

京都大学・再エネ講座シンポジウム2022

(2022年12月9日)



日本の2050年カーボンニュートラル達成に向けた 脱炭素制度設計と日本の経済・産業に与える影響分析 －E3MEマクロ計量経済モデルによる分析－

李秀澈(名城大学)

slee@meijo-u.ac.jp

※本報告は、京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー
経済学講座（座長：諸富徹教授）【部門C】の研究成果である。

今日の報告の元になる研究

■ 加藤真也, 李秀澈, 何彦旻, 吉岡努, 諸富徹, Unnada Chewpreecha 「[日本の2030年温室効果ガス削減目標及び電源計画達成を前提とした2050年カーボンニュートラルに向けた経済・産業への影響分析](#)」 京都大学再エネ講座DP43、2022年9月

■ Soochaeol Lee, Yanmin He, Sunhee Suk, Toru Morotomi, Unnada Chewpreecha (2022) "Impact on the power mix and economy of Japan under a 2050 carbon-neutral scenario: Analysis using the E3ME macro-econometric model", *Climate Policy*, Volume 22, pp.823-833.

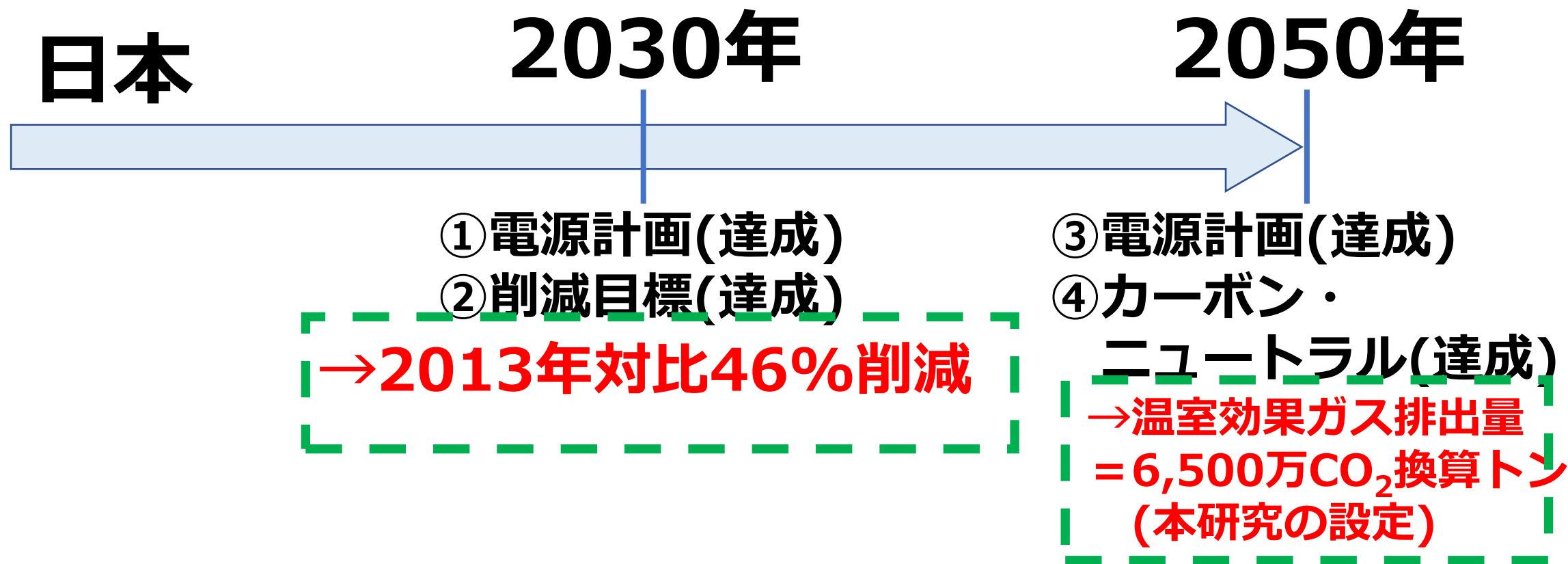
目次

1. 研究の概要と目的
2. E3MEモデルの概要
3. カーボンニュートラルに向けた
脱炭素政策シナリオの設定と二酸化炭素排出経路
4. 2050年カーボンニュートラルの日本の電源構成、
マクロ経済及び産業生産に与える影響
5. 結論と今後の課題

研究の概要と目的



研究の概要と目的



上記4つを達成する**脱炭素パッケージ**を設定
⇒ 2050年までの**電源構成・マクロ経済の変化、
産業別のCO₂排出量・生産の変化等を推定**

分析ツール

E3MEモデル

E3ME : Energy-Environment-Economy Macro Econometrics

ケンブリッジ大学と
ケンブリッジ・エコノメトリクス研究所が開発

EU委員会やイギリス政府等が
気候変動政策策定に重用している
⇒ IPCCの第4次報告書で、
唯一のマクロ計量モデルとして分析に採用

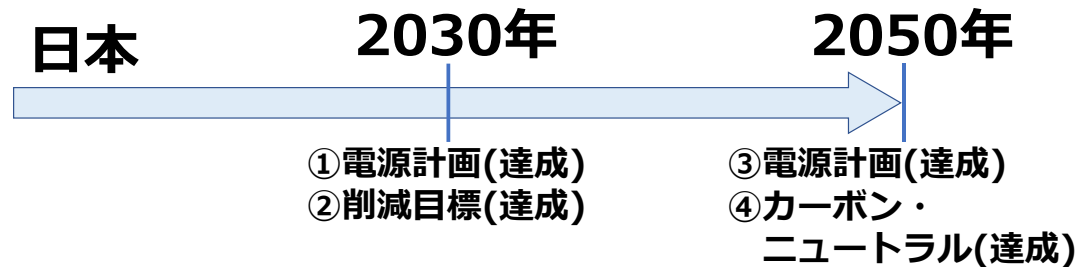
E3MEモデルの特徴

- ・ 大規模グローバル・マクロ計量モデル
- ・ 有効需要がGDPを決定するポストケインジアン理論に基づく
- ・ 2050カーボンニュートラル達成のための、**多様な脱炭素政策設定と（カーボンプライシング、補助、規制等）** シミュレーションが可能である
- ・ 炭素税など**カーボンプライシング**による炭素費用の上昇で、
低炭素技術革新や関連投資が促進され、経済へプラスの影響が出やすい

世界62カ国・地域分析可能
42・64産業分析可能

①電源計画：2030年

第6次エネルギー基本計画



(2019年 ⇒ 旧ミックス)

2030年度ミックス (野心的な見通し)

省エネ		(1,655万kl ⇒ 5,030万kl)		6,200万kl	
最終エネルギー消費（省エネ前）		(35,000万kl ⇒ 37,700万kl)		35,000万kl	
電源構成	再エネ	(18% ⇒ 22~24%)	太陽光 6.7% ⇒ 7.0%	36~38%※ ※現在取り組んでいる再生可能エネルギーの研究開発の成果の活用・実装が進んだ場合には、38%以上の高みを目指す。	(再エネの内訳) 太陽光 14~16% 風力 5% 地熱 1% 水力 11% バイオマス 5%
	水素・アンモニア	(0% ⇒ 0%)	風力 0.7% ⇒ 1.7%		
	原子力	(6% ⇒ 20~22%)	地熱 0.3% ⇒ 1.0~1.1%		
	LNG	(37% ⇒ 27%)	水力 7.8% ⇒ 8.8~9.2%		
	石炭	(32% ⇒ 26%)	バイオマス 2.6% ⇒ 3.7~4.6%		
	石油等	(7% ⇒ 3%)			
発電電力量: 10,650億kWh ⇒ 約9,340 億kWh程度					
(+ 非エネルギー起源ガス・吸収源)					

温室効果ガス削減割合 (14% ⇒ 26%)

46%
更に50%の高みを目指す

(引用) 資源エネルギー庁(2021)「エネルギー基本計画の概要」

①電源計画：2030年

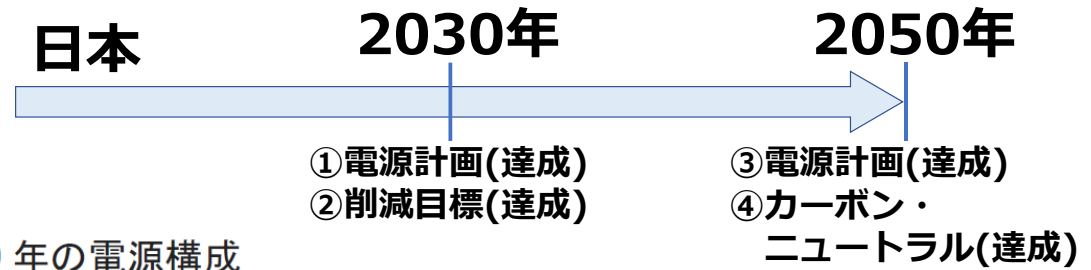
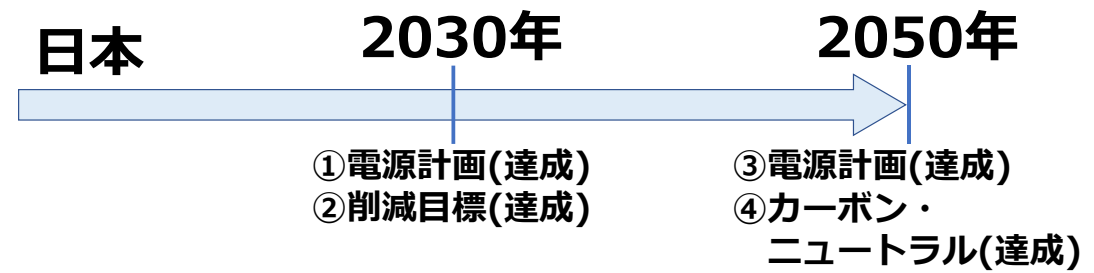


表2 政策シナリオ I 及び II における 2030 年の電源構成

出典：政府の 2030 年における電源計画（第 6 次エネルギー基本計画）及び本研究の設定による。

政策シナリオ I (S1)		政策シナリオ I (政府の 2030 年電源計画)	政策シナリオ II (本研究の設定)	政策シナリオ II (S2)
2030 年温室効果ガス目標		46%削減 (2013 年比)	内生的に決定される	
再エネ	原子力	20%	2040 年にフェーズアウト	
	石炭	19.0%	2040 年にフェーズアウト	
	LNG	20.0%	内生的に決定される	
	石油	2.0%	内生的に決定される	
	小計	38.0%	内生的に決定される	
	太陽光	15.7%		
	洋上風力	3.7%		
	陸上風力	1.8%		
	地熱	1.2%		
	水力	10.5%		
	バイオマス	5.1%		
水素・アンモニア		1.0%	内生的に決定される	
合計		100.0% (総発電量：9,340 億 kWh)	100.0%	

②削減目標：2030年



温室効果ガス排出量46%削減(2013年比)

④カーボン・ニュートラル：2050年

2050年の

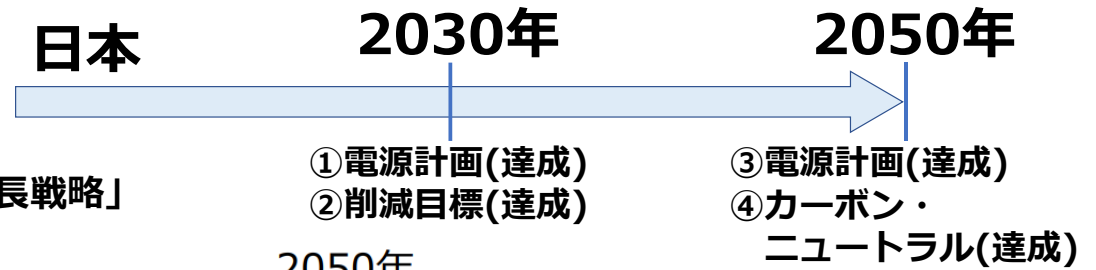
温室効果ガス排出量

= 6,500万CO₂換算トン (本研究の設定)

⇒ 森林等による吸収量

③電源計画：2050年

(引用) 成長戦略会議(2021)「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」

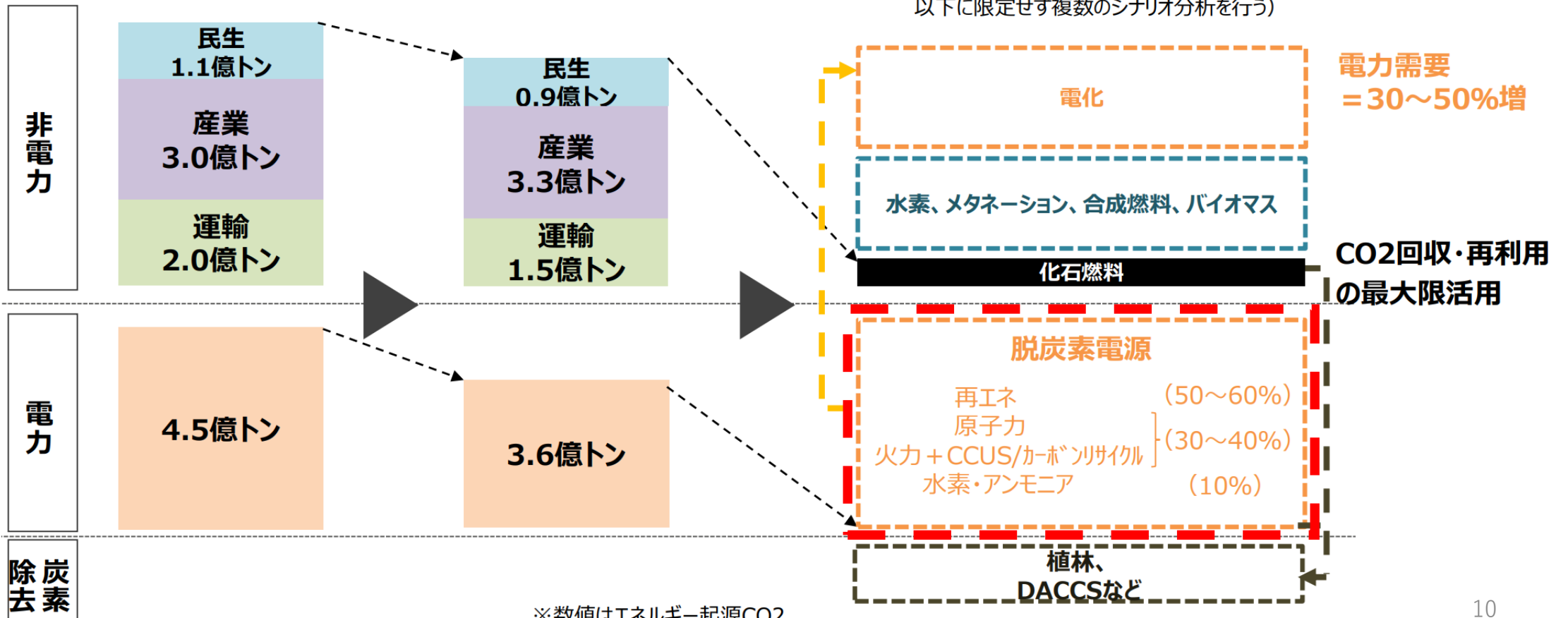


2018年
10.6億トン

2030年ミックス
9.3億トン (▲25%)

2050年
排出+吸収で実質0トン
(▲100%)

(今後議論を深めていくための参考値。今後、
以下に限定せず複数のシナリオ分析を行う)



③電源計画：2050年

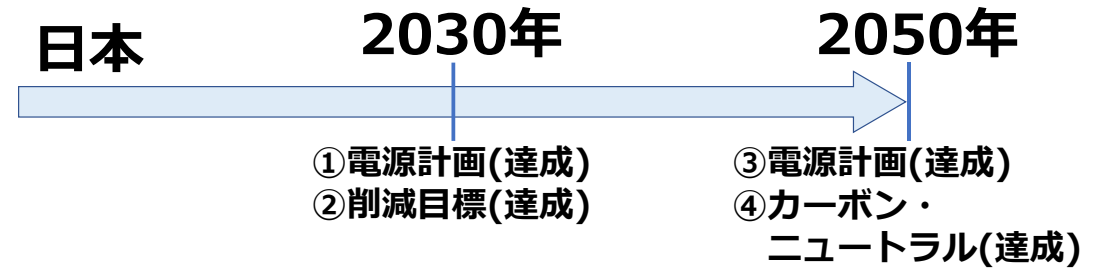


表3 政策シナリオⅠ及びⅡにおける2050年の電源構成

注：政府の2050年電源計画検討案では、火力+CCUS及び再生可能エネルギーの細部電源については示されていない。細部の電源シェアはモデルの中で内生的に決定される。

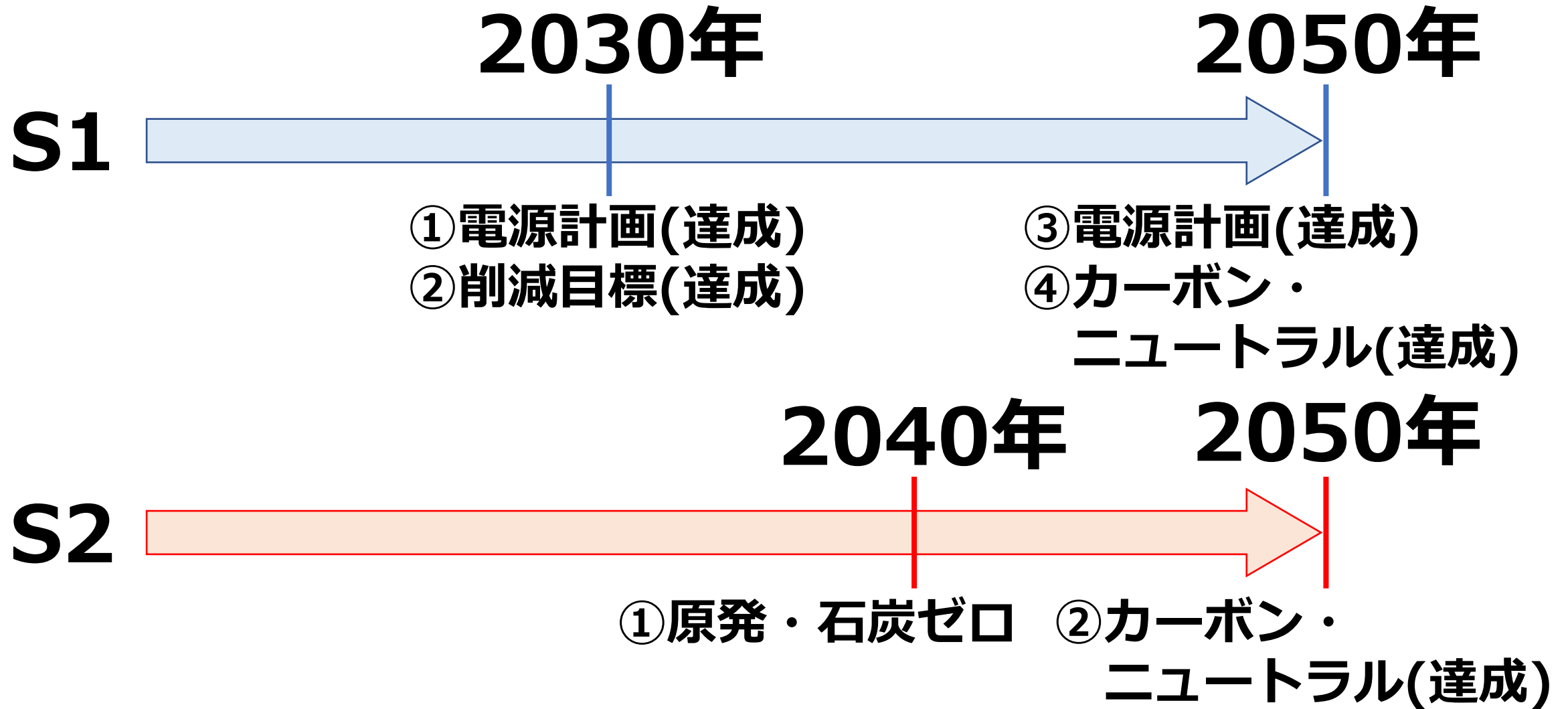
出典：政府の2050年電源計画検討案（成長戦略会議, 2021）及び本研究の設定による。

政策シナリオⅡ(S2)

政策シナリオⅠ(S1)

	政策シナリオⅠ (政府の2050年電源計画検討案)	政策シナリオⅡ (本研究の設定)
2050年温室効果ガス目標	カーボンニュートラル	カーボンニュートラル
原子力	10%	2040年にフェーズアウト
火力+CCUS	30%	石炭火力は2040年にフェーズアウト
再生可能エネルギー	60%	内生的に決定される
水素・アンモニア	10%	内生的に決定される
合計	100%	100%

政策シナリオの概念図

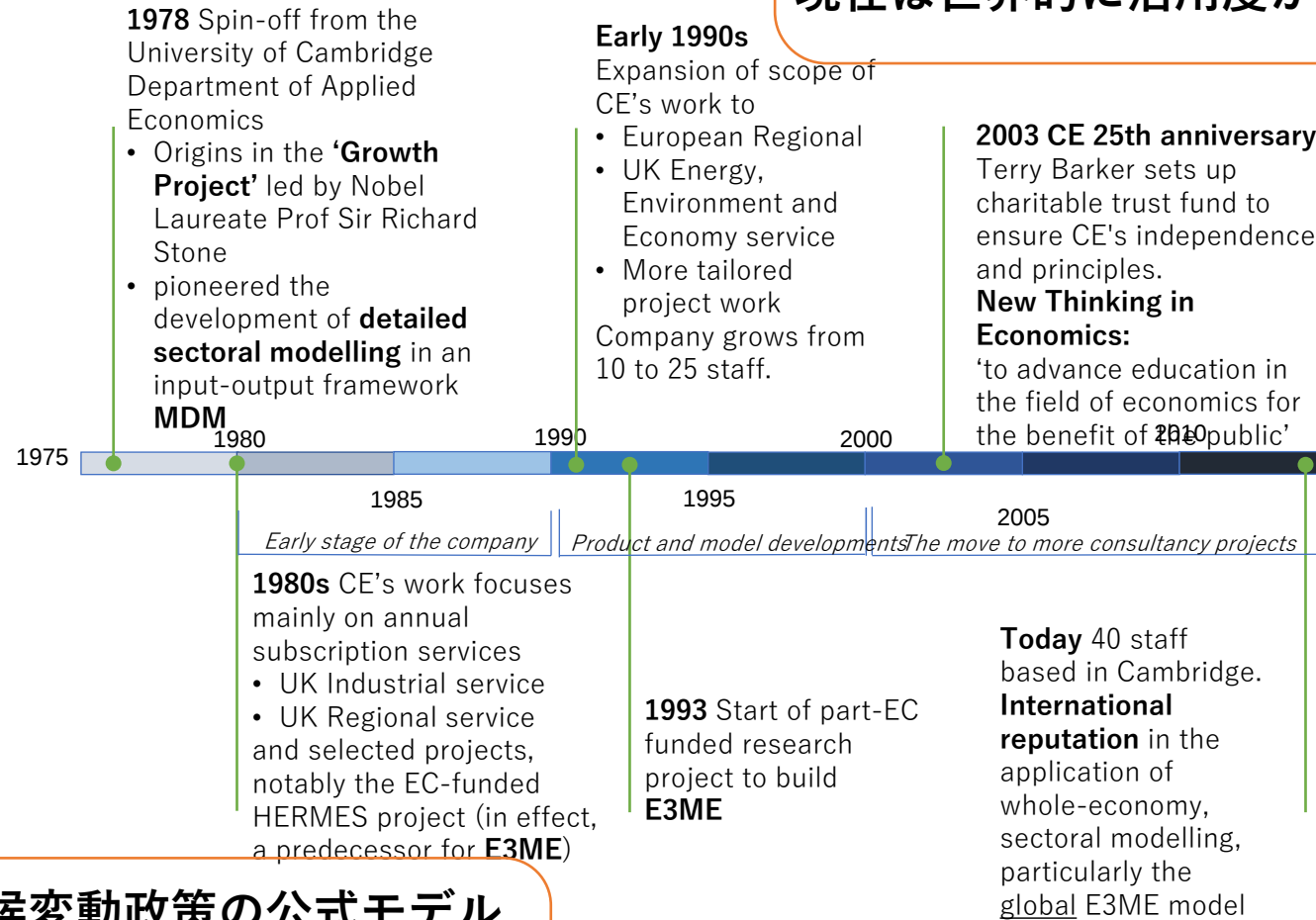




E3MEモデルの概要

E3MEモデルの沿革

1970年代にケンブリッジ大学・ケンブリッジエコノメトリックスで開発・運用されており、ヨーロッパでは最も知られているマクロ計量経済モデルであり、現在は世界的に活用度が広がっている。



EU Commissionの気候変動政策の公式モデルとして採用されており、近年のClean Energy Package, Climate and Energy Framework(2030)でも活用されている

E3MEモデルの概要

①世界の62国・地域をカバー

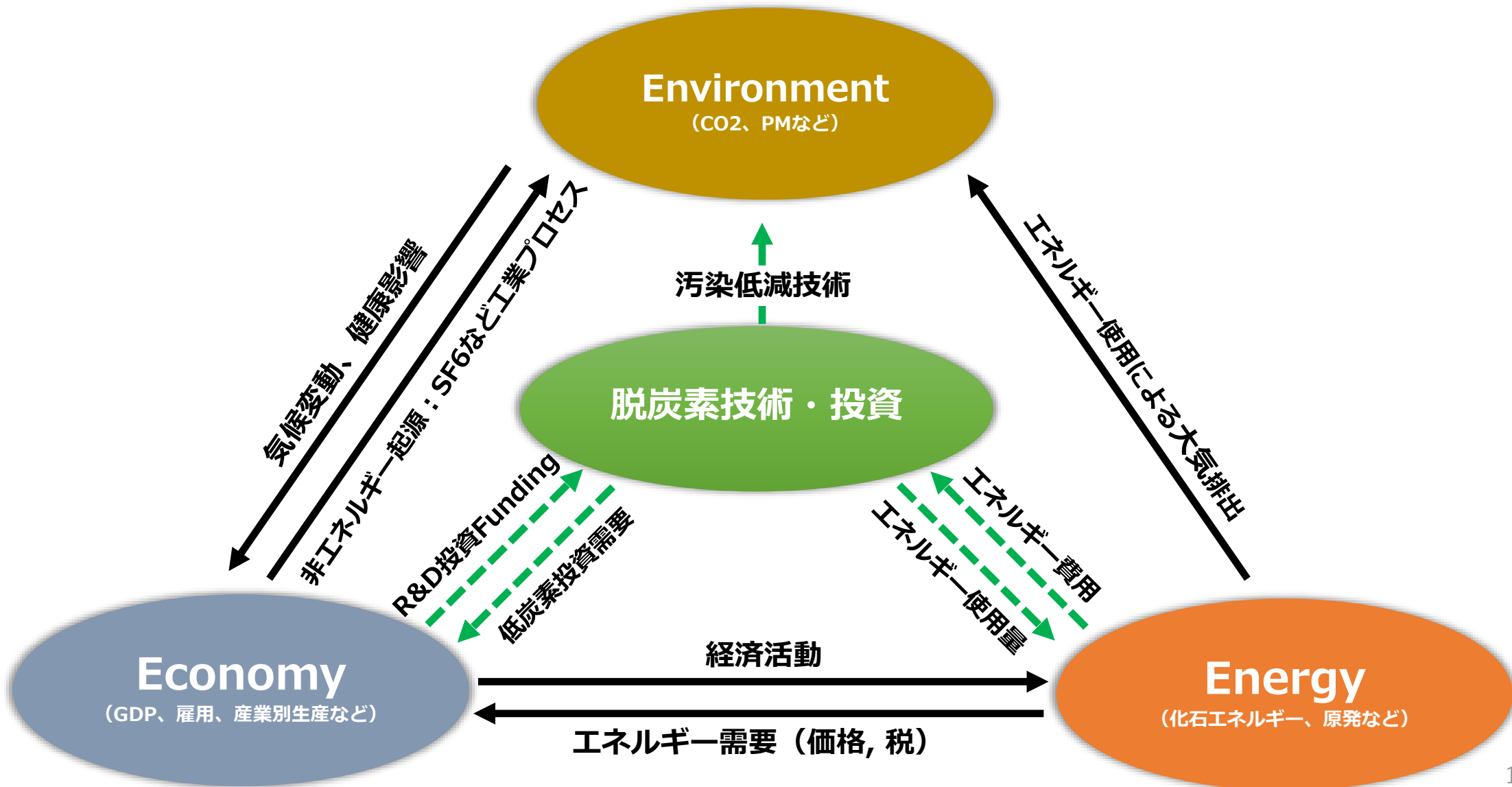
G20のすべての国、EUのすべての加盟国、日中韓など東アジアの一部の国を明示的にカバーし、ASEAN諸国はグループ化されている

②42産業（EUの場合64産業まで分析可能）

③24種類の発電技術(E3ME-FTTモデル)

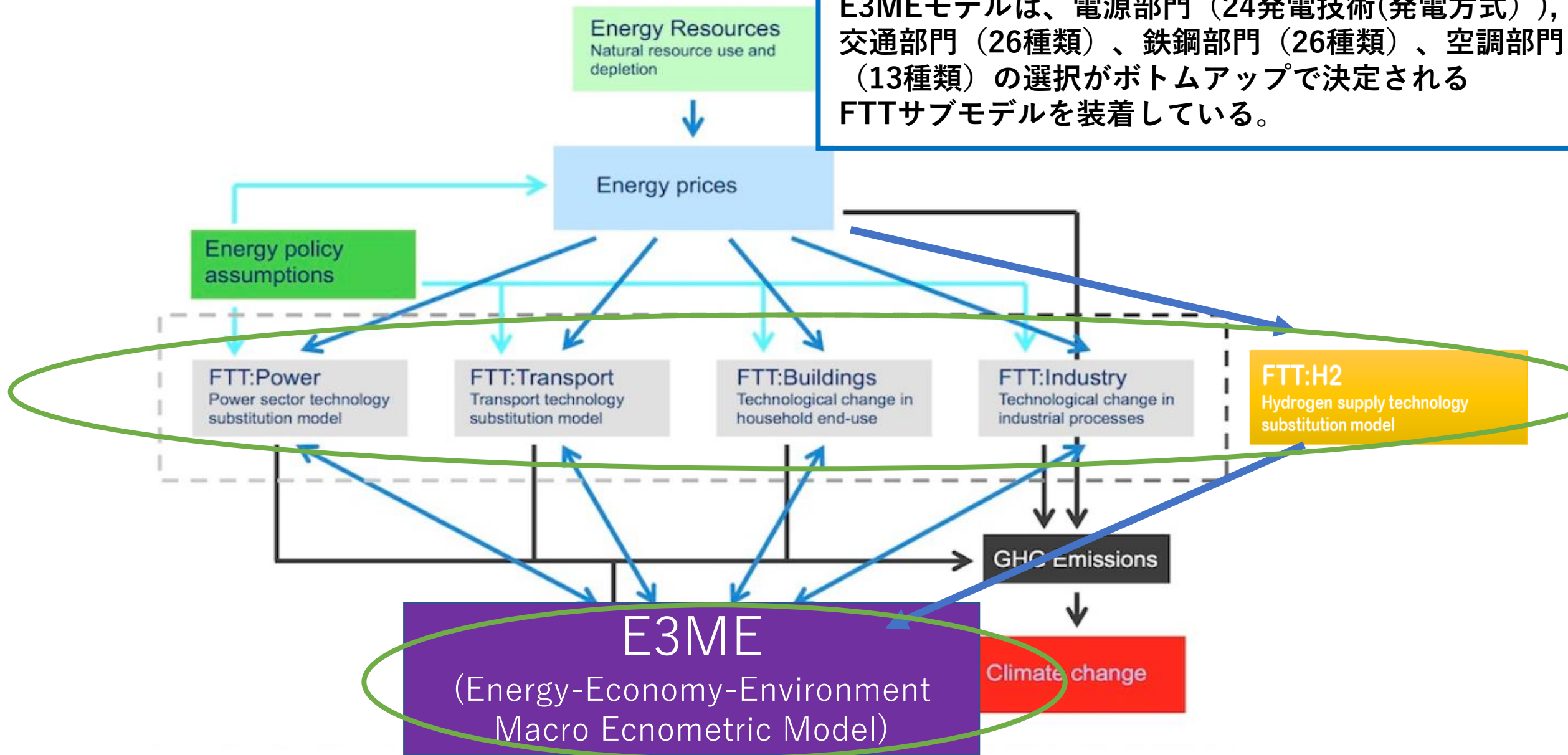
原子力	個体バイオマス	陸上風力
石油火力	個体バイオマス+CCS	洋上風力
石炭火力(微粉炭方式=PC)	バイオマス(IGCC)	太陽光
石炭火力(ガス化複合=IGCC)	バイオマス(IGCC+CCS)	集光型太陽熱発電
石炭火力(PC+CCS)	バイオガス	地熱
石炭火力(IGCC+CCS)	バイオガス+CCS	波力
ガス火力(コンバインド=CCGT)	潮力	燃料電池
ガス火力(CCGT+CCS)	大型水力	コージェネレーション(CHP)

E3MEモデルの基本構造とメカニズム



The FTT(Future Technology Transformation) family of E3ME

E3MEモデルは、電源部門（24発電技術(発電方式)）、交通部門（26種類）、鉄鋼部門（26種類）、空調部門（13種類）の選択がボトムアップで決定されるFTTサブモデルを装着している。



発電技術に関するFTTインプットデータ

出所：IEA (2016)

From: IEA Projected costs of generating electricity																		
	p.103	p. 62-63							43									
	Discount rate 10%		Rate increase price of carbon 1%		Starting price of carbon 22.10 \$/t		1%											
	Carbon Costs	std	Overnight	std	Fuel	std	O&M	std	Lifetime	Lead Time	Load Factor	Type	LCOE	std	Fuel CO2	Efficiency	Emissions	Learning rate
	\$/MWh	\$/MWh	\$/kw	\$/MWh	\$/MWh	\$/MWh	\$/MWh	\$/MWh	years	years		0,1,2,3	\$/MWh	\$/MWh	kgCO2/GJ	%	tCO2/GWh	
Nuclear	0	0	4896.00	1525.05	9.60	2.33	11.00	6.15	60	7	85%	1	109.95	34.41	0.0	100%	0.0	-0.086
Oil	0	0	1227.84	1033.63	223.66	239.52	22.13	5.69	40	4	85%	1	265.34	256.04	73.3	45%	586.4	-0.014
Coal	0	0	2292.95	775.01	25.62	11.23	7.41	6.02	40	4	85%	1	69.54	25.08	99.4	43%	832.2	-0.044
Coal + CCS	0	0	4224.69	1172.55	22.43	10.23	15.02	4.55	40	4	85%	1	104.72	29.87	99.4	37%	96.7	-0.074
GCC	0	0	3829.06	1705.94	20.05	1.57	10.09	1.51	40	4	85%	1	91.11	29.34	99.4	42%	852.0	-0.044
GCC + CCS	0	0	4521.14	1523.05	19.96	7.50	12.87	0.52	40	4	85%	1	104.83	31.77	99.4	37%	96.7	-0.074
CCGT	0	0	1067.00	336.75	66.46	16.52	5.82	2.80	30	2	85%	1	88.23	21.79	56.1	57%	354.3	-0.059
CCGT + CCS	0	0	2446.53	520.63	71.20	1.47	6.42	0.40	30	2	85%	1	114.19	9.31	56.1	47%	43.0	-0.074
Solid Biomass	0	0	4007.00	2587.47	93.24	72.94	18.55	26.53	40	4	85%	2	175.59	118.82	0.0	43%	0.0	-0.074
Biomass CCS	0	0	5938.74	2985.00	93.24	72.94	18.55	26.53	40	4	85%	2	206.35	125.15	-112.0	37%	-980.8	-0.105
IGCC	0	0	3829.06	1705.94	93.24	72.94	10.09	1.51	40	4	85%	2	164.30	100.12	0.0	42%	0.0	-0.074
IGCC + CCS	0	0	4521.14	1523.05	93.24	72.94	12.87	0.52	40	4	85%	2	178.10	97.19	-112.0	37%	-980.8	-0.105
Nat Gas	0	0	3733.00	3519.63	0.00	36.62	60.52	5.84	30	2	85%	2	116.32	89.69	0.0	57%	0.0	-0.074
Nat Gas + CCS	0	0	5112.53	3703.50	0.00	36.62	60.52	5.84	30	2	85%	2	136.94	92.44	-54.6	47%	-376.4	-0.105
Small Hydro	0	0	2782.50	3538.98	0.00	0.00	38.40	6.45	80	7	85%	3	89.04	70.86	0.0	100%	0.0	-0.020
Large Hydro	0	0	2492.50	2499.96	0.00	0.00	9.86	10.43	80	7	85%	3	55.21	55.92	0.0	100%	0.0	-0.020
Onshore	0	0	1841.00	443.49	0.00	0.00	21.38	8.67	25	1	30%	0	98.50	27.25	0.0	100%	0.0	-0.105
Offshore	0	0	5000.00	579.58	0.00	0.00	40.71	19.82	25	1	42%	0	190.32	37.17	0.0	100%	0.0	-0.136
Solar PV	0	0	1833.50	552.90	0.00	0.00	22.80	15.57	25	1	14%	0	187.39	65.20	0.0	100%	0.0	-0.269
Wind	0	0	4901.00	1859.10	0.00	0.00	17.38	22.10	25	1	55%	0	129.37	64.58	0.0	100%	0.0	-0.152
Geothermal	0	0	5822.50	2036.63	0.00	0.00	17.28	34.10	40	4	85%	3	109.99	66.53	0.0	100%	0.0	-0.074
Wave	0	0	5142.07	2414.85	0.00	0.00	55.91	36.58	20	1	46%	0	207.34	107.70	0.0	100%	0.0	-0.218
Fuel Cells	0	0	5884.82	5459.00	58.71	54.56	53.70	49.81	20	2	85%	1	205.17	159.93	15.3	80%	68.9	-0.234
HP	0	0	2000.00	4358.28	65.74	15.21	15.93	31.85	40	2	85%	1	76.82	124.79	15.3	80%	68.9	-0.044

発電技術

建設費

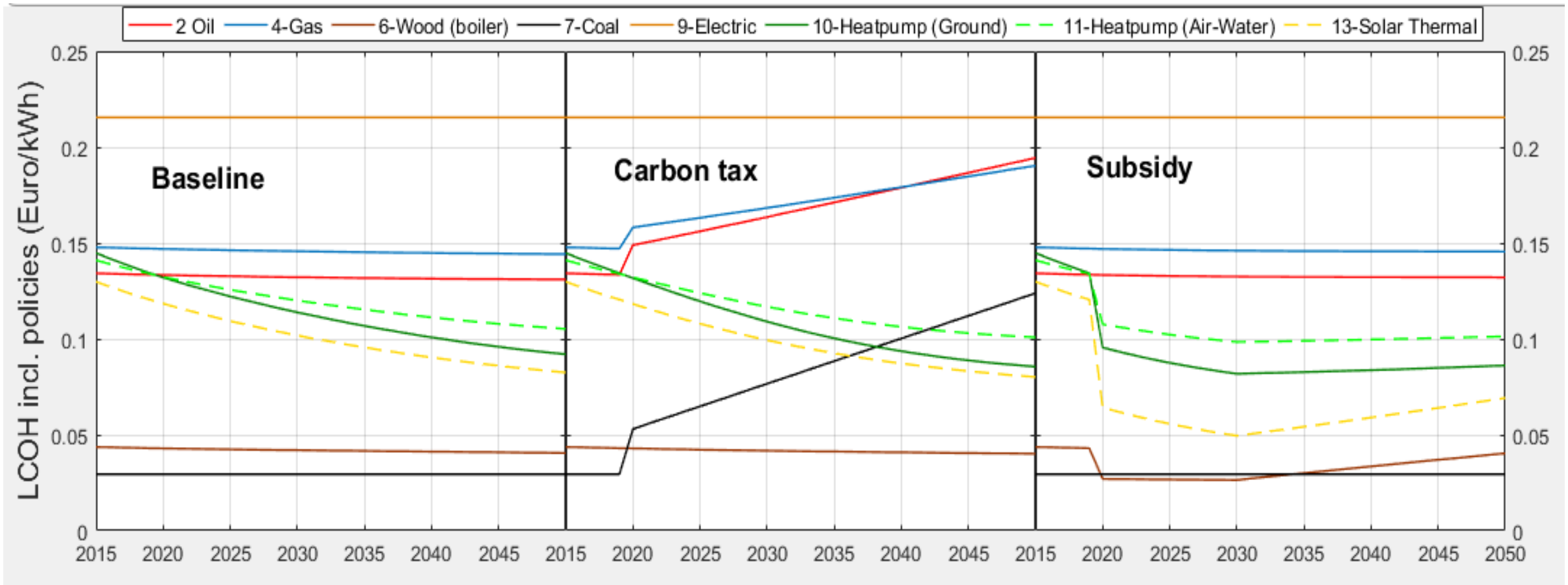
燃料代

オペレーションコスト

発電コスト

排出量

Effect of policies on the levelized cost

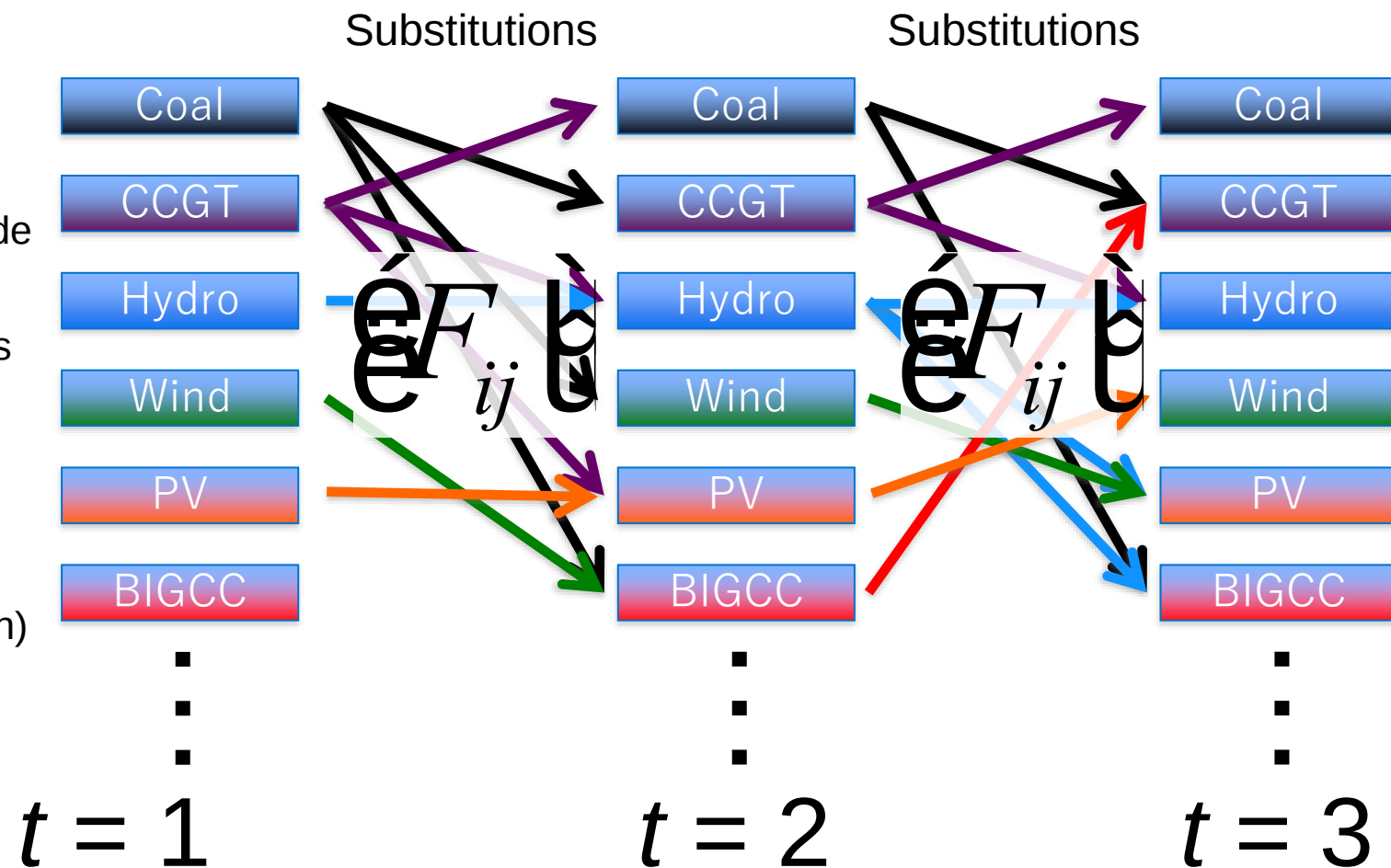


FTT: Power

Modeling technology substitution

Simulates:

- The future replacement and diffusion
- Of power technologies
- By power generation sectors worldwide (59 world regions)
- Based on dynamical shares equations (the FTT method – no optimisation)
- Useful energy demand by country as an exogenous driver (depending on future levels of construction/generation)



E3MEモデル v.s. CGEモデル

Keynes v.s. Walras



https://en.wikipedia.org/wiki/John_Keynes

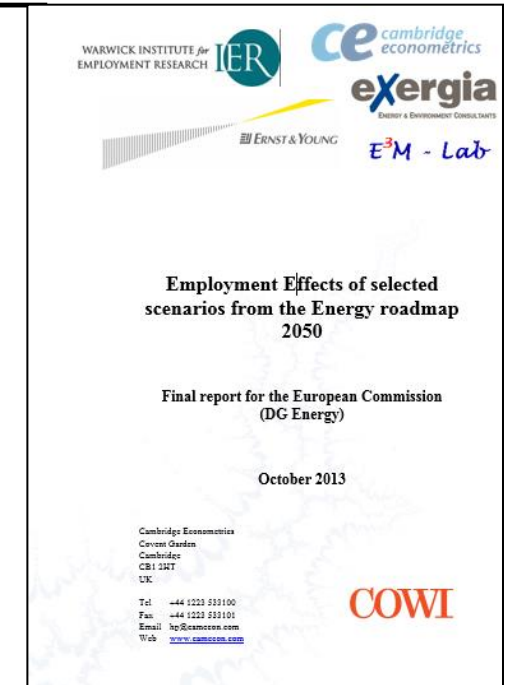


https://en.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9on_Walras

E3MEのFTT機能 = シュンペーター

E3MEとCGEモデルのEUの経済 影響比較

- The scenarios show different ways of meeting the EU's 2050 decarbonization targets
- Two models were run – the macro-econometric E3ME model and the CGE GEM-E3 model
 - S1 – High energy efficiency
 - S2 –Diversified energy supply
 - S3 – High renewables
 - S4 – Delayed CCS
 - S5 – Low nuclear

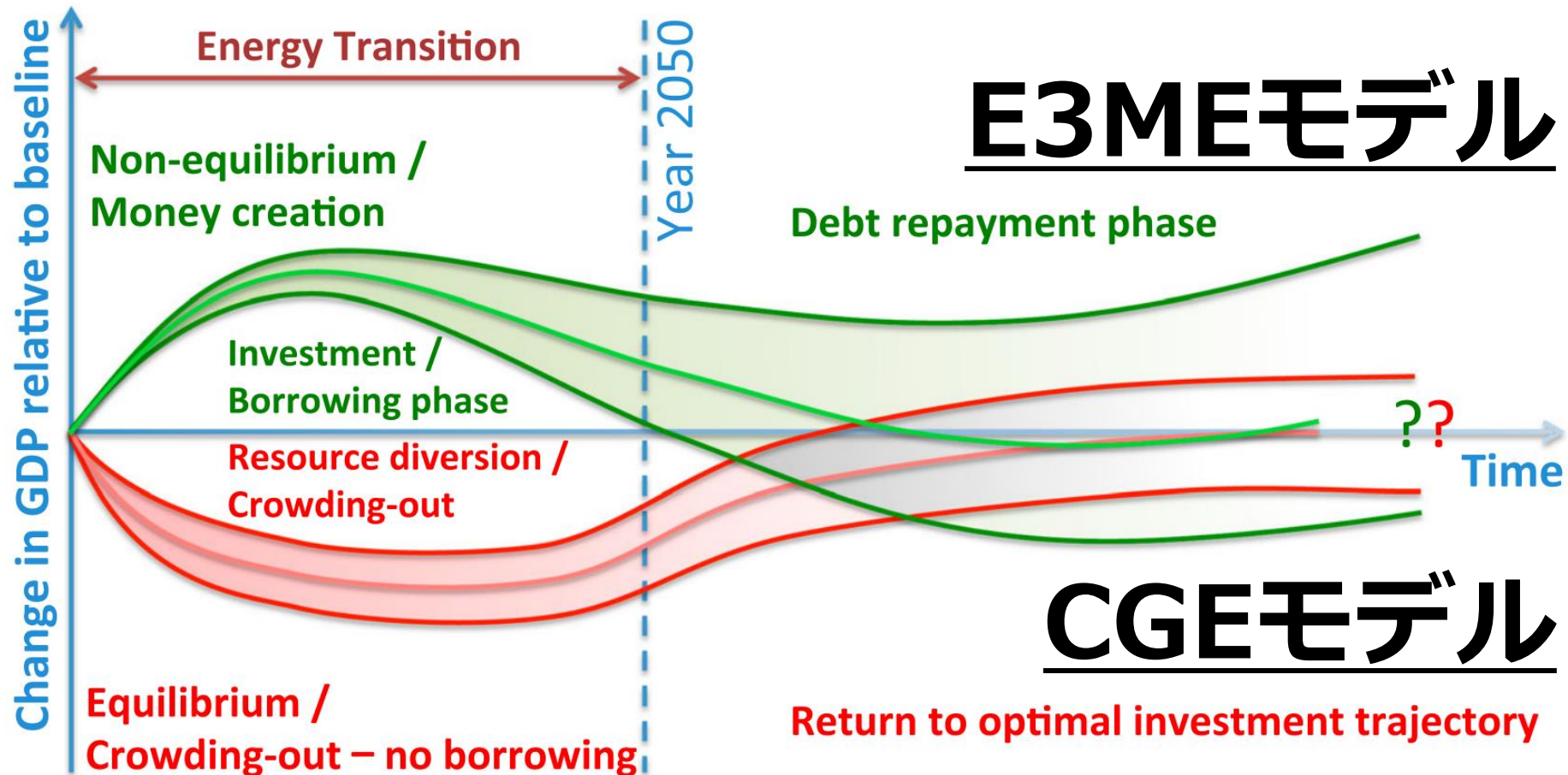


Comparison of the two models' results for the impacts on GDP in the scenarios

	S1	S2	S3	S4	S5
% difference in GDP from CPI baseline in 2050					
E3ME	2.9	2.3	2.0	2.2	2.2
GEM-E3	-0.6	-0.8	-0.8	-0.9	-0.7
Sources: E3ME and GEM-E3 models.					

Source: Employment Effects of the Energy Roadmap, Cambridge Econometrics et al (2013)

CGEモデル vs. E3MEモデル



(引用) Mercure et al. (2018)
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2019.1617665>



カーボンニュートラルに 向けた脱炭素政策シナリオの 設定と二酸化炭素排出経路

ベースラインシナリオ(BA)の設定

現状の温暖化対策が維持された場合のシナリオ

表 1 OUTLOOK 2022 レファレンスシナリオにおける主要指標の見通し

注：()内は、各電源の全体発電量に占める構成比(%)である。

出所：日本エネルギー経済研究所(2021)

	2019 年	2030 年	2040 年	2050 年
GDP (10 億米ドル、2010 年価格)	6,211	6,664	7,227	7,761
最終エネルギー消費 (百万 toe)	279	259	240	222
発電量 (TWh)	1,037	1,045	1,079	1,099
原子力	64(6.2)	157(15.0)	141(13.1)	141(12.8)
再生可能エネルギー	205(19.8)	255(24.4)	305(28.3)	365(33.2)
石炭火力	329(31.7)	257(24.6)	247(22.9)	221(20.1)
LNG 火力	385(37.1)	338(32.3)	358(33.2)	354(32.2)
エネルギー起源 CO ₂ 排出量 (百万 CO ₂ t)	1,059	885	792	691

2019年比

25% ↑

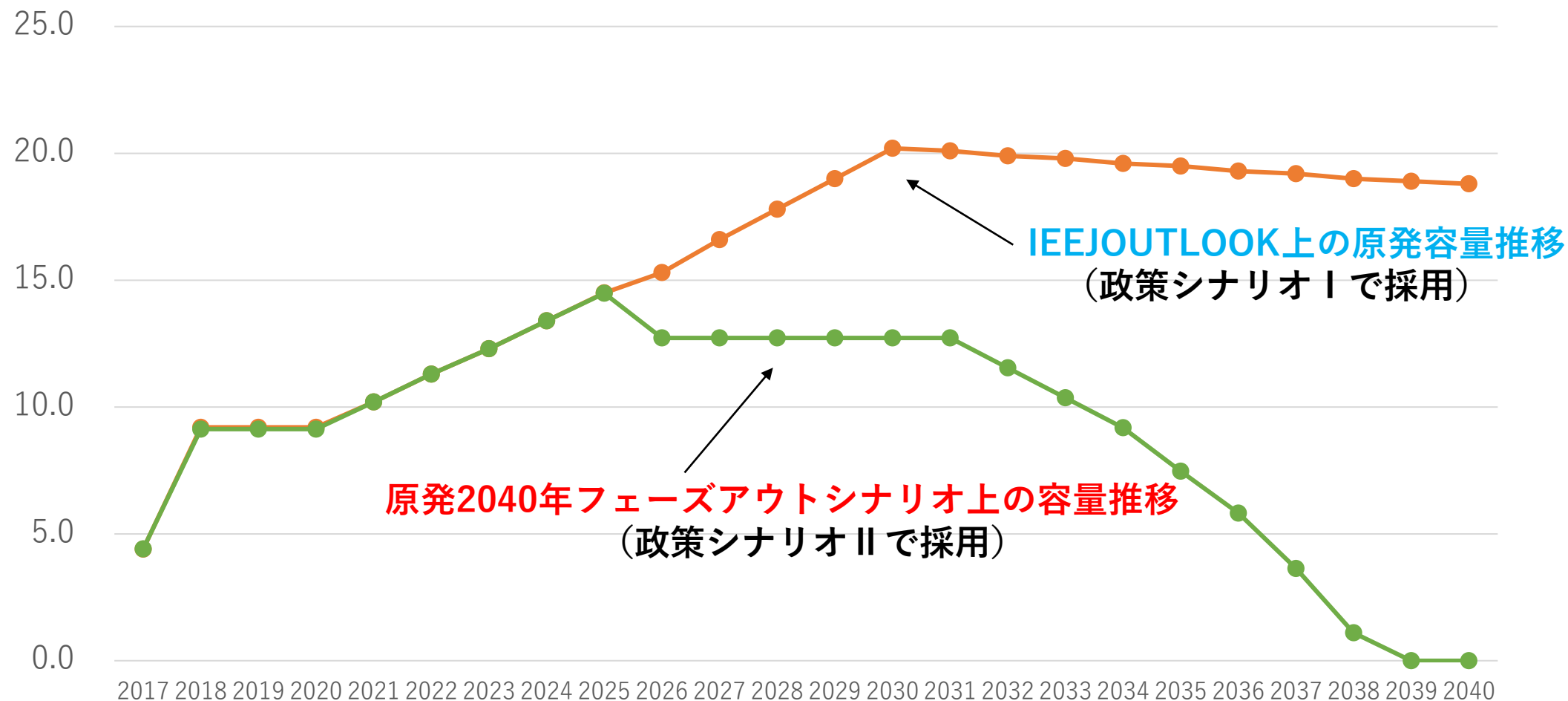
20% ↓

6% ↑

35% ↓

原発の政策シナリオ設定

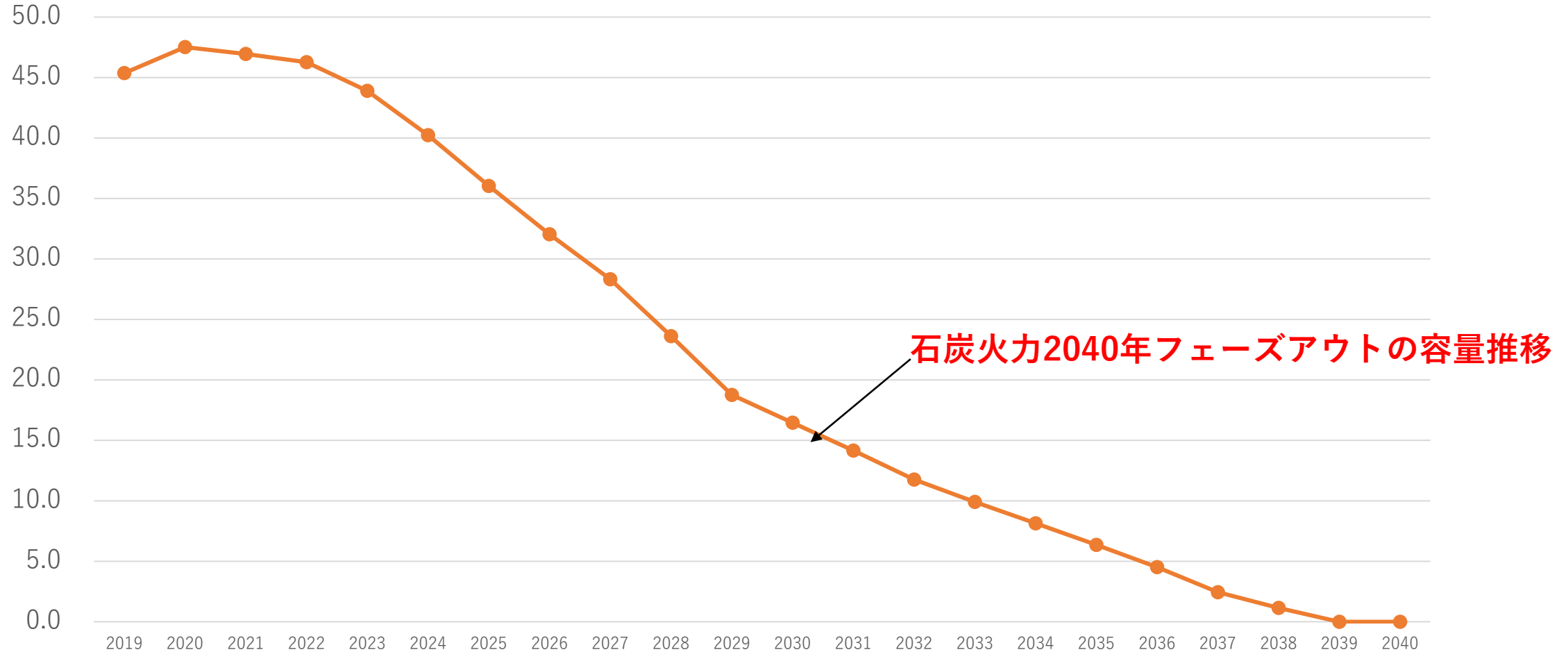
(単位:GW)



出所：本研究による設定

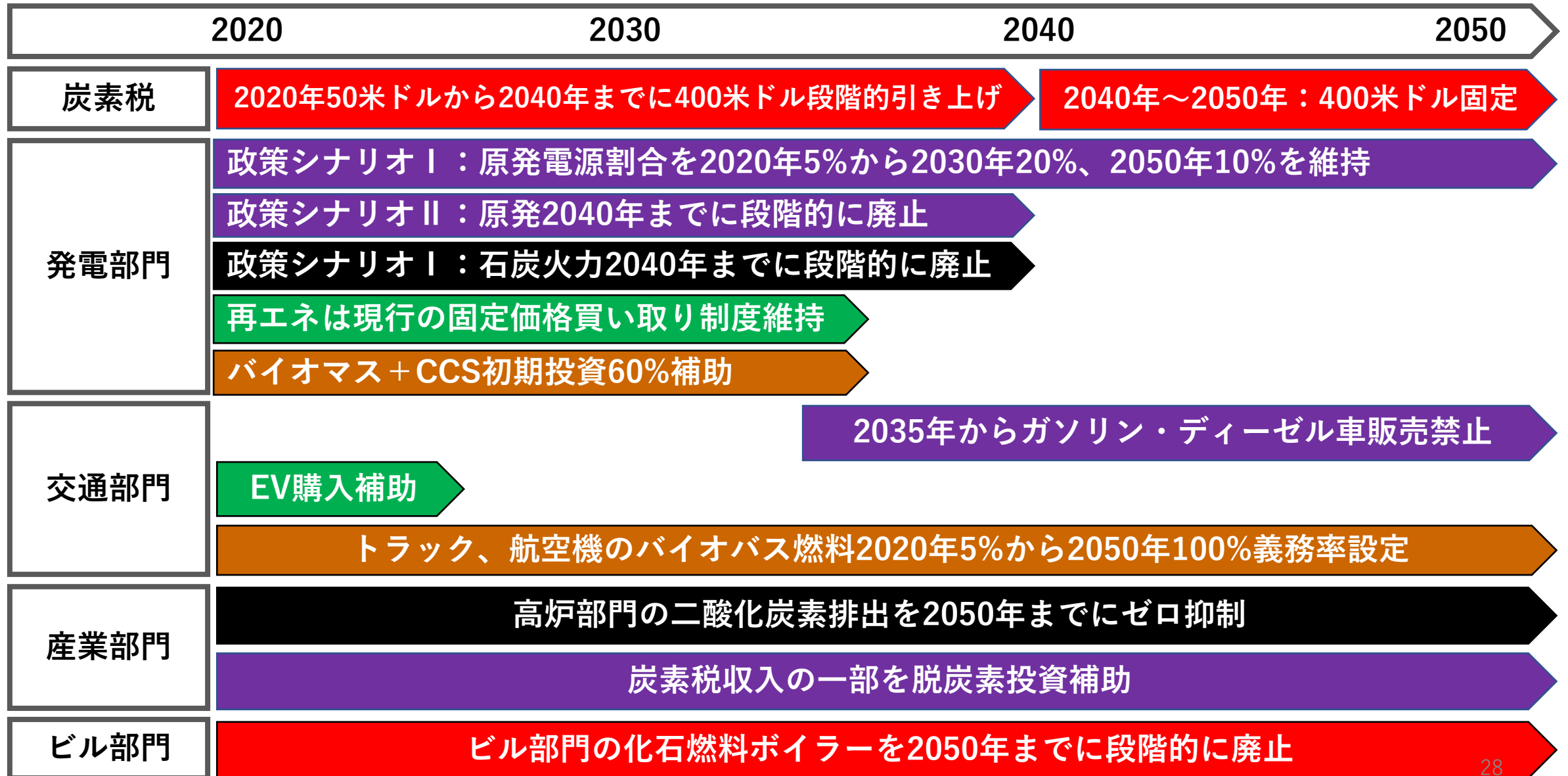
2040年石炭火力フェーズアウトの経路

(単位: GW)



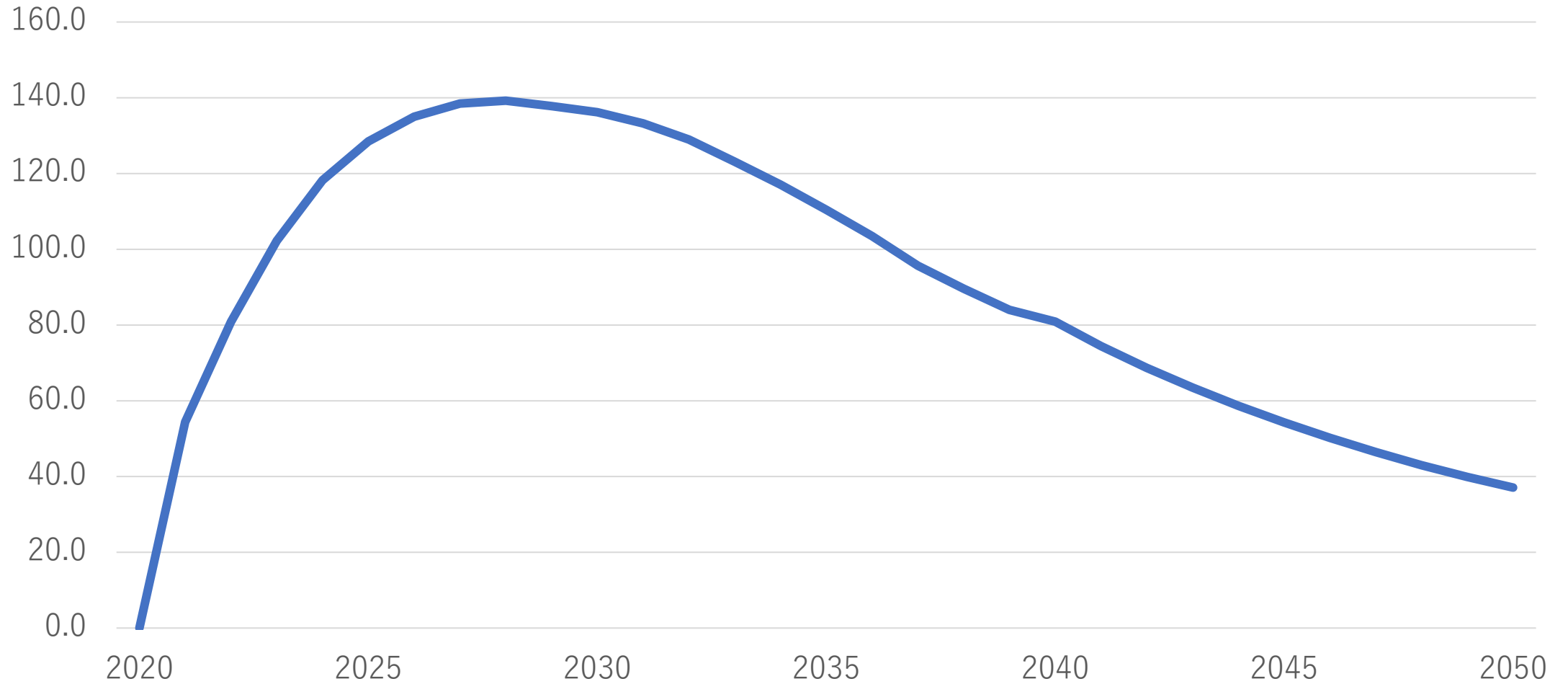
出所：本研究による設定

2050年カーボンニュートラルに向けた脱炭素政策パッケージ

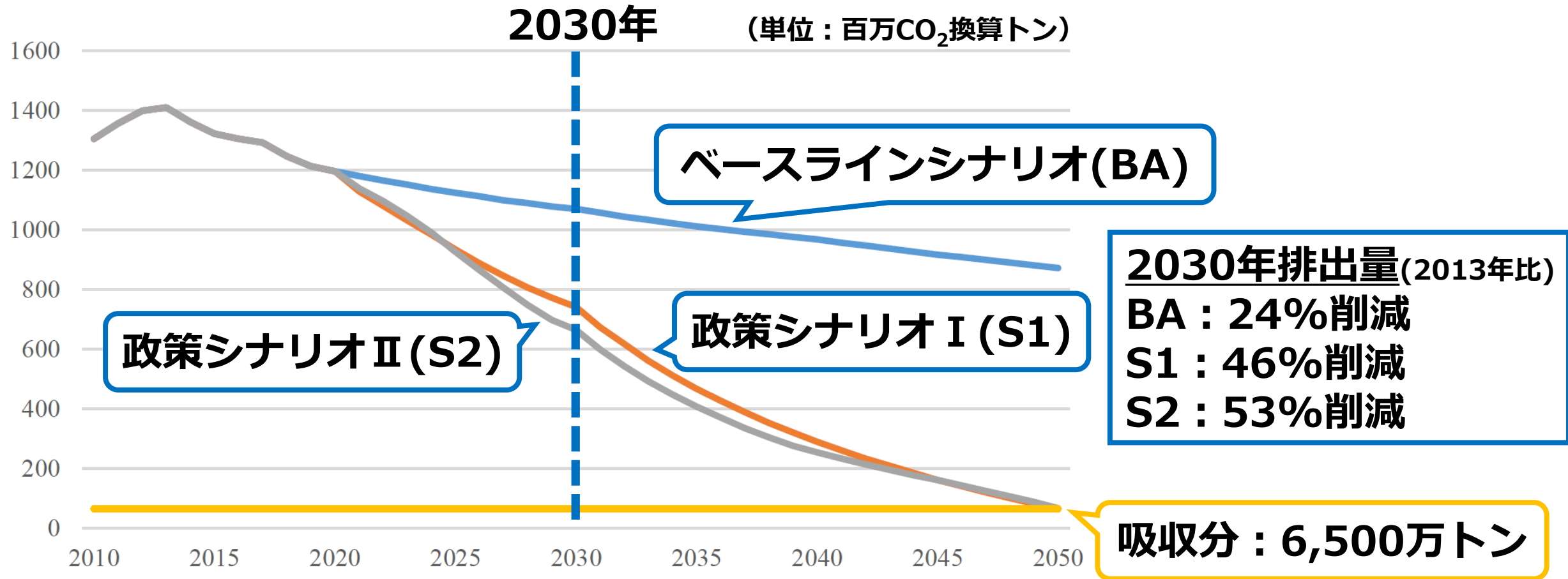


炭素税の税収予想推移

(10億US\$: 2010年価格)

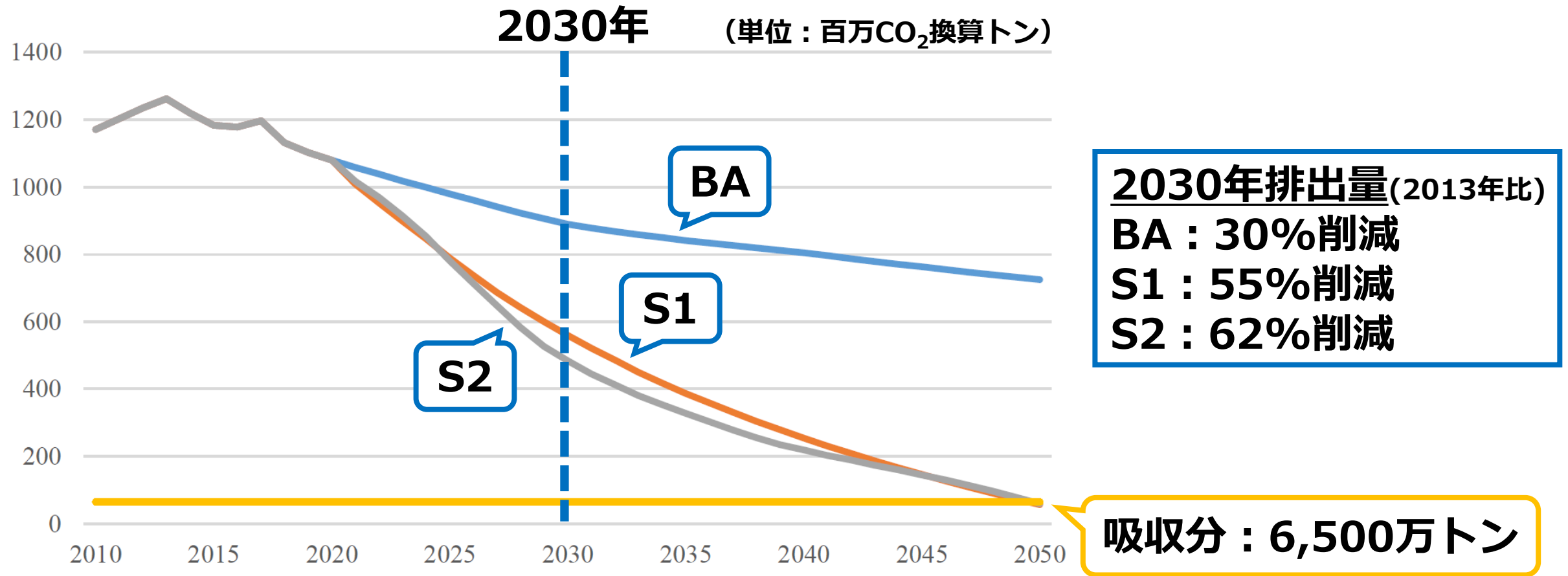


結果：温室効果ガス排出量経路



注：本研究のE3MEモデル推定による(以降、同様)

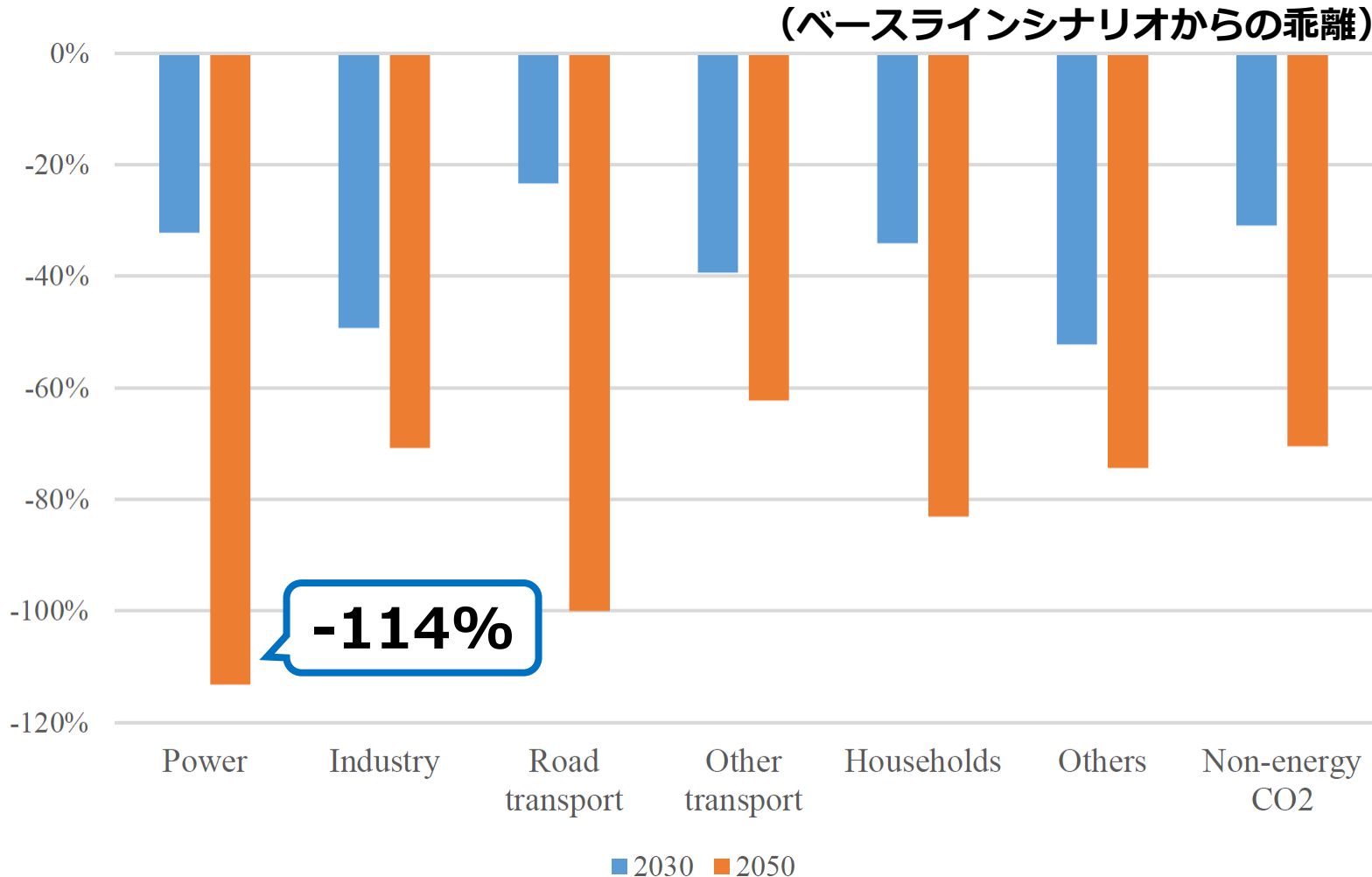
エネルギー起源CO₂排出量経路



部門別CO₂削減率(S1)

S2はほぼ同様の結果のため省略

BA : 2050年35%削減(2019年比)

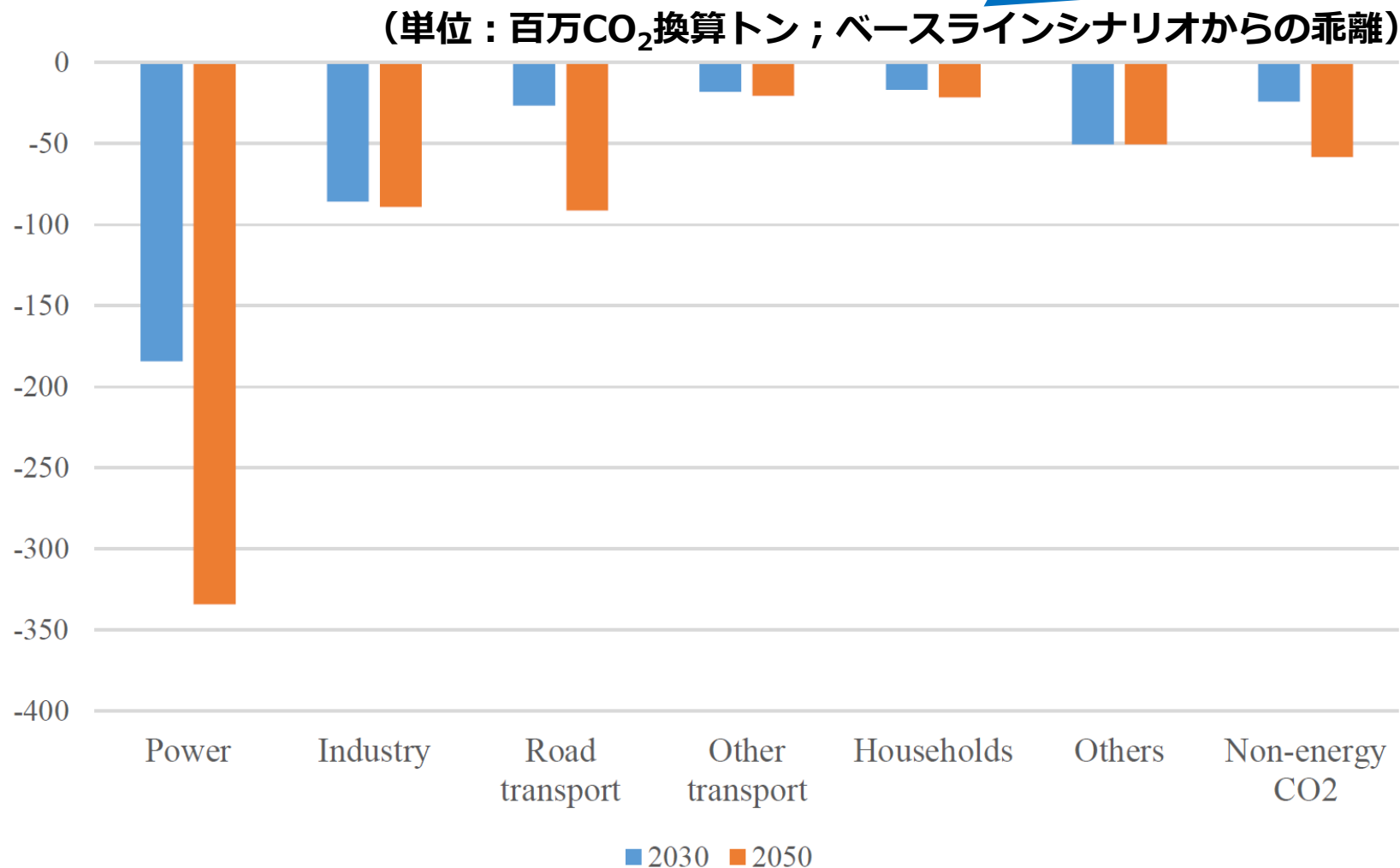


2050年CO₂削減率(対BA比)

- ・ 電源部門 : 114%削減*
 - ・ 道路交通部門 : 100%削減
 - ・ 産業部門 : 72%削減
 - ・ 住宅部門 : 82%削減
- *CCSを考慮のため100%を超える

部門別CO₂削減量(S1)

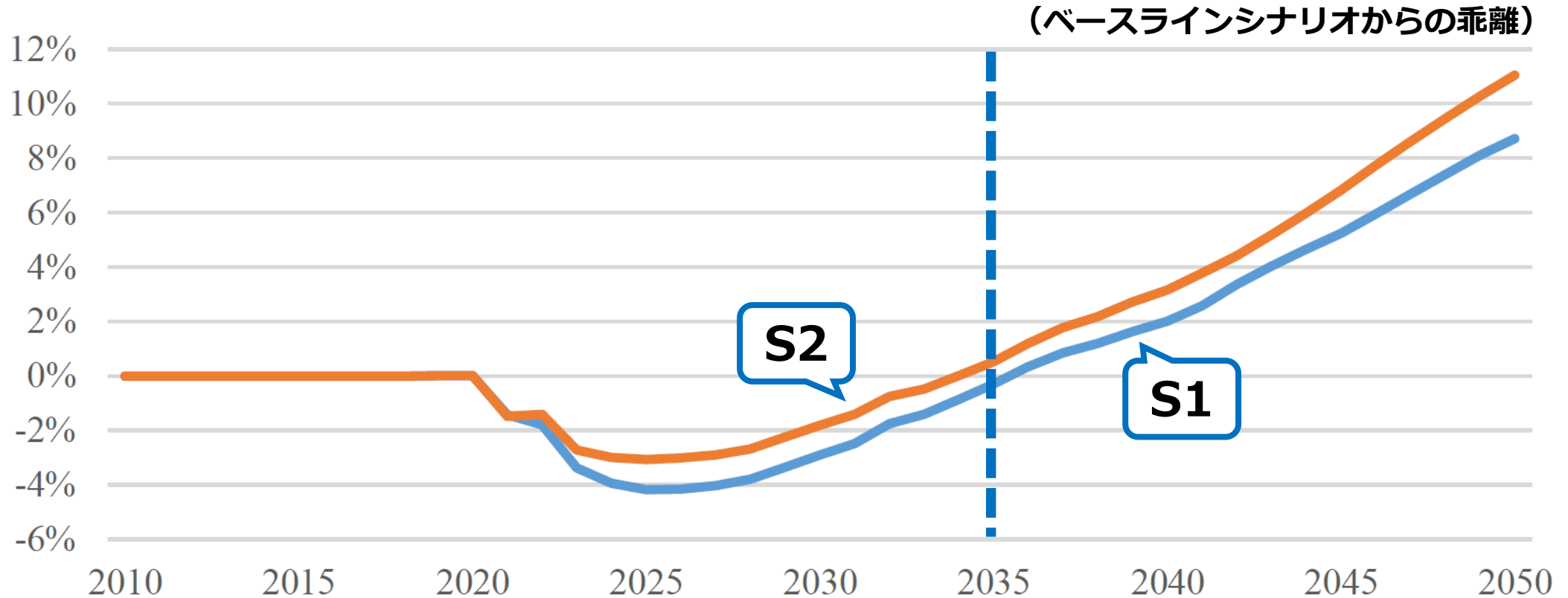
BA : 6億9,100万トン(2050年排出量)





2050年カーボンニュートラルの 日本の電源構成、マクロ経済及び 産業生産に与える影響

電力需要予測

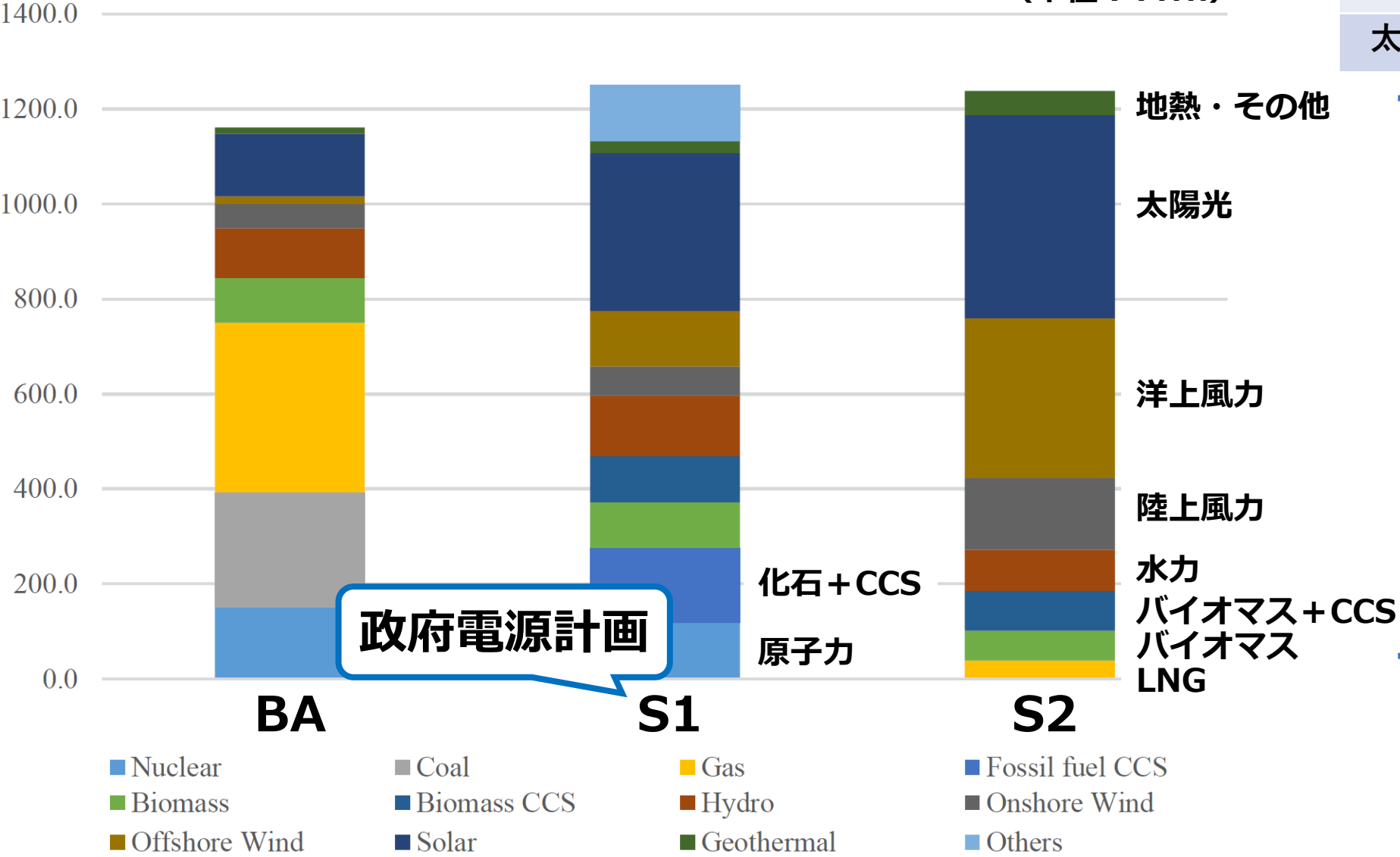


- ・炭素税などによる発電コストの上昇で、電力需要は最大4%(対BA比)程減少
- ・2035年頃から「**経済の電力化**」が進み、電力需要は上昇に転じる
- ・2050年には電力需要は9～11%(対BA比)程増加

2050年の電源別発電量予測

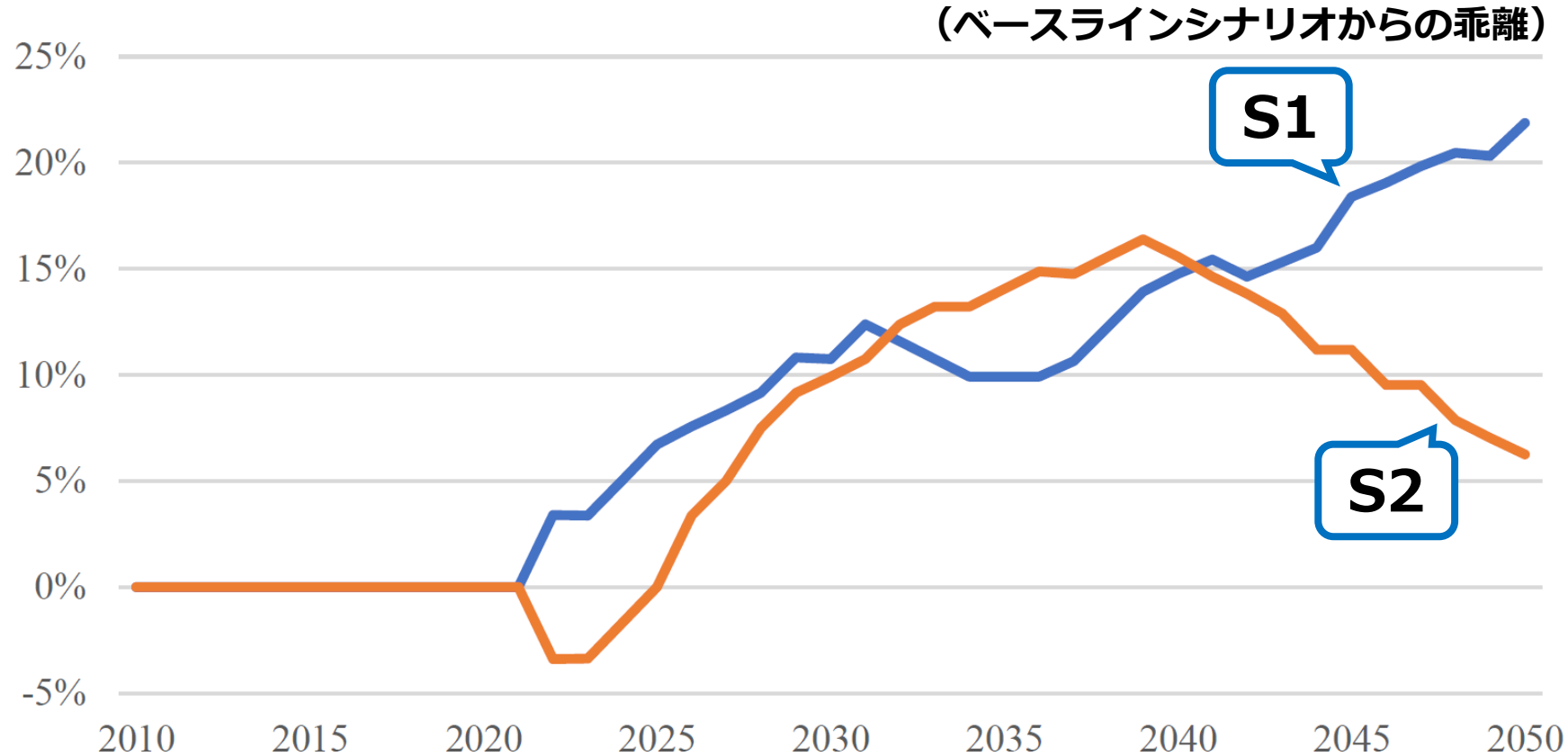
(単位 : TWh)

電源構成	S1	S2
陸上風力	4.9%	11.9%
洋上風力	9.4%	26.4%
太陽光	26.5%	33.5%



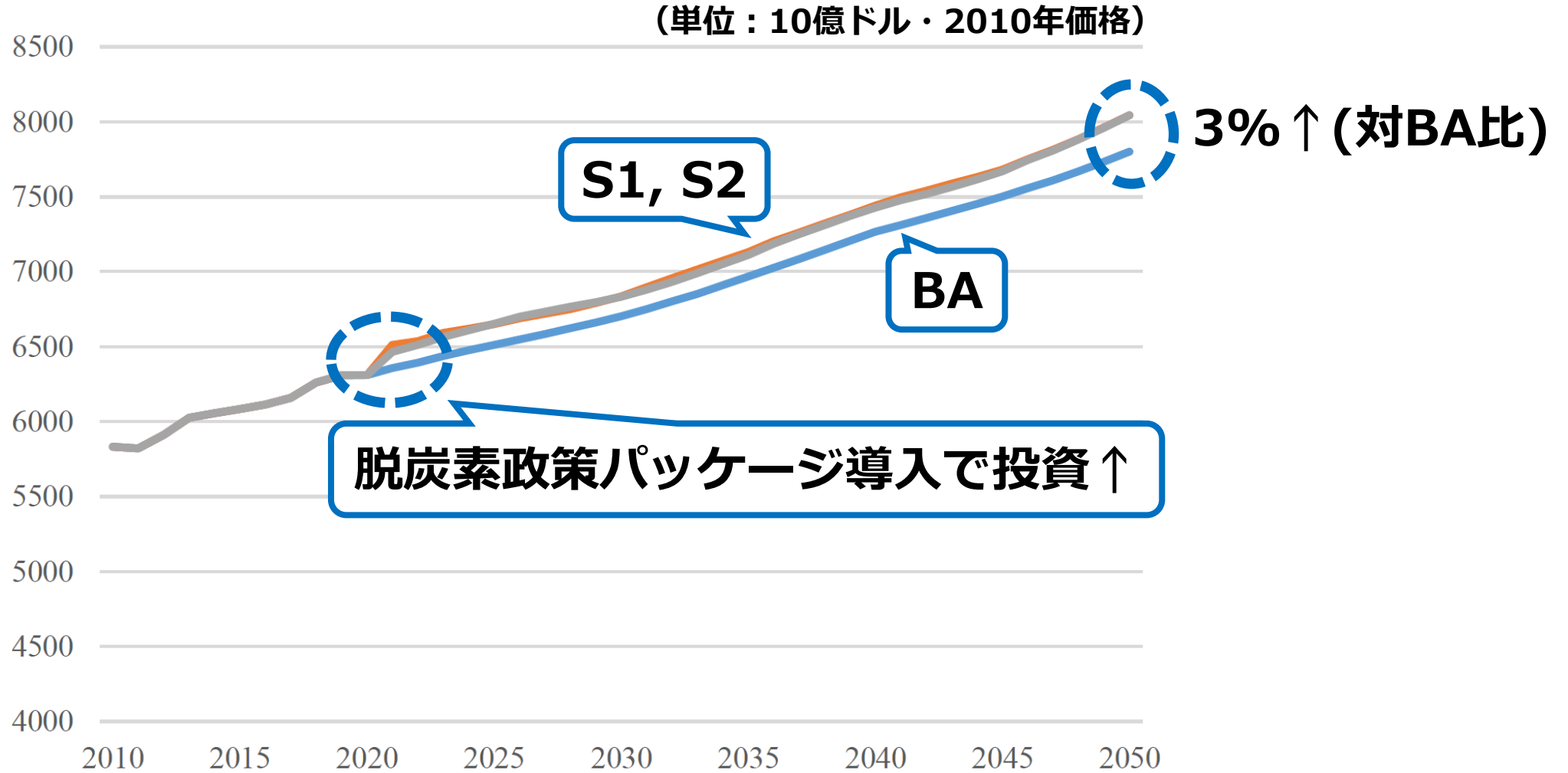
ほとんど
再エネ電源(S2)

発電コストへの影響



- ・ S1とS2で**炭素税の影響**で2040年に発電コストは15%(対BA比)まで上昇
- ・ S1は炭素税と化石燃料+CCSが残る等の影響で発電コストの上昇が続く
- ・ S2は**再エネ発電のコスト↓**と2040年石炭火力ゼロにより発電コスト↓

GDPの経路



カーボン・ニュートラル達成の過程で、低・脱炭素投資需要が
様々な部門(発電部門、産業部門、交通部門等)に渡って経済を刺激した

マクロ経済への影響

(ベースラインシナリオからの乖離)

	2030 年		2050 年	
	政策シナリオ I	政策シナリオ II	政策シナリオ I	政策シナリオ II
GDP	2.0%	1.9%	3.1%	3.1%
消費	0.5%	0.5%	2.3%	2.5%
投資	7.7%	7.5%	7.0%	6.0%
輸出	-0.4%	-0.5%	-0.3%	-0.2%
輸入	0.2%	0.1%	-2.1%	-2.7%
雇用	1.1%	1.2%	1.4%	1.5%
消費者物価	3.3%	3.3%	-0.3%	-1.4%

経済成長の主要因

化石燃料の輸入 ↓

再エネ発電コスト ↓

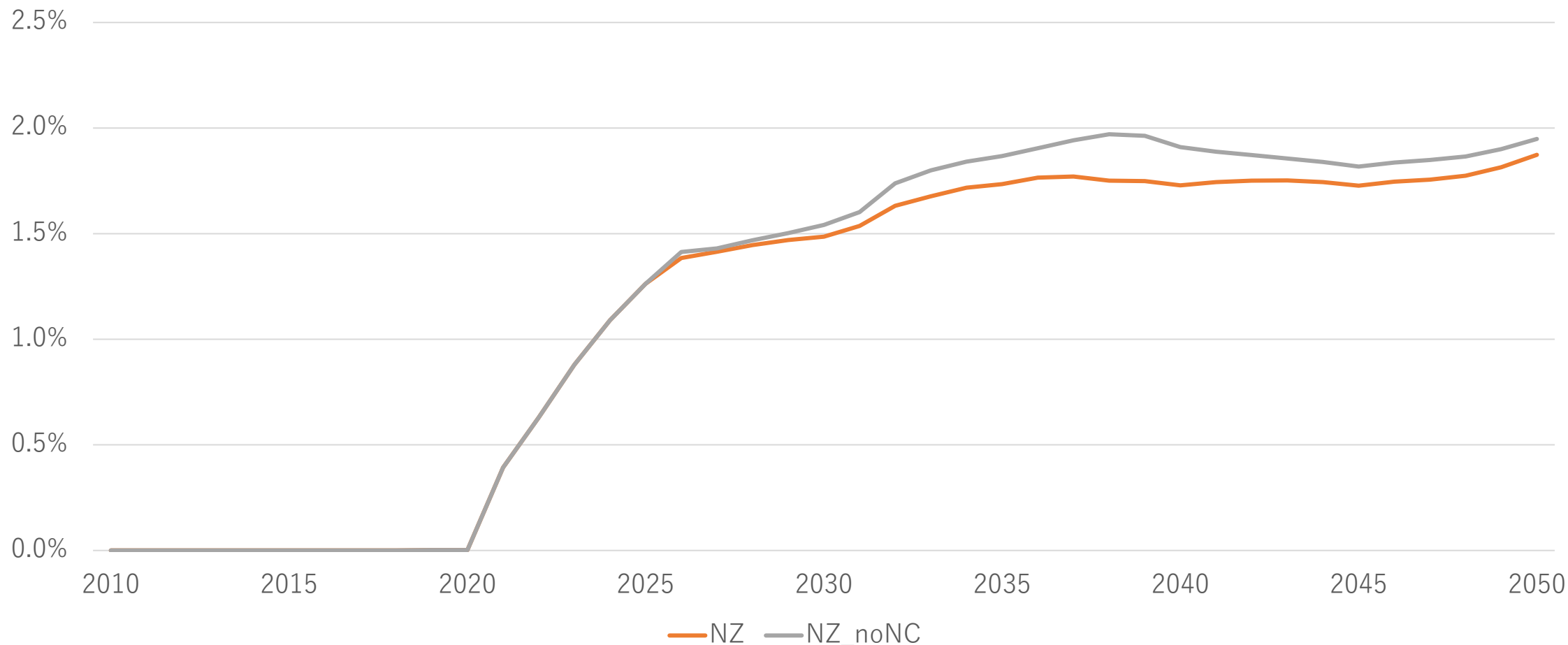
経済成長のシナリオ

① 脱炭素投資需要 ↑ ⇒ 雇用 ↑ ⇒ 消費 ↑ ⇒ GDP ↑

② カーボン・ニュートラル ⇒ 化石燃料の輸入 ↓ ⇒ GDP ↑

カーボンニュートラルによる雇用予測

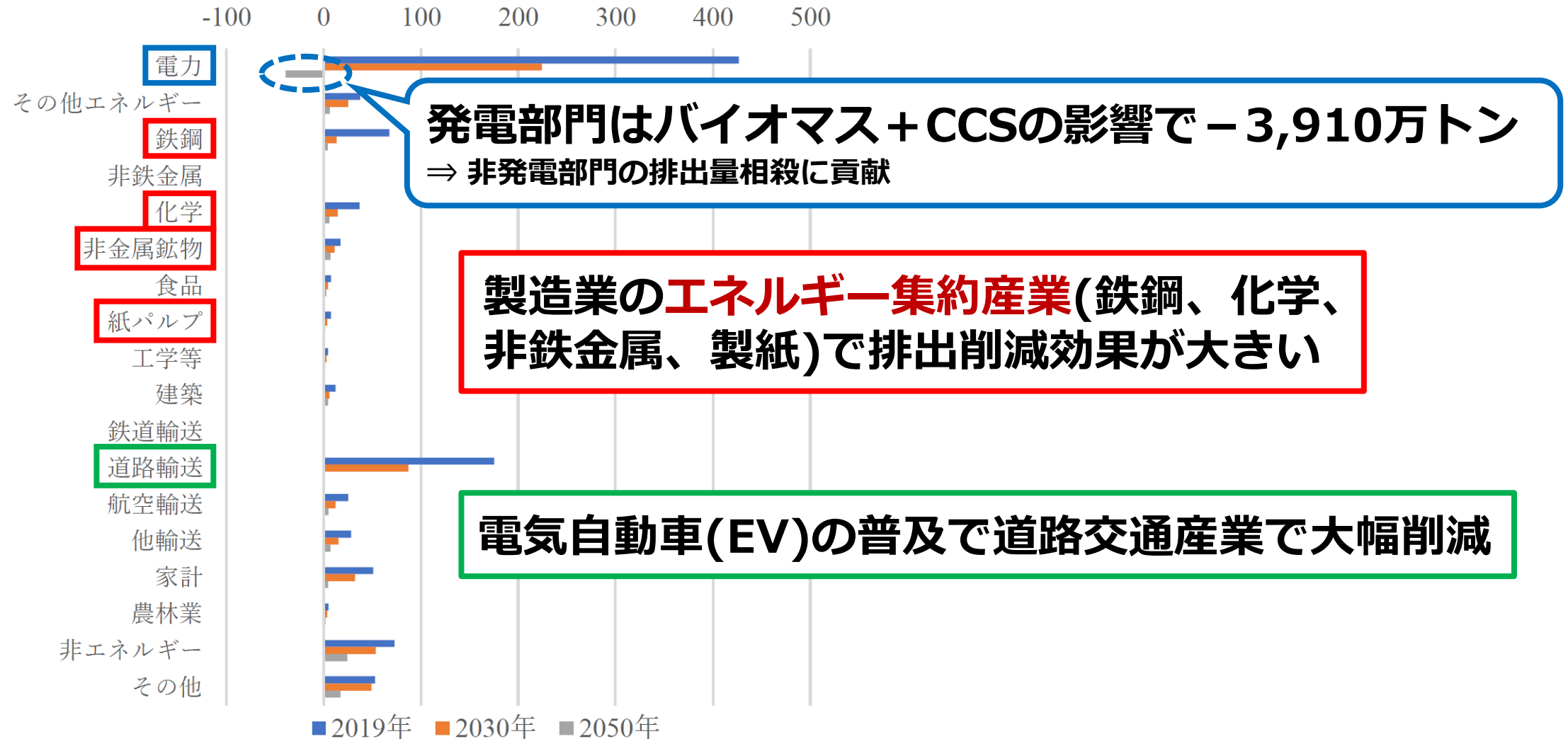
(ベースライン対比、%)



出所：本研究による推定

部門別CO₂排出量の見通し

(単位：エネルギー起源CO₂百万トン)



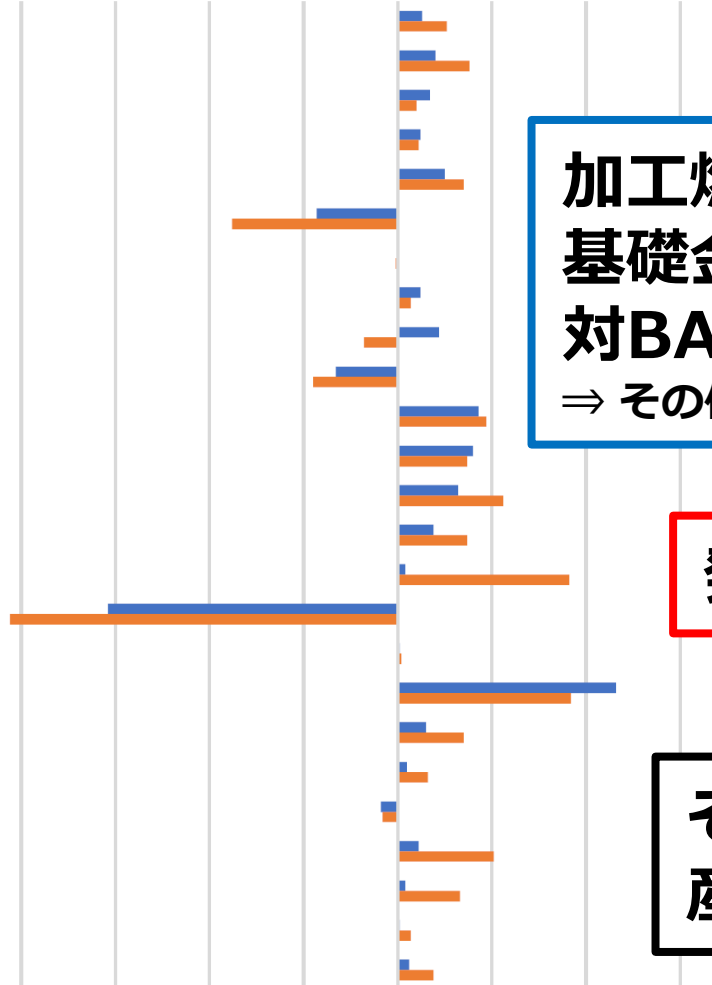
注：非エネルギーとは、鉄鋼部門のコークス利用など製造工程上の非エネルギー利用による排出量である

産業別生産見通し

(ベースラインシナリオからの乖離)

-25% -20% -15% -10% -5% 0% 5% 10% 15%

農業等
食品・飲料
繊維・皮革
木材・紙
印刷・出版
加工燃料
その他化学
ゴム・プラスチック
非金属鉱製品
基礎金属
金属製品
機械工業
電機製品
自動車
電力
ガス
水供給
建設
小売
飲食店・宿泊
航空輸送
銀行・金融
保険
教育
医療・介護



加工燃料(石油精製等)、非鉄金属(セメント等)、
基礎金属(鉄鋼等)、ガスなど**エネルギー集約産業**で
対BAで生産が減少する

⇒ その他の産業では、脱炭素投資需要と消費の堅調さにより生産が増加する

発電部門は経済の電化が進み、生産が増加する

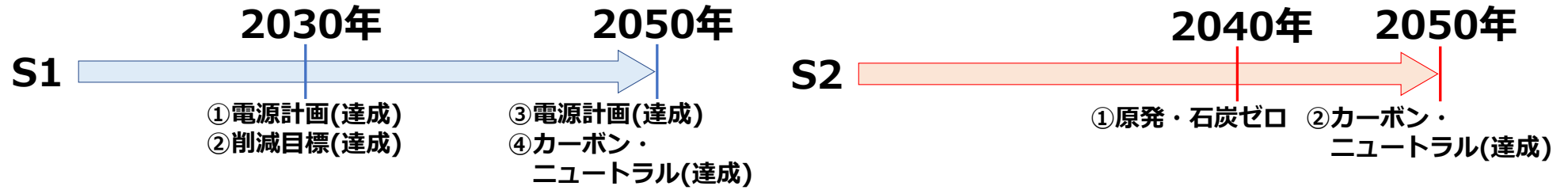
その他の部門は、投資需要と消費増加により生
産の増加が見込まれる

■ 2030年 ■ 2050年



結論と今後の課題

結論



- ①カーボン・ニュートラル達成と経済成長の両立(S1, S2)
- ②発電部門で再エネ投資↑、各部門で脱炭素投資↑
⇒ 雇用↑ ⇒ 民間消費↑ ⇒ GDP↑
- ③化石燃料の輸入↓(貿易バランス改善) ⇒ GDP↑
- ④エネルギー集約産業(鉄鋼、石油精製、ガス等)で生産↓
- ⑤その他の産業(機械、電気電子、建設、サービス等)では、
脱炭素投資需要と民間消費の底堅さにより生産↑

今後の課題

① 多様な低・脱炭素技術革新スピードの設定

技術革新スピードの設定は標準ケースの学習曲線に従っている

⇒ 洋上風力、水素還元技術、燃料電池自動車やe-fuelなど、
今後技術革新のスピードが速まることが予想される脱炭素技術について、
学習曲線の調整による脱炭素技術革新効果の適正な反映が必要

② 原子力発電コスト

日本政府は原発を主要電源として位置づけている

⇒ 原発のコストは安全対策費など今後も上昇することが予想されており、
原発の将来のコストをいかにモデルに適正に反映するかが課題である

③ 産業構造の転換の問題

E3MEモデルには、産業の構造的な大転換を推定する機能はない

⇒ 産業別影響に関するシミュレーションの解釈には、
産業構造の転換の可能性を考慮に入れる必要がある



ご清聴いただきありがとうございました。