

博士論文

技術選択を考慮した動学的多部門エネルギー経済モデルによる  
日本の CO<sub>2</sub> 排出削減対策の評価

Assessment of CO<sub>2</sub> Emissions Reduction Measures in Japan  
through the Use of a Dynamic Multi-sector Energy Economic  
Model considering Technology Selection

磯貝基

# 目次

目次	1
図目次	4
表目次	18
<b>第 1 章 序論</b>	<b>20</b>
1.1 背景	20
1.2 本研究の目的・意義・新規性	22
1.3 本論文の構成	22
参考文献	24
<b>第 2 章 エネルギー・経済モデルの概要</b>	<b>25</b>
2.1 モデルの分類	25
2.2 応用一般均衡モデル	28
2.2.1 応用一般均衡モデルの概要	28
2.2.2 簡単な応用一般均衡モデルの数学的説明	29
2.3 国際貿易分析プロジェクト (GTAP)	31
2.3.1 GTAP モデル	31
2.3.2 GTAP データベース	33
2.4 ボトムアップ型技術選択モデル	36
2.5 ハイブリッドモデルの概要と本モデルの位置づけ	36
2.6 第 2 章の結論	38
参考文献	39
<b>第 3 章 動学的多部門エネルギー経済モデル (DMSEE) の開発</b>	<b>41</b>
3.1 DMSEE の概要	41
3.2 パラメータの設定	43
3.2.1 GTAP データの加工	50
(a) 生産・消費・投資・中間投入の対応	50
(b) 貿易の対応	50
(c) 税率の対応	52
3.2.2 トップダウン部門とボトムアップ部門の接続	55
3.3 定式化	56
3.3.1 効用関数・生産関数の線形近似手法	56
3.3.2 目的関数	59
3.3.3 制約条件	59
(a) 需要供給バランス	60
(b) 物量バランス	60

(c) 設備と投資, 設備と生産 . . . . .	61
(d) 労働と生産 . . . . .	61
(e) CES 関数の一次不等式近似 . . . . .	62
3.4 第3章の結論 . . . . .	65
参考文献 . . . . .	66
<b>第4章 電力部門を高時間解像度化した DMSEE 拡張モデル</b>	<b>67</b>
4.1 電力部門の定式化 . . . . .	67
4.1.1 アクティビティの諸情報 . . . . .	71
4.1.2 高時間解像度化した電力部門特有の制約条件 . . . . .	71
(a) 電力需給式 . . . . .	71
(b) 発電量と設備容量 . . . . .	74
(c) 負荷追従運転 . . . . .	74
(d) 供給予備力 . . . . .	76
(e) プラントの補修 . . . . .	77
(f) 揚水及び蓄電池に関する制約 . . . . .	78
4.2 シナリオおよびケース設定 . . . . .	78
4.2.1 シナリオ . . . . .	78
4.2.2 ケース . . . . .	79
4.3 結果とその分析 . . . . .	79
4.3.1 最適電源構成および設備容量と CO <sub>2</sub> 排出量 . . . . .	79
4.3.2 最適発電パターン . . . . .	81
4.3.3 GDP と効用 . . . . .	83
4.4 第4章の結論 . . . . .	84
参考文献 . . . . .	85
<b>第5章 素材部門と非電力エネルギー部門を詳細化した DMSEE 拡張モデル</b>	<b>86</b>
5.1 概要 . . . . .	86
5.2 素材部門の定式化 . . . . .	87
5.2.1 鉄鋼部門 . . . . .	87
(a) アクティビティと財 . . . . .	87
(b) 高価格鉄鋼製品と低価格鉄鋼製品 . . . . .	88
5.2.2 セメント部門 . . . . .	89
(a) アクティビティと財 . . . . .	89
(b) GTAP の部門分解 . . . . .	90
5.2.3 石油化学部門 . . . . .	90
(a) アクティビティと財 . . . . .	90
(b) GTAP の部門分解 . . . . .	91
5.2.4 紙・パルプ部門 . . . . .	91
(a) アクティビティと財 . . . . .	91
5.3 非電力エネルギー部門の定式化 . . . . .	91
5.4 シナリオおよびケース設定 . . . . .	93
5.4.1 シナリオ . . . . .	93
5.4.2 ケース . . . . .	94
5.5 結果とその分析 . . . . .	94

5.5.1	最適電源構成と CO <sub>2</sub> 排出量	94
	(a) \$10, \$10_N ケース	95
	(b) \$50, \$50_N ケース	95
	(c) \$150, \$150_N ケース	95
	(d) RAMP, RAMP_N ケース	95
5.5.2	素材部門の技術選択	97
5.5.3	GDP と TD 部門の経済活動	97
5.5.4	一次エネルギー供給と最終エネルギー消費	98
5.6	第 5 章の結論	100
	参考文献	125
<b>第 6 章</b>	<b>温室効果ガス削減技術考慮した DMSEE 拡張モデル</b>	<b>126</b>
6.1	概要	126
6.2	CCS の定式化	127
6.2.1	アクティビティの設定	127
6.2.2	制約条件	128
	(a) 基本式	128
	(b) 設備と投資	128
	(c) 需要供給バランス	129
6.3	シナリオおよびケース設定	129
6.3.1	シナリオ	129
6.3.2	ケース	129
6.4	結果とその分析	130
6.4.1	最適電源構成	130
6.4.2	CO <sub>2</sub> 排出量	130
6.4.3	CCS の技術選択と投資	131
6.5	第 6 章の結論	131
	参考文献	150
<b>第 7 章</b>	<b>結論</b>	<b>151</b>
7.1	これまでのまとめ	151
7.2	今後の課題・展望	152
	受賞歴	153
	謝辞	154
	付録	155
A	GTAP-POWER で定義される部門一覧	155
B	GTAP-POWER で定義される地域一覧	158
C	本モデルで使用する GTAP データベースの主要変数一覧	160
D	CES 型関数の様々な形	161
E	投入係数 $\beta$ の導出	163
G	第 5 章の結果	165
G	第 6 章の結果	172

# 目次

1.1	世界の一次エネルギー消費量と実質 GDP* <sup>1</sup> . . . . .	21
1.2	原子力発電所の稼働状況 (2019 年 7 月 8 日現在) <sup>[1-8]</sup> . . . . .	21
1.3	2030 年に目指すべき日本のベストミックス* <sup>2</sup> . . . . .	22
2.1	MARKAL-MACRO モデルのフロー図 (文献 [2-15] の Figure 3-1 を転載). . . . .	28
2.2	GTAP の概要. 矢印の方向は貨幣の流れ* <sup>3</sup> . . . . .	32
2.3	GTAP モデルの生産者行動の枠組み* <sup>4</sup> . . . . .	33
2.4	GTAP モデルの消費者行動の枠組み* <sup>5</sup> . . . . .	33
2.5	文献 [2-18] のモデルのシステム概要 (文献 [2-18] の Fig. 1 を転載). . . . .	36
2.6	DNE21 の構造 (文献 [2-26] の構造図を転載). . . . .	37
3.1	DMSEE の概要 (矢印は財や紙幣の流れ). . . . .	43
3.2	GTAP データベースの貿易変数の概念図 . . . . .	51
3.3	計算回数と目的関数の推移. 初期計算の目的関数からの変化率. . . . .	58
4.1	DMSEE2.0 が考慮する電力供給から需要までの概要図. TnDS は超高压, TnDH は高压, TnDL は は低压の送配電部門を表す. . . . .	73
4.2	各部門の電力負荷曲線. . . . .	75
4.3	水力発電の年間設備利用率. . . . .	76
4.4	風力発電の年間設備利用率. . . . .	76
4.5	太陽光発電の年間設備利用率. . . . .	77
4.6	原子力発電及び火力発電のメンテナンスパターン. . . . .	78
4.7	BAU ケースの最適電源構成. . . . .	80
4.8	\$50 ケースの最適電源構成. . . . .	80
4.9	\$300 ケースの最適電源構成. . . . .	80
4.10	\$300N ケースの最適電源構成. . . . .	80
4.11	2050 年における各ケースの最適電源構成と CO <sub>2</sub> 排出量 . . . . .	80
4.12	BAU ケースの最適発電パターン (2030 年). . . . .	81
4.13	\$50 ケースの最適発電パターン (2030 年). . . . .	81
4.14	\$300 ケースの最適発電パターン (2030 年). . . . .	81
4.15	\$300N ケースの最適発電パターン (2030 年). . . . .	81
4.16	BAU ケースの最適発電パターン (2050 年). . . . .	81
4.17	\$50 ケースの最適発電パターン (2050 年). . . . .	81
4.18	\$300 ケースの最適発電パターン (2050 年). . . . .	81
4.19	\$300N ケースの最適発電パターン (2050 年). . . . .	81
4.20	BAU ケースの最適発電パターン (2030 年 7 月). . . . .	82

4.21	\$50 ケースの最適発電パターン (2030 年 7 月).	82
4.22	\$300 ケースの最適発電パターン (2030 年 7 月).	82
4.23	\$300N ケースの最適発電パターン (2030 年 7 月).	82
4.24	BAU ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	82
4.25	\$50 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	82
4.26	\$300 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	82
4.27	\$300N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	82
4.28	各ケースの GDP 推移. BAU ケースの 2015 年の値を 1 として規格化.	83
4.29	各ケースの効用の変化. BAU ケースの 2015 年の値を 1 として規格化.	84
5.1	2016 年度における素材部門のエネルギー消費. 文献 [5-1] より抜粋.	86
5.2	電気炉法による粗鋼生産量の上下限.	87
5.3	鋼材品種別の価格推移. 文献 [5-5] より抜粋.	89
5.4	紙の製造工程. 文献 [5-2] より抜粋.	92
5.5	各部門ごとの中間投入係数の値. 行が財, 列がアクティビティ.	94
5.6	各ケースの CO <sub>2</sub> 排出量.	96
5.7	各ケースの部門別の CO <sub>2</sub> 排出量.	96
5.8	各ケースの GDP 推移. BAU ケースの 2020 年の値を 1 として規格化.	98
5.9	2020 年~2030 年における各ケースの TD 部門別実質生産量推移.	98
5.10	2020, 2030, 2050 年における各ケースの一次エネルギー供給量.	99
5.11	2020, 2030, 2050 年における各ケースの業務部門の最終エネルギー消費量.	99
5.12	2020, 2030, 2050 年における各ケースの産業部門の最終エネルギー消費量.	99
5.13	2020, 2030, 2050 年における各ケースの運輸部門の最終エネルギー消費量.	99
5.14	2020, 2030, 2050 年における各ケースの家庭・政府部門の最終エネルギー消費量.	99
5.15	2020, 2030, 2050 年における各ケースの部門別最終エネルギー消費量.	99
5.16	BAU ケースの最適電源構成.	101
5.17	\$10 ケースの最適電源構成.	101
5.18	\$10_N ケースの最適電源構成.	101
5.19	\$50 ケースの最適電源構成.	101
5.20	\$50_N ケースの最適電源構成.	101
5.21	\$150 ケースの最適電源構成.	102
5.22	\$150_N ケースの最適電源構成.	102
5.23	RAMP ケースの最適電源構成.	102
5.24	RAMP_N ケースの最適電源構成.	102
5.25	BAU ケースの最適電源容量.	103
5.26	\$10 ケースの最適電源容量.	103
5.27	\$10_N ケースの最適電源容量.	103
5.28	\$50 ケースの最適電源容量.	103
5.29	\$50_N ケースの最適電源容量.	103
5.30	\$150 ケースの最適電源容量.	104
5.31	\$150_N ケースの最適電源容量.	104
5.32	RAMP ケースの最適電源容量.	104
5.33	RAMP_N ケースの最適電源容量.	104
5.34	BAU ケースの鉄鋼部門の技術選択.	105

5.35	\$10 ケースの鉄鋼部門の技術選択.	105
5.36	\$10_N ケースの鉄鋼部門の技術選択.	105
5.37	\$50 ケースの鉄鋼部門の技術選択.	106
5.38	\$50_N ケースの鉄鋼部門の技術選択.	106
5.39	\$150 ケースの鉄鋼部門の技術選択.	106
5.40	\$150_N ケースの鉄鋼部門の技術選択.	106
5.41	RAMP ケースの鉄鋼部門の技術選択.	106
5.42	RAMP_N ケースの鉄鋼部門の技術選択.	106
5.43	BAU ケースのセメント部門の技術選択.	107
5.44	\$10 ケースのセメント部門の技術選択.	107
5.45	\$10_N ケースのセメント部門の技術選択.	107
5.46	\$50 ケースのセメント部門の技術選択.	108
5.47	\$50_N ケースのセメント部門の技術選択.	108
5.48	\$150 ケースのセメント部門の技術選択.	108
5.49	\$150_N ケースのセメント部門の技術選択.	108
5.50	RAMP ケースのセメント部門の技術選択.	108
5.51	RAMP_N ケースのセメント部門の技術選択.	108
5.52	BAU ケースの石油化学部門の技術選択.	109
5.53	\$10 ケースの石油化学部門の技術選択.	109
5.54	\$10_N ケースの石油化学部門の技術選択.	109
5.55	\$50 ケースの石油化学部門の技術選択.	110
5.56	\$50_N ケースの石油化学部門の技術選択.	110
5.57	\$150 ケースの石油化学部門の技術選択.	110
5.58	\$150_N ケースの石油化学部門の技術選択.	110
5.59	RAMP ケースの石油化学部門の技術選択.	110
5.60	RAMP_N ケースの石油化学部門の技術選択.	110
5.61	BAU ケースの紙・パルプ部門の技術選択.	111
5.62	\$10 ケースの紙・パルプ部門の技術選択.	111
5.63	\$10_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択.	111
5.64	\$50 ケースの紙・パルプ部門の技術選択.	112
5.65	\$50_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択.	112
5.66	\$150 ケースの紙・パルプ部門の技術選択.	112
5.67	\$150_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択.	112
5.68	RAMP ケースの紙・パルプ部門の技術選択.	112
5.69	RAMP_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択.	112
5.70	BAU ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.	113
5.71	\$10 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.	113
5.72	\$10_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.	113
5.73	\$50 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.	114
5.74	\$50_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.	114
5.75	\$150 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.	114
5.76	\$150_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.	114
5.77	RAMP ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.	114
5.78	RAMP_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.	114

5.79	BAU ケースのセメント部門の最適設備容量.	115
5.80	\$10 ケースのセメント部門の最適設備容量.	115
5.81	\$10_N ケースのセメント部門の最適設備容量.	115
5.82	\$50 ケースのセメント部門の最適設備容量.	116
5.83	\$50_N ケースのセメント部門の最適設備容量.	116
5.84	\$150 ケースのセメント部門の最適設備容量.	116
5.85	\$150_N ケースのセメント部門の最適設備容量.	116
5.86	RAMP ケースのセメント部門の最適設備容量.	116
5.87	RAMP_N ケースのセメント部門の最適設備容量.	116
5.88	BAU ケースの石油化学部門の最適設備容量.	117
5.89	\$10 ケースの石油化学部門の最適設備容量.	117
5.90	\$10_N ケースの石油化学部門の最適設備容量.	117
5.91	\$50 ケースの石油化学部門の最適設備容量.	118
5.92	\$50_N ケースの石油化学部門の最適設備容量.	118
5.93	\$150 ケースの石油化学部門の最適設備容量.	118
5.94	\$150_N ケースの石油化学部門の最適設備容量.	118
5.95	RAMP ケースの石油化学部門の最適設備容量.	118
5.96	RAMP_N ケースの石油化学部門の最適設備容量.	118
5.97	BAU ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量.	119
5.98	\$10 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量.	119
5.99	\$10_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量.	119
5.100	\$50 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量.	120
5.101	\$50_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量.	120
5.102	\$150 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量.	120
5.103	\$150_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量.	120
5.104	RAMP ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量.	120
5.105	RAMP_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量.	120
5.106	BAU ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	121
5.107	\$10 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	121
5.108	\$10_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	121
5.109	\$50 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	122
5.110	\$50_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	122
5.111	\$150 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	122
5.112	\$150_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	122
5.113	RAMP ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	122
5.114	RAMP_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	122
5.115	BAU ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	123
5.116	\$10 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	123
5.117	\$10_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	123
5.118	\$50 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	124
5.119	\$50_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	124
5.120	\$150 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	124
5.121	\$150_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	124
5.122	RAMP ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.	124



5.123RAMP_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	124
6.1 水素基本戦略のシナリオ*6. . . . .	127
6.2 6 各ケースの CCS 貯留ポテンシャルの上限値. . . . .	129
6.3 \$10 ケースの最適電源構成 (SuperHigh). . . . .	132
6.4 \$10_N ケースの最適電源構成 (SuperHigh). . . . .	132
6.5 \$50 ケースの最適電源構成 (SuperHigh). . . . .	132
6.6 \$50_N ケースの最適電源構成 (SuperHigh). . . . .	132
6.7 \$150 ケースの最適電源構成 (SuperHigh). . . . .	132
6.8 \$150_N ケースの最適電源構成 (SuperHigh). . . . .	132
6.9 RAMP ケースの最適電源構成 (SuperHigh). . . . .	133
6.10 RAMP_N ケースの最適電源構成 (SuperHigh). . . . .	133
6.11 \$10 ケースの最適電源容量 (SuperHigh). . . . .	133
6.12 \$10_N ケースの最適電源容量 (SuperHigh). . . . .	133
6.13 \$50 ケースの最適電源容量 (SuperHigh). . . . .	133
6.14 \$50_N ケースの最適電源容量 (SuperHigh). . . . .	133
6.15 \$150 ケースの最適電源容量 (SuperHigh). . . . .	134
6.16 \$150_N ケースの最適電源容量 (SuperHigh). . . . .	134
6.17 RAMP ケースの最適電源容量 (SuperHigh). . . . .	134
6.18 RAMP_N ケースの最適電源容量 (SuperHigh). . . . .	134
6.19 \$10 ケースの最適電源構成 (High). . . . .	135
6.20 \$10_N ケースの最適電源構成 (High). . . . .	135
6.21 \$50 ケースの最適電源構成 (High). . . . .	135
6.22 \$50_N ケースの最適電源構成 (High). . . . .	135
6.23 \$150 ケースの最適電源構成 (High). . . . .	135
6.24 \$150_N ケースの最適電源構成 (High). . . . .	135
6.25 RAMP ケースの最適電源構成 (High). . . . .	136
6.26 RAMP_N ケースの最適電源構成 (High). . . . .	136
6.27 \$10 ケースの最適電源容量 (High). . . . .	136
6.28 \$10_N ケースの最適電源容量 (High). . . . .	136
6.29 \$50 ケースの最適電源容量 (High). . . . .	136
6.30 \$50_N ケースの最適電源容量 (High). . . . .	136
6.31 \$150 ケースの最適電源容量 (High). . . . .	137
6.32 \$150_N ケースの最適電源容量 (High). . . . .	137
6.33 RAMP ケースの最適電源容量 (High). . . . .	137
6.34 RAMP_N ケースの最適電源容量 (High). . . . .	137
6.35 \$10 ケースの最適電源構成 (Low). . . . .	138
6.36 \$10_N ケースの最適電源構成 (Low). . . . .	138
6.37 \$50 ケースの最適電源構成 (Low). . . . .	138
6.38 \$50_N ケースの最適電源構成 (Low). . . . .	138
6.39 \$150 ケースの最適電源構成 (Low). . . . .	138
6.40 \$150_N ケースの最適電源構成 (Low). . . . .	138
6.41 RAMP ケースの最適電源構成 (Low). . . . .	139
6.42 RAMP_N ケースの最適電源構成 (Low). . . . .	139

6.43	\$10 ケースの最適電源容量 (Low).	139
6.44	\$10_N ケースの最適電源容量 (Low).	139
6.45	\$50 ケースの最適電源容量 (Low).	139
6.46	\$50_N ケースの最適電源容量 (Low).	139
6.47	\$150 ケースの最適電源容量 (Low).	140
6.48	\$150_N ケースの最適電源容量 (Low).	140
6.49	RAMP ケースの最適電源容量 (Low).	140
6.50	RAMP_N ケースの最適電源容量 (Low).	140
6.51	SuperHigh シナリオの各ケースの CO <sub>2</sub> 排出量.	141
6.52	High シナリオの各ケースの CO <sub>2</sub> 排出量.	141
6.53	Low シナリオの各ケースの CO <sub>2</sub> 排出量.	142
6.54	SuperHigh シナリオの各ケースの部門別 CO <sub>2</sub> 排出量.	142
6.55	High シナリオの各ケースの部門別 CO <sub>2</sub> 排出量.	142
6.56	Low シナリオの各ケースの部門別 CO <sub>2</sub> 排出量.	143
6.57	各ケースの GDP 推移 (SuperHigh). BAU ケースの 2020 年の値を 1 として規格化.	143
6.58	各ケースの GDP 推移 (High). BAU ケースの 2020 年の値を 1 として規格化.	143
6.59	各ケースの GDP 推移 (Low). BAU ケースの 2020 年の値を 1 として規格化.	144
6.60	\$10 ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).	145
6.61	\$10_N ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).	145
6.62	\$50 ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).	145
6.63	\$50_N ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).	145
6.64	\$150 ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).	146
6.65	\$150_N ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).	146
6.66	RAMP ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).	146
6.67	RAMP_N ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).	146
6.68	\$10 ケースの CCS 技術選択 (High).	146
6.69	\$10_N ケースの CCS 技術選択 (High).	146
6.70	\$50 ケースの CCS 技術選択 (High).	147
6.71	\$50_N ケースの CCS 技術選択 (High).	147
6.72	\$150 ケースの CCS 技術選択 (High).	147
6.73	\$150_N ケースの CCS 技術選択 (High).	147
6.74	RAMP ケースの CCS 技術選択 (High).	147
6.75	RAMP_N ケースの CCS 技術選択 (High).	147
6.76	\$10 ケースの CCS 技術選択 (Low).	148
6.77	\$10_N ケースの CCS 技術選択 (Low).	148
6.78	\$50 ケースの CCS 技術選択 (Low).	148
6.79	\$50_N ケースの CCS 技術選択 (Low).	148
6.80	\$150 ケースの CCS 技術選択 (Low).	148
6.81	\$150_N ケースの CCS 技術選択 (Low).	148
6.82	RAMP ケースの CCS 技術選択 (Low).	149
6.83	RAMP_N ケースの CCS 技術選択 (Low).	149
F.1	BAU ケースの最適発電パターン (2050 年).	165
F.2	\$10 ケースの最適発電パターン (2050 年).	165

F.3	\$10_N ケースの最適発電パターン (2050 年).	166
F.4	\$50 ケースの最適発電パターン (2050 年).	166
F.5	\$50_N ケースの最適発電パターン (2050 年).	166
F.6	\$150 ケースの最適発電パターン (2050 年).	167
F.7	\$150_N ケースの最適発電パターン (2050 年).	167
F.8	\$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年).	167
F.9	\$RAMP_N ケースの最適発電パターン (2050 年).	168
F.10	BAU ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	168
F.11	\$10 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	168
F.12	\$10_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	169
F.13	\$50 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	169
F.14	\$50_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	169
F.15	\$150 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	170
F.16	\$150_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	170
F.17	\$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	170
F.18	\$RAMP_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).	171
G.19	\$10 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	172
G.20	\$10_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	172
G.21	\$50 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	172
G.22	\$50_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	172
G.23	\$150 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	173
G.24	\$150_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	173
G.25	RAMP ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	173
G.26	RAMP_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	173
G.27	\$10 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	173
G.28	\$10_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	173
G.29	\$50 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	174
G.30	\$50_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	174
G.31	\$150 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	174
G.32	\$150_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.	174

G.33 RAMP ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	174
G.34 RAMP_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	174
G.35 \$10 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	175
G.36 \$10_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	175
G.37 \$50 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	175
G.38 \$50_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	175
G.39 \$150 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	175
G.40 \$150_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	175
G.41 RAMP ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	176
G.42 RAMP_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	176
G.43 \$10 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	176
G.44 \$10_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	176
G.45 \$50 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	176
G.46 \$50_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	176
G.47 \$150 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	177
G.48 \$150_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	177
G.49 RAMP ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	177
G.50 RAMP_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	177
G.51 \$10 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	177
G.52 \$10_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	177
G.53 \$50 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	178
G.54 \$50_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	178
G.55 \$150 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	178
G.56 \$150_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	178
G.57 RAMP ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	178
G.58 RAMP_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	178
G.59 \$10 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	179
G.60 \$10_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	179
G.61 \$50 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	179
G.62 \$50_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	179
G.63 \$150 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	179
G.64 \$150_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	179
G.65 RAMP ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	180
G.66 RAMP_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化. . . . .	180
G.67 \$10 ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh). . . . .	181
G.68 \$10_N ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh). . . . .	181

G.69	\$50 ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).	182
G.70	\$50_N ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).	182
G.71	\$150 ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).	182
G.72	\$150_N ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).	183
G.73	\$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).	183
G.74	\$RAMP_N ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).	183
G.75	\$10 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).	184
G.76	\$10_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).	184
G.77	\$50 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).	184
G.78	\$50_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).	185
G.79	\$150 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).	185
G.80	\$150_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).	185
G.81	\$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).	186
G.82	\$RAMP_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).	186
G.83	\$10 ケースの最適発電パターン (2050 年, High).	186
G.84	\$10_N ケースの最適発電パターン (2050 年, High).	187
G.85	\$50 ケースの最適発電パターン (2050 年, High).	187
G.86	\$50_N ケースの最適発電パターン (2050 年, High).	187
G.87	\$150 ケースの最適発電パターン (2050 年, High).	188
G.88	\$150_N ケースの最適発電パターン (2050 年, High).	188
G.89	\$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年, High).	188
G.90	\$RAMP_N ケースの最適発電パターン (2050 年, High).	189
G.91	\$10 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).	189
G.92	\$10_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).	189
G.93	\$50 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).	190
G.94	\$50_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).	190
G.95	\$150 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).	190
G.96	\$150_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).	191
G.97	\$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).	191
G.98	\$RAMP_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).	191
G.99	\$10 ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).	192
G.100	\$10_N ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).	192
G.101	\$50 ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).	192
G.102	\$50_N ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).	193
G.103	\$150 ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).	193
G.104	\$150_N ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).	193
G.105	\$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).	194
G.106	\$RAMP_N ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).	194
G.107	\$10 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).	194
G.108	\$10_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).	195
G.109	\$50 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).	195
G.110	\$50_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).	195
G.111	\$150 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).	196
G.112	\$150_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).	196

G.11\$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).	196
G.11\$RAMP_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).	197
G.11\$10 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).	198
G.11\$10_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).	198
G.11\$50 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).	198
G.11\$50_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).	198
G.11\$150 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).	199
G.12\$150_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).	199
G.12RAMP ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).	199
G.12RAMP_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).	199
G.12\$10 ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).	199
G.12\$10_N ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).	199
G.12\$50 ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).	200
G.12\$50_N ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).	200
G.12\$150 ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).	200
G.12\$150_N ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).	200
G.12RAMP ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).	200
G.13RAMP_N ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).	200
G.13\$10 ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).	201
G.13\$10_N ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).	201
G.13\$50 ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).	201
G.13\$50_N ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).	201
G.13\$150 ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).	201
G.13\$150_N ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).	201
G.13RAMP ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).	202
G.13RAMP_N ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).	202
G.13\$10 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).	202
G.14\$10_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).	202
G.14\$50 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).	202
G.14\$50_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).	202
G.14\$150 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).	203
G.14\$150_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).	203
G.14RAMP ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).	203
G.14RAMP_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).	203
G.14\$10 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).	203
G.14\$10_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).	203
G.14\$50 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).	204
G.15\$50_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).	204
G.15\$150 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).	204
G.15\$150_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).	204
G.15RAMP ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).	204
G.15RAMP_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).	204
G.15\$10 ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).	205
G.15\$10_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).	205

G.157\$50 ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).	205
G.158\$50_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).	205
G.159\$150 ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).	205
G.160\$150_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).	205
G.161RAMP ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).	206
G.162RAMP_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).	206
G.163\$10 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).	206
G.164\$10_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).	206
G.165\$50 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).	206
G.166\$50_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).	206
G.167\$150 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).	207
G.168\$150_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).	207
G.169RAMP ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).	207
G.170RAMP_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).	207
G.171\$10 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).	207
G.172\$10_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).	207
G.173\$50 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).	208
G.174\$50_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).	208
G.175\$150 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).	208
G.176\$150_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).	208
G.177RAMP ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).	208
G.178RAMP_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).	208
G.179\$10 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).	209
G.180\$10_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).	209
G.181\$50 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).	209
G.182\$50_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).	209
G.183\$150 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).	210
G.184\$150_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).	210
G.185RAMP ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).	210
G.186RAMP_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).	210
G.187\$10 ケースのセメント部門の技術選択 (High).	210
G.188\$10_N ケースのセメント部門の技術選択 (High).	210
G.189\$50 ケースのセメント部門の技術選択 (High).	211
G.190\$50_N ケースのセメント部門の技術選択 (High).	211
G.191\$150 ケースのセメント部門の技術選択 (High).	211
G.192\$150_N ケースのセメント部門の技術選択 (High).	211
G.193RAMP ケースのセメント部門の技術選択 (High).	211
G.194RAMP_N ケースのセメント部門の技術選択 (High).	211
G.195\$10 ケースの石油化学部門の技術選択 (High).	212
G.196\$10_N ケースの石油化学部門の技術選択 (High).	212
G.197\$50 ケースの石油化学部門の技術選択 (High).	212
G.198\$50_N ケースの石油化学部門の技術選択 (High).	212
G.199\$150 ケースの石油化学部門の技術選択 (High).	212
G.200\$150_N ケースの石油化学部門の技術選択 (High).	212

G.201RAMP ケースの石油化学部門の技術選択 (High).	213
G.202RAMP_N ケースの石油化学部門の技術選択 (High).	213
G.203\$10 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).	213
G.204\$10_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).	213
G.205\$50 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).	213
G.206\$50_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).	213
G.207\$150 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).	214
G.208\$150_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).	214
G.209RAMP ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).	214
G.210RAMP_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).	214
G.211\$10 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).	214
G.212\$10_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).	214
G.213\$50 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).	215
G.214\$50_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).	215
G.215\$150 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).	215
G.216\$150_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).	215
G.217RAMP ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).	215
G.218RAMP_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).	215
G.219\$10 ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).	216
G.220\$10_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).	216
G.221\$50 ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).	216
G.222\$50_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).	216
G.223\$150 ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).	216
G.224\$150_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).	216
G.225RAMP ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).	217
G.226RAMP_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).	217
G.227\$10 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).	217
G.228\$10_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).	217
G.229\$50 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).	217
G.230\$50_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).	217
G.231\$150 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).	218
G.232\$150_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).	218
G.233RAMP ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).	218
G.234RAMP_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).	218
G.235\$10 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).	218
G.236\$10_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).	218
G.237\$50 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).	219
G.238\$50_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).	219
G.239\$150 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).	219
G.240\$150_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).	219
G.241RAMP ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).	219
G.242RAMP_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).	219
G.243\$10 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).	220
G.244\$10_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).	220



G.245\$50 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).	220
G.246\$50_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).	220
G.247\$150 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).	221
G.248\$150_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).	221
G.249RAMP ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).	221
G.250RAMP_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).	221
G.251\$10 ケースのセメント部門の技術選択 (Low).	221
G.252\$10_N ケースのセメント部門の技術選択 (Low).	221
G.253\$50 ケースのセメント部門の技術選択 (Low).	222
G.254\$50_N ケースのセメント部門の技術選択 (Low).	222
G.255\$150 ケースのセメント部門の技術選択 (Low).	222
G.256\$150_N ケースのセメント部門の技術選択 (Low).	222
G.257RAMP ケースのセメント部門の技術選択 (Low).	222
G.258RAMP_N ケースのセメント部門の技術選択 (Low).	222
G.259\$10 ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).	223
G.260\$10_N ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).	223
G.261\$50 ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).	223
G.262\$50_N ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).	223
G.263\$150 ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).	223
G.264\$150_N ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).	223
G.265RAMP ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).	224
G.266RAMP_N ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).	224
G.267\$10 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).	224
G.268\$10_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).	224
G.269\$50 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).	224
G.270\$50_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).	224
G.271\$150 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).	225
G.272\$150_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).	225
G.273RAMP ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).	225
G.274RAMP_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).	225
G.275\$10 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).	225
G.276\$10_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).	225
G.277\$50 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).	226
G.278\$50_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).	226
G.279\$150 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).	226
G.280\$150_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).	226
G.281RAMP ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).	226
G.282RAMP_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).	226
G.283\$10 ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).	227
G.284\$10_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).	227
G.285\$50 ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).	227
G.286\$50_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).	227
G.287\$150 ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).	227
G.288\$150_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).	227

G.28RAMP ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).	228
G.29RAMP_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).	228
G.29I\$10 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).	228
G.29I\$10_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).	228
G.29I\$50 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).	228
G.29I\$50_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).	228
G.29I\$150 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).	229
G.29I\$150_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).	229
G.29IRAMP ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).	229
G.29IRAMP_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).	229
G.29I\$10 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).	229
G.30I\$10_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).	229
G.30I\$50 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).	230
G.30I\$50_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).	230
G.30I\$150 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).	230
G.30I\$150_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).	230
G.30IRAMP ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).	230
G.30IRAMP_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).	230
G.30I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの一次エネルギー供給量 (SuperHigh).	231
G.30I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの業務部門の最終エネルギー消費量 (SuperHigh).	231
G.30I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの産業部門の最終エネルギー消費量 (SuperHigh).	231
G.31I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの運輸部門の最終エネルギー消費量 (SuperHigh).	231
G.31I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの家庭・政府部門の最終エネルギー消費量 (SuperHigh).	232
G.31I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの部門別最終エネルギー消費量 (SuperHigh).	232
G.31I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの一次エネルギー供給量 (High).	232
G.31I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの業務部門の最終エネルギー消費量 (High).	232
G.31I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの産業部門の最終エネルギー消費量 (High).	232
G.31I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの運輸部門の最終エネルギー消費量 (High).	232
G.31I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの家庭・政府部門の最終エネルギー消費量 (High).	233
G.31I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの部門別最終エネルギー消費量 (High).	233
G.31I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの一次エネルギー供給量 (Low).	233
G.32I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの業務部門の最終エネルギー消費量 (Low).	233
G.32I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの産業部門の最終エネルギー消費量 (Low).	233
G.32I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの運輸部門の最終エネルギー消費量 (Low).	233
G.32I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの家庭・政府部門の最終エネルギー消費量 (Low).	234
G.32I2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの部門別最終エネルギー消費量 (Low).	234

# 表目次

1.1	各電源の発電単価*7.	21
2.1	ボトムアップモデル, トップダウンモデルの特徴*8.	26
2.2	著名なモデルの分類.	27
2.3	GTAP-POWER で定義される付加価値財一覧.	33
2.4	本モデルで使用する GTAP-POWER の主要変数一覧.	34
2.5	ハイブリッドモデルのタイプ別の特徴.	37
3.1	DMSEE1.0 が扱う部門一覧.	42
3.2	DMSEE1.0 が扱う集合一覧.	43
3.3	DMSEE1.0 が扱う外生変数.	44
3.4	DMSEE1.0 が扱う内生変数.	48
3.5	各段階における代替弾力性.	64
4.1	DMSEE2.0 が扱う集合一覧.	67
4.2	DMSEE2.0 が扱う外生変数.	69
4.3	DMSEE2.0 が扱う内生変数.	70
4.4	原子力発電および火力発電の諸情報.	72
4.5	再生可能エネルギーの諸情報.	72
4.6	電力貯蔵設備の諸情報.	72
4.7	GTAP の各部門の電力需要クラス.	74
4.8	各電力需要クラスの電圧ごとの電力消費割合.	74
4.9	各送配電部門の送配電ロスの割合.	74
4.10	GTAP の各部門の属性.	75
4.11	BAU ケースと比較したときの 2050 年における主要部門の消費変化率と GDP におけるシェア.	83
5.1	鉄鋼部門のアクティビティ.	88
5.2	鉄鋼部門の財.	88
5.3	セメント部門のアクティビティ.	89
5.4	セメント部門の財.	90
5.5	石油化学部門のアクティビティ.	90
5.6	石油化学部門の財.	91
5.7	紙・パルプ部門のアクティビティ.	92
5.8	紙・パルプ部門の財.	92
5.9	非電力エネルギー部門のアクティビティ.	93
5.10	非電力エネルギー部門の財.	93

5.11	2030 年, 2050 年における BAU, \$10, \$50 各ケースの CO <sub>2</sub> 排出量. 2020 年の BAU ケースのそれを 1 として規格化. . . . .	97
5.12	2025 年, 2030 年における \$50_N, \$150_N ケースの生産量比率. 2020 年の BAU ケースの値を 1 として規格化. . . . .	98
5.13	2025 年, 2030 年における \$50_N, \$150_N ケースの価格比率. 2020 年の BAU ケースの値を 1 として規格化. . . . .	98
6.1	CCS 部門のアクティビティ. . . . .	128
A.1	GTAP-POWER で定義される部門一覧 . . . . .	155
B.2	GTAP-POWER で定義される地域一覧 . . . . .	158
C.3	本モデルで使用する GTAP データベースの主要変数一覧. . . . .	160

# 第 1 章

## 序論

本論文の導入として本章では序論を展開する。研究の背景となるエネルギー情勢について 1.1 節で背景を述べた後、その背景を踏まえた研究の目的と意義および新規性を 1.2 節で説明する。そして最後に、1.3 節にて、本論文全体の全体構成について言及する。

### 1.1 背景

世界経済の発展とともにエネルギー消費量もまた増え続けており (図 1.1), それに伴って気候変動問題の顕在化が進んでいる。その影響緩和に向けて、国連気候変動枠組条約 (United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC) の締約国会議 (Conference Of Parties; COP) が毎年開催されているが、先進国と途上国との間の意見の乖離が大きく、議論は毎年平行線をたどることが多い。しかし、2015 年 12 月開催の COP21 で採択されたパリ協定では、国の経済規模に関係なく、同じ目標 (世界全体の温度上昇を産業革命以前と比べて 2℃より十分低く保つ、1.5℃以下に抑える) に向けて温室効果ガス排出削減に取り組んでいくことで合意したことから、世界全体で危機感を持って環境問題に向き合う必要があるとの共通認識を確認できる。我が国はこのパリ協定において、2030 年度の温室効果ガス削減目標を 2013 年度比マイナス 26.0% を目標として掲げており、この達成のために、省エネルギー対策によるエネルギー需要の抑制と、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出量<sup>\*1</sup>の少ない電源、あるいはまったく排出しないゼロエミッション電源の選択を行う方針である [1-2]。

しかし、我が国のエネルギー情勢は厳しい。まずエネルギー自給率<sup>\*2</sup>が著しく低い。2017 年時点における日本のエネルギー自給率は 9.6% と OECD(Organisation for Economic Co-operation and Development; 経済協力開発機構)35 カ国中 34 位であった [1-3]。資源の乏しさに加えて、2011 年の福島第一原発事故を契機とする原子力発電所の停止・廃止がエネルギー自給率を押し下げている (図 1.2)。結果、化石燃料の依存度は、2016 年時点で約 89% [1-3] であり、歴史的に見ても輸入先の政治情勢が直接日本の経済にダメージを与えるリスクを我が国は常に有している。さらに、化石燃料による発電増加は当然、発電由来の CO<sub>2</sub> 排出量の増加を招いた。2013 年度に過去最高の排出量を記録してからは減少に転じているが、2016 年度時点で 507 Mt-CO<sub>2</sub> と震災前 2010 年度と比べて 54 Mt-CO<sub>2</sub> 程多くなっており [1-3]、パリ協定で掲げた目標達成への道のりを険しくしている。

上記のような情勢変化は社会経済にも直結する。表 1.1 は資源エネルギー庁の発電コスト検証ワーキンググループで試算された各電源の発電コストである。発電コストの低い原子力発電を制限されたことで、2014 年度の家庭向けおよび産業向けの電気料金は、2010 年度比でそれぞれ約 25%、38% まで上昇した。原油価格の下

\*1 日本において CO<sub>2</sub> は、温室効果ガスの約 92% を占める [1-1]。

\*2 社会に必要な一次エネルギーのうち、自国内で確保できるエネルギーの比率。日本は厳密には原子力発電の原料 (ウラン) も他国 (カナダやウズベキスタン等) の資源に頼っているが、一度輸入すれば燃料サイクルによって長く使用できることから、純国産エネルギーとしてエネルギー自給率に計上している。

落等に起因し、2014 年度をピークに徐々に下がり始めたが、現在でも震災前より高い水準である\*3。

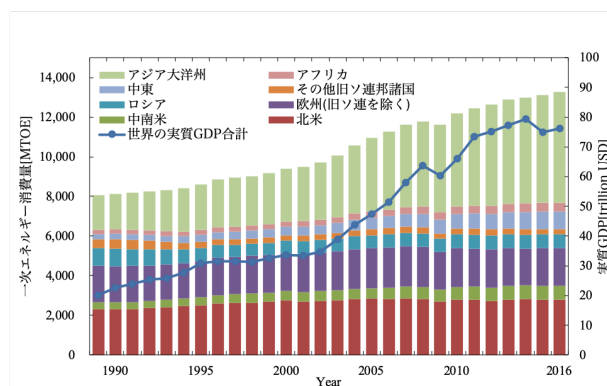


図 1.1 世界の一次エネルギー消費量と実質 GDP\*4。

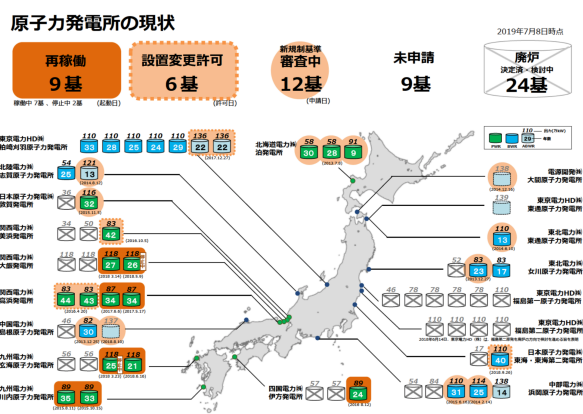


図 1.2 原子力発電所の稼働状況 (2019 年 7 月 8 日現在)[1-8]。

表 1.1 各電源の発電単価\*5。

電源	原子力	石炭火力	LNG 火力	陸上風力	地熱	一般水力
発電コスト [円/kWh]	10.1~	12.3	13.7	21.6	16.9	11.0

電源	小水力 (80 万円/kW)	小水力 (100 万円/kW)	バイオマス (専焼)	バイオマス (混焼)	石油火力	太陽光 (メガ)	太陽光 (住宅)
発電コスト [円/kWh]	23.3	27.1	29.7	12.6	30.6~43.4	24.2	29.4

以上の問題に対処していくべく、我が国のエネルギー政策が進むべきロードマップを示すのがエネルギー基本計画であり、2019 年 11 月現在、最新は 2018 年 7 月 3 日に閣議決定された「第 5 次エネルギー基本計画」である。エネルギー基本計画では、3E+S\*6を達成すべく 2030 年、2050 年に向けた方針が示されている。そして 2014 年 4 月に閣議決定された第 4 次エネルギー基本計画に基づき、長期的なエネルギー需給の見通しを取りまとめたものが「長期エネルギー需給見通し」である。図 1.3 は、長期エネルギー需給見通しに記載されている、2030 年に日本が目指すべき最適電源構成である。加えて、徹底した省エネ対策により、2013 年度の実績値と比べて、最終エネルギー消費を約 13% 抑えることを目標としている。1.7%/年の経済成長を前提にした省エネであるので、エネルギー効率を約 35% 改善する必要がある。そして 2050 年に向けては、2013 年度比温室効果ガス 80% 削減という野心的な目標を達成すべく、第 5 次エネルギー基本計画において、① 再生可能エネルギーの経済的自立と主要電源化、② 社会的信頼の回復を前提として、安全性・経済性・機動性に優れた原子炉の開発、追求、③ よりクリーンなガスにシフトし、石炭火力発電のフェードアウト、④ その他として、水素や蓄電池による脱炭素化、分散型エネルギーシステムの構築を掲げている。加えて、CO<sub>2</sub> を回収して貯留しておく CO<sub>2</sub> 回収・貯留技術 (CO<sub>2</sub> Capture and Storage; CCS) も脱炭素化に向けて重要な役割を担う。

\*3 最新の 2017 年度のデータでは、家庭向け、産業向けそれぞれ 2010 年度比で約 16%、21% 高い [1-4]。

\*4 出典：一次エネルギー消費量は文献 [1-5] を、GDP は文献 [1-6] を参照し筆者作成。

\*5 出典：文献 [1-7] における 2014 年モデルプラント試算結果概要を参照。

\*6 安定供給 (Energy security)、経済性 (Economical efficiency)、環境適合 (Environment) + 安全性 (Safety)

\*7 第 5 次エネルギー基本計画の数値を元に筆者作成。

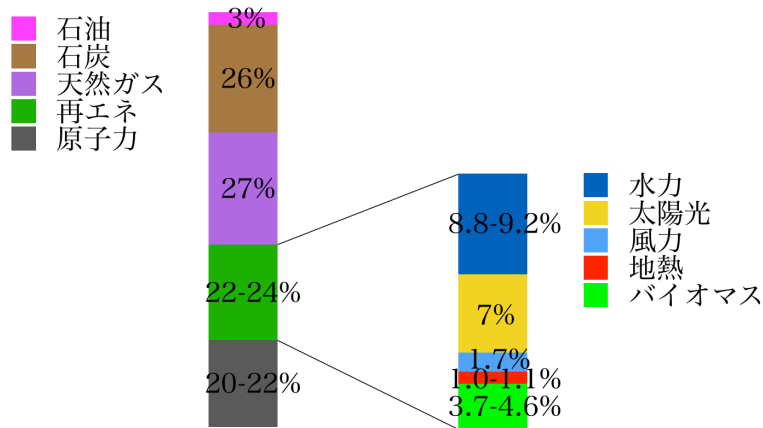


図 1.3 2030 年に目指すべき日本のベストミックス\*7.

## 1.2 本研究の目的・意義・新規性

上記のような背景から、日本がエネルギー基本計画に基づき推し進めていくエネルギー政策の実現可能性について、エネルギーシステムを定量分析するような研究は意義を持つと言える。そして、3E+S に明示されている経済性 (Economical efficiency) にも焦点を当て、エネルギーシステムのみではなく、経済全体を俯瞰した分析が求められる。さらに言えば、不確定要素の大きい新技術のポテンシャルを、長期的なスパンで考慮可能な分析は非常に価値が高いと言える。

本研究の目的は、独自に開発したエネルギー経済モデルを用いて上記の定量分析を行うことである。経済全体の産業連関構造を詳細に考慮可能な応用一般均衡モデルを土台とし、エネルギーを供給するエネルギー部門やエネルギー多消費産業である素材部門を工学データを用いて技術選択の議論を可能にすることで、CO<sub>2</sub> 排出量の削減のためにはどのような技術選択を行うことが我が国にとって合理的かという困難な議題に対し、経済性を担保した上で一定の示唆を与えることが可能な本モデルの存在意義は大きいと言える。

本研究の新規性は主に以下の 4 点である。まず 1 点目は、経済全体を俯瞰したエネルギー経済モデルでありながら、電力部門を非常に高時間解像度で分析している点である。電力部門の技術には変動性再生可能エネルギーも含まれており、それらのより現実的な運用を議論する上で高時間解像度分析は欠かせない。2 点目は、電力部門に加えて非電力エネルギー部門も詳細に考慮している点である。例えば石油製品部門における製品もガソリンや軽油、重油といった製品に細かく分類しそれらに物量単位を与えることで、社会全体のエネルギーフローを詳細に観察可能である。3 点目は上記に加えて素材部門の技術選択も考慮している点である。エネルギー多消費産業である素材部門における技術選択を論じることで、将来に向けた CO<sub>2</sub> 排出量削減の可能性を模索することが可能である。そして最後に 4 点目は、独自の計算手法によって、本来ならば大規模な連立方程式の求解によって解くべき問題を線形計画問題へと帰着させている点である。これにより、計算機における計算時間の大幅な抑制とモデルの発展性の向上を可能にした。そして、本モデルは複数のモデルによって計算を行い、その結果をフィードバックし合うモデルではなく、1 つのモデルで計算を完結させている点も特徴的である。

## 1.3 本論文の構成

まず本章にて、研究分野の背景とその背景に基づいた本研究の目的・意義・新規性について言及した。以下に次章以降の本論文の構成について言及する。第 2 章でエネルギー経済モデルの概要を述べる。本研究は先にも述べたように、エネルギー経済モデルの開発に従事するものである。エネルギー経済モデルはそれぞれ一長

一短あり，分析対象や立場を明確にした上で開発する必要がある。したがって，第 2 章では，エネルギー経済モデルの主な分類とそれに属する著名なモデルを紹介することでエネルギー経済モデルへの知見を深めるとともに，本研究が開発したモデルの立場を明確にする。第 3 章では，本研究で開発したモデルの定式化について説明を行う。本研究において，独自の計算手法を用いることで，産業連関構造を考慮しながら対象部門の技術選択を詳細に考慮可能な線形計画モデルを構築することに成功しており，第 3 章にて，モデルの根幹を成す具体的な定式化手法について説明を与えている。第 4 章以降，第 3 章で説明したモデルを拡張していく。まず第 4 章にて，電力部門の技術選択を考慮可能にしたモデルの定式化および計算結果について言及する。特に再生可能エネルギーの変動性をより詳細に考慮するために高時間解像度化している点についても触れる。第 5 章では，電力部門に加えて素材部門と非電力部門を詳細に扱ったモデルの定式化および計算結果について述べる。素材部門は，鉄鋼部門，セメント部門，紙・パルプ部門，石油化学部門の 4 部門について技術選択を考慮しており，排出税下における各部門の最適な技術運用とそれによる二酸化炭素削減可能量について議論する。また，経済的観点からも排出税が経済にもたらす影響を議論する。第 6 章では，温室効果ガス削減技術をモデルに追加し，電力部門および素材部門における技術選択に加え，さらなる CO<sub>2</sub> 排出量削減に向けた議論を行う。そして最後に第??章で本研究のまとめと今後の課題について言及し本論文を締めくくる。



## 参考文献

- [1-1] 国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス: 日本の温室効果ガス排出量データ
- [1-2] 名倉良雄: COP21 合意を受けた日本の今後の地球温暖化対策について, 環境省地球環境局 地球温暖化フォーラム (2015)
- [1-3] 経済産業省 資源エネルギー庁: 2018-日本が抱えているエネルギー問題, 経済産業省 資源エネルギー庁 ウェブサイト, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2018.html> (アクセス日: 2019年8月17日)
- [1-4] 経済産業省 資源エネルギー庁: 日本のエネルギー 2018「エネルギーの今を知る 10の質問」, 経済産業省 資源エネルギー庁 ウェブサイト, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2018/html/002/> (アクセス日: 2019年8月17日)
- [1-5] 経済産業省 資源エネルギー庁: エネルギー白書 2018 第2部, 経済産業省 資源エネルギー庁 ウェブサイト,  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018pdf/whitepaper2018pdf\\_2\\_2.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018pdf/whitepaper2018pdf_2_2.pdf) (アクセス日: 2019年8月17日)
- [1-6] THE WORLD BANK, GDP(current US\$), THE WORLD BANK Website,  
<https://data.worldbank.org/indicator/ny.gdp.mktp.cd> (アクセス日: 2019年8月17日)
- [1-7] 経済産業省 資源エネルギー庁: 長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告(案), 総合資源エネルギー調査会発電コスト検証ワーキンググループ(第6回会合)資料1(2015)
- [1-8] 経済産業省 エネルギー資源庁: 経済産業省 エネルギー資源庁 ウェブサイト,  
[https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/001/pdf/001\\_02\\_001.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf) (アクセス日: 2019年8月17日)
- [1-9] 経済産業省: 我が国の CCS 政策について, 経済産業省 ウェブサイト,  
[https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso\\_nenryodenchi/co2free/pdf/006\\_02\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/co2free/pdf/006_02_00.pdf) (アクセス日: 2019年8月17日)
- [1-10] International Energy Agency: CO<sub>2</sub> Emissions Statistics, IEA Website,  
<https://www.iea.org/statistics/co2emissions/> (アクセス日: 2019年8月17日)
- [1-11] 経済産業省: 水素基本戦略, 2017年 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 経済産業省 ウェブサイト,  
<https://www.iea.org/statistics/co2emissions/> (アクセス日: 2019年8月17日)
- [1-12] 経済産業省: 水素基本戦略の概要, 経済産業省 ウェブサイト,  
<https://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-2.pdf> (アクセス日: 2019年8月17日)

## 第2章

# エネルギー・経済モデルの概要

第1章で述べたように、エネルギー政策を定量的に評価・分析する手段として、エネルギー・経済モデルが有効である。本研究もモデルの開発に従事するものであり、それを論ずる前に、一般的なモデルの概要について言及する。まず2.1節において、一般的なモデルの分類とそれに属する著名なモデルをいくつか紹介する。続いて、2.2節では、本モデルのベースとなる応用一般均衡モデルについて言及する。そして、応用一般均衡モデルのひとつ、国際貿易分析プロジェクト (Global Trade Analysis Project; GTAP) モデルおよびデータベースについて2.3節で述べた後、応用一般均衡モデルとは異なるアプローチでエネルギーシステムの技術運用について論ずることが可能なボトムアップ型技術最適モデルについて2.4節で述べる。そして2.5節で、これらエネルギー・経済モデルにおける、本研究で開発したモデルの位置づけについて記述する。最後に2.6節で本章を締めくくる。

### 2.1 モデルの分類

エネルギー・経済モデルとは、現実に起こっている事象、あるいは今後起こりうるであろう事象について、経済学やあるシステム (特にエネルギーシステム) 特有の工学的特性に基づいて数式で記述された系のことを言う。そのモデルの解を用いて、対象の評価・分析を行うことができる。一般には、より現実的なモデルを構築すればするほど変数の数は増えるので、人の演算能力では追いつかず、計算機に委ねることになる。そして他の学問分野と同様、現実に起こっていること、起こりうることをそのまま忠実に数式で表現することは不可能である。また、計算機の能力にも限界は存在するので、その能力の範囲内で求解可能なモデルを構築する必要がある。したがって、モデルで評価・分析したい対象によって立場を確立し、仮定の設定や譲歩を行う必要がある。それに伴ってエネルギー・経済モデルも多様化した。モデルの分類も文献 [2-1, 2-2, 2-3] のように様々であるが、ここでは文献 [2-6] の分類に基づいて紹介する。

文献 [2-6] ではエネルギー・経済モデルを、①シミュレーション型か最適化型 (数理計画型) か、②ボトムアップ型かトップダウン型かの2軸で分類している。まずは前者について説明する。

一般に「シミュレーション」と聞くと計算機を用いた数値計算を連想させる場合が多く、広義には数理計画問題もこれに含有する場合があるが、この分野では明確にそれらの意味を定義した方が齟齬が生じにくい。文献 [2-6] では、シミュレーションと数理計画の違いを以下のように説明している。

"A model is needed to simulate the physical behaviour of a defined system (here the energy system, and in particular the power sector), with its inputs and parameters. In the economic language, a simulation is usually recursive: the model is run year after year and the hypotheses and parameters can evolve over time. Another modelling approach is the optimization. It is based on a simulation of the physical reality, but it has

one or several criteria and parameters being optimized, so the logic is different."

また、森戸ら (1998)<sup>[2-7]</sup> は、以下のようにその違いを表現している。

「I/O<sup>\*1</sup>関係が既知であるときに、一定の制約のもとで、定められた評価尺度を最適化する政策を求めるツールが数理計画、(中略)、変数と評価尺度間の未知の関係を明らかにする評価のツールがシミュレーション」

すなわち、数理計画は、「ある最適解を得るためにはどのような政策を行えばよいのか」を議論するのに対し、シミュレーションは、「ある政策を実行すればどのような結果になるか」を議論する。両者表現は違えど、シミュレーション型か最適化型かという評価軸は、目的の違いと解釈してよい<sup>\*2</sup>。数学的に言えば、シミュレーション型のモデルは微分方程式を用いたモデルや待ち行列モデル等様々なアプローチが存在する。数理計画問題は、目的関数と制約条件に分かれており、その制約条件のもとである関数を最大化あるいは最小化して、内生変数を求めるモデルである。本研究で扱うモデルは数理計画問題であり、最適化型に分類される<sup>\*3</sup>。

続いて②の分類について説明する。文献 [2-6] では、次のように説明している。

"A top-down model describes the macro-economic relationships between the components, while a bottom-up model starts from the technology description of supply and demand."

すなわち、トップダウンモデルは、マクロ経済学に基づき各部門間の産業連関構造を記述したモデルであり、ボトムアップモデルは、ある特定部門に着眼しその部門における工学的特性を考慮しながら、一定のシナリオ(例えば需要の外生化)の元で最適な技術運用を求めるモデルである。表 2.1 は、それぞれの長短をまとめたものである。それが示す通り、両者の特徴はトレードオフの関係にあるので、分析対象や目的によって立場を慎重に選択する必要がある。後ほど言及するが、双方のデメリットをカバーするハイブリッドモデルの開発も近年盛んに行われており、本研究で開発しているモデルもハイブリッドモデルに該当する。

表 2.1 ボトムアップモデル、トップダウンモデルの特徴<sup>\*4</sup>。

トップダウンモデル	ボトムアップモデル
経済学的アプローチ	工学的アプローチ
悲観的推計	楽観的推計
技術を明示的に記述不可	技術の詳細説明が可能
既存技術のみ考慮可能	新技術を考慮可能
最も効率的な技術は生産可能性フロンティア <sup>*5</sup> によって決定	効率的な技術は生産可能性フロンティアを超える可能性を含有
予測を目的とし既存の集約データを使用	探索を目的とし細分化されたデータを使用
観察された市場の動向をベース	観察された市場の動向から独立
利用可能な最も効率的な技術を無視し効率改善の可能性を過大評価する傾向	市場の閾値を無視し効率改善の可能性を過大評価する傾向
産業連関関係を内生化する	技術のコストを直接評価
歴史的に不連続性がないと仮定	エネルギー部門と他部門との相互関係は無視できると仮定

\*1 Input/Output の略。産業連関構造の意。

\*2 文献 [2-7] では、モデルの柔軟性という切り口でも違いを論じている。

\*3 数理計画法について多くの書籍が存在しているが、筆者は文献 [2-4, 2-5] 等で勉強した。

\*4 文献 [2-2] の Table 1 を筆者訳。

\*5 生産可能性フロンティアとは、最も効率のよい生産を行った場合の、生産にかかった時間と生産量の組み合わせをグラフ化したもの。

下表 2.2 は、いくつかの著名なモデルを上記の軸にしたがって分類したものである。

表 2.2 著名なモデルの分類。

	トップダウンモデル	ハイブリッドモデル	ボトムアップモデル
シミュレーション型	GREEN, EPPA	NEMS	MEDEE, POLES
最適化型	DICE, RICE	MARKAL-MACRO, MESSAGE-MACRO, DNE21	MARKAL, MESSAGE, TIMES

シミュレーション型のトップダウンモデルである GREEN (GeneRal Equilibrium ENvironmental) モデル [2-8] は、1991 年から 92 年にかけて OECD にて開発されたものであり、CO<sub>2</sub> 制約下における経済の動向を評価する目的で開発された。そして MIT (Massachusetts Institute of Technology) が GREEN モデルを発展させる形で、MIT-EPPA (Emissions Predictions and Policy Analysis) モデル [2-9] が開発された。どちらも一般均衡モデル (詳細は次節 2.2) に分類される。シミュレーション型ボトムアップモデルは、MEDEE (Modele d'Evolution de la DEmande d'Energie) モデル [2-10] が著名である。途上国の社会構造の変化を考慮してエネルギー需要量を予測することが可能なモデルである。また、POLES (Prospective Outlook on Long-term Energy Systems) モデル [2-11] はエネルギーの生産から消費までをモデリングし、その過程でエネルギーシステムから排出される温室効果ガスの排出量を 2050 年までシミュレーション可能なモデルである。以上、経済的アプローチのトップダウンモデルとエネルギーシステムに着眼したボトムアップモデルを紹介したが、それら 2 つの要素を備えたシミュレーション型ハイブリッドモデルとして、NEMS (National Energy Modeling System) モデル [2-12] が挙げられる。NEMS モデルは米国エネルギー情報局 (U.S. Energy Information Administration; EIA) が開発に従事した。エネルギーシステムモデルとマクロ経済モデルを統合させたシミュレーション型のモデルであり、市場のリソースや技術選択、人口統計の過程に基づき、生産や消費、エネルギー価格等を推計する。

続いて最適化型の著名なモデルを紹介する。最適化型トップダウンモデルで最も有名なモデルは、DICE (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy) モデル [2-13] であろう。IPCC の 2℃目標設定にも大いに貢献した地球温暖化の統合評価モデル (Integrated Assessment Model; IAM) の基礎が DICE モデルであり、その功績から、開発者の Nordhaus 氏にはノーベル経済学賞 (2018) が与えられている。DICE モデルは、目的関数に効用関数 (詳細は 2.2 節) を採用し、その効用関数を経済関係式ならびに地球物理関係式の下で最大化したときの生産量や消費、温室効果ガスの排出量等を求め、長期的な地球温暖化対策に定量評価を与えることが可能なモデルである。DICE モデルは世界全体を 1 地域としているが、それを多地域化<sup>\*6</sup>したモデルが RICE (Regional Integrated model of Climate and the Economy) モデル [2-14] である。一方、同じ最適化型でも、MARKAL (MARKet ALlocation) モデル [2-15] はボトムアップ的アプローチをするモデルである。エネルギーシステム総コストを工学的制約条件下で最小化するような技術選択を求める。MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental impacts) モデル [2-16] および TIMES (The Integrated Markal-Efom System) モデル [2-17] は MARKAL モデルから発展したモデルである。その他にも文献 [2-18] のように、MARKAL/TIMES モデルの時間解像度の粗さとそれに起因する VRE コスト低下時における導入量の過大評価の可能性に着眼し、電力部門の解像度を 10 分間隔に発展させたモデルも存在する。そして、MARKAL モデルおよび MESSAGE モデルに経済モデルをリンクさせた MARKAL-MACRO モデル (文献 [2-15] の PART2)、MESSAGE-MACRO モデル [2-19] がハイブリッドモデルに分類される (ハイブリッドモデルの詳細は 2.5)。また藤井ら (1998)<sup>[2-20]</sup> によって開発された DNE21 (Dynamic New Earth 21) もハイブリッドモデルとして知られている。

の。

\*6 アメリカ合衆国, 日本, 旧ソビエト連邦, 中国, ヨーロッパ, Huge(インド), Large(ブラジル, インドネシア), Midsized(カナダ,

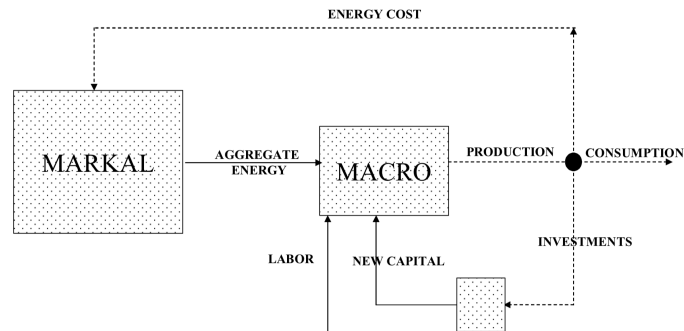


図 2.1 MARKAL-MACRO モデルのフロー図 (文献 [2-15] の Figure 3-1 を転載).

## 2.2 応用一般均衡モデル

本節では、経済モデルの最も基本的なモデルの 1 つである応用一般均衡モデルについて解説する。2.2.1 項で概要について説明した後、2.2.2 項で最も簡素化した経済における応用一般均衡モデルの理論とその立式方法について言及する。尚、本節はその多くの内容を文献 [2-21, 2-22] を参考にして書いた。

### 2.2.1 応用一般均衡モデルの概要

応用一般均衡モデルのベースとなる一般均衡理論は、1870 年代に Walras (Marie Esprit Léon Walras, 1834-1910) によって創られ、その後 Lausanne 学派<sup>\*7</sup>が発展させた、経済学における一理論である。財<sup>\*8</sup>の消費者は効用<sup>\*9</sup>を最大化するよう需要を決定し、財の生産者は利潤を最大化するように供給を決定し、各財の市場では需要と供給が一致するように価格が決定されるという完全競争市場<sup>\*10</sup>の価格メカニズムに基づいて、すべての財の相互依存を考慮した市場の均衡を論じるのが一般均衡理論である。応用一般均衡モデルは、この一般均衡モデルに基づき連立方程式を構築し、それを解くことで数値解を導出できるモデルである。故に、「計算可能な」という意味で応用一般均衡モデルは、"Computable General Equilibrium (CGE) Models"と表記される。人類の経済発展と共に地球上の資源分配が昨今の課題として取り上げられている中、そこに数値解をもたらす CGE モデルの存在意義は大きいと言える。

CGE モデルの長所として以下の点が挙げられる。第一に、CGE モデルを用いれば、状況や条件が異なった均衡状態を描写することが出来る。例えば税率の変更である。消費税や関税の増減が経済にどのような影響を与えるかを細かく分析することが可能であり、経済政策の定量評価に役立てることができる。第二に必要なデータ量の少なさである。大抵の場合、モデルを構築する際に必要が基準均衡解は 1 期分のデータである。統計学に基づいて経済モデルの妥当性を検証する計量経済学の分野では、少なくとも数期分の時系列データが必要になり、データを揃える労力という観点では、CGE モデルに軍配が上がる。一方で短所も持つ。第一に上記の基準均衡解に選択した年のデータが均衡的かどうかである。例えば、日本におけるバブル崩壊やリーマンショックのような経済における異常事態が発生した年のデータを均衡解として選択してしまうと、そこから導かれる結論は必ずしも現実的なものではない。第二に、1 期分のデータのみを用いるということは、静学モデルにな

オーストラリア等 11 国), Small(ベネズエラ, ルーマニア等 38 国), Tiny(ケニア, アイスランド等 137 国や地域) の計 10 地域。

<sup>\*7</sup> Walras が創始し Pareto (Vilfredo Frederico Damaso Pareto, 1848-1923) らによって継承・発展させられた経済学における一学派。一般均衡理論をパラダイムとして持つ。

<sup>\*8</sup> 資源や物品, 生産物の総称。

<sup>\*9</sup> 財の消費によって個人が得られる満足度, 幸福度を数値化したもの。

<sup>\*10</sup> 需要者と供給者が個人の影響を無視できるほど多数存在している, 市場への参入が自由である, 各人が取引を完全に平等に理解している, 等の理想的な条件を有した仮想的市場のこと。

らざるを得ないということを意味する。しかし現実的な経済では投資や貯蓄といった期をまたぐ動学的な要素の考慮が不可欠である。そこで、このデメリットをカバーすべく動学的応用一般均衡モデルの開発も各所で進められている。第三に、貨幣等の金融的要素を取り入れることが困難な点が挙げられる。したがって絶対価格を求めることはできず、ある基準財（ニューメレール）を設定し、その価格を 1 とすることで他の財の相対価格を用いて価格を議論することになる。この弱点を克服すべく、金融応用一般均衡モデルの開発も試みられている。

## 2.2.2 簡単な応用一般均衡モデルの数学的説明

簡単のため、1つの家計が2つの財（財1と財2）と2つの生産要素（資本と労働）からなる完全競争市場に存在しているとして、応用一般均衡モデルを作成する。静学モデルを考え、貿易も行わないものとする。また、政府の存在も無視する。企業（アクティビティ）は財1を生産するそれと財2を生産するそれとでそれぞれ1つずつ存在し、家計は資本と労働を企業に提供することでその対価として収入を得る。それぞれの企業はその生産要素を使って生産活動を行う<sup>\*11</sup>。現実の経済と大きく乖離する設定が多いが、すべてのCGEモデルはこの簡素なモデルを拡張したものであるので、簡単なCGEモデルを理解するところからスタートするべきであるという点を強調しておきたい。

まずは家計から立式しよう。家計は自らの満足度を最大化するように財を消費する。しかし、予算には限りがある。したがって家計は、予算制約式のもとで消費の効用関数を最大化するので、

$$\max_{\mathbf{d}} u = g(\mathbf{d}) \quad (\mathbf{d} = (d_1, d_2)) \quad (2.1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_i p_i d_i = \sum_f p_f^F \bar{v}_f \quad (2.2)$$

$u$ : 評価関数,  $g$ : 効用関数,  $i$ : 財の種類 ( $i = 1, 2$ ),  $f$ : 生産要素の種類 ( $f = 1, 2$ ),  $d_i$ :  $i$  財の需要量,  $p_i$ :  $i$  財の価格,  $p_f^F$ : 生産要素  $f$  の価格,  $\bar{v}_f$ : 生産要素  $f$  の賦存量

なる問題と向き合えばよい。この最大化問題を Lagrange 未定乗数法を用いて解く。すなわち、Lagrangian を  $\mathcal{L}$ 、未定定数を  $\lambda$  とすると、

$$\mathcal{L} = g(\mathbf{d}) - \lambda \left( \sum_i p_i d_i - \sum_f p_f^F \bar{v}_f \right) \quad (2.3)$$

となるので、その最大化条件は、

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial d_i} = \frac{\partial g(\mathbf{d})}{\partial d_i} - \lambda p_i = 0 \quad (i = 1, 2), \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = - \left( \sum_i p_i d_i - \sum_f p_f^F \bar{v}_f \right) = 0 \quad (2.5)$$

となる。(2.4)、(2.5) 式は変数3つ ( $d_1, d_2, \lambda$ ) に対して3本の式があるので、この連立方程式を解くことで需要

<sup>\*11</sup> 中間投入もここでは考えない。

$d_i$  を求めることが出来る．例えば効用関数  $g$  が Cobb-Douglas 型で与えられるとすると，

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial d_i} \prod_i d_i^{\alpha_i} - \lambda p_i = 0 \quad (i = 1, 2) \\ \sum_i p_i d_i - \sum_f p_f^F \bar{v}_f = 0 \end{cases}, \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} \frac{\alpha_i}{d_i} \prod_i d_i^{\alpha_i} - \lambda p_i = 0 \quad (i = 1, 2) \\ \sum_i p_i d_i = \sum_f p_f^F \bar{v}_f \end{cases} \quad (2.7)$$

と計算できる．ここで  $\alpha_i$  は効用関数の支出割合係数であり， $0 \leq \alpha_i \leq 1, \sum_i \alpha_i = 1$  の条件を満たす．(2.7) の第 1 式から  $\lambda$  を消去すると，

$$\alpha_1 \cdot d_2 \cdot p_2 = \alpha_2 \cdot d_1 \cdot p_1 \quad (2.8)$$

を得るので，(2.7) の第 2 式に代入して，

$$d_i = \frac{\alpha_i}{p_i} \left( \sum_i p_i d_i - \sum_f p_f^F \bar{v}_f \right) \quad (2.9)$$

と  $i$  財の需要量が求まる．(2.9) 式が示す通り，需要量は価格と予算の関数であり，Marshall の需要関数あるいは非補償需要関数と呼ばれる\*12．

次に企業が解くべき問題を解説する．先程も述べたように，企業は家計からの生産要素を投入財として財を生産する．本来なら生産要素だけではなく，他企業から材料を購入するはずだが，今回は生産要素のみの投入を考えている．企業は投入物を  $\mathbf{x}_f$  ( $\mathbf{x}_f = (x_{f,1}, x_{f,2})$ ) とすると，生産関数  $z_i(\mathbf{x}_f)$  にしたがって生産量を決定する．生産量から投入財を購入した費用を引いたものが利潤であり，企業はこの利潤を最大化するように行動するので，

$$\max_{\mathbf{x}_f} \pi_i = p_i^Y z_i(\mathbf{x}_f) - \sum_f p_f^F x_{f,i} \quad (2.10)$$

の問題を解くことになる．制約条件が存在しないので，この問題が解けるためには，生産関数は準凹関数である必要がある．その前提条件の下，(2.10) 式が解ける条件は，

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial x_{f,i}} = p_i^Y \frac{\partial z_i(\mathbf{x}_f)}{\partial x_{f,i}} - p_f^F = 0 \Leftrightarrow p_i^Y \frac{\partial z_i(\mathbf{x}_f)}{\partial x_{f,i}} = p_f^F \quad (2.11)$$

である．例えば生産関数が，

$$z_i(\mathbf{x}_f) = b_i \prod_f x_{f,i}^{\beta_{f,i}} \quad (2.12)$$

$b_i$ : 生産関数の規模係数,  $\beta_{f,i}$ :  $i$  企業が<sup>3</sup>行う生産要素  $f$  の投入割合 ( $0 \leq \beta_{f,i} \leq 1, \sum_f \beta_{f,i} = 1$ )

と Cobb-Douglas 型で与えられたとして，(2.11) 式に代入して家計のときと同様に投入財  $x_{f,i}$  について解くと，

$$x_{f,i} = \frac{\alpha_i}{p_f^F} p_i^Y z_i(\mathbf{x}_f) \quad (2.13)$$

と生産要素の需要関数を求めることができる．

\*12 需要関数を効用関数に代入した効用関数を特に間接効用関数と呼ぶ．

以上、家計と企業の行動を立式した。当然、家計と企業は独立しているわけではなく、生産があつての消費であり、消費があつての生産である。したがって、以下のような市場の均衡条件を考えなければならない。

$$d_i = z_i(\mathbf{x}_f), \quad (2.14)$$

$$\bar{v}_f = \sum_i x_{f,i}, \quad (2.15)$$

$$p_i = p_i^Y. \quad (2.16)$$

(2.14) 式は市場の需給バランス式である。生産した財は漏れなく家計に消費される。(2.15) 式は生産要素の需給均衡式である。家計が提供した生産要素は、2つの企業によって消費される。(2.16) 式は、生産価格と市場価格が同じであることを表している。今、政府は無視して考えているので、税金による上乗せがない。また、仲介企業も考えていないので、生産価格と市場価格は同じになる。

以上をまとめると、1つの家計と2つの財(財1と財2)、2つの生産要素(資本と労働)からなる完全競争市場という最も簡単な状況下でCGEモデルを考えた場合、以下の連立方程式を解くことで均衡解を得ることができる。

$$d_i = \frac{\alpha_i}{p_i} \left( \sum_i p_i d_i - \sum_f p_f^F \bar{v}_f \right) \quad \forall i, \quad (2.17)$$

$$x_{f,i} = \frac{\alpha_i}{p_f^F} p_i^Y z_i(\mathbf{x}_f) \quad \forall i, \quad (2.18)$$

$$z_i(\mathbf{x}_f) = b_i \prod_f x_{f,i}^{\beta_{f,i}} \quad \forall f, i, \quad (2.19)$$

$$d_i = z_i(\mathbf{x}_f) \quad \forall i, \quad (2.20)$$

$$\bar{v}_f = \sum_i x_{f,i} \quad \forall f, \quad (2.21)$$

$$p_i = p_i^Y \quad \forall i. \quad (2.22)$$

## 2.3 国際貿易分析プロジェクト (GTAP)

前節で述べたように、応用一般均衡モデルの初期時点における基準均衡解として、その時点のSAM(あるいはそのベースとなる産業連関表)が必要となる。しかし、各国の産業連関表の作成方法は細かくは統一されておらず、各々の国の産業連関表をそれぞれ入手しモデリングする方法では、特に貿易データにおいてずれが生じる可能性が高い。そこで本研究では、世界各地域のデータをまとめて提供する「GTAP データベース」を用いて、各種データ・パラメータの設定を行っている。現状、本研究の対象は日本のみであるので、日本の産業連関表を用いても上記の懸念事項は無視できるが、本研究は対象地域を拡大する余力を残しており、今後を見据えて、現在の1地域モデルからGTAPデータベースの値を使用している。本節では、2.3.1項でGTAPモデルの概要を説明した後、2.3.2項で、本モデルが実際に使うGTAPデータベースの変数について記述する。

### 2.3.1 GTAP モデル

そもそもGTAPとは何か。GTAPは、自身のウェブサイトで以下のように存在意義と目的を定義している。

"GTAP (Global Trade Analysis Project) is a global network of researchers and policy makers conducting quantitative analysis of international policy issues. GTAP's goal is to improve the quality of quantitative analysis of global economic issues within an economy-wide framework."

すなわち、グローバルな政策問題に対して定量分析を行う研究者や政策立案者で構成された国際的なネットワークであり、経済全体の枠組みの中でその定量分析の質を向上させていくことを目的としている。そし



て GTAP モデルとは，GTAP が開発を手掛ける CGE モデルであり，1992 年にアメリカのパルーデュー大学の Hertel 氏が中心となり開発された．パルーデュー大学農業経済学部の世界貿易分析センターが提供している．

図 2.2 は，GTAP モデルのある地域における貨幣の流れを模式的に表したものである．民間家計と政府を地域家計の主体として設定している．民間家計は生産者に対して生産要素(労働，資本，土地)を提供する対価として要素取得を得る．政府はあらゆる税を収入としている<sup>\*13</sup>．地域家計において余った貨幣は貯蓄に回される．GTAP の特徴として，国際銀行<sup>\*14</sup>と呼ばれる，地域から独立した仮想的な主体を導入している点が挙げられる．貯蓄は一旦国際銀行に送られ，減価償却後の金額が純投資として各地域の生産者へと配分される．こうすることで，各地域の貯蓄と投資を均等化させている．生産者は，生産要素と国内外の中間投入を用いて，民間・政府消費および輸出，投資に見合った生産を行い，需給をバランスさせる．

図 2.3 は生産者行動の枠組みを示したものである．生産者は規模に関して一定の生産を行う技術を有しているとし，Leontief 型生産関数に従って生産量が与えられたもとにおいて中間投入と付加価値を決定する．その代替は一定である．そして，CES 型生産関数によって付加価値は土地，資本，労働が，中間投入は国内財と輸入財が決定される．輸入財は，どの地域から輸入するかも CES 型生産関数で決定される<sup>\*15</sup>．図 2.4 は生産された財を消費する消費者の行動の枠組みを説明する図である．予算制約のもとで貯蓄を説明変数<sup>\*16</sup>として含む Stone-Geary 型効用関数を最大化するよう消費行動を行い，政府消費，貯蓄，民間消費の水準が満たされる．政府消費は Cobb-Douglas 型効用関数によって各財別の需要を求めることができ，そして CES 型効用関数によってその需要は効用関数で国内財か輸入財かを決定する．一方民間消費は，CDE 型支出関数によって各財別の支出額が求まり，政府消費と同様，CES 型効用関数によって国内財か輸入財かを決定する．

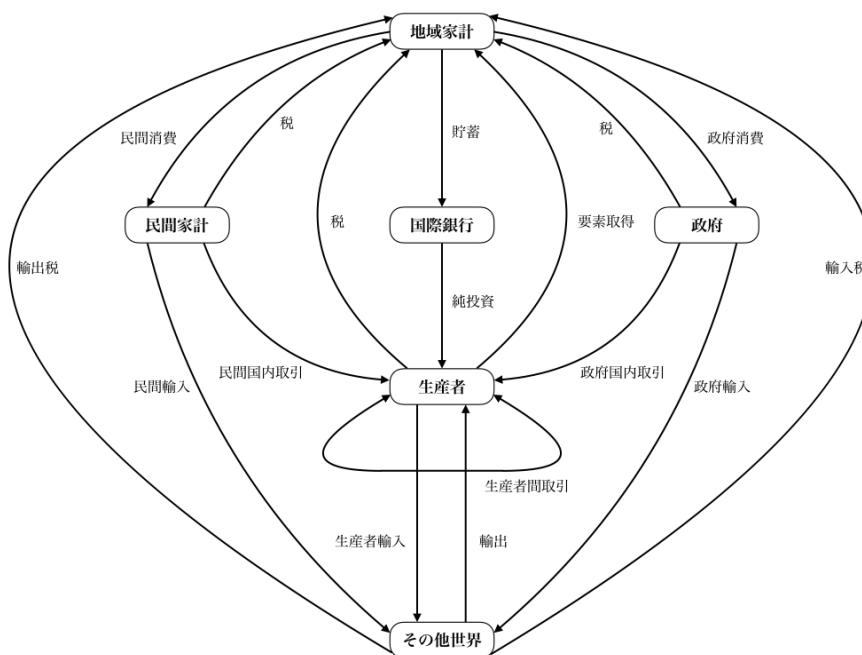


図 2.2 GTAP の概要．矢印の方向は貨幣の流れ<sup>\*17</sup>．

\*13 補助金は負の収入として計上．

\*14 文献によっては世界銀行とも．

\*15 国内財と輸入財，輸入財と輸入財は不完全代替とする仮定を Armington 仮定と言う．

\*16 目的変数を説明する変数のこと． $y = ax_1 + bx_2 + c$  ( $a, b, c$  は定数) において， $y$  を目的変数，すなわち求めたい変数としたときの  $x_1$  および  $x_2$  が説明変数に該当する．

\*17 文献 [2-23] の付録 A から筆者作成．

\*18 文献 [2-24]，213 ページの付図 3-2-2 を参考に筆者作成．

\*19 文献 [2-24]，214 ページの付図 3-2-3 を参考に筆者作成．

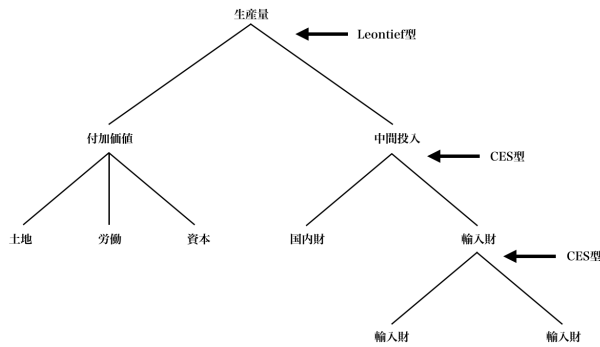


図 2.3 GTAP モデルの生産者行動の枠組み<sup>\*18</sup>。

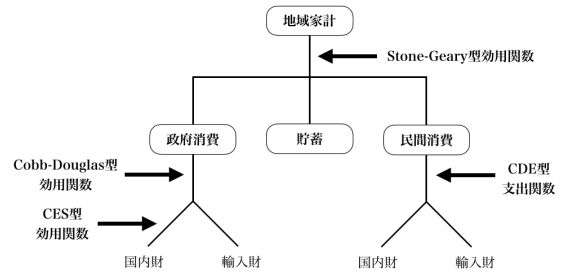


図 2.4 GTAP モデルの消費者行動の枠組み<sup>\*19</sup>。

### 2.3.2 GTAP データベース

上記のモデルとともに、世界各地域の生産や消費、貿易、税金、投資、資本、労働等のデータを格納したデータベースが提供されており、GTAP データベースと呼ぶ。1993年にGTAP 1 Data Base がリリースされてから順次アップデートされ、最新版は2019年7月にリリースされたGTAP 10 Data Baseである。GTAP 10は本論文執筆最中にリリースされたモデルということもあり、本モデルで使用しているデータは1つ前のバージョンのGTAP 9 Data Baseである。また、GTAP 9からGTAP-POWERと呼ばれる、電力部門を分割したデータベースを提供するようになった。本研究はこのGTAP-POWERを用いて各種パラメータの設定を行っているので、以下の説明はGTAP-POWERに基づくものとする<sup>\*20</sup>。

表 2.3 GTAP-POWER で定義される付加価値財一覧。

記号	説明
<i>capital</i>	資本
<i>off_mgr_pros</i> <sup>*21</sup>	管理職及び専門職
<i>tech_aspros</i> <sup>*22</sup>	技術者及び準専門的職業従事者
<i>clerks</i> <sup>*23</sup>	事務的職業従事者
<i>service_shop</i> <sup>*24</sup>	サービス職業従事者、及び市場での販売従事者
<i>ag_othlowsk</i> <sup>*25</sup>	農業従事者、及び非熟練労働者
<i>land</i>	土地
<i>naturalResource</i>	天然資源

GTAP-POWER は 68 部門 140 地域のデータを扱う。それぞれ付録の表??, 表??に示した。部門はアクティビティと財を有し、アクティビティが生産活動によって財を生産する。部門内に含まれるアクティビティと

<sup>\*20</sup> ノーマルバージョンでは電力部門を'ely'とひとつにまとめていたが、POWERバージョンではそれを、8つの発電部門と1つの送配電部門に分割している。それ以外にノーマルバージョンとPOWERバージョンに差はなく、本項の内容は特に電力部門を分割する必要がない読者にも参考になるであろう。

<sup>\*21</sup> Legislators, senior officials and managers (ISCO- 88 Major Groups 1), and professionals (Major Group 2).

<sup>\*22</sup> Technicians and associate professionals (Major Groups 3).

<sup>\*23</sup> Clerks (Major Groups 4).

<sup>\*24</sup> Service workers and shop and market sales workers (Major Groups 5).

<sup>\*25</sup> skilled agricultural and fishery workers (Major Group 6), craft and related trade workers (Major Group 7), plant and machine operators and assemblers (Major Group 8), and elementary occupations (Major Group 9).

財はそれぞれ1つずつであり、一対一対応する。すなわち、例えば *pdr* アクティビティ<sup>\*26</sup>は *pdr* 財<sup>\*27</sup>のみ生産し、それ以外の財の生産は行わない。同様に *pdr* 財は *pdr* アクティビティ以外から生産されることはない。付加価値財は、下表??で示す通りである。労働のみスキル別に5つに分類されている。また、投資に関しては、'CGDS' アクティビティで表現される。すなわち、ある財が投資にどれだけ使われたかの合計量はデータベースで確認できるが、あるアクティビティが投資にどれだけ貨幣を投入したかはデータとして存在せず、必要な場合は別途推計する必要がある。表 2.4 は本モデルで使用したデータ一覧である。これ以外にも多数のデータが用意されており、詳しくは文献 [2-23] を参照されたい。

表 2.4: 本モデルで使用する GTAP-POWER の主要変数一覧。

変数名	説明 (英文)	説明
$VOM_{n,r}$	Value of Output at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における $n$ アクティビティの総額
$VOA_{n,r}$	Value of Output at Agent' prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域における $n$ アクティビティの総額
$VDFM_{m,n,r}$	Value of Domestic Firm's purchases at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における $n$ アクティビティにおける企業による国内財 $m$ の総額
$VDFA_{m,n,r}$	Value of Domestic purchases by Firms at Agents' prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の国内財 $m$ の中間投入額
$VDPM_{m,r}$	Value of Domestic Personal purchases at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における民間による国内財 $m$ の総額
$VDPA_{m,r}$	Value of Domestic Personal purchases at Agent prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域における民間による国内財 $m$ の総額
$VDGM_{m,r}$	Value of Domestic Government purchases at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における政府による国内財 $m$ の総額
$VDGA_{m,r}$	Value of Domestic Government purchases at Agent prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域における政府による国内財 $m$ の総額
$VIFM_{m,n,r}$	Value of Import Firm's purchases at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における $n$ アクティビティにおける企業による輸入財 $m$ の総額
$VIFA_{m,n,r}$	Value of Import Firm's purchases at Agent prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域における $n$ アクティビティにおける企業による輸入財 $m$ の総額
$VIPM_{m,r}$	Value of Import Personal purchases at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における民間による輸入財 $m$ の総額
$VIPA_{m,r}$	Value of Import Personal purchases at Agent prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域における民間による輸入財 $m$ の総額
$VIGM_{m,r}$	Value of Import Government purchases at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における政府による輸入財 $m$ の総額

\*26 稲作生産業。

\*27 玄米、白米。

変数名	説明 (英文)	説明
$VIGA_{m,r}$	Value of Import Government purchases at Agent prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域における政府による輸入財 $m$ の総額
$VXMD_{m,r,s}$	Value of eXports at Market prices by Destination	$r$ 地域における市場価格で表現された、 $r$ 地域から $s$ 地域へ輸送される財 $m$ の総額
$XTAXD_{m,r,s}$	tax on exports	$m$ 財を $r$ 地域から $s$ 地域へ輸送する際に発生する輸出税の総額
$VXWD_{m,r,s}$	Value of eXports at World prices by Destination	FOB 世界価格 <sup>*28</sup> で表現された、 $r$ 地域から $s$ 地域へ輸出される財 $m$ の総額
$VTWR_{m,r,s}$	Value of Transportation at World prices by Route	世界価格で表現された、 $r$ 地域から $s$ 地域へ $m$ 財を輸送する際に発生する輸送サービスの供給総額
$VIWS_{m,r,s}$	Value of Imports at World prices by Source	CIF 世界価格 <sup>*29</sup> で表現された、 $r$ 地域から $s$ 地域へ輸出される財 $m$ の総額
$MTAX_{m,r,s}$	tax on imports	$m$ 財を $r$ 地域から $s$ 地域へ輸送する際に発生する輸入税の総額
$VIMS_{m,r,s}$	Value of Imports at Market prices by Source	$s$ 地域における市場価格で表現された、 $r$ 地域から $s$ 地域へ輸出される $m$ 財の総額
$VST_{w,r}$	exports of international transport service	$r$ 地域における市場価格で表現された、国際輸送サービス $w$ への輸出総額
$DFTAX_{m,n,r}$	TAX of Domestic Firms' purchases	$r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の国内財 $m$ の投入に要する税金
$IFTAX_{m,n,r}$	TAX of Import Firms' purchases	$r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の輸入財 $m$ の投入に要する税金
$VIFA_{m,n,r}$	Value of Import purchases by Firms at Agents' prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の輸入財 $m$ の中間投入額
$VIFM_{m,n,r}$	Value of Import purchases by Firms at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の輸入財 $m$ の中間投入額
$EVFA_{e,n,r}$	Value of Firms' purchases of production Elements at Agent prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の $e$ 付加価値財の総額
$EVFM_{e,n,r}$	Value of Firms' purchases of production Elements at Agent prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の $e$ 付加価値財の総額
$FTAX_{n,r}$	Fixed assets TAX	$r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の固定資産税
$LTAX_{n,r}$	Labor TAX	$r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の労働税

<sup>\*29</sup> ここに FOB 世界価格の注釈が入ります。

<sup>\*30</sup> ここに CIF 世界価格の注釈が入ります。

## 2.4 ボトムアップ型技術選択モデル

以上までの説明と被る点も多々あるが、本項ではボトムアップ的アプローチを行うモデルの概要について、MARKAL/TIMES モデルをベースとした文献 [2-18] を元に説明する。ボトムアップ型のエネルギーモデルはトップダウン型と異なり、1つの部門、特にエネルギー部門のみに着目して立式する。図 2.5 は文献 [2-18] から転載したモデルのシステム概要である。

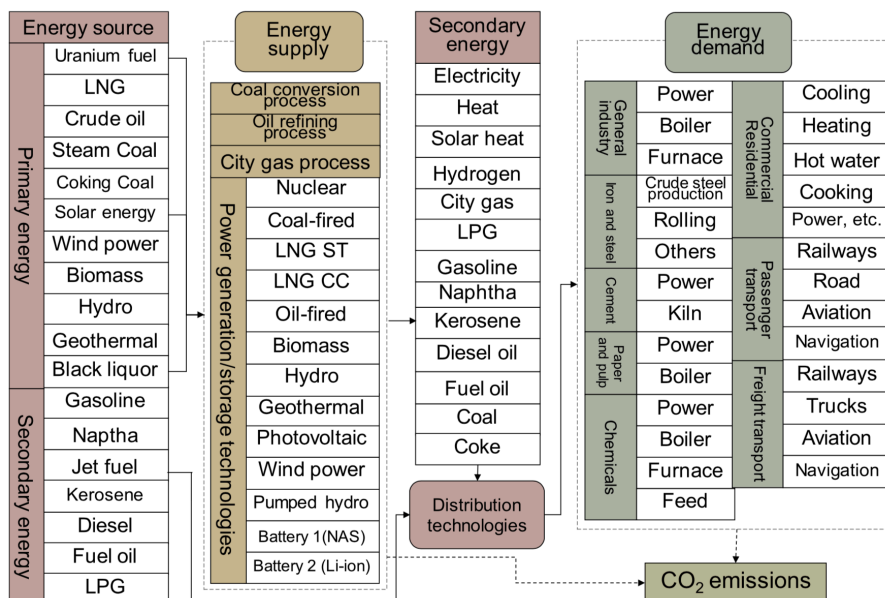


図 2.5 文献 [2-18] のモデルのシステム概要 (文献 [2-18] の Fig. 1 を転載)。

1次エネルギーから供給、需要まで技術が細かく設定されている。このエネルギーシステムの運用にかかるコストを、エネルギーバランスや発電に関わる工学的制約式<sup>31</sup>の下で最小化するような問題を解くことで、図 2.5 の点線で囲まれたエネルギー供給技術や需要技術の最適な選択を求めることが出来る。2.1 節で言及した通り、エネルギーシステム内の技術を精緻にモデリングできる一方で、エネルギーシステムのコスト最小化が必ずしも経済全体の最適解と一致しない点等が、このモデルを使用する上での懸念点としてしばしば指摘される。

## 2.5 ハイブリッドモデルの概要と本モデルの位置づけ

トップダウン、ボトムアップ、双方のアプローチを可能にするハイブリッドモデルは大きく分けて、Soft-linked モデル、Hard-linked モデル、Integrated モデルの3種類に分類することが出来る [2-25]。表 2.5 は、文献 [2-25] から転載した、ハイブリッドモデルのタイプ別の特徴である。

Soft-linked モデルでは独立した2つのトップダウンとボトムアップモデルを計算し、その計算結果を分析・検証しながら互いのモデルに提供する。一方、Hard-linked モデルは、トップダウンモデルとボトムアップモデルを含んだ1つの大規模モデルを作成し、その中でそれぞれが互いにフィードバックし合いながら結果を得る。2.1 節で紹介した MARKAL-MACRO、MESSAGE-MACRO、DNE21 はすべて Hard-linked モデルに該当する。図 2.6 は地球環境産業技術研究機構 (Research Institute of Innovative Technology for the Earth; RITE) のシステム研究グループがウェブサイトで公開している DNE21 の概要図である [2-26]。マクロ経済モデル、エネルギーシステムモデル、気候変動モデルがそれぞれエネルギー需要やエネルギーシステムコスト、温室効果ガ

<sup>31</sup> 発電容量制約や供給予備力制約、負荷追従制約等。

表 2.5 ハイブリッドモデルのタイプ別の特徴.

Soft-linked	Processing and transfer of information is controlled by the user. The user evaluates results from the models and decides if and how the inputs of each model should be modified to bring the two sets of results more in line with each other, i.e. how to make the models converge.
Hard-linked	All information processing and transfer is formalized and usually handled by computer programs. In areas where the models overlap an algorithm may be used to negotiate results. Usually one model is given control over certain results, and the other model is set up to reproduce the same results.
Integrated	The models are directly influencing each other, and are not run independently in stand-alone mode.

ス排出量を 1 つのモデル内でフィードバックし合う。

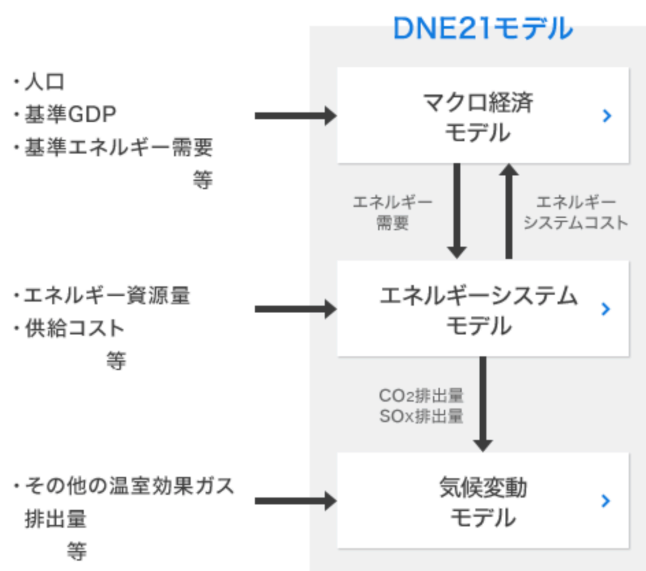


図 2.6 DNE21 の構造 (文献 [2-26] の構造図を転載).

Integrated モデルは、1 つのモデル内でトップダウン、ボトムアップ両方のアプローチを行うモデルである。Böhringer と Rutherford が支持者として開発を長年進めている [2-27, 2-28]。文献 [2-27] が、” The integrated approach focuses on a selected sector in order to maintain tractability, and most contributions focus on electricity.” と解説しているように、トップダウンモデルの 1 つの部門 (大抵は電力部門) に着眼し、その部門をボトムアップ式にモデリングするのが Integrated モデルの特徴であり、複数のモデルによる計算とそのフィードバックというアプローチを行う Soft, Hard-linked モデルとは一線を画している。先に述べている通り、本研究で開発している DMSEE モデルもハイブリッドモデルであり、Integrated モデルに該当する。CGE をベースにエネルギー部門や素材部門に着眼し、ボトムアップ式にモデリングを行っている。

## 2.6 第2章の結論

本章ではエネルギー・経済モデルの主な分類について言及した。「シミュレーション型か最適化型か」、「ボトムアップモデルかトップダウンモデルか、その両方の性質を備えたハイブリッドモデルか」という分類を元にいくつか著名なモデルを紹介した。そして本モデルの土台となる応用一般均衡モデルの基礎を紹介するとともに、本モデルが均衡解として採用している GTAP データベースについても触れた。更にハイブリッドモデルを細かく分類するならば、「Soft-linked モデルか Hard-linked モデルか Integrated モデルか」なる分類もあり、上記の分類と合わせると本モデルは「最適化型 Integrated ハイブリッドモデル」であると述べた。経済全体を俯瞰し各部門の産業連関構造を詳細に考慮しながらも一部の部門における技術選択を議論可能なモデルであり、1.2 節で言及した本研究の目的に最も即したモデルである。

## 参考文献

- [2-1] 山地憲治: 「エネルギー・環境政策におけるシミュレーションモデルの役割」, 電気学会論文誌 C, Vol. 118 No. 10 pp. 1399-1402 (1998)
- [2-2] van Beeck, N. M. J. P.: "Classification of Energy Models", FEW Research Memorandum, Vol. 777 (1999)
- [2-3] Subhes C. Bhattacharyya, Govinda R. Timilsina: "A review of energy system models", International Journal of Energy Sector Management, Vol. 4 No. 4 pp. 494-518 (2010)
- [2-4] 金谷 健一: 「これなら分かる最適化数学」, 共立出版 (2005)
- [2-5] 福島 雅夫: 「新版 数理計画入門」, 朝倉書店 (2011)
- [2-6] Jacques Despres, Nouredine Hadjsaid, Patrick Criqui, Isabelle Noirot: "Modelling the impacts of variable renewable sources on the power sector: Reconsidering the typology of energy modelling tools", Elsevier Energy, Vol. 80 pp. 285-495 (2015)
- [2-7] 森戸 晋, 久保 幹雄: 「数理計画とシミュレーション」, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, Vol. 43 No. 2 pp. 81-87 (1998)
- [2-8] Hiro Lee, Dominique Van der Mensbrugge, Joaquim Oliveira Martins: "The OECD Green Model: An Updated Overview", OECD DEVELOPMENT CENTRE, Working Paper No. 97 (1994) Working Paper No. 97
- [2-9] Sergey Paltsev, et al.: "The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4", MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report No. 125 (2005)
- [2-10] B. Lapillonne, B. Chateau: "The medee models for long term energy demand forecasting", Elsevier Socio-Economic Planning Sciences, Vol. 15 Is. 2 pp. 53-58 (1981)
- [2-11] Enerdata: "Prospective Outlook on Long-term Energy Systems", Enerdata Website, <https://www.enerdata.net/solutions/poles-model.html> (accessed 19.08.23)
- [2-12] EIA Office of Energy Analysis: "Annual Energy Outlook 2019", EIA Website, <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/aeo2019.pdf> (accessed 19.08.23)
- [2-13] William D. Nordhaus: "Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change", Massachusetts Institute of Technology (1994)
- [2-14] William D. Nordhaus, Zili Yang: "A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies", American Economic Association, Vol. 86 No. 4 pp. 741-765 (1996)
- [2-15] Richard Loulou, Gary Goldstein, Ken Noble: "Documentation for the MARKAL Family of Models", Energy Technology Systems Analysis Programme (2004)
- [2-16] Sabine Messner, Manfred Strubegger: "User's Guide for MESSAGE III", International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), WP-95-69 (1995)
- [2-17] Richard Loulou, et al.: "Documentation for the TIMES model", Energy Technology Systems Analysis Programme (2016)
- [2-18] 川上 恭章, 小宮山 涼一, 藤井 康正: 「高時間解像度の発電部門を持つエネルギーシステム技術選択モデルによる CO<sub>2</sub> 削減シナリオの分析」, 電気学会論文誌 B, Vol. 138 No. 5 pp. 382-391 (2018)
- [2-19] Sabine Messner, Leo Schrattenholzer: "MESSAGE - MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively", Elsevier Energy, Vol. 25 Is. 3 pp. 267-282 (2000)
- [2-20] Yasumasa Fujii, Kenji Yamaji: "Assessment of technological options in the global energy system for limiting the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration", Environmental Economics and Policy Studies 1, pp. 113-139 (1998)
- [2-21] 細江 宣裕, 我澤 賢之, 橋本 日出男: 「テキストブック 応用一般均衡モデリング プログラムからシミュレーションまで」, 東京大学出版会 (2004)



- [2-22] 武田 史郎: 「応用一般均衡 (CGE) 分析の解説文書」, 武田 史郎 ウェブサイト, <http://shirotaleda.org/ja/research-ja/cge-howto.html> (アクセス日 2019.08.28)
- [2-23] 角野 隆, 柴崎 隆一, 石倉 智樹, 馬立 強: 「応用一般均衡モデルを用いた東アジア地域における経済・交通連携政策が交際海上コンテナ輸送にもたらす影響の試算」, 国土技術政策総合研究所資料, No. 258 (2005)
- [2-24] 経済産業省: 「通商白書 2003 付注」, 経済産業省 ウェブサイト, [http://www.dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo\\_3487781\\_po\\_18\\_futyu.pdf?contentNo=18&alternativeNo=](http://www.dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_3487781_po_18_futyu.pdf?contentNo=18&alternativeNo=)
- [2-25] Per Ivar Helegesen: "Top-down and Bottom-up: Combining energy system models and macroeconomic general equilibrium models", Regional Effects of Energy Policy (RegPol) CenSES working paper (2013)
- [2-26] RITE システム研究グループ: 『「地球再生計画」の実施計画作成に関する調査事業 総合評価モデル DNE21 の概要』, RITE ウェブサイト, <https://www.rite.or.jp/system/research/new-earth/dne21-model-outline/> (アクセス日 19.8.23)
- [2-27] Per Ivar Helgesen, Arne Lind, Olga Ivanova, Asgeir Tomasgard: "Using a hybrid hard-linked model to analyze reduced climate gas emissions from transport", Elsevier Energy, Vol. 156 pp. 196-212 (2018)
- [2-28] C. Böhringer, T.F. Rutherford: "Combining bottom-up and top-down", Energy Econ, Vol. 30 No. 2 pp. 574-596 (2008)

## 第3章

# 動学的多部門エネルギー経済モデル (DMSEE) の開発

前章でエネルギー経済モデルの基本事項について確認したわけであるが、本章から本研究で開発に取り組んでいる動学的多部門エネルギー経済 (Dynamic Multi-Sector Energy Economic; DMSEE) モデルの具体的な定式化について述べていく。本章ではまず DMSEE を形成する基本式について説明を行う。まず 3.1 節で DMSEE の概要について述べた後、3.2 節で DMSEE が扱う集合や外生変数について説明する。3.3 節から DMSEE を形成する式の解説を行い、3.4 節で本章を締める。

### 3.1 DMSEE の概要

本研究で開発する動学的多部門エネルギー経済 (Dynamic Multi-Sector Energy Economic; DMSEE) モデルは CGE モデルをベースとし、特定部門をボトムアップ (以下 BU) 式に詳細化した最適化型 Integrated ハイブリッドエネルギー経済モデルである。消費の CES 型効用関数を最大化する線形計画問題であり、結果として、各アクティビティの生産量や投資量、中間消費量、加えて GDP や二酸化炭素排出量等が得られる。本研究は本章で解説する DMSEE (以下 DMSEE1.0 とする) をアップグレードする形で進んでいく。すなわち対象地域や対象期間、BU 化の対象となる部門の数は DMSEE のバージョンによって変動する。扱う部門は表 3.1 に示すように、GTAP-POWER の部門分類を統合する形で設定した。また、労働は、DMSEE では GTAP-POWER で定義されている 5 つのクラスを統合して扱った。

図 3.1 はモデルの全体像を模式化したものである。図の赤い矢印が財市場への財の提供であり、青い矢印が財の消費先である。企業 (アクティビティ) によって生産された財あるいは海外から輸入された財は、家計や政府、アクティビティによって消費されるか海外に輸出される。GTAP モデルの場合、生産要素は家計から供給されるモデリングであったが、DMSEE では、設備 (資本ストック、容量) も労働も各アクティビティが有しているものとし、その範囲内で可能な生産を行い財を提供する。DMSEE は動学モデルであり、時点間の投資の関係を考慮している。労働力も効率労働という観点で時点間の成長を考慮している。財もアクティビティもトップダウン (TD) 財・アクティビティ、BU 財・アクティビティに分けられる。TD アクティビティの生産は投入財の代替関係を考慮し、CES 型の生産関数によって決定される。BU アクティビティは、それぞれ独自の工学的制約条件下で生産活動を行う。TD アクティビティはアクティビティと財が一对一対応する。BU アクティビティは、例えば石油製品アクティビティが灯油やガソリン等、複数の石油製品 (財) を生産するように、必ずしも一对一対応しないが、BU アクティビティが TD 財を生産することはない。したがって、TD 部門と BU 部門は中間投入と投資によって接続され、本モデルを Integrated 型ハイブリッドモデルたらしめている点である。

表 3.1: DMSEE1.0 が扱う部門一覧.

No.	DMSEE	GTAP	説明
1	<i>agr</i>	<i>pdr, wht, gro, v_f, osd, c_b, pfb, ocr, ctl, oap, rmk, wol, frs, fsh</i>	農業, 林業, 水産業; 農作物, 材木, 水産物等
2	<i>coa</i>	<i>coa</i>	石炭取扱業; 石炭等
3	<i>oil</i>	<i>oil</i>	石油取扱業; 石油等
4	<i>gas</i>	<i>gas</i>	ガス取扱業; 天然ガス, 都市ガス等
5	<i>omn</i>	<i>omn</i>	その他鉱業; その他鉱物等
6	<i>ppp</i>	<i>ppp</i>	紙パルプ業; 紙製品, パルプ等
7	<i>p_c</i>	<i>p_c</i>	石油石炭製品業; コークス, 石油製品等
8	<i>crp</i>	<i>crp</i>	化学ゴム製造業; 化学ゴム製品等
9	<i>nmm</i>	<i>nmm</i>	非金属鉱物製造業; 非金属鉱物等
10	<i>i_s</i>	<i>i_s</i>	鉄鋼業; 粗鋼, 鉄鋼製品等
11	<i>nfm</i>	<i>nfm</i>	非鉄金属製造業; 非金属等
12	<i>fme</i>	<i>fmp, ele, ome</i>	金属製造業, 電子装置製造業, その他機械製造業; 金属製品, 電子機器, 装置等
13	<i>mvn</i>	<i>mvh, otn</i>	自動車製造業; 自動車等
14	<i>omf</i>	<i>omf</i>	その他製造業; その他製造物等
15	<i>gdt</i>	<i>gdt</i>	ガス配管業; ガス供給サービス等
16	<i>cns</i>	<i>cns</i>	建設業; 建設サービス等
17	<i>otp</i>	<i>otp</i>	陸上輸送業; 陸上輸送サービス等
18	<i>wtp</i>	<i>wtp</i>	海上輸送業; 海上輸送サービス等
19	<i>atp</i>	<i>atp</i>	航空輸送業; 航空輸送サービス等
20	<i>oth</i>	<i>cmt, omt, vol, mil, pcr, sgr, ofd, b_t, tex, wap, lea, lum, wtr, trd, cmn, ofi, isr, obs, ros, osg, dwe</i>	その他取扱業; その他サービス等
21	<i>TnD</i>	<i>TnD</i>	送電・配電業; 送電・配電サービス等
22	<i>NuclearE</i>	<i>NuclearBL</i>	原子力発電業; 原子力発電所由来の電気等
23	<i>CoalE</i>	<i>CoalBL</i>	石炭火力発電業; 石炭火力発電所由来の電気等
24	<i>GasE</i>	<i>GasBL, GasP</i>	ガス火力発電業; ガス火力発電所由来の電気等
25	<i>WindE</i>	<i>WindBL</i>	風力発電業; 風力発電所由来の電気等
26	<i>HydroE</i>	<i>HydroBL, HydroP</i>	水力発電業; 水力発電所由来の電気等
27	<i>OilE</i>	<i>OilBL, OilP</i>	石油火力発電業; 石油火力発電所由来の電気等
28	<i>OtherE</i>	<i>OtherBL</i>	その他発電業; その他発電所由来の電気等
29	<i>SolarE</i>	<i>SolarP</i>	太陽光発電業; 太陽光発電所由来の電気等

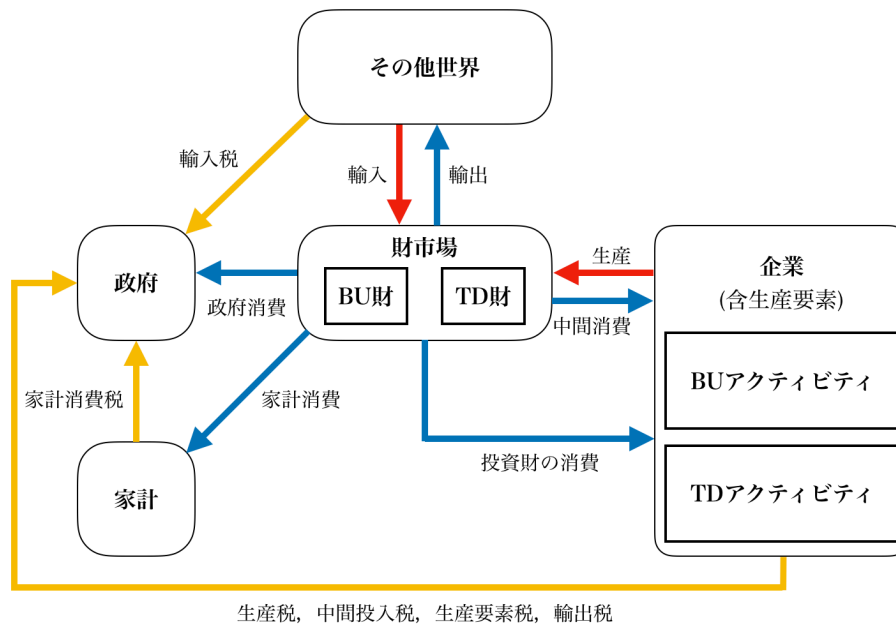


図 3.1 DMSEE の概要 (矢印は財や紙幣の流れ).

## 3.2 パラメータの設定

DMSEE には多くのパラメータが登場するので、本節でその設定を行う。3.2.1 項では、GTAP データベースで提供されている変数を DMSEE の外生変数として扱うための加工について説明を行う。そして 3.2.2 項では、3.1 節で触れた通り、DMSEE の最も肝となる TD 部門と BU 部門の接続に関してより詳細な説明を与える。本章を読み進める上で必要となる DMSEE で扱う集合、内生変数および外生変数について下表 3.2、3.3、3.4 に示す。ただし表に出てくる「(可変)」は、DMSEE のバージョンによって変わる値であることを意味する。「(物量単位)」は BU 部門固有に設定する単位であり、例えば電力部門ならば [GWh] や [GW]、石油製品製造部門ならば [TJ]、鉄鋼部門ならば [Mt] 等が該当する。

表 3.2: DMSEE1.0 が扱う集合一覧。

集合記号	要素	説明
<i>YR</i>	(可変)	時点
<i>RR</i>	(可変)	分析対象地域
<i>RR2</i>	(可変)	全地域
<i>GFR</i>	<i>agr, coa, oil, gas, omn, ppp, p_c, crp, nnm, i_s, nfm, fme, mvn, omf, gdt, cns, otp, atp, TnD, NuclearE, CoalE, GasE, WindE, HydroE, OilE, OtherE, SolarE</i>	GTAP の部門分類を統合した全アクティビティとその財
<i>TAR</i>	(可変)	TD アクティビティ
<i>TCR</i>	= <i>TFR</i>	TD 財
<i>BAR</i>	(可変)	BU アクティビティ
<i>BCR</i>	(可変)	BU 財
<i>TR</i>	<i>otp, atp, wtp</i>	国際輸送サービスアクティビティ, 財

集合記号	要素	説明
$CAP$	$Capital$	資本
$LAB$	$Labor$	労働
$ER$	$CAP \cup LAB$	資本と労働

表 3.3: DMSEE1.0 が扱う外生変数.

変数	説明	単位	添字の集合
$Xp_{Tn,r}$	地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ の初期生産額	million USD	$n \in TAR, r \in RR$
$Xp_{Bn,r}$	地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ の初期生産量	(物理単位)	$n \in BAR, r \in RR$
$Xh_{Tm,r}$	地域 $r$ における TD 財 $m$ の初期家計消費額	million USD	$m \in TCR, r \in RR$
$Xh_{Bm,r}$	地域 $r$ における BU 財 $m$ の初期家計消費量	(物理単位)	$m \in BCR, r \in RR$
$Xg_{Tm,r}$	地域 $r$ における TD 財 $m$ の初期政府消費額	million USD	$m \in TCR, r \in RR$
$Xg_{Bm,r}$	地域 $r$ における BU 財 $m$ の初期政府消費量	(物理単位)	$m \in BCR, r \in RR$
$Xd_{Tm,r}$	地域 $r$ における TD 財 $m$ の初期国内消費額	million USD	$m \in TCR, r \in RR$
$Xd_{Bm,r}$	地域 $r$ における BU 財 $m$ の初期国内消費量	(物理単位)	$m \in BCR, r \in RR$
$Xa_{TTm,n,r}$	地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ による TD 財 $m$ の初期中間消費額	million USD	$m \in TCR, n \in TAR, r \in RR$
$Xa_{TBm,n,r}$	地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ による TD 財 $m$ の初期中間消費額	million USD	$m \in TCR, n \in BAR, r \in RR$
$Xa_{BTm,n,r}$	地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ による BU 財 $m$ の初期中間消費量	(物量単位)	$m \in BCR, n \in TAR, r \in RR$
$Xa_{BBm,n,r}$	地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ による BU 財 $m$ の初期中間消費量	(物量単位)	$m \in BCR, n \in BAR, r \in RR$
$Xi_{Tm,r}^M$	地域 $r$ における投資財としての TD 財 $m$ の初期消費額	million USD	$r \in RR, m \in TCR$
$Xi_{TTn,m,r}^{MN}$	地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ による投資財としての TD 財 $m$ の初期消費額	million USD	$r \in RR, m \in TCR$
$Xi_{TBn,m,r}^{MN}$	地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ による投資財としての TD 財 $m$ の初期消費額	million USD	$r \in RR, m \in TCR$
$Xi_{Tm,r}$	地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ の初期投資額	million USD	$r \in RR, m \in TAR$

変数	説明	単位	添字の集合
$Xi_{Bm,r}$	地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ の初期投資額	million USD	$r \in RR, m \in BAR$
$Xe_{Tn,r}^F$	地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ の初期資本ストック	$n$ Unit	$n \in TAR, r \in RR$
$Xe_{Tn,r}^L$	地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ の初期効率労働力	人	$n \in TAR, r \in RR$
$Xe_{Bn,r}^F$	地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ の初期設備容量	(物量単位)	$n \in BAR, r \in RR$
$Xe_{Bn,r}^L$	地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ の初期効率労働力	人	$n \in BAR, r \in RR$
$Xt_{Tm,r,s}$	地域 $r$ から地域 $s$ に輸送される TD 財 $m$ の量	million USD	$m \in TCR, r \in RR2, s \in RR2, r \neq s$
$Xt_{Bm,r,s}$	地域 $r$ から地域 $s$ に輸送される BU 財 $m$ の量	million USD	$m \in BCR, r \in RR2, s \in RR2, r \neq s$
$Wt_{w,r}$	地域 $r$ が利用した国際輸送サービス $w$ の総額	million USD	$r \in RR, w \in TR$
$Transpt_{Tw,m,r,s}$	地域 $r$ から地域 $s$ に輸送される際に利用する TD 財 $m$ の単位貿易量あたりの国際輸送サービスの総額	(無次元量)	$r \in RR2, s \in RR2, m \in TCR, w \in TR$
$Transpt_{Bw,m,r,s}$	地域 $r$ から地域 $s$ に輸送される際に利用する TD 財 $m$ の単位貿易量あたりの国際輸送サービスの総額	million USD / (物量単位)	$r \in RR2, s \in RR2, m \in TCR, w \in TR$
$FCM_{TTm,n}$	2007 年の固定資本マトリックスで提供されている日本における TD アクティビティ $n$ の TD 投資財 $m$ の消費額	million USD	$r \in RR, m \in TCR, n \in TAR$
$FCM_{TBm,n}$	2007 年の固定資本マトリックスで提供されている日本における BU アクティビティ $n$ の TD 投資財 $m$ の消費額	million USD	$r \in RR, m \in TCR, n \in BAR$
$AT_{Tm,n,r,y}$	時点 $y$ , 地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ , TD 財 $m$ の中間投入行列	(無次元)	$r \in RR, m \in TCR, n \in TAR$
$AT_{Bm,n,r,y}$	時点 $y$ , 地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ , TD 財 $m$ の中間投入行列	million USD / (物量単位)	$r \in RR, m \in TCR, n \in BAR$
$AB_{Tm,n,r,y}$	時点 $y$ , 地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ , BU 財 $m$ の中間投入行列	(物量単位) / million USD	$r \in RR, m \in BCR, n \in TAR$
$AB_{Bm,n,r,y}$	時点 $y$ , 地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ , BU 財 $m$ の中間投入行列	(無次元)	$r \in RR, m \in BCR, n \in BAR$

変数	説明	単位	添字の集合
$C_{TTm,n,r,y}$	地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ , TD 財 $m$ の投資行列	(無次元)	$r \in RR, m \in TCR, n \in BAR$
$C_{TBm,n,r,y}$	地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ , TD 財 $m$ の投資行列	(無次元)	$r \in RR, m \in TCR, n \in BAR$
$PTAX_{n,r}$	地域 $r$ におけるアクティビティ $n$ が支払った生産物税の総額	million USD	$r \in RR, n \in GFR$
$DFTAX_{m,n,r}$	地域 $r$ におけるアクティビティ $n$ が国内財 $m$ の購入時に支払った中間投入税の総額	million USD	$r \in RR, m \in GFR, n \in GFR$
$IFTAX_{m,n,r}$	地域 $r$ におけるアクティビティ $n$ が輸入財 $m$ の購入時に支払った中間投入税の総額	million USD	$r \in RR, m \in GFR, n \in GFR$
$DPTAX_{m,r}$	地域 $r$ における家計が国内財 $m$ の購入時に支払った家計消費税の総額	million USD	$r \in RR, m \in GFR$
$IPTAX_{m,r}$	地域 $r$ における家計が輸入財 $m$ の購入時に支払った家計消費税の総額	million USD	$r \in RR, m \in GFR$
$DGTAX_{m,r}$	地域 $r$ における政府が国内財 $m$ の購入時に支払った政府消費税の総額	million USD	$r \in RR, m \in GFR$
$IGTAX_{m,r}$	地域 $r$ における政府が輸入財 $m$ の購入時に支払った政府消費税の総額	million USD	$r \in RR, m \in GFR$
$FTAX_{e,n,r}$	地域 $r$ におけるアクティビティ $n$ が生産要素 $e$ の購入時に支払った資本税の総額	million USD	$r \in RR, e \in CAP, n \in GFR$
$LTAX_{e,n,r}$	地域 $r$ におけるアクティビティ $n$ が生産要素 $e$ の購入時に支払った労働税の総額	million USD	$r \in RR, e \in LAB, n \in GFR$
$\tau_{Tn,r,y}^P$	時点 $y$ , 地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ の初期生産物税率	(無次元)	$r \in RR, n \in TAR, y \in YR$
$\tau_{Bn,r,y}^P$	時点 $y$ , 地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ の初期生産物税率	million USD / (物量単位)	$r \in RR, n \in BAR, y \in YR$
$\tau_{TTm,n,r,y}^A$	時点 $y$ , 地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ による TD 財 $m$ の初期中間投入税率	(無次元)	$r \in RR, m \in TCR, n \in TAR, y \in YR$
$\tau_{TBm,n,r,y}^A$	時点 $y$ , 地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ による TD 財 $m$ の初期中間投入税率	million USD / (物量単位)	$r \in RR, m \in TCR, n \in BAR, y \in YR$
$\tau_{BTm,n,r,y}^A$	時点 $y$ , 地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ による BU 財 $m$ の初期中間投入税率	(無次元)	$r \in RR, m \in BCR, n \in TAR, y \in YR$
$\tau_{BBm,n,r,y}^A$	時点 $y$ , 地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ による BU 財 $m$ の初期中間投入税率	million USD / (物量単位)	$r \in RR, m \in BCR, n \in BAR, y \in YR$

変数	説明	単位	添字の集合
$\tau_{Tm,r,y}^H$	時点 $y$ , 地域 $r$ における家計が TD 財 $m$ の購入時に支払った家計消費税の税率	(無次元)	$r \in RR, m \in TCR, y \in YR$
$\tau_{Bm,r,y}^H$	時点 $y$ , 地域 $r$ における家計が BU 財 $m$ の購入時に支払った家計消費税の税率	million USD / (物量単位)	$r \in RR, m \in TCR, y \in YR$
$\tau_{Tm,r,y}^G$	時点 $y$ , 地域 $r$ における政府が TD 財 $m$ の購入時に支払った政府消費税の税率	(無次元)	$r \in RR, m \in TCR, y \in YR$
$\tau_{Bm,r,y}^G$	時点 $y$ , 地域 $r$ における政府が BU 財 $m$ の購入時に支払った政府消費税の税率	million USD / (物量単位)	$r \in RR, m \in BCR, y \in YR$
$\tau_{Tm,r,y}^I$	時点 $y$ , 地域 $r$ における TD 投資財 $m$ の購入時に支払う投資税の税率	(無次元)	$r \in RR, m \in TCR, y \in YR$
$\tau_{Bm,r,y}^I$	時点 $y$ , 地域 $r$ における BU 投資財 $m$ の購入時に支払う投資税の税率	(無次元)	$r \in RR, m \in BCR, y \in YR$
$\tau_{Tm,r,y}^M$	時点 $y$ , 地域 $r$ における TD 財 $m$ の輸入時に支払う関税の税率	(無次元)	$r \in RR, m \in TCR, y \in YR$
$\tau_{Bm,r,y}^M$	時点 $y$ , 地域 $r$ における BU 財 $m$ の輸入時に支払う関税の税率	million USD / (物量単位)	$r \in RR, m \in BCR, y \in YR$
$\tau_{Tm,r,y}^X$	時点 $y$ , 地域 $r$ における TD 財 $m$ の輸出時に支払う関税の税率	(無次元)	$r \in RR, m \in TCR, y \in YR$
$\tau_{Bm,r,y}^X$	時点 $y$ , 地域 $r$ における BU 財 $m$ の輸出時に支払う関税の税率	million USD / (物量単位)	$r \in RR, m \in BCR, y \in YR$
$\tau_{Tn,r,y}^F$	時点 $y$ , 地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ が資本の購入時に支払う固定資産税の税率	(無次元)	$r \in RR, n \in TAR, y \in YR$
$\tau_{Bn,r,y}^F$	時点 $y$ , 地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ が資本の購入時に支払う固定資産税の税率	million USD / (物量単位)	$r \in RR, n \in BAR, y \in YR$
$\tau_{Tn,r,y}^L$	時点 $y$ , 地域 $r$ における TD アクティビティ $n$ が労働の購入時に支払う労働税の税率	(無次元)	$r \in RR, n \in TAR, y \in YR$
$\tau_{Bn,r,y}^L$	時点 $y$ , 地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ が労働の購入時に支払う労働税の税率	million USD / (物量単位)	$r \in RR, n \in BAR, y \in YR$
$DiscountRate_r$	地域 $r$ における割引率	(無次元)	$r \in RR$
$E_{Bm,n}$	BU アクティビティ $n$ が生産する BU 財 $m$ に関する係数	(無次元)	$m \in BCR, n \in BAR$
$F_{By,y',r}$	地域 $r$ の時点 $y, y'$ に依存する投資と設備を接続する係数	(無次元)	$r \in RR, y \in YR, y' \in YR$



変数	説明	単位	添字の集合
$n_{Bn,r,y}^I$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU アクティビティ $n$ の単位投資当たりを得られる設備量	(物量単位)	$n \in BAR, r \in RR, y \in YR$
$\tau$	時点間隔	(無次元)	
$LT_{Bn,r}$	地域 $r$ における BU アクティビティ $n$ の耐用年数	(無次元)	$n \in BAR, r \in RR$
$n_{Bn}^F$	BU アクティビティ $n$ の生産量と設備量の工学的変換係数	(物量単位) / (物量単位)	$n \in BAR$
$\theta$	人口成長率	(無次元)	
$\zeta_{Tn,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD アクティビティ $n$ の技術進歩率	(無次元)	$n \in TAR, r \in RR, y \in YR$
$\zeta_{Bn,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU アクティビティ $n$ の技術進歩率	(無次元)	$n \in BAR, r \in RR, y \in YR$
$l'_{Tn,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD アクティビティ $n$ の労働可能人数	人	$n \in TAR, r \in RR, y \in YR$
$l'_{Bn,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU アクティビティ $n$ の労働可能人数	人	$n \in BAR, r \in RR, y \in YR$
$e_{Tn,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD アクティビティ $n$ の労働の効率性	(無次元)	$n \in TAR, r \in RR, y \in YR$
$e_{Bn,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU アクティビティ $n$ の労働の効率性	(無次元)	$n \in BAR, r \in RR, y \in YR$
$\gamma_{Tn,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD アクティビティ $n$ の効率労働力の増加率	(無次元)	$n \in TAR, r \in RR, y \in YR$
$\gamma_{Bn,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU アクティビティ $n$ の効率労働力の増加率	(無次元)	$n \in BAR, r \in RR, y \in YR$

表 3.4: DMSEE1.0 が扱う内生変数.

変数	説明	単位	添字の集合
$xp_{Tn,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD アクティビティ $n$ の生産額	million USD	$n \in TAR, r \in RR, y \in YR$
$xp_{Bn,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU アクティビティ $n$ の生産量	(物量単位)	$n \in BAR, r \in RR, y \in YR$
$xh_{Tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD 財 $m$ の家計消費額	million USD	$n \in TCR, r \in RR, y \in YR$
$xh_{Bm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU 財 $m$ の家計消費量	(物量単位)	$n \in BCR, r \in RR, y \in YR$
$xg_{Tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD 財 $m$ の政府消費額	million USD	$n \in TCR, r \in RR, y \in YR$
$xg_{Bm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU 財 $m$ の政府消費量	(物量単位)	$n \in BCR, r \in RR, y \in YR$

変数	説明	単位	添字の集合
$xd_{Tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD 財 $m$ の国内消費額	million USD	$n \in TCR, r \in RR, y \in YR$
$xd_{Bm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU 財 $m$ の国内消費量	(物量単位)	$n \in BCR, r \in RR, y \in YR$
$xc_{Tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD 財 $m$ の合計消費額	million USD	$n \in TCR, r \in RR, y \in YR$
$xc_{Bm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU 財 $m$ の合計消費量	(物量単位)	$n \in BCR, r \in RR, y \in YR$
$xa_{TTm,n,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD アクティビティ $n$ による TD 財 $m$ の中間消費額	million USD	$m \in TCR, n \in TAR, r \in RR, y \in YR$
$xa_{TBm,n,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU アクティビティ $n$ による TD 財 $m$ の中間消費額	million USD	$m \in TCR, n \in BAR, r \in RR, y \in YR$
$xa_{BTm,n,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD アクティビティ $n$ による BU 財 $m$ の中間消費量	(物量単位)	$m \in BCR, n \in TAR, r \in RR, y \in YR$
$xa_{BBm,n,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU アクティビティ $n$ による BU 財 $m$ の中間消費量	(物量単位)	$m \in BCR, n \in BAR, r \in RR, y \in YR$
$xi_{Tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD アクティビティ $n$ の初期投資額	million USD	$m \in TAR, r \in RR, y \in YR$
$xi_{Bm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU アクティビティ $n$ の初期投資額	million USD	$m \in BAR, r \in RR, y \in YR$
$xe_{Tn,r,y}^F$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD アクティビティ $n$ の初期資本ストック	$n$ Unit	$n \in TAR, r \in RR, y \in YR$
$xe_{Tn,r,y}^L$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD アクティビティ $n$ の初期効率労働力	人	$n \in TAR, r \in RR, y \in YR$
$xe_{Bn,r,y}^F$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU アクティビティ $n$ の初期設備容量	(物量単位)	$n \in BAR, r \in RR, y \in YR$
$xe_{Bn,r,y}^L$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU アクティビティ $n$ の初期効率労働力	人	$n \in BAR, r \in RR, y \in YR$
$xt_{Tm,r,s,y}$	時点 $y$ において地域 $r$ から地域 $s$ に輸送される TD 財 $m$ の量	million USD	$m \in TCR, r \in RR2, s \in RR2, r \neq s, y \in YR$
$xt_{Bm,r,s,y}$	時点 $y$ において地域 $r$ から地域 $s$ に輸送される BU 財 $m$ の量	(物量単位)	$m \in BCR, r \in RR2, s \in RR2, r \neq s, y \in YR$
$obj$	目的関数	million USD	
$util_{Hr,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における家計の効用	million USD	$r \in RR, y \in YR$
$util_{Gr,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における政府の効用	million USD	$r \in RR, y \in YR$
$tax_{Tr,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における TD アクティビティが支払う税金総額	million USD	$r \in RR, y \in YR$
$tax_{Br,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における BU アクティビティが支払う税金総額	million USD	$r \in RR, y \in YR$

変数	説明	単位	添字の集合
$DiscountRate_{r,y}$	地域 $r$ における割引率	(無次元)	$r \in RR$

### 3.2.1 GTAP データの加工

各種外生変数の設定に GTAP データベースと内閣府が発行する産業連関表付随の固定資本マトリックス [3-1] を採用している。固定資本マトリックスの使用は、本モデルが投資行動を考慮した動学的なモデルであることに起因している。というのも、GTAP データベースでは、ある地域で投資された財の投資量の合計のみを取り扱っているため、より詳細な投資行動を把握するために、資本財種類ごとに投資先にあたる部門内訳を明らかにしている固定資本マトリックスが必要なのである。具体的な考慮の方法は後ほど記述する。注意すべき点として、使用した GTAP のデータは 2007 年のデータであり、GTAP が提供する値の単位は 2007 年時点での 100 万アメリカドル (million USD) である。また、データをモデル変数に対応させる際は、価格を 1、量を基準時点における価格相当の量として取り扱った。

#### (a) 生産・消費・投資・中間投入の対応

さて、実際にモデルで使用された変数と GTAP データベースで用いられている変数の対応を考えよう。基準均衡データにおける国内アクティビティの生産量  $Xp_{Tn,r}$  は、

$$Xp_{Tn,r} = VOM_{n,r} \quad (3.1)$$

と対応する。GTAP データベースの変数は C.3 に示す通りである。続いて各消費である。家計消費量  $Xh_{Tn,r}$  及び政府消費量  $Xg_{Tn,r}$  はそれぞれ、

$$Xh_{Tm,r} = VDPM_{m,r} + VIPM_{m,r} \quad (3.2)$$

$$Xg_{Tm,r} = VDGM_{m,r} + VIGM_{m,r} \quad (3.3)$$

と与えられる。中間消費は、TD アクティビティによる TD 財の消費  $Xa_{TTm,n,r}$  と BU アクティビティによる TD 財の消費  $Xa_{TBm,n,r}$  が GTAP のデータから与えられる。

$$Xa_{TTm,n,r} = VDFM_{m,n,r} + VIFM_{m,n,r} \quad (m \in TCR, n \in TAR), \quad (3.4)$$

$$Xa_{TBm,n,r} = VDFM_{m,n,r} + VIFM_{m,n,r} \quad (m \in TCR, n \in BAR). \quad (3.5)$$

続いて投資の対応である。GTAP データベースにおいて、投資アクティビティは CGDS と表現され、投資アクティビティが中間消費した財の量がすなわち投資財の消費量として定義される。したがって、投資財としての TD 財の初期消費額  $Xi_{Tm,r}^M$  は、

$$Xi_{Tm,r}^M = VDFM_{m,CGDS,r} + VIFM_{m,CGDS,r} \quad (3.6)$$

で与えられる。

生産要素について、GTAP データベース上で用意されている生産要素は、表 2.3 の 8 つである。DMSEE では生産構造の簡単のため、*Land* および *NatRes* を考慮していない。各アクティビティが有する設備の容量の初期値  $Xe_{Te,n,r}^F, Xe_{Be,n,r}^F$  と労働の初期値  $Xe_{Te,n,r}^L, Xe_{Be,n,r}^L$  は後に詳しく述べる。

#### (b) 貿易の対応

GTAP データベースにおける貿易に関する変数は、以下の関係を満足している。

$$VXMD_{m,r,s} + XTAXD_{m,r,s} = VXWD_{m,r,s} \quad (3.7)$$

$$VXWD_{m,r,s} + VTWR_{m,r,s} = VIWS_{m,r,s} \quad (3.8)$$

$$VIWS_{m,r,s} + MTAX_{m,r,s} = VIMS_{m,r,s} \quad (3.9)$$

輸出国の市場価格で表現された輸出総額  $VXND$  に輸出関税  $XTAXD$  を足すと、世界価格で表現された輸出総額  $VXWD$  になる。  $VXWD$  はまだ輸送サービス費が含まれていないので、FOB 価格<sup>\*1</sup>である。その  $VXWD$  に輸送サービス費  $VTWR$  を足した  $VIWS$  が輸出の CIF 価格<sup>\*2</sup>である。さらに、輸入関税  $MTAX$  を足した  $VIMS$  が輸入総額である (図 3.2)。

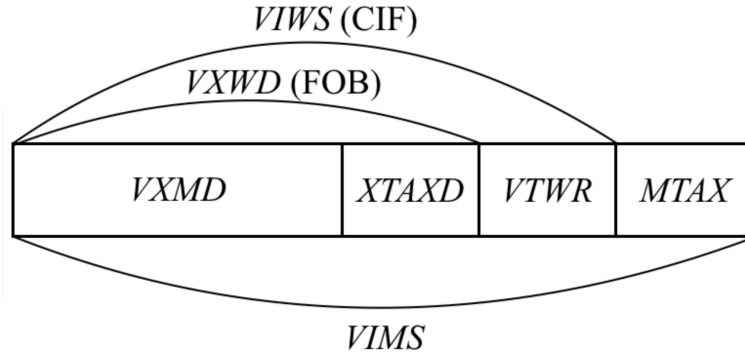


図 3.2 GTAP データベースの貿易変数の概念図

先で言及した通り、GTAP データベースでは、ある TD アクティビティが生産する財は 1 つである。すなわち、アクティビティと財は一対一対応しており、代替可能である。すなわち、以下の関係式でモデルと GTAP を連結することができる。

$$Xt_{Tm,r,s} = VXMD_{n,r,s} \quad (r \in RR, s \in RR2, r \neq s), \quad (3.10)$$

$$Xt_{Tm,s,r} = VIMS_{n,r,s} \quad (r \in RR, s \in RR2, r \neq s) \quad (3.11)$$

BU 部門に関しては初期時点における実際の貿易量を設定する。

財の輸送には、輸送サービスを利用する必要がある。GTAP では各地域間に利用された輸送サービスの総額が提供されているが、輸出、あるいは輸入の際にどちらの地域がどれだけ輸送サービスに紙幣を費やしているかを調査するのは困難である。したがって、本モデルでは以下のように、輸出と輸入の際に支払った額の平均を輸送サービス利用料として計上している。

$$Wt_{w,r} = \frac{1}{2} \sum_{r,s \in RR2, r \neq s} \left( \sum_{m \in TCR} Transpt_{Tw,m,r,s} \cdot Xt_{Tm,r,s} + \sum_{m \in BCR} Transpt_{Bw,m,r,s} \cdot Xt_{Bm,r,s} \right), \quad (3.12)$$

$$\begin{cases} Transpt_{Tw,m,r,s} = \frac{VTWR_{w,m,r,s}}{Xt_{Tm,r,s}} & \text{if } Xt_{Tm,r,s} \neq 0 \\ Transpt_{Tw,m,r,s} = 0 & \text{if } Xt_{Tm,r,s} = 0 \end{cases} \quad (m \in TCR), \quad (3.13)$$

$$\begin{cases} Transpt_{Bw,m,r,s} = \frac{VTWR_{w,m,r,s}}{Xt_{Bm,r,s}} & \text{if } Xt_{Bm,r,s} \neq 0 \\ Transpt_{Bw,m,r,s} = 0 & \text{if } Xt_{Bm,r,s} = 0 \end{cases} \quad (m \in BCR). \quad (3.14)$$

ただし、日本は現状、国際送電網を有していないため、本モデルでも全時点を通して電気の輸出入は考えていない。したがって、BU 部門が電力部門のみの DMSEE においては、上記の貿易に関するパラメータの設定に BU 部門は関連しない点に留意されたい。電力部門以外のエネルギー部門や素材部門を考慮可能な DMSEE では、上記の式を使ってパラメータを設定すればよい。

\*1 'Free on Board' の略で「本船積み込み渡し条件」と呼ばれる。輸出者が輸送サービスに貨物を積み込むまでの費用を負担し、輸入者がその他の輸送サービス費と海上保険料、自社までの運送費を負担する、という取引条件のこと。

\*2 'Cost, Insurance and Freight' の略。輸出者が輸送サービスに貨物を積み込むまでの費用と輸送サービス費を負担し、輸入者がその他の海上保険料と自社までの運送費を負担する、という取引条件のこと。

(c) 税率の対応

GTAP データベース上における税金は、市場価格 (Market Price) と当事者価格 (Agent Price) の差で記述される。したがって、 $r$  地域における各税金額は、

$$PTAX_{n,r} = VOM_{n,r} - VOA_{n,r} , \quad (3.15)$$

$$DFTAX_{m,n,r} = VDF_{m,n,r} - VDFM_{m,n,r} , \quad (3.16)$$

$$IFTAX_{m,n,r} = VIF_{m,n,r} - VIFM_{m,n,r} , \quad (3.17)$$

$$DPTAX_{m,r} = VDP_{m,r} - VDPM_{m,r} , \quad (3.18)$$

$$IPTAX_{m,r} = VIP_{m,r} - VIPM_{m,r} , \quad (3.19)$$

$$DGTAX_{m,r} = VDG_{m,r} - VDGM_{m,r} , \quad (3.20)$$

$$IGTAX_{m,r} = VIG_{m,r} - VIGM_{m,r} \quad (3.21)$$

を満足する。これらを使って各税率を設定する。初期時点における生産物税率、中間投入税率、設備投資にかかる税率、家計消費にかかる税率、政府消費にかかる税率、輸入関税率および輸出関税率について、以下の式が成立する。ただし、それぞれ時点毎に設定することができるよう時点の添字を添付しているが、将来の税率の予測は困難であるため、GTAP で設定した初期値と同じ値を全時点の税率に設定している\*3。さらに、下記

---

\*3 故に、右辺には時点の添字がない。

すべての式において、分母が0の場合は各税率も0としている。

$$\tau_{Tn,r,y}^Z = \frac{PTAX_{n,r}}{Xp_{Tn,r}} \quad (n \in TAR), \quad \tau_{Bn,r,y}^Z = \frac{PTAX_{n,r}}{Xp_{Bn,r}} \quad (n \in BAR), \quad (3.22)$$

$$\tau_{TTm,n,r,y}^A = \frac{DFTAX_{m,n,r} + IFTAX_{m,n,r}}{Xp_{Tn,r}} \quad (n \in TAR), \quad (3.23)$$

$$\tau_{TBm,n,r,y}^A = \frac{DFTAX_{m,n,r} + IFTAX_{m,n,r}}{Xp_{Bn,r}} \quad (n \in BAR), \quad (3.24)$$

$$\tau_{BTm,n,r,y}^A = \frac{\sum_{m' \in GER} (DFTAX_{m',n,r} + IFTAX_{m',n,r})}{Xp_{Tn,r}} \quad (n \in TAR), \quad (3.25)$$

$$\tau_{BBm,n,r,y}^A = \frac{\sum_{m' \in GER} (DFTAX_{m',n,r} + IFTAX_{m',n,r})}{Xp_{Bn,r}} \quad (n \in BAR), \quad (3.26)$$

$$\tau_{Tm,r,y}^H = \frac{DPTAX_{m,r} + IPTAX_{m,r}}{Xh_{Tm,r}} \quad (m \in TCR), \quad (3.27)$$

$$\tau_{Bm,r,y}^H = \frac{\sum_{m' \in GER} (DPTAX_{m',r} + IPTAX_{m',r})}{Xh_{Bm,r}} \quad (m \in BCR), \quad (3.28)$$

$$\tau_{Tm,r,y}^G = \frac{DGTAX_{m,r} + IGTAX_{m,r}}{Xg_{Tm,r}} \quad (m \in TCR), \quad (3.29)$$

$$\tau_{Bm,r,y}^G = \frac{\sum_{m' \in GER} (DGTAX_{m',r} + IGTAX_{m',r})}{Xg_{Bm,r}} \quad (m \in BCR), \quad (3.30)$$

$$\tau_{Tm,r,y}^I = \frac{DFTAX_{m,CGDS,r} + IFTAX_{m,CGDS,r}}{\sum_{n \in TAR} C_{TTm,n,r} \cdot Xi_{Tn,r} + \sum_{n \in BAR} C_{TBm,n,r} \cdot Xi_{Bn,r}} \quad (m \in TCR), \quad (3.31)$$

$$\tau_{Bm,r,y}^I = \frac{\sum_{m' \in GER} (DFTAX_{m',CGDS,r} + IFTAX_{m',CGDS,r})}{\sum_{n \in TAR} C_{BTm,n,r} \cdot Xi_{Tn,r} + \sum_{n \in BAR} C_{BBm,n,r} \cdot Xi_{Bn,r}} \quad (m \in BCR), \quad (3.32)$$

$$\tau_{Tm,s,r,y}^M = \frac{MTAX_{m,r,s}}{Xt_{Tm,s,r}} \quad (m \in TCR, r \in RR, s \in RR2, r \neq s), \quad (3.33)$$

$$\tau_{Bm,s,r,y}^M = \frac{\sum_{m' \in GER} MTAX_{m',r,s}}{Xt_{Tm,s,r}} \quad (m \in BCR, r \in RR, s \in RR2, r \neq s), \quad (3.34)$$

$$\tau_{Tm,r,s,y}^X = \frac{XTAXD_{m,r,s}}{Xt_{Tm,r,s}} \quad (m \in TCR, r \in RR, s \in RR2, r \neq s), \quad (3.35)$$

$$\tau_{Bm,r,s,y}^X = \frac{\sum_{m' \in GER} XTAXD_{m',r,s}}{Xt_{Tm,r,s}} \quad (m \in BCR, r \in RR, s \in RR2, r \neq s). \quad (3.36)$$

さて、本モデルにおいては、上記の税以外に固定資産税と労働税を考慮している。これらの税は、企業が財以外に生産要素  $EVFA$  の購入を行っていることを考慮しなければならない。用意されている  $EFVA$  のデータはすべて当事者価格であり、市場価格はデータとして存在しない。そこで、生産要素に関する税率  $RTF$  を用いて、生産要素の市場価格  $EVFM$  を作成した。すなわち、変数  $e \in \{Land, of\_mgr\_pros, tech\_aspros, clerks, service\_shop, ag\_othlowsk, Capital, NatRes\}$  を用いて、

$$EVFM_{e,n,r} = \frac{EVFA_{e,n,r}}{1 + RTF_{e,n,r}/100} \quad (3.37)$$

が得られる。EVFA, EVFM を用いて、 $r$  地域におけるアクティビティ  $n$  の固定資産税、および労働税は、

$$FTAX_{e,n,r} = EVFA_{e,n,r} - EVFM_{e,n,r} \quad (e \in CAP), \quad (3.38)$$

$$LTAX_{e,n,r} = EVFA_{e,n,r} - EVFM_{e,n,r} \quad (e \in LAB) \quad (3.39)$$

と書ける。よって、固定資産税率  $\tau_{Fn,r,y}$ 、労働税率  $\tau_{Ln,r,y}$  はそれぞれ、

$$\tau_{Tn,r,y}^F = \frac{FTAX_{e,n,r}}{Xe_{Tn,r}^F} \quad (e \in CAP), \quad (3.40)$$

$$\tau_{Tn,r,y}^L = \frac{LTAX_{e,n,r}}{Xe_{Tn,r}^L} \quad (e \in LAB) \quad (3.41)$$

と対応する。

### 3.2.2 トップダウン部門とボトムアップ部門の接続

3.1 節で述べたように、本モデルは中間投入と投資によって TD 部門と BU 部門が接続されている。DMSEE では中間投入財および投資財の代替性を Leontief 型で扱っている。すなわち、あるアクティビティの生産に使用される中間投入財と投資財の量は生産額に線形に比例する。その比例係数が中間投入行列 (係数)、投資行列 (係数)<sup>\*4</sup>であり、本項ではそれらの値の設定方法について言及する。

TD・BU アクティビティそれぞれが TD・BU 財それぞれを中間投入および投資を行うので、中間投入行列および投資行列は 4 つのパートに分けられる。BU 部門の財やアクティビティに関する中間投入、投資は、どの BU 部門に関する中間投入かによって値の設定方法が異なるので、ここでは一般化した話に留める。

まずは TD アクティビティ  $n$  による TD 財  $m$  購入の中間投入係数  $A_{TTm,n,r,y}$  である。これは GTAP のデータがそのまま利用できるので、

$$A_{TTm,n,r,y} = \frac{Xa_{TTm,n,r}}{Xp_{Tn,r}} \quad (m \in TCR, n \in TAR) \quad (3.42)$$

と書ける。税率と同様、時点  $y$  によって係数は外生的に変えられるが、本モデルでは初期時点から一定としている。

続いて、BU アクティビティ  $n$  による TD 財  $m$  購入の中間投入係数  $A_{TBm,n,r,y}$  である。分母には BU アクティビティの生産量が入るので、

$$A_{TBm,n,r,y} = \frac{Xa_{TBm,n,r}}{Xp_{Bn,r}} \quad (m \in TCR, n \in BAR) \quad (3.43)$$

と書ける。例えば分母には発電量や鉄鋼の生産量等のデータを設定する。

続いて、TD アクティビティ  $n$  による BU 財  $m$  購入の中間投入係数  $A_{BTm,n,r,y}$  である。同様に、

$$A_{BTm,n,r,y} = \frac{Xa_{BTm,n,r}}{Xp_{Tn,r}} \quad (m \in BCR, n \in TAR) \quad (3.44)$$

と書ける。分子の値は、例えばどの TD 部門がどれだけエネルギーを消費したかが記載されている総合エネルギー統計等が入る。

最後に、BU アクティビティ  $n$  による BU 財  $m$  購入の中間投入係数  $A_{BBm,n,r,y}$  である。こちらも同様に、

$$A_{BBm,n,r,y} = \frac{Xa_{BBm,n,r}}{Xp_{Bn,r}} \quad (m \in BCR, n \in BAR) \quad (3.45)$$

と書ける。例えば電力部門であれば所内率がこれにあたる。また、素材部門およびエネルギー部門を BU 部門とする場合、素材部門のエネルギー原単位がこの値に該当する。

続いて投資係数に関して述べる。(3.6) 式が示す通り、GTAP データベースでは、ある地域  $r$  における  $m$  財の合計量のみ記述されている。一方、本モデルはアクティビティごとの投資行動を考慮しているため、別のデータを用いてそれぞれのアクティビティの初期投資量  $Xi_{Tm,r}, Xi_{Bm,r}$  を得る必要がある。そこで冒頭でも述べたとおり、本研究では産業連関表付随の固定資本マトリックスを参照した。固定資本マトリックスは、政府及び民間が 1 年間に行った、 $n$  アクティビティが資本形成のために購入した  $m$  財の量が記録されているマトリックスである。

固定資本マトリックス上でアクティビティが投資用に購入した財の量を 投資財  $m$  をアクティビティ  $n$  が購

\*4 中間投入行列および投資行列の各成分を中間投入係数および投資係数と呼ぶ。



入する量を  $FCM_{m,n}$  とすると,

$$X_{TT}^{i,MN}{}_{n,m,r} = \frac{FCM_{m,n}}{\sum_{n' \in TAR} FCM_{m,n'}} \cdot X_{T}^i{}_{m,r}{}^M, \quad (3.46)$$

$$X_{TB}^{i,MN}{}_{n,m,r} = \frac{FCM_{m,n}}{\sum_{n' \in BAR} FCM_{m,n'}} \cdot X_{T}^i{}_{m,r}{}^M, \quad (3.47)$$

$$X_{BT}^{i,MN}{}_{n,m,r} = \frac{FCM_{m,n}}{\sum_{n' \in TAR} FCM_{m,n'}} \cdot X_{B}^i{}_{m,r}{}^M, \quad (3.48)$$

$$X_{BB}^{i,MN}{}_{n,m,r} = \frac{FCM_{m,n}}{\sum_{n' \in BAR} FCM_{m,n'}} \cdot X_{B}^i{}_{m,r}{}^M \quad (3.49)$$

が成立する。ただし分子が 0 になる場合は、各値は 0 とする。これらを用いて各投資係数は、

$$C_{TT}{}_{m,n,r} = \frac{X_{TT}^{i,MN}{}_{n,m,r}}{X_{Tn,r}}, \quad (3.50)$$

$$C_{TB}{}_{m,n,r} = \frac{X_{TB}^{i,MN}{}_{n,m,r}}{X_{Bn,r}}, \quad (3.51)$$

$$C_{BT}{}_{m,n,r} = \frac{X_{BT}^{i,MN}{}_{n,m,r}}{X_{Tn,r}}, \quad (3.52)$$

$$C_{BB}{}_{m,n,r} = \frac{X_{BB}^{i,MN}{}_{n,m,r}}{X_{Bn,r}} \quad (3.53)$$

と書ける。  $X_{Tn,r}, X_{Bn,r}$  はアクティビティが行った投資額を意味し、

$$X_{Tn,r} = \sum_{m \in TCR} X_{TT}^{i,MN}{}_{n,m,r} + \sum_{m \in BCR} X_{BT}^{i,MN}{}_{n,m,r}, \quad (3.54)$$

$$X_{Bn,r} = \sum_{m \in TCR} X_{TB}^{i,MN}{}_{n,m,r} + \sum_{m \in BCR} X_{BB}^{i,MN}{}_{n,m,r} \quad (3.55)$$

で与えられる。

### 3.3 定式化

以上が GTAP データに基づいた外生変数の設定方法であり、本節から計画問題の構築を行う。ここまでで何度か言及したが、本モデルは独自の線形近似手法を用いて、非線形な効用関数および生産関数を線形計画問題内で扱っている。まず 3.3.1 項で具体的な線形近似の手法について説明を与える。そしてそれに基づいて、3.3.2 項と 3.3.3 項でそれぞれ目的関数と制約条件を説明する。

#### 3.3.1 効用関数・生産関数の線形近似手法

先に述べたように、DMSEE は大規模な線形計画問題である。しかし、財の代替性を考慮するために、効用関数および生産関数は CES 型を採用している。一般的な CES 関数は次式で与えられる。

$$y = \begin{cases} \left( \sum_i b_i x_i^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} & \text{if } \sigma \neq 0, 1 \text{ (一般型)} \\ \min \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots\} & \text{if } \sigma = 0 \text{ (Leontief型)} \\ \left( \prod_i x_i^{b_i} \right)^{1/\sum_i b_i} & \text{if } \sigma = 1 \text{ (Cobb-Douglas 型)} \end{cases} \quad (3.56)$$

$y$ : 生産関数あるいは効用関数,  $i$ : 財の数,  $b_i$ : 財  $i$  の投入係数,  $x_i$ : 財  $i$  の投入量,  $\sigma$ : 代替弾力性

Leontief 型と Cobb-Douglas 型は、一般型においてそれぞれ  $\sigma \rightarrow 0, 1$  を考えることによって導かれる。導出は、付録 D を参照されたい。一般型の CES 関数は見ても通り非線形関数であり、このままの形では計画問題で考慮することはできない。したがって、以下の方法で曲線を線形近似しモデル内で考慮できる形にしている。以下、(3.56) 式の第 1 式において、 $\rho = (\sigma - 1)/\sigma$  として、さらに財の数を  $I$  とすると、

$$Y = \left( \sum_{i=1}^I b_i x_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (3.57)$$

を考える。

さて、生産関数を変数で偏微分するとその変数の価格  $P_i$  が得られるので、

$$P_i = \frac{\partial Y}{\partial x_i} = Y^{1-\rho} b_i x_i^{\rho-1} \quad (3.58)$$

を得る。次にこの生産で生じるコスト  $c$  の最小化を前提とすると、

$$\text{minimize } c = \sum_{i=1}^I x_i \cdot P_i, \text{ s.t. (3.57)} \quad (3.59)$$

の問題を考えることになる。包絡線定理より、(3.59) 式の問題のラグランジアン  $\mathcal{L}$  を考えて、

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_i} = -\rho \cdot \lambda \cdot b_i \cdot x_i^{\rho-1} = 0 \quad (3.60)$$

$$\iff x_i^\rho = \left( \frac{P_i}{\rho \cdot \lambda \cdot b_i} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \quad (3.61)$$

を得る ( $\lambda$  は未定定数)。これを (3.59) 式の制約式に代入し未定定数  $\lambda$  を求め (3.59) 式のコストに代入すると、

$$c = Y \left( \sum_{i=1}^I b_i \left( \frac{P_i}{b_i} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (3.62)$$

となる。Shepard の補題より、コストの価格偏微分は変数量に等しくなるので、

$$x_i = Y \left( \frac{P_i}{b_i} \right)^{\frac{1}{\rho-1}} \left( \sum_{i'=1}^I b_{i'} \left( \frac{P_{i'}}{b_{i'}} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho}} \quad (3.63)$$

となる。したがって、

$$\beta_i = \left( \frac{P_i}{b_i} \right)^{\frac{1}{\rho-1}} \left( \sum_{i'=1}^I b_{i'} \left( \frac{P_{i'}}{b_{i'}} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho}} \quad (3.64)$$

と  $x_i$  の投入係数  $\beta_i$  が求まる。価格は  $x_i \geq \beta_i \cdot Y$  の不等式のシャドウプライスで決定される。この不等式を制約条件として記述すれば、非線形型の生産過程を Leontief 型に線形近似して考慮することができる。

次に  $b_i$  を求める。(3.58) 式の両辺に  $x_i$  を乗じ 1 から  $n$  まで和を取ると、次式を得る。

$$Y = \sum_{i=1}^I x_i \cdot P_i \quad (3.65)$$

これを (3.58) 式に代入して、

$$b_i = P_i \left( \frac{x_i}{\sum_{i'=1}^I x_{i'} \cdot P_{i'}} \right)^{1-\rho} \quad (3.66)$$

と変数量とその価格で書ける。

以上より、投入係数  $\beta_i$  が完全に変数量と価格のみで与えられたわけであるが、当然それらはモデルの解である。したがって本モデルでは、繰り返し計算を行い変数量と価格を更新することで、より元の CES 型の生産関数に近い近似を試みている。

さらに、近似の精度を高めるために本モデルでは繰り返し計算を行い、複数回の投入係数および生産関数を用いて凸包近似を行っている。すなわち、 $a$  回目に得られた投入係数を  $\beta_i^a$  とすると、

$$\sum_a \beta_i^a \cdot y^a \leq x_i, \quad (3.67)$$

$$\text{s.t. } Y = \sum_a y^a, \quad (3.68)$$

となる。2次元平面で考えるなら凸型の曲線を複数の直線で、3次元空間で考えるなら凸錐を内側から複数の平面で、それぞれ凸包近似することに相当する。これにより、 $a = 1$ 、すなわち繰り返し計算によって価格情報を更新しない場合よりも、より元の曲線をより再現した近似が可能となる。

図 3.3 は、DMSEE の計算回数と目的関数の値の変化を表したものである。初期計算の目的関数からの変化率を表している。現状の DMSEE の規模\*5だと約 15 回の繰り返し計算で変化率が 0.01% を下回り、各変数はおよそ同じ値に収束する。得られた変数の値を元の非線形関数に代入しても誤差率 0.1% 以内に収まるのが各計算から確認できた。

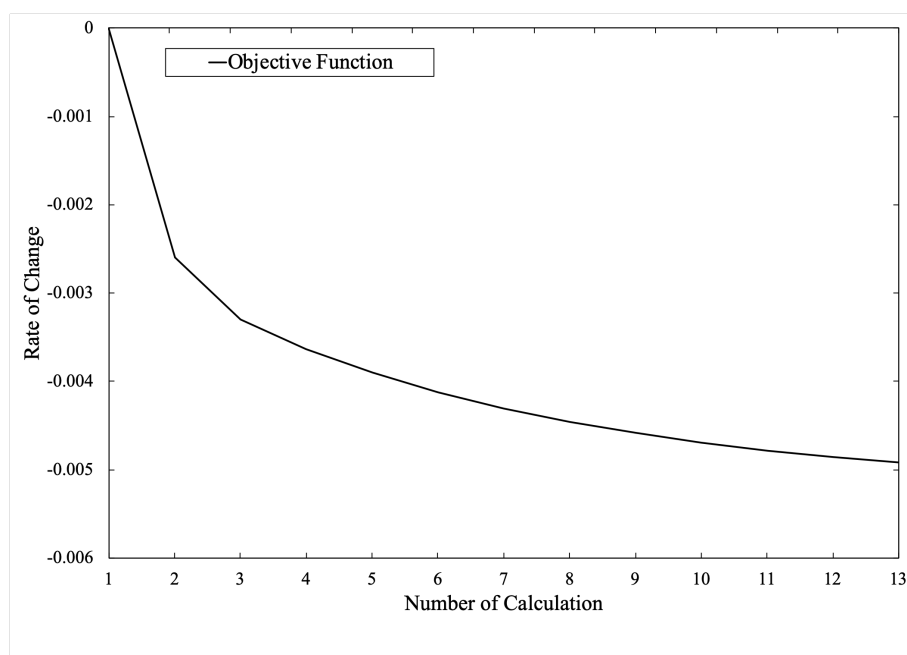


図 3.3 計算回数と目的関数の推移。初期計算の目的関数からの変化率。

\*5 図に示した結果は第 5 章で紹介するモデルによる計算である。

### 3.3.2 目的関数

家計と政府はその効用を最大化するように財を消費するので、

$$\text{maximize } obj = \sum_{r \in RR} \sum_{y=0}^{Y-1} \sigma_{r,y} \left( (util_{Hr,y} + util_{Gr,y}) - (tax_{Tr,y} + tax_{Br,y}) \right) \quad (3.69)$$

$$\text{s.t. } \sigma_{r,y} = \left( \sum_{t=0}^{\tau-1} \exp(y/DiscountRate_r) \right) \exp(-\tau \cdot DiscountRate_r \cdot y), \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned} tax_{Tr,y} = & \sum_{n \in TAR} \left( \tau_{Tn,r,y}^Z \cdot xp_{Tn,r,y} + \tau_{Tn,r,y}^F \cdot xe_{Tn,r,y}^F + \tau_{Tn,r,y}^L \cdot xe_{Tn,r,y}^L \right) \\ & + \sum_{m \in TCR} \left( \tau_{Tm,r,y}^H \cdot xh_{Tm,r,y} + \tau_{Tm,r,y}^G \cdot xg_{Tm,r,y} \right. \\ & \quad + \sum_{n \in TAR} \left( \tau_{TTm,n,r,y}^A \cdot xp_{Tn,r,y} + \tau_{Tm,r,y}^I \cdot C_{TTm,n,r} \cdot xi_{Tn,r,y} \right) \\ & \quad + \sum_{n \in BAR} \left( \tau_{TBm,n,r,y}^A \cdot xp_{Bn,r,y} + \tau_{Tm,r,y}^I \cdot C_{TBm,n,r} \cdot xi_{Bn,r,y} \right) \\ & \quad \left. + \sum_{s \in RR2, r \neq s} \left( \tau_{Tm,s,r,y}^M \cdot xt_{Tm,s,r,y} + \tau_{Tm,r,s,y}^X \cdot xt_{Tm,r,s,y} \right) \right), \quad (3.71) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} tax_{Br,y} = & \sum_{n \in BAR} \left( \tau_{Bn,r,y}^Z \cdot xp_{Bn,r,y} + \tau_{Bn,r,y}^F \cdot xe_{Bn,r,y}^F + \tau_{Bn,r,y}^L \cdot xe_{Bn,r,y}^L \right) \\ & + \sum_{m \in BCR} \left( \tau_{Bm,r,y}^H \cdot xh_{Bm,r,y} + \tau_{Bm,r,y}^G \cdot xg_{Bm,r,y} \right. \\ & \quad + \sum_{n \in TAR} \left( \tau_{BTm,n,r,y}^A \cdot xp_{Tn,r,y} + \tau_{Bm,r,y}^I \cdot C_{BTm,n,r} \cdot xi_{Tn,r,y} \right) \\ & \quad + \sum_{n \in BAR} \left( \tau_{BBm,n,r,y}^A \cdot xp_{Bn,r,y} + \tau_{Bm,r,y}^I \cdot C_{BBm,n,r} \cdot xi_{Bn,r,y} \right) \\ & \quad \left. + \sum_{s \in RR2, r \neq s} \left( \tau_{Bm,s,r,y}^M \cdot xt_{Bm,s,r,y} + \tau_{Bm,r,s,y}^X \cdot xt_{Bm,r,s,y} \right) \right) \quad (3.72) \end{aligned}$$

が目的関数である。各時点において効用から税金による効用損失を控除する。割引率で現在価値換算し、すべての時点、すべての地域で足し上げた目的関数を最大化する。

効用関数は、CES 型の効用関数を 3.3.1 項で説明した方法で線形近似し、制約条件で考慮している。詳細は、3.3.3 項で説明する。

### 3.3.3 制約条件

各種制約条件について以下に説明を与える<sup>\*6</sup>。以下特に断りが無い限り、 $r \in RR$ ,  $y \in YR$  とする。

\*6 ここでは一般化した制約条件の説明を行うが、次章以降で新技術の追加等で形を変えることはある。

(a) 需要供給バランス

アクティビティによって生産された財は家計や政府、アクティビティによって消費されるわけだが、需要量がその財の供給量を超えることは許されない。したがって、

$$\begin{aligned} xh_{Tm,r,y} + xg_{Tm,r,y} + \sum_{n \in TAR} A_{TTm,n,r,y} xp_{Tn,r,y} + \sum_{n \in BAR} A_{TBm,n,r,y} xp_{Bn,r,y} \\ + \sum_{n \in TAR} C_{TTm,n,r,y} xi_{Tn,r,y} + \sum_{n \in BAR} C_{TBm,n,r,y} xi_{Bn,r,y} \leq xC_{Tm,r,y} , \end{aligned} \quad (3.73)$$

$$\begin{aligned} xh_{Bm,r,y} + xg_{Bm,r,y} + \sum_{n \in TAR} A_{BTm,n,r,y} xp_{Tn,r,y} + \sum_{n \in BAR} A_{BBm,n,r,y} xp_{Bn,r,y} \\ + \sum_{n \in TAR} C_{BTm,n,r,y} xi_{Tn,r,y} + \sum_{n \in BAR} C_{BBm,n,r,y} xi_{Bn,r,y} \leq xC_{Bm,r,y} , \end{aligned} \quad (3.74)$$

が成立する。

(b) 物量バランス

BU 財に関して、生産された財は国内消費分と輸出分とに分けられる。したがって、

$$\begin{aligned} \sum_{n \in BAR} E_{Bm,n} xp_{Bn,r,y} = xd_{Bm,r,y} + xt_{Bm,r,s,y} \\ (m \in BCR, s \in RR2, r \neq s) \end{aligned} \quad (3.75)$$

が成立する。ただし  $E$  は BU アクティビティ  $n$  が BU 財  $m$  を生産する場合は 1、それ以外は 0 を取る係数である。また、消費合計は生産財と輸入財の合計であるので、

$$\begin{aligned} xc_{Bm,r,y} = xd_{Bm,r,y} + xt_{Bm,s,r,y} \\ (m \in BCR, s \in RR2, r \neq s) \end{aligned} \quad (3.76)$$

が成立する。TD 部門の物量バランスは代替性を考慮しているので本項 (e) の定式化で与えられる。ただし本モデルは 1 国モデルであるので、下記のように輸入に関して別途制約条件を設けた。

$$xt_{Tm,s,r,y} \leq \frac{Xt_{Tm,r,0}}{Xp_{Tm,r,0}} \cdot xp_{Tm,r,y} , \quad (3.77)$$

$$xt_{Tm,s,r,y} \leq \frac{Xt_{Tm,r,0}}{\sum_{n \in BAR} E_{Bm,n} Xp_{Bn,r,0}} \cdot \sum_{n \in BAR} E_{Bm,n} xp_{Bn,r,y} . \quad (3.78)$$

ただし、国内生産のない BU 部門 (すなわち (3.78) 式の分母が 0 になる BU 部門<sup>\*7</sup>) に関しては、(3.34) 式の輸入税率を初期時点の輸入価格  $ImportPrice_B$  を用いて以下のように再定義することで、貿易を加味した 1 国モデルを構築している。

$$\tau_{Bm,s,r,y}^M = \frac{\sum_{m' \in GER} MTAX_{m',r,s}}{Xt_{Tm,s,r}} + ImportPrice_{Bm,s,r} . \quad (3.79)$$

\*7 具体的には石油部門、石炭部門が挙げられる。

(c) 設備と投資, 設備と生産

各アクティビティは投資によって減価償却していく設備を増強し, 生産能力を高める. したがって, BU 部門の設備容量  $x e_{Bn,r,y}^F$  は,

$$x e_{Bn,r,y}^F = X e_{Bn,r}^F + \sum_{t'=0}^t F_{By,y',r} \eta_{Bn',r,y}^I x i_{Bn,r,y'} \quad (3.80)$$

$$\text{s.t. } F_{By,y',r} = \begin{cases} \tau & (\text{if } \tau(y - y') \leq LT_{Bn,r}) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \quad (y \geq y') \quad (3.81)$$

$F_{By,y',r}$ : 地域  $r$  の時点  $y, y'$  に依存する投資と設備を接続する係数,  $\eta_{Bn',r,y}^I$ : 時点  $y$ , 地域  $r$  における単位投資当たりには得られる設備量,  $\tau$ : 時点間隔,  $LT_{Bn,r}$ : 地域  $r$  における BU アクティビティ  $n$  の耐用年数

で与えられる. この設備容量を用いて, 各生産は以下のように制約される.

$$\eta_{Bn}^F \cdot x p_{Bn,r,y} \leq x e_{Bn,r,y}^F \quad (3.82)$$

ただし  $\eta_{Bn}^F$  は, 生産量と設備量の工学的変換係数であり, 例えば電力部門だと GW と GWh を変換する.

一方, TD 部門の設備は, BU 部門のような明確な設備の単位が存在しないので, 以下の方法で独自の設備単位を導入した. 通常, 設備の価値を表す方法として, その設備を貸与した際にどれだけの金額で貸与可能かを用いて金額で表現する. その金額をレンタルペイメントと呼ぶ. 金額で表現された資本ストックはレンタルペイメントを意味する. 次に, 部門ごとに独自の単位を導入する. 例えば TD 部門  $n$  の資本ストックの単位を  $[n\text{Unit}]$  とする. この独自の単位を持った資本ストックの初期値は, GTAP で与えられる初期時点における生産量の絶対値として設定した. この独自の単位を持つ資本ストックは,  $1 n\text{Unit}$  の価値 (レンタルプライス)  $RentalPrice$  と先述のレンタルペイメント  $V$  を用いて,

$$V_n = RentalPrice_n \cdot X e_{Tn,r}^F \quad (3.83)$$

と変換されるので, GTAP から得られる  $V$  と生産量で設定した  $X e_{Tn,r}^F$  から,  $RentalPrice$  の値が計算される. この  $RentalPrice$  を用いて,

$$x e_{Tn,r,y+1}^F = (1 - \delta_{r,y})^\tau x e_{Tn,r,y}^F + \tau \cdot x i_{Tn,r,y} / RentalPrice_n \quad (3.84)$$

と独自の単位を持つ資本ストックが投資によって更新される. ただし  $\delta$  は減価償却率であり時点によって変更することも可能であるが, 将来の減価償却率を予測することは困難であるため, 初期時点から一律 4% としている.

TD 部門の生産と設備の関係は, 生産は資本と労働の生産関数で決定されるので, 本項 (e) の定式化で与えられる.

(d) 労働と生産

生産には設備の他に労働力も必要である. 文献 [3-2] を参考にして, 本研究では労働力を効率単位で測った労働力 (以下効率労働) で設定する. 効率労働は労働可能人数  $l'$  と労働の効率性  $e$  の積で与えられる. 労働可能人数は人口成長率  $\theta$  で, 労働の効率性は技術進歩率  $\zeta$  で変化するとすると, 効率労働  $x e_T^L, x e_B^L$  は, 以下の漸化式を満たす.

$$x e_{Tn,r,y+1}^L = (1 + \zeta_{Tn,r,y}) e_{Tn,r,y} \cdot (1 + \theta) l'_{n,r,y} \quad (3.85)$$

$$\approx (1 + \zeta_{Tn,r,y} + \theta) x e_{Tn,r,y}^L \quad (3.86)$$

$$= (1 + \gamma_{Tn,r,y}) x e_{Tn,r,y}^L \quad (\gamma_{Tn,r,y} \equiv \zeta_{Tn,r,y} + \theta), \quad (3.87)$$

$$x e_{Bn,r,y+1}^L = (1 + \gamma_{Bn,r,y}) x e_{Bn,r,y}^L \quad (\gamma_{Bn,r,y} \equiv \zeta_{Bn,r,y} + \theta). \quad (3.88)$$

$\gamma$  は効率労働の労働力増加率と解釈できる。解の定常均衡状態を仮定すると、投資と資本ストックの関係及び (3.88) 式より、初期時点において次式が成立する。

$$(\gamma_{n,r,0} + \delta_{r,0}) V_n = X i_{Tn,r} . \quad (3.89)$$

減価償却率は一律 4% としているため、レンタルペイメントと初期時点における投資額の比を検討すれば、効率労働の労働力増加率の理論値を推計することが可能である。

BU 部門に関しては、こうして決定される労働力によって以下のように生産量が制約される。

$$\eta_n^L \cdot x p_{Bn,r,y} \leq x e_{Tn,r,y}^L . \quad (3.90)$$

ただし  $\eta_n^L$  は、生産量と効率労働力とを変換する係数であり、

$$\eta_n^L = \frac{X e_{Tn,r}^L}{X p_{Bn,r}} \quad (3.91)$$

で与えられる。

TD 部門の生産と労働の関係は、生産は資本と労働の生産関数で決定されるので、本項 (e) の定式化で与えられる。

#### (e) CES 関数の一次不等式近似

DMSEE は TD 部門の財の生産について、財の代替性を考慮するために生産関数を導入している。また輸入に関しても Armington 仮定を導入し、国内財と輸入財の代替性を考慮している。3.3.1 項で述べたように、これらの生産関数はすべて CES 型の生産関数を採用しており、一般には非線形関数であるため、線形計画問題として考慮するためには線形に近似する必要がある。また、生産関数に加えて目的関数である効用関数も同様である。

以下、各段階における生産関数と 3.3.1 項の方法で近似した一次不等式である。尚、各  $\beta$  と  $b$  の値はそれぞれ (3.64)、(3.66) 式に示すように、各変数の価格によって決定される。変数の価格は各一次不等式のシャドウプライスによって更新される。また、代替弾力性の値は様々な分野で様々な観点から推計が行われている [3-3, 3-4] が、本研究では深追いせず、文献 [3-2] および [3-5] を参考する形で設定した (表 3.5)。

#### 輸入財と輸入財

$$x t'_{Tm,r,y} = \left( \sum_{s \in RR2, r \neq s} b_{Mm,r,s,y} x t_{Tm,r,s,y}^{\rho_{Mm,r}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Mm,r}}} , \quad (3.92)$$

$$x t_{Tm,r,s,y} \geq \beta_{Mm,r,s,y} \cdot x t'_{Tm,r,y} , \quad (3.93)$$

$$\text{s.t. } \beta_{Mm,r,s,y} = \left( \frac{P_{Mm,r,s,y}}{b_{Mm,r,s,y}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Mm,r}-1}} \left( \sum_{m' \in TCR} b_{Mm',r,s,y} \left( \frac{P_{Mm',r,s,y}}{b_{Mm',r,s,y}} \right)^{\frac{\rho_{Mm,r}}{\rho_{Mm,r}-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho_{Mm,r}}} , \quad (3.94)$$

$$b_{Mm,r,s,y} = P_{Mm,r,s,y} \left( \frac{x t_{Tm,r,s,y}}{\sum_{m' \in TCR} x t_{Tm',r,s,y} \cdot P_{Mm',r,s,y}} \right)^{1-\rho_{Mm,r}} . \quad (3.95)$$

$$x c_{Tm,r,y} = (b_{Dm,r,y} x d_{Tm,r,y}^{\rho_{Cm,r}} + b_{M'm,r,y} x t'_{Tm,r,y}^{\rho_{Cm,r}})^{\frac{1}{\rho_{Cm,r}}}, \quad (3.96)$$

$$x d_{Tm,r,y} \geq \beta_{Dm,r,y} \cdot x c_{Tm,r,y}, \quad x t'_{Tm,r,y} \geq \beta_{M'm,r,y} \cdot x c_{Tm,r,y}, \quad (3.97)$$

$$\text{s.t. } \beta_{Dm,r,y} = \left( \frac{P_{Dm,r,y}}{b_{Dm,r,y}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Dm,r}-1}} \left( \sum_{m' \in TCR} b_{Dm',r,y} \left( \frac{P_{Dm',r,y}}{b_{Dm',r,y}} \right)^{\frac{\rho_{Dm,r}}{\rho_{Dm,r}-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho_{Dm,r}}}, \quad (3.98)$$

$$b_{Dm,r,y} = P_{Dm,r,y} \left( \frac{x d_{Tm,r,y}}{\sum_{m' \in TCR} x d_{Tm',r,y} \cdot P_{Dm',r,y}} \right)^{1-\rho_{Dm,r}}, \quad (3.99)$$

$$\beta_{M'm,r,y} = \left( \frac{P_{M'm,r,y}}{b_{M'm,r,y}} \right)^{\frac{1}{\rho_{M'm,r}-1}} \left( \sum_{m' \in TCR} b_{M'm',r,y} \left( \frac{P_{M'm',r,y}}{b_{M'm',r,y}} \right)^{\frac{\rho_{M'm,r}}{\rho_{M'm,r}-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho_{M'm,r}}}, \quad (3.100)$$

$$b_{M'm,r,y} = P_{M'm,r,y} \left( \frac{x t'_{Tm,r,y}}{\sum_{m' \in TCR} x t'_{Tm',r,y} \cdot P_{M'm',r,y}} \right)^{1-\rho_{M'm,r}}. \quad (3.101)$$

生産と資本・労働

$$x p_{Tn,r,y} = (b_{Kn,r,y} x e_{Tn,r,y}^F)^{\rho_{Pn,r}} + b_{Ln,r,y} x e_{Tn,r,y}^L)^{\frac{1}{\rho_{Pn,r}}}, \quad (3.102)$$

$$x e_{Tn,r,y}^F \geq \beta_{Kn,r,y} \cdot x p_{Tn,r,y}, \quad x e_{Tn,r,y}^L \geq \beta_{Ln,r,y} \cdot x p_{Tn,r,y}, \quad (3.103)$$

$$\text{s.t. } \beta_{Kn,r,y} = \left( \frac{P_{Kn,r,y}}{b_{Kn,r,y}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Kn,r}-1}} \left( \sum_{n' \in TCR} b_{Kn',r,y} \left( \frac{P_{Kn',r,y}}{b_{Kn',r,y}} \right)^{\frac{\rho_{Kn,r}}{\rho_{Kn,r}-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho_{Kn,r}}}, \quad (3.104)$$

$$b_{Kn,r,y} = P_{Kn,r,y} \left( \frac{x e_{Tn,r,y}^F}{\sum_{n' \in TAR} x e_{Tn',r,y}^F \cdot P_{Kn',r,y}} \right)^{1-\rho_{Kn,r}}, \quad (3.105)$$

$$\beta_{Ln,r,y} = \left( \frac{P_{Ln,r,y}}{b_{Ln,r,y}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ln,r}-1}} \left( \sum_{n' \in TCR} b_{Ln',r,y} \left( \frac{P_{Ln',r,y}}{b_{Ln',r,y}} \right)^{\frac{\rho_{Ln,r}}{\rho_{Ln,r}-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho_{Ln,r}}}, \quad (3.106)$$

$$b_{Ln,r,y} = P_{Ln,r,y} \left( \frac{x e_{Tn,r,y}^L}{\sum_{n' \in TAR} x e_{Tn',r,y}^L \cdot P_{Ln',r,y}} \right)^{1-\rho_{Ln,r}}. \quad (3.107)$$



$$util_{Hr,y} = \left( \sum_{m \in TCR} b_{Hm,r,y}^T xh_{Tm,r,y}^{\rho_H} + \sum_{m \in BCR} b_{Hm,r,y}^B xh_{Bm,r,y}^{\rho_H} \right)^{\frac{1}{\rho_H}}, \quad (3.108)$$

$$util_{Gr,y} = \left( \sum_{m \in TCR} b_{Gm,r,y}^T xg_{Tm,r,y}^{\rho_G} + \sum_{m \in BCR} b_{Gm,r,y}^B xg_{Bm,r,y}^{\rho_G} \right)^{\frac{1}{\rho_G}}, \quad (3.109)$$

$$xh_{Tm,r,y} \geq \beta_{Hm,r,y}^T \cdot util_{Hr,y}, \quad xg_{Tm,r,y} \geq \beta_{Gm,r,y}^T \cdot util_{Gr,y} \quad (m \in TCR), \quad (3.110)$$

$$xh_{Bm,r,y} \geq \beta_{Hm,r,y}^B \cdot util_{Hr,y}, \quad xg_{Bm,r,y} \geq \beta_{Gm,r,y}^B \cdot util_{Gr,y} \quad (m \in BCR), \quad (3.111)$$

$$\text{s.t. } \beta_{Hm,r,y}^T = \left( \frac{P_{Hm,r,y}^T}{b_{Hm,r,y}^T} \right)^{\frac{1}{\rho_{Hm,r}^T-1}} \left( \sum_{m' \in TCR} b_{Hm',r,y}^T \left( \frac{P_{Hm',r,y}^T}{b_{Hm',r,y}^T} \right)^{\frac{\rho_{Hm,r}^T}{\rho_{Hm,r}^T-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho_{Hm,r}^T}}, \quad (3.112)$$

$$b_{Hm,r,y}^T = P_{Hm,r,y}^T \left( \frac{xh_{Tm,r,y}}{\sum_{m' \in TCR} xh_{Tm',r,y} \cdot P_{Hm',r,y}^T} \right)^{1-\rho_{Hm,r}^T}, \quad (3.113)$$

$$\beta_{Gm,r,y}^T = \left( \frac{P_{Gm,r,y}^T}{b_{Gm,r,y}^T} \right)^{\frac{1}{\rho_{Gm,r}^T-1}} \left( \sum_{m' \in TCR} b_{Gm',r,y}^T \left( \frac{P_{Gm',r,y}^T}{b_{Gm',r,y}^T} \right)^{\frac{\rho_{Gm,r}^T}{\rho_{Gm,r}^T-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho_{Gm,r}^T}}, \quad (3.114)$$

$$b_{Gm,r,y}^T = P_{Gm,r,y}^T \left( \frac{xg_{Tm,r,y}}{\sum_{m' \in TCR} xg_{Tm',r,y} \cdot P_{Gm',r,y}^T} \right)^{1-\rho_{Gm,r}^T}, \quad (3.115)$$

$$\beta_{Hm,r,y}^B = \left( \frac{P_{Hm,r,y}^B}{b_{Hm,r,y}^B} \right)^{\frac{1}{\rho_{Hm,r}^B-1}} \left( \sum_{m' \in BCR} b_{Hm',r,y}^B \left( \frac{P_{Hm',r,y}^B}{b_{Hm',r,y}^B} \right)^{\frac{\rho_{Hm,r}^B}{\rho_{Hm,r}^B-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho_{Hm,r}^B}}, \quad (3.116)$$

$$b_{Hm,r,y}^B = P_{Hm,r,y}^B \left( \frac{xh_{Bm,r,y}}{\sum_{m' \in BCR} xh_{Bm',r,y} \cdot P_{Hm',r,y}^B} \right)^{1-\rho_{Hm,r}^B}, \quad (3.117)$$

$$\beta_{Gm,r,y}^B = \left( \frac{P_{Gm,r,y}^B}{b_{Gm,r,y}^B} \right)^{\frac{1}{\rho_{Gm,r}^B-1}} \left( \sum_{m' \in BCR} b_{Gm',r,y}^B \left( \frac{P_{Gm',r,y}^B}{b_{Gm',r,y}^B} \right)^{\frac{\rho_{Gm,r}^B}{\rho_{Gm,r}^B-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho_{Gm,r}^B}}, \quad (3.118)$$

$$b_{Gm,r,y}^B = P_{Gm,r,y}^B \left( \frac{xg_{Bm,r,y}}{\sum_{m' \in BCR} xg_{Bm',r,y} \cdot P_{Gm',r,y}^B} \right)^{1-\rho_{Gm,r}^B}. \quad (3.119)$$

表 3.5: 各段階における代替弾力性.

部門	輸入財間	国内財と輸入財	資本と労働
agr	6	3	1
omn	1.8	0.9	1
crp	6.6	3.3	1
nmm	5.8	2.9	1
nfm	8.4	4.2	1
fme	7.5	3.75	1
mvn	5.6	2.8	1
omf	7.5	3.75	1
gdt	5.6	2.8	1
cns	3.8	1.9	1

部門	輸入財間	国内財と輸入財	資本と労働
otp	3.8	1.9	1
wtp	3.8	1.9	1
atp	3.8	1.9	1
oth	3.8	1.9	1
TnD	0	0	1

### 3.4 第3章の結論

本章では、一般均衡モデルをベースとした独自のトップダウン型モデルの解説を行い、次章以降で示されるボトムアップモデルとの接続の入り口を示した。本モデルは、一般的な連立方程式を求解する一般均衡モデルとは異なり、効用関数を最大化するような線形計画問題であり、工学データを用いた部門の詳細化が比較的容易な点と *Integrated* 型のハイブリッドモデルである点を特徴として持つことが示された。これを可能にしているのが、独自に定式化された効用関数・生産関数の線形近似手法であり、その数学的手法と計算による裏付けも示した。また各種産業連関表の値は国際的にも信頼性の高い GTAP データベースを用いていることと、具体的なパラメータの設定手法についても示した。

## 参考文献

- [3-1] 内閣府: 「固定資本マトリックス」,  
[https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/sonota/kotei/kotei\\_top.html](https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/sonota/kotei/kotei_top.html) (アクセス日 2019.10.20)
- [3-2] 伴 金美: 「日本経済の多地域動学的応用一般均衡モデルの開発 Forward Looking の視点に基づく地域経済分析」, RITETI Discussion Paper Series, 07-J-043 (2007)
- [3-3] George E. Battese and Sohail J. Malik: "Estimation of Elasticities of Substitution for CES and VES Production Functions using Firm-level Data for Food-processing Industries in Pakistan", *The Pakistan Development Review*, Vol. 27, No. 1, pp. 59-71 (1988)
- [3-4] Paul Thorsnes: "Consistent Estimates of the Elasticity of Substitution between Land and Non-Land Inputs in the Production of Housing", *Journal of Urban Economics*, Vol. 42, No. 1, pp. 98-108 (1997)
- [3-5] Hertel, T., R. MacDougall, B.Narayanan and A. H. Aguiar: "GTAP 7 Data Base Documentation - Chapter 14: Behavioral Parameters", <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/4184.pdf> (アクセス日 2019.10.20)

## 第 4 章

# 電力部門を高時間解像度化した DMSEE 拡張モデル

前章では DMSEE の基礎的な定式化について説明した。これからいくつかの部門の BU 化が開始され、本章ではまず電力部門の技術選択を議論可能にするモデルの定式化と計算結果について説明する。まず 4.1 節では、電力部門の具体的な定式化について言及する。そして 4.2 節で計算する上で設定したシナリオとケースについて述べ、4.3 節で、モデルが示唆する計算結果を分析することで、電力部門の技術選択が経済に及ぼす影響や CO<sub>2</sub> 排出量削減効果について一定の示唆を得る。そして 4.4 節で本章を締める。

### 4.1 電力部門の定式化

前章で説明した DMSEE において、まずは電力部門から BU 化を行う。このモデルを DMSEE2.0 と呼ぶこととする。下表 4.1 に DMSEE2.0 で取り扱った集合一覧を示す。ただし、表 3.2 と同じ集合については省略している。加えて表 4.2, 4.3 に DMSEE2.0 で扱う外生変数および内生変数を示す。同様に表 3.4, 3.4 と同じ変数は省略している。電力部門で扱う物量単位は、発電量は [GWh]、設備容量は [GW] とする。

表 4.1: DMSEE2.0 が扱う集合一覧。

集合記号	要素	説明
<i>RR</i>	<i>JPN</i>	日本
<i>RR2</i>	<i>JPN, REJ</i>	日本, 日本以外
<i>YR</i>	0, 1, ..., 19	時点 (2010 年~2080 年)
<i>SEASON</i>	0, 1, ..., 364	季節 (日)
<i>TIME</i>	0, 1, ..., 23	時間
<i>EAR</i>	<i>NuclearE, CoalE, GasE, WindE, HydroE, OilE, OtherE, SolarE</i>	電力アクティビティ
<i>EAR2</i>	<i>NuclearE, CoalE, GasE, OilE</i>	原子力発電および火力発電アクティビティ
<i>SAR</i>	<i>Battery1, Battery2, PumpedE</i>	電力貯蔵アクティビティ
<i>SAR2</i>	<i>Battery1, Battery2</i>	バッテリーアクティビティ
<i>BAR</i>	= <i>EAR</i>	BU アクティビティ
<i>ECR</i>	<i>ely</i>	電力財

集合記号	要素	説明
<i>BCR</i>	$= ECR$	BU 財
<i>TAR</i>	$agr, coa, oil, gas, omn, ppp, p\_c, crp, nnm, i\_s, nfm, fme, mvn, omf, gdt, cns, otp, atp, TnD$	TD アクティビティ
<i>GBR</i>	$= BAR$	GTAP の部門分類における電力アクティビティとその財
<i>RAR</i>	$SolarE, WindE$	変動性再生可能エネルギーアクティビティ
<i>RAR2</i>	$SolarE, WindE, HydroE$	変動性再生可能エネルギー + 水力発電アクティビティ
<i>RARN</i>	$NuclearE, SolarE, WindE$	変動性再生可能エネルギーアクティビティ + 原子力発電アクティビティ
<i>TCR</i>	$= TAR$	TD 財
<i>SEAR</i>	$NuclearE_{ss,tm}, CoalE_{ss,tm}, GasE_{ss,tm}, WindE_{ss,tm}, HydroE_{ss,tm}, OilE_{ss,tm}, OtherE_{ss,tm}, SolarE_{ss,tm}$	季節時間別電力アクティビティ ( $ss \in SEASON, tm \in TIME$ )
<i>SSAR</i>	$Battery1_{ss,tm}, Battery2_{ss,tm}, PumpedE_{ss,tm}$	季節時間別電力貯蔵アクティビティ ( $ss \in SEASON, tm \in TIME$ )
<i>SECR</i>	$ely_{ss,tm}$	季節時間別電力財 ( $ss \in SEASON, tm \in TIME$ )
<i>TSR</i>	$TnDS$	超高压送配電アクティビティ
<i>THR</i>	$TnDH$	高压送配電アクティビティ
<i>TLR</i>	$TnDL$	低压送配電アクティビティ
<i>TDR</i>	$TSR \cup THR \cup TLR$	送配電アクティビティ
<i>STSR</i>	$TnDS_{ss,tm}$	季節時間別超高压送配電アクティビティ ( $ss \in SEASON, tm \in TIME$ )
<i>STHR</i>	$TnDH_{ss,tm}$	季節時間別高压送配電アクティビティ ( $ss \in SEASON, tm \in TIME$ )
<i>STLR</i>	$TnDL_{ss,tm}$	季節時間別低压送配電アクティビティ ( $ss \in SEASON, tm \in TIME$ )
<i>STDR</i>	$STSR \cup STHR \cup STLR$	季節時間別送配電アクティビティ
<i>CLE</i>	$IND, SVC, TRP, HOS$	負荷曲線の属性. それぞれ産業, 業務, 運輸, 家庭の意.
<i>PRP</i>	$IND, SVC, HOS, LEV$	負荷曲線の属性. それぞれ産業, 業務, 家庭, 均一の意.
<i>MPR</i>	$0, 1, 2, 3$	メンテナンスパターン

表 4.2: DMSEE2.0 が扱う外生変数.

変数	説明	単位	添字の集合
$ElyDemandShare_{vl,c}$	クラス $c$ の送配電部門 $vl$ の電力消費割合	(無次元)	$vl \in TDR, c \in CLE$
$SectorClass_{Tn}$	TD アクティビティ $n$ の電力需要クラス		$n \in TAR$
$SectorClass_{Bn}$	BU アクティビティ $n$ の電力需要クラス		$n \in BAR$
$LoadCurve_{a,ss,tm,r}$	地域 $r$ における属性 $a$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の電力負荷	(無次元)	$a \in PRP, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR$
$SectorProperty_{Tn}$	TD アクティビティ $n$ の属性		$n \in TAR$
$SectorProperty_{Bn}$	BU アクティビティ $n$ の属性		$n \in BAR$
$ElyLoss_{vl,r}$	地域 $r$ における送配電部門 $vl$ の送配電ロスの割合		$vl \in TDR, r \in RR$
$ReserveRate_r$	地域 $r$ の供給予備力の割合		$r \in RR$
$MaxLoadSeason_r$	地域 $r$ の 1 年で最も需要が多い時間帯を含む季節		$r \in RR$
$MaxLoadTime_r$	地域 $r$ の 1 年で最も需要が多い時間帯		$r \in RR$
$\eta_B^E$	W と Wh を変換する係数	(無次元)	
SS	季節数 (日数)	(無次元)	
TM	一日の時間帯数	(無次元)	
$CapacityFactor_{n,ss,tm,r}$	地域 $r$ の電力アクティビティ $n$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の設備利用率	(無次元)	$n \in EAR \setminus EAR2, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR$
$MaxLF_{n,r}$	地域 $r$ における電力アクティビティ $n$ の負荷追従能力の上限	(無次元)	$n \in EAR \setminus RARN, r \in RR$
$MinLF_{n,r}$	地域 $r$ における電力アクティビティ $n$ の負荷追従能力の下限	(無次元)	$n \in EAR \setminus RARN, r \in RR$
$Ur_{p,ss,r}$	地域 $r$ における補修パターン $p$ で $ss$ 日にプラントが停止する割合	(無次元)	$p \in MPR, ss \in SEASON, r \in RR$
$Up_{n,r}$	地域 $r$ におけるプラント $n$ の日別最大稼働率	(無次元)	$n \in ECR2, r \in RR$
$Ua_{n,r}$	地域 $r$ におけるプラント $n$ の年平均稼働率	(無次元)	$n \in ECR2, r \in RR$
$Usw_{n,ss,tm,r}$	地域 $r$ における電力貯蔵アクティビティ $n$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の W 設備稼働率	(無次元)	$n \in SAR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR$
$Ush_{n,ss,tm,r}$	地域 $r$ における電力貯蔵アクティビティ $n$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の Wh 設備稼働率	(無次元)	$n \in SAR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR$

変数	説明	単位	添字の集合
$Sd_{n,r}$	地域 $r$ における電力貯蔵アクティビティ $n$ の 1 時間あたりの自己放電率	(無次元)	$n \in SAR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR$
$Eff_{n,r}$	地域 $r$ における電力貯蔵アクティビティ $n$ の 1 時間あたりの充電効率	(無次元)	$n \in SAR, r \in RR$
$MStorage_{n,r}$	地域 $r$ における揚水発電アクティビティ $n$ の設備容量あたりの電力貯蔵可能量	GWh / GW	$n \in \{ "Pumped" \}, r \in RR$
$CRate_{n,r}$	地域 $r$ におけるバッテリーアクティビティ $n$ の C レート	GW / GWh	$n \in SAR2, r \in RR$

表 4.3: DMSEE2.0 が扱う内生変数.

変数	説明	単位	添字の集合
$xpS_{Bn,ss,tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における電力アクティビティ $n$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の発電量	GWh	$n \in EAR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR, y \in YR$
$xpS_{TNDvl,ss,tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における送配電アクティビティ $vl$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の発電量	GWh	$vl \in TDR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR, y \in YR$
$xpS_{STOn,ss,tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における電力貯蔵アクティビティ $n$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の発電量	GWh	$n \in SAR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR, y \in YR$
$disSTOn,ss,tm,r,y$	地域 $r$ 時点 $y$ における電力貯蔵アクティビティ $n$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の放電量	GWh	$n \in SAR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR, y \in YR$
$chaSTOn,ss,tm,r,y$	地域 $r$ 時点 $y$ における電力貯蔵アクティビティ $n$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の充電量	GWh	$n \in SAR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR, y \in YR$
$xhS_{Bm,ss,tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における電力財 $m$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の家計消費量	GWh	$m \in ECR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR, y \in YR$
$xgS_{Bm,ss,tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における電力財 $m$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の政府消費量	GWh	$m \in ECR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR, y \in YR$
$xdS_{Bm,ss,tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における電力財 $m$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の国内消費量	GWh	$m \in ECR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR, y \in YR$
$xcS_{Bm,ss,tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における電力財 $m$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の消費量合計	GWh	$m \in ECR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR, y \in YR$
$xcS_{TNDvl,ss,tm,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における需要家 $vl$ による $ss$ 日 $tm$ 時間帯の消費量合計	GWh	$vl \in TDR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR, y \in YR$

変数	説明	単位	添字の集合
$xtSB_{n,ss,tm,r,s,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における電力財 $m$ の $ss$ 日 $tm$ 時間帯の国際送電	GWh	$n \in ECR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r \in RR2, s \in RR2, y \in YR, r \neq s$
$ap_{n,ss,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ におけるプラント $n$ の $ss$ 日の稼働容量	GW	$n \in ECR2, ss \in SEASON, r \in RR, y \in YR$
$mk_{p,n,r,y}$	地域 $r$ 時点 $y$ における補修パターン $p$ にしたがってプラント $n$ が停止する容量	GW	$p \in MPR, n \in ECR2, r \in RR, y \in YR$
$xe_{STOn,r,y}^F$	地域 $r$ 時点 $y$ における電力貯蔵アクティビティ $n$ の $W$ 容量	GW	$n \in SAR, r \in RR, y \in YR$
$xe_{STOn,r,y}^{FS}$	地域 $r$ 時点 $y$ における電力貯蔵アクティビティ $n$ の $Wh$ 容量	GWh	$n \in SAR, r \in RR, y \in YR$

#### 4.1.1 アクティビティの諸情報

各電源設備の諸情報について、表 4.4、表 4.5 で示す。電力貯蔵設備に関しては、表 4.6 に示す。各値は文献 [4-1, 4-2, 4-3] を参考にした。基本的にこれらの外生値は全時点を通して同じ値を与えているが、太陽光と風力の建設コストに関しては、技術進歩を考慮して以下のように時点毎に設定している。

まず風力発電は、コスト検証ワーキンググループ [4-4] で設定されている 2030 年の下限値 17.7 万円/kW を 2030 年の建設単価として設定した。2015 年から 2030 年までは同じ割合で減少するものとし、それ以降は 2030 年の値と同じ値で設定した。次に太陽光発電は、風力発電と同様に、2030 年で 15.8 万円/kW とし、それ以前もそれ以降も同じ割合で減少するものとした。また、風力発電の拡大には地域内および地域間連系線の考慮が不可欠である。本モデルでは、簡易的な送配電しか考慮できておらず、上記のような連系線の問題に適切に対処できてない。したがって、各時点において風力発電の設備容量に上限を設けた。具体的には環境省が設定している風力発電導入高位ケースと同様、2030 年に 32.5 GW、2050 年に 70.0 GW を上限としている。

原子力発電に関して、現在、日本の原子力発電所の運転はほとんど行われていない。文献 [4-5] によると、2017 年 9 月時点における日本の原子力の設備利用率は 11.1% であり、稼働可能な 42 基すべてを早期に再稼働させるのは困難である。そこで、2030 年までに既存の原子力発電所がすべて再稼働可能と仮定し、2020 年時点で 2015 年時点における最大認可出力合計の 30%、2025 年時点で 60% を上限とした。また、増設は 2030 年以降に行われるものとし、増設のための新規投資は 2030 年以降のみ許可している。

#### 4.1.2 高時間解像度化した電力部門特有の制約条件

DMSEE では太陽光発電および風力発電の時間変動性を考慮するために発電の時間解像度を設定できるようにモデリングしている。DMSEE2.0 では、年間を 1 時間刻み、すなわち 8760 分割している。以下、その手法について説明する。

##### (a) 電力需給式

(3.74) 式が BU 財に関する需給バランス式であるが、これを 1 時間毎の式に分解する。そのためには各部門が各時間帯に消費する電力、すなわち電力負荷曲線を設定する必要がある。したがって文献 [4-6] を参考に、図 4.2 のように設定した。部門は工業 (IND) 属性、商業 (SVC) 属性、住宅 (HOS) 属性にその他 (LEV) 属性に



表 4.4 原子力発電および火力発電の諸情報.

	Nuclear	Coal	Oil	Gas
Initial Capacity [GW]	42.0	51.4	42.3	94.4
Construction cost [ $10^3$ yen / kW]	1000	272	200	164
Annual Average Availability [%]	10-80	80	80	80
Seasonal Peak Availability [%]	20-90	90	95	95
Maximum Increase Rate of Output [1/h]	0.02	0.26	0.44	0.44
Minimum Increase Rate of Output [1/h]	0.02	0.31	0.31	0.31
Life Time [year]	40	40	40	40
Share of Daily Start and Stop	0.8	0.3	0.3	0.3

表 4.5 再生可能エネルギーの諸情報.

	Hydro	PV	Wind	Other
Initial Capacity [GW]	49.5	34.3	3.10	4.20
Construction cost [ $10^3$ yen / kW]	640	294	284	790
Annual Average Availability [%]	65	-	-	70
Maximum Increase Rate of Output [1/h]	0.05	-	-	0.05
Minimum Increase Rate of Output [1/h]	0.05	-	-	0.05
Life Time [year]	60	15	15	40

表 4.6 電力貯蔵設備の諸情報.

	Pumped	Battery1	Battery2
Initial Capacity [GW]	54.1	0	0
Construction cost [ $10^3$ yen / kW]	19	-	-
Construction cost [ $10^3$ yen / kWh]	17	60	0.1
CRate	-	0.14C	2C
Self-discharge Rate [%/hour]	0.01	0.05	0.05
Efficiency[%]	70	85	85
Availability Factor [%]	90	90	90
Life Time [year]	60	15	8

分かれ、その他属性は全時間帯を通して電力消費が均等として設定した。GTAPの各部門がそれぞれどれに属するかを示したのが表 4.10 である。家庭の電力消費は HOS 属性、政府の電力消費は SVC 属性として設定した。今後、例えば電気自動車の普及等で負荷曲線は時点によって異なることが予想されるが、負荷曲線に影響を与える技術が将来的にどの程度普及するかの予測は困難であり、したがって本研究では全時点同じ負荷曲線を設定している。尚、国際送電は考慮していない。加えて、本モデルでは超高圧、高圧、低圧の3種類の送配電部門も考慮している。図 4.1 は本モデルが考慮している電力供給から需要までの概要図である。発電部門によって発電された電気は超高圧送配電部門の電線を伝って超高圧需要家へと供給されるか、高圧送配電部門に流れるか選択される。そして高圧送配電部門に流れた電気は同様に、高圧需要家によって消費されるか低圧送配電部門へと流れるか選択される。最後に家庭部門等の低圧需要家に消費される。それぞれの部門において送配電ロスも考慮している。

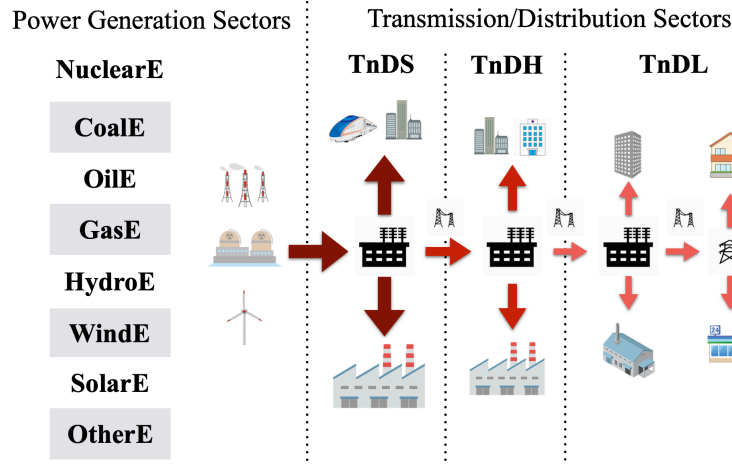


図 4.1 DMSEE2.0 が考慮する電力供給から需要までの概要図。TnDS は超高圧，TnDH は高圧，TnDL は低圧の送配電部門を表す。

$$\sum_{n \in TAR} ElyDemandShare_{vl, SectorClass_{Tn}} LoadCurve_{SectorProperty_{Tn}, ss, tm, r} A_{BTm, n, r, y} xP_{Tn, r, y} + xpS_{TND_{vl+1}, ss, tm, r, y} = (1 - ElyLoss_{vl, r}) xpS_{TND_{vl}, ss, tm, r, y} \quad (vl \in TSR \cup THR) , \quad (4.1)$$

$$\sum_{n \in TAR} ElyDemandShare_{vl, SectorClass_{Tn}} LoadCurve_{SectorProperty_{Tn}, ss, tm, r} A_{BTm, n, r, y} xP_{Tn, r, y} + xhS_{Bm, ss, tm, r, y} + xgS_{Bm, ss, tm, r, y} = (1 - ElyLoss_{vl, r}) xpS_{TND_{vl}, ss, tm, r, y} \quad (vl \in TLR) , \quad (4.2)$$

$$(1 - ElyLoss_{vl, r}) \sum_{n \in EAR} (1 - A_{BBm, n, r, y}) xpS_{Bn, ss, tm, r, y} + \sum_{n \in SAR} xpS_{STOn, ss, tm, r, y} = xpS_{B_{vl}, ss, tm, r, y} \quad (vl \in TSR) , \quad (4.3)$$

$$\sum_{n \in TAR} ElyDemandShare_{vl, SectorClass_{Tn}} LoadCurve_{SectorProperty_{Tn}, ss, tm, r} A_{BTm, n, r, y} xP_{Tn, r, y} = xcS_{TND_{vl}, ss, tm, r, y} \quad (vl \in TSR \cup THR) , \quad (4.4)$$

$$\sum_{n \in TAR} ElyDemandShare_{vl, SectorClass_{Tn}} LoadCurve_{SectorProperty_{Tn}, ss, tm, r} A_{BTm, n, r, y} xP_{Tn, r, y} + xhS_{Bm, ss, tm, r, y} + xgS_{Bm, ss, tm, r, y} = xcS_{TND_{vl}, ss, tm, r, y} \quad (vl \in TLR) , \quad (4.5)$$

$$xhS_{Bm, ss, tm, r, y} = LoadCurve_{HOS, ss, tm} \cdot xh_{Bm, r, y} , \quad (4.6)$$

$$xgS_{Bm, ss, tm, r, y} = LoadCurve_{SVC, ss, tm} \cdot xg_{Bm, r, y} , \quad (4.7)$$

$$xcS_{Bm, ss, tm, r, y} = xdS_{Bm, ss, tm, r, y} , \quad (4.8)$$

$$xcS_{Bm, ss, tm, r, y} = \sum_{vl \in TDR} xcS_{TND_{vl}, ss, tm, r, y} , \quad (4.9)$$

$$xtS_{Bm, ss, tm, r, s, y} = 0 . \quad (4.10)$$

where  $m \in ECR, ss \in SEASON, tm \in TIME, r, s \in RR2, r \neq s$

$ElyDemandShare_{vl, c}$ : クラス  $c$  の送配電部門  $vl$  の電力消費割合,  $SectorClass_{Tn}$ : TD 部門  $n$  の電力需要クラス,  $LoadCurve_{a, ss, tm, r}$ : 地域  $r$  における属性  $a$  の  $ss$  日  $tm$  時間帯の電力負荷,  $SectorProperty_{Tn}$ : TD アクティビティ  $n$  の属性,  $ElyLoss_{vl, r}$ : 地域  $r$  における送配電部門  $vl$  の送配電ロスの割合

尚, 表 4.7 は各部門の電力需要クラス, 表 4.8 は各クラスの電圧ごとの電力消費割合, 表 4.9 は各送配電部門の送配電ロスの割合を示す。

表 4.7 GTAP の各部門の電力需要クラス.

部門	属性	部門	属性
<i>agr</i>	<i>IND</i>	<i>cns</i>	<i>IND</i>
<i>coa</i>	<i>IND</i>	<i>otp</i>	<i>TRP</i>
<i>oil</i>	<i>IND</i>	<i>wtp</i>	<i>TRP</i>
<i>gas</i>	<i>IND</i>	<i>atp</i>	<i>TRP</i>
<i>omn</i>	<i>IND</i>	<i>oth</i>	<i>SVC</i>
<i>ppp</i>	<i>IND</i>	<i>TnD</i>	<i>SVC</i>
<i>p_c</i>	<i>IND</i>	<i>NuclearE</i>	<i>IND</i>
<i>crp</i>	<i>IND</i>	<i>CoalE</i>	<i>IND</i>
<i>nmm</i>	<i>IND</i>	<i>GasE</i>	<i>IND</i>
<i>i_s</i>	<i>IND</i>	<i>WindE</i>	<i>IND</i>
<i>nfm</i>	<i>IND</i>	<i>HydroE</i>	<i>IND</i>
<i>fme</i>	<i>IND</i>	<i>OilE</i>	<i>IND</i>
<i>mvn</i>	<i>IND</i>	<i>OtherE</i>	<i>IND</i>
<i>omf</i>	<i>IND</i>	<i>SolarE</i>	<i>IND</i>
<i>gdt</i>	<i>IND</i>		

表 4.8 各電力需要クラスの電圧ごとの電力消費割合.

	超高圧	高圧	低圧
産業	40%	53%	7%
業務	34%	59%	7%
運輸	100%	0%	0%
家庭	0%	0%	100%

表 4.9 各送配電部門の送配電ロスの割合.

超高圧	高圧	低圧
2.2%	4.4%	8.4%

(b) 発電量と設備容量

発電所の設備容量を超えて発電を行うことはできない。したがって以下の制約条件を課す。

$$\eta_B^E \cdot xp_{Bn,ss,tm,r,y} \leq CapacityFactor_{n,ss,tm,r} x e_{Bn,r,y}^F \quad (4.11)$$

$$\text{where } n \in EAR \setminus EAR2, \eta_B^E \equiv (SS \cdot TM) / (364 \cdot 24)$$

$CapacityFactor_{n,ss,tm,r}$ : 地域  $r$  の電力アクティビティ  $n$  の  $ss$  日  $tm$  時間帯の設備利用率,  $SS$ : 季節数 (日数),  $TM$ : 一日の時間帯数

ただし、原子力発電および火力発電は後に説明する (4.18) 式で制約されるので本制約式からは除外している。水力、風力、太陽光の設備利用率は全時点を通して外生的に設定した (図 4.5, 4.4)。値は文献 [4-3] と同じ値で設定した。

(c) 負荷追従運転

系統全体の電力需給をバランスさせるため、負荷追従運転を行い、発電所の出力をコントロールしている。ただし、自然状態に左右される風力発電と太陽光発電は負荷追従運転を行わないものとしこの制約から除外し

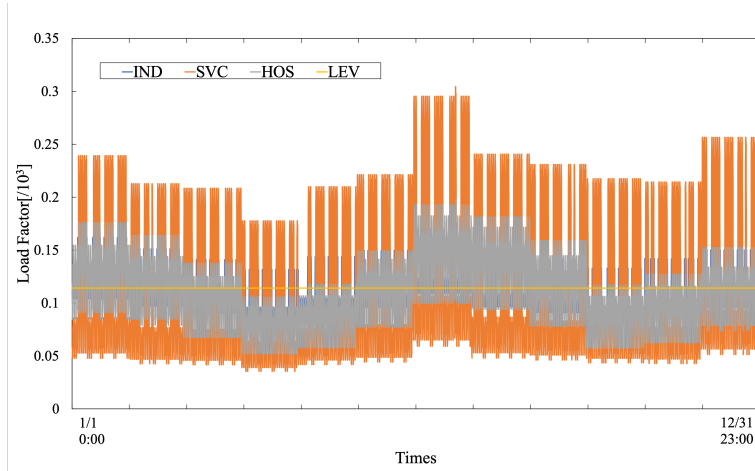


図 4.2 各部門の電力負荷曲線.

表 4.10 GTAP の各部門の属性.

部門	属性	部門	属性
<i>agr</i>	<i>LEV</i>	<i>cns</i>	<i>IND</i>
<i>coa</i>	<i>LEV</i>	<i>otp</i>	<i>SVC</i>
<i>oil</i>	<i>LEV</i>	<i>wtp</i>	<i>SVC</i>
<i>gas</i>	<i>LEV</i>	<i>atp</i>	<i>SVC</i>
<i>omn</i>	<i>LEV</i>	<i>oth</i>	<i>SVC</i>
<i>ppp</i>	<i>LEV</i>	<i>TnD</i>	<i>LEV</i>
<i>p_c</i>	<i>LEV</i>	<i>NuclearE</i>	<i>LEV</i>
<i>crp</i>	<i>LEV</i>	<i>CoalE</i>	<i>LEV</i>
<i>nmm</i>	<i>LEV</i>	<i>GasE</i>	<i>LEV</i>
<i>i_s</i>	<i>LEV</i>	<i>WindE</i>	<i>LEV</i>
<i>nfm</i>	<i>LEV</i>	<i>HydroE</i>	<i>LEV</i>
<i>fme</i>	<i>IND</i>	<i>OilE</i>	<i>LEV</i>
<i>mvn</i>	<i>IND</i>	<i>OtherE</i>	<i>LEV</i>
<i>omf</i>	<i>IND</i>	<i>SolarE</i>	<i>LEV</i>
<i>gdt</i>	<i>IND</i>		

ている。また、日本の原子力発電の出力は一定であるので、原子力発電もこの制約から除外している。

$$xp_{Bn,ss,tm,r,y} \leq (1 + MaxLF_{n,r}) xp_{Bn,ss,tm,r,y} \cdot \quad (4.12)$$

$$xp_{Bn,ss,tm,r,y} \geq (1 - MinLF_{n,r}) xp_{Bn,ss,tm,r,y} \cdot \quad (4.13)$$

where  $n \in EAR \setminus RARN$ ,  
 $ss \in SEASON, tm \in TIME$

$MaxLF_{n,r}$ : 地域  $r$  における電力アクティビティ  $n$  の負荷追従能力の上限,  $MinLF_{n,r}$ : 地域  $r$  における電力アクティビティ  $n$  の負荷追従能力の下限

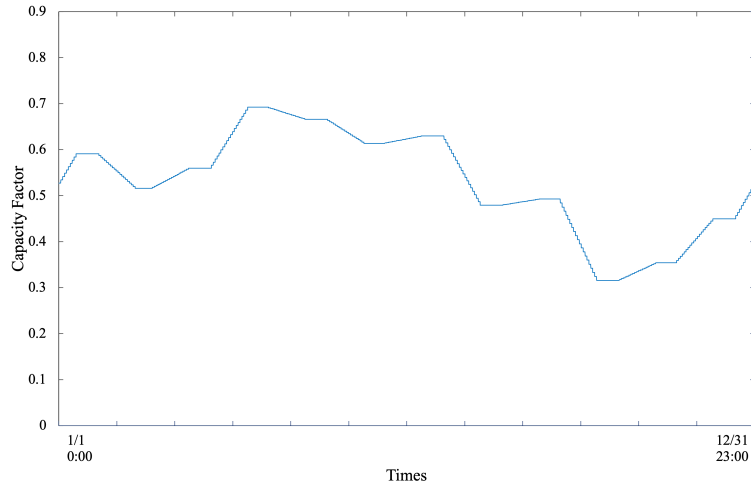


図 4.3 水力発電の年間設備利用率.

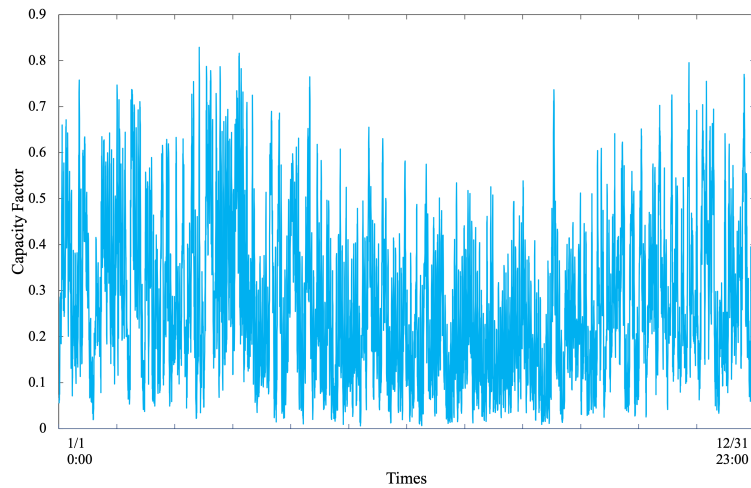


図 4.4 風力発電の年間設備利用率.

(d) 供給予備力

電源設備容量は想定される最大需要より変動性再生可能エネルギーを除く電源で数 % の供給予備力を持ち、不測の事態に備える必要がある。したがって、

$$\sum_{n' \in EAR \setminus RAR} x e_{Bn',r,y}^F \geq \eta_B^E (1 + ReserveRate_r) x c_{Bm,r,y,MaxLoadSeason_r,MaxLoadTime_r}^E, \quad (4.14)$$

where  $m \in ECR, ss \in SEASON, tm \in TIME$

$ReserveRate_r$ : 地域  $r$  の供給予備力の割合,  $MaxLoadSeason_r$ : 地域  $r$  の 1 年で最も需要が多い時間帯を含む季節,  $MaxLoadTime_r$ : 地域  $r$  の 1 年で最も需要が多い時間帯

を制約条件として課す。日本における  $ReserveRate_r$  は 8% が一般的であるので、本モデルでも  $ReserveRate_r = 0.08$  と設定した。

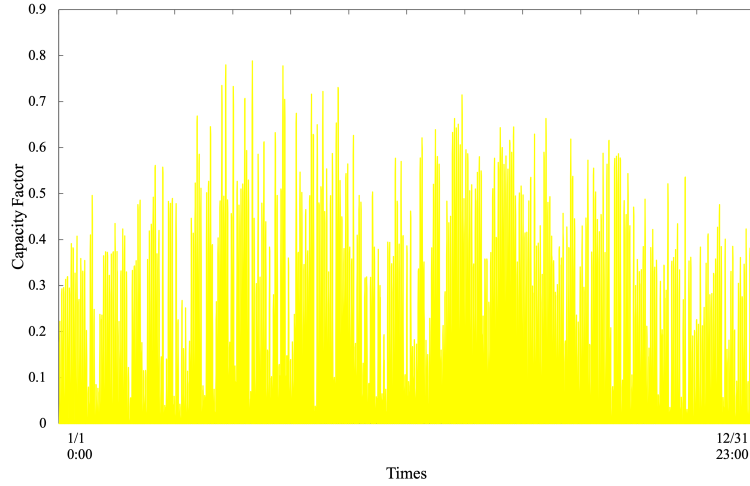


図 4.5 太陽光発電の年間設備利用率.

(e) プラントの補修

原子力発電および火力発電は発電所のメンテナンスを行うために、1年の適当なタイミングで設備の稼働を停止させる。DMSEEは、文献??と同様に、各日の補修パターンを4季節毎に設定した季節補修パターン(図4.6)の重ね合わせで表現した。

$$ap_{n,ss,r,y} + \sum_{p \in MPR} Ur_{p,ss,r} mk_{p,n,r,y} = xe_{Bn,r,y}^F, \quad (4.15)$$

$$\sum_{p \in MPR} Ur_{p,ss,r} mk_{p,n,r,y} \geq (1 - Up_{n,r}) xe_{Bn,r,y}^F, \quad (4.16)$$

$$\sum_{p \in MPR} \sum_{ss' \in SEASON} Ur_{p,ss',r} mk_{p,n,r,y} / 365 = (1 - Ua_{n,r}) xe_{Bn,r,y}^F, \quad (4.17)$$

$$\eta_B^E xp_{Bn,ss,tm,r,y} \leq ap_{n,ss,r,y}. \quad (4.18)$$

where  $n \in EAR2, ss \in SEASON, tm \in TIME$

$ap_{n,ss,r,y}$ : 地域  $r$  時点  $y$  におけるプラント  $n$  の  $ss$  日の稼働容量,  $Ur_{p,ss,r}$ : 地域  $r$  における補修パターン  $p$  で  $ss$  日にプラントが停止する割合,  $mk_{p,n,r,y}$ : 地域  $r$  時点  $y$  における補修パターン  $p$  にしたがってプラント  $n$  が停止する容量,  $Up_{n,r}$ : 地域  $r$  におけるプラント  $n$  の日別最大稼働率,  $Ua_{n,r}$ : 地域  $r$  におけるプラント  $n$  の年平均稼働率

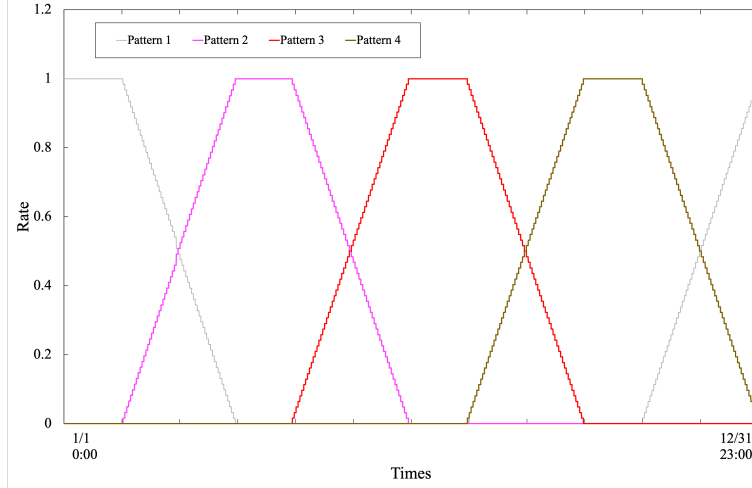


図 4.6 原子力発電及び火力発電のメンテナンスパターン。

#### (f) 揚水及び蓄電池に関する制約

揚水と蓄電池は以下の制約条件によって定式化されている。蓄電池は **Battery1** と **Battery2** が存在しているが、それぞれ長周期、短周期変動調整用蓄電池を意味している。

$$xp_{STON,ss,tm,r,y} = dis_{STON,ss,tm,r,y} - cha_{STON,ss,tm,r,y} , \quad (4.19)$$

$$\eta_B^E (dis_{STON,ss,tm,r,y} + cha_{STON,ss,tm,r,y}) \leq UsW_{n,ss,tm,r} xe_{STON,r,y}^F , \quad (4.20)$$

$$ss_{n,ss,tm,r,y} \leq UsWh_{n,ss,tm,r} xe_{STON,r,y}^{FS} , \quad (4.21)$$

$$ss_{n,ss+1,tm,r,y} = (1 - Sd_{n,r})^{\frac{TM}{24}} ss_{n,ss,tm,r,y} + E \cdot cha_{STON,ss,tm,r,y} - dis_{STON,ss,tm,r,y}/E , \quad (4.22)$$

$$xe_{STON',r,y}^{FS} \leq MStorage_{n',r} xe_{STON',r,y}^F \text{ where } n' \in \{ \text{"Pumped"} \} , \quad (4.23)$$

$$xe_{STON',r,y}^F \leq CRate_{n',r} xe_{STON',r,y}^{FS} \text{ where } n' \in SAR2 . \quad (4.24)$$

where  $n \in SAR, ss \in SEASON, tm \in TIME, E \equiv \left( \sqrt{Eff_{n,r}} \right)^{\frac{TM}{24}}$

$xe_{STON,r,y}^{FS}$ : 地域  $r$  時点  $y$  における電力貯蔵アクティビティ  $n$  の Wh 容量,  $UsW_{n,ss,tm,r}$ : 地域  $r$  における電力貯蔵アクティビティ  $n$  の  $ss$  日  $tm$  時間帯の W 設備稼働率,  $UsWh_{n,ss,tm,r}$ : 地域  $r$  における電力貯蔵アクティビティ  $n$  の  $ss$  日  $tm$  時間帯の Wh 設備稼働率,  $Sd_{n,r}$ : 地域  $r$  における電力貯蔵アクティビティ  $n$  の 1 時間あたりの自己放電率,  $TM$ : 一日の時間帯数,  $Eff_{n,r}$ : 地域  $r$  における電力貯蔵アクティビティ  $n$  の 1 時間あたりの充放電効率,  $MStorage_{n,r}$ : 地域  $r$  における揚水発電アクティビティ  $n$  の設備容量あたりの電力貯蔵可能量,  $CRate_{n,r}$ : 地域  $r$  におけるバッテリーアクティビティ  $n$  の C レート

## 4.2 シナリオおよびケース設定

### 4.2.1 シナリオ

本モデルでは家計消費を外生的に与えている。電力財は今後の電化を見込んで、年率 1.5% の割合で家計消費が増えるものとしている。非電力財は予想が困難であるため、初期時点から一定として与えている。貿易に関して、輸出量は初期時点から一定とし、輸入は内生的に扱うが、各財の輸入価格は初期時点から一定としている。

## 4.2.2 ケース

本章では以下のケースを設定した。

- BAU (Business As Usual) ケース: 2章で記述した制約条件以外に制約を課さないケース
- \$50 ケース: 2025年以降全時点において、二酸化炭素1t当たり\$50の排出税を課すケース
- \$300 ケース: 2025年以降全時点において、二酸化炭素1t当たり\$300の排出税を課すケース
- \$300N ケース: 2025年以降全時点において、二酸化炭素1t当たり\$300の排出税を課し、全時点において原子力発電所の新設を禁止するケース

## 4.3 結果とその分析

さて本節にて結果とその分析を行う。まず4.3.1節で電力部門の技術選択とCO<sub>2</sub>排出量への影響を述べた後、4.3.2節でいくつかの年間の最適発電パターンについて考察する。そして最後に4.3.3節でGDPの変化と主な部門における生産量変化の関係や効用の変化について述べる。

### 4.3.1 最適電源構成および設備容量とCO<sub>2</sub>排出量

図4.7～図4.10は各ケースの最適電源構成、図4.11は2050年の各ケースの最適電源構成とCO<sub>2</sub>排出量である。先に述べたように、本モデルは5年刻みで計算を行っているため、図4.7～図4.10は5年刻みごとの最適電源構成を表している。全体の発電量は、例えば2030年時点で1.12PWhである。家計の電力消費は外生的に与えているが、企業が中間消費する電力の量は内生的に決まる。企業の電力需要はほぼ横ばいであり、したがって、家計の電力消費が伸びる分、全体としての電力需要は増加傾向にある。一般的には、排出税導入の影響で電力価格が上昇し需要は下がると考えられるが、本モデルでは、家計の電力消費量を上昇するとして設定している点や、需要側の省エネ技術を考慮していない点から、一般的な考えには沿わない結果を得ている。仮に省エネ技術や電化技術を考慮した場合、排出税によって電力の需要量は減少すると予想される。その場合、ベストミックスも変化し、より再生可能エネルギーのシェアが増すと予想される。それに伴い経済における投資行動は活発化する。これらの影響を加味したうえで、二酸化炭素税の適切な価格を検討する必要がある。

さて、ベストミックスに焦点を充てると、BAUケースでは、環境負荷に対する制約がないので、固定費の高い原子力や再生可能エネルギーは縮小し、代わりに石炭火力とガス火力が支配的である。それに伴い、CO<sub>2</sub>排出量は1.3Gtとなり2015年現在から比較するとおよそ9.2%増加している。続いて炭素税を課したケースを見ると、原子力発電が重要なベースロード電源として機能している。既存の発電所の再稼働だけではなく新設も求められる。さらに太陽光の伸びが著しく、2050年時点では総発電量の52%を占めている。CO<sub>2</sub>を排出しない原子力、太陽光の参入により、CO<sub>2</sub>排出量は0.9Gtと約25%の削減が可能である。

\$300ケースを見ると、高い炭素税に起因し火力発電はほとんどその運転を停止している。それに伴い、再生可能エネルギーの拡大、原子力発電所の更なる新設が行われた。しかし、CO<sub>2</sub>排出量を見ると2050年時点で0.86Gtと\$50ケースとあまり差が出なかった。原子力発電所の新設を禁ずる\$300Nケースでは、既設の原子力発電所はフル稼働させ、太陽光発電が供給を支えている。図4.11を見れば、BAUケースを除く各ケースにおいて長周期蓄電池の役割が大きく、昼間しか発電できない太陽光発電の拡大に貢献している。



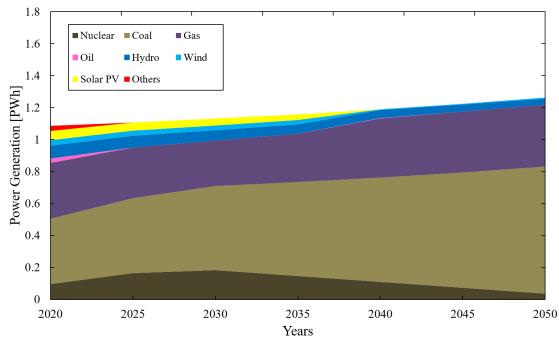


図 4.7 BAU ケースの最適電源構成.

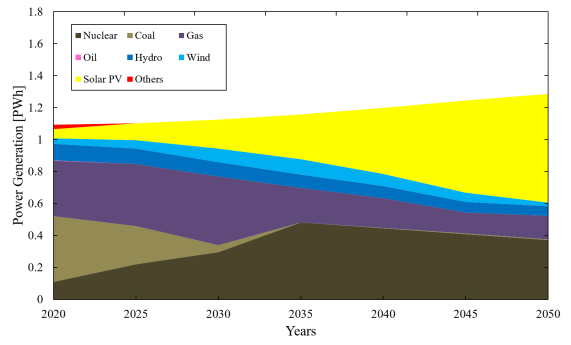


図 4.8 \$50 ケースの最適電源構成.

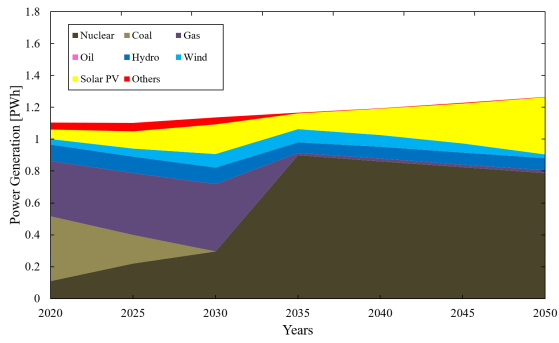


図 4.9 \$300 ケースの最適電源構成.

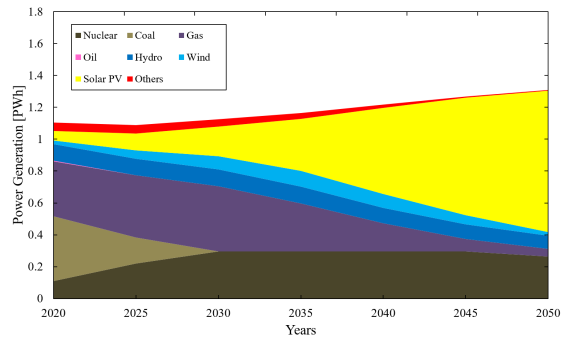


図 4.10 \$300N ケースの最適電源構成.

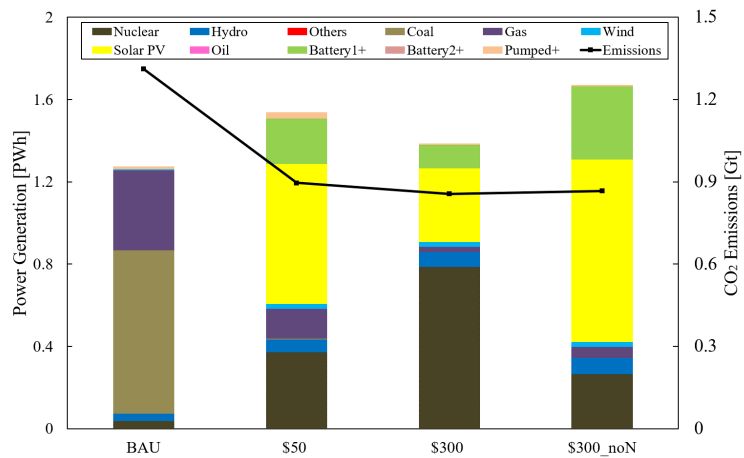


図 4.11 2050 年における各ケースの最適電源構成と CO<sub>2</sub> 排出量

### 4.3.2 最適発電パターン

本モデルでは年間を 8760 分割しているため、任意の年の年間の発電パターンを計算可能である。図 4.12 から図 4.19 に 2030 年、2050 年の各ケースの年間発電パターンを示す。しかしこれだと見にくいので、図 4.20 から図 4.27 に 2030 年 7 月、2050 年 7 月の各ケースの年間発電パターンを示す。2030 年と 2050 年を比べるとバッテリーの利用量に大きな差がある。ガス火力が支配的であり、太陽光発電およびバッテリーの普及が進んでいない 2030 年では、ほとんど揚水のみが蓄電設備として使用されている。一方 2050 年になると、長周期蓄電池が積極的に利用されている。充放電効率の差に起因すると考えられる。

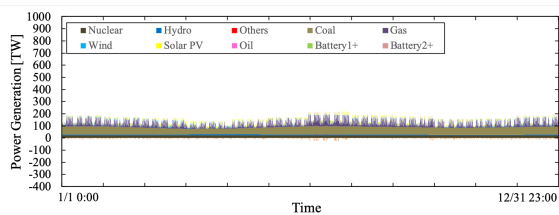


図 4.12 BAU ケースの最適発電パターン (2030 年).

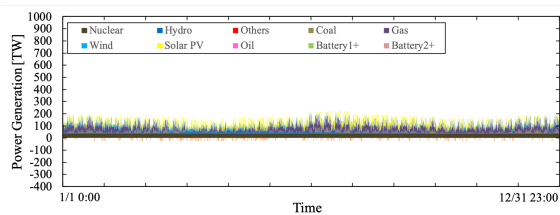


図 4.13 \$50 ケースの最適発電パターン (2030 年).

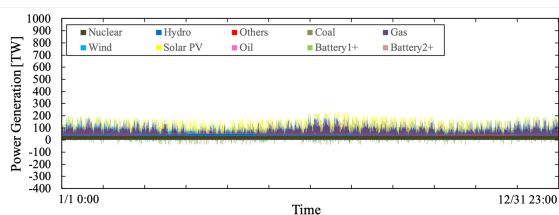


図 4.14 \$300 ケースの最適発電パターン (2030 年).

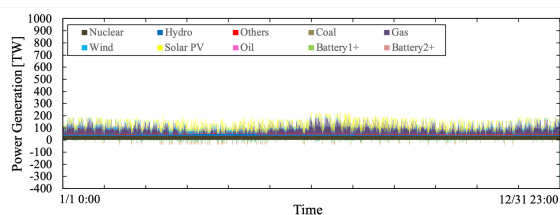


図 4.15 \$300N ケースの最適発電パターン (2030 年).

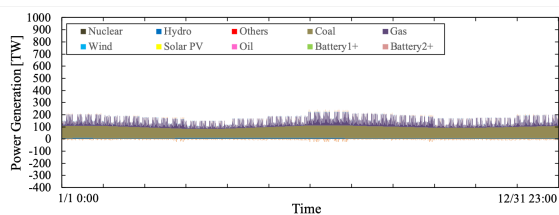


図 4.16 BAU ケースの最適発電パターン (2050 年).

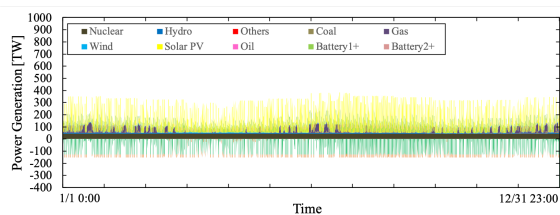


図 4.17 \$50 ケースの最適発電パターン (2050 年).

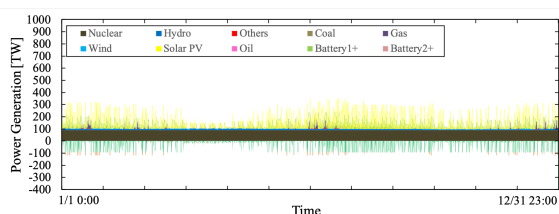


図 4.18 \$300 ケースの最適発電パターン (2050 年).

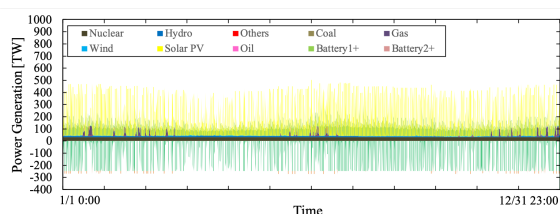


図 4.19 \$300N ケースの最適発電パターン (2050 年).

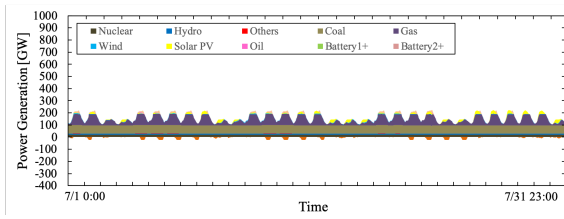


図 4.20 BAU ケースの最適発電パターン (2030 年 7 月).

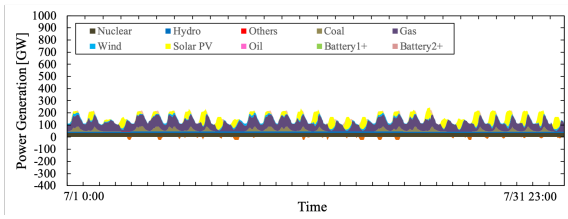


図 4.21 \$50 ケースの最適発電パターン (2030 年 7 月).

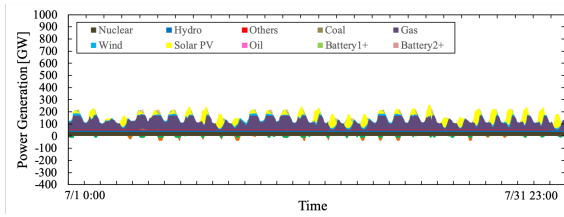


図 4.22 \$300 ケースの最適発電パターン (2030 年 7 月).

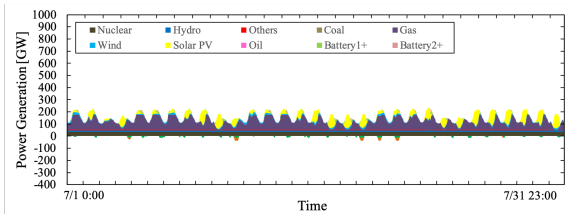


図 4.23 \$300N ケースの最適発電パターン (2030 年 7 月).

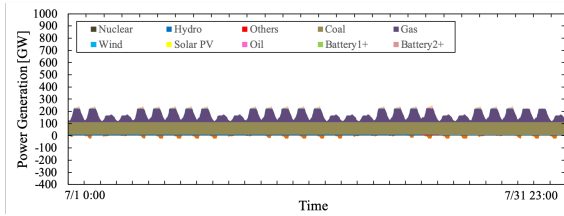


図 4.24 BAU ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

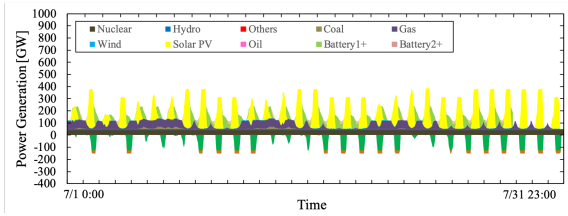


図 4.25 \$50 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

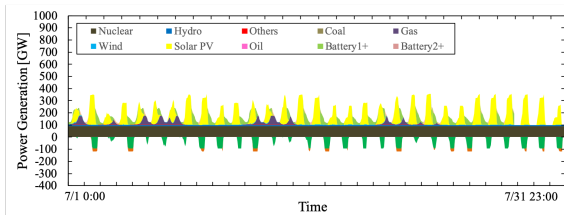


図 4.26 \$300 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

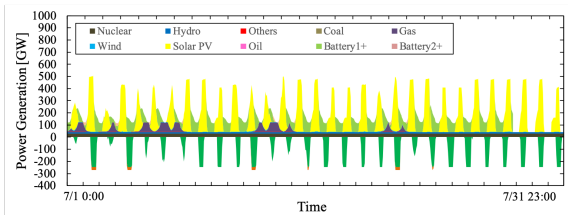


図 4.27 \$300N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

### 4.3.3 GDP と効用

本研究は一般均衡モデルをベースとする経済モデルでもあるため、各時点における産業連関表が作成可能である。その産業連関表から計算した GDP 成長率が図 4.28 である。二酸化炭素税を課した各ケースでは、再生可能エネルギーへの投資が GDP の成長に大きく貢献している。\$300 ケースでは、原子力発電所の新設におよそ 30 兆円が注ぎ込まれており、投資による各部門の生産拡大が GDP に大きく貢献している。\$300 ケースと \$300N ケースを比較すると、2030 年までは前者の方が GDP の水準が高く、それ以降は後者の方が高い。既存の原子力発電を再稼働で維持したとしても、再生可能エネルギーへの投資に起因し、2035 年以降の GDP 水準は高いという結果になっている。しかし GDP 成長率という観点で見ると、最大で 13% という結果であり、文献 [4-7] や文献 [4-8] で想定されているそれとは大きな乖離がある (それぞれ 39%, 41%)。本モデルでは、前述の通り、消費をシナリオとして設定しており、特に非電力財の消費は初期時点から一定としていることが低成長の原因である。今後、消費シナリオをいくつか設けることや消費を内生的に扱うことも検討している。

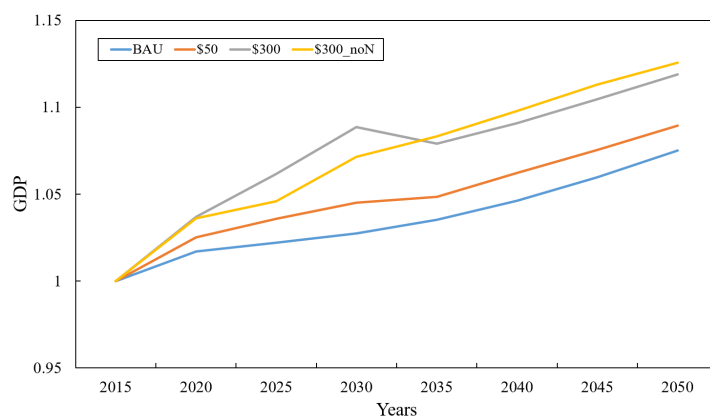


図 4.28 各ケースの GDP 推移。BAU ケースの 2015 年の値を 1 とし規格化。

表 4.11 は具体的に各部門の消費の GDP への貢献度を示す。BAU ケースと比較して変化の大きい部門の結果を載せた。石炭や天然ガスの消費量が激減しているのは炭素税の影響である。また、太陽光発電の大幅な普及により、建築部門 (建築に関するすべてのアクティビティ) や機械部門 (計算機器, 通信機器, 装置, 電気機械, 精密機器, 光学機器等) の消費が拡大し, GDP を押し上げている。太陽光発電の設備増強のために機械部門の財の購入が促進され, 設備建設のために建築部門の利用が進んだことに起因する。また, 化石燃料の取引が大幅に縮小したことによって, 海上輸送部門にも負の影響が出ている。これらの結果は, 脱炭素化によって経済の拡大を示唆しているが, 当然のことながら, 著しく生産を減らす部門が存在することも注意が必要がある。

表 4.11 BAU ケースと比較したときの 2050 年における主要部門の消費変化率と GDP におけるシェア。

	建設部門	石炭部門	機械部門	ガス部門	海上輸送部門
\$50	7.3 (1.0)	-76 (0.074)	1.8 (0.69)	-44 (0.38)	-4.3 (0.48)
\$300	7.3 (1.1)	-76 (0.073)	8.3 (0.70)	-68 (0.16)	-5.1 (0.47)
\$300N	8.3 (1.1)	-76 (0.073)	10 (0.70)	-62 (0.20)	-4.5 (0.48)

さらに重要なこととして, GDP の増加が国民の生活に効用をもたらしているかはまた別問題であることが挙げられる。図 4.29 は BAU ケースの初期時点の効用を 1 としたときの各ケースの効用を示す。CO<sub>2</sub> 1 t あた

り\$300 と非常に高い炭素税は、4.28 に示したとおり GDP の成長に貢献したが、各家庭の効用は初期時点と比べて約 25% 減少している。効用の 25% の減少は、それが具体的に意味するところは議論し難いが、ここで重要なのは、少なくとも経済成長が効用と正比例しないという事実であり、特に本分析では、人々の生活の幸福度に焦点を当てると、高い炭素税の導入には慎重にならざるを得ないとの示唆を得た。また、省エネ技術の活用によって、二酸化炭素税導入に伴うエネルギー消費の削減が期待されるが、先に述べたように、現状のモデルでは省エネ技術を考慮していないため、二酸化炭素税の効果について正確に議論することは難しい。さらに、二酸化炭素税収をその他の税金や補助金に還元することも考えられるが、本モデルにおける税金の扱いではそこまで議論を及ぼすことが困難であり今後の課題である。また本モデルは、税金による効用損失を単純化して効用関数から直接控除しているが、税金が効用に及ぼす影響は未検討であり、今後の課題として認識している。また、労働力の投入量の増加による効用損失も同様である。極端に言えば、労働が 24 時間フル稼働すれば GDP は増加するが、余暇の減少による効用損失も考慮すべきである。文献 [4-9], [4-10] のように一般均衡モデルで余暇の効用関数を考慮したモデリングも検討する必要がある。

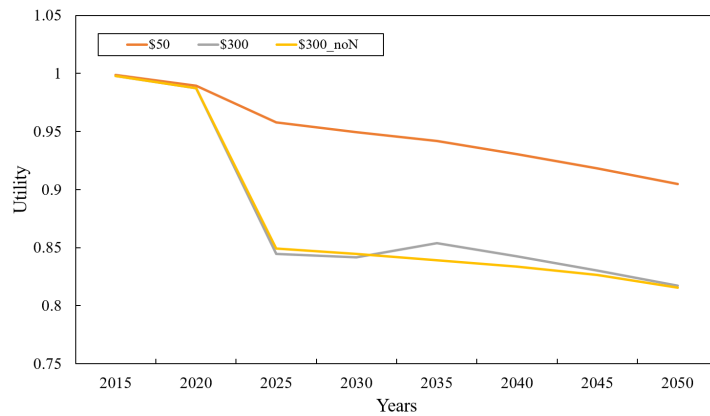


図 4.29 各ケースの効用の変化。BAU ケースの 2015 年の値を 1 として規格化。

#### 4.4 第 4 章の結論

本章は、第 3 章で説明を行った DMSEE における電力部門における技術選択の議論を可能にした。また、技術選択において太陽光発電と風力発電のより現実的な運用を議論可能にすべく、電力部門の時間解像度を 1 時間刻みと高時間解像度でのモデリングを行った。そしていくつかの二酸化炭素排出税を課した際の最適電源構成の変化および CO<sub>2</sub> 排出削減量の可能性について計算と分析を行った。結果として、排出税課税下においては、原子力発電および太陽光発電の重要性が示唆され、同時に高い排出税によって投資が促進され、GDP 増加を招くという示唆を得た。他方、高い排出税は家計の効用減少も誘発するため、排出税の課税の是非を GDP の観点のみで議論すべきではないという示唆を得た。

## 参考文献

- [4-1] 岡健太, 小宮山涼一, 藤井康正: 「エネルギー物質循環モデル構築に向けた産業連関表に基づく準備的検討」, 第 28 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
- [4-2] 杉山達彦, 小宮山涼一, 藤井康正: 「全国の電力基幹システムを考慮した最適電源構成モデルの開発と太陽光・風力発電大量導入に関する分析」, 電気学会論文誌 B, Vol. 136, No. 12, pp. 864-875 (2016)
- [4-3] 川上恭章, 小宮山涼一, 藤井康正: 「高時間解像度の発電部門を持つエネルギーシステム技術選択モデルによる CO<sub>2</sub> 削減シナリオの分析」, 電気学会論文誌 B, Vol. 138, No. 5, pp. 382-391 (2018)
- [4-4] 経済産業省: 長期エネルギー需給見通し小委員会・発電コスト検証ワーキンググループ (平成 27 年 4 月 16 日)
- [4-5] 一般社団法人日本原子力産業協会: 「わが国の原子力発電所の運転実績」 (2017)
- [4-6] 一般社団法人 電気学会: 「地域供給システムモデル」, [http://denki.iee.jp/pes/?page\\_id=966](http://denki.iee.jp/pes/?page_id=966) (アクセス日 2019.07.01)
- [4-7] Bert Saveyn, Leonidas Paroussos, Juan-Carlos Ciscar: “Economic analysis of a low carbon path to 2050: A case for China, India and Japan.”, Elsevier, Energy Economics 34, S451-458 (2012)
- [4-8] 松尾 雄司ら: 「統合型エネルギー経済モデルによる 2050 年までの日本の長期エネルギー受給見通しと輸入水素導入シナリオの分析」, Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 35, No. 2 (2014)
- [4-9] 朴 勝俊: 「環境税制改革の応用一般均衡 (CGE) 分析」, 国民経済雑誌, Vol.186, No. 2, pp. 1-16 (2002)
- [4-10] 武藤 慎一, 森杉 壽芳, 松澤 晴季: 「地球温暖化の緩和策と適応策評価のための最適動学 CGE モデル」, 土木計画学研究・論文集, Vol.72, No. 5, pp. I\_177-I\_190 (2016)

## 第5章

# 素材部門と非電力エネルギー部門を詳細化した DMSEE 拡張モデル

前章では、多部門の応用一般均衡モデルを電力部門に焦点を当てて、工学データに基づいて技術選択を議論可能にした。その他の部門についても各種工学データを用いることで、同様に技術選択を議論することが可能であり、本章ではまずエネルギー多消費産業である素材部門に着目し技術を詳細化した。そして、エネルギーフローをより詳細に追跡できるように、非電力エネルギー部門についても財の細分化を行った。本章ではまず 5.1 節で素材部門と非電力エネルギー部門の概要について説明した後、5.2 節、5.3 節でそれぞれ素材部門、非電力エネルギー部門の定式化の説明を行う。そして、計算のシナリオおよびケース設定について 5.4 節で言及した後、5.5 節で結果とその分析について論ずる。最後に 5.6 節で本章を締めくくる。

### 5.1 概要

素材部門は、鉄鋼部門、セメント部門、石油化学部門、紙・パルプ部門に分類される。素材部門はエネルギー多消費産業として知られているが、実際にどれほどのエネルギーを消費しているのだろうか。日本のエネルギー消費内訳をエネルギー白書 2018<sup>[5-1]</sup>によると、2016 年度、日本全体のエネルギー消費は  $13.32 \times 10^3$  PJ である。そのうち約 62.2% が企業・事務所等で消費されたエネルギーであり、さらにそのうち 69.7% にあたる  $5.771 \times 10^3$  PJ が製造業で消費されたエネルギーである (図 5.1)。素材部門はこれの 80.9% を占めるので、2016 年度に素材部門で消費されたエネルギーは  $4.669 \times 10^3$  PJ であり、実に全消費エネルギーの約 35.0% を占めることになる。したがって、素材部門における省エネルギー化およびよりクリーンな技術選択を考えることは、日本の温室効果ガス削減に向けて必須の課題と言える。GTAP の部門分類でも、鉄鋼部門、セメント部門、石油化学部門、紙・パルプ部門はそれぞれ用意されており、工学データを用いてこれらの部門を細分化することで、政策実行下における技術選択の考慮の余地を DMSEE に与えるのが本章の主な目的である。加えて、より詳細なエネルギーの消費フローを追跡可能にするためにも、GTAP では大雑把な分類に留まる石油、石炭、ガス等といった非電力のエネルギー部門について、細かな財を設定を行った。

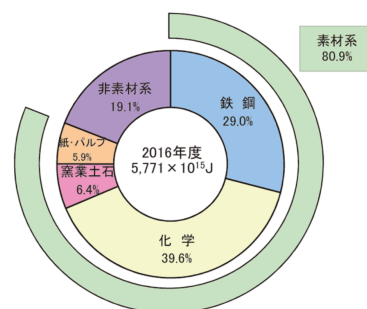


図 5.1 2016 年度における素材部門のエネルギー消費。文献 [5-1] より抜粋。

## 5.2 素材部門の定式化

先にも述べた通り，素材部門は，鉄鋼部門，セメント部門，石油化学部門，紙・パルプ部門に分けられる．以下，主に文献 [5-2] に基づいて定式化した．素材部門の制約条件は??項で説明した BU 部門の制約条件に従う．物量単位はすべて [Mt] とした．また，中間投入係数は図 5.5 に示すように設定した．

### 5.2.1 鉄鋼部門

#### (a) アクティビティと財

GTAP において鉄鋼部門は  $i_s$  で定義されている． $i_s$  には粗鋼の生産から鉄鋼製品の生産まで，鉄鋼製品が生産されるまでの全プロセスが含まれているので，これを工学データを用いて分解する．具体的には，高炉・転炉法，電気炉法，直接還元法によってそれぞれ高炉・転炉鋼，電気炉鋼が生産され，鉄鋼製品へと加工される．各技術は効率や付加技術，コストによって差別化される．表 5.1 に DMSEE が扱う鉄鋼部門のアクティビティを示した．鉄鋼製品製造業は高価格鉄鋼製品を作るアクティビティと低価格鉄鋼製品を作るアクティビティの 2 つを用意したが，詳細は後に述べる．表 5.1 のコストは，文献 [5-2] の表 2.3-1 に記載されているコストを引用した．各アクティビティの初期設備容量は，文献 [5-2] の図 2.5-3 から引用した．そして，鉄鋼部門が扱う財を 5.2 に示す．スクラップやスラグはモデル内で考慮できるように整備しているが，簡単のため現状では特にモデリングしておらず，特に鉄スクラップは市場から無制限に供給されるものとしている．その他，特筆すべき制約条件として，電気炉による粗鋼の生産に上下限を設定している．文献 [5-2] の図 2.4-3 に世界の電気炉由来の粗鋼 (電気炉鋼) の上下限值が設定されている．この値に日本と世界の電気炉鋼の比率をかけて日本の電気炉鋼の生産に上下限制約を設定した (図 5.2)．表 5.1 に示すとおり，本モデルでは直接還元法による鉄源生産もアクティビティとして考慮している．現状，直接還元法によって作られた還元鉄は主に電気炉を通して粗鋼へと姿を変える [5-3] が，工学的には直接還元法で作られた還元鉄も高炉・転炉法で粗鋼へと変えることができる [5-4]．しかし本研究においては，現状の直接還元法に関する十分なデータを得ることができなかったため，直接還元法による鉄源の生産は行われぬものとしている．直接還元法のアクティビティを残しているのは，将来，直接還元法の利用が現実的となり十分なデータが得られた際にはモデルで考慮可能にするためである．

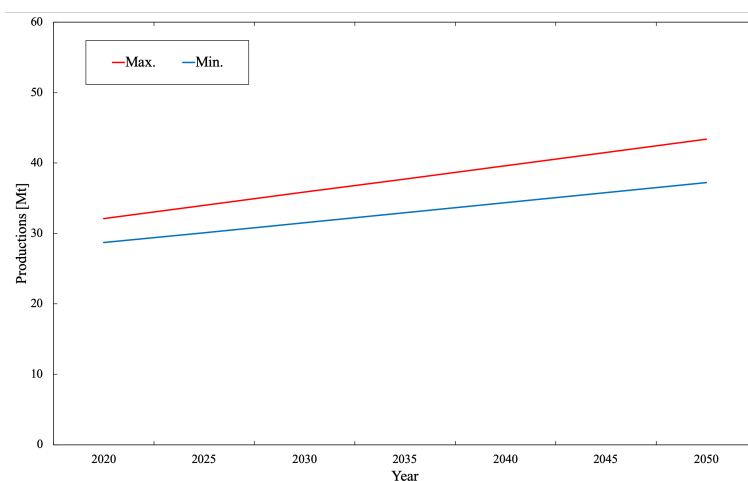


図 5.2 電気炉法による粗鋼生産量の上下限.



表 5.1 鉄鋼部門のアクティビティ.

名称	説明	設備費 [Mt / million USD]	初期設備容量 [Mt]
i_sBFL	高炉・転炉法 低効率	276.20	1.5105
i_sBFM	高炉・転炉法 中効率	295.43	0
i_sBFMCOG	高炉・転炉法 中効率 COG 回収	304.75	0
i_sBFMLDG	高炉・転炉法 中効率 LDG 回収	311.66	0
i_sBFMCDQ	高炉・転炉法 中効率 CDQ 技術	311.49	0
i_sBFMTRT	高炉・転炉法 中効率 TRT 技術	309.07	23.161
i_sBFMALL	高炉・転炉法 中効率 すべて	350.68	0
i_sBFH	高炉・転炉法 高効率	386.51	68.979
i_sBFN	高炉・転炉法 次世代	377.14	0
i_sEFL	電気炉法 低効率	143.00	0
i_sEFM	電気炉法 中効率	173.92	19.636
i_sEFH	電気炉法 高効率	183.68	13.594
i_sDRM	直接還元法 中効率	-	0
i_sDRH	直接還元法 高効率	-	0
i_sRMPH	高価格鉄鋼製品製造	-	120.72
i_sRMPL	低価格鉄鋼製品製造	-	14.296

表 5.2 鉄鋼部門の財.

名称	説明
scrap	鉄スクラップ
slag	スラグ
crudeSteelB	高炉・転炉鋼
crudeSteelE	電気炉鋼
ironProductH	高価格鉄鋼製品
ironProductL	低価格鉄鋼製品

(b) 高価格鉄鋼製品と低価格鉄鋼製品

図 5.3 に示すとおり，鉄鋼製品の価格はその品種によって価格差が目立つ．当然，鉄鋼製品の質によっても価格は上下する．したがって本モデルでも高価格鉄鋼財と低価格鉄鋼財の 2 種類の鉄鋼財を用意した．スクラップを利用する電気炉鋼は純粋な鉄鉱石から作る高炉・転炉鋼より質が劣ると考え本モデルでは，高炉・転炉鋼から高価格鉄鋼製品が，電気炉鋼から低価格鉄鋼製品が生産されるものとして扱った．そして，生産されたこれら 2 種類の鉄鋼財はその他産業のアクティビティに中間投入される．あるアクティビティ  $n$  が高価格鉄鋼財を  $x_n$  の割合で購入するとき， $x_n$  は以下の式によって与えられる．

$$M_n \cdot x_n \cdot P_H + M_n \cdot (1 - x_n) \cdot P_L = VDFM_n \quad (5.1)$$

$$\therefore x_n = \frac{VDFM_n - M_n \cdot P_L}{M_n(P_H - P_L)} \quad (5.2)$$

$M_n$ :  $n$  アクティビティによる鉄鋼製品の消費量,  $P_H$ : 高価格鉄鋼財の価格,  $P_L$ : 低価格鉄鋼財の価格,  $VDFM_n$ :  $n$  アクティビティの GTAP に記載されている鉄鋼財の中間消費額

しかし， $M_n$  の値は，年間の鉄鋼製品の生産量を GTAP のデータで按分しているので， $x_n$  はアクティビティに

よらず同じ値になる。現状の課題点ではあるが、逆に言えば、観測データとして各アクティビティがどの鉄鋼財をどれだけ消費したかのデータを入力すれば、より現実的に鉄鋼製品の生産について論ずることが可能である。実際、図 5.3 から、 $P_H = 112905$  円 / t,  $P_L = 61065$  円 / t と設定し  $x_n$  を求めると、 $x_n \approx 0.894$  と求まる。つまり各アクティビティは高価格鉄鋼財と低価格鉄鋼財をおよそ 9 : 1 の割合で消費する。

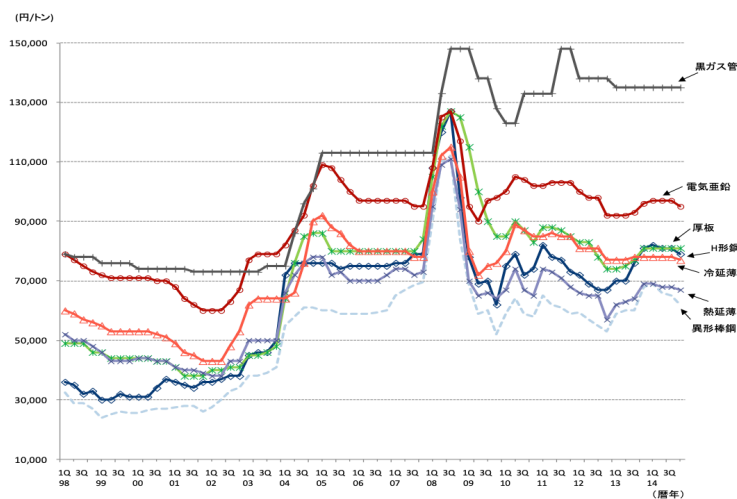


図 5.3 鋼材品種別の価格推移。文献 [5-5] より抜粋。

## 5.2.2 セメント部門

### (a) アクティビティと財

GTAP の部門部類においてセメント部門は *nm* に属す。*nm* は非金属鉱物全般を含むので、*nm* からセメント部門を抽出する必要がある(次項)。セメント部門で定義したアクティビティは表 5.3、財は表 5.2 である。設備費は文献 [5-2] の表 3.3-1 の値を用いた。初期の設備容量は同じく文献 [5-2] の図 3.5-3 の値を引用した。

表 5.3 セメント部門のアクティビティ。

名称	説明	設備費 [Mt / million USD]	初期設備容量 [Mt]
cemSS	小規模シャフトキルン	354.42	0
cemSW	小規模湿式ロータリーキルン	478.39	0
cemSD	小規模乾式ロータリーキルン	574.81	0
cemSDS	小規模乾式ロータリーキルン (SP/NSP)	547.25	0
cemSDSN	新型小規模乾式ロータリーキルン	516.28	0
cemLW	大規模湿式ロータリーキルン	446.25	0
cemLD	大規模乾式ロータリーキルン	592.17	0
cemLDS	大規模乾式ロータリーキルン (SP/NSP)	292.25	60.862
cemLDSN	大規模乾式ロータリーキルン (SP/NSP BAT)	335.82	17.582

表 5.4 セメント部門の財.

名称	説明
cement	セメント

(b) GTAP の部門分解

GTAP ではセメント部門は  $nmm$  の中にまとめられているので、セメント部門をそこから抽出する必要がある。セメント部門以外を新たに  $tnm$  とおき、セメント部門以外の非金属鉱物部門は TD 部門として扱っている。以下、具体的な抽出方法について説明する。

まず生産量は、一般社団法人セメント協会が発表しているセメントハンドブック [5-6] のデータを用いた。2007 年度のセメントの生産量は 70.6 Mt なので、 $\sum_{n \in AAR} Xp_{Bn} = 70.6 \text{ Mt}$  である。同じく文献 [5-6] のセメントの 2007 年の生産者価格を  $ProductionPrice_{Bcement}$  を用いると、 $tnm$  の初期生産量  $Xp_{T,tnm}$  は、

$$Xp_{T,tnm} = VOM_{nmm} - ProductionPrice_{Bcement} \cdot \sum_{n \in AAR} Xp_{Bn} \quad (5.3)$$

で与えられる\*1。同様に、 $tnm$  の輸出入も以下の用に設定した。

$$Xt_{T,tnm,r,s} = VXMD_{nmm,r,s} - ExportPrice_{Bcement} \cdot Xt_{Bcement,r,s}, \quad (5.4)$$

$$Xt_{T,tnm,s,r} = VIMS_{nmm,s,r} - ImportPrice_{Bcement} \cdot Xt_{Bcement,s,r} \quad (5.5)$$

$(r \in RR, s \in RR, r \neq s)$

### 5.2.3 石油化学部門

(a) アクティビティと財

石油化学部門は、GTAP では  $p_c$  に含まれる。したがって、セメント部門と同様に石油化学部門を  $p_c$  から抽出する必要がある(次項)。石油化学部門で定義したアクティビティと財はそれぞれ表 5.5、表 5.6 である。エチレン生産プラントはエタン原料とナフサ原料に分かれ、それぞれ効率を3つずつ設定している。コストは文献 [5-2] の表 5.4-1 および表 5.4-2 の値を、初期設備容量は図 5.5-7 および 5.5-8 の値を用いている。ただしエタン原料、ナフサ原料ともに日本において低効率プラントの利用は現状なく、今後も中効率、高効率から代替する余地はないので、設備の新設はないものとして設備費を設定していない。

表 5.5 石油化学部門のアクティビティ.

名称	説明	設備費 [Mt / million USD]	初期設備容量 [Mt]
ethyEL	エタン原料プラント 低効率	-	0
ethyEM	エタン原料プラント 中効率	17.808	0.25817
ethyEH	エタン原料プラント 高効率	68.329	0.11065
ethyNL	ナフサ原料プラント 低効率	-	0.15982
ethyNM	ナフサ原料プラント 中効率	24.658	4.3889
ethyNH	ナフサ原料プラント 高効率	95.726	2.5571

\*1 地域を表す添字  $r$  は省略。

表 5.6 石油化学部門の財.

名称	説明
ethylene	エチレン

#### (b) GTAP の部門分解

以下で GTAP の  $p\_c$  部門から石油化学部門を抽出した手順を説明する.  $p\_c$  は石油石炭製品部門であり, 石油化学部門を除いた残りの部門も BU で表現している. すなわち, GTAP の  $p\_c$  は石油化学部門, 石油製品部門, 石炭製品部門の 3 つの BU 部門に分解されるので, 生産量や輸出入量は GTAP の金額データを用いずすべて実際の物量データで設定した. 具体的には,

$$\sum_{n \in AAR} Xp_{Bn} = 7.385 \text{ Mt}, \quad (5.6)$$

$$Xt_{Tethylene,r,s} = 2.391 \text{ Mt}, \quad (5.7)$$

$$Xt_{Tethylene,s,r} = 0.3940 \text{ Mt}, \quad (5.8)$$

$$(r \in RR, s \in RR2, r \neq s)$$

である. 生産量は文献 [5-2] の図 5.5-7 を引用, 輸出入量は石油化学工業協会のエチレン換算輸出入バランス [5-7] を引用した. 石油製品部門, 石炭製品部門に関しては 5.3 節で言及する.

### 5.2.4 紙・パルプ部門

#### (a) アクティビティと財

紙・パルプ部門は GTAP 上では  $ppp$  部門として扱われている. これを工学データを用いて分解する. 設定したアクティビティと財はそれぞれ表 5.7, 表 5.8 である. 図 5.4 に示されるように, 紙の原料となるパルプの製造は, 木材チップを原料とする化学, 半化学, 機械パルプ製造工程と, 古紙を原料とする古紙再生工程が存在する. 前者はその約 9 割が化学パルプ製造工程であるので, 本モデルで木材チップからパルプを製造するアクティビティは化学パルプ製造工程のみを考えている. そして効率の差で 3 つのアクティビティを設定している. 加えて, 古紙再生製造工程も効率の差で 3 つのアクティビティを設定している. これらのアクティビティによって製造されたパルプは抄紙工程において紙製品へと姿を変える. 鉄鋼部門と同様に, 紙製品も一定の価格差が存在するので, 高価格紙製品と低価格紙製品の 2 つの財を用意した. これらも効率によってそれぞれ 3 つのアクティビティを考えている. 設備費, 初期設備容量はそれぞれ文献 [5-2] の表 4.4-1, 図 4.4-4 から引用した. 紙の輸出入のデータは, 文献 [5-8] から設定した.

各アクティビティが消費する高価格紙製品と低価格紙製品の比率は, 鉄鋼部門のそれと同じように計算される. 文献 [5-9] に記載されている各紙製品の価格を参考に,  $P_H = 126 \text{ 円/kg}$ ,  $P_L = 96 \text{ 円/kg}$  と設定し  $x_n$  を求めると,  $x_n \approx 0.305$  と求まる. つまり, 各アクティビティは高価格紙製品と低価格紙製品をおよそ 3:7 の割合で消費する.

### 5.3 非電力エネルギー部門の定式化

本節では非電力部門の定式化について説明する. 非電力エネルギー部門は石炭を採掘する石炭採掘部門, 原油を採掘する原油採掘部門, ガスを採掘しガス製品を製造するガス部門, 石炭から石炭製品を製造する石炭製品製造部門, 原油から石油製品を製造する原油製品製造部門に分けられる. それぞれ以下に説明する. ただし, 本モデルでは, 非電力エネルギー部門において技術選択は考慮しておらず, あくまで物量単位の導入に留めている. 文献 [5-10] で指摘されているような付加技術や効率化技術, あるいは SCOPE21 [5-11] のような次世代

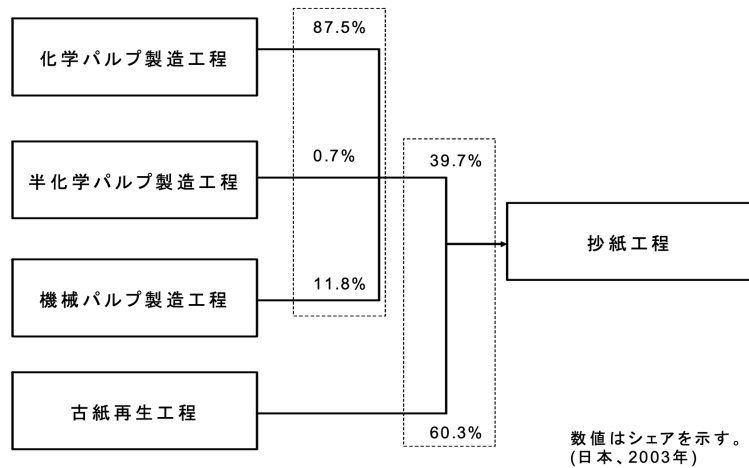


図 5.4 紙の製造工程。文献 [5-2] より抜粋。

表 5.7 紙・パルプ部門のアクティビティ。

名称	説明	設備費 [Mt / million USD]	初期設備容量 [Mt]
pppCPPL	化学パルプ製造工程 低効率	216.44	0
pppCPPM	化学パルプ製造工程 中効率	221.92	0
pppCPPH	化学パルプ製造工程 高効率	232.88	11.907
pppOPRL	古紙再生パルプ製造工程 低効率	37.808	0
pppOPRM	古紙再生パルプ製造工程 中効率	39.726	0
pppOPRH	古紙再生パルプ製造工程 高効率	43.836	18.000
pppPMLH	高価格抄紙工程 低効率	58.904	0
pppPPMMH	高価格抄紙工程 中効率	65.753	0
pppPPMHH	高価格抄紙工程 高効率	79.452	10.453
pppPPMLL	低価格抄紙工程 低効率	58.904	0
pppPPMML	低価格抄紙工程 中効率	65.753	0
pppPPMHL	低価格抄紙工程 高効率	79.452	23.823

表 5.8 紙・パルプ部門の財。

名称	説明
pulp	パルプ
opp	古紙
pppH	高価格紙製品
pppL	低価格紙製品

コークス炉への技術選択<sup>\*2</sup>をモデル計算に入れることは今後の課題として認識している。

非電力エネルギー部門の生産量や中間投入量、輸出入量のデータはすべて資源エネルギー庁の総合エネルギー統計 [5-12] の値を引用した (図 5.5)。物量単位はすべて [TJ] である。素材部門と同様に、制約条件は??項で説明した BU 部門の制約条件に従う。

<sup>\*2</sup> 例えば鉄鋼部門における技術選択で、次世代コークス炉の活用による効率化が含まれているので、実質次世代コークス炉を考慮している場合もある。

表 5.9, 表 5.10 はそれぞれ非電力エネルギー部門のアクティビティと財を示している。初期設備容量は生産能力として、初期生産量を稼働率で割った値を設定した。稼働率は一律 90% とした。設備費は文献 [5-13] に記載されている 2007 年度のガス製造部門、石油・石炭製品製造部門の投資額に基づいて設定した。ただし石炭採掘、石油採掘に関しては、日本では行われないものとして設備投資に関する式から除外しているため値を設定していない。

表 5.9 非電力エネルギー部門のアクティビティ。

名称	説明	設備費 [ $10^{-3}$ TJ / million USD]	初期設備容量 [ $10^6$ TJ]
coa	石炭採掘	-	-
oil	原油採掘	-	-
gas	ガス採掘・製造	14.74	
coaP	石炭製品製造	3.568	0.405
oilP	石油製品製造	3.568	9.95

表 5.10 非電力エネルギー部門の財。

生産するアクティビティ	名称	説明
coa	coa	石炭
oil	oil	原油
gas	naturalGas	天然ガス
	cityGas	都市ガス
	ethane	エタン
coaP	cokes	コークス
	cog	コークス炉ガス
	bfg	高炉ガス
	ldg	転炉ガス
oilP	naphtha	ナフサ
	gasoline	ガソリン
	jetOil	ジェット燃料
	kerosene	灯油
	dieselOil	軽油
	heavyOil	重油
	otherOil	その他オイル

## 5.4 シナリオおよびケース設定

### 5.4.1 シナリオ

前章と同様に家計消費および政府消費をシナリオ化した。本章では、家計消費を年率 1.5% で消費増するとし、政府消費は初期時点から一定とした。

CA	TD [M\$]	Material [Mt]	Energy [TJ]	Electricity [GWh]
TD	GTAP	GTAPデータを RITEのデータで按分	GTAPデータを RITEのデータで按分	GTAPデータを 電気事業連合会のデータで按分
Material	GTAPデータと 各種実測データ	RITEの工学データ	×	×
Energy	総合エネルギー統計	RITEの工学データ	総合エネルギー統計	総合エネルギー統計
Electricity	総合エネルギー統計	RITEの工学データ	総合エネルギー統計	経産省の所内率

図 5.5 各部門ごとの中間投入係数の値。行が財，列がアクティビティ。

## 5.4.2 ケース

本章では以下のケースを設定した。

- BAU(Business As Usual) ケース: 先で記述した基本的な制約条件以外に制約を課さないケース。
- \$10 ケース: 2025 年以降, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$10 の排出税を課すケース。
- \$10\_N ケース: 2025 年以降, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$10 の排出税を課し, 全時点において原子力発電所の新設を禁止するケース。
- \$50 ケース: 2025 年以降, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$50 の排出税を課すケース。
- \$50\_N ケース: 2025 年以降, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$50 の排出税を課し, 全時点において原子力発電所の新設を禁止するケース。
- \$150 ケース: 2025 年以降, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$150 の排出税を課すケース。
- \$150\_N ケース: 2025 年以降, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$150 の排出税を課し, 全時点において原子力発電所の新設を禁止するケース。
- RAMP ケース: 2025 年, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$20 の排出税を課し, 毎年単位トン当たり\$4 の排出税を上乗せするケース (すなわち 2050 年時点で\$120/t-CO<sub>2</sub>)。
- RAMP\_N ケース: 2025 年, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$20 の排出税を課し, 毎年単位トン当たり\$4 の排出税を上乗せするケース。加えて全時点において原子力発電所の新設を禁止するケース。

## 5.5 結果とその分析

本節では上記で説明した DMSEE の計算結果とその分析を行う。まず 5.5.1 項で各時点の最適電源構成と CO<sub>2</sub> 排出量について述べた後, 5.5.2 項において, 素材部門における技術選択について言及する。そして, 政策実行下において経済はどのように変化するのか 5.5.3 項で述べる。最後に 5.5.4 項で一次エネルギー供給と各部門における最終エネルギー消費について言及する。

### 5.5.1 最適電源構成と CO<sub>2</sub> 排出量

まずは電力部門の技術選択, すなわち最適電源構成の結果を図 5.16~5.24 に示し, 図 5.25~5.33 に最適電源容量の結果を示す。そして BU 部門では電力部門の技術選択が最も CO<sub>2</sub> 排出量に影響するので, 本項で各ケースの CO<sub>2</sub> 排出量について言及する (図 5.6, 5.7)。最適電源パターンに関しては, 本章では議論の対象外とするが, 付録 G に掲載した。以下, それぞれの結果について特徴を述べた後にいくつか考察を行う。

(a) \$10, \$10\_N ケース

- 建設単価が他の電源より低く、原材料(天然ガス)が安いガス火力発電が支配的。2050年においては全体の約97%を占める。
- 原子力発電の再稼働も見られるが、高い固定費から導入は進まず。最大で9.6%程度。原子力発電の制限の有無に関わらずこの程度の導入量なので、Nケースとの差はほぼ皆無。
- CO<sub>2</sub>排出量は共に2020年と比べて2025年は若干の減少(約-6%)が見られるが、その後上昇する。

(b) \$50, \$50\_N ケース

- \$50 ケースでは、原子力発電の再稼働に加え新設が活発化。2030年では、約45%を占めた。
- N ケースでは、原子力発電の再稼働は進むが、2030年時点では新設できない分をガス火力発電が代替(約49%)。2035年以降は太陽光発電の低価格化により、2050年で全体の約16%を占めるまでに成長する。
- 両ケース共に2025年以降、水力発電および風力発電が台頭(N ケースでは2030年時点でそれぞれ5.5%, 8.2%)。その後、間欠性再エネ(風力及び太陽光)の低価格化により水力発電はそれらに代替される(2050年時点で水力発電は約1.9%)。
- 発電パターンを見ると、\$50 ケースでは、夜間に原子力発電によって発電した電力を蓄電し、昼間のピーク時に供給していることが確認できる。例えば春の8-16時では、供給の4.7%程をNAS電池で賄う。N ケース程度の間欠性再エネ導入では、蓄電池の積極利用は見られなかった。
- \$50 ケースのCO<sub>2</sub>排出量は2020年と比べて最大約32%の減少(2030年)、N ケースは最大約20%の減少(2030年)が見込める。

(c) \$150, \$150\_N ケース

- \$150 ケースでは2050年にゼロ・エミッション電源のみでの運用が実現する。
- 原子力の新設が禁止されると、2025年以降、間欠性再エネおよび水力、その他発電が台頭し、2050年では再エネ合計49%程度に及ぶ。特に太陽光発電の成長は著しい(約33%)。
- 最適電源パターンも、太陽光発電の大量導入により、余剰電力を蓄電池に溜め、その他の時間帯の供給に利用している。例えば春の16-24時のうち、約6.4%の電力需要はNAS電池で賄う。
- CO<sub>2</sub>排出量はそれぞれ最大約40%、31%の削減を見込める(2030年)。その後上昇に転じる。

(d) RAMP, RAMP\_N ケース

- 両ケース共に\$60/t-CO<sub>2</sub>を超える2035年から太陽光発電の発電量の増加が目立つ。それぞれ2050年時点で約5.6%、20%を占める。
- N ケースは2050年でガス火力が約49%を占める。
- 排出税が\$120/t-CO<sub>2</sub>に達する2050年にはほとんどゼロ・エミッション電源のみでの運用が実現する。
- CO<sub>2</sub>排出量はそれぞれ最大約31%(2040年)、18%(2040年)の削減を見込める。

上記の結果を踏まえ考察を行う。まずは原子力発電の重要性である。\$10 ケースでは、ガス火力発電が支配的であり、原子力発電の重要度は低いが、CO<sub>2</sub>排出量はほとんど減少せず、2030年以降は上昇を続ける。加えて、電源構成のほとんどをガス火力発電が占めるので、エネルギー自給率は著しく低下する。排出量削減が見込める他のケースを見ると、殊原子力発電については、現状の再稼働に加え新設が可能であれば新設を行う方が経済合理的であるとの結果を得た。また、高い排出税において、図5.6のCO<sub>2</sub>排出量が示すように、原子力発電を新設したケースの方が、化石燃料を再生可能エネルギーに代替するよりもCO<sub>2</sub>削減効果が得られる



との示唆を得た。特に\$150 ケースでは 2050 年にゼロ・エミッション電源のみで電力供給を行う。

続いて CO<sub>2</sub> 排出削減量についてである。前章や文献 [5-14] で示した結果よりも、より削減効果が顕著に現れている。理由としては、文献 [5-14] では電力部門における脱炭素化の議論のみであったが、本モデルでは、電力部門に加えエネルギー多消費産業である素材部門における技術選択も議論可能にしている点が挙げられる。排出税によって、より CO<sub>2</sub> を排出しない高効率あるいは次世代型の技術を選択することで、素材部門における排出量を削減し、全体の削減に貢献している。図 5.6 に示すとおり、電力部門と素材部門の脱炭素化によって\$50、\$150 ケースではそれぞれ 2030 年時点で 2020 年比約 32%、40% の削減が見込める。これらのケースであれば、2030 年に 1.0 Gt-CO<sub>2</sub> まで排出量を下げたい第五次環境基本計画 [5-15] を満足可能である。しかし、RAMP ケースを除く全ケース共通して、2035 年以降で排出量が増加していることが分かる。部門ごとの排出量を示した図 5.7 を見れば明らかだが、現在のモデルでは、脱炭素化の余地があるのは電力部門と素材部門のみであり、増える家計需要や TD 部門の生産に対する温室効果ガス削減技術、例えば電化や燃料電池等を考慮できていない点が原因として考えられる。本モデルの次の課題点として認識している。

この課題点に加えて、現状のモデルのその他の課題点が結果から浮き彫りになる。2 点に言及する。まず 1 点目は、発電電力量が現実と比べて低い点である。エネルギー白書 2018 [5-1] によると、2016 年度の日本の発電電力量合計は 1.04 PWh であった。本計算結果で算出される発電電力量はそれより 15% 程低い。原因として、BU 部門の電力の中間消費量と実際のエネルギー収支表との間に乖離があるためだと考えられる。先の説明で、TD 部門による BU 財の中間投入係数は、総合エネルギー統計で与えられるエネルギー消費量を GTAP の生産量で除したものと説明した。一方、BU 部門による BU 財の中間投入係数は、工学データの理論値を用いている。例えば、紙パルプ部門は、総合エネルギー統計によると 2007 年度で 12.7 TWh の電力を消費しているが、文献 [5-2] に基づいて設定した、電力のエネルギー原単位と 2007 年における紙の生産量から算出した電力消費量は 2.33 TWh と、大きな乖離がある。また、厳密に考える場合、紙パルプ部門は製造工程以外にも、紙を販売する会社の電力消費も考慮に入れる必要がある。以上のことから、各部門毎に基準としているデータを見比べ、チューニングを行う必要があるが、本モデルは非常に大規模なモデルであり、現状のモデルでは実現できておらず、今後の課題として認識している。

2 点目は、排出税導入によって電力需要が低下しない点である。排出税の導入による電気料金の上昇で需要は下がるのが一般的だが、前章や文献 [5-14] でも指摘しているように、家計の電力消費量をシナリオとして与えている点や需要側の省エネ技術を考慮していない点からこのような結果を得ていると考えられる。今後、省エネ技術や電化技術を考慮可能なモデルに発展させることで、排出税による電力需要の減少とともに、電源構成における再生可能エネルギーの割合の増加も予測される。この結果を得て、再度適切な排出税の価格を検討する必要があるが、現状のモデルでは、適正価格や実施時期等、様々な自由度をはらむ排出税のマクロ的な感度分析として、電源構成の変化や GDP 変化、排出量の削減可能性について示唆を与えている。

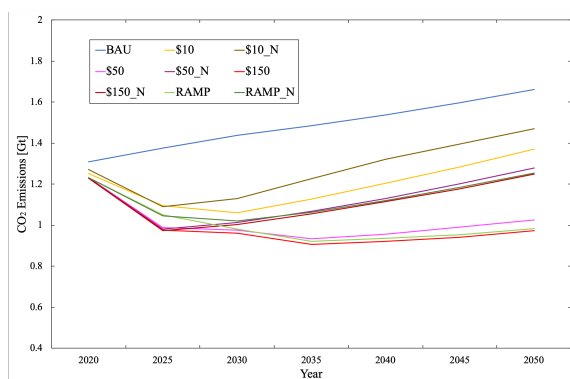


図 5.6 各ケースの CO<sub>2</sub> 排出量。

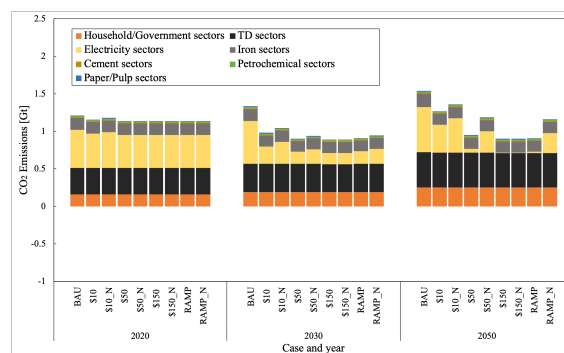


図 5.7 各ケースの部門別の CO<sub>2</sub> 排出量。

## 5.5.2 素材部門の技術選択

本モデルは素材部門の最適な技術選択も最適化計算で求めることが可能である。図 5.34～図 5.42 は各ケースの各時点における生産量構成，図 5.70～図 5.78. は各ケースの各時点における最適設備容量を示す。BAU ケースでは，化石燃料の消費を減らすインセンティブがはたらかないため，i\_sBFH は，より設備単価が安価で電力のエネルギー原単位が低い i\_sBFMALL に代替されていく。\$10 ケースでは i\_sBFH と i\_sBFMALL は i\_sBFN に徐々に代替されていくのに対し，\$50，\$150 ケースでは排出税が開始される 2025 年に急激に代替が発生する。例えば\$150 ケースの 2020 年における鉄鋼部門への投資額合計を見ると，およそ 53 億 US ドルである。法人企業統計によると，近年の鉄鋼部門における全投資額の合計は 5,000 億円程度の水準であるので，非現実的な運用ではないとも言える。加えて，日本では次世代型のコークス炉を備えた SCOPE21(Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21st Century)<sup>[5-16]</sup> プロジェクトが開発され，2008 年に大分製鉄所で初号機が稼働している実績がある。続いて RAMP ケースを見ると，2030 年以降はほとんどすべて次世代型の高炉・転炉法によって代替されるという計算結果である。一方電炉鋼は，高効率の i\_sEFH に単調に代替され，2050 年にはすべての電炉鋼が i\_sEFH による生産となる。排出税が高くなればなるほど電気炉法による生産は増加し，\$50 ケース以上のケースではおおよそ電気炉法の生産上限の頭打ちにあう。

続いて，技術選択の変化による CO<sub>2</sub> 削減効果について検証する。それぞれの技術ごとにエネルギー原単位が決まっており，(生産量) × (エネルギー原単位) × (CO<sub>2</sub> 排出係数) によって CO<sub>2</sub> 排出量が求められるわけであるが，技術選択によって具体的にどれだけの CO<sub>2</sub> 削減が見込めるのだろうか。BAU，\$10，\$50 各ケースにおける 2030 年および 2050 年の CO<sub>2</sub> 排出量を表にしたものが下表 5.11 である。2020 年における BAU ケースの CO<sub>2</sub> 排出量 (約 200 Mt-CO<sub>2</sub>) を 1 とした。

表 5.11 2030 年，2050 年における BAU，\$10，\$50 各ケースの CO<sub>2</sub> 排出量。2020 年の BAU ケースのそれを 1 として規格化。

	BAU	\$10	\$50
2030	1.04	0.969	0.917
2050	1.11	0.934	0.939

\$10 ケースでは徐々に次世代型の高炉・転炉法に代替されるので，2030 年から 2050 年にかけて排出量の削減が望まれるが，\$50 ケースでは 2030 年も 2050 年も技術構成は同じであり，鉄鋼需要に合わせて排出量も増加している。すなわち，鉄鋼部門において CO<sub>2</sub> 排出量を根本的に減らすためには，既存の高炉・転炉法の運用では限界があり，新しい技術の普及や電炉鋼のシェア拡大が望まれるということが示唆された。

## 5.5.3 GDP と TD 部門の経済活動

本モデルは各時点において産業連関表や投資マトリックスを作成可能である。各ケースの GDP 推移を図 5.8 で与える。簡単な為，BAU ケースの 2020 年の値を 1 とした。また，図 5.9 に 2020 年～2030 年の間における各ケースの TD 部門の生産量推移を示す。このように，政策によって各産業の生産行動がどのように変化するのかも詳細に見ることができる。すべてのケースの 2020 年から 2050 年までの生産量推移と価格推移を図 5.106～図 5.123 に示す。

2020 年，多部門で生産量が増加しており，表 6 に挙げた 3 つの部門に関しても生産量が増加している (表 ??)。特に建設部門は，2025 年の生産量を約 14% 増やしている。また，風力発電，太陽光発電が中間投入財および投資財として消費する一般機械・金属・電子装置製造 (fme) 財も 7% 程生産を伸ばしている。そして排出税が導入される 2025 年以降，特に\$150\_N ケースでは各財の価格が急騰しており，その結果，例えば農業部門

の生産量は減少する(表??)。全体で見ると、\$150 ケースでは、高い排出税が各経済活動を活発化させ GDP の増加を招くが、将来的にはケース間で GDP に大差はない。ここから導かれる一つ示唆として、排出税は経済の投資行動を促進させ、GDP の一時的な増加を招くものの、将来的には大差ないが、急激な排出税導入は短期的な価格の急騰を招く恐れがある。本モデルは家計消費をシナリオとして与えており、価格の高騰が家計に及ぼす影響を考慮できていないが、一般的に価格の急騰は家計にも悪影響を及ぼす。加えて、GDP が向上する一方で家計の効用は減少する。以上から、高い排出税の導入には慎重な検討が必要であり、GDP の観点のみで議論すべきではない。

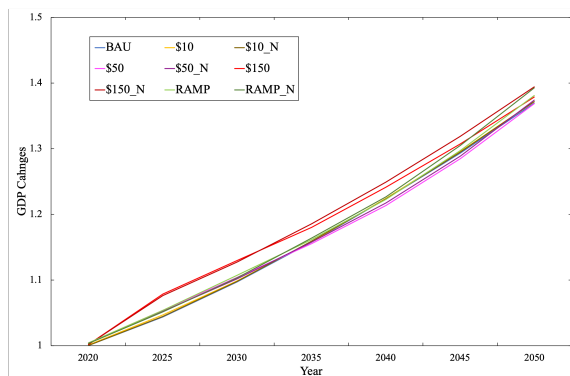


図 5.8 各ケースの GDP 推移。BAU ケースの 2020 年の値を 1 として規格化。

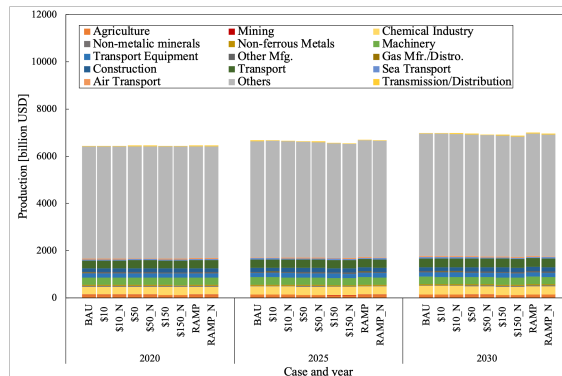


図 5.9 2020 年～2030 年における各ケースの TD 部門別実質生産量推移。

表 5.12 2025 年、2030 年における\$50\_N, \$150\_N ケースの生産量比率。2020 年の BAU ケースの値を 1 として規格化。

	Agriculture		Machinery		Construction	
	\$10_N	\$150_N	\$10_N	\$150_N	\$10_N	\$150_N
2025	1.03	0.865	1.01	1.07	1.09	1.07
2030	1.09	0.905	0.990	0.918	1.14	1.09

表 5.13 2025 年、2030 年における\$50\_N, \$150\_N ケースの価格比率。2020 年の BAU ケースの値を 1 として規格化。

	Agriculture		Machinery		Construction	
	\$10_N	\$150_N	\$10_N	\$150_N	\$10_N	\$150_N
2025	1.30	2.90	1.12	2.14	1.12	1.96
2030	1.35	3.16	1.14	2.11	1.13	2.00

### 5.5.4 一次エネルギー供給と最終エネルギー消費

本モデルでは電力部門を含むエネルギー部門も BU 化し一次エネルギー供給から最終エネルギー消費まで細かく観察することが可能である。以下、図 5.10～図 5.15 に、一次エネルギー供給量から部門ごとの最終エネルギー消費を示す。一次エネルギー供給量は、排出税をかけると BAU ケースと比べて全ケースにおいて減少する。それに伴い、最終エネルギー消費も減少し排出税が高ければ高いほどエネルギー消費量は抑制され、CO<sub>2</sub> 排出量の減少に貢献する。一次エネルギー供給では、原子力発電および再生可能エネルギーが天然ガスの輸入に代替されている。一定量の天然ガス供給が存在しているのは、業務部門および家庭部門における都市ガス生産用

である。都市ガスは電化代替の余地が十分にあるが本モデルではその代替を考慮できておらず課題点として認識している。石炭も同様である。石炭火力は先の電源構成で示した通り、高い排出税下ではその運用は行われないが、産業部門における石炭の利用を代替する技術を本モデルでは考慮していないため、一定量の石炭エネルギーの供給が必要である。

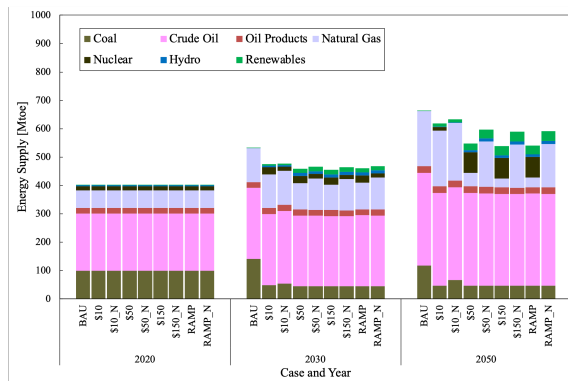


図 5.10 2020, 2030, 2050 年における各ケースの一次エネルギー供給量。

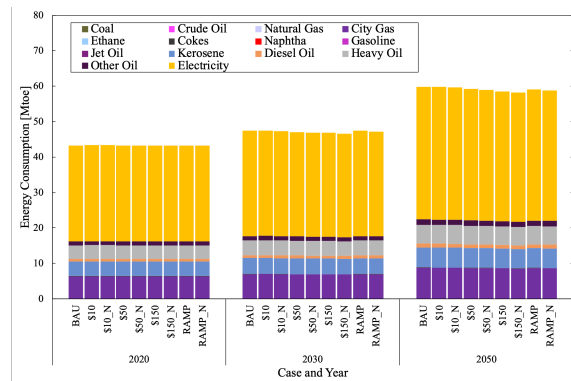


図 5.11 2020, 2030, 2050 年における各ケースの業務部門の最終エネルギー消費量。

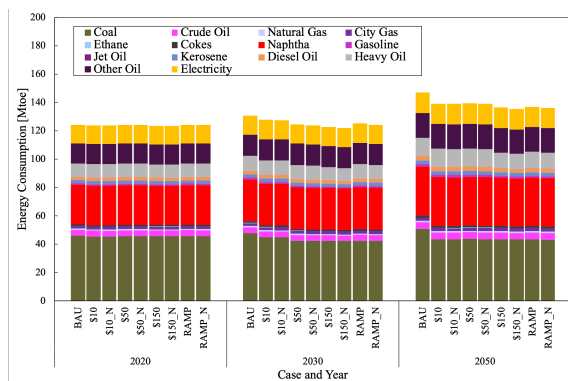


図 5.12 2020, 2030, 2050 年における各ケースの産業部門の最終エネルギー消費量。

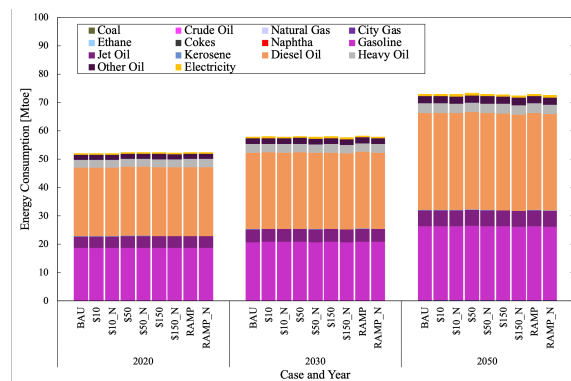


図 5.13 2020, 2030, 2050 年における各ケースの運輸部門の最終エネルギー消費量。

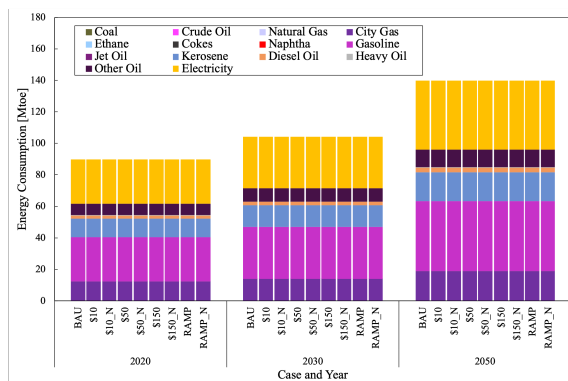


図 5.14 2020, 2030, 2050 年における各ケースの家庭・政府部門の最終エネルギー消費量。

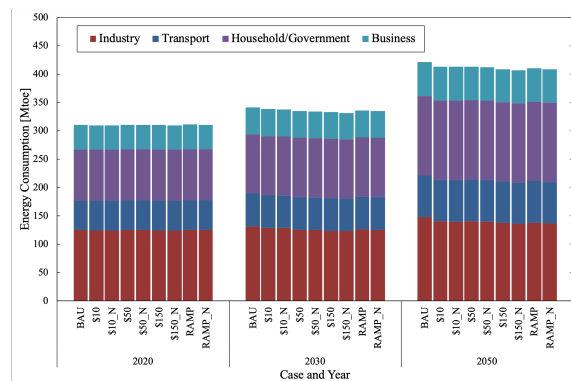


図 5.15 2020, 2030, 2050 年における各ケースの部門別最終エネルギー消費量。

## 5.6 第5章の結論

前章で説明した電力部門を BU 式に詳細化したモデルを更に改良し、エネルギー多消費産業である鉄鋼、セメント、石油化学、紙・パルプ部門における技術選択を考慮可能にすることで、CO<sub>2</sub> 排出税の効果をより広範囲まで議論可能にした。また、非電力エネルギー部門も財を細かく分解することで、一次エネルギー消費から各部門の最終エネルギー消費まで、詳細に観察可能になった。結果として、電源構成は前章の結論と同様、再生可能エネルギーの拡大を目指しながらも原子力発電の重要性の高さが示唆された。素材部門においては、よりエネルギー消費の少ない高効率技術への代替が確認されたが、今回考慮している技術は排出量削減に決定的な貢献をするとは言い難い技術ばかりであるので、大幅な CO<sub>2</sub> 削減効果を望むのは難しいという示唆を得た。一方、これらの技術普及による他産業への影響も論じた。前章同様、高い排出税によって GDP 増加が見られたが、同時に価格の急騰も示唆された。加えて、排出税の課税によって効用の損失は免れず、経済の正負の影響を GDP の観点のみで論ずるべきではないとの立場を示した。

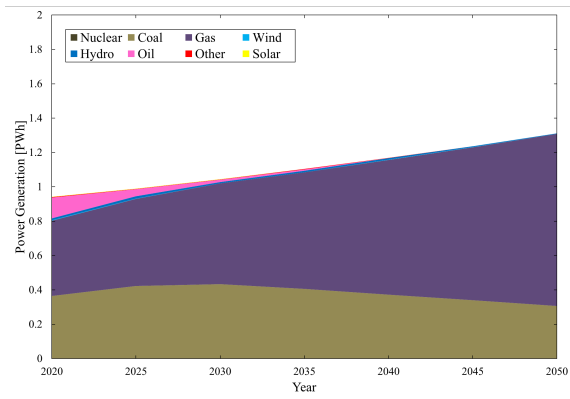


図 5.16 BAU ケースの最適電源構成.

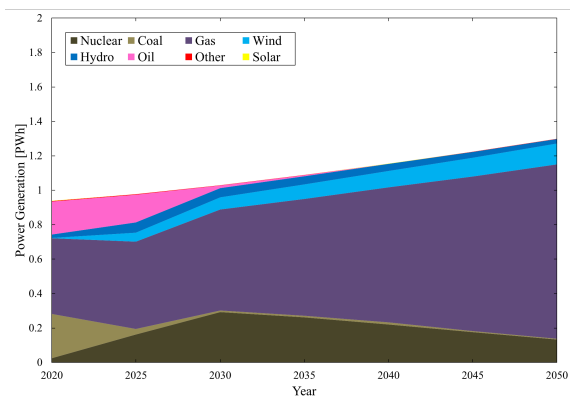


図 5.17 \$10 ケースの最適電源構成.

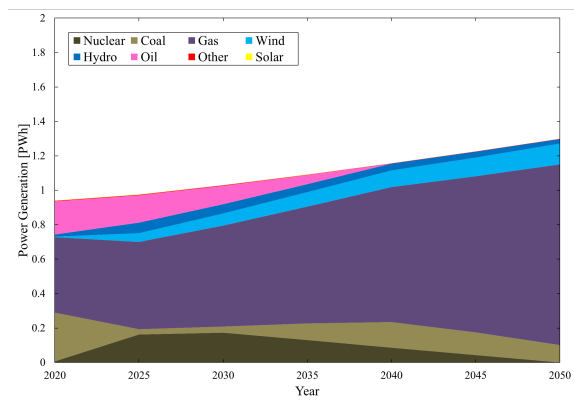


図 5.18 \$10\_N ケースの最適電源構成.

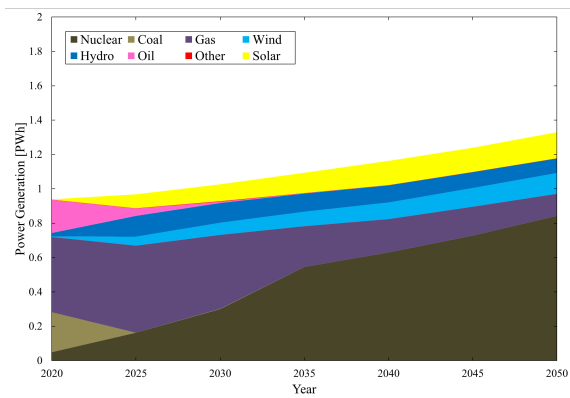


図 5.19 \$50 ケースの最適電源構成.

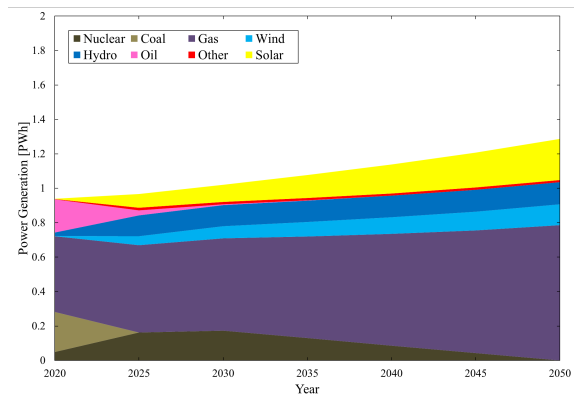


図 5.20 \$50\_N ケースの最適電源構成.

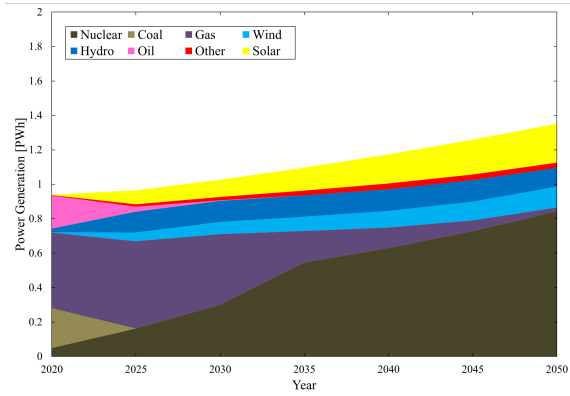


図 5.21 \$150 ケースの最適電源構成.

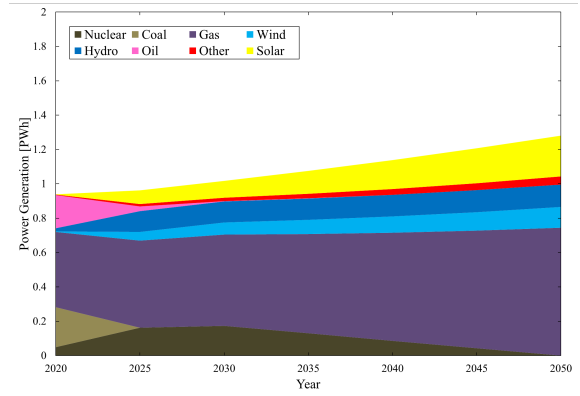


図 5.22 \$150\_N ケースの最適電源構成.

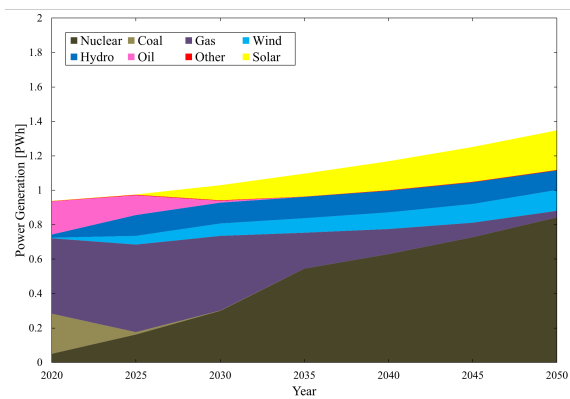


図 5.23 RAMP ケースの最適電源構成.

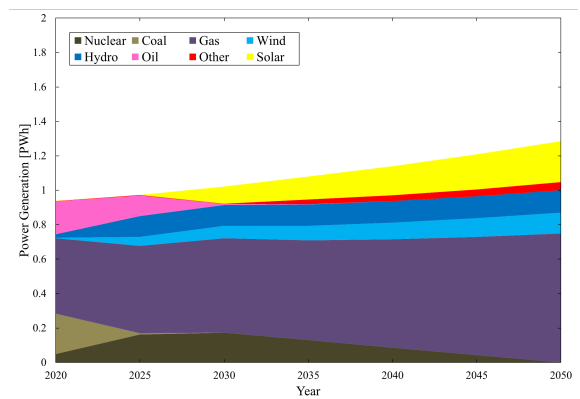


図 5.24 RAMP\_N ケースの最適電源構成.

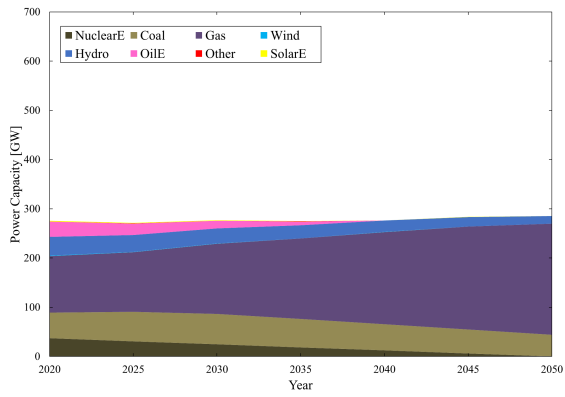


図 5.25 BAU ケースの最適電源容量.

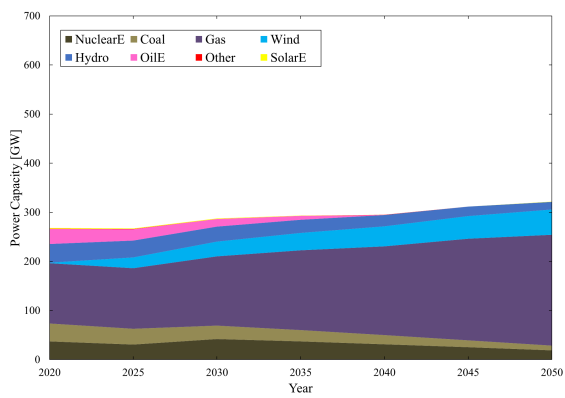


図 5.26 \$10 ケースの最適電源容量.

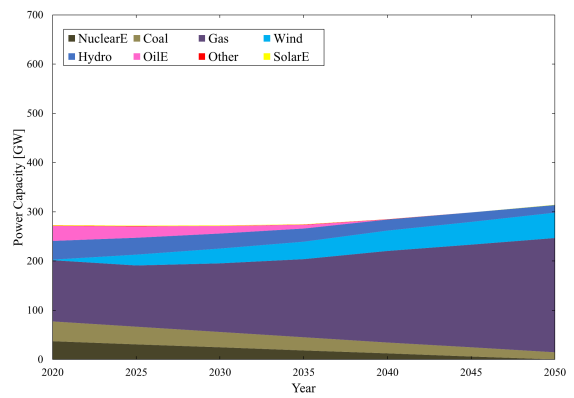


図 5.27 \$10\_N ケースの最適電源容量.

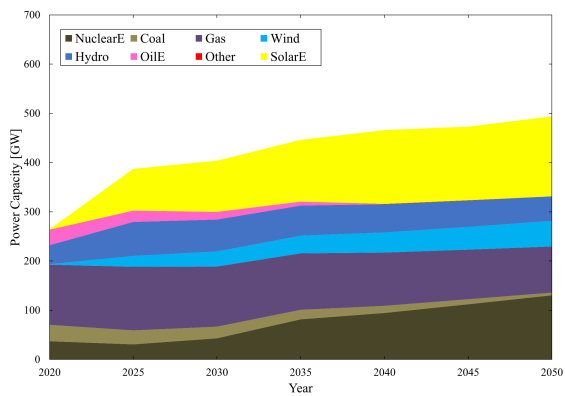


図 5.28 \$50 ケースの最適電源容量.

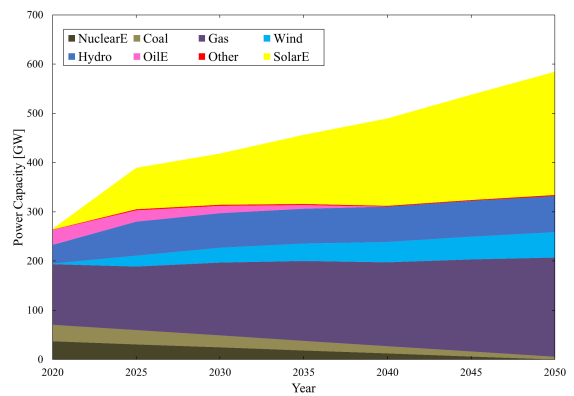


図 5.29 \$50\_N ケースの最適電源容量.



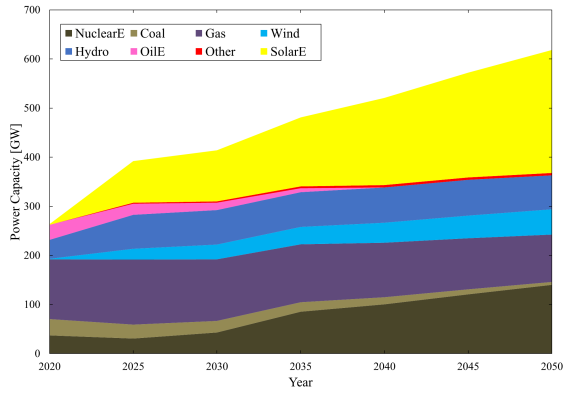


図 5.30 \$150 ケースの最適電源容量.

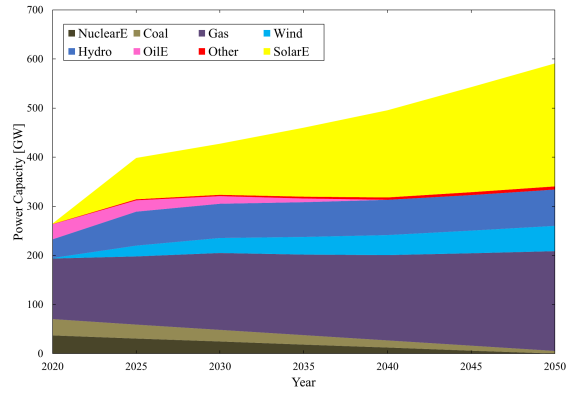


図 5.31 \$150\_N ケースの最適電源容量.

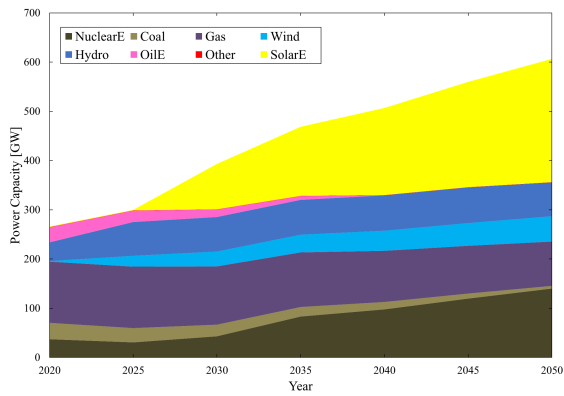


図 5.32 RAMP ケースの最適電源容量.

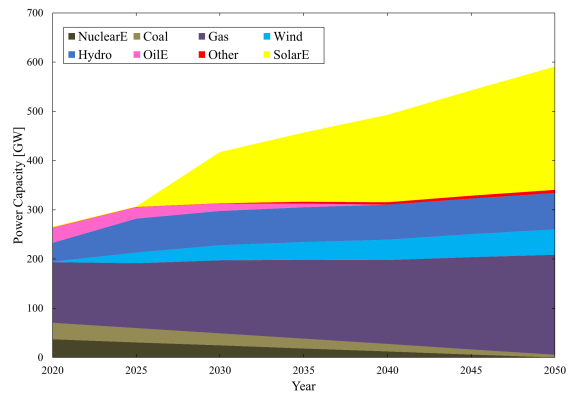


図 5.33 RAMP\_N ケースの最適電源容量.

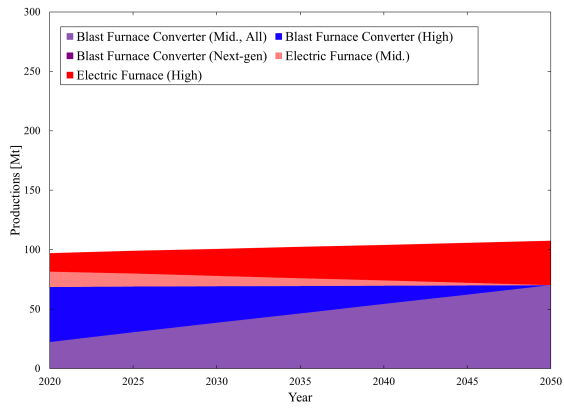


図 5.34 BAU ケースの鉄鋼部門の技術選択.

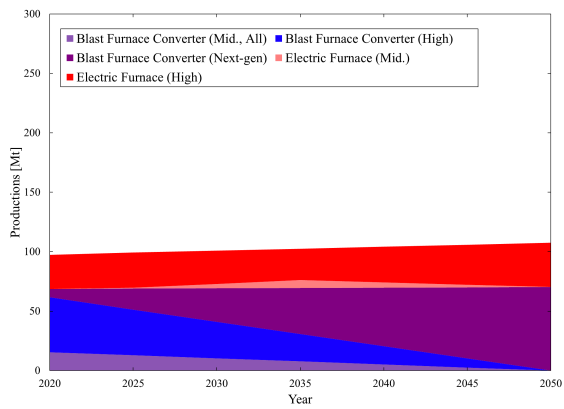


図 5.35 \$10 ケースの鉄鋼部門の技術選択.

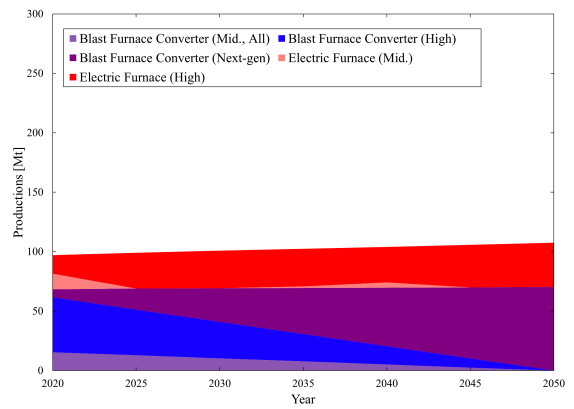


図 5.36 \$10\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択.

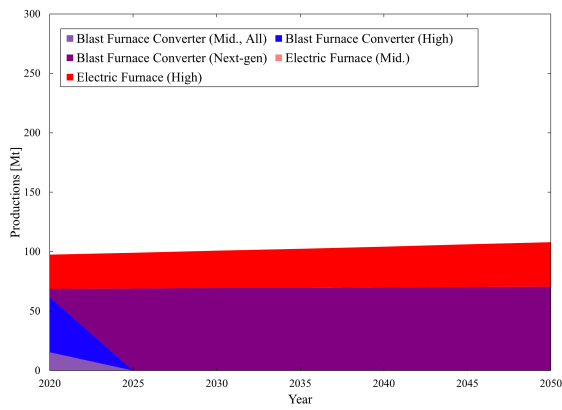


図 5.37 \$50 ケースの鉄鋼部門の技術選択.

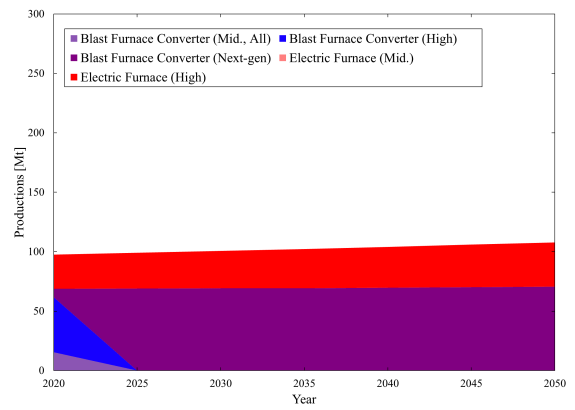


図 5.38 \$50\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択.

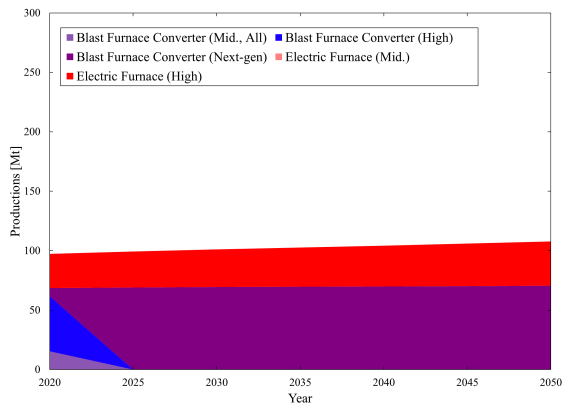


図 5.39 \$150 ケースの鉄鋼部門の技術選択.

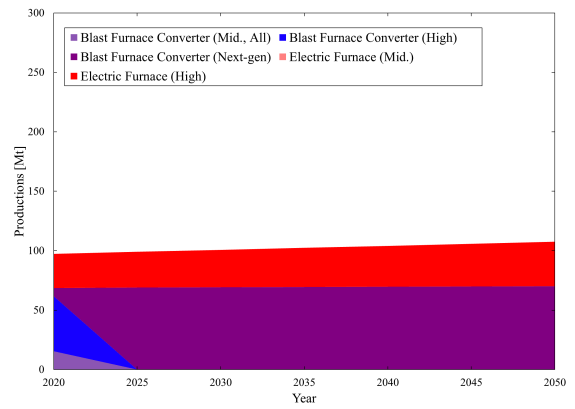


図 5.40 \$150\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択.

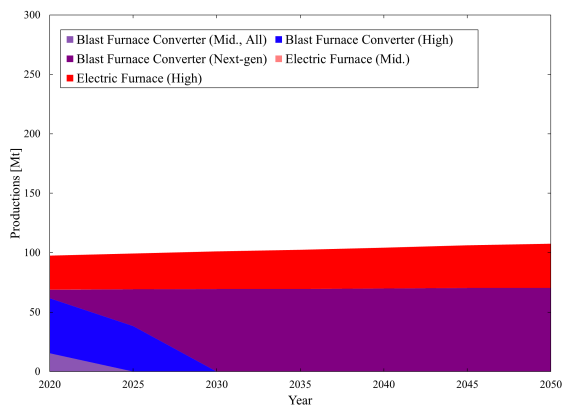


図 5.41 RAMP ケースの鉄鋼部門の技術選択.

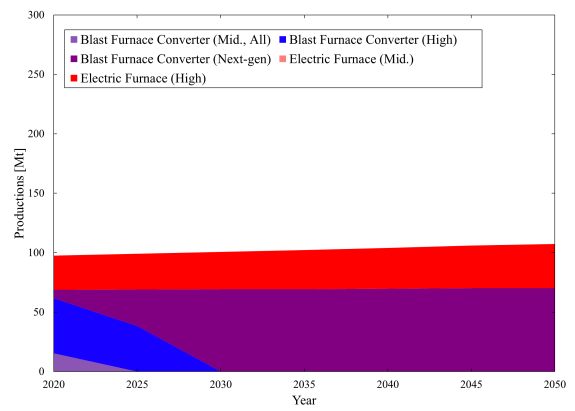


図 5.42 RAMP\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択.

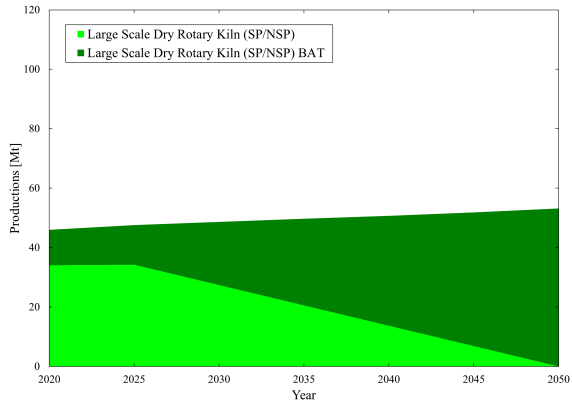


図 5.43 BAU ケースのセメント部門の技術選択.

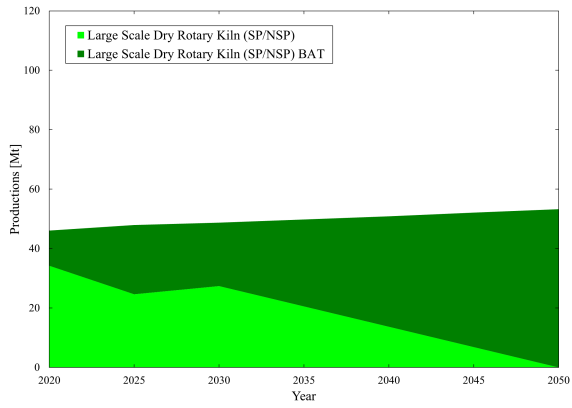


図 5.44 \$10 ケースのセメント部門の技術選択.

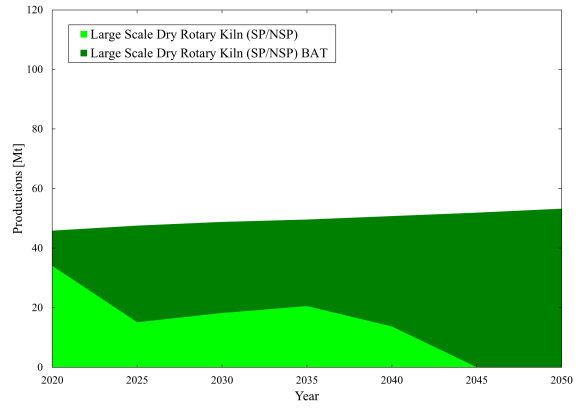


図 5.45 \$10\_N ケースのセメント部門の技術選択.

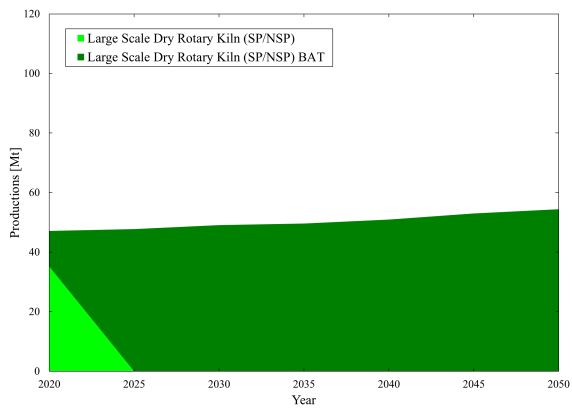


図 5.46 \$50 ケースのセメント部門の技術選択.

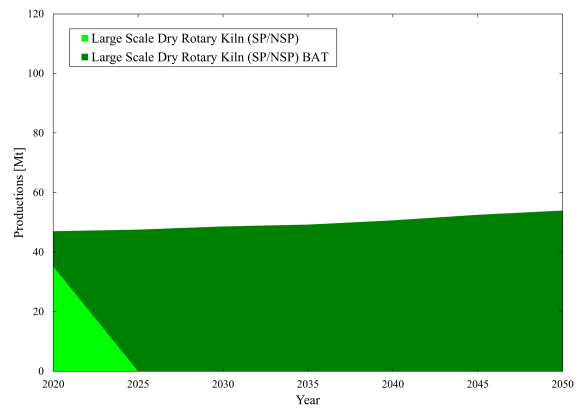


図 5.47 \$50\_N ケースのセメント部門の技術選択.

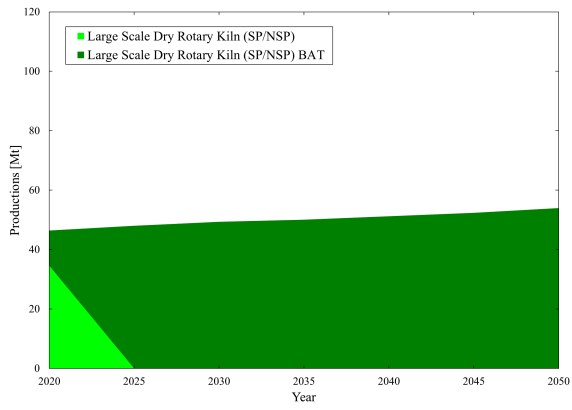


図 5.48 \$150 ケースのセメント部門の技術選択.

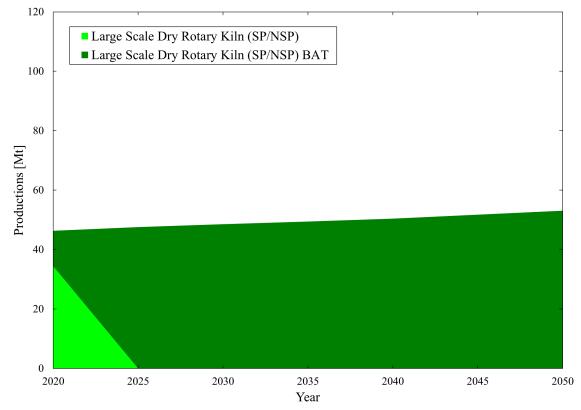


図 5.49 \$150\_N ケースのセメント部門の技術選択.

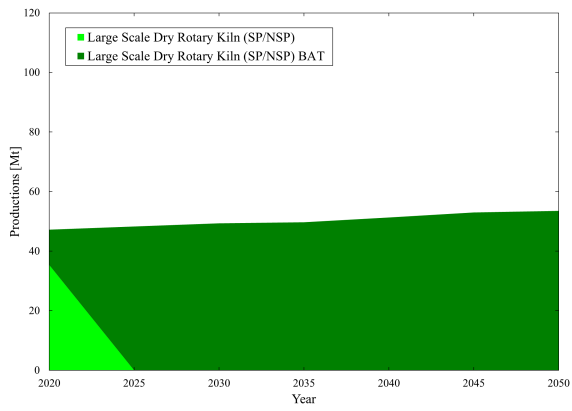


図 5.50 RAMP ケースのセメント部門の技術選択.

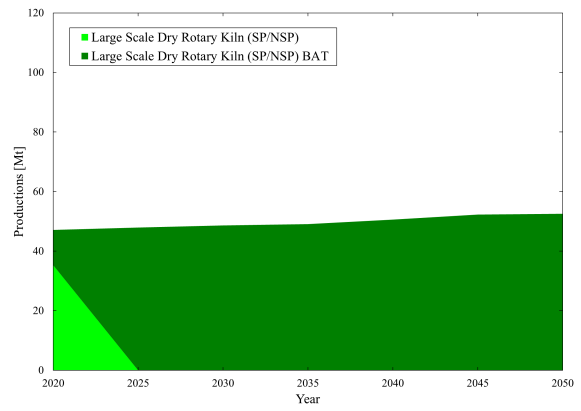


図 5.51 RAMP\_N ケースのセメント部門の技術選択.

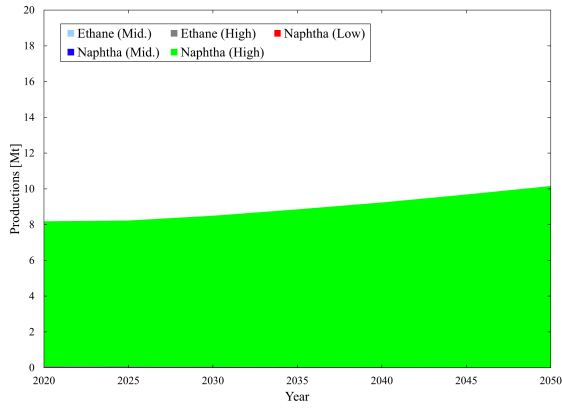


図 5.52 BAU ケースの石油化学部門の技術選択.

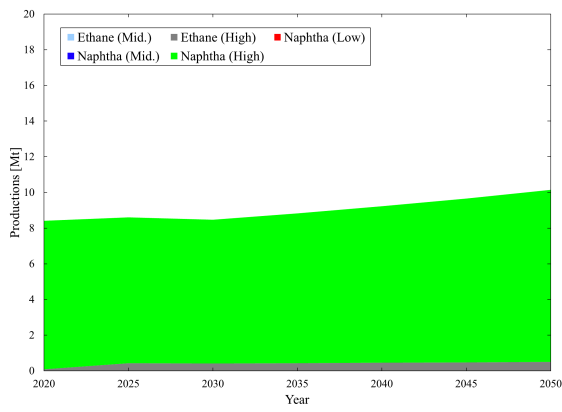


図 5.53 \$10 ケースの石油化学部門の技術選択.

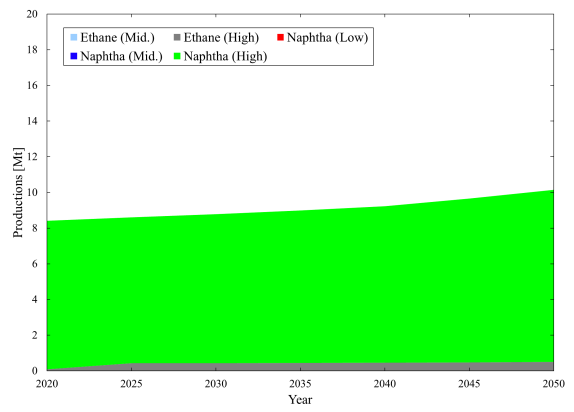


図 5.54 \$10\_N ケースの石油化学部門の技術選択.

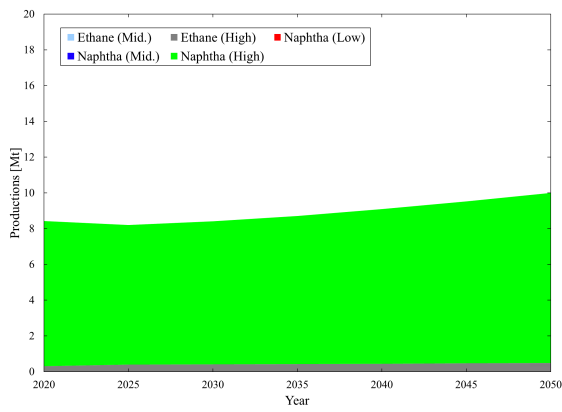


図 5.55 \$50 ケースの石油化学部門の技術選択.

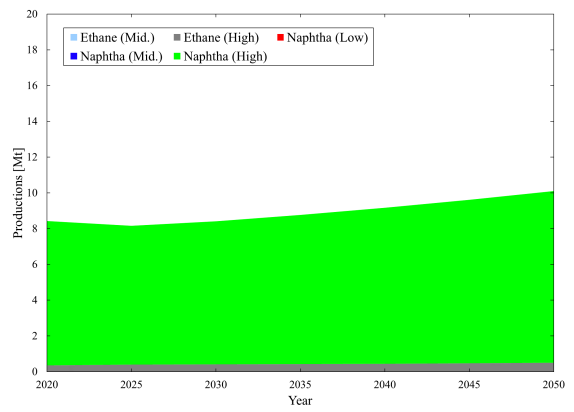


図 5.56 \$50\_N ケースの石油化学部門の技術選択.

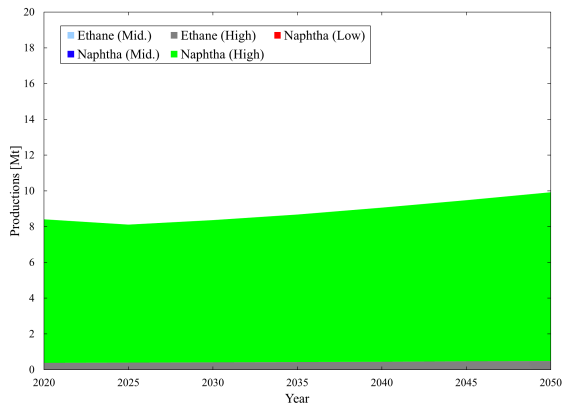


図 5.57 \$150 ケースの石油化学部門の技術選択.

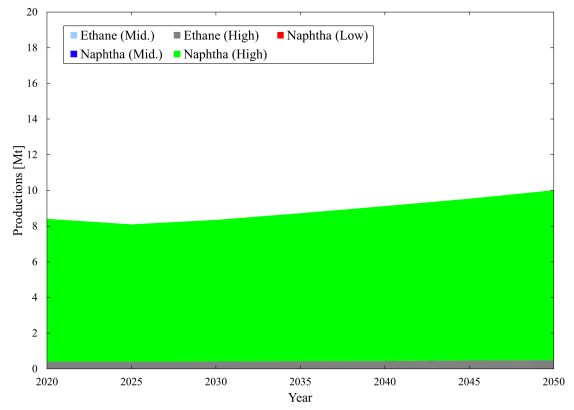


図 5.58 \$150\_N ケースの石油化学部門の技術選択.

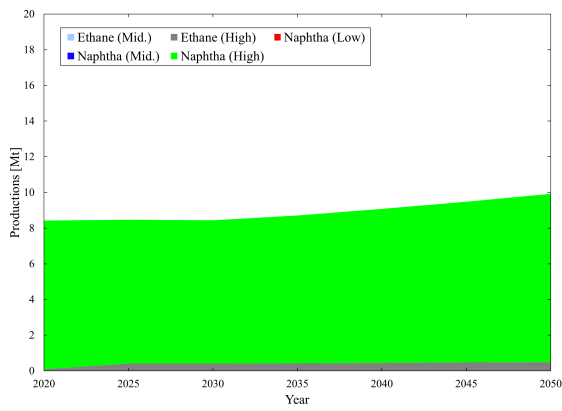


図 5.59 RAMP ケースの石油化学部門の技術選択.

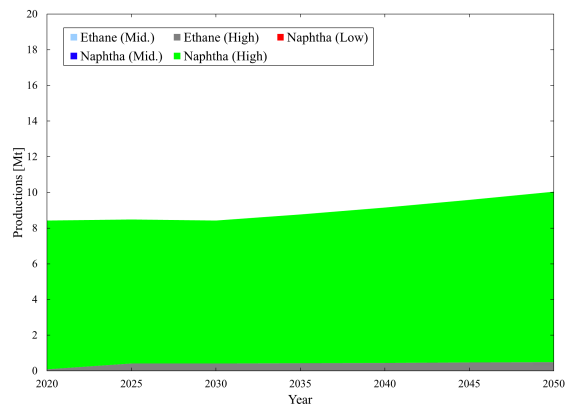


図 5.60 RAMP\_N ケースの石油化学部門の技術選択.

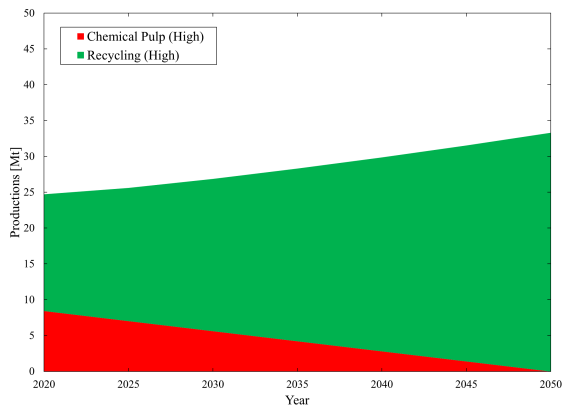


図 5.61 BAU ケースの紙・パルプ部門の技術選択.

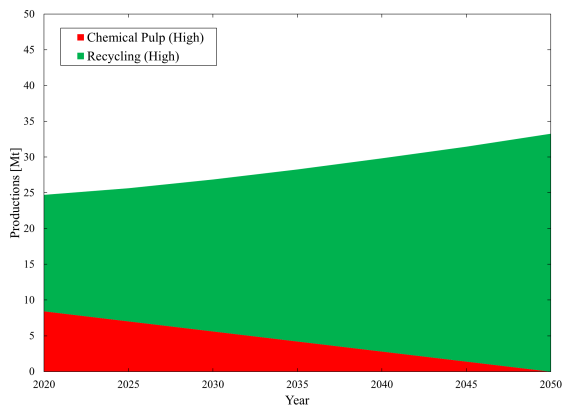


図 5.62 \$10 ケースの紙・パルプ部門の技術選択.

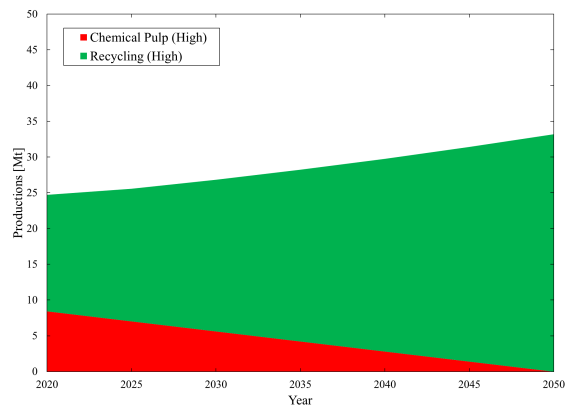


図 5.63 \$10\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択.



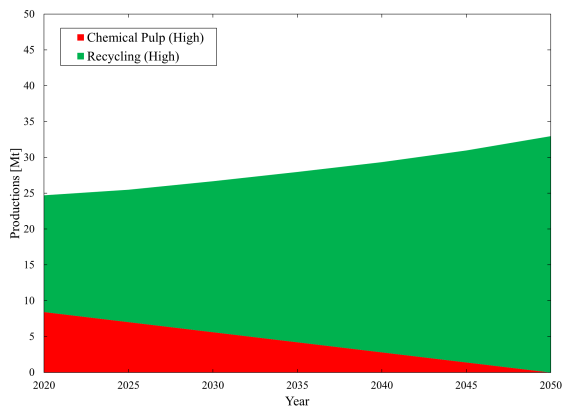


図 5.64 \$50 ケースの紙・パルプ部門の技術選択.

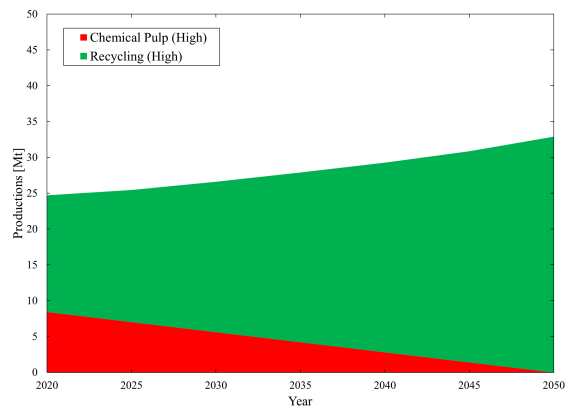


図 5.65 \$50\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択.

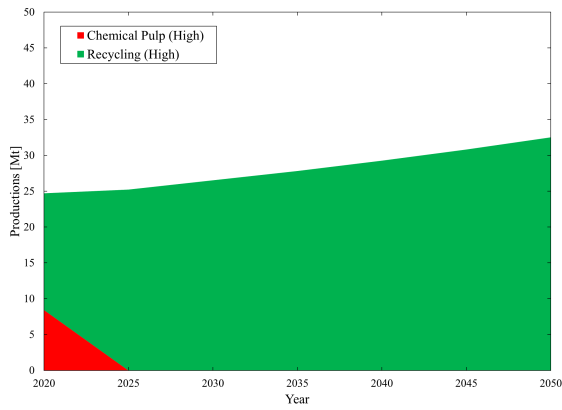


図 5.66 \$150 ケースの紙・パルプ部門の技術選択.

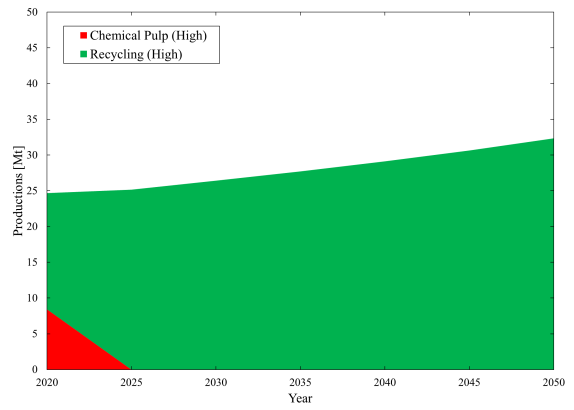


図 5.67 \$150\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択.

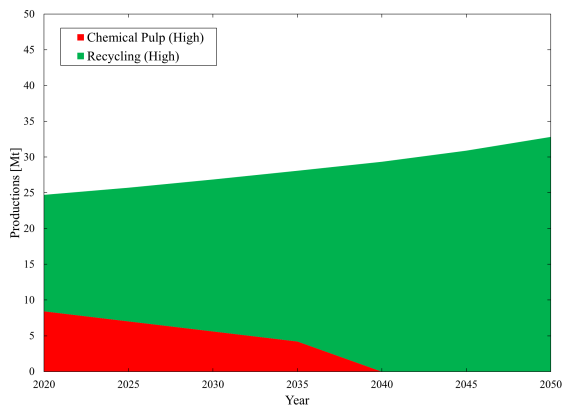


図 5.68 RAMP ケースの紙・パルプ部門の技術選択.

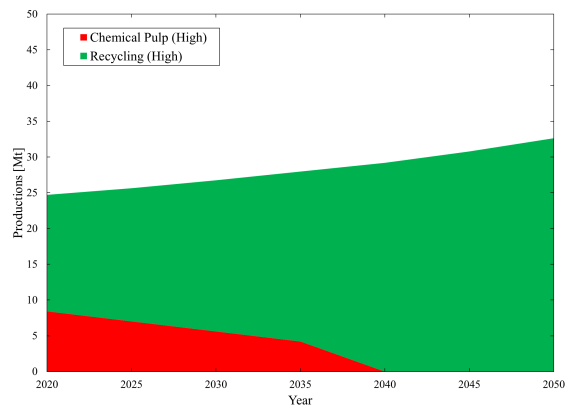


図 5.69 RAMP\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択.

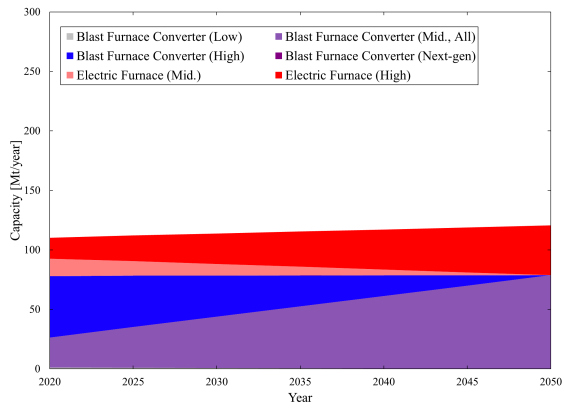


図 5.70 BAU ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.

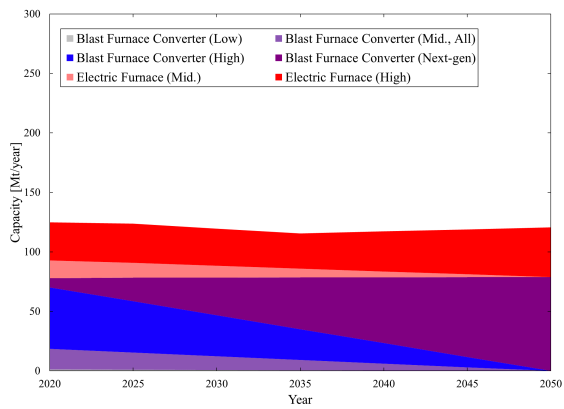


図 5.71 \$10 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.

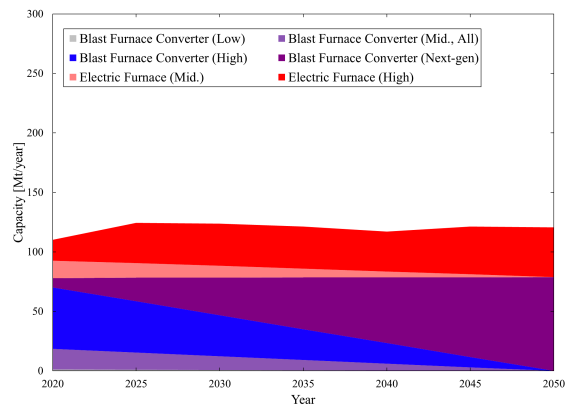


図 5.72 \$10\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.

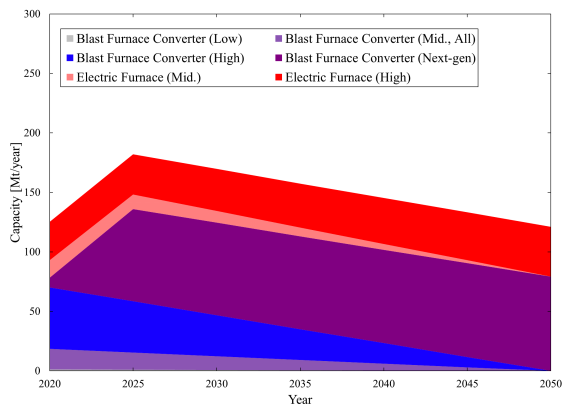


図 5.73 \$50 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.

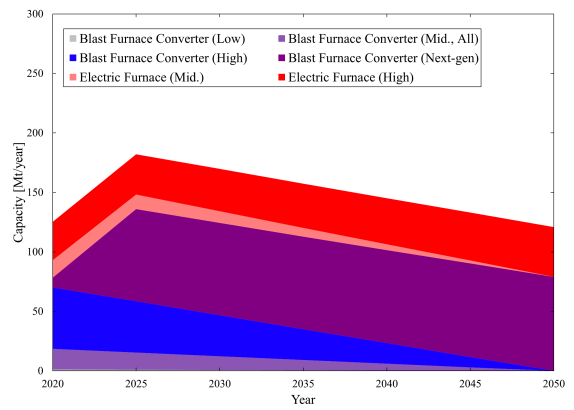


図 5.74 \$50\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.

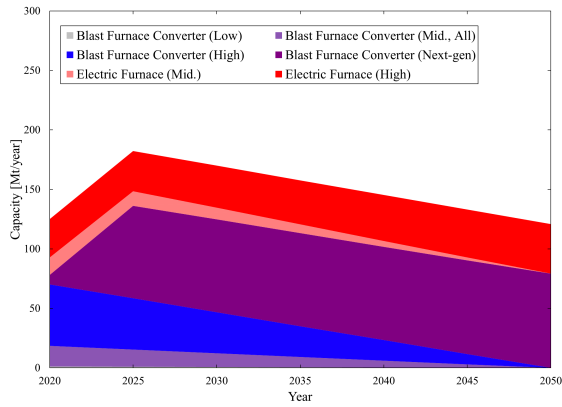


図 5.75 \$150 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.

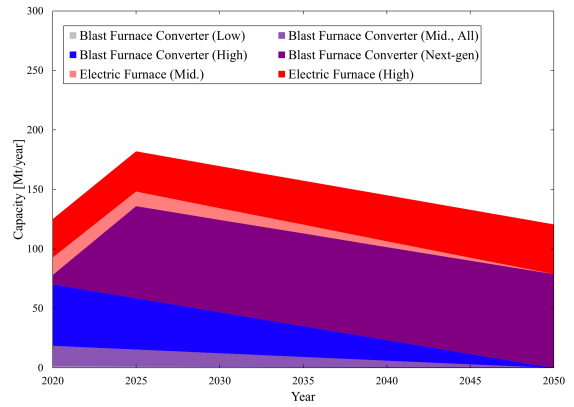


図 5.76 \$150\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.

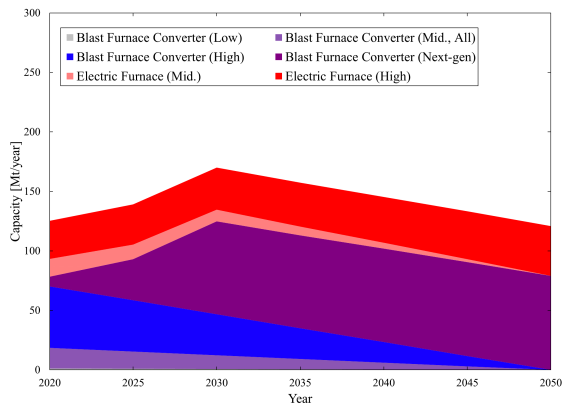


図 5.77 RAMP ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.

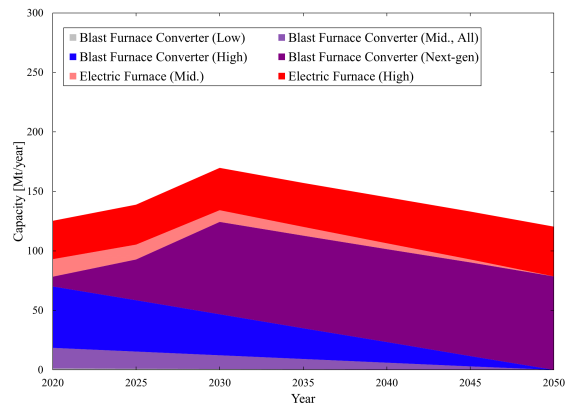


図 5.78 RAMP\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量.

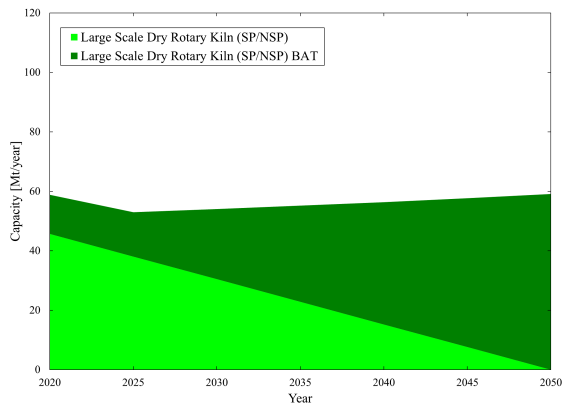


図 5.79 BAU ケースのセメント部門の最適設備容量.

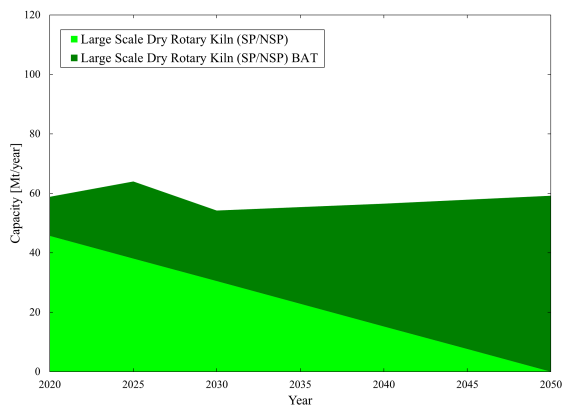


図 5.80 \$10 ケースのセメント部門の最適設備容量.

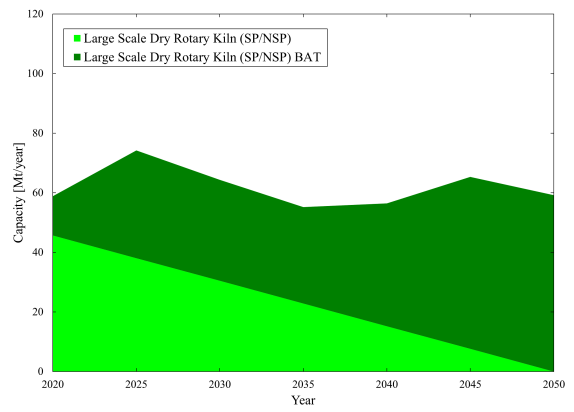


図 5.81 \$10\_N ケースのセメント部門の最適設備容量.

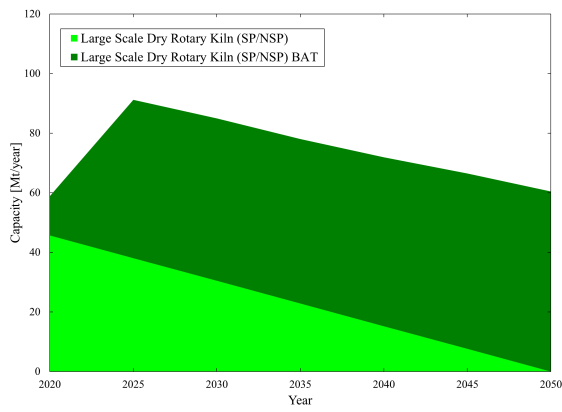


図 5.82 \$50 ケースのセメント部門の最適設備容量.

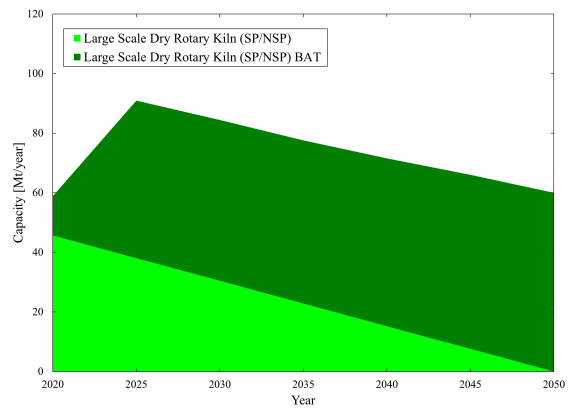


図 5.83 \$50\_N ケースのセメント部門の最適設備容量.

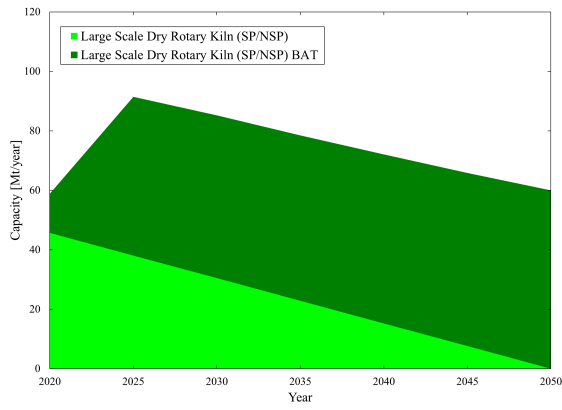


図 5.84 \$150 ケースのセメント部門の最適設備容量.

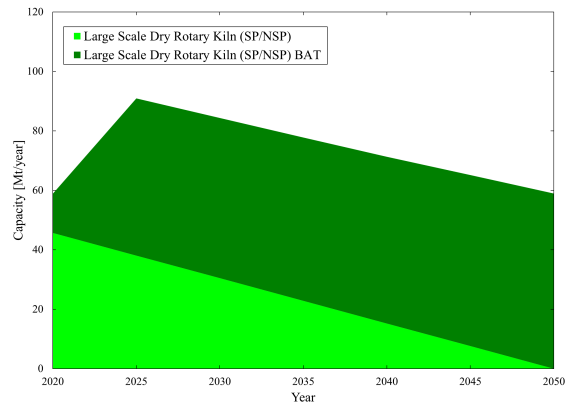


図 5.85 \$150\_N ケースのセメント部門の最適設備容量.

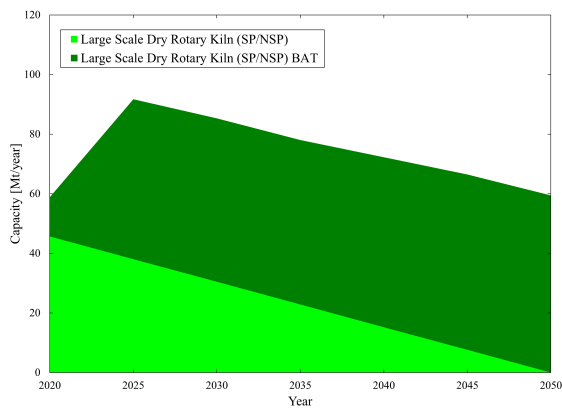


図 5.86 RAMP ケースのセメント部門の最適設備容量.

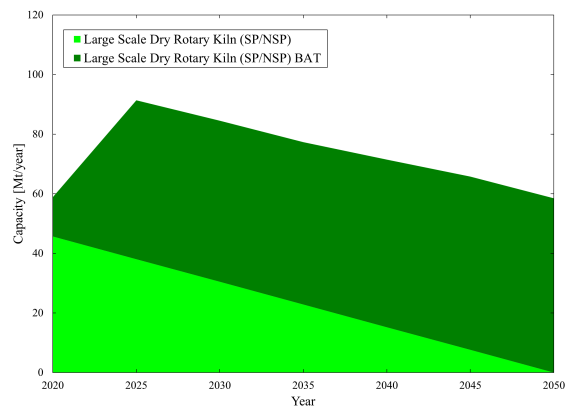


図 5.87 RAMP\_N ケースのセメント部門の最適設備容量.

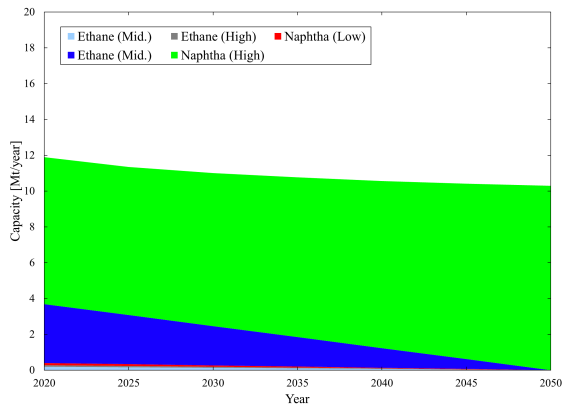


図 5.88 BAU ケースの石油化学部門の最適設備容量.

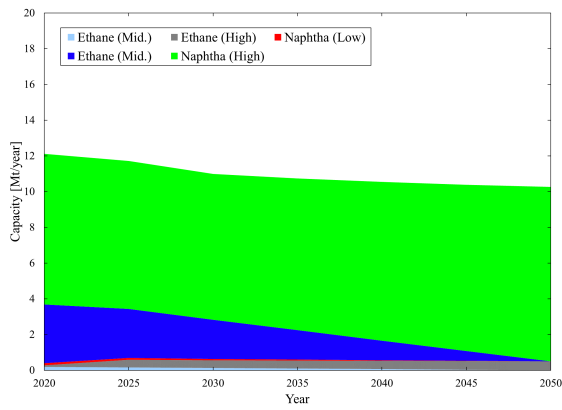


図 5.89 \$10 ケースの石油化学部門の最適設備容量.

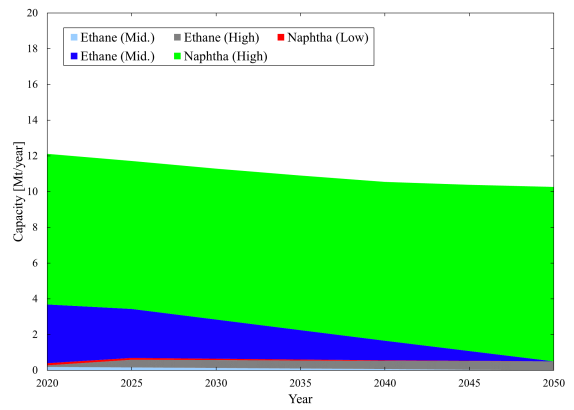


図 5.90 \$10\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量.

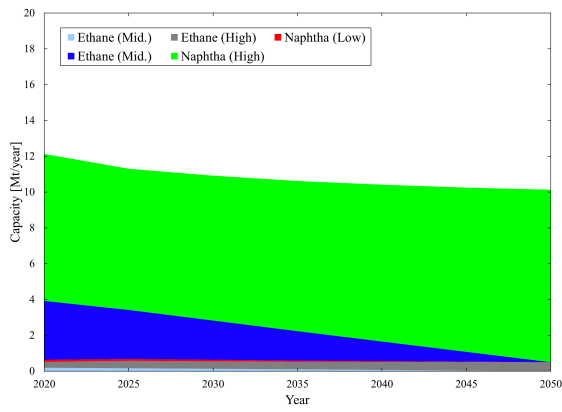


図 5.91 \$50 ケースの石油化学部門の最適設備容量.

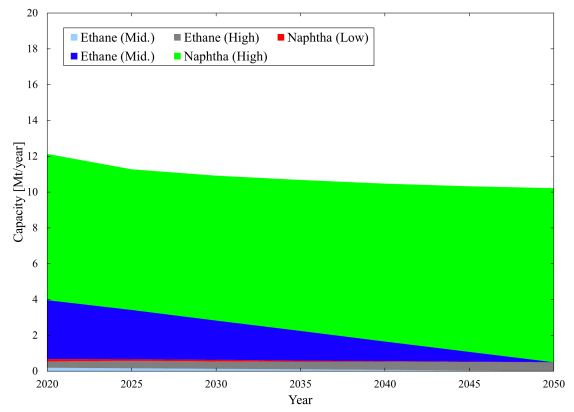


図 5.92 \$50\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量.

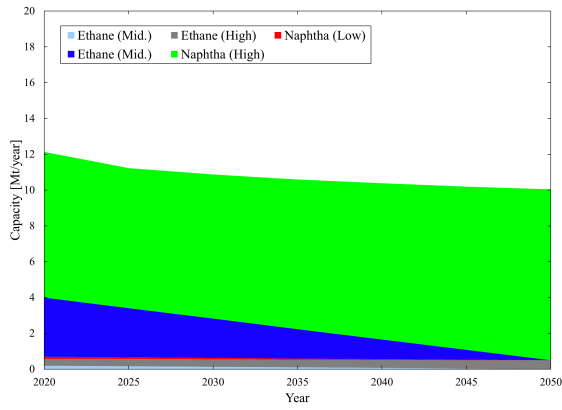


図 5.93 \$150 ケースの石油化学部門の最適設備容量.

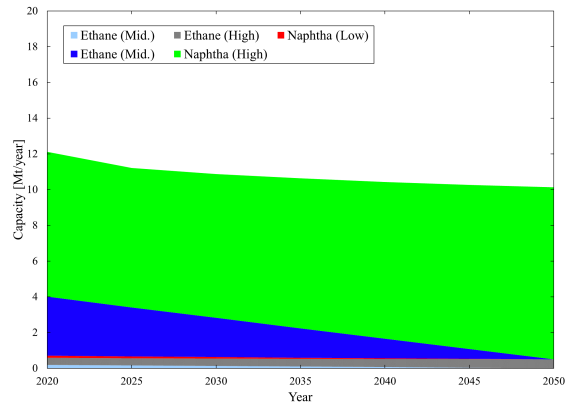


図 5.94 \$150\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量.

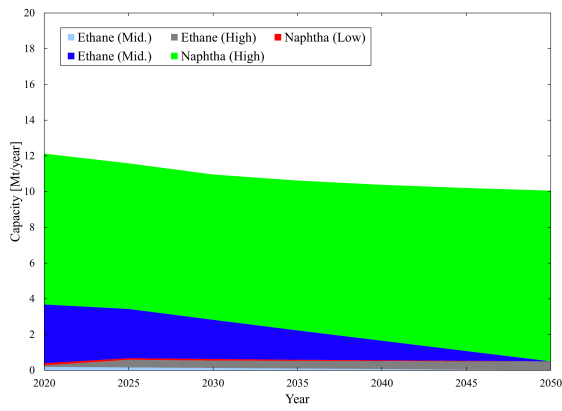


図 5.95 RAMP ケースの石油化学部門の最適設備容量.

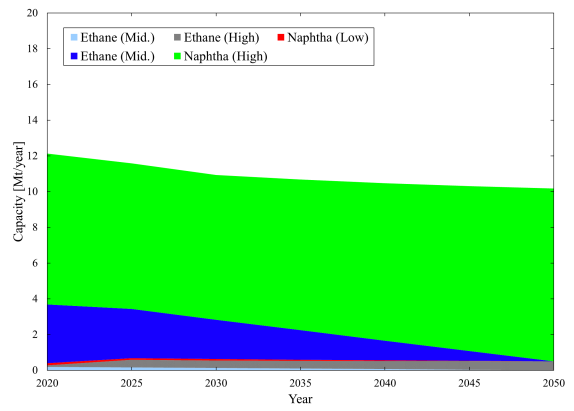


図 5.96 RAMP\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量.

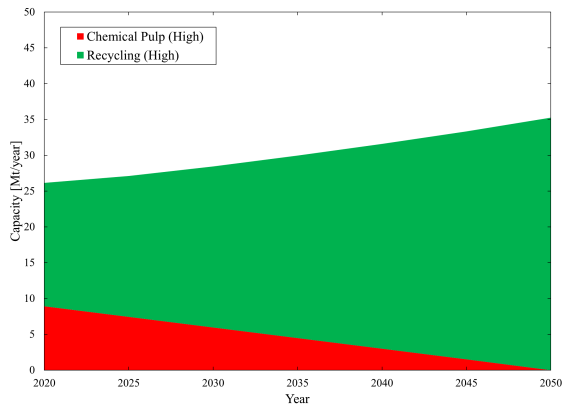


図 5.97 BAU ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量.

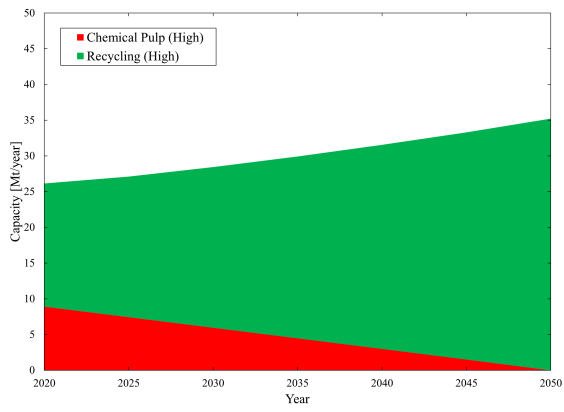


図 5.98 \$10 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量.

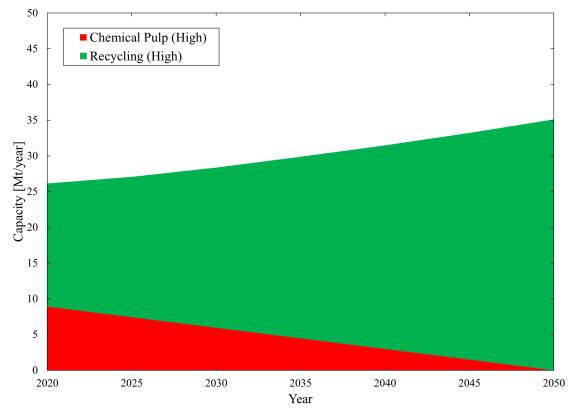


図 5.99 \$10\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量.



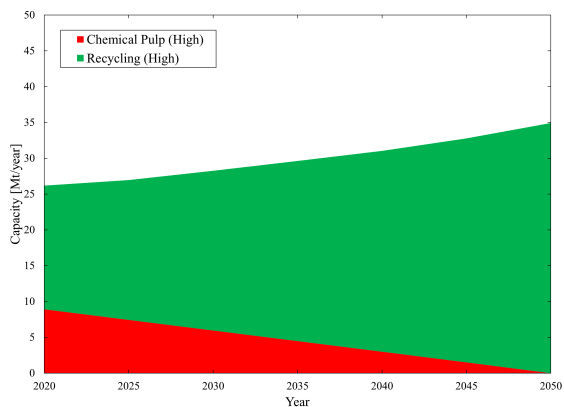


図 5.100 \$50 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量。

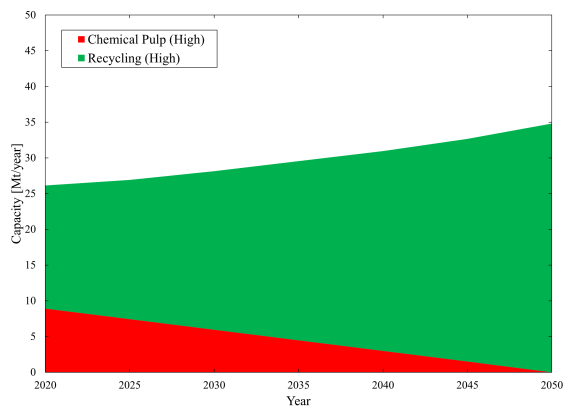


図 5.101 \$50\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量。

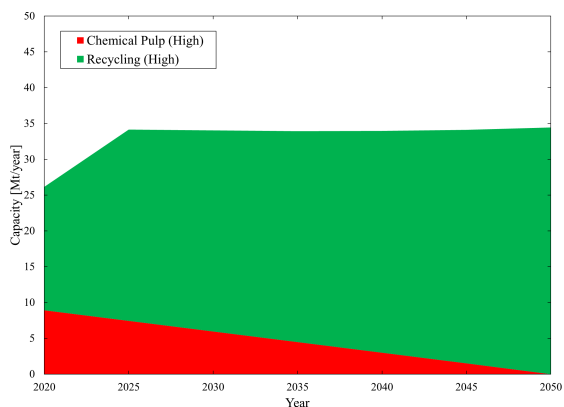


図 5.102 \$150 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量。

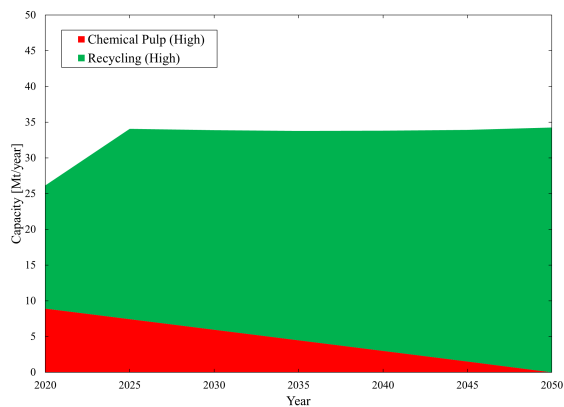


図 5.103 \$150\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量。

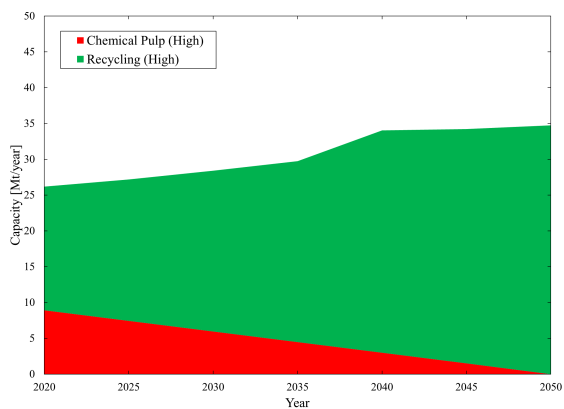


図 5.104 RAMP ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量。

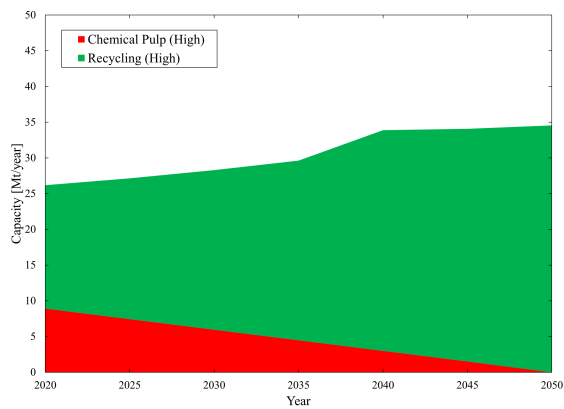


図 5.105 RAMP\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量。

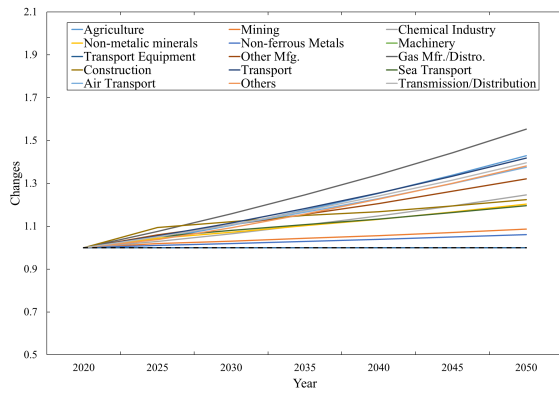


図 5.106 BAU ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

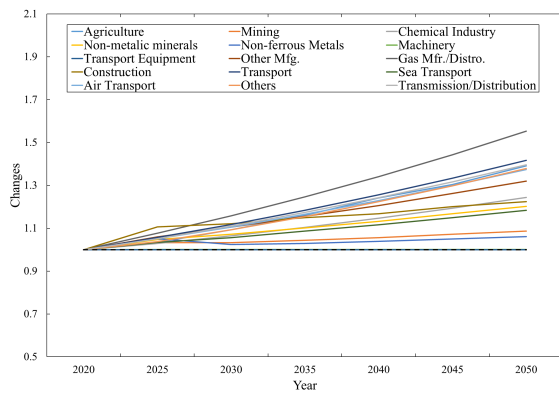


図 5.107 \$10 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

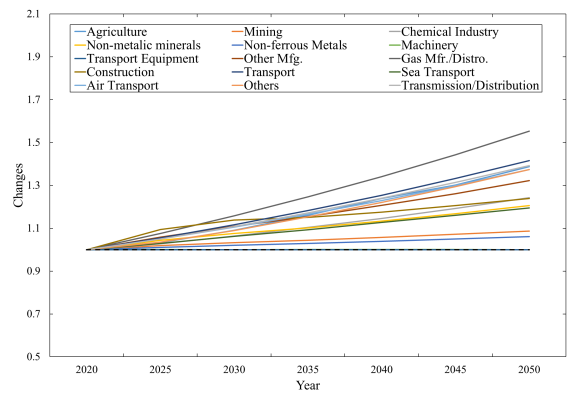


図 5.108 \$10\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

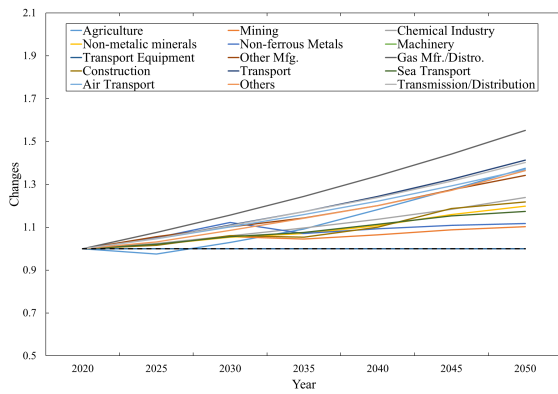


図 5.109 \$50 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

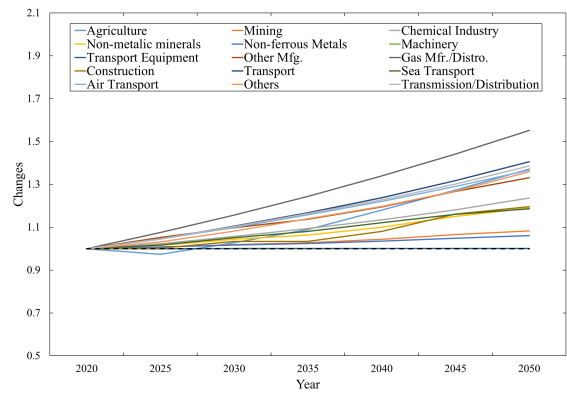


図 5.110 \$50\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

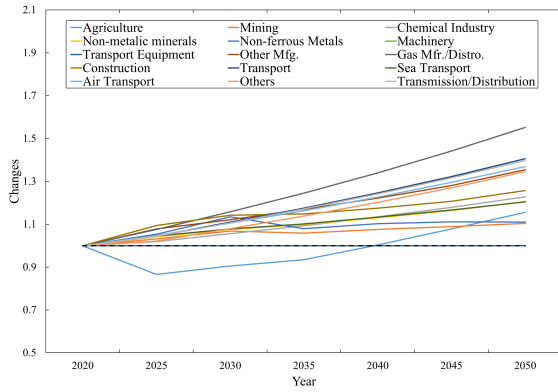


図 5.111 \$150 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

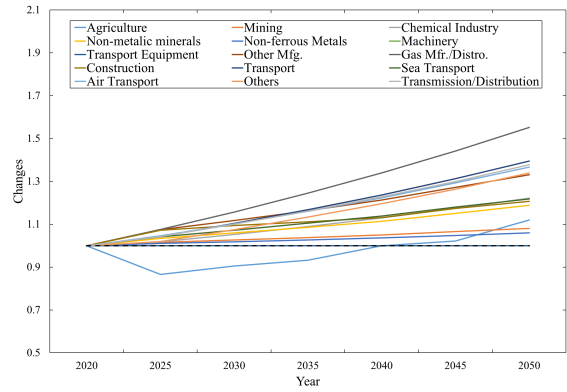


図 5.112 \$150\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

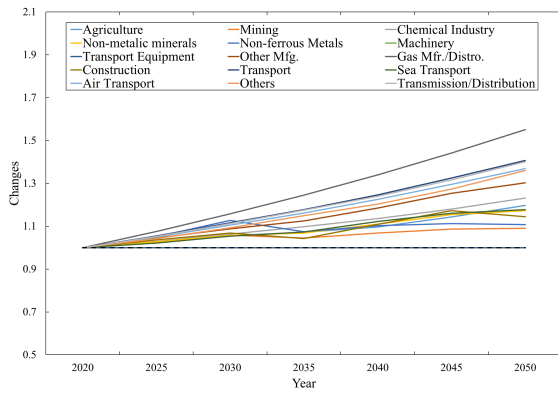


図 5.113 RAMP ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

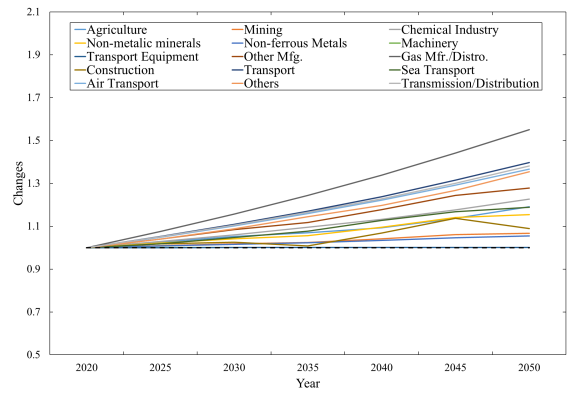


図 5.114 RAMP\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

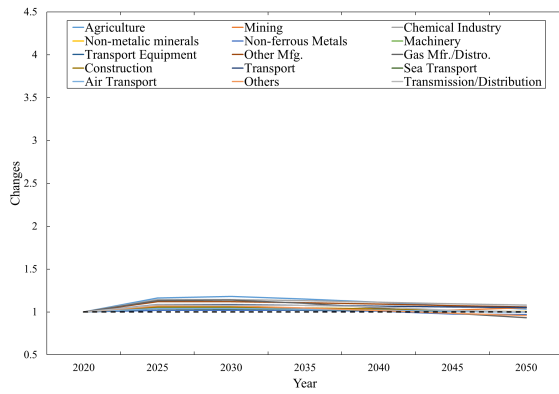


図 5.115 BAU ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

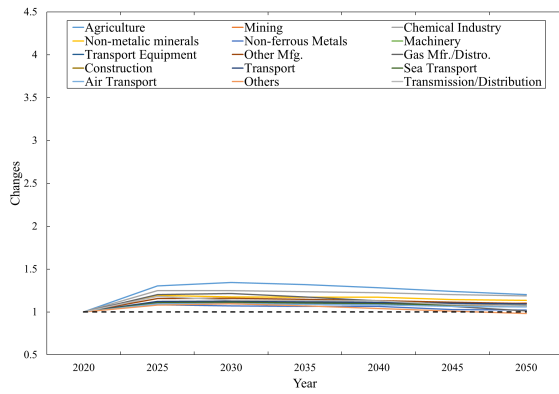


図 5.116 \$10 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

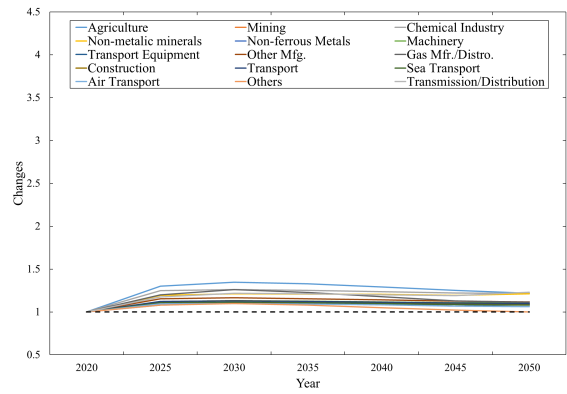


図 5.117 \$10\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

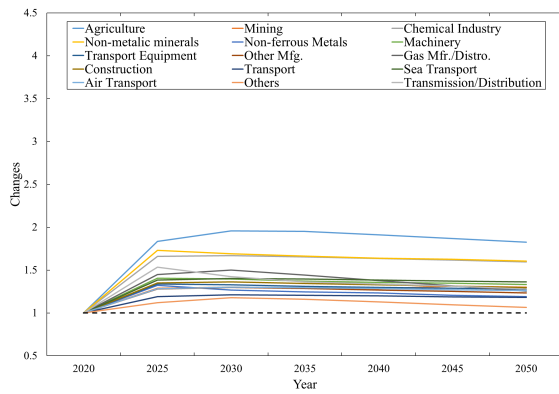


図 5.118 \$50 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

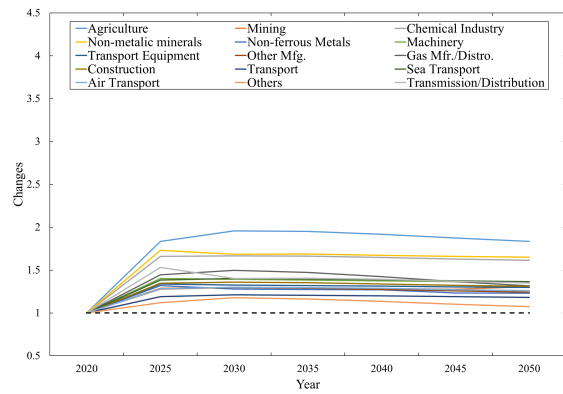


図 5.119 \$50\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

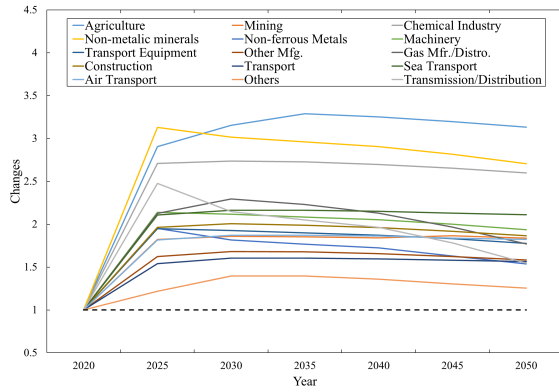


図 5.120 \$150 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

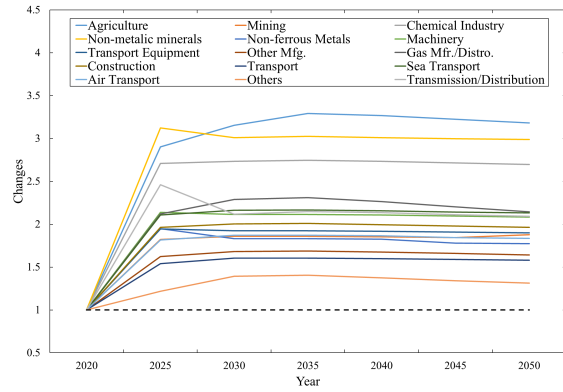


図 5.121 \$150\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

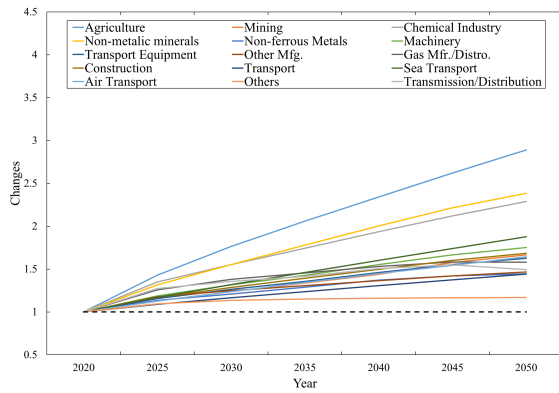


図 5.122 RAMP ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

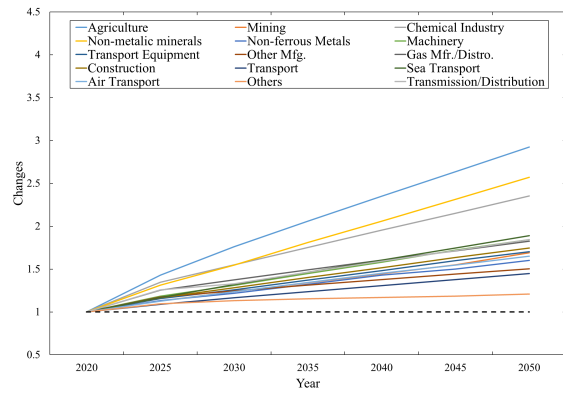


図 5.123 RAMP\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年). 2020 年の値を 1 に規格化.

## 参考文献

- [5-1] 資源エネルギー庁: 「エネルギー白書 2018 第 2 節部門別エネルギー消費の動向」, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018html/2-1-2.html>, (アクセス日 2019.11.02)
- [5-2] 平成 17 年度調査報告書: 「2013 年以降の温暖化対策方策に関する調査研究」, (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2006)
- [5-3] 新日鉄住金エンジニア株式会社: 「直接還元鉄 (DRI) 製造設備」, JASE-W 国際展開技術集, [https://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies-j/pdf/iron\\_steel/S-16.pdf](https://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies-j/pdf/iron_steel/S-16.pdf) (アクセス日 2019.11.02)
- [5-4] 稲葉 晉一: 「新鉄源製造技術の展開」, 鉄と鋼, Vol. 87, No. 5 (2001)
- [5-5] 経済産業省: 「政策について 参考資料集」, [https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/mono/iron\\_and\\_steel/downloadfiles/kinzokusozaio2sankoshiryo.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/iron_and_steel/downloadfiles/kinzokusozaio2sankoshiryo.pdf) (アクセス日 2019.11.02)
- [5-6] 一般社団法人セメント協会: 「セメントハンドブック 2019 年度版」
- [5-7] 石油化学工業協会: 「エチレン換算輸出入バランス」, <https://www.jpca.or.jp/statistics/annual/ethylene.html> (アクセス日 2019.11.02)
- [5-8] 日本製紙連合会: 「製紙産業の現状 紙・板紙」, <https://www.jpa.gr.jp/states/paper/index.html> (アクセス日 2019.11.02)
- [5-9] 日本紙パルプ商事株式会社: 「図表: 紙・パルプ統計」, [https://www.kamipa.co.jp/wp/wp-content/uploads/2019/04/statistical\\_charts\\_201904.pdf](https://www.kamipa.co.jp/wp/wp-content/uploads/2019/04/statistical_charts_201904.pdf) (アクセス日 2019.11.02)
- [5-10] 一般財団法人石油エネルギー技術センター: 「石油エネルギー資源関連分野の技術戦略マップ 平成 27 年度版」, <http://www.pecj.or.jp/japanese/images/top/map2016.pdf> (アクセス日 2019.11.02)
- [5-11] 西岡 邦彦, 大島 弘信, 杉山 勇夫, 藤川 秀樹: 「次世代コークス製造技術 (SCOPE21) の開発」, 鉄と鋼, Vol. 90, No. 9 (2004)
- [5-12] 経済産業省 資源エネルギー庁: 「総合エネルギー統計」, [https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/) (アクセス日 2019.11.02)
- [5-13] 財務総合政策研究所: 「法人企業統計調査」, <https://www.mof.go.jp/pri/reference/ssc/results/data.htm> (アクセス日 2019.11.02)
- [5-14] 磯貝 基・小宮山 涼一・藤井 康正: 「エネルギー部門を詳細化した動学的多部門エネルギー経済モデルの開発と 2050 年に向けた日本の最適電源構成の検討」, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), 139 巻 7 号 p. 461-469 (2019)
- [5-15] 環境省: 「第五次環境基本計画」, <https://www.env.go.jp/press/files/jp/108982.pdf> (アクセス日 2019.11.02)
- [5-16] 林崎 秀幸, 林 裕介, 窪田 征弘, 上坊 和弥, 野村 誠治: 「高品質コークス製造に向けた石炭配合技術の開発」, 日本製鉄技報, 第 413 号 (2019)

## 第6章

# 温室効果ガス削減技術考慮した DMSEE 拡張モデル

前章では、電力部門に加えて非電力エネルギー部門の財を細かく分け、エネルギーフローをより詳細に追跡できるようにし、素材部門に技術選択の余地を与え、エネルギー多消費産業における CO<sub>2</sub> 排出削減について議論を行った。本章ではさらに次世代の温室効果ガス削減技術、具体的には二酸化炭素回収・貯留 (CO<sub>2</sub> Capture & Storage; CCS) 技術を加え、これが二酸化炭素排出量削減にどれだけ貢献するか、議論可能にした。本章ではまず 6.1 節で CCS の概要について説明した後、6.2 節で CCS の定式化の説明を行う。そして、計算のシナリオおよびケース設定について 6.3 節で言及した後、6.4 節で結果とその分析について論ずる。そして 6.5 節で本章を締める。

### 6.1 概要

脱炭素化に向けた次世代技術として、CO<sub>2</sub> 回収・貯留技術 (CO<sub>2</sub> Capture and Storage; CCS) と水素利用が挙げられる。CCS とは工場や発電所で排出される CO<sub>2</sub> を回収し、地下に貯留する技術である。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change; 気候変動に関する政府間パネル) の第 5 次報告書および「CCS に関する特別報告書」等をまとめた文献 [6-1] によると、世界の CCS 技術ポテンシャルは約 2 兆トンにも及ぶ。2016 年の世界の CO<sub>2</sub> 排出量が約 323 億トン [6-2] であったことから、非常に大きなポテンシャルを有していると言える。IPCC も「CCS 技術は、化石燃料発電プラントの温室効果ガス排出を削減できる可能性がある」と評価している。我が国においても、そのポテンシャルは約 1,461 億 t-CO<sub>2</sub> と推計されている [6-3]。現在、北海道の苫小牧市で実証実験が進んでおり、調査、試験、研究、開発を重ねて、早期の CCS 設置に向けて尽力している\*1。水素についても同様に、日本は水素を重要なエネルギー源として捉えており、水素基本戦略 [6-5] を作成している。利用時に温室効果ガスを全く排出しないことや、多様なエネルギー源から製造、貯蔵、輸送可能なので安定供給を実現できる点等が水素利用のメリットである。特に日本の場合、先に述べたように、低炭素化と安定供給のどちらも同時に遂行できる点から、その研究開発および実現に向けて尽力している。しかし、図 6.1 にもあるように、高いコストとプレイチェーンの未構築の問題がある。政府はこのシナリオをベースとして、技術開発や市場のスケールアップによるコストの低減を目指すとともに、サプライチェーンの確保にも努めていく方針である。本モデルでは、まず CCS を考慮できるようモデルを開発した。

\*1 詳しくは文献 [6-1] の 7 ページ以降を参照されたい。

\*2 水素基本戦略の概要資料 [6-4] から引用。

## 水素基本戦略のシナリオ

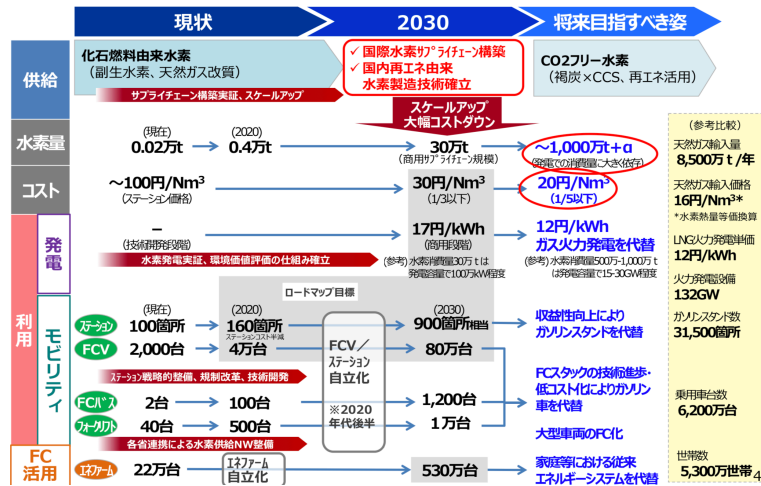


図 6.1 水素基本戦略のシナリオ\*2.

## 6.2 CCS の定式化

### 6.2.1 アクティビティの設定

GTAP の各種データには CCS を扱う部門が存在しないので、独自に文献調査を行い各種物量データや金額データを設定する必要がある、文献 [6-6, 6-7] を参考した。

まずアクティビティの設定である。アクティビティは表 6.1 のように設定した。主な CCS の技術は、燃料をボイラーで燃焼し除塵・脱硫処理後に CO<sub>2</sub> を分離回収する Post-Combustion 方式と、燃料を酸素を用いてガス化し、洗浄・水性ガスシフト反応および脱硫処理した後に CO<sub>2</sub> を分離回収する Pre-Combustion 方式の 2 つの技術である。しかし Pre-Combustion 方式の技術は一般に発電所の建設前から付属させる必要がある (IGCC/IGFC 等)、Post-Combustion 方式に比べ技術的困難を伴う。したがって本モデルでは、示したアクティビティの通り、Post-Combustion 方式のみを考慮することとしている。将来的に Pre-Combustion 方式の運用の現実性が増せばモデルでも考慮可能である。これらの技術が石炭火力発電、ガス火力発電、あるいは鉄鋼部門の工場に設置され、それぞれで発生する CO<sub>2</sub> を回収する。上記の回収アクティビティに加えて、CO<sub>2</sub> を貯留する貯留アクティビティを考えている。設備費は文献 [6-6] の表 3 に記載されている分離回収コストで設定した。文献 [6-6] の表 1 および 2 に主要機器リストとその価格、および必要電力が掲載されている。機器はすべて *fme* 部門からの中間投入であるとしてモデル内では考慮している。また文献 [6-6] の表 3 には工事費も記載されているので、この工事費は *cns* 部門からの投資として考慮している。加えて、文献 [6-8] において、船舶による輸送コストを約 4,000 円/t と試算している、この値を用いて CO<sub>2</sub> の輸送コストも *wtp* 部門\*3からの中間投入によって考慮している。ただし、電力部門とその他産業部門との間でこれらの値は同じとして設定している。

\*3 海上輸送。



表 6.1 CCS 部門のアクティビティ.

名称	説明	設備費 [10 <sup>4</sup> Gt-CO <sub>2</sub> / million USD]	初期設備能力 [Gt-CO <sub>2</sub> /year]
ccsELY_coa	Post-Combusion 方 式 (石炭火力)	41507	0
ccsELY_gas	Post-Combusion 方 式 (ガス火力)	79390	0
ccsROE_i_s	Post-Combusion 方 式 (鉄鋼部門)	47903	0
ccsSTO	貯蔵設備	174942	0

## 6.2.2 制約条件

### (a) 基本式

$$xp_{Cn,r,y} \leq 0, \quad (6.1)$$

$$-xp_{Cn,r,y} \leq OperationRate_{Cn,r} \cdot xe_{Cn,r,y}^F, \quad (6.2)$$

$$xp_{CccsSTO,r,y} = \sum_{n \in CCSR \setminus \{ "ccsSTO" \}} xp_{Cn,r,y}. \quad (6.3)$$

CCS 部門の生産量  $xp$  は CO<sub>2</sub> 削減量を意味する。したがって負の値として設定している ((6.1) 式)。そして他の部門の設備容量に当たる  $xe$  は、年間の CO<sub>2</sub> 削減可能量として設定しており、稼働率  $OperationRate_C$  によって  $xp$  と結びつく ((6.2) 式)。そして各産業で回収された CO<sub>2</sub> はそのまますべて貯留施設へと運ばれるとして (6.3) 式を設けている。

### (b) 設備と投資

$$xe_{Cn,r,y}^F = Xe_{Cn,r}^F + \sum_{t'=0}^t F_{Cy,y',r} \eta_{Cn',r,y}^I xi_{Cn,r,y'}^I, \quad (6.4)$$

$$\text{s.t. } F_{Cy,y',r} = \begin{cases} \tau & (\text{if } \tau(y - y') \leq LT_{Cn,r}) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \quad (y \geq y') \quad (6.5)$$

$F_{Cy,y',r}$ : 地域  $r$  の時点  $y, y'$  に依存する投資と設備を接続する係数,  $\eta_{Cn',r,y}^I$ : 時点  $y$ , 地域  $r$  における単位投資当たりを得られる設備量,  $\tau$ : 時点間隔,  $LT_{Cn,r}$ : 地域  $r$  における BU アクティビティ  $n$  の耐用年数 (全アクティビティ 40 年)

BU 部門のそれと同じ形式で設定した。ただし,

### (c) 需要供給バランス

CCS 部門を加えたことによって以下のように需要供給バランス式を変更した。

$$\begin{aligned}
 xh_{Tm,r,y} + xg_{Tm,r,y} + \sum_{n \in TAR} A_{TTm,n,r,y} xp_{Tn,r,y} + \sum_{n \in BAR} A_{TBm,n,r,y} xp_{Bn,r,y} + \sum_{n \in CCSR} A_{TCm,n,r,y} (-xp_{Cn,r,y}) \\
 + \sum_{n \in TAR} C_{TTm,n,r,y} xi_{Tn,r,y} + \sum_{n \in BAR} C_{TBm,n,r,y} xi_{Bn,r,y} + \sum_{n \in CCSR} C_{TCm,n,r,y} xi_{Cn,r,y} \leq xc_{Tm,r,y} ,
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

$$\begin{aligned}
 xh_{Bm,r,y} + xg_{Bm,r,y} + \sum_{n \in TAR} A_{BTm,n,r,y} xp_{Tn,r,y} + \sum_{n \in BAR} A_{BBm,n,r,y} xp_{Bn,r,y} + \sum_{n \in BAR} A_{BCm,n,r,y} (-xp_{Cn,r,y}) \\
 + \sum_{n \in TAR} C_{BTm,n,r,y} xi_{Tn,r,y} + \sum_{n \in BAR} C_{BBm,n,r,y} xi_{Bn,r,y} + \sum_{n \in BAR} C_{BCm,n,r,y} xi_{Cn,r,y} = xc_{Bm,r,y} .
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

## 6.3 シナリオおよびケース設定

### 6.3.1 シナリオ

前章と同様に家計消費および政府消費をシナリオ化した。本章では 5 章と同様に、家計消費を年率 1.5% で消費増るとし、政府消費は初期時点から一定とした。

CCS 部門に関して、3 つの上限シナリオを用意した。6.1 節で述べた通り、文献 [6-3] によると日本の CCS ポテンシャルは 1,461 億 t-CO<sub>2</sub> と見積もられている。また文献 [6-9] のように 2050 年のポテンシャルを 9,100 万 t-CO<sub>2</sub> と設定している例もある。本研究ではこれらを参考に、各時点におけるポテンシャルを図 6.2 のように 3 つの上限シナリオを用意した (SuperHigh, High, Low シナリオ)。ただし、電力部門とその他産業部門それぞれのポテンシャルは未知であるため、このポテンシャルを 1:1 で分け合うものとしている。いずれそれぞれの部門における信憑性の高いポテンシャルのデータが入手できればすぐに再設定可能である。

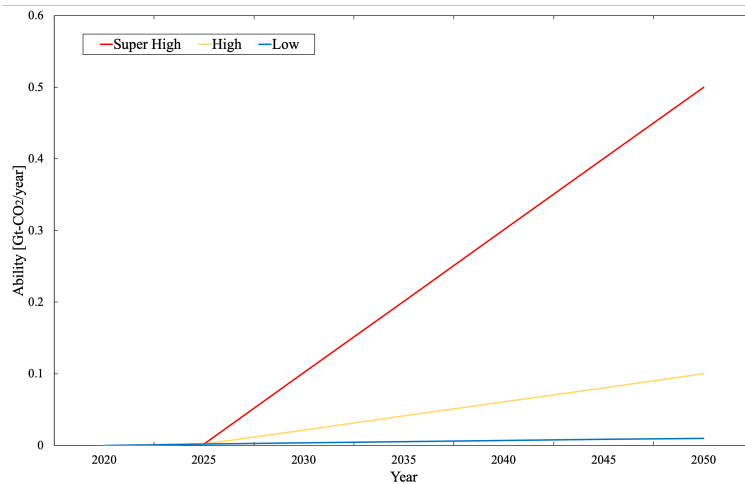


図 6.2 6 各ケースの CCS 貯留ポテンシャルの上限値。

### 6.3.2 ケース

本章では以下のケースを設定した。5 章のケースと同じである。

- BAU(Business As Usual) ケース: 先で記述した基本的な制約条件以外に制約を課さないケース.
- \$10 ケース: 2025 年以降, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$10 の排出税を課すケース.
- \$10\_N ケース: 2025 年以降, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$10 の排出税を課し, 全時点において原子力発電所の新設を禁止するケース.
- \$50 ケース: 2025 年以降, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$50 の排出税を課すケース.
- \$50\_N ケース: 2025 年以降, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$50 の排出税を課し, 全時点において原子力発電所の新設を禁止するケース.
- \$150 ケース: 2025 年以降, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$150 の排出税を課すケース.
- \$150\_N ケース: 2025 年以降, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$150 の排出税を課し, 全時点において原子力発電所の新設を禁止するケース.
- RAMP ケース: 2025 年, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$20 の排出税を課し, 毎年単位トン当たり\$4 の排出税を上乗せするケース (すなわち 2050 年時点で\$120/t-CO<sub>2</sub>).
- RAMP\_N ケース: 2025 年, CO<sub>2</sub> 単位トン当たり\$20 の排出税を課し, 毎年単位トン当たり\$4 の排出税を上乗せするケース. 加えて全時点において原子力発電所の新設を禁止するケース.

## 6.4 結果とその分析

ここではまず 6.4.1 項で CCS 導入による最適電源構成の変化を見る. 次に CCS 導入による CO<sub>2</sub> 排出量の変化を 6.4.2 項で, そして 6.4.3 項でどの部門に CCS を導入しその投資額がどれほどになるのかを示す. 本文に載せていない結果は付録 G を参照されたい.

### 6.4.1 最適電源構成

図 6.3~図 6.50 に各シナリオ各ケースの最適電源構成および最適電源容量を示した. 特に SuperHigh シナリオでは, \$150 ケースでも原子力発電よりも CCS 設備を付したガス火力発電での運用に代替された. また, \$10\_N ケースにおいてもガス火力発電に加え, 石炭火力発電の運用も 2050 年時点で全体の約 15% を占める結果となった. CCS の導入量によっては最適電源構成の変化が認められる結果である.

### 6.4.2 CO<sub>2</sub> 排出量

図 6.51~図 6.53 に各シナリオの排出量推移, 図 6.54~図 6.56 に各シナリオの部門別 CO<sub>2</sub> 排出量推移を示す. CCS の導入量が増えれば触れるほど削減効果が望め, SuperHigh シナリオの\$150 ケースでは, 2040 年の CO<sub>2</sub> 排出量が 2020 年比で約 41% の削減を可能にしている. High シナリオでは, \$150 ケースで 2020 年比最大約 29% の削減が可能 (2040 年) であり, CCS を導入しない場合に比べて 4% 程排出量の削減効果が望める. Low シナリオでは CCS を導入しない場合とほとんど変わらず, 排出量削減効果は薄いと言わざるを得ない. 6.4.1 項で述べたとおり, CCS の導入によって SuperHigh シナリオではガス火力発電や石炭火力発電の運用が行われるため, 図 6.51 に示されるように, 発電部門からの CO<sub>2</sub> 排出量が顕著である. High ケースになると, 発電部門から回収できる CO<sub>2</sub> の量に限界があるため, 原子力発電等のゼロ・エミッション電源へと代替がすすむ. ほとんどすべてのシナリオおよびケースにおいて, CCS の上限シナリオを一杯満たしていることから, 現状のモデリングやパラメータの設定下では, CCS の CO<sub>2</sub> 排出量削減における経済性は非常に高いと言える.

### 6.4.3 CCS の技術選択と投資

図 6.60～図 6.83 に CCS がどの部門に導入されるのが経済合理的かを示した。シナリオで設定した上限はすべての CCS 導入量の合計であるので、その中でどの部門に CCS を導入すべきか選択が行われる。例えば 6.4.1 で述べたように、SuperHigh シナリオの\$150 ケースにおいて、CCS の導入によって原子力発電からガス火力発電へと大幅に代替が行われたので、図 6.64 が示すとおり、ガス火力発電に設置される CCS が多量を占める。石炭火力発電の運用がほとんどないので、上限までの残りは鉄鋼部門に設置される CCS が占めている。また図 6.61 にあるように、石炭火力発電に設置される CCS の導入によって石炭火力発電の運用が 2050 年時点でも行われる。経済性の観点からはこれ以上の排出税下では石炭火力発電の出る幕はないが、エネルギー源の多様性を模索するのであれば、CCS 技術の普及とともに石炭火力発電の運用が考えられるかもしれない。

次に投資額を見る。SuperHigh シナリオではどのケースに置いても毎年約 5～10 億 US ドルの投資が行われている。2006 年から 2015 年まで、世界全体で CCS に投資された額は約 200 億 US ドル [6-10] であることを考えると非現実的な投資額ではないと言える。

## 6.5 第 6 章の結論

本章では、前章までで解説した拡張版の DMSEE をさらに拡張させて、温室効果ガス削減技術の 1 つとして期待されている CCS を考慮可能にするとともに、代表的な結果について分析を行った。CCS は将来技術であり、データの信憑性も乏しいと言わざるを得ないため本章の拡張モデルでも簡易的なモデリングに留めているが、将来、より CCS が現実的な技術になった際にも十分に余力を残す。主な結果として、CCS を考慮した際の最適電源構成、CO<sub>2</sub> 排出量、CCS の技術選択と投資が示された。CCS の導入によって、原子力発電がガス火力発電に代替する可能性が示唆され、CO<sub>2</sub> 排出量も CCS を導入した方が抑制できるとの結果であるが、いずれも CCS の効果を望むためには、野心的な CCS の導入量が必要になるとの示唆を得た。しかし、野心的な CCS の導入を実現するための投資額を見ると、非現実的な話ではないとの示唆を得た。

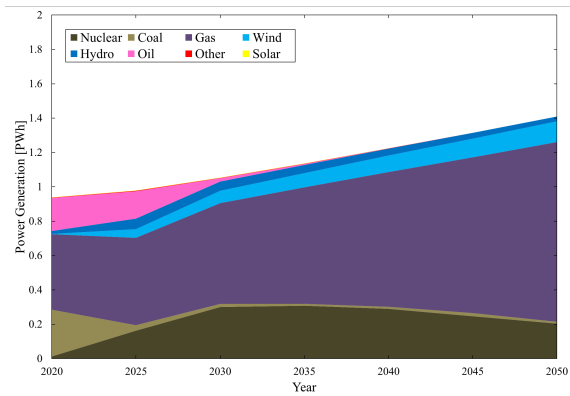


図 6.3 \$10 ケースの最適電源構成 (SuperHigh).

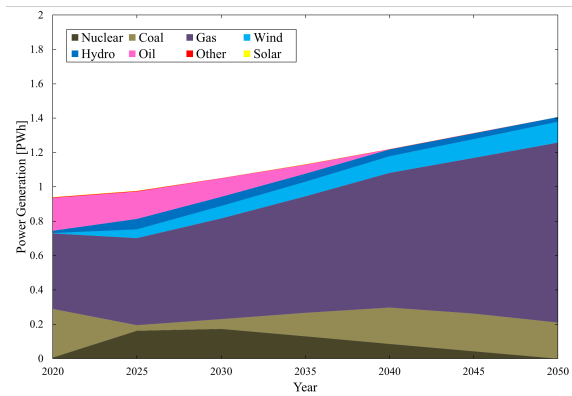


図 6.4 \$10\_N ケースの最適電源構成 (SuperHigh).

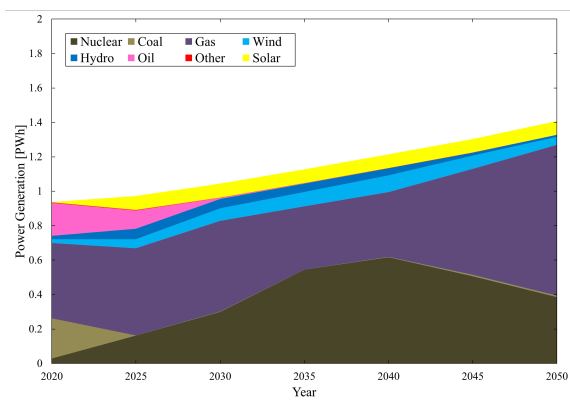


図 6.5 \$50 ケースの最適電源構成 (SuperHigh).

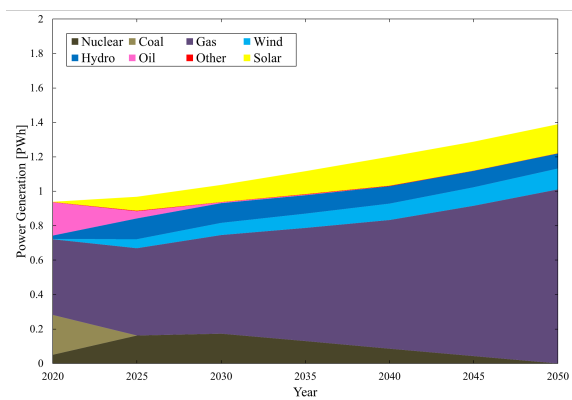


図 6.6 \$50\_N ケースの最適電源構成 (SuperHigh).

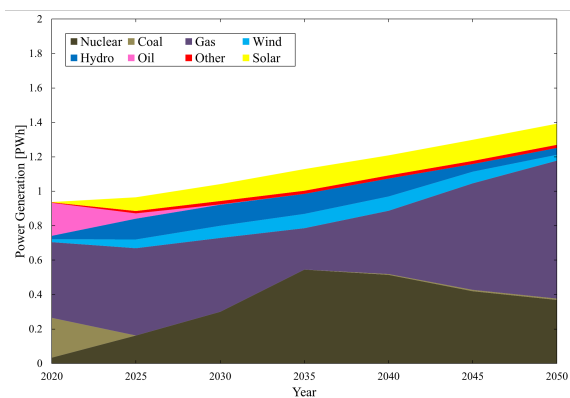


図 6.7 \$150 ケースの最適電源構成 (SuperHigh).

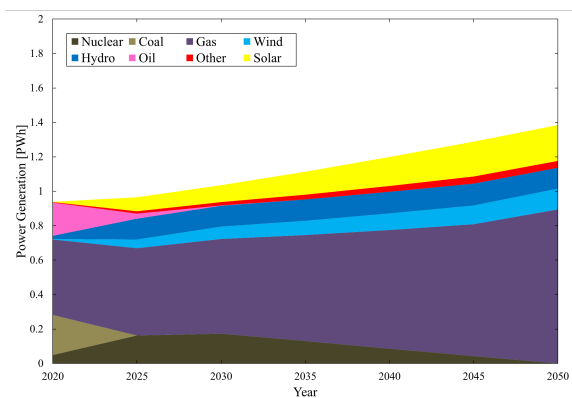


図 6.8 \$150\_N ケースの最適電源構成 (SuperHigh).

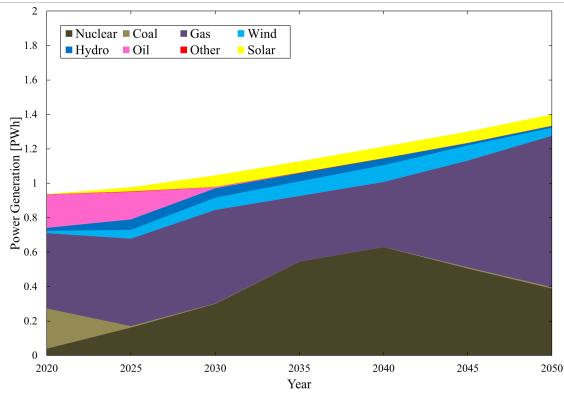


図 6.9 RAMP ケースの最適電源構成 (SuperHigh).

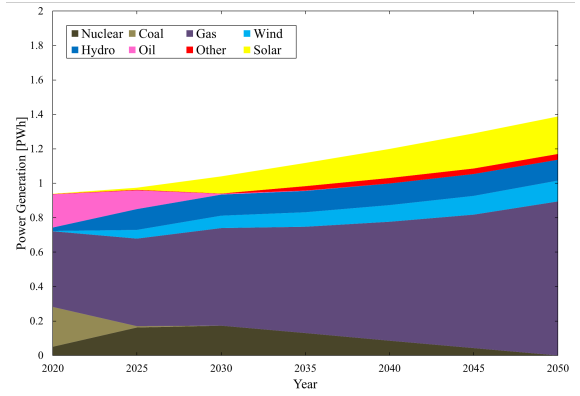


図 6.10 RAMP\_N ケースの最適電源構成 (SuperHigh).

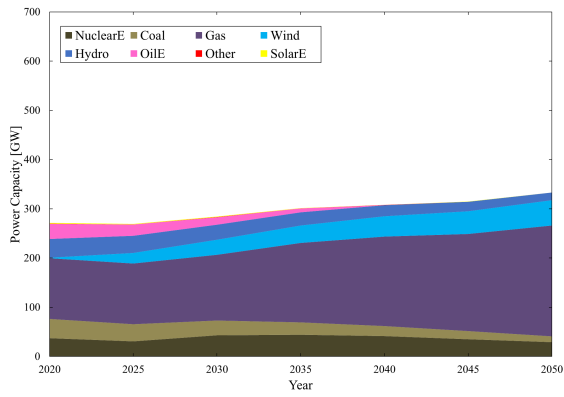


図 6.11 \$10 ケースの最適電源容量 (SuperHigh).

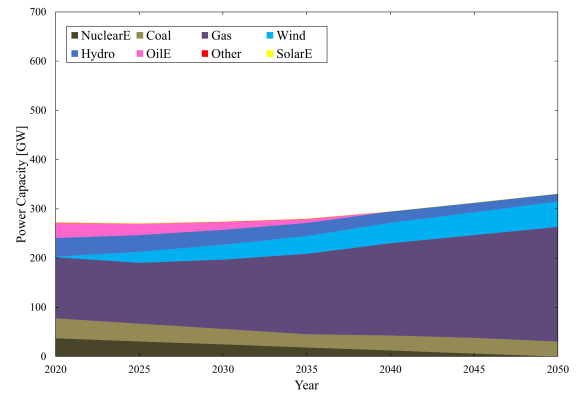


図 6.12 \$10\_N ケースの最適電源容量 (SuperHigh).

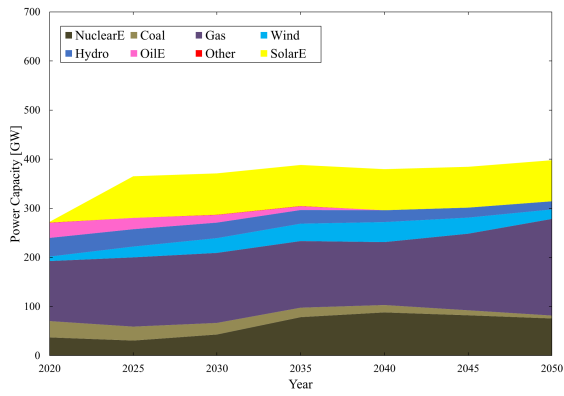


図 6.13 \$50 ケースの最適電源容量 (SuperHigh).

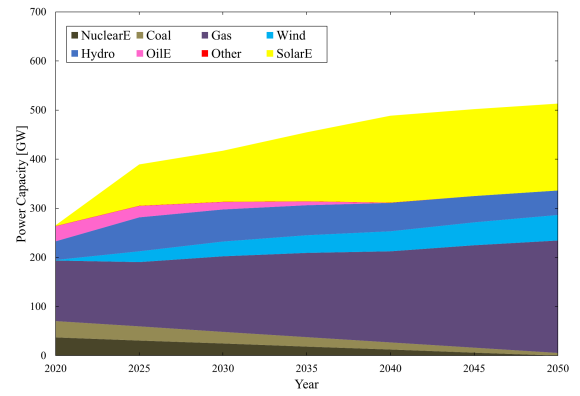


図 6.14 \$50\_N ケースの最適電源容量 (SuperHigh).

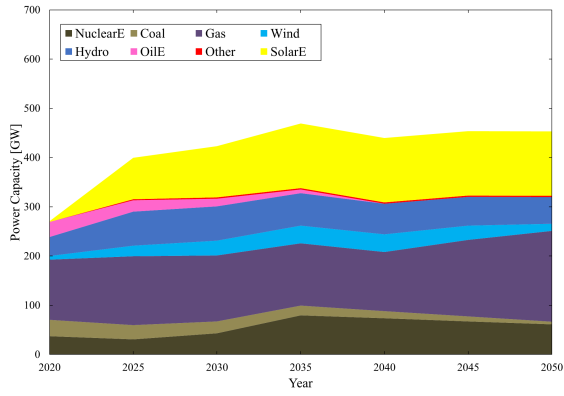


図 6.15 \$150 ケースの最適電源容量 (SuperHigh).

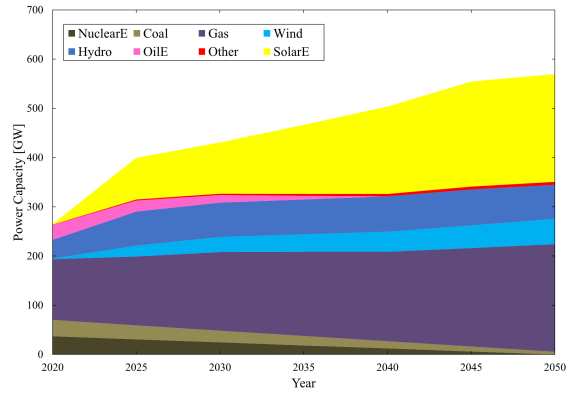


図 6.16 \$150\_N ケースの最適電源容量 (SuperHigh).

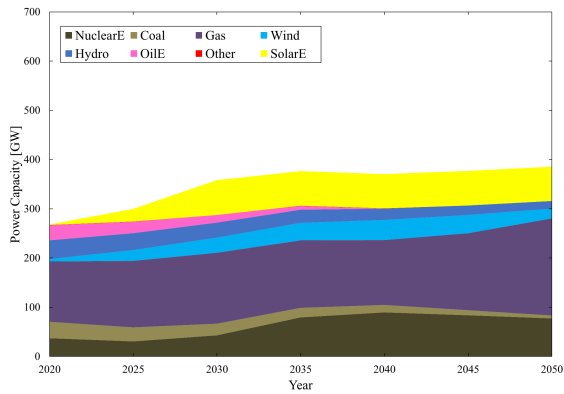


図 6.17 RAMP ケースの最適電源容量 (SuperHigh).

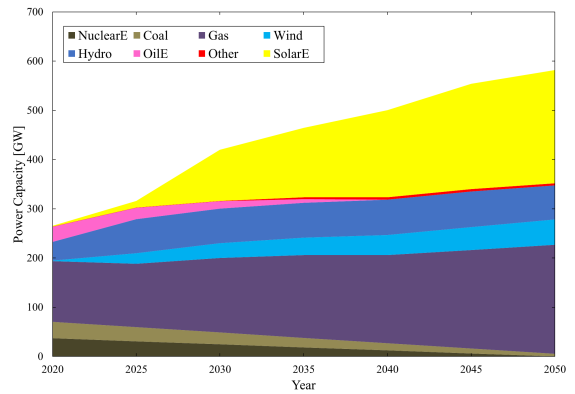


図 6.18 RAMP\_N ケースの最適電源容量 (SuperHigh).

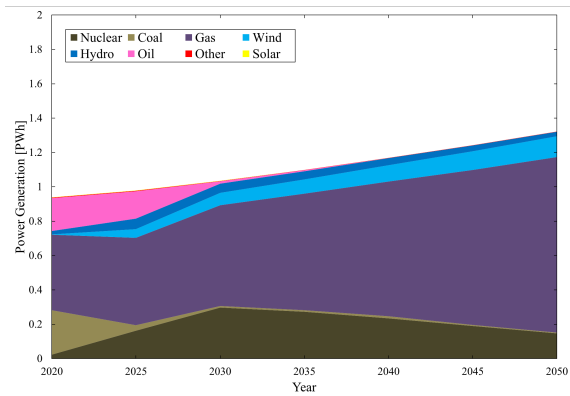


図 6.19 \$10 ケースの最適電源構成 (High).

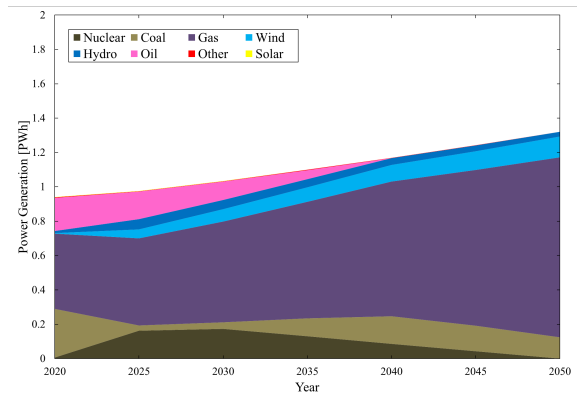


図 6.20 \$10\_N ケースの最適電源構成 (High).

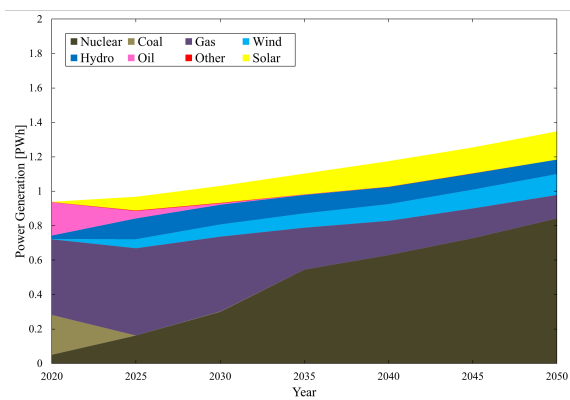


図 6.21 \$50 ケースの最適電源構成 (High).

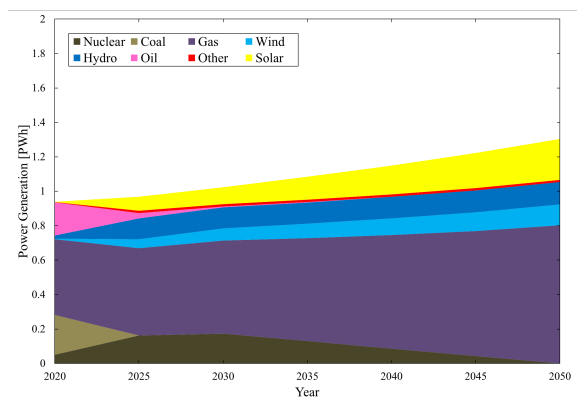


図 6.22 \$50\_N ケースの最適電源構成 (High).

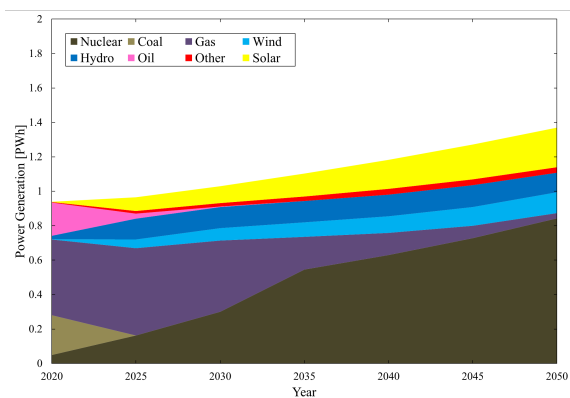


図 6.23 \$150 ケースの最適電源構成 (High).

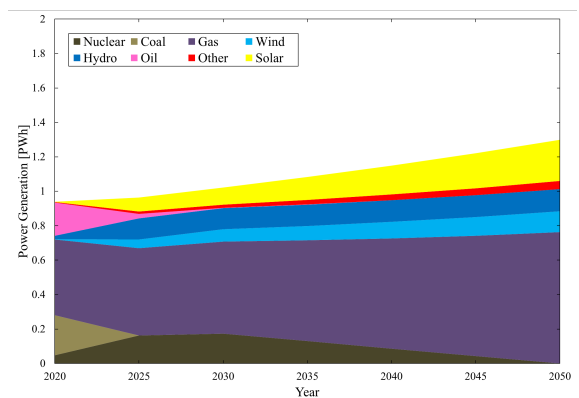


図 6.24 \$150\_N ケースの最適電源構成 (High).



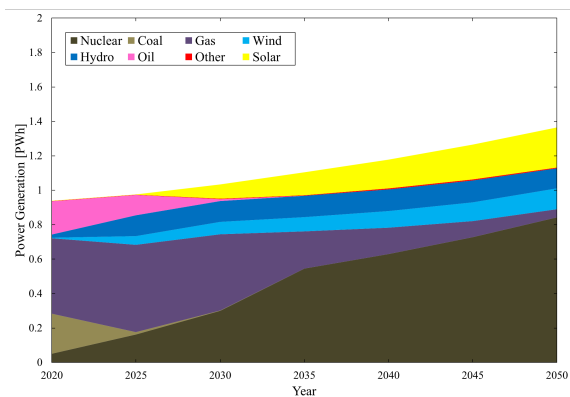


図 6.25 RAMP ケースの最適電源構成 (High).

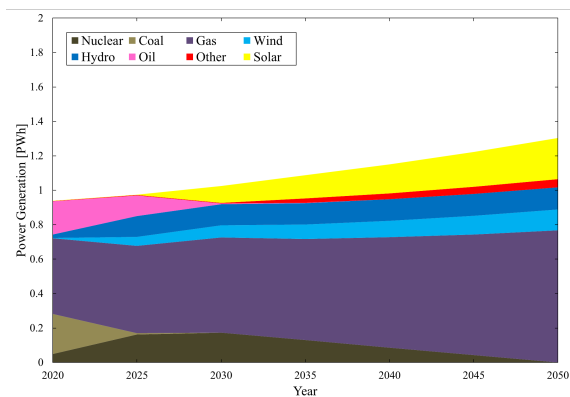


図 6.26 RAMP\_N ケースの最適電源構成 (High).

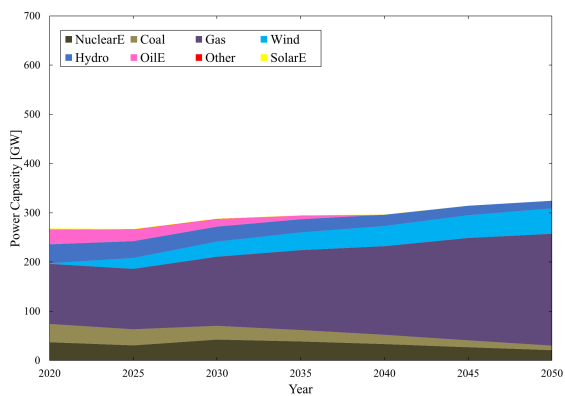


図 6.27 \$10 ケースの最適電源容量 (High).

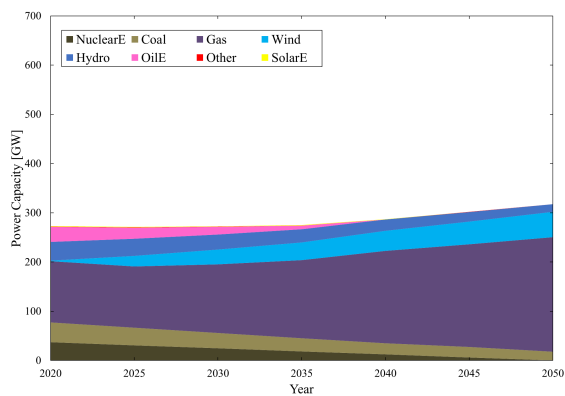


図 6.28 \$10\_N ケースの最適電源容量 (High).

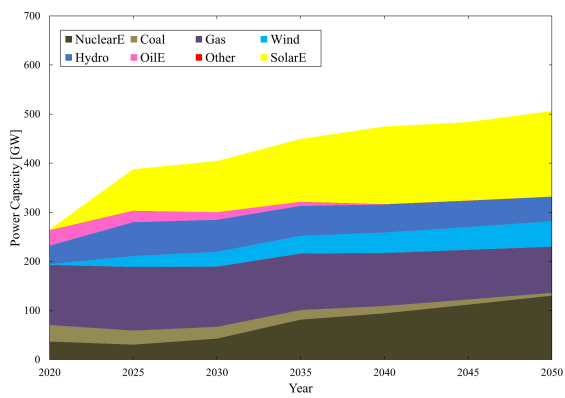


図 6.29 \$50 ケースの最適電源容量 (High).

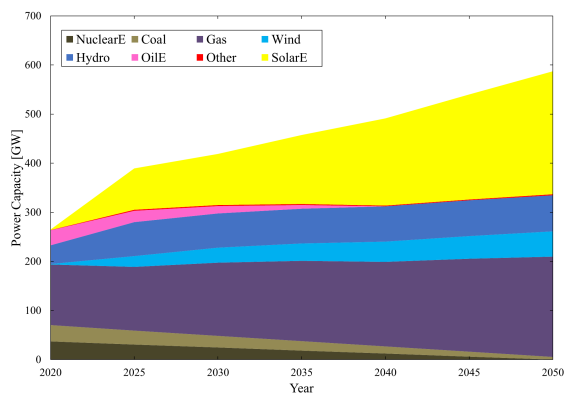


図 6.30 \$50\_N ケースの最適電源容量 (High).

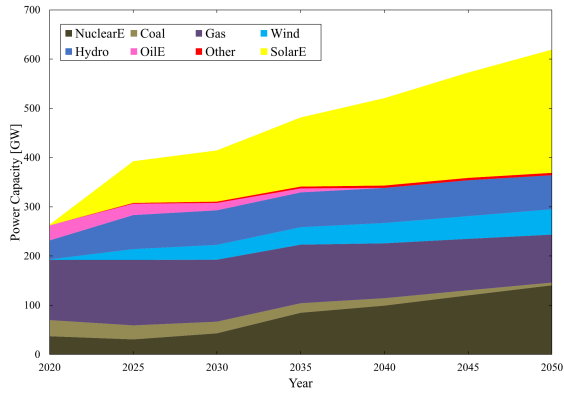


図 6.31 \$150 ケースの最適電源容量 (High).

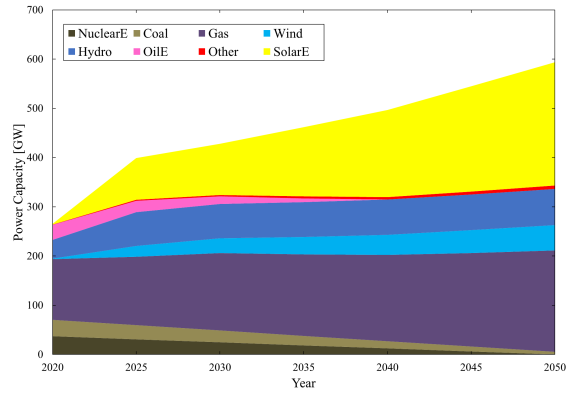


図 6.32 \$150\_N ケースの最適電源容量 (High).

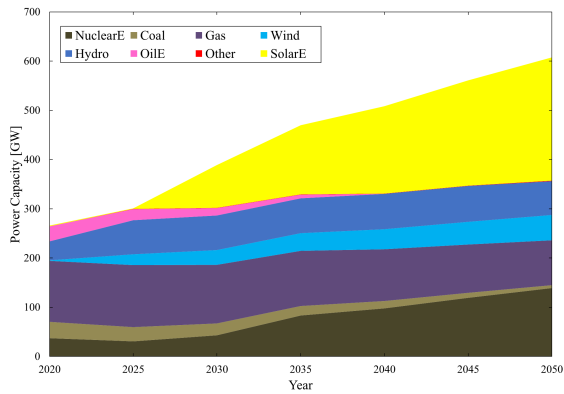


図 6.33 RAMP ケースの最適電源容量 (High).

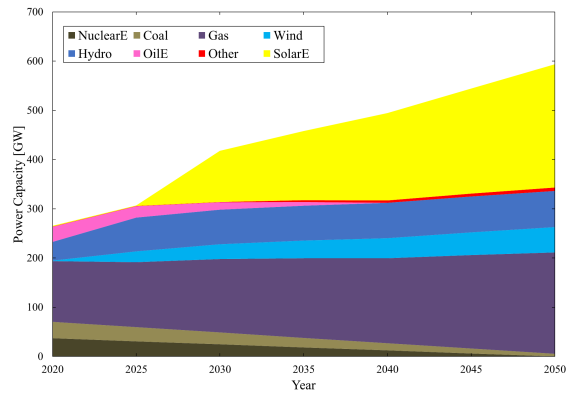


図 6.34 RAMP\_N ケースの最適電源容量 (High).

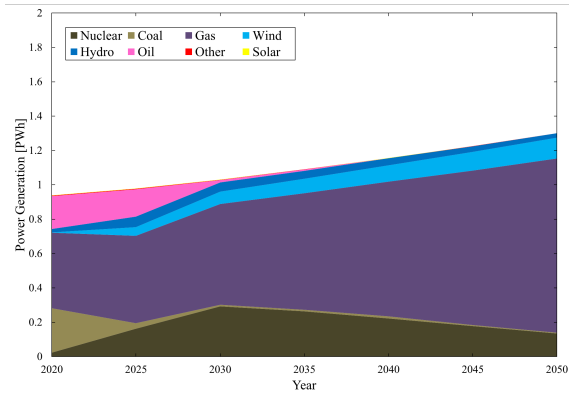


図 6.35 \$10 ケースの最適電源構成 (Low).

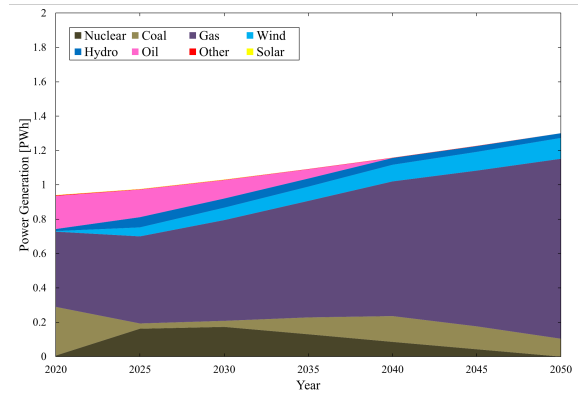


図 6.36 \$10\_N ケースの最適電源構成 (Low).

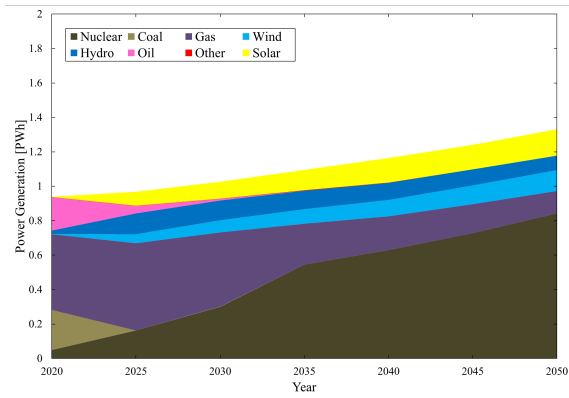


図 6.37 \$50 ケースの最適電源構成 (Low).

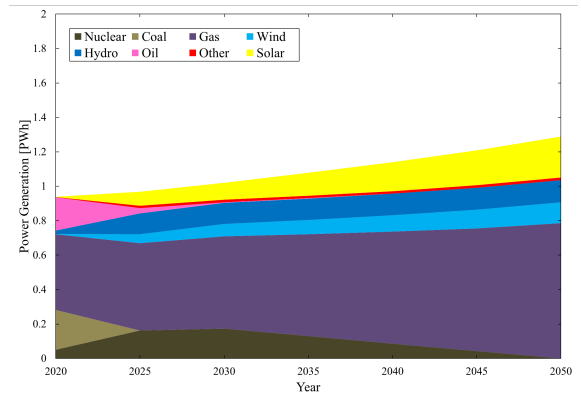


図 6.38 \$50\_N ケースの最適電源構成 (Low).

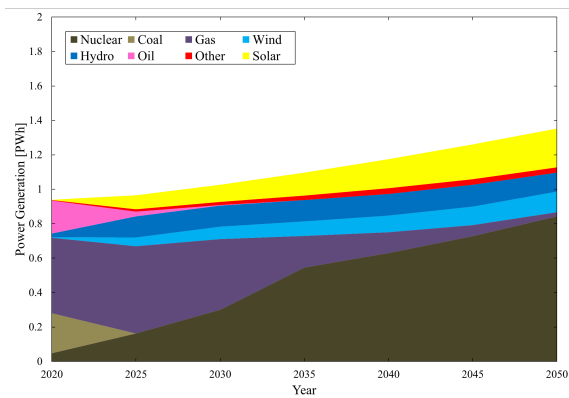


図 6.39 \$150 ケースの最適電源構成 (Low).

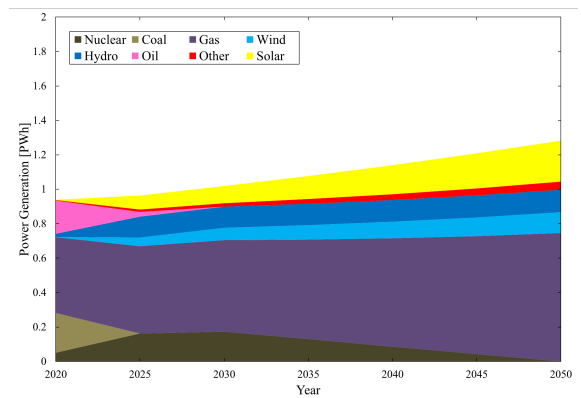


図 6.40 \$150\_N ケースの最適電源構成 (Low).

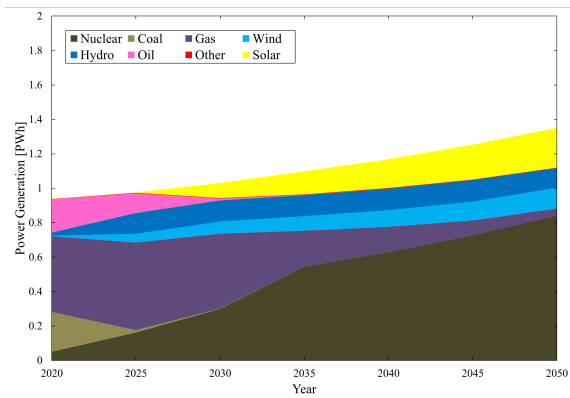


図 6.41 RAMP ケースの最適電源構成 (Low).

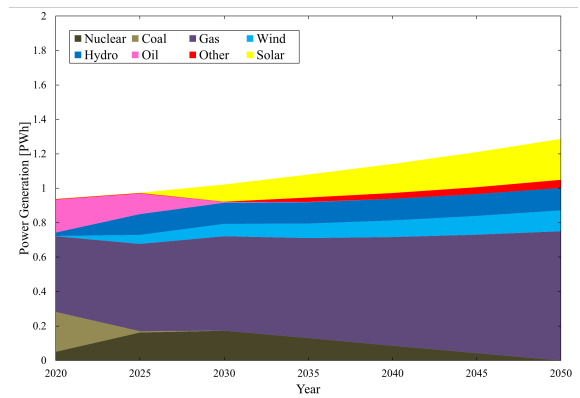


図 6.42 RAMP\_N ケースの最適電源構成 (Low).

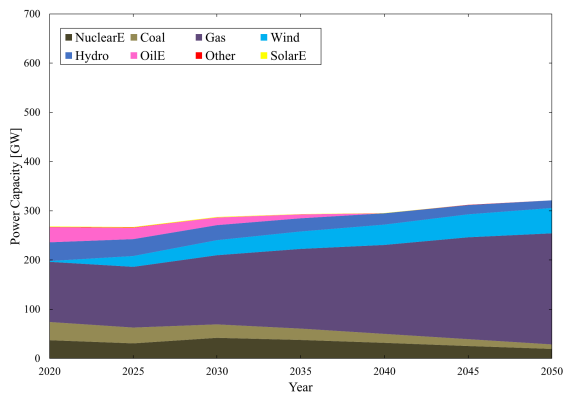


図 6.43 \$10 ケースの最適電源容量 (Low).

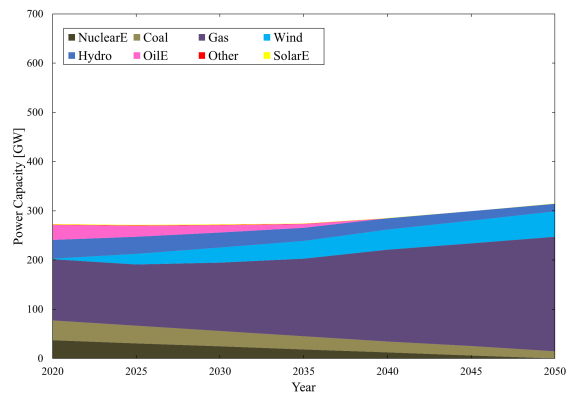


図 6.44 \$10\_N ケースの最適電源容量 (Low).

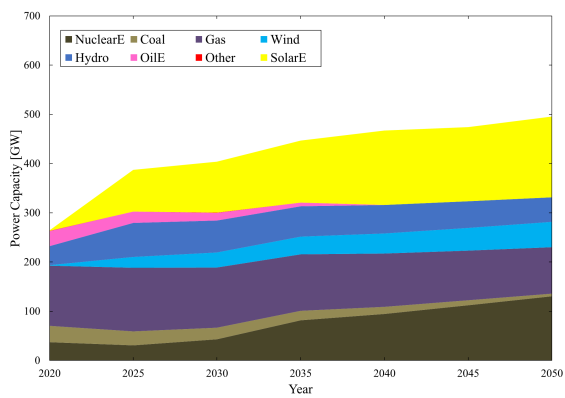


図 6.45 \$50 ケースの最適電源容量 (Low).

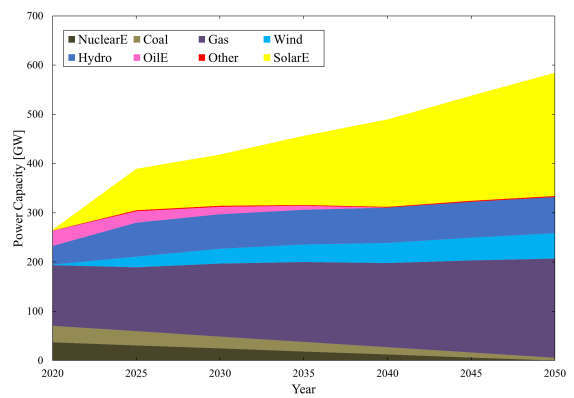


図 6.46 \$50\_N ケースの最適電源容量 (Low).

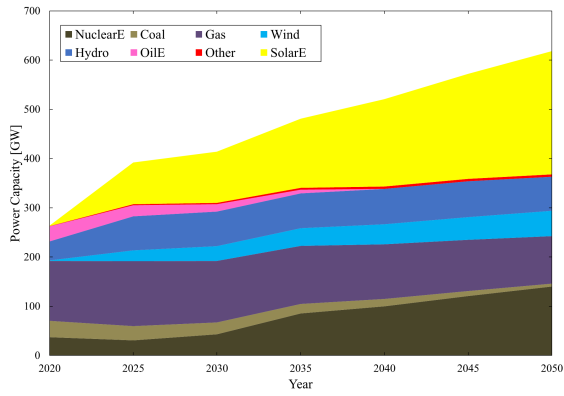


図 6.47 \$150 ケースの最適電源容量 (Low).

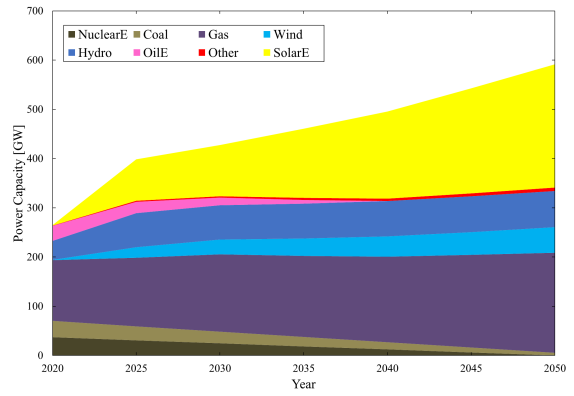


図 6.48 \$150\_N ケースの最適電源容量 (Low).

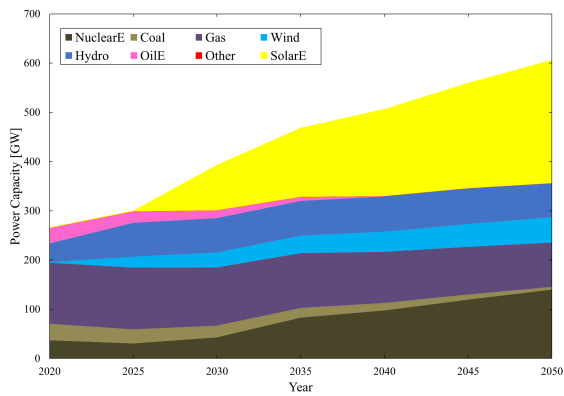


図 6.49 RAMP ケースの最適電源容量 (Low).

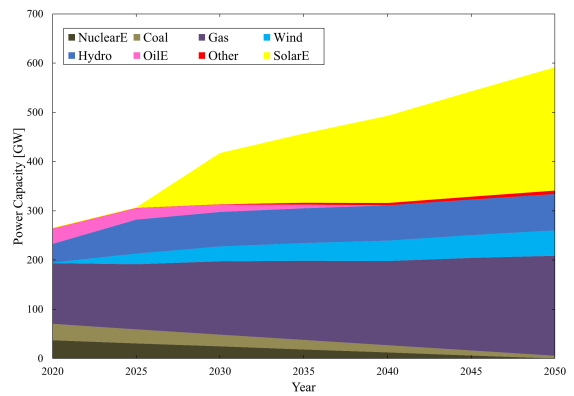


図 6.50 RAMP\_N ケースの最適電源容量 (Low).

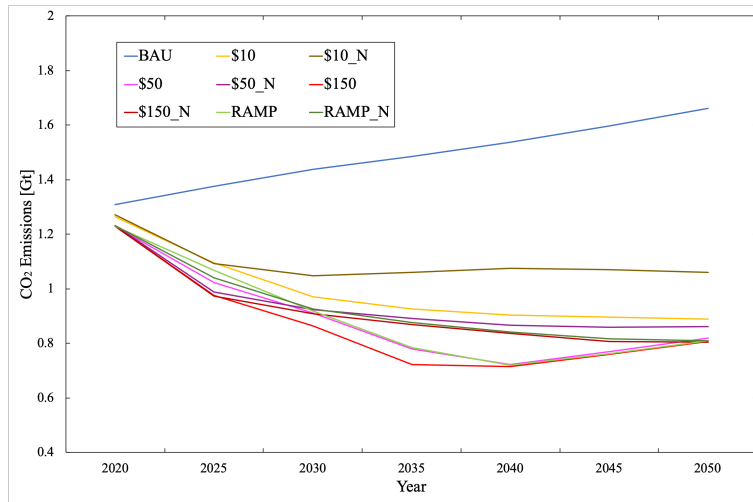


図 6.51 SuperHigh シナリオの各ケースの CO<sub>2</sub> 排出量.

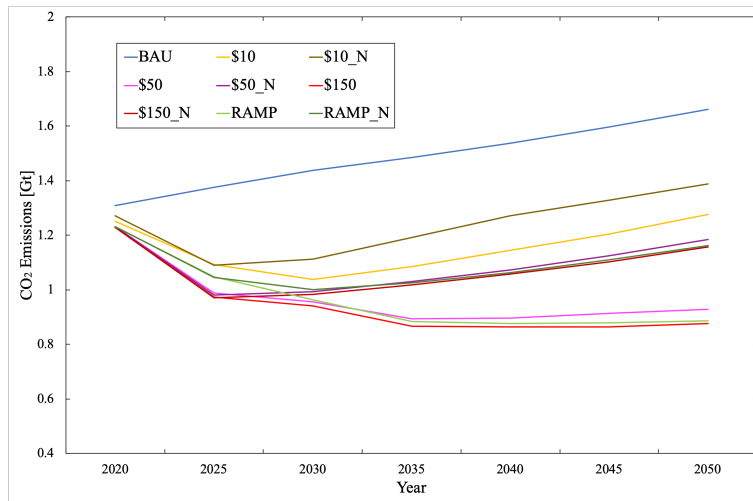


図 6.52 High シナリオの各ケースの CO<sub>2</sub> 排出量.

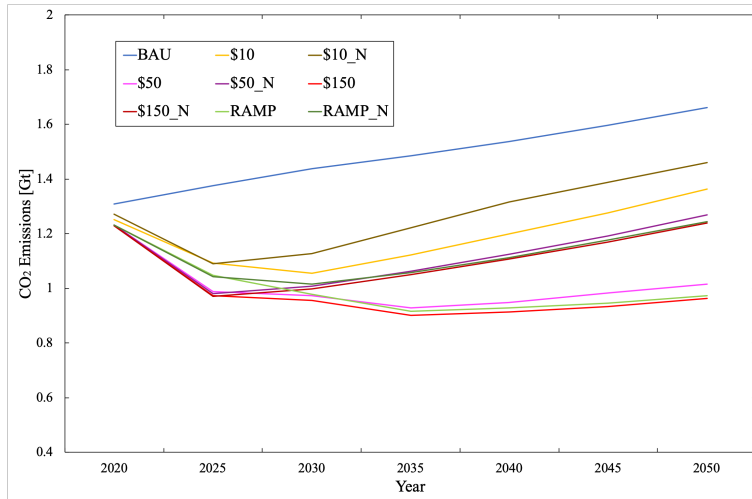


図 6.53 Low シナリオの各ケースの CO<sub>2</sub> 排出量.

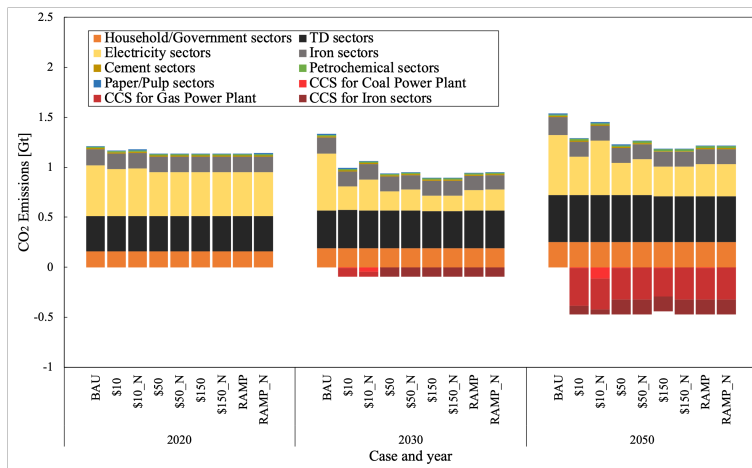


図 6.54 SuperHigh シナリオの各ケースの部門別 CO<sub>2</sub> 排出量.

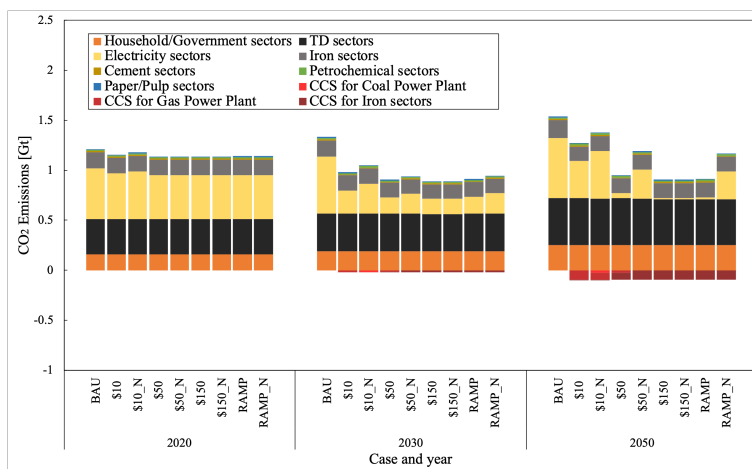


図 6.55 High シナリオの各ケースの部門別 CO<sub>2</sub> 排出量.

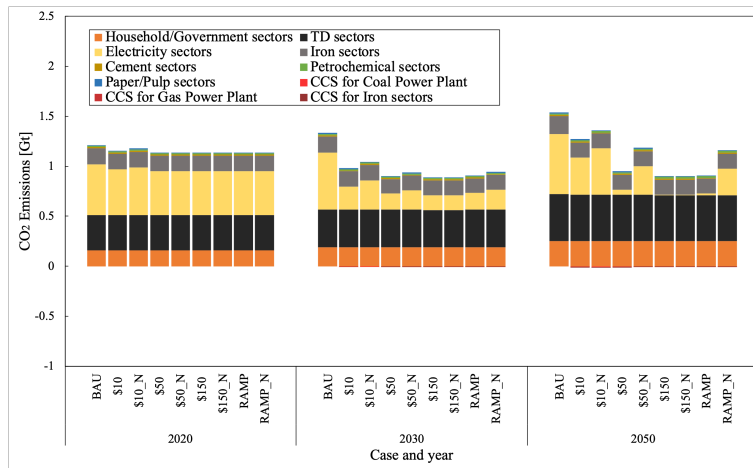


図 6.56 Low シナリオの各ケースの部門別 CO<sub>2</sub> 排出量.

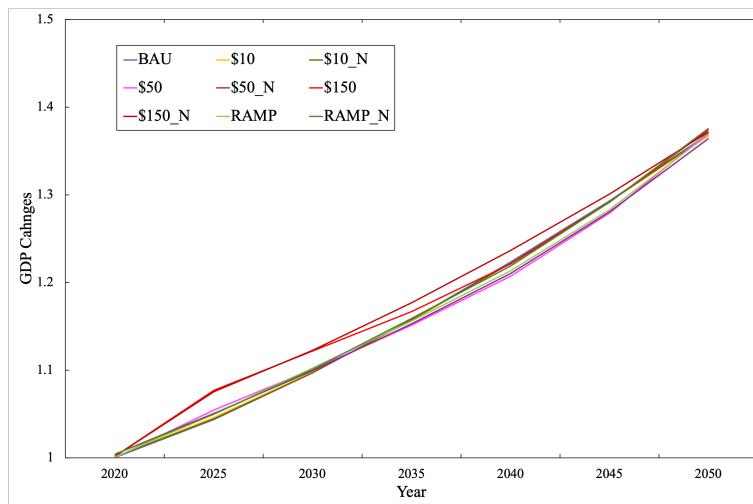


図 6.57 各ケースの GDP 推移 (SuperHigh). BAU ケースの 2020 年の値を 1 として規格化.

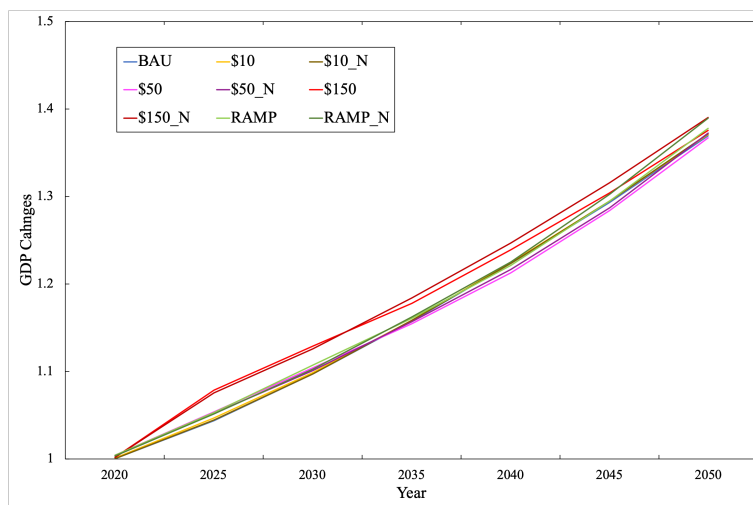


図 6.58 各ケースの GDP 推移 (High). BAU ケースの 2020 年の値を 1 として規格化.



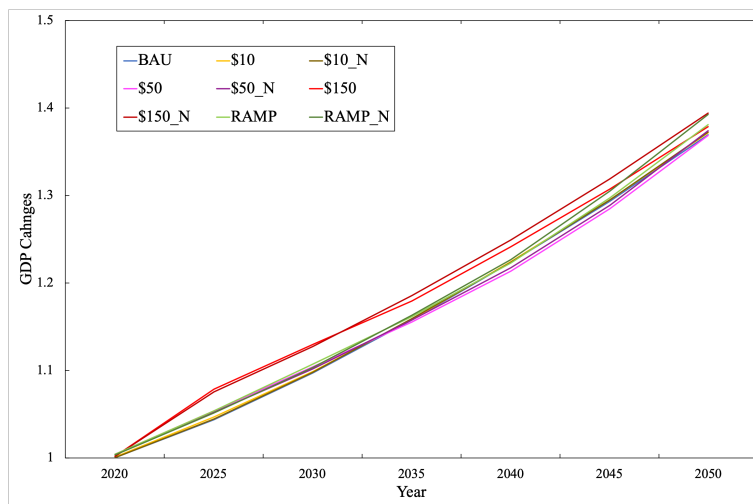


図 6.59 各ケースの GDP 推移 (Low). BAU ケースの 2020 年の値を 1 として規格化.

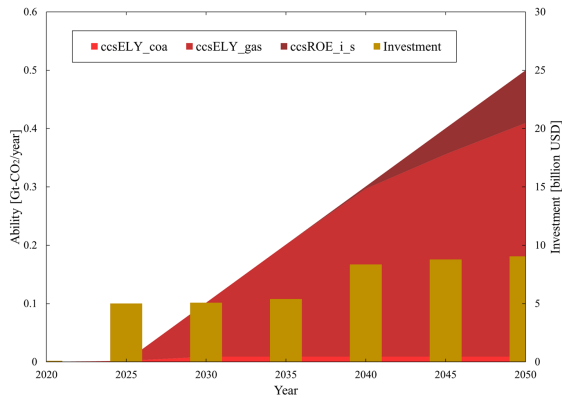


図 6.60 \$10 ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).

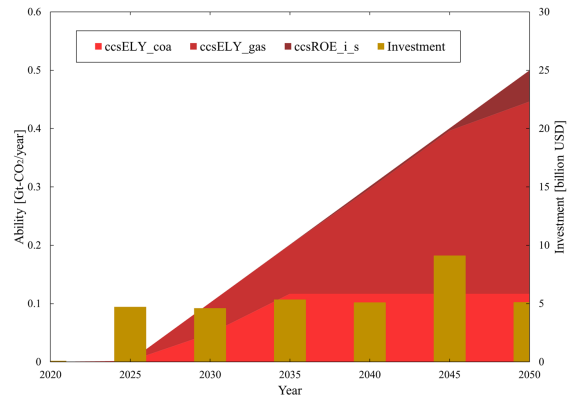


図 6.61 \$10\_N ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).

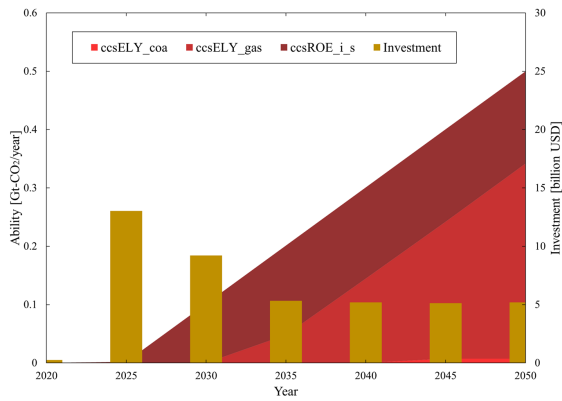


図 6.62 \$50 ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).

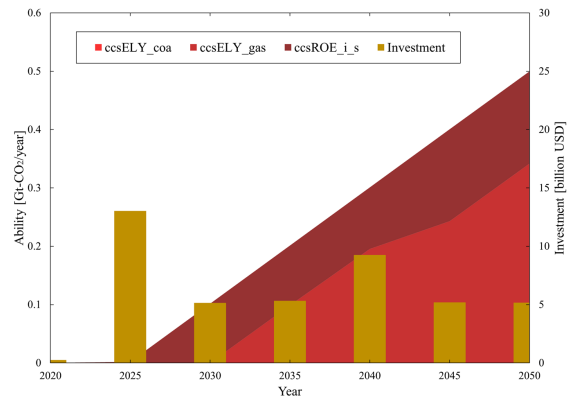


図 6.63 \$50\_N ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).

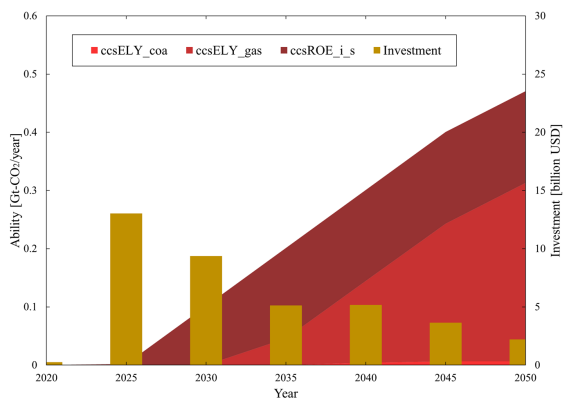


図 6.64 \$150 ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).

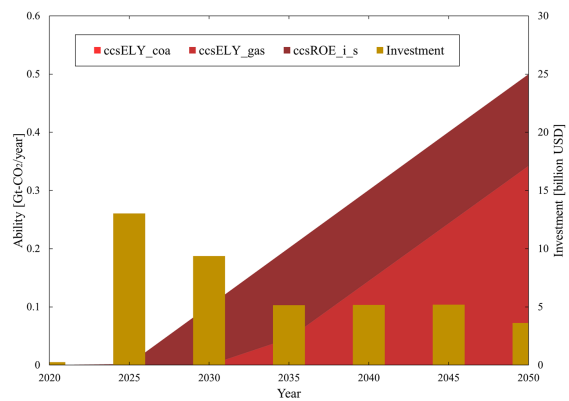


図 6.65 \$150\_N ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).

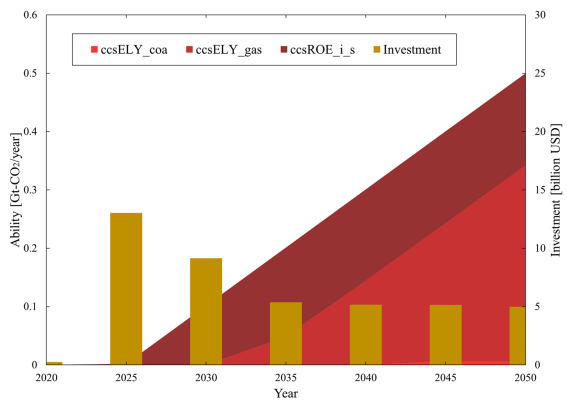


図 6.66 RAMP ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).

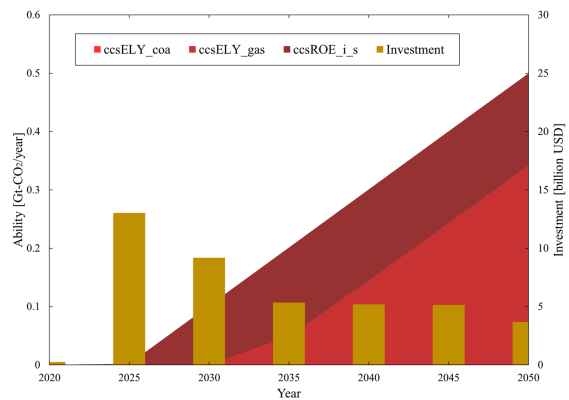


図 6.67 RAMP\_N ケースの CCS 技術選択 (SuperHigh).

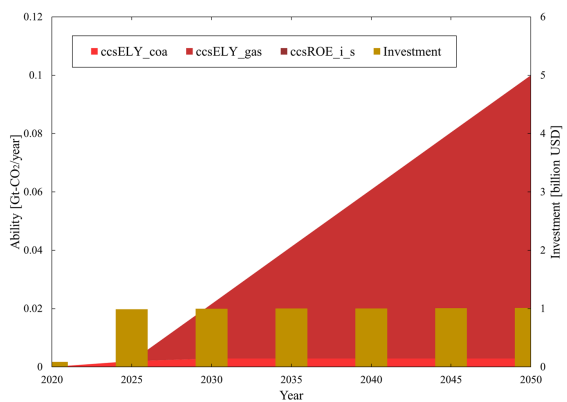


図 6.68 \$10 ケースの CCS 技術選択 (High).

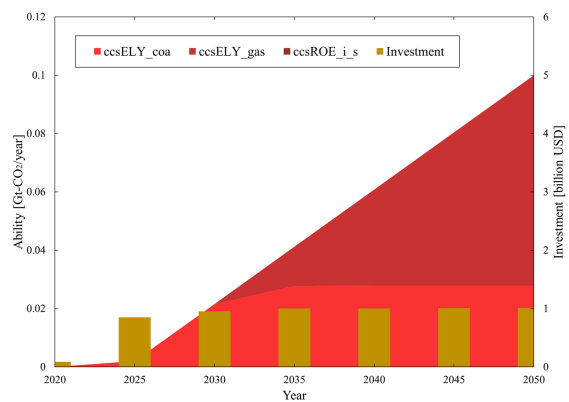


図 6.69 \$10\_N ケースの CCS 技術選択 (High).

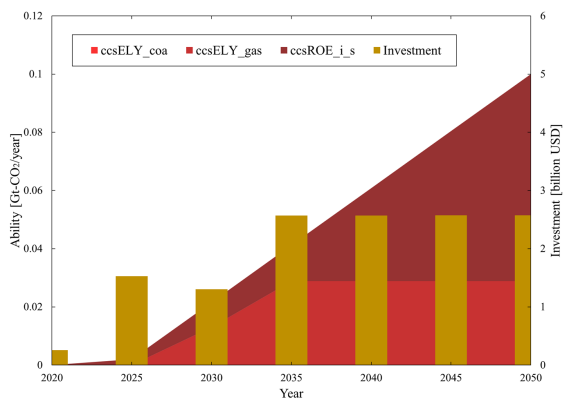


図 6.70 \$50 ケースの CCS 技術選択 (High).

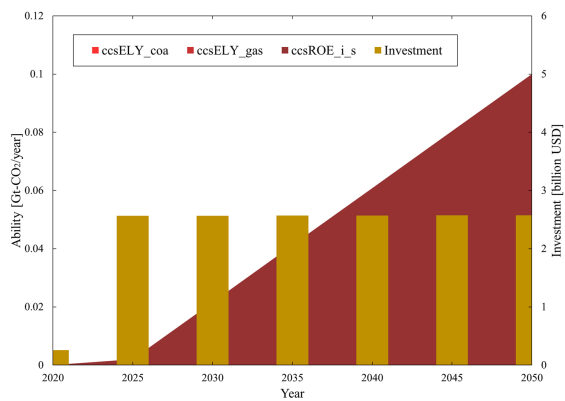


図 6.71 \$50\_N ケースの CCS 技術選択 (High).

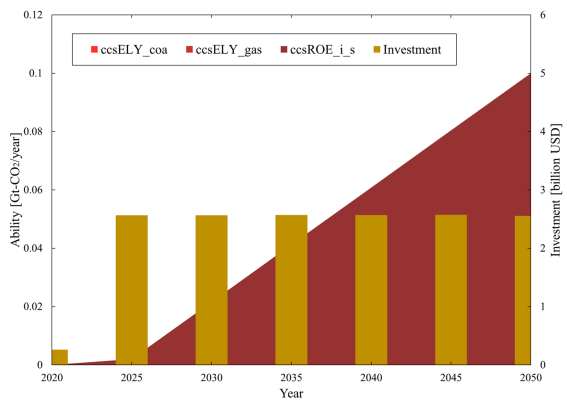


図 6.72 \$150 ケースの CCS 技術選択 (High).

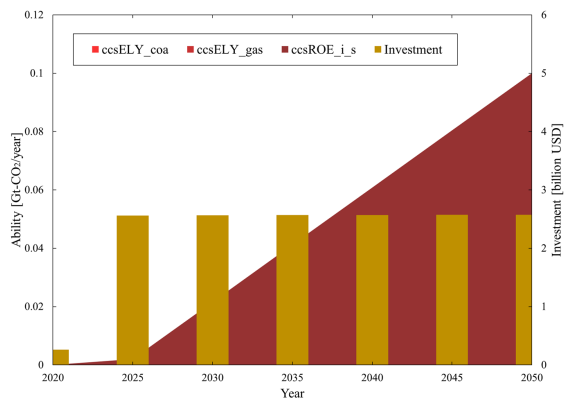


図 6.73 \$150\_N ケースの CCS 技術選択 (High).

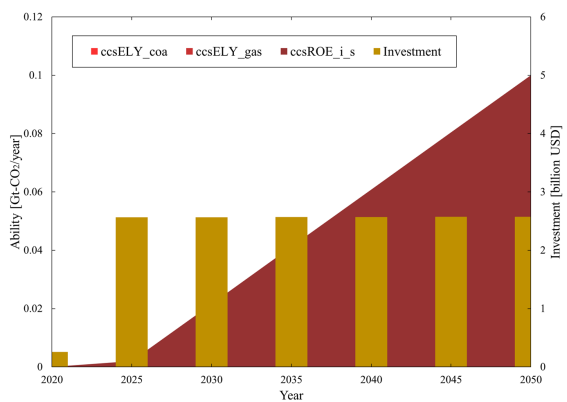


図 6.74 RAMP ケースの CCS 技術選択 (High).

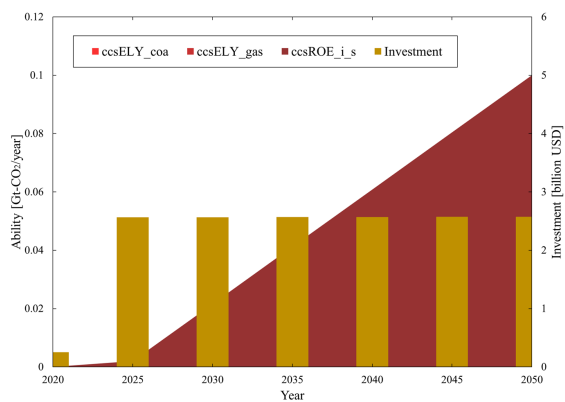


図 6.75 RAMP\_N ケースの CCS 技術選択 (High).

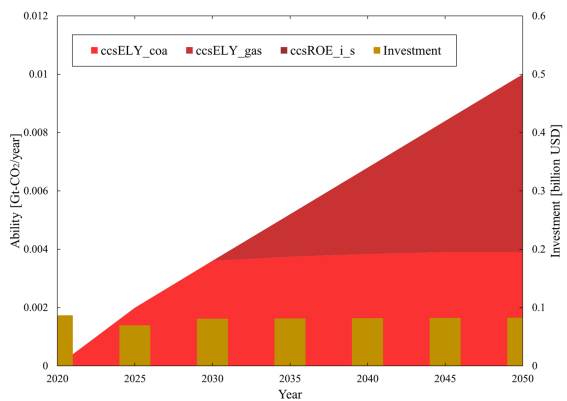


図 6.76 \$10 ケースの CCS 技術選択 (Low).

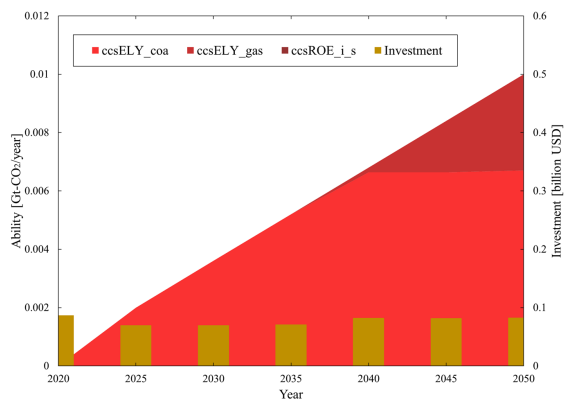


図 6.77 \$10<sub>N</sub> ケースの CCS 技術選択 (Low).

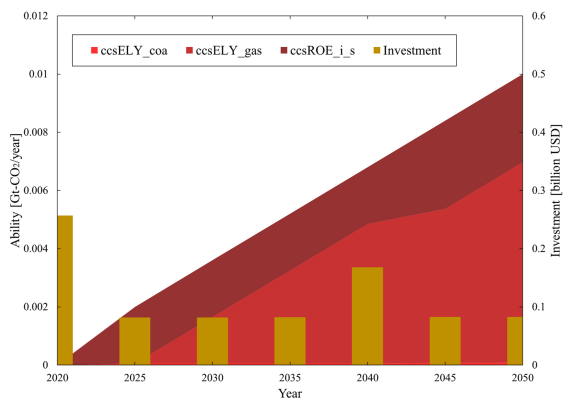


図 6.78 \$50 ケースの CCS 技術選択 (Low).

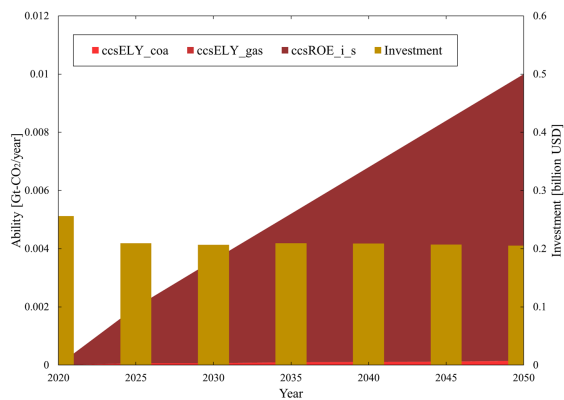


図 6.79 \$50<sub>N</sub> ケースの CCS 技術選択 (Low).

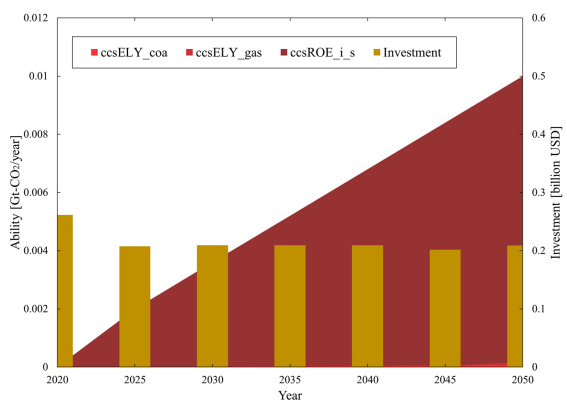


図 6.80 \$150 ケースの CCS 技術選択 (Low).

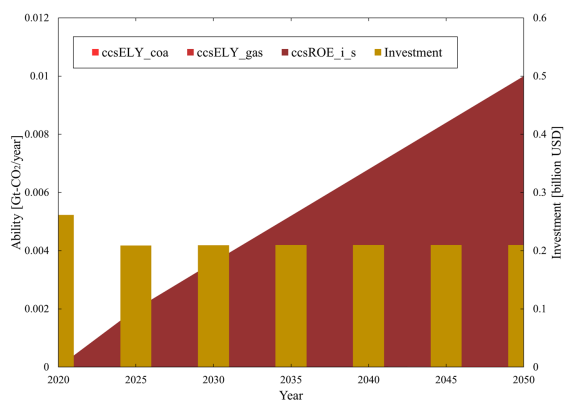


図 6.81 \$150<sub>N</sub> ケースの CCS 技術選択 (Low).

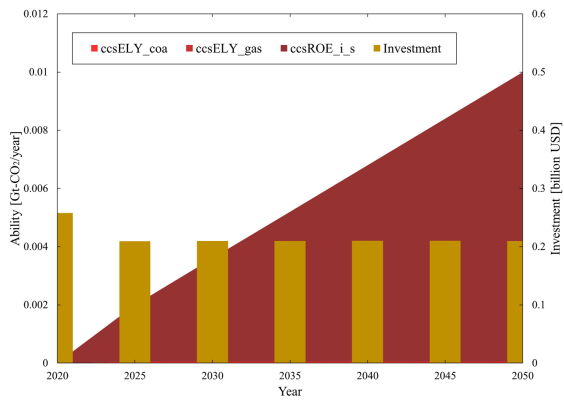


図 6.82 RAMP ケースの CCS 技術選択 (Low).

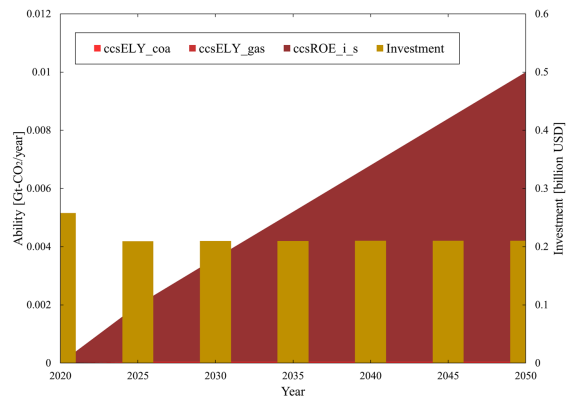


図 6.83 RAMP\_N ケースの CCS 技術選択 (Low).

## 参考文献

- [6-1] 経済産業省: 我が国の CCS 政策について, 経済産業省 ウェブサイト,  
[https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso\\_nenryodenchi/co2free/pdf/006\\_02\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/co2free/pdf/006_02_00.pdf) (アクセス日: 2019 年 8 月 17 日)
- [6-2] International Energy Agency: CO<sub>2</sub> Emissions Statistics, IEA Website,  
<https://www.iea.org/statistics/co2emissions/> (アクセス日: 2019 年 11 月 17 日)
- [6-3] 地球環境産業技術研究機構: 「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」, 成果報告書 (2006)
- [6-4] 経済産業省: 水素基本戦略の概要, 経済産業省 ウェブサイト,  
<https://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-2.pdf> (アクセス日: 2019 年 8 月 17 日)
- [6-5] 経済産業省: 水素基本戦略, 2017 年 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 経済産業省 ウェブサイト,  
<https://www.iea.org/statistics/co2emissions/> (アクセス日: 2019 年 8 月 17 日)
- [6-6] 国立研究開発法人科学技術新興機構 低炭素社会戦略センター: 「CCS (二酸化炭素回収貯留) の概要と展望 - CO<sub>2</sub> 分離回収技術の評価と課題 -」, 低炭素社会の実現にくけた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書 (2016)
- [6-7] 地球環境産業技術研究機構 システム研究グループ: 「DNE21+ モデルの概要 -二酸化炭素回収貯留 (CCS)-」 (2008)
- [6-8] 経済産業省地球環境連携室: 「CCS を取り巻く状況」, CCS の実証および調査事業のあり方に向けた有識者検討会 (2018)
- [6-9] 秋元 圭吾, 佐野 史典: 「パリ協定 2 °C 目標から見た我が国の 2050 年排出削減目標に関する分析」, エネルギー・資源学会論文誌, Vol. 38, No. 1, pp. 1-9 (2017)
- [6-10] Global CCS Institute: "The Global Status of CCS 2016",  
<https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/201483/global-status-ccs-2016-summary-report-JP.pdf> (アクセス日: 2019 年 11 月 20 日)

## 第7章

# 結論

前章までをもって、独自のエネルギー経済モデルの開発とその計算結果が示す CO<sub>2</sub> 排出削減対策の評価について行ってきた。本章では結論として、7.1 節でこれまで各章で示してきた主な内容について述べた後、7.2 節で本モデルが現在抱える今後の課題について言及する。

### 7.1 これまでのまとめ

まず第1章では本研究の背景となる、世界のエネルギー情勢、日本のエネルギー情勢の概要について言及した。特に我が国においては、低いエネルギー自給率や原子力発電再稼働の問題、先進国としての CO<sub>2</sub> 排出削減への責務等、混沌としたエネルギー情勢を抱えていることに触れるとともに、電気料金を引き合いに出し、これらエネルギー問題と経済とは切っても切り離せない関係にあることを強調した。この背景に基づき、日本のエネルギー政策を定量評価するモデルの中でも、エネルギーシステムそのものだけではなく、経済全体を俯瞰して、エネルギーシステムを含む産業連関構造を詳細に考慮可能なモデルの意義について触れ、本研究がこのようなモデルの開発に従事するものであることを示した。そして本研究が開発するモデルは、経済全体を俯瞰しながらも、エネルギー部門や素材部門における技術選択を論ずることが可能なモデルであること、電力部門における再生可能エネルギーの現実的な導入量を議論すべく高時間解像度化に成功していること、独自の計算手法を用いて、大規模な連立方程式を線形計画問題へと帰着させ、計算機に依る計算時間の大幅な抑制とモデルの発展性の向上を担保していることなどを新規性として示し、本研究がいかに画期的で学術的に価値のあるものかを示した。

第2章では、エネルギー・経済モデルの概要について説明した。エネルギー・経済モデルは大きく分けて、「最適化型かシミュレーション型か」、「トップダウンモデルかボトムアップモデルかハイブリッドモデルか」なる分類があることを説明し、それぞれの分類の著名なモデルを紹介した。加えて、その中でも本研究の基礎となる、応用一般均衡モデルおよび GTAP モデルについての概要を解説した。そして、トップダウン、ボトムアップ、双方のアプローチを可能にするハイブリッドモデルの種類について説明し、本モデルの立ち位置がひとつのモデル内で完結する Integrated 型ハイブリッドモデルであることを示した。

第3章から、本研究が開発した動学的多部門エネルギー経済モデル (DMSEE) の具体的な定式化を開始した。DMSEE は CGE に基づいて構築されたエネルギー経済モデルであるが、一般的な CGE が連立方程式の求解を行うのに対し、DMSEE は独自の線形近似手法を用いることで大規模な連立方程式を、消費の効用関数を目的関数とする線形計画問題に帰着させて求解している。これによって計算時間の大幅な抑制と、モデルの発展性の向上を可能にした。そして、ある部門ある生産過程における非線形生産関数の真値と近似値とを実際に比較し、誤差率が 0.1% 以内に抑えられることを示した。

第4章からは、第3章で説明した DMSEE において、いくつかの部門に着目し、その部門を詳細化することで技術選択を議論可能にした。第4章ではまず電力部門に着眼し、電力部門における技術選択によってどれだ



け経済が変化するか、CO<sub>2</sub> 排出削減が望めるかについて議論した。再生可能エネルギーのより現実的な運用を考えるため、年間を 8,760 分割し 1 時間毎の電力の需給バランスを考えた。計算結果では原子力発電、太陽光発電の重要性が示唆され、また、高い排出税が GDP 増加に繋がるとの示唆も得た。他方、高い排出税は家計の効用を下げる結果となり、GDP だけで議論を行うべきではないという示唆も得た。

第 5 章では、電力部門に加え、非電力エネルギー部門およびエネルギー多消費産業である素材部門のボトムアップ化を行った。素材部門に関しては、鉄鋼部門、セメント部門、石油化学部門、紙・パルプ部門それぞれに詳細が技術選択の余地を与えて、排出税下における CO<sub>2</sub> 排出削減効果について論じた。計算の結果、鉄鋼部門において、高い排出税をかけると次世代型コークス炉を備えた高炉・転炉法がシェアを拡大させたが、石炭を用いた製鉄法では排出量削減効果に限界があり、新しい技術や電気炉法の普及が望まれるという示唆を得た。その他素材部門においては、排出税下において、よりエネルギー原単位の少ない高効率の技術が選択される結果を得た。また、本章の拡張モデルから行った非電力エネルギー部門のボトムアップ化により、一次エネルギー供給から最終エネルギー消費まで詳細に追跡可能になった。計算結果から、高い排出税によってエネルギー消費全体が抑制されるが、本モデルで考慮している省エネ技術は限られており、例えば家計部門や運輸部門における省エネ技術の考慮が早急なモデルの改善点として浮き彫りになった。加えて、本章でも経済的観点からの分析を行った。結果として、投資の促進により GDP の一時的な増加は招くものの、急激な排出税の課税は短期的な価格の急騰を引き起こす可能性が示唆された。また前章と同様に、GDP が増加する一方で消費の効用は減少するという点に対する慎重な議論は必要であるとの示唆を得た。

第 6 では、更に CCS を導入することでどれほど CO<sub>2</sub> 削減効果が望めるかを議論可能にした。CCS は次世代技術であり、その実際の運用は未知な側面が大きい、モデルの拡張性を示すことに成功した。実際には CCS のポテンシャル別に 3 つのシナリオを設定したが、特に超高位ケースでは、ガス火力発電における CCS が重要な役割を担う結果となった。排出量を見ると、特に高排出税ケースでは CCS を導入しない場合に比べて最大で 4% 程排出量が減るという結果を得た。今後、技術開発が進み、信憑性の高い各種パラメータの値が入手可能になれば本モデルでも更に CCS の可能性について議論可能である。

## 7.2 今後の課題・展望

本研究は新規性の高いモデル開発に従事したものであるが、多くの課題を抱えている。

まず BU 部門と TD 部門のより整合的な接続である。第 5 章でも指摘したとおり、実測値である産業連関表の値と、各技術ごとの理論的な工学データとの間に一定の隔たりがあることである。この課題の克服には各部門の投入係数や投資係数等すべての外生データを細かく見ていく必要があり、膨大な時間と労力を要する。しかし、より現実的な分析のためには必須の作業であり、今後の課題である。

続いて GDP および効用の取り扱いである。第 4 章で指摘したとおり、本モデルにおける効用の扱いをより明瞭にする必要がある。現状では排出税をかければかけるほど技術が出尽くさな限り GDP は増加するが、GDP の増加には労働の余暇等の他の経済におけるパラメータも重要な鍵を握るため、経済サイドの議論をより現実的なものとするためには、GDP および効用の取り扱いについて、検討を重ねていく必要があると言える。

TD 部門、家庭部門における省エネ、CO<sub>2</sub> 削減についても議論可能に発展させたい。実社会においても省エネ対策は進んでおり、TD 部門並びに家庭部門においても CO<sub>2</sub> 削減効果の議論が可能なモデルに発展させるべきである。また、現状、CCS は第 6 章で扱っているが、今後のさらなる運用が期待される水素についても考えていきたい。

最後に、世界モデルへの拡張である。現状、対象地域は日本のみとしているが、本モデルでは貿易も考慮可能であるので、対象地域を世界へと広げることが可能である。貿易価格や効用の取り扱い、あるいは工学データの入手等、抱える課題は多いが、今後の展望としたい。

## 受賞歴

- 磯貝 基，小宮山 涼一，藤井 康正，「エネルギー部門を詳細化した動学的多部門エネルギー経済モデルの開発と2050年における日本の最適電源構成の検討」，平成30年電気学会電力・エネルギー部門大会ポスター発表，奨励賞，2018年9月12日，徳島(徳島大学)
- 磯貝 基，小宮山 涼一，藤井 康正，「エネルギー部門を詳細化した動学的多部門エネルギー経済モデルの開発と2050年における日本の最適電源構成の検討」，平成30年電気学会電力・エネルギー部門大会ポスター発表，優秀賞，2018年9月12日，徳島(徳島大学)
- 磯貝 基，小宮山 涼一，藤井 康正，「エネルギー部門を詳細化した動学的多部門エネルギー経済モデルの開発と日本における最適電源運用の検討」，第37回エネルギー・資源学会，学生発表賞，2018年6月12日，大阪(グランキューブ大阪)

# 謝辞

時の流れに対して抱く感覚は人それぞれだと思いますが、私にとって博士後期課程の3年間は、まるで、再度この身を投じれば飲み込まれてしまいそうな、それほどに速く激しいものでした。時間的には連続している博士前期(修士)課程と後期課程ですが、求められる専門性と研究に対する姿勢は比べ物にならず、その厳しさを目の当たりにする日々でした。しかし、何とかここまでたどり着くことができたのは、研究室の指導教官である東京大学大学院工学系研究科教授 藤井康正教授と東京大学大学院工学系研究科准教授 小宮山涼一博士のご指導あったればこそであり、この場を借りて厚く御礼申し上げます。研究分野の最新動向や深い洞察に基づく将来の見通し等の大局的なものから、モデル開発そのものにおける細かな助言まで、研究の血肉になるようなご指導に心から感謝いたします。ありがとうございました。

博士論文審査に際しまして、東京大学大学院工学系研究科教授 山口彰博士、東京大学大学院工学系研究科教授 吉田好邦博士、早稲田大学社会科学総合学術院教授 鷺津明由博士よりご助言を賜り、博士研究をより充実させることができました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

藤井・小宮山研究室のメンバーにも大変支えられました。特に同じ研究分野であり、共通の趣味も多い同研究室修士課程2年生の大谷尚徹君の存在は、私の心の拠り所でもありました。彼とともに同じ研究分野を少しでも発展させることができたことを誇りに思うと同時に、毎日のように顔を合わせて話をしていた日々が終わろうとしていること、本当に寂しく思います。またいつか、彼とともに何かに向かえるなら、こんなに嬉しいことはありません。

そして、私のすべてを理解し、いつも支えてくれた家族、恋人には、感謝してもしきれません。これからの恩返しをここに誓いながら、謝辞の締めくくりといたします。

本当にありがとうございました。

2020年2月 磯貝 基

# 付録

## A GTAP-POWER で定義される部門一覧

GTAP-POWER では部門が 65 部門用意されている。以下にそれぞれの説明を与える。

表 A.1 : GTAP-POWER で定義される部門一覧

番号	部門	説明
1	<i>pdr</i>	稲作生産業: 玄米, 白米
2	<i>wht</i>	小麦生産業: 小麦, メスリン
3	<i>gro</i>	その他穀物生産業: トウモロコシ, 大麦, ライ麦, 燕麦, その他穀物
4	<i>v_f</i>	野菜 & フルーツ生産業: 野菜, 果菜類, 果物, ナッツ, ジャガイモ, キャッサバ, トリュフ
5	<i>osd</i>	脂肪種子生産業: 脂肪種子, 油性果物; 大豆, コブラ
6	<i>c_b</i>	食用茎 & 食用根生産業: サトウキビ, テンサイ
7	<i>pfb</i>	食物繊維生産業: コットン, アマ, タイマ, サイザル麻, 繊維製品に使用される生果菜材料
8	<i>ocr</i>	その他穀物生産業: 生きた植物; 切花, 花芽; 花や果実の種; 野菜の種, 喫飲料作物, 香辛料作物, 未加工のタバコ, 穀物の藁, 殻, 殺虫剤, かび防止剤, 類似品, テンサイの種と飼料植物 (他の生植物性材料) の種, スウェーデンカブ, トウヂシャ. 飼料ルーツ, 干し草, アルファルファ, クローバー, イガマメ, 飼料ケール, ルピナス, ソラマメ類と類似した飼料製品 (香水で主に使われる植物の植物の一部)
9	<i>ctl</i>	畜牛業: 牛, 羊, ヤギ, 馬, ロバ, ラバ, ケッテイ, それらの精液
10	<i>oap</i>	その他家畜業: 豚, 家禽, その他の生き物; 生卵, 加工卵, はちみつ, 生のあるいは保存されたカタツムリ (海産巻貝を除く); 食用カエルの足, その他食用動物, 皮膚, 皮, 毛皮, 虫白蠟, 鯨蠟 (加工有無に関わらず)
11	<i>rmk</i>	生乳生産業: 生乳
12	<i>wol</i>	羊毛生産業: 羊毛, 絹, その他織元して使われる動物の毛
13	<i>frs</i>	林業: 木材伐採業, 木材の搬出業, その他関連業
14	<i>fsh</i>	漁業: 捕獲, 養魚, 繁殖, その他漁業関連業
15	<i>coa</i>	石炭業: 採鉱業, 亜炭, 泥炭, 無煙炭の凝集
16	<i>oil</i>	製油業 (原油と天然ガスの抽出), 測量を除くその他の関連業
17	<i>gas</i>	製ガス業 (原油と天然ガスの抽出), 測量を除くその他の関連業
18	<i>omn</i>	その他鉱業 (その他金属鉱物の採鉱, 採石): ウラン, 宝石
19	<i>cmt</i>	食用牛畜産業: 生あるいは冷凍の牛肉, 食用の牛, 羊, ヤギ, 馬, ロバ, ラバ, ケッテイ, 動物性油脂
20	<i>omt</i>	その他肉に関する産業 (保存, 準備): 豚肉, 豚くず肉, 血液

番号	部門	説明
21	<i>vol</i>	植物性油生産業: 大豆, とうもろこし, オリーブ, ごま, ピーナッツ, ひまわりの種, ベニバナ, 綿の種子, セイヨウアブラナ, キャノーラ等の油, マスタード, ココ椰子, オイル椰子の実, ビーバー香, ホホバ油, 羽状葉ヤシ, 亜麻の種子 (一部, あるいはすべて水素化, エステル化, 最エステル化されたもの). マーガリン, and 類似物, 動物あるいは植物の蜜蝋, 脂肪, コットンリンター, 油かす, その他植物油の抽出で出てきた固体のかす
22	<i>mil</i>	牛乳生産業: 乳製品
23	<i>pcr</i>	精米されたお米
24	<i>sgr</i>	砂糖生産業: 砂糖
25	<i>ofd</i>	その他食品業: 保存された魚, 野菜, フルーツ, フルーツジュース, 野菜ジュース, 木の実, すべての穀粉, 麦, 小麦のペレット, その他穀粒製品 (コーンフレークを含む), その他植物粉, パンの生地, 澱粉と澱粉製品, 砂糖, 砂糖シロップ, 動物の餌, パン製品, ココア, チョコレートおよび砂糖菓子類. マカロニ, 麺類, クスクスと類似した粉製の製品等
26	<i>b_t</i>	飲料, タバコ生産業: 飲料, タバコ
27	<i>tex</i>	織物生産業: 織物および人造繊維
28	<i>wap</i>	衣服業 (製造と仕上げ): 衣服, 毛皮染め
29	<i>lea</i>	革物製造業 (製造と仕上げ): 旅行かばん, ハンドバッグ, 馬具, 履物類
30	<i>lum</i>	製材業: 家具を除く材木製品, コルク製品, わら製品, 編み製品
31	<i>ppp</i>	製紙業 (出版, 印刷, 記録媒体の複製を含む)
32	<i>p_c</i>	石油 & コークス製造業: コークス炉製造物, 精製された石油製品, 加工された核燃料
33	<i>crp</i>	化学ゴム製造業: 基礎化学製品, その他化学製品, ゴム, プラスチック製品
34	<i>nmm</i>	非金属鉱物製造業: セメント, 石膏, 石灰, 砂利, コンクリート
35	<i>i_s</i>	鉄 & 鋼製造業: 基礎製造物と鋳造
36	<i>nfm</i>	非鉄金属製造業: 銅, アルミ, 亜鉛, 鉛, 金, 銀製造物と鋳造
37	<i>fmp</i>	金属製造業: 機械装置を除く板金製品
38	<i>mvh</i>	自動車と部品製造業: 車, タンクローリー, トレーラー, セミトレーラー
39	<i>otn</i>	その他輸送装置製造業: その他輸送装置
40	<i>ele</i>	電子装置製造業: オフィス, 会計および計算機械, ラジオ, テレビ, 通信機器, 装置
41	<i>ome</i>	その他機械と器材の製造業: 電気機械と装置, 医療機器, 精密機器, 光学機器, 腕時計, 時計
42	<i>omf</i>	その他製造業 (リサイクルも含む)
43	<i>TnD</i>	送電・配電
44	<i>NuclearBL</i>	原子力発電 (ベースロード)
45	<i>CoalBL</i>	石炭火力発電 (ベースロード)
46	<i>GasBL</i>	ガス火力発電 (ベースロード)
47	<i>WindBL</i>	風力発電 (ベースロード)
48	<i>HydroBL</i>	水力発電 (ベースロード)
49	<i>OilBL</i>	石油火力発電 (ベースロード)
50	<i>OtherBL</i>	その他発電 (ベースロード)
51	<i>GasP</i>	ガス火力発電 (ピークロード)
52	<i>HydroP</i>	水力発電 (ピークロード)

番号	部門	説明
53	<i>OilP</i>	石油火力発電 (ピークロード)
54	<i>SolarP</i>	太陽光発電 (ピークロード)
55	<i>gdt</i>	ガス配給業: 配管を使ったガス燃料の配布; 蒸気と湯の供給
56	<i>wtr</i>	水製造業: 採取, 精製, 配布
57	<i>cns</i>	建設業: 家, 向上, オフィス, 道路の建築
58	<i>trd</i>	取引業 (すべての小売販売, 卸売業と委員会との取引, ホテルとレストラン, 自動車と家庭商品の修繕, 自動車用燃料の小売販売)
59	<i>otp</i>	その他の輸送業: 交通, 鉄道; パイプライン, 補助交通; 旅行代理店
60	<i>wtp</i>	水上輸送業
61	<i>atp</i>	航空輸送業
62	<i>cmn</i>	通信業: 郵便, 電話
63	<i>ofi</i>	その他の財政的介入業 (保険, 年金資金提供以外の補助活動を含む)
64	<i>isr</i>	保険業: 年金も含む (義務的な社会保障を除く)
65	<i>obs</i>	その他の事業サービス業: 不動産, レンタル事業活動
66	<i>ros</i>	レクリエーション業, その他サービス業 (レクリエーション的、文化的、スポーツ的な活動、他のサービス活動, 使用人)
67	<i>osg</i>	その他のサービス業, 政府活動 (行政と防御, 必須な社会保障、教育、健康と社会福祉、汚水とゴミ処分、公衆衛生と類似した活動)
68	<i>dwe</i>	住居業: オーナーの賃貸住宅の所有権

## B GTAP-POWER で定義される地域一覧

GTAP-POWER および GTAP 9 では地域が 140 地域に分類されている。以下にそれぞれの説明を与える。

表 B.2 : GTAP-POWER で定義される地域一覧

番号	部門	説明	番号	部門	説明
1	<i>AUS</i>	オーストラリア	34	<i>CHL</i>	チリ
2	<i>NZL</i>	ニュージーランド	35	<i>COL</i>	コロンビア
3	<i>XOC</i>	その他オセアニア	36	<i>ECU</i>	エクアドル
4	<i>CHN</i>	中国	37	<i>PRY</i>	パラグアイ
5	<i>HKG</i>	香港	38	<i>PER</i>	ペルー
6	<i>JPN</i>	日本	39	<i>URY</i>	ウルグアイ
7	<i>KOR</i>	韓国	40	<i>VEN</i>	ベネズエラ
8	<i>MNG</i>	モンゴル	41	<i>XSM</i>	その他南アメリカ
9	<i>TWN</i>	台湾	42	<i>DOM</i>	ドミニカ共和国
10	<i>XEA</i>	その他東アジア	43	<i>JAM</i>	ジャマイカ
11	<i>BRN</i>	ブルネイ	44	<i>HND</i>	ホンジュラス
12	<i>KHM</i>	カンボジア	45	<i>NIC</i>	ニカラグア
13	<i>IDN</i>	インドネシア	46	<i>PAN</i>	パナマ
14	<i>LAO</i>	ラオス	47	<i>SLV</i>	エルサルバドル
15	<i>MYS</i>	マレーシア	48	<i>XCA</i>	その他中央アメリカ
16	<i>PHL</i>	フィリピン	49	<i>DOM</i>	ドミニカ共和国
17	<i>SGP</i>	シンガポール	50	<i>JAM</i>	ジャマイカ
18	<i>THA</i>	タイ	51	<i>PRI</i>	プエルトリコ
19	<i>VNM</i>	ベトナム	52	<i>TTO</i>	トリニダード・トバゴ
20	<i>XSE</i>	その他東南アジア	53	<i>XCB</i>	カリブ
21	<i>BGD</i>	バングラデシュ	54	<i>AUT</i>	オーストリア
22	<i>IND</i>	インド	55	<i>BEL</i>	ベルギー
23	<i>NPL</i>	ネパール	56	<i>CYP</i>	キプロス
24	<i>PAK</i>	パキスタン	57	<i>CZE</i>	チェコ
25	<i>LKA</i>	スリランカ	58	<i>DNK</i>	デンマーク
26	<i>XSA</i>	その他南アジア	59	<i>EST</i>	エストニア
27	<i>CAN</i>	カナダ	60	<i>FIN</i>	フィンランド
28	<i>USA</i>	アメリカ	61	<i>FRA</i>	フランス
29	<i>MEX</i>	メキシコ	62	<i>DEU</i>	ドイツ
30	<i>XNA</i>	その他北アメリカ	63	<i>GRC</i>	ギリシャ
31	<i>ARG</i>	アルゼンチン	64	<i>HUN</i>	ハンガリー
32	<i>BOL</i>	ボリビア	65	<i>IRL</i>	アイルランド
33	<i>BRA</i>	ブラジル	66	<i>ITA</i>	イタリア
67	<i>LVA</i>	ラトビア	105	<i>TUR</i>	トルコ
68	<i>LTU</i>	リトアニア	106	<i>ARE</i>	アラブ首長国連邦
69	<i>LUX</i>	ルクセンブルク	107	<i>XWS</i>	その他西アジア

番号	部門	説明	番号	部門	説明
70	MLT	マルタ	108	EGY	エジプト
71	NLD	オランダ	109	MAR	モロッコ
72	POL	ポーランド	110	TUN	チュニジア
73	PRT	ポルトガル	111	XNF	その他北アフリカ
74	SVK	スロバキア	112	BEN	ベナン
75	SVN	スロベニア	113	BFA	ブルキナファソ
76	ESP	スペイン	114	CMR	カメルーン
77	SWE	スウェーデン	115	CIV	コートジボワール
78	GBR	イギリス	116	GHA	ガーナ
79	CHE	スイス	117	GIN	ギニア
80	NOR	ノルウェイ	118	NGA	ナイジェリア
81	XEF	その他欧州自由貿易連合	119	SEN	セネガル
82	ALB	アルバニア	120	TGO	トーゴ
83	BGR	ブルガリア	121	XWF	その他西アフリカ
84	BLR	ベラルーシ	122	XCF	中央アフリカ
85	HRV	クロアチア	123	XAC	南中央アフリカ
86	ROU	ルーマニア	124	ETH	エチオピア
87	RUS	ロシア	125	KEN	ケニア
88	UKR	ウクライナ	126	MDG	マダガスカル
89	XEE	その他東ヨーロッパ	127	MWI	マラウィ
90	XER	その他ヨーロッパ	128	MUS	モーリシャス
91	KAZ	カザフスタン	129	MOZ	モザンビーク
92	KGZ	キルギス	130	RWA	ルワンダ
93	XSU	その他旧ソビエト	131	TZA	タンザニア
94	ARM	アルメニア	132	UGA	ウガンダ
95	AZE	アゼルバイジャン	133	ZMB	ザンビア
96	GEO	ジョージア	134	ZWE	ジンバブエ
97	BHR	バーレーン	135	XEC	その他東アフリカ
98	IRN	イラン	136	BWA	ボツワナ
99	ISR	イスラエル	137	NAM	ナミビア
100	JOR	ヨルダン	138	ZAF	南アフリカ
101	KWT	クウェート	139	XSC	その他南アフリカ関税同盟
102	OMN	オマーン	140	XTW	その他地域
103	QAT	カタール			
104	SAU	サウジアラビア			



## C 本モデルで使用する GTAP データベースの主要変数一覧

下表??は GTAP で使用されている主要変数一覧である。

表 C.3: 本モデルで使用する GTAP データベースの主要変数一覧.

変数名	正式名称	説明
$VOM_{n,r}$	Value of Output at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における $n$ アクティビティの総額
$VOA_{n,r}$	Value of Output at Agent' prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域における $n$ アクティビティの総額
$VDFM_{m,n,r}$	Value of Domestic Firm's purchases at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における $n$ アクティビティにおける企業による国内財 $m$ の総額
$VDFAm,n,r$	Value of Domestic purchases by Firms at Agents' prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の国内財 $m$ の中間投入額
$VDPM_{m,r}$	Value of Domestic Personal purchases at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における民間による国内財 $m$ の総額
$VDPA_{m,r}$	Value of Domestic Personal purchases at Agent prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域における民間による国内財 $m$ の総額
$VDGM_{m,r}$	Value of Domestic Government purchases at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における政府による国内財 $m$ の総額
$VDGA_{m,r}$	Value of Domestic Government purchases at Agent prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域における政府による国内財 $m$ の総額
$VIFM_{m,n,r}$	Value of Import Firm's purchases at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における $n$ アクティビティにおける企業による輸入財 $m$ の総額
$VIFAm,n,r$	Value of Import Firm's purchases at Agent prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域における $n$ アクティビティにおける企業による輸入財 $m$ の総額
$VIPM_{m,r}$	Value of Import Personal purchases at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における民間による輸入財 $m$ の総額
$VIPAm,r$	Value of Import Personal purchases at Agent prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域における民間による輸入財 $m$ の総額
$VIGM_{m,r}$	Value of Import Government purchases at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域における政府による輸入財 $m$ の総額
$VIGAm,r$	Value of Import Government purchases at Agent prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域における政府による輸入財 $m$ の総額
$VXMD_{m,r,s}$	Value of eXports at Market prices by Destination	$r$ 地域における市場価格で表現された、 $r$ 地域から $s$ 地域へ輸送される財 $m$ の総額
$XTAXD_{m,r,s}$	tax on exports	$m$ 財を $r$ 地域から $s$ 地域へ輸送する際に発生する輸出税の総額

変数名	正式名称	説明
$VXWD_{m,r,s}$	Value of eXports at World prices by Destination	FOB 世界価格で表現された、 $r$ 地域から $s$ 地域へ輸出される財 $m$ の総額
$VTWR_{m,r,s}$	Value of Transportation at World prices by Route	世界価格で表現された、 $r$ 地域から $s$ 地域へ $m$ 財を輸送する際に発生する輸送サービスの供給総額
$VIWS_{m,r,s}$	Value of Imports at World prices by Source	CIF 世界価格で表現された、 $r$ 地域から $s$ 地域へ輸出される財 $m$ の総額
$MTAX_{m,r,s}$	tax on imports	$m$ 財を $r$ 地域から $s$ 地域へ輸送する際に発生する輸入税の総額
$VIMS_{m,r,s}$	Value of Imports at Market prices by Source	$s$ 地域における市場価格で表現された、 $r$ 地域から $s$ 地域へ輸出される $m$ 財の総額
$VST_{w,r}$	exports of international transport service	$r$ 地域における市場価格で表現された、国際輸送サービス $w$ への輸出総額
$DFTAX_{m,n,r}$	TAX of Domestic Firms' purchases	$r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の国内財 $m$ の投入に要する税金
$IFTAX_{m,n,r}$	TAX of Import Firms' purchases	$r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の輸入財 $m$ の投入に要する税金
$VIFA_{m,n,r}$	Value of Import purchases by Firms at Agents' prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の輸入財 $m$ の中間投入額
$VIFM_{m,n,r}$	Value of Import purchases by Firms at Market prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の輸入財 $m$ の中間投入額
$EVFA_{e,n,r}$	Value of Firms' purchases of production Elements at Agent prices	当事者価格で表現された、 $r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の $e$ 生産の総額
$EVFM_{e,n,r}$	Value of Firms' purchases of production Elements at Agent prices	市場価格で表現された、 $r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の $e$ 生産の総額
$FTAX_{n,r}$	Fixed assets TAX	$r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の固定資産税
$LTAX_{n,r}$	Labor TAX	$r$ 地域におけるアクティビティ $n$ の労働税
$GWH_{n,r}$	Power Generation	$r$ 地域における電力アクティビティ $n$ の発電量

## D CES 型関数の様々な形

本節では、3.3.1 項で扱った、CES 型関数の特殊型 (Leontief 型と Cobb-Douglas 型) の導出を行う。簡単のため、 $\rho = (\sigma - 1)/\sigma$  を用いた、

$$y = \left( \sum_i b_i x_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (b_i, x_i \geq 0, b_i^\exists, x_i^\exists > 0) \quad (\text{D.1})$$

について考える。

## Leontief 型

$\sigma \rightarrow 0$  の形を考えることは, (D.1) 式において,  $\rho \rightarrow -\infty$  を考えることと同値である. さて, (D.1) 式の両辺の  $\log$  を取る\*1と,

$$\log y = \frac{\log \left( \sum_i b_i x_i^\rho \right)}{\rho} \quad (\text{D.2})$$

となる. (D.3) 式の右辺の分母と分子はそれぞれ  $\rho \rightarrow -\infty$  において負の無限大に発散 (すなわち不定形) し, かつそれぞれ微分可能であるため, l'Hôpital の定理より,

$$\lim_{\rho \rightarrow -\infty} ((\text{D.3}) \text{ 式の右辺}) = \lim_{\rho \rightarrow -\infty} \frac{d}{d\rho} \left( \log \left( \sum_i b_i x_i^\rho \right) \right) \quad (\text{D.3})$$

$$= \lim_{\rho \rightarrow -\infty} \frac{\sum_i b_i x_i^\rho \log x_i}{\sum_i b_i x_i^\rho} \quad (\text{D.4})$$

$$= \lim_{\rho \rightarrow -\infty} \frac{b_1 \left( \frac{x_1}{x_j} \right)^\rho \log x_1 + b_2 \left( \frac{x_2}{x_j} \right)^\rho \log x_2 + \cdots + b_j \left( \frac{x_j}{x_j} \right)^\rho \log x_j + \cdots}{b_1 \left( \frac{x_1}{x_j} \right)^\rho + b_2 \left( \frac{x_2}{x_j} \right)^\rho + \cdots + b_j \left( \frac{x_j}{x_j} \right)^\rho + \cdots} \quad (\text{D.5})$$

$$(j \in \mathbb{N}, \min \{x_1, x_2, \dots, x_j, \dots\} = x_j)$$

$$= \lim_{\rho \rightarrow -\infty} \frac{b_1 \left( \frac{x_1}{x_j} \right)^\rho \log x_1 + b_2 \left( \frac{x_2}{x_j} \right)^\rho \log x_2 + \cdots + b_j \log x_j + \cdots}{b_1 \left( \frac{x_1}{x_j} \right)^\rho + b_2 \left( \frac{x_2}{x_j} \right)^\rho + \cdots + b_j + \cdots} \quad (\text{D.6})$$

$$= \frac{b_j \log x_j}{b_j} \quad (\text{D.7})$$

$$= \log x_j \quad (\text{D.8})$$

となる. したがって,

$$y = \left( \sum_i b_i x_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} \xrightarrow{\rho \rightarrow -\infty} \min \{x_1, x_2, \dots\} \quad (\text{D.9})$$

となり, Leontief 関数が導出された.

## Cobb-Douglas 型

$\sigma \rightarrow 1$  の形を考えることは, (D.1) 式において,  $\rho \rightarrow 0$  を考えることと同値である. 先程と同様に, (D.1) 式

---

\*1 (D.1) 式における  $\beta$  と  $x$  の条件から, 両辺正であることは保証済み.

の両辺の  $\log$  を取り, l'Hôpital の定理を適用して求める.

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} ((D.3) \text{ 式の右辺}) = \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{\sum_i b_i x_i^\rho \log x_i}{\sum_i b_i x_i^\rho} \quad (D.10)$$

$$= \frac{\sum_i b_i \log x_i}{\sum_i b_i} \quad (D.11)$$

$$= \frac{\log \prod_i x_i^{b_i}}{\sum_i b_i} \quad (D.12)$$

$$= \log \left( \prod_i x_i^{b_i} \right)^{1/\sum_i b_i} \quad (D.13)$$

と計算できるので,

$$y = \left( \sum_i b_i x_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} \xrightarrow{\rho \rightarrow 0} \left( \prod_i x_i^{b_i} \right)^{1/\sum_i b_i} \quad (D.14)$$

となり, Cobb-Douglas 関数が導出された.

## E 投入係数 $\beta$ の導出

本節は, 生産関数  $Y$  が下式 (E.1) 式の CES 型で与えられるとき, 資本  $K$ , 労働  $L$  それぞれの投入係数  $\beta_K$ ,  $\beta_L$  を  $K, L, P_K, P_L$  の関数として求めることを目的とする. ただし, これ以降は一般化のため, 変数の添字は省略して表記する.

$$Y = (a_K K^\rho + a_L L^\rho)^{\frac{1}{\rho}} \quad (E.1)$$

$\rho$  は定数,  $a_K, a_L$  は  $K, L, P_K, P_L$  の関数であり, 後の計算過程で導出される.

ある生産アクティビティにおいて, コスト  $c$  の最小化を仮定する. すなわち,

$$\text{minimize } c = K \cdot P_K + L \cdot P_L \quad (E.2)$$

$$\text{s.t. } Y = (a_K K^\rho + a_L L^\rho)^{\frac{1}{\rho}} \quad (E.3)$$

を仮定する. 包絡線定理より, 上式のラグランジアン  $\mathcal{L}$  を考えて,

$$\mathcal{L} = K \cdot P_K + L \cdot P_L + \lambda (Y^\rho - a_K K^\rho - a_L L^\rho) \quad (E.4)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K} = P_K - \lambda \cdot \rho \cdot a_K K^{\rho-1} = 0 \quad (E.5)$$

$$\therefore P_K = \lambda \cdot \rho \cdot a_K K^{\rho-1} \Leftrightarrow K^\rho = \left( \frac{P_K}{\lambda \cdot \rho \cdot a_K} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \quad (E.6)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial L} = P_L - \lambda \cdot \rho \cdot a_L L^{\rho-1} = 0 \quad (E.7)$$

$$\therefore P_L = \lambda \cdot \rho \cdot a_L L^{\rho-1} \Leftrightarrow L^\rho = \left( \frac{P_L}{\lambda \cdot \rho \cdot a_L} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \quad (E.8)$$

$\lambda$  は未定乗数であり, (E.1) 式に (E.6), (E.8) を代入することで,

$$Y = \left( \frac{1}{\lambda \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{\rho-1}} \left( a_K \left( \frac{P_K}{a_K} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + a_L \left( \frac{P_L}{a_L} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (\text{E.9})$$

$$\lambda = \frac{1}{\rho \cdot Y^{\rho-1}} \left( a_K \left( \frac{P_K}{a_K} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + a_L \left( \frac{P_L}{a_L} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (\text{E.10})$$

と書ける. (E.10) 式を (E.6) および (E.8) 式の第 1 式に代入して価格を求め, (E.2) に代入すると,

$$c = K \cdot \frac{a_K K^{\rho-1}}{Y^{\rho-1}} \left( a_K \left( \frac{P_K}{a_K} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + a_L \left( \frac{P_L}{a_L} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} + L \cdot \frac{a_L L^{\rho-1}}{Y^{\rho-1}} \left( a_K \left( \frac{P_K}{a_K} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + a_L \left( \frac{P_L}{a_L} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (\text{E.11})$$

$$= \frac{1}{Y^{\rho-1}} (a_K K^\rho + a_L L^\rho) \left( a_K \left( \frac{P_K}{a_K} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + a_L \left( \frac{P_L}{a_L} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (\text{E.12})$$

$$= Y \left( a_K \left( \frac{P_K}{a_K} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + a_L \left( \frac{P_L}{a_L} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (\text{E.13})$$

Shephard の補題より, コストを価格微分すると変数量に等しくなるので,

$$K = \frac{\partial c}{\partial P_K} = \left( \frac{P_K}{a_K} \right)^{\frac{1}{\rho-1}} \cdot Y \left( a_K \left( \frac{P_K}{a_K} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + a_L \left( \frac{P_L}{a_L} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho}} \quad (\text{E.14})$$

$$L = \frac{\partial c}{\partial P_L} = \left( \frac{P_L}{a_L} \right)^{\frac{1}{\rho-1}} \cdot Y \left( a_K \left( \frac{P_K}{a_K} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + a_L \left( \frac{P_L}{a_L} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho}} \quad (\text{E.15})$$

$$(\text{E.16})$$

が成立する. よって, 資本, 労働の投入係数  $\beta_K, \beta_L$  はそれぞれ

$$\beta_K = \left( \frac{P_K}{a_K} \right)^{\frac{1}{\rho-1}} \left( a_K \left( \frac{P_K}{a_K} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + a_L \left( \frac{P_L}{a_L} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho}} \quad (\text{E.17})$$

$$\beta_L = \left( \frac{P_L}{a_L} \right)^{\frac{1}{\rho-1}} \left( a_K \left( \frac{P_K}{a_K} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + a_L \left( \frac{P_L}{a_L} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{-\frac{1}{\rho}} \quad (\text{E.18})$$

と求められる.

次に  $a_K, a_L$  を導出する. 生産関数を  $K$  と  $L$  それぞれで偏微分すると価格が得られるので,

$$\frac{\partial Y}{\partial K} = a_K \cdot K^{\rho-1} \cdot Y^{1-\rho} = P_K \quad (\text{E.19})$$

$$\frac{\partial Y}{\partial L} = a_L \cdot L^{\rho-1} \cdot Y^{1-\rho} = P_L \quad (\text{E.20})$$

が成立する. それぞれに  $K$  と  $L$  を乗じ和を取ると,

$$a_K \cdot K^\rho \cdot Y^{1-\rho} + a_L \cdot L^\rho \cdot Y^{1-\rho} = LK \cdot P_K + L \cdot P_L \quad (\text{E.21})$$

## G 第5章の結果

第5章で論じたモデル計算の結果について、本文に掲載しなかった結果図を以下に示す。

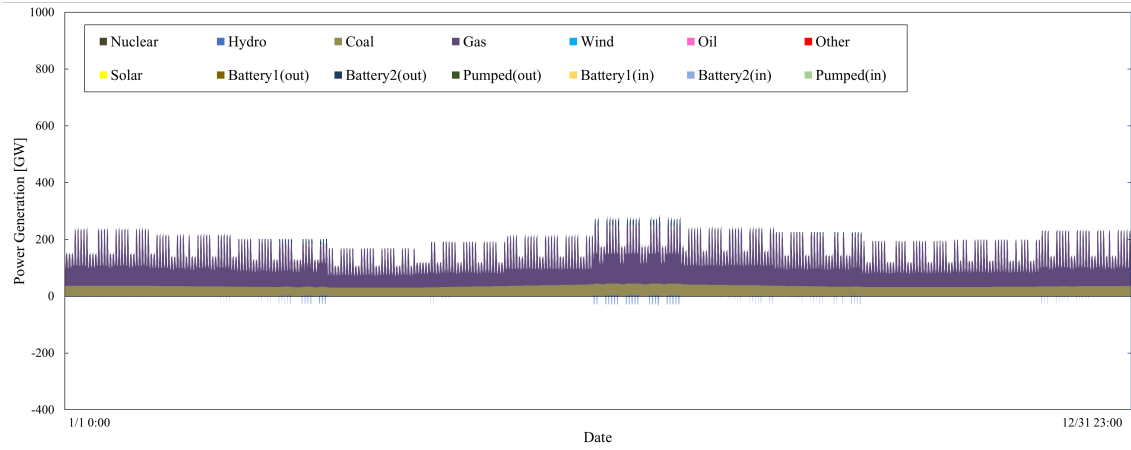


図 F.1 BAU ケースの最適発電パターン (2050 年).

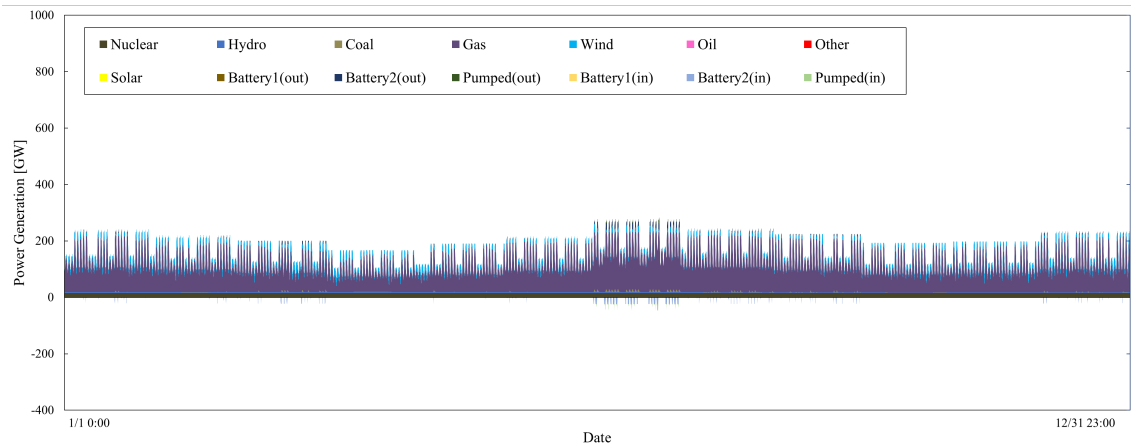


図 F.2 \$10 ケースの最適発電パターン (2050 年).

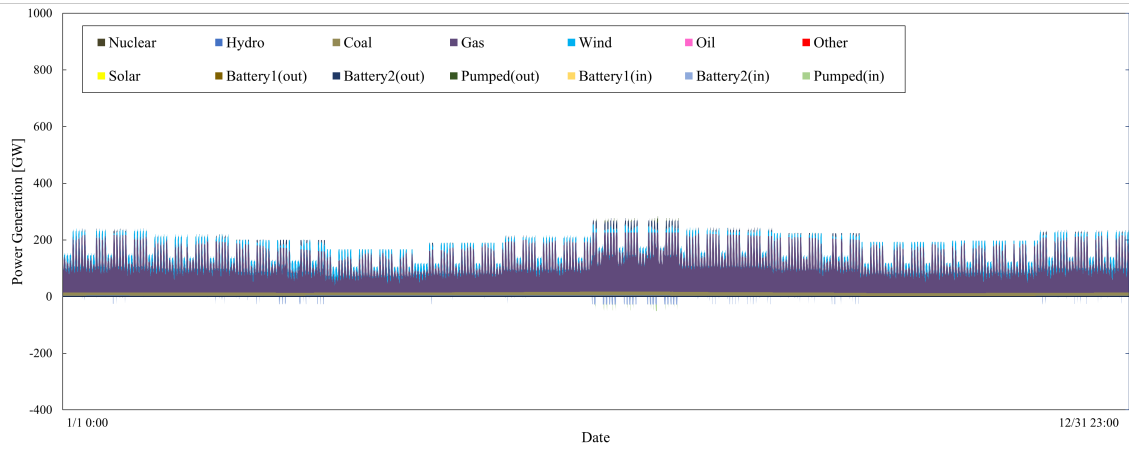


図 F.3 \$10\_N ケースの最適発電パターン (2050 年).

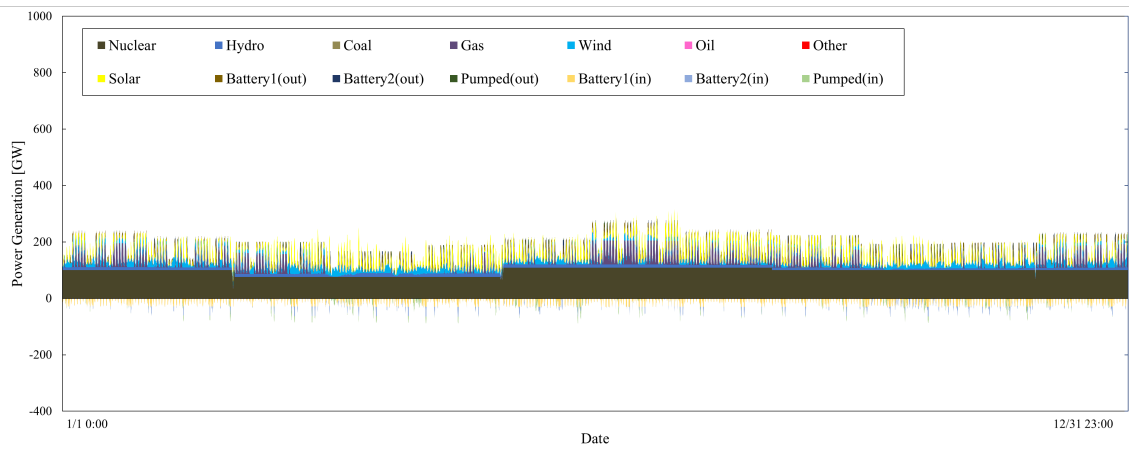


図 F.4 \$50 ケースの最適発電パターン (2050 年).

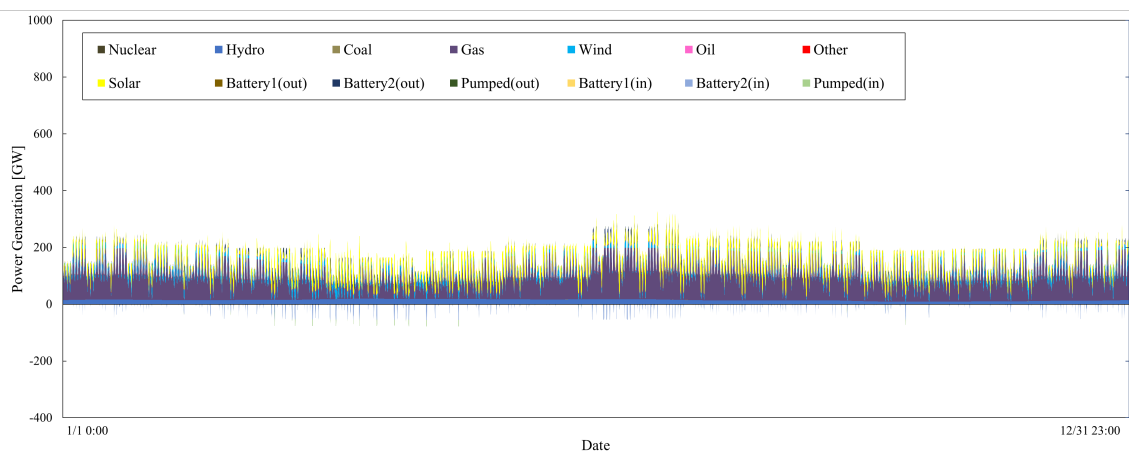


図 F.5 \$50\_N ケースの最適発電パターン (2050 年).

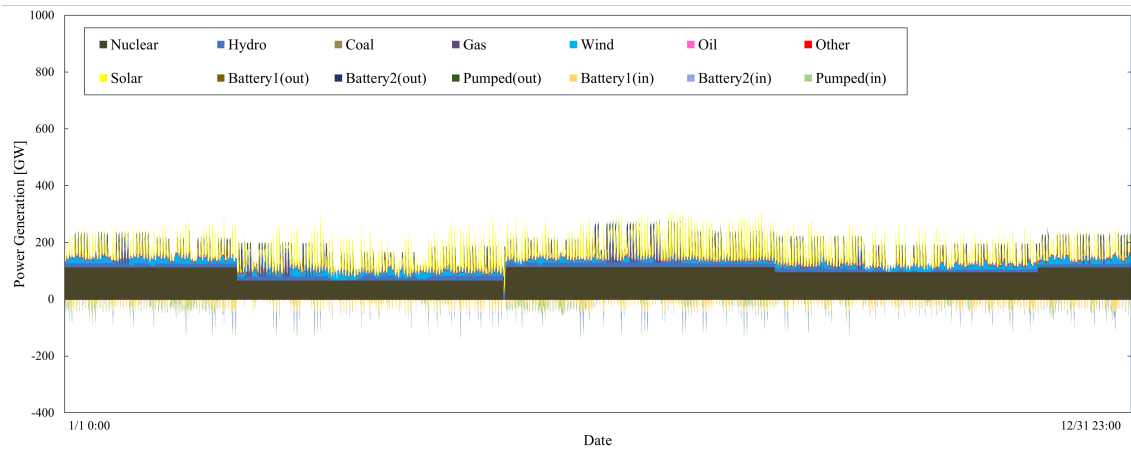


図 F.6 \$150 ケースの最適発電パターン (2050 年).

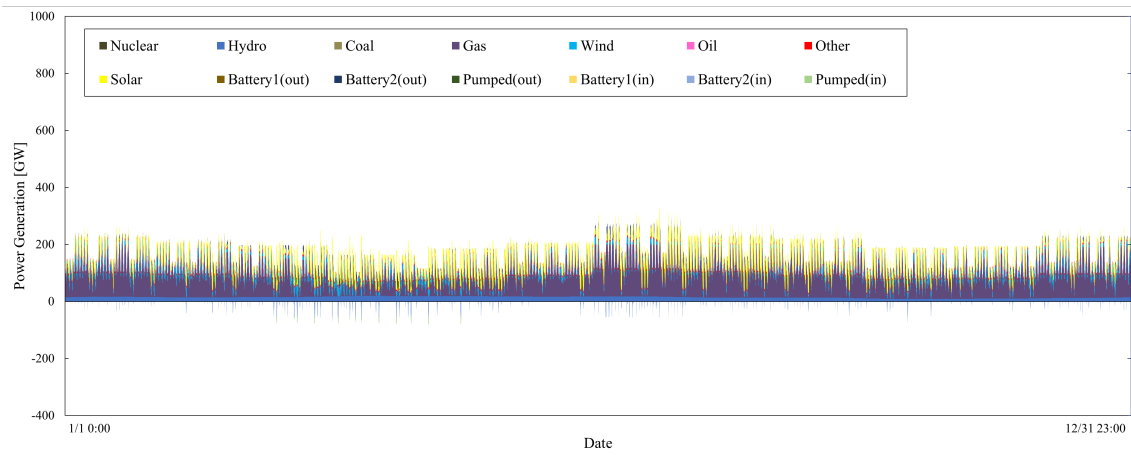


図 F.7 \$150\_N ケースの最適発電パターン (2050 年).

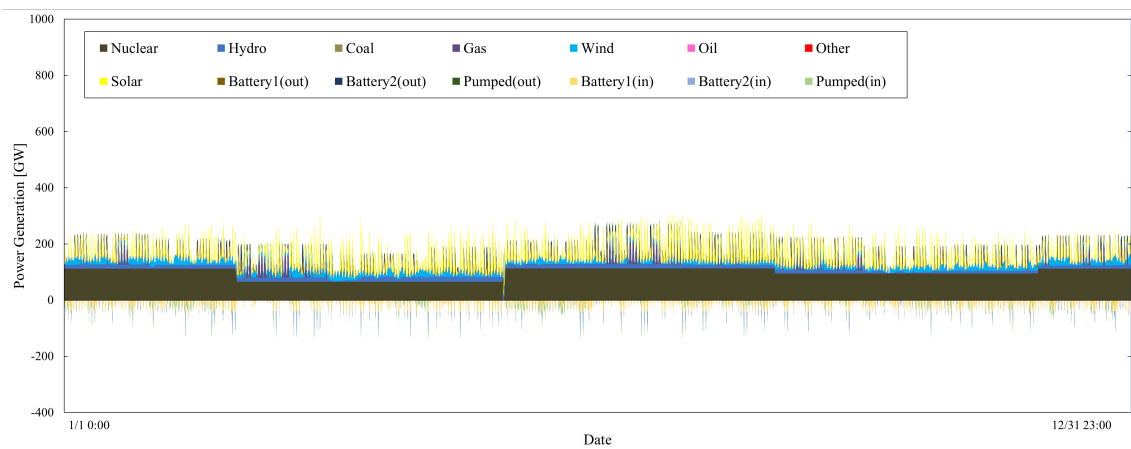


図 F.8 \$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年).



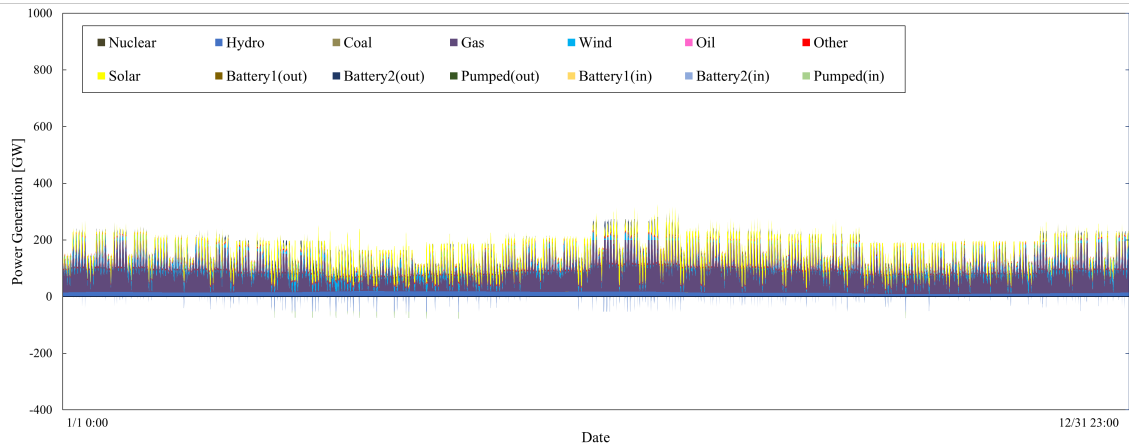


図 F.9 \$RAMP\_N ケースの最適発電パターン (2050 年).

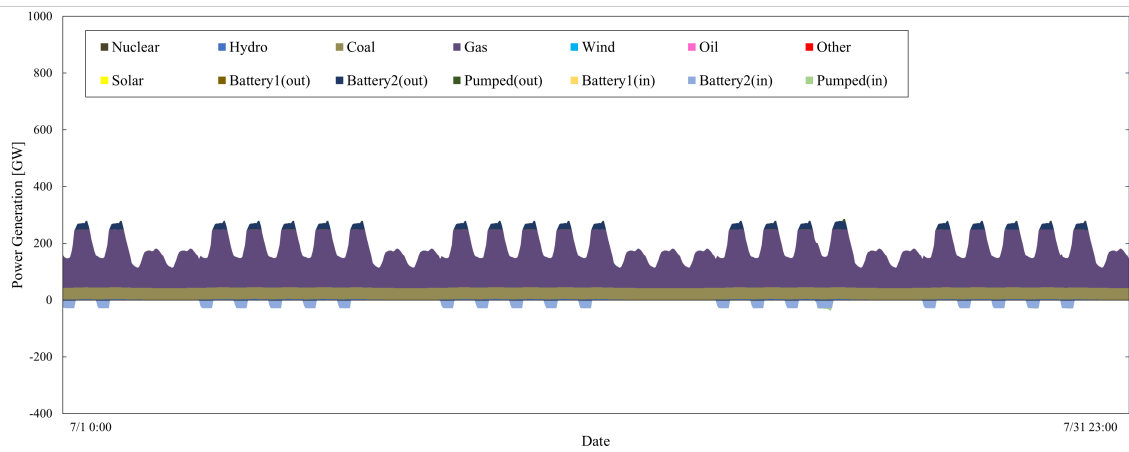


図 F.10 BAU ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

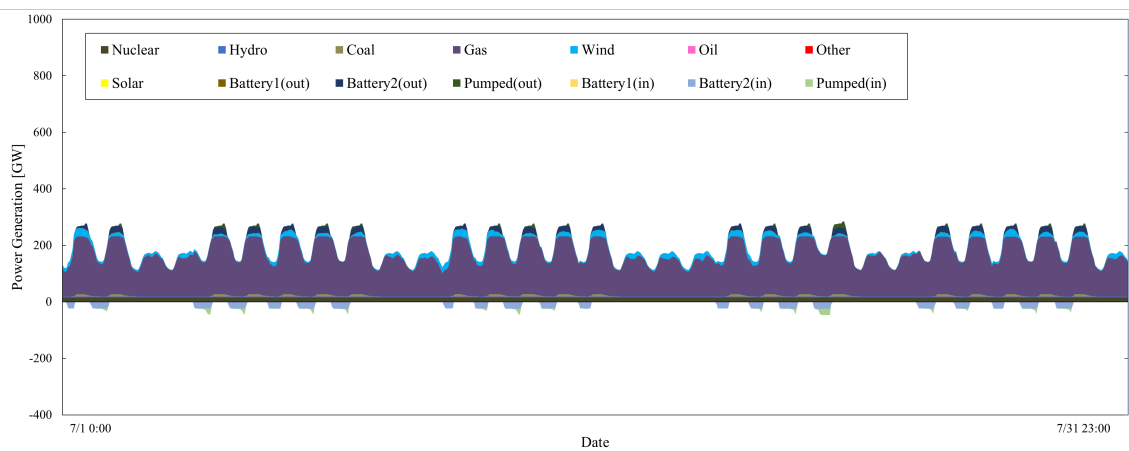


図 F.11 \$10 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

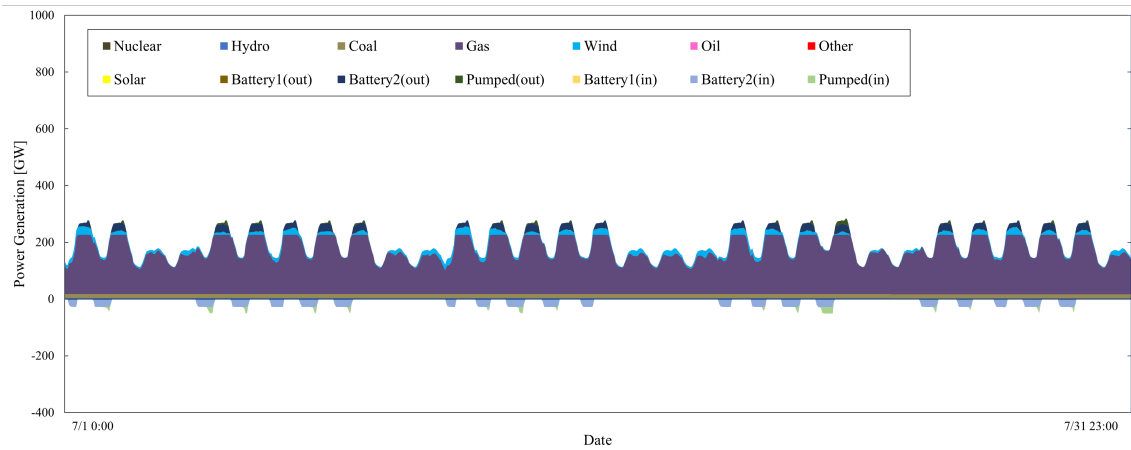


図 F.12 \$10\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

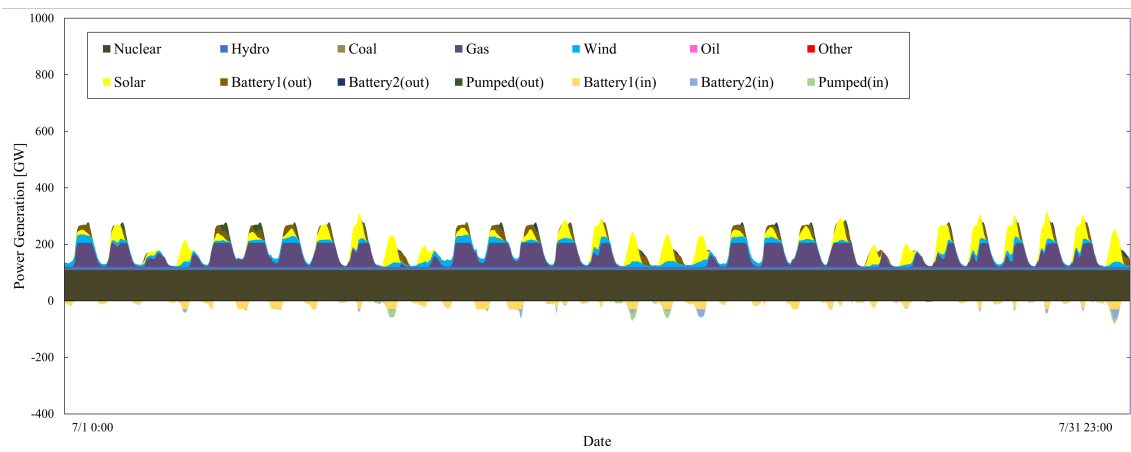


図 F.13 \$50 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

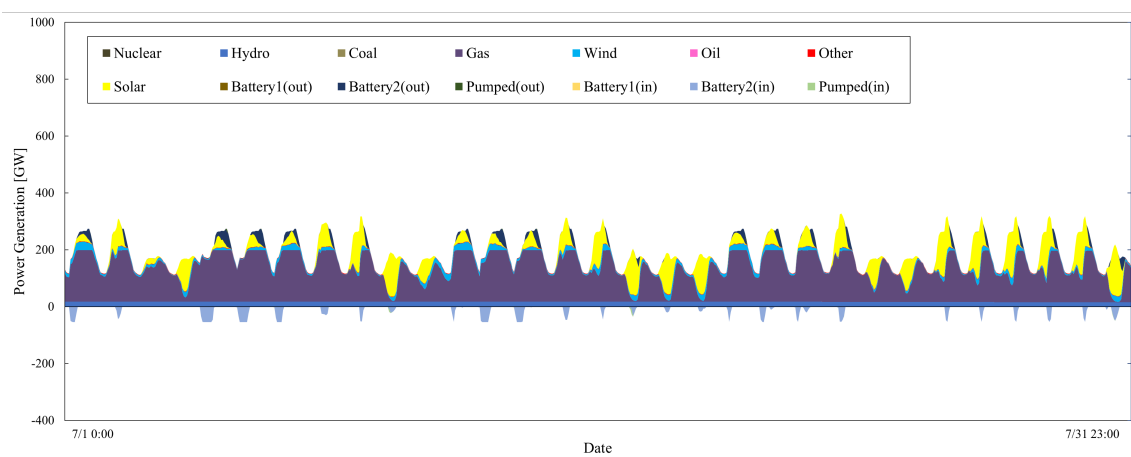


図 F.14 \$50\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

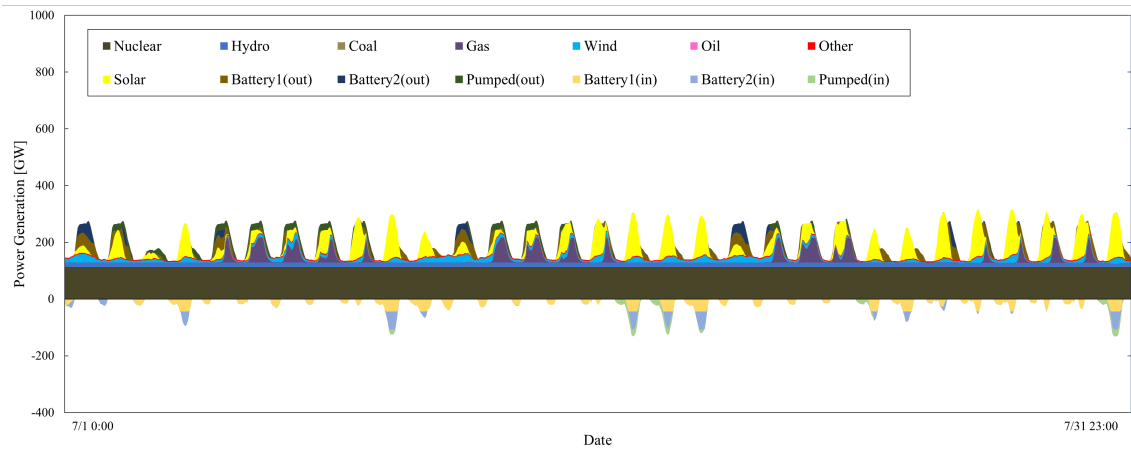


図 F.15 \$150 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

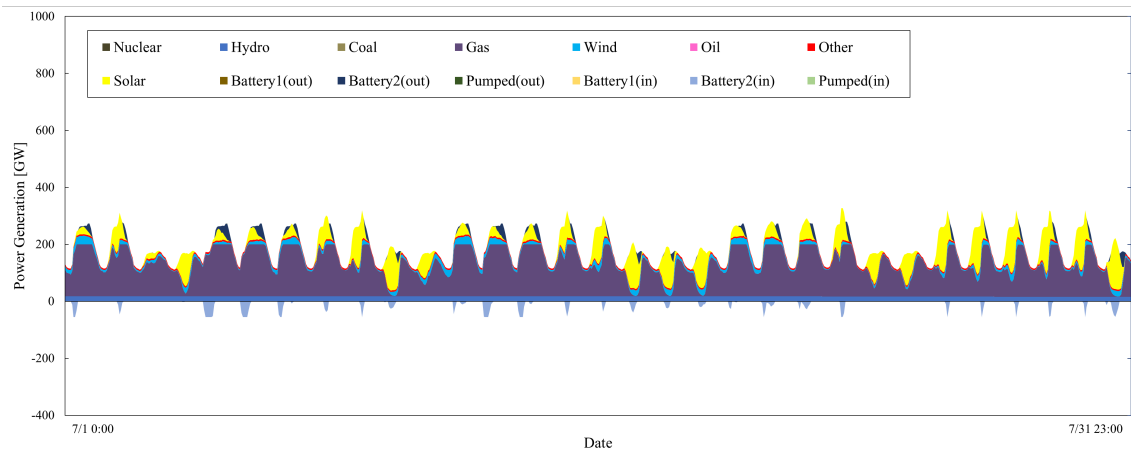


図 F.16 \$150\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

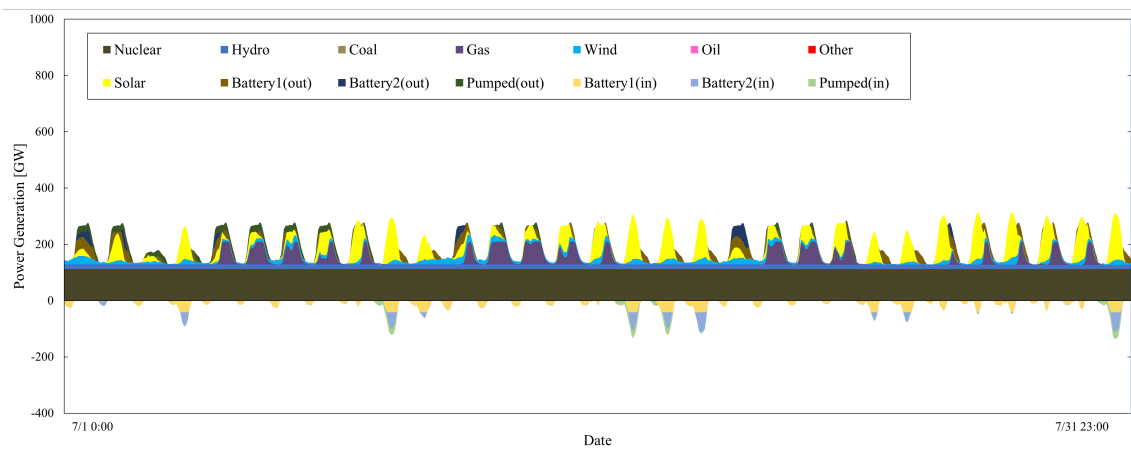


図 F.17 \$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

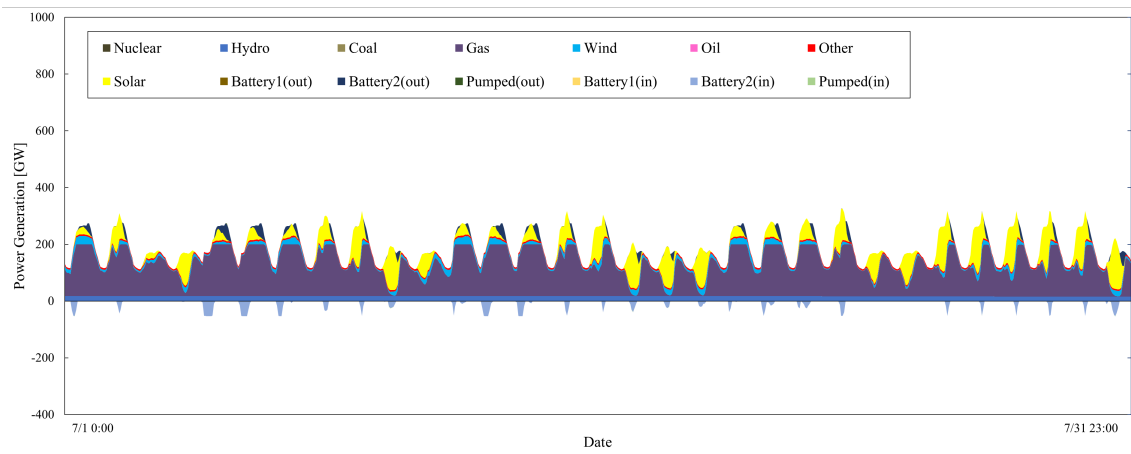


図 F.18 \$RAMP\_N\$ ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月).

## G 第6章の結果

第6章で論じたモデル計算の結果について、本文に掲載しなかった結果図を以下に示す。

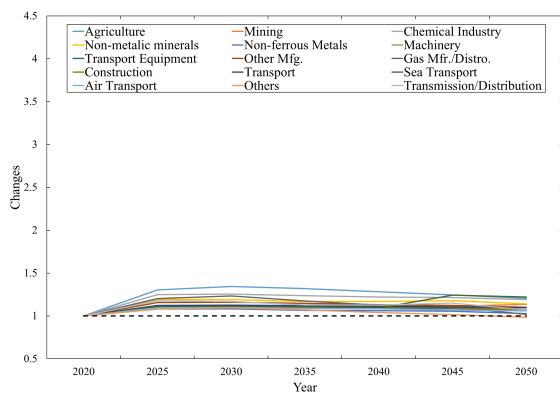


図 G.19 \$10 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

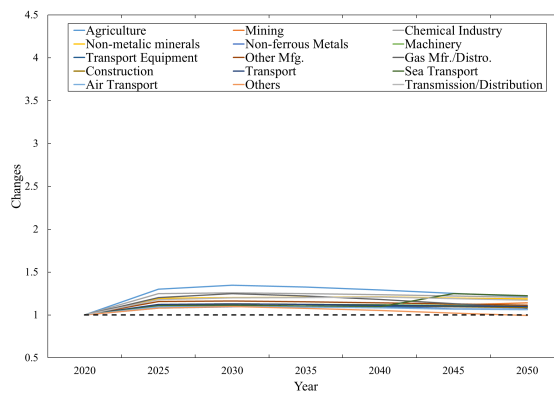


図 G.20 \$10\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

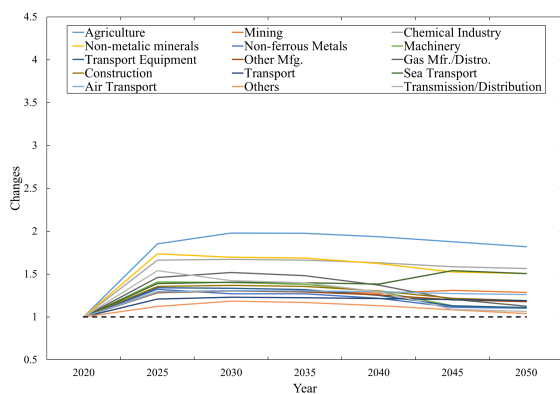


図 G.21 \$50 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

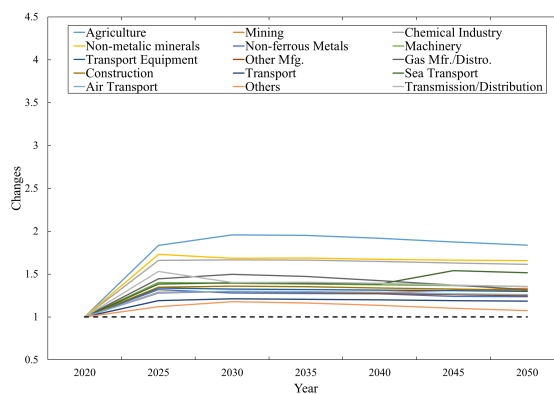


図 G.22 \$50\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

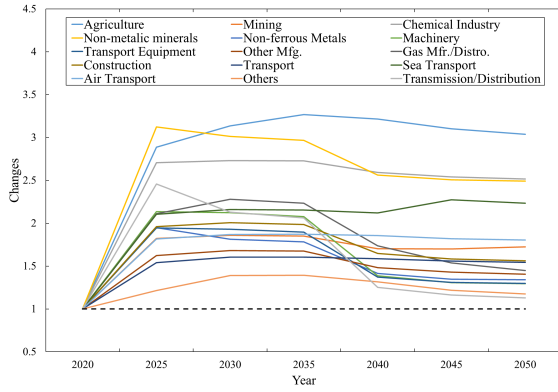


図 G.23 \$150 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

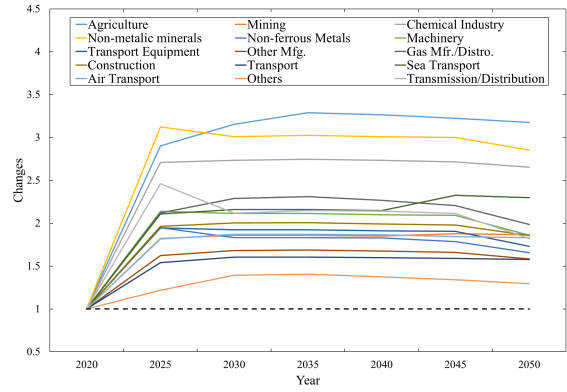


図 G.24 \$150\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

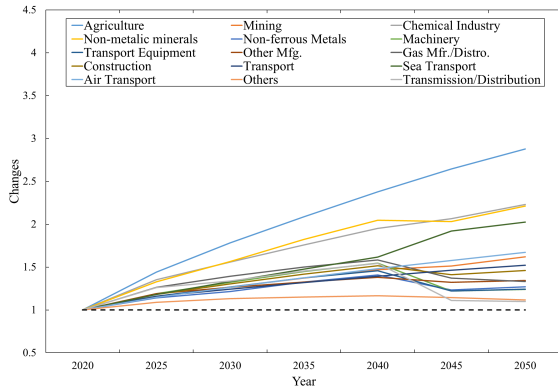


図 G.25 RAMP ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

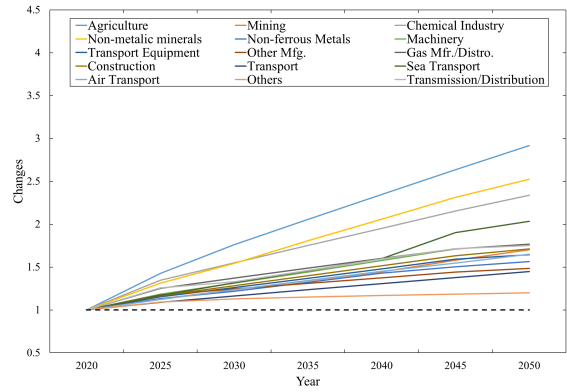


図 G.26 RAMP\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

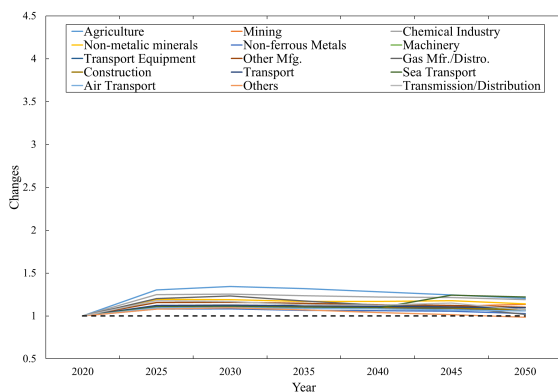


図 G.27 \$10 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

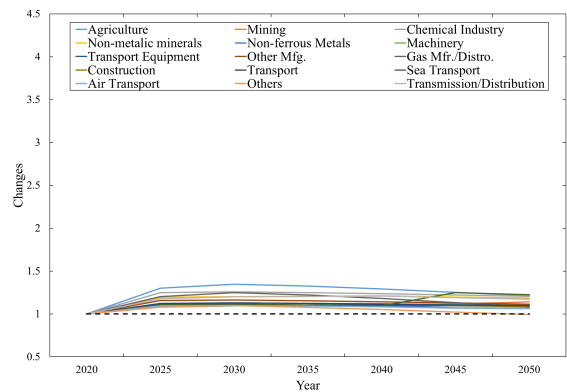


図 G.28 \$10\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

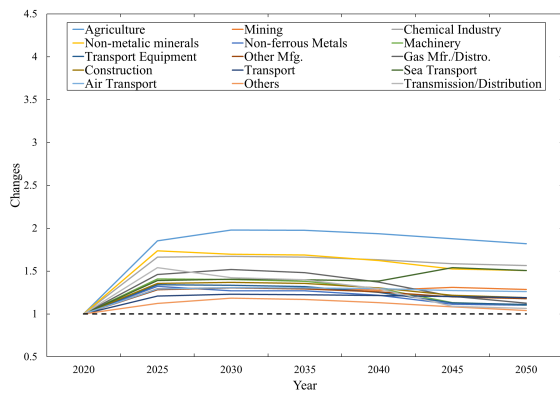


図 G.29 \$50 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

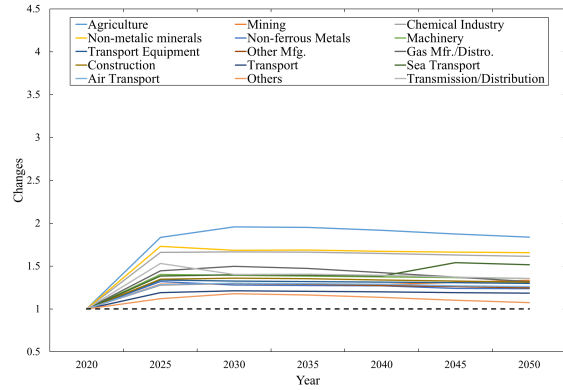


図 G.30 \$50\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

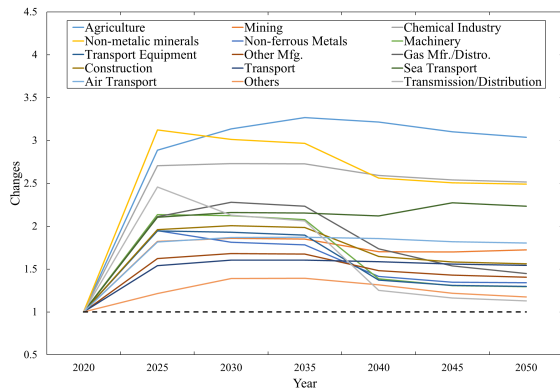


図 G.31 \$150 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

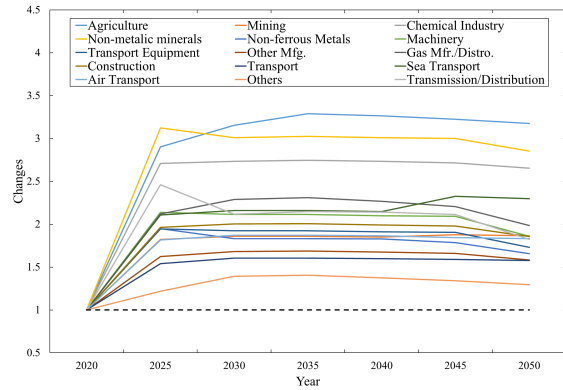


図 G.32 \$150\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

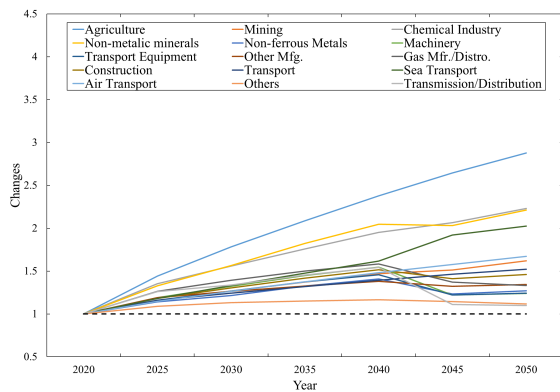


図 G.33 RAMP ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

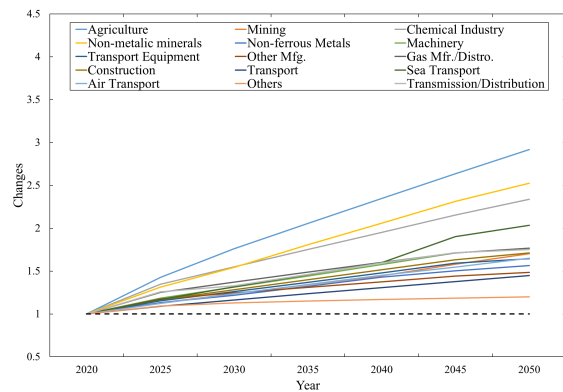


図 G.34 RAMP\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, SuperHigh). 2020 年の値を 1 に規格化.

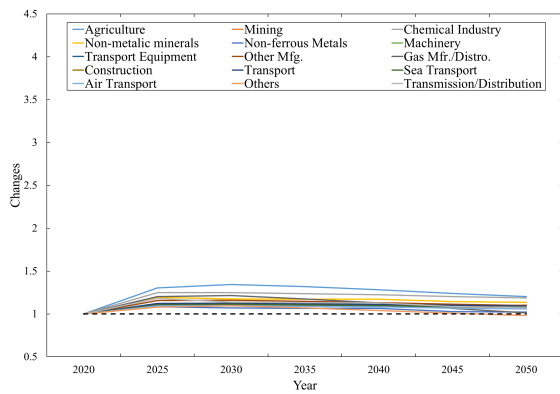


図 G.35 \$10 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

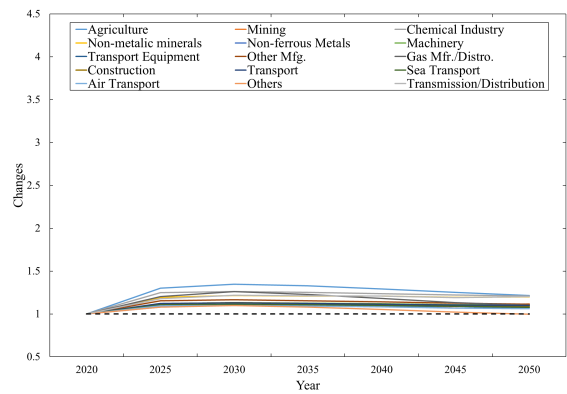


図 G.36 \$10\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

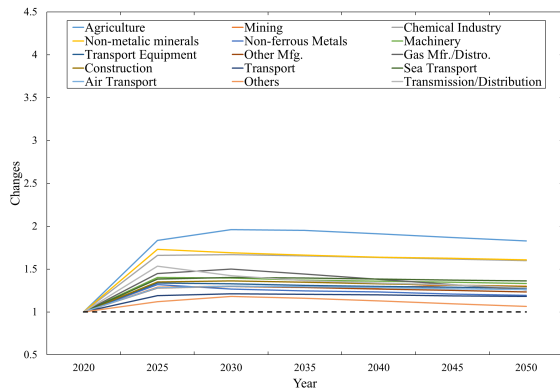


図 G.37 \$50 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

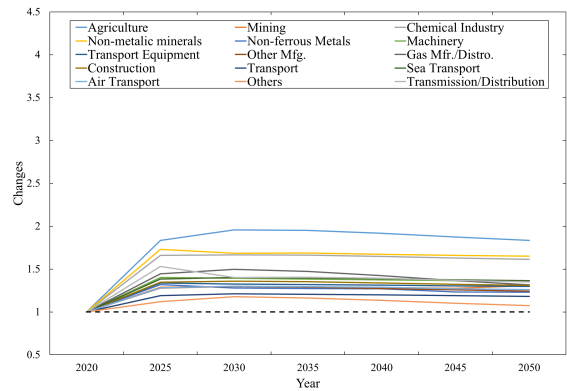


図 G.38 \$50\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

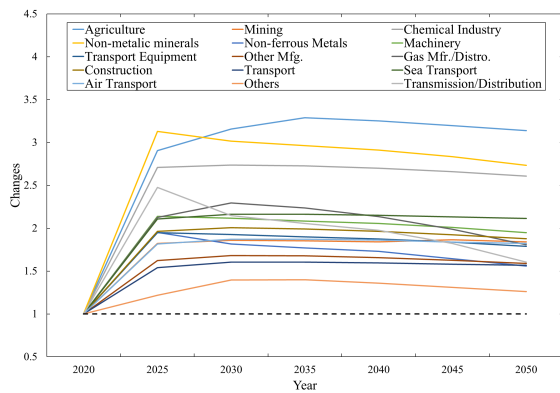


図 G.39 \$150 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

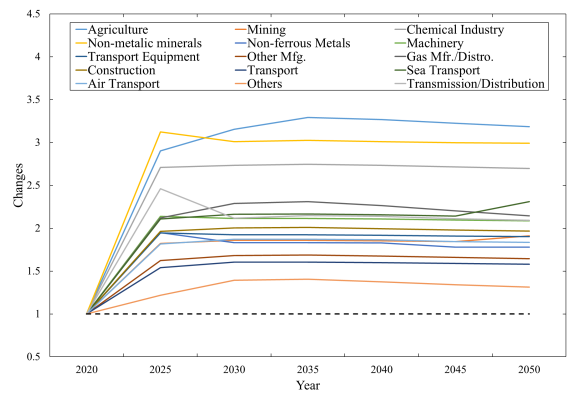


図 G.40 \$150\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.



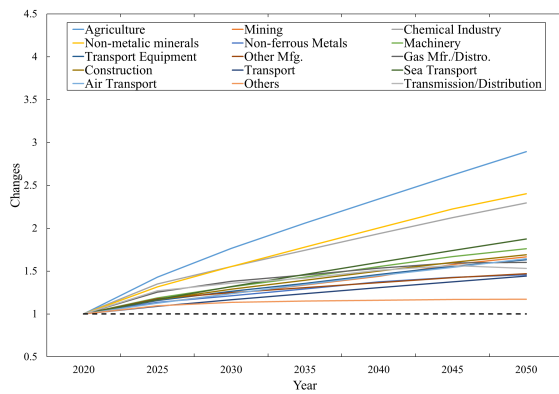


図 G.41 RAMP ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

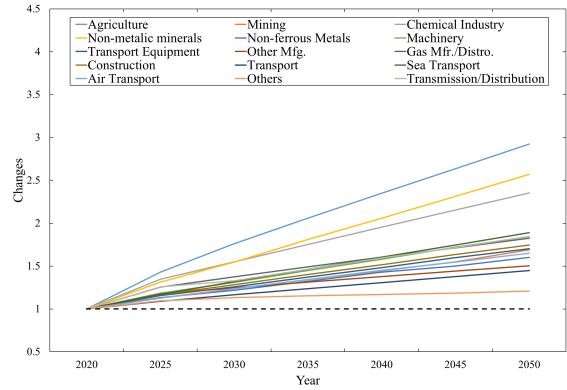


図 G.42 RAMP\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

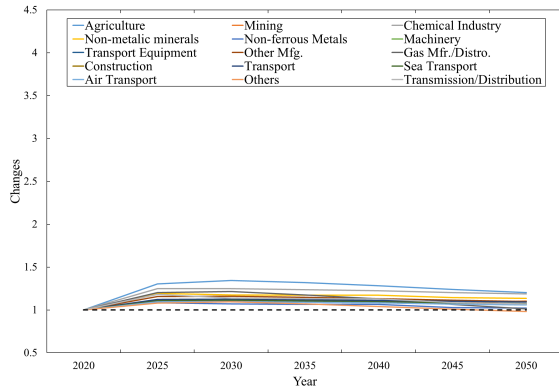


図 G.43 \$10 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

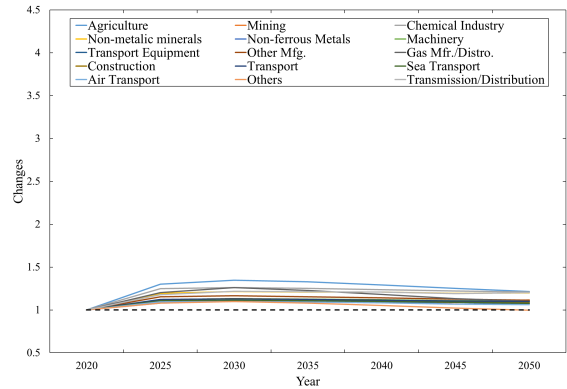


図 G.44 \$10\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

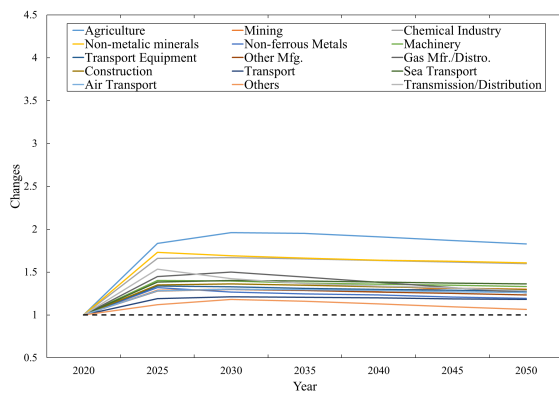


図 G.45 \$50 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

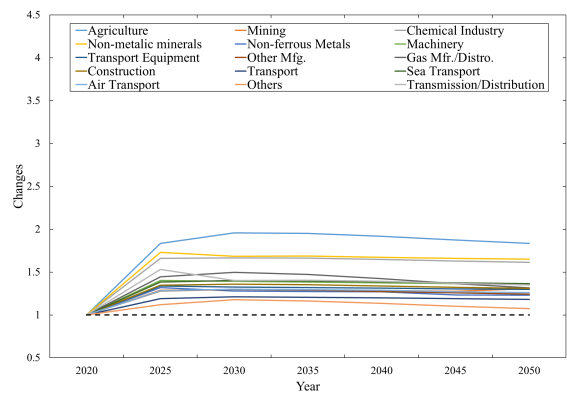


図 G.46 \$50\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

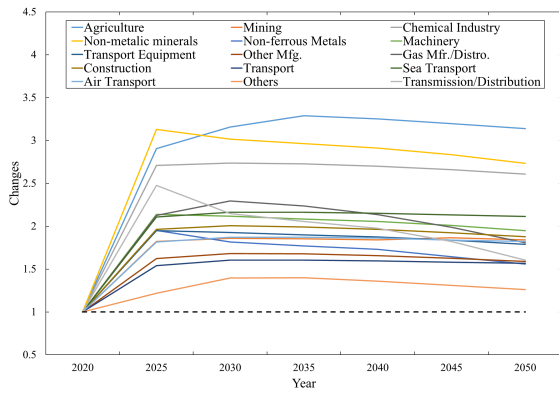


図 G.47 \$150 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

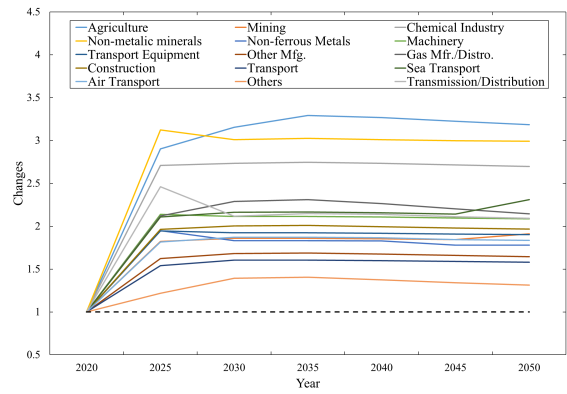


図 G.48 \$150\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

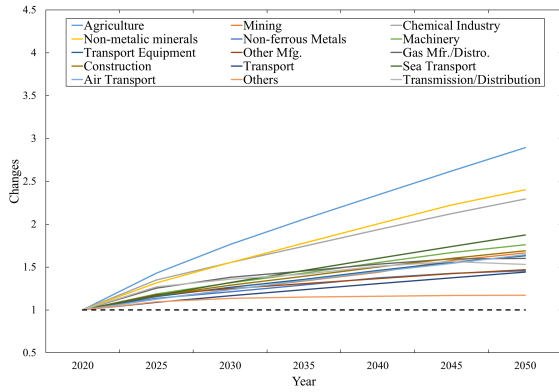


図 G.49 RAMP ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

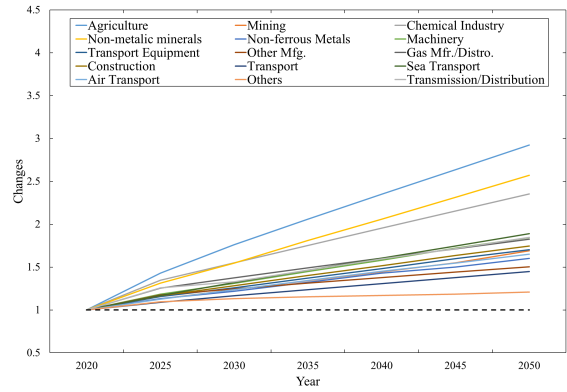


図 G.50 RAMP\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, High). 2020 年の値を 1 に規格化.

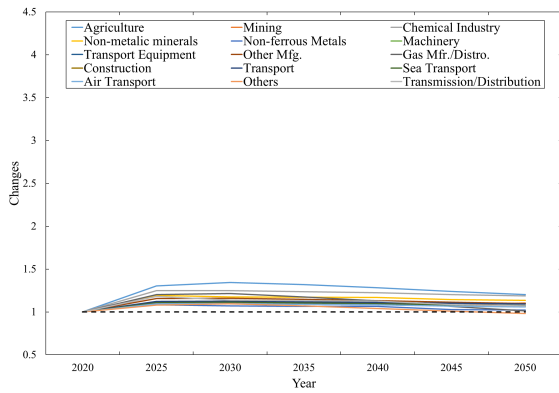


図 G.51 \$10 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

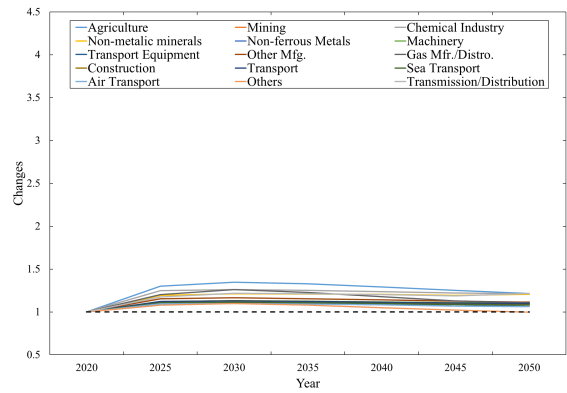


図 G.52 \$10\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年~2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

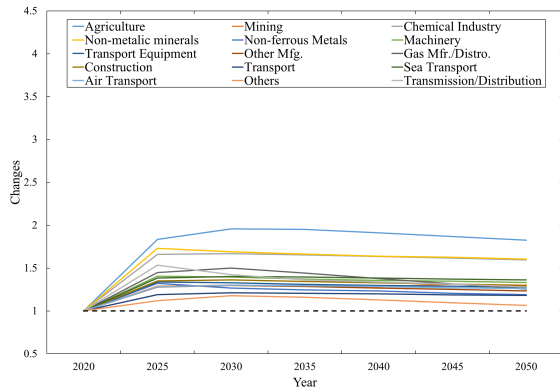


図 G.53 \$50 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

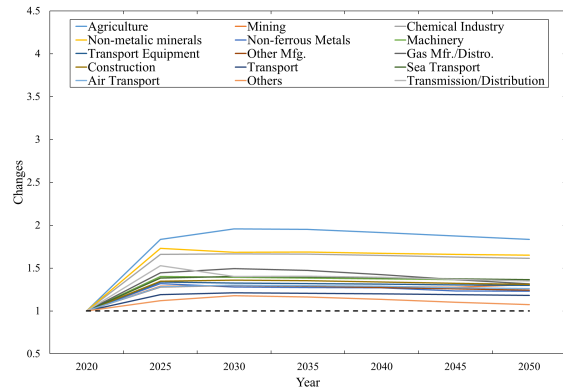


図 G.54 \$50\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

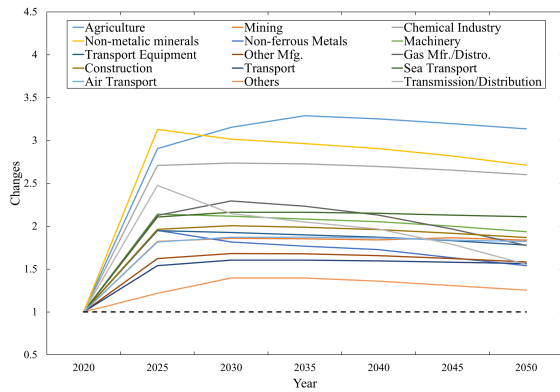


図 G.55 \$150 ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

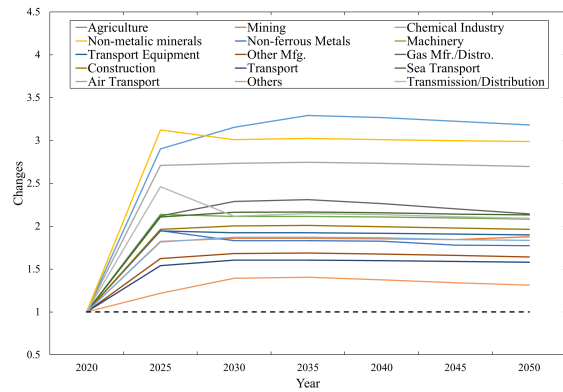


図 G.56 \$150\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

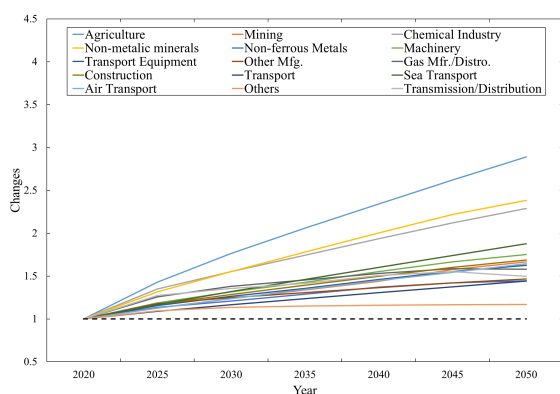


図 G.57 RAMP ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

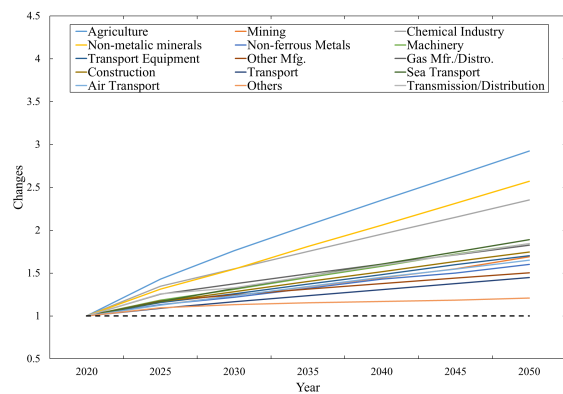


図 G.58 RAMP\_N ケースの各 TD 部門の生産量推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

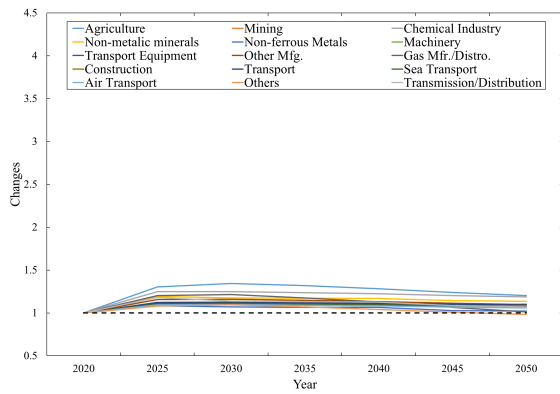


図 G.59 \$10 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

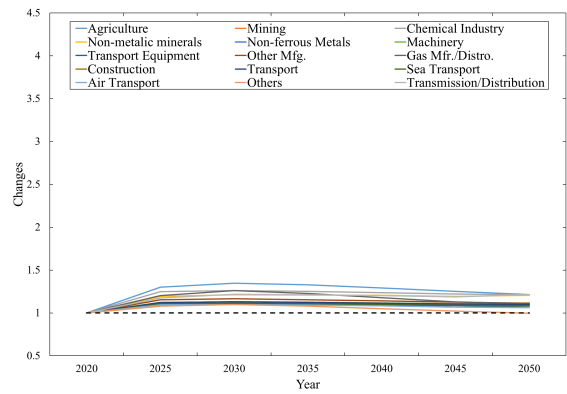


図 G.60 \$10\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

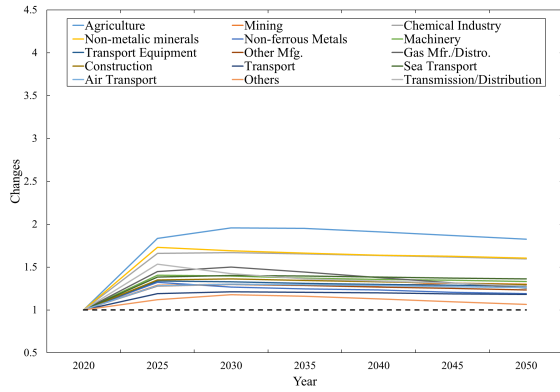


図 G.61 \$50 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

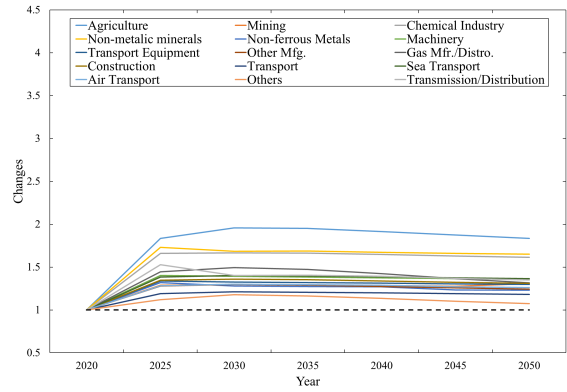


図 G.62 \$50\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

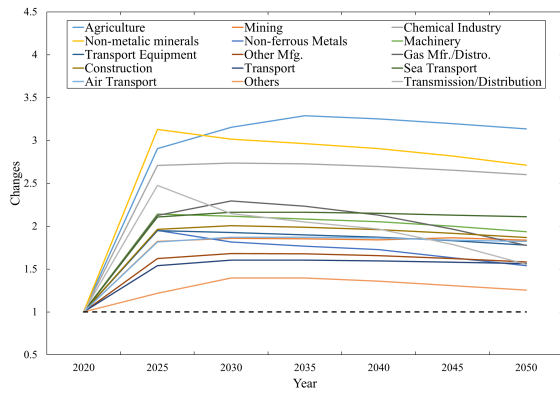


図 G.63 \$150 ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

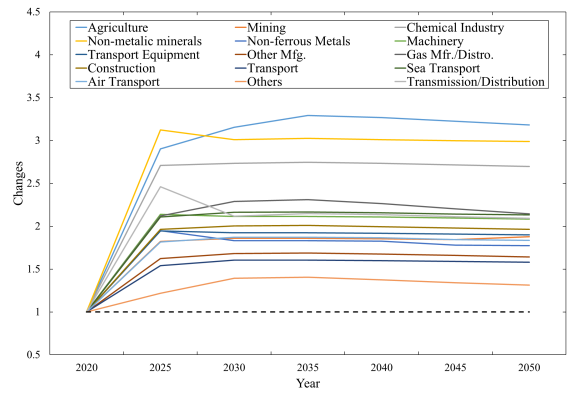


図 G.64 \$150\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年~2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

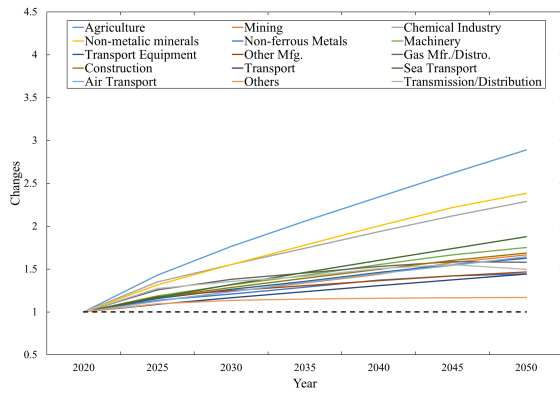


図 G.65 RAMP ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

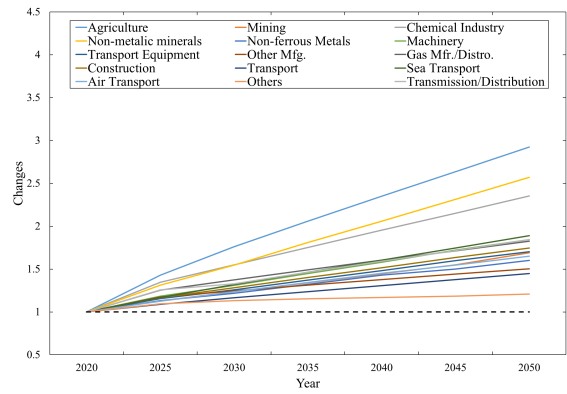


図 G.66 RAMP\_N ケースの各 TD 部門の価格推移 (2020 年～2050 年, Low). 2020 年の値を 1 に規格化.

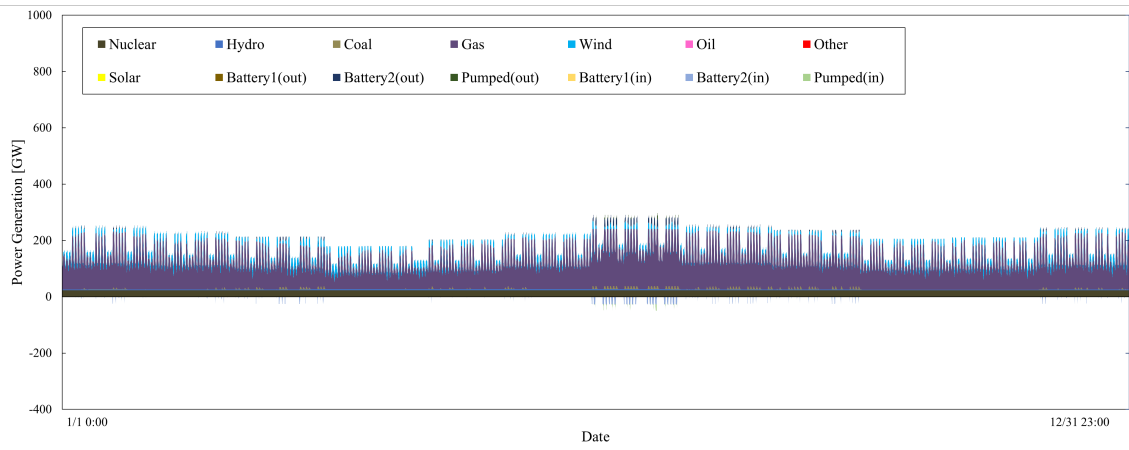


図 G.67 \$10 ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).

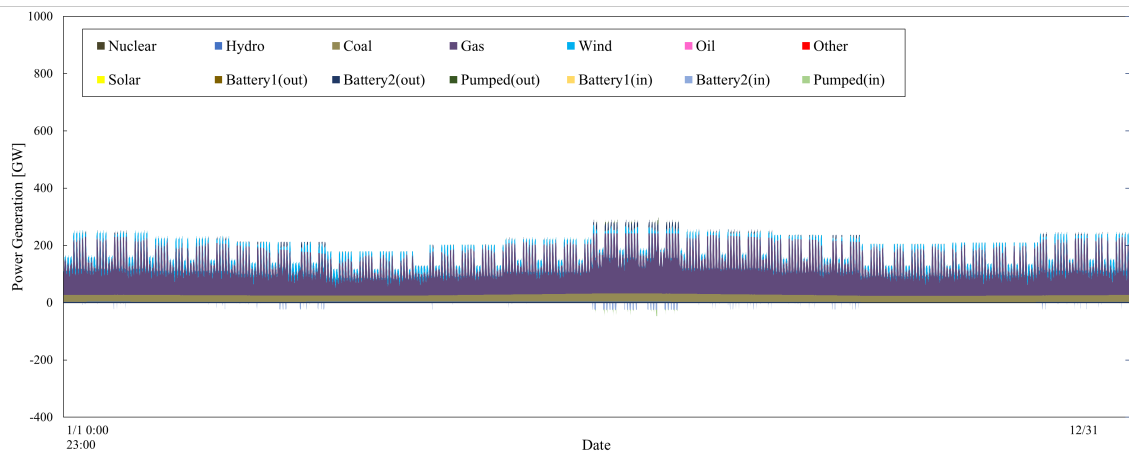


図 G.68 \$10\_N ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).

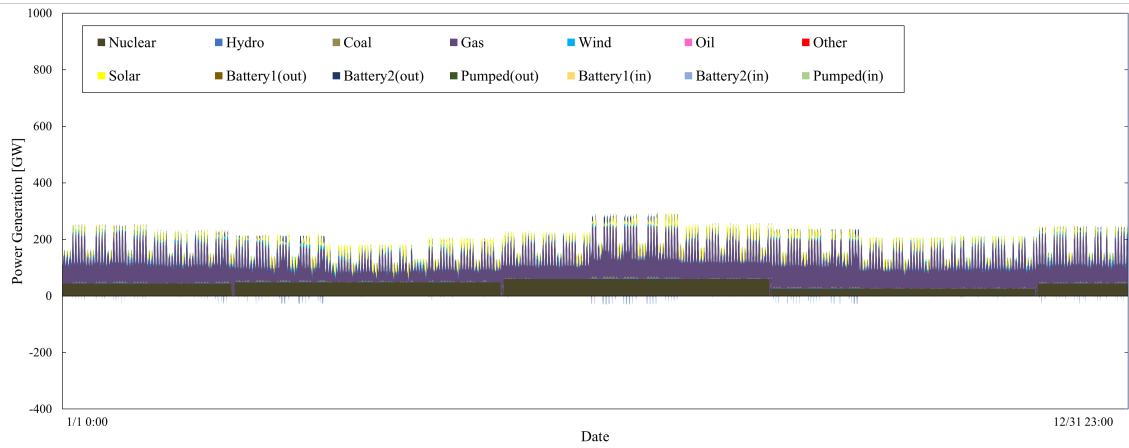


図 G.69 \$50 ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).

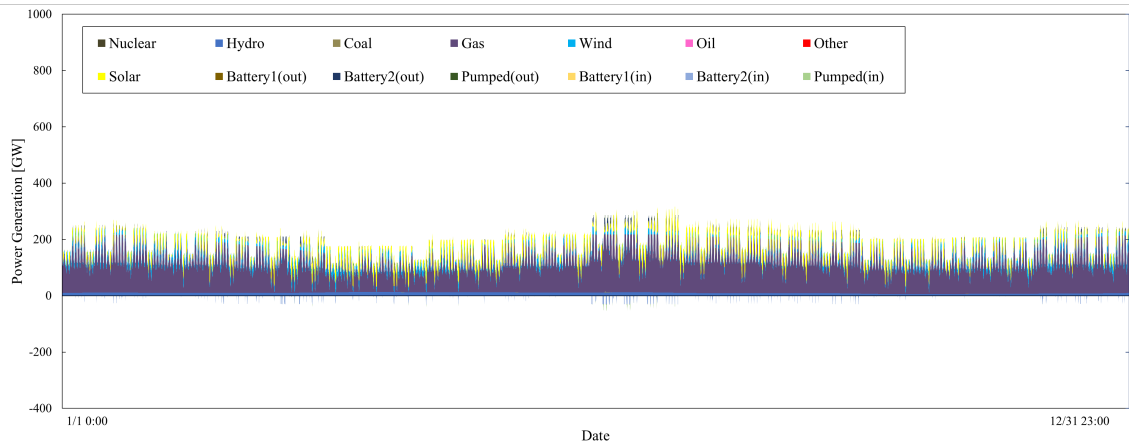


図 G.70 \$50\_N ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).

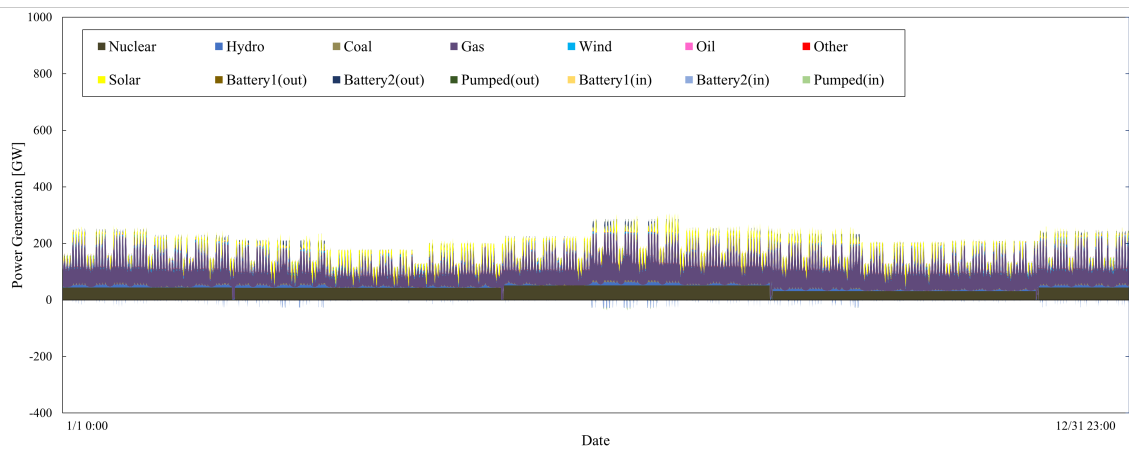


図 G.71 \$150 ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).

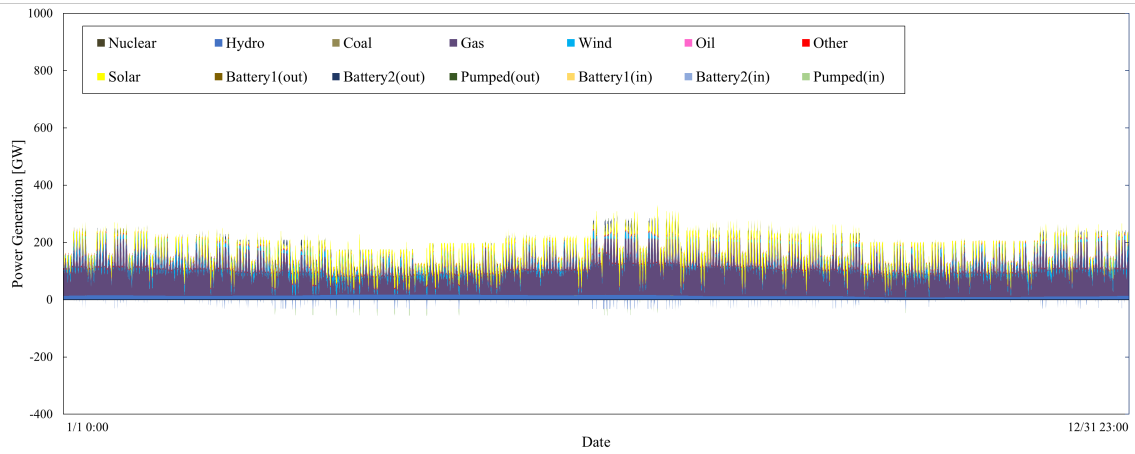


図 G.72 \$150\_N ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).

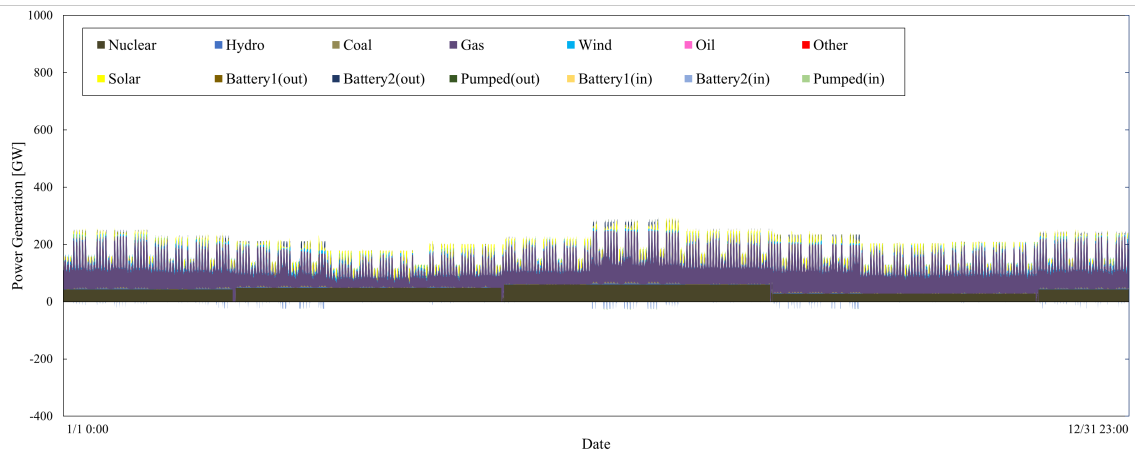


図 G.73 \$SRAMP ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).

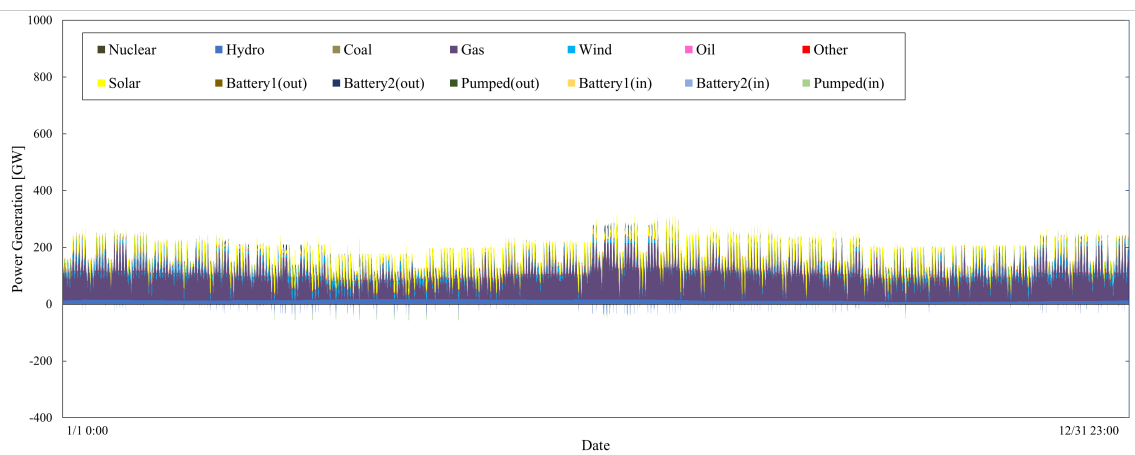


図 G.74 \$SRAMP\_N ケースの最適発電パターン (2050 年, SuperHigh).



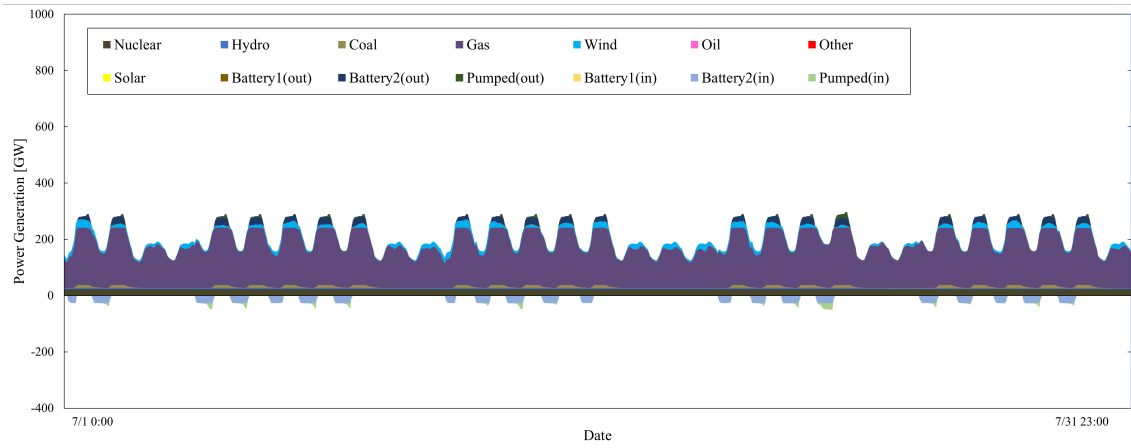


図 G.75 \$10 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).

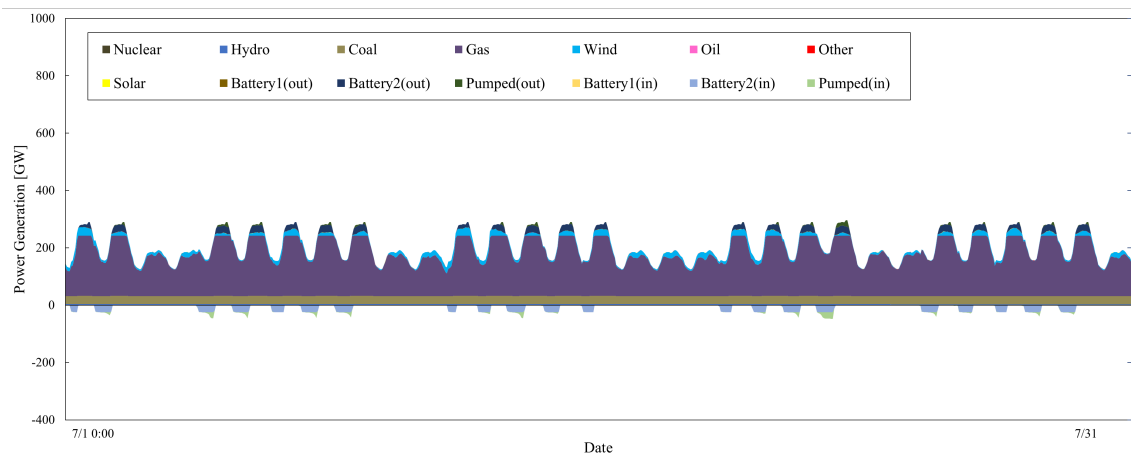


図 G.76 \$10\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).

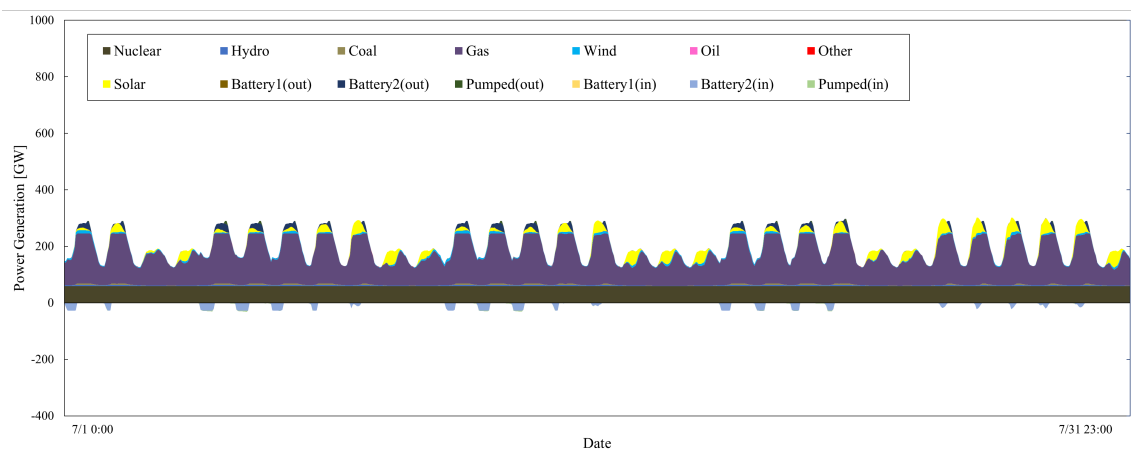


図 G.77 \$50 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).

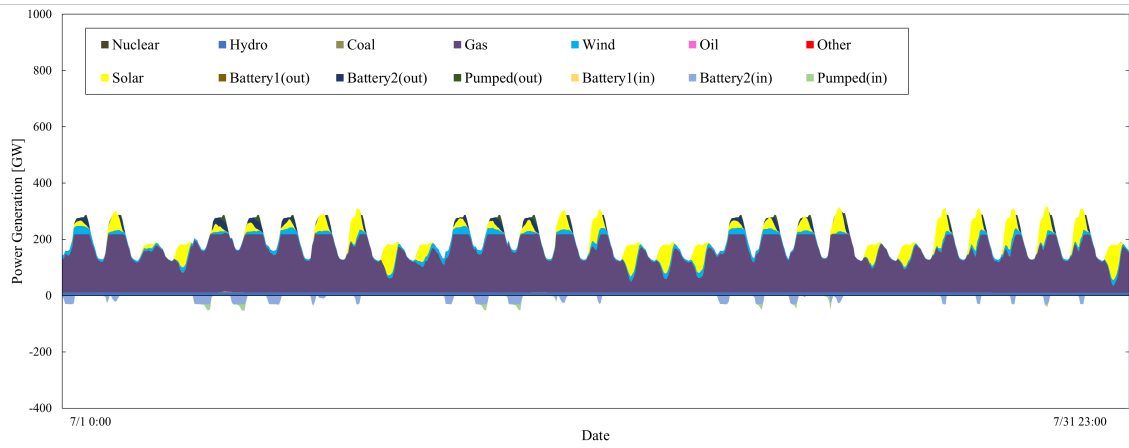


図 G.78 \$50\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).

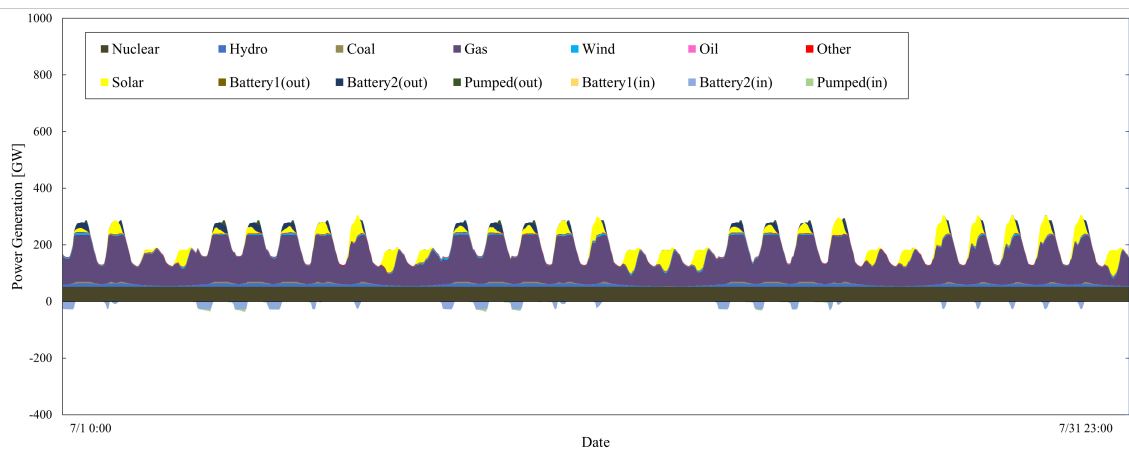


図 G.79 \$150 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).

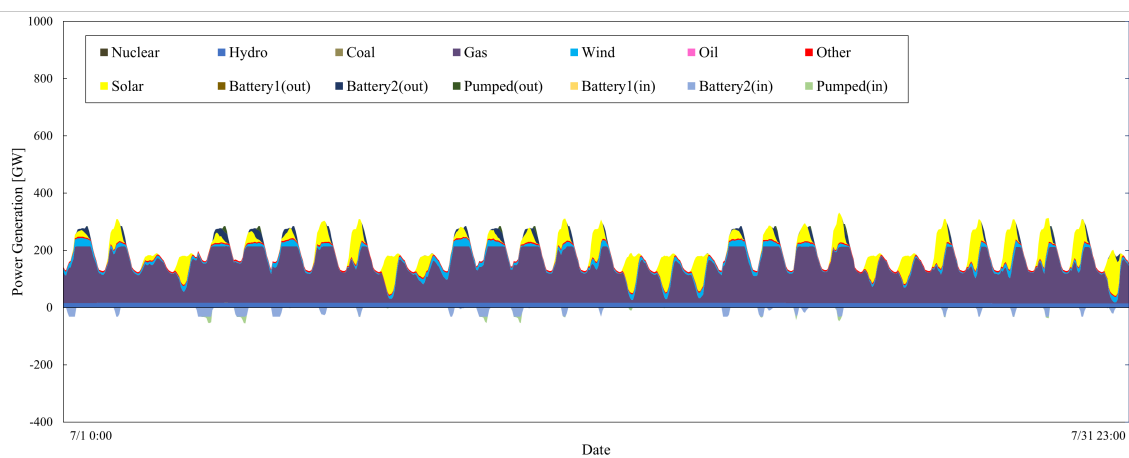


図 G.80 \$150\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).

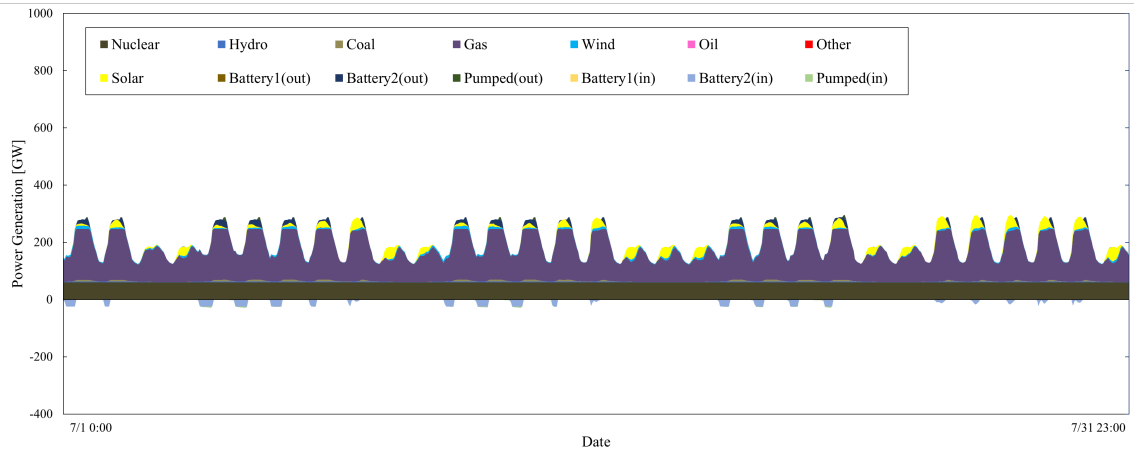


図 G.81 \$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).

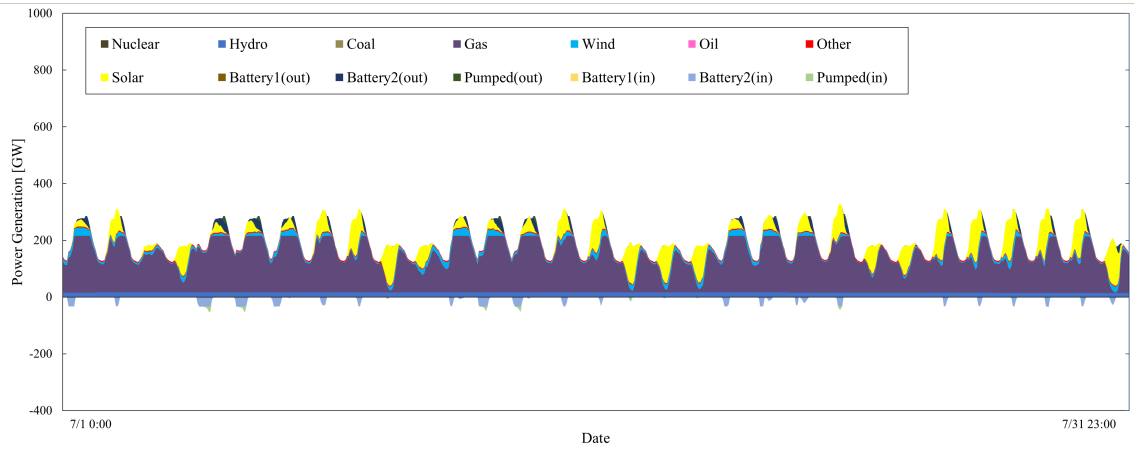


図 G.82 \$RAMP\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, SuperHigh).

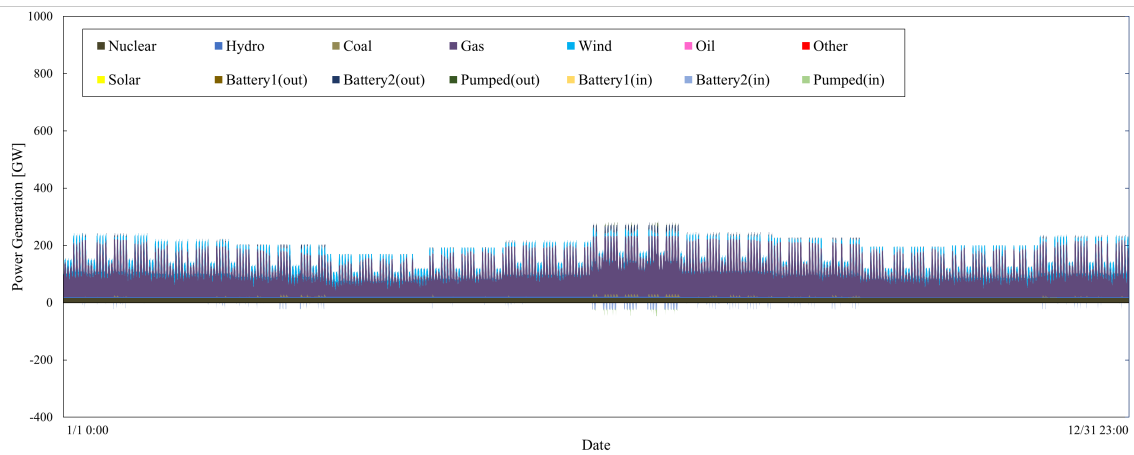


図 G.83 \$10 ケースの最適発電パターン (2050 年, High).

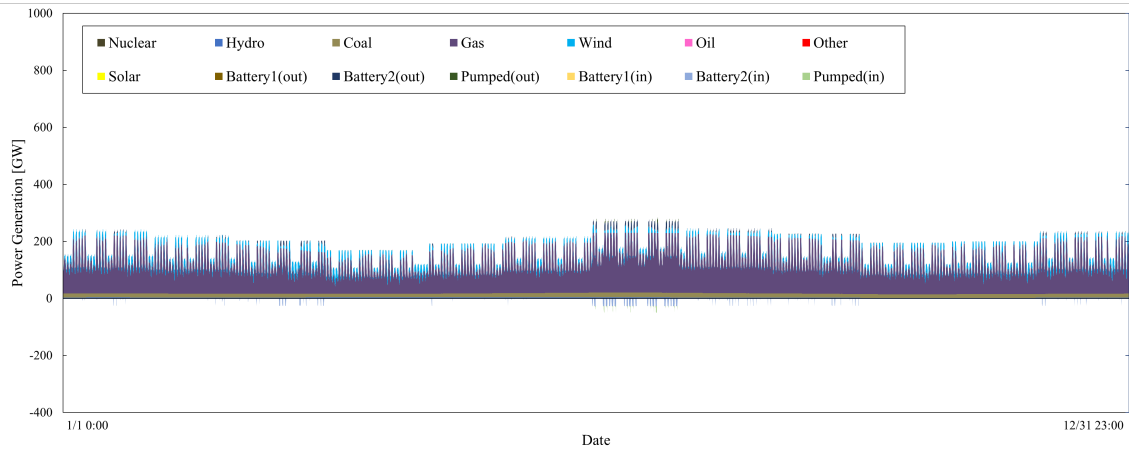


図 G.84 \$10\_N ケースの最適発電パターン (2050 年, High).

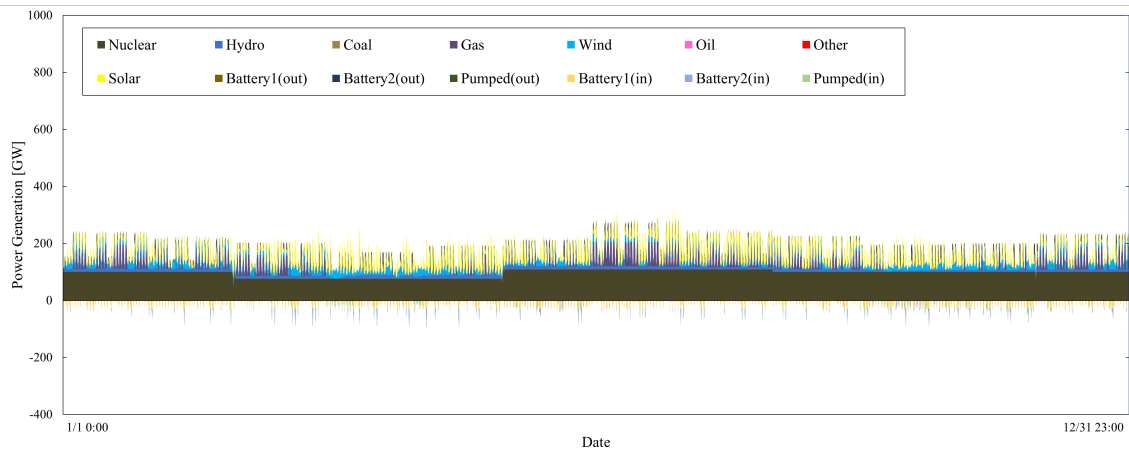


図 G.85 \$50 ケースの最適発電パターン (2050 年, High).

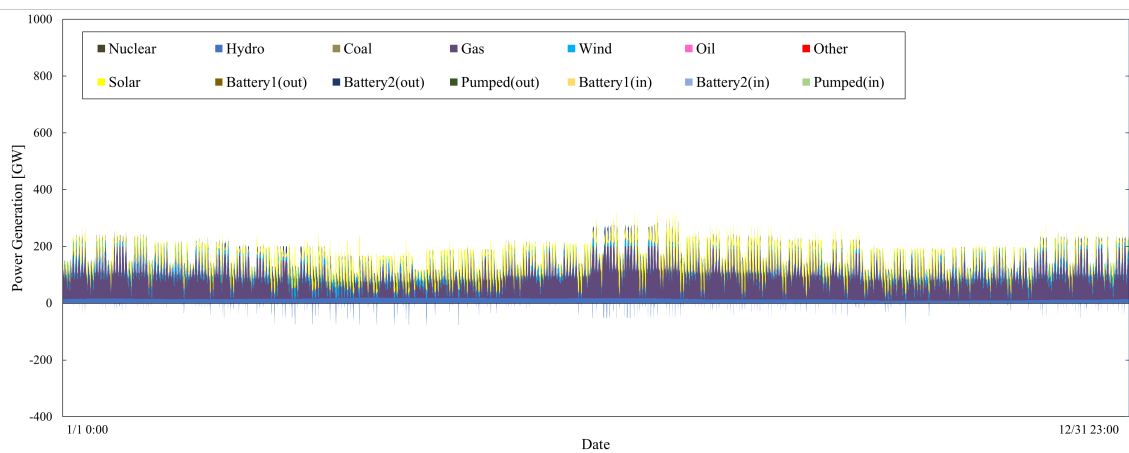


図 G.86 \$50\_N ケースの最適発電パターン (2050 年, High).

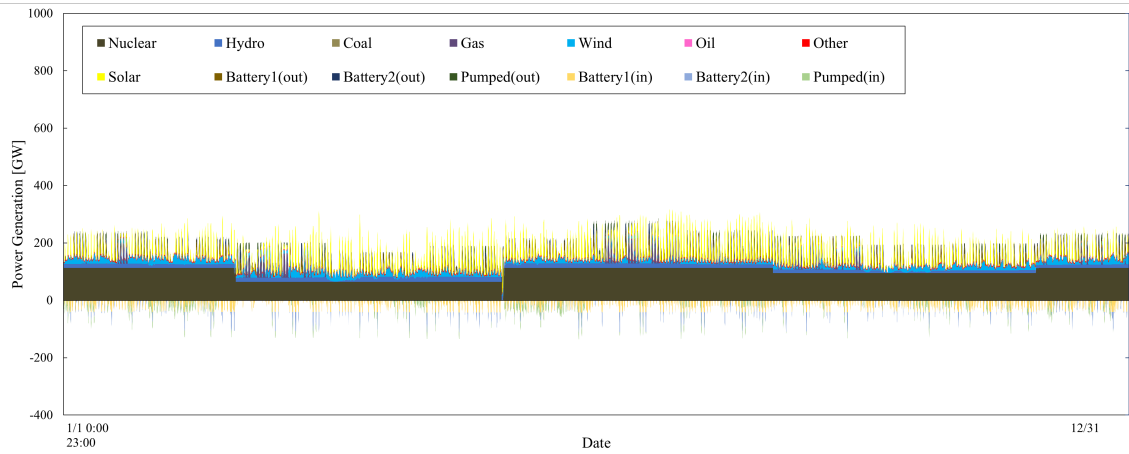


図 G.87 \$150 ケースの最適発電パターン (2050 年, High).

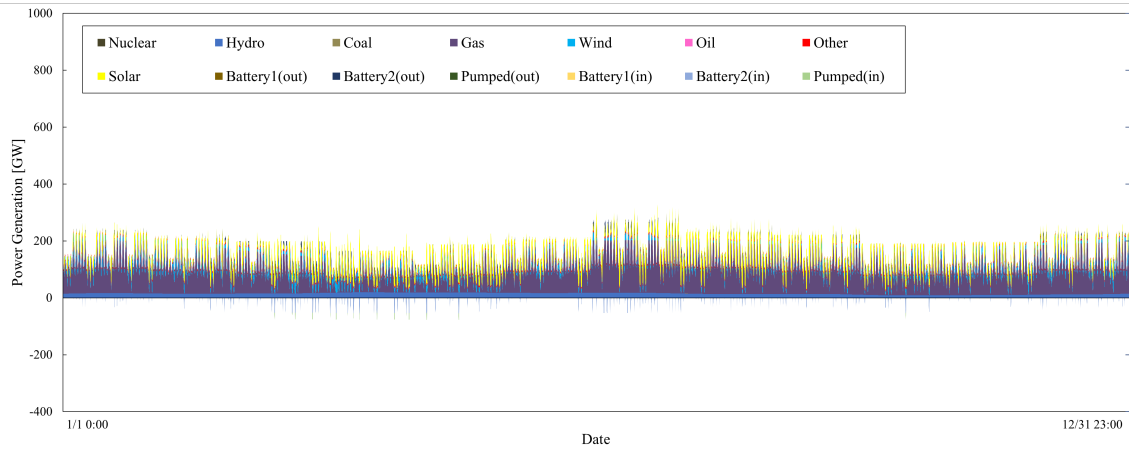


図 G.88 \$150\_N ケースの最適発電パターン (2050 年, High).

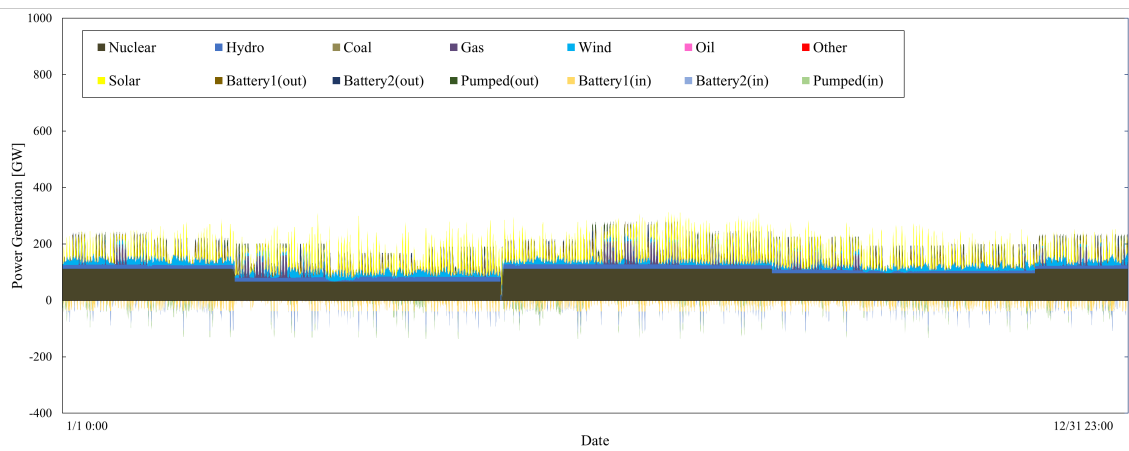


図 G.89 \$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年, High).

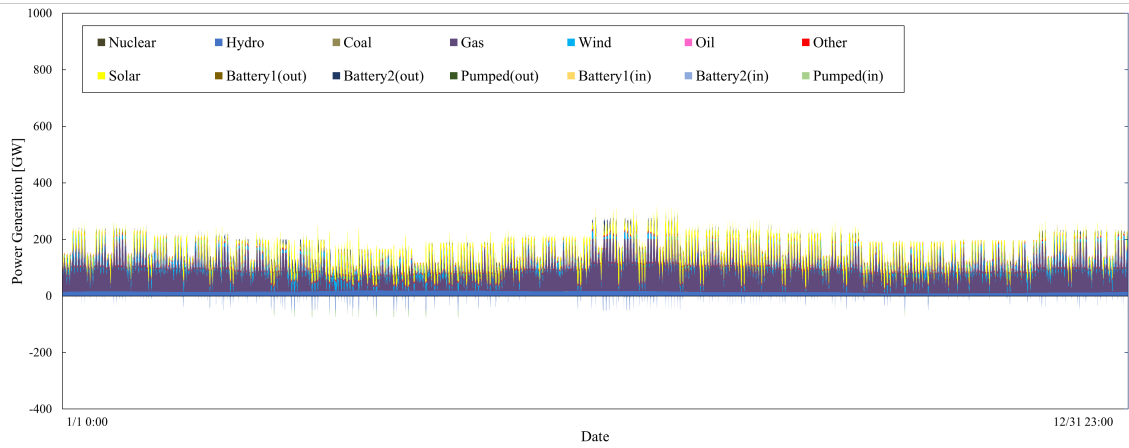


図 G.90 \$RAMP\_N ケースの最適発電パターン (2050 年, High).

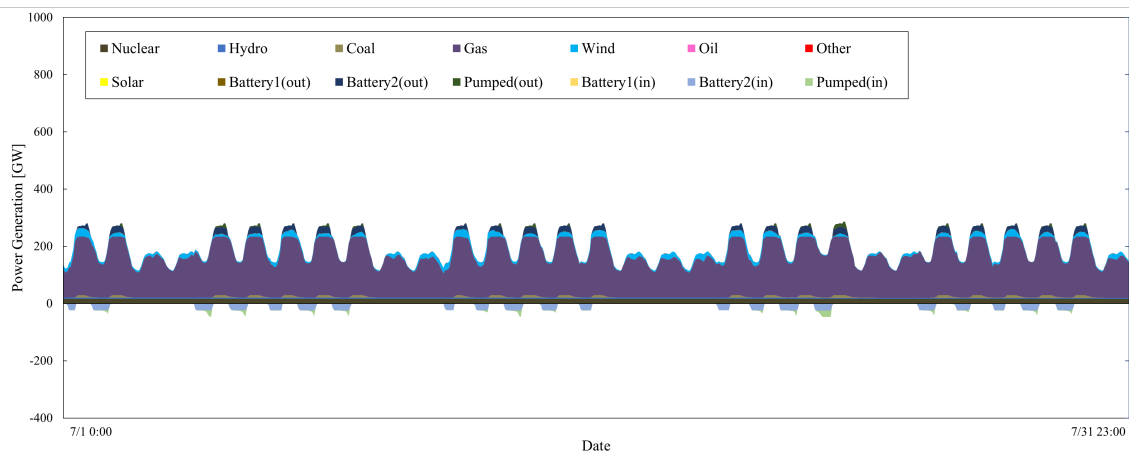


図 G.91 \$10 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).

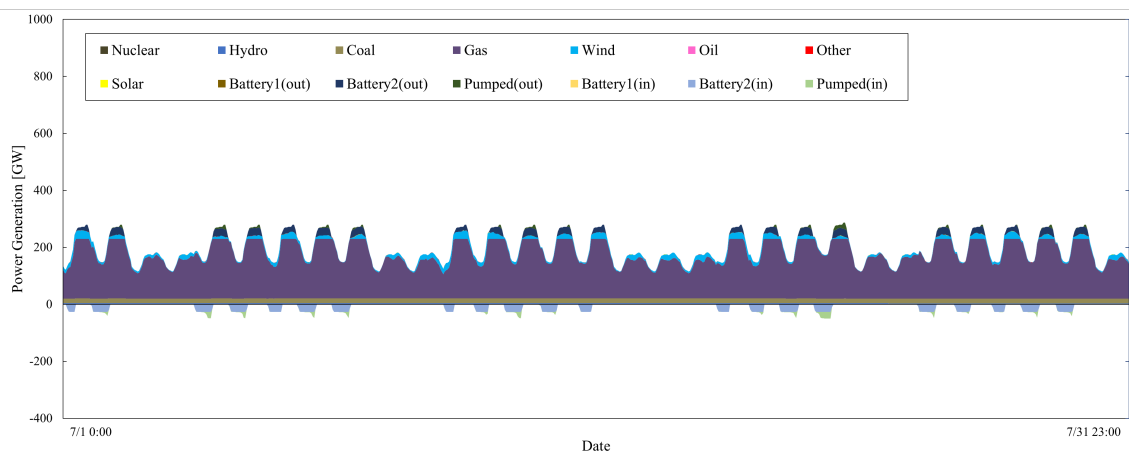


図 G.92 \$10\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).

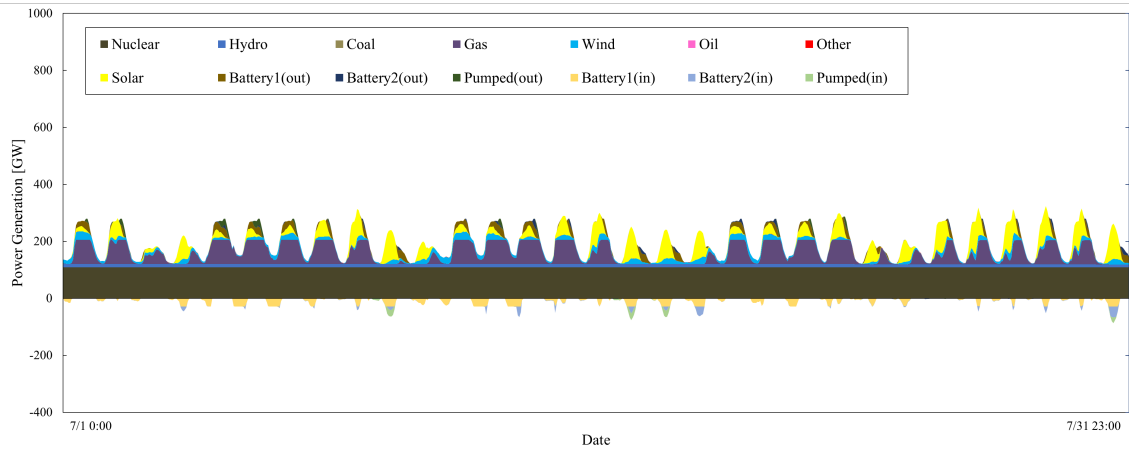


図 G.93 \$50 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).

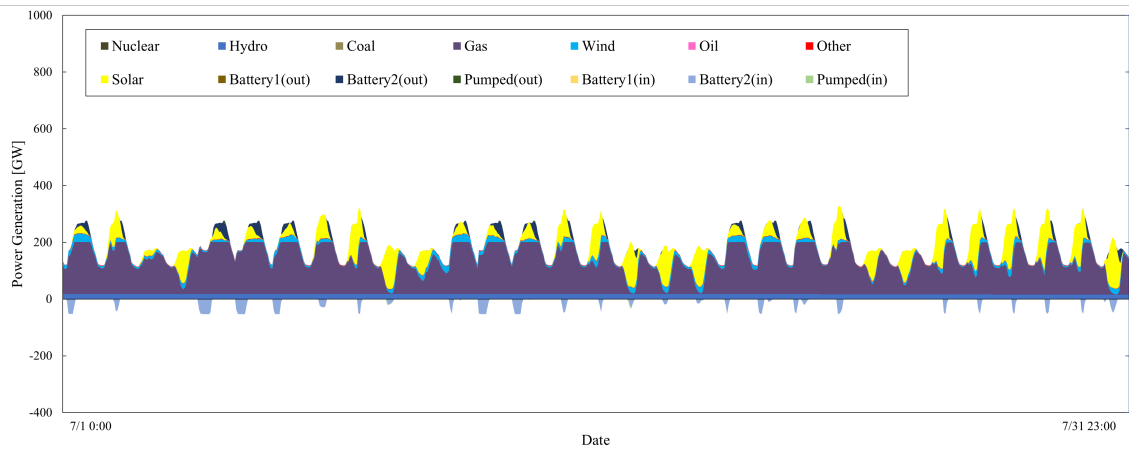


図 G.94 \$50\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).

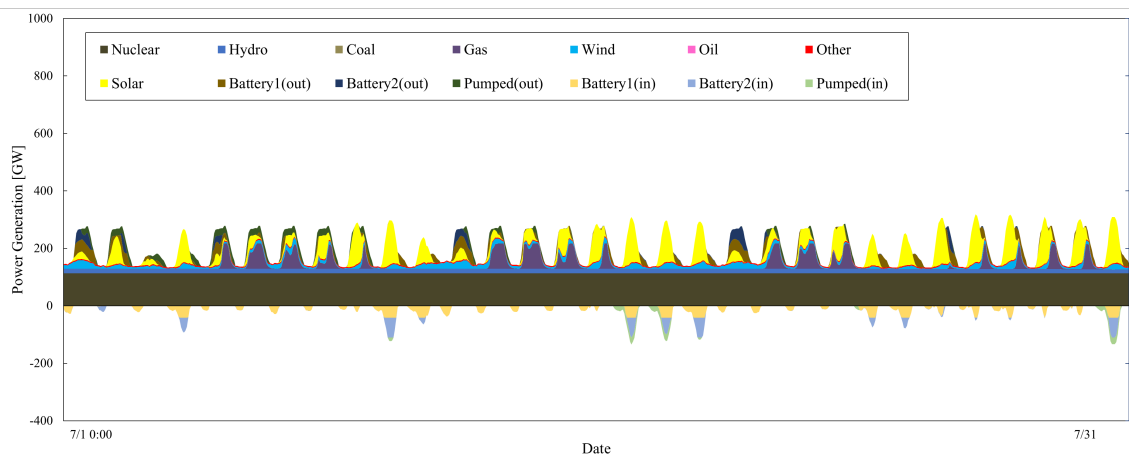


図 G.95 \$150 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).

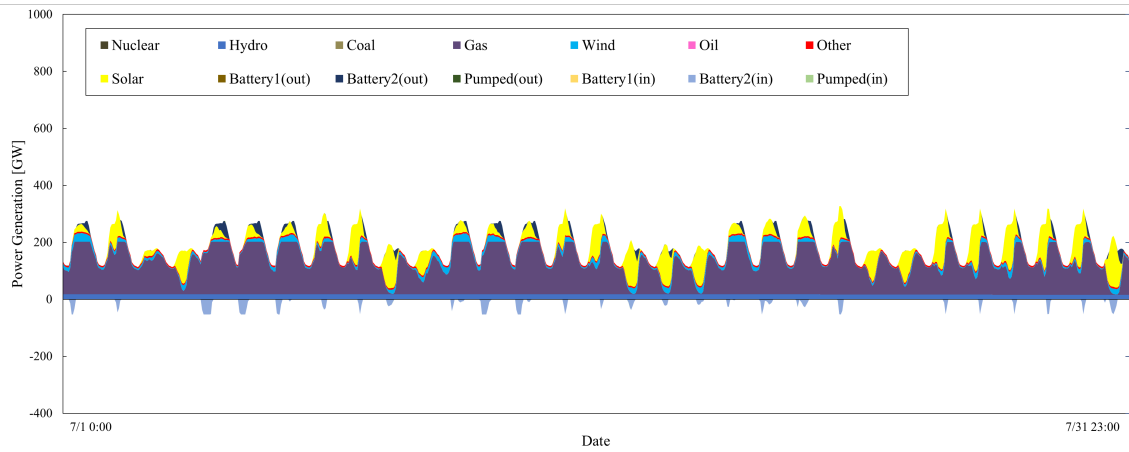


図 G.96 \$150\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).

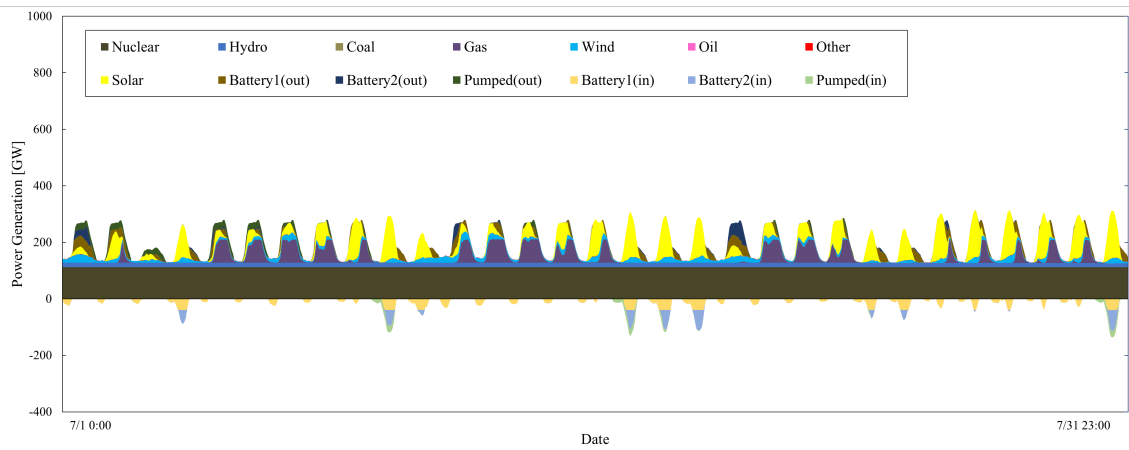


図 G.97 \$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).

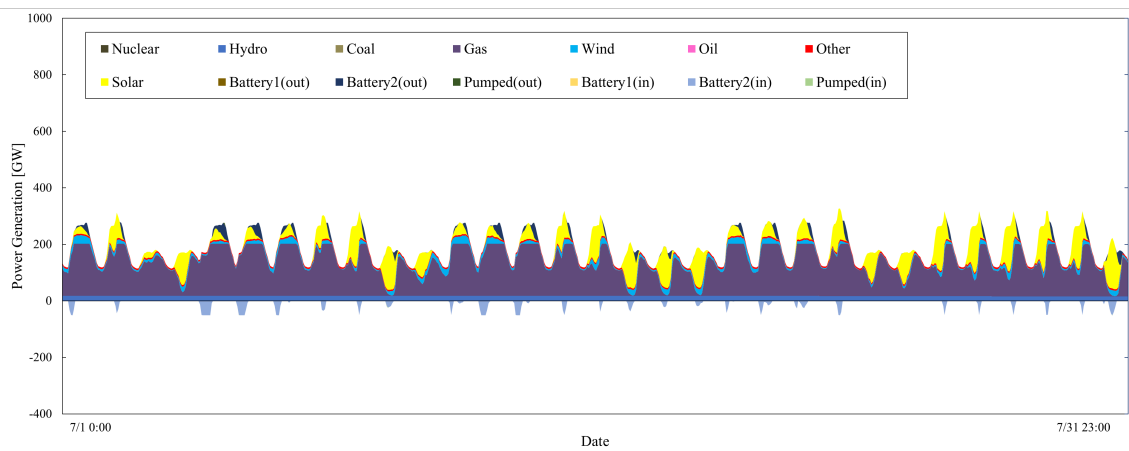


図 G.98 \$RAMP\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, High).



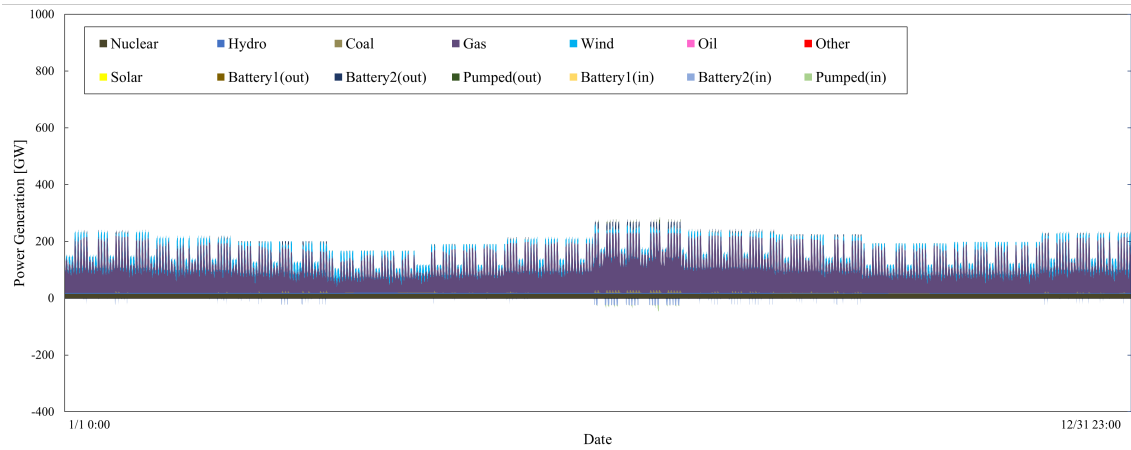


図 G.99 \$10 ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).

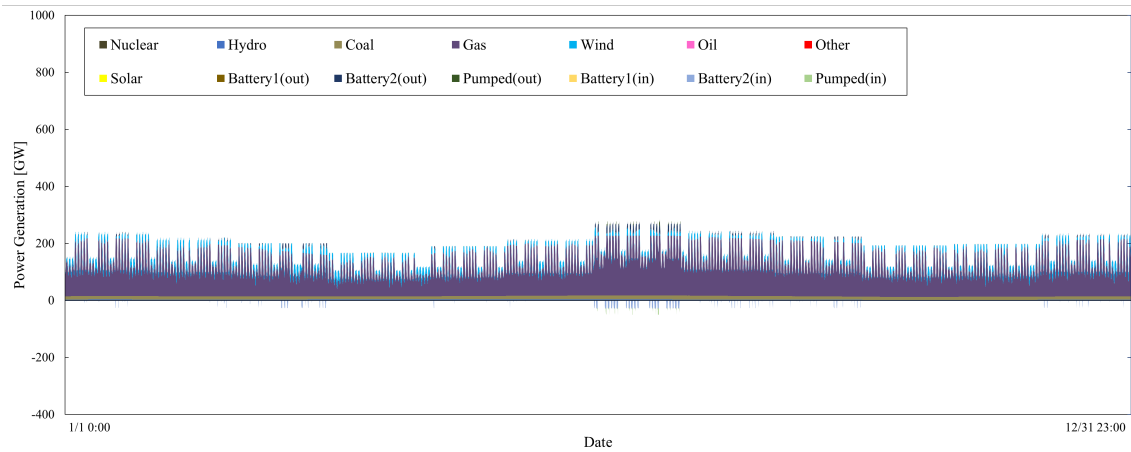


図 G.100 \$10\_N ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).

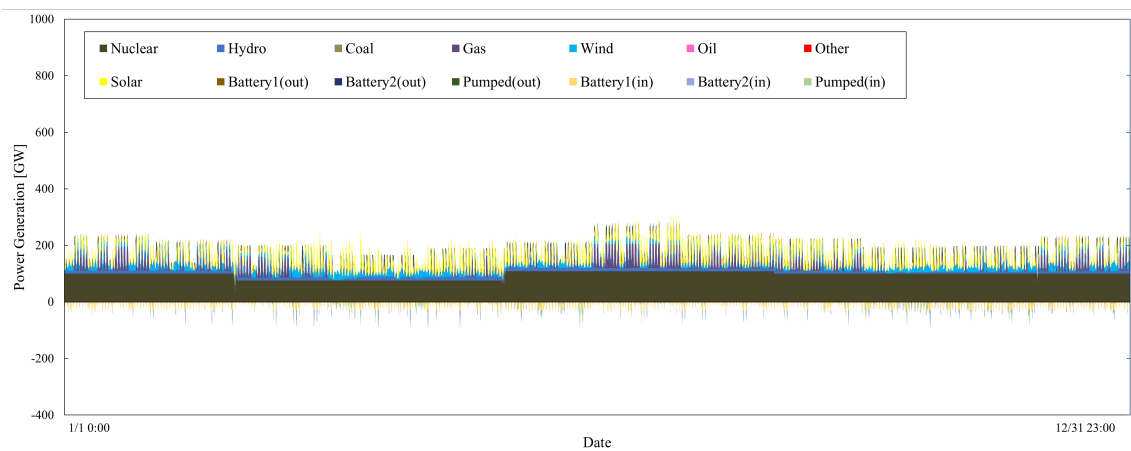


図 G.101 \$50 ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).

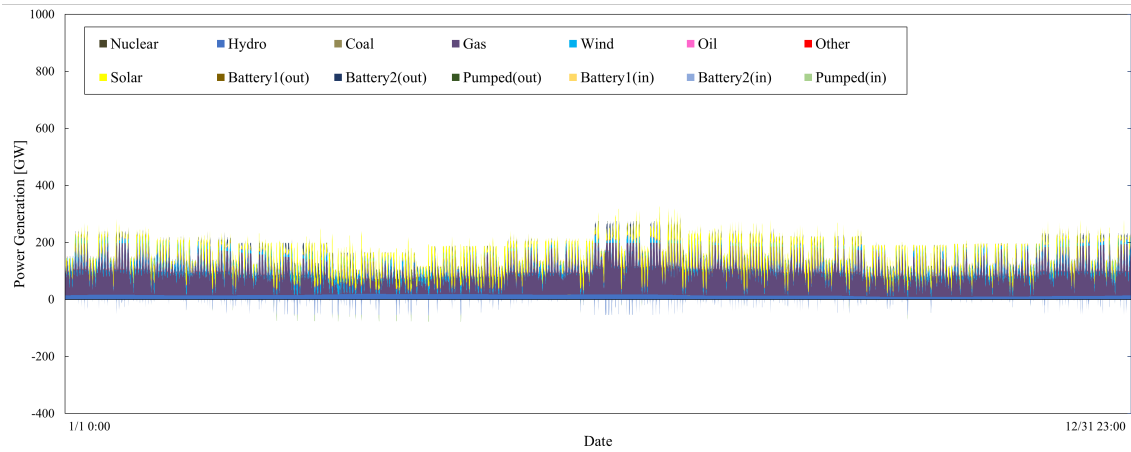


図 G.102 \$50\_N ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).

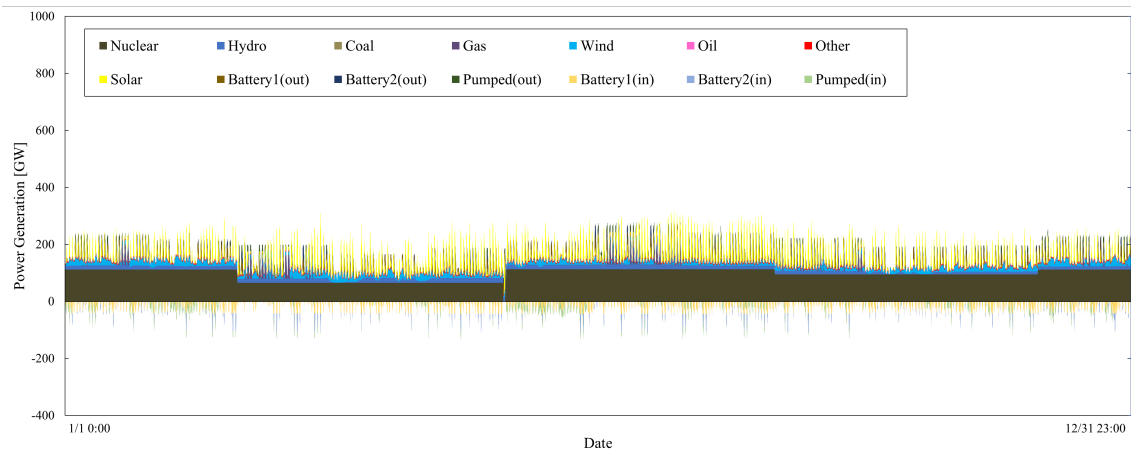


図 G.103 \$150 ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).

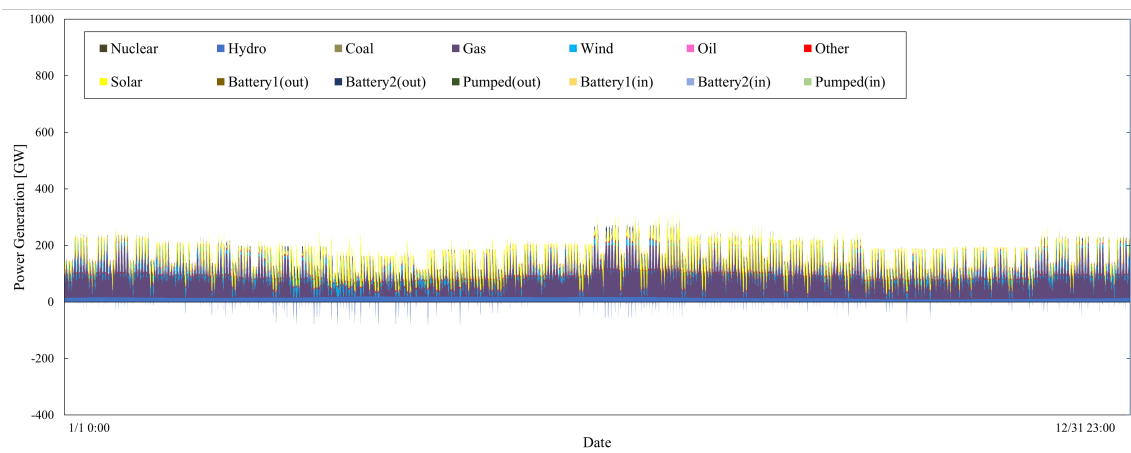


図 G.104 \$150\_N ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).

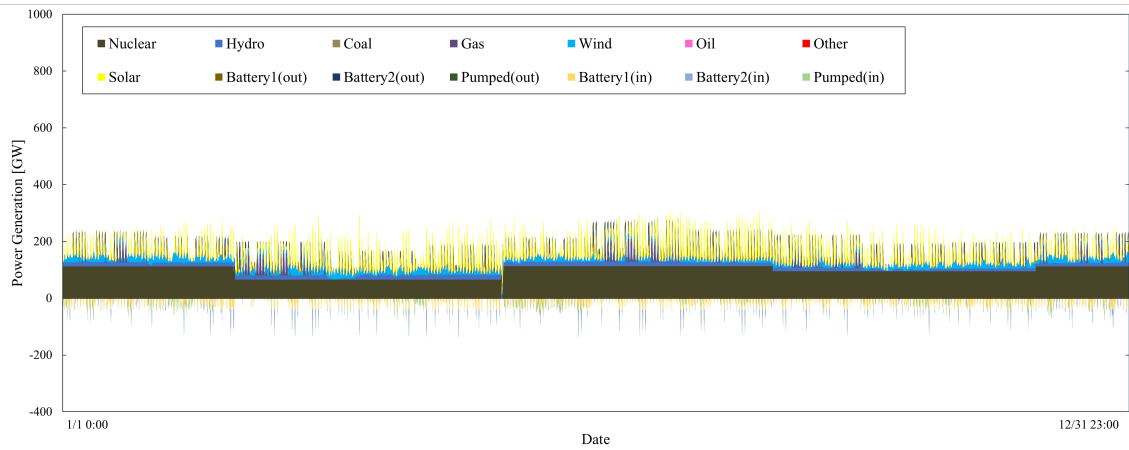


図 G.105 \$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).

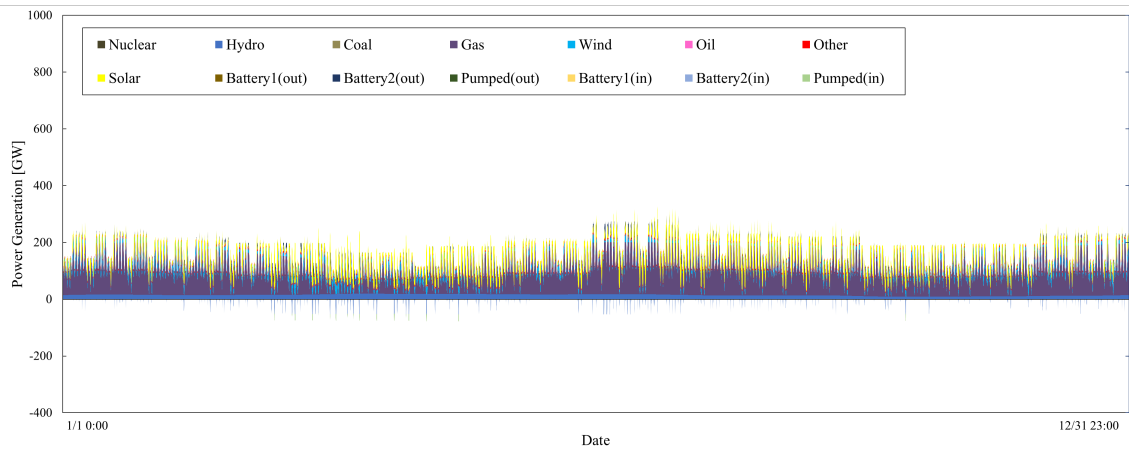


図 G.106 \$RAMP\_N ケースの最適発電パターン (2050 年, Low).

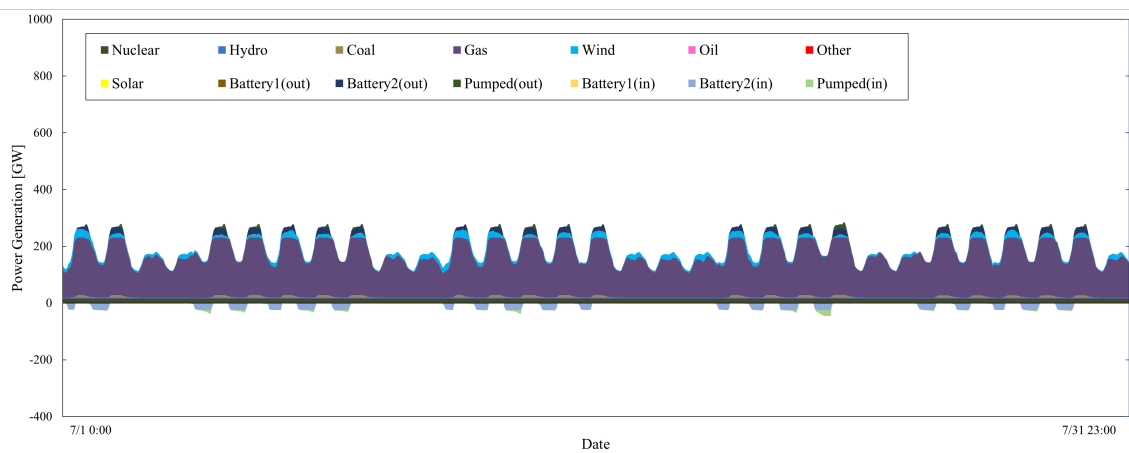


図 G.107 \$10 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).

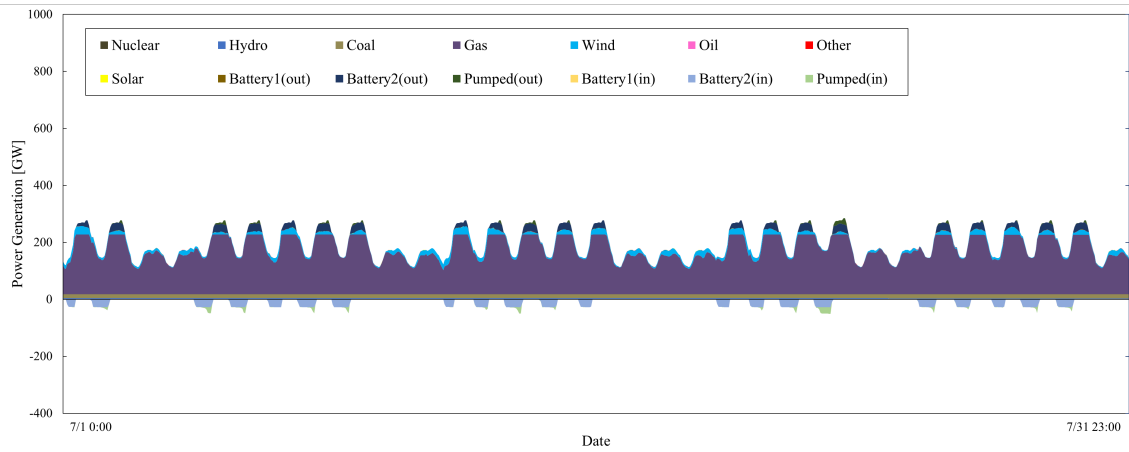


図 G.108 \$10\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).

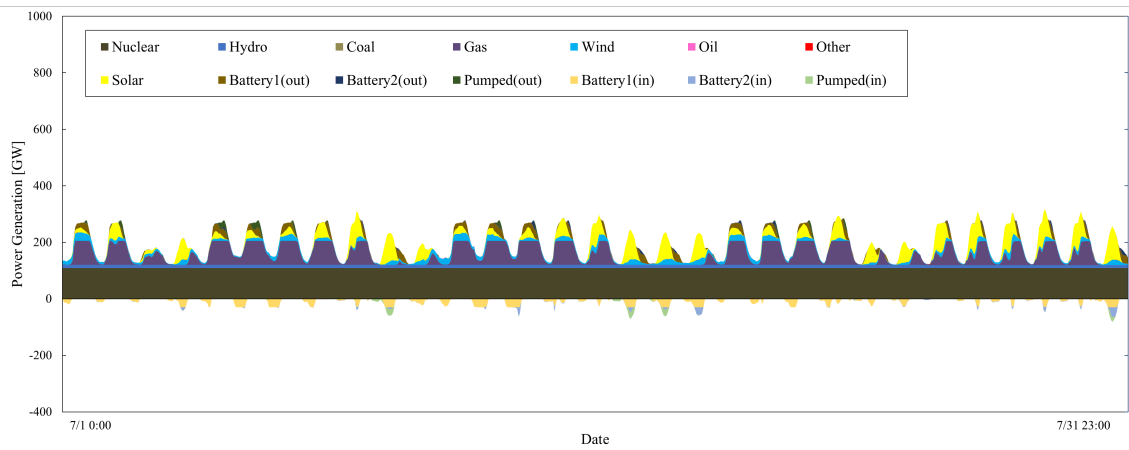


図 G.109 \$50 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).

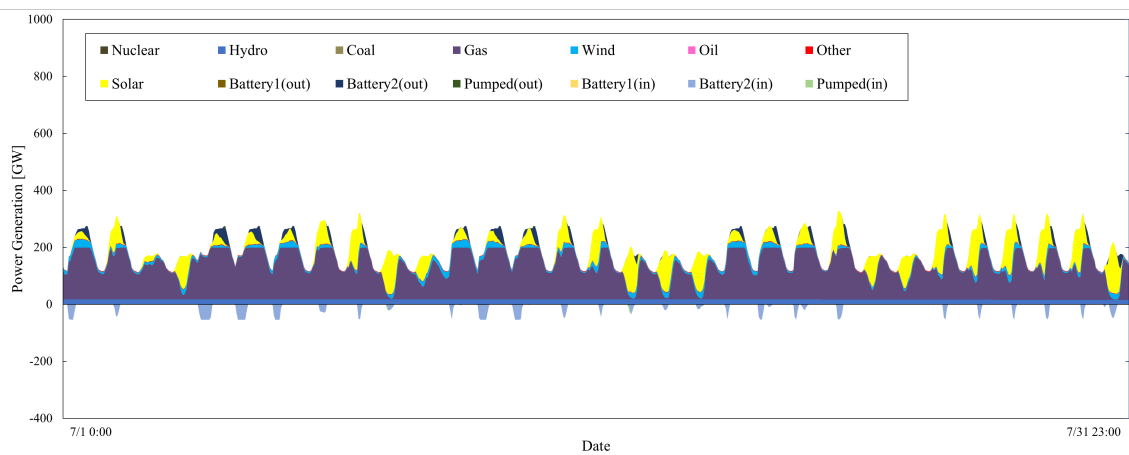


図 G.110 \$50\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).

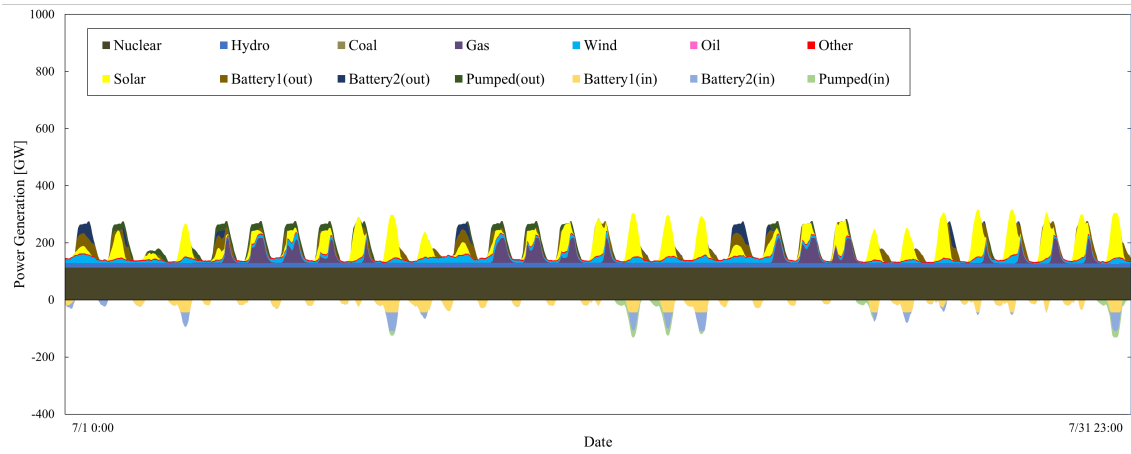


図 G.111 \$150 ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).

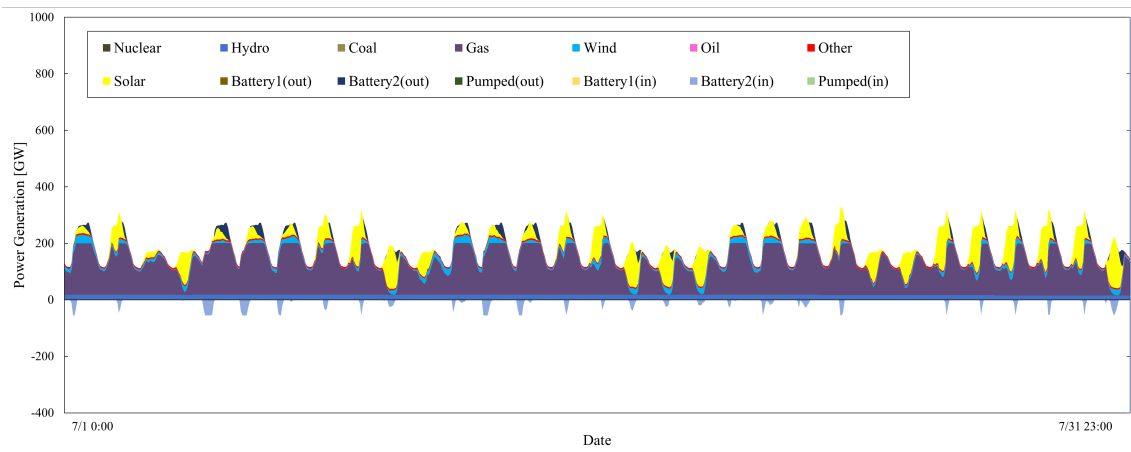


図 G.112 \$150\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).

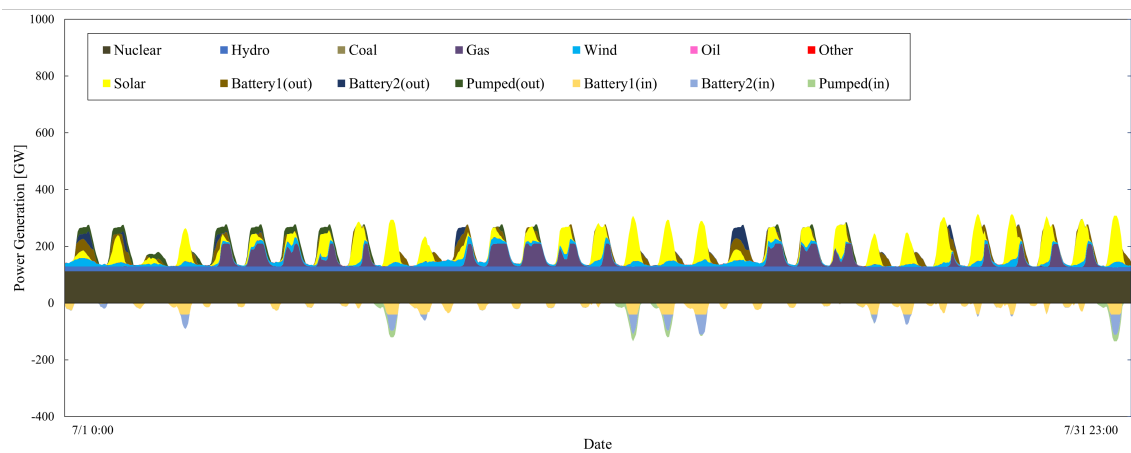


図 G.113 \$RAMP ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).

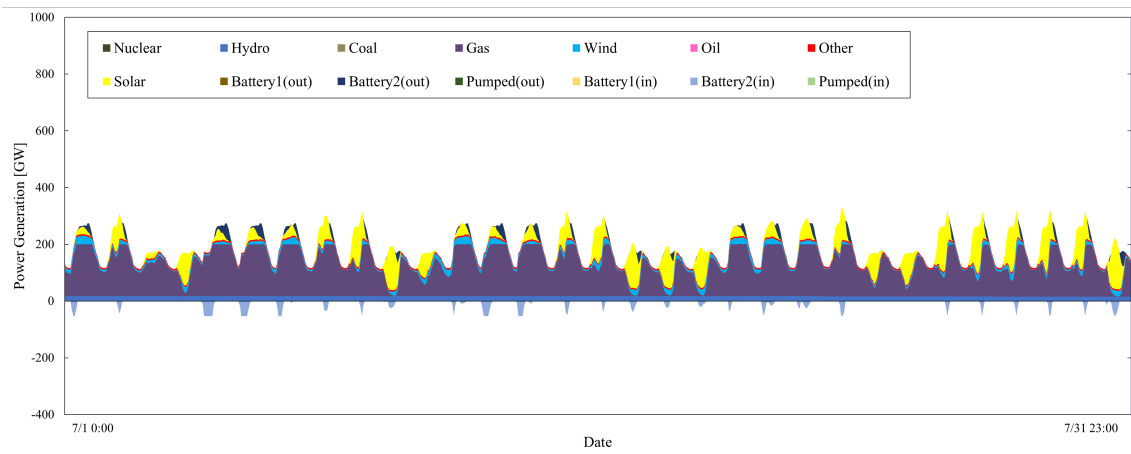


図 G.114 \$SRAMP\_N ケースの最適発電パターン (2050 年 7 月, Low).

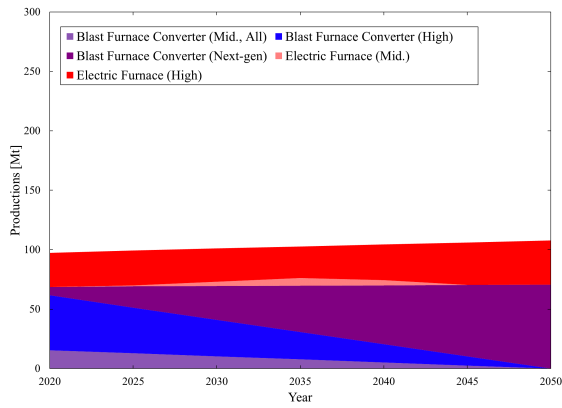


図 G.115 \$10 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).

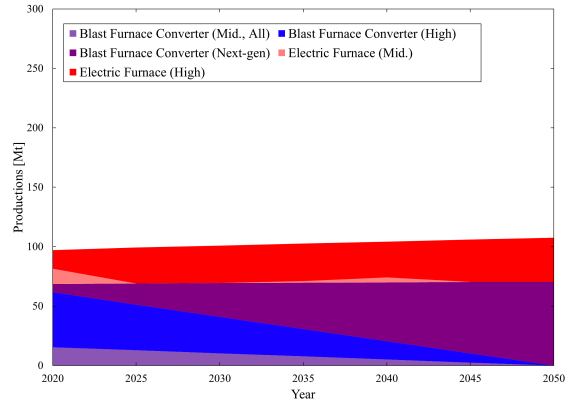


図 G.116 \$10\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).

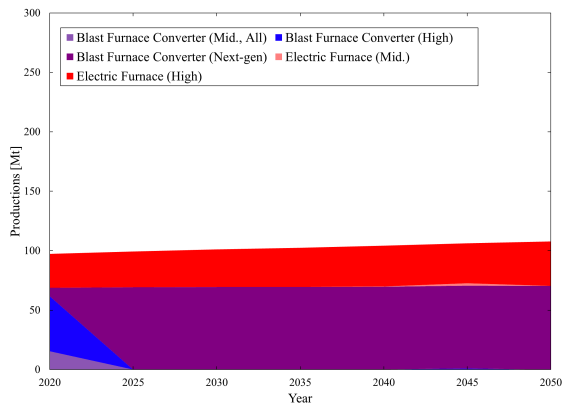


図 G.117 \$50 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).

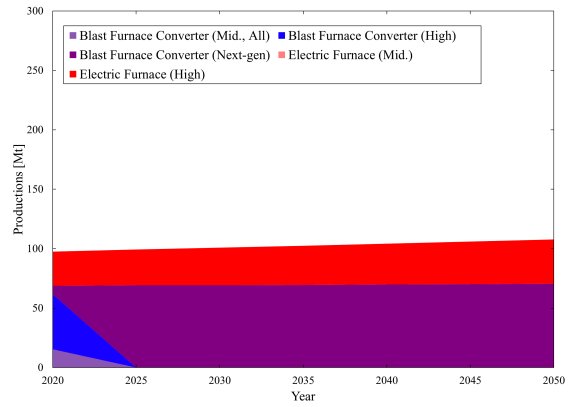


図 G.118 \$50\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).

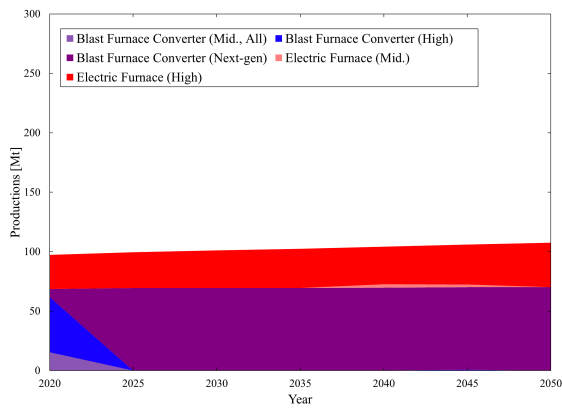


図 G.119 \$150 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).

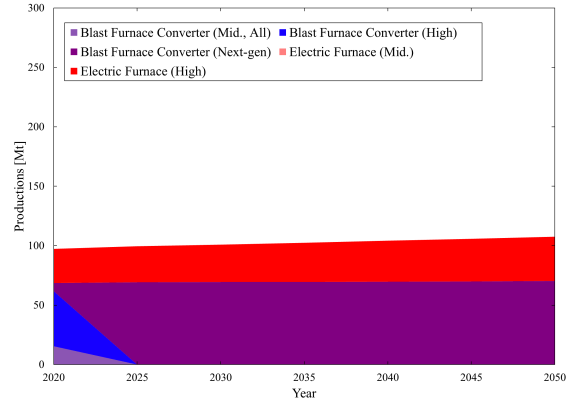


図 G.120 \$150\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).

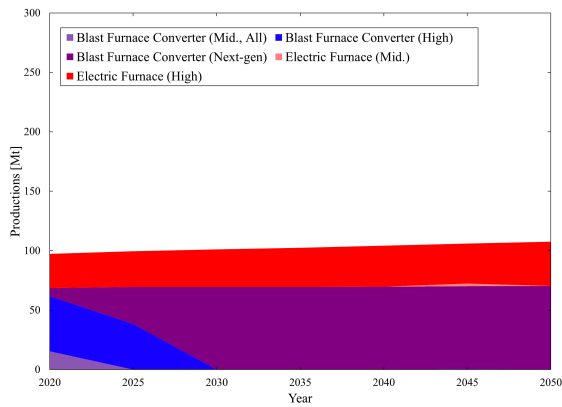


図 G.121 RAMP ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).

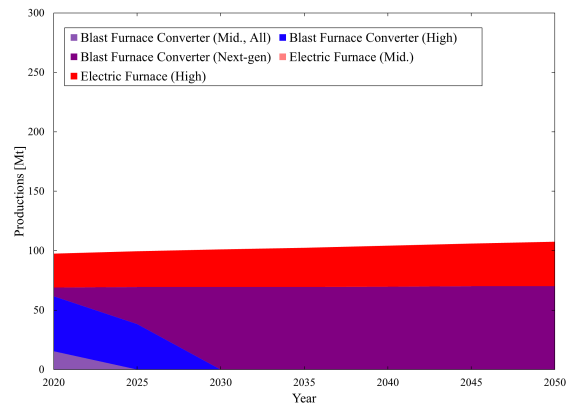


図 G.122 RAMP\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (SuperHigh).

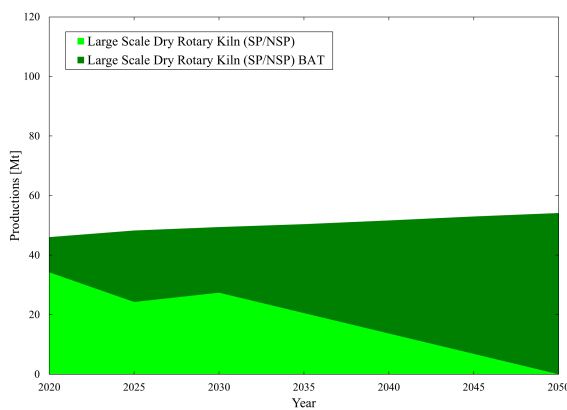


図 G.123 \$10 ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).

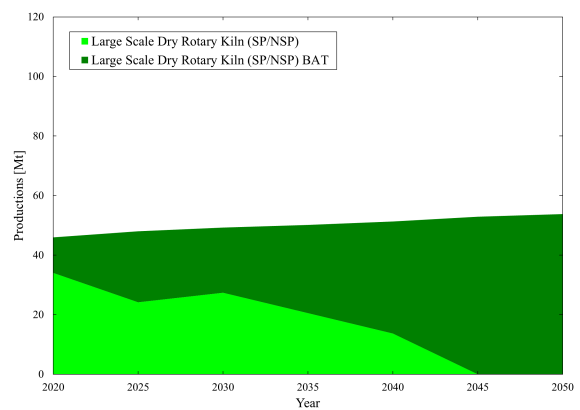


図 G.124 \$10\_N ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).



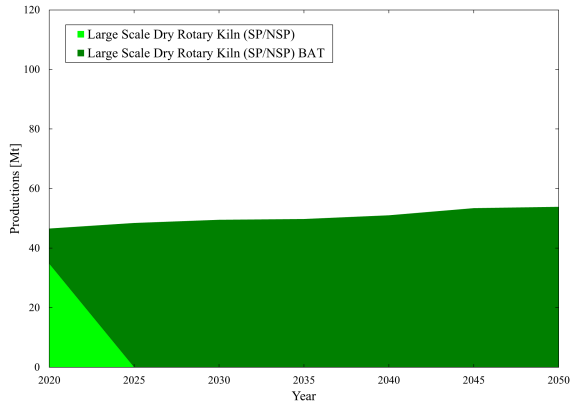


図 G.125 \$50 ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).

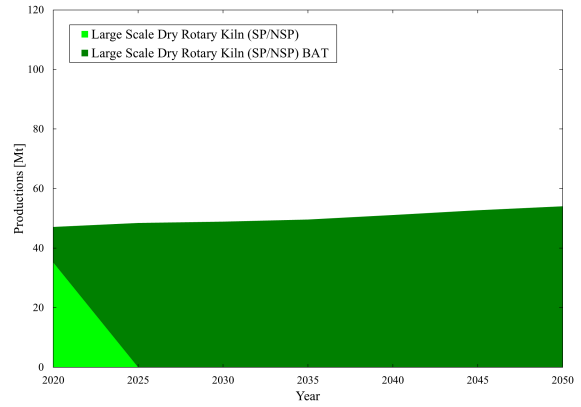


図 G.126 \$50\_N ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).

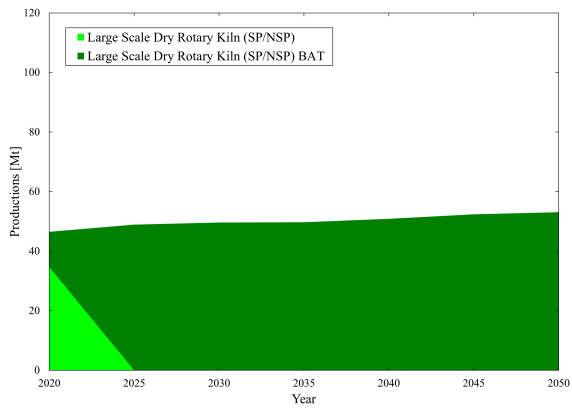


図 G.127 \$150 ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).

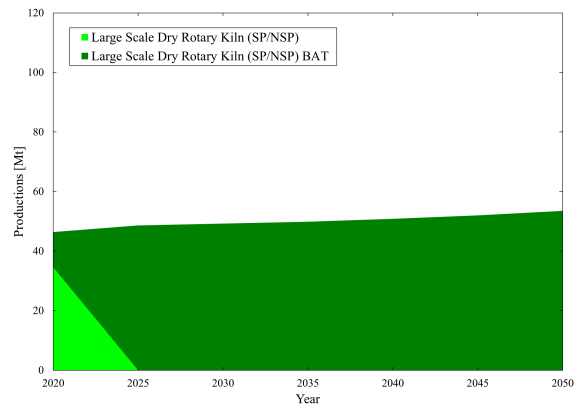


図 G.128 \$150\_N ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).

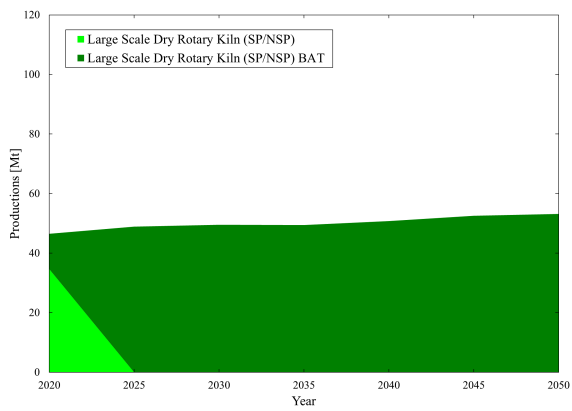


図 G.129 RAMP ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).

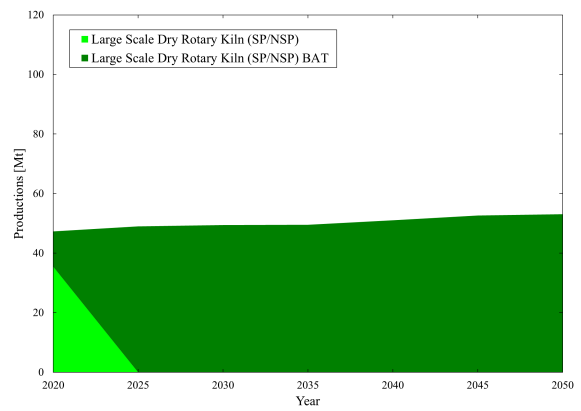


図 G.130 RAMP\_N ケースのセメント部門の技術選択 (SuperHigh).

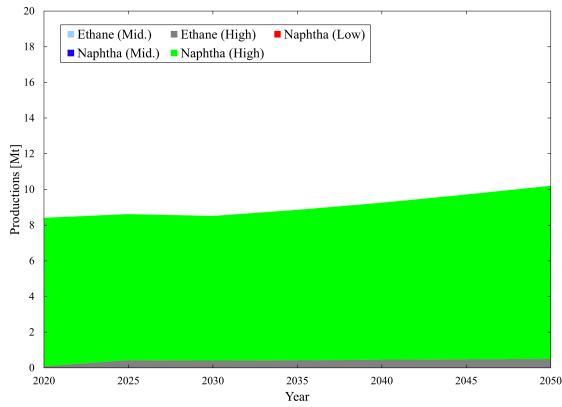


図 G.131 \$10 ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).

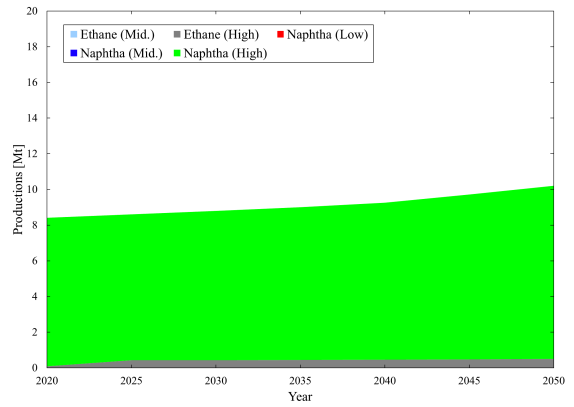


図 G.132 \$10\_N ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).

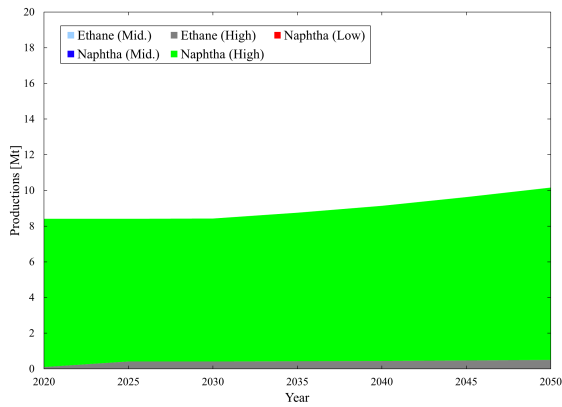


図 G.133 \$50 ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).

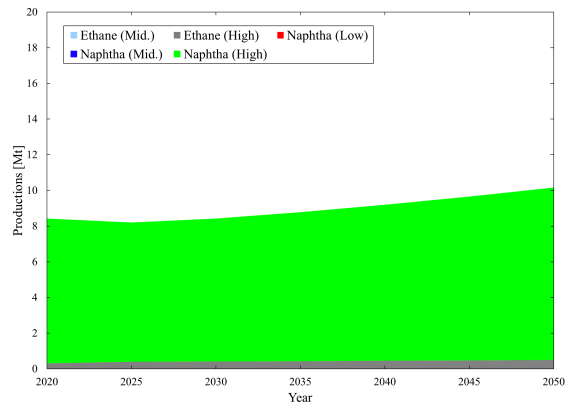


図 G.134 \$50\_N ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).

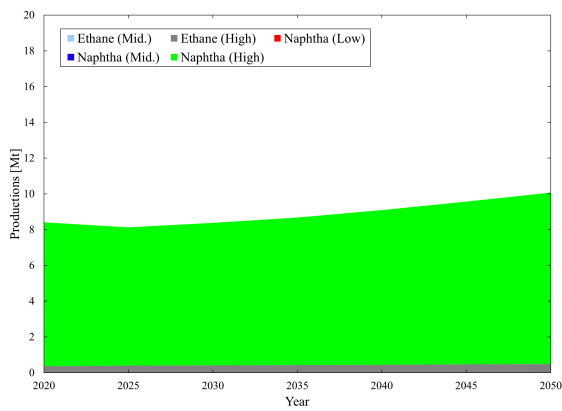


図 G.135 \$150 ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).

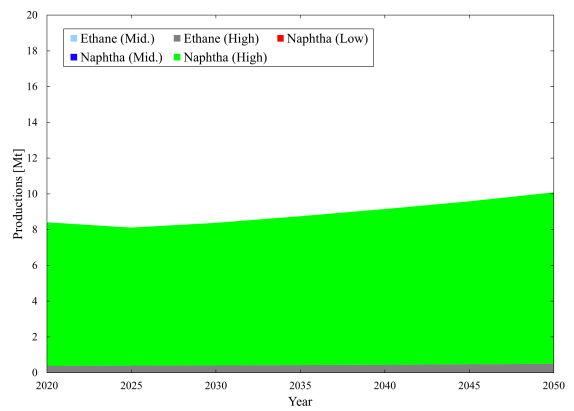


図 G.136 \$150\_N ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).

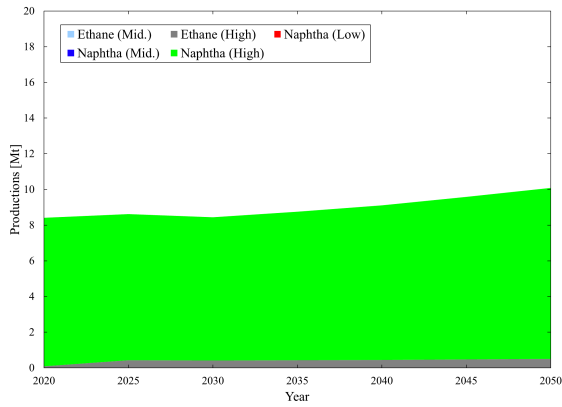


図 G.137 RAMP ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).

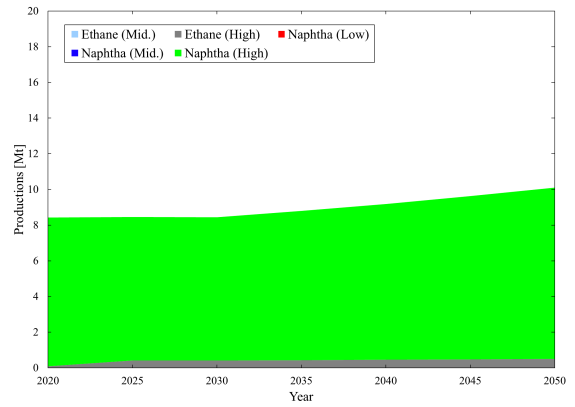


図 G.138 RAMP\_N ケースの石油化学部門の技術選択 (SuperHigh).

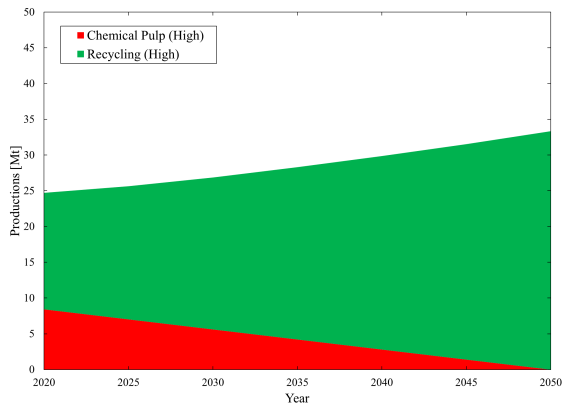


図 G.139 \$10 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).

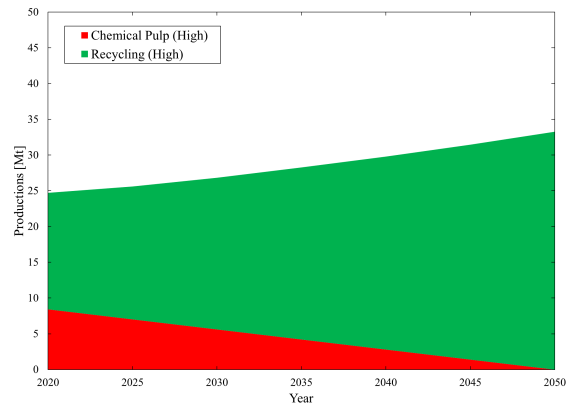


図 G.140 \$10\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).

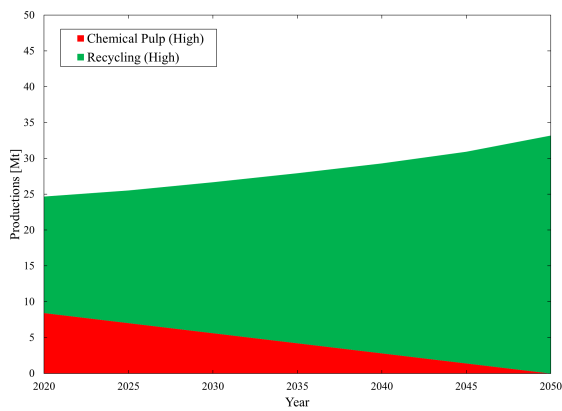


図 G.141 \$50 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).

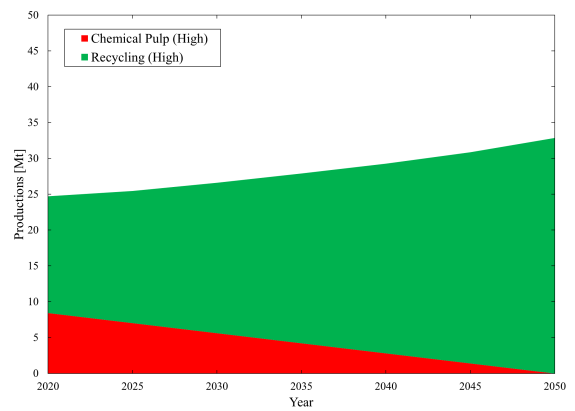


図 G.142 \$50\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).

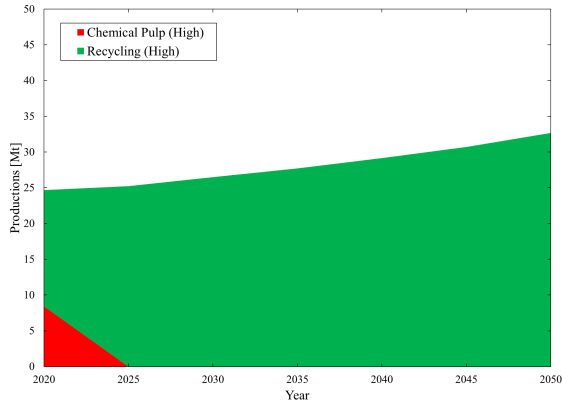


図 G.143 \$150 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).

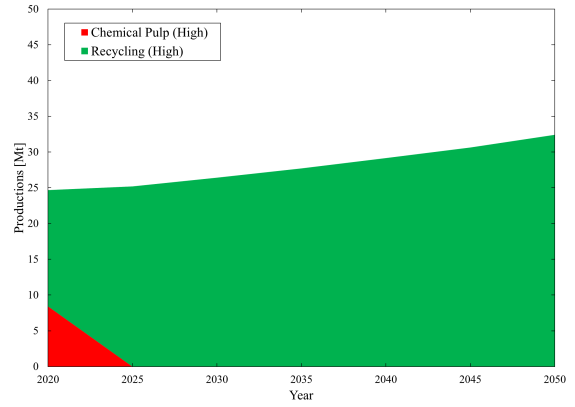


図 G.144 \$150\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).

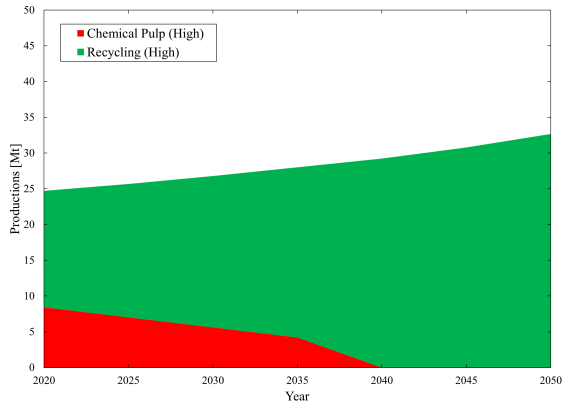


図 G.145 RAMP ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).

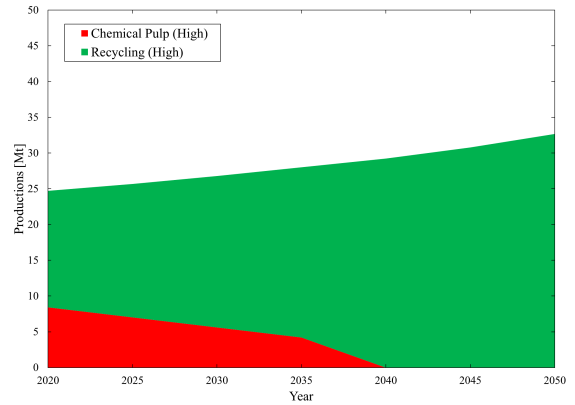


図 G.146 RAMP\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (SuperHigh).

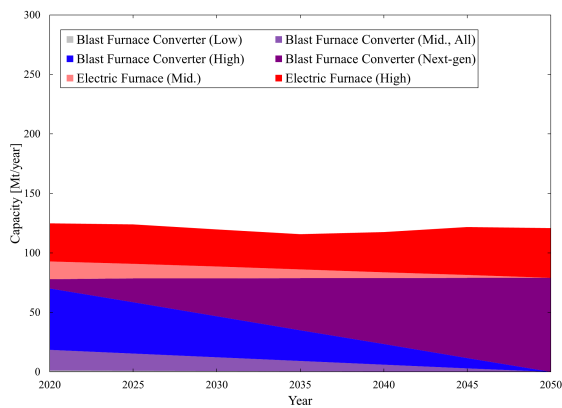


図 G.147 \$10 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).

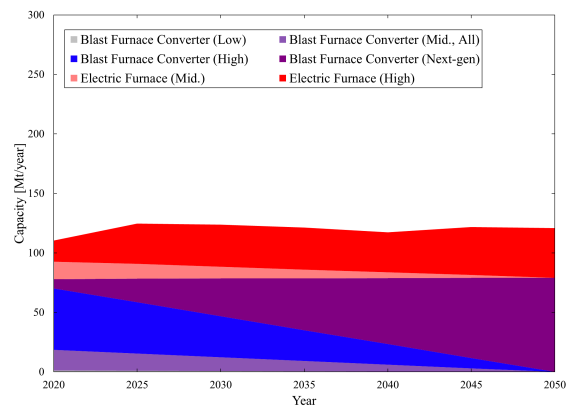


図 G.148 \$10\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).

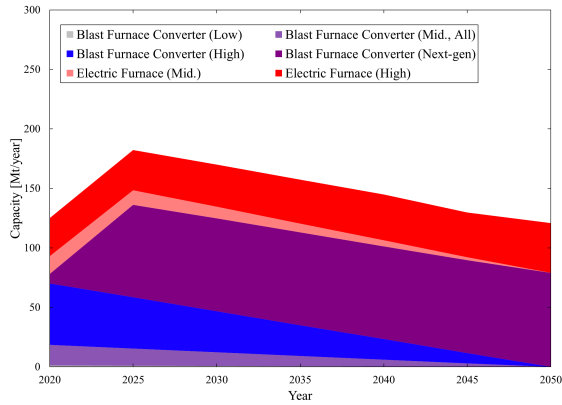


図 G.149 \$50 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).

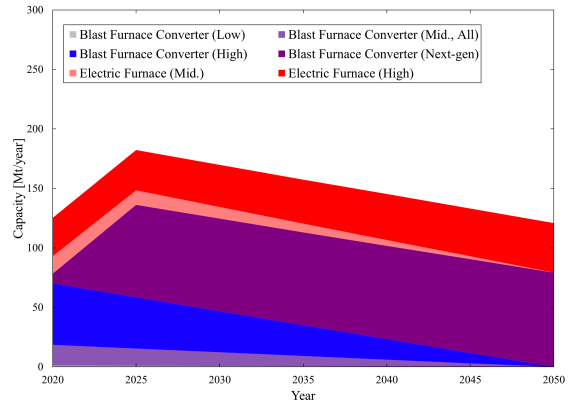


図 G.150 \$50\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).

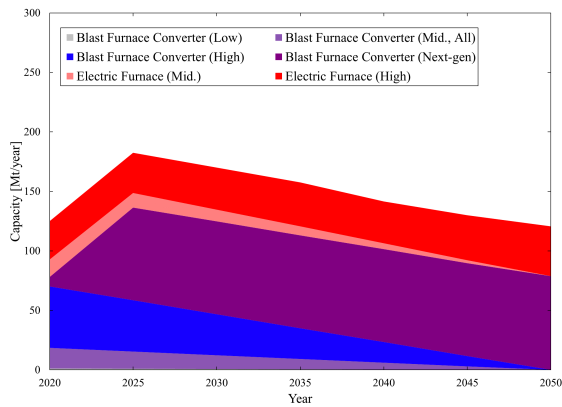


図 G.151 \$150 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).

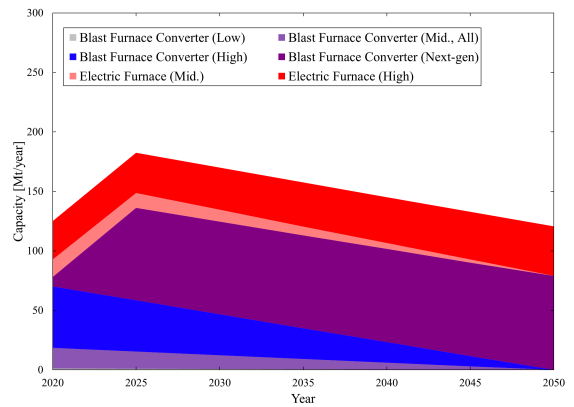


図 G.152 \$150\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).

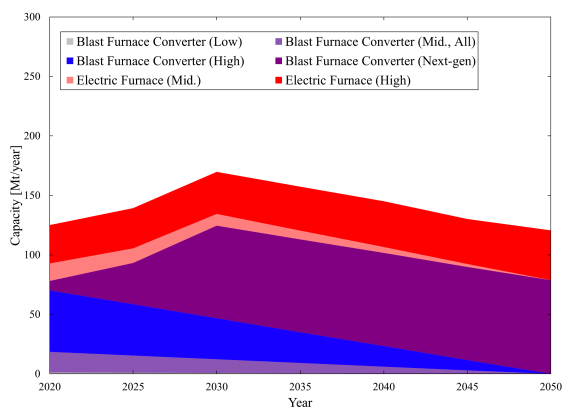


図 G.153 RAMP ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).

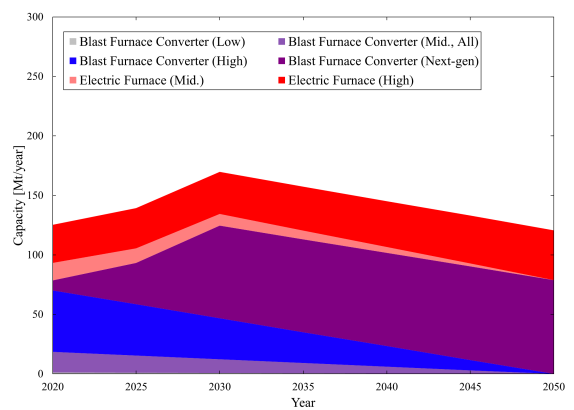


図 G.154 RAMP\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (SuperHigh).

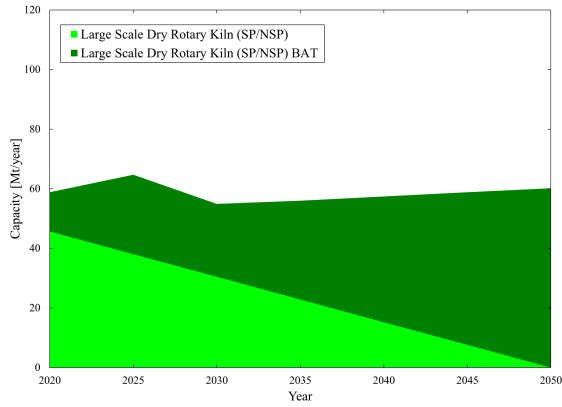


図 G.155 \$10 ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).

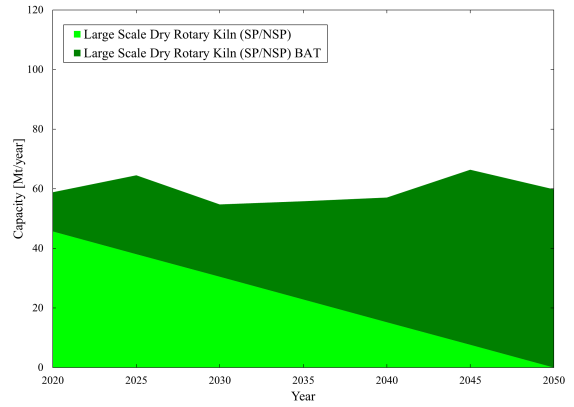


図 G.156 \$10\_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).

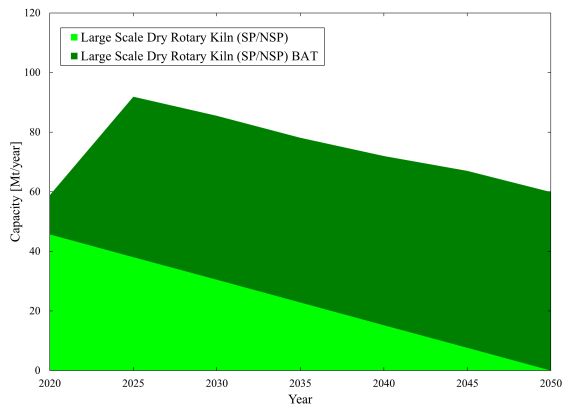


図 G.157 \$50 ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).

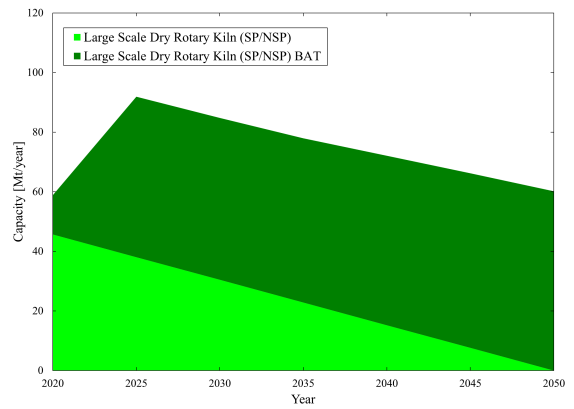


図 G.158 \$50\_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).

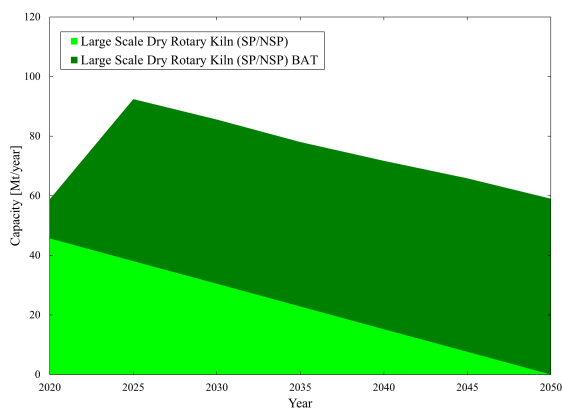


図 G.159 \$150 ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).

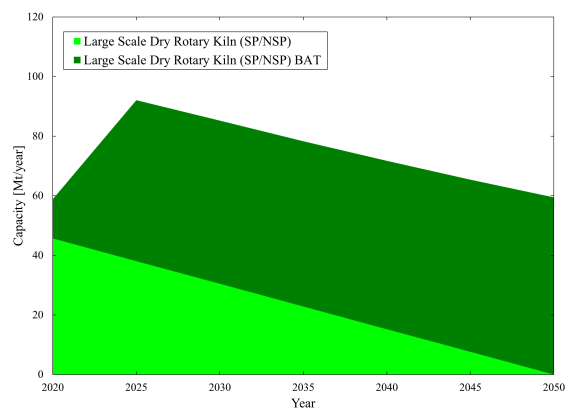


図 G.160 \$150\_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).

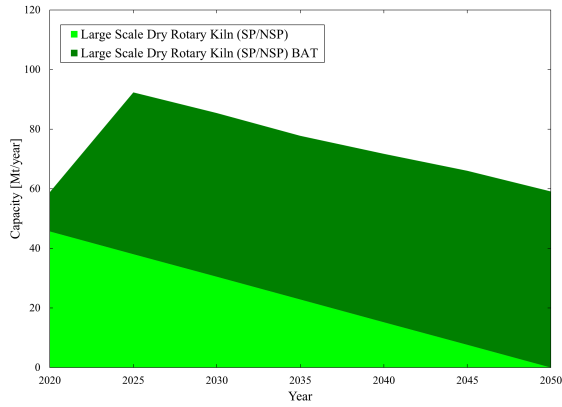


図 G.161 RAMP ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).

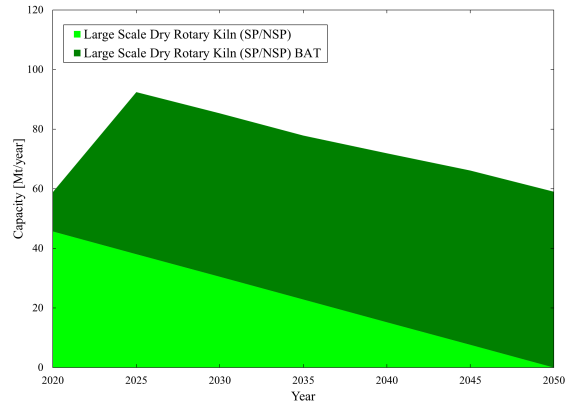


図 G.162 RAMP\_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (SuperHigh).

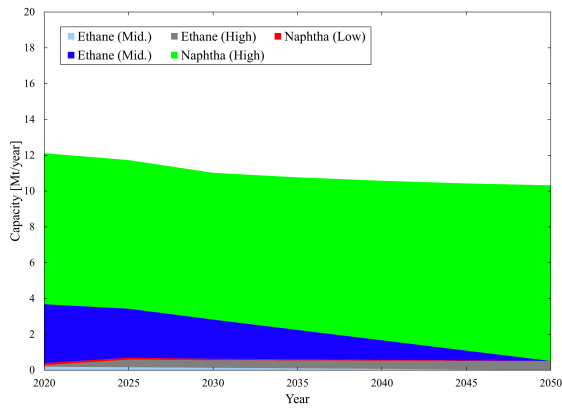


図 G.163 \$10 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).

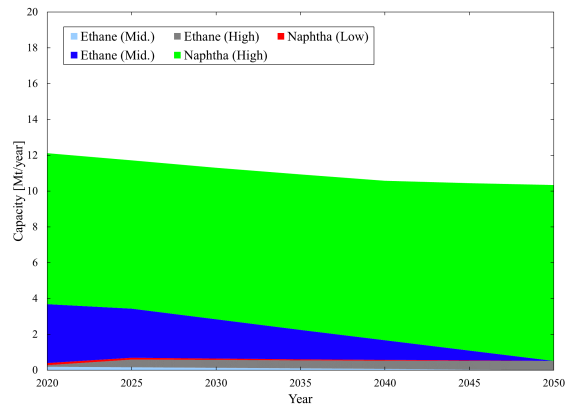


図 G.164 \$10\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).

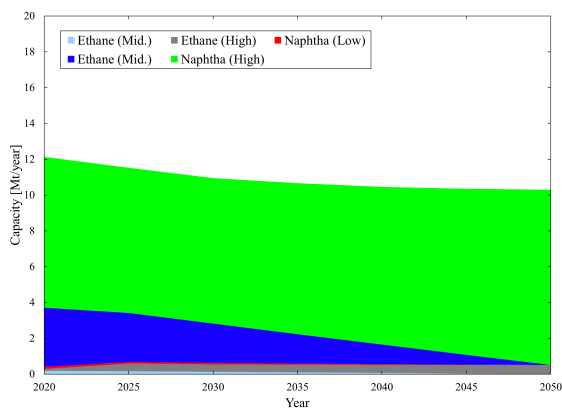


図 G.165 \$50 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).

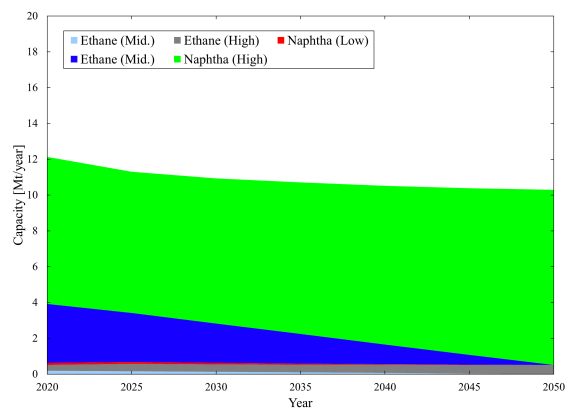


図 G.166 \$50\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).

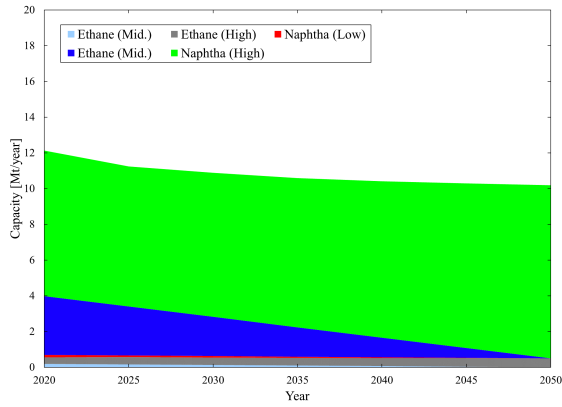


図 G.167 \$150 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).

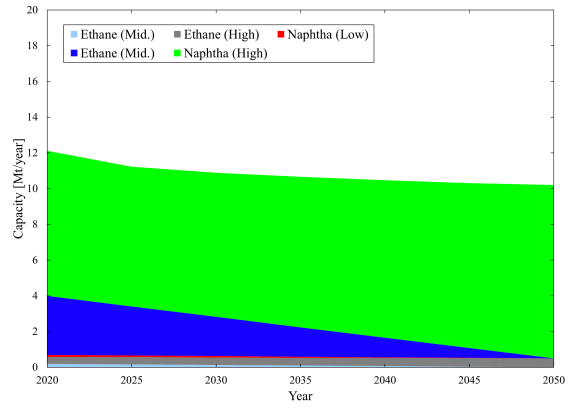


図 G.168 \$150\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).

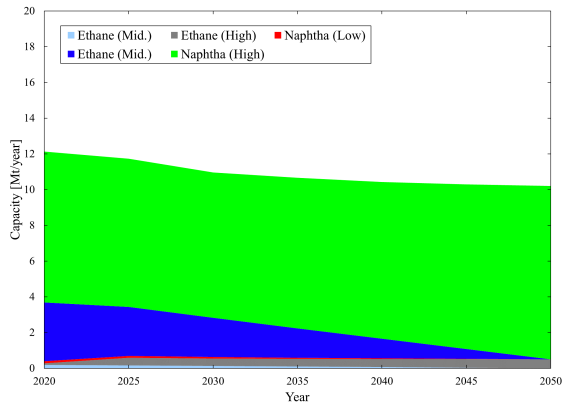


図 G.169 RAMP ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).

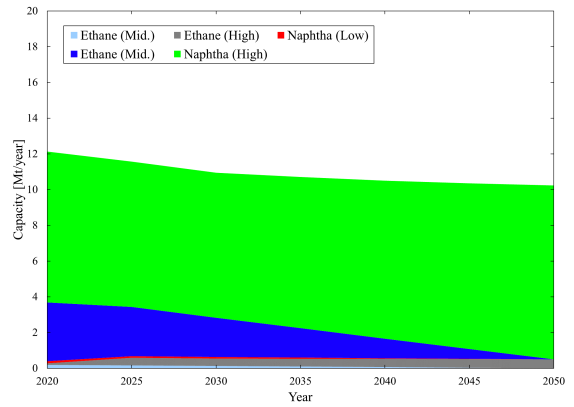


図 G.170 RAMP\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (SuperHigh).

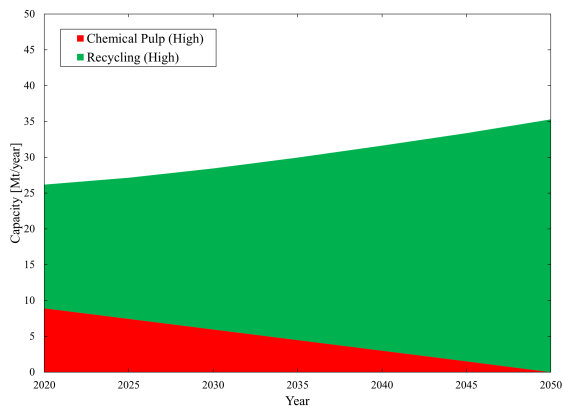


図 G.171 \$10 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).

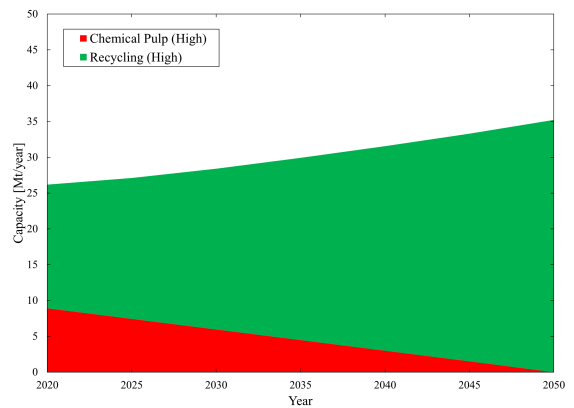


図 G.172 \$10\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).



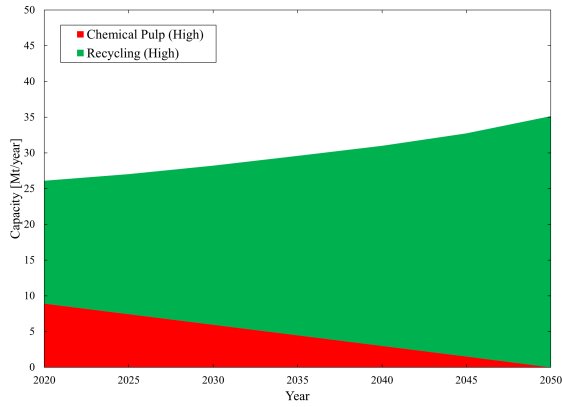


図 G.173 \$50 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).

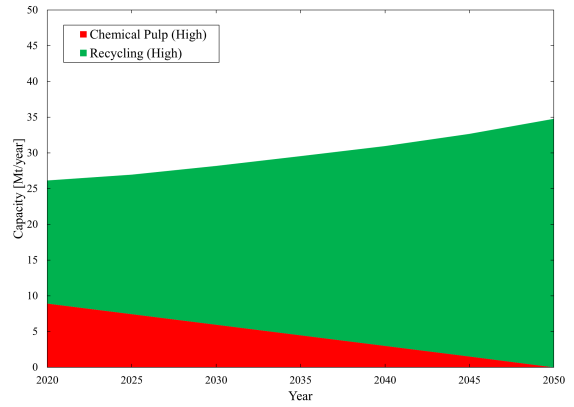


図 G.174 \$50\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).

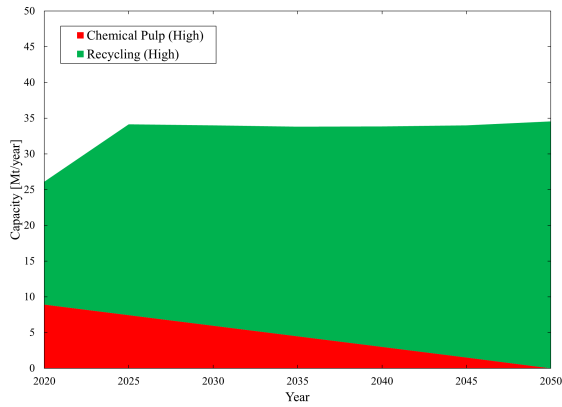


図 G.175 \$150 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).

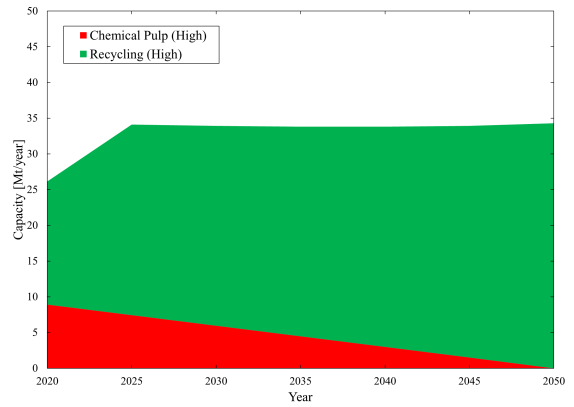


図 G.176 \$150\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).

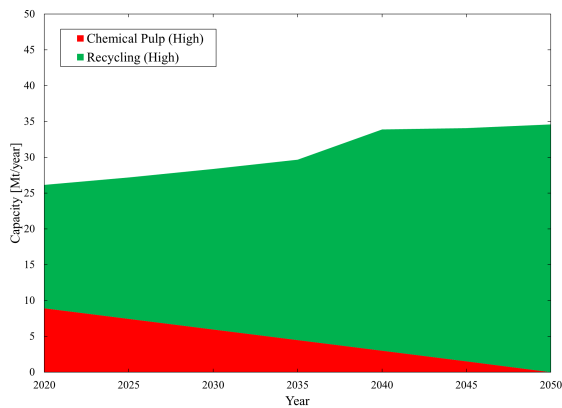


図 G.177 RAMP ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).

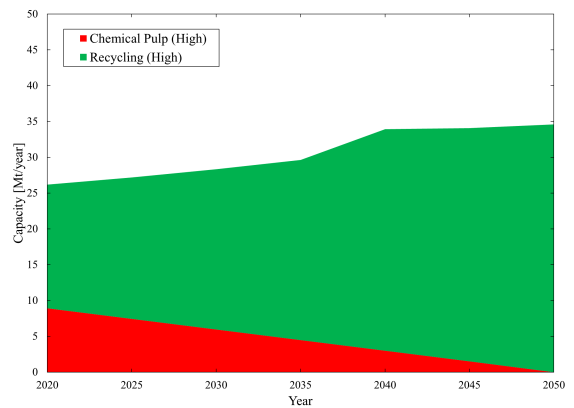


図 G.178 RAMP\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (SuperHigh).

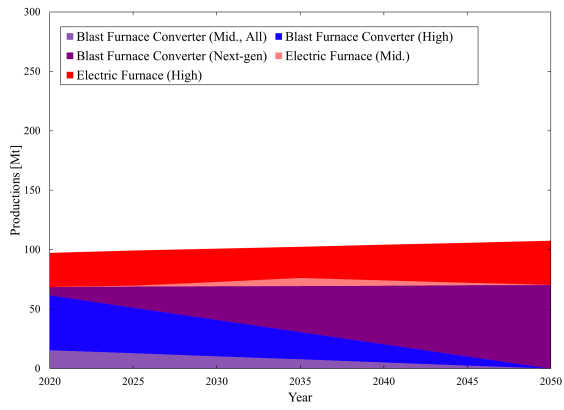


図 G.179 \$10 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).

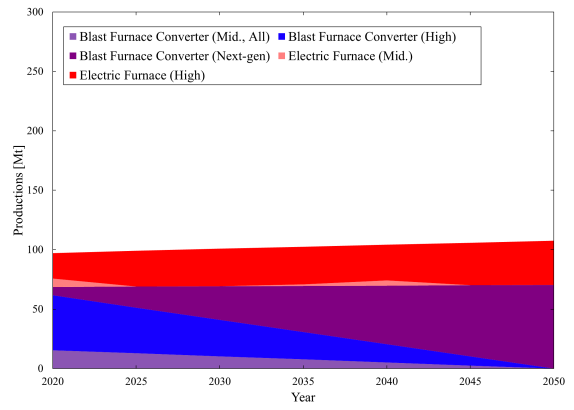


図 G.180 \$10\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).

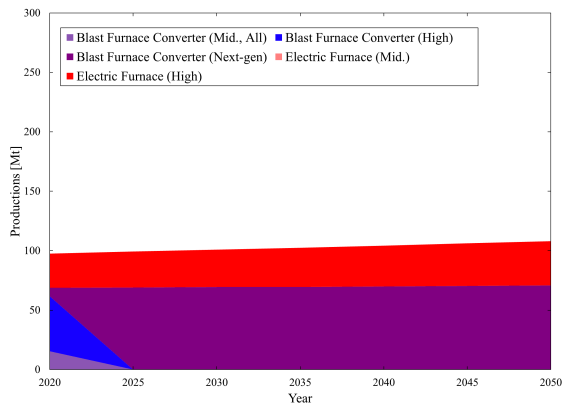


図 G.181 \$50 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).

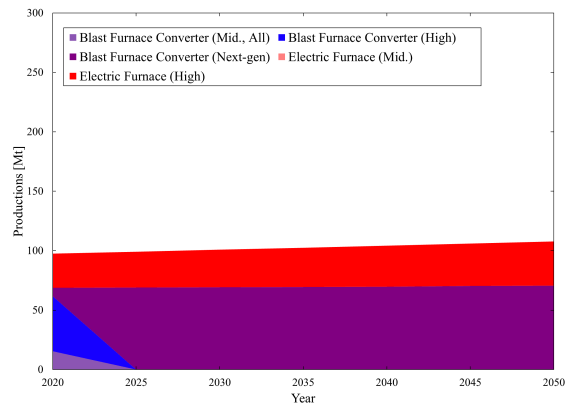


図 G.182 \$50\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).

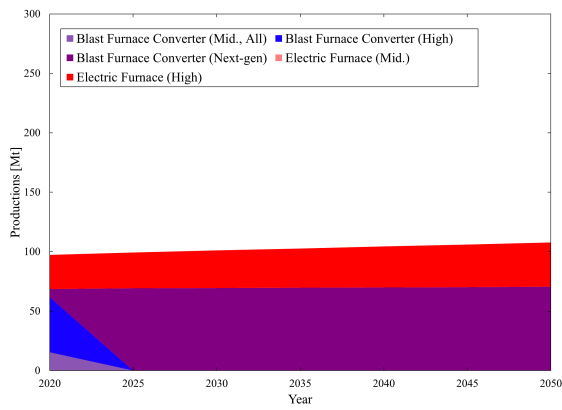


図 G.183 \$150 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).

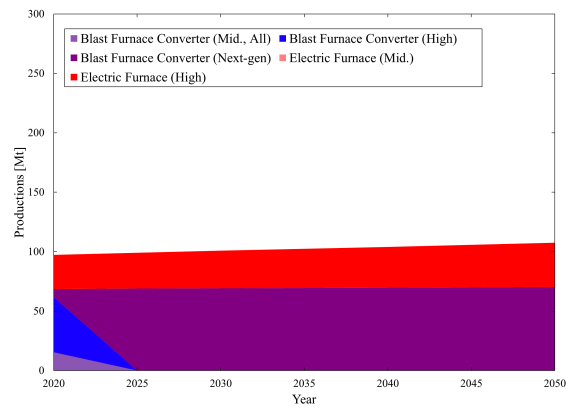


図 G.184 \$150\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).

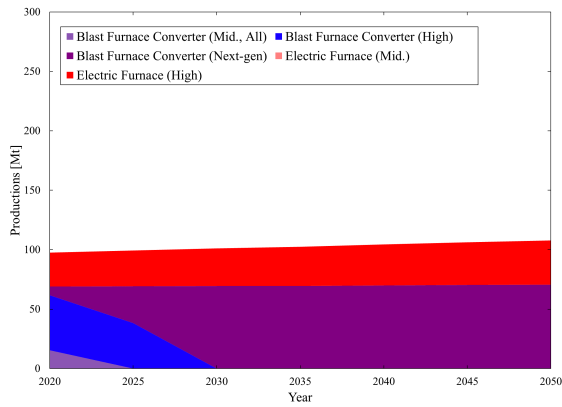


図 G.185 RAMP ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).

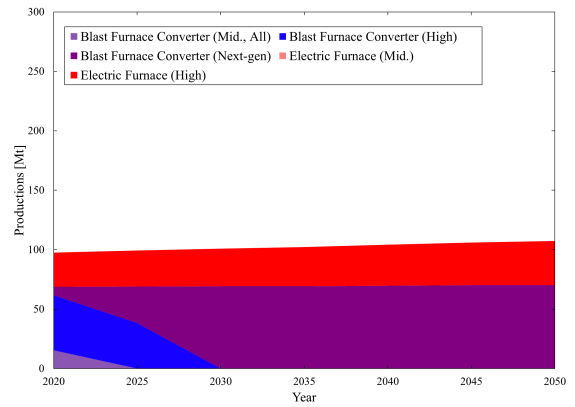


図 G.186 RAMP\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (High).

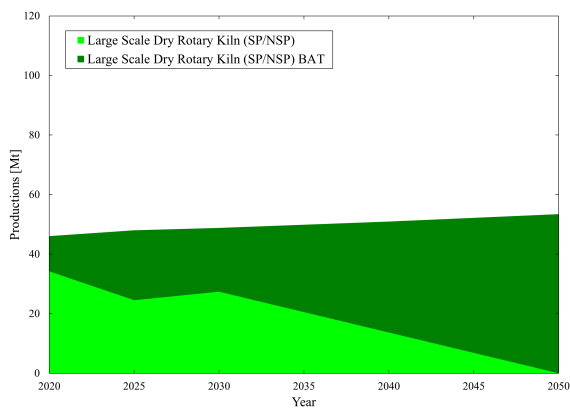


図 G.187 \$10 ケースのセメント部門の技術選択 (High).

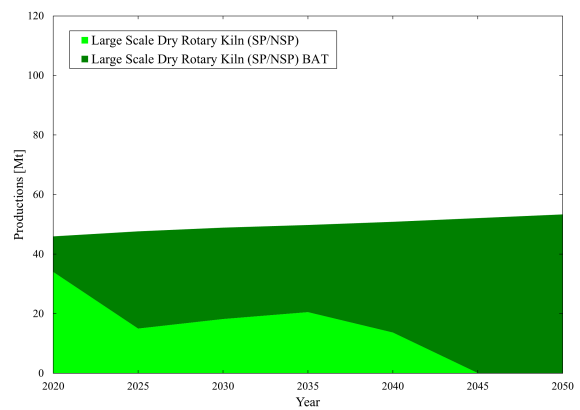


図 G.188 \$10\_N ケースのセメント部門の技術選択 (High).

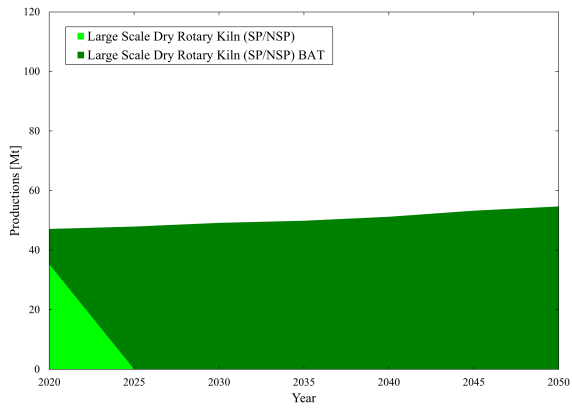


図 G.189 \$50 ケースのセメント部門の技術選択 (High).

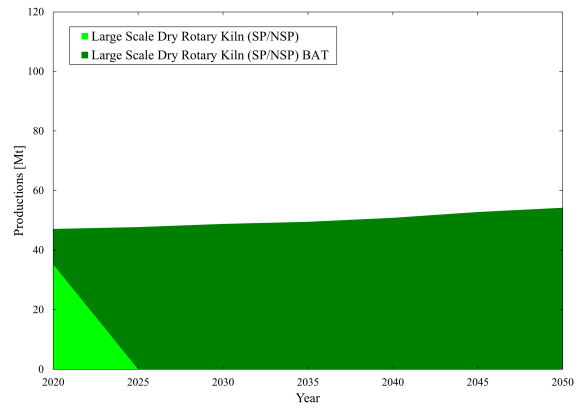


図 G.190 \$50\_N ケースのセメント部門の技術選択 (High).

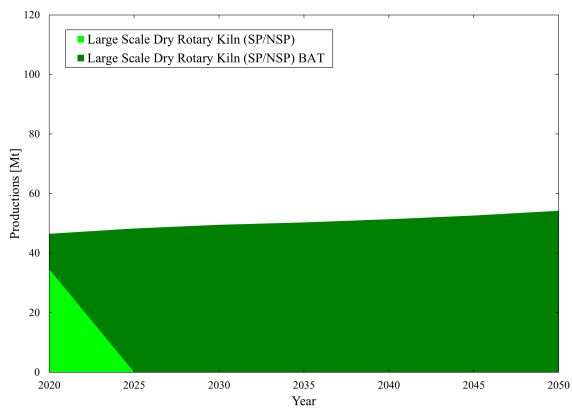


図 G.191 \$150 ケースのセメント部門の技術選択 (High).

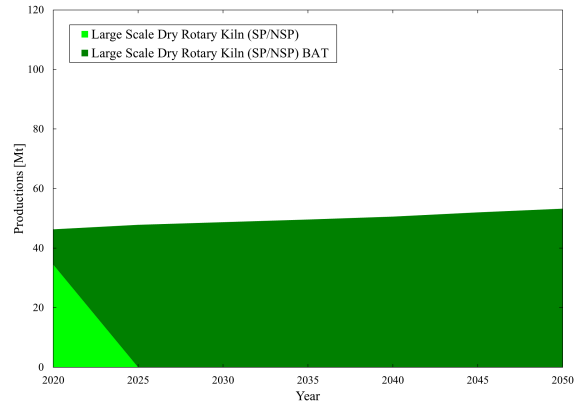


図 G.192 \$150\_N ケースのセメント部門の技術選択 (High).

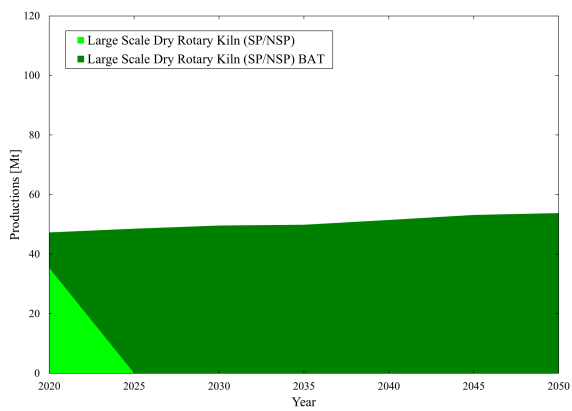


図 G.193 RAMP ケースのセメント部門の技術選択 (High).

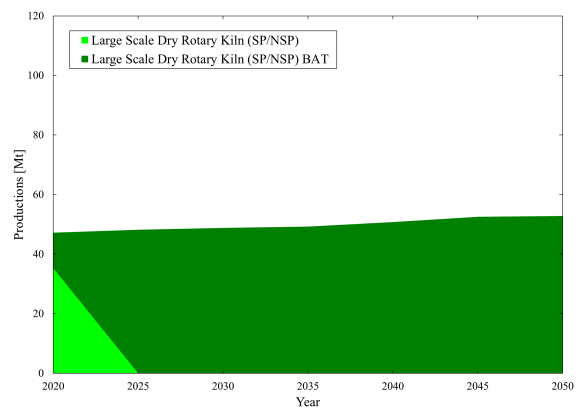


図 G.194 RAMP\_N ケースのセメント部門の技術選択 (High).

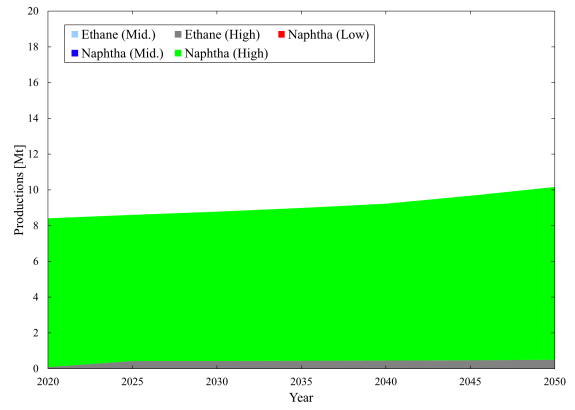
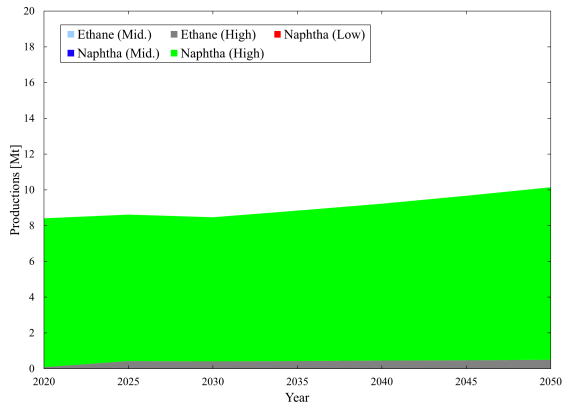


図 G.195 \$10 ケースの石油化学部門の技術選択 (High).

図 G.196 \$10\_N ケースの石油化学部門の技術選択 (High).

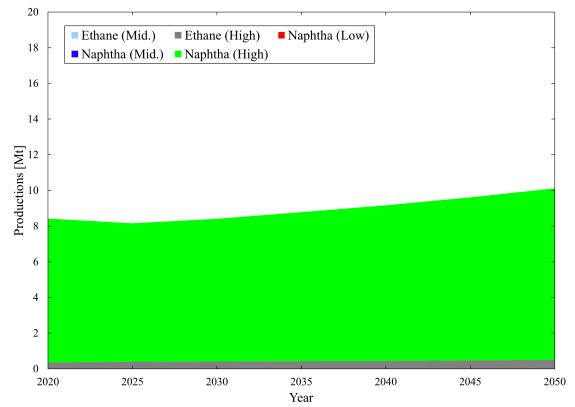
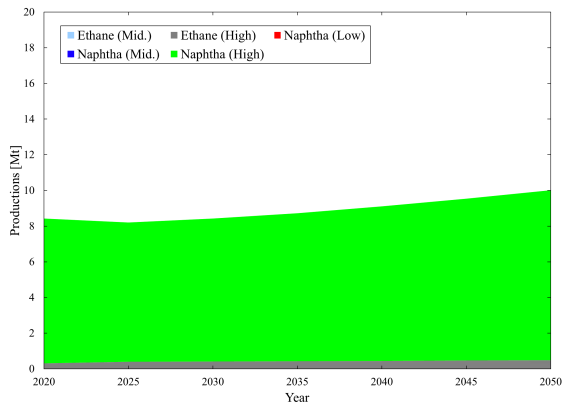


図 G.197 \$50 ケースの石油化学部門の技術選択 (High).

図 G.198 \$50\_N ケースの石油化学部門の技術選択 (High).

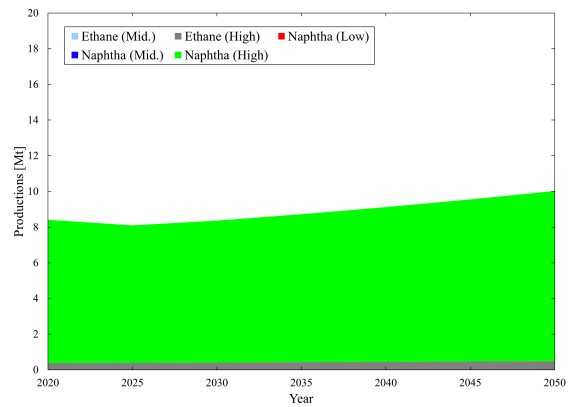
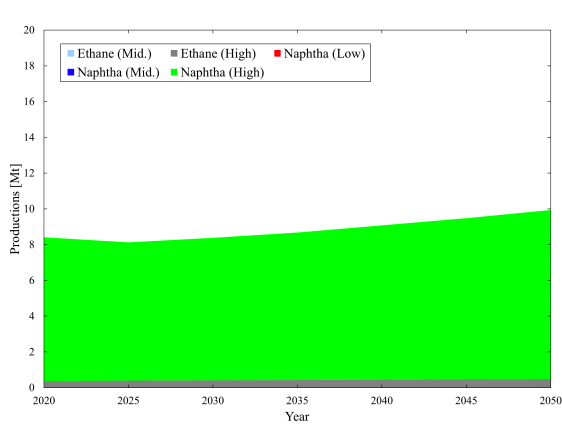


図 G.199 \$150 ケースの石油化学部門の技術選択 (High).

図 G.200 \$150\_N ケースの石油化学部門の技術選択 (High).

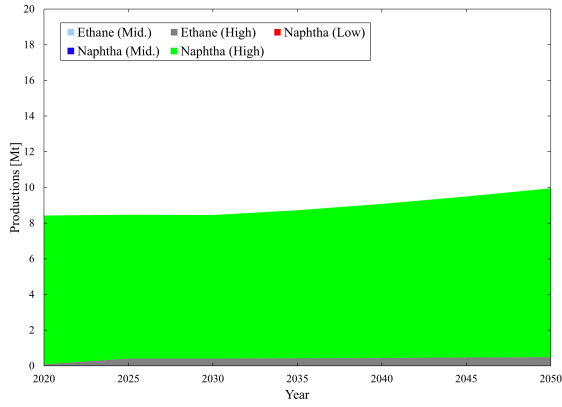


図 G.201 RAMP ケースの石油化学部門の技術選択 (High).

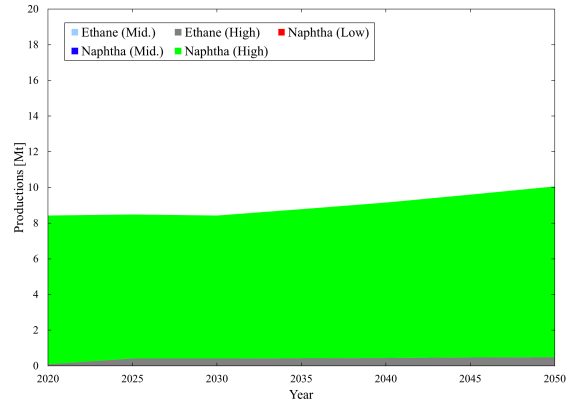


図 G.202 RAMP\_N ケースの石油化学部門の技術選択 (High).

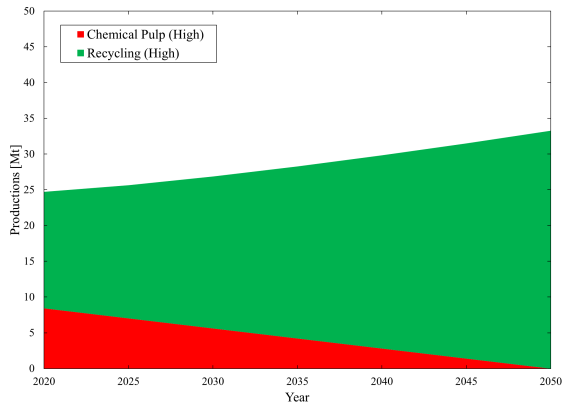


図 G.203 \$10 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).

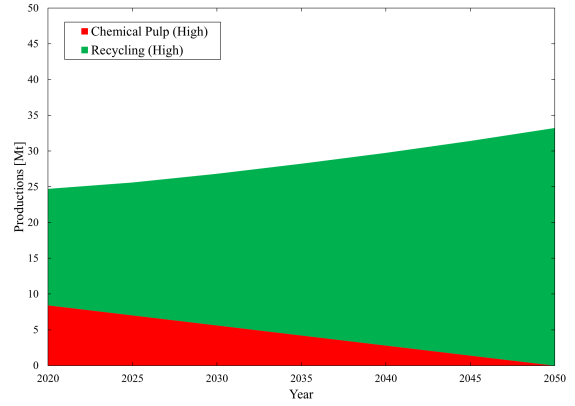


図 G.204 \$10\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).

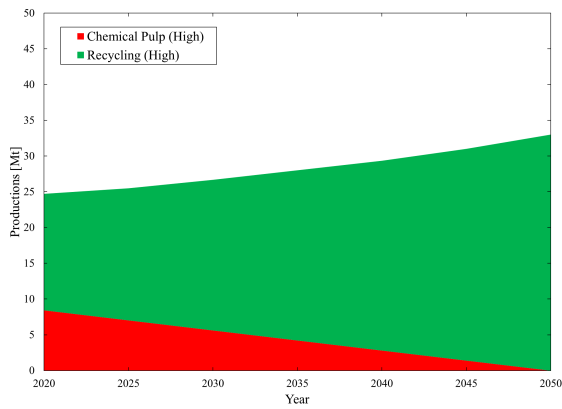


図 G.205 \$50 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).

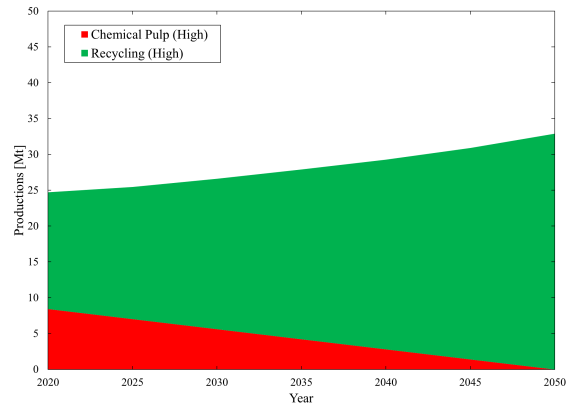


図 G.206 \$50\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).

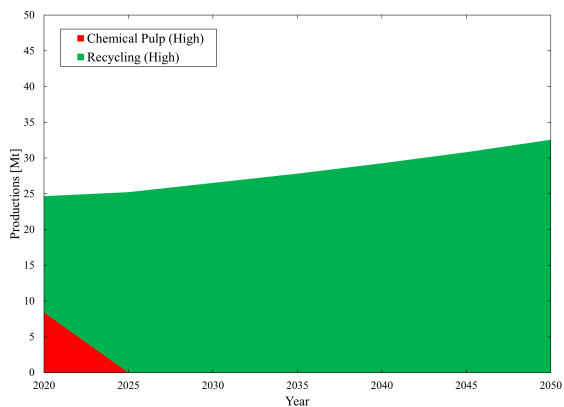


図 G.207 \$150 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).

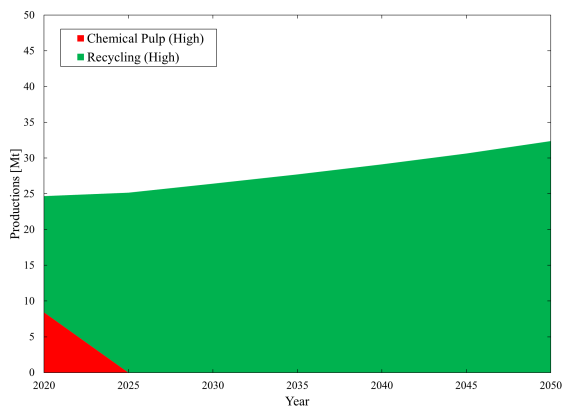


図 G.208 \$150\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).

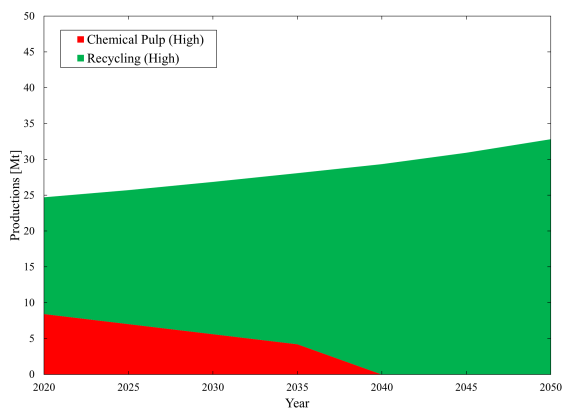


図 G.209 RAMP ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).

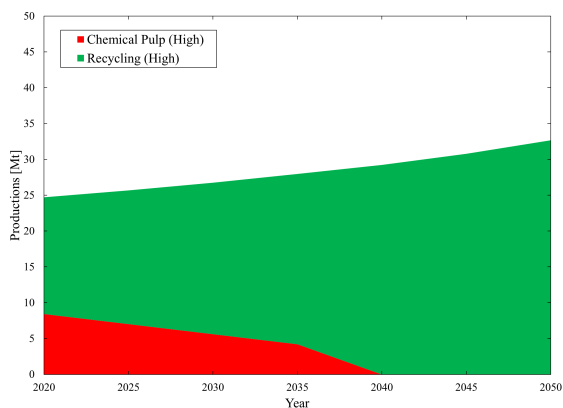


図 G.210 RAMP\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (High).

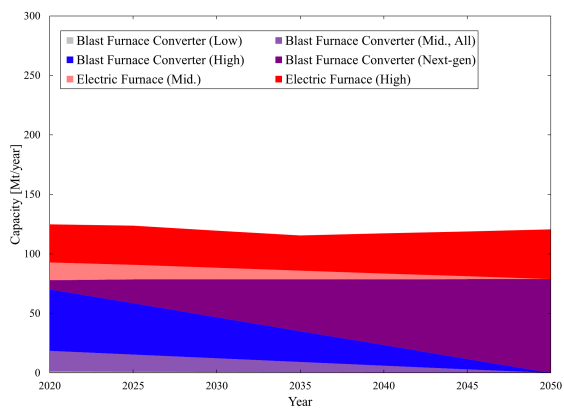


図 G.211 \$10 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).

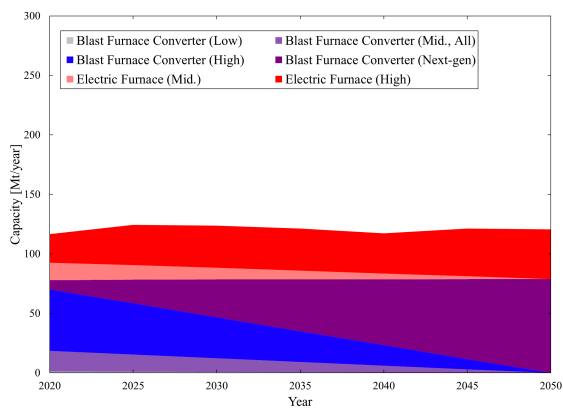


図 G.212 \$10\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).

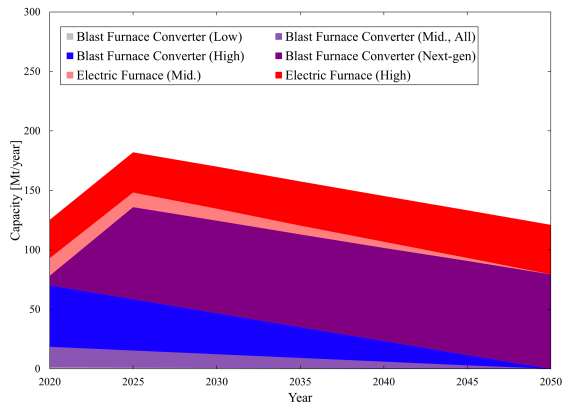


図 G.213 \$50 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).

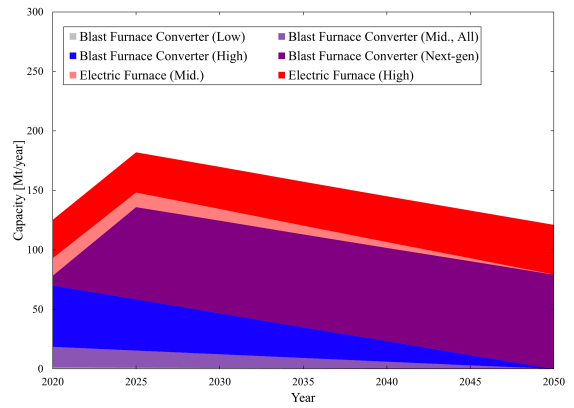


図 G.214 \$50\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).

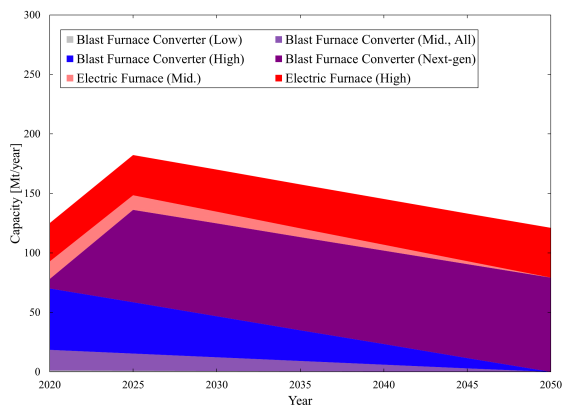


図 G.215 \$150 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).

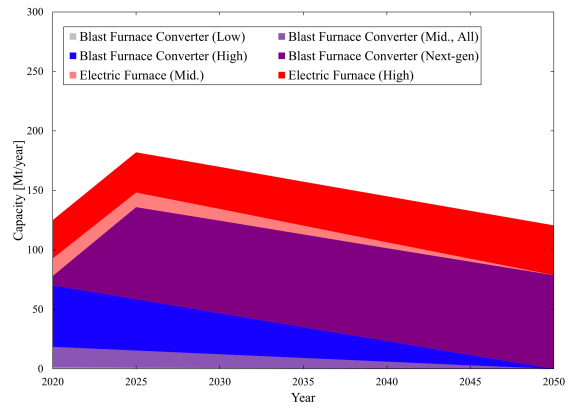


図 G.216 \$150\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).

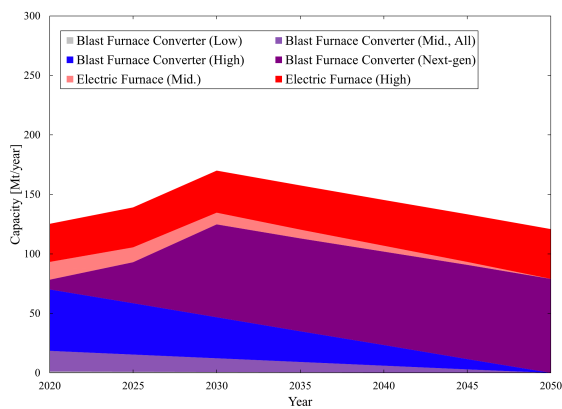


図 G.217 RAMP ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).

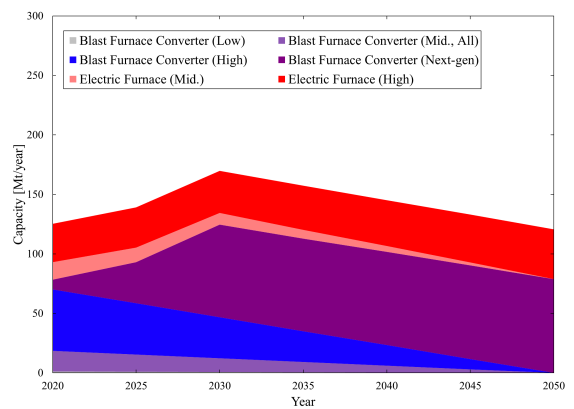


図 G.218 RAMP\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (High).



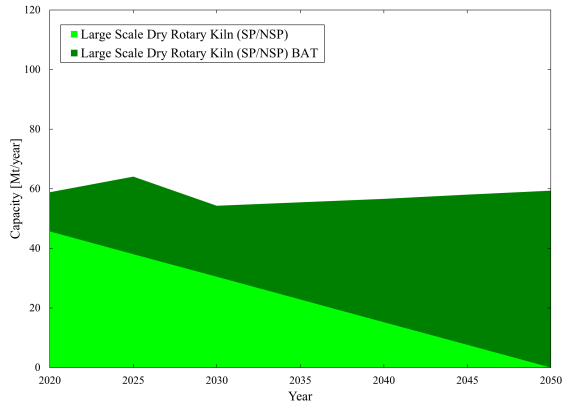


図 G.219 \$10 ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).

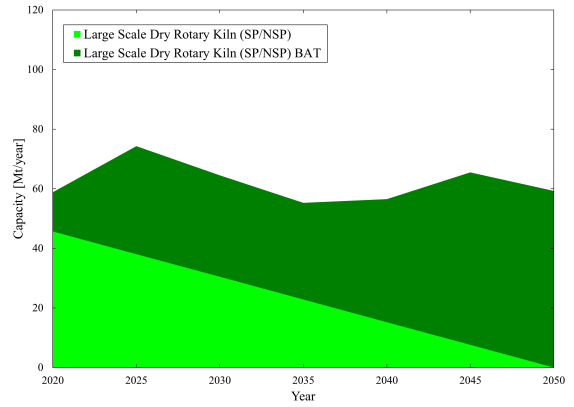


図 G.220 \$10\_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).

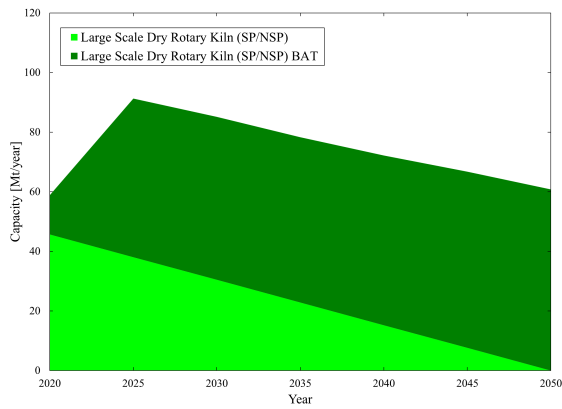


図 G.221 \$50 ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).

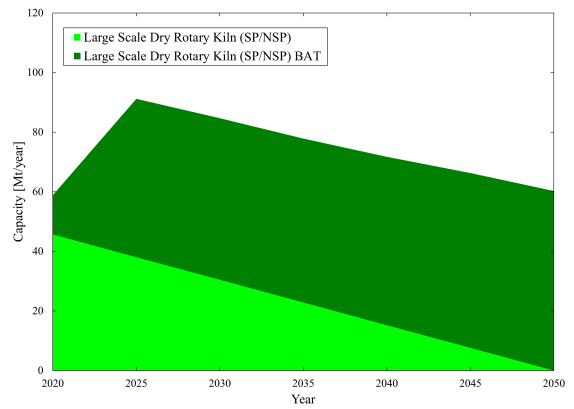


図 G.222 \$50\_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).

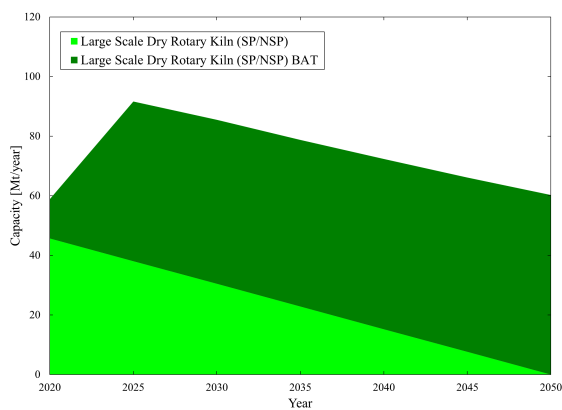


図 G.223 \$150 ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).

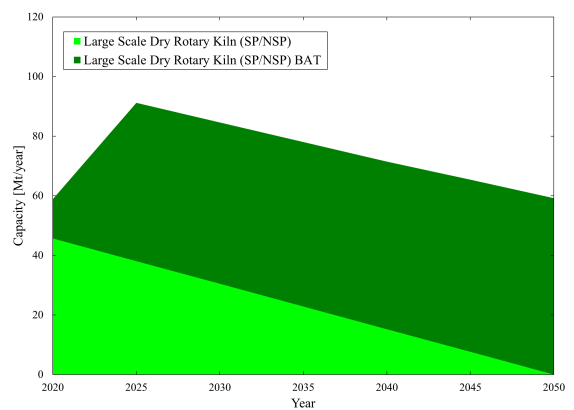


図 G.224 \$150\_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).

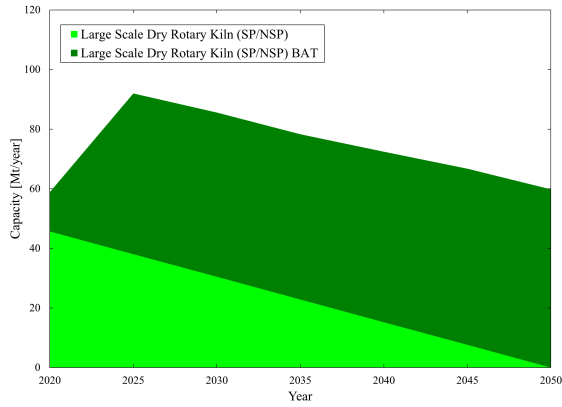


図 G.225 RAMP ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).

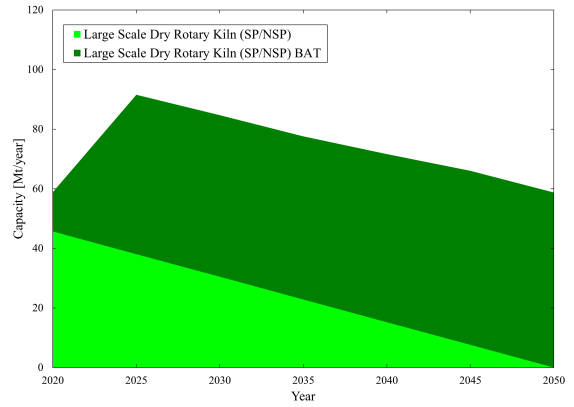


図 G.226 RAMP\_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (High).

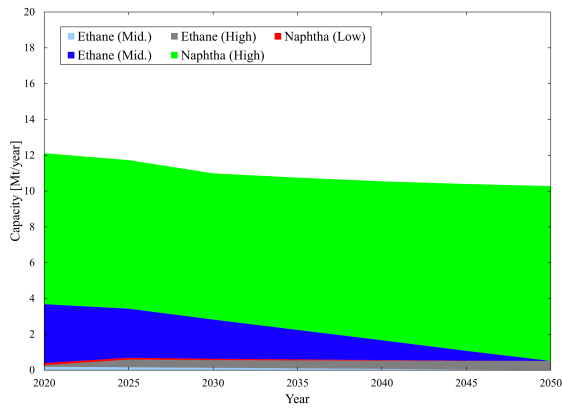


図 G.227 \$10 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).

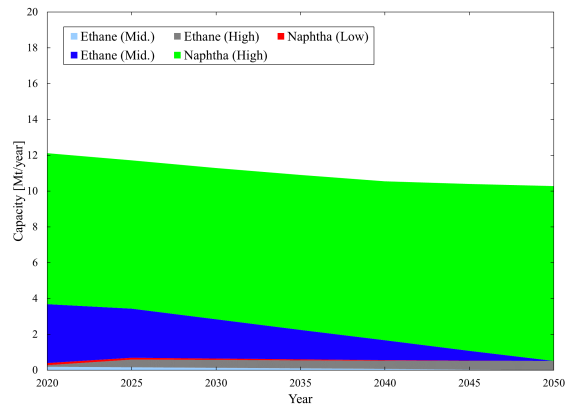


図 G.228 \$10\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).

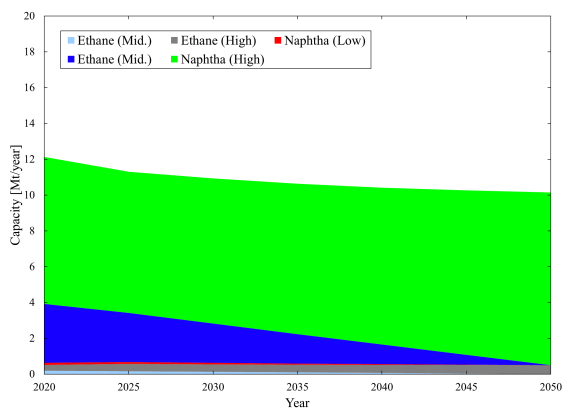


図 G.229 \$50 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).

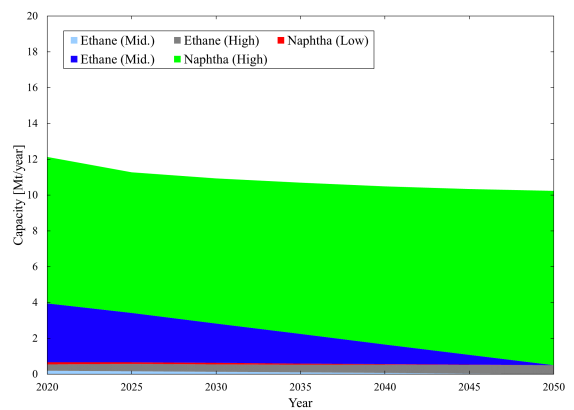


図 G.230 \$50\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).

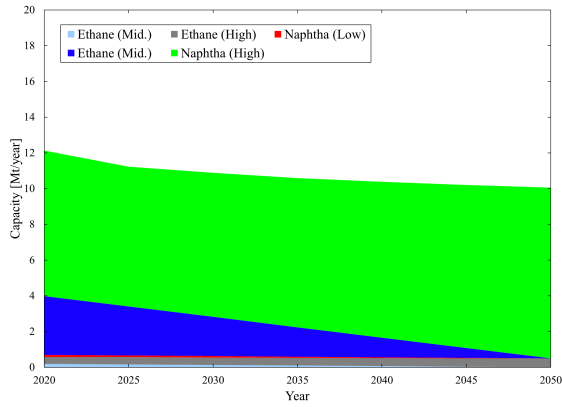


図 G.231 \$150 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).

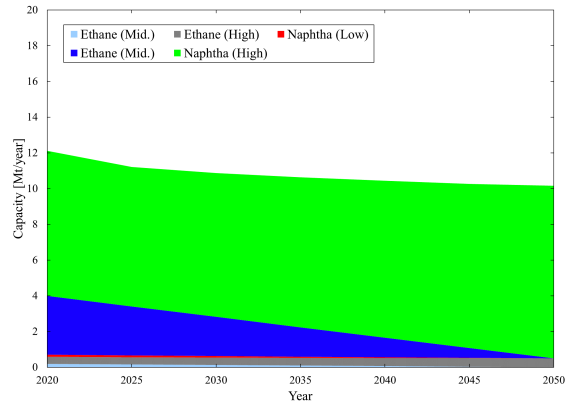


図 G.232 \$150\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).

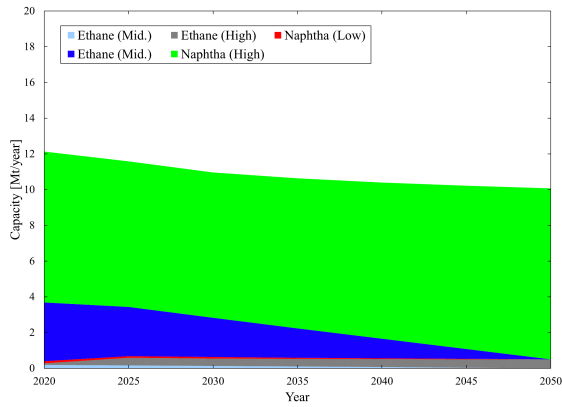


図 G.233 RAMP ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).

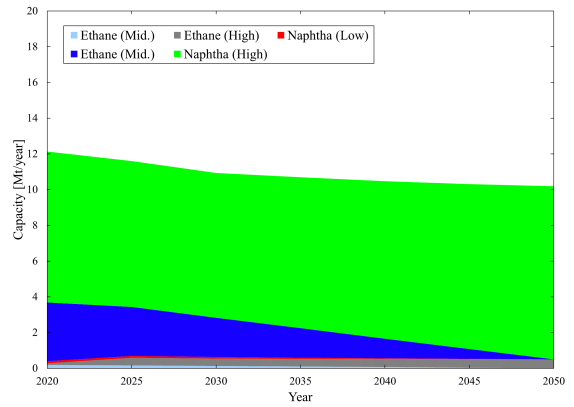


図 G.234 RAMP\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (High).

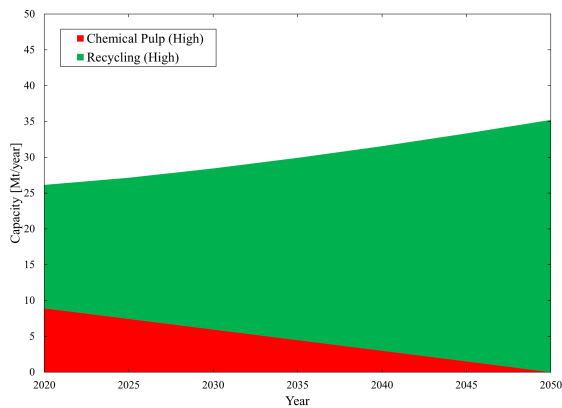


図 G.235 \$10 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).

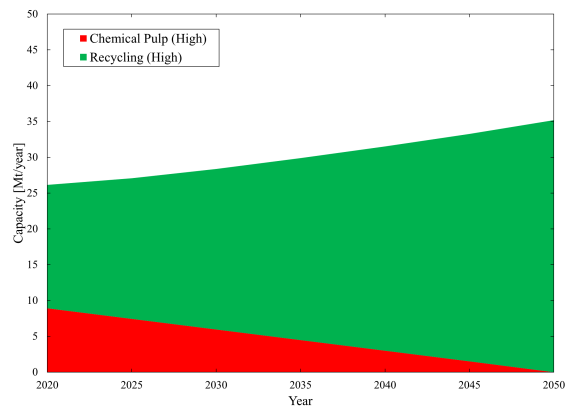


図 G.236 \$10\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).

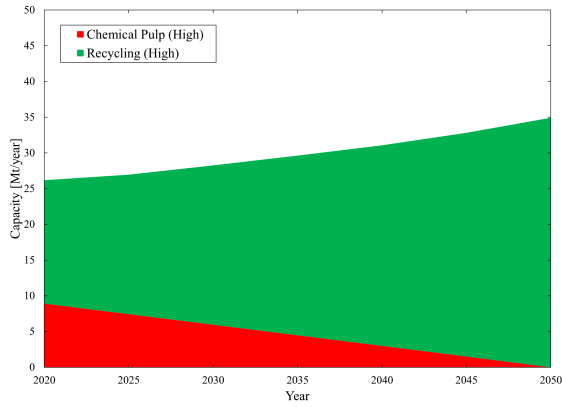


図 G.237 \$50 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).

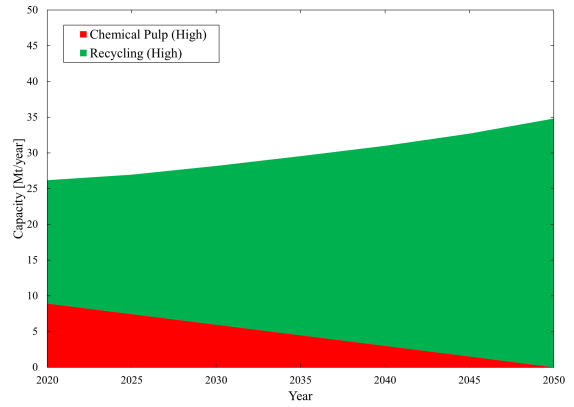


図 G.238 \$50\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).

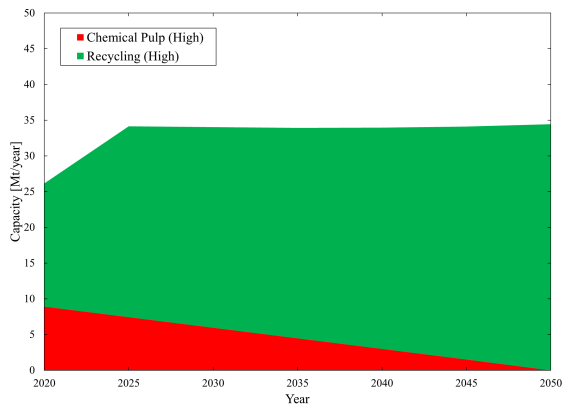


図 G.239 \$150 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).

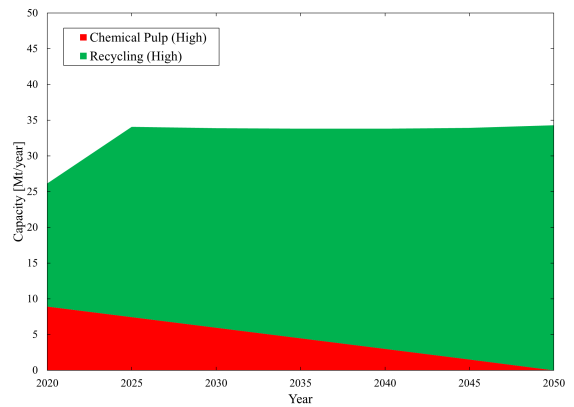


図 G.240 \$150\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).

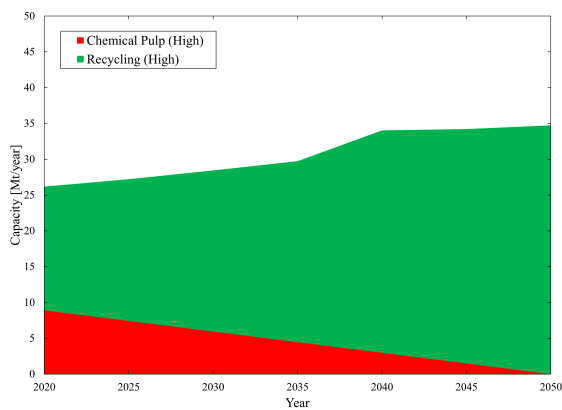


図 G.241 RAMP ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).

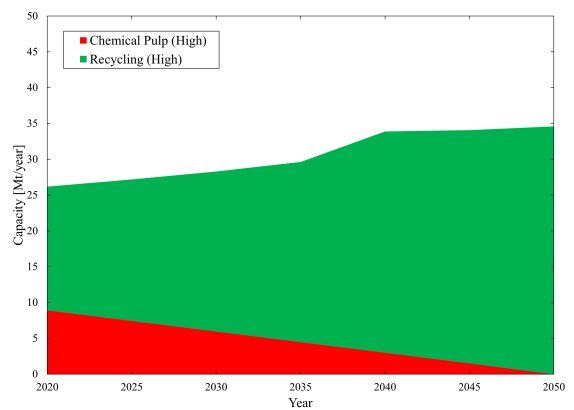


図 G.242 RAMP\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (High).

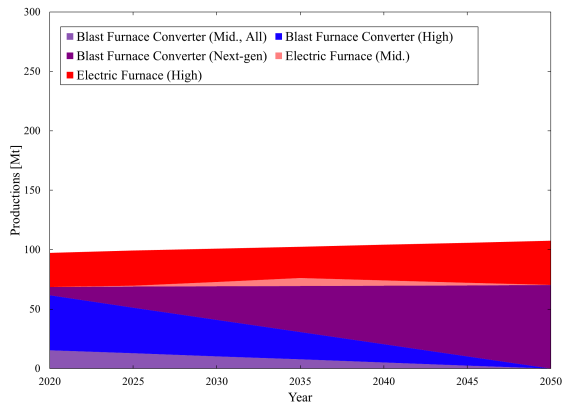


図 G.243 \$10 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).

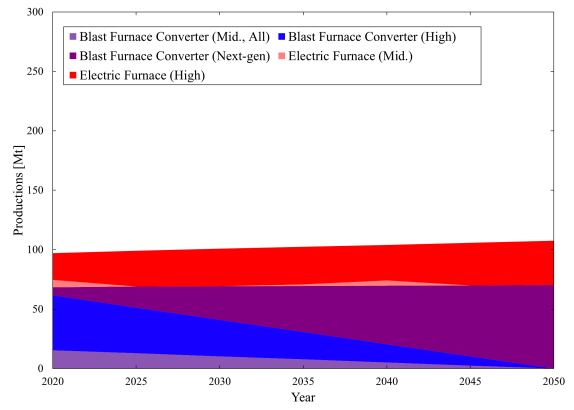


図 G.244 \$10\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).

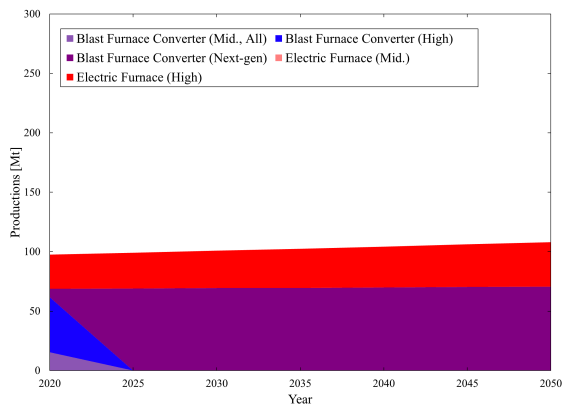


図 G.245 \$50 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).

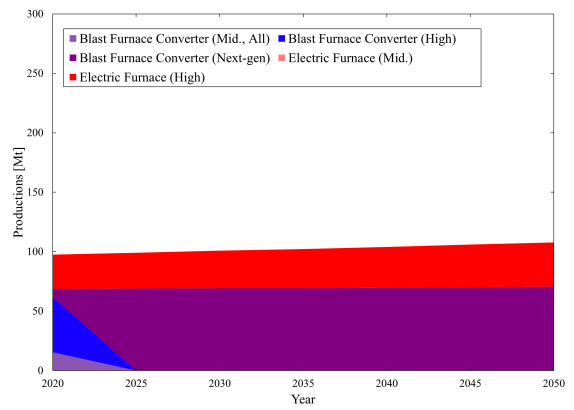


図 G.246 \$50\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).

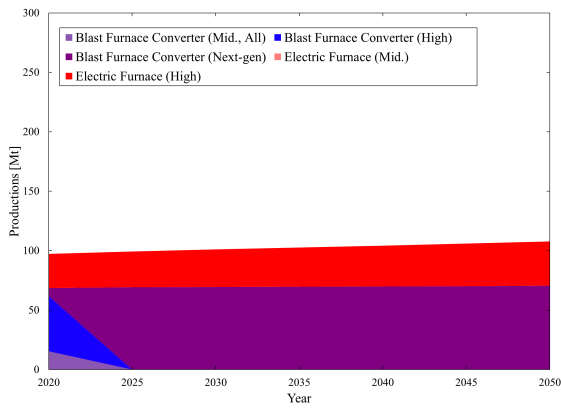


図 G.247 \$150 ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).

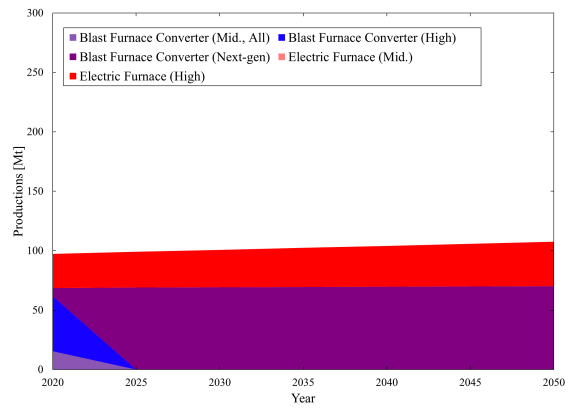


図 G.248 \$150\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).

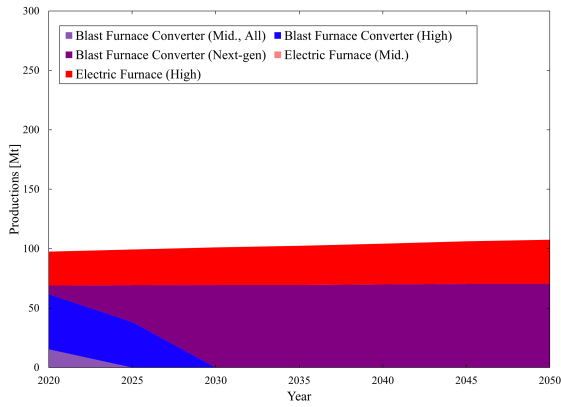


図 G.249 RAMP ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).

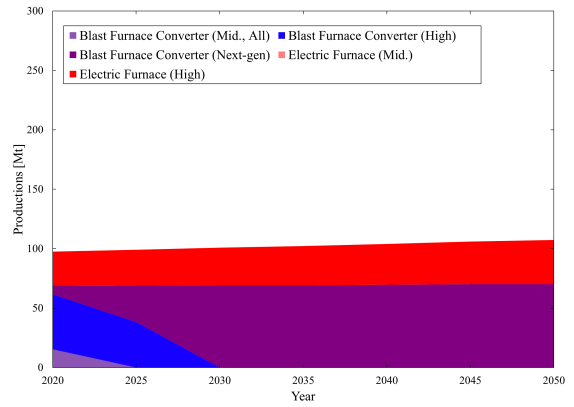


図 G.250 RAMP\_N ケースの鉄鋼部門の技術選択 (Low).

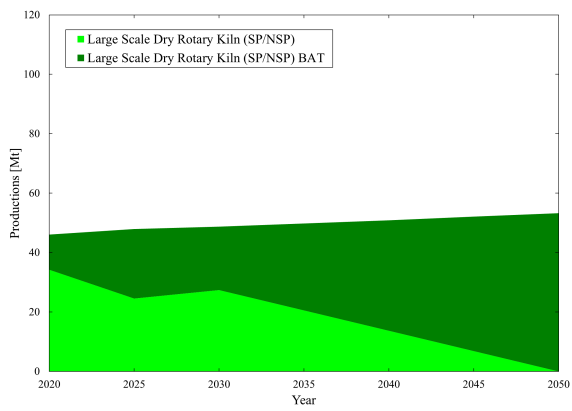


図 G.251 \$10 ケースのセメント部門の技術選択 (Low).

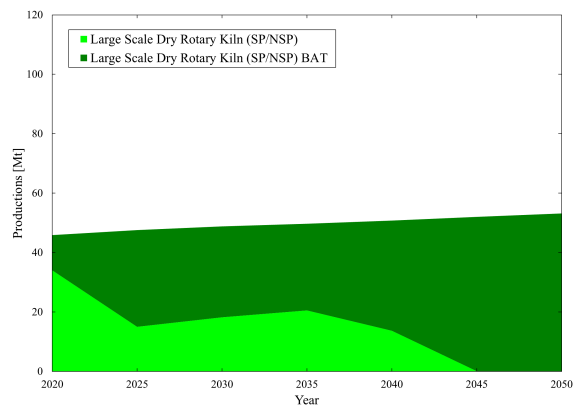


図 G.252 \$10\_N ケースのセメント部門の技術選択 (Low).

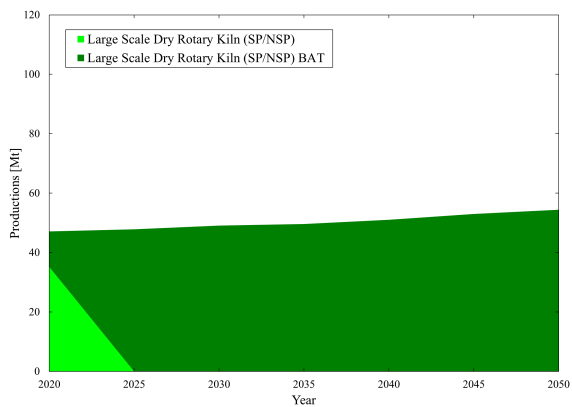


図 G.253 \$50 ケースのセメント部門の技術選択 (Low).

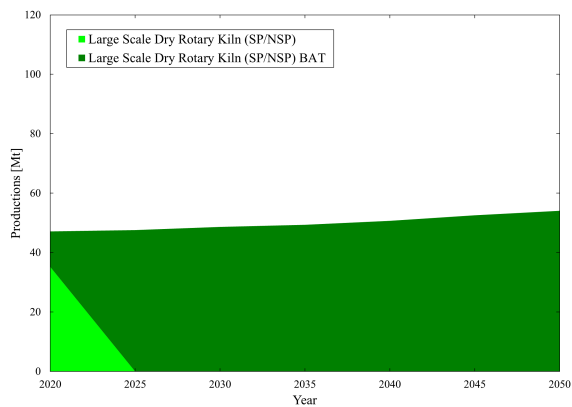


図 G.254 \$50\_N ケースのセメント部門の技術選択 (Low).

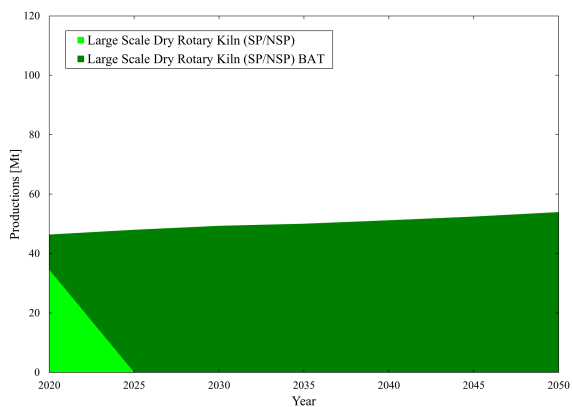


図 G.255 \$150 ケースのセメント部門の技術選択 (Low).

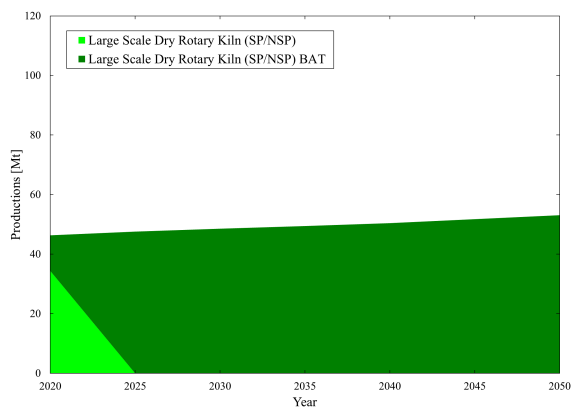


図 G.256 \$150\_N ケースのセメント部門の技術選択 (Low).

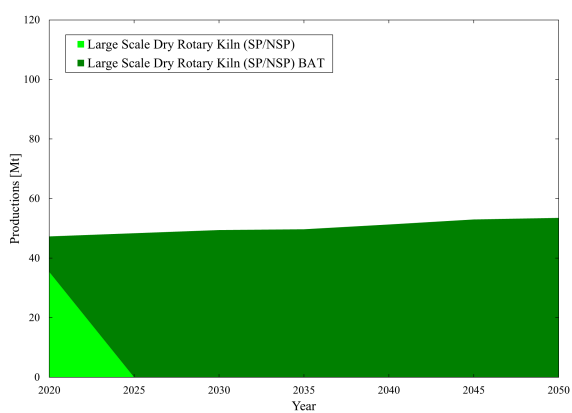


図 G.257 RAMP ケースのセメント部門の技術選択 (Low).

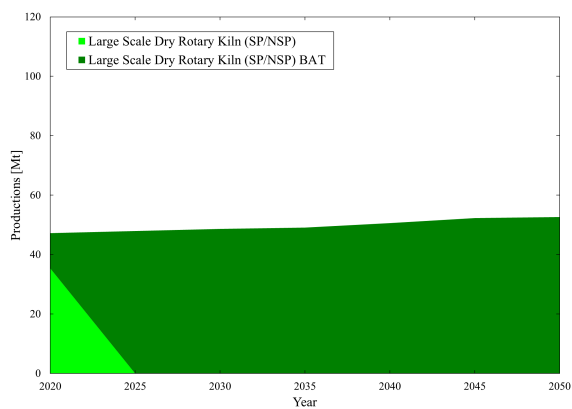


図 G.258 RAMP\_N ケースのセメント部門の技術選択 (Low).

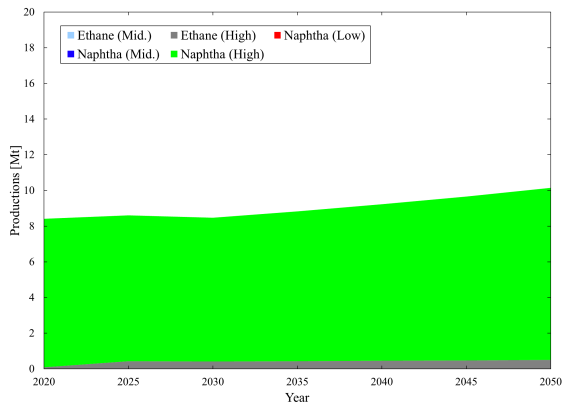


図 G.259 \$10 ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).

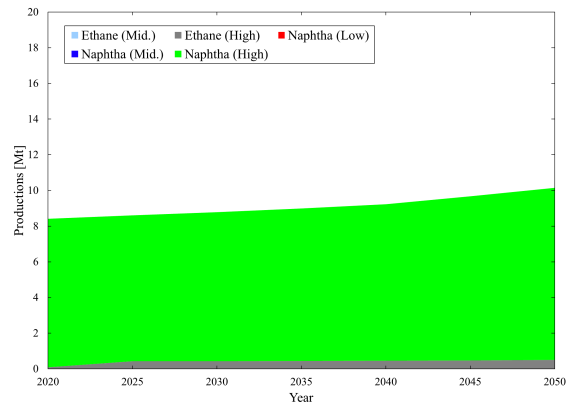


図 G.260 \$10\_N ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).

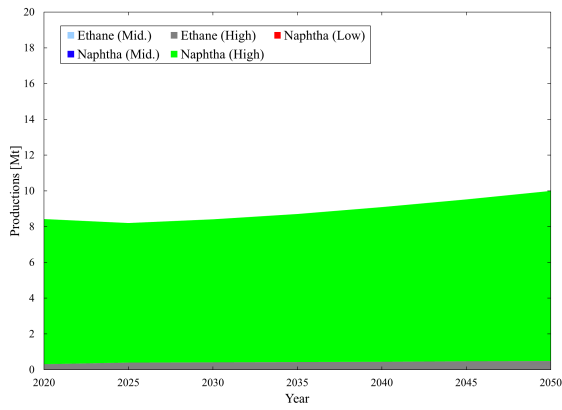


図 G.261 \$50 ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).

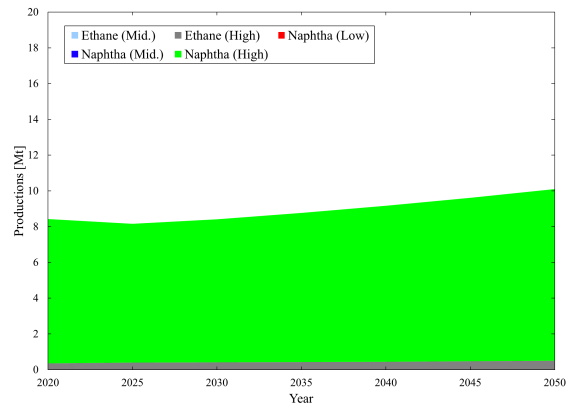


図 G.262 \$50\_N ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).

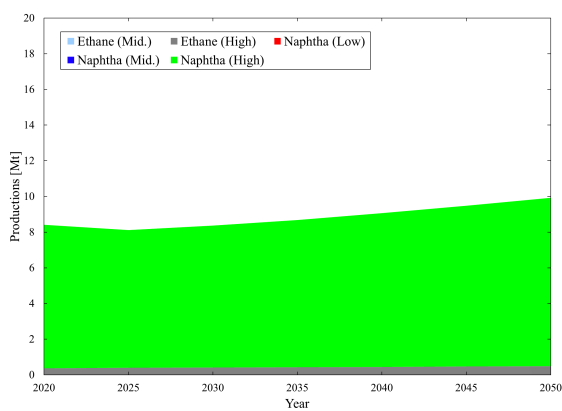


図 G.263 \$150 ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).

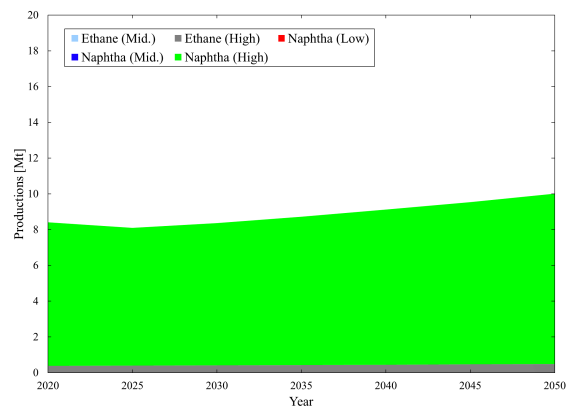


図 G.264 \$150\_N ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).



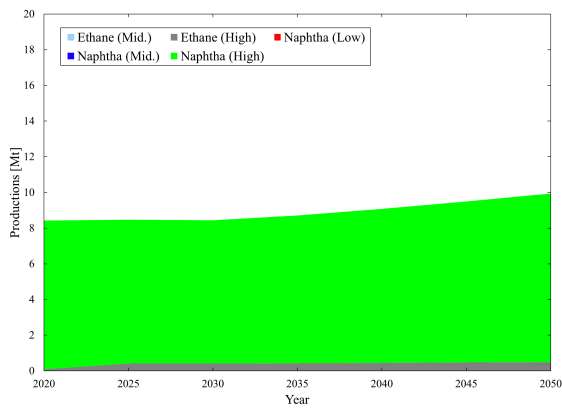


図 G.265 RAMP ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).

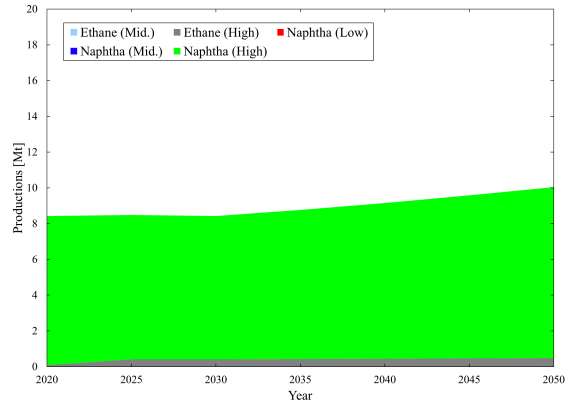


図 G.266 RAMP\_N ケースの石油化学部門の技術選択 (Low).

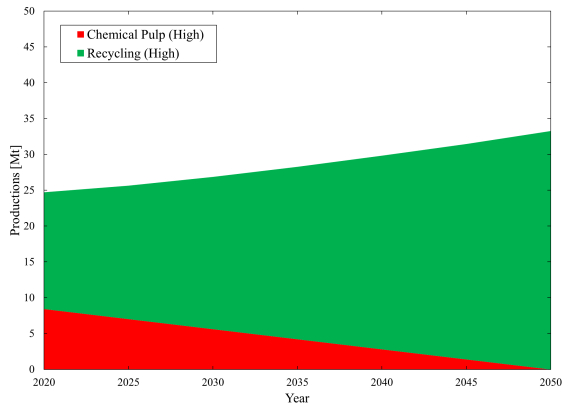


図 G.267 \$10 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).

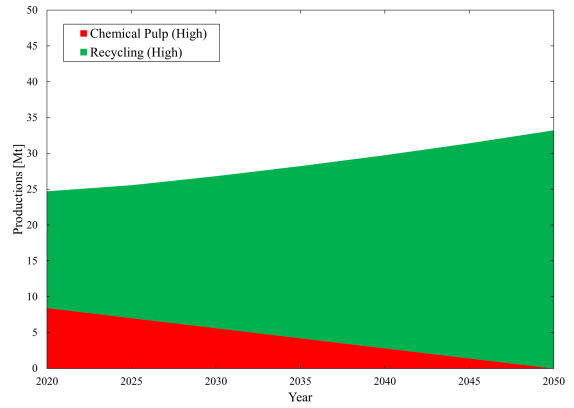


図 G.268 \$10\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).

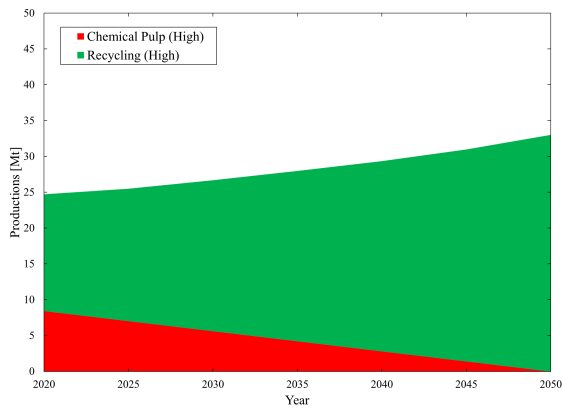


図 G.269 \$50 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).

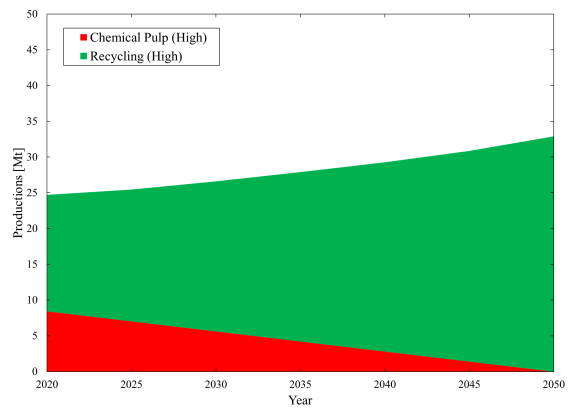


図 G.270 \$50\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).

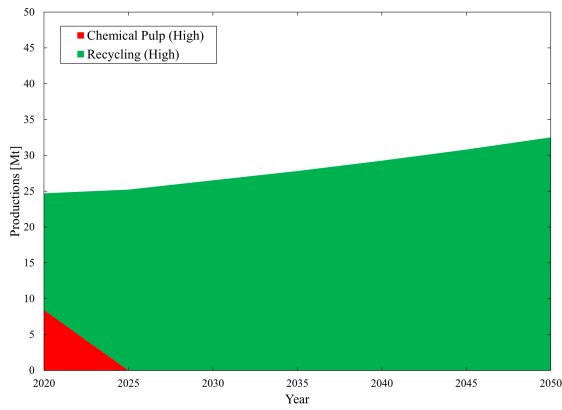


図 G.271 \$150 ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).

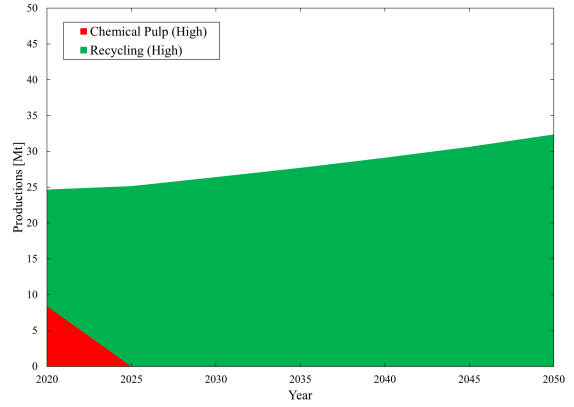


図 G.272 \$150\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).

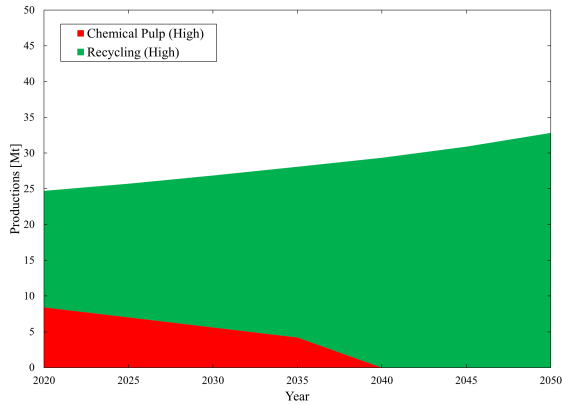


図 G.273 RAMP ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).

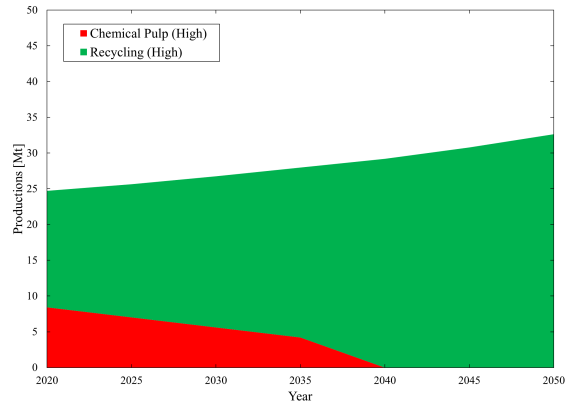


図 G.274 RAMP\_N ケースの紙・パルプ部門の技術選択 (Low).

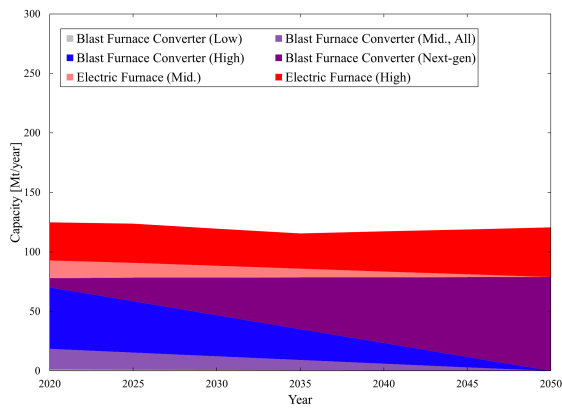


図 G.275 \$10 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).

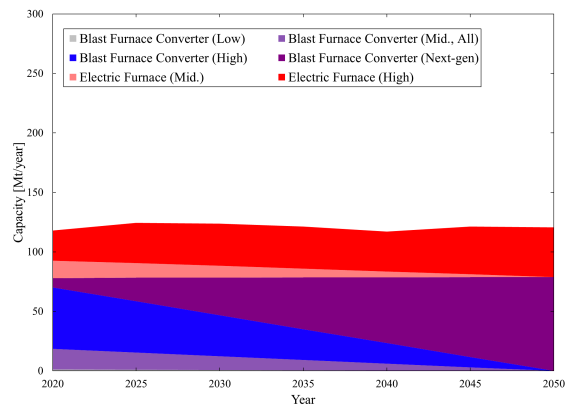


図 G.276 \$10\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).

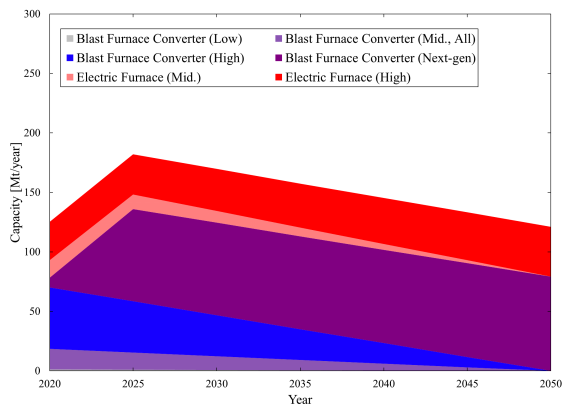


図 G.277 \$50 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).

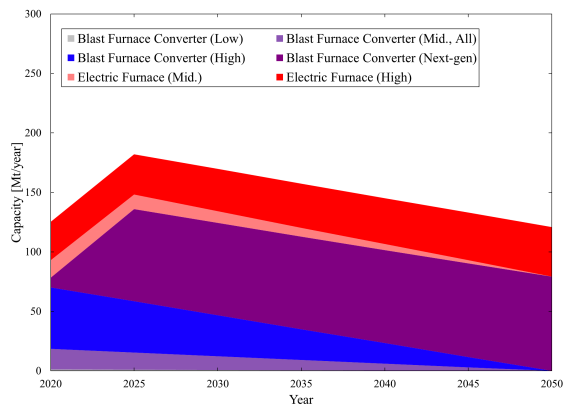


図 G.278 \$50\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).

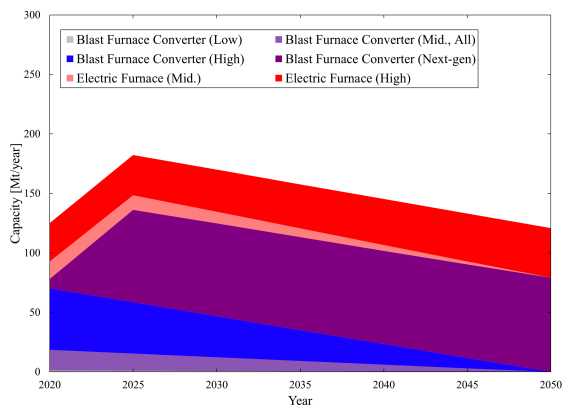


図 G.279 \$150 ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).

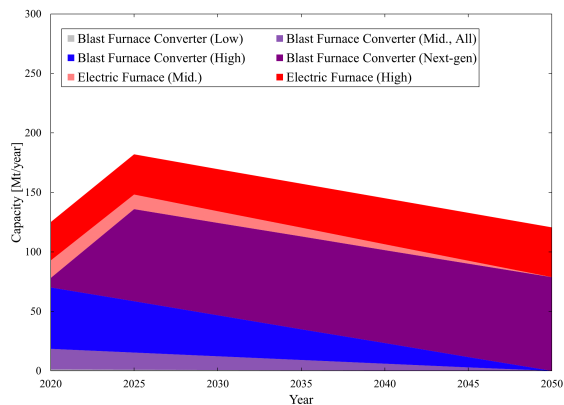


図 G.280 \$150\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).

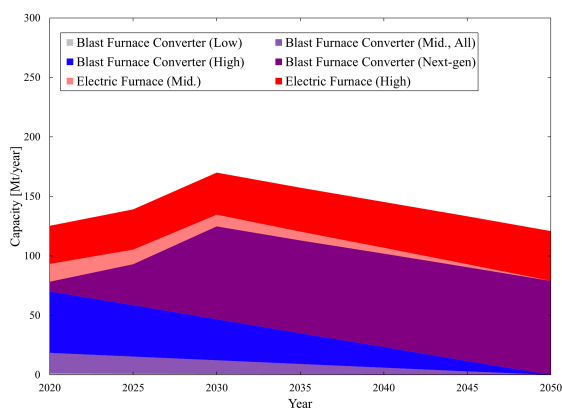


図 G.281 RAMP ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).

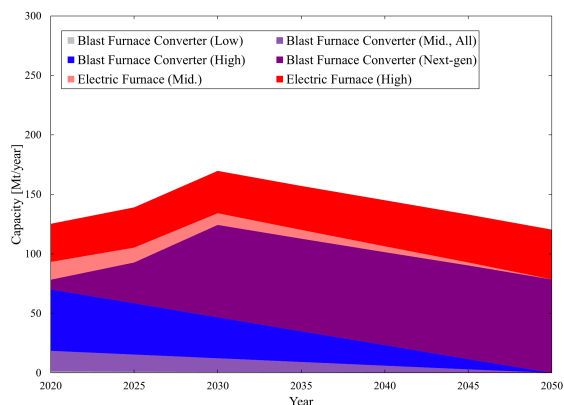


図 G.282 RAMP\_N ケースの鉄鋼部門の最適設備容量 (Low).

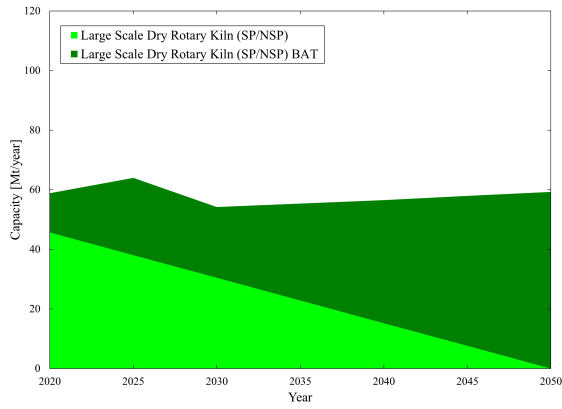


図 G.283 \$10 ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).

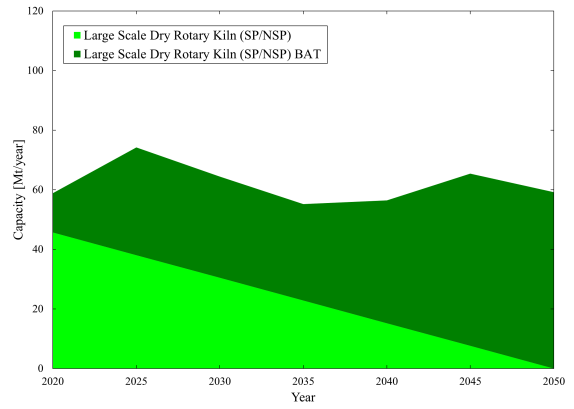


図 G.284 \$10\_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).

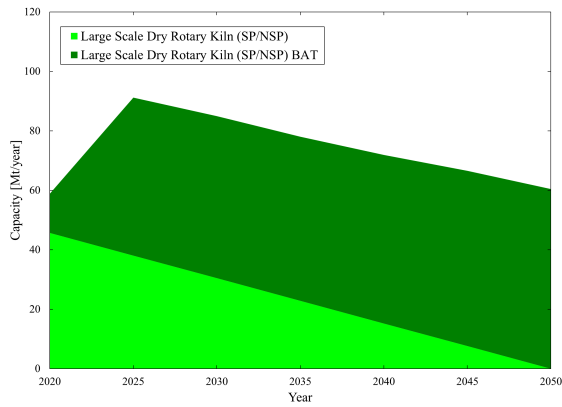


図 G.285 \$50 ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).

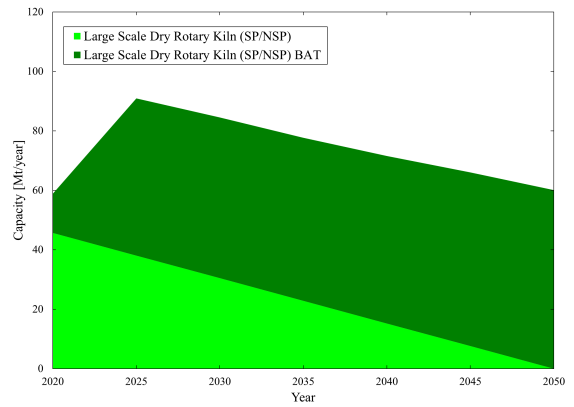


図 G.286 \$50\_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).

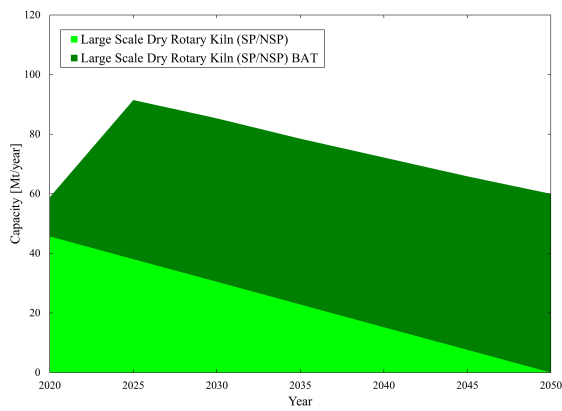


図 G.287 \$150 ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).

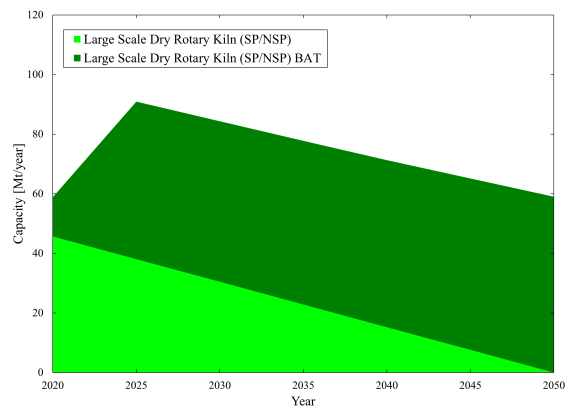


図 G.288 \$150\_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).

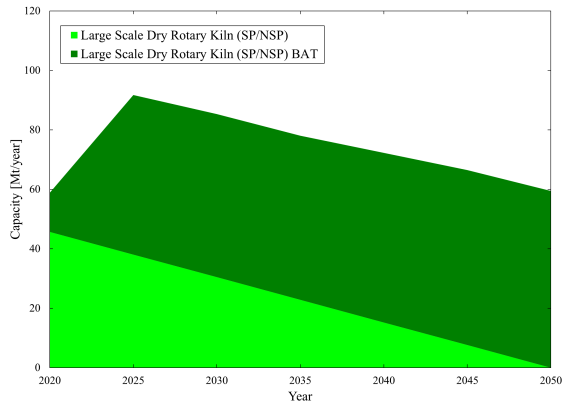


図 G.289 RAMP ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).

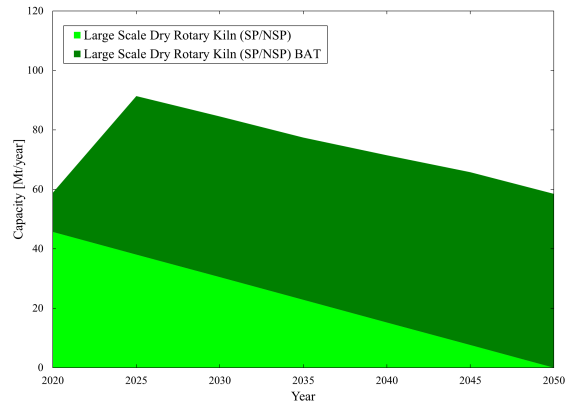


図 G.290 RAMP\_N ケースのセメント部門の最適設備容量 (Low).

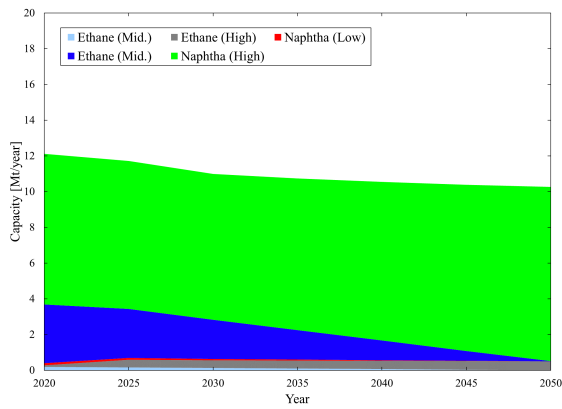


図 G.291 \$10 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).

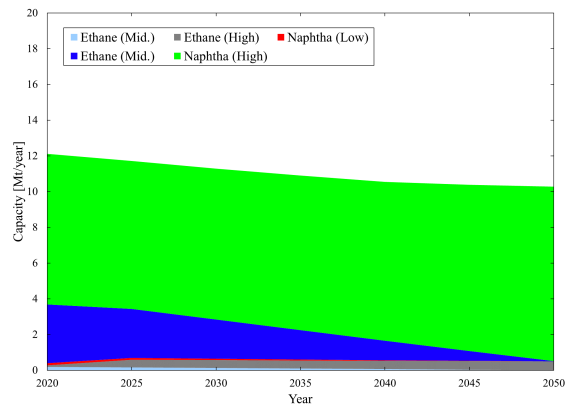


図 G.292 \$10\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).

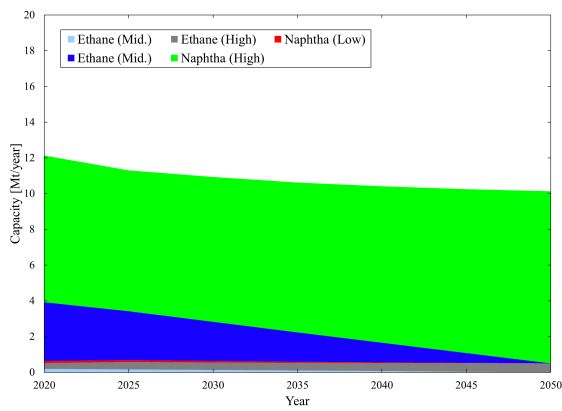


図 G.293 \$50 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).

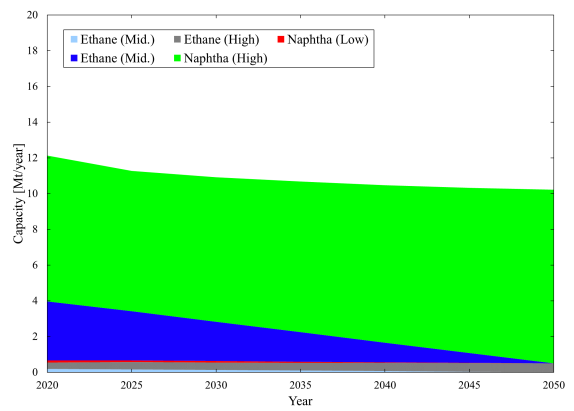


図 G.294 \$50\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).

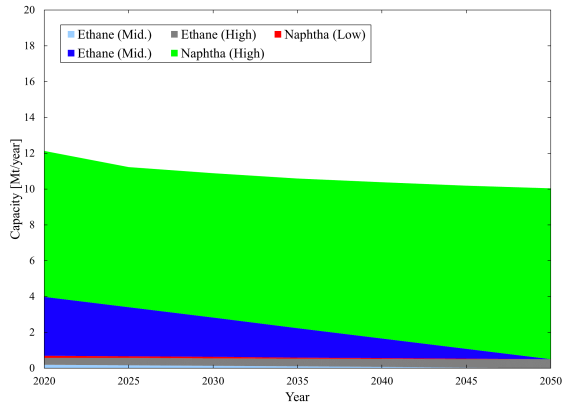


図 G.295 \$150 ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).

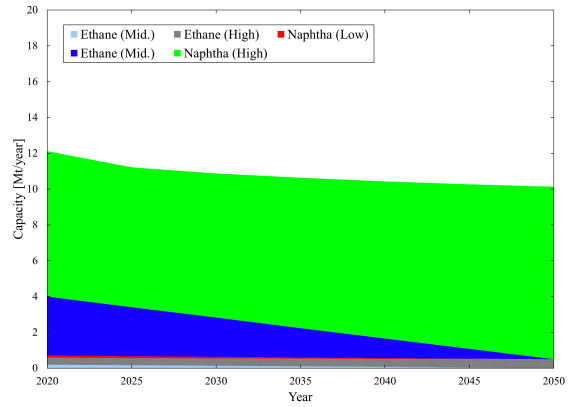


図 G.296 \$150\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).

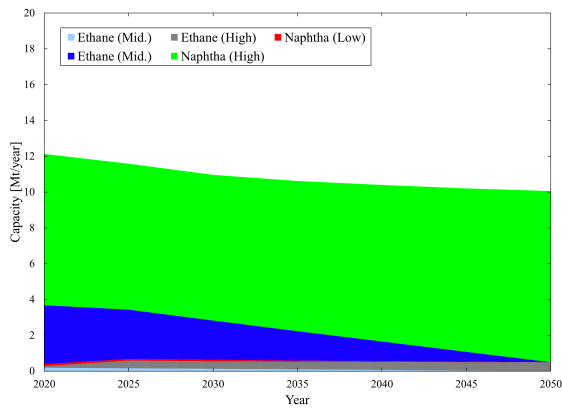


図 G.297 RAMP ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).

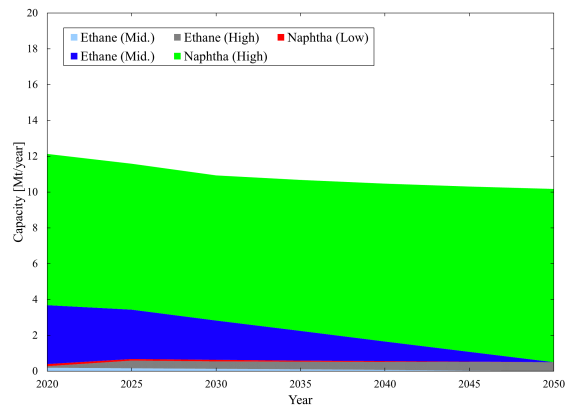


図 G.298 RAMP\_N ケースの石油化学部門の最適設備容量 (Low).

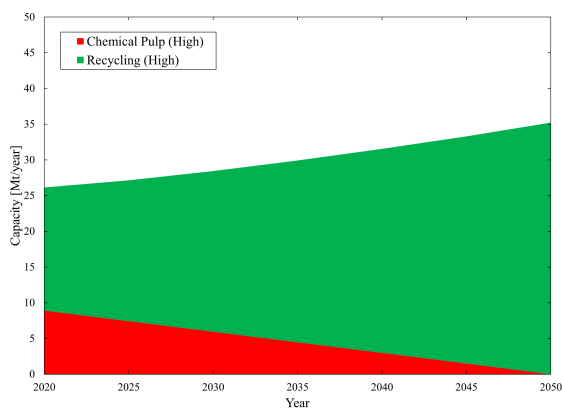


図 G.299 \$10 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).

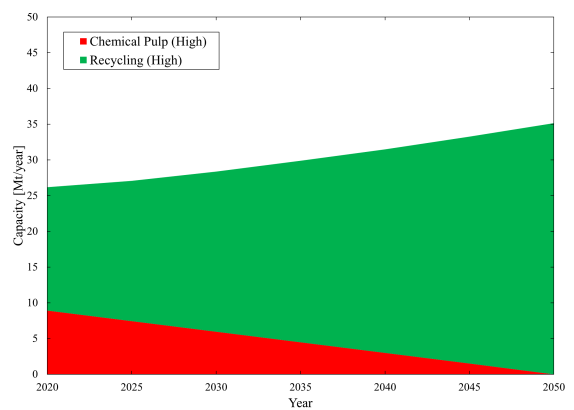


図 G.300 \$10\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).

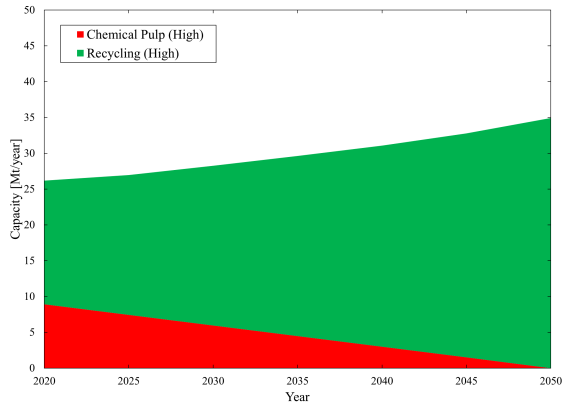


図 G.301 \$50 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).

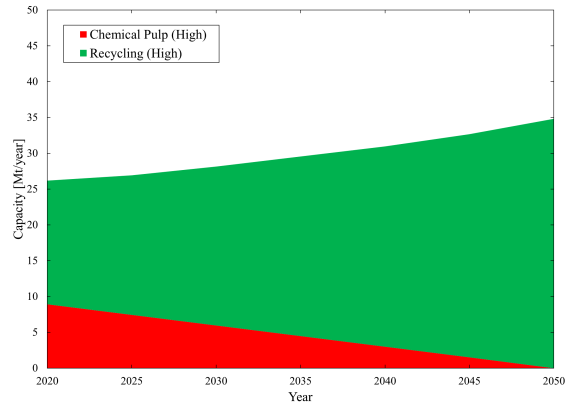


図 G.302 \$50\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).

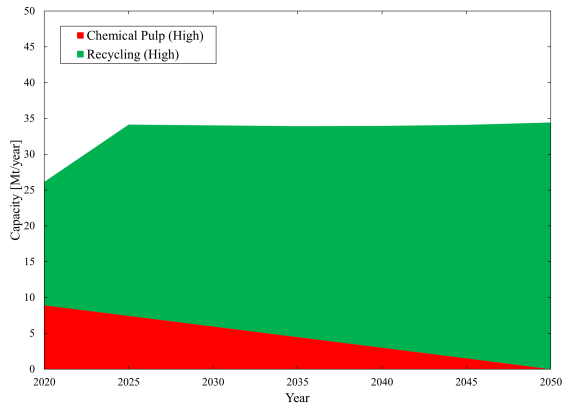


図 G.303 \$150 ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).

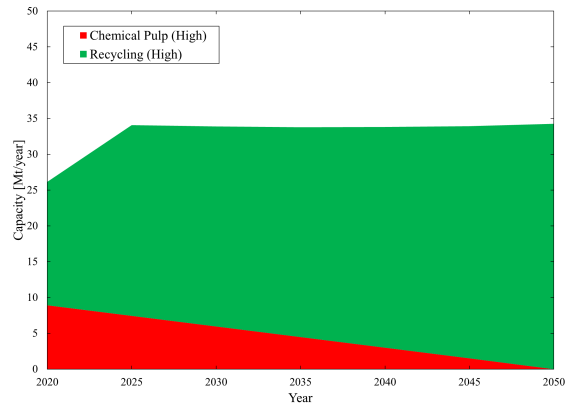


図 G.304 \$150\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).

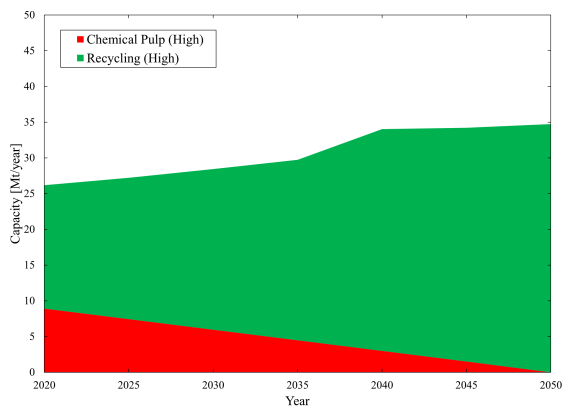


図 G.305 RAMP ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).

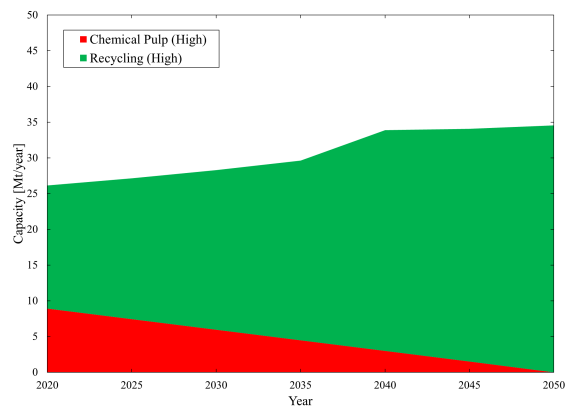


図 G.306 RAMP\_N ケースの紙・パルプ部門の最適設備容量 (Low).

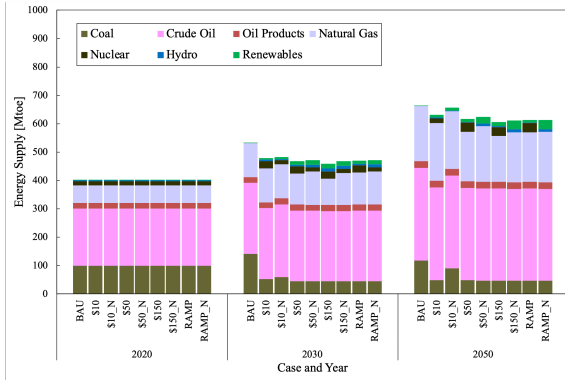


図 G.307 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの一次エネルギー供給量 (SuperHigh).

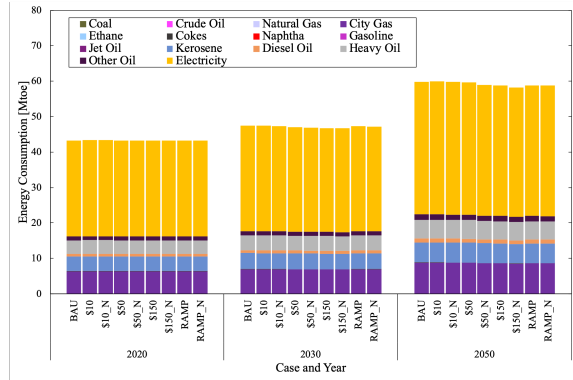


図 G.308 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの業務部門の最終エネルギー消費量 (SuperHigh).

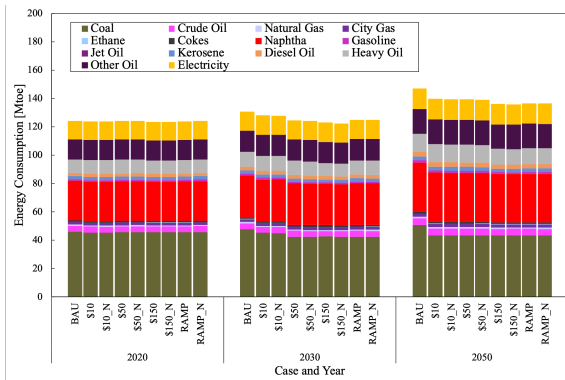


図 G.309 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの産業部門の最終エネルギー消費量 (SuperHigh).

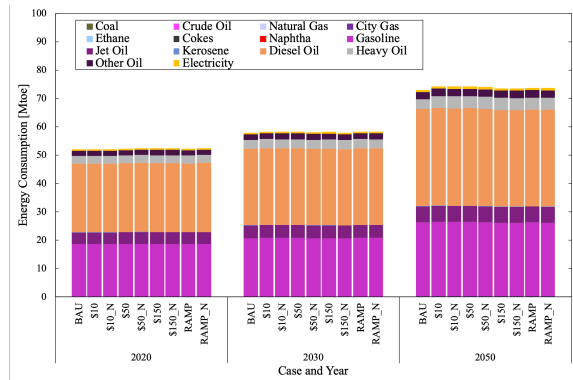


図 G.310 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの運輸部門の最終エネルギー消費量 (SuperHigh).



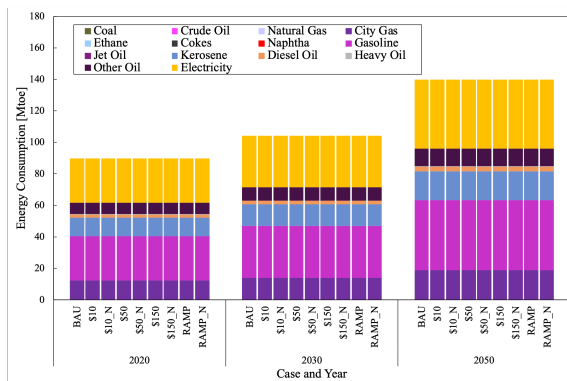


図 G.311 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの家庭・政府部門の最終エネルギー消費量 (Super-High).

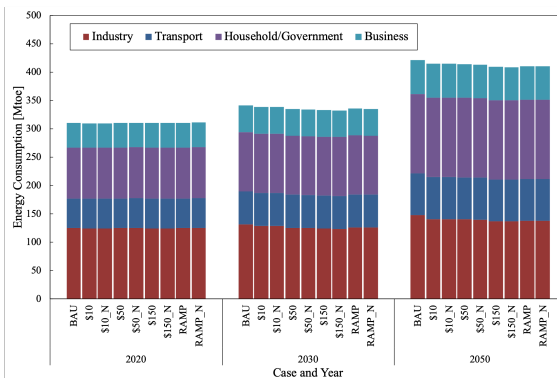


図 G.312 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの部門別最終エネルギー消費量 (SuperHigh).

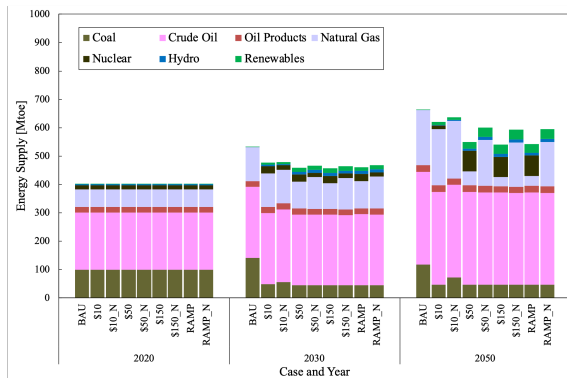


図 G.313 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの一次エネルギー供給量 (High).

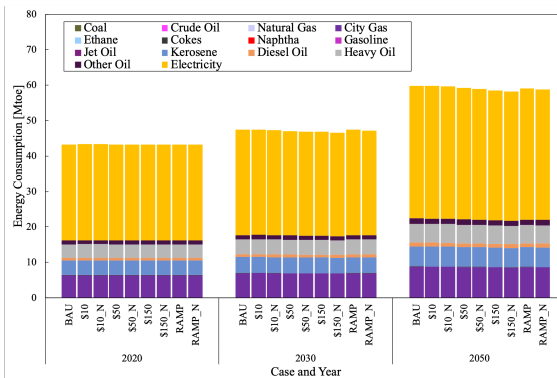


図 G.314 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの業務部門の最終エネルギー消費量 (High).

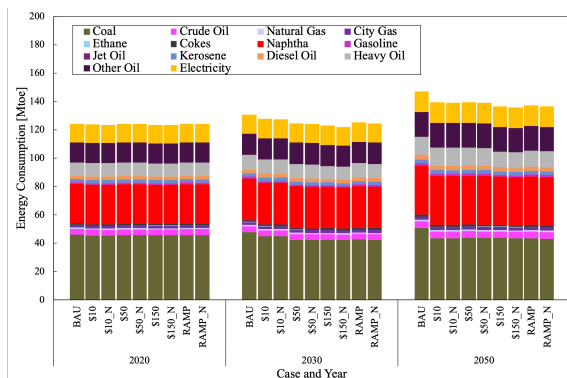


図 G.315 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの産業部門の最終エネルギー消費量 (High).

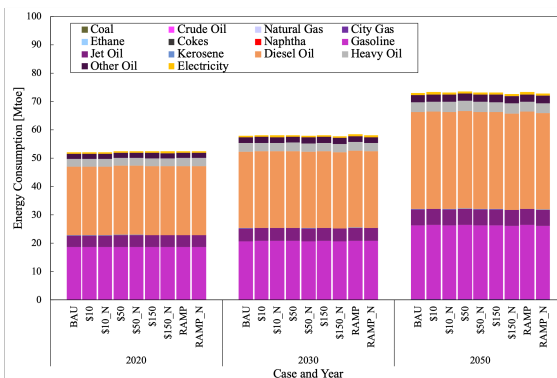


図 G.316 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの運輸部門の最終エネルギー消費量 (High).

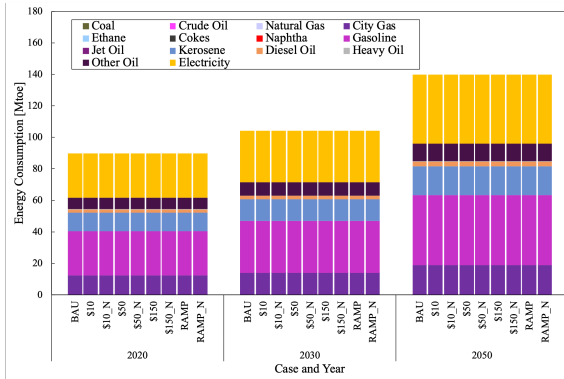


図 G.317 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの家庭・政府部門の最終エネルギー消費量 (High).

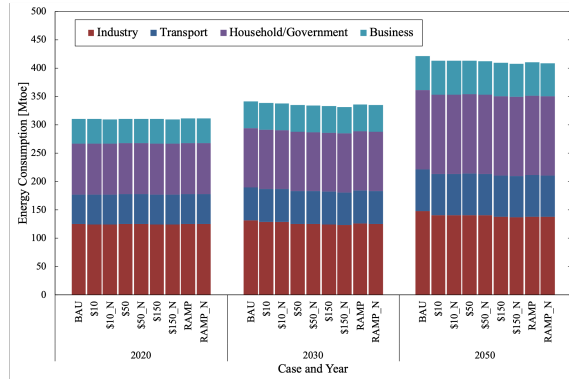


図 G.318 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの部門別最終エネルギー消費量 (High).

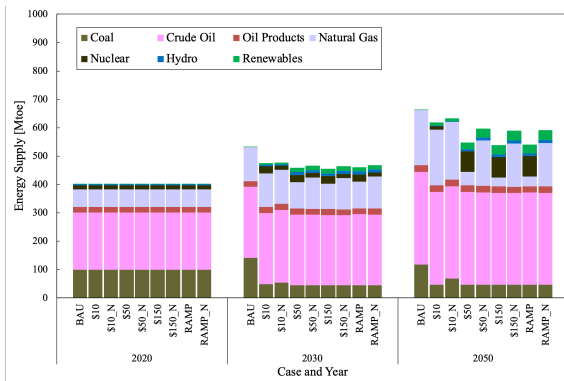


図 G.319 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの一次エネルギー供給量 (Low).

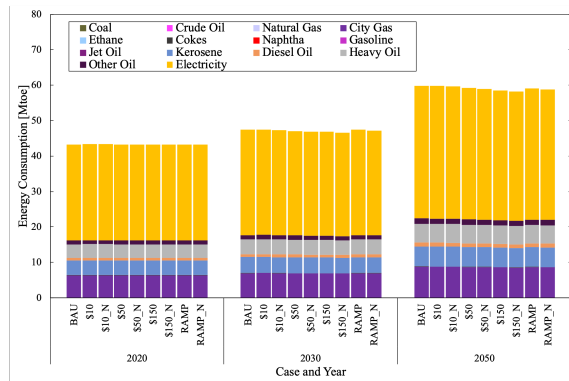


図 G.320 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの業務部門の最終エネルギー消費量 (Low).

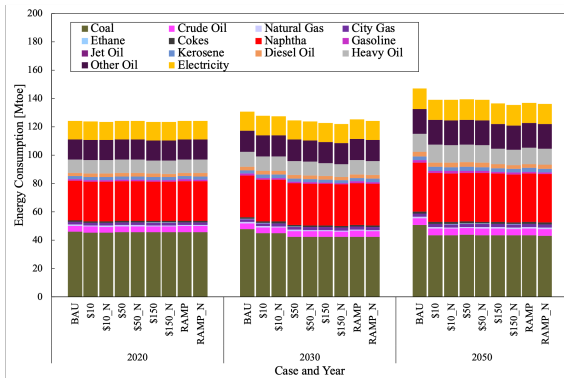


図 G.321 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの産業部門の最終エネルギー消費量 (Low).

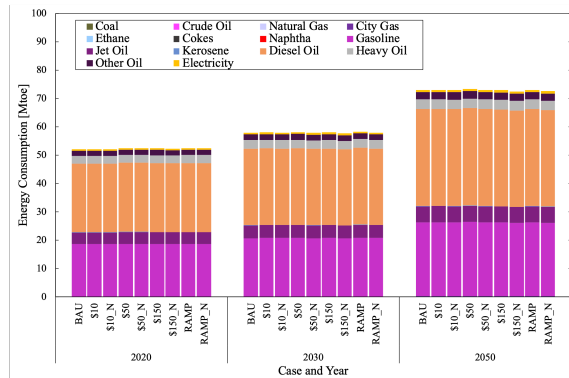


図 G.322 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの運輸部門の最終エネルギー消費量 (Low).

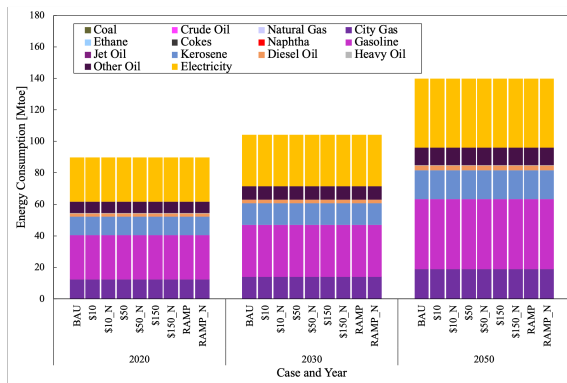


図 G.323 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの家庭・政府部門の最終エネルギー消費量 (Low).

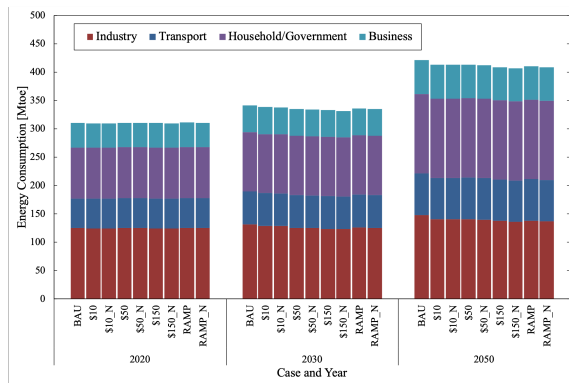


図 G.324 2020 年, 2030 年, 2050 年における各ケースの部門別最終エネルギー消費量 (Low).