

2024年8月9日

# 2050年カーボンニュートラルに向けた 我が国のエネルギー需要展望

(公財)地球環境産業技術研究機構(RITE)

システム研究グループ

秋元 圭吾、佐野 史典、本間 隆嗣



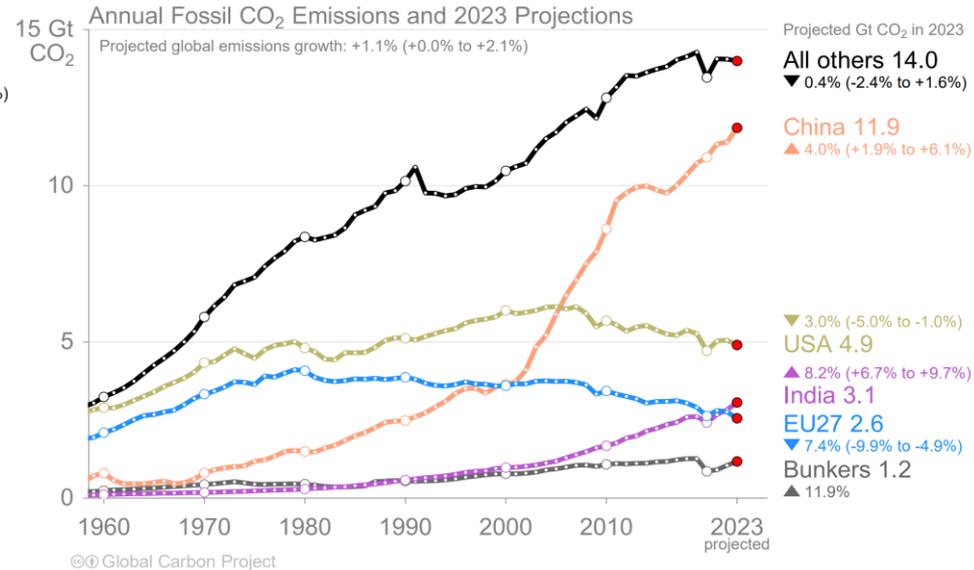
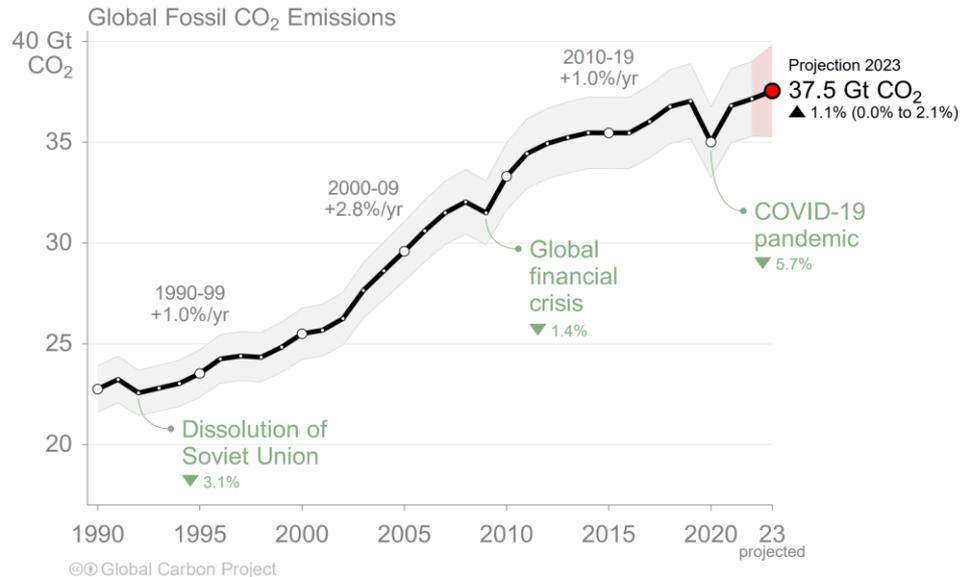
# 目次

1. エネルギー需要・電力需要の所得・価格弾性値
2. エネルギー需要の決定要因とシナリオ想定
3. エネルギー需要量推計
4. まとめ

# 1. エネルギー需要・電力需要の 所得・価格弾性値



# 世界・主要国のCO2排出量の推移



出典) Global Carbon Project, 2023

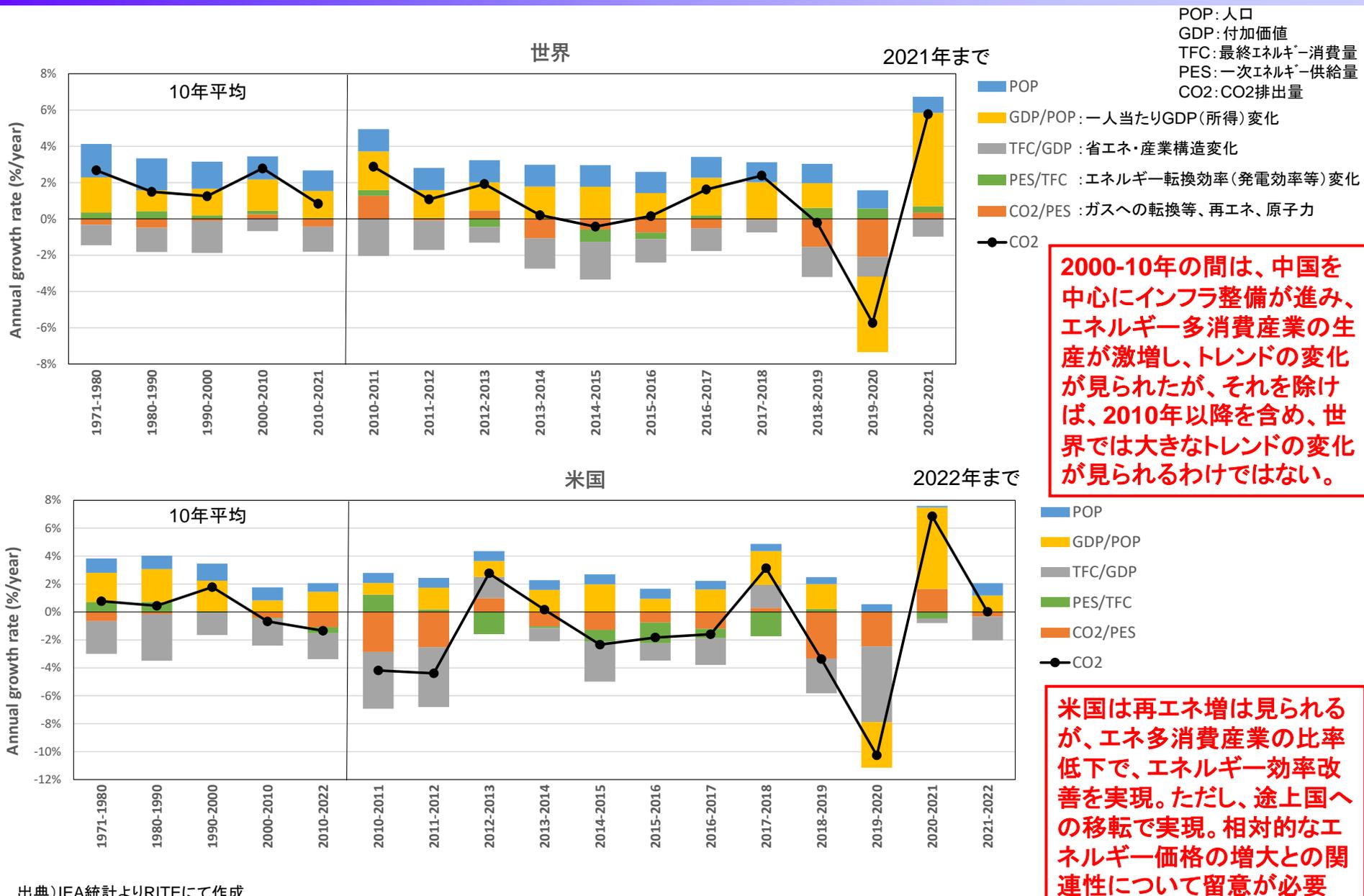
- 世界全体では、経済とCO2排出量のカップリングは続いている。CO2排出が大きく減少したときは、経済(GDP、所得)も悪化している状態。世界の排出量を簡単に減らせる状況にはない。
- EU、米国、日本は、国内排出量としては、継続的に低減が続いている。
- 先進国から、途上国へ、とりわけCO2原単位の高い製造業の移転が起こっている。

## 日本のGHG排出量

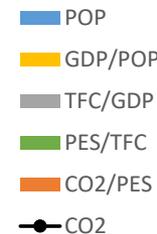
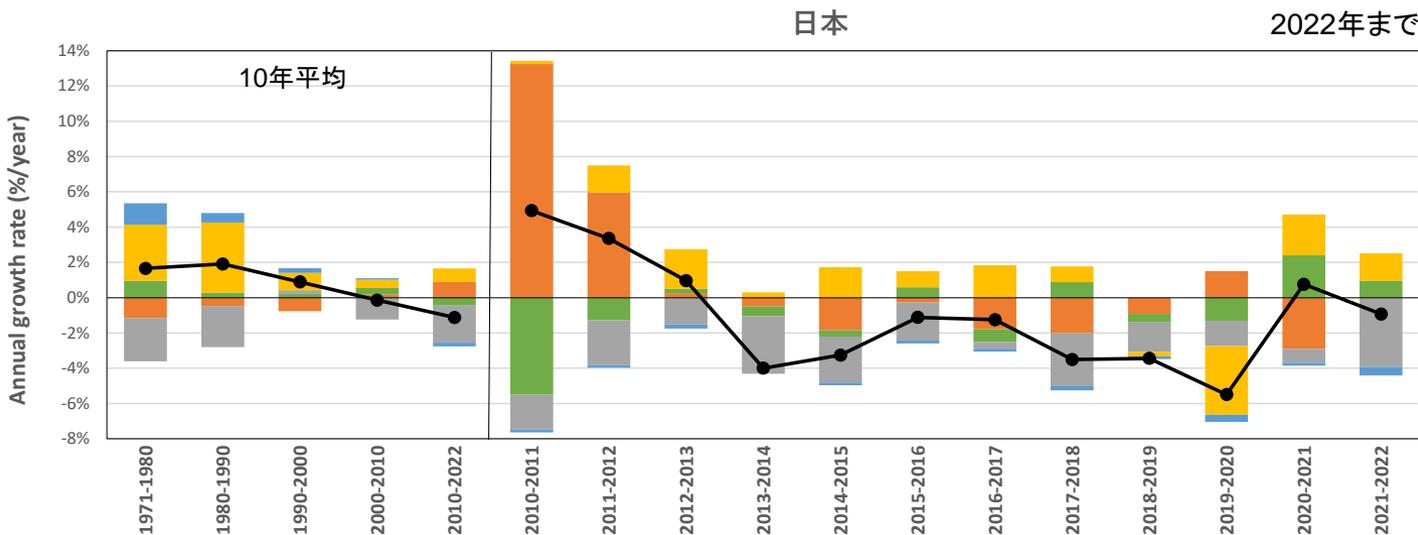


出典) 環境省, 2023

# CO<sub>2</sub>排出量の要因分解：世界、米国

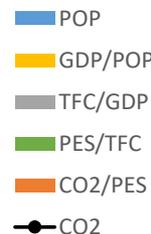
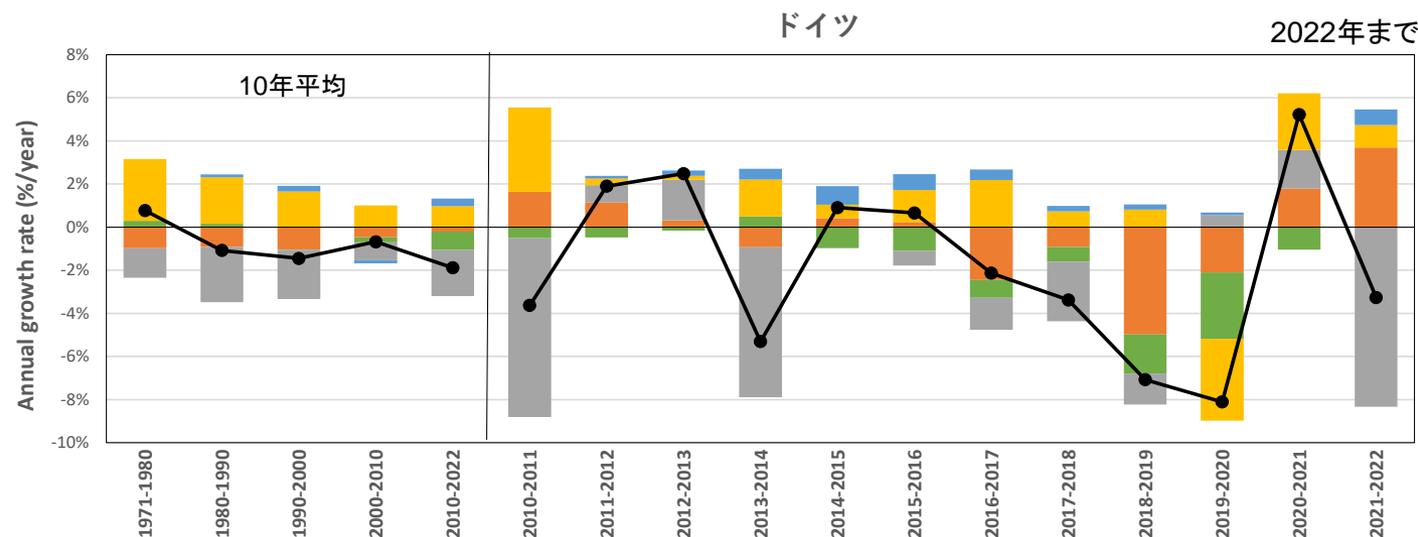


# CO<sub>2</sub>排出量の要因分解：日本、ドイツ



注)例えば、2020-21年にPES/TFCが悪化して見えているのは、IEA統計で、原子力は33%固定値で一次エネルギー換算しており、原子力の再稼働による削減効果(CO<sub>2</sub>/PES)が大きく出ていることと相まっていることに留意

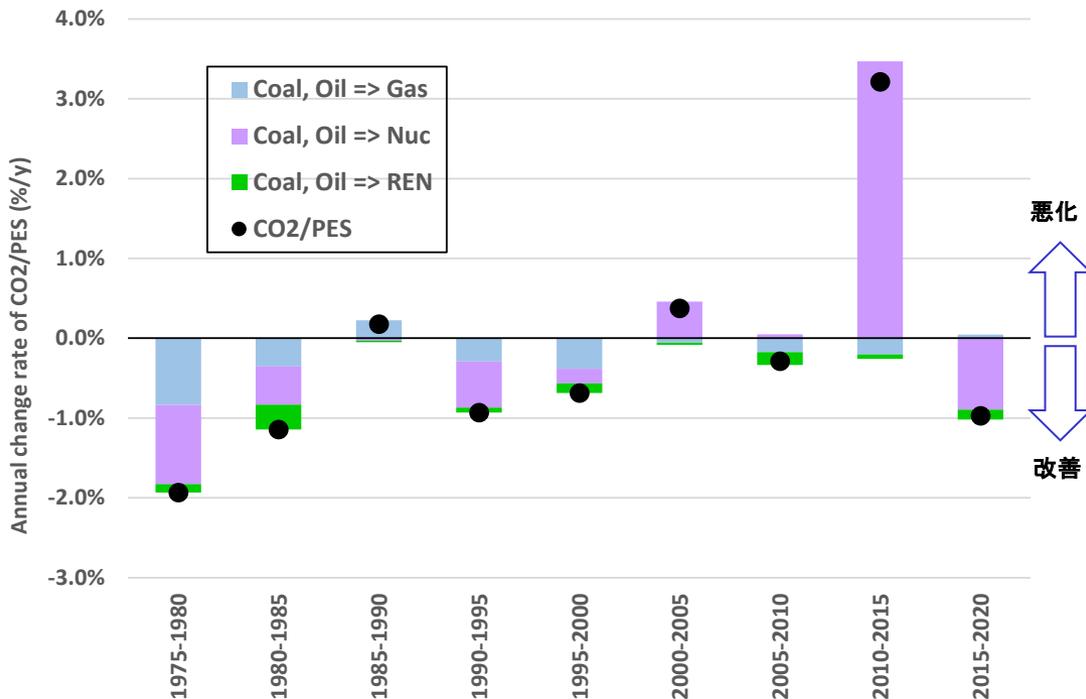
2010-21年の間では、再エネ普及はなされてきたものの、まだ震災後の原発停止による原単位悪化を取り戻せていない。エネ原単位改善によってCO<sub>2</sub>減は実現しているものの…。



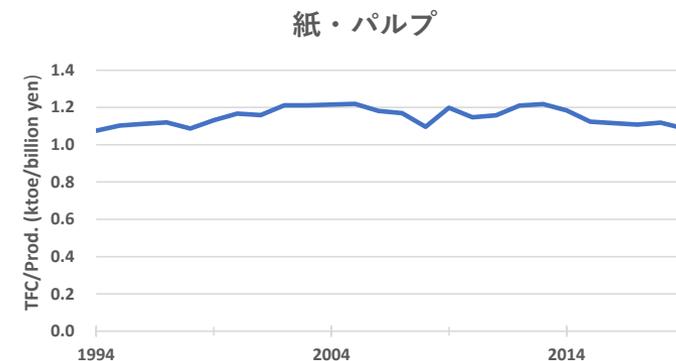
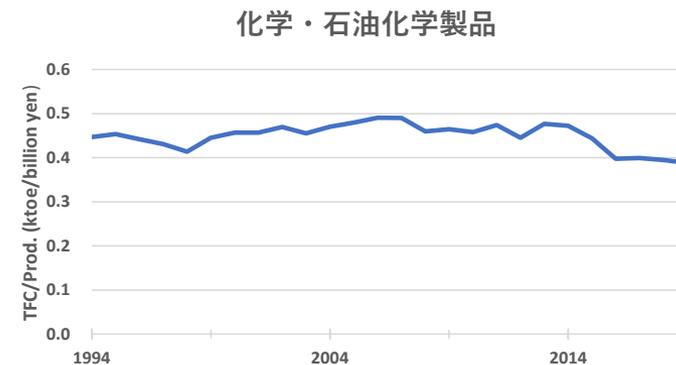
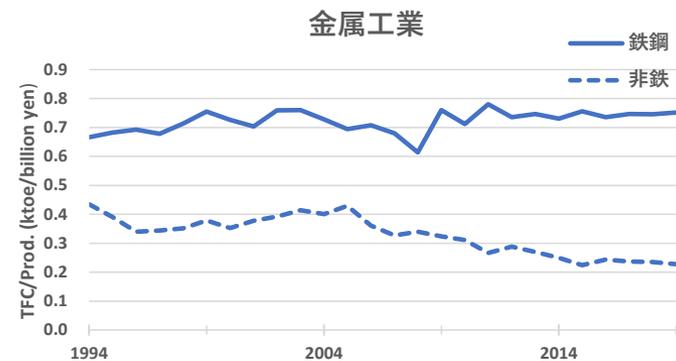
近年、再エネ拡大による排出削減効果(CO<sub>2</sub>/PESの内数)は大きいものの、10年間の期間平均で見ると、エネ原単位改善効果がもっとも大きい。以前は東独統合効果、近年はエネ多消費産業の生産量低減

# CO<sub>2</sub>排出量の要因：日本の動向

## CO<sub>2</sub>/PES変化における要因の寄与度

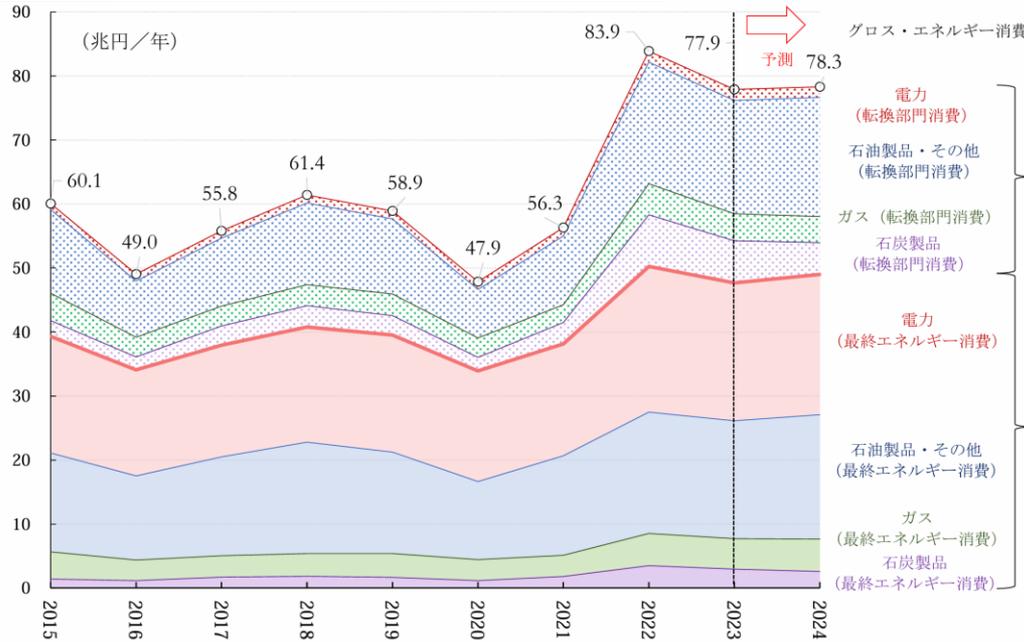


## 製造業の主な産業のTFC/Production



- 主要エネルギー多消費産業別ではエネルギー効率改善はあまり進んでおらず、マクロでのエネルギー効率改善は、エネルギー多消費産業の生産量低下が主要因と見られる。
- CO<sub>2</sub>原単位の改善は原子力再稼働の影響が大

# 日本のエネルギーコスト・価格変化

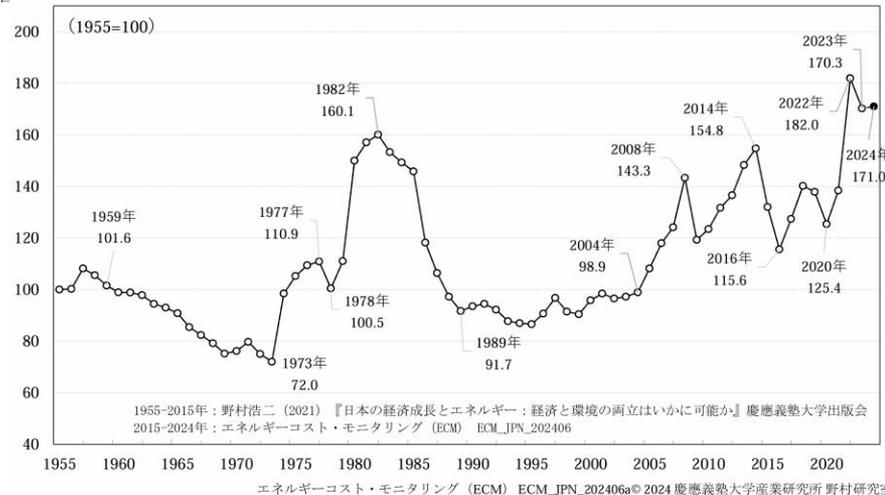


## グロス・エネルギー消費コスト

エネルギーコスト・モニタリング (ECM) ECM\_JPN\_202406a © 2024 慶應義塾大学産業研究所 野村研究室

単位: 兆円。注: 観測期間は 2015 年-2023 年。2024 年値は 2024 年 5 月実績値 (ECM 推計) までを反映した年次予測値

## 実質エネルギー価格



エネルギーコスト・モニタリング (ECM) ECM\_JPN\_202406a © 2024 慶應義塾大学産業研究所 野村研究室

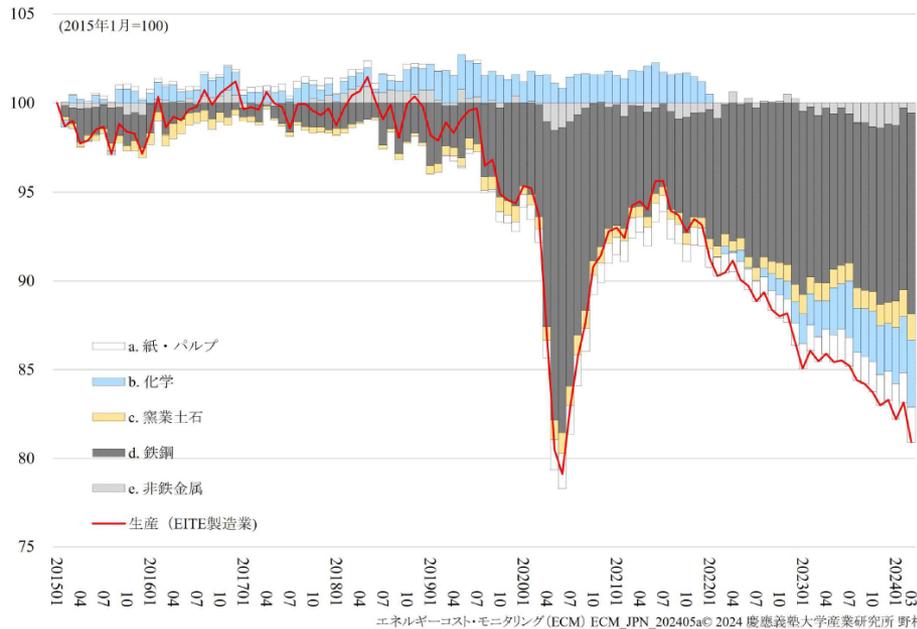
出典) 野村浩二 他(2024)

単位: 1955 暦年平均=100。注: 観測期間は 1955 年-2023 年。「燃料油価格激変緩和対策事業」・「電気・ガス価格激変緩和対策事業」による補助後 (推計値)。2024 年値は 2024 年 5 月実績値 (ECM 推計) までを反映した年次予測値。

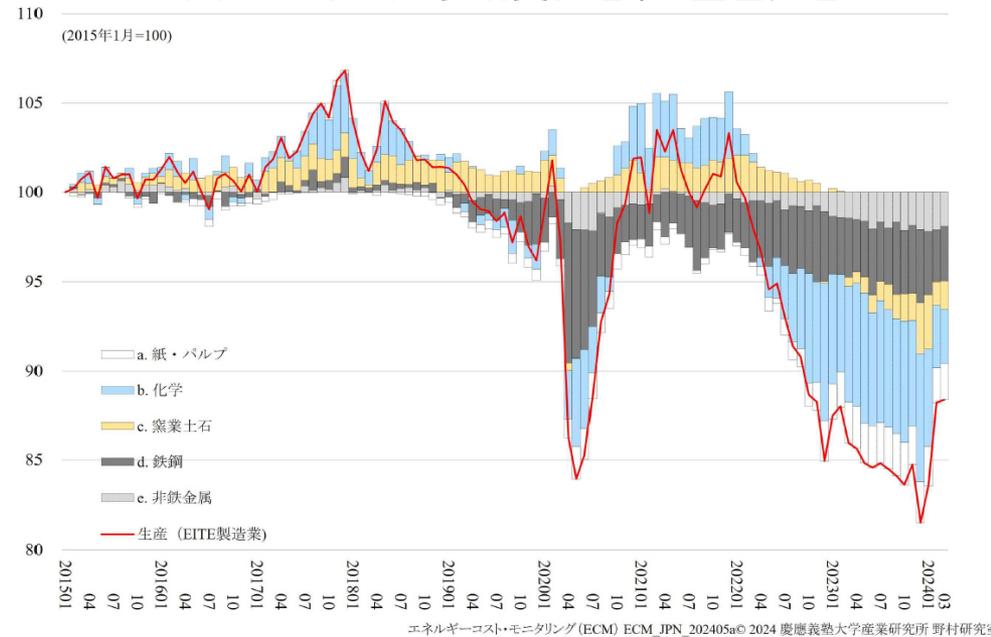
# エネルギー多消費製造業の生産減退(1/2)

- 日本では、鉄鋼や化学などのエネルギー多消費製造業の生産指数がここ数年大きく減退。ドイツでも、同様の傾向。日本では、特に、鉄鋼業の生産減少がエネルギー多消費製造業の減退を牽引。2023年からは化学業の生産減少が加速。
- 温室効果ガスの排出削減の要因には、エネルギー多消費製造業の生産が減退していることも寄与しており、産業競争力の確保・強化にとって大きな懸念。

## 日本のエネルギー多消費製造業の生産減退



## ドイツのエネルギー多消費製造業の生産減退



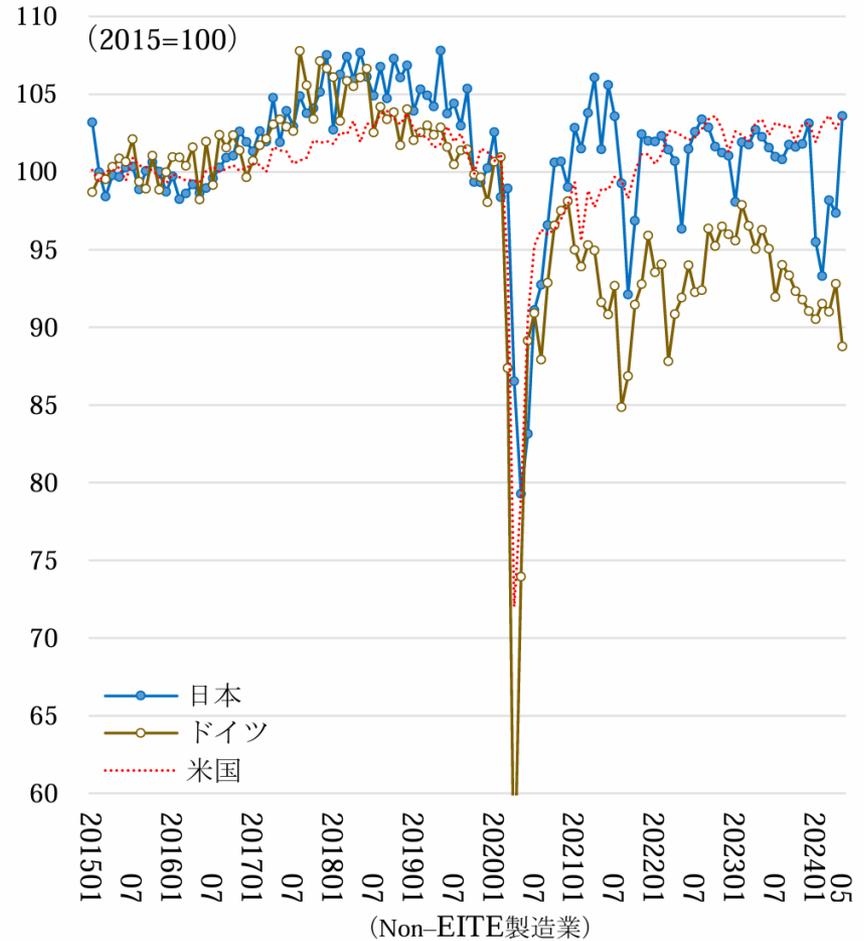
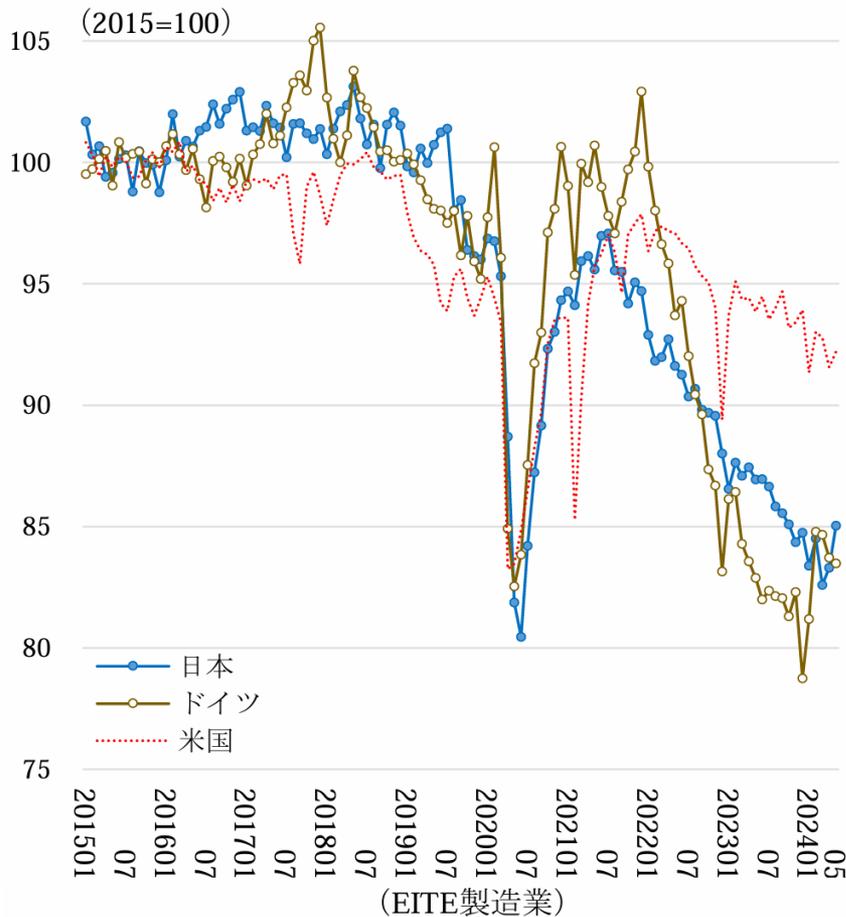
単位：2015年1月=100。注：観測期間は2015年1月-2024年3月。注：赤線はEITE製造業の集計生産指数であり、その内訳は紙・パルプ製品、化学製品（医薬品を除く）、窯業土石製品、鉄鋼製品、非鉄金属製品の製造業の寄与度。

出典：慶応大学 産業研究所 野村研究室

<https://www.ruec.world/Japan-EITE.html>

出典) 政府資料 (2024)

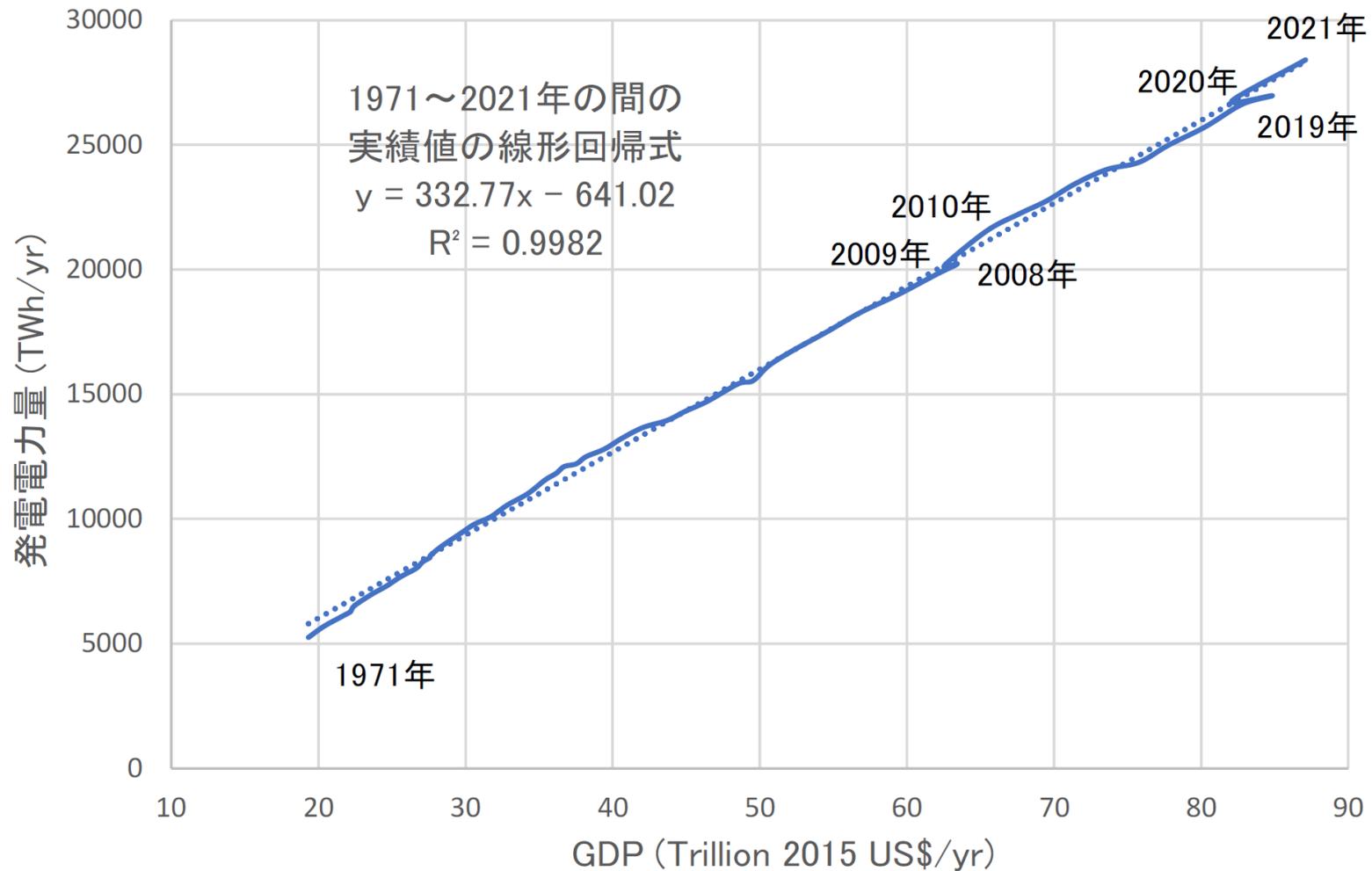
# エネルギー多消費製造業の生産減退(2/2)



エネルギーコスト・モニタリング (ECM) ECM\_JPN\_202406b© 2024 慶應義塾大学産業研究所 野村研究室

単位：2015 暦年平均=100。注：観測期間は 2015 年 1 月-2024 年 5 月。左図は EITE 製造業の集計生産指数、右図は Non-EITE 製造業の集計生産指数。EITE 製造業は、紙・パルプ製品、化学製品（医薬品を除く）、窯業土石製品、鉄鋼製品、非鉄金属製品の製造業として定義。Non-EITE 製造業は、それ以外の製造業。

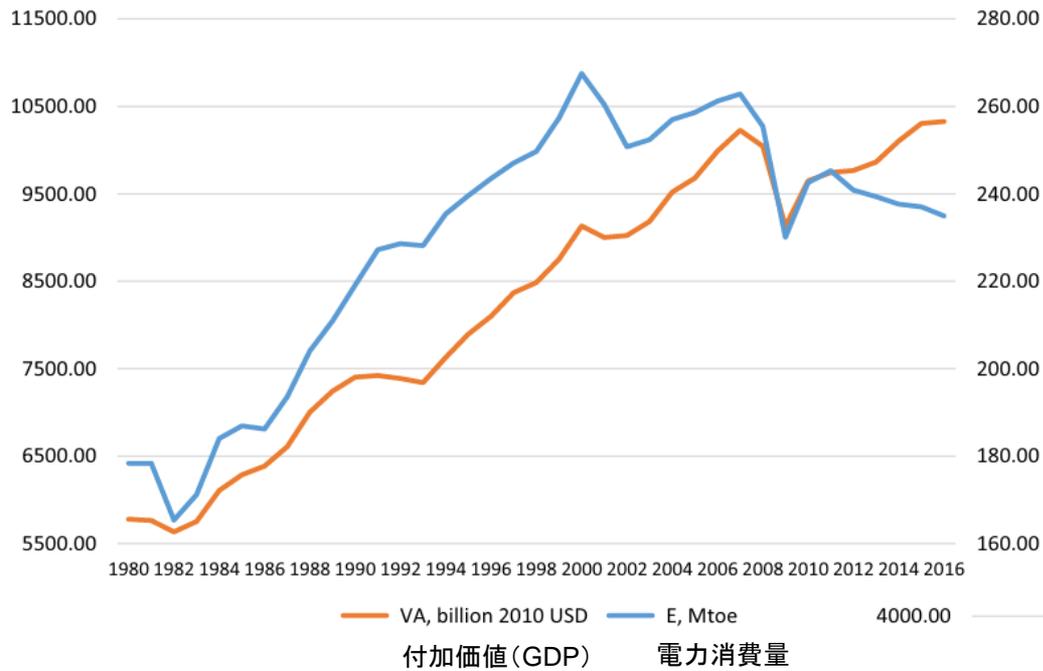
# GDPと電力消費量の関係：世界全体



出典) 国際エネルギー機関 (IEA) のデータより作成

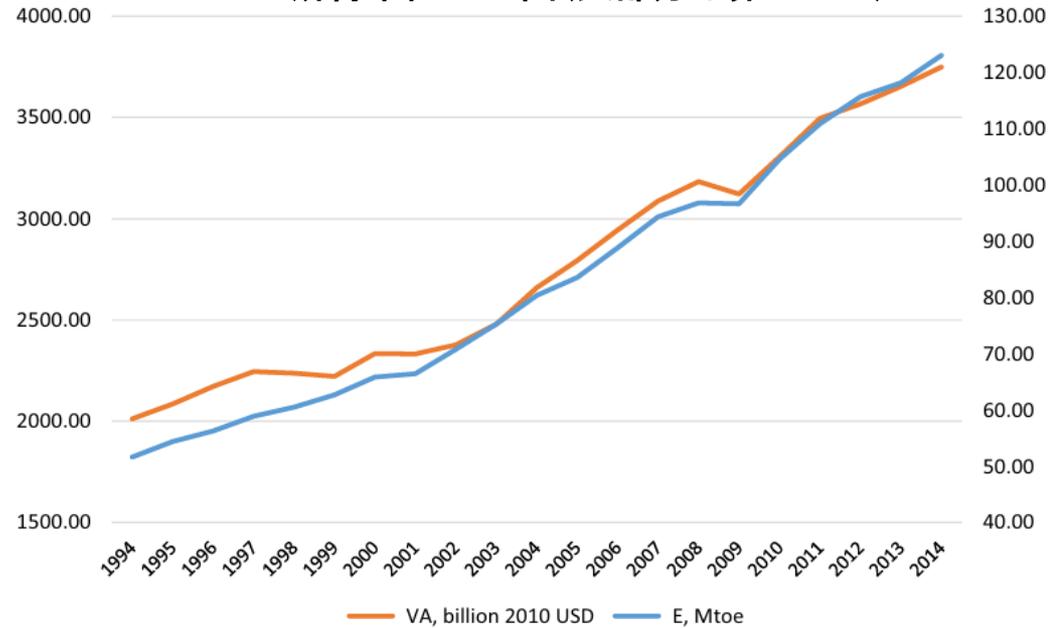
- 世界全体では、GDPと発電電力量には強い線形に近い関係が見られる。

# GDPと電力消費量の関係：所得による地域分類別



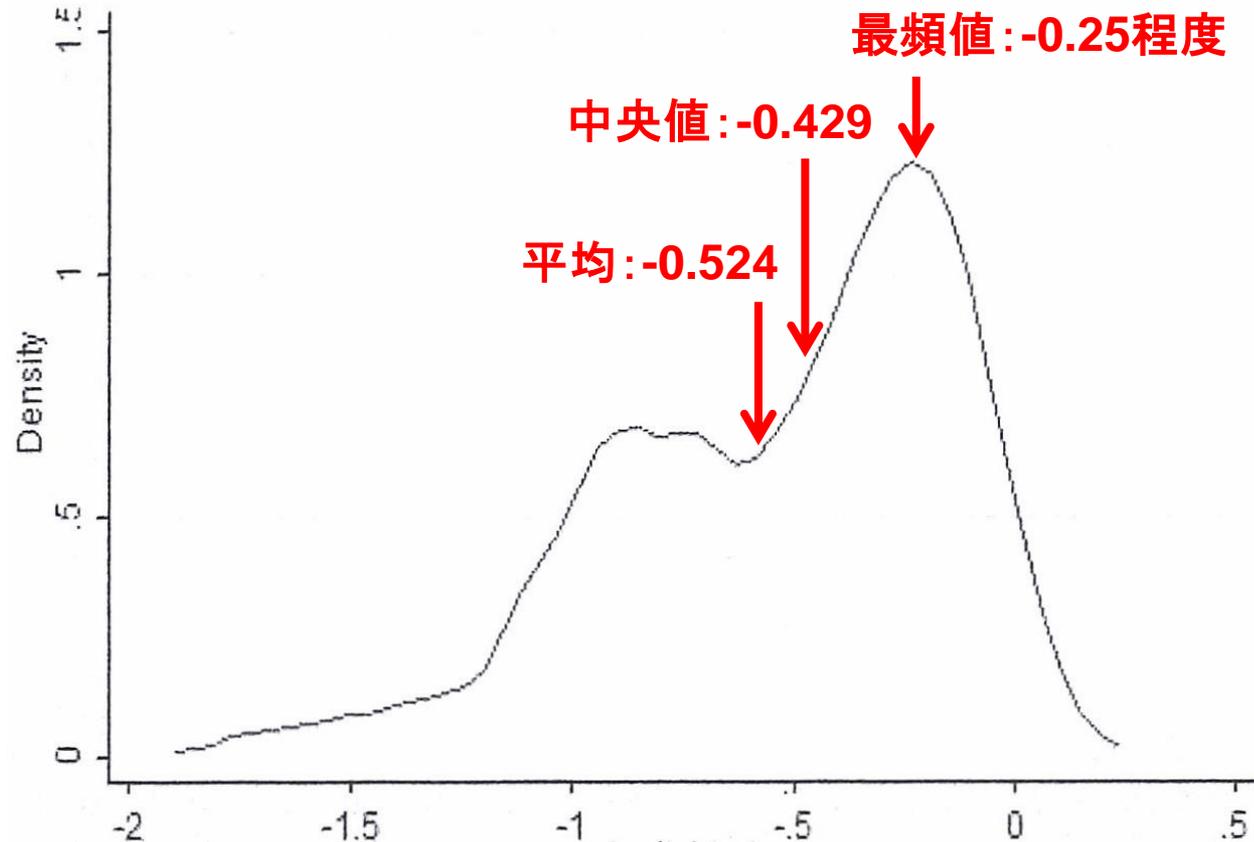
Brantley Liddle et al., Empirical Economics (2022)

## 所得中位30か国(大部分は非OECD)



- 先進国では強い正の関係性は見られなくなっている。GDP弾性はマイナス
- 他方、中位所得国は、GDPと電力消費量に強い正の相関関係あり

## 95%タイル推計の分布(1990~2016年に報告された959推計)



X. Labanderian et al. (2017)

- 価格弾性値の推計は、既往文献で大きな幅がある。

# EUの電力消費量の価格弾性値の推計例

Between estimates of residential electricity consumption 1996-2016

	(1)	(2)	(3)	(4)
Dependent variable: Ln Household Electricity Consumption per capita	Residential	Residential	Residential	Residential
	BE	BE	IV	IV
Ln Sectoral Electricity Price (real)	-0.56* (0.31)	-0.75** (0.32)	-0.55* (0.31)	-0.76** (0.32)
Ln GDP per capita (real)	0.61** (0.24)	0.22 (0.29)	0.61** (0.24)	0.20 (0.29)
Ln Population Density	-0.15* (0.09)	-0.10 (0.09)	-0.15* (0.09)	-0.10 (0.08)
Temperatures	-0.00 (0.02)	-0.03 (0.02)	0.00 (0.02)	-0.03 (0.02)
Precipitation	-0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
Ln Environmental Tax Share of GDP	0.64*** (0.21)	0.42* (0.22)	0.63*** (0.21)	0.41* (0.21)
Ln Sectoral Electricity Price (real) *Transition Economies		0.09 (0.65)		0.13 (0.65)
Transition Economies		-0.38 (1.32)		-0.30 (1.31)
Ln Sectoral Electricity price in Transition Economies		-0.66		-0.62
R2	0.650	0.725	0.646	0.724
Number of observations	513	513	487	487

First stage: Instrumented variable: Ln Electricity Price, Instrument: Lagged Ln Electricity Price.

Note: \*\*\*p < 0.01, \*\*p < 0.05, \*p < 0.1 Standard errors are in parentheses. Constants are not reported. The [Stock and Yogo \(2005\)](#) test statistic for 10% maximal IV size is 16.38, for 15% maximal IV size is 8.96, for 20% maximal IV size is 6.66 and for 25% maximal IV size is 5.53 The F-statistic on the first stage instrument in Model (3) is 4737.50 and in Model (4) is 4580. The instrument passes the [Stock and Yogo \(2005\)](#) test for weak identification. Models 1 and 3 present residential price elasticities for the entire EU, while Models 2 and 4 present the long-run price elasticities for old and new member states.

Between estimates of industrial electricity consumption 1996-2016

	(1)	(2)	(3)	(4)
Dependent variable: Ln Industrial Electricity Consumption per capita	Industrial	Industrial	Industrial	Industrial
	BE	BE	IV	IV
Ln Sectoral Electricity Price (real)	-1.01*** (0.35)	-1.14*** (0.40)	-0.97*** (0.34)	-1.12*** (0.39)
Ln GDP per capita (real)	1.07*** (0.25)	0.98*** (0.35)	1.08*** (0.25)	0.99*** (0.36)
Ln Population Density	0.13 (0.11)	0.13 (0.11)	0.12 (0.10)	0.12 (0.11)
Temperatures	-0.07*** (0.02)	-0.07** (0.03)	-0.07*** (0.02)	-0.07** (0.03)
Precipitation	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
Ln Environmental Tax Share of GDP	0.20 (0.24)	0.22 (0.30)	0.17 (0.24)	0.21 (0.30)
Ln Sectoral Electricity Price (real) *Transition Economies		0.74 (0.89)		0.80 (0.89)
Transition Economies		1.57 (1.99)		1.69 (1.99)
Ln Sectoral Electricity price in Transition Economies		-0.40		-0.32
R2	0.778	0.786	0.779	0.787
Number of observations	504	504	477	477

First stage: Instrumented variable: Ln Electricity Price, Instrument: Lagged Ln Electricity Price.

Note: \*\*\*p < 0.01, \*\*p < 0.05, \*p < 0.1 Standard errors are in parentheses. Constants are not reported. The [Stock and Yogo \(2005\)](#) test statistic for 10% maximal IV size is 16.38, for 15% maximal IV size is 8.96, for 20% maximal IV size is 6.66 and for 25% maximal IV size is 5.53. The F-statistic on the first stage instrument in Model (3) is 5113 and in Model (4) is 4850. The instrument passes the [Stock and Yogo \(2005\)](#) test for weak identification. Models 1 and 3 present industrial price elasticities for the entire EU, while Models 2 and 4 present the long-run price elasticities for old and new member states.

# 価格弾性値の推計例

	DNE21+ の標準想定	DEARS (内生)	Hunt and Ninomiya (2005)	Otsuka (2024)	Al-Rabbai and Hunt (2006)	Nrayan et al. (2007)	Chang et al. (2019)	Labanderi an et al. (2017)	Liddle et al. (2022)	Csereklyei (2020)
対象国	全世界	日本/ EU/ OECD	日本	日本 (都道府 県別)	OECD	G7	先進国20 国	世界各国 (既往文献 428本の サーベイ)	高所得国	EU
推計期間		GTAP9 (2011)	1887-2001	1990- 2015	1960-2003	1978- 2003	1978- 2013	1990-2016 (文献年)	1978- 2016	1996-2016
全エネル ギー		-0.40~ -0.62	-0.2		-0.4	[民生] -1.45~ -1.563	-0.234 (別推計の 提示も有)	-0.52 (平均値)		
電力	[マクロ評 価の需要 (主にエネ 寡消費産 業,民生)] -0.3	-0.21~ -0.30		[産業] -0.25~ -0.74 [民生] -0.55~ -1.0				-0.37 (平均値)	-0.25~ -0.27	[産業] -0.75~ -1.01 [民生] -0.53~ -0.56
非電力	[マクロ評 価の需要 (主にエネ 寡消費産 業,民生)] -0.4	-0.56~ -0.60								
エネルギー 多消費	基本的に 内生	-0.36~ -0.70					-0.529			
エネルギー 寡消費	基本的に 外生(上記 どおり: -0.4~-0.3	-0.27~ -0.56					-0.299			

注)いずれも長期弾性値

## 【所得弾力性】

- ◆ 先進国では、サービス産業等（金融・保険、コンサル、医薬、ITなど）への移行と、エネルギー多消費産業の海外移転によって、経済とCO<sub>2</sub>排出等とのデカップリングは観測されてきている。国別では、エネルギーの所得弾性は逆U字曲線を描く傾向有
- ◆ 他方、世界全体では経済とCO<sub>2</sub>排出・エネルギー消費量・電力消費量とのカップリングは継続
- ◆ 最終エネルギー需要や電力需要の所得弾性（付加価値弾性）は1.0前後が多いが、製造業比率に依るところは大きく、製造業比率が小さいと弾性値も小さい（このとき製造業の海外移転が伴っている）。

## 【価格弾力性】

- ◆ 電力需要の長期価格弾性値は▲0.3程度が標準的な推計。そして、短期に比べ長期は弾力的、電力は非電力に比べて非弾力的というのが比較的広い合意がある。しかしながら、弾性値の水準は推計幅が大きく、EUの最近での価格弾力性は高く▲0.8～▲1.0という報告も有（Csereklyei (2020)など）
- ◆ 以前の小さい価格変化、また、以前よりもグローバル化している中で産業の国際的な移転がしやすくなっている状況では、先進国では価格弾力性が高まっている可能性有
- ◆ 更に、直近の日本やドイツでのエネルギー多消費産業の動向でも、急速な生産低下が見られている。慶応野村教授の最新の分析結果も、EUの価格弾性は▲0.8～▲1.0という比較的新しい報告をサポートするようなものとなっている。途上国への産業リーケージが起こっていると推察できる。
- ◆ なお、価格弾性は、国内の価格だけではなく、海外を含めた相対価格による影響が大きいと見られるため、価格弾性値の推計は容易ではなく、不確実性は高い。また非連続的な面もある。

## 2. エネルギー需要の決定要因とシナリオ想定

※ OCCTO「第4回将来の電力需給シナリオに関する検討会」RITE提供資料も参照されたい。



# 将来の発電電力量の主要な要因

## 【発電電力量の上昇要因】

- ✓ 所得効果による電力需要の増大
- ✓ 世帯数の増加による電力需要の増大
- ✓ 気候変動要因による電力需要の増大
- ✓ デジタル化社会(BEV/PHEVの増大、データセンターの増大など)への変化による電力需要の増大【EVはDNE21+内生、ただし技術見通しは外生】
- ✓ 発電効率の低下:CCUSの増大等【DNE21+内生、ただし技術見通しは外生】
- ✓ 蓄電等の増大による効率低下:VRE増大に伴う、蓄電池、揚水等の増大【DNE21+内生、ただし技術見通しは外生】
- ✓ 産業部門でのCCS、水素製造、DACCS等のための電力需要の増大【DNE21+内生、ただし技術見通しは外生】
- ✓ 電力と他エネルギー種間における相対価格の変化:通常は脱炭素化の中で電力が優位で、電化進展【DNE21+内生】。ただし、政策に歪みが生じた場合、電化進展の程度に影響

## 【発電電力量の減少要因】

- ✓ 人口の低下に伴う、直接的および間接的(製品等に体化される電力需要)電力需要の低下
- ✓ (途上国等に対する)労働生産性の相対的な低下に伴う、エネルギー多消費・電力多消費産業の低下
- ✓ 気候変動要因による電力需要の低下(冬季)
- ✓ デジタル化進展による低エネルギー需要社会のシフト:シェアリング経済等
- ✓ 価格効果による需要側の高効率化(低炭素、脱炭素対策による電力コスト上昇見通し)【DNE21+内生】
- ✓ 国際的な相対的な電力コスト上昇に伴う、エネルギー多消費・電力多消費産業の低下

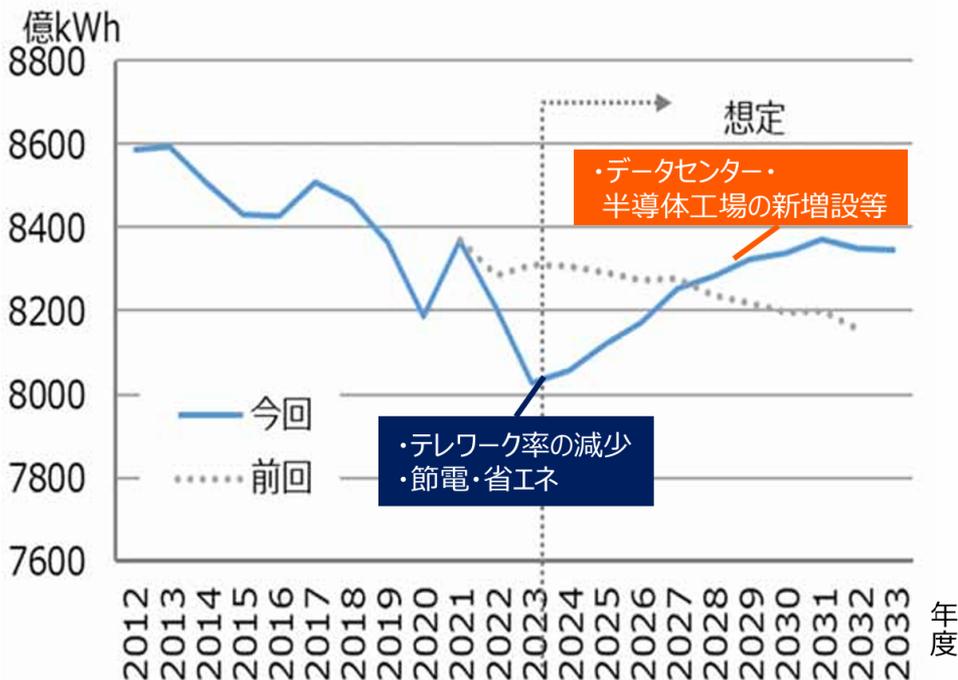
## 【その他、系統発電電力量の減少要因】

- ✓ 自家消費再エネの増大による系統発電電力量の低下【DNE21+内生】
- ✓ 産業自家発の低下【DNE21+内生】

# 【参考】DXの進展による電力需要増大

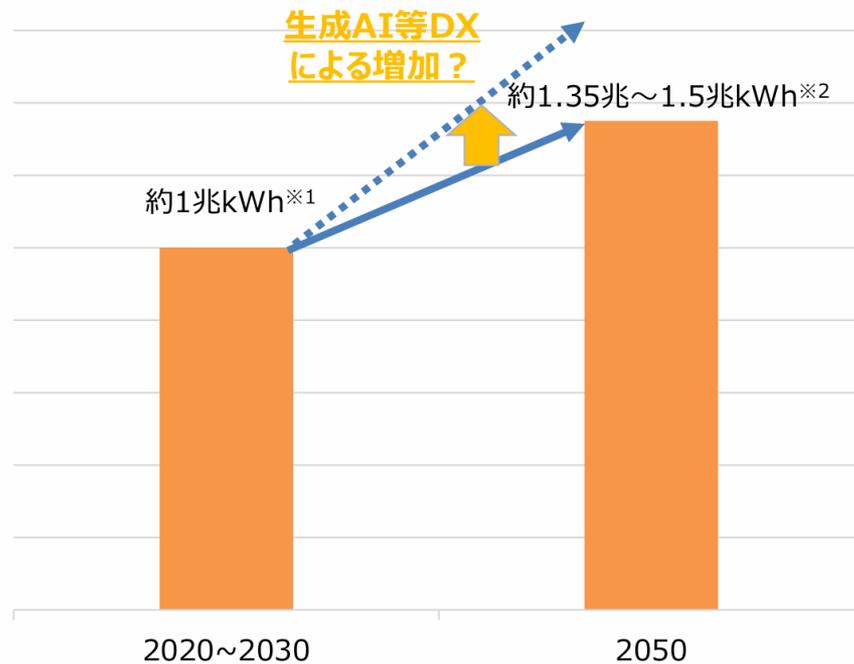
- 半導体の省エネ性能が向上する一方で、Chat GPTなどの生成AIの利活用拡大に伴い、計算資源における電力消費量が増加する可能性。
- 半導体の微細化や光電融合等の消費電力の低減に大きく寄与する半導体技術の開発等を進めながらも、今後、AIの進展による計算量の増大に伴い、電力消費量が急増するシナリオも想定しておく必要。（増加量の見通しは、半導体の省エネ性能の向上による効果などがどの程度期待できるかによって、大きな幅がある。）

### 我が国の需要電力量の見通し



(出所) 電力広域的運営推進機関「全国及び供給区域ごとの需要想定 (2024年度)」  
(令和6年1月24日) を元に作成

### 国内発電電力量のイメージ



※1：総合エネルギー統計、第6次エネルギー基本計画に基づく。

※2：第43回基本政策分科会で示されたRITEによる発電電力推計を踏まえた参考値。

# データセンター需要増シナリオのモデル想定と論拠

Masanet et al., や Koot et al., Base scenario的シナリオ

Koot et al., Combined scenario (median)的シナリオ

	低位ケース		高位ケース	
	世界	日本	世界	日本
<b>2016年</b>	<b>286 TWh/yr</b>	<b>21 TWh/yr</b>	<b>286 TWh/yr</b>	<b>21 TWh/yr</b>
(全電力消費量)	(25,000 TWh/yr)	(1,050 TWh/yr)		
データセンター分	1.15%	2%(想定)		2%(想定)
<b>2030年</b>	(+0.8 %/yr)		(+4.9 %/yr)	
	<b>321 TWh/yr</b>	<b>24 TWh/yr</b>	<b>566 TWh/yr</b>	<b>42 TWh/yr</b>
<b>2050年</b>	年上昇率一定 (+0.8 %/yr)		年上昇率一定 (+4.9 %/yr)	
	<b>377 TWh/yr</b>	<b>28 TWh/yr</b>	<b>1497 TWh/yr</b>	<b>110 TWh/yr</b>

高位ケースでの追加電力需要: **+83 TWh/yr**

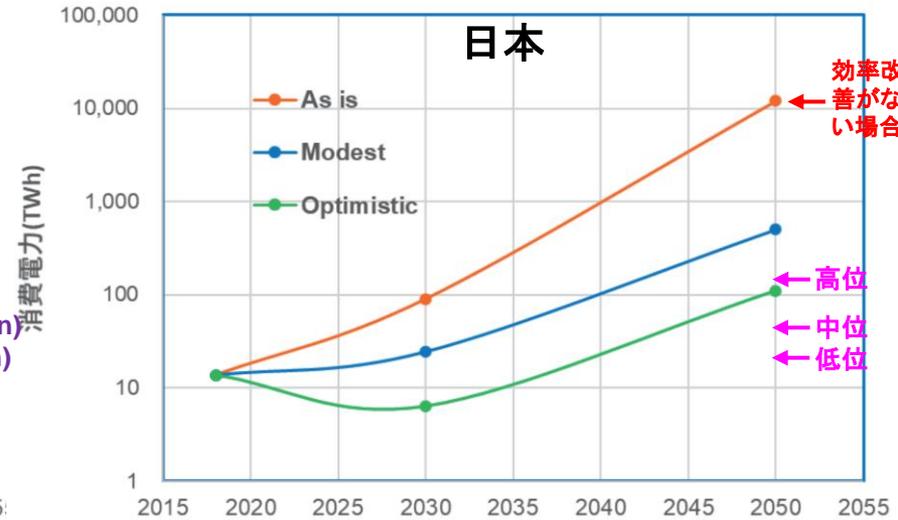
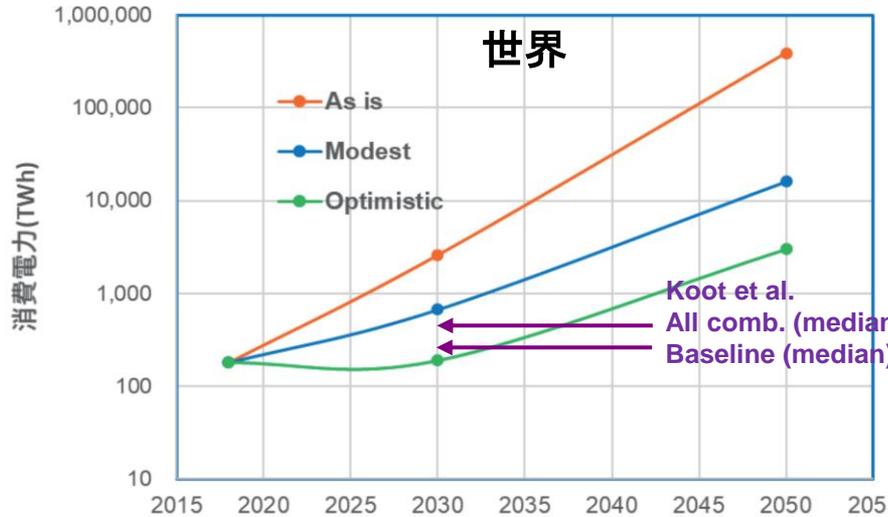
※ 中位ケースは年上昇率を高位ケースの半分と想定

【参考】JST (2022) LCS-FY2021-PP-01 における推計

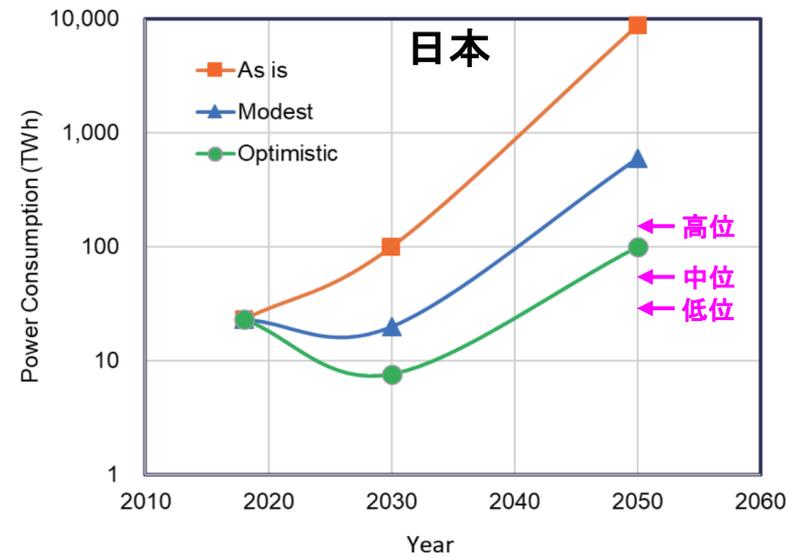
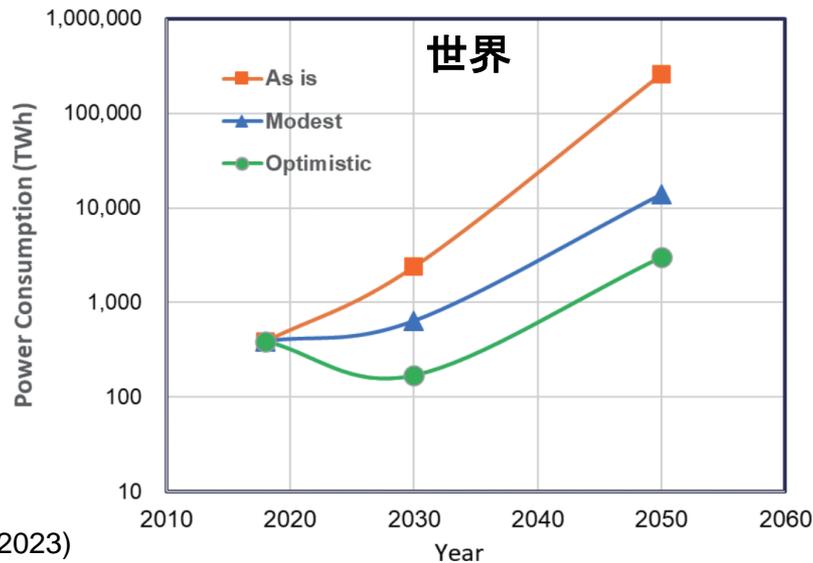
	Optimisticケース		Modestケース	
	世界	日本	世界	日本
<b>2030年</b>	190 TWh/yr	6 TWh/yr	670 TWh/yr	24 TWh/yr
<b>2050年</b>	3000 TWh/yr	110 TWh/yr	16000 TWh/yr	500 TWh/yr

# データセンター・ネットワークの電力消費の増大の見通し

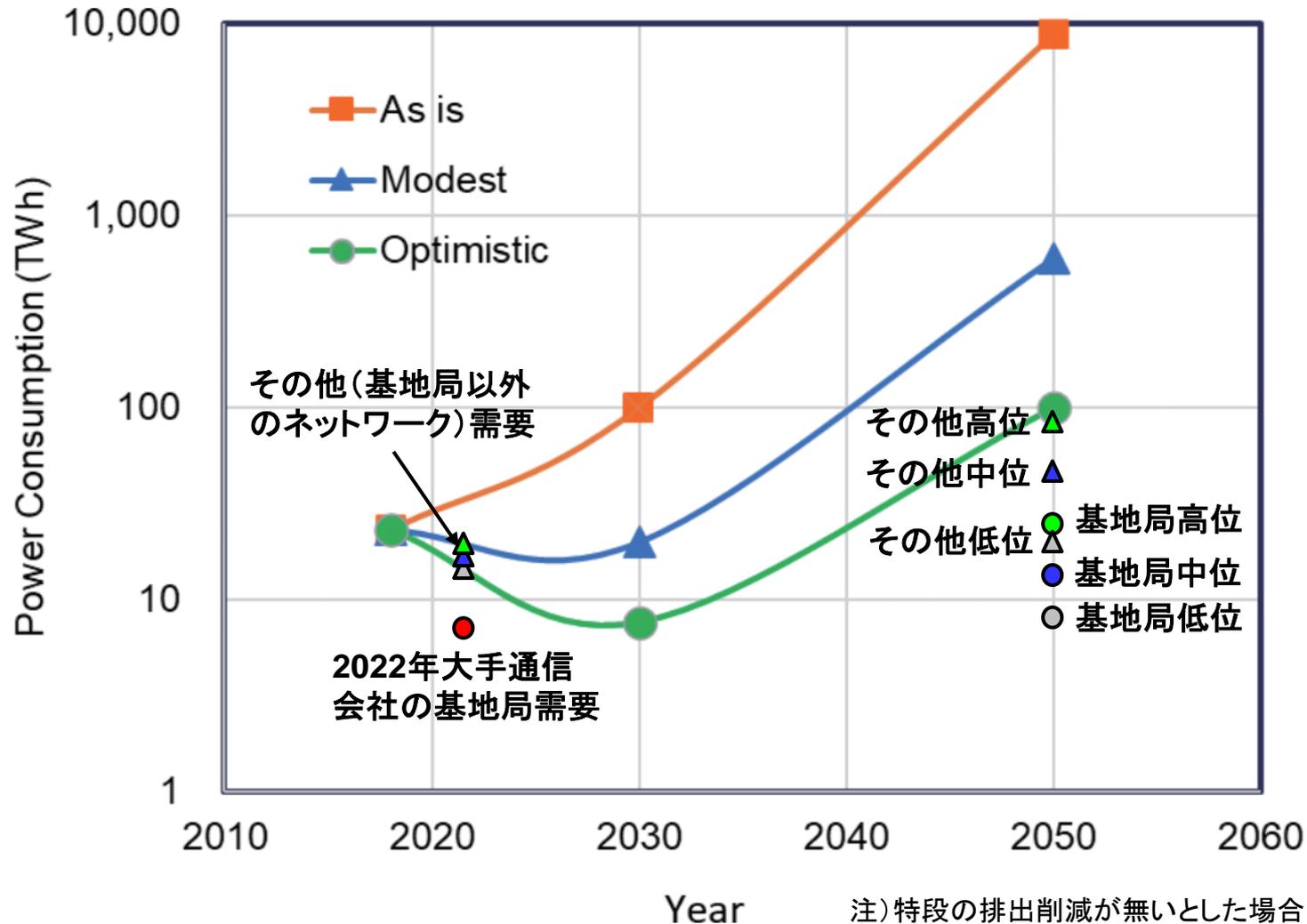
## データセンター電力需要



## 情報通信ネットワーク(ルーター・無線基地局)電力需要



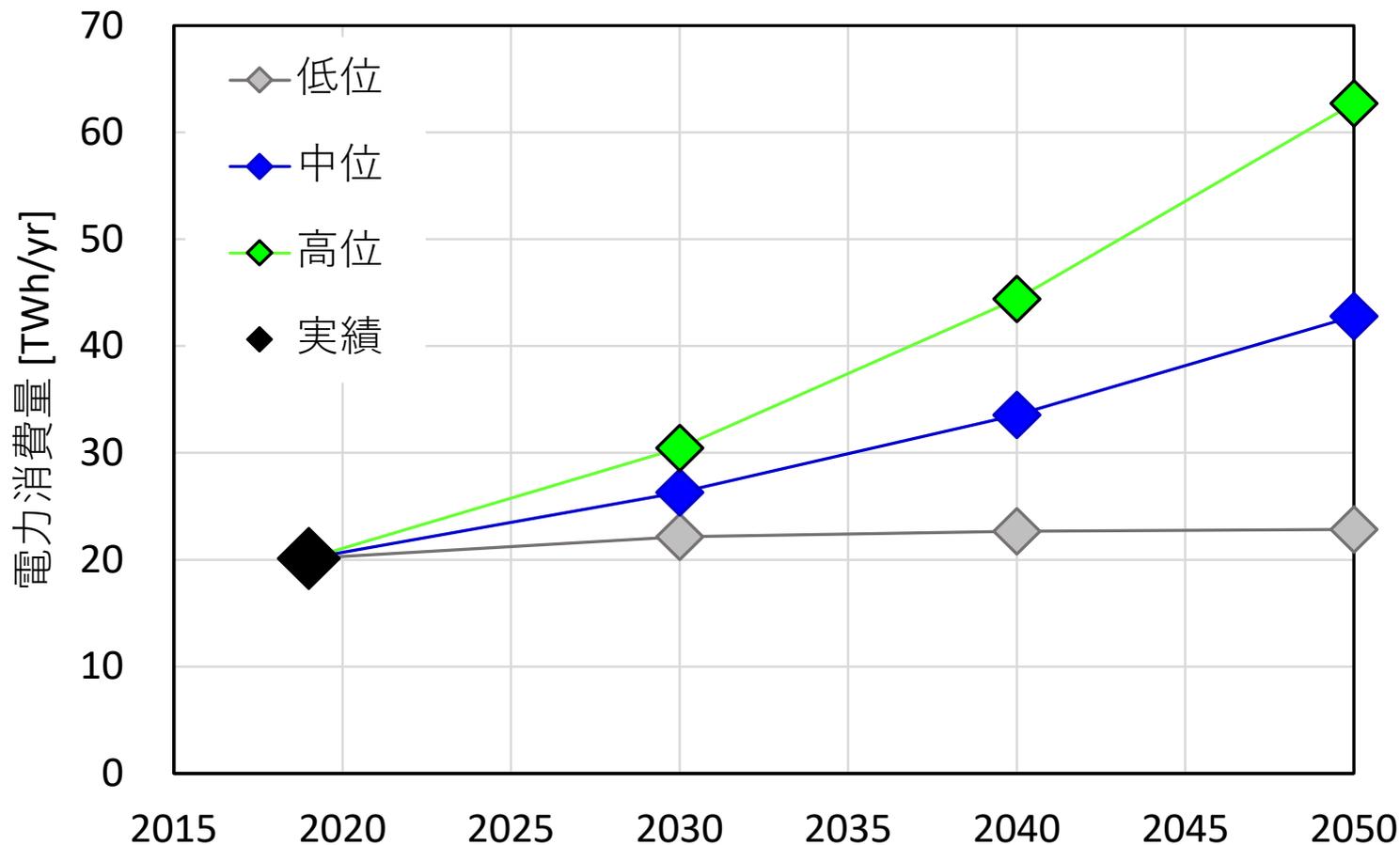
# ネットワークの電力消費想定：通信基地局とその他



注) 特段の排出削減が無いとした場合のベースラインの需要

- ✓ 基地局分は日本総研推計のバウンダリーを採用。その他は、JSTのネットワークの2018年値を低位、中位、高位の成長率(0.8、2.4、4.9%/yr)に基づき2022年まで延長し、基地局分を差し引いて2022年値を想定。
- ✓ 以降はこれまで同様に成長率に沿って推計。人口は減少しても一人当たり通信量は増加する可能性があるため、人口減少の影響は明示的には考慮していない。

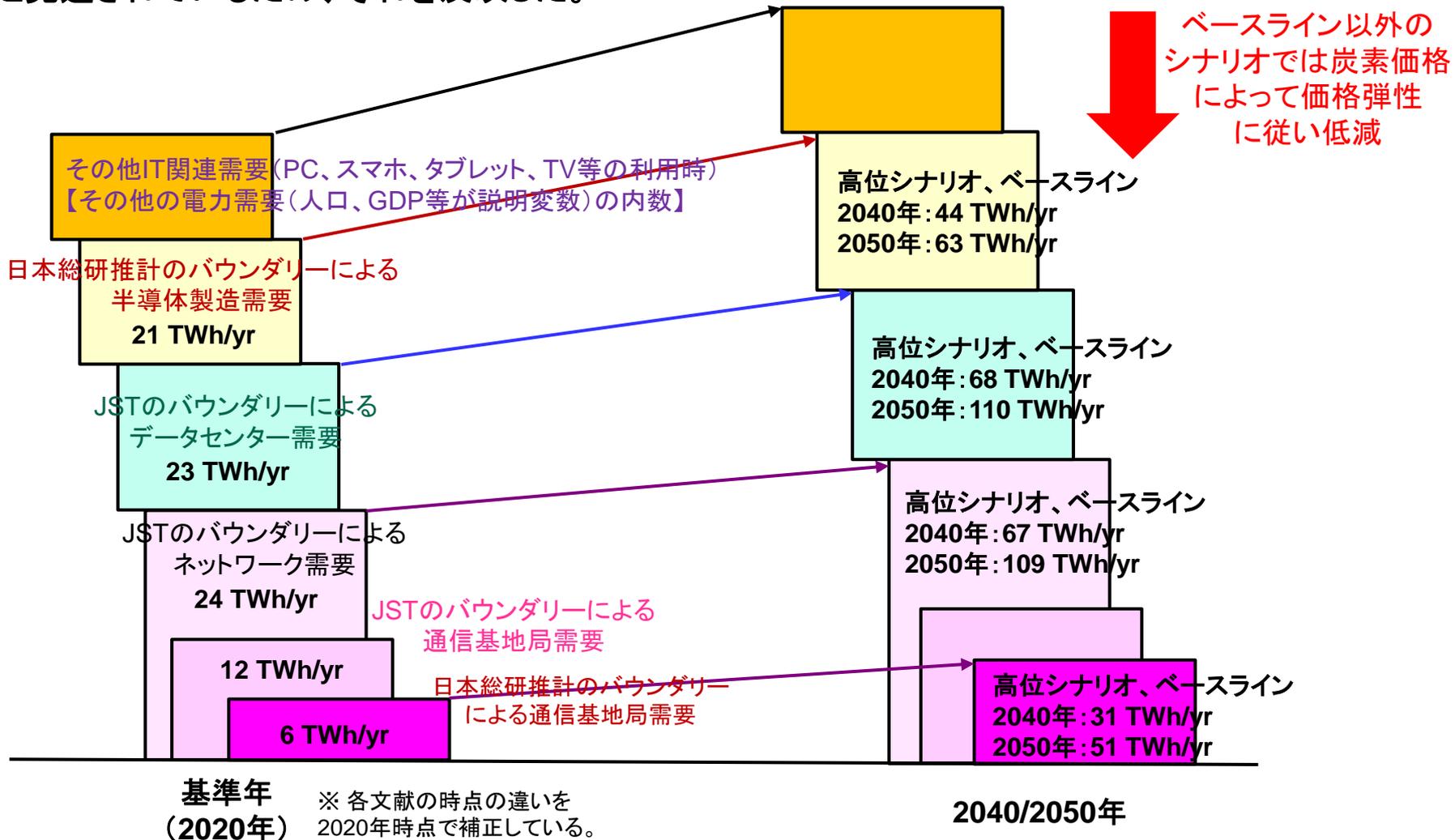
# 半導体需要増シナリオのモデル想定



- ✓ 成り行きでの半導体工場の推移はモデルのベースラインとして織り込んでいる(低位)。
- ✓ 中位は、データセンターやネットワークと同様に、年上昇率を2.4%/yrと想定。
- ✓ 高位は、中位と低位の差分を中位に足すことで想定した。

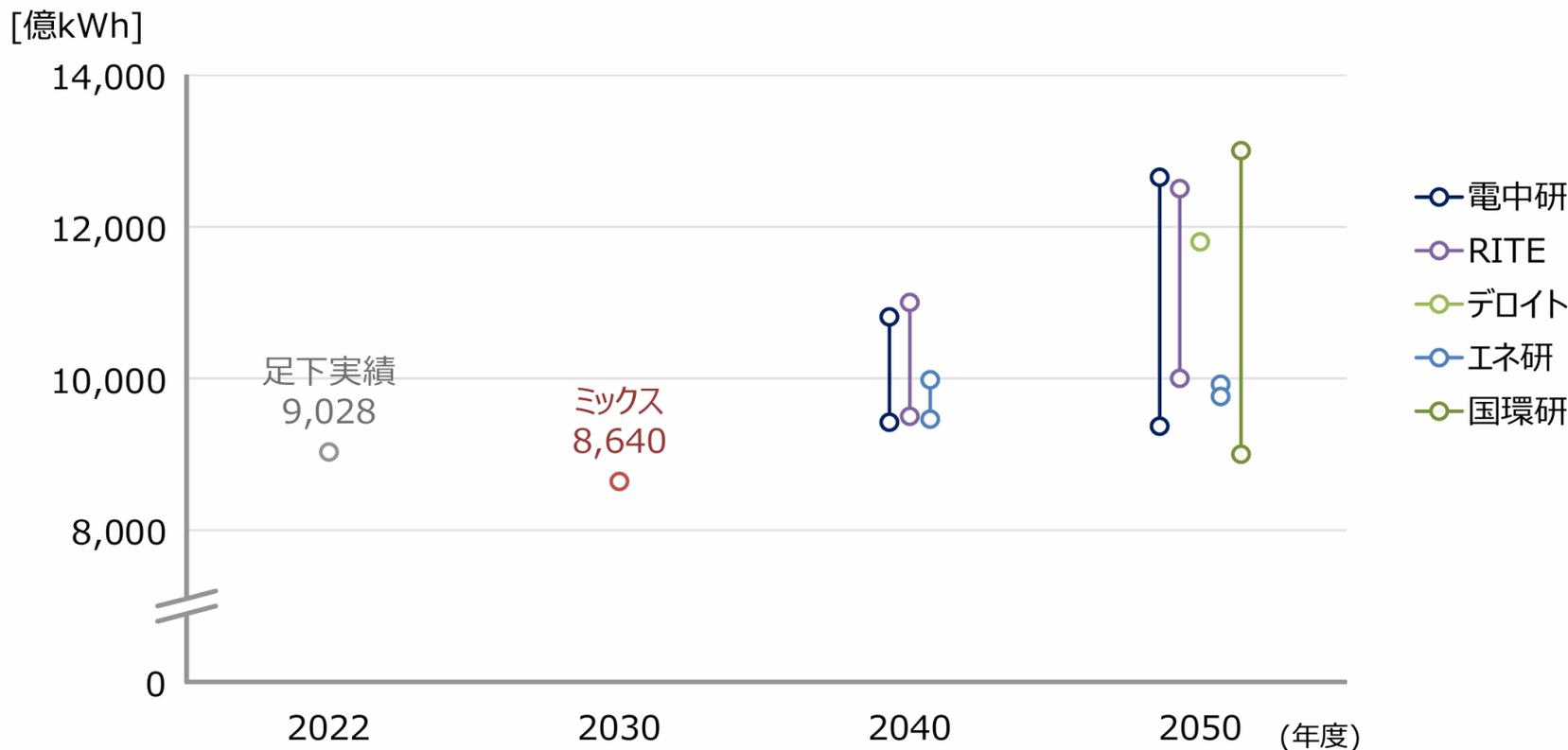
# IT関連の需要想定：高位シナリオ

- ◆ とりわけネットワーク需要内のバウンダリーは、文献毎で異なっていて不明瞭なところがある。本分析では、以下のように区分し、各需要を想定した。
- ◆ 通信キャリア基地局の電力需要の伸びが、その他の通信ネットワーク関連需要の伸びよりも大きいと見通されているため、それを反映した。



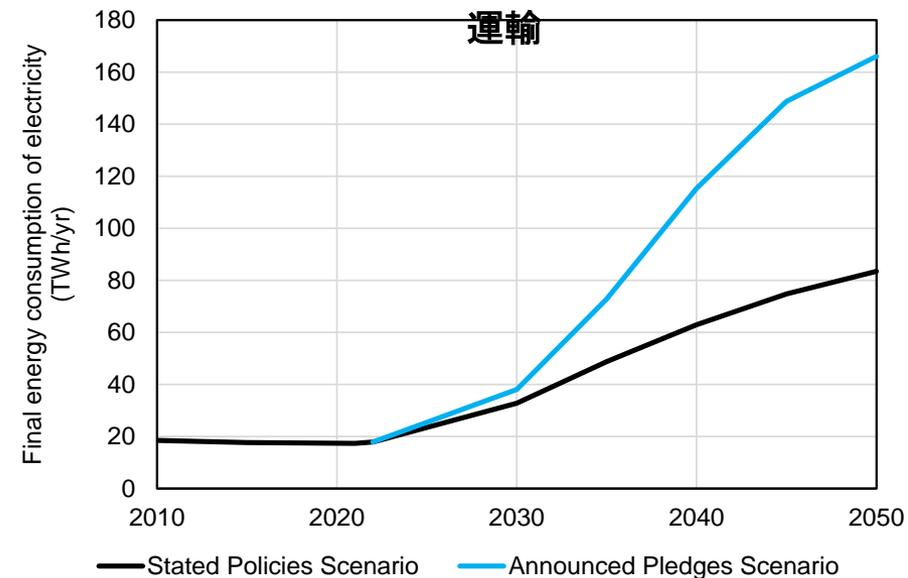
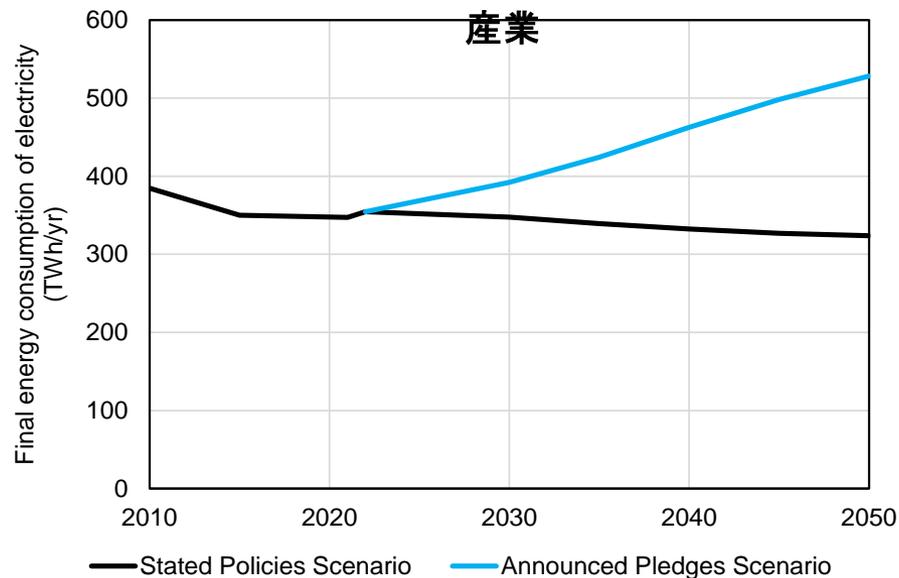
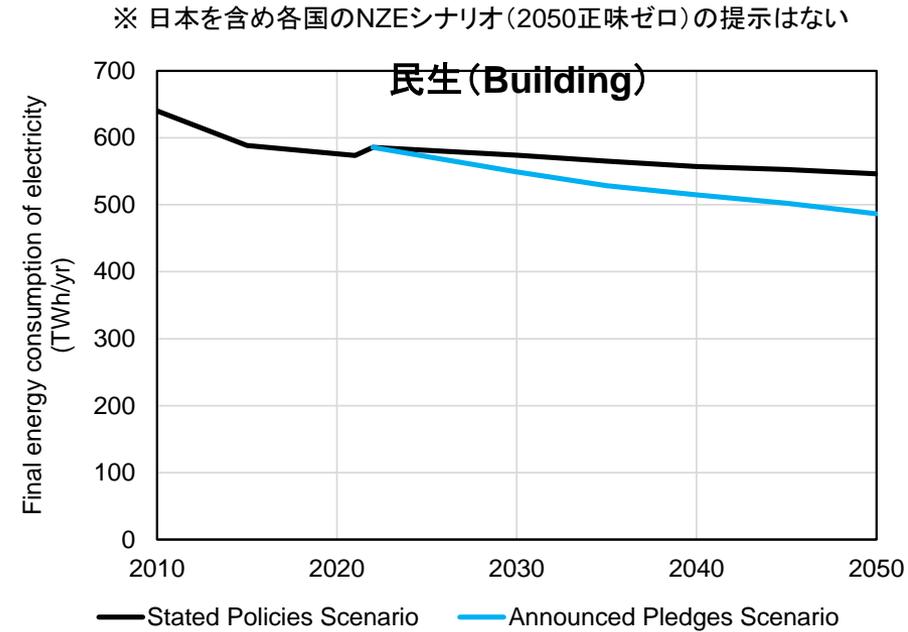
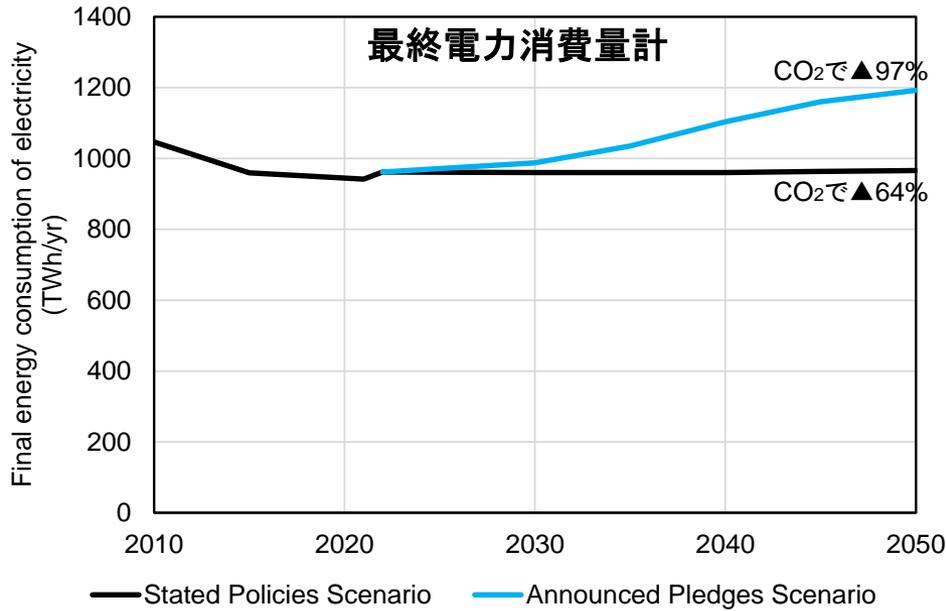
# 【参考】研究機関等による国内電力需要見通し

- これまでの研究機関等による分析では、日本の電力需要の見通しには大きな幅が存在。
- 現時点では、各社の試算の前提は様々であるが、データセンター・半導体工場等による需要増の可能性が明示的に考慮されているものは、下記のうち電中研、RITE、デロイト。



(出所) 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計 2022年度確報」(2024年4月12日)、電力広域的運営推進機関 第3回 第4回将来の電力需給シナリオに関する検討会資料(2024年1月24日、3月5日)、日本エネルギー経済研究所「IEEJアウトルック2024」、国立環境研究所「2050年脱炭素社会実現に向けた排出経路 追加分析」中央環境審議会地球環境部会地球温暖化対策計画フォローアップ専門委員会 第7回 資料4をもとに作成。

# 【参考】CO2削減に伴う電化：日本の見通し (IEA World Energy Outlook 2023)



# 想定の方

- ◆ IT関連の電力需要は、不確実性は大きいですが、潜在的に急増する可能性有。なお、DXによるサーキュラー経済・シェアリング経済等の誘発による大きな社会変化が実現できれば、電力需要増大と引き換えに、エネルギー消費量全体を大きく抑制でき、「経済と環境の好循環」を実現できる機会ともなり得る。
- ◆ ただし、需要の展望は、国間での相対的な電力価格を含め、電力価格にも大きく依存⇒電力価格の価格弾性を踏まえて評価
- ◆ 気候変動要因によるエネルギー需要量変化は、1.5°C目標の実現が容易ではない状況を踏まえ、排出削減分析は1.5°C未満を達成するシナリオを分析するものの、実現する世界平均気温については尤度を見て、2100年2°C未満相当の気温上昇を前提として、気候変化に伴う冷房需要、暖房需要を推計
- ◆ なお、カーボンニュートラル実現のような大幅な排出削減においては、電化の促進は重要な要素。電化については、あとで示す、技術・経済モデルにおいて、費用効率的な対策の結果として、モデルで内生的に算定

### 3. エネルギー需要量推計



# 分析手法・分析モデルの概要 と想定シナリオ

典型的と考えられる2シナリオを分析

# エネルギー需要・経済影響分析の手法

日本: 成長実現ケース  
GDP想定 = 実質1.7%/年相当

世界他国: 中位的な社会経済  
シナリオ想定 SSP2想定

統合的なエネルギー需要・基礎素材生産量等

世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+で費用最小化のエネルギーシステムとコスト推計

成長実現シナリオ

低成長シナリオ

世界での相対的な  
エネルギー価格差: 小  
+ 低価格弾性

世界各国のCO<sub>2</sub>限界  
削減費用

世界での相対的な  
エネルギー価格差: 大  
+ 高価格弾性

世界エネルギー経済モデルDEARS  
で各産業の生産量低下を推計  
(過去の長期における弾性値を  
踏まえた均衡解を導出)

欧州等で近年観測されている高い  
エネルギー価格弾性値を採用。  
RAS法により、部門間の均衡解を導出。  
GDPの低下、各産業の生産量低下を推計

日本の低炭素・脱炭素技術の  
海外市場獲得効果を加算

DNE21+で再計算

DNE21+で再計算

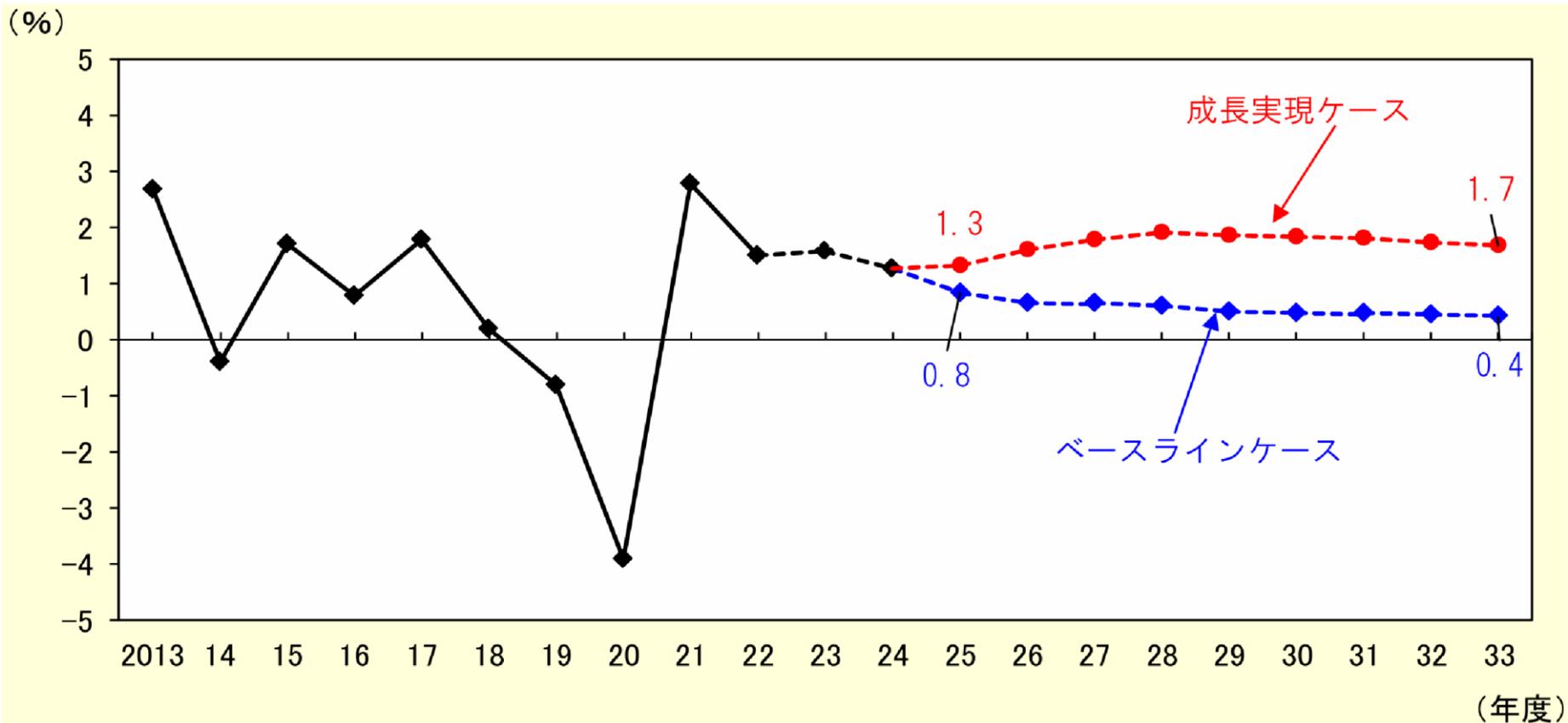
成長実現シナリオの  
経済展望

成長実現シナリオの  
エネルギー需要量

低成長シナリオの  
エネルギー需要量

低成長シナリオの  
経済展望

# GDP想定:内閣府展望



出典)内閣府「中長期の経済財政に関する試算」(2024)

「成長実現ケース」をベースに試算。2034年以降は、一人当たりGDPが「成長実現ケース」が継続するものと想定

# 想定シナリオ

シナリオ	潜在的 経済成長	GHG排出 削減制約	エネルギー 供給技術の 技術進展・ 技術普及水準	データセンター等 IT需要		自動車	鉄鋼	鉄鋼・化学・ 自動車等の 生産量の展 望：炭素価 格による生 産量低下
	所得効果、 人口・なり ゆき産業 構造変化 等	GHG排出 削減によっ て誘発され る炭素価格		潜在的需 要(外生)	価格弾性 による効 果(内生)	【EV】 中位 コスト低減 加速	水素DRI 普及速 度	
成長実現 シナリオ	内閣府「成 長実現ケー ス」	世界全体で 1.5°C目標、 日本NDC+ 2050年CN	高位 (相対的エネ ルギー価格の 差異：小)	高位	高位需要	コスト低減 加速	高位 (2050年： 普及上限 制約無)	小 (中弾性 (DEARS))
低成長 シナリオ			低位 (相対的エネ ルギー価格の 差異：大)	中位	低位需要	中位	中位	大 (高弾性+ RAS法)

※ 比較参照として、特段のGHG排出削減を想定せず、エネルギーシステムコスト最小化の「ベースライン」(CO2限界削減費用ゼロ)も推計

- 「成長実現シナリオ」は、エネルギー供給・需要側技術ともに、技術革新が広範に進展。技術普及障壁も小さい。結果、国際的な相対的エネルギー価格も比較的低廉。DXの進展も広範に起こる。海外への産業移転は少なく、結果、価格弾性値は長期の傾向に沿ったものに。
- 「低成長シナリオ」は、現状延長線上の技術進展。技術普及障壁も比較的大。DX進展も中庸。結果、脱炭素・低炭素エネルギー資源にハンディキャップが大きい日本は、国際的な相対的エネルギー価格は高い状況
- 引き続き、エネルギー関連技術の技術進展・普及障壁の想定の様々な差異による分析は検討課題

# 温暖化対策評価モデルDNE21+の概要

## (Dynamic New Earth 21+)

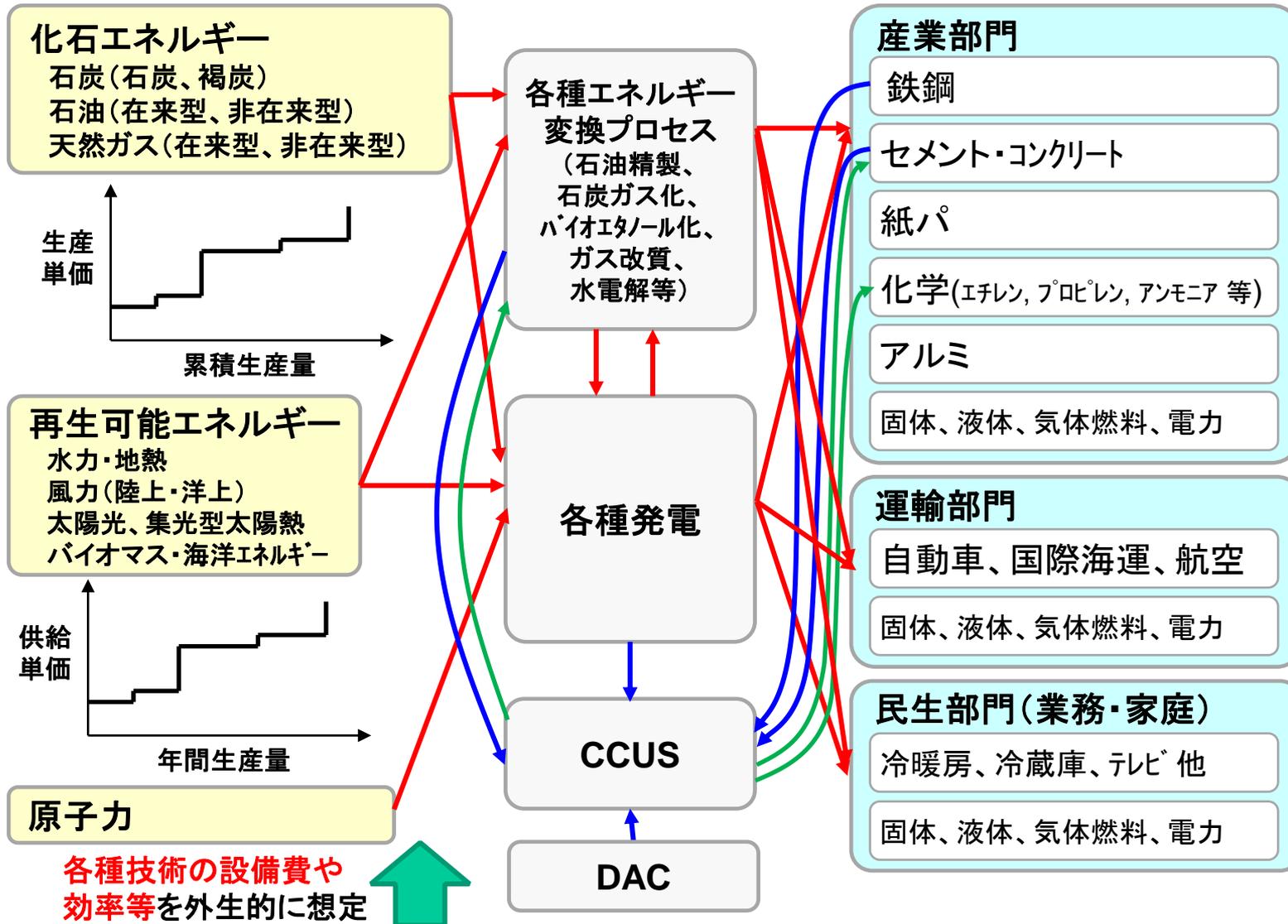
- ◆ 各種エネルギー・CO<sub>2</sub>削減技術のシステムの的なコスト評価が可能なモデル
- ◆ 線形計画モデル(エネルギーシステム総コスト最小化。決定変数:約1千万個、制約条件:約1千万本)
- ◆ モデル評価対象期間: 2000~2100年(代表時点:2005, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 70, 2100年)
- ◆ 世界地域分割: 54 地域分割(米国、中国等は1国内を更に分割。計77地域分割)
- ◆ 地域間輸送: 石炭、原油・各種石油製品、天然ガス・合成メタン、電力、エタノール、水素、CO<sub>2</sub>(ただしCO<sub>2</sub>は国外への移動は不可を標準ケースとしている)
- ◆ エネルギー供給(発電部門等)、CO<sub>2</sub>回収・利用・貯留技術(CCUS)を、ボトムアップ的に(個別技術を積み上げて)モデル化
- ◆ エネルギー需要部門のうち、鉄鋼、セメント、紙パ、化学、アルミ、運輸、民生の一部について、ボトムアップ的にモデル化。その他産業や民生においてCGSの明示的考慮
- ◆ 国際海運、国際航空についても、ボトムアップ的にモデル化
- ◆ 500程度の技術を具体的にモデル化、設備寿命も考慮
- ◆ それ以外はトップダウン的モデル化(長期価格弾性値を用いて省エネ効果を推定)
- ◆ モデル内でのコストは、実質価格で想定しており、1 USD=110円(2000-10年の平均値)を採用

- 地域別、部門別に技術の詳細な評価が可能。また、それらが整合的に評価可能
- 非CO<sub>2</sub> GHGについては、別途、米EPAの技術・コストポテンシャル推計を基にしてRITEで開発したモデルを利用

- 中期目標検討委員会およびタスクフォースにおける分析・評価
- 国内排出量取引制度の検討における分析・評価、環境エネルギー技術革新計画における分析・評価
- 第6次エネルギー基本計画策定時において基本政策分科会への2050年CN分析の提示はじめ、気候変動政策の主要な政府検討において活用されてきた。またIPCCシナリオ分析にも貢献

# DNE21+のエネルギーフロー概略

温暖化対策を想定しないベースラインにおける化石燃料価格は外生的に想定し、生産単価や利権料等のその他価格要因を調整する。排出削減を想定したケースでは、それに伴う化石燃料利用量の変化に従って、モデルで内生的に価格が決定される。



ボトムアップ的にモデル化している主要な部門については、**経済活動量**や**サービス需要**を外生的に想定してモデルに入力する(例:粗鋼やセメント生産量、乗用車の旅客サービス需要等)。

# 社会経済シナリオの想定(概略)

IPCCの招請を受けて、共有社会経済経路(SSPs: Shared Socioeconomic Pathways)を策定中(SSP1~5の5種類のシナリオ)。SSPsのストーリーラインに沿った定量的なシナリオを策定している。本分析では、その内、**中位的なSSP2の社会経済シナリオを想定**

## 【世界】

	2030年	2050年	2100年
人口(億人)	83.6 (81.4-85.9)	92.1 (86.1-100.5)	93.1 (70.0-127.3)
GDP(%/年)	2.7 (2.4-3.1) [2010年~]	2.2 (1.3-2.8) [2030年~]	1.4 (0.6-2.2) [2050年~]
粗鋼生産量(億トン)	19.6 (18.8-20.0)	21.3 (19.3-22.7)	22.9 (14.7-26.5)
セメント生産量(億トン)	41.6 (39.0-43.0)	44.0 (38.5-46.6)	44.7 (29.4-59.1)
道路部門の旅客輸送需要(兆p-km)	30.2 (31.2-37.3)	60.0 (56.8-74.2)	83.3 (66.8-88.8)

## 【日本】(下記、記載のGDP想定は「成長実現ケース」ベース)

	2030年	2050年	2100年
人口(億人)	1.18 (1.16-1.26)	1.02 (0.96-1.22)	0.84 (0.47-1.05)
GDP(%/年)	1.6 (1.3-1.9) [2010年~]	0.6 (-0.1-1.2) [2030年~]	0.4 (-0.9-1.5) [2050年~]
粗鋼生産量(億トン)	0.90 (0.81-0.97)	0.95 (0.73-1.11)	0.85 (0.45-0.90)
セメント生産量(億トン)	0.54 (0.50-0.68)	0.44 (0.31-0.75)	0.40 (0.23-0.65)
道路部門の旅客輸送需要(兆p-km)	0.77 (0.69-0.85)	0.64 (0.61-0.82)	0.61 (0.51-0.70)

注)括弧内は、SSP1~5までのシナリオの幅。なお、エネルギー需要や発電電力量はモデルで内生的に計算される。

# 自動車車両コストの想定：小型乗用車

## 【標準の技術想定シナリオ】

	2015	2020	2030	2050
在来型内燃自動車	170	170	180	185
ハイブリッド車(ガソリン)	210	209	202	201
プラグインハイブリッド車(ガソリン)	270	248	219	210
純電気自動車(BEV)	311	305	265	225
燃料電池自動車(FCEV)	598	514	388	244

単位) 万円/台

## 【自動車電化高位シナリオ】 EVのコスト低減加速

(バッテリーコスト：2030年：1万円/kWh、2050年：5千円/kWh相当)

	2015	2020	2030	2050
在来型内燃自動車	170	170	180	185
ハイブリッド車(ガソリン)	210	208	201	201
プラグインハイブリッド車(ガソリン)	270	244	210	205
純電気自動車(BEV)	311	285	210	205
燃料電池自動車(FCEV)	598	412	244	205

単位) 万円/台

# 自動車車両コストの想定：大型乗用車

## 【標準の技術想定シナリオ】

	2015	2020	2030	2050
在来型内燃自動車	370	370	380	385
ハイブリッド車(ガソリン)	418	415	404	402
プラグインハイブリッド車(ガソリン)	521	482	429	414
純電気自動車(BEV)	622	550	490	430
燃料電池自動車(FCEV)	1046	902	682	467

単位) 万円/台

## 【自動車電化高位シナリオ】 EVのコスト低減加速

(バッテリーコスト：2030年：1万円/kWh、2050年：5千円/kWh相当)

	2015	2020	2030	2050
在来型内燃自動車	370	370	380	385
ハイブリッド車(ガソリン)	418	415	392	391
プラグインハイブリッド車(ガソリン)	521	471	404	397
純電気自動車(BEV)	622	520	407	400
燃料電池自動車(FCEV)	1046	748	467	402

単位) 万円/台

- DNE21+では、原則的には、エネルギー価格上昇による需要低減効果は内生的に計算される。
- しかしながら、エネルギー多消費産業の生産量（粗鋼生産量、エチレン生産量等）については、国別に外生的に想定を行っており、相対的なエネルギー価格変化に伴う、国際的な産業の移転については考慮できない。相対的な価格差が小さい場合は、この扱いで大きな問題はないが、国間で相対的なエネルギー価格差が大きく生じる場合では、別途考慮が必要である。
- 先述のように、「成長実現シナリオ」では国際産業連関表GTAP9（基準年2011年）をベースとした一般均衡モデルDEARSモデルを利用して、生産量の低下を推計
- 「低成長シナリオ」では、最近の先進国でエネルギー多消費産業で見られる産業の海外移転を踏まえた、価格弾性値を反映した分析を実施。**所得弾性値1.0、価格弾性▲1.0と想定**した上で、産業部門間の均衡はKEO-RAS法を用いて推計
- エネルギー多消費産業の生産量を上記の「成長実現シナリオ」と「低成長シナリオ」別に推計。DNE21+での想定生産量を修正して、再計算し、エネルギー需要を推計（p.30参照）

# 世界エネルギー経済モデルDEARS

(Dynamic Energy-economic Analysis model with multi-Regions and multi-Sectors)

- ◆ トップダウン型経済モジュールとボトムアップ型エネルギーシステムモジュールの統合モデル
- ◆ 動的非線形最適化モデル(世界全体の消費効用最大化)
- ◆ モデル対象期間: 21世紀中頃まで(最適化時点間隔 10年)
- ◆ 世界地域分割: 18地域分割
- ◆ 非エネルギー産業分類: 16分類(貿易は輸入財・国内財の代替性を考慮[アーミントン構造])
- ◆ エネルギー分類: IEA統計に基づき、一次エネルギー8種、二次エネルギー4種。(IEA統計の鉄鋼部門のエネルギー消費のバウンダリーの修正。)
- ◆ GTAP (Global Trade Analysis Project) モデル・データベースに基づく、貿易マトリックスを含む国際産業関連構造を明示した経済モジュール
- ◆ 簡略化ながら、ボトムアップ化したエネルギーシステムモジュール
  - ✓ ボトムアップ的にエネルギー供給技術(発電技術等)、CO<sub>2</sub>回収・貯留技術をモデル化
  - ✓ 一次エネルギー供給: 8種類をモデル化(石炭、原油、天然ガス、水力・地熱、風力、太陽光、バイオマス、原子力)
  - ✓ トップダウン的にエネルギー需要サイドをモデル化(家計: エネルギー価格・所得弾性、産業・運輸: エネルギー価格弾性、これらはすべて経済モジュールとリンク)
  - ✓ 最終エネルギー消費: 4種類をモデル化(固体燃料、液体燃料、気体燃料、電力)

**政府のエネルギー・環境会議選択肢の経済分析等にも活用された。**

- T. Homma & K. Akimoto(2013), "Analysis of Japan's energy and environment strategy after the Fukushima nuclear plant accident", *Energy Policy* 62, 1216–1225
- 本間他(2020)、現状の気候・エネルギー政策を考慮した、パリ協定国別貢献における国際競争力に関する分析、*エネルギー・資源*、41-5

- 「成長実現シナリオ」は、世界に先行して低炭素・脱炭素技術の開発、実証、商用化が進展し、各種技術のコスト低減等が加速する世界観である。
- 他方、DEARSモデルは国際産業連関表をベースにモデルが構成されているが、分割された部門内において、日本の環境に優れた技術の比率が高いことが考慮できず、世界への低炭素・脱炭素技術の展開に伴う経済効果は含まれない。そこで、この効果を考慮するため「海外での排出削減対策の設備投資額増に伴う日本製品の輸出増分」を別途推計

## 【推計手順】

- (1) DNE21+モデルから「成長実現シナリオ」で推計された、世界における低炭素・脱炭素技術の設備費を整理
- (2) 日本の各種機器の輸出シェアを実績値を基に想定し、(1)を用いて、日本の設備・機器の海外での投資増を推計(なお、海外での工事費相当額として26%を想定し、日本の投資増分から除外)
- (3) (2)を、輸送機械産業[運輸関連技術の寄与]、電気機械産業[家電機器技術の寄与]、汎用機械産業[発電他、その他の技術の寄与]の3分類に整理
- (4) (3)を基に、産業連関表の波及効果分析(当該設備投資増加による2次効果まで考慮、2015年表[大分類]を利用)を用いて、GDPへの波及効果(誘発GDP)を推計

# 「低成長シナリオ」推計の手順について

## 【手順1】

長期価格弾性値▲1.0の想定の下、最終エネルギー消費量を推計

## 【手順2】

1.で得られた**最終エネルギー消費量**（ベースラインと低成長シナリオ）と、想定所得弾性値（付加価値弾性値）、価格弾性値から、**付加価値**変化を算定

産業連関表の各項目の推計

			需要サイド							
			中間需要				最終消費	投資	輸出入	国内生産
			産業1	産業2	・・・	エネルギー				
供給サイド	中間投入	産業1								
		産業2								
		・・・								
		エネルギー								
	付加価値									
	国内生産									

## 【手順3】

KEO-RAS法\*やDEARSモデル想定関数を活用しつつ、部門別**国内生産**変化や**輸出入**変化(他国との貿易価格の相対変化を考慮)などを算定。

**KEO-RAS法**とは、未知の産業連関表を推計する最適化手法（黒田他, 1997）。産業連関表の中ですでに決定・推計されている数値を利用して、他の未知数を推定するための手法で、産業連関分析では伝統的によく用いられるRAS法（収束計算法）の近似解が得られる。最終的に得られた推計結果は、産業連関表の枠組みに基づき、各産業の需給が均衡している。

- 未知の産業連関表の行列A（産業×産業）に対して各行の比率（投入比率）及び各列の比率（配分比率）の残差自乗和を同時に最小化する最適化問題を解き、未知の変数が決定される。

# シナリオ分析結果

# CO<sub>2</sub>限界削減費用

	成長実現シナリオ		低成長シナリオ	
	2040	2050	2040	2050
日本	392	544	538	1032
米国	280	256	340	352
英国	304	367	382	477
EU	287	418	340	536
その他	280	256	340	344

単位: USD/tCO<sub>2</sub>

注)一部の国抜粋表示

✓ 「成長実現シナリオ」では、技術開発・普及が進展すると想定。2050年CNに向けて、相応のCO<sub>2</sub>限界削減費用が推計されるが、それでも、他国との相対的な費用差は、技術開発・普及を保守的に想定した「低成長シナリオ」と比較すると小さい。

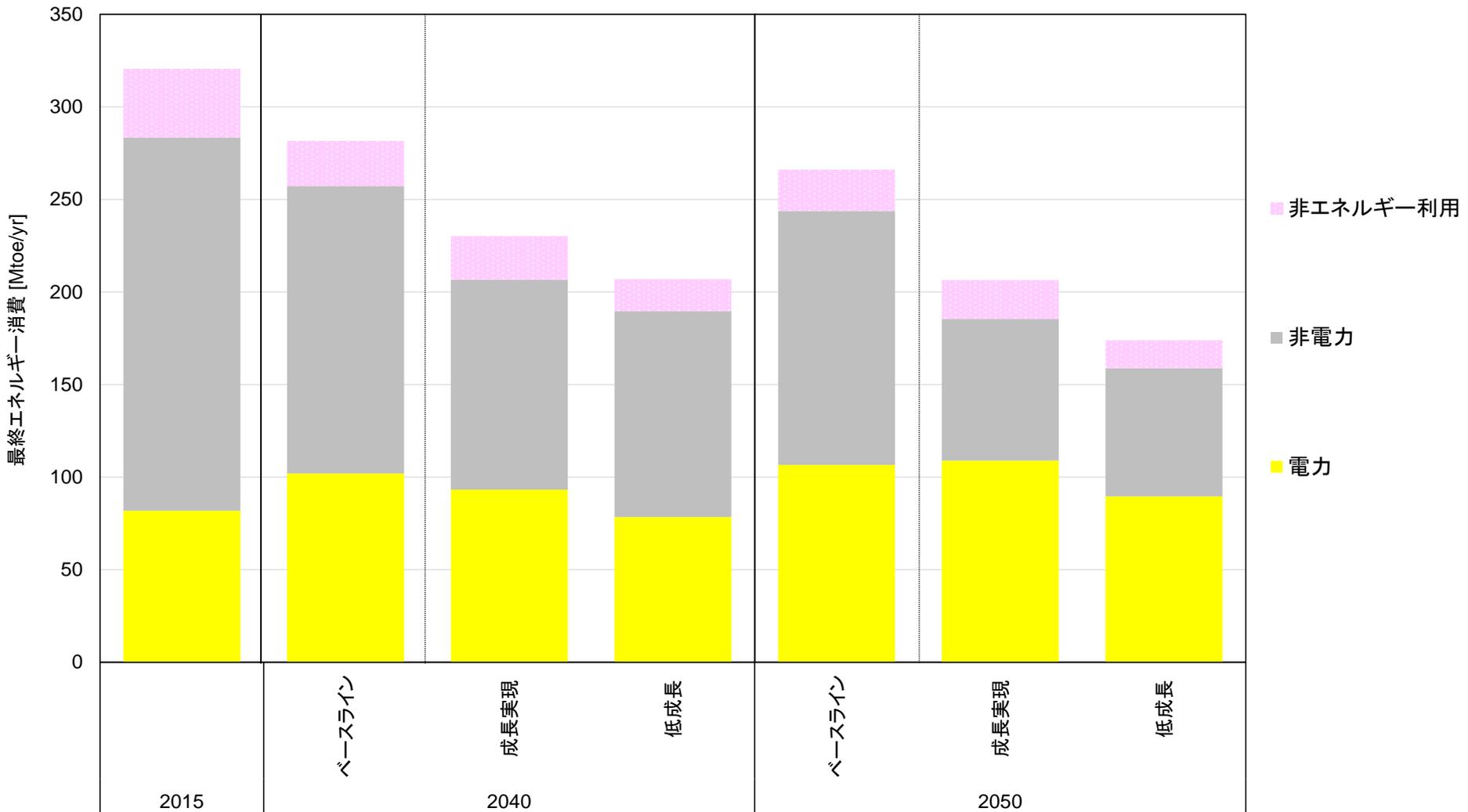
# 生産量・GDPの低下

ベースラインからの低減率	成長実現シナリオ (DEARS)		低成長シナリオ (価格弾性:▲1.0、所得 弾性:1.0 + RAS法)	
	2040	2050	2040	2050
鉄鋼 (生産量 [億トン/年])	-6.9% (0.86)	-9.6% (0.85)	-41% (0.54)	-47% (0.50)
化学	-6.6%	-10.2%	-35%	-41%
窯業土石(セメント含)	-2.4%	-2.1%	-30%	-35%
非鉄金属	-1.9%	-1.9%	-35%	-41%
紙パ	-4.7%	-5.9%	-33%	-38%
輸送機械	-5.4%	-6.5%	-42%	-49%
GDP (CO2削減技術の海外市場獲得効果含まず)	-4.6%	-5.3%	-13%	-14%
GDP, GNI (海外市場獲得効果含む)	内閣府「成長実現ケース」の一人当たりGDP成長率を若干上回る水準 (海外市場獲得効果:+5%程度)		上記とほぼ同様 (海外市場獲得効果は期待できず)	
経済成長率:2023年からの年成長率 ※ 人口低減見通しが含まれる	+1.1%/年	+0.7%/年	+0.5%/年	+0.3%/年

注) 気候変動による負の影響の緩和による便益は含んでいない。成長実現シナリオでは上記に追加的にGX⇒DXの正の経済効果もあり得る。

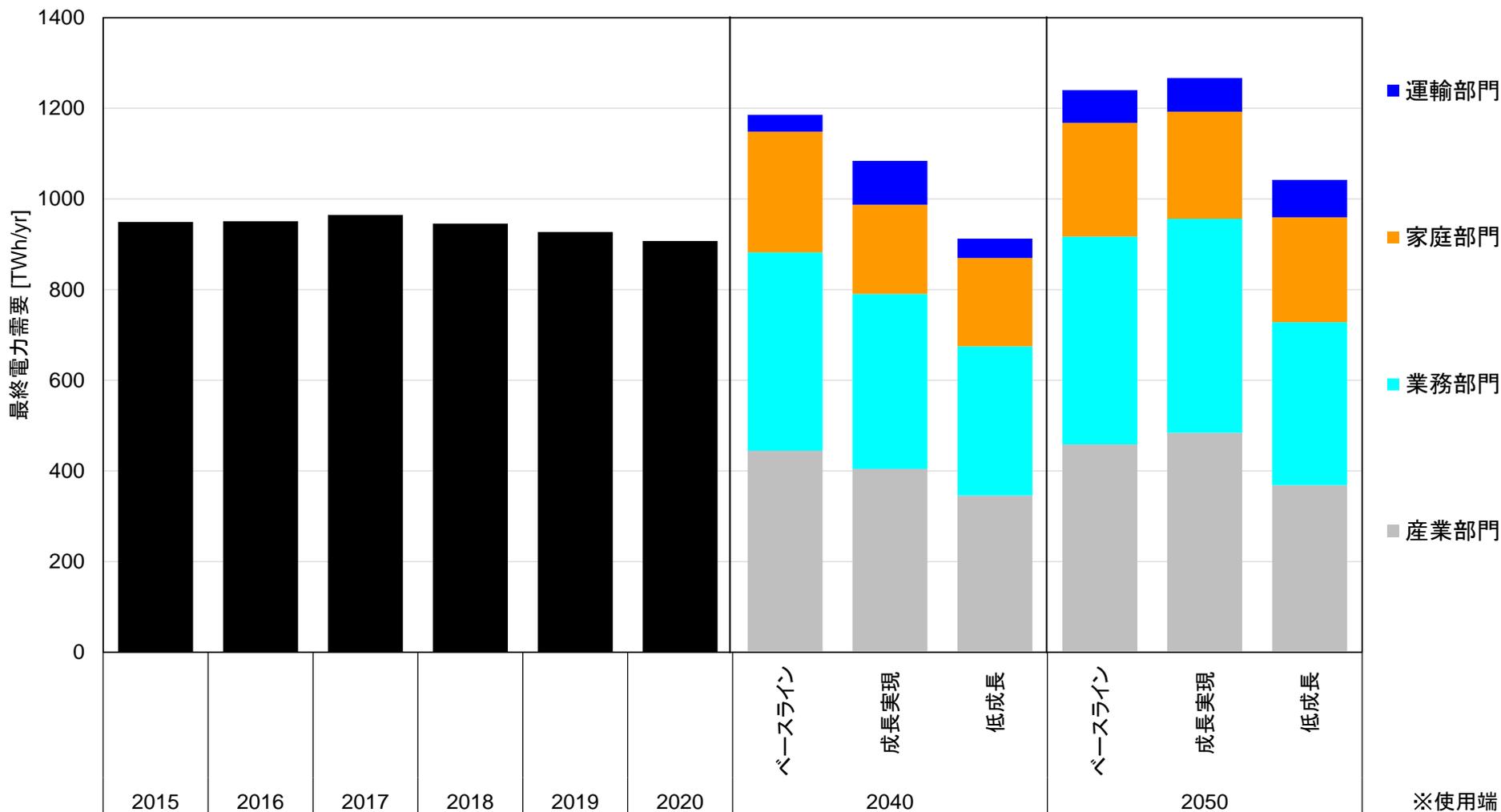
日本の相対的なエネルギー価格が高くなる「低成長シナリオ」では、経済成長率は低位。相対的なエネルギー価格差が小さい「成長実現シナリオ」では、排出削減対策の影響は相対的に小さく、CO2削減対策技術の国際的な優位性が加わることで、CNを実現しつつ内閣府の成長実現ケースの経済成長率(2040年まで1.0%/年)を若干上回る成長を達成

# 最終エネルギー消費量：電力・非電力・非エネルギー別



- ✓ 電力需要は増大、非電力需要は低下。「成長実現シナリオ」では電力需要は大きく増大
- ✓ とりわけ、「低成長シナリオ」では、経済成長が低く、電力需要、最終エネルギー消費量ともに相当抑制される。低経済成長によって、エネルギー需要が抑制され、CO2排出削減を実現

# 最終エネルギー消費量：部門別電力需要

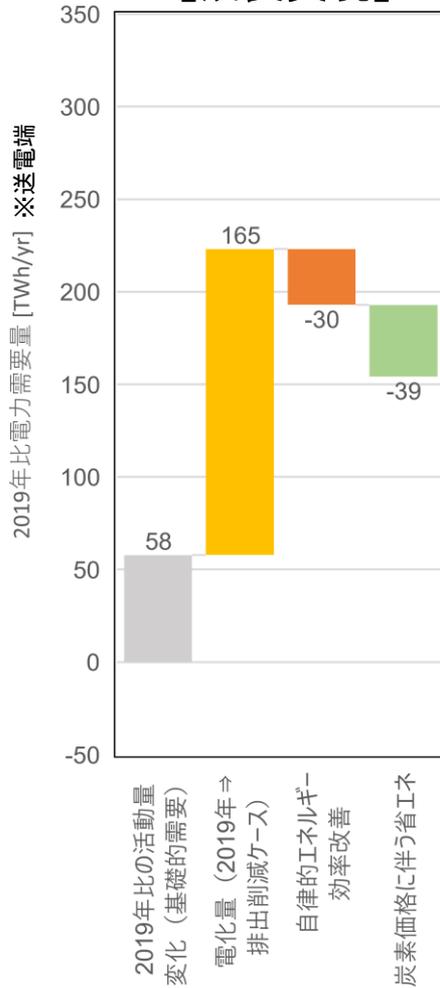


- ✓ 「低成長シナリオ」では、2040年まで電力需要はほぼ横ばい。2050年では、CN達成のため電化が必要で若干の需要増。ただし、エネルギー多消費産業は国外流出
- ✓ 「成長実現シナリオ」では、高経済成長とともに、IT需要増、海外との相対的な電力価格差も小さく、電力需要は大きく増大

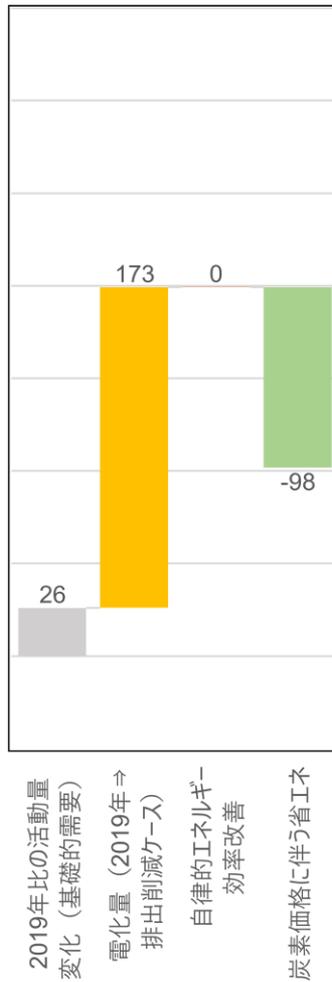
# 産業：基礎的需要、電化、省エネ（省電力）

2040年

【成長実現】

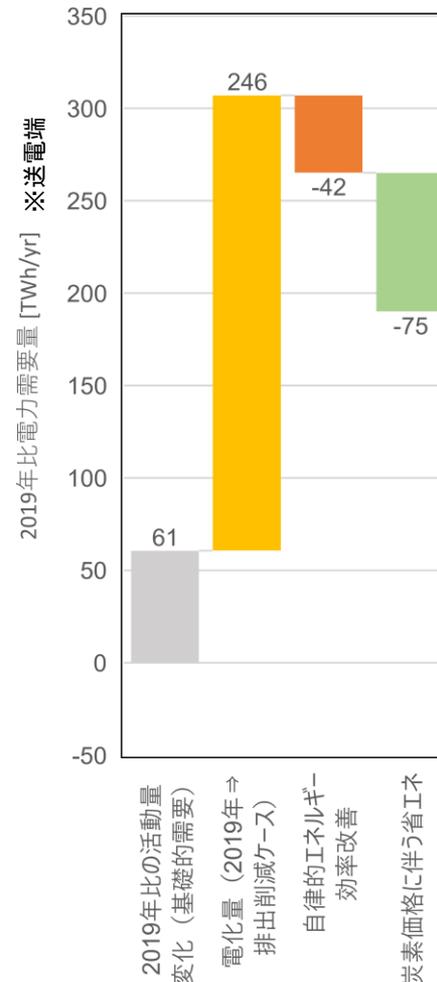


【低成長】

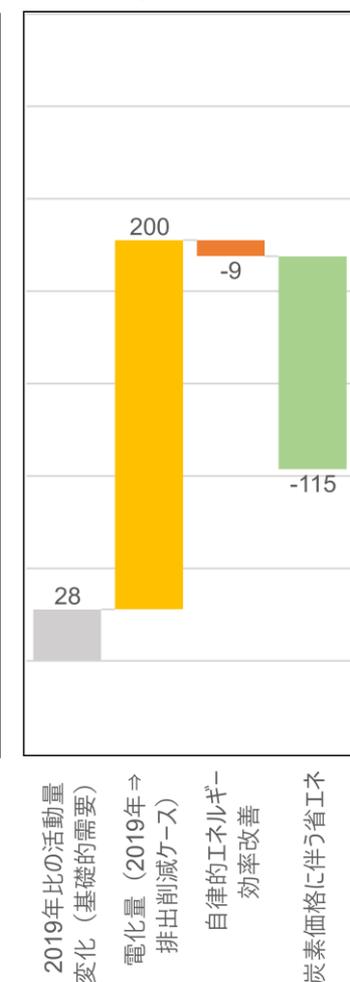


2050年

【成長実現】



【低成長】



- ✓ 「成長実現シナリオ」では、アフォーダブルな電力価格の実現により、産業の電化も一層進展
- ✓ 「低成長シナリオ」では、電力価格が高いため、「成長実現シナリオ」以上の大きな省電力が必要

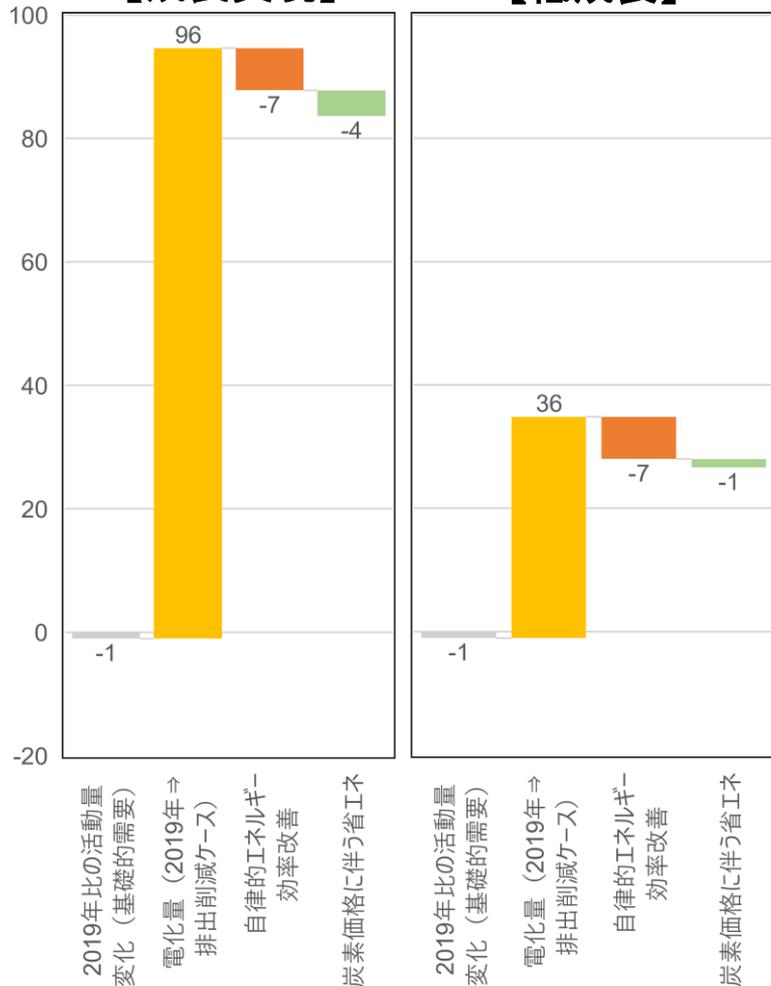
# 運輸：基礎的需要、電化、省エネ（省電力）

2040年

【成長実現】

【低成長】

2019年比電力需要量 [TWh/yr] ※送電端

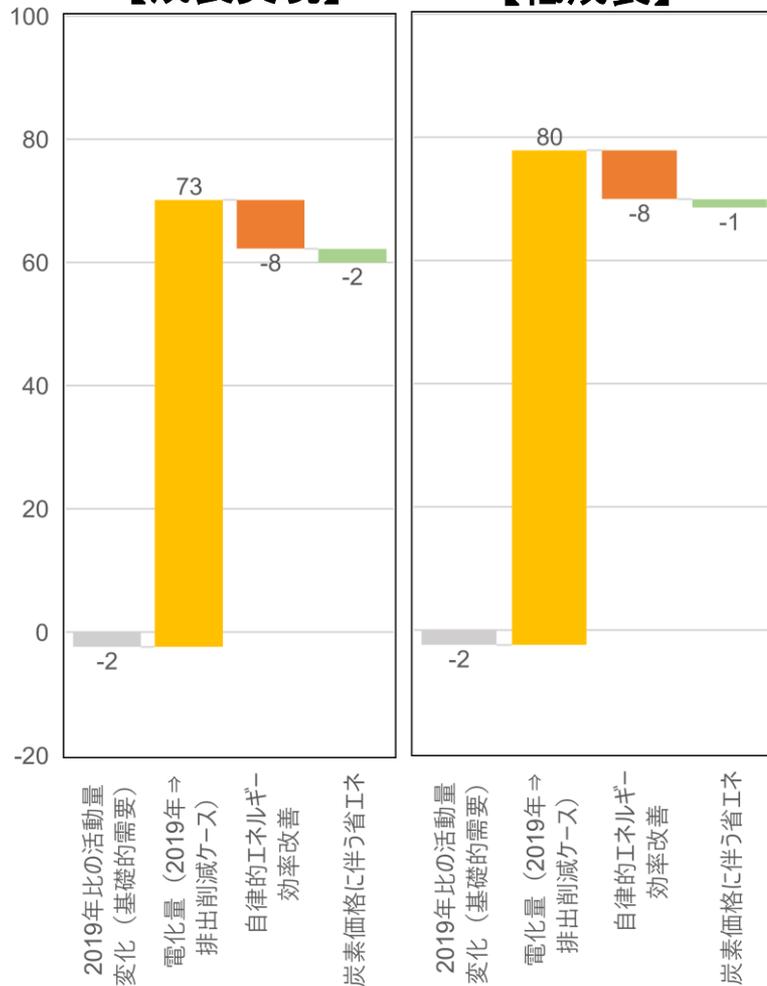


2050年

【成長実現】

【低成長】

2019年比電力需要量 [TWh/yr] ※送電端

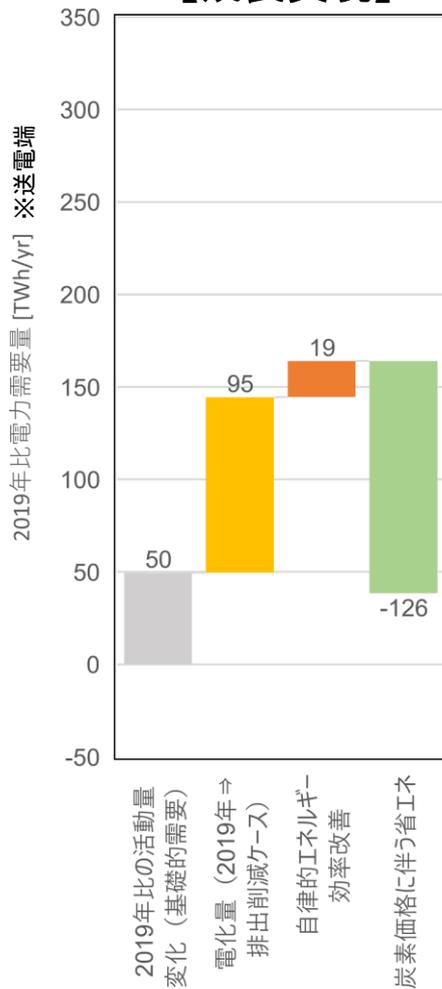


✓ 「成長実現シナリオ」の2040年では、EVバッテリー価格の低下に伴い、EVの普及が進み、電化が進展。2050年では、e-fuelsの大幅利用も経済効率的（「成長実現シナリオ」ではアフォーダブルに実現）

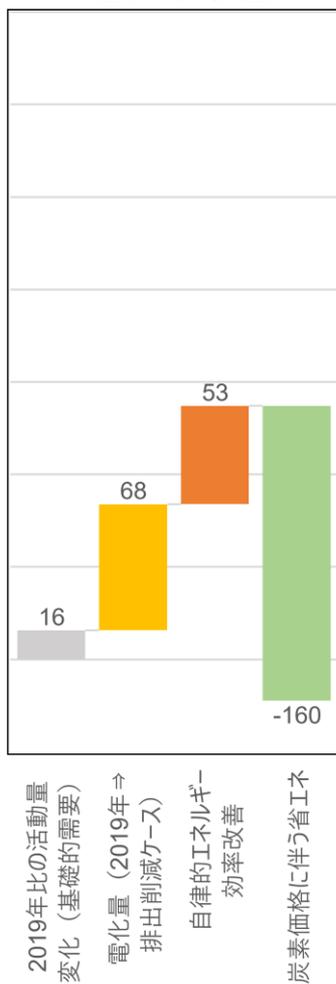
# 民生：基礎的需要、電化、省エネ（省電力）

2040年

【成長実現】

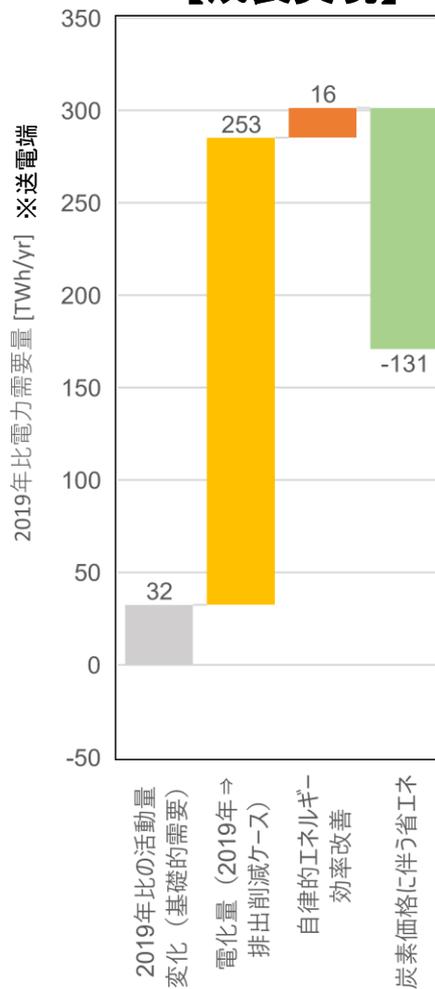


【低成長】

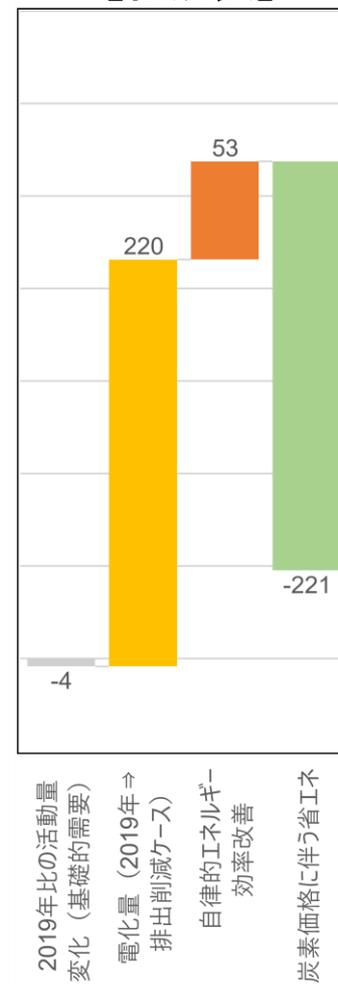


2050年

【成長実現】



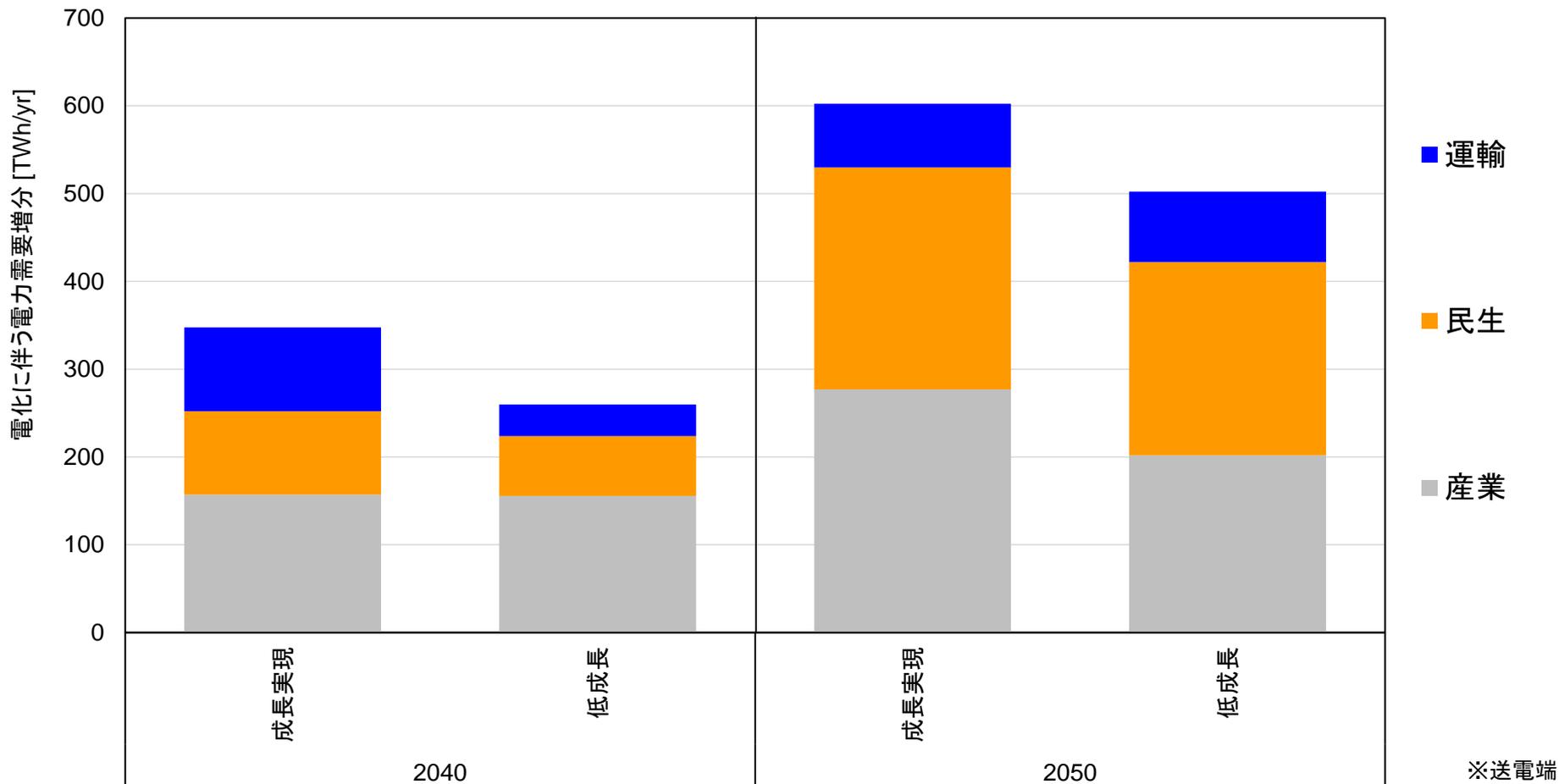
【低成長】



✓ 「低成長シナリオ」では、電力価格が高いため、「成長実現シナリオ」以上の大きな省電力が必要。これは簡単に言えば相当な無理をした省電力でもあり、結果、経済は低成長

# 電化に伴う電力需要増分

【定義】電化に伴う電力需要増分 = 基準年(2019年)比での電化率の上昇分 × 最終エネルギー消費量



✓ 大幅なCO<sub>2</sub>排出削減に向けて、すべての部門における電化の進展は重要であり、これに伴う電力需要の増大も大きい。

An aerial photograph of a cityscape. In the foreground, there is a large, well-maintained green golf course with several trees and a winding road. To the right, there are several modern, multi-story buildings, including a prominent white building with a curved facade. The background shows a dense urban area with many smaller buildings under a clear blue sky.

## 4. まとめ

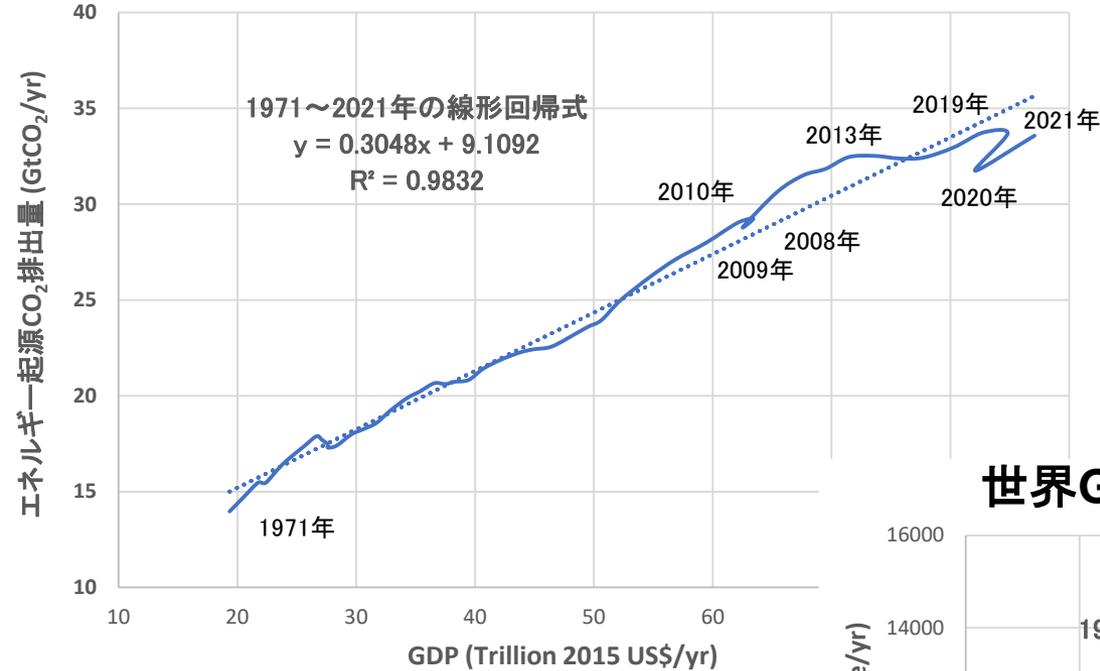
- ◆ 電化促進効果も相まって、最終エネルギー需要量は低下が見込まれるが、IT関連の需要増と電化によって、電力需要量は大きく増大する可能性がある。「成長実現シナリオ」では、2040年1080、2050年1270 TWh/年程度の見通し
- ◆ 他方、海外との相対的なエネルギー価格が高い場合（「低成長シナリオ」）は、エネルギー多消費産業の国際的な競争力低下により、海外移転が進み、電力およびエネルギー需要量は低位に推移する可能性もある。このとき、経済成長も低位となる可能性が高い。
- ◆ なお、民間企業の投資は、リスク回避的になりやすいので、「低成長シナリオ」が実現しない予見性を高めることは政府の重要な役割。それが「経済と環境の好循環」を実現する上で必須条件
- ◆ ここで提示したシナリオは、世界で1.5°C未満の目標達成、また、米国を含め、主要先進国は2030年NDC、2050年CN実現を前提とした分析としている。しかし、その目標達成は相当難しいとの見方もある。仮に日本以外の国が、本分析で想定した目標を達成せず、日本のみが想定した排出削減目標を達成する場合には、日本と他国とのCO2限界削減費用の差異はここでの分析結果以上に大きくなり、産業の海外移転は一層進むこととなるため、ここで提示した「低成長シナリオ」を更に下回る結果となり得ることに留意されたい。
- ◆ 逆に言えば、「成長実現シナリオ」は、海外との相対的なエネルギー価格が大きいことが前提であるため、このシナリオの経済成長実現においては、海外の状況に応じて、日本の排出削減目標も柔軟性を有した対応が必要
- ◆ また、GXをすすめる日本の低炭素・脱炭素技術の海外展開が加速すれば、日本経済の成長に大きく寄与する可能性があるため、海外市場獲得の取組は、いかなるシナリオ下においても重要

# 付録1 : CO<sub>2</sub>およびエネルギー動向

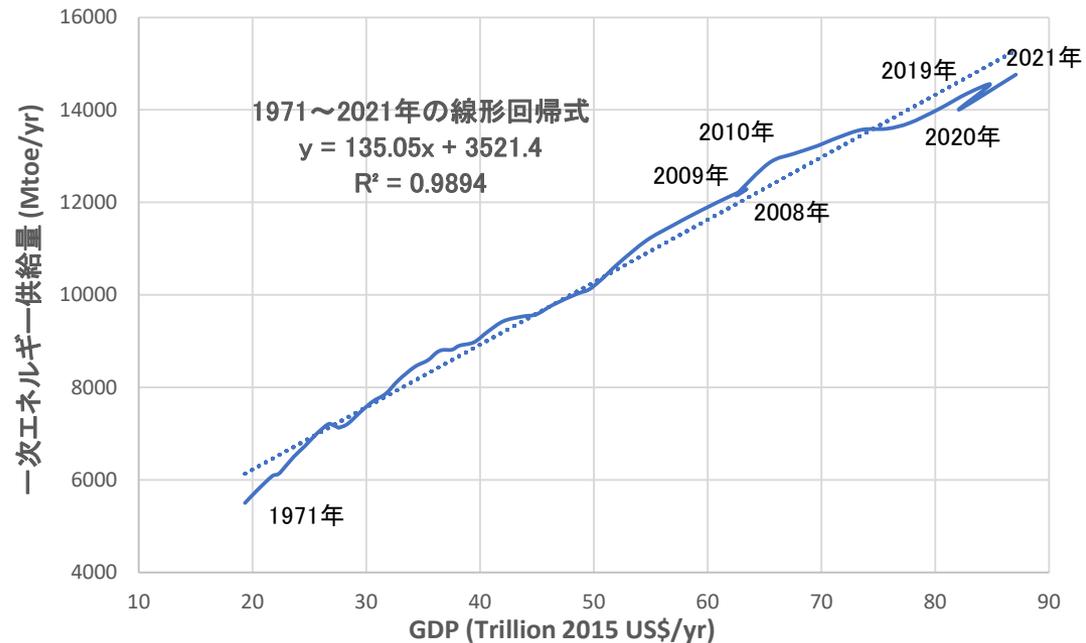
# 世界の経済成長とCO<sub>2</sub>排出量、一次エネルギー供給量の関係

## 世界GDPとCO<sub>2</sub>排出量の関係

出典) IEA GHG Emissions from Energy 2023を使用



## 世界GDPと一次エネルギー供給量の関係



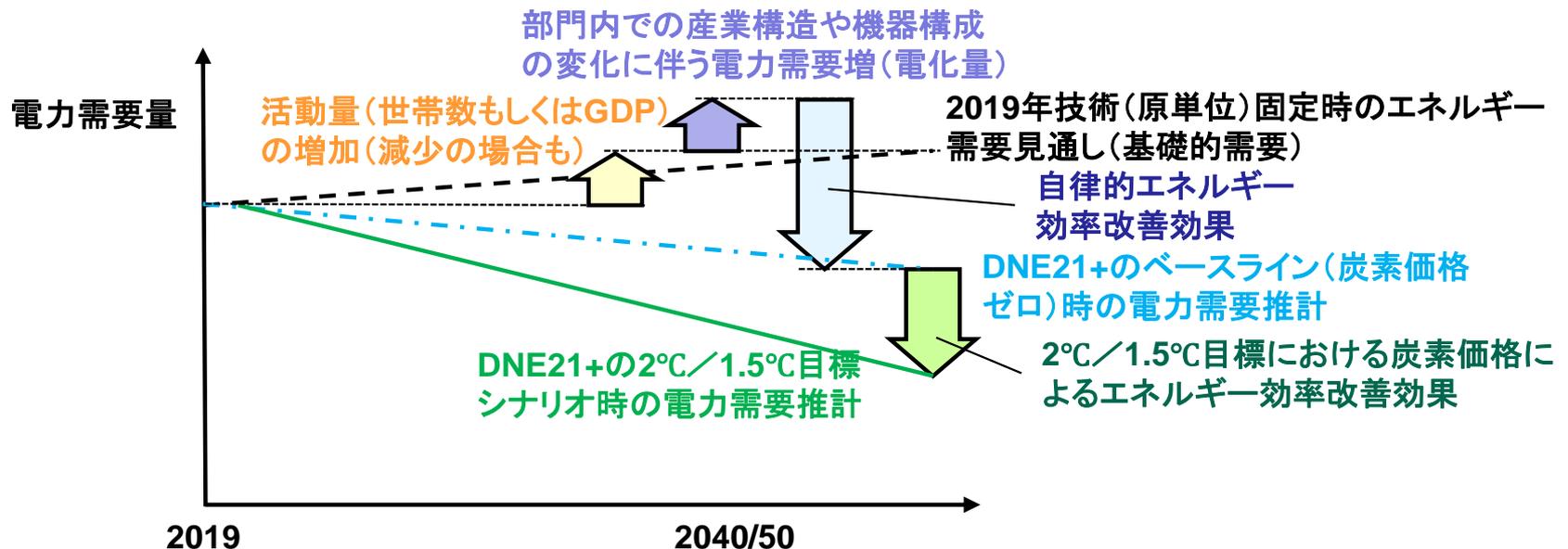
電力消費量ほどではないが、世界GDPとCO<sub>2</sub>排出量、また一次エネルギー供給量との間にも、まだ強い正の相関が見られる。

## 付録2：省エネ・電化の定義

# 省エネ（省電力）量、電化量の算定（概要）

以降の省エネ(省電力)量、電化量の算定は、以下のような定義に基づく。

- ◆ 各部門の基準需要量を、各部門の基準年(2019年)のエネルギー原単位(世帯当たり、もしくは、GDP当たりの最終エネルギー消費量)に、2040年もしくは2050年の世帯数もしくはGDPを乗じたもので定義(家庭部門:世帯数利用、業務、産業部門:GDP利用)。技術固定ケースと呼ぶ(基礎的需要に相当)。
- ◆ 電化量は、基準年(2019年)比での電化率の上昇分に最終エネルギー消費量で定義
- ◆ 化石燃料価格の上昇や設備や機器の時系列的なエネルギー効率改善に伴って生じる省エネ効果である、自律的エネルギー効率改善(AEEI)効果は、[(技術固定ケースの電力需要量+電化量) - ベースライン時の電力需要量]。炭素価格に伴うエネルギー効率改善効果は、[ベースライン時の電力需要量 - 排出削減シナリオ(炭素価格時)の電力需要量]として定義



## 【電力需要の茅恒等式分解】

$$ED = \frac{ED}{FD} \times \frac{FD}{ACT} \times ACT \quad \text{右辺第1項は電化に関連、第2項は総最終エネルギー需要における省エネ関連}$$

ED: 電力需要量、FD: 総最終エネルギー需要量、ACT: 活動量（世帯数もしくはGDP）  
以降の添え字、TF: 技術固定ケース（2019年基準）、BL: ベースラインシナリオ（炭素価格ゼロ）、CP: 排出削減シナリオ

## 【電化量の定義】

$$Electrification = \left( \frac{ED_{CP}}{FD_{CP}} - \frac{ED_{TF}}{FD_{TF}} \right) \times FD_{CP} \quad \text{TF} \Rightarrow \text{CP} \text{の間の電化量の場合}$$

注) FDは排出削減シナリオ（CP）を利用した。FDを技術固定ケース（TF）とすることも可能なので注意されたい。

## 【省電力量の定義】

$$\text{電力需要量の変化: } ED_{TF} - ED_{CP} = \frac{ED_{TF}}{FD_{TF}} \times FD_{TF} - \frac{ED_{CP}}{FD_{CP}} \times FD_{CP}$$

ここで定義する省電力量には、電化による電力需要量の増大効果が含まれ、かつ交差項となり一義的な分離は不可能だが、上記でCPケースを用いたFDで定義した電化量を差し引くことで、省電力効果を定義した。

$$\text{省電力量: } (ED_{TF} - ED_{CP}) + Electrification = \frac{ED_{TF}}{FD_{TF}} \times (FD_{TF} - FD_{CP})$$

なお、省電力量は、技術固定ケースからベースラインまでの自律的エネルギー効率改善効果と、炭素価格による省エネ効果に更に分離できる。

$$\text{自律的エネルギー効率改善効果: } ED_{TF} - ED_{BL}$$

$$\text{炭素価格効果による省エネ効果: } ED_{BL} - ED_{CP}$$