

内燃機関改善に対する目標と マツダの取り組み

第10回オートモーティブワールド
2018年1月17日
マツダ株式会社
人見光夫

内容

1. 電気自動車に対する考察
2. 内燃機関の効率改善
 - 2-1. 目標
 - 2-2. SKYACTIV-X
3. 全体最適のアプローチに対する提案
 - 3-1. NOxとCO2の効率的低減
 - 3-2. 発電と運輸の効率的CO2低減

電気自動車に対する考察

同一車種でのガソリン車とEVの燃費、電費

デミオ SKY-G

JC08: 25km/L

実用燃費 : 18.4km/L, 5.43L/100km

デミオ EV

JC08: 10kwh/100km

実用電費 : 16.3kwh/100km 6.13km/kwh

本結果に充電効率は考慮されているので、送電効率95%を加味すると発電端での電費は

JC08: 10.5kwh/100km

実用電費 : 17.2kwh/100km 5.81km/kwh

評価条件 : 下記3テストの結果を日本の四季の気温の変化を考慮してe-燃費に合うように加重平均した (マツダ内で作成)

1. JC08 Hot ambient temperature 25°C air conditioner 25°C AUTO
2. JC08 Hot ambient temperature 37°C air conditioner 25°C AUTO
3. JC08 Cold ambient temperature -7°C air conditioner 25°C AUTO

電気自動車に対する考察

18.4km/Lのガソリン車のwell to wheel CO₂

Emitted amount of greenhouse effect gases for 1MJ of oil products [g eq-CO₂/MJ]

| | Current DE fuel | Low sulfur DE fuel | Ultra low sulfur DE fuel | Current Gasoline | Gasoline in future | Kerosene | Naphtha | A heavy oil | C heavy oil | |
|--------|-----------------------------|--------------------|--------------------------|------------------|--------------------|----------|---------|-------------|-------------|------|
| Mining | Operations | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.74 | 0.75 | 0.76 | |
| | Flare combustion | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.39 | |
| | Accompanied CO ₂ | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.32 | 0.33 | 0.33 | |
| | Leaked CH ₄ | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | |
| | Foreign transport | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.90 | 0.91 | 0.92 | |
| | Domestic refinery | 2.66 | 3.64 | 5.08 | 8.59 | 9.36 | 1.91 | 3.33 | 4.14 | 5.94 |
| | Domestic transport | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.41 | 0.41 | 0.39 | — | — | |
| | Refueling to a car | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | — | — | — | |
| | Sum | 5.45 | 6.43 | 7.88 | 11.42 | 12.19 | 4.72 | 5.70 | 6.54 | 6.38 |

Source : Toyota and Mizuho Financial group,
The evaluation of Well-to-Wheel CO₂ for transportation fuels, (2006)

Well to tank

ガソリン製造時のCO₂は12.19g-CO₂/mJ

ガソリン発熱量33.37mJ/L

→1LあたりのCO₂発生量は12.19×33.37=406.8 CO₂-g/L

18.4km/Lなら 406.8÷18.4=22g/km

Tank to wheel

18.4km/Lのtank to wheelは126g/km

well to wheel CO₂

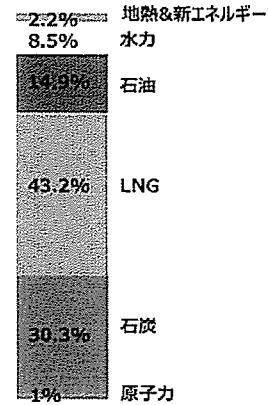
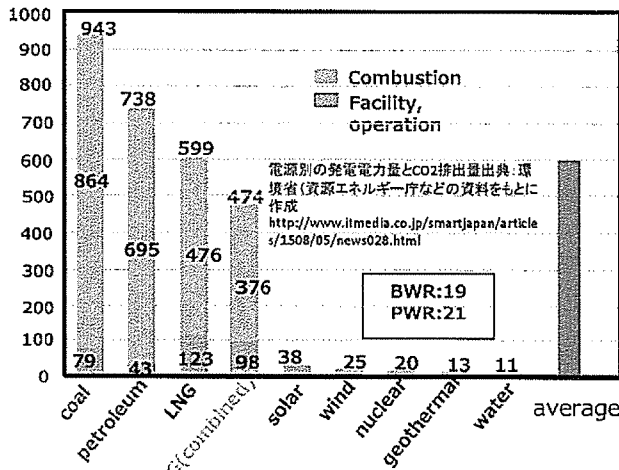
22+126=**148 CO₂-g/km**

電気自動車に対する考察

21.2kwh/100kmの電気自動車のwell to wheel CO2

2013年度石炭、石油、LNG発電による排出CO2量

2013年度発電電力量=9397億kwh



1kwhあたりの平均CO2は (LNGは平均)

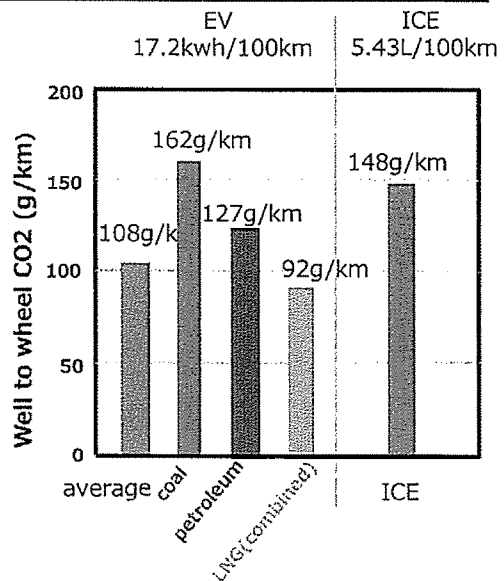
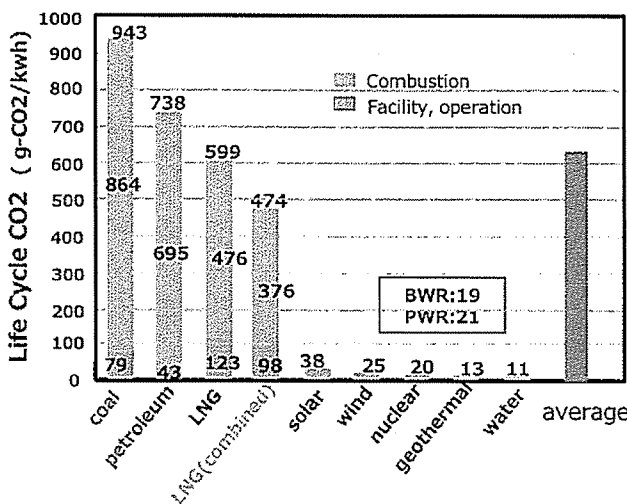
$$943 \times 0.303 + 738 \times 0.149 + (599 + 474) / 2 \times 0.432 + 20 \times 0.01 + 11 \times 0.085 + (38 + 25 + 13) / 3 \times 0.022 = 628 \text{g/kwh}$$

17.2kwh/100kmの電気自動車のwell to wheel CO2は

$$628 \times 17.2 / 100 = 108 \text{ CO2-g/km}$$

電気自動車に対する考察

発電手段ごとのWTW CO2



平均的発電方法で見ると一見電気自動車が正しい

個別の発電方法で見ると？

CO2を出さない発電方法で電力を得たなら電気自動車に使うよりも石炭発電を減らす方に先に使うべきではないか？

電気自動車に対する考察

ケーススタディー: 運輸の使用燃料の半分を電気で補う

等価エネルギー比較 (欧州Cカーでの実用燃費比較から)

5.43L(ガソリン)=5L(軽油)=17.2kwh(電力)

| | 2013(H25)年度消費量 (万kL/年) | 化石燃料CO2排出量試算 (億t/年) | EV化した時の電力換算 (送電、充電効率90%) (億kwh) |
|------|------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| ガソリン | 5,680 | 0.23 (WtT) + 1.32 (TtW) | 2120/0.85 |
| 軽油 | 2,435 | 0.08(WtT) + 0.64(TtW) | 985/0.85 |
| | | 2.27 | 3105 |

必要発電量は 3105億kwh÷2=1553億kwh

1年間で1553億kwhの追加電力が必要

7

電気自動車に対する考察

ケーススタディー: 運輸の使用燃料の半分を電気で補う

1年で1553億kwhの電力を供給するために必要な太陽光、風力発電の発電設備容量

太陽光と風力の現状比率 ; 太陽光85%, 風力15%

この比率で必要な電力を供給→太陽光1320億kwh, 風力233億kwh

太陽光の現状稼働率13%、風力20%、



太陽光の必要発電力 $1553 \div 365 \div 24 \div 0.13 = 1$ 億1600万kw
(60.7万円/kw×1億1600万kw=70兆円)

風力の必要発電能力 $230 \div 365 \div 24 \div 0.2 = 1310$ 万kw

の発電能力増強が必要

8

電気自動車に対する考察

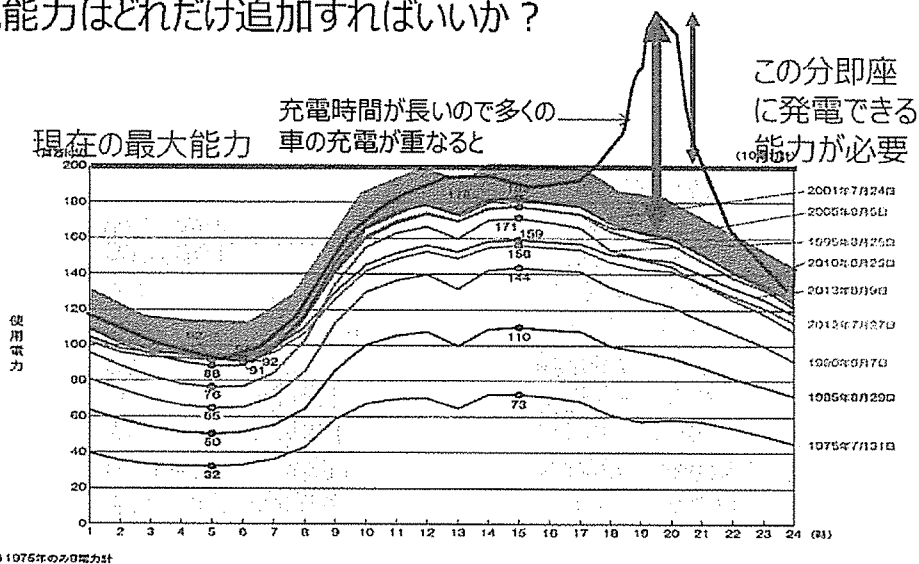
- 2014年 4輪車 7700万台 乗用車6000万台
- 乗用車はほとんどガソリン、商用車の大きいものが軽油
- 電気に置き換えるのは主にガソリンエンジン搭載の小さい方の車
- 小さいガソリン車の代替だけで半減させるには電気自動車が何台いるか
ガソリンは6000万台で5680万kL 軽油は1700万台で2435万kL
- 軽油は同じ容量でガソリンよりCO2を10%余計に出す
両方のガソリン換算量は
 $5680 + 2435 \times 1.1 = 8359$ 万kL
- これをガソリン自動車だけで半減するには 4180万kL減らさないといけない
 $4180 \div 5680 \times 6000$ 万台 = 4400万台のEVが必要
- これらが3kwで一斉に充電したら $3\text{kw} \times 4400$ 万 = 1.32億kwの発電力必要
一回の充電に何時間もかかるから充電が重なる可能性は大

| 2013 consumption (mill. kL/year) | |
|-------------------------------------|-------|
| Gasoline | 56.80 |
| Diesel fuel | 24.35 |

9

電気自動車に対する考察

発電能力はどれだけ追加すればいいか？

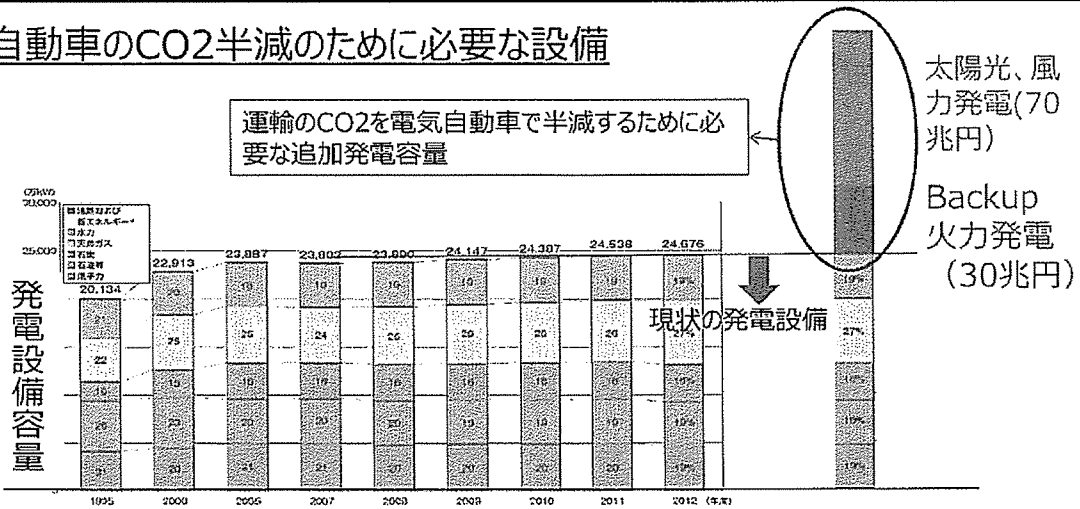


これから電池容量が増すので350kwの急速充電器も開発中とのこと。30万台が一斉充電すれば上記と同じ状況になる

10

電気自動車に対する考察

自動車のCO2半減のために必要な設備

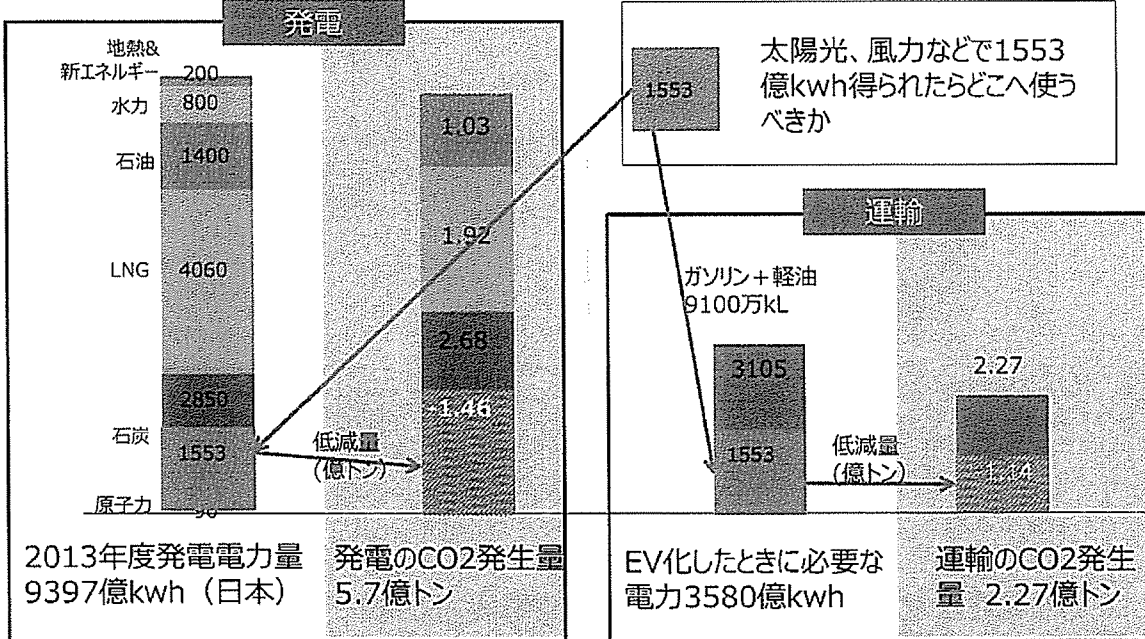


2倍近い発電容量に増強した上に4千万台以上のEV 大規模な蓄電設備
何十万か所の急速充電器 家庭用充電器数千万台??? (数十兆円?)

既存発電設備は稼働率低下で発電コストは上昇

電気自動車に対する考察

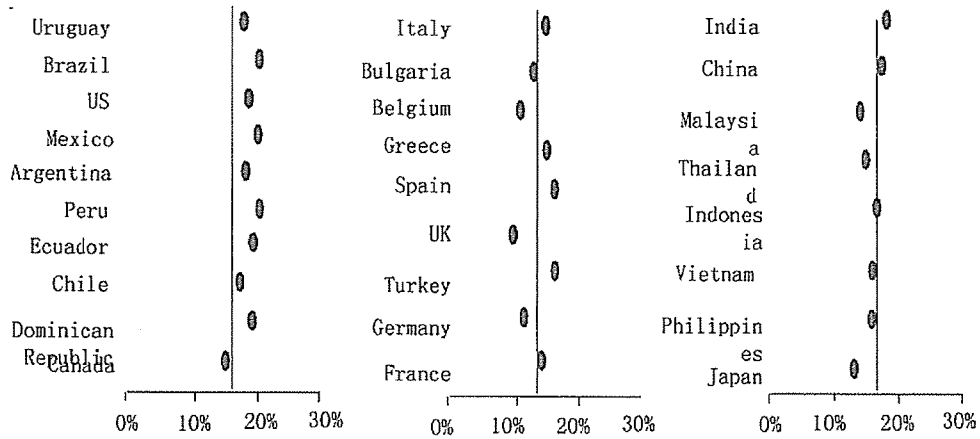
CO2レス電力はどこに使うべきか?



石炭発電を抑制するのに使うほうがCO2低減効果は大きい

電気自動車に対する考察

太陽光発電稼働率



出典: H2 2014 PV LCOE OUTLOOK(Bloomberg New Energy Finance, 2014)

世界平均で20%以下でしかない

電気自動車に対する考察

現状

太陽光発電の発電量



電力需給



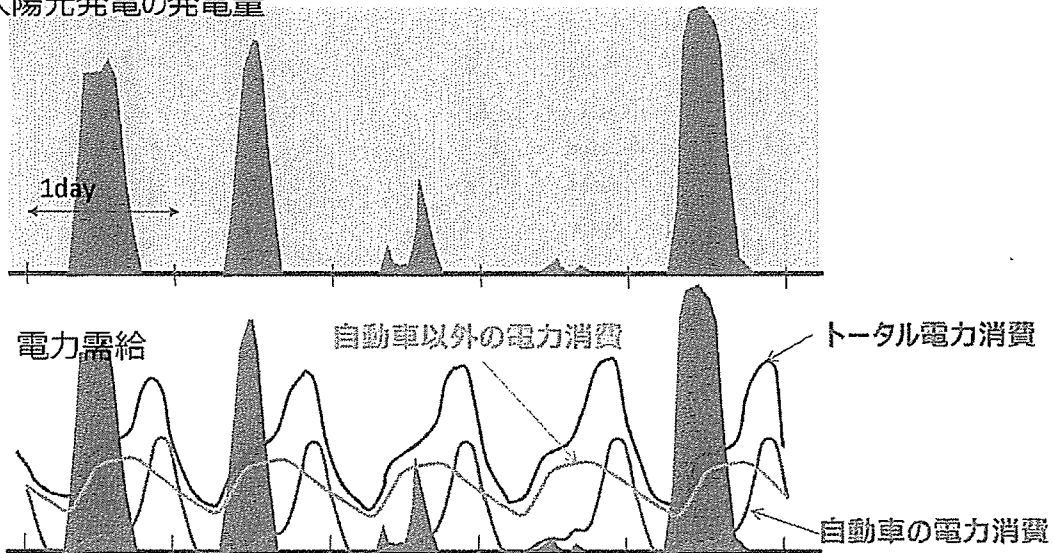
今は太陽光発電の量が少ないので現状の電力供給システム内で問題なく稼働

電気自動車が増えて太陽光発電も増えたらどうなるか？

電気自動車に対する考察

増えたらどうなるか？

太陽光発電の発電量



日ごと、時間ごとに変わる発電量に対し、それらをすべて有効に活用するには蓄電設備またはエネルギー変換&保存設備、バックアップ火力発電が必須 = 莫大なコスト、電気代の大幅アップについて知らされているか？

電気自動車に対する考察

欧州、インド、中国、カリフォルニア

大都市の排ガス汚染 車が悪いとなっているが何が主要因か本当にわかっているのか？

車と言ってもいろいろある

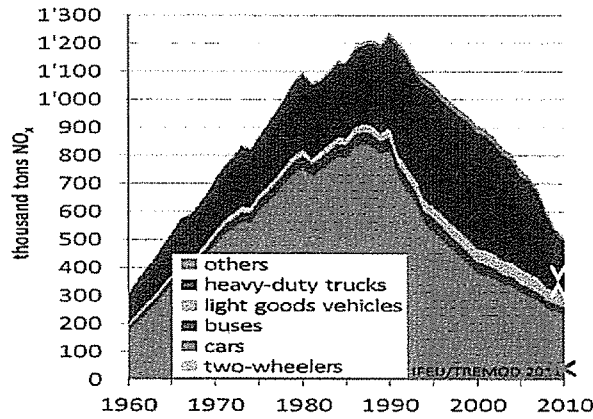
古い車、不正ソフト車、等々

最新の規制にまっとうに適合した車にすればどうなるか検証しているか？

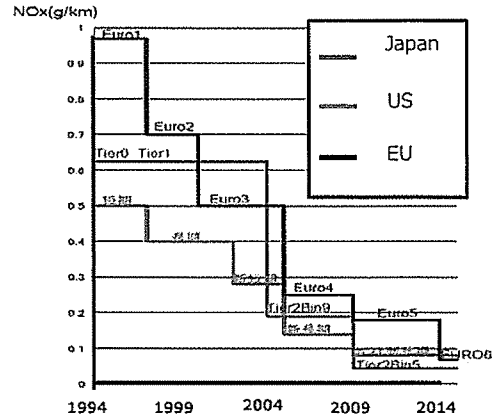
電気自動車に対する考察

ドイツのNOx排出量とNOx規制

NO_x emissions from road transport in Germany



ディーゼル乗用車のNOx規制



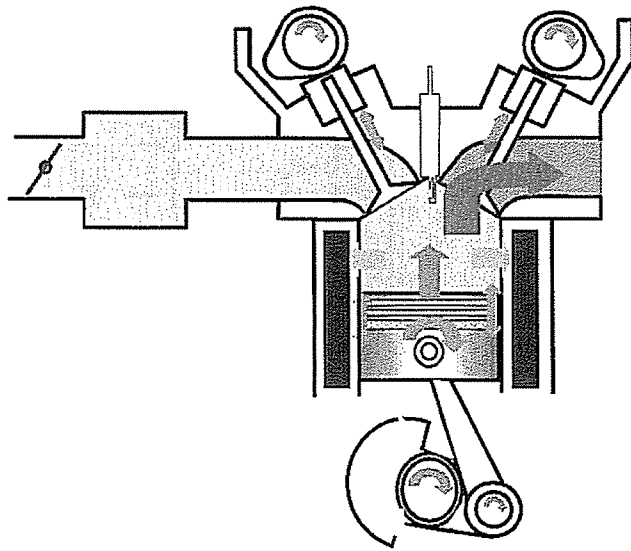
ソフトウェアの問題で何十倍も出していたら10年前に後戻りしているのでは？
きちんと規制対応しておけば都市部の排ガス問題も出ないのでは？
東京は自動車に関わる環境問題など出ていない！！！！

内容

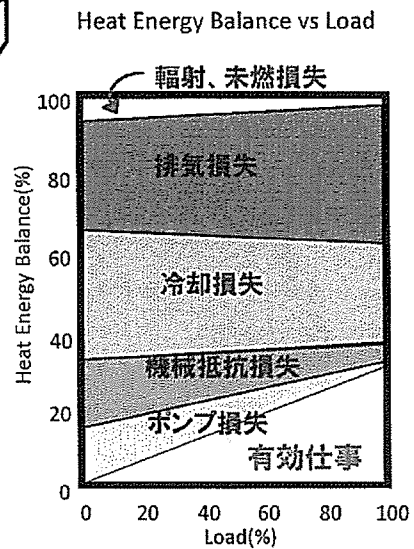
1. 電気自動車に対する考察
2. 内燃機関の効率改善
 - 2-1. 目標
 - 2-2. SKYACTIV-X
3. 全体最適のアプローチに対する提案
 - 3-1. NOxとCO2の効率的低減
 - 3-2. 発電と運輸の効率的CO2低減

内燃機関の効率改善 目標

内燃機関の効率改善



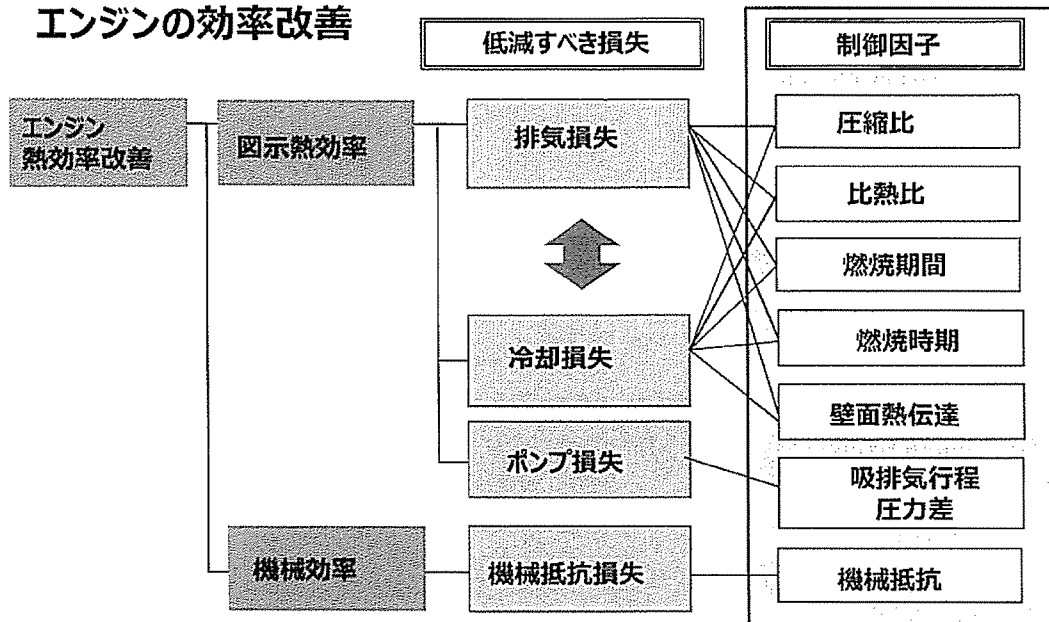
内燃機関の各種損失



内燃機関の効率改善 = 排気損失、冷却損失、ポンプ損失、機械抵抗損失低減

内燃機関の効率改善 目標

エンジンの効率改善

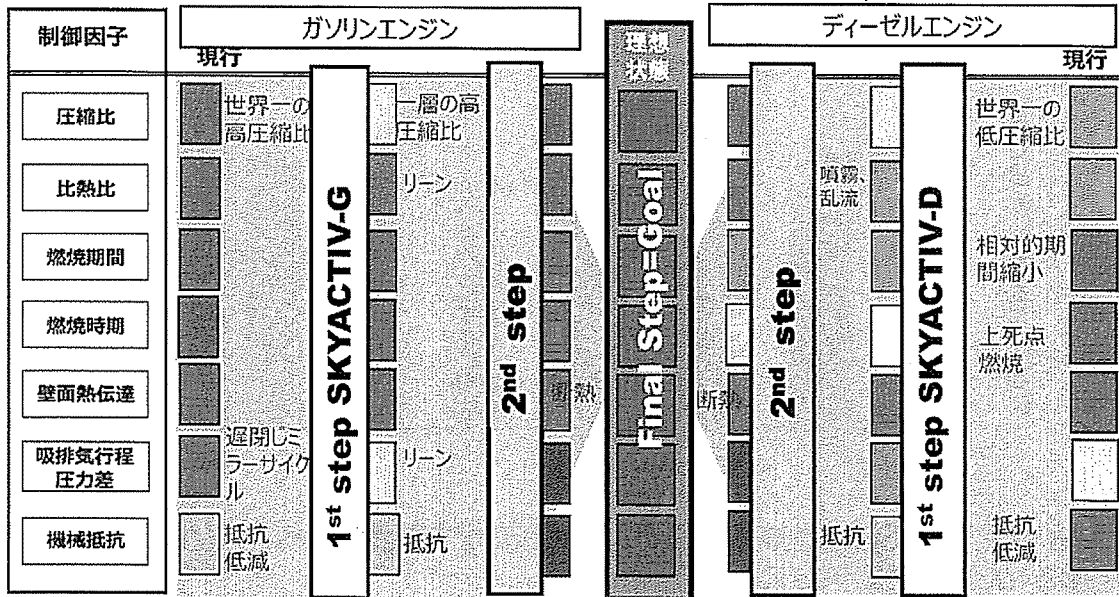


効率改善 = 制御可能な因子を理想に近づけていく取り組み

内燃機関の効率改善 目標

内燃機関進化Vision

遠い 理想からの距離 近い



ガソリンもディーゼルも同じ方向へ向かう

内燃機関の効率改善 目標

LCA

In the equipment cycle, it is clear that the production of the lithium battery plays an important role. A large battery LCA review paper [12] reveals that depending on the literature source and chemistry (LFP, LTO, LCO, LMO, NCM, NCA) [13], the impact of producing a lithium battery can vary from 40 to 350 kg CO₂/kWh_{battery capacity}, with an average of 110 kg CO₂/kWh_{battery capacity}, see figure 3. A technical review paper discussing these various battery chemistries is to be found in [14].

ENVIRONMENT

Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles

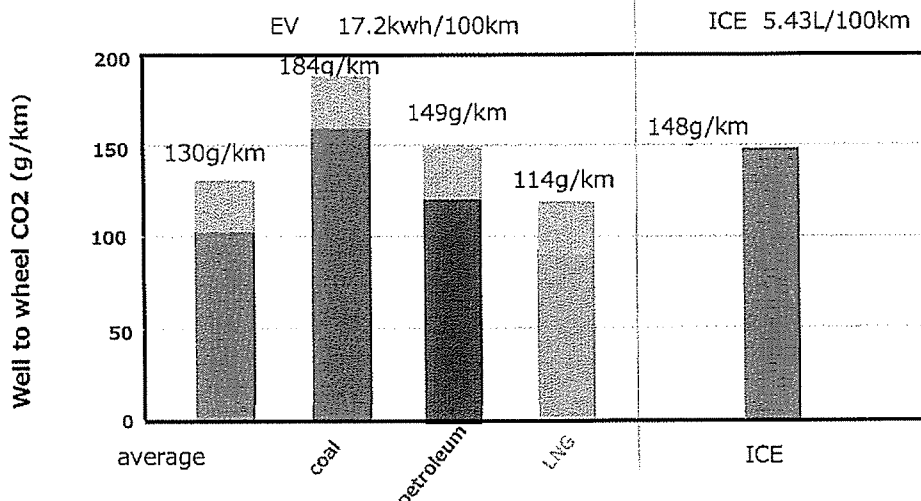
Author: Dr. Maarten Messing - Vrije Universiteit Brussel - research group MOB

The European Federation for Transport and Environment, commonly referred to as Transport & Environment (T&E) is a European umbrella for non-governmental organisations working in the field of transport and the environment, promoting sustainable transport in Europe; which means an approach to transport that is environmentally responsible, economically sound and socially just.

バッテリーは平均で40kwhとし、一台が平均20万km走るとすると
 $110 \times 1000 \times 40 / 200000 = 22g/km$

電気自動車に対する考察

Li-ion batteryのLCAを考慮したWTW CO₂



SKYACTIV搭載車で実用燃費を10%強改善すれば平均的発電方法で供給された電気を使うEVにCO₂で追いつく

火力発電で最もCO₂発生が少ないLNG発電で供給された電力で動くEVにも25%改善程度で追いつく

内容

1. 電気自動車に対する考察
2. 内燃機関の効率改善
 - 2-1. 目標
 - 2-2. SKYACTIV-X
3. 全体最適のアプローチに対する提案
 - 3-1. NO_xとCO₂の効率的低減
 - 3-2. 発電と運輸の効率的CO₂低減

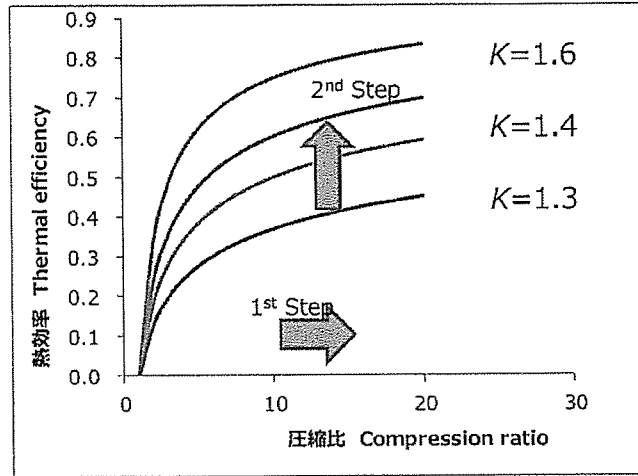
SKYACTIV-X

比熱比改善

オットーサイクルの理論熱効率

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

ε : 圧縮比 Compression ratio
 κ : 比熱比 Specific heat ratio

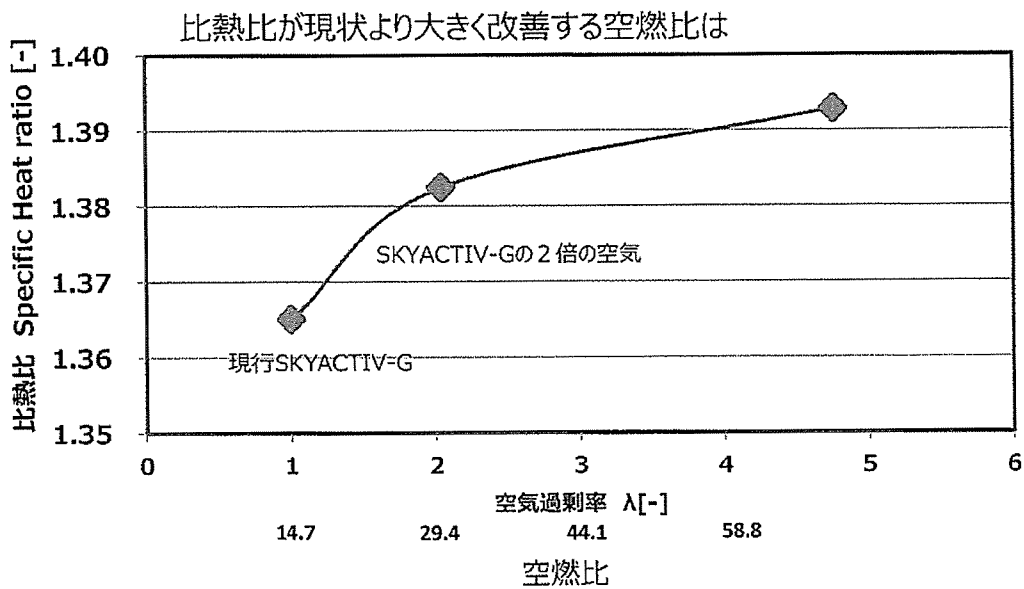


比熱比を大きくするにはどうすればよいか

- ・ 燃料に対する空気の比率を大きくする。=リーンバーン
- ・ 燃焼温度を下げる

SKYACTIV-X

どれくらいリーンにしたいか



大きく燃費改善するなら空燃比で30以上にしたい ($\lambda > 2$)

SKYACTIV-X

A/F>30実現のための課題と対応策

理論空燃比の2倍以上（空燃比を30以上）というレベルにすると

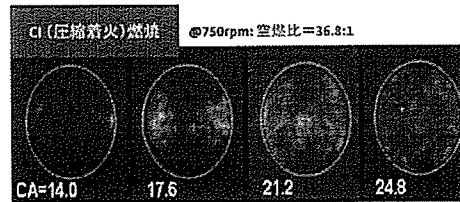
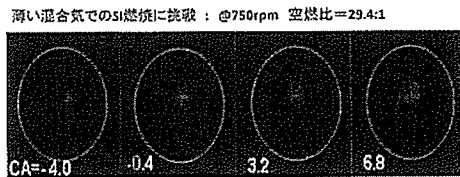
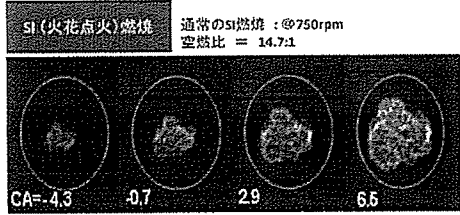


火花点火では火炎伝播ができず燃えなくなる

ガソリン燃料もディーゼルみたいに圧縮着火できないか？



理論空燃比の2倍以上の薄さでも高圧縮比で高温・高圧にすれば圧縮着火により燃焼可能
圧縮着火を実現すればよい

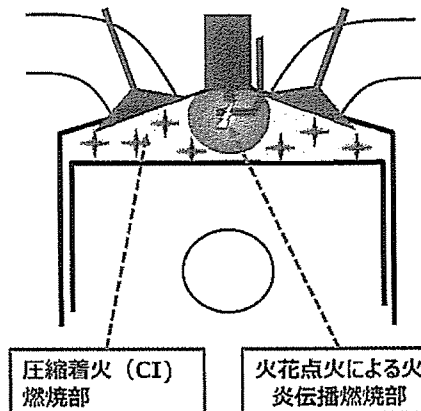


SKYACTIV-X

マツダがとった手段

SPCCI : SPark Controlled Compression Ignition

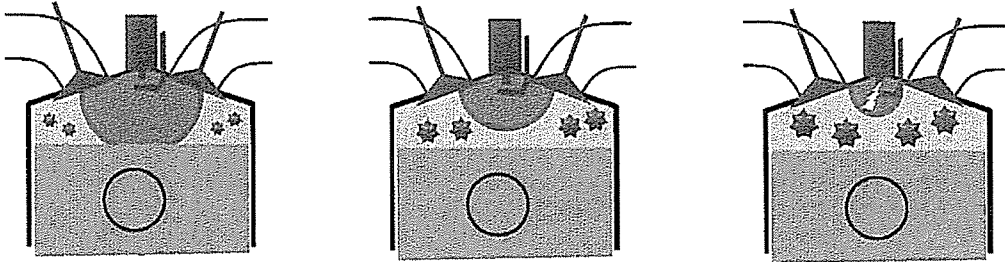
スパークプラグによる点火を制御因子とした圧縮着火



SKYACTIV-X

G2の燃焼技術コンセプト

SPCCI=スパークプラグによる点火を制御因子とした圧縮着火



CIしにくい軽負荷、高回転、低外気、低気圧、ハイオクタン燃料の場合は早く点火して大きく圧縮



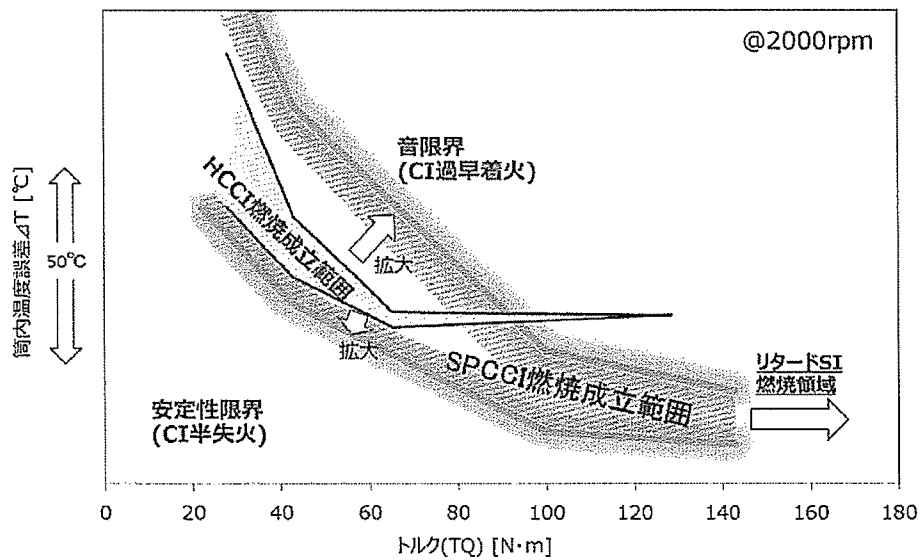
容易にCIする条件では遅く点火して小さく圧縮

火花点火による燃焼で、瞬時に適度なCIを起こさせる状態を作ることができる

マツダ株式会社 | Strictly Confidential

SKYACTIV-X

燃焼成立範囲の拡大

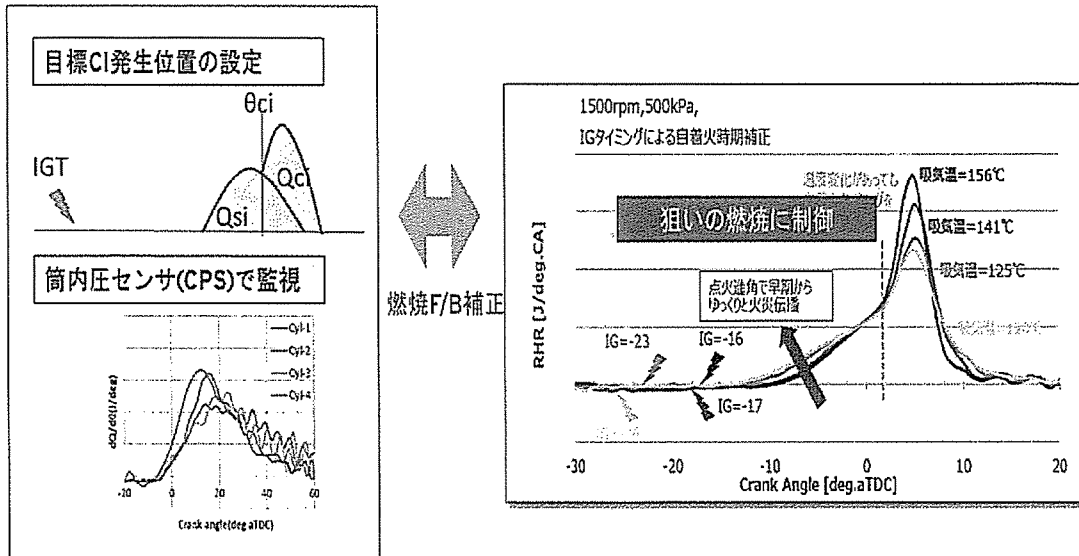


燃焼の生存空間が大きく広がり、燃焼制御のロバスト性が大きく改善した。

マツダ株式会社 | Strictly Confidential

SKYACTIV-X

燃焼制御性の改善

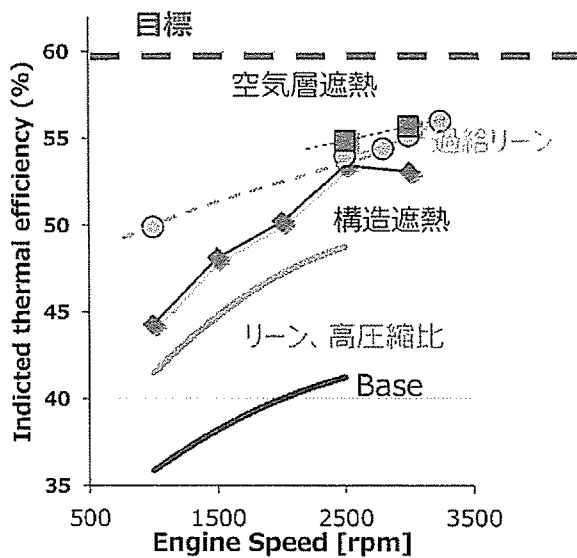


点火時期により目標の燃焼状態に制御可能

SKYACTIV-Xの次

SKYACTIV Generation 3

遮熱の効果



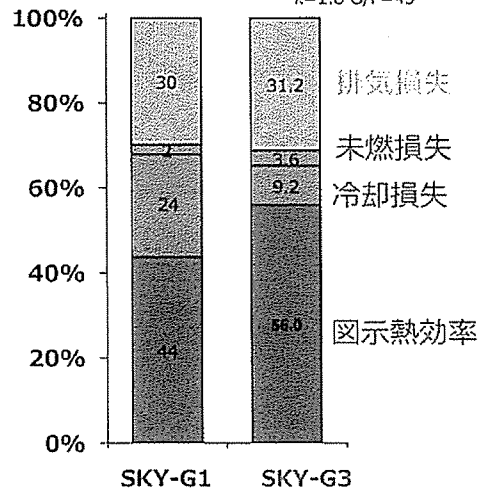
現状:56.0% (ISFC:148.1g/kWh)

@3250rpm GrossIMEP:6.57bar

Charging pressure:43kPaG

EGR:40%

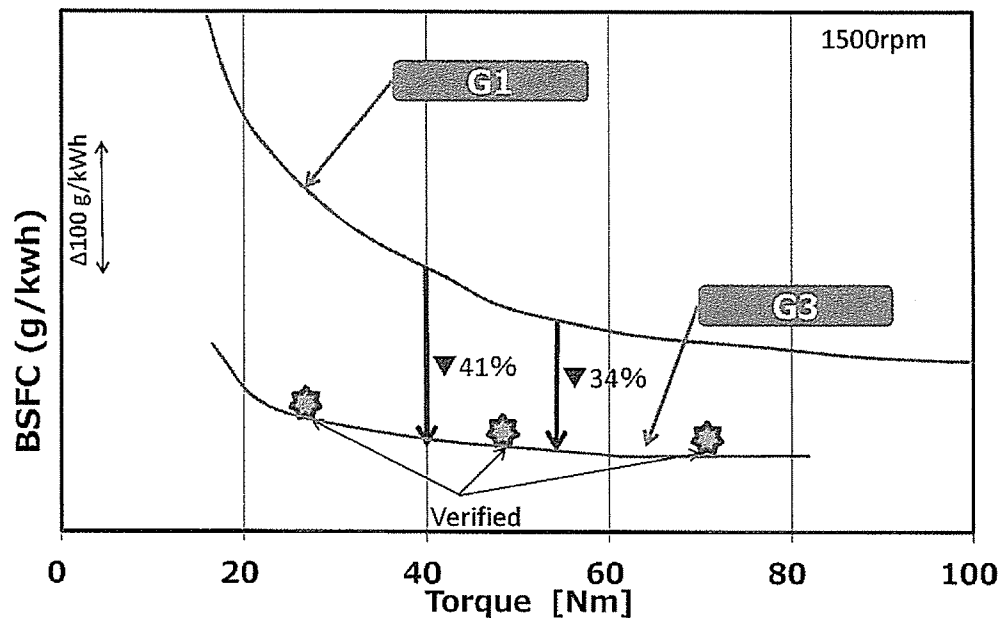
$\lambda=1.8$ G/F=45



図示熱効率の実測値 : 56.0%(@3250rpm)

SKYACTIV-Xの次

SKYACTIV Generation 3



LNG発電の電気を使うEVに勝る実用燃費25%以上改善は可能と考えられる

33

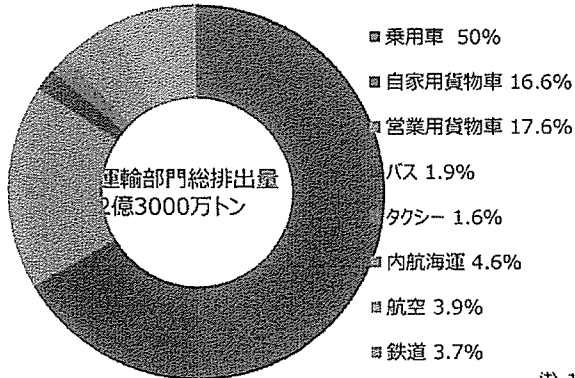
内容

1. 電気自動車に対する考察
2. 内燃機関の効率改善
 - 2-1. 目標
 - 2-2. SKYACTIV-X
3. 全体最適のアプローチに対する提案
 - 3-1. NOxとCO2の効率的低減
 - 3-2. 発電と運輸の効率的CO2低減

34

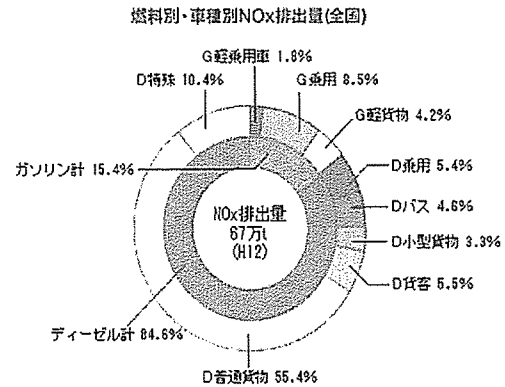
NOxとCO2の効率的低減

自動車によるCO2排出 (2011年)



中央環境審議会地球環境部会・
産業構造審議会産業技術環境分科会地球環境小委員会第38回合同会合

自動車によるNOx排出 (平成22年)



注) 1%未満はラベルを除く
出典: 「自動車排出ガス原単位及び総量算定値の調査」 環境省環境管理局(H18年度結果報告書より)

乗用車は貨物車の3倍CO2を出している

貨物車は乗用車の7倍NOxを出している

35

NOxとCO2の効率的低減

他国の状況は？

2016.12.20時点での調査結果

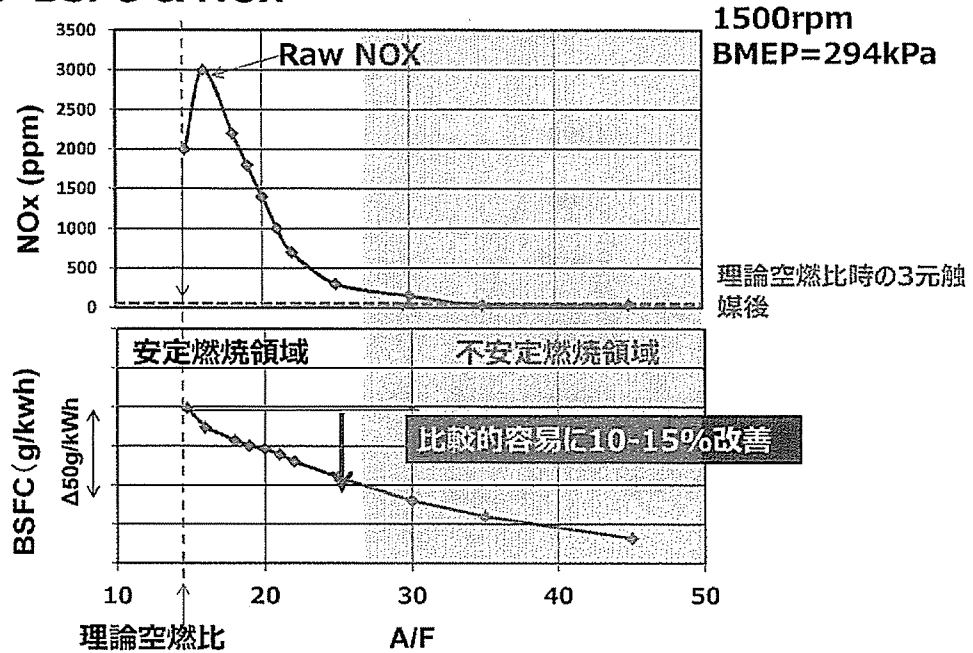
| | 普通貨物車/乗用車 Heavy duty trucks/Passenger vehicles, Cars | | | |
|---------|---|------|-------|------|
| | CO2比率 | 調査年 | NOx比率 | 調査年 |
| 日本 | 0.37 | 2014 | 6.4 | 2010 |
| 欧州 | 0.47 | 2015 | 1.3 | 2010 |
| カリフォルニア | 0.27 | 2014 | 3.5 | 2015 |
| 米国 | 0.38 | 2014 | — | — |
| 中国 | — | — | 6.0 | 2013 |

どの国も乗用車の方がCO2は多く輩出し、NOxは貨物車が多く輩出している

36

NOxとCO2の効率的低減

A/F vs BSFC & NOx



NOx規制値が緩和されれば燃費は容易に改善する

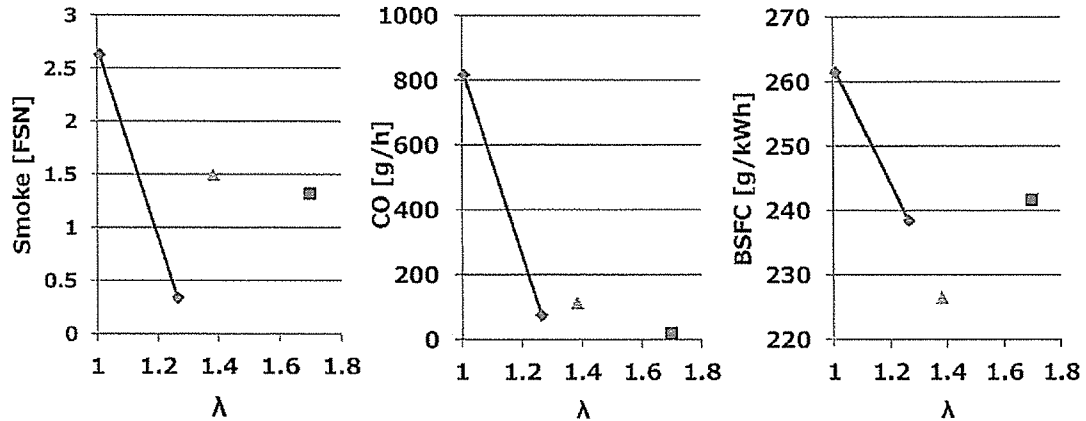
NOxとCO2の効率的低減

大型ディーゼルエンジンのAfter-treatment コスト低減へのアプローチ

$\lambda = 1$ で運転可能になり3元触媒が使えれば実現
可能では？

NOxとCO2の効率的低減

ディーゼルに3元触媒は使えるか？



Smoke,未燃分の急増、燃費悪化で使えない
SCR,NSCなどの高コスト後処理の付加が必須となっている

NOxとCO2の効率的低減

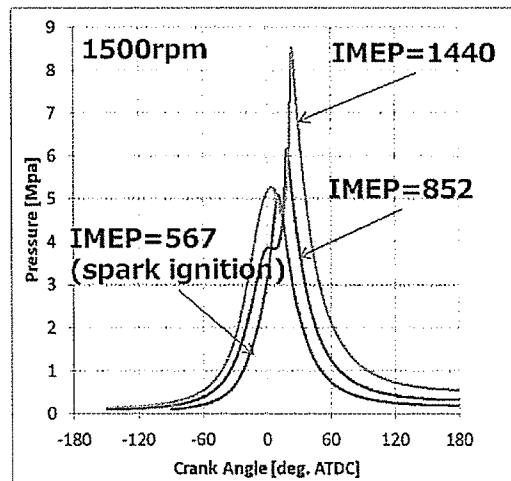
ナフサの有効活用（理論空燃比燃焼）

計算条件

| IMEP [kPa] | EGR [%] | IVC [deg. ABDC] | Napththa ratio(%) |
|------------|---------|-----------------|-------------------|
| 567 | 40 | 90 | 100 |
| 852 | 40 | 30 | 95 |
| 1440 | 29 | 30 | 95 |

| | |
|--------------------|-----------|
| Bore x Stroke [mm] | 120 x 145 |
| Compression ratio | 16.0 |
| Engine speed [rpm] | 1500 |

シリンダー圧力波形

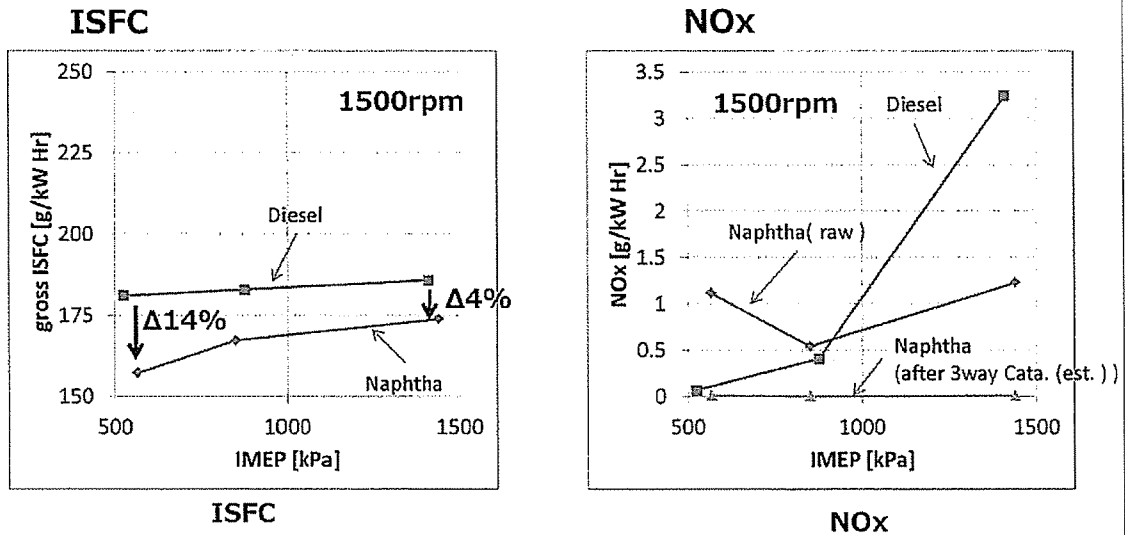


燃料の役割分担

ナフサ; 主燃焼混合気 (均質) 軽油; 点火源

NOxとCO2の効率的低減

ナフサの有効活用（理論空燃比燃焼）

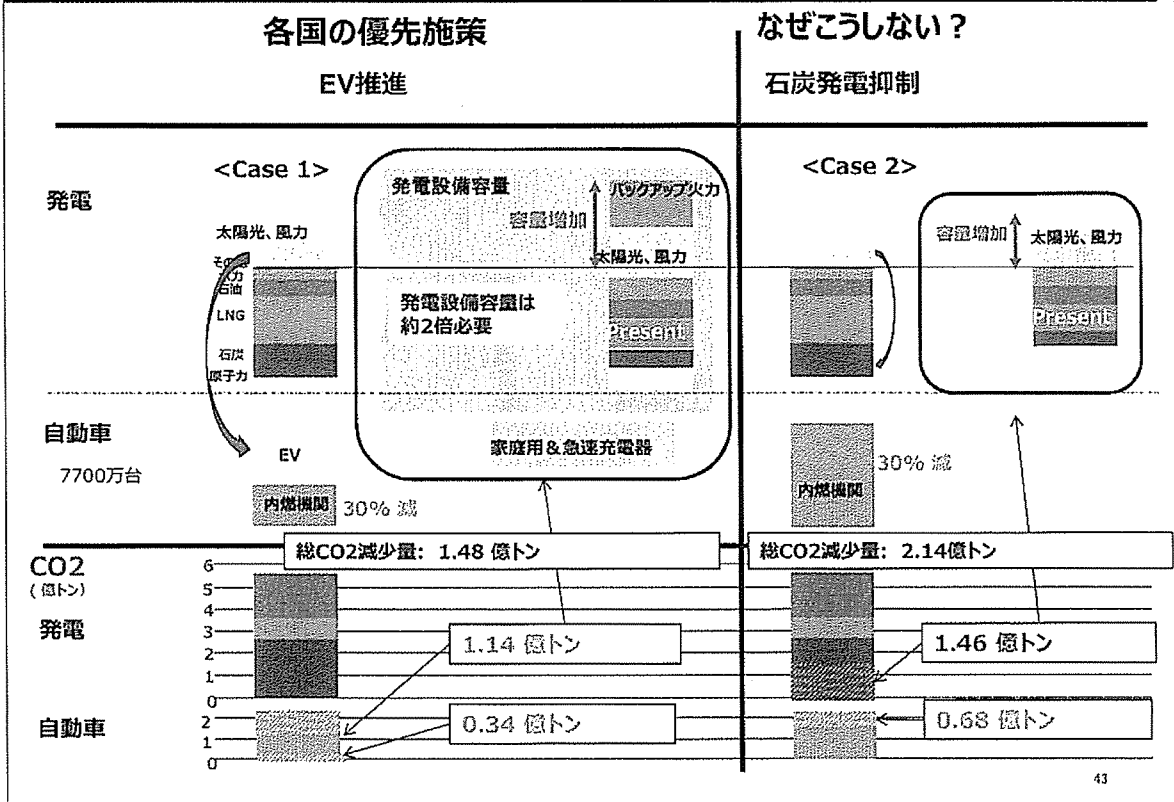


ナフサを利用することでヘビーデューティーの大型エンジンが理論空燃比運転可能になり低コストの3元触媒が利用可能になる

内容

1. 電気自動車に対する考察
2. 内燃機関の効率改善
 - 2-1. 目標
 - 2-2. SKYACTIV-X
3. 全体最適のアプローチに対する提案
 - 3-1. NOxとCO2の効率的低減
 - 3-2. 発電と運輸の効率的CO2低減

発電と運輸の効率的CO2低減



発電と運輸の効率的CO2低減

主なバイオ燃料の比較（食糧競合、燃料生産性）

| | 第1世代 | | 第2世代 | 第3世代 |
|-------------------|---------------------|-----------------|---------------------|-------|
| | デンプン質植物 (トウモロコシ) | 糖質植物 (サトウキビ) | 草本セルロース (ネピアグラス) | 微細藻類 |
| 食糧競合 | レ | レ | - | - |
| 燃料生産性 (t/ha/y) | 3.8 | 4.9 | 9.5 | 33-98 |

右記データ: COCN報告書※
(2012) より引用

※COCN (産業競争力懇談会)、微細藻類を利用した燃料の開発

微細藻類バイオ燃料が、将来の再生可能液体燃料候補として有望

発電と運輸の効率的CO2低減

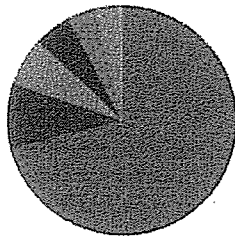
Well to TankゼロCO2に向けた考え方（案）

微細藻類バイオ燃料の製造プロセス：



微細藻類バイオ燃料製造におけるGHG排出量の内訳と削減のアプローチ

※CO2N報告書資料よりマツダ作成（独立栄養ケース、乾燥には廃熱利用想定）



■ 電力
 ■ N,P,K (栄養塩)
 ■ 熱
 ■ 凝集剤
 ■ 水
 ■ 水系
 ■ ヘキサン

| 内訳 | 主な利用工程 | GHG排出削減の考え方（案） |
|-------|-------------------|--|
| 電力 | 培養（CO2バブリング、攪拌）ほか | 短期間/高密度で培養可能な【高性能微細藻類】開発→必要電力大幅削減→【残渣利用発電・電力】で賄う |
| N,P,K | 培養（栄養塩） | 【下水廃栄養塩】を活用 |
| 熱 | 油脂抽出ほか | 【残渣利用発電・廃熱】を活用 |
| 凝集剤 | 回収 | 【高効率膜分離】など |
| 水 | 培養 | 【水リサイクル】【下水廃水】を活用 |

Well to Tank（燃料製造段階）でのCO₂排出量をゼロの可能性あり。

45

疑問点のまとめ

- EVとICEのどちらがCO2が低いかなど関係ない
太陽光や風力で得た発電は火力発電を減らす方に使い、自動車は自動車で削減努力をする
両方で努力するほうがインフラコストも低くCO2低減効果も大きいのになぜそうしないか？
- 最新規制にまじめに対応した車が大半を占めれば大都市の環境問題も出ないはず。なぜ検証しないか？
- 全体最適の視点で規制を考えればもっと効率的に有害物の排出を抑えられるはず。そのようなアプローチは聞いたことがないのはなぜか？
- 貯蔵、輸送も簡単なクリーンな液体燃料研究をなぜ促進しないのか？

ご清聴ありがとうございました！

