

日本における燃料電池自動車を用いた 自動車保有台数のCO₂削減可能性

ゴンザレス ファン

知能機械創製部門 理工学府

群馬大学

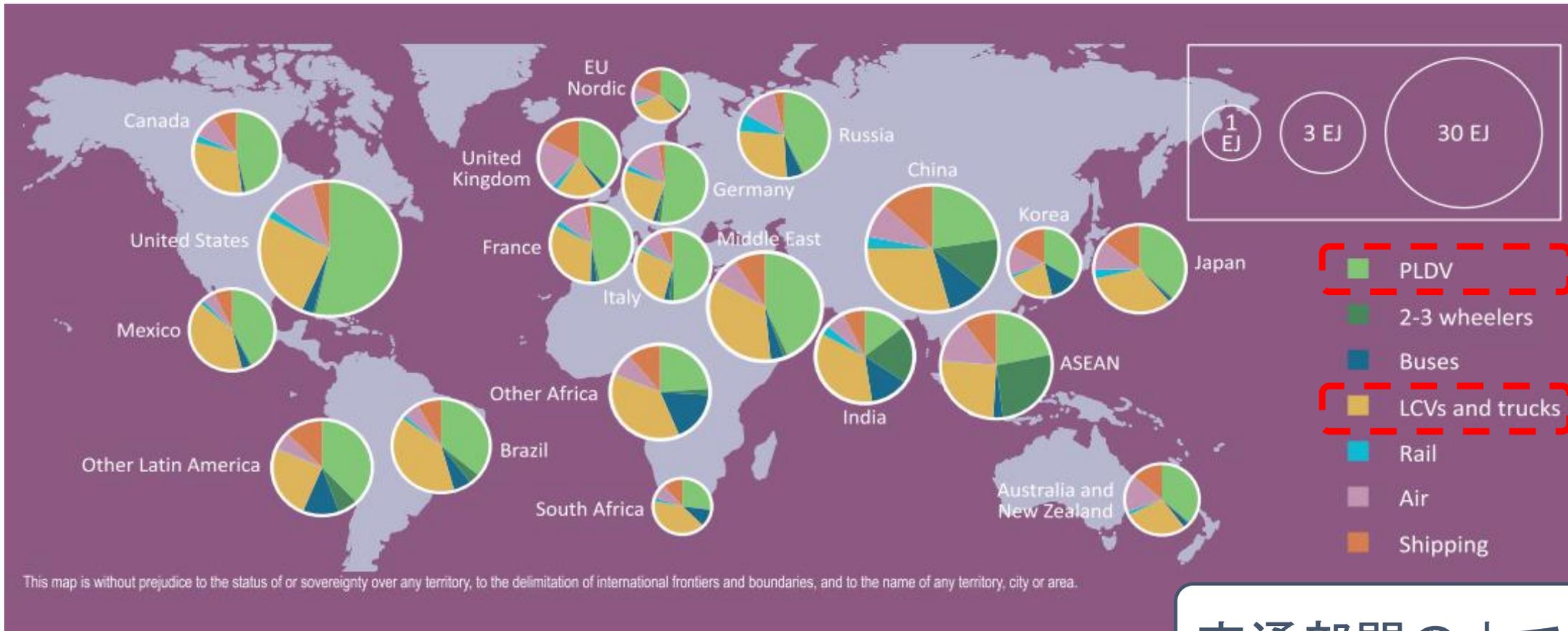
2023年2月5日

目次

1. 自動車技術開発における現在の状況と傾向
2. 水素を用いたエネルギーシステムのCO₂排出量の削減
3. 水素燃料電池自動車の普及
4. 持続可能な水素生産システムの設計

1. 自動車技術開発における現在の状況と 傾向

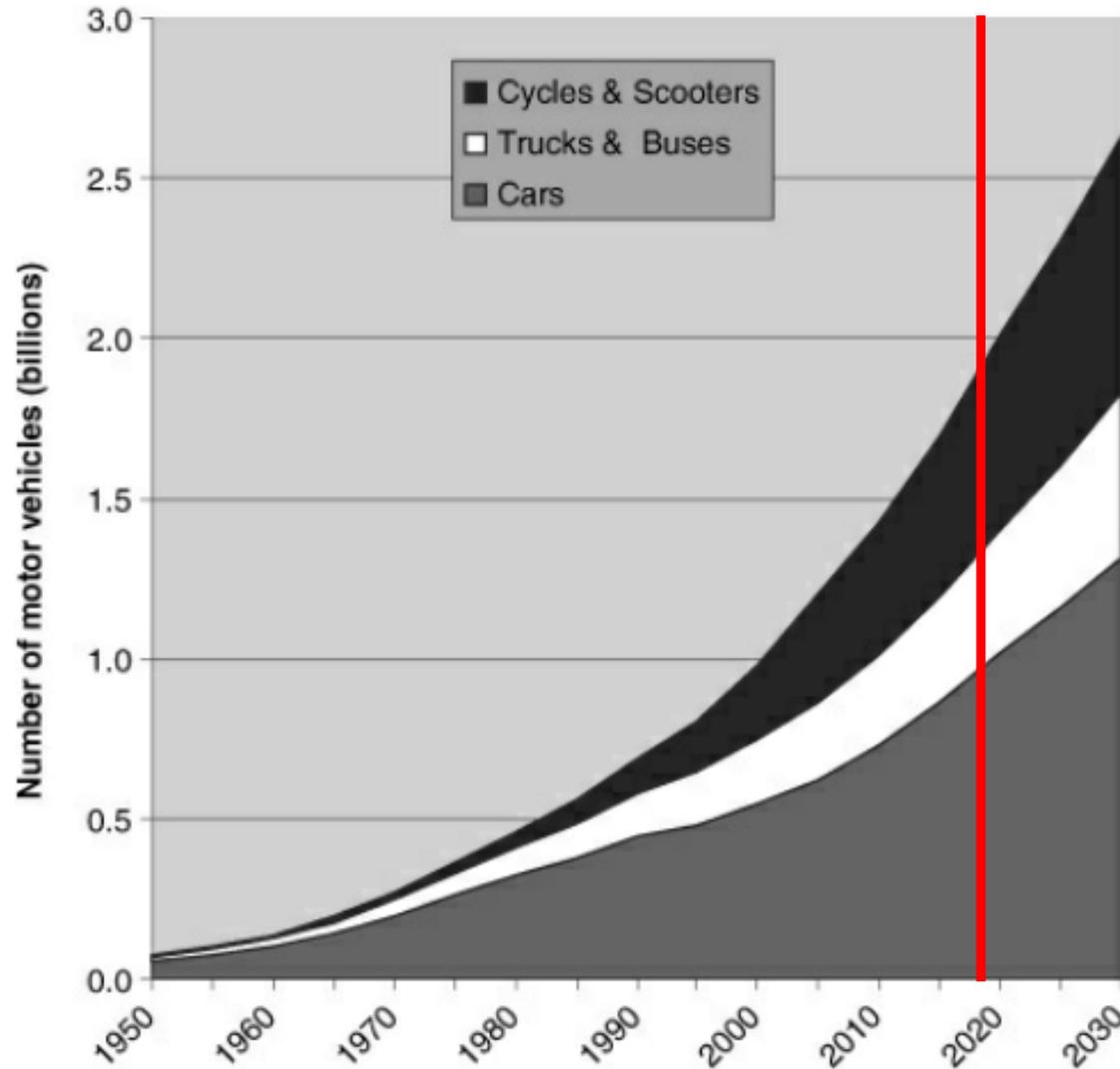
交通部門のエネルギー消費量



参考文献: IEA, OECD, 2017, Energy Technology Perspectives 2017; Catalysing Energy Technology Transitions

交通部門の中で、乗用車と貨物自動車のエネルギー消費量が一番大きい

世界における自動車保有台数の予測



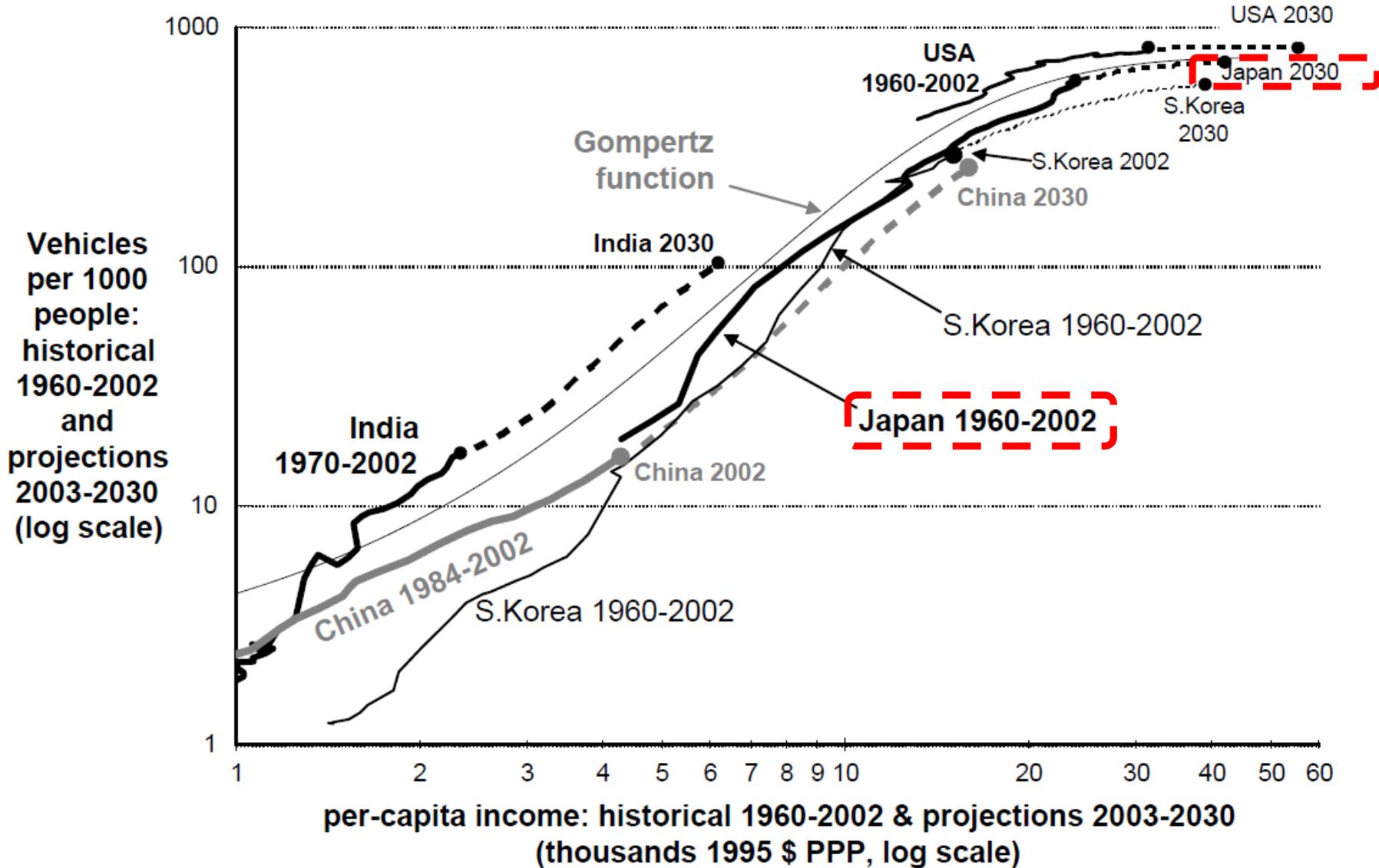
世界の自動車保有台数は
10億台を超えた

自動車保有台数の半分以上は乗用車

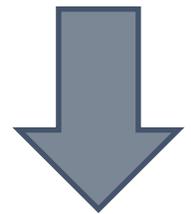
乗用車保有台数は将来増加する傾向にある

参考文献: Sperling and Gordon, 2009, Two Billion Cars: Driving Towards Sustainability, Oxford University Press

世界自動車普及率の進化

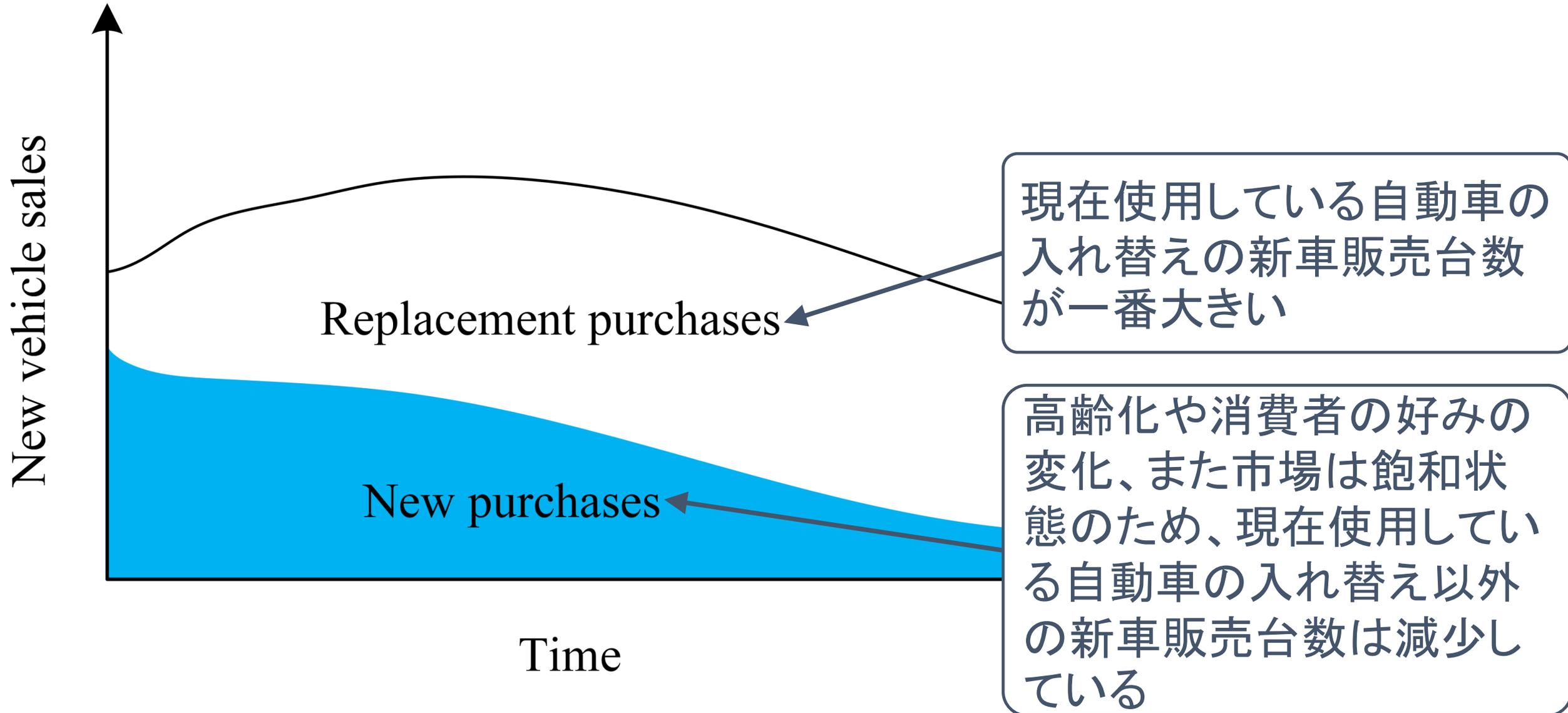


日本における自動車普及率は飽和状態に近い



次世代自動車の普及は、ほとんど、現在使用している自動車の入れ替えに限定されている

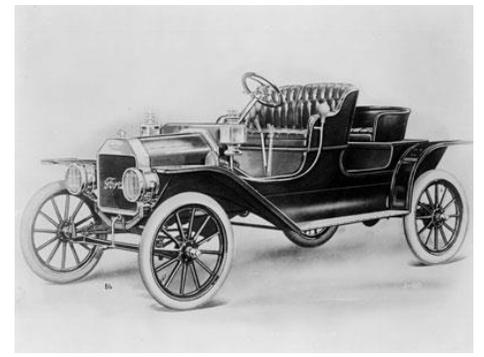
先進国における新車販売台数



自動車使用におけるタイムライン 1859～

1859	First U.S. oil well drilled
Internal combustion engine (ICE) invented by Nikolaus Otto	1867
1885	First ICE car built by Karl Benz
Hybrid-electric prototype built by Porsche	1899
1908	Model T (with ICE) debuts
U.S. transit ridership reaches highest peacetime levels	1926
1930	Car ownership reaches 200 cars for every 1000 Americans
Suburban building boom begins following World War II	1947
1956	U.S. interstate highway system launched
Arab oil embargo constricts supply	1973
1979	Iran-Iraq war doubles oil prices
First hybrid-electric cars sold in U.S.	2000
2003	Car ownership reaches 1.15 vehicles per American driver
Motor vehicle population worldwide exceeds 1 billion	2005
2008	Crude oil hits \$147 a barrel on July 11

参考文献: Sperling and Gordon, 2009, Two Billion Cars: Driving Towards Sustainability, Oxford University Press



参考文献: <http://corporate.ford.com>



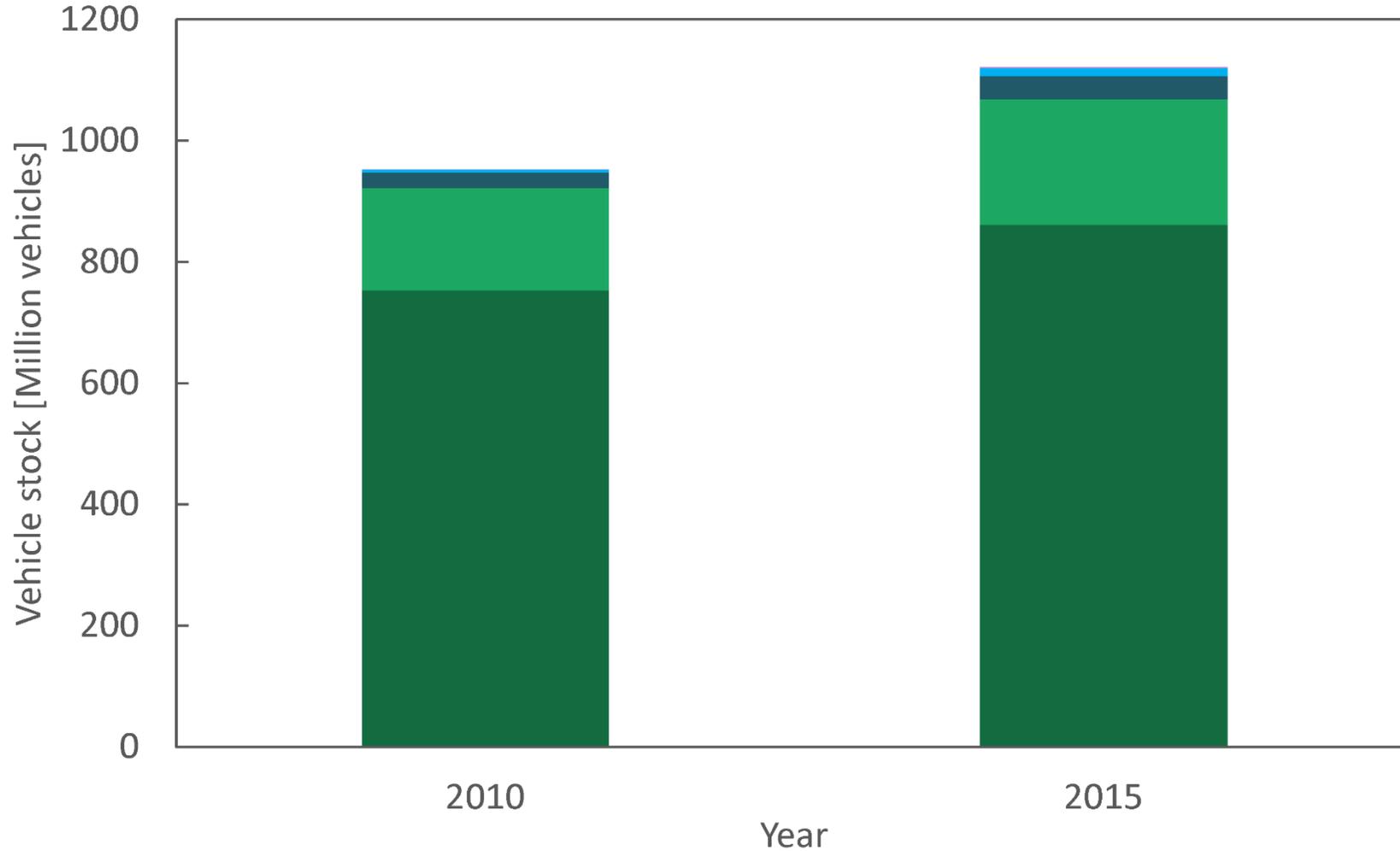
参考文献: <http://toyota.jp>

1990年代後半にハイブリッド自動車が導入されるまでは、自動車技術について大きな変化はなかった



参考文献: <http://nissan.jp>

世界における乗用車保有台数



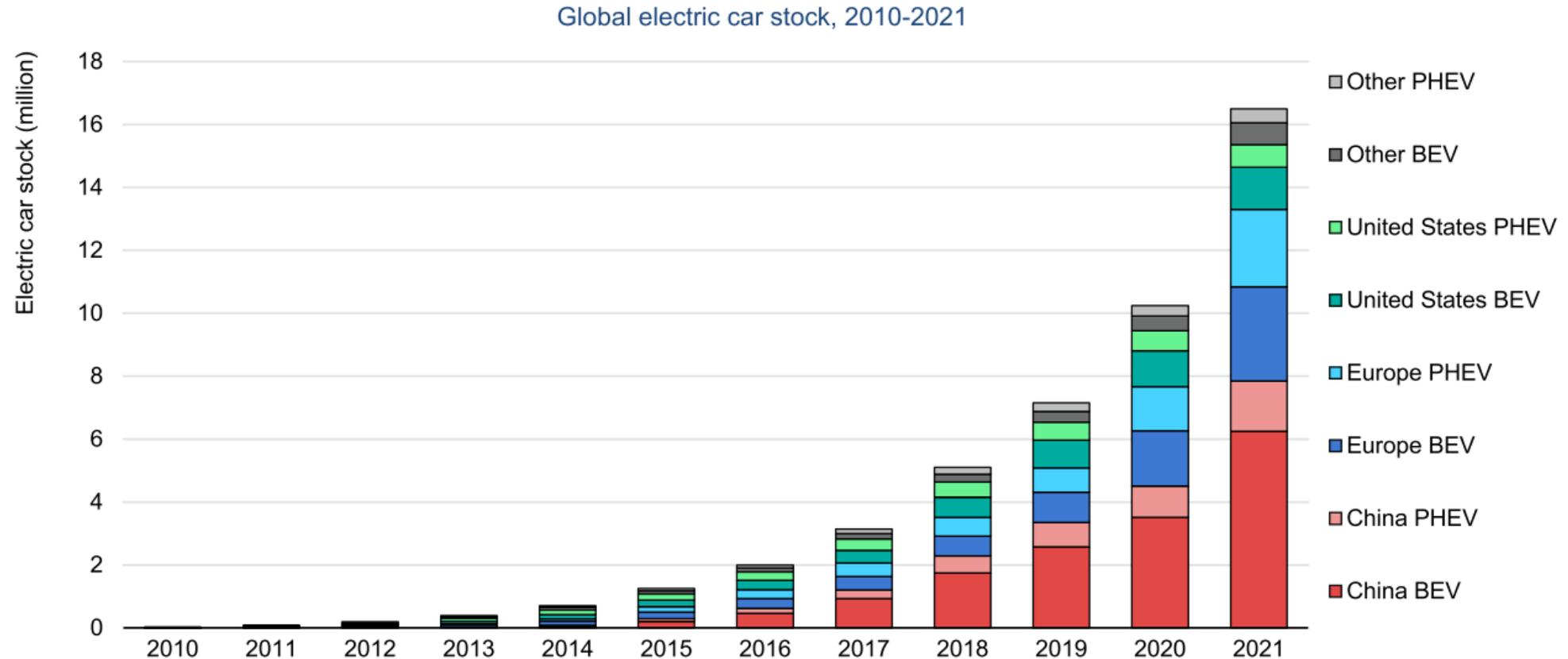
世界で使用されている乗用車の99%以上は内燃機関自動車

Gasoline ICE Diesel ICE CNG/LPG Hybrids Plug-in electric Battery electric Fuel cell

参考文献: IEA, OECD, 2017, Energy Technology Perspectives 2017; Catalysing Energy Technology Transitions

世界の電気自動車 (BEV, PHEV) の自動車保有台数

Over 16.5 million electric cars were on the road in 2021, a tripling in just three years



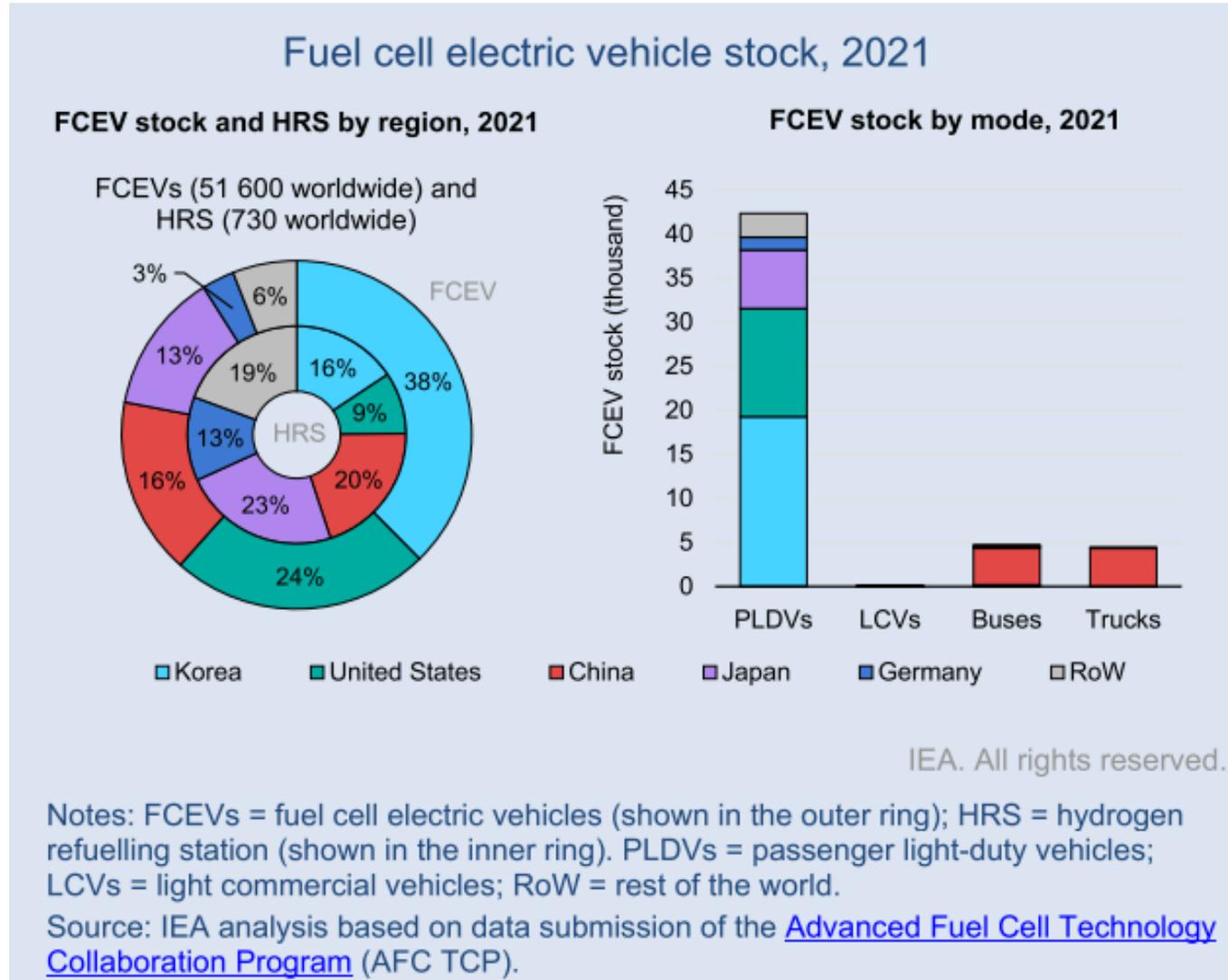
IEA. All rights reserved.

Notes: BEV = battery electric vehicle; PHEV = plug-in hybrid electric vehicle. Electric car stock in this figure refers to passenger light-duty vehicles.

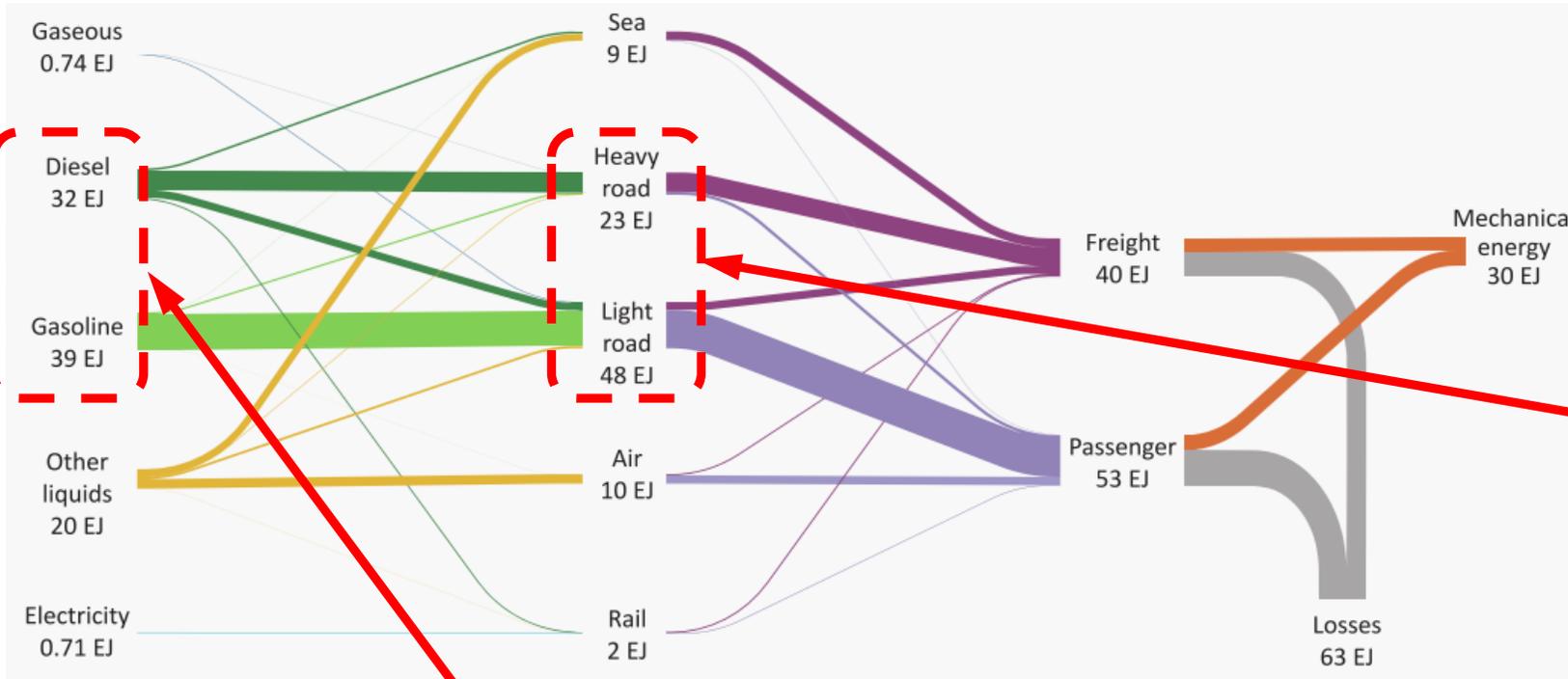
"Other" includes Australia, Brazil, Canada, Chile, India, Japan, Korea, Malaysia, Mexico, New Zealand, South Africa and Thailand. Europe in this figure includes the EU27, Norway, Iceland, Switzerland and United Kingdom.

Sources: IEA analysis based on country submissions, complemented by [ACEA](#); [CAAM](#); [EAFO](#); [EV Volumes](#); [Marklines](#).

世界の燃料電池自動車の自動車保有台数



道路交通部門の化石燃料消費量

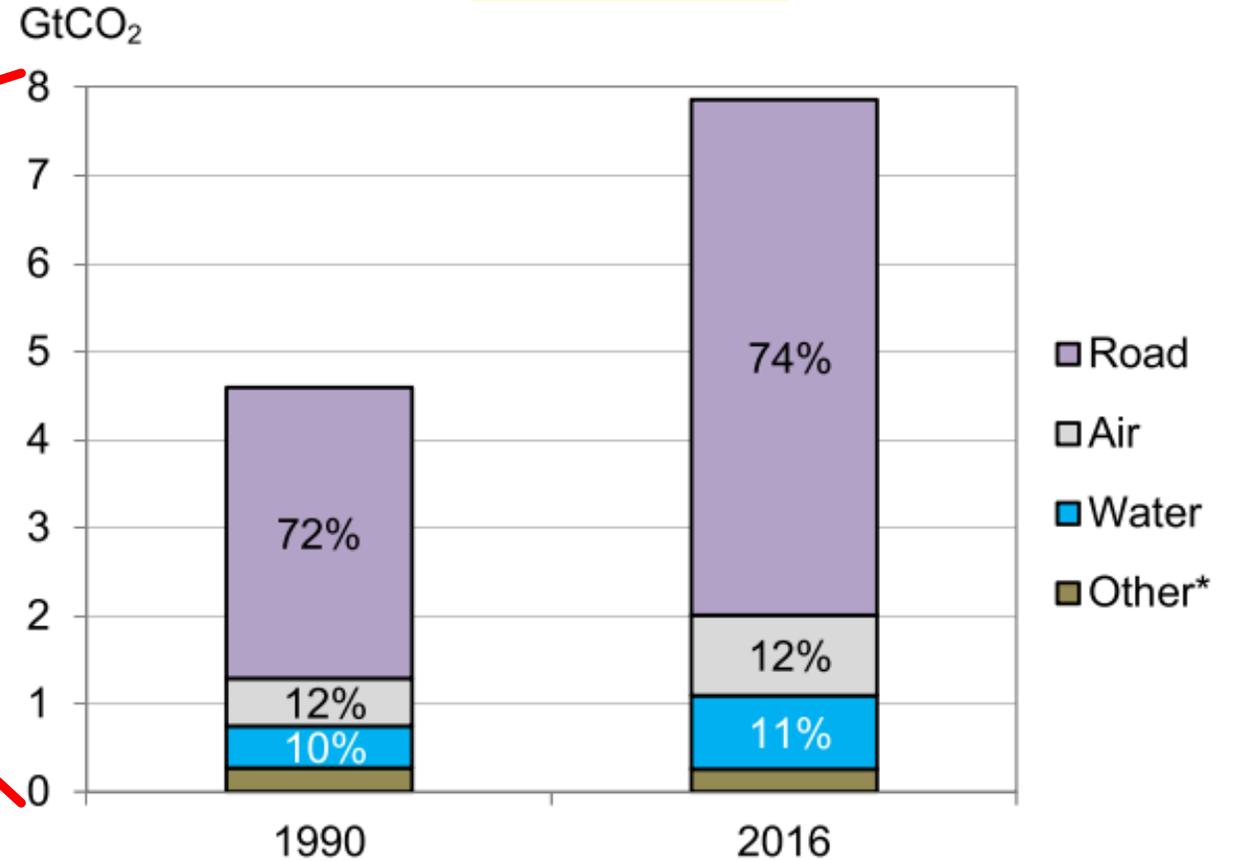
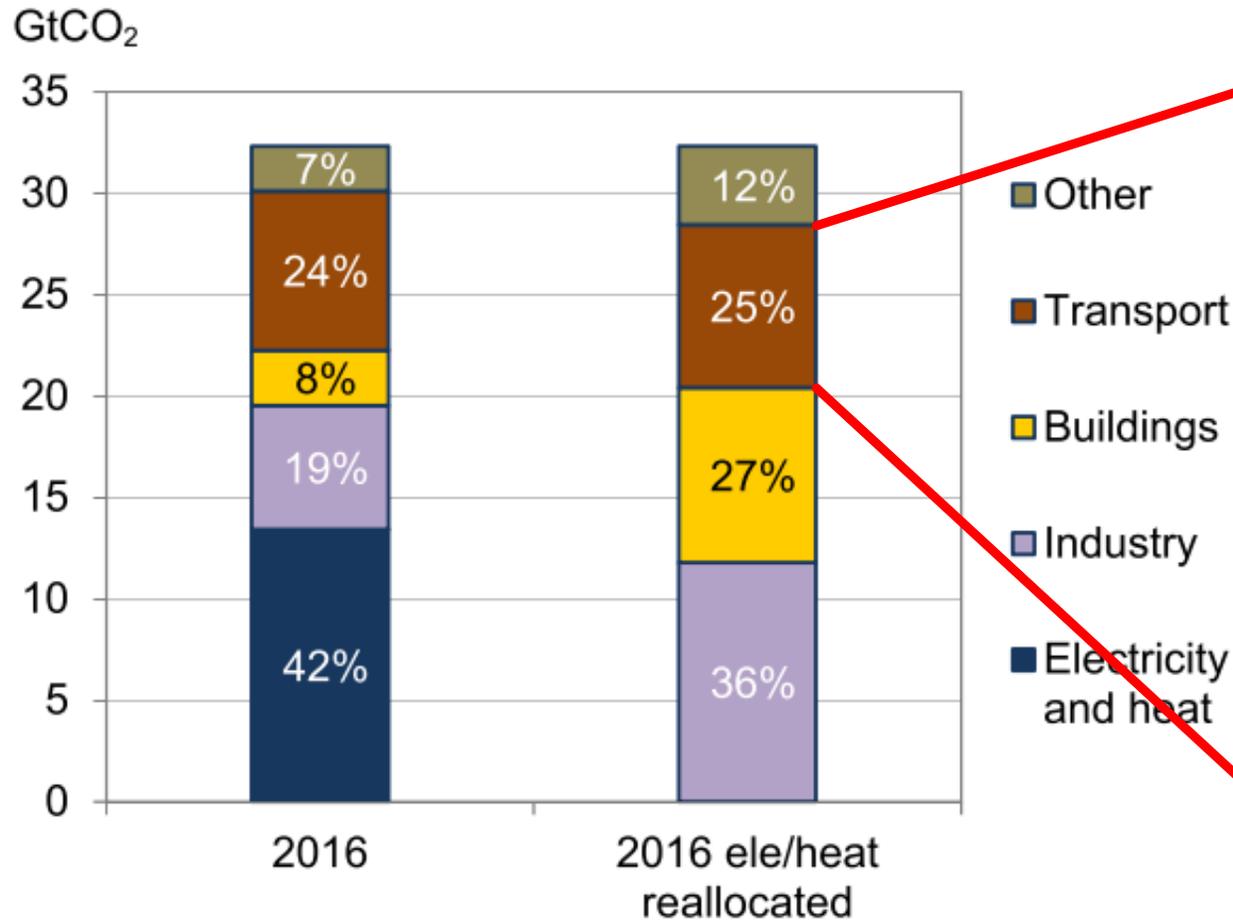


世界の交通部門で消費した93EJの中で、71EJは道路交通部門で使用した

道路交通部門で消費したエネルギーはほとんどガソリンとディーゼル

参考文献: IEA, OECD, 2012, Energy Technology Perspectives 2012; Pathways to a clean energy system

世界における交通部門のCO₂排出量

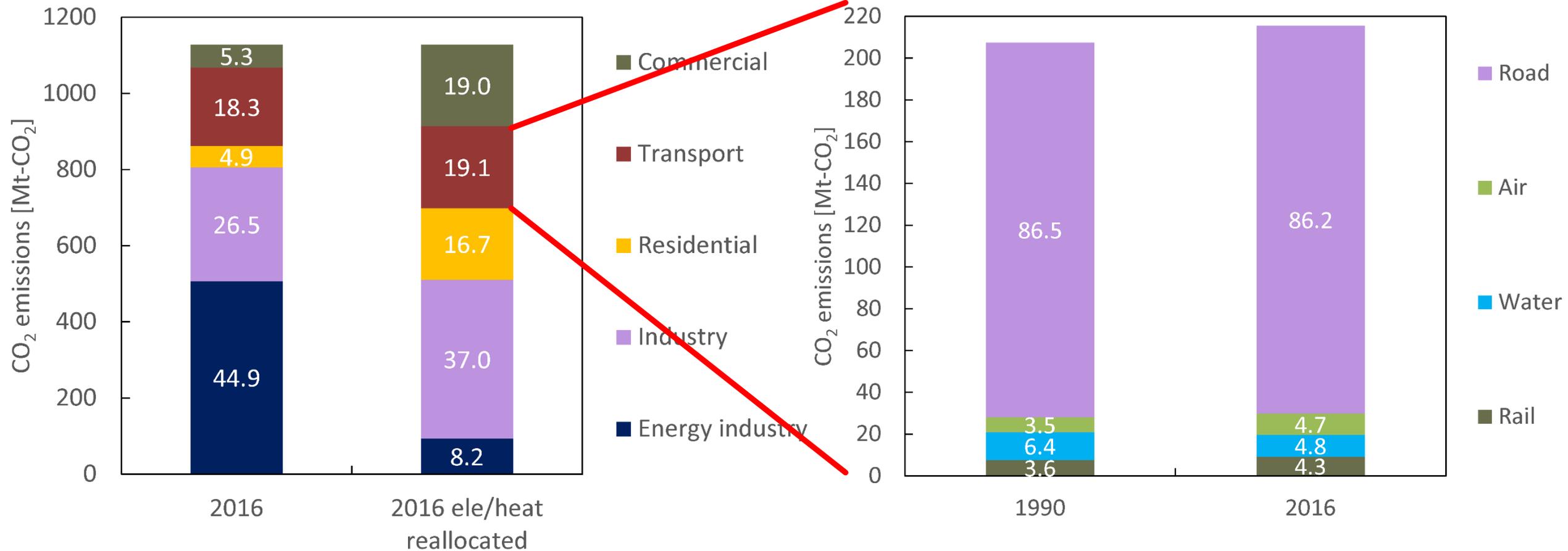


* Other includes rail, pipeline and other non-specified. Air and water include international bunkers.

参考文献: IEA, OECD, 2018, CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights 2018

交通部門は世界のCO₂排出量の25%を排出し、その中の75%は道路交通で排出されている

日本における交通部門のCO₂排出量

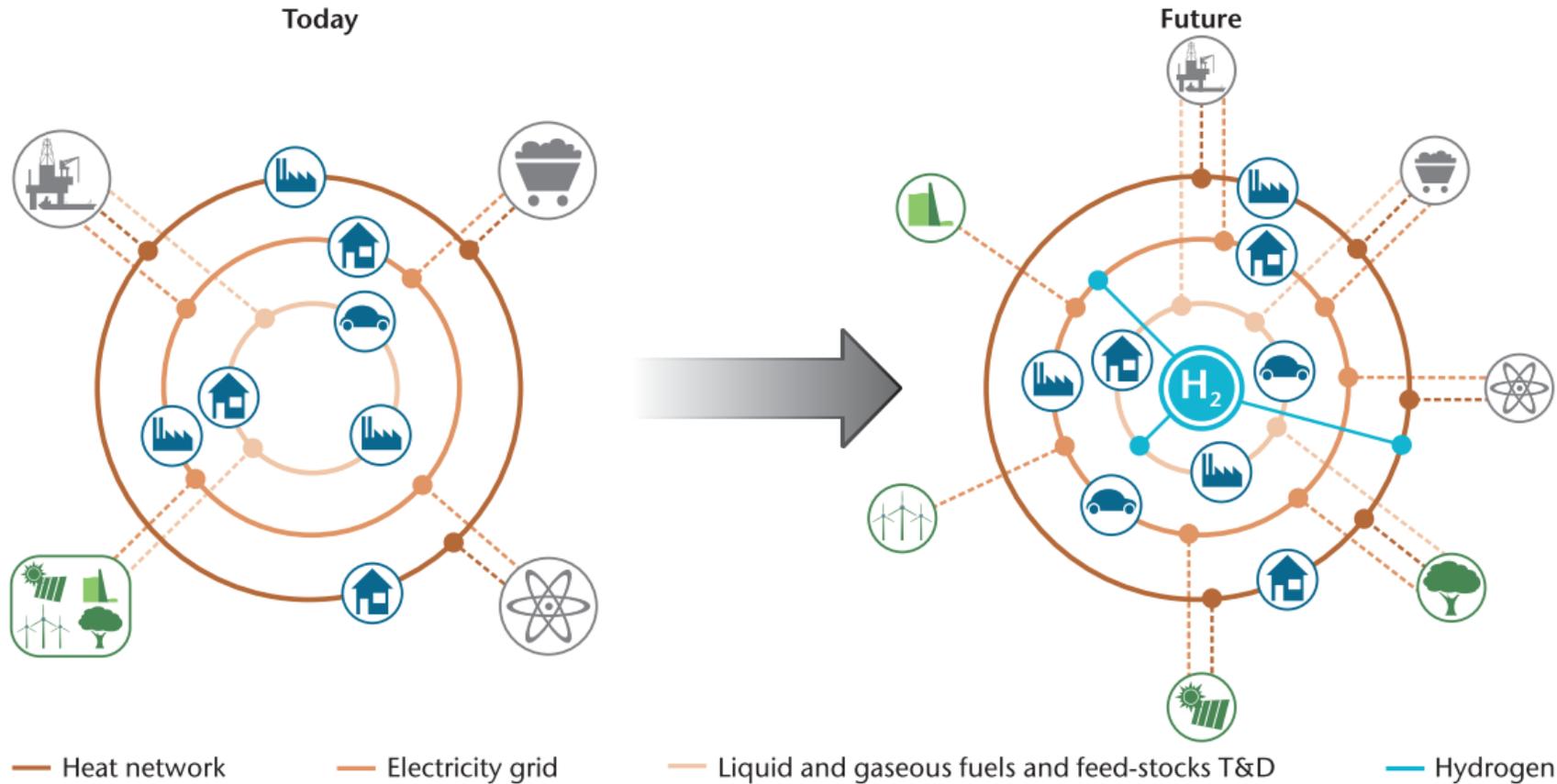


交通部門は日本のCO₂排出量の18%を排出し、その中の86%は道路交通で排出されている

参考文献: GIO, NIES, 2018, Japan's GHG Emission Data (FY1990-2016) Final Figures

2. 水素を用いたエネルギーシステムの CO₂排出量の削減

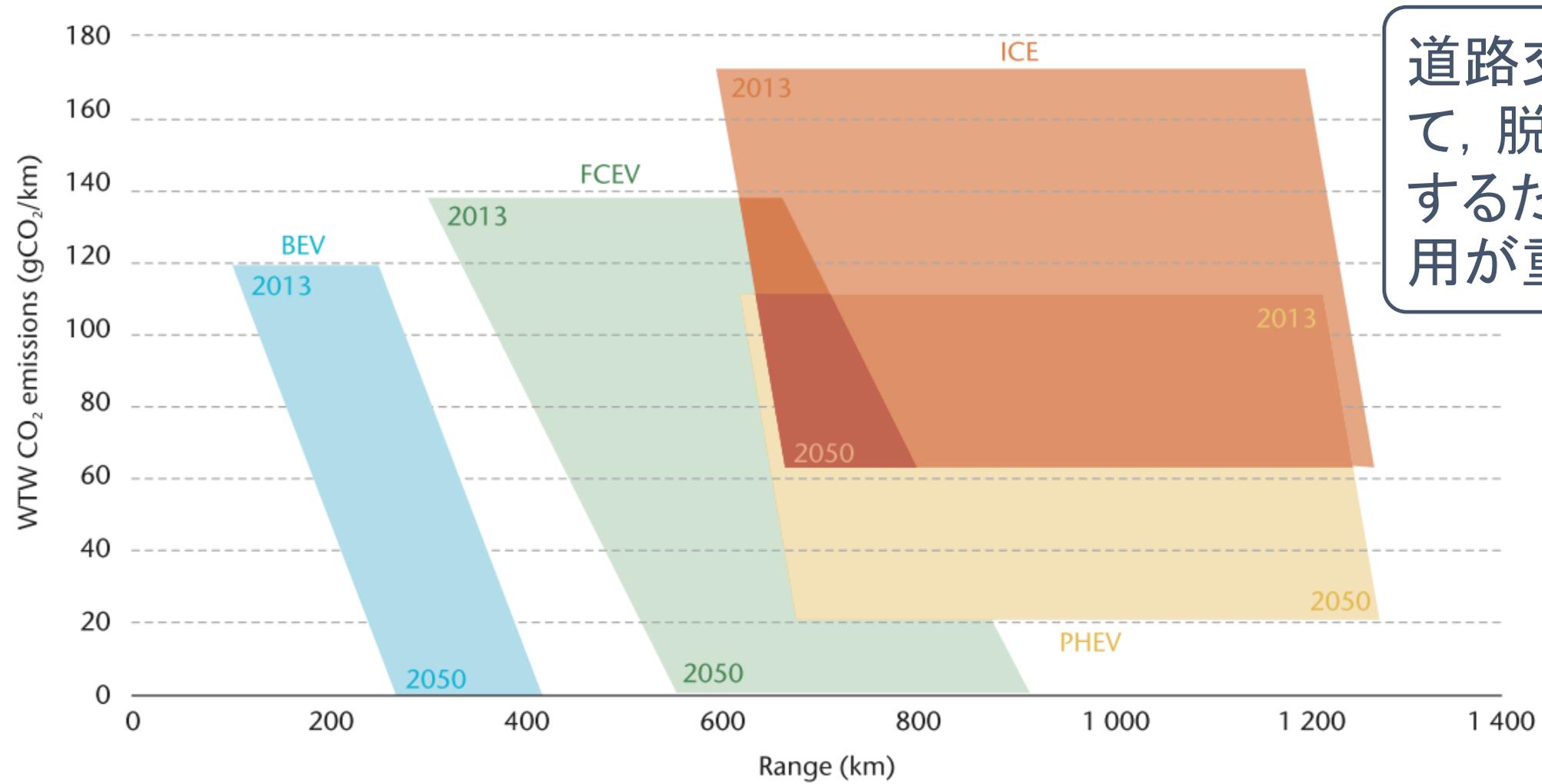
将来のエネルギーシステム



水素はエネルギーシステムの脱炭素化に貢献することができる

Source: IEA, OECD, 2015, Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells

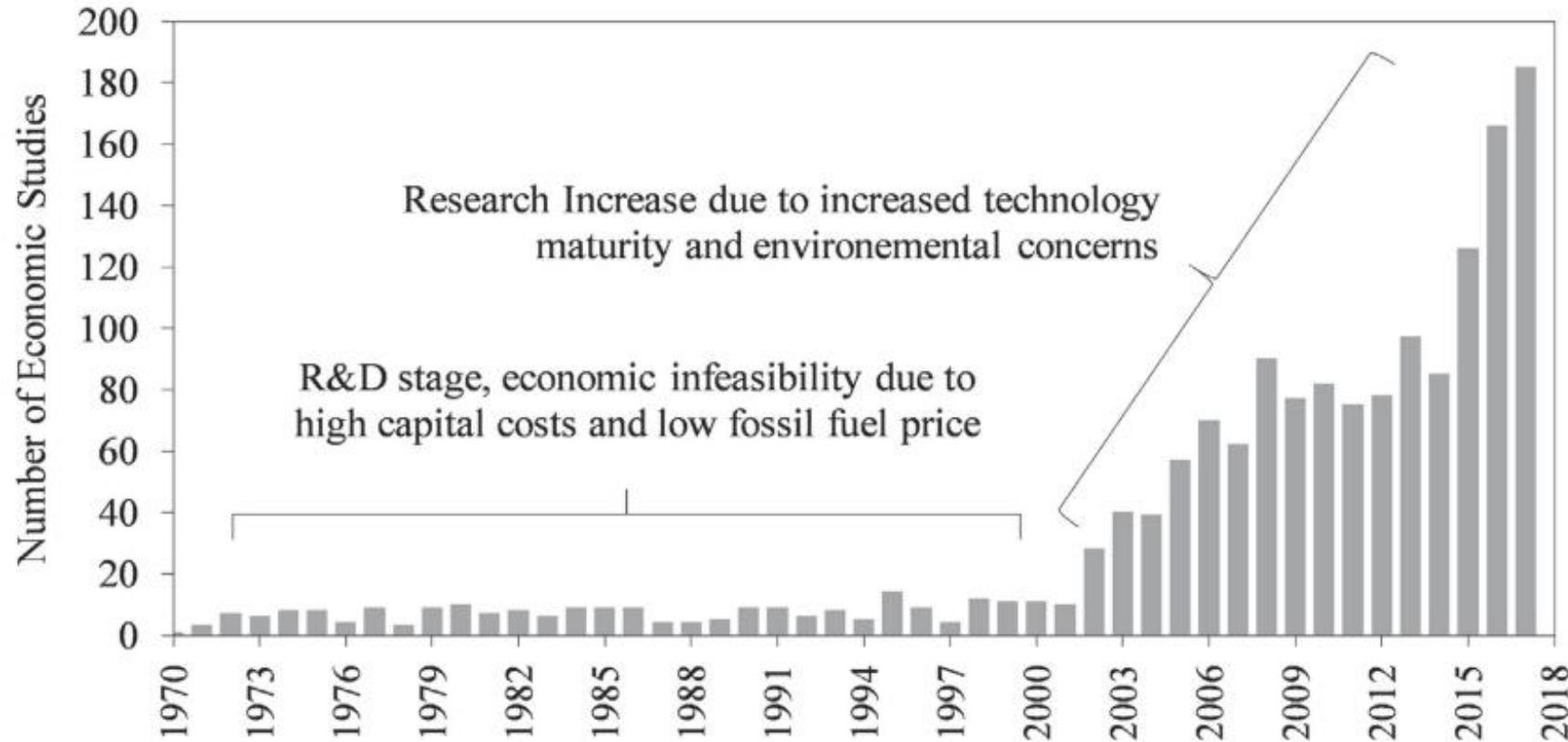
道路交通部門での水素の使用



道路交通部門において、脱炭素化を実現するために水素の使用が重要である

Source: IEA, OECD, 2015, Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells

水素の経済評価に関する研究



2003年から水素の経済評価に関する研究は急激に増大した

以前の研究ではコスト、エネルギー消費量、CO₂排出量が評価されたが、水の使用量は評価されていない

Source: El-Emam and Özcan, 2019, Journal of Cleaner Production, 220, pp: 593-609

日本における脱炭素化に関するポリシー

The Mainichi

Japan's National Daily Since 1922

Japan PM Suga vows goal of net zero emissions by 2050

October 26, 2020 (Mainichi Japan)



Japanese Prime Minister Yoshihide Suga delivers a policy speech during an extraordinary Diet session at the upper house of parliament in Tokyo, on Oct. 26, 2020. (AP Photo/Koji Sasahara)

TOKYO (Kyodo) -- Japanese Prime Minister Yoshihide Suga on Monday pledged to cut greenhouse gas emissions in Japan to net zero by 2050 in his first policy speech in parliament.

In his address at the start of the 41-day extraordinary Diet session through Dec. 5, Suga also called for balancing measures to prevent the spread of the novel coronavirus with the promotion of economic growth, while reiterating his resolve to hold the postponed Tokyo Olympics next summer.

The Asahi Shimbun | Asia & Japan Watch

Japan to ban domestic gas-fueled car sales by mid-2030s

THE ASAHI SHIMBUN

December 4, 2020 at 16:18 JST



The LEAF, an electric vehicle manufactured by Nissan Motor Co., on display in September 2017 (Asahi Shimbun file photo)

Japan will ban the sale of new gasoline-powered cars by the mid-2030s to help it put the brakes on greenhouse gas emissions, sources said.

The central government is expected to set the new regulations to achieve its goal of net zero carbon emissions by 2050.

The economy ministry will hold a meeting of experts and automobile industry leaders as early as Dec. 10 to discuss the new target, which will be included in the government's draft plan at the end of the year.

The new plan would ban the sale of new gasoline-powered vehicles in the domestic market and limit sales of new cars to those with no or low exhaust emissions, such as electric



vehicles and hybrid cars.

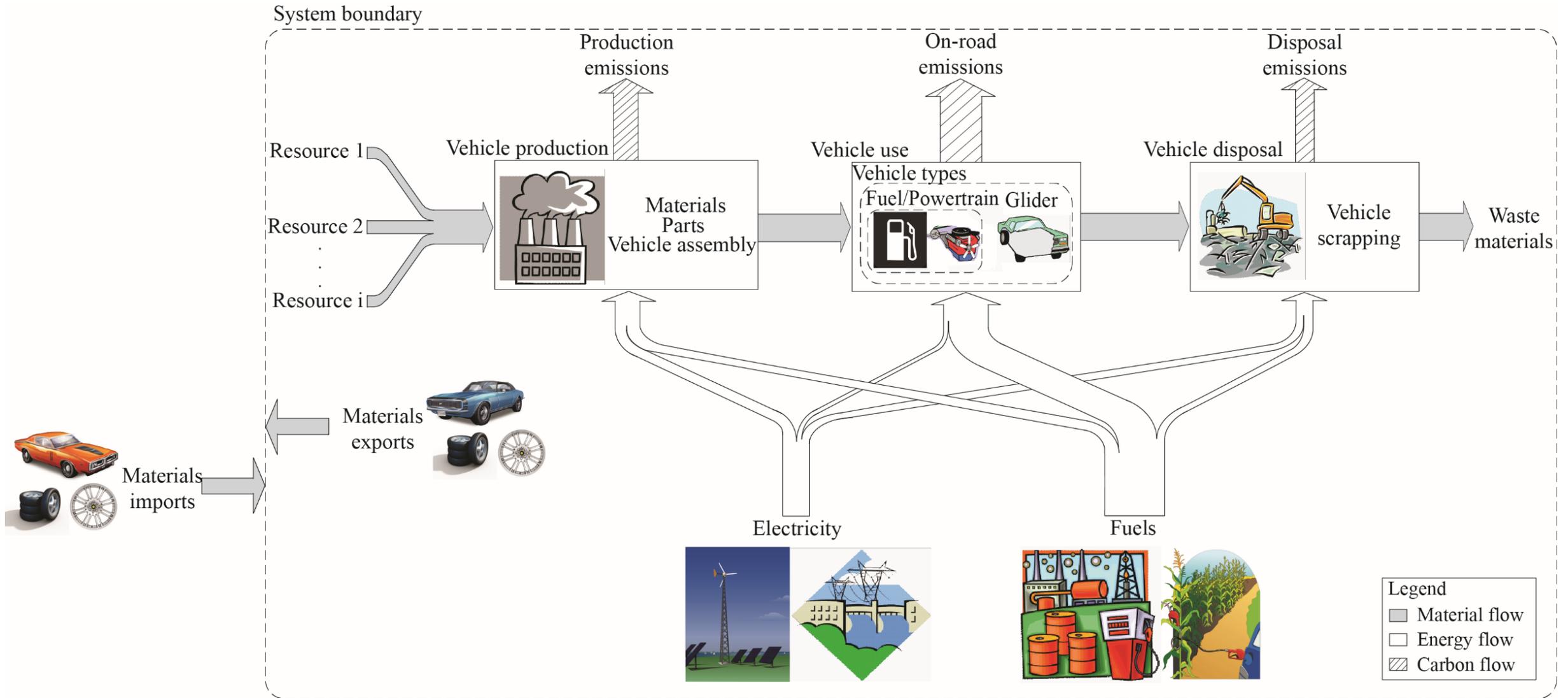
2050年までにカーボンニュートラル社会

Source: <https://mainichi.jp/english/articles/20201026/p2g/00m/0na/081000c>

2035からガソリン車は販売禁止

Source: <http://www.asahi.com/ajw/articles/13989088#:~:text=Japan%20will%20ban%20the%20sale,zero%20carbon%20emissions%20by%202050>

自動車に関するエネルギーフローとマテリアルフロー

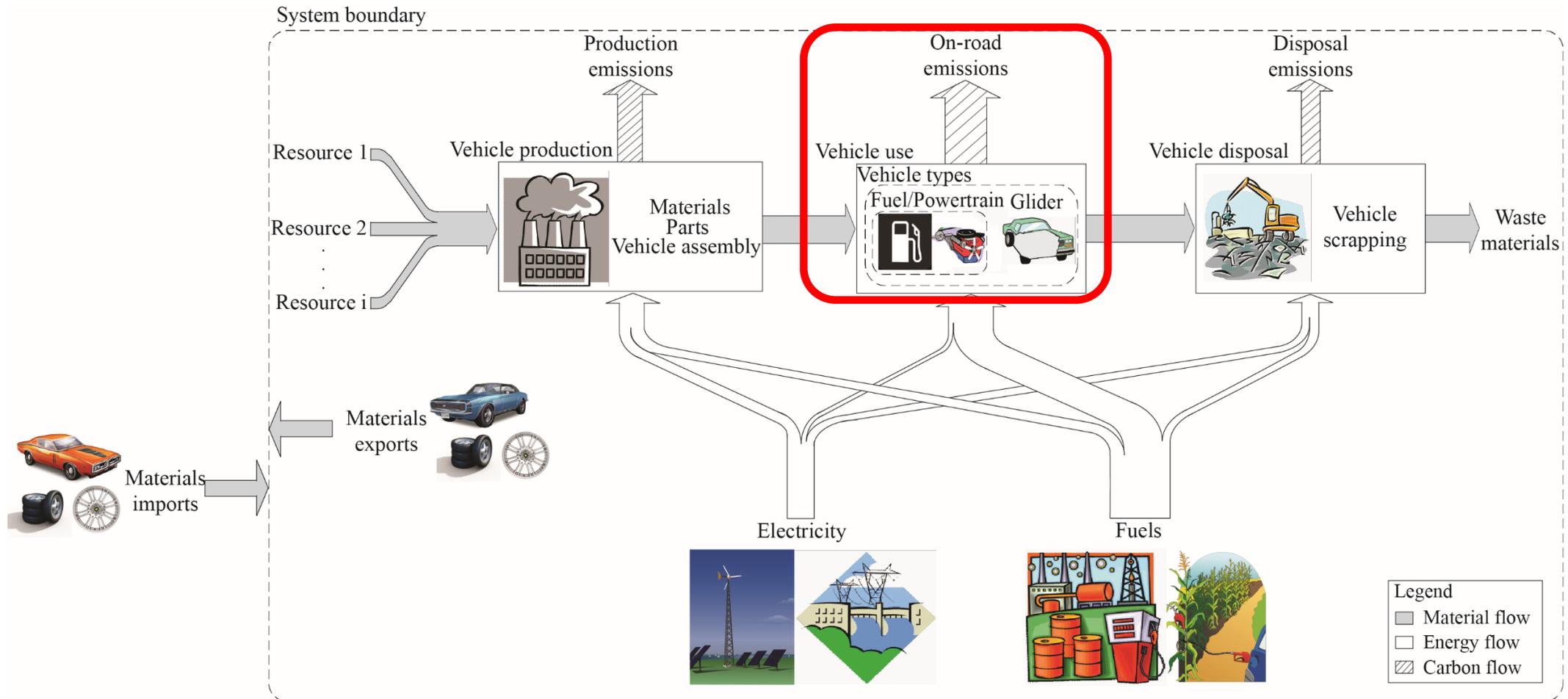


Source: González Palencia et al., 2014, Applied Energy, Vol. 123, pp. 129-142

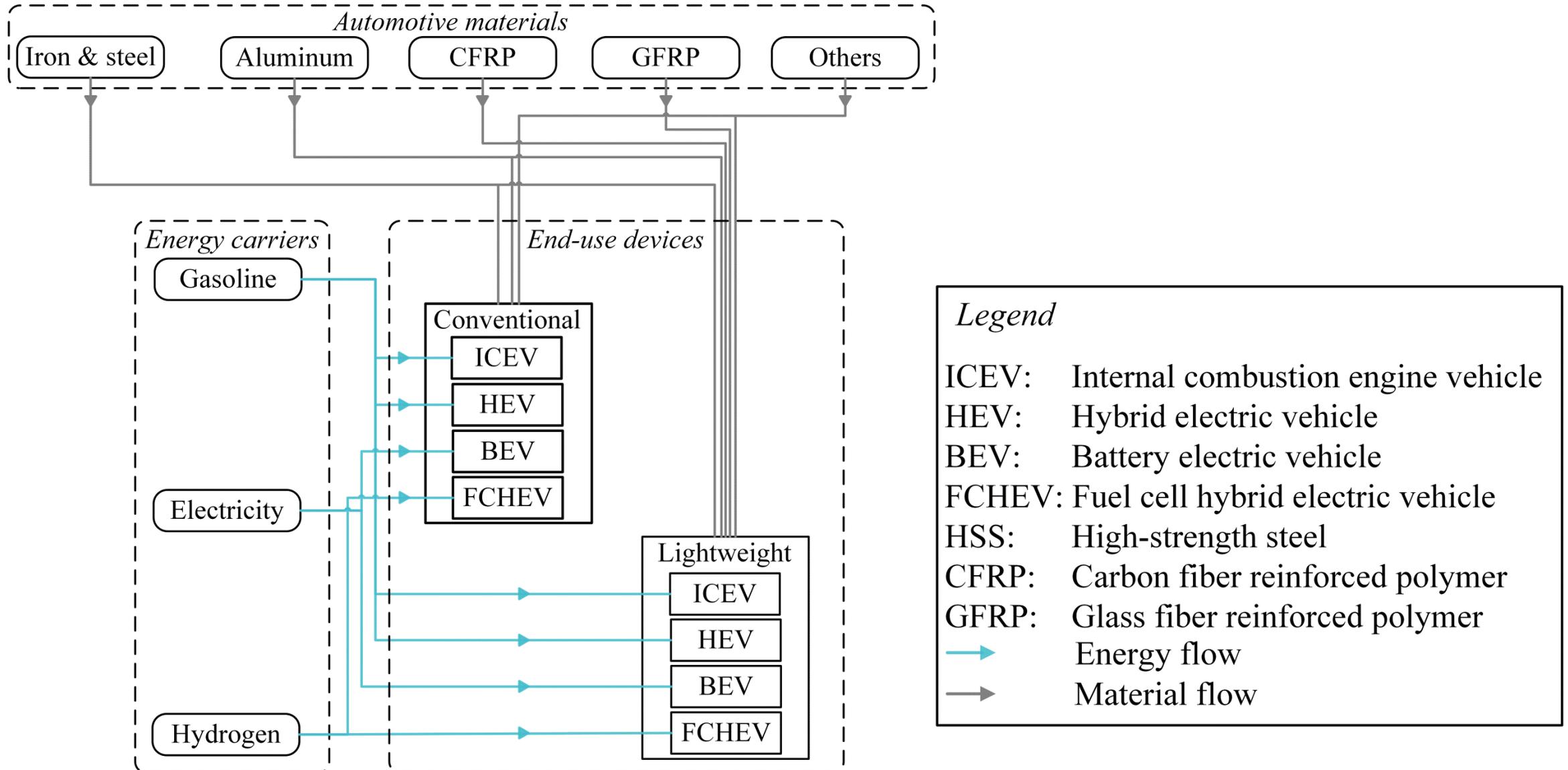
3. 水素燃料電池自動車の普及

研究目的

- 水素燃料電池自動車が自動車保有台数に及ぼす影響を明らかにする

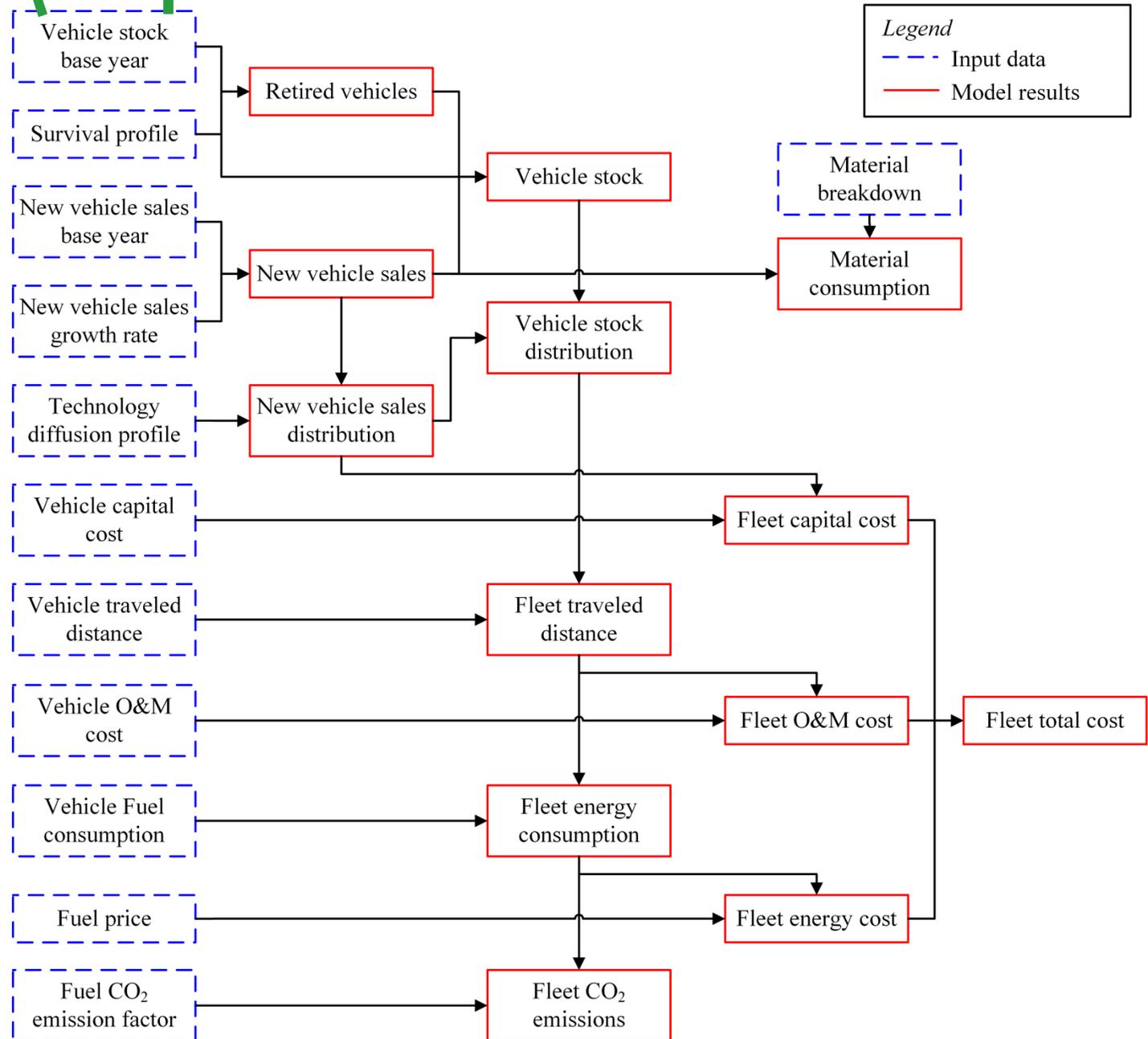


エネルギーシステムの概略図



Source: González Palencia et al, 2015, Proceedings of the ICOPE 2015, ICOPE-15-1061

モデルのフローチャート



ケーススタディー

日本



GDP per capita: USD 38,492

Source: <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>

Population: 127,103,388 people

Source: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>

Car ownership: 455 car/10³ people

Source: IEA/OECD, “Energy Technology Perspectives 2012”, (2012).

Source: <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>

日本における自動車の種別

車格	総排気量 [cc]	自動車の大きさ [m]		
		長さ	幅	高さ
軽自動車	≤ 660	3.40	1.48	2.00
小型自動車	≤ 2,000	4.70	1.70	2.00
普通自動車	> 2,000	> 4.70	> 1.70	> 2.00

参考文献：国土交通省，1951，道路運送車両法施行規則（昭和二十六年八月六日運輸省令第七十四号）

普通自動車



参考文献： <http://toyota.jp>

小型自動車



参考文献： <http://honda.co.jp>

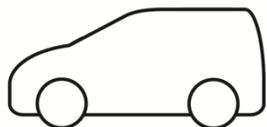
軽自動車



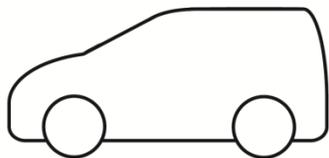
参考文献： <http://honda.co.jp>

自動車の種類

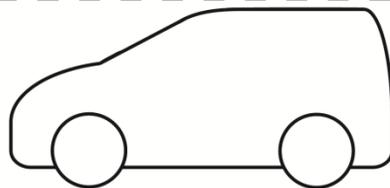
Size class



Mini-sized



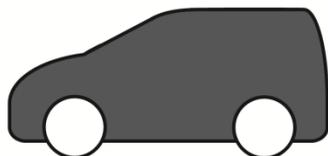
Compact



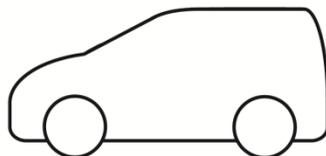
Normal

+

Glider



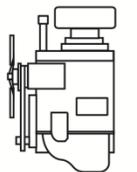
Conventional



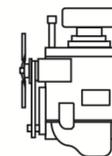
Light

+

Powertrain



Engine

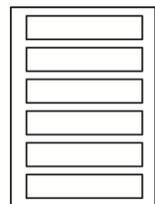


Engine

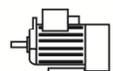
Battery



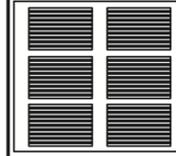
Motor



Battery



Motor



Fuel cell



Motor

Battery

ICEV

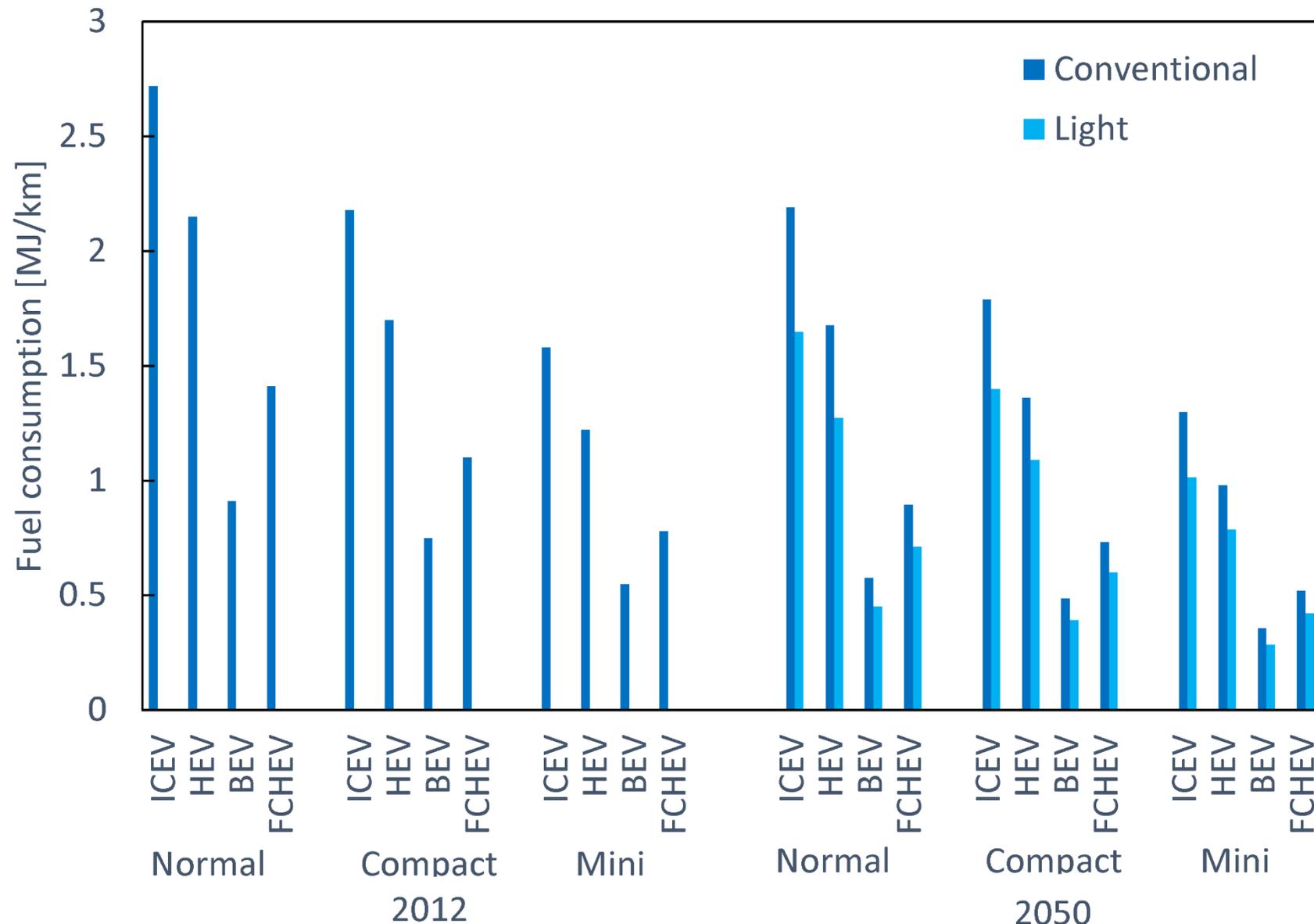
HEV

BEV

FCHEV

24 種類:
3 車格,
4 ドライブトレイン,
2 車体

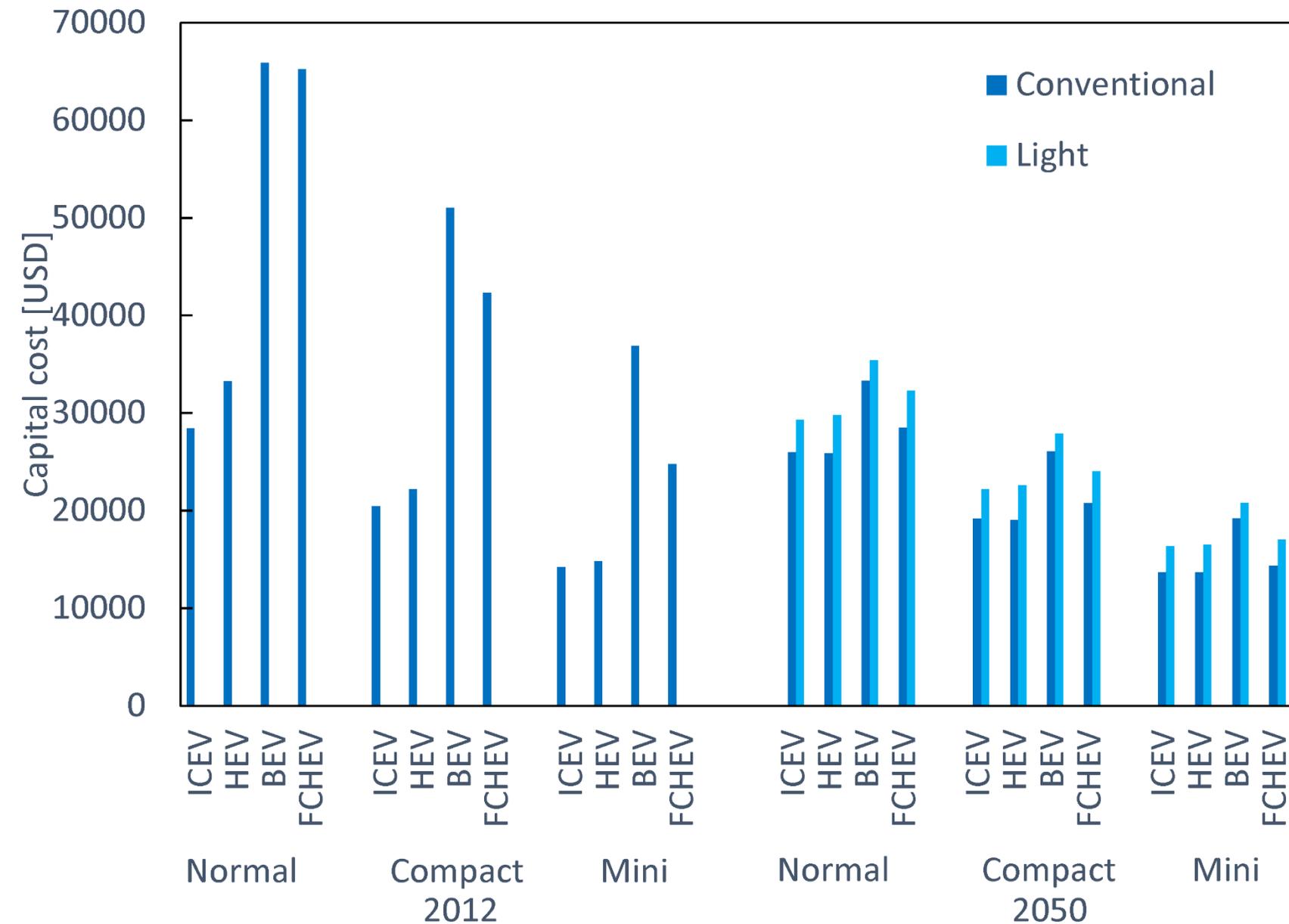
自動車の燃料消費量



軽量材料を用いた
バッテリー電気軽自動車
は、燃料消費量が
一番少ない

燃料消費量削減
について、電動化の影響
はダウンサイジングの
影響より大きい

自動車の資本コスト



将来、電気自動車の資本コストは減少が予測される

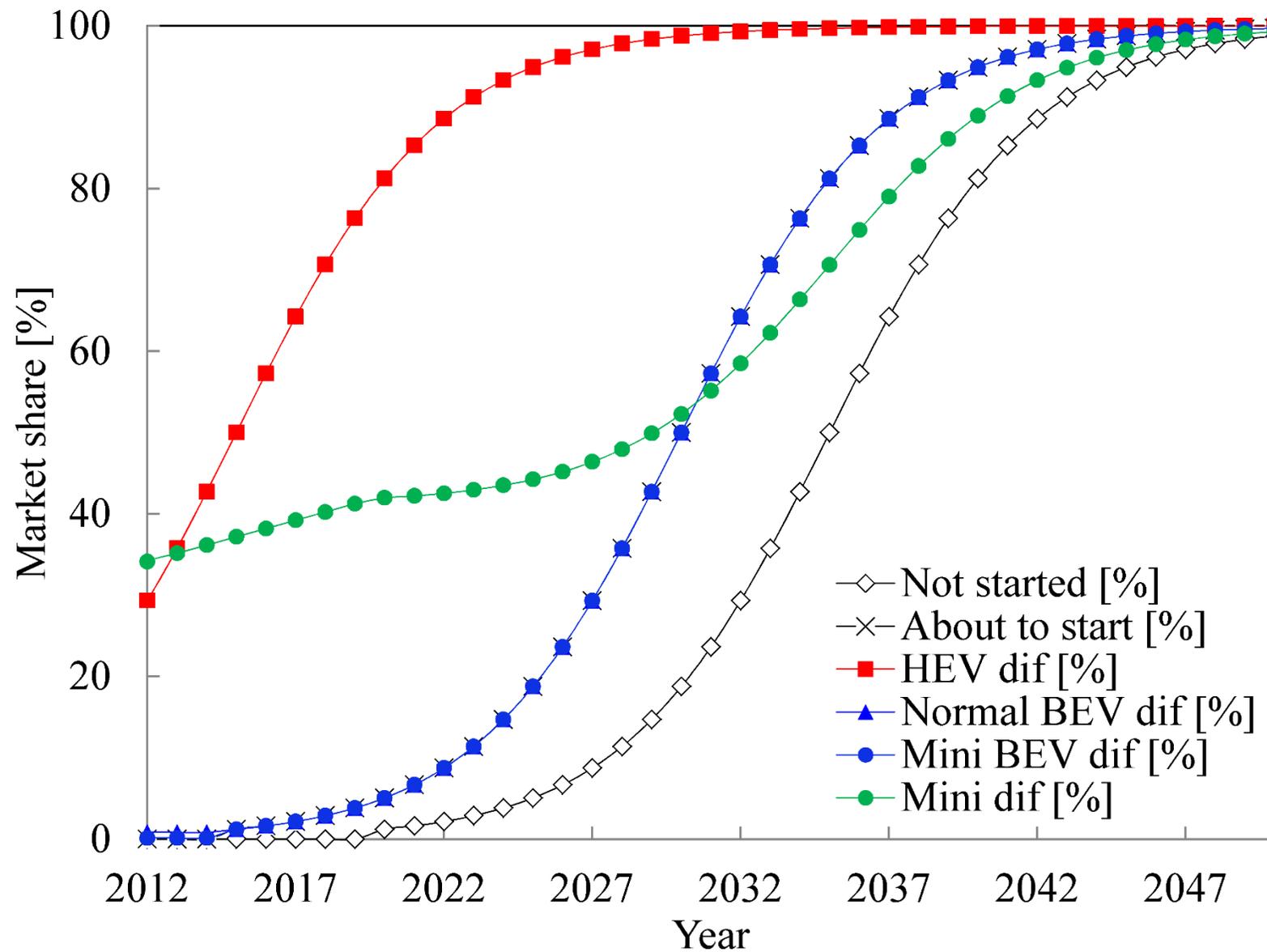
軽量材料シフトのため、自動車の資本コストは最大21%増加する

シナリオ設定

シナリオ	原動機			ダウンサイジング
	ICEV	BEV	FCHEV	
Base	✓			
BEV		✓		
FCHEV			✓	
Mini BEV		✓		✓
Mini FCHEV			✓	✓

- 技術普及はロジスティック関数によって計算された。
- 2020までに新車販売台数の成長率は0.05%/yrとなり、2020後は-1.00%/yrとなる。
- 全国のモデル。
- LEAP (Long-Range Energy Alternatives Planning Systems)を用いたモデル。

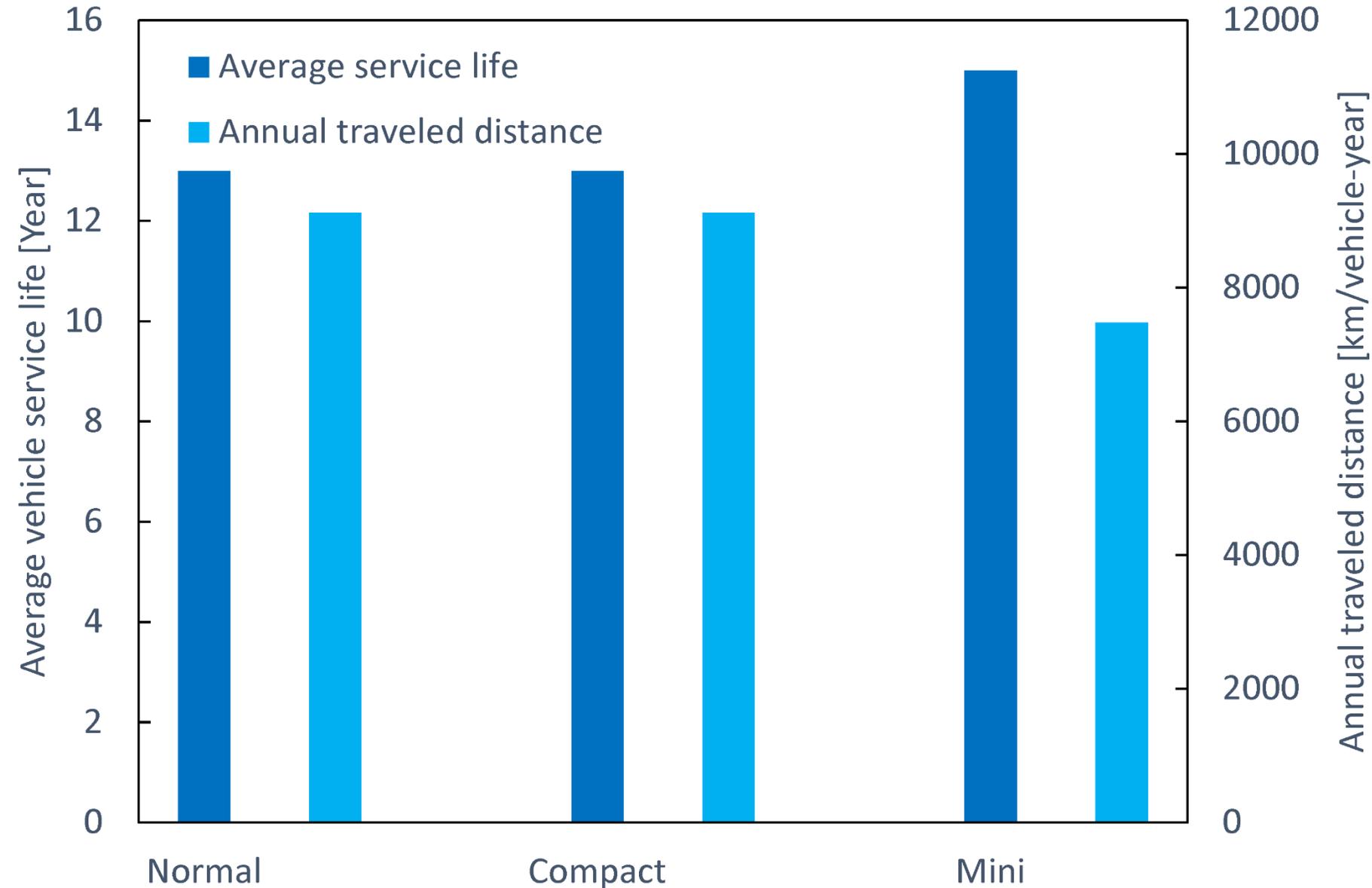
技術普及



ロジスティック関数を用いて技術普及を計算した

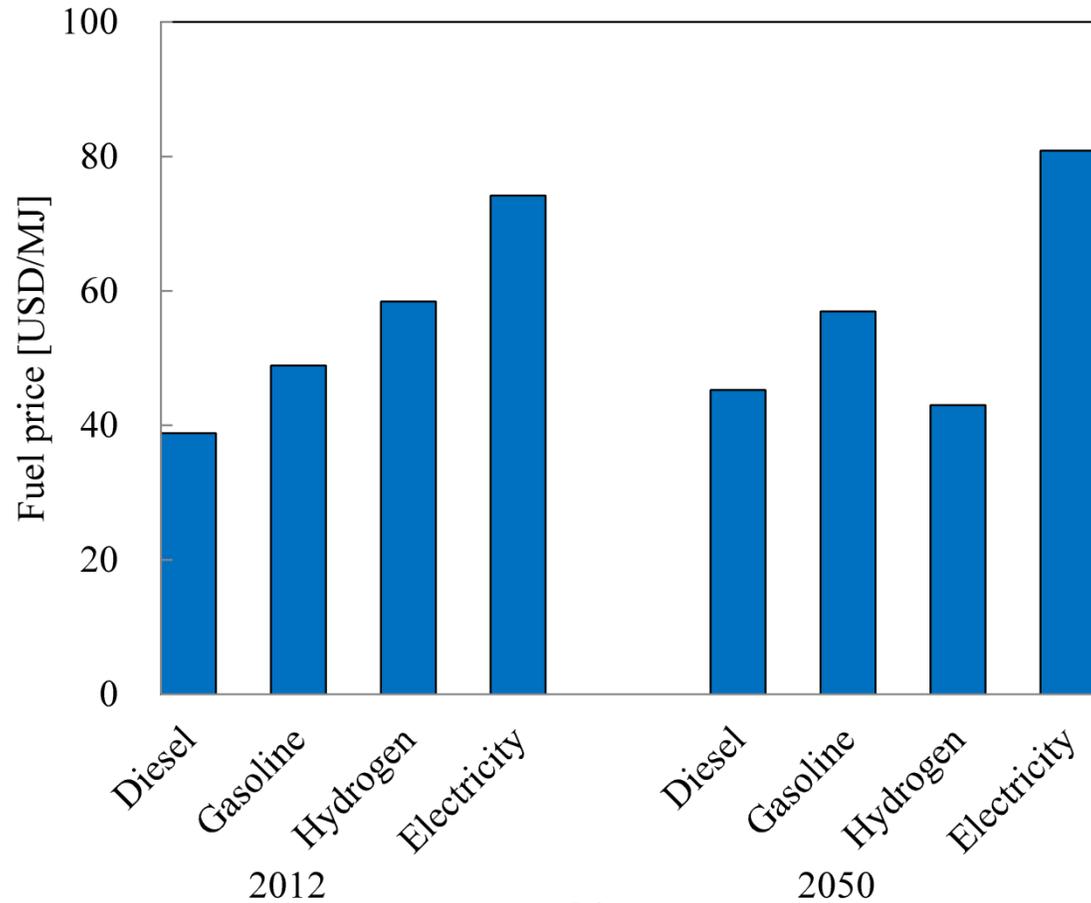
参考文献: González Palencia et al., 2015, Energy, 93 (2), pp. 1489-1504

使用年数及び年間走行距離

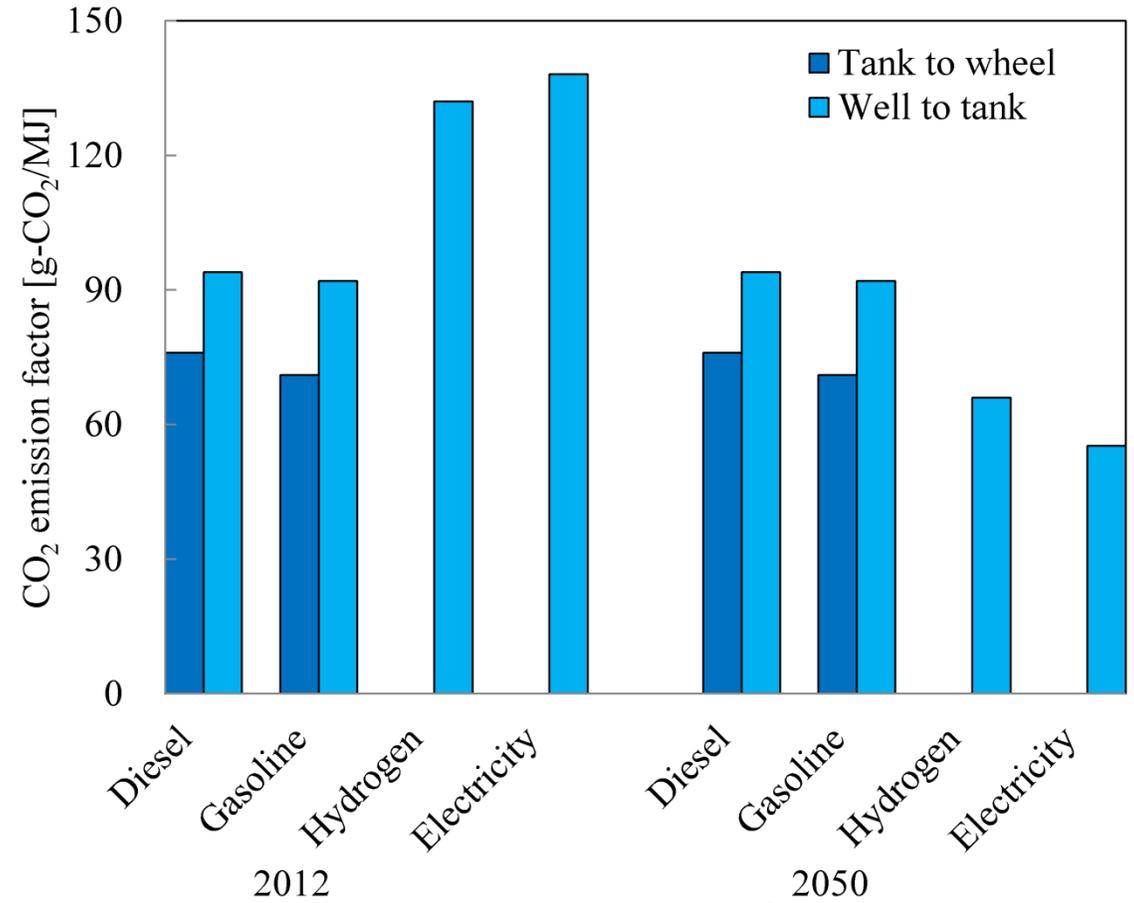


Estimated using data from
(MLIT, 2004), (Nishimura, 2011),
(MOE, 2011), (MLIT, 2009)

燃料における価格とCO₂排出量係数



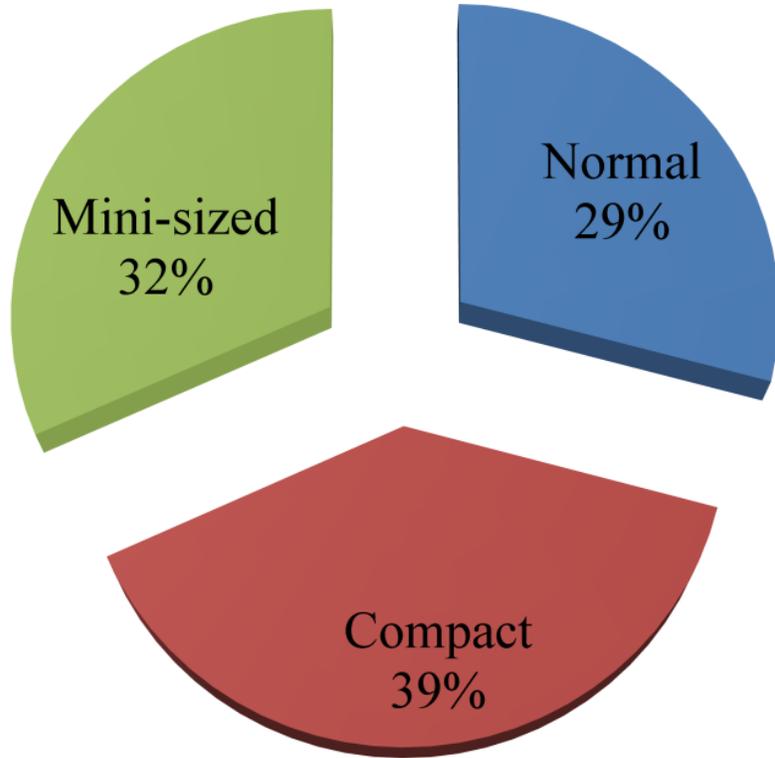
価格



CO₂排出量係数

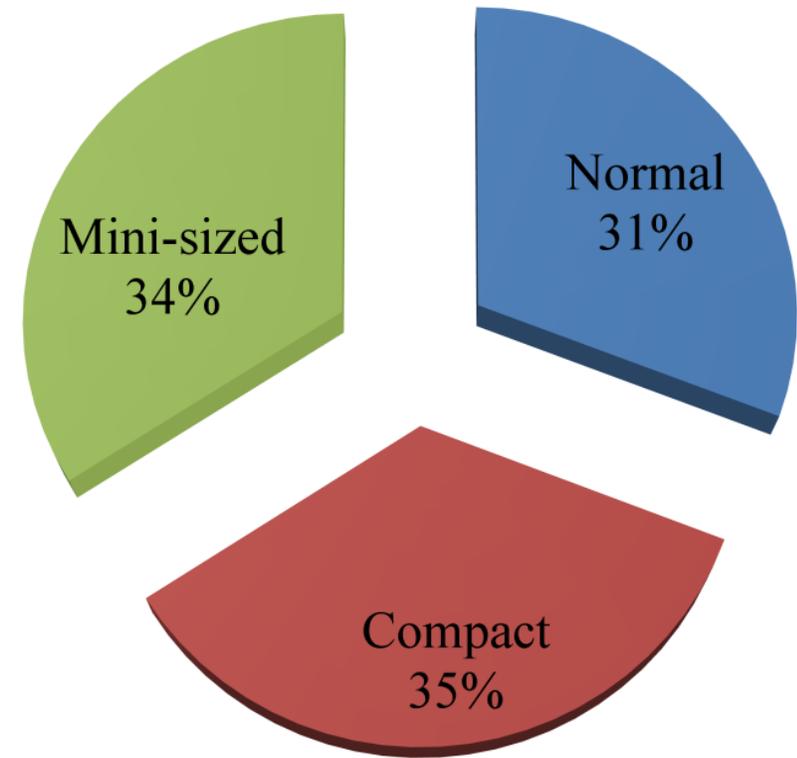
Notes. ^a Gasoline and diesel: CO₂ emission factors (Bandivadekar et al, 2008), price (EDMC and IEEJ, 2014) and (IEA/OECD, 2012); ^b Hydrogen: 100% SMR in 2012; 50% SMR, 25% wind and 25% solar PV in 2050; CO₂ emission factors and price (Bandivadekar et al, 2008) and (Delucchi et al, 2014); ^c Electricity: 50% renewables and 50% fossil fuels in 2050; CO₂ emission factors (IEA/OECD, 2013), (Berraho, 2012) and (IEA/OECD, 2012).

2012年乗用車保有台数及び販売台数



乗用車保有台数: 5850万台

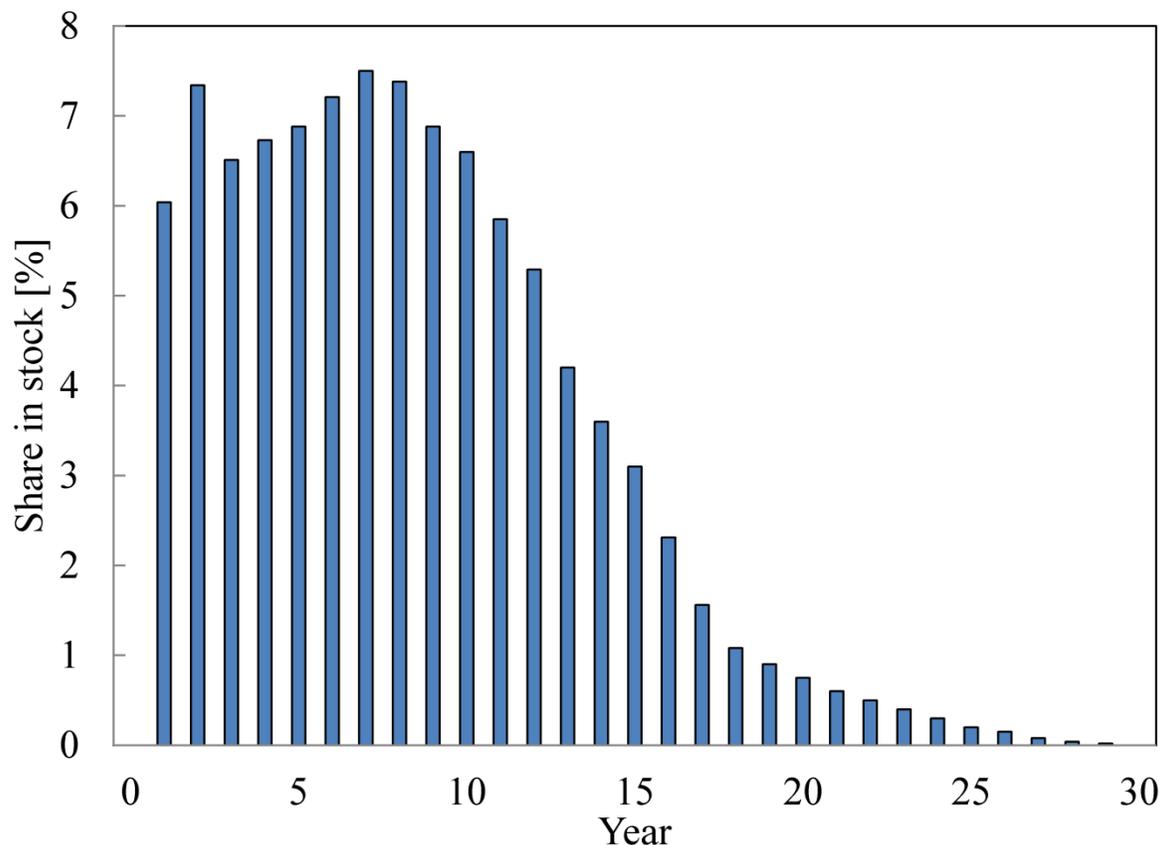
参考文献: 自動車検査登録情報協会, 2012,
自動車保有台数



新車販売台数: 457万台

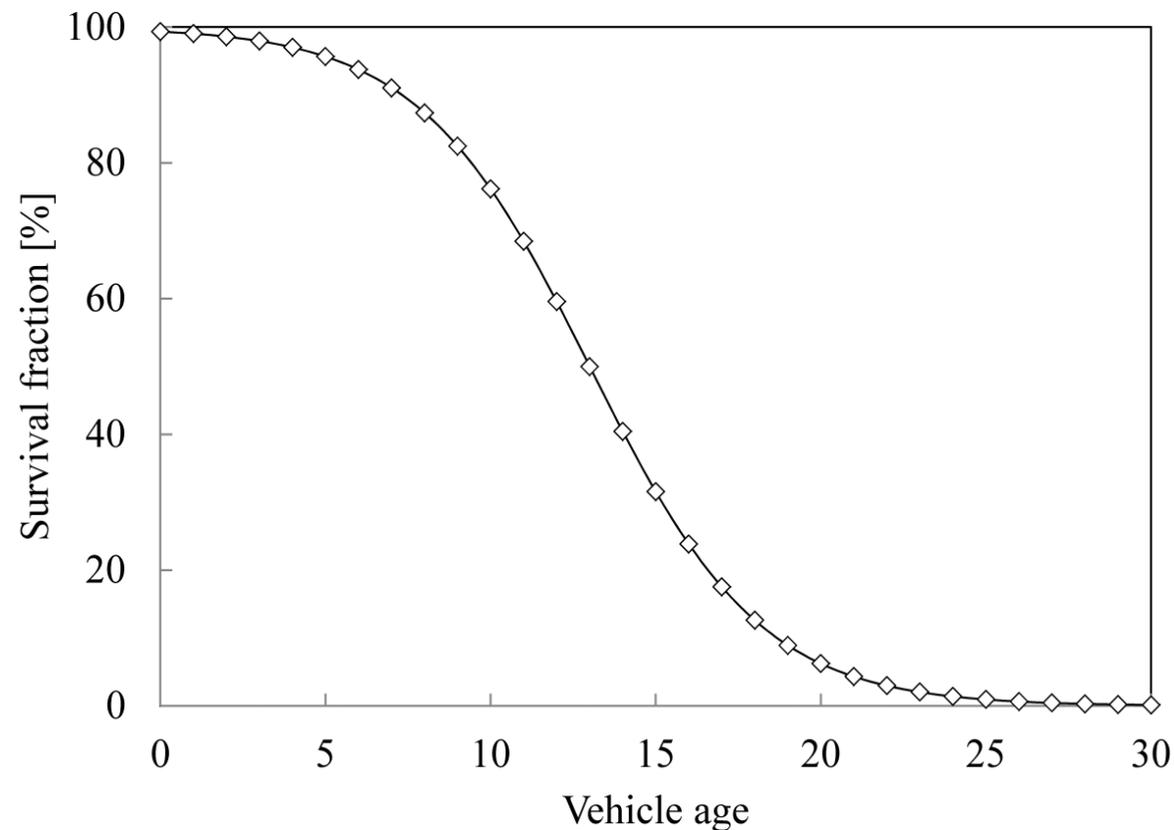
参考文献: 日本自動車販売協会連合会, 2013,
新車・年別販売台数

日本における乗用車保有台数の特性



乗用車保有台数の分布

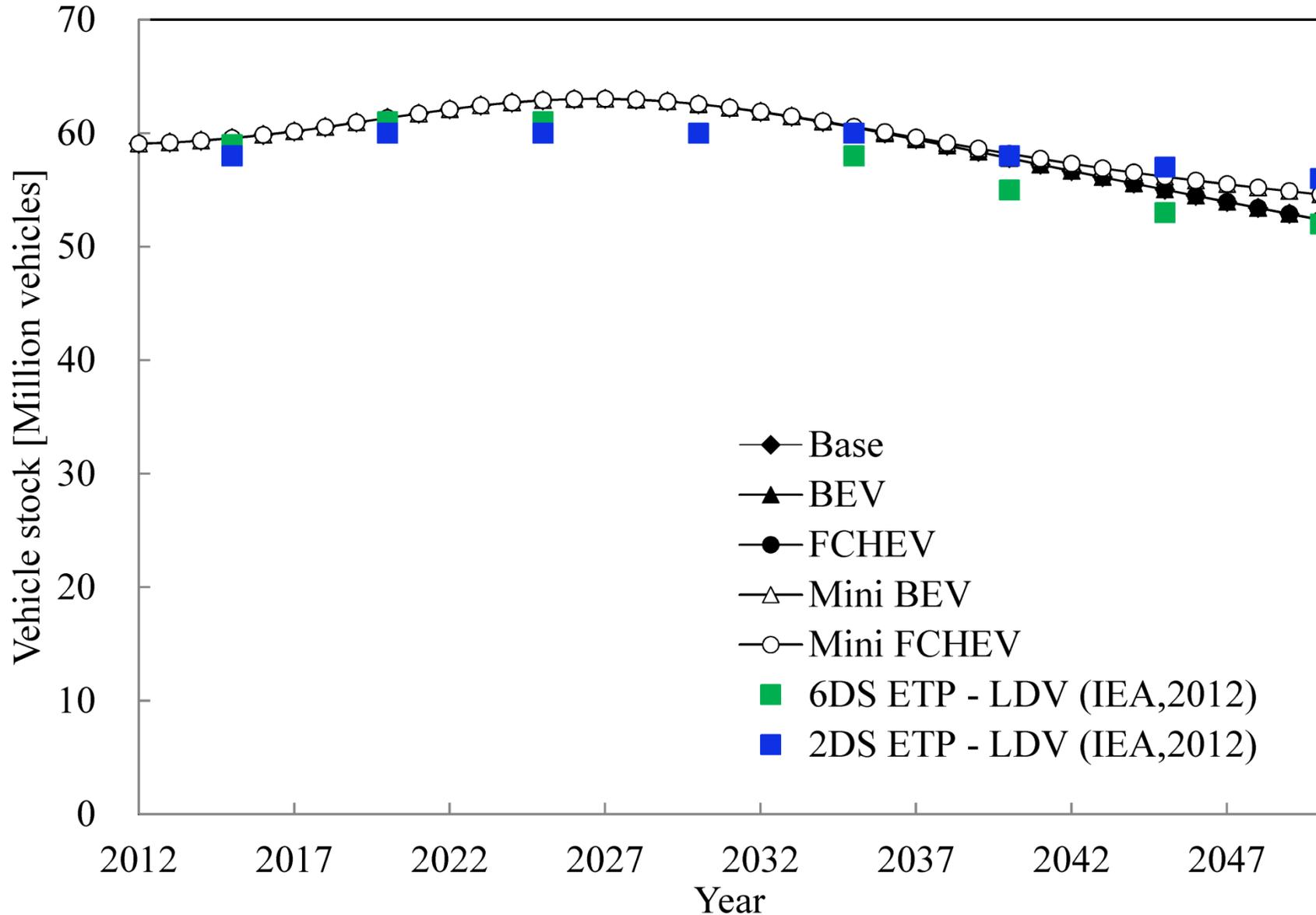
参考文献: 自動車検査登録情報協会, 2012, 初度登録年別 自動車保有車両数



生存関数

参考文献: 環境省, 2010, 環境対応車普及戦略

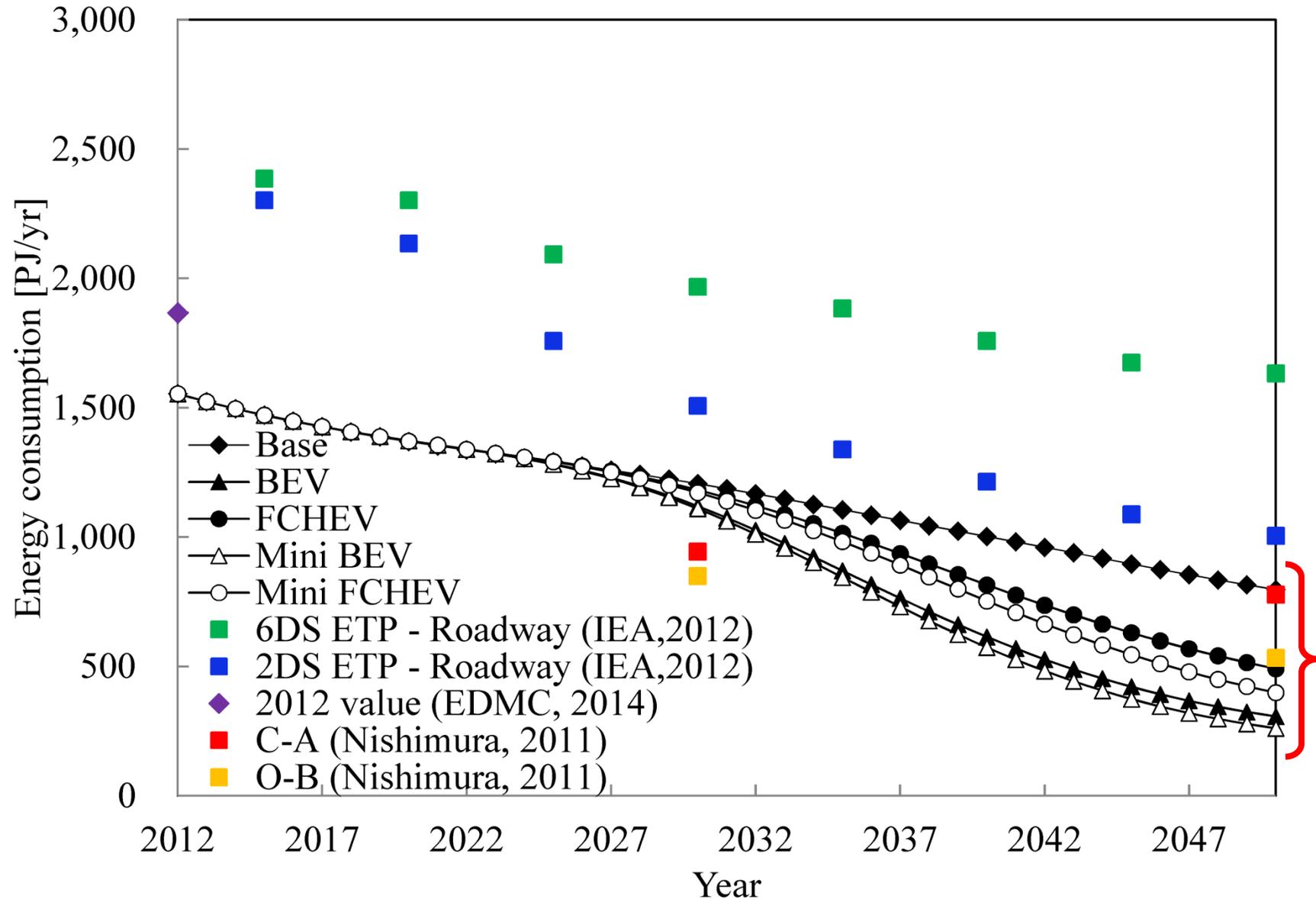
乗用車保有台数



2027年に、乗用車保有台数が約6300万台とピークになる

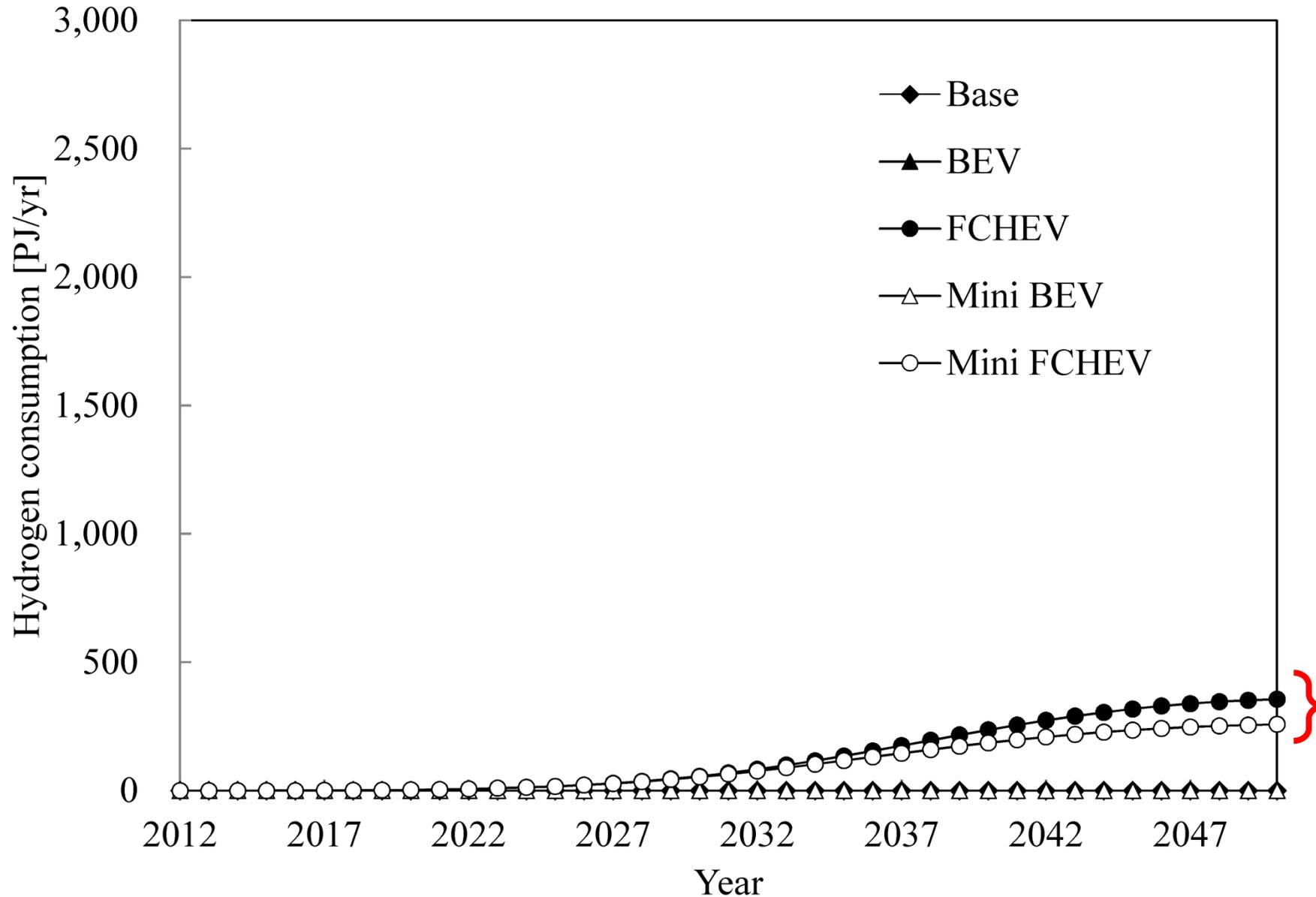
2050年に、乗用車保有台数が5240～5460万台となる

エネルギー消費量



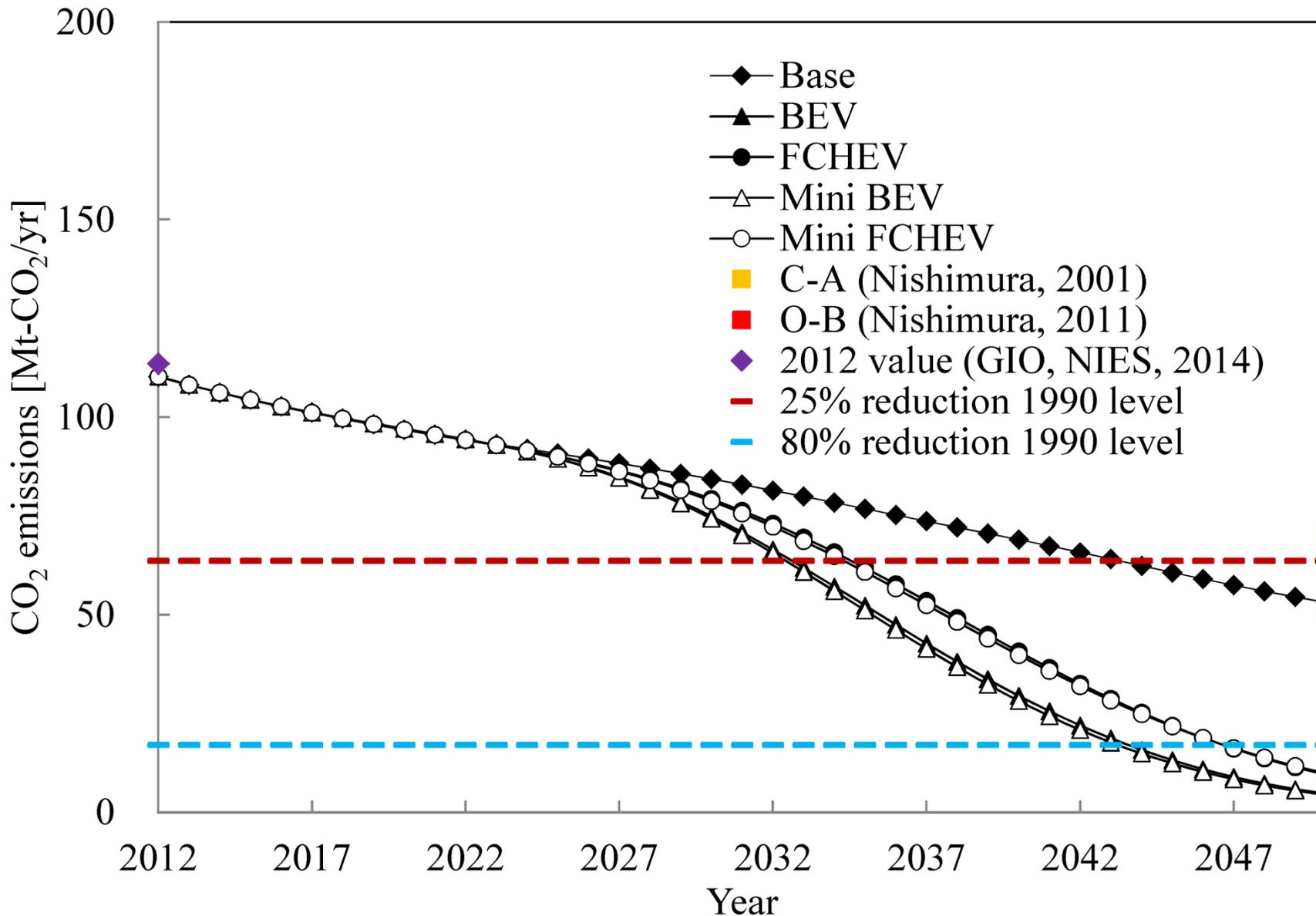
Baseシナリオを比較すると、バッテリー電気軽自動車の普及により、2050には67%のエネルギー消費量を削減できる

水素消費量



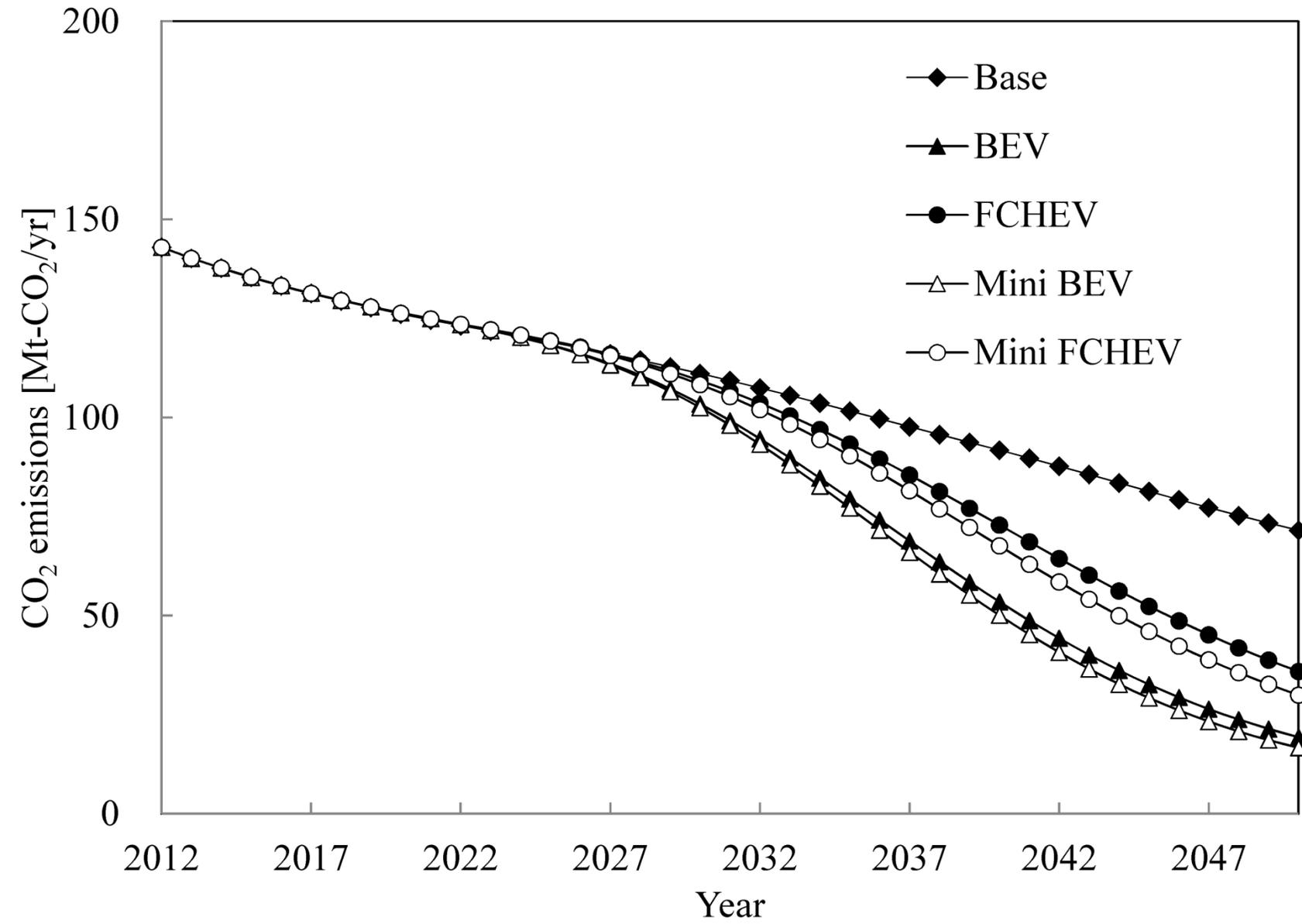
ダウンサイジング
を実現すると水素
消費量の27%を
削減する

タンク・トゥー・ホイールCO₂排出量



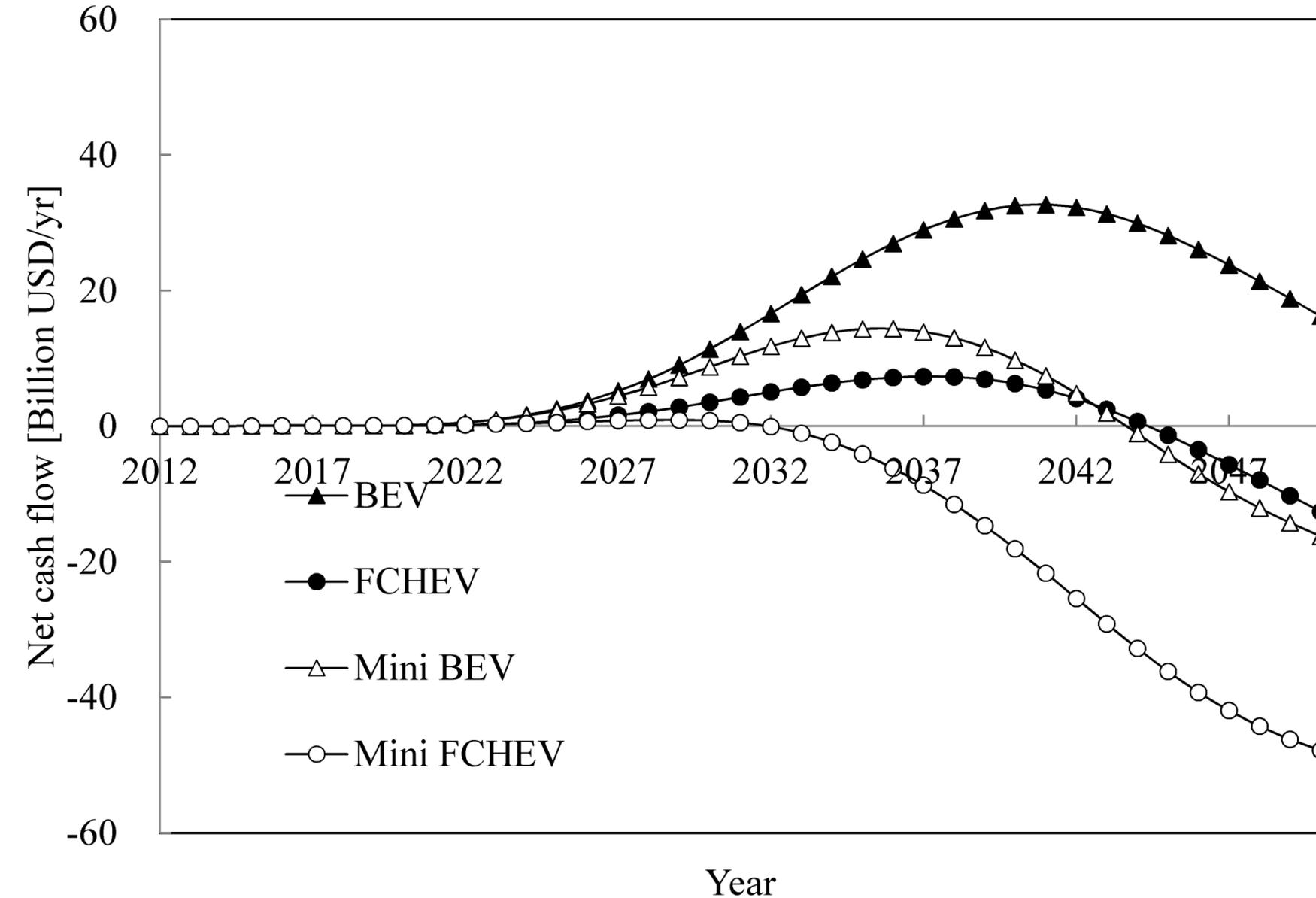
Baseシナリオを比較すると、バッテリー電気軽自動車の普及により、2050には92%のCO₂排出量を削減できる

ウェル・トゥー・ホイールCO₂排出量



Baseシナリオを比較すると、バッテリー電気軽自動車の普及により、2050には77%のCO₂排出量を削減できる

キャッシュフロー



ダウンサイジングを
実現するとキャッシュ
フローが減少していく

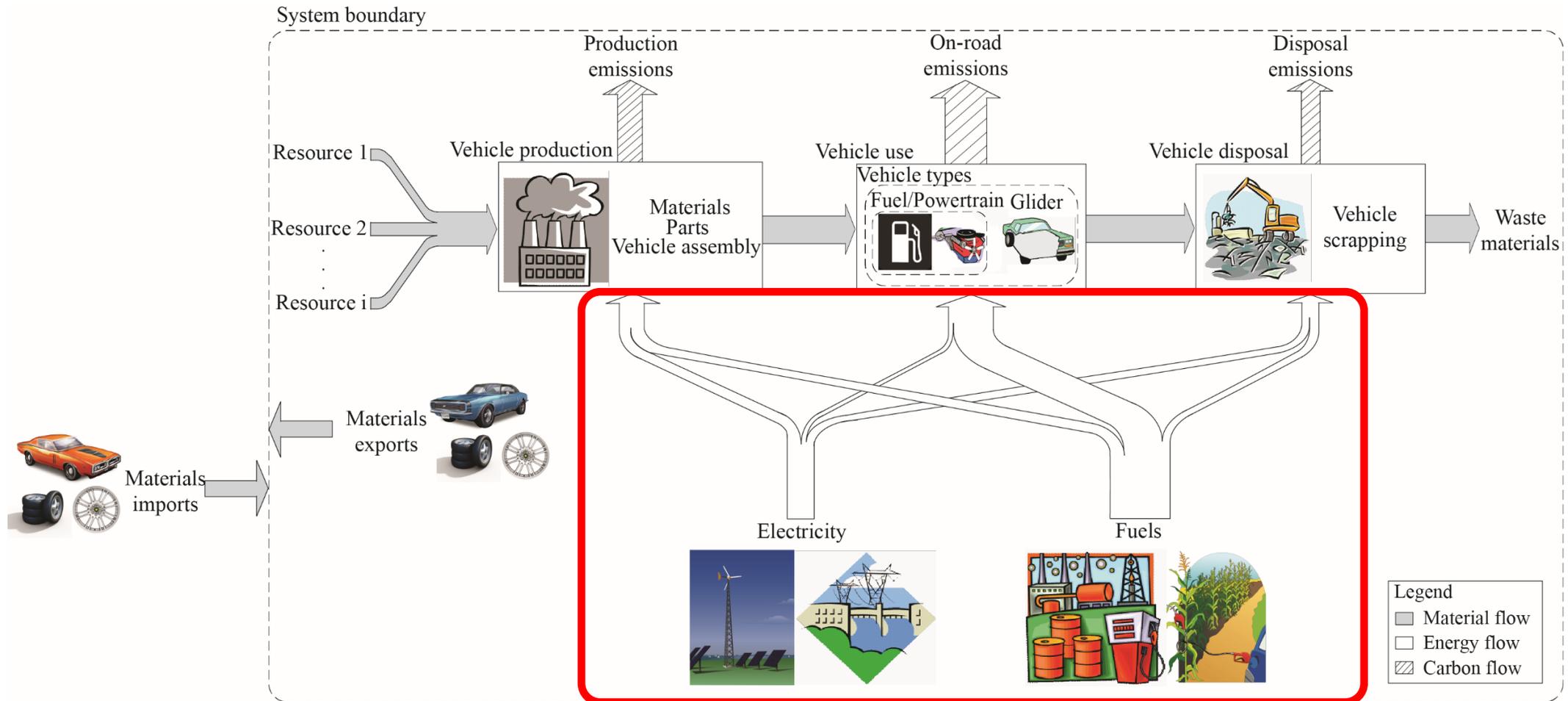
結言

- 2012年から2050年の間に、BaseシナリオでCO₂排出量が52%減少する。これらの結果の理由は自動車のエネルギー消費量の改善と乗用車保有台数の減少である。
- Baseシナリオを比較すると、バッテリー電気軽自動車及び燃料電池自動車の普及により、2050年にはそれぞれ77%、50%のCO₂排出量を削減できる。2050年のキャッシュフローはそれぞれ16.3 billion USD/year、-12.6 billion USD/yearになる。
- ダウンサイジングの影響で乗用車保有台数のコストおよびCO₂排出量は減少する。

4. 持続可能な水素生産システムの 設計

研究目的

- エネルギー消費量、CO₂排出量、水の使用量、コストを考慮した水素生産システムを設計する。



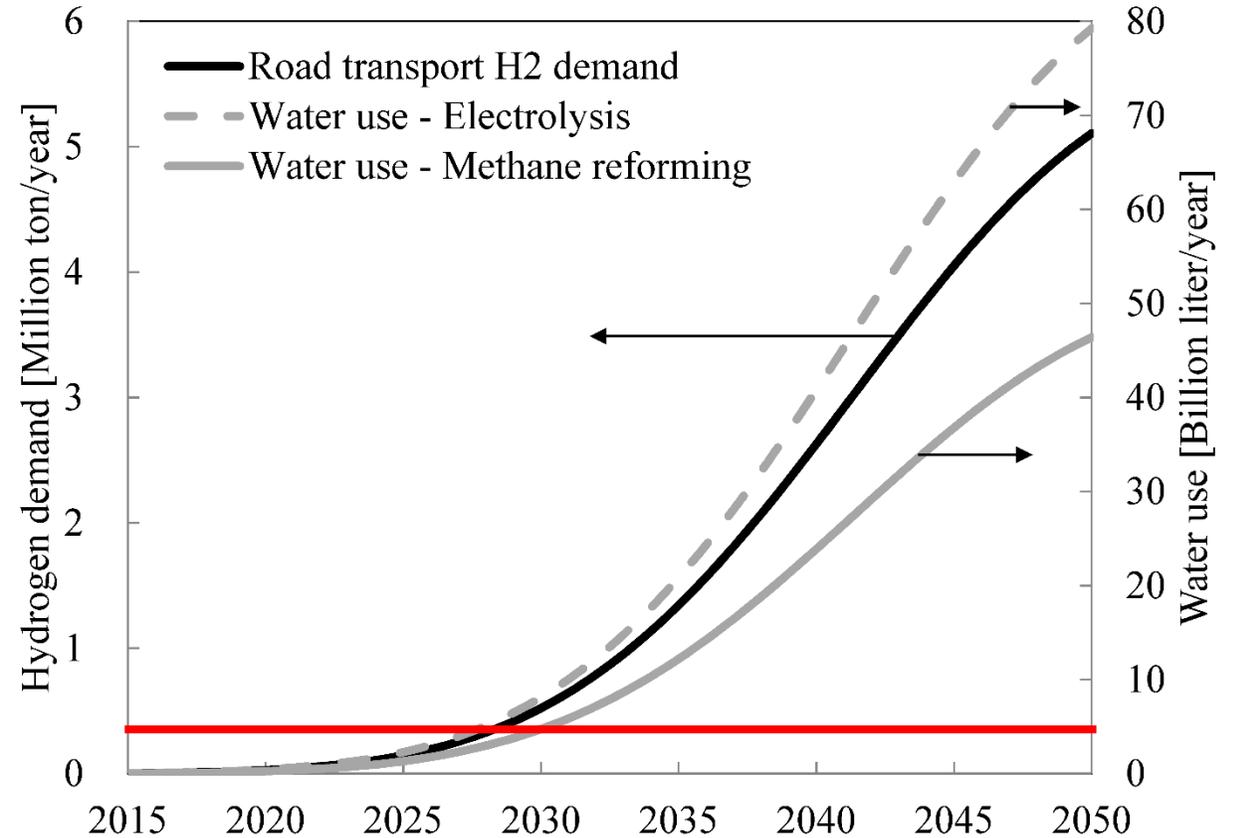
ケーススタディー



Source: <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>

2030年の水素生産量が30万t-
H₂/yearを目標とされている

Source: Ministry of Economy, Trade and Industry Japan, 2017, Basic Hydrogen Strategy.



道路交通部門に関する水素の需要

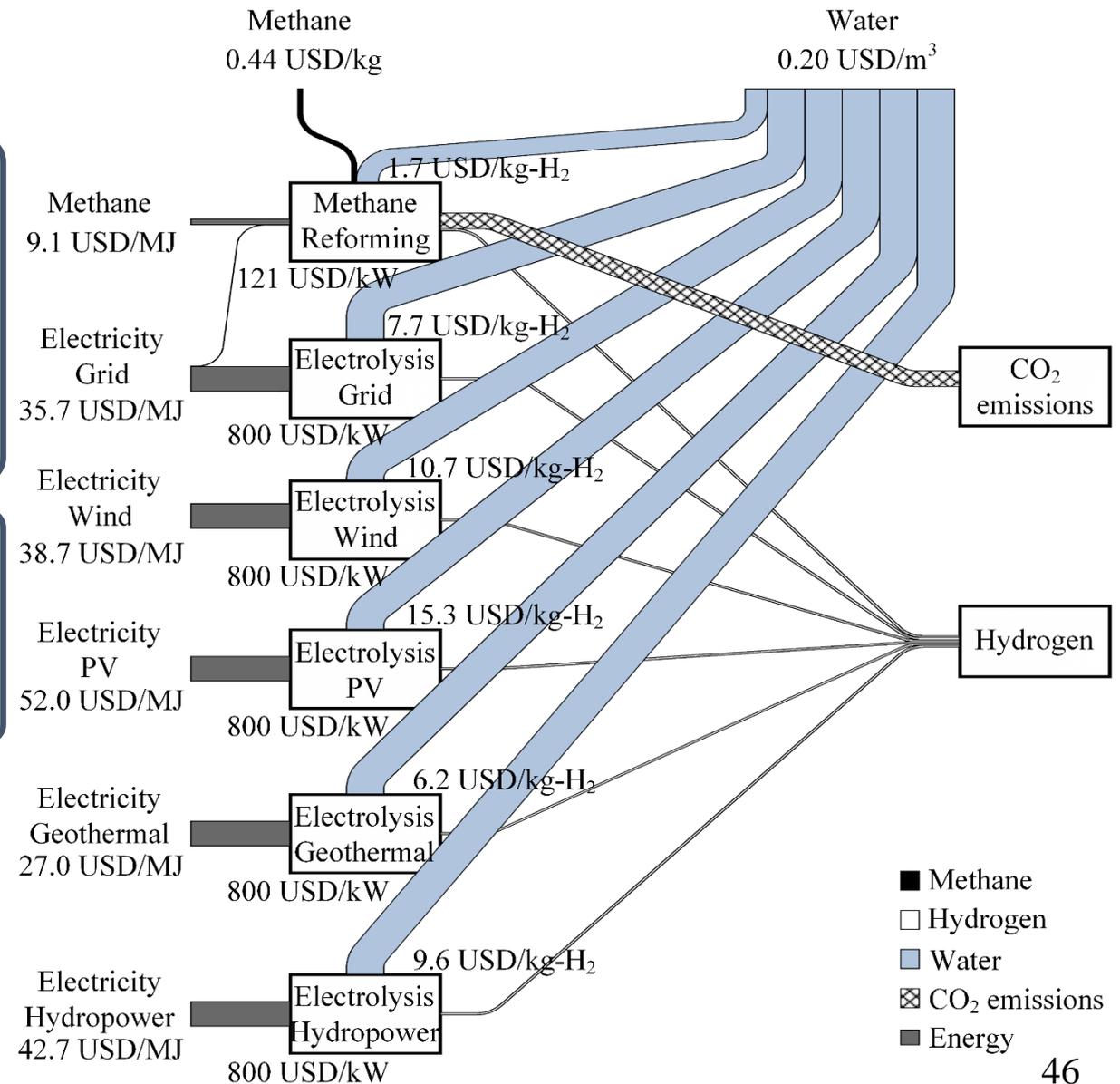
Source: González Palencia et al., 2016, Applied Energy, Vol. 181, pp. 96-109; González Palencia et al., 2020, Energies, Vol. 13 (10), paper No 2459.

1kg水素を生産するためのエネルギー消費量、CO₂排出量、水の使用量、コスト

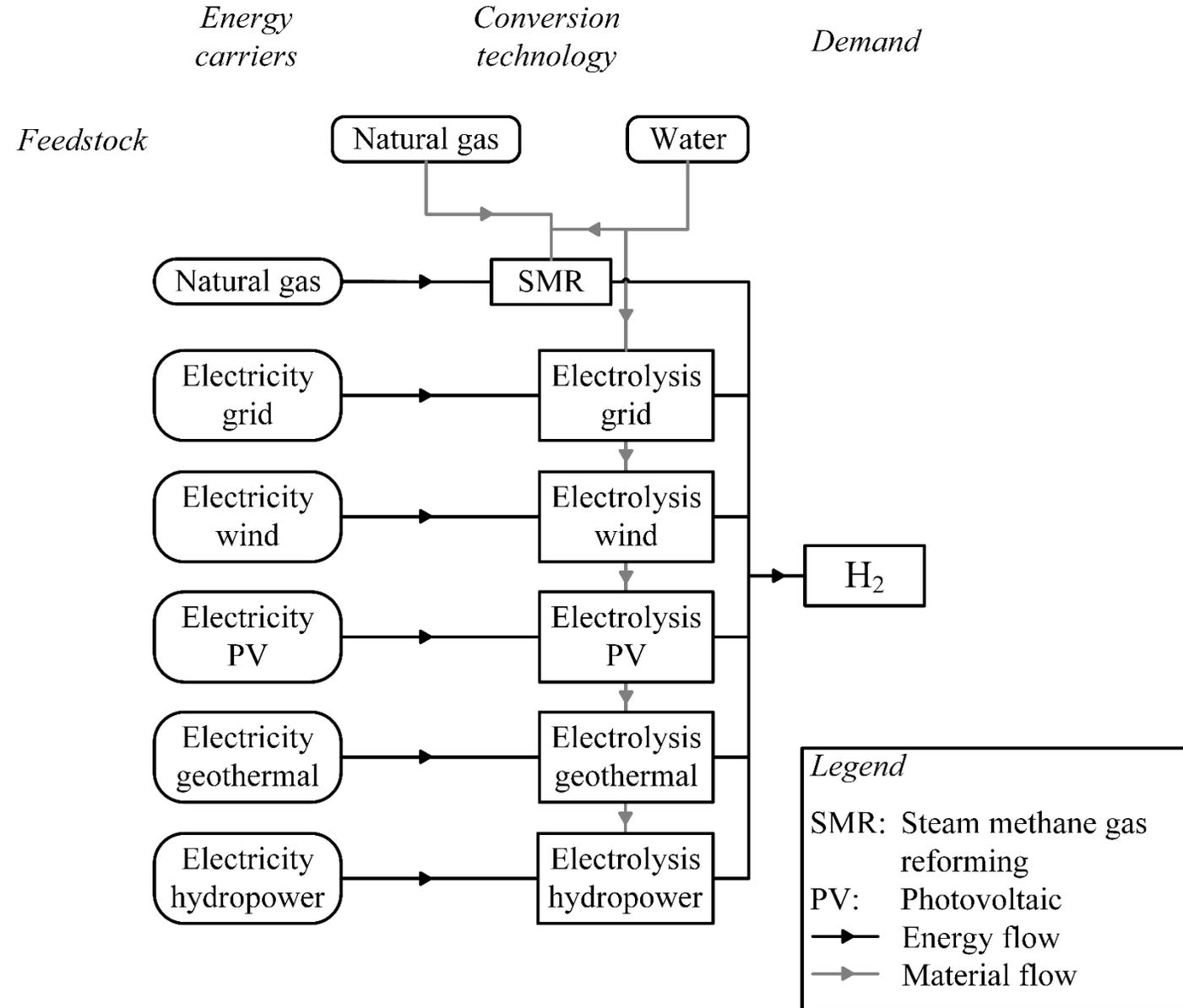
水素生産において、メタン改質から電気分解へシフトするとエネルギー消費量、水の使用量、コストが増大していく

今までの研究ではWater-Energy-Carbon (WEC) nexusが考慮されていない

Source: Elgowainy et al., 2016, Life-Cycle Analysis of Water Consumption for Hydrogen Production, 25p; Ruth et al., 2009, Technical Report NREL/TP-6A1-46612; Jaber et al., 2010, J. Hydrog. Energy, 35, pp.8569-79; Parkinson et al., 2018, J. Hydrog. Energy, 43, pp. 2540-55; Wakeel et al., 2016, Appl. Energy, 178, pp. 868-85; METI, 2019, FY2017 Energy Supply and Demand Report; EDMC, IEEJ, EDMC Handbook of energy & economic statistics 2019; Nikolaidis and Poullikkas, 2017, Renew. Sust. Energ. Rev., 67, pp. 597-611; Samsatli and Samsatli, 2018, Appl. Energy, 220, pp. 893-920; Spang et al., 2014, Environ. Res. Lett., 9, 105002 14p.



エネルギーシステムの概略図



水素生産システムのモデルー目的関数

Overall score

$$Z = \sum_j \sum_c \alpha_j S_{j,c} w_c \quad \text{Eq. (1)}$$

Where:

$$\alpha_j = \frac{H_{2,j}}{Dmd} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$S_{j,c} = \frac{Maximum_c - Attribute_{j,c}}{Maximum_c - Minimum_c} \quad \text{Eq. (3)}$$

α : Share hydrogen production

c : Category for evaluation

Dmd : Hydrogen demand

j : Hydrogen production technology

H_2 : Amount of hydrogen produced

$Maximum$: Maximum value for each attribute

$Minimum$: Minimum value for each attribute

S : Score

w : Weighting coefficient

Z : Overall score

水素生産システムのモデルー制約

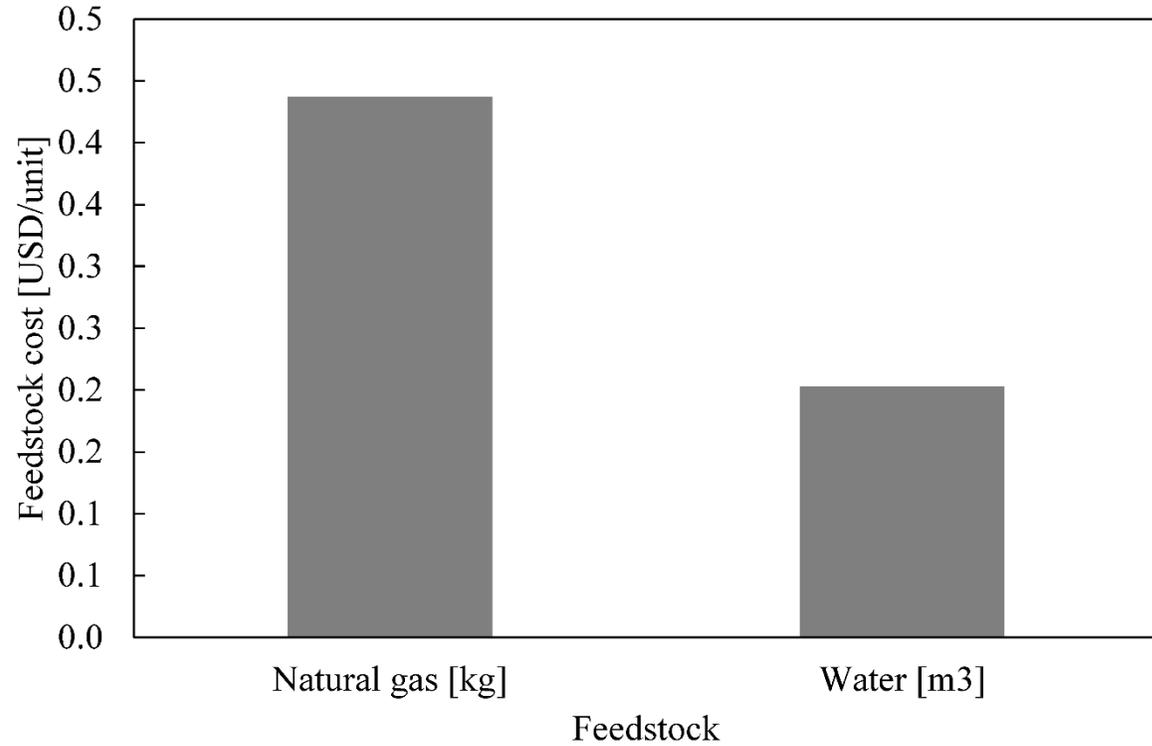
1. 水素生産量 \geq 水素の需要
2. 原料の使用量 \leq 利用可能な原料
3. エネルギー消費量 \leq 利用可能なエネルギー資源
4. $\alpha_j \geq 0$
5. 1kg水素当たりCO₂排出量 \leq 最大CO₂排出強度

シナリオ

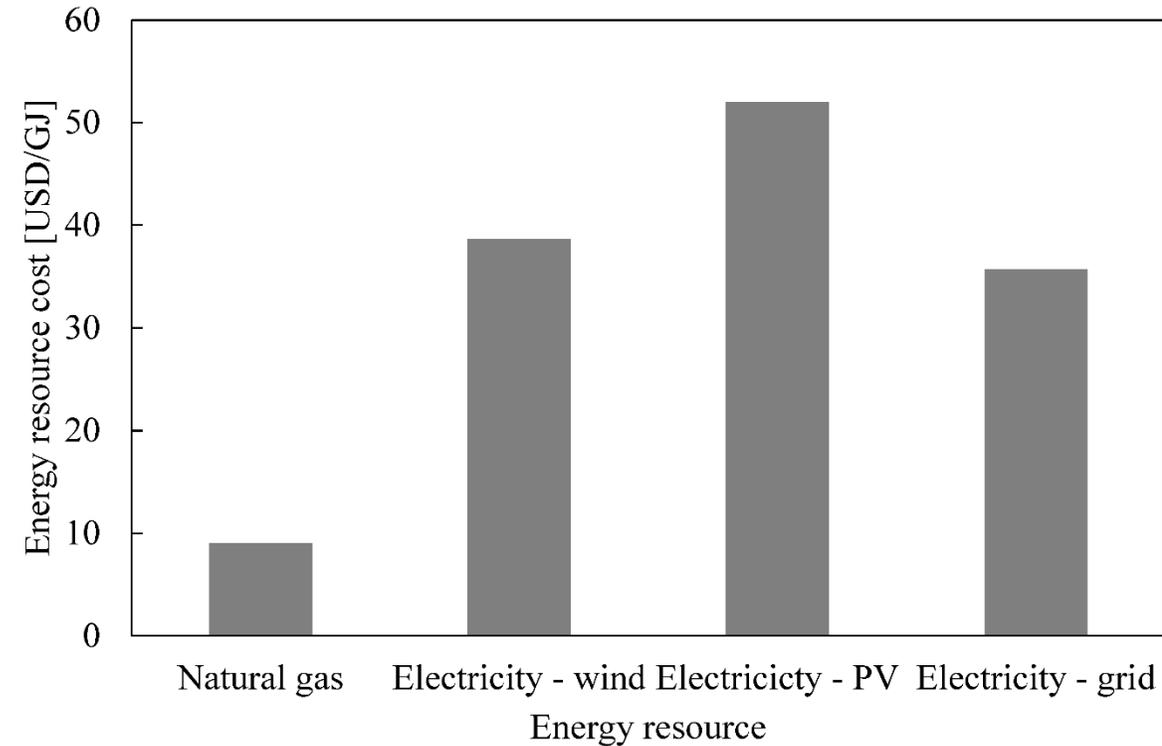
Scenarios	Priority			
	Cost	Energy	Water	CO ₂
Low Cost (LC)	✓			
Low Energy Use (LEU)		✓		
Water-Energy-Carbon (WEC)		✓	✓	✓
Water-Energy-Carbon and cost (WECC)	✓	✓	✓	✓

- Linear Programming static optimization model.
- National-scale.
- Model developed in GAMS (General Algebraic Modeling System).
- Model solved using CPLEX.

入力データー原料、エネルギー資源コスト



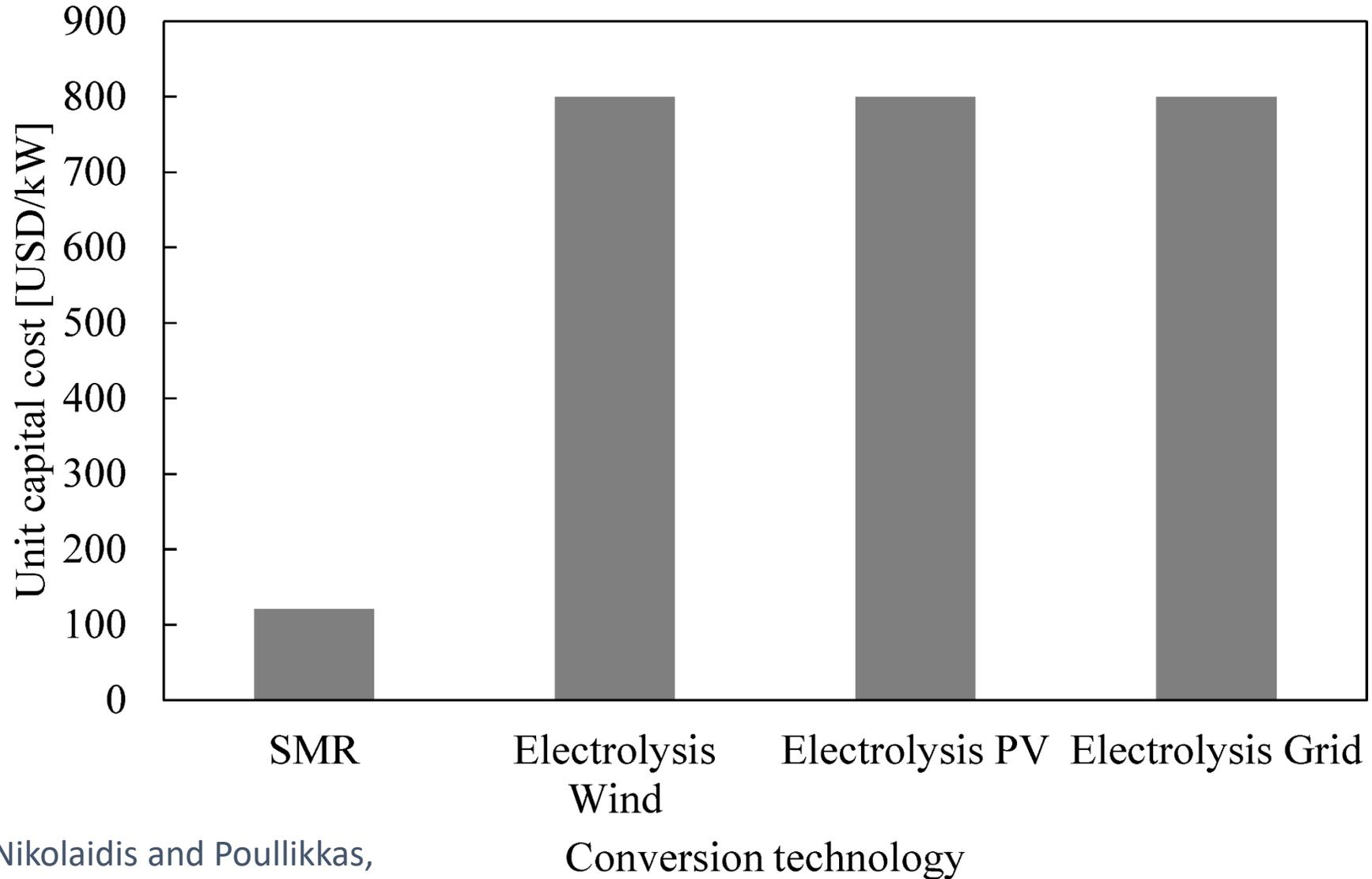
原料



エネルギー資源

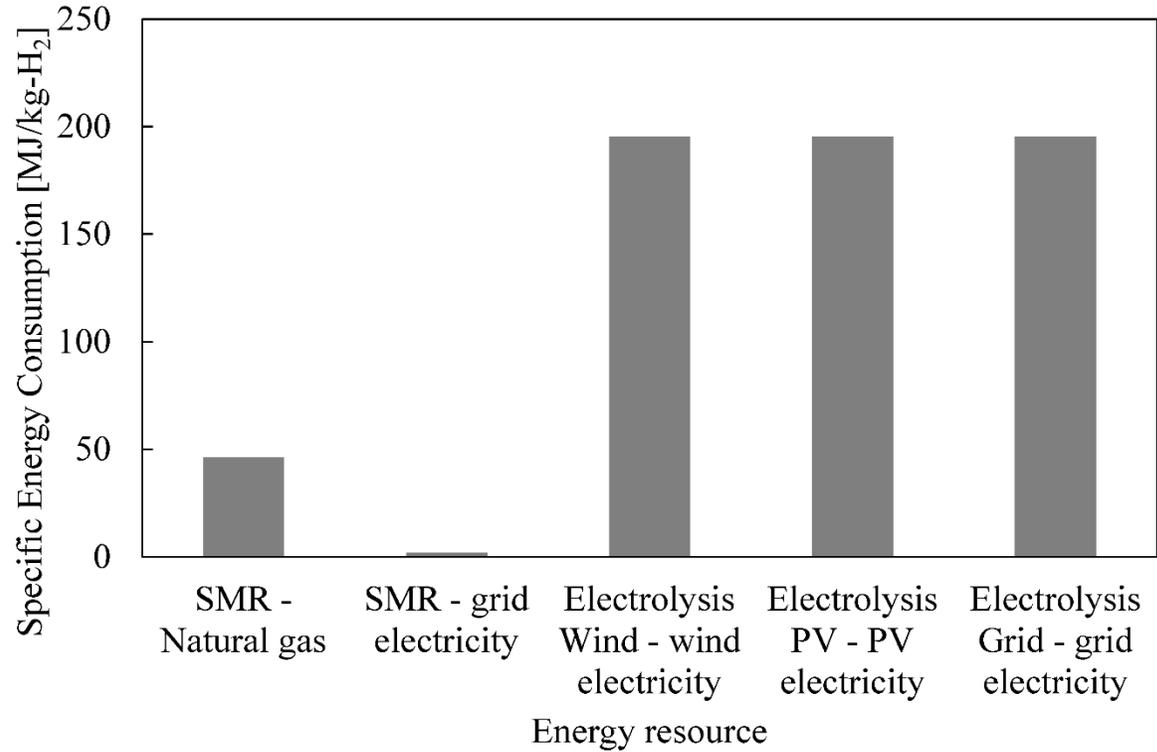
Using data from (EDMC, 2019) and (METI, 2013)

入力データー資本コスト

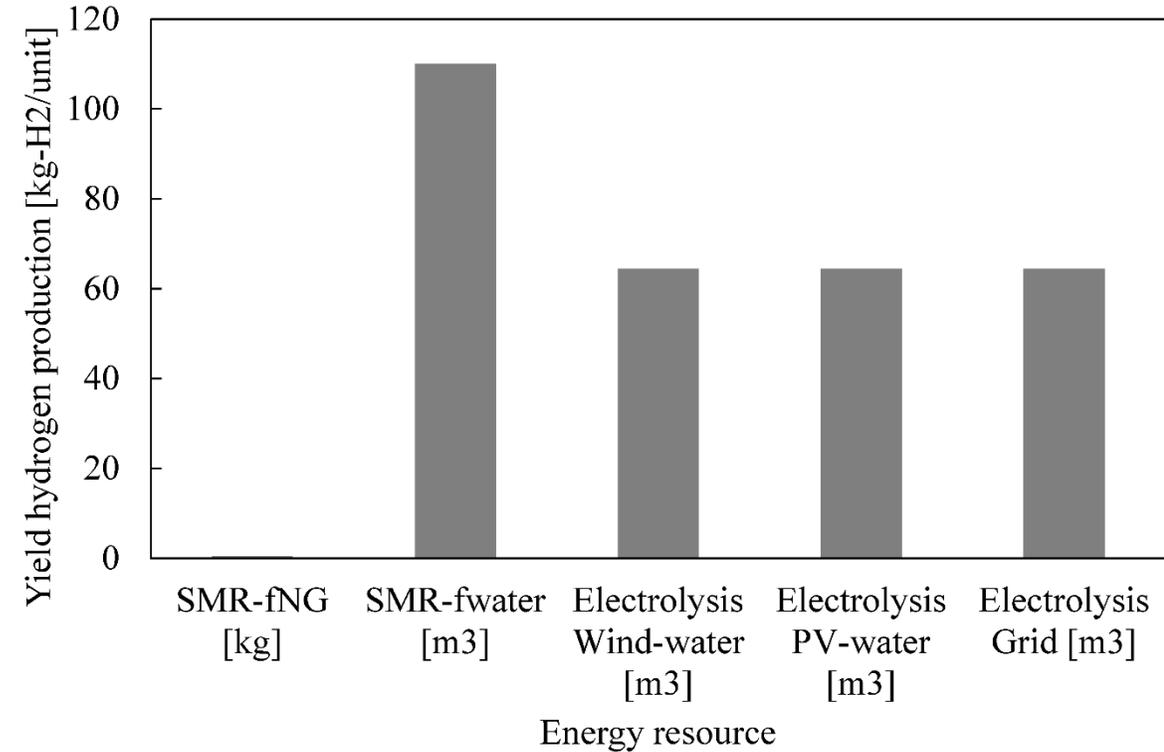


Using data from (Nikolaidis and Poullikkas, 2017) and (Parkinson et al., 2018)

入カデーター水素1kg当たりエネルギー消費量、資源の使用量



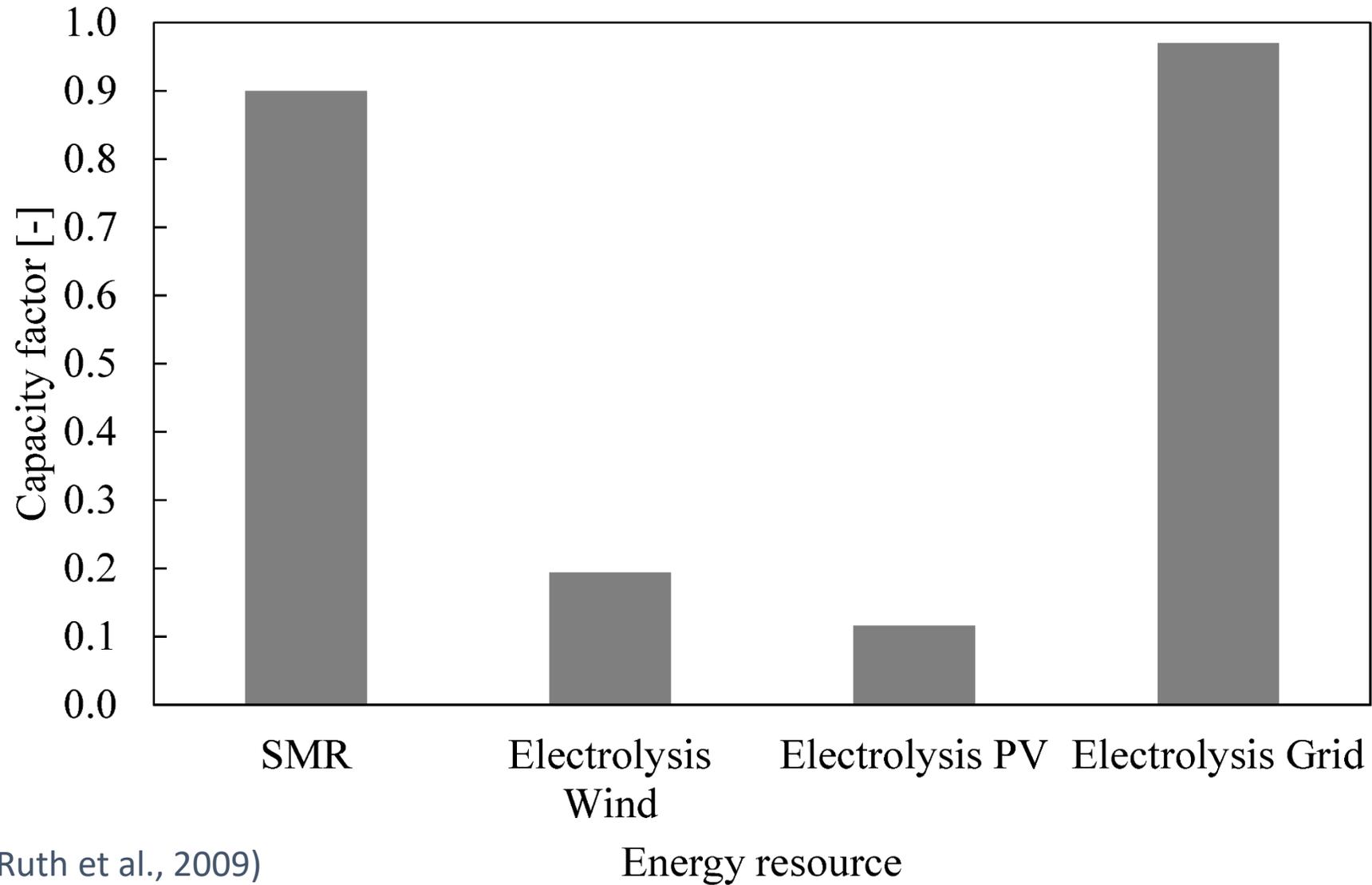
エネルギー消費量



資源の使用量

Using data from (Jaber et al, 2010), (Ruth et al., 2009) and (Parkinson et al., 2018)

入力データー設備利用率



入力データー利用可能な資源

原料

Availability

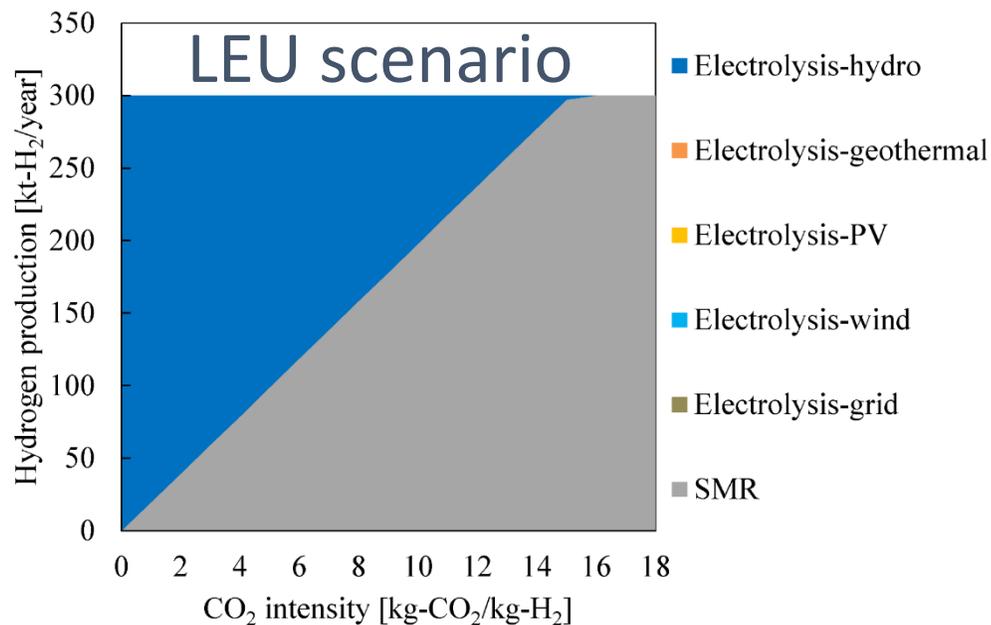
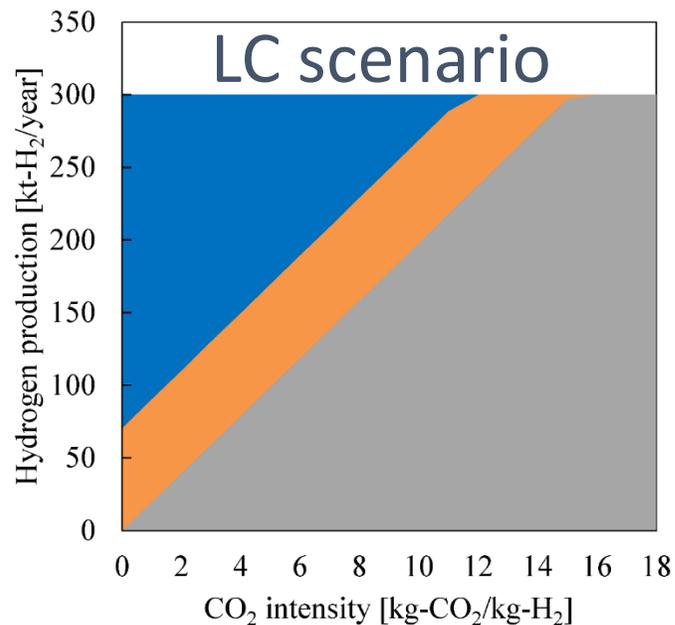
Natural gas [Mt/year]	2.29
Water [billion m ³ /year]	1.11

エネルギー資源

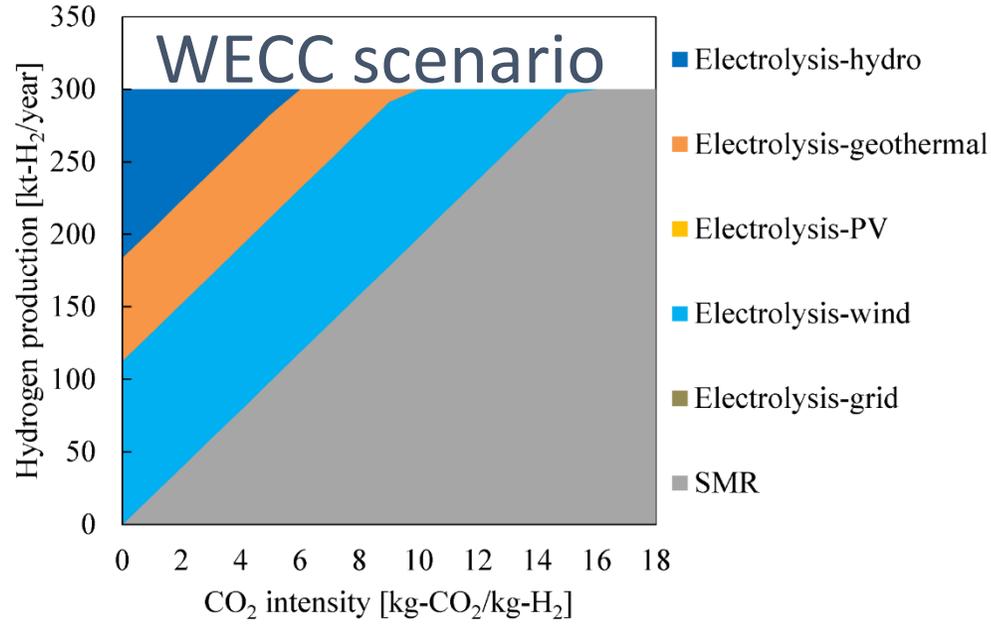
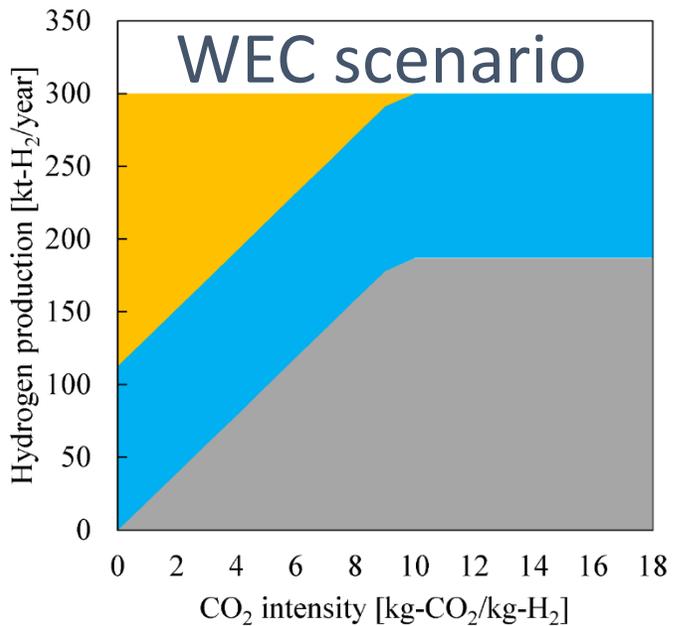
	Availability [PJ]	Energy use [MJ/MJ]	Feedstock use [unit/MJ]	
			Water [L]	Natural gas [kg]
Natural gas	110	0.066	0.004	0.0012
Wind electricity	22.1	1.857	0	0
PV electricity	132	6.042	0.006	0
Geothermal electricity	13.9	7.333	0.487	0
Hydroelectricity	420	0.294	4.267	0
Grid electricity	1444	1.530	0.632	0

Source: Elgowainy et al., 2016, Life-Cycle Analysis of Water Consumption for Hydrogen Production, 25p; Ruth et al., 2009, Technical Report NREL/TP-6A1-46612; Jaber et al., 2010, J. Hydrog. Energy, 35, pp.8569-79; Parkinson et al., 2018, J. Hydrog. Energy, 43, pp. 2540-55; Wakeel et al., 2016, Appl. Energy, 178, pp. 868-85; METI, 2019, Annual Energy Report 2018; Spang et al., 2014, Environ. Res. Lett., 9, 105002 14p; MLIT, 2018, Utilization of Water Resources, 4p; NEDO, 2013, Renew. Energy Technol. White Pap.; Lee et al., 2016, Water Consumption Factors for Electricity Generation in the United States, 28p; METI, 2019, Japan's Energy 2018; 10 Questions for Understanding the Current Energy Situation, 19p.

水素生産システムの設計

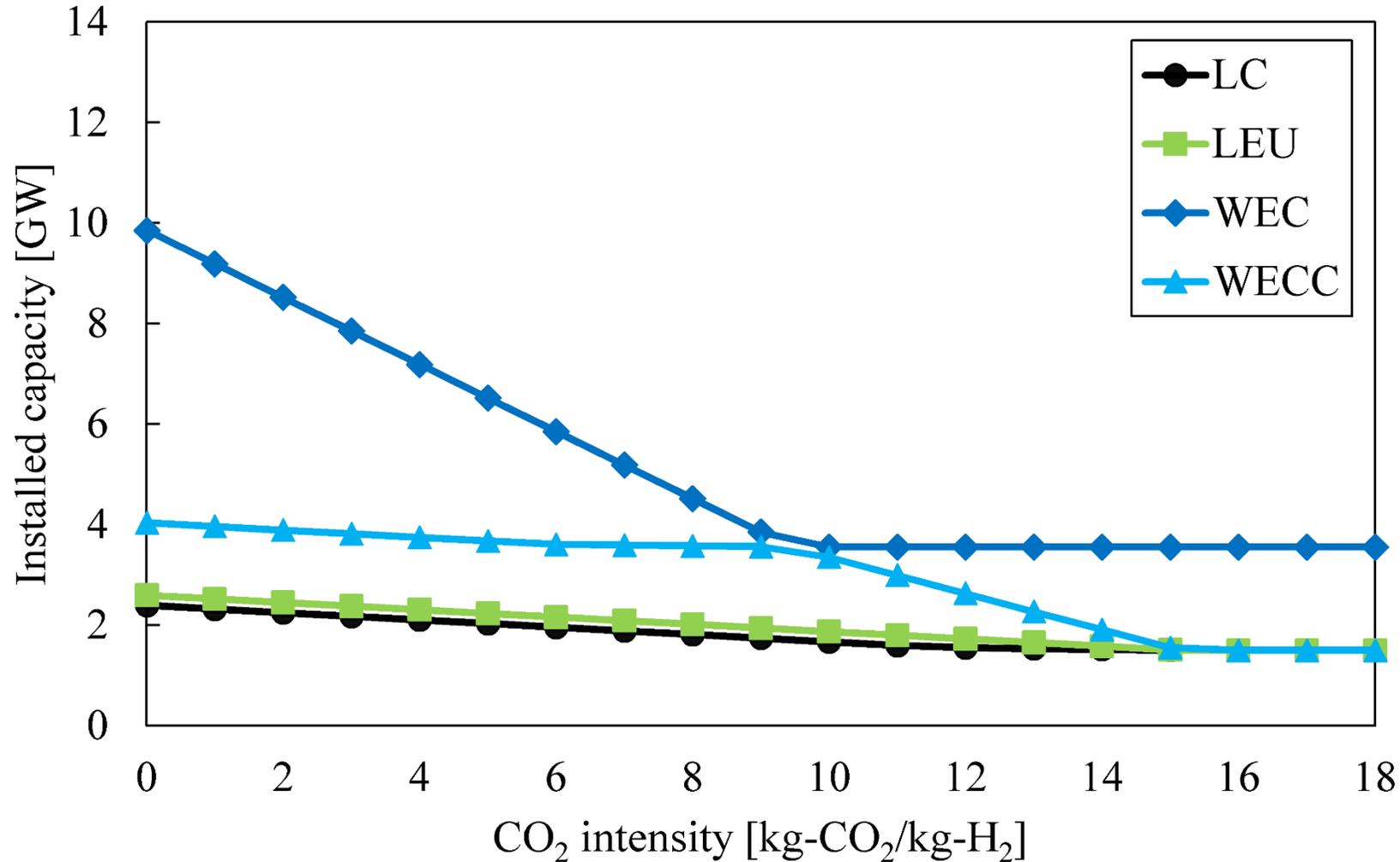


SMR ≥ 50% 水素生産量 if CO₂ intensity ≥ 8 kg-CO₂/kg-H₂.



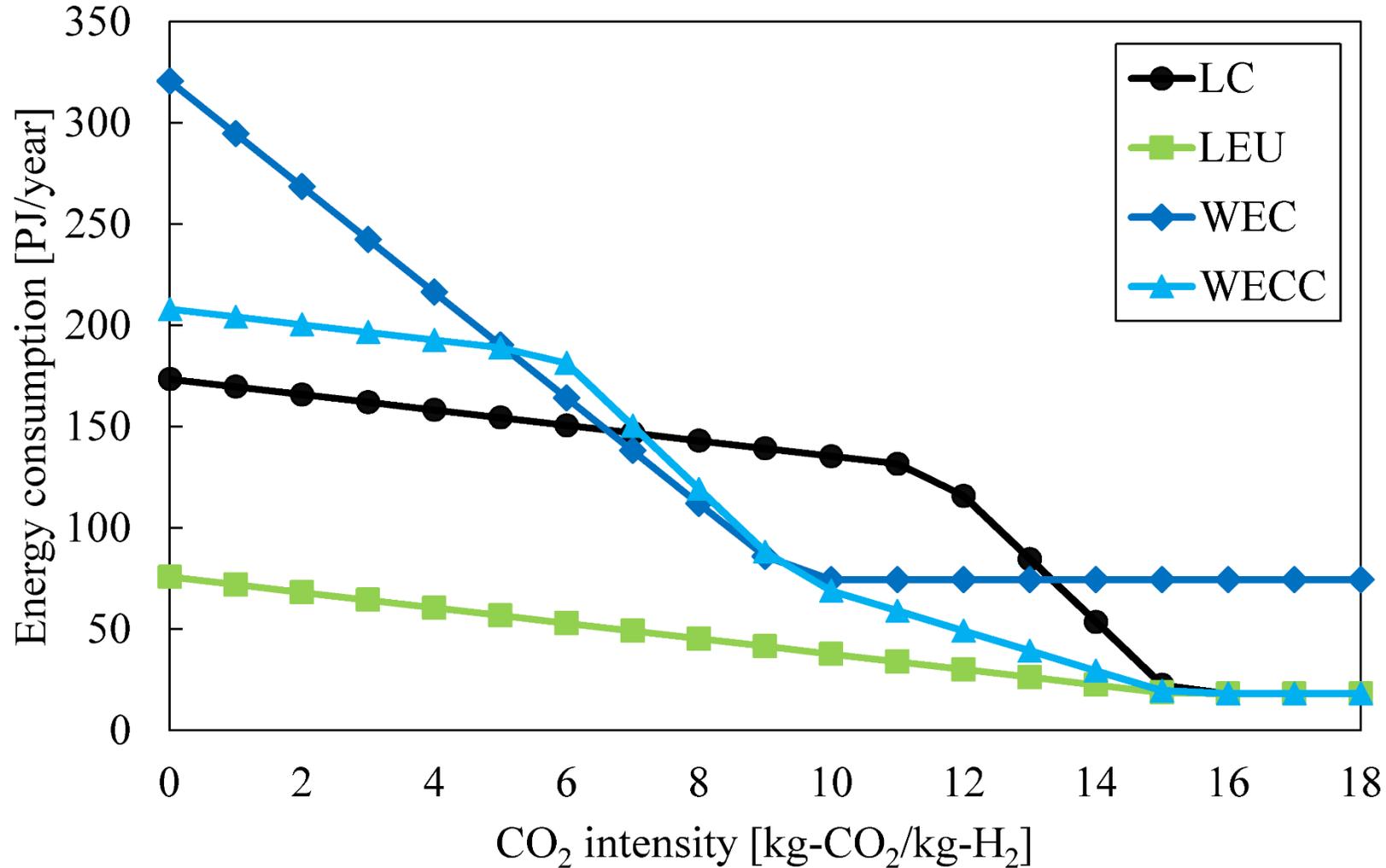
グリッド電気をを用いた電気分解が選択されていない

水素生産システムのパワー



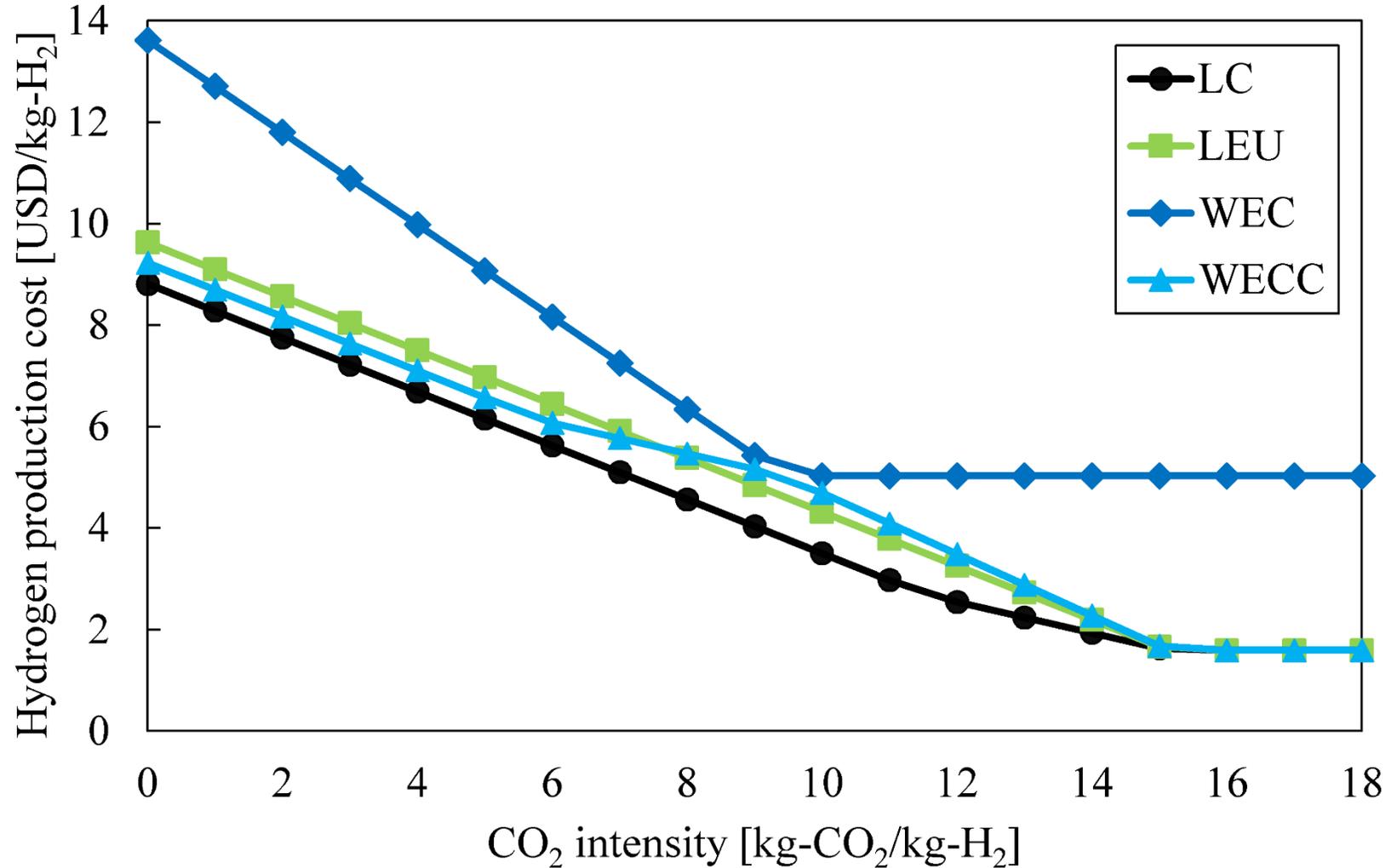
太陽光発電、風力発電の設備利用率は低いため、水の使用量を考慮すると水素生産システムのパワーが増大していく

エネルギー消費量



電気分解のエネルギー消費量はメタン改質のエネルギー消費量より大きいいため、水の使用量を考慮すると水素生産システムのエネルギー消費量が増大していく

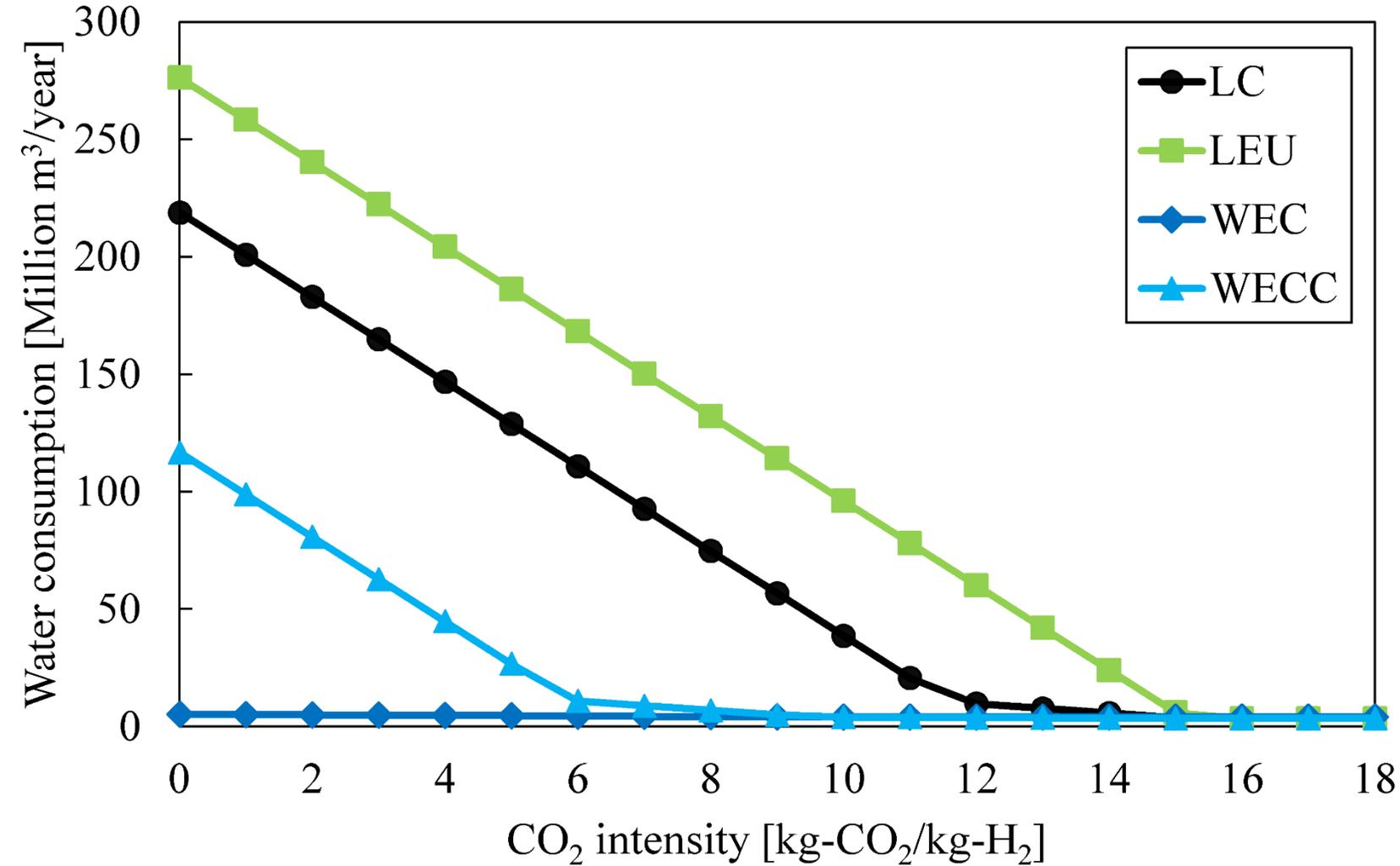
水素生産コスト



水素生産コストの最小値は1.6 USD/kg-H₂ (CO₂ intensity of 18 kg-CO₂/kg-H₂)

ゼロエミッションの水素生産コストは9.2 と13.6 USD/kg-H₂となる

水の使用量



水素1kgのCO₂排出量が減少すると水の使用量が増大していく

エネルギー資源の生産が最も大きな水の使用量の割合となる

結言

- 水素1kgあたりのCO₂排出量が8 kg-CO₂/kg-H₂ 以下の場合は、全てのシナリオで水素生産量の50%以上がメタン改質で生産される
- 水素生産コストの最小値は1.6 USD/kg-H₂ となる。ゼロエミッションの水素生産コストは9.2と13.6 USD/kg-H₂となる
- エネルギー消費量、CO₂排出量、水の使用量、コストが高いため、グリッド電気をを用いた電気分解はモデルによって選択されない

ご清聴ありがとうございました!

Contact: gonzalez@gunma-u.ac.jp