

カーボンニュートラルに向けた世界の自動車パワートレインの最新動向

Latest Trends of global Automotive Powertrains towards Carbon Neutrality

株式会社 SOKEN (非) *古野 志健男

Shigeo Furuno*,

*SOKEN, INC.

1. はじめに

カーボンニュートラル (CN) に向けて、世界の自動車産業界は過去に類を見ない激変の動きを見せている。世界の自動車各社は、BEV 戦略に対して多額の研究開発投資を異口同音に発表。一方で電動車 (HEV, PHEV) に特化した低炭素で高効率な Dedicated Hybrid Engine や、水素など CN 燃料による脱炭素なエンジン研究も進められている。それらの課題と方向性について解説する。

2. 欧米の脱炭素規制動向

2021 年 7 月、欧州委員会 (EC) は Fit for 55 という CO₂削減政策を提案した。その中の 1 つに乗用車及び小型商用車の CO₂排出基準に関する規則の改定案がある。新規追加項目として 2035 年にはそれらのテールパイプでの CO₂排出量がゼロの新車しか販売できないというもの。換言すれば、Tank to wheel で CO₂排出ゼロであり、合成燃料 (e-fuel) やバイオ燃料などの CN 燃料を使用したエンジン搭載車も販売できなくなる。この法案は、2022 年度中に欧州議会や閣僚理事会で承認された。ただし、2026 年には PHEV や e-fuel の技術進捗をみて見直す文言を追加した。

一方、米国加州では、2020 年の州知事令を受けて 2022 年 8 月加州大気資源委員会 (CARB) は、2035 年には新車販売の 100%を無排出車 ZEV とする ACC II (Advanced Clean Cars II) 法案を正式承認した。ZEV (Zero Emission Vehicle) とは、PHEV, BEV, FCEV を含む。また、中国では、同様に 2035 年の新車販売の 50%を NEV (New Energy Vehicle) とすることが自動車メーカーに義務付けされた。NEV とは、ZEV と同じく PHEV, BEV, FCEV を指す。

3. BEV の課題とエンジン搭載車の必要性

以上から世界自動車市場は電動化が進み、その中心が BEV であることは間違いないが、多くの課題が山積している。BEV は、他の電動車に比べ多くの二次電池を搭載しなければならず、HEV に比べればその搭載容量は 30~40 倍必要である。自動車メーカーは、自社の BEV 用に多くの二次電池を製造もしくは確保しなければならず、設備投資など莫大となり多くの会社で採算が悪化している。また、二次電池には多くのレアメタルが使用され世界的な資源問題である。2030 年には現状の約 20 倍もの二次電池生産量の計画があり、原材料も不足しコストも高騰している。

加えて、BEV、特に二次電池の LCA 視点での CO₂排出量が低くない。現在の世界発電ミックスで計算すると BEV が 11 万 km 以上走行して、初めて純ガソリン搭載車の CO₂排出量よりも少なくなる。ただ、二次電池の寿命は 10 万 km 程度と言われているので新品に交換すれば、その時点で BEV の LCA 視点の CO₂がまた急増することになる。

世界中で BEV は増加していくが、一方 2035 年でさえエンジン搭載電動車が無くなることはない。BEV や FCEV だけでは世界の自動車市場の CN 化を達成することは困難である。世界に 15 億台以上存在するエンジン搭載の既販車からの CO₂排出量を考えれば、大気からの CO₂回収・濃縮技術 (DAC: Direct Air Capture) や、その CO₂の有効利用技術 (CCUS: Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) も必須である。また、既販車に E20 や B10 燃料のように e-fuel やバイオ燃料との混合燃料を用いれば CO₂低減に大きく貢献できる。さらにモータリゼーションが進んでいるインドやアフリカ市場ではまだまだ低コストで高効率なエンジン搭載車の需要は増加の一途を辿る。

4. CN に向けたパワートレイン技術

4.1 電動車に特化した専用エンジン: DHE

エンジン搭載電動車としても出来る限り LCA 視点で CO₂排出量を低減しなければならない。近年、HEV や PHEV の電動車に特化した高効率なエンジン (DHE: Dedicated Hybrid Engine) 開発が欧州を中心にさかんである。その DHE の基本コンセプトは、過給ガソリン直噴スーパーリーンバーンエンジンであり、狙う最大正味熱効率は 50%である。現在市販のガソリンエンジンの熱効率は 39~41%程度なので 25%の効率向上となる。幾つか事例を紹介する。

欧州では、2019 年頃から DHE コンセプトのエンジン開発がさかんとなった。ポイントは、電動パワートレインと組み合わせることにより、エンジンとして燃費の良くない運転条件 (低温始動時、アイドル、ノック点など) を想定する必要がなく、熱効率のいい回転数-負荷の領域のみに特化して、より熱効率を追求した設計ができることである。DHE の概要、重要性、技術事例に関して ScienceDirect のオンラインジャーナルで IAV が紹介している²⁾。IAV 自身の DHE 技術の 1 つが、プレチャンバー点火である。原型はホンダの CVCC に遡るが、点火プラグの放電部分をキャップ状に覆い小さな副室を形成し、点火後に複数の穴からメインの燃焼室の混合気に火炎噴射する方式である。狙いは 2 つあり、リーンバーンでの層流燃焼速度に由来する火炎伝播速度低下を補い安定して早期に燃焼を終わらせることと、ノック領域でノッキング発生よりも先にメインの燃焼を終了させることである。プレチャンバー内で混合気を形成する方式

は 2 つあり、圧縮行程でメインの燃焼室から混合気を流入させるパッシブ方式と、プレチャンバー内に燃料を噴射するアクティブ方式がある。IAV の提案はアクティブプレチャンバー点火であり、しかもプレチャンバー内に燃料ではなく混合気を噴射するものである。アイドルなどでも安定して火炎噴射させる狙いである。DHE 用としてはパッシブ方式で充分だろう。MAHLE も、JET Ignition と称して両方の方式で検討している。アクティブプレチャンバー点火とリーンバーンの組合せで、正味熱効率 42.3%を実現した。

日本では、日産のシリーズ HV システムである e-POWER 用の DHE として開発されているのが、STARC (Strong Tumble and Appropriately stretched Robust Ignition Channel) と呼ばれる燃焼コンセプトである³⁾。直噴ロングストロークと強タンブル流によって混合気の乱れ強度を向上し、それに対応した強力点火プラグの組合せで、空気過剰率 $\lambda > 2$ というスーパーリーンバーンを実現した。現在の開発段階では最大正味熱効率 46%を実証済で、排熱回収などの技術によって 50%の目処があるという。

中国では、吉利汽車集団 (Geely Automotive) が PHEV 用などの DHE 開発を強化している。22 年 11 月 29 日、Geely は、DHE 用の高効率エンジンで画期的な進歩を得たと発表した。研究開発中のリーンバーンガソリンで最大正味熱効率 46%を達成したという。リーン度合の空気過剰率 λ を明らかにしていないが、超希薄燃焼領域で燃焼を安定させるのにアクティブプレチャンバー点火システムを採用したものである。

4.2 水素エンジン

ここ数年、欧州自動車業界を中心に水素エンジンの研究開発が加速している。2022 年 4 月にオーストリアで開催された第 43 回 Vienna Motor Symposium では、全 72 件の発表中 12 件が水素エンジン関連テーマで、前年に比べ増加している。欧州での水素エンジン関連の開発キーワードは、「大型商用向け」「熱効率改善」「耐久性向上」「排ガス後処理 (NOx 浄化)」「低コスト化」など。基礎研究の段階を抜けて、かなり実用化に向けた量産開発方向に移行している。欧州での開発の方向性は、低圧水素直噴エンジンである。燃焼コンセプトは、 $\lambda = 2$ 以上の高過給スーパーリーンバーンが主流で、それに尿素 SCR を搭載したシステムである。低圧というのは約 2~3MPa の水素噴射圧とし、70Pa の高圧タンク内の水素を可能な限り有効に利用するためである。主な開発課題は、水素の可燃範囲が広いことによる頻繁な異常燃焼 (ブレイグ、バックファイヤ)、ガソリンの 7.6 倍の層流燃焼速度による冷却損失増大、リーンでの NOx 排出である。それらの共通の対策手段が、空気過剰率 $\lambda = 2$ 以上のスーパーリーンバーンコンセプトだ。

Bosch は、排気量 2.0L の過給直噴均質リーンバーンエンジンを検討している。しかも水素エンジンを DHE 化とすることにより、 $\lambda = 2.5$ で最大正味熱効率 45%を実現したという⁴⁾。一方、MAN は、大型商用車用の排気量 16.8L のディーゼルエンジンをベースに主に噴射系などシリンダヘッド回りの変更のみで水素エンジン化した⁵⁾。 $\lambda = 3.0$ で最大正味熱効率 44%を実現した。水素エンジンのキー技術は水素インジェクタであり、Bosch はブレイグ時の高筒内圧でも開弁しない外開弁の水素インジェクタの開発を、BorgWarner は低圧 (0.9MPa) や高圧 (30MPa) 噴射用の様々な水素インジェクタの開発を急いでいる。AVL は、水素燃焼のブレイグ対策として水噴射コンセプトも提案している。

トヨタは、モータースポーツでの実証実験結果を活用しながら 2020 年代に水素エンジン車を市販化すべく、富士山 4 合目の開発段階だという。日本では、CJPT を中心に大型商用車用水素エンジン開発を、カワサキやヤマハなど 4 社は、二輪車用水素エンジン開発を、川重やヤンマーなど 3 社は船舶用大型水素エンジン開発をそれぞれ開始している。

4.3 CN 燃料用エンジン

液体の CN 燃料は、従来のエンジンや燃料インフラを活用できるという点で優れていて、回収 CO₂ と水 H₂O から再エネ電力で合成された e-fuel やバイオエタノール/バイオディーゼル燃料が代表的である。いずれも、課題はコストと生産量であり、ブラジルの E100 以外は基本的に 100%使用ということではなくガソリンや軽油に混合して混焼するという使い方となる。ただ、航空用燃料の SAF (Sustainable Aviation Fuel) としての活用が優先順位として高い。e-fuel 用にエンジンを大幅に変更する必要はない。e-エタノールや MtG (Methanol to Gasoline) が製造できれば、ガソリンに比べて硫黄などの不純物もなく素性のいい燃料である。バイオディーゼルに関しては、植物油や FAME を水素化処理 (HVO: Hydrotreated Vegetable Oil) すれば問題はない。ただ、どちらも生産量が少なく石油以上に高沸点成分などが存在すると、デポジットやオイル希釈などが問題となり得る。

5. おわりに

CN に向けて世界の自動車市場で電動化は加速するが、エンジン搭載電動車はなくなることはなく、電動車に最適で高効率なエンジン DHE に進化していく。加えて水素エンジンや CN 燃料利用のエンジンも CN として重要である。その中で、エンジンへの潤滑技術は、高効率化という観点で水素などガスエンジンも含めその要求はさらに重要となる。

文献

- 1) Rei Palm, et al.: The Carbon Footprint of Volvo XC40 BEV and ICE – Presented with Transparency, 30th Aachen Colloquium Sustainable Mobility, (2021) 245.
- 2) Marc Sens: Hybrid Powertrains with Dedicated Internal Combustion Engines are the Perfect Basis for Future Global Mobility Demands, Transportation Engineering, ScienceDirect (2022). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/>
- 3) Tadashi Tsurushima: Future Internal Combustion Engine Concept Dedicated to NISSAN e-POWER for Sustainable Mobility, 29th Aachen Colloquium Sustainable Mobility, (2020) 145.
- 4) Dr.-Ing. A. Kufferath: H2 ICE Powertrains for Future On-Road Mobility, 42nd Int. Vienna Motor Symposium, 25, (2021)
- 5) Dipl.-Ing. L. Walter: The H2 Combustion Engine -The Forerunner of a Zero Emissions Future, 42nd Int. Vienna Motor Symposium, 6, (2021)