ST整備事業費補助金について」令和3年5月 資源エ

ネルギー庁

- 5 一般社団法人日本自動車販売協会連合会 月別販売データ 燃料別販売台数（乗用車）
- 6 「FCV・水素ステーション事業の現状について」2021年3月18日 経済産業省 資源エネルギー庁
- 7 「水素の製造、輸送・貯蔵について」平成26年4月14日 資源エネルギー庁 燃料電池推進室
- 8 輸送用燃料の Well-to-Wheel 評価日本における輸送用燃料製造（Well-to-Tank）を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書、みずほ情報総研、トヨタ自動
- 9 「Energy-Consumption and Carbon-Emission Analysis of Vehicle and Component Manufacturing」Argonne National Laboratory
- 10 「Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status 2019 on Energy Use, CO₂ Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling」
- 11 IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd.
- 12 「Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions」Feb, 2018 International Council on Clean Transportation.
- 13 「Estimation of CO₂ Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA」MDPI
- 14 「我が国の電動化戦略～自動車新時代戦略会議中間整理について～」平成31年1月31日 経済産業省
- 15 「エネルギー転換部門におけるエネルギー起源CO」環境省