

# The MIRAI

## LCA レポート

for communication



会社名： トヨタ自動車株式会社

責任者： 時枝 純二

LCA 分析者： 小澤 環 吉田 拓矢

監督者： 相田 智 大宅 梨沙

報告書作成日： 2015年6月10日

準拠規格： ISO 14040(2006) / ISO 14044(2006)

校閲者： Dominik Müller, TÜV Rheinland LGA Products GmbH

## 目次

1. 調査目的	P. 4
2. 機能	P. 5
3. 評価領域	P. 6
4. ライフサイクルインベントリ分析	P. 7
5. インベントリ分析結果	P. 11
6. ライフサイクル影響評価	P. 13
7. 感度分析	P. 28
8. LCA の限界	P. 29
9. 結論	P. 30

## 略語説明

ADP (Fossil fuel)	(Abiotic depletion potential) 化石燃料消費ポテンシャル
ADP (Elements)	(Abiotic depletion potential) 鉱物資源消費ポテンシャル
AP	(Acidification potential) 酸性化ポテンシャル
BOM	(Bill of materials) 部品構成表
CEP	(Clean Energy Partnership) クリーンエネルギーパートナーシップ
CFRP	(Carbon fiber reinforced plastic) 炭素繊維強化プラスチック
CML	Centrum voor Mileukunde Leiden (Centre for Environmental Sciences, Netherlands)
COD	(Chemical Oxygen Demand) 化学的酸素要求量
CO <sub>2</sub>	(Carbon dioxide) 二酸化炭素
e, eq	(Equivalent) 等価
EP	(Eutrophication potential) 富栄養化ポテンシャル
FCV	(Fuel cell vehicles) 燃料電池自動車
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung, by Thinkstep
GV	(Gasoline vehicles) ガソリン車
GWP	(Global warming potential) 地球温暖化ポテンシャル
HC	(Hydrocarbons) 炭化水素
HV	(Hybrid vehicles) ハイブリッド車
JAMA	(Japan Automobile Manufacturers Association, Inc.) 一般社団法人日本自動車工業会
JLCA	(The Life Cycle Assessment Society of Japan) LCA 日本フォーラム
JRC	(European Commission Joint Research Centre) 欧州委員会共同研究センター
kg	キログラム
kW	キロワット
LCA	(Life Cycle Assessment) ライフサイクルアセスメント
LIME2	Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modelling
Mizuho	みずほ情報総研
NEDC	(New European Driving Cycle) 新欧州ドライビングサイクル
NEDO	(New Energy and Industrial Technology Development Organization) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
NM VOC	(Non-methane volatile organic compounds) 非メタン炭化水素
NO <sub>x</sub>	(Nitrogen oxides) 窒素酸化物
POCP	(Photochemical ozone creation potential) 光化学オゾン生成ポテンシャル
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	(Phosphate) リン酸塩
ppm	(Parts per million)
SO <sub>x</sub>	(Sulphur oxides) 硫黄酸化物
t	(tonnes) トン
TN	(Total nitrogenous matter) 全窒素
TP	(Total phosphorous matter) 全燐
WtW	(Well to Wheel) “井戸もとから車軸まで”

# MIRAI LCA レポート

## 1. 調査目的

### 背景

今日において、自動車の走行段階での有害物質排出量低減に貢献する環境性能を備えたパワートレインは多種多様に存在する。しかし、自動車の環境性能評価は、走行時に限らず素材製造から車両廃棄までのライフサイクル全体で想定され得るすべての影響を考慮しなければならない。トヨタは世界初の量産型FCV、MIRAIの発売に当たり、比較対象としてガソリン車とHV車を取り上げライフサイクルアセスメント(LCA)を実施した。

### 目的

トヨタでは1997年以降、すべての乗用車とその部品に対してLCAを実施、従来品との比較で環境性能の向上を確認してきた。検証結果は各製品カタログで展開し、顧客等に一般公表されている。

今回の評価プロセスでは、特有のパワートレイン“燃料電池”と、エネルギー源“水素”に重点を置き、MIRAIに使用される水素の製造方法や燃料電池専用部品の材料構成、製造プロセスの環境影響について考察した。

(FCVの環境性能は、燃料となる水素の製造方法・輸送方法・燃焼効率によって異なる。本評価では、水素源(水素生成に必要な燃料)としての化石燃料や再生可能エネルギー由来エネルギー、及び、その輸送方法やオンサイト・オフサイト等の生成条件等、多様なパスを考慮している。)

### 情報開示の対象

結果は、顧客や水素供給業者、各地の政府機関とのコミュニケーションツールとして利用されると同時に、どの材料やどの工程が大きく影響しているかを、社内の開発部署にフィードバックすることにより、今後の車両開発の改善に役立てる。

## 2. 機能

本評価において、自動車の主たる機能は乗員を輸送すること、と定義している。

比較対象車両として、MIRAI と同様のプレミアムサルーン(GV、HV)を採用した。

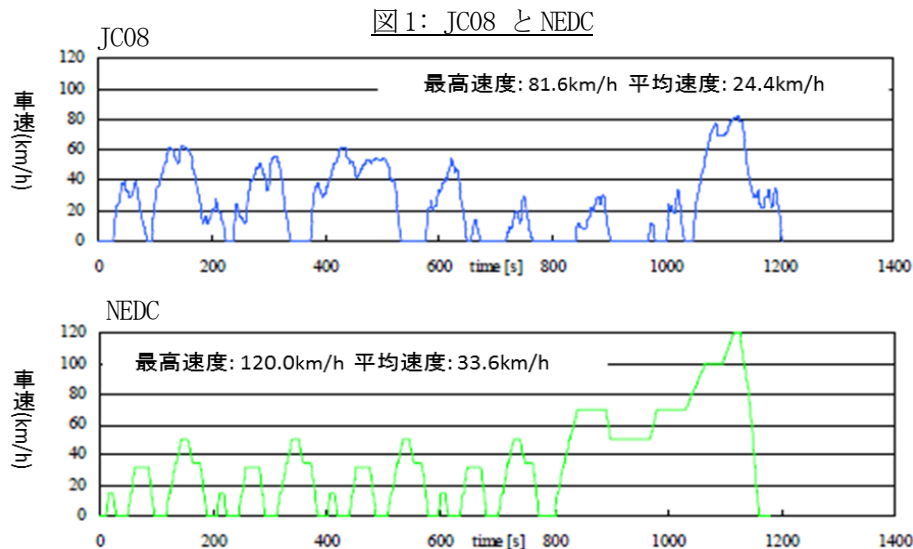
表1：諸元

	GV	HV	MIRAI
燃料	ガソリン	ガソリン	水素
排気量(cm <sup>3</sup> )	2499	2493	-
エンジン最高出力(kW)	149 kW	131 kW	-
エンジン最大トルク(Nm)	243 Nm	221 Nm	-
電気モーター最高出力	-	105 kW	113 kW
電気モーター最大トルク(Nm)	-	300 Nm	335 Nm
燃料電池最高出力	-	-	114kW
トランスミッション	6AT	eCVT	-
車両質量	1540 kg	1630 kg	1850 kg
車両外寸法(mm)	4895x1800x1460		4890x1815x1535
燃費(日本) ／使用段階(JC08)	11.4 km/L	23.2 km/L	*2
燃費(欧州) ／使用段階(NEDC)*1	8.5 L/100km	4.3 L/100km	0.76 kg - H <sub>2</sub> /100km

\*1 NEDC における燃料消費率は、同クラス車両の係数により JC08 認定値から算出。

\*2 新規規格ステーションでの満充填約 4.6kg、航続距離約 700km (JC08 相当トヨタ測定値)

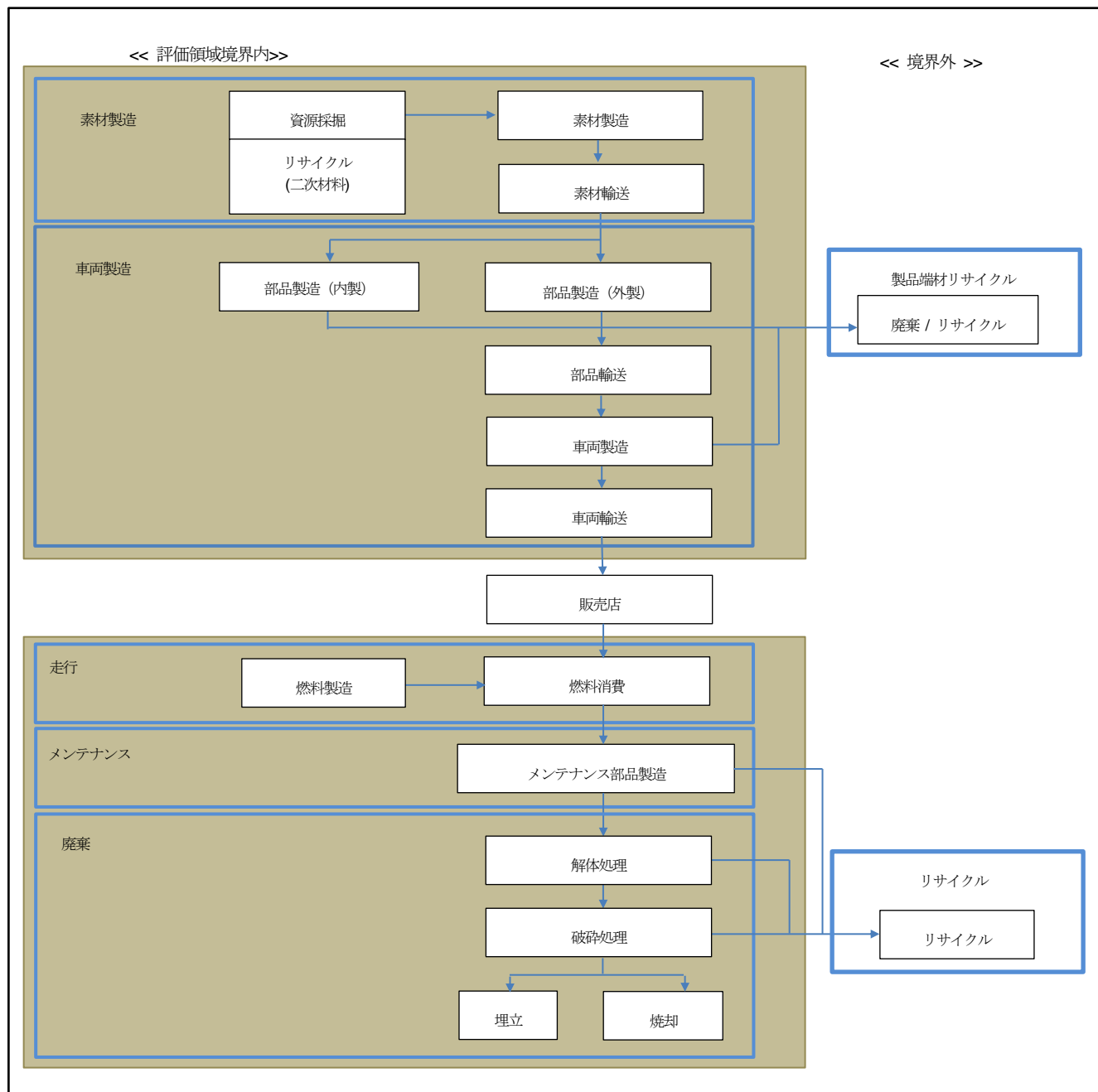
本評価は、92/22/EEC 指令に基づき規定された条件下（車両質量+運転者 68kg、積載貨物 7kg、燃料タンク 90%）で実施、輸送距離(生涯走行距離)は日欧で 2 パターンを想定した。(日本：JC08 モードで 100,000km、欧州：NEDC モードで 150,000km、両者とも車両寿命 10 年、10 年分のメンテナンス及び必要な交換部品を含む)



### 3. 評価領域

本評価では、想定される全てのエネルギー、材料、プロセスを評価領域と定義している。新しい車両モデルを追加するにあたっては、部品等のサプライヤーや社内各部署の協力が必要となる。燃料電池パワートレインに関しては、社内の開発部門と製造部門から、新しい部品の全ライフサイクル段階の評価に必要なデータを収集した。以下、概略図にて評価領域を示す。

図 2: 評価領域



#### 4. ライフサイクルインベントリ分析

- 概要
- トヨタ LCA システム
  - インプット：関連資源
  - アウトプット：5 物質 (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM, NMHC)
  - 5 段階(素材製造、車両製造、走行、メンテナンス、廃棄)

原単位データと計算式は以下のように設定されている。

##### (1) 素材製造段階

今回の調査対象は日本の製造ケースであるため、原単位は JLCA のデータベースを参照・採用した。また必要に応じて、文献調査等から補足として 60 種類以上の原単位を用意した。各原単位は、素材の採掘まで遡る上流工程も考慮している。マテリアルリサイクルの影響もまた、素材製造段階に含まれる。

〈インベントリ計算式〉

素材製造 = (車両の材料質量 / 加工歩留まり率) × 素材製造原単位 + 輸送距離 × 質量 / (積載貨物 × 比率) × (輸送距離の陸上・海上別排出量)

##### (2) 車両製造段階

###### 1) 内製部品

2013 年 4 月～2014 年 3 月までの年次データを参照し、製造原単位を作成。工場データは工程ごとに管理し、該当工程にて製造される部品質量を基に原単位化した。

〈インベントリ計算式〉

内製原単位 (g/kg) = 工程別エネルギー消費量 ÷ 工程別部品加工重量 × エネルギー燃焼原単位

###### 2) 外製部品

2013 年度のサプライヤーデータより、部品質量あたりの製造原単位を作成。工場データは、個々の部品製造部門の年間使用データを集計、製品質量で原単位化したものを使用した (内製加工原単位は製造工程ごとに原単位化しているのに対し、外製加工原単位は部品製造一式で原単位化している)。

※調査データには上流の仕入れ先も含まれている。また、日本のサプライヤーデータに基づく原単位が相応しいとして適用した。

〈インベントリ計算式〉

外製原単位 (排出量/kg) = 該当部品工場のエネルギー消費量 ÷ 製品質量 × エネルギー燃焼原単位

###### 3) 輸送原単位 (部品/車両)

JLCA のデータベースより 10t トラック / 5 台積キャリアカーでの輸送および海外海上輸送の原単位を使用した。

(3) 走行段階(燃料製造)

ここでは、燃料供給段階( WtT )の排出量(採取、精製、輸送 etc. 含)について評価する。

<インベントリ計算式>

燃料製造=燃料消費量×二次データ参照の燃料製造原単位(ガソリン、水素)

水素製造時の排出量は、採取地、採取方法等の製造パスによって異なる。(表2参照)

燃料製造二次データ元:

(ガソリン)

日本: NMHC 以外: JLCA

NMHC: GaBi4

欧州: GaBi4

(水素)

日本: みずほ情報総研

欧州: CO<sub>2</sub>: EC JRC

CO<sub>2</sub>以外: みずほ情報総研

表2: 水素パス

地域	水素パス	120MJ/kg-H <sub>2</sub>					データ元
		CO <sub>2</sub>	NOx	SOx	PM	HC	
日本	副生水素(苛性ソーダ)	※					みずほ情報総研(非公開)
欧州	NG (Natural gas): 天然ガス集中改質 (北海・ロシアよりパイプ輸送 4000km)	99.86	※				CO <sub>2</sub> : 欧州委員会共同研究センター(JRC) <a href="http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/about-jec/">http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/about-jec/</a> . WELL-TO-TANK Report Version 4.0 CO <sub>2</sub> 以外: みずほ情報総研(非公開)
	RE (Renewable): 再生可能エネルギー由来水電解(風力)	12.10	※				CO <sub>2</sub> : 欧州委員会共同研究センター(JRC) <a href="http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/about-jec/">http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/about-jec/</a> . WELL-TO-TANK Report Version 4.0 CO <sub>2</sub> 以外: みずほ情報総研(非公開)

日本:

本研究では、顧客への車両引渡し時に充填されている苛性ソーダの副生水素を適用した。

※みずほ情報総研とトヨタが共同研究を実施、参照元の研究データをアップデートした結果を用いたが、みずほ情報総研との間で開示の合意に至っていないため本レポートでは非公開としている。

欧州:

本研究では、MIRAI 販売国であるイギリス、ドイツ、デンマークの水素パスを適用した。

一方は北海やロシアからパイプ輸送された天然ガス改質、他方は風力による水電解である。両パスのCO<sub>2</sub>排出量はEC JRC のデータベースに基づき、その他の排出物質についてはみずほ情報総研が調査した同等のパスに基づいている。

【参照】 国別の条件・政策

イギリス: パス: 最大ケースは、北海、ロシアからパイプ輸送された天然ガス改質 100%  
政策: 該当なし

デンマーク: パス: 風力による水電解 100%  
政策: 法規、100%再生可能エネルギー、グリーンパワー認定必須

ドイツ： パス：北海、ロシアからパイプ輸送された天然ガス改質 50%、風力による水電解 50%  
 政策：クリーンエネルギーパートナーシップ政策 (50%以上再生可能エネルギー)  
<http://cleanenergypartnership.de/>

#### (4) 走行段階(燃料消費)

日欧両ケースの分析を実施した。

〈インベントリ計算式〉

- ・ 走行(燃料消費) — CO<sub>2</sub> = 車両ごとの燃料消費 による排出原単位 × 生涯走行距離
- ・ 走行(燃料消費) — その他排出物質 = 規制値 × 生涯走行距離

##### 1) 走行時の排出量 — CO<sub>2</sub>(ガソリン/水素) :

日本: JC08 認定値

欧州: MIRAI : NEDC (欧州の認定燃費値)

GV, HV : NEDC (JC08 の変換値)

##### 2) 走行時の排出量 — NO<sub>x</sub>, PM, NMHC :

日本: 日本における低排出ガス車認定制度の SU-LEV レベル値(規制値より 75%低減)

欧州: 欧州における規制値 (EURO6)

表 3: 走行段階における排出量

	単位	GV	HV	MIRAI	走行モード/法規		単位	GV	HV	MIRAI	走行モード/法規
CO <sub>2</sub>	g/km	204	100	0	JC08	CO <sub>2</sub>	g/km	196	101	0	NEDC
NO <sub>x</sub>	g/km	0.013	0.013	0	日本 75%低減レベル	NO <sub>x</sub>	g/km	0.06	0.06	0	EURO6
PM	g/km	0.005	0.005	0	—	PM	g/km	0.0045	0.0045	0	EURO6
NMHC	g/km	0.013	0.013	0	日本 75%低減レベル	NMHC	g/km	0.068	0.068	0	EURO6

#### (5) メンテナンス段階

2011年3月31日付 JAMA 研究結果より、走行段階において、車両寿命中 10 年の間にメンテナンスが必要な部品のうち、以下の 3 部品が CO<sub>2</sub> 排出量の 80% を占めるとして特定された。下表で、それら部品のメンテナンス頻度を示す。

表 4 : メンテナンス部品条件

部品名	メンテナンス頻度
補機バッテリー	1 回 / 2 年
タイヤ	1 回 / 33,000km
エンジンオイル(GV, HV)	1 回 / 10,000km

〈インベントリ計算式〉

メンテナンス = 製品質量 × 加工原単位 × メンテナンス回数

(6) 廃棄・リサイクル段階

廃棄段階の原単位は、日欧両地域を考慮し JLCA データベースと NEDO 文献値より算出した。

車両の廃棄・リサイクルには下記工程が伴う：

廃車輸送、フロン類回収、解体処理(エンジン、燃料電池、スタックやタイヤなどの取り外しとエアバッグ回収)、破碎処理、焼却・熱回収、埋立

これら各工程の原単位に質量を掛け合わせることで算出する。今回の評価では廃車輸送距離は 100km と仮定した。

リサイクル工程の条件は、ELV(End of Life Vehicles)について 85%リユース・リサイクル、95%リカバリーという欧州指令の目標率達成を想定して設定した。

<インベントリ計算式>

廃棄＝廃車輸送＋フロン処理＋解体＋破碎＋熱回収＋焼却＋埋立

## 5. インベントリ分析結果

各ライフサイクル段階におけるインベントリ評価結果を図3, 4に示す。

欧州ケースについては、現状で有効な製造パスの中でパイプラインの天然ガス集中改質と風力による水電解の2つの水素製造ケースを検証した。

図3: インベントリ結果 (日本)

MIRAI 水素=苛性ソーダの副生

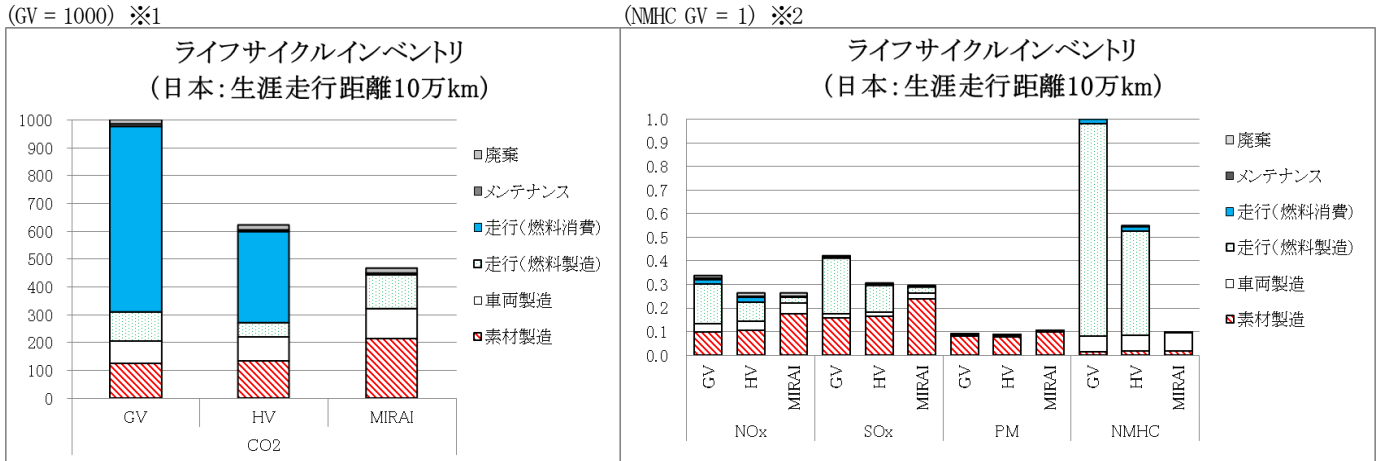
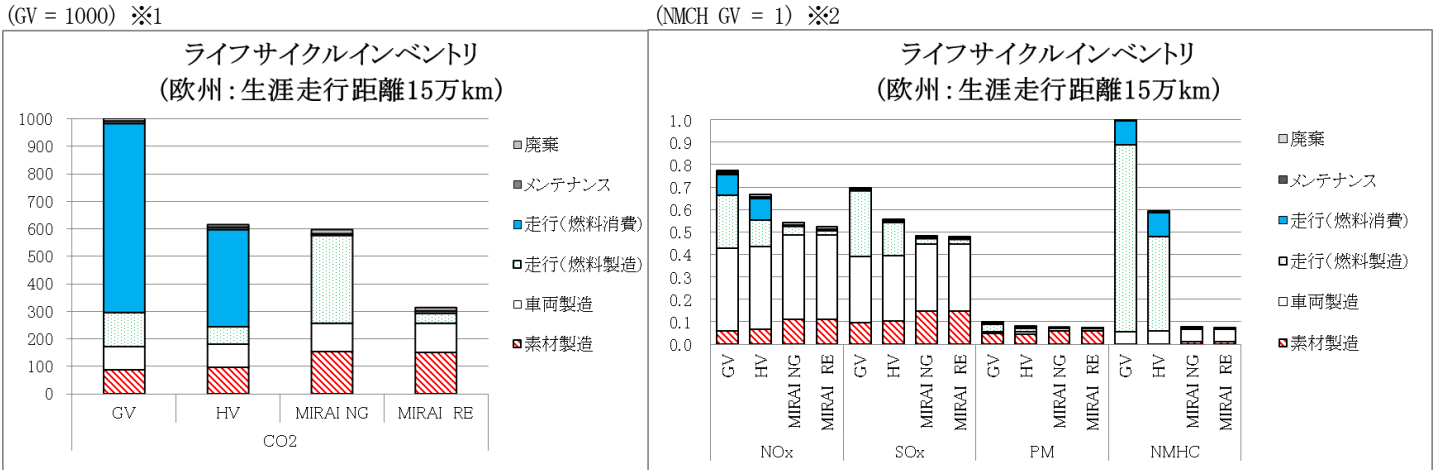


図4: インベントリ結果 (欧州)

MIRAI 水素=NG: パイプライン天然ガス集中改質 RE: 風力による水電解



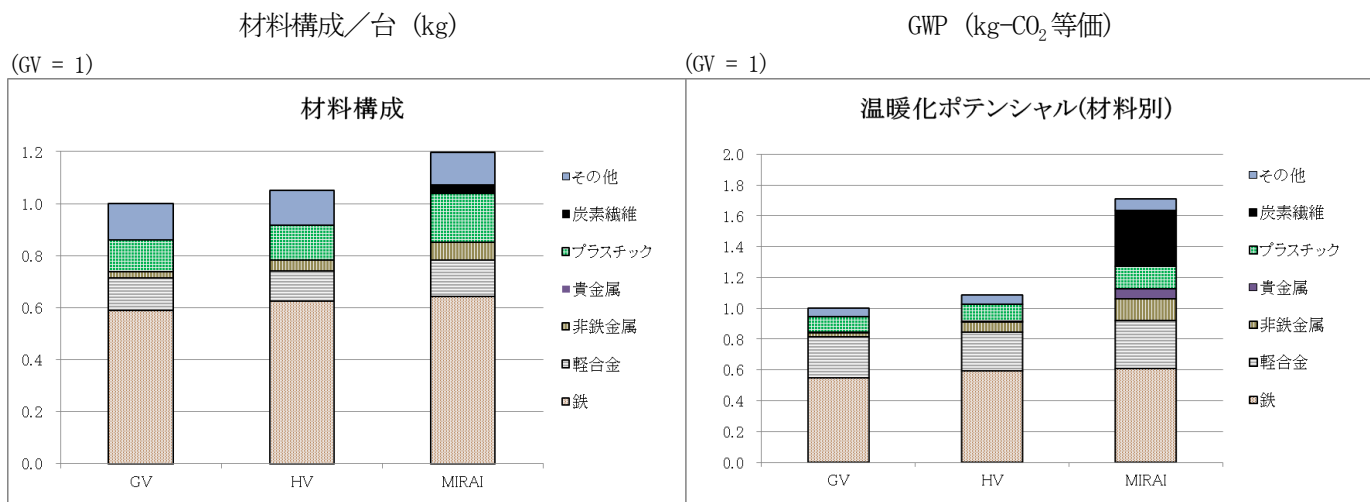
※1 CO<sub>2</sub>は ton レベル、それ以外の項目はkg レベルで排出されるため、CO<sub>2</sub>の基準単位を1000としている。

※2 NO<sub>x</sub>・SO<sub>x</sub>・PM・NMHCの中で最大値のものを1としている。

水素の製造パスは多様に存在するが、日本ではMIRAI 販売時に充填されている苛性ソーダの副生水素パスを採用、各インベントリのHV 比較でも同等またはそれ以下の排出量を示している。欧州の実社会における水素パスは把握しきれない面があるが、今後MIRAI の発売を予定しているイギリス、ドイツ、デンマークにおいて現状で機能している水素ステーションとそのパスを参照した。結果として、パイプラインの天然ガス集中改質、風力による水電解共に、HV と比べて同等またはそれ以下の排出量を示している。

図5は、1車両あたりに必要な材料を示している。MIRAIの構成で特筆すべきは、炭素繊維と貴金属（白金など）を含んでいることである。炭素繊維はCFRPとしてプラスチックと混合され、主に水素の燃料タンクに使用される。これらMIRAI特有の材料はGWPやその他の影響ポテンシャルも多大なため、今後の取り組みが素材製造段階改善のカギとなる。

図5: 材料構成とGWP



## 6. ライフサイクル影響評価

### (1) 影響評価手法

#### ・適用手法

今回の評価手法として、LIME2 と CML を採用した。MIRAI は日本生産であり、製造に関連する段階の評価には主に日本における影響を考慮する LIME2 が相応しいと考えられる。一方で、欧州市場においての使用とそれ以後の段階については、欧州への影響を考慮する必要があるため、CML で評価するのが相応しいと考えられる。しかし、段階ごとに異なる手法を用いることは分析の複雑化を招くため、一研究には一手法とするのが賢明であるとする。また、両手法間の相違についても調査する必要があるとする。よって、両手法について、必要に応じ調査、比較、編集を行い、日欧で以下のように使用した。

日本市場：LIME2 を主要評価手法、CML を参照手法として LCA を実施。

欧州市場：CML を主要評価手法、LIME2 を参照手法として LCA を実施。

#### ・評価領域

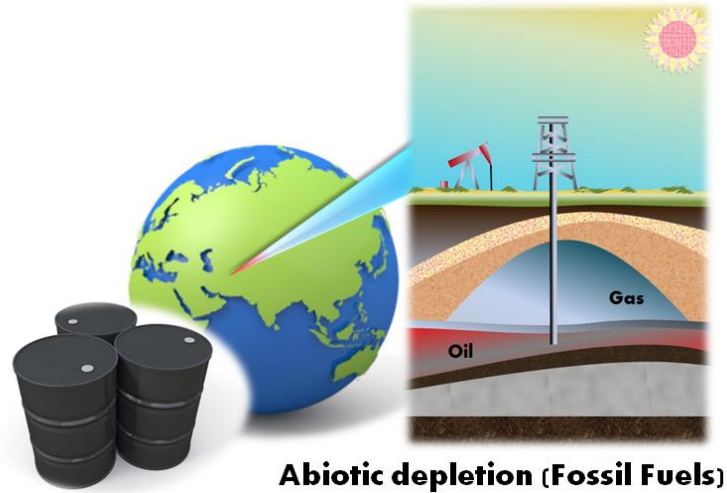
以下 1～6 の影響カテゴリーについて評価した。

1. 化石燃料消費ポテンシャル (ADP 化石燃料)
2. 鉱物資源消費ポテンシャル (ADP 鉱物資源)
3. 光化学オゾン生成ポテンシャル (POCP)
4. 地球温暖化ポテンシャル (GWP)
5. 酸性化ポテンシャル (AP)
6. 富栄養化ポテンシャル (EP)

(2) 評価結果と解釈(日本市場)

1) ADP (Abiotic Depletion Potential) 化石燃料

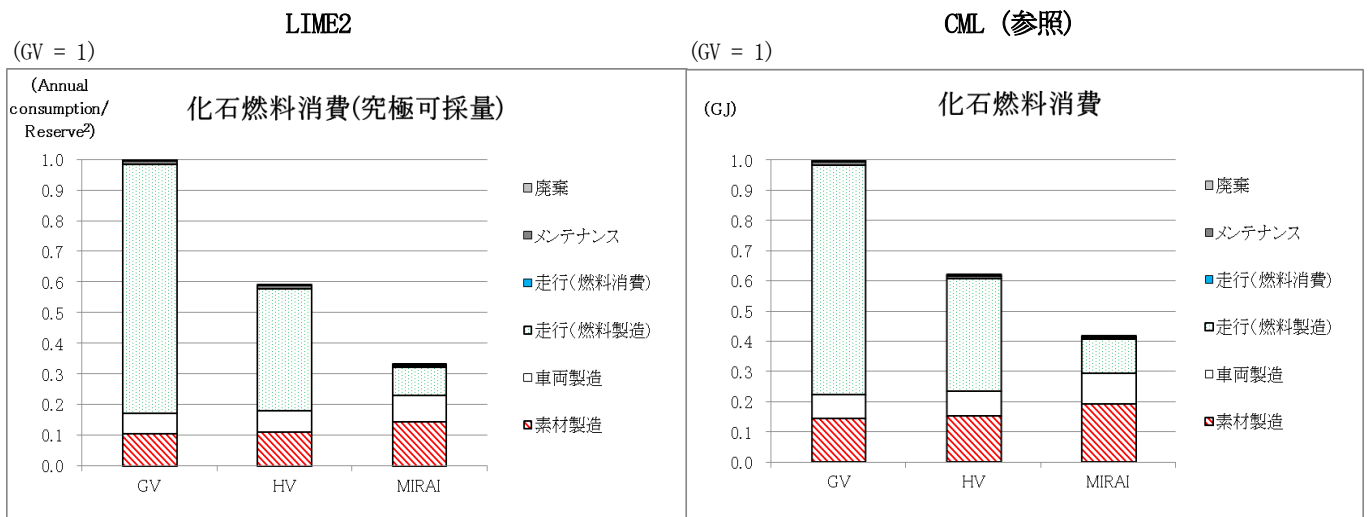
車両製造時(素材、部品、車両輸送含む)や、走行時の車両駆動にかかるエネルギー製造において消費される化石燃料の量を指す(年間消費量/保存量<sup>2</sup>単位)。



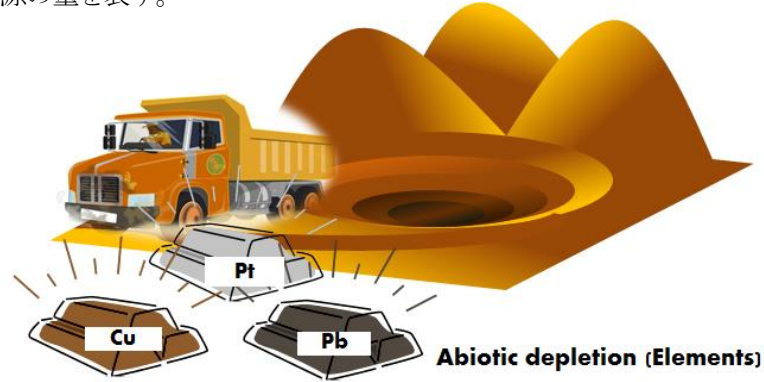
車両走行時、リファレンス車(GV、HV)はガソリンを消費しMIRAI は水素(副生苛性ソーダ)を消費するという点で、走行(燃料製造)段階において大きな違いが見られる。

リファレンス車(HV)はガソリンの消費量を大幅に削減するが、MIRAI は水素で走行するという点から、より一層の優位性を示している。参照したCMLの結果では単位・数値が異なるが、関連の評価ではほぼ同等の結果を示している。

図6：日本市場における影響評価結果 (ADP 化石燃料)

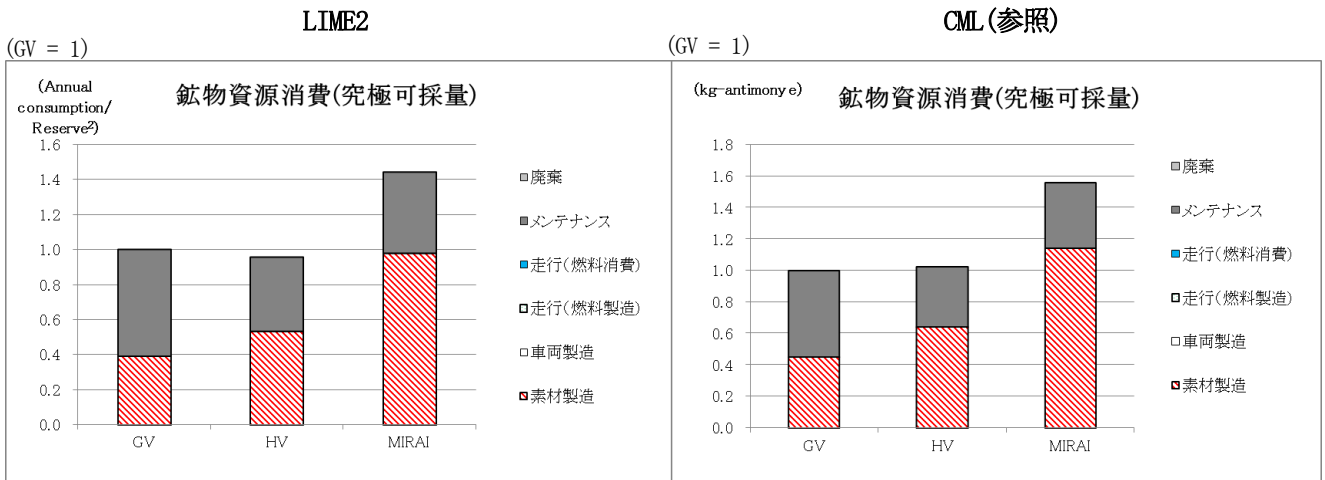


2) ADP (Abiotic Depletion Potential) 鉱物資源  
地球から採取される天然資源の量を表す。



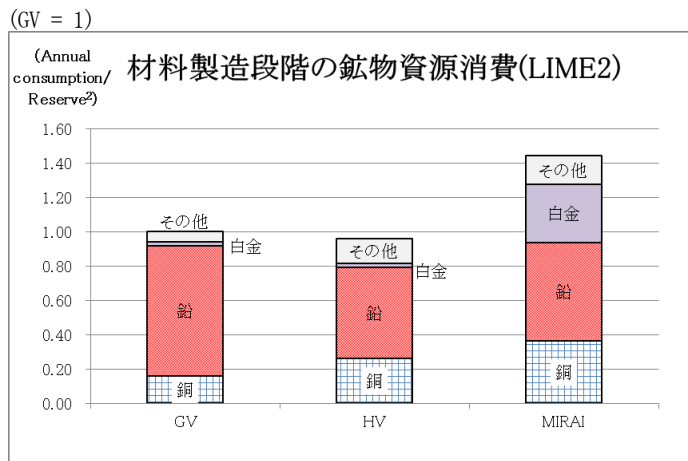
LIME2 は、全世界の究極可採量当たりの年間消費量における影響を示している。参照した CML はアンチモン等価という異なる単位で示しているが、同様の結果となった。

図 7：日本市場における影響評価結果 (ADP 鉱物資源)



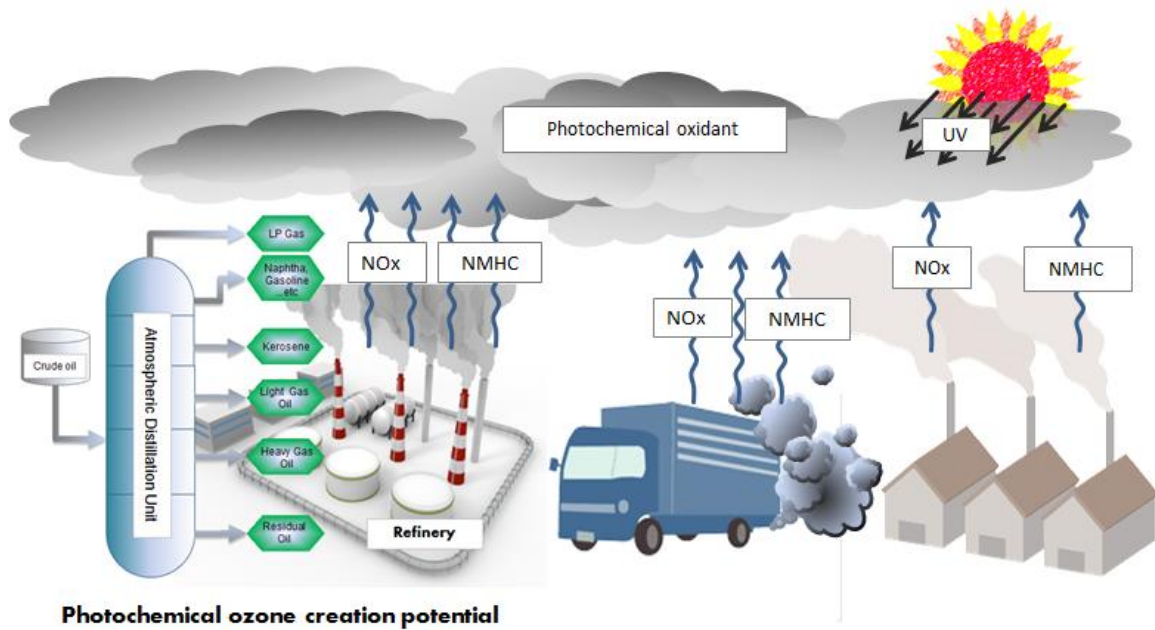
LIME2 と CML 双方において MIRAI の合計値が同程度で増加しているが、その主な理由としては MIRAI 特有の部品材料に使用している素材の中で、白金や銅の使用量が多いということが挙げられる。一方で、2年で交換される補助バッテリーに使用される鉛は、バッテリーの大きさによって多少の差異はあるもののほぼ同等の影響となっている。

図 8：日本市場における詳細分析 (ADP 鉱物資源)



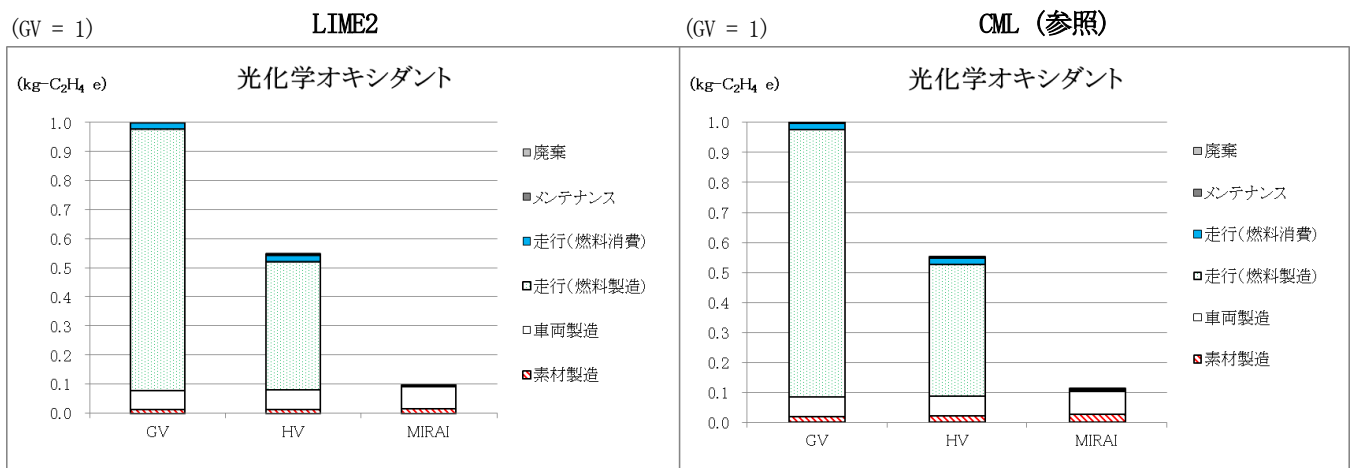
### 3) 光化学オゾン生成ポテンシャル

光化学オキシダントの生成ポテンシャルを示す。インベントリとしてNOx とNMHCを参照した。基準物質はエチレン(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)を適用。



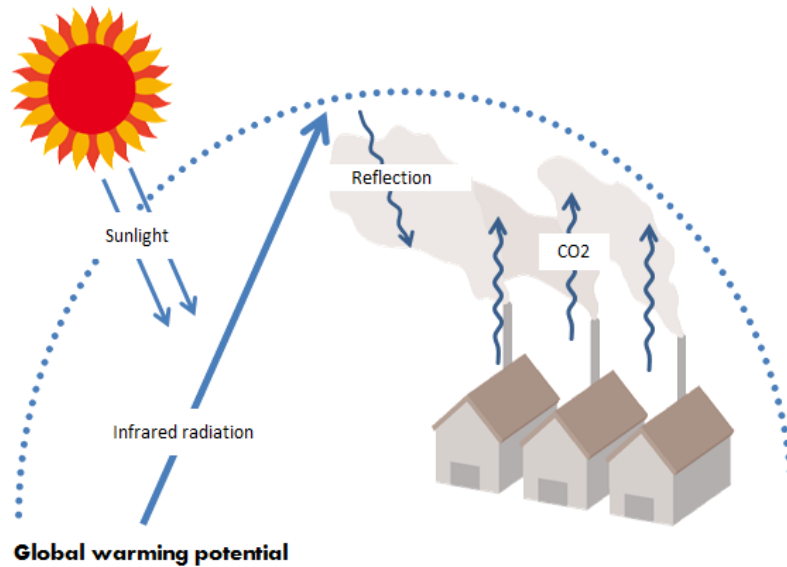
MIRAIはこの影響カテゴリにおいて、リファレンス車(GV, HV)に比べ大きなアドバンテージを示している。光化学オキシダントが発生する主な要因は、ガソリン生産/輸送時に放出される炭化水素である。参照したCMLでも同等の結果が示されている。

図9：日本市場における影響評価結果 (POCP)



4) 温暖化(GWP : Global Warming Potential)

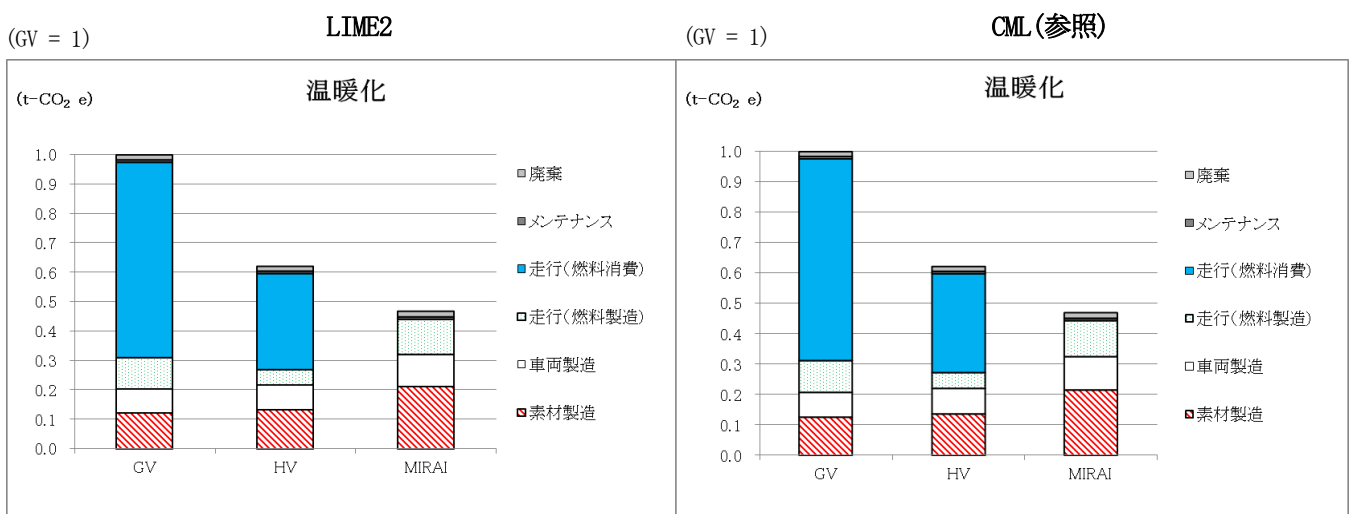
車両ライフサイクルにおける温室効果ガスの排出量を示す。基準物質はCO<sub>2</sub>を適用。



リファレンス車(GV、HV)に比べ、MIRAI にはライフサイクル全体での優位性が認められる。走行段階（燃料製造・燃料消費）における寄与率が多大であることから、多様な製造パスが存在する水素について、自動車メーカーはWtWに留意する必要がある。

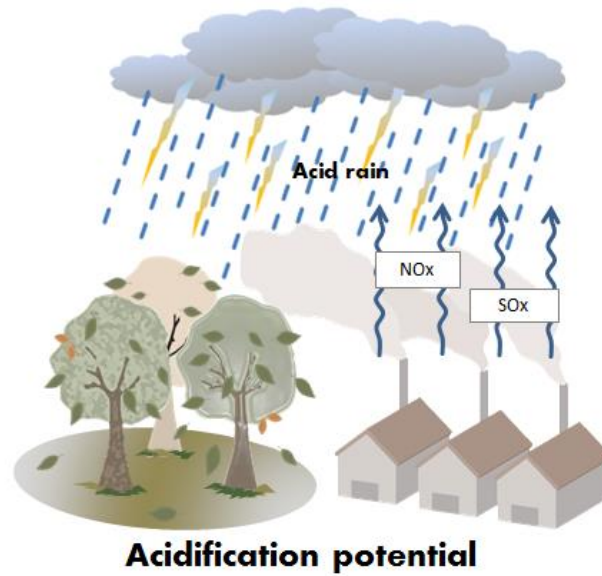
その他に自動車メーカーが重要視すべき点として、新技術の導入（新材料や新工程の追加等）によって製造段階における排出削減を目指すことが挙げられる。なぜなら、走行時の効率向上や車両の軽量化を実現するために軽量素材を使用することは、新たな製造工程を追加する必要性が生じ、その工程における温室効果ガスの排出量が、走行段階での効率向上による削減量を上回るといったトレードオフも起こり得るためである。

図 10：日本市場における影響評価結果（GWP）



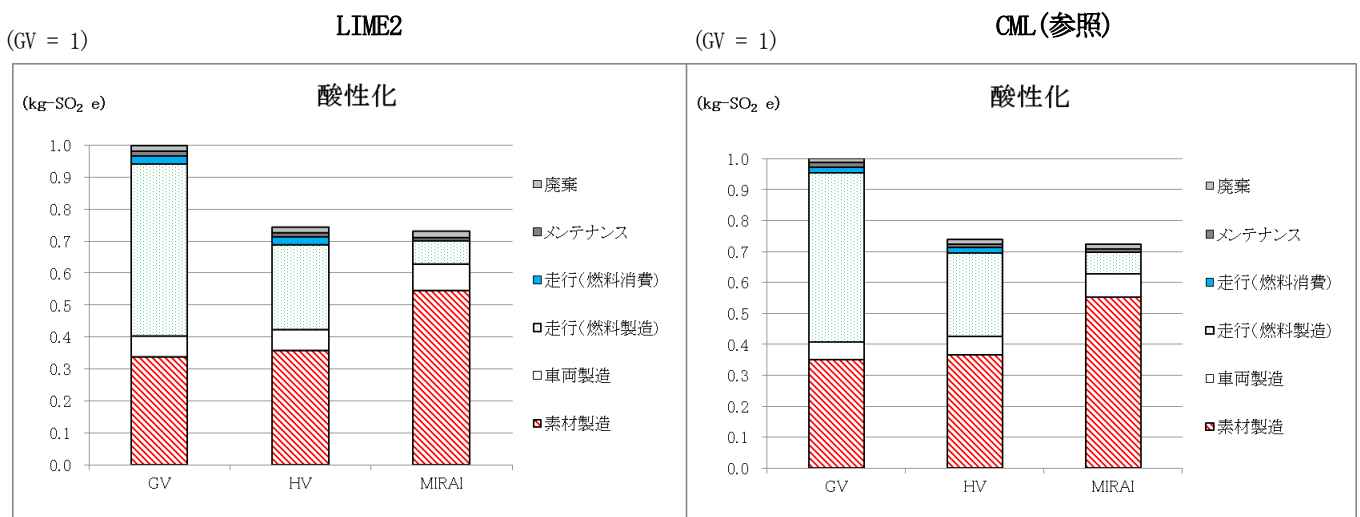
5) 酸性化(AP: Acidification Potential)

SO<sub>2</sub> 等価単位での、NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 等の酸性化物質の排出量を示す。



MIRAI は他車種と比べ素材製造段階において、FCV 特有の部品で使用されている CFRP 等の影響が大きいことが明らかになった。CFRP は水素タンクとタンクフレームに使用される炭素繊維の複合材であり、炭素繊維の製造工程における高温処理により、NO<sub>x</sub> や SO<sub>x</sub> 等の排出量が大きくなる。CFRP は、高強度、高剛性などの技術的利点と軽量化ポテンシャルを併せ持ち、走行時の負荷低減に貢献するが、製造段階の負荷は大きい。その製造負荷低減のために材料メーカーと車両メーカーによる今後のさらなる開発が期待される。

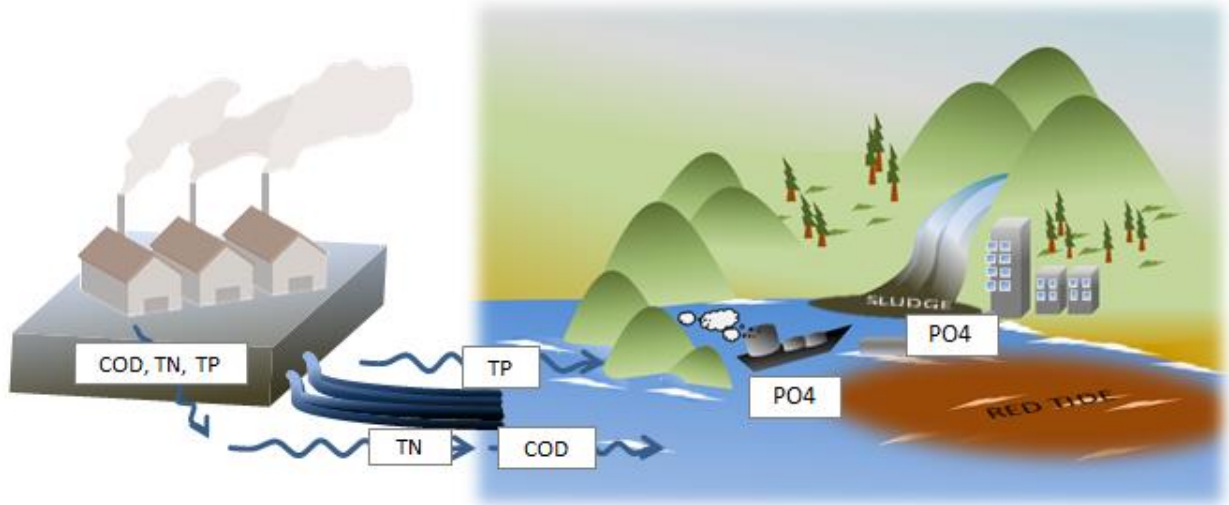
図 11：日本市場における影響評価結果 (AP)



6) 富栄養化(EP: Eutrophication Potential)

周辺水域への好ましくない栄養素の流入(排出)を示す。基準物質は $PO_4^{3-}$ を適用。

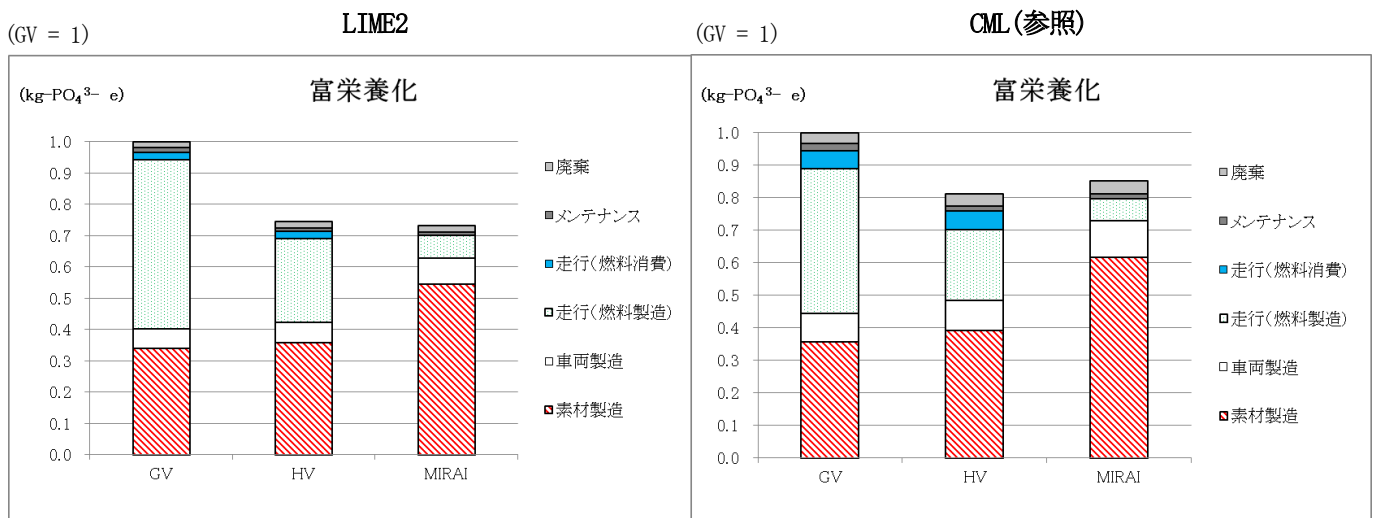
### Eutrophication potential



MIRAI に炭素繊維などの新材料を使用することで素材製造時の排出量は増加するが、総量としてはリファレンス車(GV)のそれを上回ることはない。

両手法の単位と係数は、地域性による条件や影響の捉え方によって異なる。CMLでは $NO_x$ が大きく評価されるため、炭素繊維使用の影響度が大きく表れている。(LIME2は日本を、CMLは欧州を対象としている)

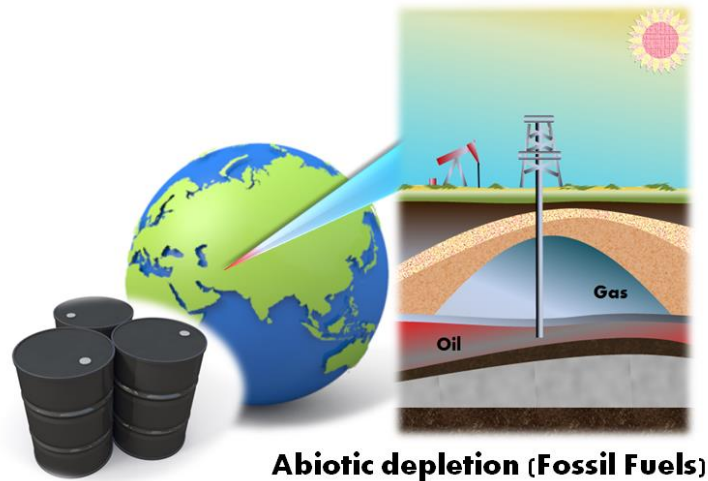
図 12：日本市場における影響評価結果 (EP)



(3) 評価結果と解釈(欧州市場)

1) ADP (Abiotic Depletion Potential) 化石燃料

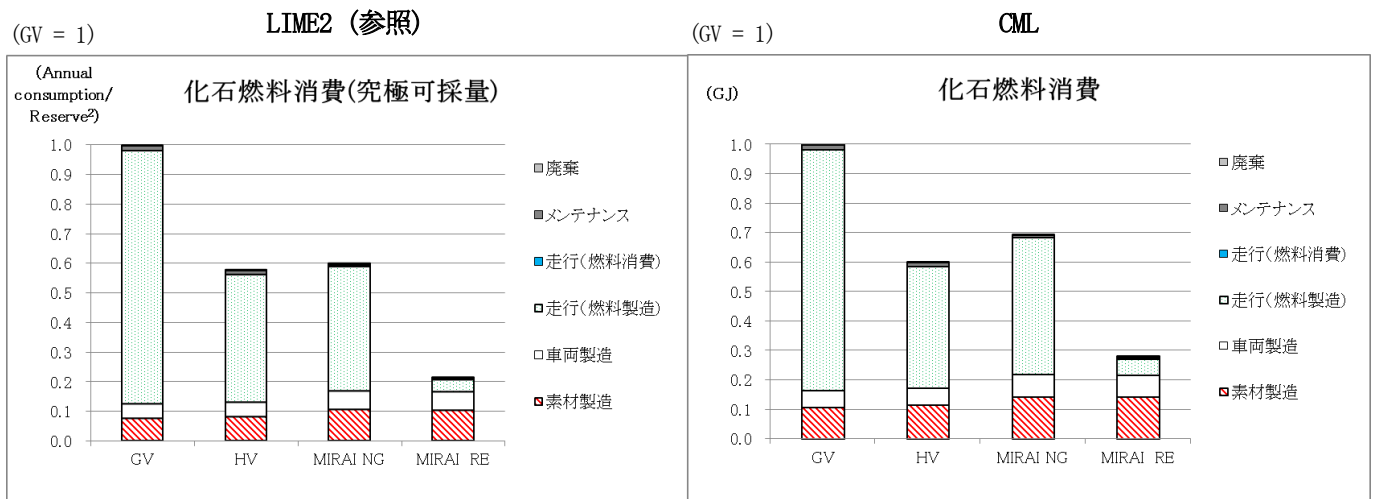
車両製造時(素材、部品、車両輸送含む)や、走行時の車両駆動にかかるエネルギー製造において消費される化石燃料の量をギガジュール単位で示す。



車両走行時、リファレンス車(GV、HV)はガソリンを消費しMIRAI は水素を消費するという点で、走行(燃料製造)段階において大きな違いが見られる。特に、ライフサイクルの中で水素がどのようにして製造、輸送されるかが重要である。

下図では、JRC レポートに基づき、天然ガス由来水素を使用した場合をMIRAI NG(Natural Gas)、水電解由来水素を使用した場合をMIRAI RE(Renewable)として示している。MIRAI NGはリファレンスのGVとの比較で低減されているものの、HVとの比較においてはわずかに悪い結果が出ている。一方、水電解由来の水素を使用したMIRAI REは、GV、HV両者よりも良いことが見てとれる。この背景には、GVにはガソリンを、MIRAI NGには天然ガスを、それぞれ化石燃料を使用していることがある。

図 13 : 欧州市場における影響評価結果 (ADP 化石燃料)



2) ADP (Abiotic Depletion Potential) 鉱物資源、究極可採量

CML においては、究極可採量ベースでの鉱物資源への影響を示す。基準物質はアンチモンを適用。

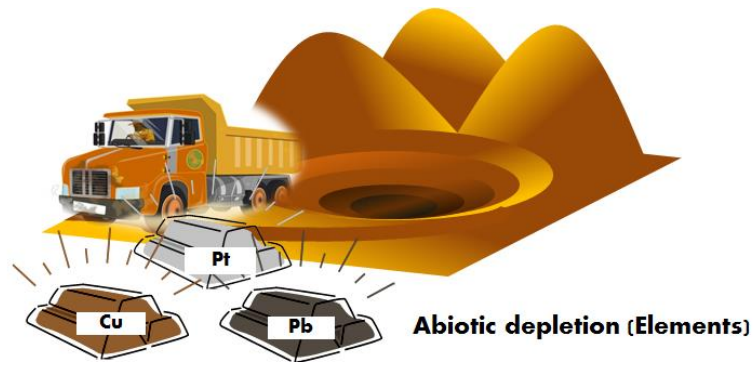
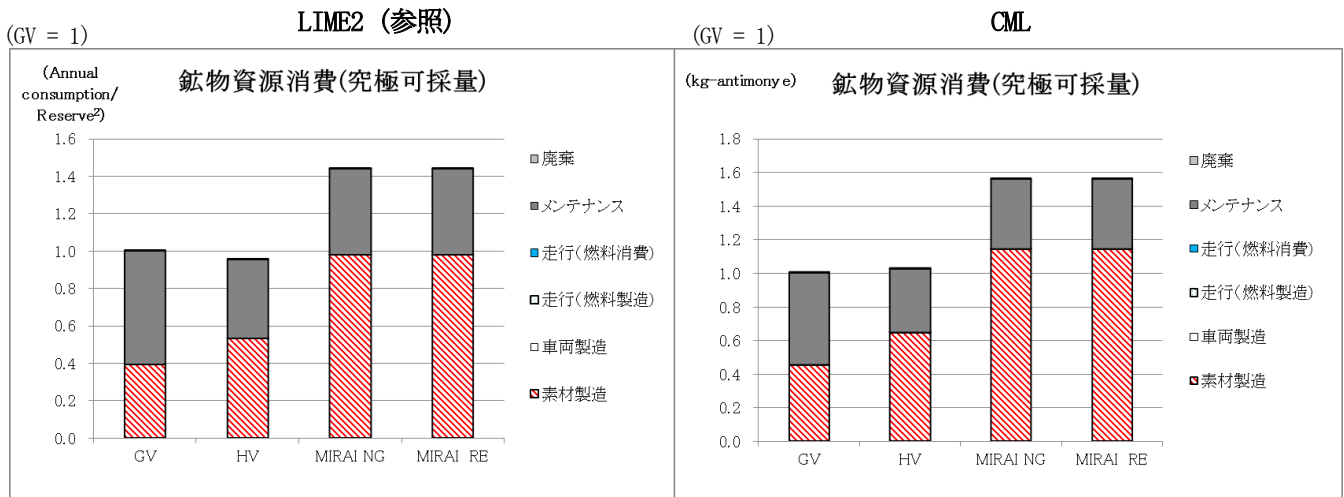
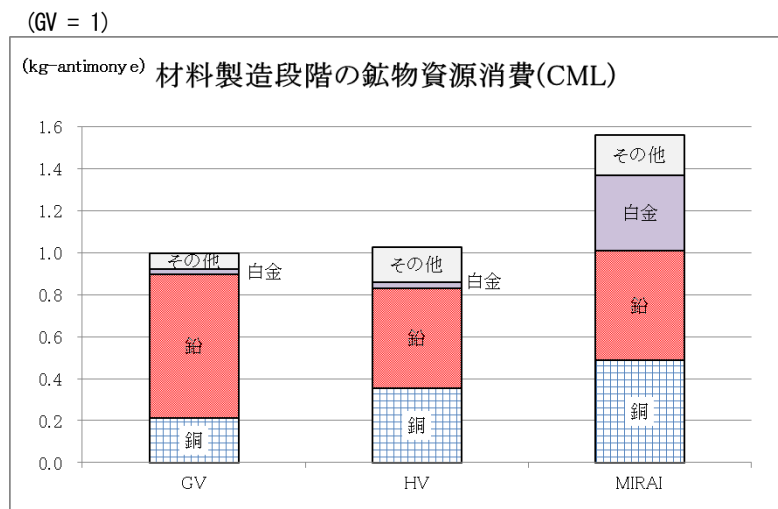


図 14：欧州市場における影響評価結果 (ADP 鉱物資源)



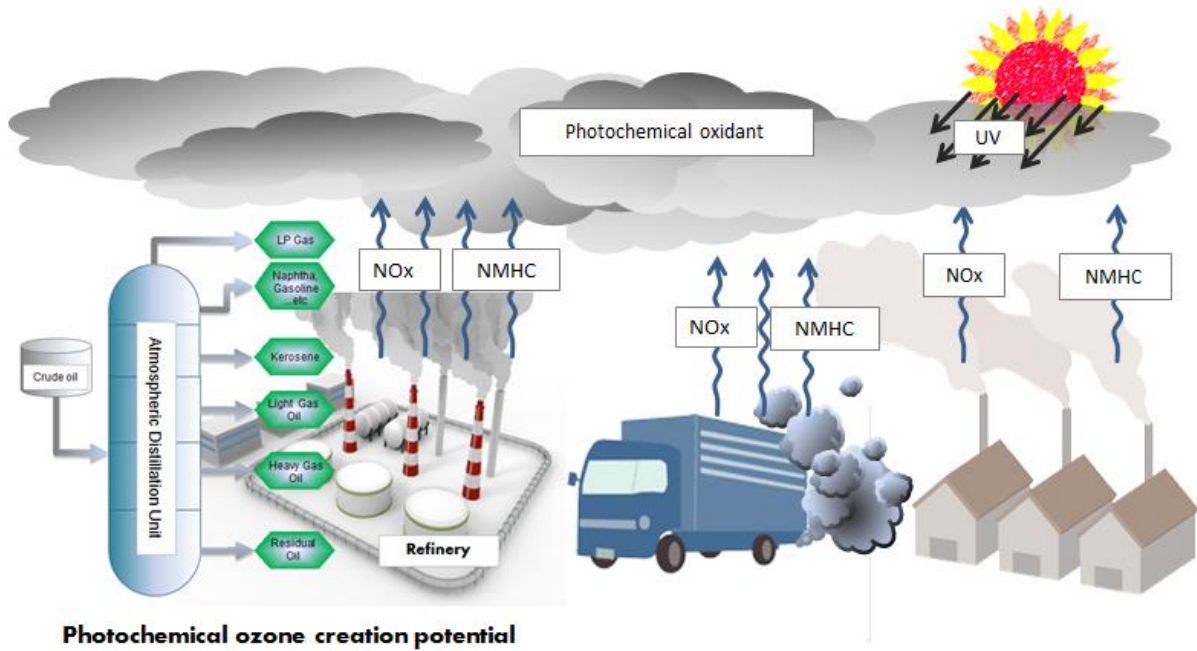
LIME2 と CML 双方において MIRAI の ADP がリファレンス車と比べて同程度に増加しているが、その主な理由としては MIRAI 特有の部品材料に使用している素材の中で、白金や銅の使用量が多いということが挙げられる。一方で、2 年で交換される補助バッテリーに使用される鉛は、バッテリーの大きさによって多少の差異はあるもののほぼ同等の影響度となっている。

図 15：日本市場における詳細分析 (ADP 鉱物資源)



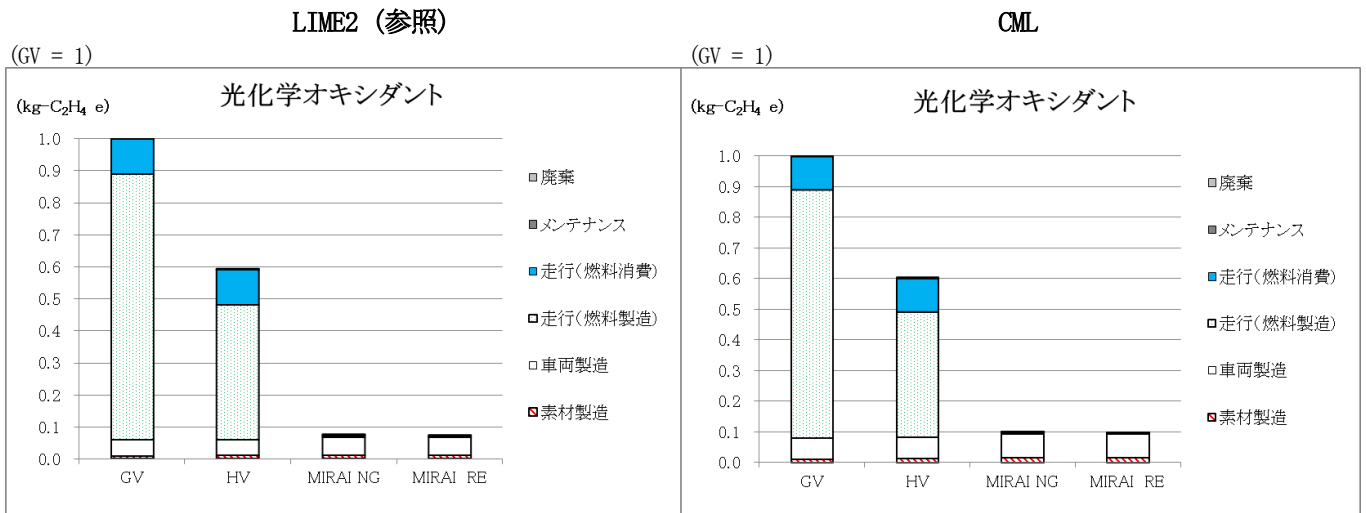
### 3) 光化学オゾン生成(POCP: Photochemical Ozone Creation Potential)

光化学オキシダントの生成ポテンシャルを示す。インベントリとしてNOx と NMHC を参照した。基準物質はエチレン(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)を適用。



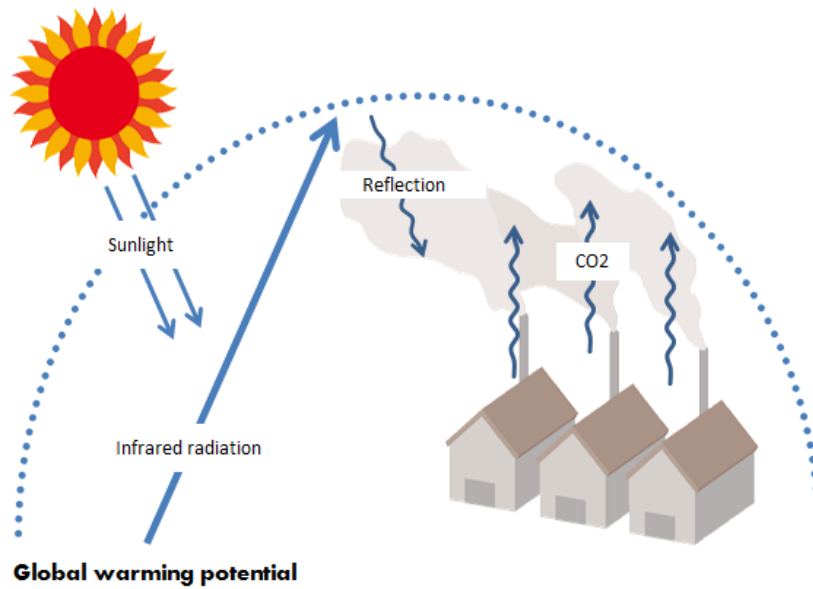
MIRAI はこの影響カテゴリーにおいて、リファレンス車(GV, HV)に比べ大きなアドバンテージを示している。光化学オキシダントが発生する主な要因は、ガソリン生産／輸送時に放出される炭化水素である。参照したLIME2でも同等の結果が示されている。

図 16 : 欧州市場における影響評価結果 (POCP)



4) 温暖化(GWP : Global Warming Potential)

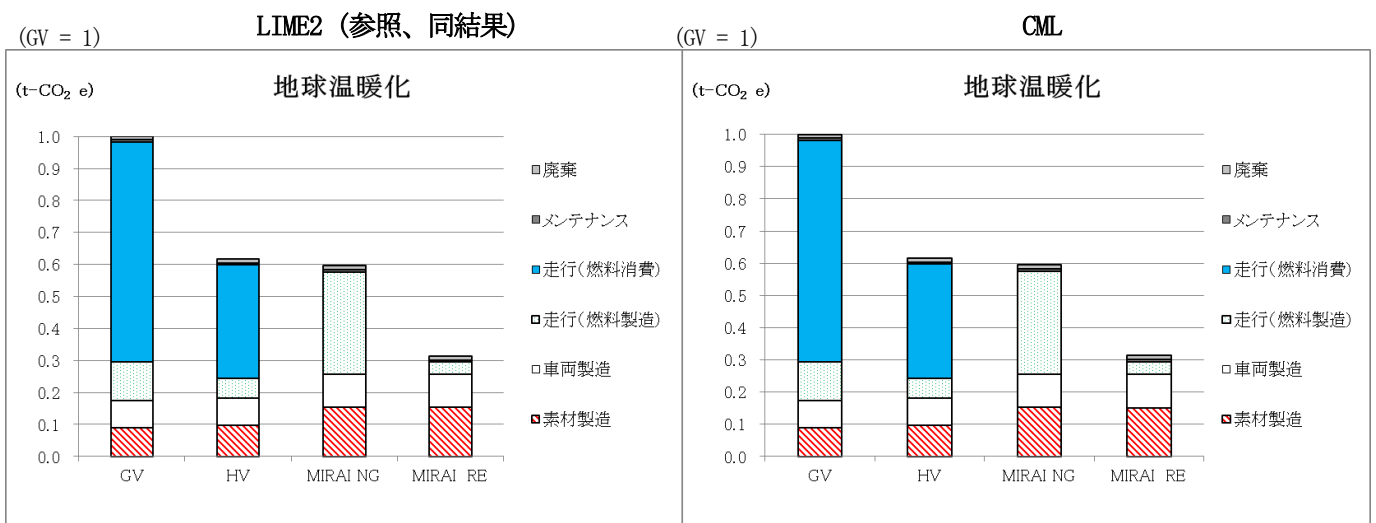
車両ライフサイクルにおける温室効果ガスの排出量を示す。基準物質はCO<sub>2</sub>を適用。



リファレンス車(GV)と比較すると、MIRAI NGにはライフサイクル全体で優位性が認められ、リファレンス車(HV)に匹敵する。またMIRAI REにはリファレンス車GV、HV 両者に対してかなりの優位性が認められる。走行段階（燃料製造・燃料消費）における寄与率が多大であることから、多様な製造パスが存在する水素について、自動車メーカーはWtWに留意する必要がある。

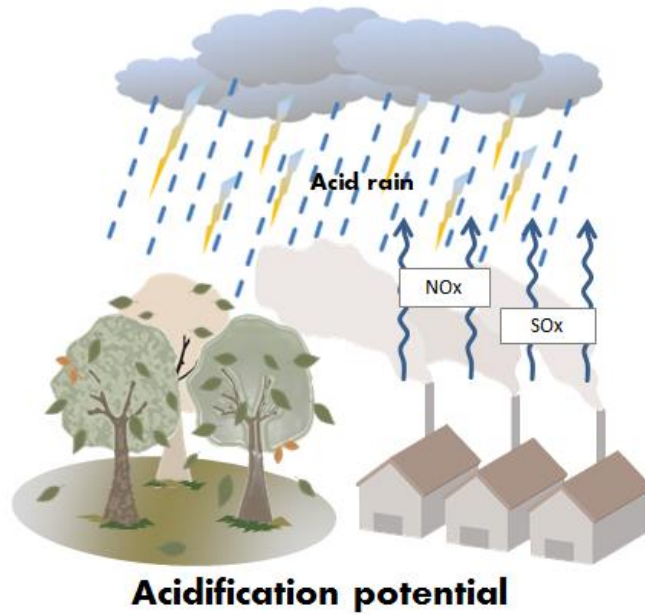
その他に自動車メーカーが重要視すべき点として、新技術の導入（新材料や新工程の追加等）によって製造段階における削減を目指すことが挙げられる。なぜなら、走行時の効率向上や車両の軽量化を実現するために軽量素材を使用することは、新たな製造工程を追加する必要性が生じ、その工程における温室効果ガスの排出量が、走行段階での効率向上による削減量を上回るといったトレードオフも起こり得るためである。

図 17：欧州市場における影響評価結果（GWP）



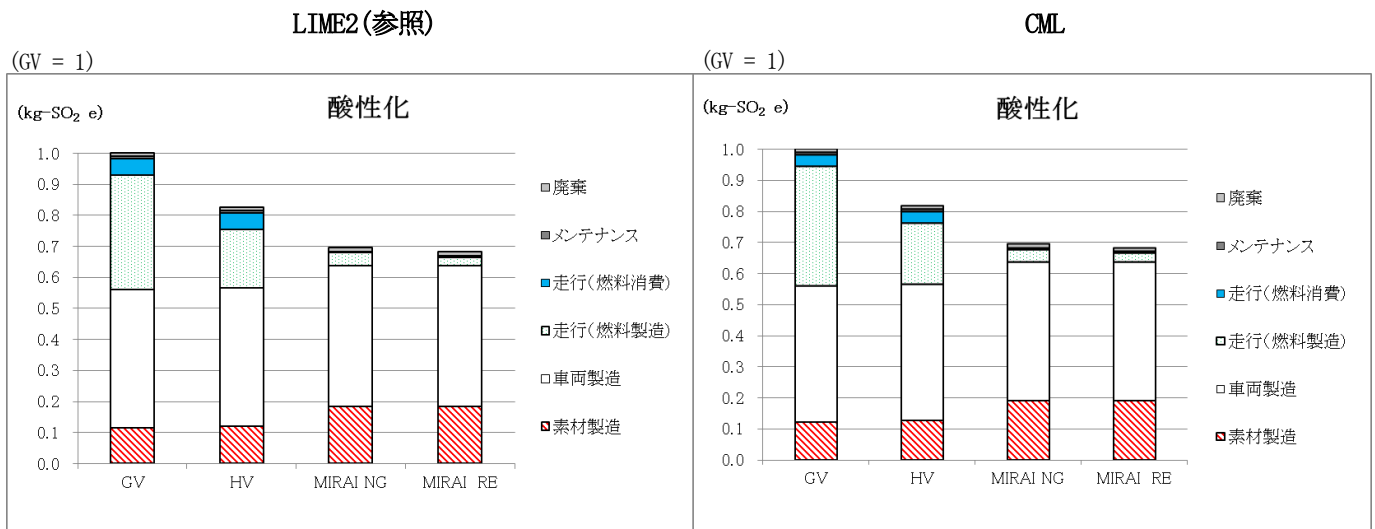
5) 酸性化(AP : Acidification Potential)

SO<sub>2</sub>等価単位での、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>等の酸性化物質の排出量を示す。



素材製造において、MIRAI は特有の部品を使用しているため他車種と比較してCFRP等の影響が大きい。CFRPは水素タンクやスタックフレーム等の燃料電池パワートレインの部品に使用されている。炭素繊維の製造工程における高温処理により、NO<sub>x</sub>やSO<sub>x</sub>等の排出量が大きくなる。CFRPは、高強度、高剛性などの技術的利点と軽量化ポテンシャルを併せ持ち走行時の負荷低減に貢献するが、製造段階の負荷は大きい。その製造負荷低減のために材料メーカーと車両メーカーによる今後のさらなる開発が期待される。

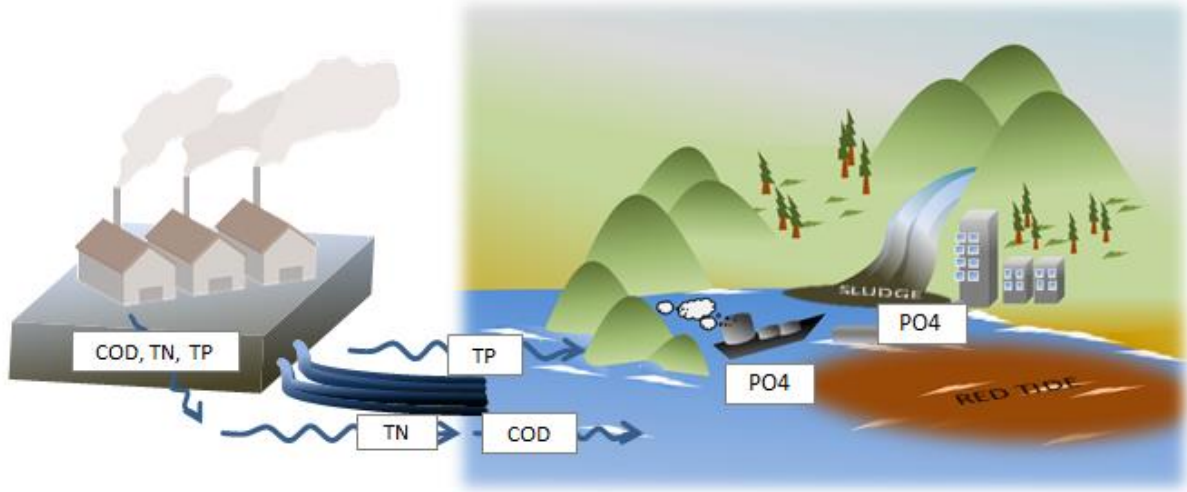
図 18 : 欧州市場における影響評価結果 (AP)



6) 富栄養化(EP : Eutrophication potential)

周辺水域への好ましくない栄養素の流入 (排出) を示す。基準物質は  $\text{PO}_4^{3-}$  を適用。

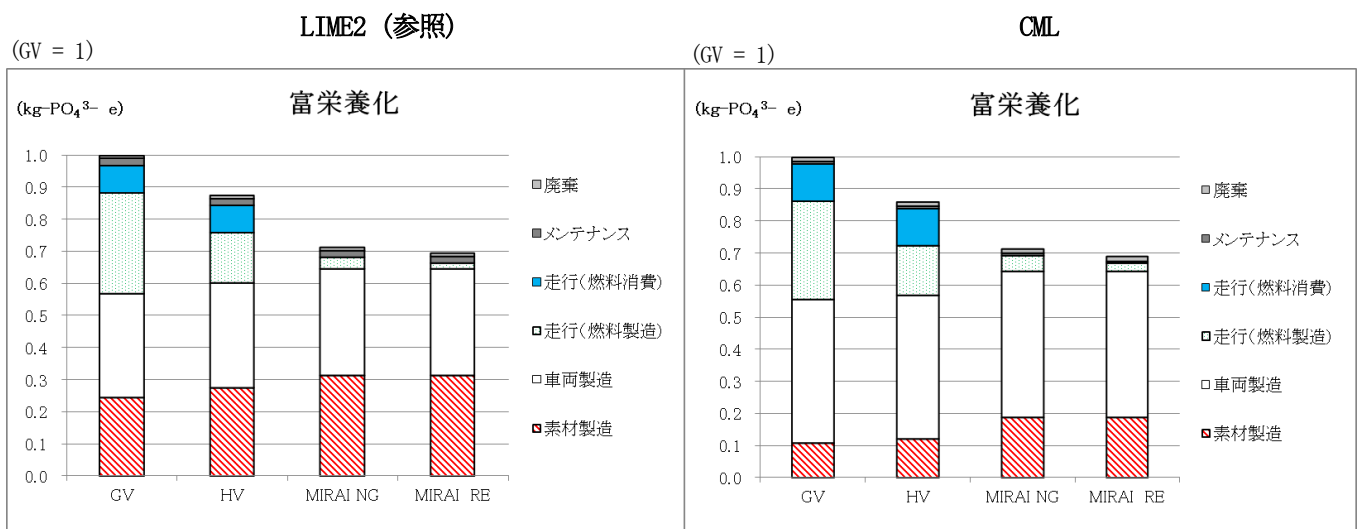
### Eutrophication potential



MIRAI にのみ使用されている新材料により、素材製造時の排出量は増加するが、MIRAI NG と RE の両ケースにおける燃料製造時の低減によってリファレンス車の結果を上回ることではない。

日本のケース (19 ページ) と比較して欧州においては、車両製造段階がより大きくなっている。これは日本から欧州への海上輸送時の  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  排出量が含まれるためである。しかしながらそれら排出物が洋上の大気へ与える影響は、湾岸や陸地への影響とは別問題となる。洋上については、それほど富栄養化の影響はないかもしれない。一方、湾岸地域への影響は船舶での輸送によるものは一部分であり、海上輸送とは関連のない陸地から川の流れによるものが大部分である。

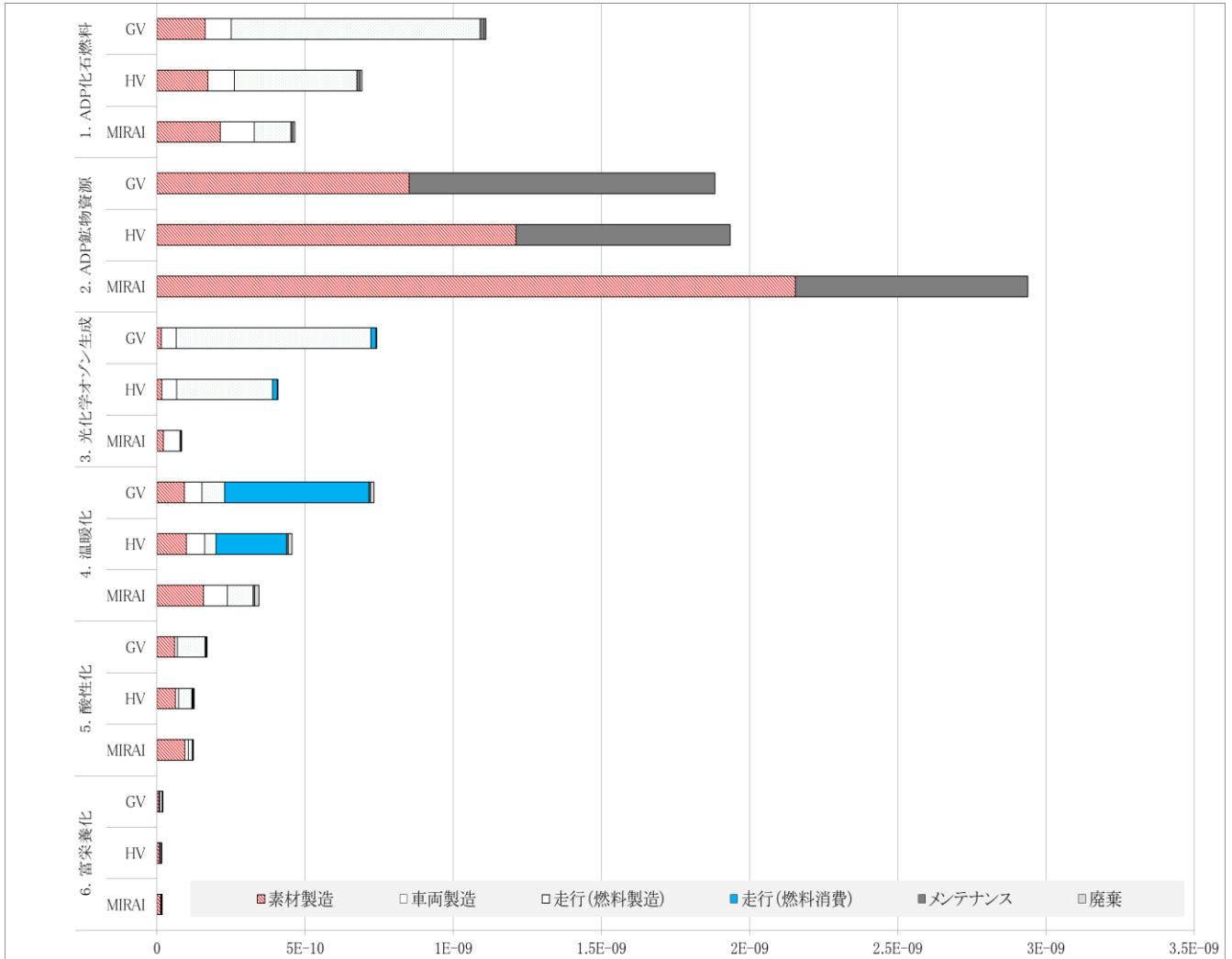
図 19 : 欧州市場における影響評価結果 (EP)



(4) 影響カテゴリーの正規化(CMLのみ)

1) 日本における条件(生涯走行距離 10 万 km): world, 2000 (Wegener Sleeswijk *et al.*, 2008)

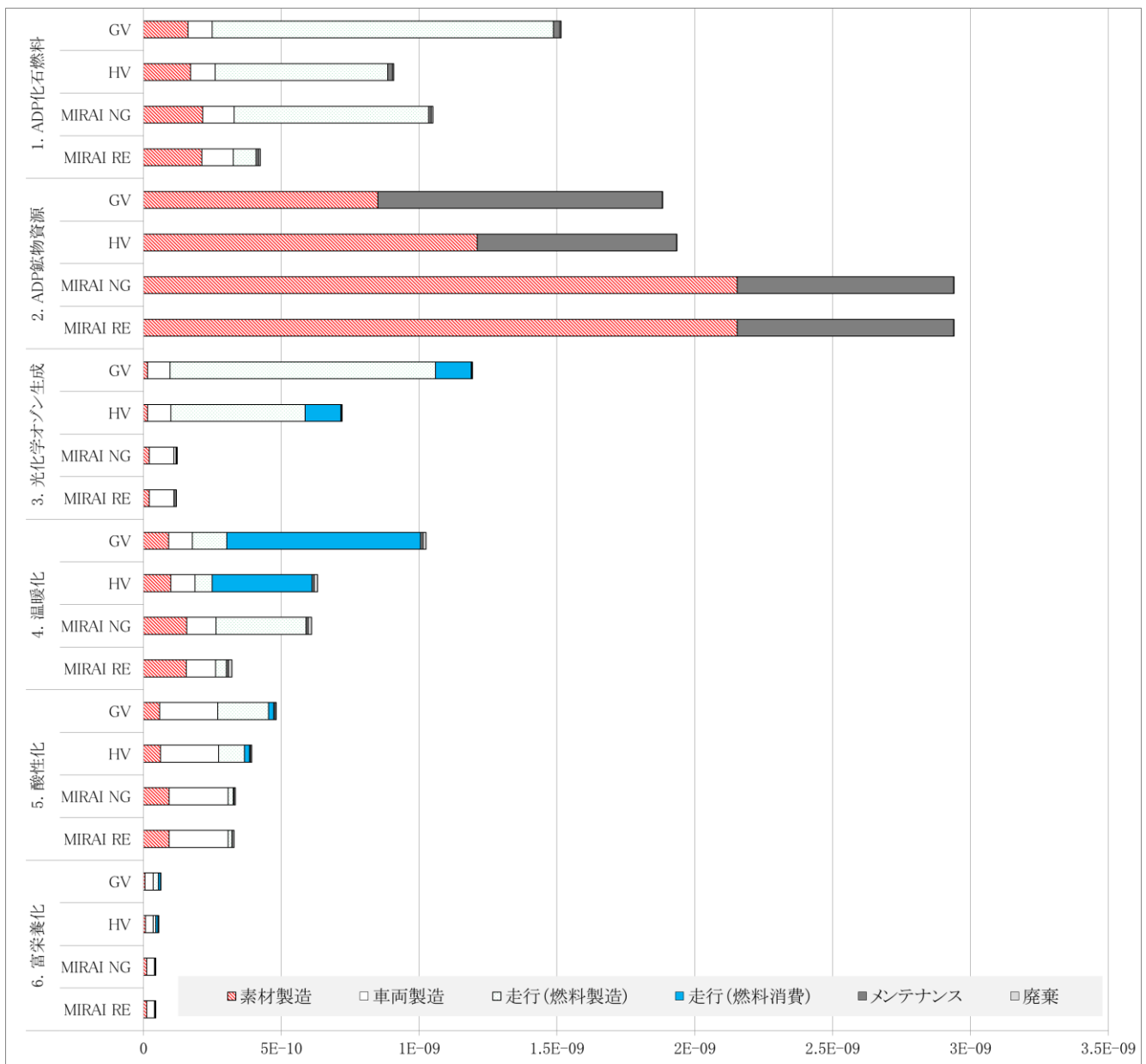
以下グラフは、CML 手法で示される日本ケースの世界的影響を示す。



1. ADP (化石燃料)は1 車両のライフサイクルで使用される化石燃料について、世界全体での影響を1としたときのMIRAI 1台分の影響量を示している。この結果は、自動車メーカーにとって最大の懸念点となりつつある4. GWP よりもかなり高くなっている。2. ADP (鉱物資源)では、貴金属の使用分が強く表れている。ここでは、全ての材料が新材であるとして影響を評価しており、通常リサイクルされている白金ですらリサイクルパスがないものと想定されている。3. POCPにおいて、その影響度合いを助長させている主な要因はガソリン製造時のNMHC 排出量であり、5. AP と6. EP は他カテゴリーと比べて影響が小さく示されている。

2) 欧州における条件(生涯走行距離 15 万 km): world, 2000 (Wegener Sleeswijk *et al.*, 2008)

以下グラフは、CML 手法で示される欧州ケースの世界的影響を示す。



日本の結果との類似点も認められるが、1. ADP(化石燃料)において、リファレンス車(HV)とMIRAI NGには相違点がある。

1. ADP(化石燃料)は1車両のライフサイクルで使用される化石燃料について、世界全体での影響を1としたときのMIRAI 1台分の影響量を示している。この結果は、自動車メーカーにとって最大の懸念点となりつつある4. GWPよりもかなり高くなっている。MIRAI NGもまた化石燃料(天然ガス)を使用しており、リファレンス車(HV)はMIRAI NGより良い結果が出ている。2. ADP(鉱物資源)では、貴金属の使用分が強く表れている。ここでは、全ての材料が新材であるとして影響を評価しており、通常リサイクルされている白金ですらリサイクルパスがないものと想定されている。3. POCPにおいて、その影響度合いを助長させている主要因はガソリン製造時のNMHC排出量であり、5. APと6. EPは他カテゴリーと比べて影響が小さく示されている。

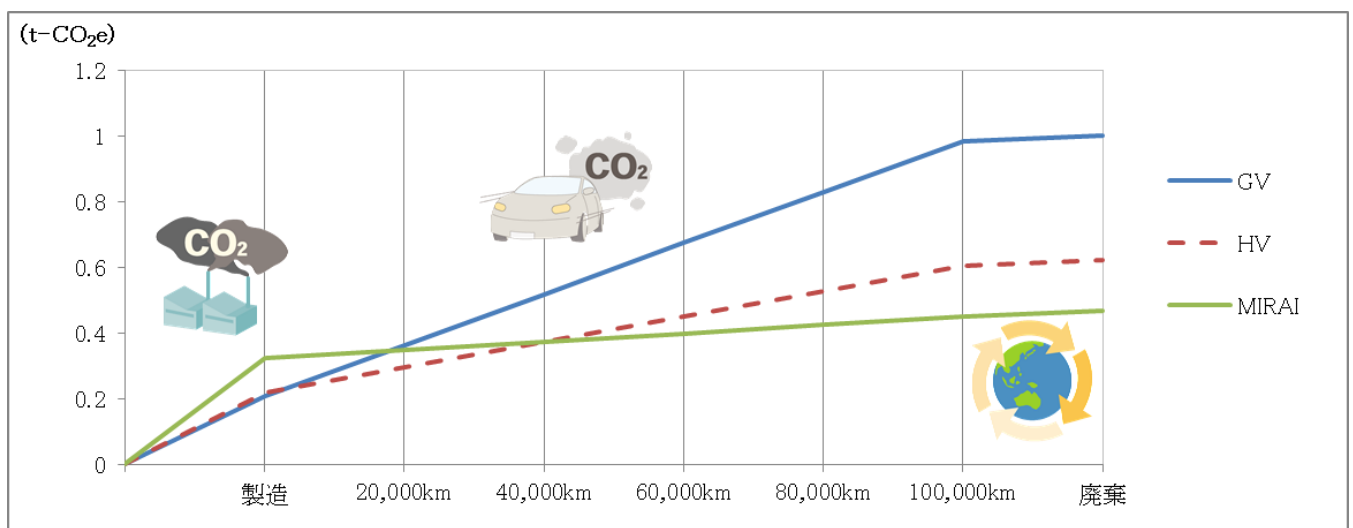
## 7. 感度分析

自動車のCO<sub>2</sub>排出量は走行距離によって変化する。ここでは、ライフサイクルにおけるCO<sub>2</sub>排出量が走行距離によってどのように増加していくか分析した。本評価では走行距離を日本 100,000km、欧州 150,000km と定義しているが、実走行距離は使用者によって異なる。

下図は、リファレンス車(GV、HV)との比較におけるCO<sub>2</sub>排出量と距離の関係を示している。

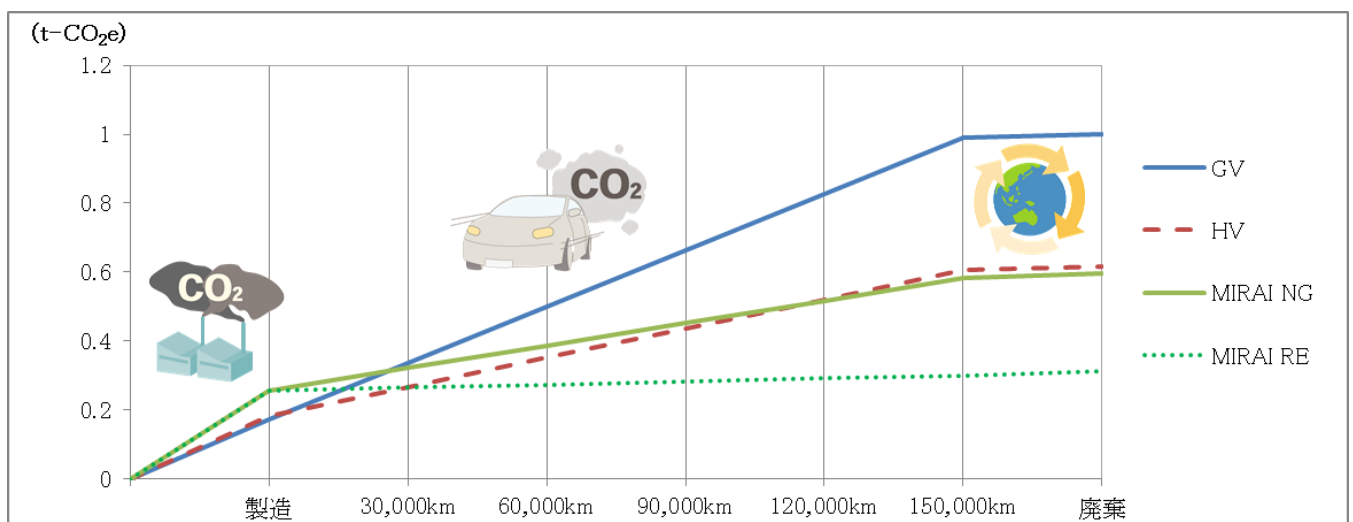
日本条件：

MIRAI の製造段階における負荷の大きさは、ライフサイクルの初期段階で相殺することができる。リファレンス車(GV、HV)はそれぞれ、20,000km、40,000km 走行時点でMIRAI と同様のCO<sub>2</sub>排出量となっている。MIRAI の優位性は両ケースにおいて、ライフサイクル後期で増加し続ける。



欧州条件：

ワーストケースである天然ガス由来の水素で走行したMIRAIは、ライフサイクルのかなり後期でリファレンス車(HV)と交差している。水電解由来の水素の場合は、再生可能エネルギーの利点が早期に表れており、MIRAI 両ケースとリファレンス車(GV)は初期段階で交差している。



## 8. LCA の限界

- 本評価では、MIRAI と同等クラスのリファレンス車(GV、HV)を選定したが、これは完全な同クラス車両が存在しない中で、ターゲット購買層を考慮した妥当な選択である。
- 日本向け二次データのほとんどは JLCA データベースを、欧州については GaBi データベースを参照した。両データベースの中で、上流のエネルギー製造を含む原単位について言及されているが、試算条件の相違や工程の欠如等により双方の境界が一貫性に欠け、結果として双方の LCA 結果に大きなギャップが生じる可能性もある。例えば、我々はガソリン製造に JLCA を参照したが、いくつかの上流工程の欠如により NMVOC の量が非常に低いことが分かったため、このケースに関しては GaBi の工程を確認し代用したが、結果的な排出量は非常に高く、その詳細な理由は開示されていない。
- 走行(燃料消費)段階の評価において燃費と排出値は認定値または規制値を用いたため、それらと実走行との間には差異が生じる。また、実走行状況は車両の運転者により異なる。(走行距離、ペダル操作 etc.)
- 評価要件を十分に満たす地域として、本調査では日本、欧州のみが地理的条件において考察されている。他地域については、同等レベルの手法と、完全性、質、一貫性を十分に兼ね備えた一次・二次データが要求される。
- LCA においては、全地域に適合する単一の手法は存在しないが、それぞれの地域特性が反映された評価手法が存在する。MIRAI の評価において、2つの手法 (LIME2, CML) で生産国や導入市場の差異を考慮した分析を実施した (アセスメントプロセスやデータソースのトレース、環境情報の解析 etc.)。

## 9. 結論

今回、世界初の量産燃料電池車 MIRAI の LCA を実施、現状の環境性能の確認を行った。結果及び結果の考察は開発にフィードバックし、将来改善に繋げていく。影響度大の段階における結果は下記の通り。

### - 材料

本評価結果より、FCV のタンクやフレームに CFRP を使用しているが、GWP や他のインパクト評価結果に大きく影響していることが分かった。CFRP は軽量で強度剛性に優れているという技術的メリットがある。この技術面の利点を損なわずに環境性能の向上も両立させるために、自動車メーカーと材料メーカー間の協力がカギとなる。

そのため、走行時の排出量低減を目的とした軽量化材料の採用の際には、製造時の排出量増加が走行時の低減量を上回っていないかを見る必要がある。LCA はこの増減のトレードオフを見える化し、環境にやさしい材料への取り組みに貢献することができる。

今回の CML インパクト評価手法では、台当たりの影響度として自動車会社が最も重点的に対策している GWP よりも、資源枯渇の評価結果が強く出ている。これには二つ理由があり、一つは白金などの貴金属の使用が GV、HV よりも FCV の方が多いこと、二つ目は、殆どの白金がリサイクルされている現状を考慮せず、すべて新材という前提で評価しているためと思われる。前者については、すでに市場に出回っている総量を考慮した上で、台辺り使用量低減に取り組んでいる。後者については、全世界市場における総量、究極可採量をどう設定しているのか、CML 評価手法について更に検証する必要がある。

### - 製造

今回、FCV 特有部品の新工程について重点的に調査を行った。開発初期段階では、製品の品質を優先するため環境面での配慮は不足しがちであるが、今後の生産台数の増加に伴い、順次具体的な改善策を取っていく。また次期モデル以降も継続評価し、MIRAI からの改善幅を確認する。

### - 走行

MIRAI の水素供給には様々なパスが存在し、実社会における水素供給のインフラ整備は着実に進んでいるものの、未だ初期段階にある。本レポートでは、実際の車両納車時の水素製造パスで評価した。天然ガス由来の水素を使用した MIRAI は HV と拮抗しており、CO<sub>2</sub>フリー水素の普及と FCV の車両効率の改善が期待される。

今回、FCV を評価したが、今後新開発パワートレインについても評価していく。

# CERTIFICATE

Certificate-ID: C01-2018-09-21231625

Certificate Type: **Comparative LCA for 3 vehicles**

Certificate holder: Toyota Motor Corporation

Toyota-Cho, Toyota City 1  
Aichi 471-8571  
Japan



Test report No: 21231625\_003

TÜV Rheinland Energy GmbH herewith confirms the performance of independent critical review in line with ISO 14040:2006 and ISO 14044:2006 of the comparative Life Cycle Assessment for three selected Toyota vehicle products, namely conventional, hybrid and fuel cell. The results of the comparative LCA study confirm the high impact of the use phase on the overall life cycle environmental impacts for all three vehicles.

This certificate is valid until 31 December 2020



Comparative  
Life Cycle  
Assessment



www.tuv.com  
ID 0000045605

Cologne, September 17<sup>th</sup> 2018

Norbert Heidelmann  
TÜV Rheinland Group  
Carbon Services

Roland Wollenweber  
TÜV Rheinland Group  
Carbon Services