

平成 23 年度環境研究総合推進費補助金
総合研究報告書

レアメタル再資源化総合システム評価技術開発
(K 2 1 2 8、K 2 2 0 9 2、K 2 3 2 1)

平成 2 4 年 5 月

(代表研究者) 東北大学多元物質科学研究所 中村 崇

補助事業名 平成 23 年度環境研究総合推進費補助金 研究事業

所管 環境省

国庫補助金 62,081,000 円

研究課題名 レアメタル再資源化総合システム評価技術開発

研究期間 平成 21 年 4 月 1 日～平成 24 年 3 月 31 日

代表研究者名 中村 崇（東北大学多元物質科学研究所）

研究分担者名 柴田 悦郎（東北大学多元物質科学研究所）

飯塚淳（東北大学多元物質科学研究所）

岡部徹（東京大学生産技術研究所）

溝口照康（東京大学生産技術研究所）

安達毅（秋田大学国際資源学校教育研究センター）

板明果（宮城大学）

目次

1. 研究目的	1
2. 研究方法	3
2.1 3ヵ年間の研究スケジュール	3
3. 研究結果	5
3.1 レアメタルの社会蓄積量（最大回収ポテンシャル量）	5
4. 素材戦略モデルを用いたシミュレーション分析結果	19
4.1 素材戦略モデルの概要	19
4.2 シナリオ設定	22
(ア) 各種設定	22
(イ) 自動車エンジン・電池性能	22
(ウ) 車の重量	23
(エ) 制約条件	24
4.3 推計シナリオ	24
(ア) 燃費向上シナリオ	24
(イ) 原油価格変動シナリオ	25
(ウ) 自動車需要変動シナリオ	25
(エ) 電池技術向上シナリオ	26
4.4 シナリオ分析結果	27
1) ベースシナリオ	27
2) 燃費向上シナリオ①結果	30
3) 燃費向上シナリオ②	32
4) 燃費向上シナリオ③	34
5) 燃費向上シナリオ④	36
6) 燃費向上シナリオ⑤	38
7) 原油価格変動シナリオ①	40
8) 原油価格変動シナリオ②	42
9) 原油価格変動シナリオ③	44
10) 原油価格変動シナリオ④	46
11) 原油価格変動シナリオ⑤	48
12) 原油価格変動シナリオ⑥	50
13) 需要量変動シナリオ①	52
14) 需要量変動シナリオ②	54
15) 需要量変動シナリオ③	56
16) 需要量変動シナリオ④	58
17) 需要量変動シナリオ⑤	60
18) 需要量変動シナリオ⑥	60
19) 需要量変動シナリオ⑦	60
20) 需要量変動シナリオ⑧	62
21) 需要量変動シナリオ⑨	64
22) 需要量変動シナリオ⑩	66

23)	需要量変動シナリオ⑪	68
24)	需要量変動シナリオ⑫	70
25)	電池技術向上シナリオ①	72
26)	電池技術向上シナリオ②	74
27)	電池技術向上シナリオ③	76
28)	電池技術向上シナリオ④	78
29)	電池技術向上シナリオ⑤	80
4.5.	シナリオ分析結果のまとめ	82
(ア)	燃費向上シナリオ	82
(イ)	原油価格変動シナリオ	83
(ウ)	需要量変動シナリオ	83
(エ)	電池技術向上シナリオ	84
(オ)	リチウム需要量の比較	84
5.	研究発表	87

表目次

表 4-1	各車種の燃費設定	22
表 4-2	自動車用電池の一台当たりリチウム使用料	23
表 4-3	ベースシナリオの T5 における CO ₂ 排出量推計	29
表 4-4	燃費向上シナリオの T5 における CO ₂ 排出量推計	82
表 4-5	原油価格変動シナリオの T5 における CO ₂ の排出量推計	83
表 4-6	生産量変動シナリオの T5 における CO ₂ の排出量推計	84
表 4-7	電池技術向上シナリオの T5 における CO ₂ 排出量推計	84
表 4-8	HV・EV が増加した時の T5 におけるリチウム需要増加予測	85

図目次

図 3-1	本研究において仮定する累積廃棄台数の推移例	5
図 3-2	製品を通じた各元素の社会蓄積量 (1)	6
図 3-3	製品を通じた各元素の社会蓄積量 (2)	7
図 3-4	製品を通じた各元素の社会蓄積量 (3)	8
図 3-5	製品を通じた各元素の社会蓄積量 (4)	9
図 3-6	製品を通じた各元素の社会蓄積量 (5)	10
図 3-7	製品を通じた各元素の社会蓄積量 (6)	11
図 3-8	製品を通じた各元素の社会蓄積量 (7)	12
図 3-9	製品を通じた各元素の社会蓄積量 (8)	13
図 3-10	製品を通じた各元素の社会蓄積量 (9)	14
図 3-11	製品を通じた各元素の社会蓄積量 (10)	15
図 3-12	製品を通じた各元素の社会蓄積量 (11)	16
図 3-13	製品を通じた各元素の社会蓄積量 (12)	17
図 4-1	物量マトリックス概念図	19
図 4-2	本研究の CO ₂ 排出量の積算範囲	20
図 4-3	各車種の CO ₂ 排出量	22
図 4-4	素材戦略モデル内の車種別重量設定	23
図 4-5	燃費変動シナリオにおける GV の燃費変動	24
図 4-6	原油価格変動シナリオにおける原油価格変動	25
図 4-7	ベースシナリオのコスト最小化の分析結果	28
図 4-8	ベースシナリオの CO ₂ 最小化の分析結果	29
図 4-9	燃費向上シナリオ①のコスト最小化の分析結果	30
図 4-10	燃費向上シナリオ①の CO ₂ 排出量最小化の分析結果	31
図 4-11	燃費向上シナリオ②のコスト最小化の分析結果	32
図 4-12	燃費向上シナリオ②の CO ₂ 最小化の分析結果	33
図 4-13	燃費向上シナリオ③のコスト最小化の分析結果	34
図 4-14	燃費向上シナリオ③の CO ₂ 最小化の分析結果	35
図 4-15	燃費向上シナリオ④のコスト最小化の分析結果	36
図 4-16	燃費向上シナリオ④の CO ₂ 最小化の分析結果	37
図 4-17	燃費向上シナリオ⑤のコスト最小化の分析結果	38
図 4-18	燃費向上シナリオ⑤の CO ₂ 最小化の分析結果	39
図 4-19	原油価格変動シナリオ①のコスト最小化の分析結果	40
図 4-20	原油価格変動シナリオ①の CO ₂ 最小化の分析結果	41
図 4-21	原油価格変動シナリオ②のコスト最小化の分析結果	42

図 4-22	原油価格変動シナリオ②の CO ₂ 最小化の分析結果	43
図 4-23	原油価格変動シナリオ③のコスト最小化の分析結果	44
図 4-24	原油価格変動シナリオ③の CO ₂ 最小化の分析結果	45
図 4-25	原油価格変動シナリオ④のコスト最小化の分析結果	46
図 4-26	原油価格変動シナリオ④の CO ₂ 最小化の分析結果	47
図 4-27	原油価格変動シナリオ⑤のコスト最小化の分析結果	48
図 4-28	原油価格変動シナリオ⑤の CO ₂ 最小化の分析結果	49
図 4-29	原油価格変動シナリオ⑥のコスト最小化の分析結果	50
図 4-30	原油価格変動シナリオ⑥の CO ₂ 最小化の分析結果	51
図 4-31	需要量変動シナリオ①のコスト最小化の分析結果	52
図 4-32	需要量変動シナリオ①の CO ₂ 最小化の分析結果	53
図 4-33	需要量変動シナリオ②のコスト最小化の分析結果	54
図 4-34	需要量変動シナリオ②の CO ₂ 最小化の分析結果	55
図 4-35	需要量変動シナリオ③のコスト最小化の分析結果	56
図 4-36	需要量変動シナリオ③の CO ₂ 最小化の分析結果	57
図 4-37	需要量変動シナリオ④のコスト最小化の分析結果	58
図 4-38	需要量変動シナリオ④の CO ₂ 最小化の分析結果	59
図 4-39	需要量変動シナリオ⑦のコスト最小化の分析結果	60
図 4-40	需要量変動シナリオ⑦の CO ₂ 最小化の分析結果	61
図 4-41	需要量変動シナリオ⑧のコスト最小化の分析結果	62
図 4-42	需要量変動シナリオ⑧の CO ₂ 最小化の分析結果	63
図 4-43	需要量変動シナリオ⑨のコスト最小化の分析結果	64
図 4-44	需要量変動シナリオ⑨の CO ₂ 最小化の分析結果	65
図 4-45	需要量変動シナリオ⑩のコスト最小化の分析結果	66
図 4-46	需要量変動シナリオ⑩の CO ₂ 最小化の分析結果	67
図 4-47	需要量変動シナリオ⑪のコスト最小化の分析結果	68
図 4-48	需要量変動シナリオ⑪の CO ₂ 最小化の分析結果	69
図 4-49	需要量変動シナリオ⑫のコスト最小化の分析結果	70
図 4-50	需要量変動シナリオ⑫の CO ₂ 最小化の分析結果	71
図 4-51	電池技術向上シナリオ①のコスト最小化の分析結果	72
図 4-52	電池技術向上シナリオ①の CO ₂ 最小化の分析結果	73
図 4-53	電池技術向上シナリオ②のコスト最小化の分析結果	74
図 4-54	電池技術向上シナリオ②の CO ₂ 最小化の分析結果	75
図 4-55	電池技術向上シナリオ③のコスト最小化の分析結果	76
図 4-56	電池技術向上シナリオ③の CO ₂ 最小化の分析結果	77
図 4-57	電池技術向上シナリオ④のコスト最小化の分析結果	78

図 4-58	電池技術向上シナリオ④の CO ₂ 最小化の分析結果	79
図 4-59	電池技術向上シナリオ⑤のコスト最小化の分析結果	80
図 4-60	電池技術向上シナリオ⑤の CO ₂ 最小化の分析結果	81
図 4-61	各シナリオのリチウム量比較	85

1. 研究目的

近年のハイテク製品のかなりの部分に、白金、希土類、タングステンなどのレアメタルが使用されている。それらの資源は特定の国で産出され、その供給は産出国の経済や社会状況に大きく依存している。特に、希土類、タングステンは中国にほとんどを依存しており、中国の政策が輸出総量規制へ変換したことから供給不安が生じている。その一方で、我が国では多くの工業製品が製造・消費されており、それらの中には多くのレアメタルが使用されてきた。こうした背景から、我が国においても、日本の産業構造上レアメタルの資源確保については十分な認識がされている。

資源確保のための一対策として、都市鉱山の考え方があげられる。都市鉱山の重要性については喧伝されている。国家戦略としても、安定的なレアメタル確保に向けて使用済み製品からのリサイクルの重要性を一つの柱として掲げている。しかしながら、産業並びに一般廃棄物からのレアメタル回収はほとんどなされていない。その原因は多々考えられているが、対象となる廃棄物の種類の多さ、またその分野、レアメタル元素による回収技術の違いなどあまりにも問題として把握すべき対象が多く、どのように具体性をもって研究開発のリソースを投入してよいのか、判断できない状態が続いていることが挙げられる。

そのような状況を示唆している一つの事例として、以下の取り組みが挙げられる。現在、環境省と経済産業省の府省連携で小型電気・電子機器の回収にかかわる試験が行われている。将来的なレアメタル回収を見据えたこの取組みは、社会的にも大変意義深いものであることは間違いない。しかしながら、ここでの試験対象は廃小型電子機器に限定されている。明確にはなっていないものの産業機器や自動車からの廃棄物に含まれているレアメタルの方が量的に多い可能性もある。効率的なレアメタルの回収を目指し、定量的な分析をもとに回収ターゲットをより明確に絞込むことも必要だろう。

さらに、レアメタルは従来のベースメタルリサイクルとは異なり、国内に再資源化施設がまったくない元素もある。そのため、既存プロセスでの対応が難しいなど、定性的には問題・課題点が指摘されている。先述してきたように、レアメタルの回収・再生に向けては数多くの不明点・課題点があるにも関わらず、これまで、どのような分野にどの程度の開発リソースをかければ問題解決の方向性が示されるか、十分に明確にされてきていない。最近急速に回収・再資源化の機運が高まり、研究開発が行われているものの、研究が個々の技術開発に偏っている傾向がある。そのため、全体を俯瞰してどこに再資源化の問題点があるのかは未だ明確になっていない。社会システムも含めこれからの研究リソースを、どの分野にどの程度集中させるべきか方向性を示すことが今後一層重要となる。

本研究ではこうした問題意識を背景に、レアメタル回収・再生に向けた問題点を整理し、現在種々な組織で行われている研究開発リソースを効率活用することを目指す。まず、既存研究の分析値などを参考に、各種廃棄物からのレアメタル再資源化ルートの社会システムの問題点、ならびに技術課題を明らかにし、それぞれの廃棄物のレアメタル再資源化のボトルネックを明らかにする。さらに、廃棄物中のレアメタル回収ポテンシャル量を明らかにし、

レアメタル再資源化ルート構築に向けた研究を行う。

また、レアメタル再資源化の効率的な研究リソース投入を政策的に行うことを目的として、総合評価基準の提案、ならびにその手法の確立を目指す。総合評価基準の提案に向けて、異なる専門の学識経験者による委員会を設置し、検討を行う。また、委員会における研究成果を広く公表することを目的とし、シンポジウムを開催する。シンポジウムの開催は、研究成果を発信する役目を担うと同時に、これまでレアメタル回収技術に関する研究分野が多岐にわたるために分散していた研究者をまとめる働きを持つことから、本研究終了後には新たな研究者・技術者の横断的なコミュニティができると期待される。こうした相互の情報交換が、レアメタル回収技術に関する研究分野の発展に大きく貢献し、最終的には循環型社会構築へと大きく貢献すると期待できる。

2. 研究方法

まず、レアメタルの回収・再生を考える際、その回収対象は具体的なレアメタルでなく廃製品・廃棄物となる。したがって、本研究では具体的な回収対象を、

- 一般廃棄物の粗大ごみ、
- 家電リサイクル法で取り扱う対象物、
- 小型廃電気・電子機器、
- 廃自動車、
- 廃産業機械（PC サーバなどを含む）、
- その他

と分類し、そこから排出されるレアメタル量の推計を行う。推計対象レアメタルは、希土類元素、タングステン、インジウム、白金類、タンタル、リチウム、コバルト、金、銀、銅などとする。

2.1 3カ年間の研究スケジュール

本研究では、研究期間3カ年間をかけて廃小型電気・電子機器、家電リサイクル法品目、廃自動車、廃産業機器などの収集ポテンシャル量や回収技術などの基礎情報を収集し、国内の廃棄物からの回収ポテンシャルを明らかにすることを目標としている。不明な部分については、より集中的な研究開発が今後重要となってくると考えられる。本研究を通じて不明部分を明確にすることで、循環型社会構築に向けた研究開発施策を提案する基礎的な情報源となると期待できる。

研究計画1年目

まず、環境省と経済産業省の府省連携プロジェクトでの対象物でもある小型電気・電子機器とそれに近い家電リサイクル法関連品目について廃棄量とレアメタル含有量を文献値から整理し、資源化ポテンシャル量の推計を行う。これらの詳細データの収集・整理・蓄積は、今後この分野の廃棄物を対象にWIOモデルを用いて再資源化時のLCA評価を行うための基礎データとなる貴重なデータの蓄積となる。また、関連研究に係るシンポジウムを開催し、多くの研究者からの最先端の情報収集を行う。

研究計画2年目

研究計画1年目の成果を踏まえ、調査対象を廃自動車へと展開する。特に廃自動車は、今後一段と環境対応のためのハイブリッド化、電氣化が進むと予想されることから、レアメタル使用量が総体的に増加すると予想される。このとき、従来型の鉄回収のための現行システムとプロセスが大きく変換する可能性がある。これらの点を見極めるために、研究計画2年目には、調査対象を廃自動車に特化する。廃小型電気・電子機器と合わせて、廃自動車に対しても再資源化時のLCA評価が可能となるシミュレーションモデルを用いCO₂排出量に及

ぼす効果等を推計する。また、研究計画 1 年目同様に、関連テーマでシンポジウムを開催し、可能な限り最新の情報の収集に努める。また、多軸の評価項目を合理的に定量化する手法についても検討を加える。

研究計画 3 年目

最終年度では、新たに調査対象として追加するのは廃産業機器とする。ただし、この検討過程で、新たに対象項目として挙げた方がいい対象製品がある場合には追加することを適宜検討する。追加がない場合には、研究計画 1 年目、2 年目で調査した小型電気・電子機器とそれに近い家電リサイクル法関連品目、廃自動車に関するデータの再検証を進め、評価の精度を上げる。

最終年度であることから本研究テーマに関する国際シンポジウムを開催し、研究開発としての評価を受けながら、新たな情報収集を行う。

3. 研究結果

3.1. レア金属の社会蓄積量（最大回収ポテンシャル量）

本研究の調査対象製品（小型電気・電子機器、家電リサイクル法品目、自動車、産業機器）の国内に出荷された出荷台数を基に、製品を通じて社会に蓄積しているレア金属全体の回収が可能であると仮定したときの最大回収ポテンシャル量を推計した。なお、推計に用いた統計情報は、本研究の平成 21～23 年度研究報告書に詳細を記載しており、本総合研究報告書には再掲しない。詳細な統計情報等に関しては、各年度の研究報告書を参照されたい。

レア金属の各製品を通じた社会蓄積量として、国内に出荷された各製品の出荷台数や各製品のレア金属含有量情報を基に、製品を通じて社会に蓄積しているレア金属全体の回収が可能であると仮定したときの最大回収ポテンシャル量を推計する。

まず、推計の簡素化のため製品別の平均使用年数を、製品（A）ごとの耐用年数（ T_A 年）と仮定する。ここで、製品 A は故障などの理由により使用済み製品（廃棄物）となる確率が時間と共に指数関数的に上昇すると仮定する。故障率などの推計には、ワイブル分布関数などを用いて推計されることが多いが、本研究では報簡素化のため T_A 年後には全て使用済み製品となると仮定する。そこで、 i 年に出荷した製品 A の国内出荷数量（ $C_{A,i}$ 台）に対する t 時点での累積廃棄台数 Y_{i+t} を、以下の式より推計する。

製品 A の i 年での出荷量 $C_{A,i}$ に対するの t 時点 ($i + t$ 年) の累積廃棄台数 $Y_{i+t} = X_i^t$

$$\text{ただし、} X_i = \exp^{\frac{1}{T_A} \log(C_{A,i})}$$

上式を用いることで、例えば 10 年間の耐用年数の製品が、ある時点で 1,000 台出荷された場合の累積廃棄台数の推移は図 3-1 のようになる。

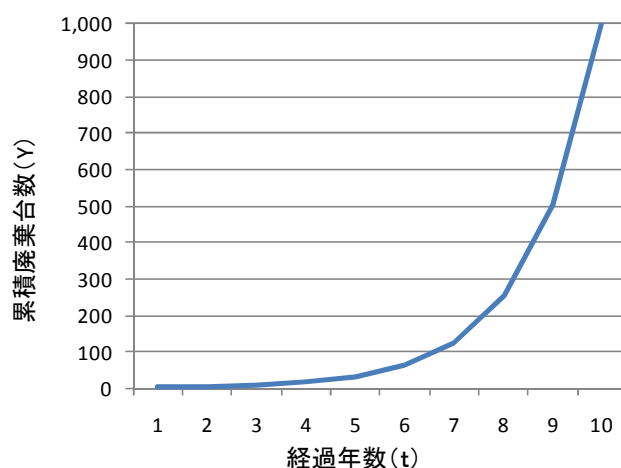


図 3-1 本研究において仮定する累積廃棄台数の推移例

そのため、例えば 2008 年時点で市場に蓄積している製品 A の In Use ストック台数（社会蓄積量） $S_{A,2008}$ は、

$$S_{A,2008} = C_{A,2008} + \sum_{t=1}^{T_A} \left[C_{A,2008-t} - \left(\exp^{\frac{1}{T_A} \log(C_{A,2008-t})} \right)^t \right]$$

から算出される。ただし、自動車に関しては、上記推計式により社会蓄積台数を推計するのではなく、自動車登録台数（2008 年値）を用いて推計することとする。また、建設機械や工作機械に関しては、耐用年数が定かでないため、本研究の平成 23 年度研究報告書に詳細に記した推計保有台数を用いて推計することとする。ただし、建設機械は保有台数（推計値）を把握できたトラッククレーン・ラフテレンクレーン、油圧ショベル、ブルドーザ、クローラクレーンの総計、工作機械はマシニングセンタ、ボール盤、フライス盤、中ぐり盤の総計値として示した。

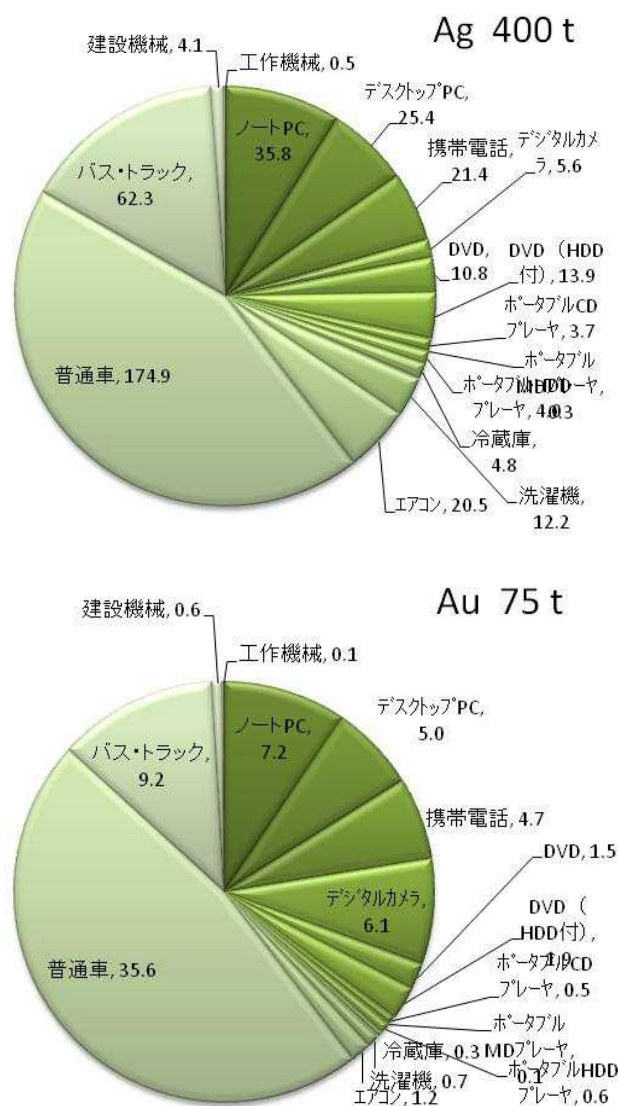


図 3-2 製品を通じた各元素の社会蓄積量 (1)

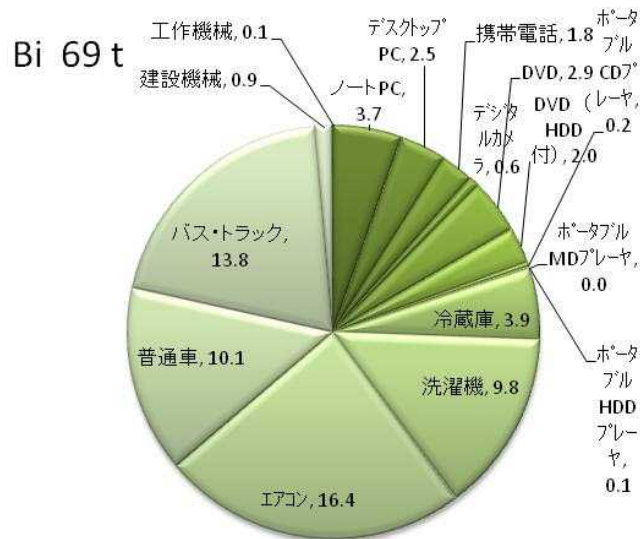
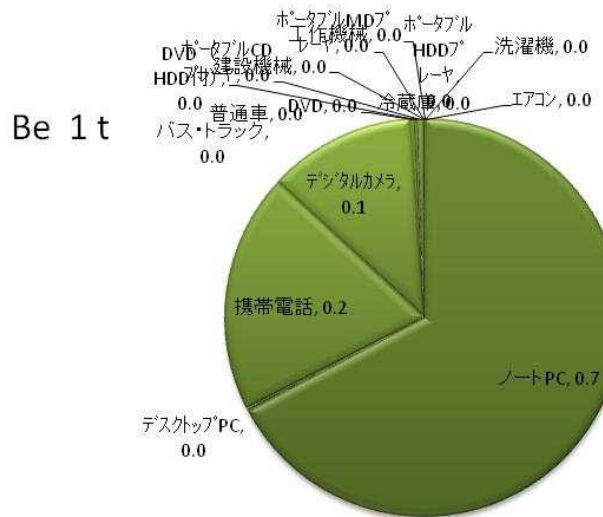
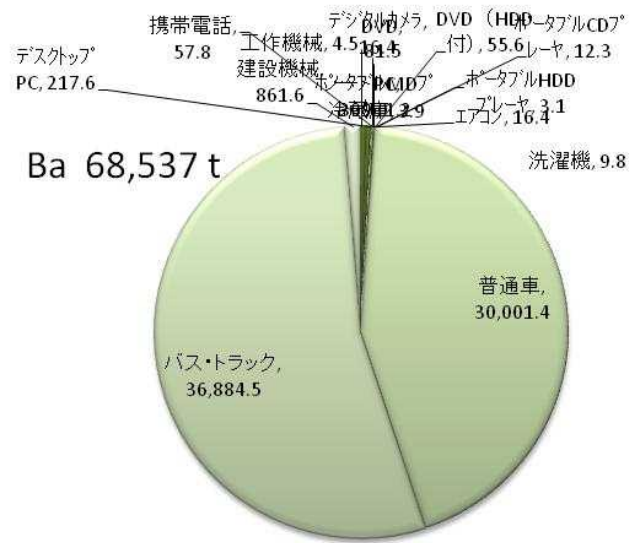


図 3-3 製品を通じた各元素の社会蓄積量 (2)

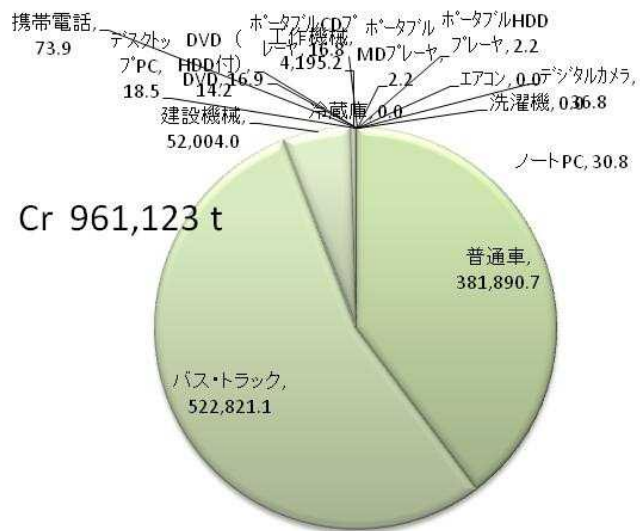
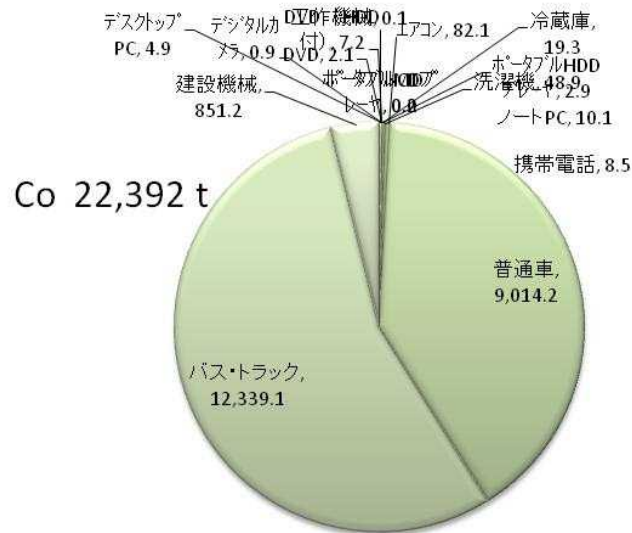
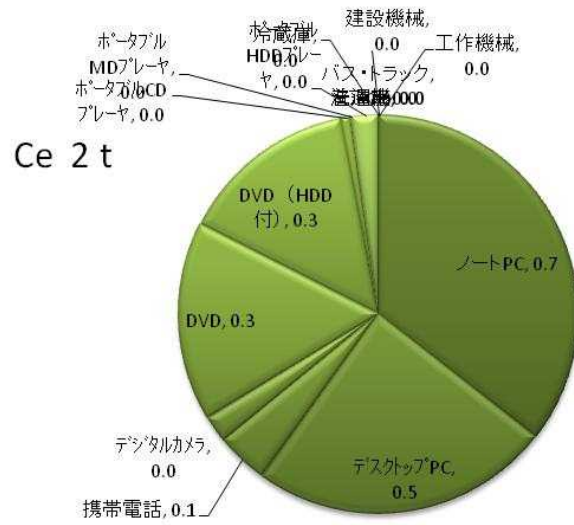


図 3-4 製品を通じた各元素の社会蓄積量 (3)

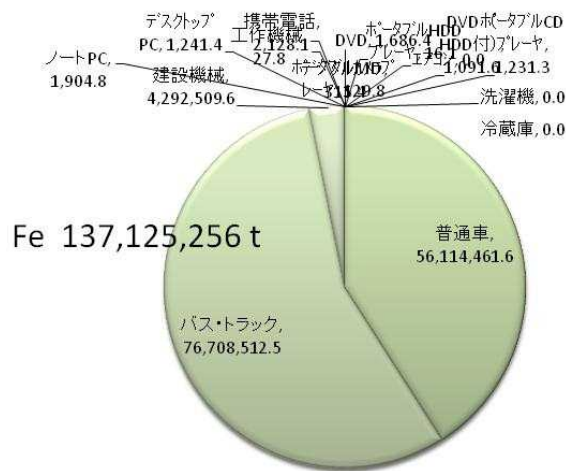
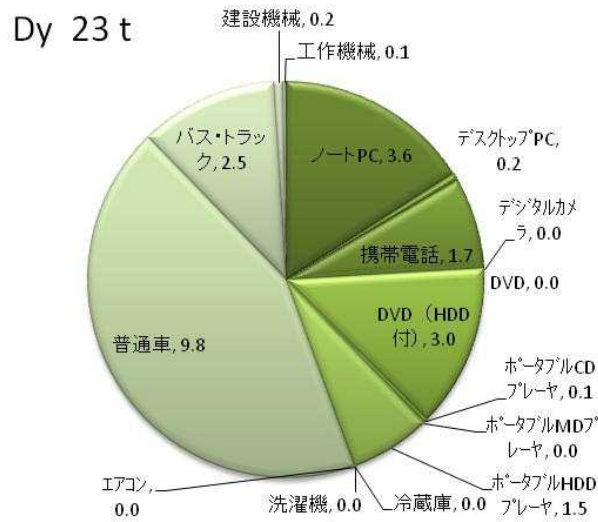
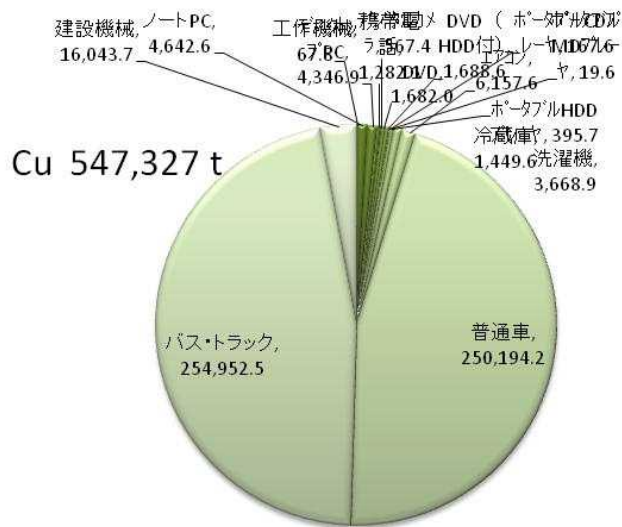


図 3-5 製品を通じた各元素の社会蓄積量 (4)

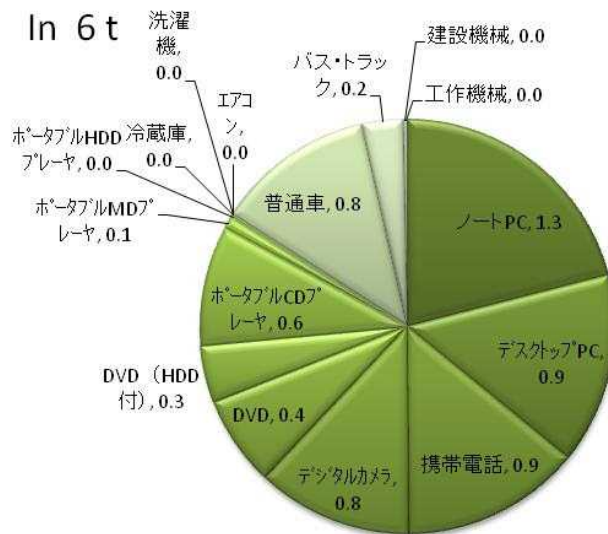
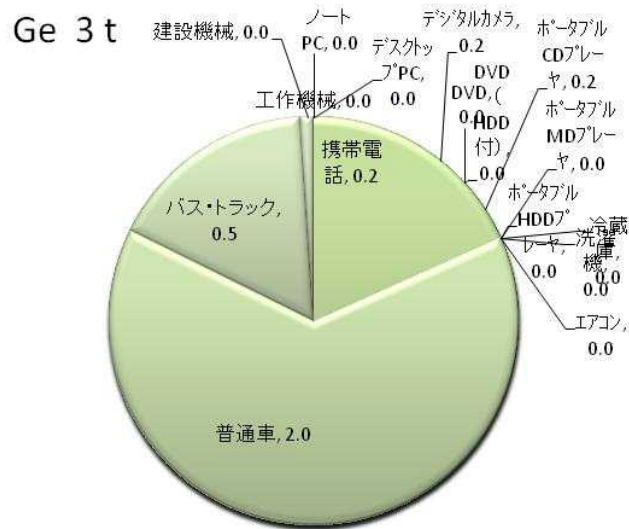
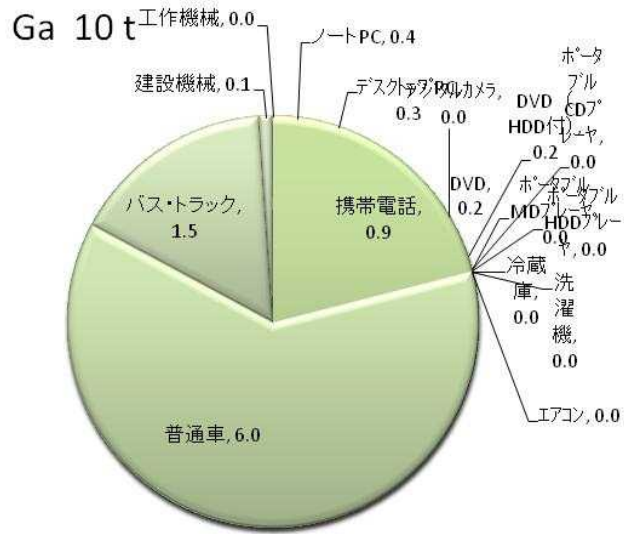


図 3-6 製品を通じた各元素の社会蓄積量 (5)

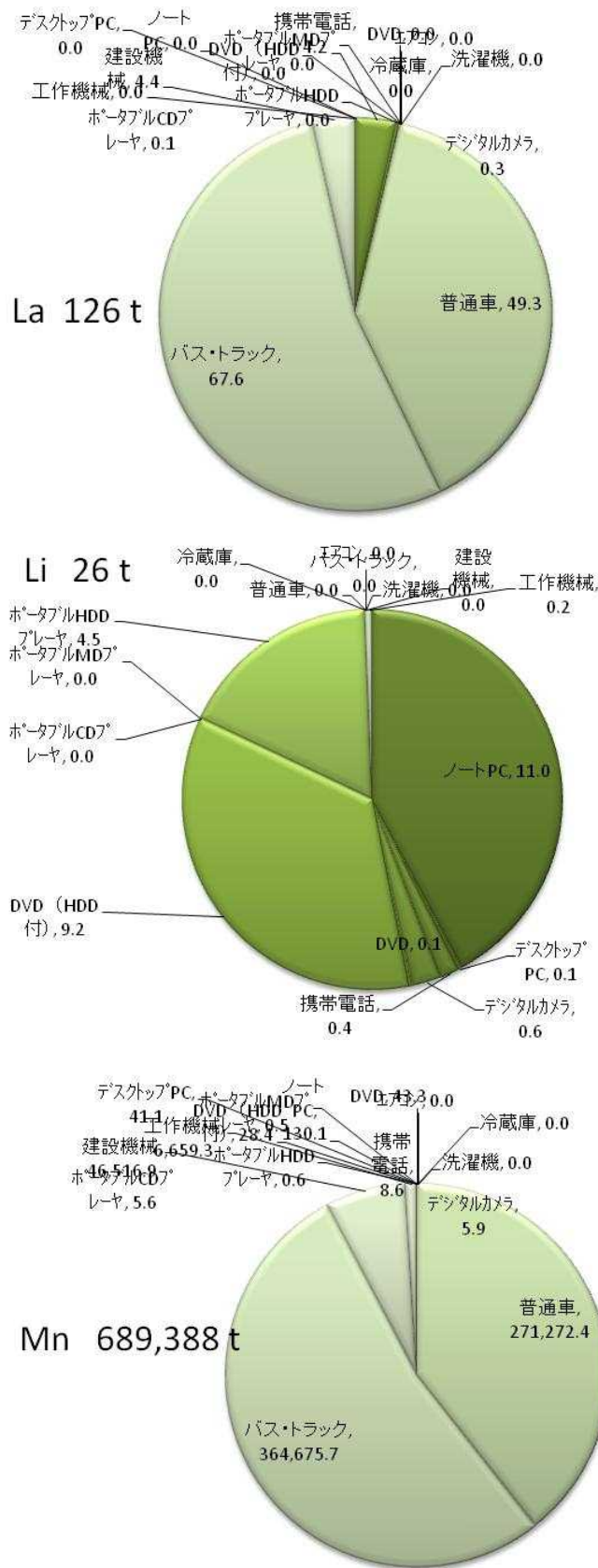


図 3-7 製品を通じた各元素の社会蓄積量 (6)

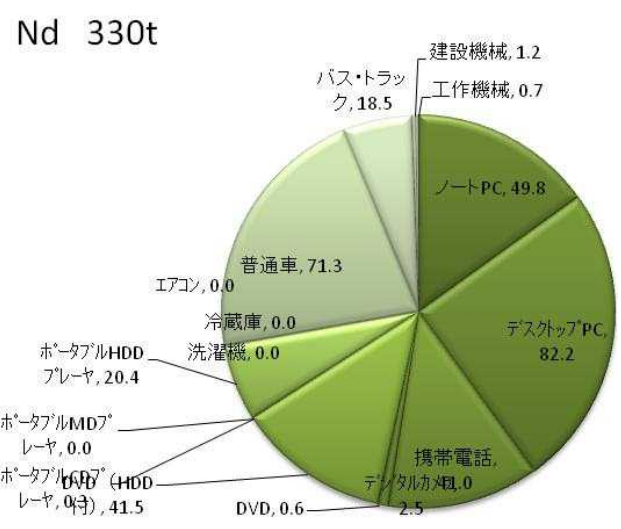
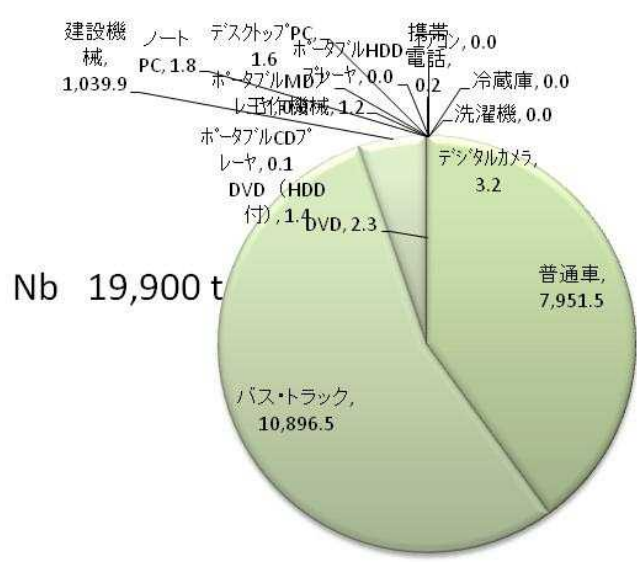
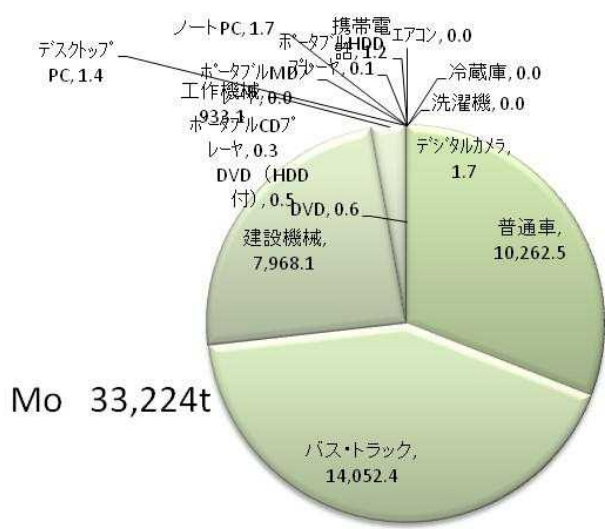


図 3-8 製品を通じた各元素の社会蓄積量 (7)

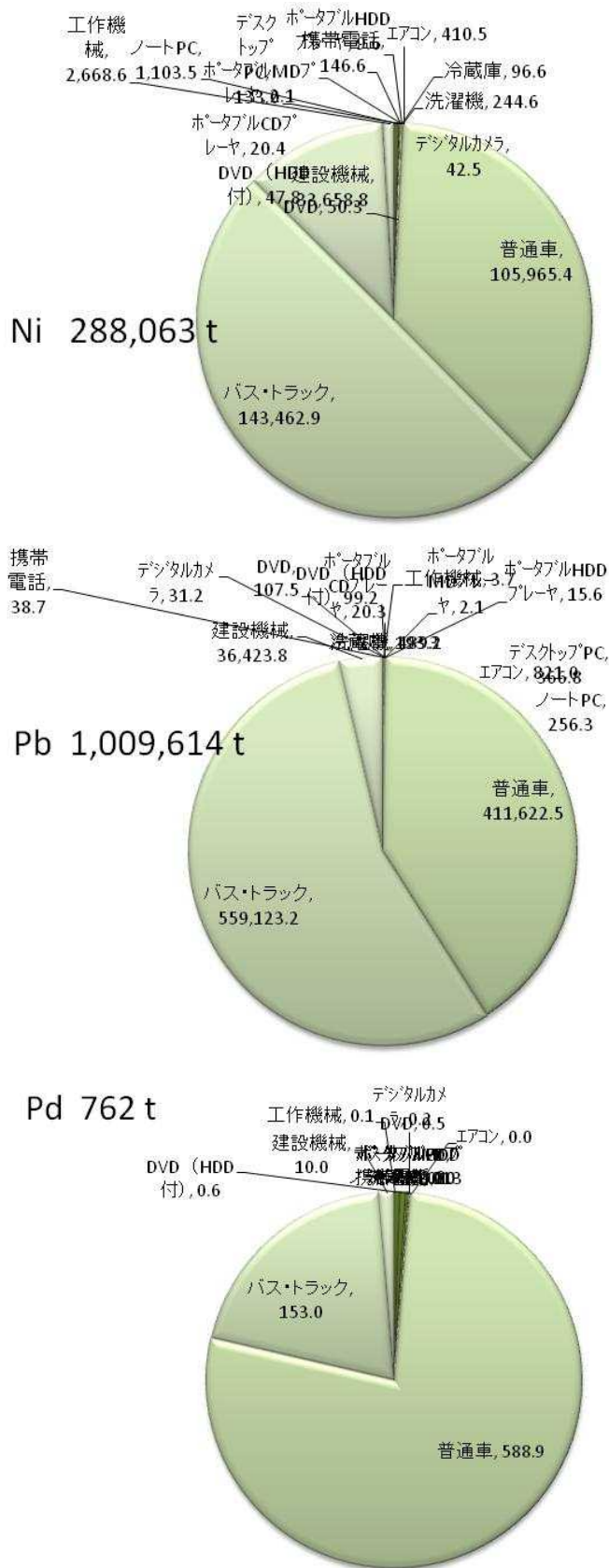


図 3-9 製品を通じた各元素の社会蓄積量 (8)

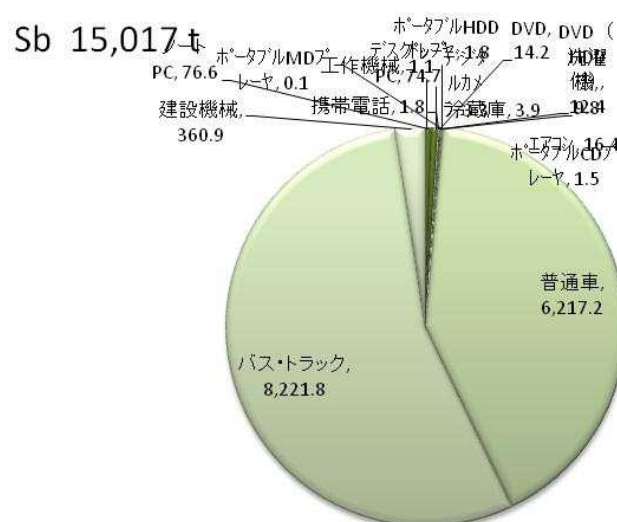
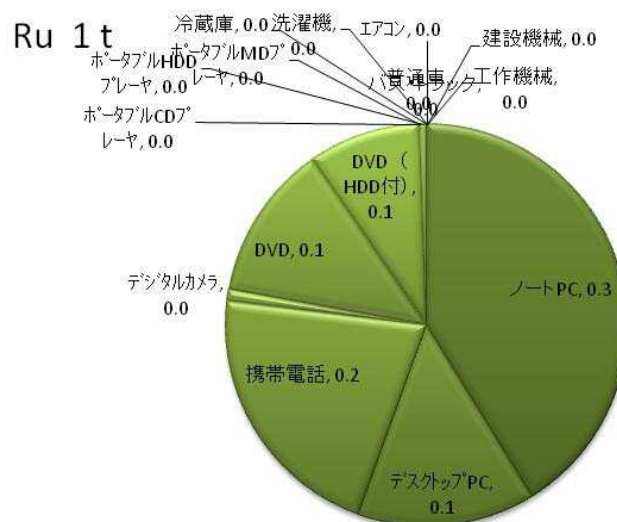
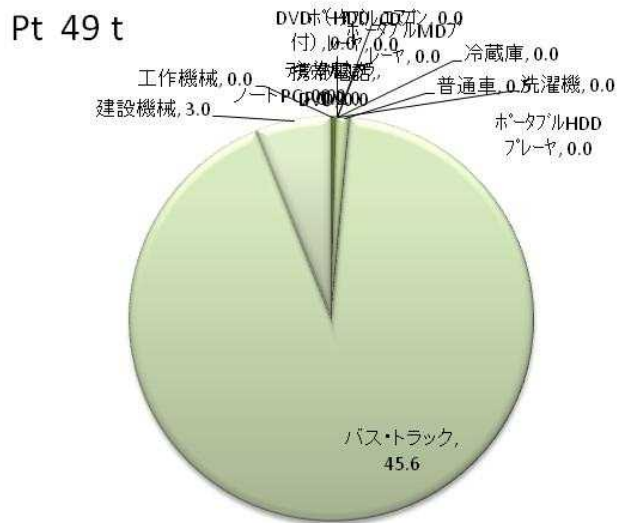


図 3-10 製品を通じた各元素の社会蓄積量 (9)

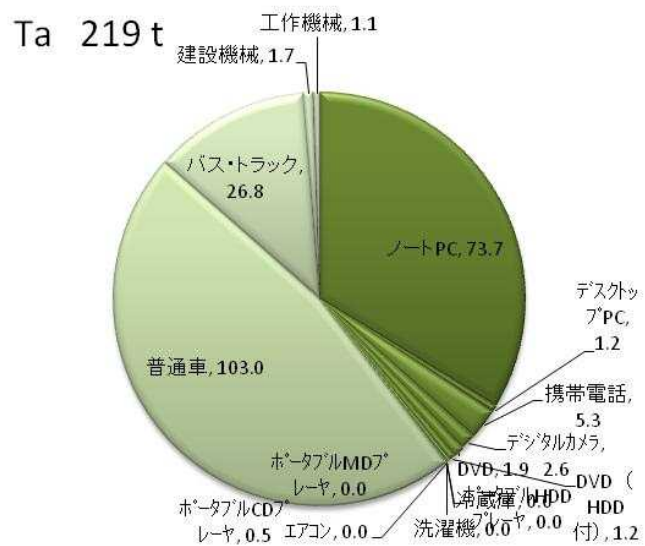
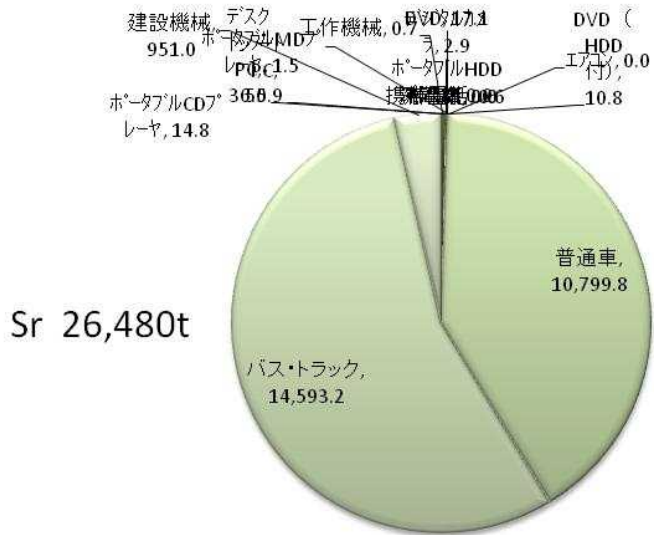
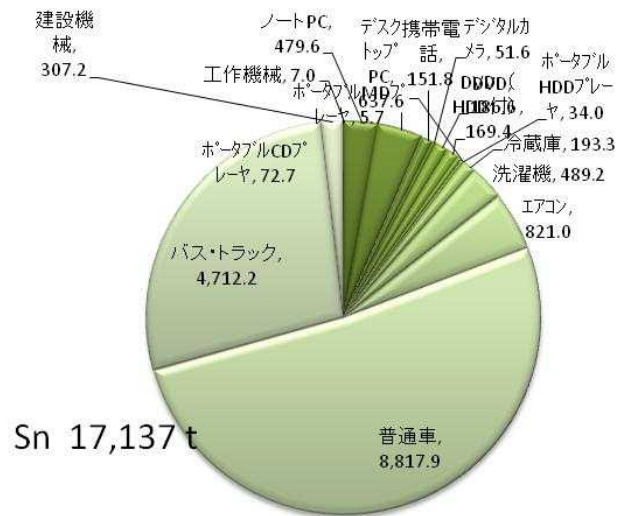


図 3-11 製品を通じた各元素の社会蓄積量 (10)

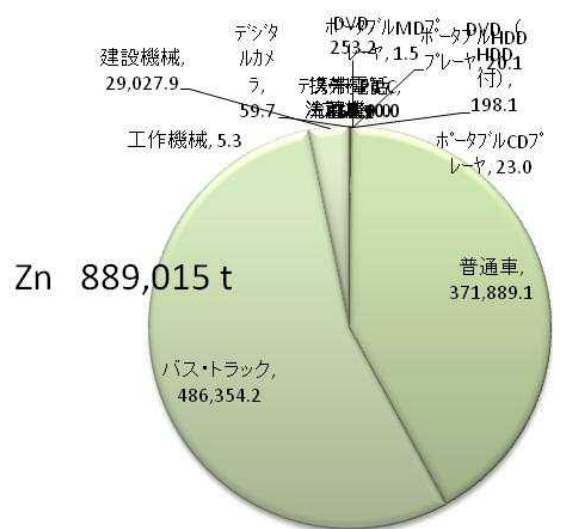
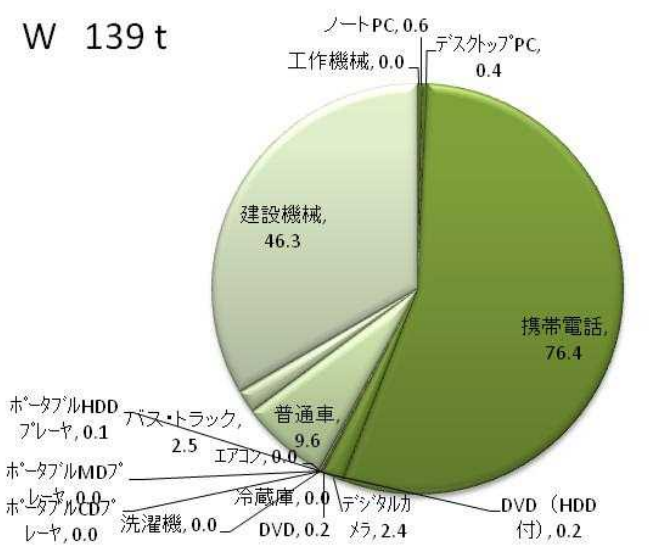
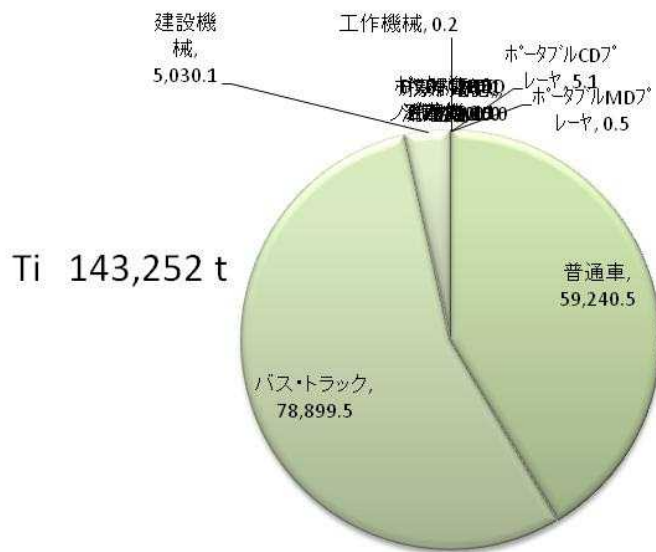


図 3-12 製品を通じた各元素の社会蓄積量 (11)

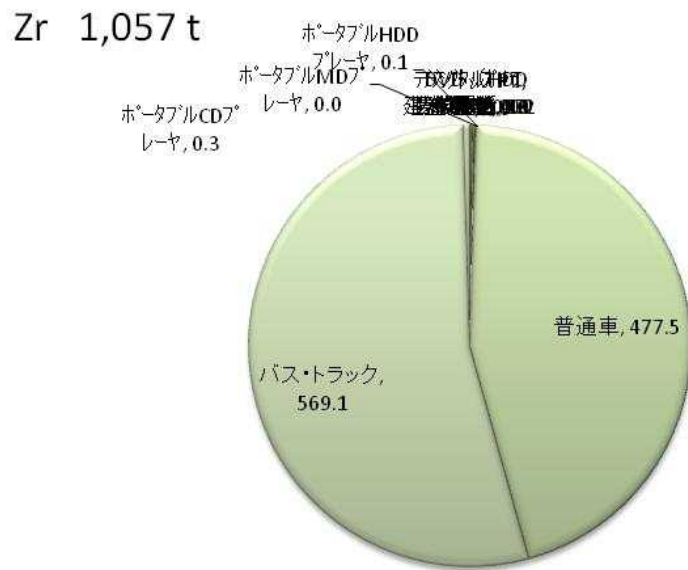


図 3-13 製品を通じた各元素の社会蓄積量 (12)

回収対象とする元素により、どの製品を対象としてリサイクル循環を構築することが効率的か、本研究の推計結果から考察することが可能となる。製品 1 台当りの重量の違いなどから、自動車为社会蓄積量のシェアの大部分を占める元素が多いものの、Bi はエアコン、Ce はパソコンなどによる社会蓄積が顕著であるなど、元素によりその特徴が異なる。Li に関しては、PC を通じた社会蓄積が進んでいる結果であるものの、近年のハイブリッド車 (HV) ・電気自動車 (EV) の急伸により、そのシェアも今後大幅に変わる可能性を秘めている。技術の変化にとともに、リサイクルシステムの再構築が必要となる可能性もあることから、今後も継続的な元素の社会蓄積量の調査を行うことが重要となっている。

4. 素材戦略モデルを用いたシミュレーション分析結果

素材戦略モデルを構築し、そのモデルを用いて、自動車の将来需要量の変化により LCA 結果がどのように影響するか、シナリオ分析を行った。

本章ではまず、次節にてモデルの概要を解説し、次に、推計の際の主要な計算手順の概説を行い、最後に分析結果を示す。

4.1. 素材戦略モデルの概要

本研究で利用する素材戦略モデルは、各製品の国内最終消費をシナリオで与え、中間製品の生産量、最終製品利用量、最終製品処分量、リサイクル量、エネルギー・原料利用量などを計算するモデルとなっている。ただし、国内モデルとしているため、各製品の輸出入量はシナリオによる外生値として与えている。なお、シナリオで与える最終消費量とは、産業連関表における国内最終需要計のことであり、家計等の消費支出、在庫純増、固定資本形成からなる。

モデルタイプは技術のボトムアップ型一括最適化型モデル(線形計画法)となっており、計算期間は一期 10 年の 11 期(2000 年~2010 年)まで計算可能なモデルとなっている(計算には GAMS プログラムを利用)。

計算モデルには、物量マトリックスにより製品間の部品・素材の流れが記述されている。なお、物量マトリックスとは具体的に、各部門に投入された物量の総数が入ったマトリックスで、列方向には生産の際に投入された原料・製品の量が記述されており、行方向には、その原料・製品の投入先に対する投入量が記述されている。このモデルは主に WIO-MFA などから得られた投入量もしくは独自に計算した 2000 年の物量値を記述している。図 4-1 に、この概念図を示す。

		二 次 製 品 最 終 製 品						
		鉄鉄	銅		Li地金	自動車	機械	
一次原料	鉄鉱石	列 生産の際に投入された原料・製品の量						
	非鉄金属鉱物							
	石灰石							
	など							
Li鉱物								
二次製品	鉄鉄							
	銅							
	など							
最終製品	自動車							
	機械							
	など							
投入の	加工スクラップ							
	金属屑							
エネルギー	一次							
	二次							
	三次							
	石炭							
	原油							
天然ガス								
ガソリン								
重油								

図 4-1 物量マトリックス概念図

本研究では、こうした物量マトリックスを基にしたインベントリ分析を応用し、自動車の将来需要などのシナリオ別に CO₂ 排出量を比較するという LCA 分析を応用したシミュレーション分析を行う。なお、今回利用する計算モデルでは、エネルギー・製品製造・使用・廃棄の各段階で発生する CO₂ の発生量を計算する。

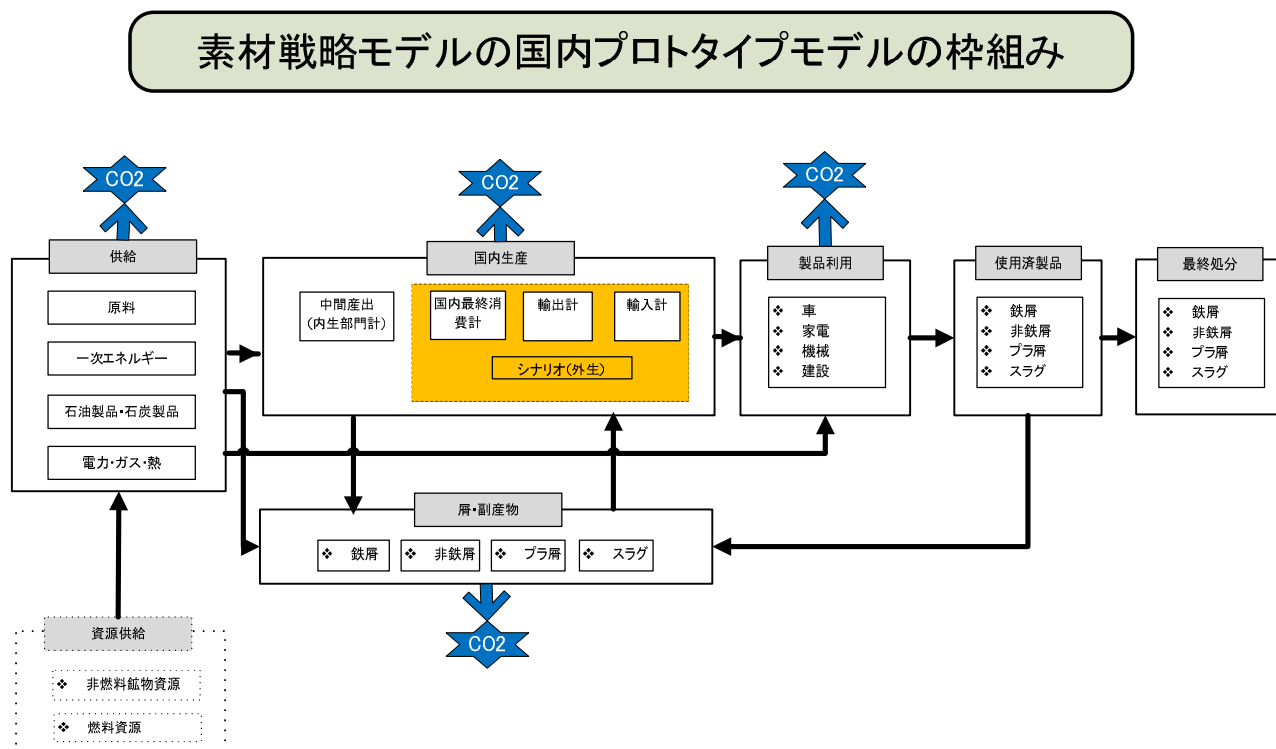


図 4-2 本研究の CO₂ 排出量の積算範囲

なお、本研究のインベントリ分析にはトップダウン方式を採用している。これは、対象とする製品等のライフサイクルがどのようなプロセスから構成されているかのフローに対し、その個々のプロセスの入力と出力の情報を利用する。入力として資源、素材、部品などのプロセスに投入される要素、出力としては製品、副産物、汚染物質、廃棄物などのプロセスから産出・排出される要素が挙げられる。産業連関表を活用することにより、このフローを把握することが可能となる。

産業連関表を LCA 分析のインベントリとして用いることの利点は大きい。例えば、産業連関表自体の中に投入物や排出物のインベントリ分析項目がそのまま、あるいは多少の加工によって利用可能な状態にあることである。産業連関表の「物量表」の利用により、理論上は各部門の単位生産量粗利の素材投入量分かる。特に燃料消費量データは、これに係数を乗じて大気環境への負荷排出量の推計に利用できる点で貴重である。しかしながら、この物量値の精度には多くの問題があり、インベントリデータでの応用に際して補正を加えたり、まったく別の統計データを併用したりする必要があり、本研究でも物量表から独自の調査値へ置き換えて利用している項目があることに注意が必要である。

なお、この素材戦略モデルでは、以下のシナリオについての需要予測が可能である。

- ① 総製造コストが最小になる製造シナリオ
- ② 総 CO₂ 排出量が最小になる製造シナリオ

①をコスト最小化シナリオ、②を CO₂ 最小化シナリオとする。コスト最小化シナリオは利益を求める企業活動の原理から考えると市場が将来とるものに近い需要予測であるとも言える。また、CO₂ 最小化シナリオは、シナリオ内において最も環境配慮規制等が厳しい場合の将来予測になると考えられる。

最小化の計算は最適化により行う。最適化とは、複数の選択肢から最善のものを選ぶことであり、数学的に表現すると「与えられた制約条件 F (実行可能集合) をすべて満たし、目的関数 $f(x)$ の値が最小または最大になるような変数 x の値を決定する」ことである。この場合 x は最適解と呼ばれ、最適解は一つしか存在しない場合もあるが、無限個存在する場合もある。目的関数をいくらでも下げることができる状態では最小化はできず、逆にいくらでもあげることができれば最大化はできない。この状態は F が非有界であるという。

本研究ではシナリオ①と②の目的関数に当たるものはそれぞれ総 CO₂ 排出量、総製造コストとなる。 x に当たるものは各種車の製造台数である。期間中の製造台数の合計値、すなわち需要量を設定し、加えて各車 0 台以上という下限を設けることで制約条件 F とする。これを以下のように表わす。

まず、総 CO₂ 最小シナリオにおける目的関数 f_1 は、部門 j の生産台数を y_j 、部門数を m とすると(1)式となる。

$$f_1(y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m) = \sum_j^m e_j X(y_j) \quad (1)$$

次に、総製造コスト最小シナリオにおける目的関数 f_2 は(2)式となる。

$$f_2(y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m) = \sum_j^m X(y_j) \quad (2)$$

また、制約条件は仮定した需要量を F とすると、次の(3)式、(4)式となる。

$$y_1 + y_2 + \dots + y_j + \dots + y_m = \sum_j^m y_j = F \quad (3)$$

$$y_1 \geq 0, y_2 \geq 0, \dots, y_j \geq 0, \dots, y_m \geq 0 \quad (4)$$

実際の推計には、この他産量の制限や電力の発電量への制限式も設定している。

4.2. シナリオ設定

以下に、シナリオ分析に使用する素材戦略モデルのデータの一部や前提条件などを示す。

(ア) 各種設定

推計は1期10年で行う。2000年をT0とし、以降10年ごとにT1、T2…とする。今回はT5(2050年)までをシミュレーション期間とした。

本研究でのシナリオ分析の対象としたのは、自動車のうちガソリン車(GV)、ディーゼル車(DV)、ハイブリッド車(HV)、電気自動車(EV)、燃料電池車(FV)の5種である。

(イ) 自動車エンジン・電池性能

GVのT1期の燃費は、日本自動車工業会環境レポート2010より得た2009年の販売平均10・15モード燃費のデータを用い、T2期以降は一定と仮定する。その他の車種に関しては、燃費の向上率がGVと同様(約1.13倍)であるとし、T1期以降の値を設定した。燃費データを表4-1に、それから計算された各車種が1km走行する際のCO₂排出量を図4-3に示す。

表 4-1 各車種の燃費設定

車種	T0 燃費	T1 以降燃費	単位	備考
GV	16.0	18.1	km/l	
DV	19.0	21.5	km/l	GVの1.18倍
HV	32.0	36.2	km/l	GVの2倍
EV	0.00211	0.00239	km/10 ⁶ kWh	
FV	2276	2575	km/Nm ³	

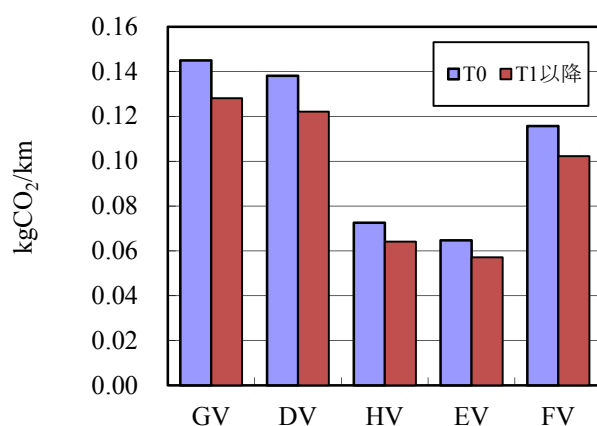


図 4-3 各車種の CO₂ 排出量

(ウ) 車の重量

素材戦略モデルのインベントリデータでは、各車種の重量を以下のように設定した。車のパーツごとの平均的な重量と一台当たりの重量比を図 4-4 に示す。

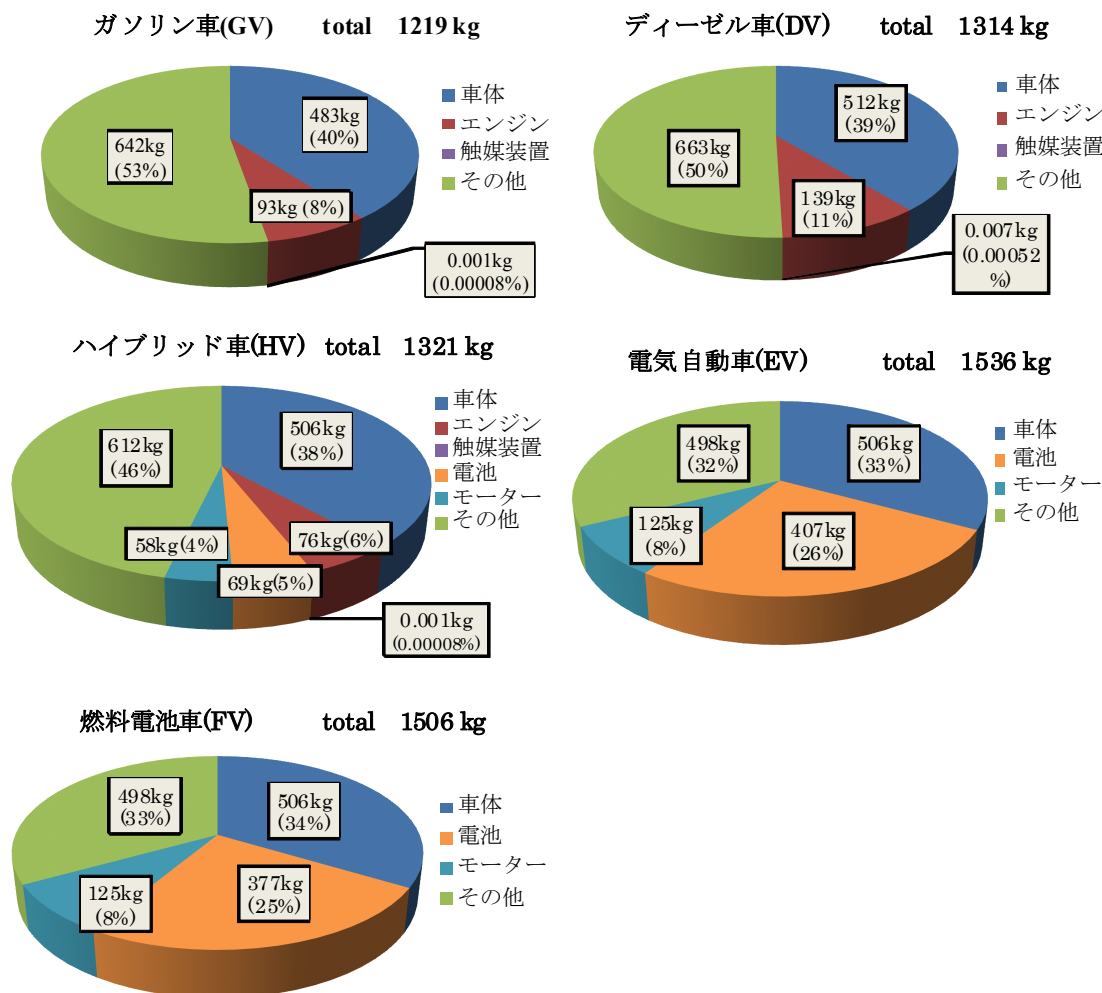


図 4-4 素材戦略モデル内の車種別重量設定

また、HV、EV、FVの電池にはそれぞれリチウムイオン電池が使用されている。これらの車の一台当たりのリチウムの使用量を表 4-2 のように設定する。なお、リチウムの単価は 580 円/kg で一定とする。

表 4-2 自動車用電池の一台当たりリチウム使用料

	ハイブリッド車(HV)	電気自動車(EV)	燃料電池車(FV)
搭載電池重量 (kg/台)	69.38	406.97	376.74
電池中のリチウム重量 (g/台)	128.31	752.68	61.2

(エ) 制約条件

線形モデルが基になっている特性上、シナリオ設定によっては結果が急激な変化を示す可能性がある。ただし、実際の生産量は生産設備などの制約により、緩慢な変化をたどる場合が多い。そのため、推計結果が急変を示す可能性を抑制するため、EV と FV の生産台数の上限を前期(10 年前)と比較してそれぞれ 30 倍、10 倍以上は生産できないとする制約条件を課す。また、電力の生産量の上限は前期の 1.1 倍までとした。

4.3. 推計シナリオ

各車種の燃費・燃料価格・生産量・リチウム使用量を現状維持（横ばい）としたものをベースシナリオとし、これをシナリオの設定・比較をする際の基準とする。その他の比較用シナリオは、これらの項目のうち 1 つを変動させることにより、その項目が将来需要にどのような影響を及ぼすかをみる。

具体的なシナリオは以下のように設定した。

(ア) 燃費向上シナリオ

原油価格、自動車の需要、電池へのリチウム使用量はベースシナリオのまま各車種の燃費を向上させたシナリオを比較した。以下のように燃費向上シナリオを設定した。なお、各シナリオにおいて全ての車の燃費向上率は同じである。

- ① T0 から T1 までの GV の燃費向上率(約 1.13 倍)で T3 まで比例、T4 以降一定のシナリオ
- ② T0 から T1 までの GV の燃費向上率(約 1.13 倍)で T5 まで比例させたシナリオ
- ③ 2010 年 12 月 13 日現在において、GV の最低燃費(ダイハツ調べ)の MOVE の燃費 27.0 km/l (10・15 モード走行燃費(国土交通省審査値))を T1 の値とし、T2 以降は一定のシナリオ
- ④ ③における T0 から T1 までの燃費向上率(約 1.69 倍)で T3 まで比例、T4 以降一定のシナリオ
- ⑤ ③における T0 から T1 までの燃費向上率(約 1.69 倍)で T5 まで比例させたシナリオ

図 4-5 に初期条件および各シナリオの GV の燃費のグラフを示す。

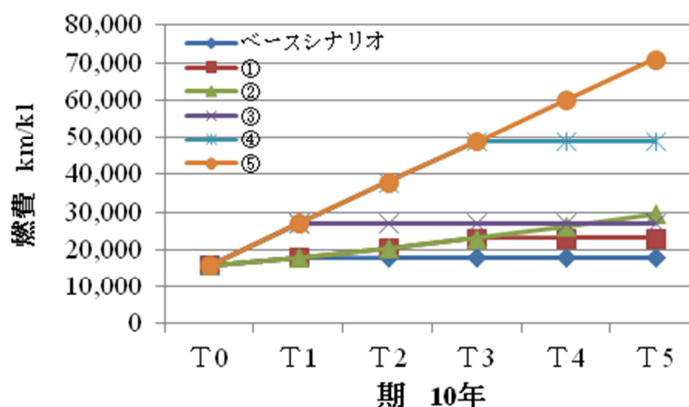


図 4-5 燃費変動シナリオにおける GV の燃費変動

(イ) 原油価格変動シナリオ

燃費、自動車の需要、電池へのリチウム使用量はベースシナリオのまま原油価格を変動させたデータを比較した。以下のように原油価格変動シナリオを設定した。

- ① 初期条件における T0 から T1 までの原油価格(百万円/kl)の上昇率で、T1 から T5 まで原油価格が比例増加するシナリオ
- ② 初期条件における T0 から T1 までの原油価格(百万円/kl)の半分の上昇率で、T1 以降 T5 まで原油価格が比例増加するシナリオ
- ③ 2000 年から 2010 年での最大の原油価格である 134-153 \$/BLL(2008 年 6 月)及びこの年の平均為替 103-86 円/\$より算出した 0.0872 百万円/kl を T1 の原油価格と設定し、T2 以降は T1 の値で一定であるシナリオ
- ④ ③における T0 から T1 までの原油価格(百万円/kl)の上昇率で、T1 以降 T5 まで原油価格が比例増加するシナリオ
- ⑤ ③における T0 から T1 までの原油価格(百万円/kl)の半分の上昇率で、T1 以降 T5 まで原油価格が比例増加するシナリオ
- ⑥ T0、T1 で初期条件と同様の原油価格を取った後、0.007 百万円/年で原油価格が比例減少する(T5 において原油価格が T0 と同じ値になるシナリオ)

図 4-6 に初期条件および各シナリオの原油価格変動のグラフを示す。

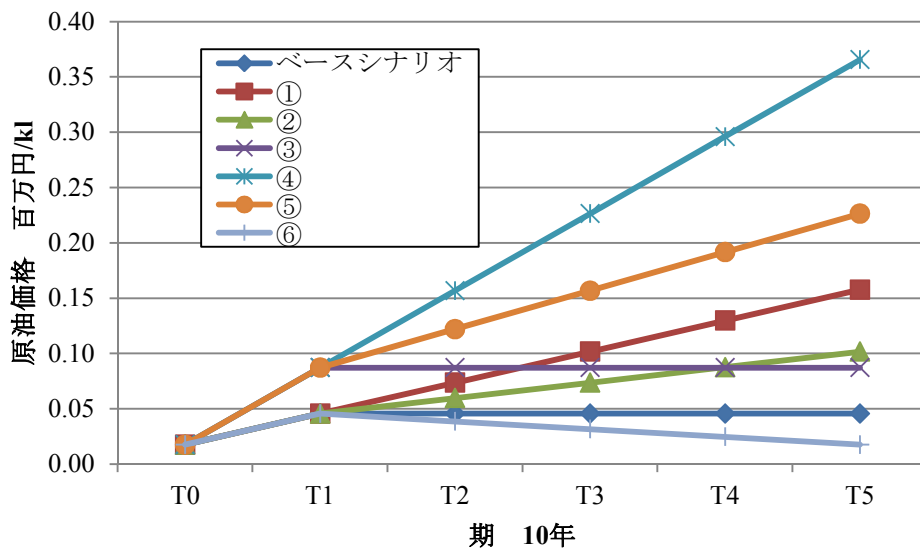


図 4-6 原油価格変動シナリオにおける原油価格変動

(ウ) 自動車需要変動シナリオ

燃費、原油価格、電池へのリチウム使用量はベースシナリオのまま、車の需要量(外生変数)を変動させたデータを比較した。以下のように生産のシナリオを設定した。

- ① 2000年と2008年の自動車の生産量(自動車工業会)より計算した、年4.57%の割合で国内最終需要のみが増加するシナリオ
- ② 年3%の割合で国内最終需要のみが増加するシナリオ
- ③ 年1%の割合で国内最終需要のみが増加するシナリオ
- ④ 2000年と2009年の自動車の生産量(自動車工業会)より計算した、年0.749%の割合で国内最終需要のみが減少するシナリオ
- ⑤ 年4.57%の割合で国内最終需要と輸出量が増加するシナリオ
- ⑥ 年3%の割合で国内最終需要と輸出量が増加するシナリオ
- ⑦ 年1%の割合で国内最終需要と輸出量が増加するシナリオ
- ⑧ 年0.749%の割合で国内最終需要と輸出量が減少するシナリオ
- ⑨ 年4.57%の割合で国内最終需要と輸出量と輸入量が増加するシナリオ
- ⑩ 年3%の割合で国内最終需要と輸出量と輸入量が増加するシナリオ
- ⑪ 年1%の割合で国内最終需要と輸出量と輸入量が増加するシナリオ
- ⑫ 年0.749%の割合で国内最終需要と輸入量が減少するシナリオ

なお、生産量からの増加割合及び減少割合は以下のように求めた。

1年間の生産率の変化率を r %、2000年の生産量を N_{2000} 、2008年及び2009年の生産量を N_t ($t=2008$ or 2009)とすると、

$$N_t = N_{2000} \times (1 + r/100)^{t-2000}$$

これを変形し r を求めると、

$$r = 100 \times (N_t / N_{2000})^{1/(t-2000)}$$

(エ) 電池技術向上シナリオ

燃費、原油価格、自動車の需要はベースシナリオのまま、リチウムイオン電池に対する技術が向上し電池におけるリチウムの使用量が減少するシナリオを比較した。以下のように技術力向上のシナリオを設定した。

- ① T0とT1におけるHV、EV、FVの電池へのリチウム使用量はベースシナリオのまま、T2からT5の4期で10%のリチウム使用量が比例的に減少するシナリオ
- ② ①と同様にして、T2からT5の4期で20%の電池へのリチウム使用量が減少するシナリオ
- ③ ①と同様にして、T2からT5の4期で30%の電池へのリチウム使用量が減少するシナリオ
- ④ ①と同様にして、T2からT5の4期で40%の電池へのリチウム使用量が減少するシナリオ
- ⑤ ①と同様にして、T2からT5の4期で50%の電池へのリチウム使用量が減少するシナリオ

以上のシナリオに関するシナリオ分析を行う。分析結果は多様な変数により示すことが可能であるが、本研究では以下のグラフで表すこととする。なお、横軸は全て期間T0期からT5期である。

- 1) コスト最小化または CO₂ 最小化によって計算された自動車国内需要量のグラフ
- 2) 国内需要量と外生値(輸出入量、内生値)により計算された国内の自動車生産台数のグラフ
- 3) セクション別に排出された CO₂ の排出量のグラフ
- 4) 全過程で使用された電力使用量(発電量)のグラフ
- 5) 生産における HV・EV・FV のリチウム使用量のグラフ
- 6) 各部門に使用されたコストのグラフ

4.4. シナリオ分析結果

1) ベースシナリオ

ベースシナリオのコスト最小化の分析結果を図 4-7 に、CO₂ 最小化の分析結果を図 4-8 に示す。また、各々の分析の T5 における CO₂ 排出量を表 4-3 に示す。コスト最小化では T1 以降 HV が占める予測、また CO₂ 最小化では T1 で HV、T2 以降は EV が市場を占める予測となった。

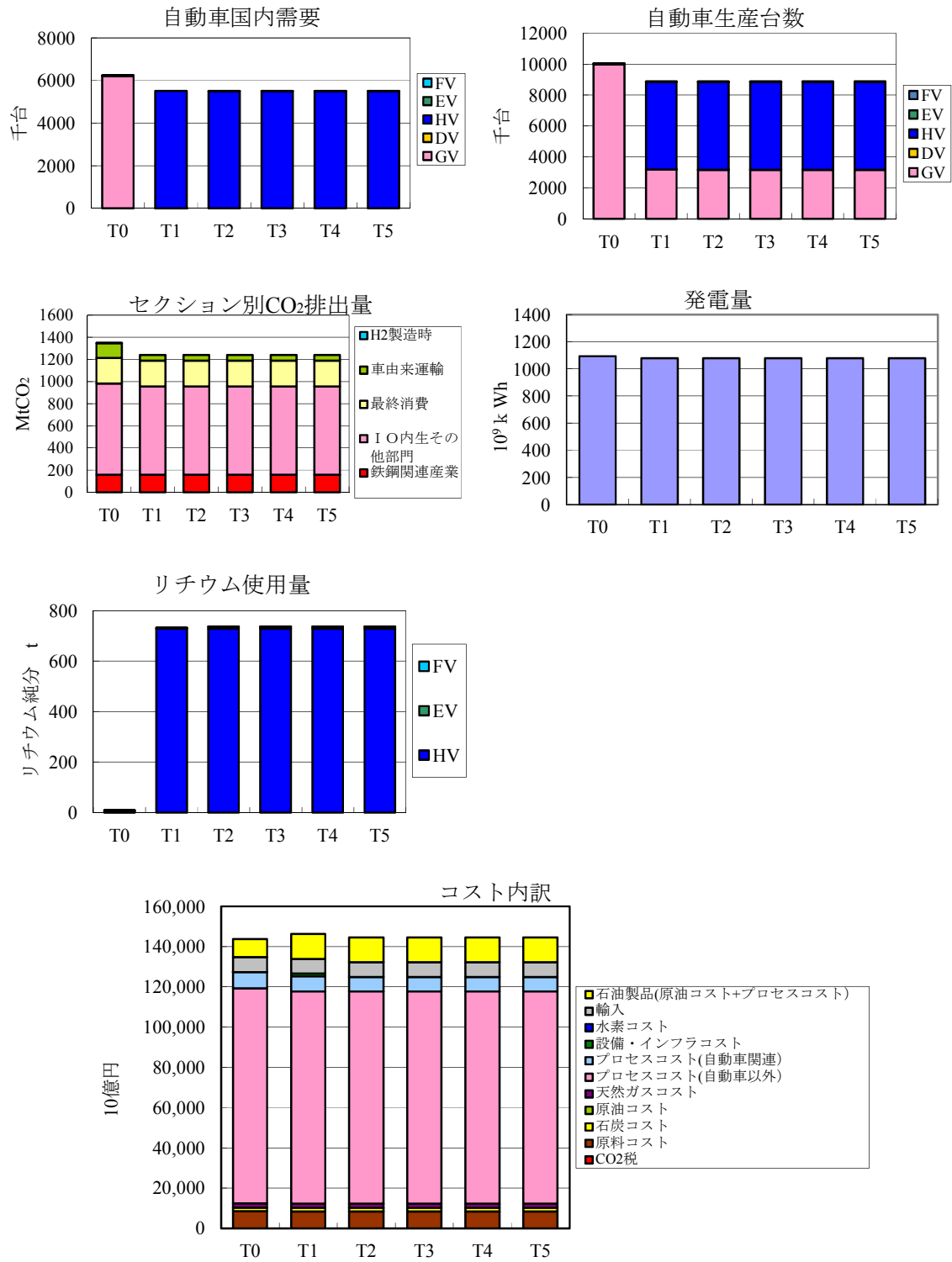


図 4-7 ベースシナリオのコスト最小化の分析結果

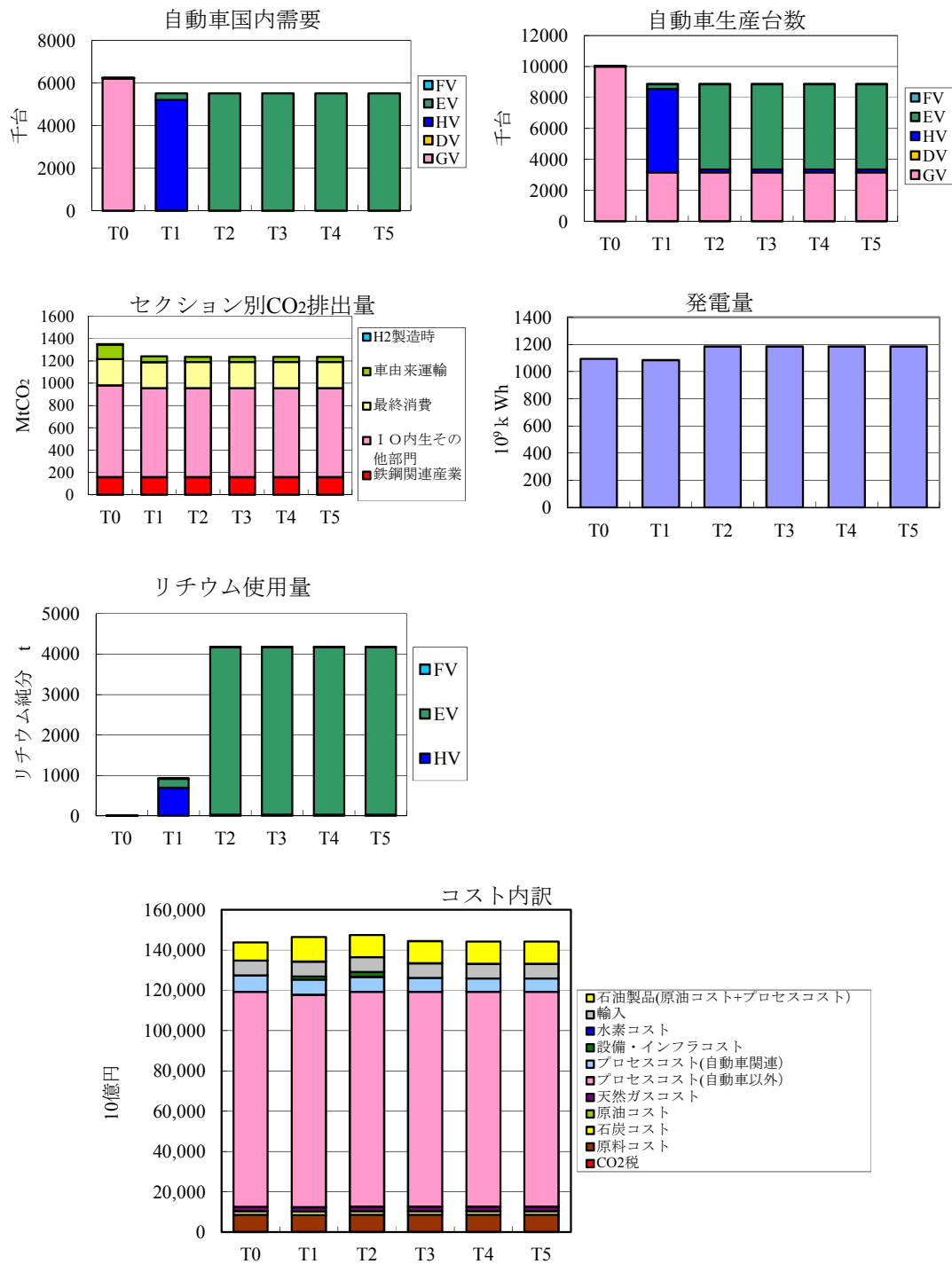


図 4-8 ベースシナリオの CO₂ 最小化の分析結果

表 4-3 ベースシナリオの T5 における CO₂ 排出量推計

シナリオ	コスト最小化シナリオ (MtCO ₂)	CO ₂ 最小化シナリオ (MtCO ₂)
ベースシナリオ	1241	1236

2) 燃費向上シナリオ①結果

燃費向上シナリオ①のコスト最小化・CO₂ 最小化の分析結果をそれぞれ図 4-9、図 4-10 に示す（以下、各シナリオについて同様）。

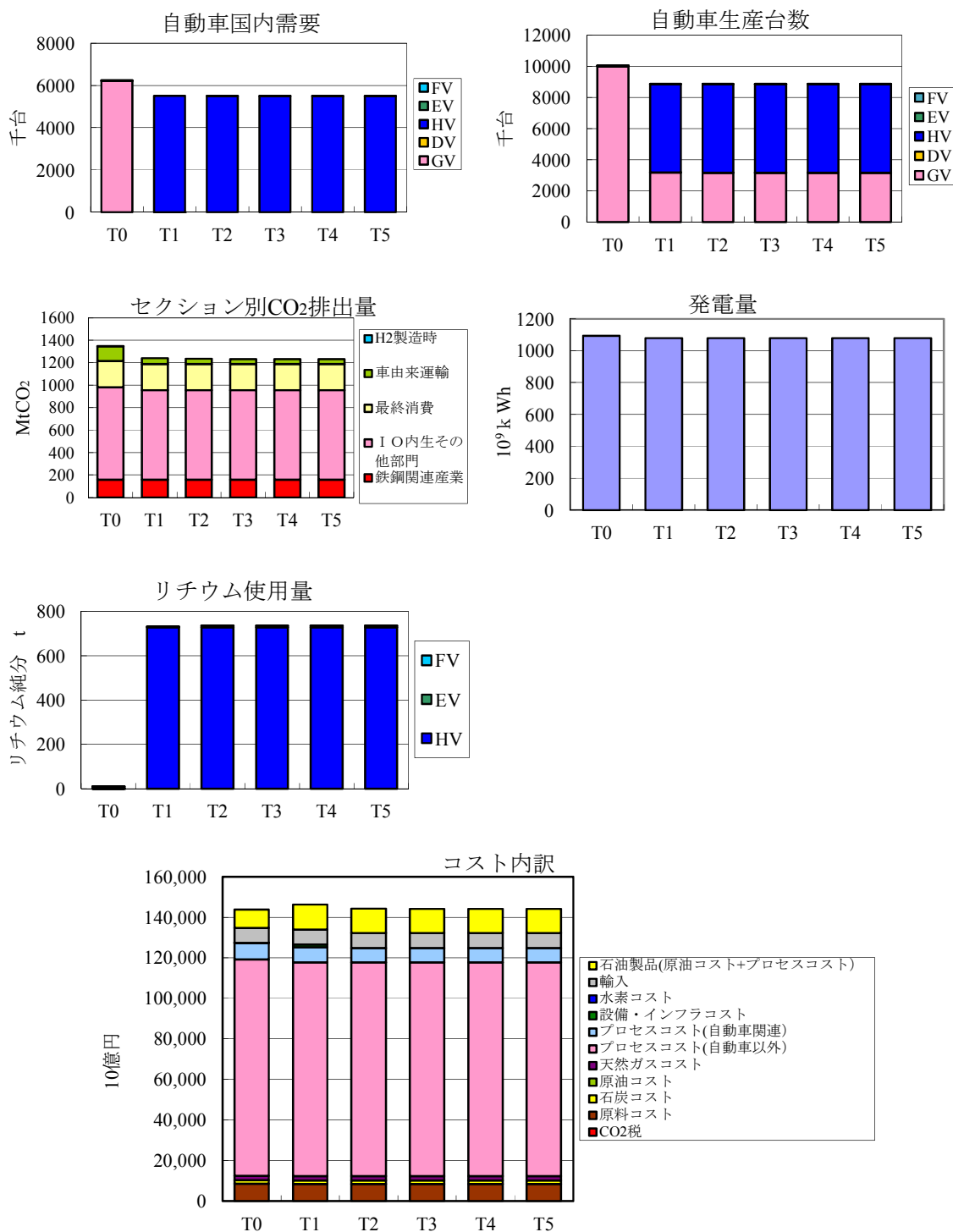


図 4-9 燃費向上シナリオ①のコスト最小化の分析結果

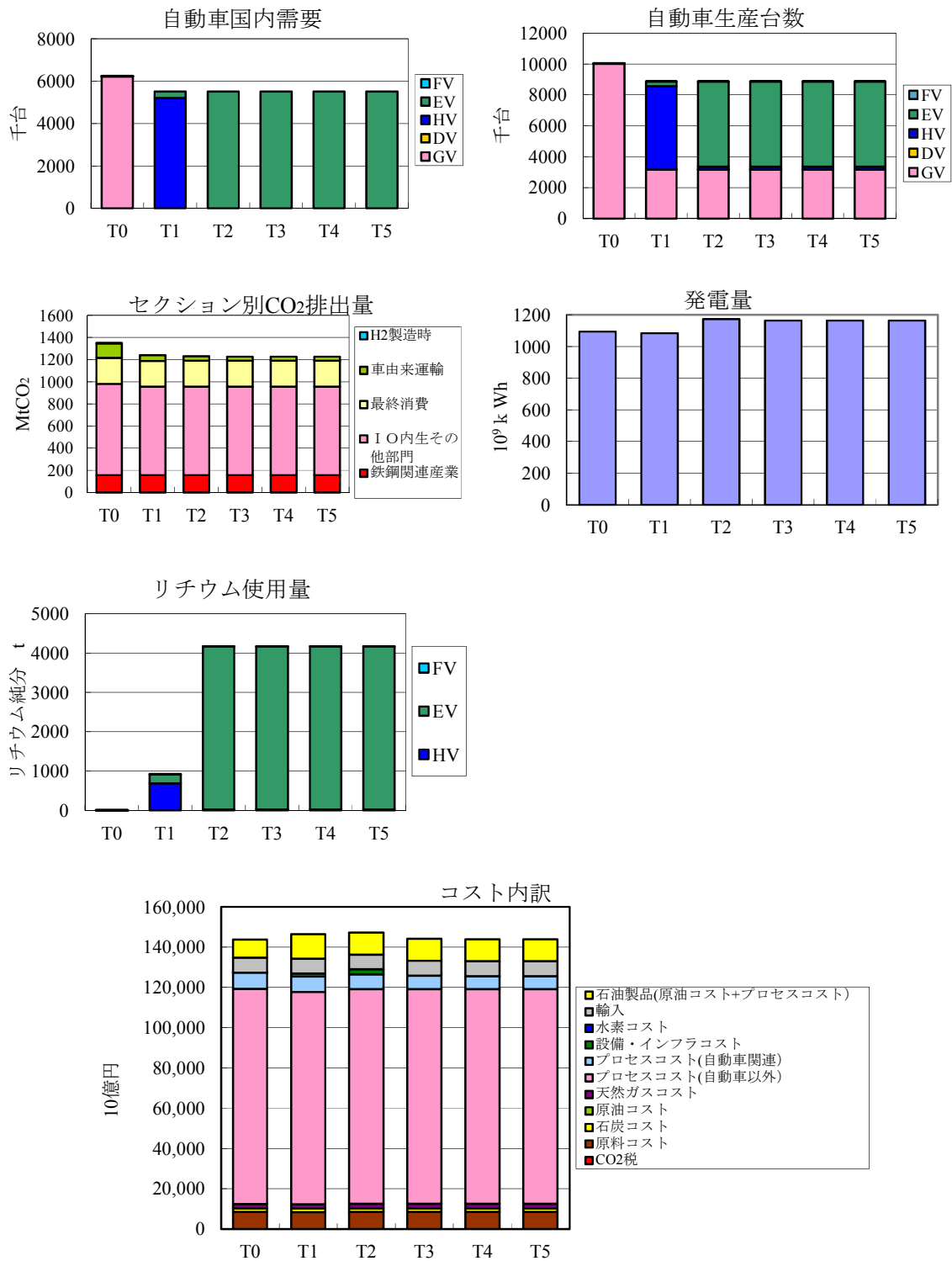


図 4-10 燃費向上シナリオ①の CO₂ 排出量最小化の分析結果

3) 燃費向上シナリオ②

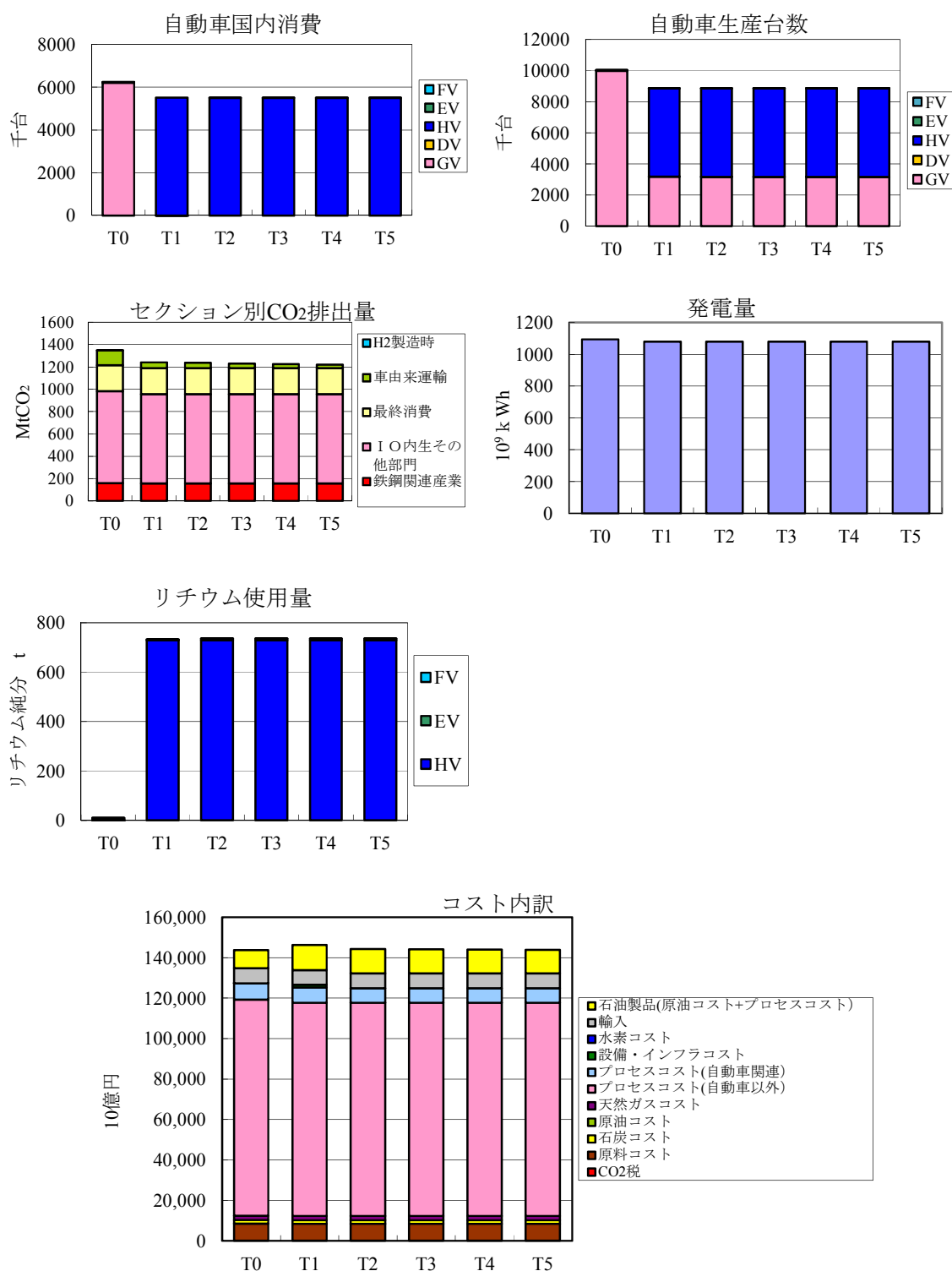


図 4-11 燃費向上シナリオ②のコスト最小化の分析結果

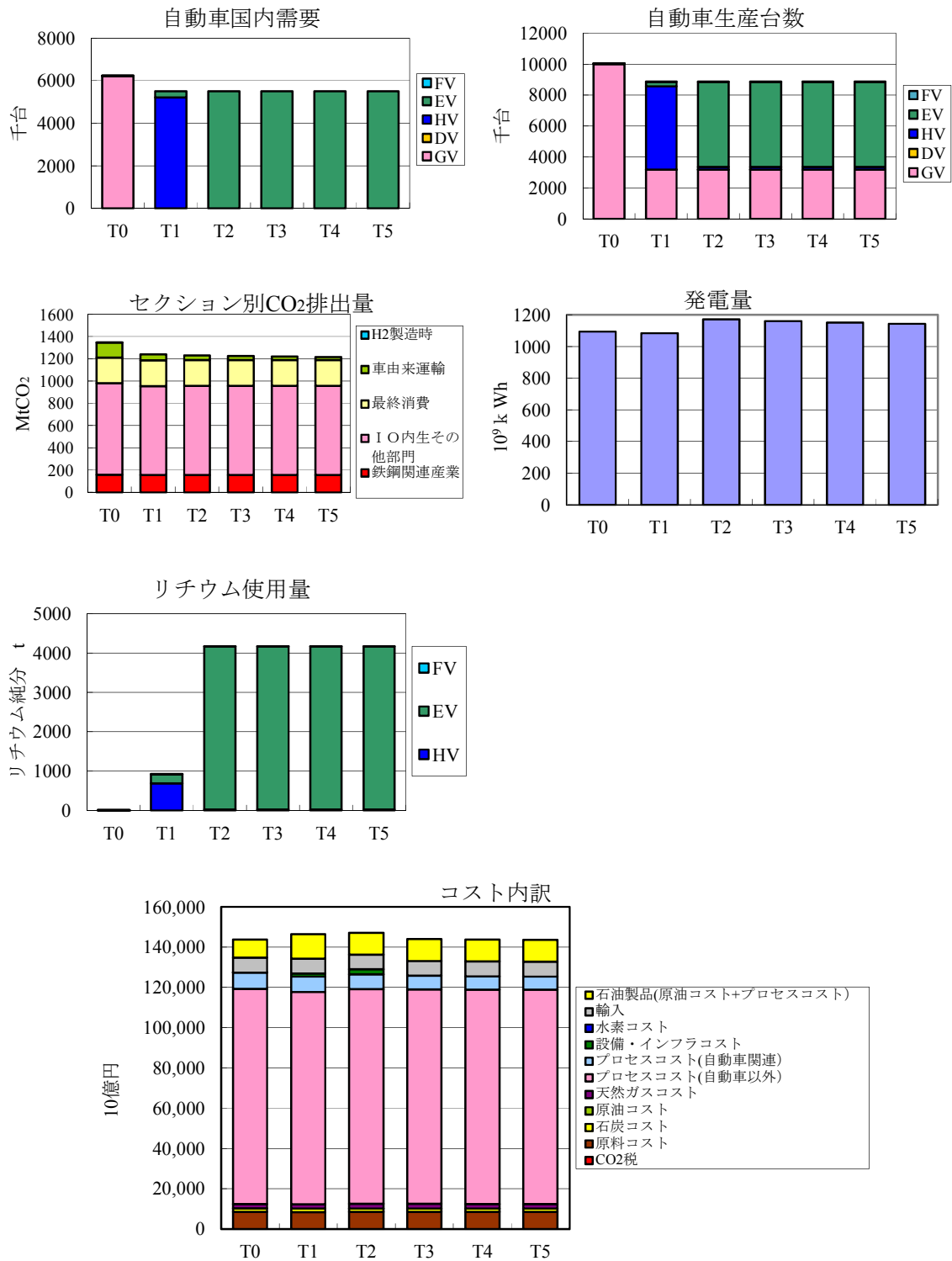


図 4-12 燃費向上シナリオ②の CO₂ 最小化の分析結果

4) 燃費向上シナリオ③

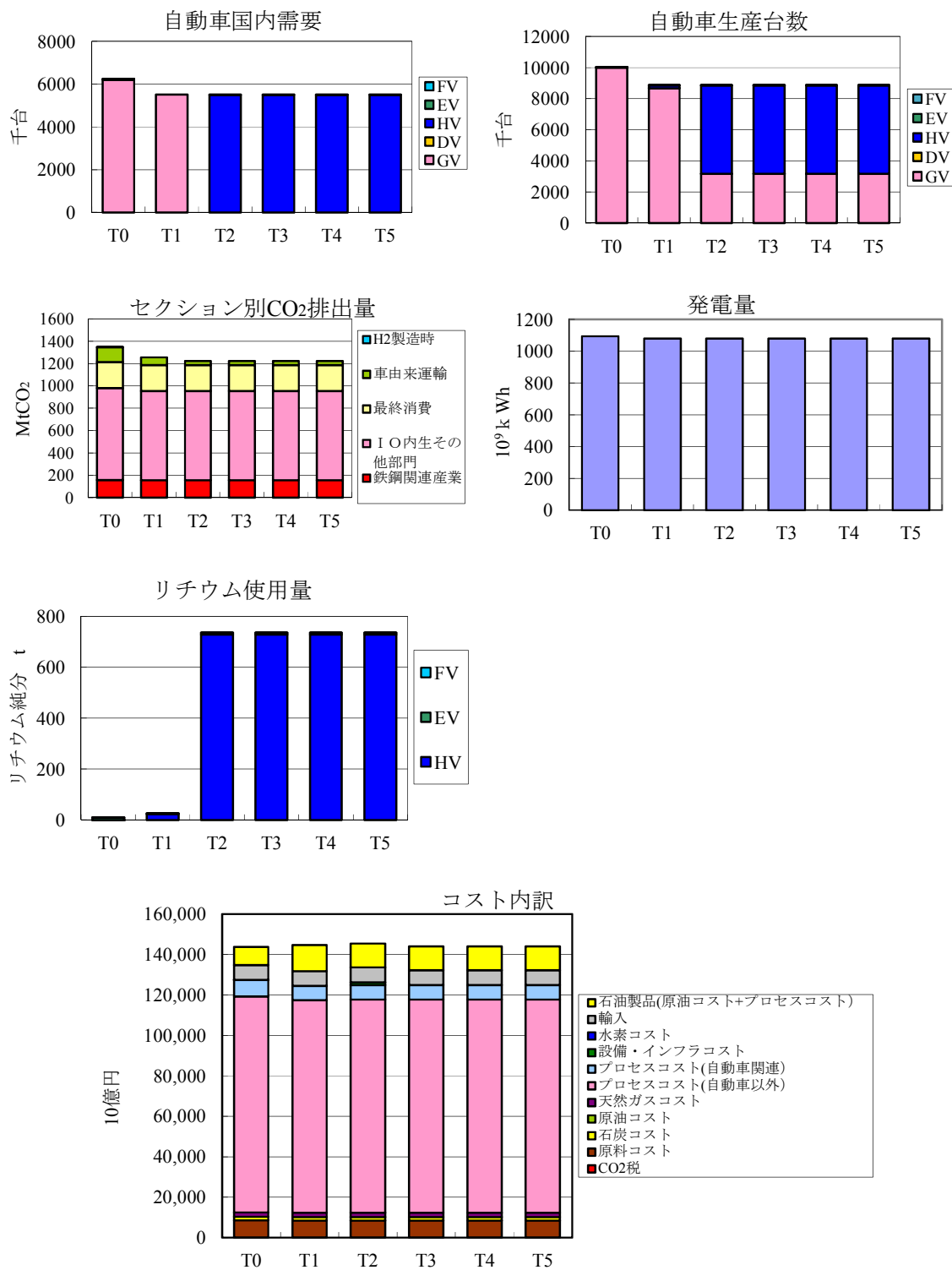


図 4-13 燃費向上シナリオ③のコスト最小化の分析結果

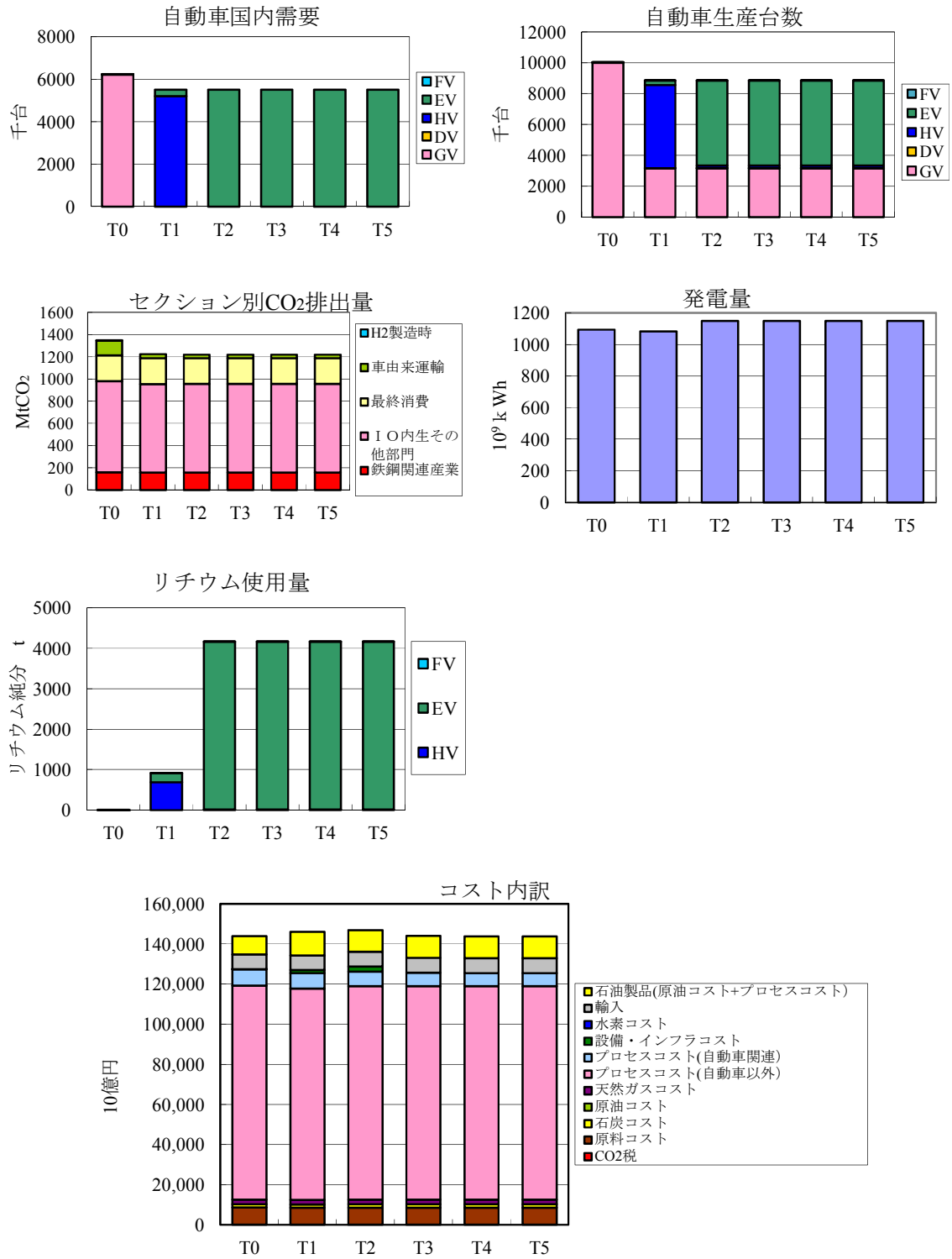


図 4-14 燃費向上シナリオ③の CO₂ 最小化の分析結果

5) 燃費向上シナリオ④

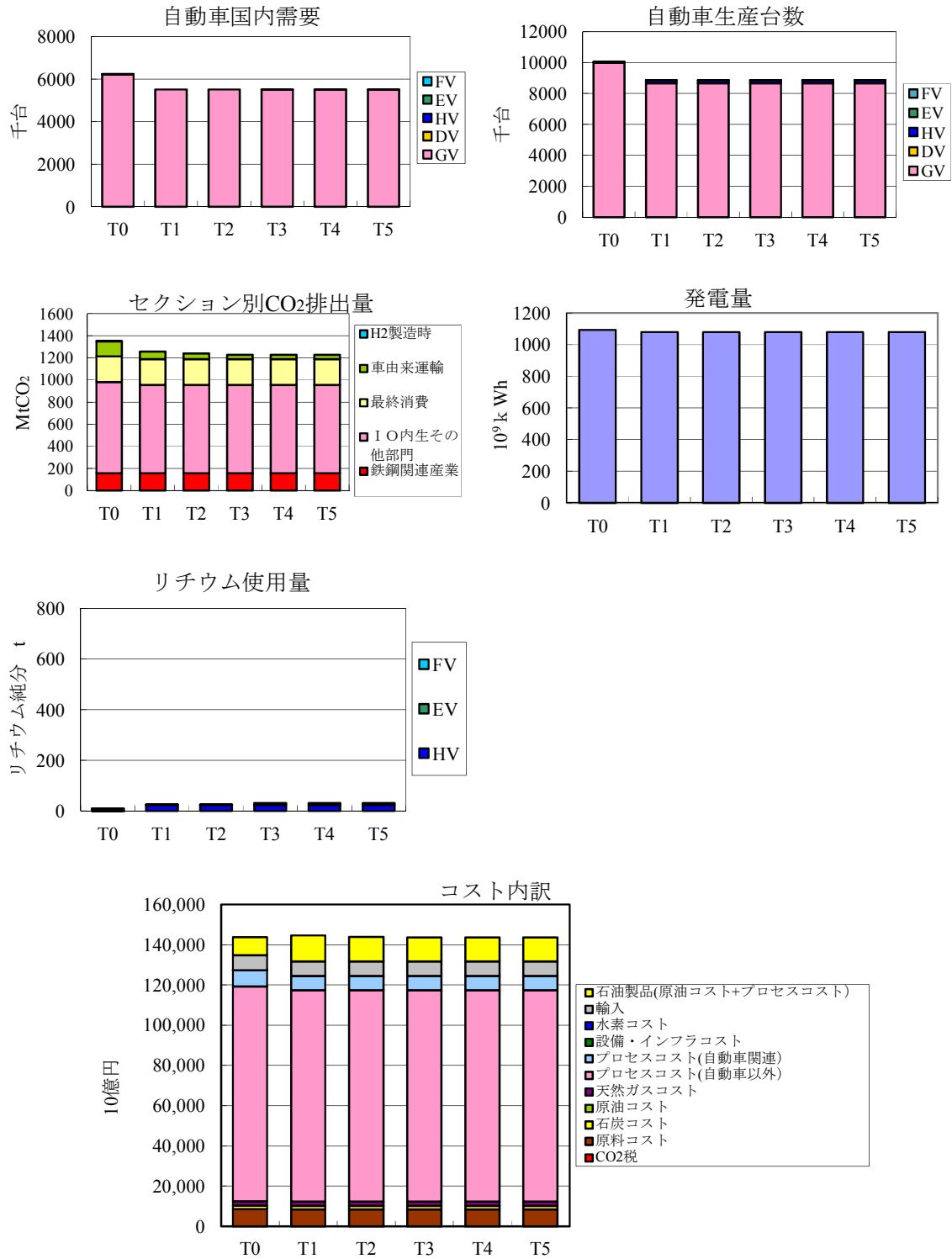


図 4-15 燃費向上シナリオ④のコスト最小化の分析結果

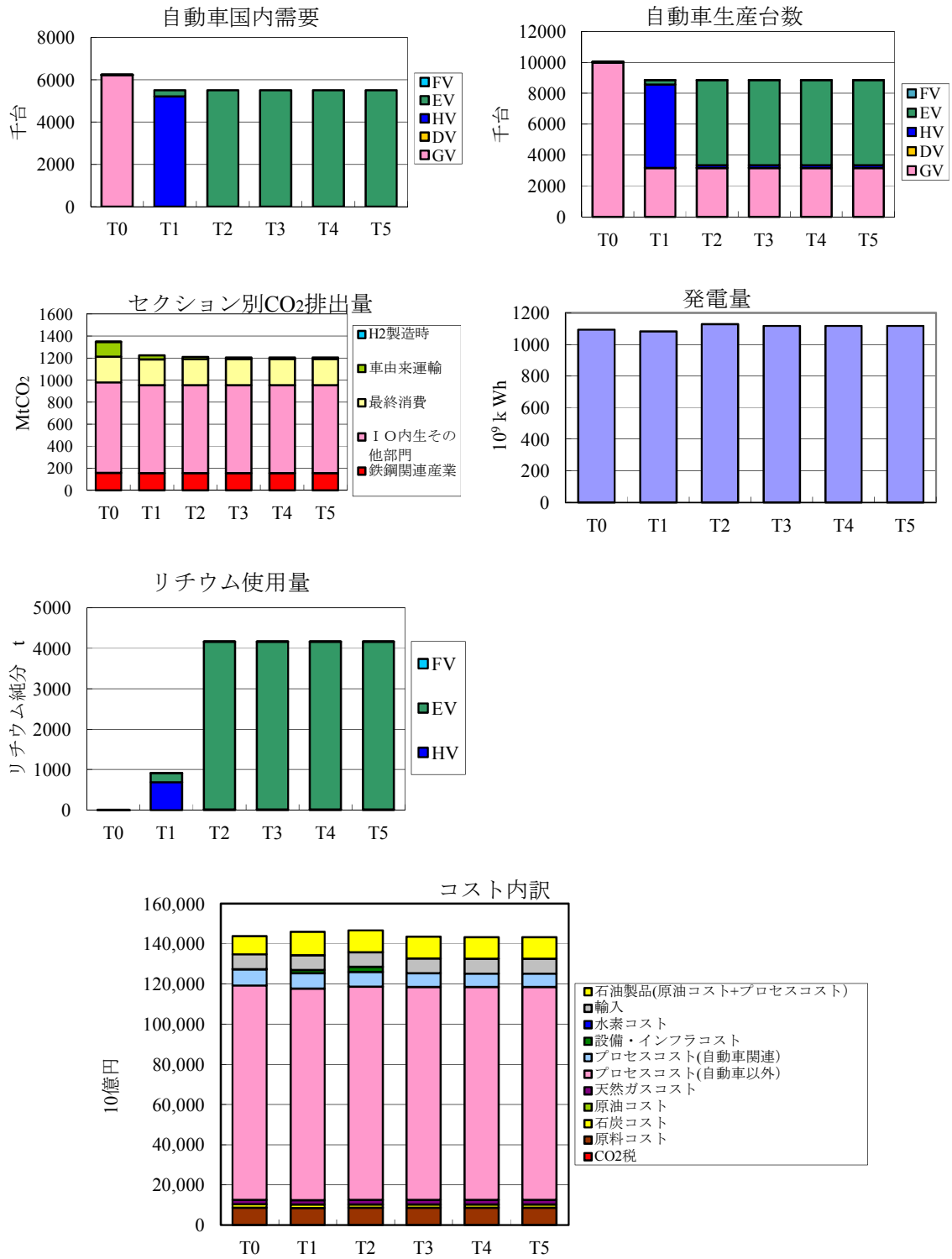


図 4-16 燃費向上シナリオ④の CO₂ 最小化の分析結果

6) 燃費向上シナリオ⑤

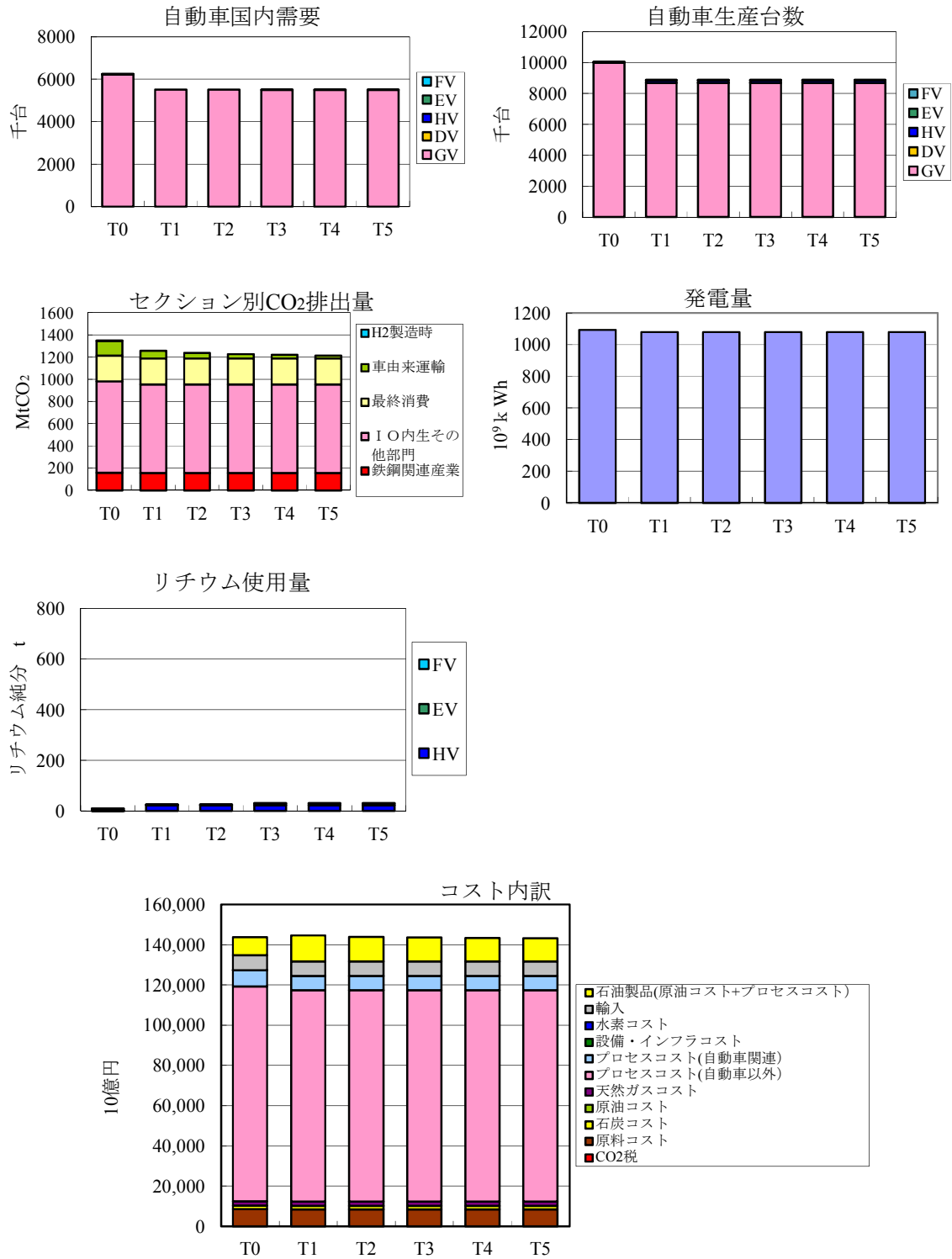


図 4-17 燃費向上シナリオ⑤のコスト最小化の分析結果

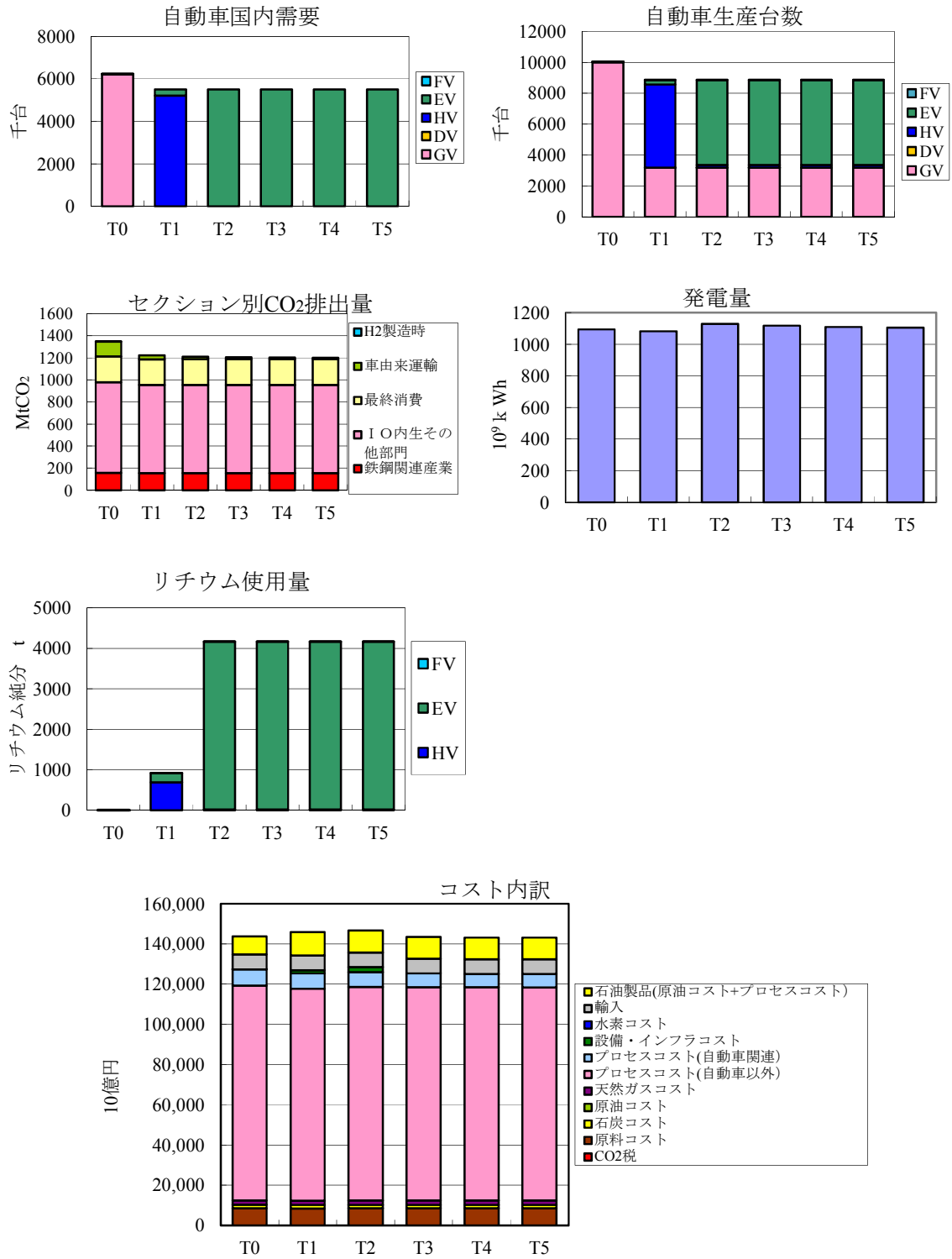


図 4-18 燃費向上シナリオ⑤の CO₂ 最小化の分析結果

7) 原油価格変動シナリオ①

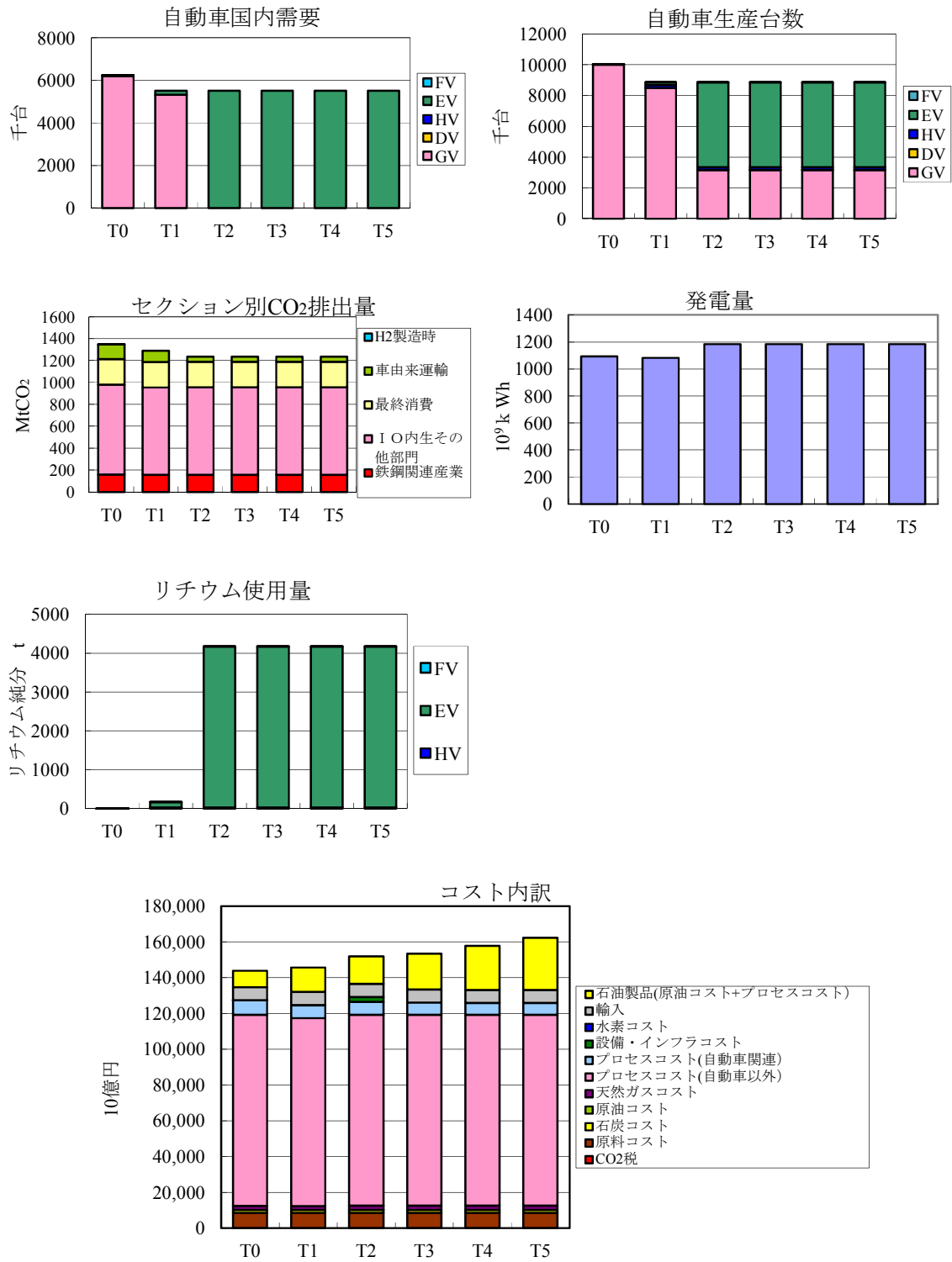


図 4-19 原油価格変動シナリオ①のコスト最小化の分析結果

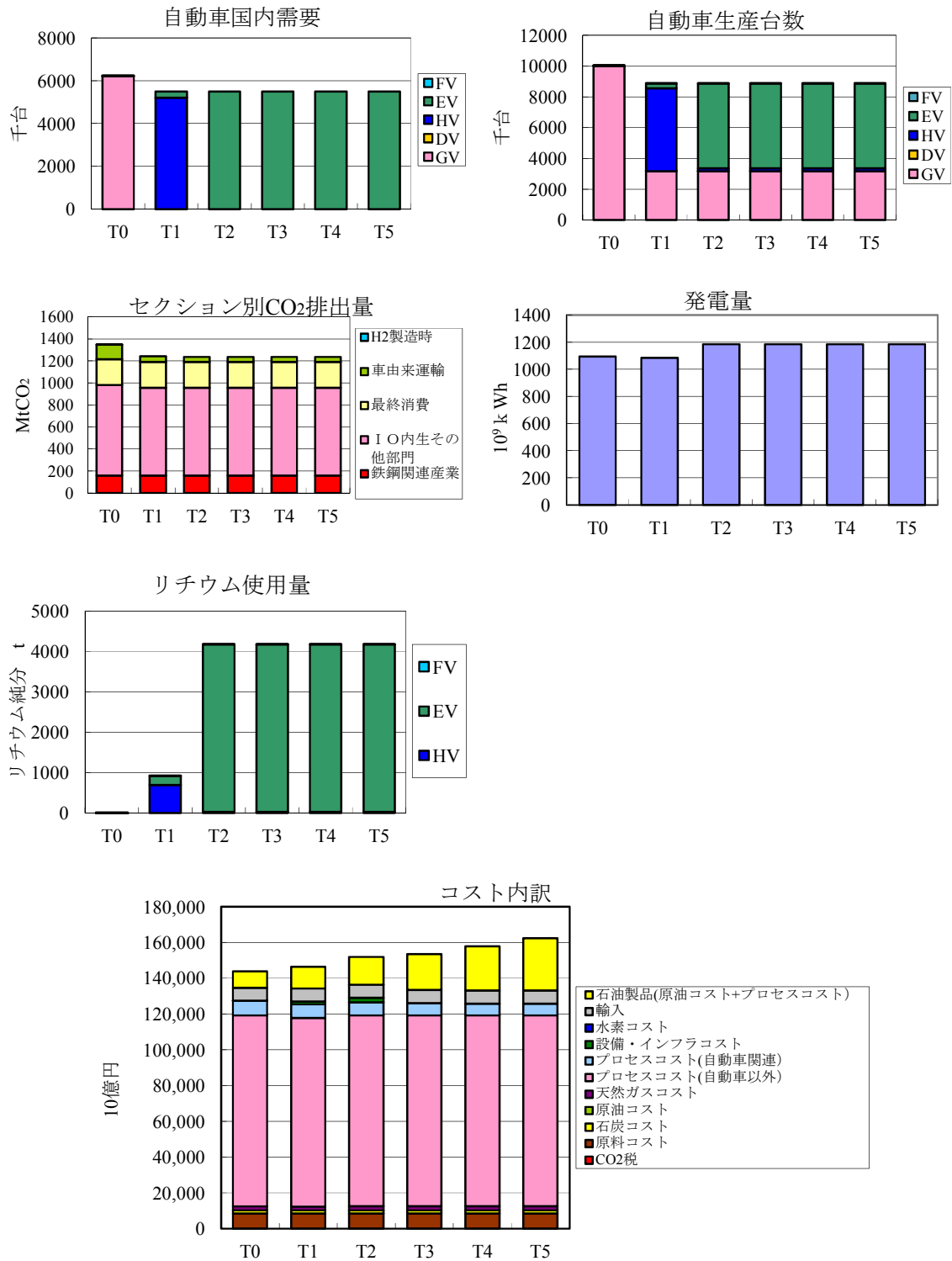


図 4-20 原油価格変動シナリオ①の CO₂ 最小化の分析結果

8) 原油価格変動シナリオ②

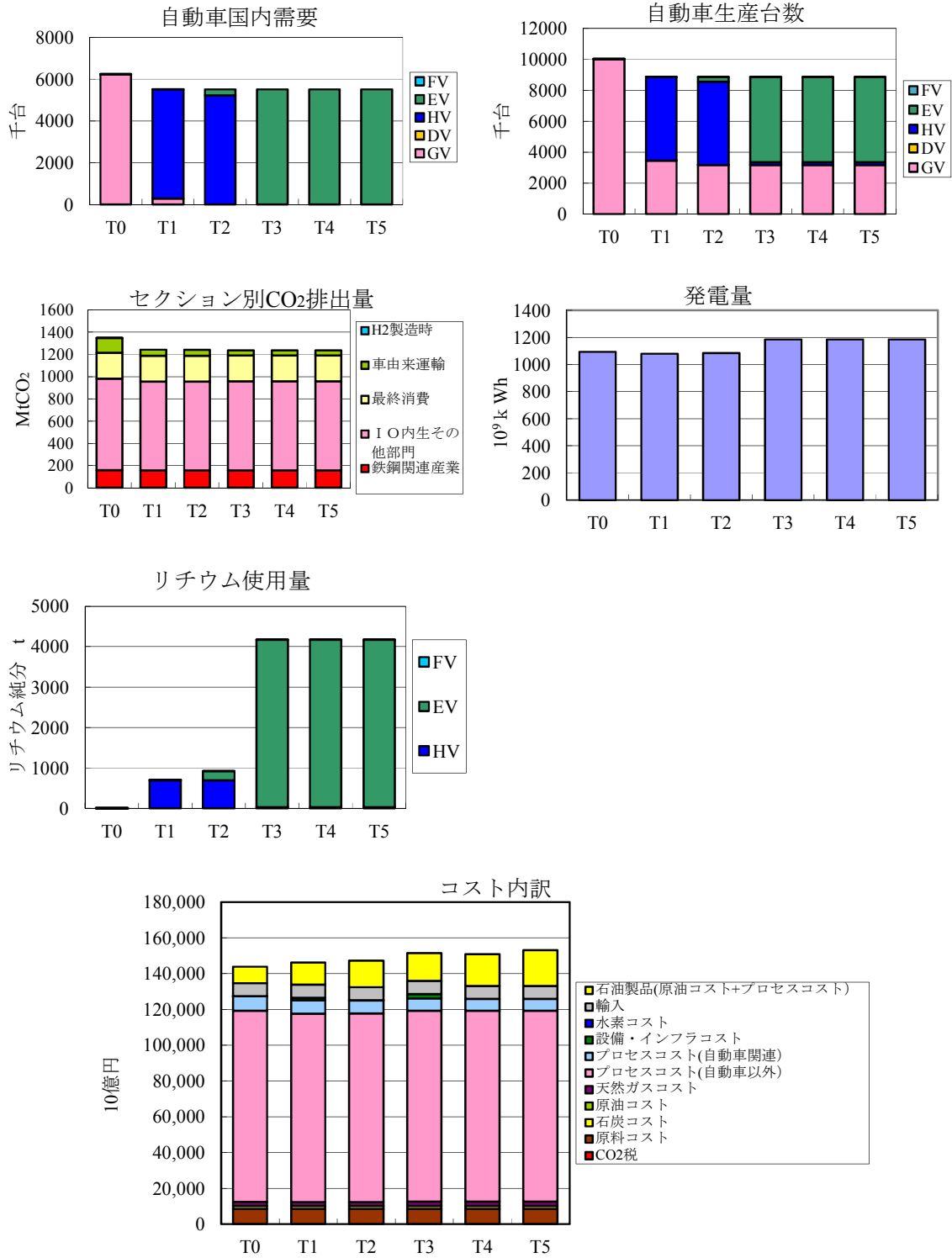


図 4-21 原油価格変動シナリオ②のコスト最小化の分析結果

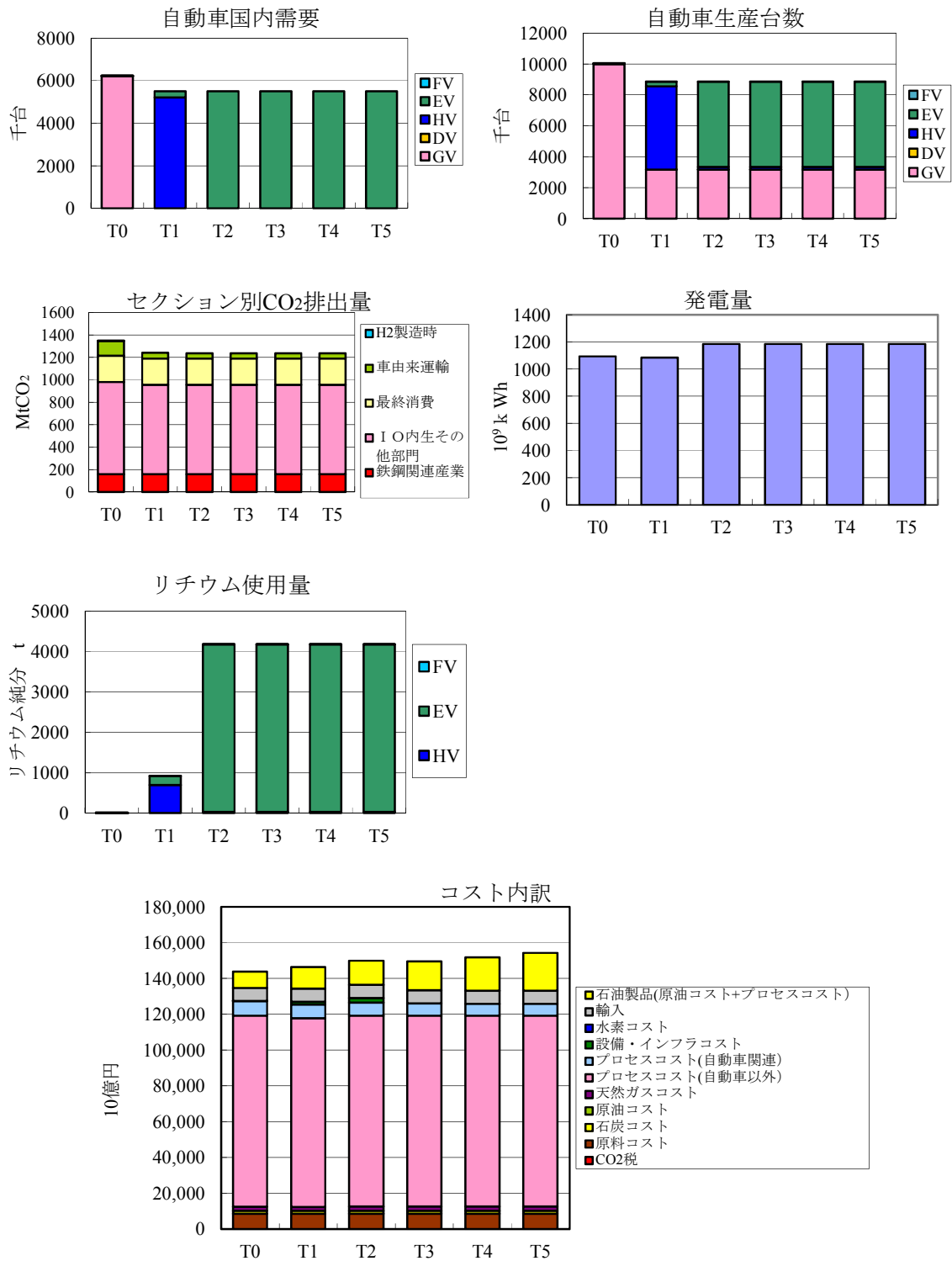


図 4-22 原油価格変動シナリオ②の CO₂ 最小化の分析結果

9) 原油価格変動シナリオ③

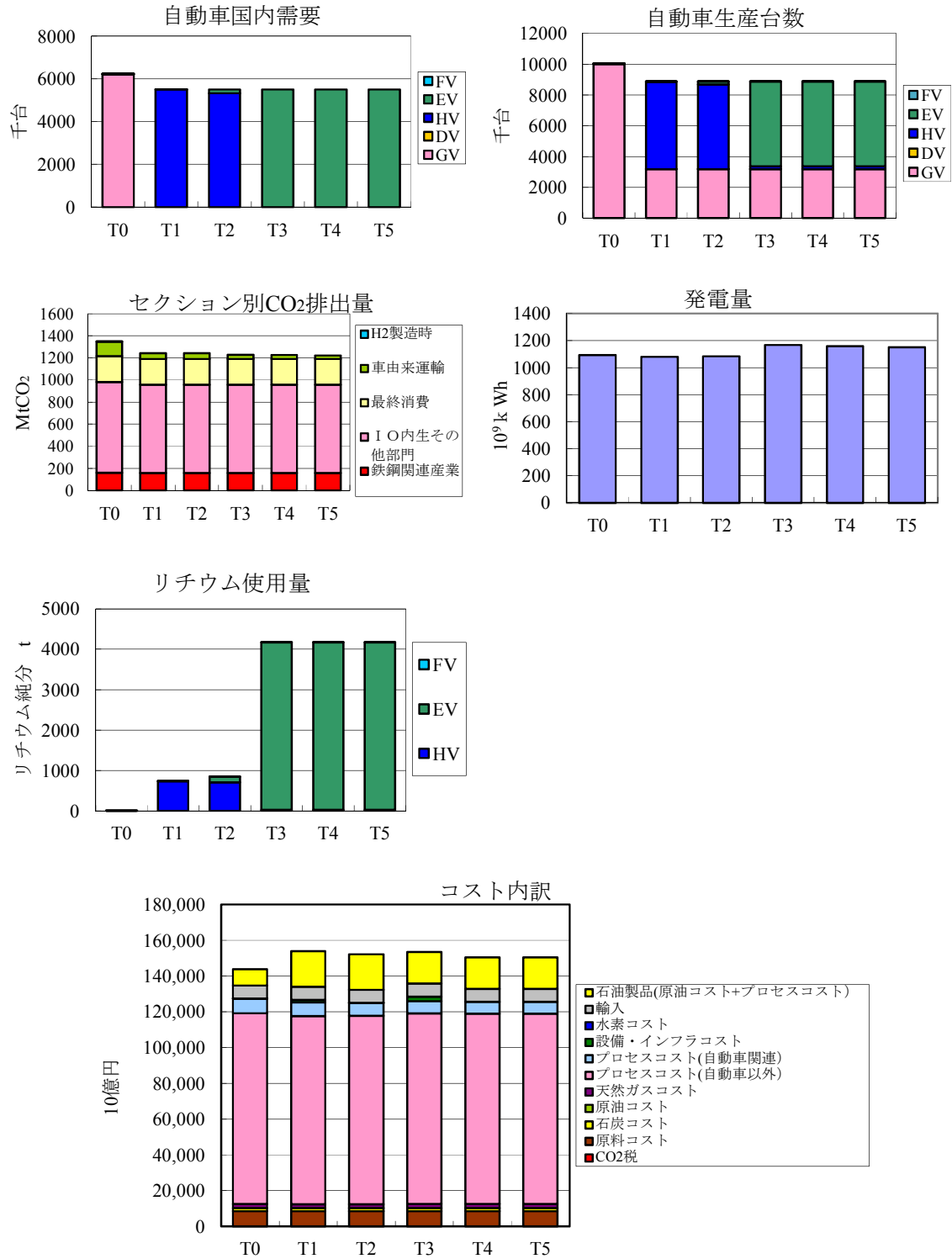


図 4-23 原油価格変動シナリオ③のコスト最小化の分析結果

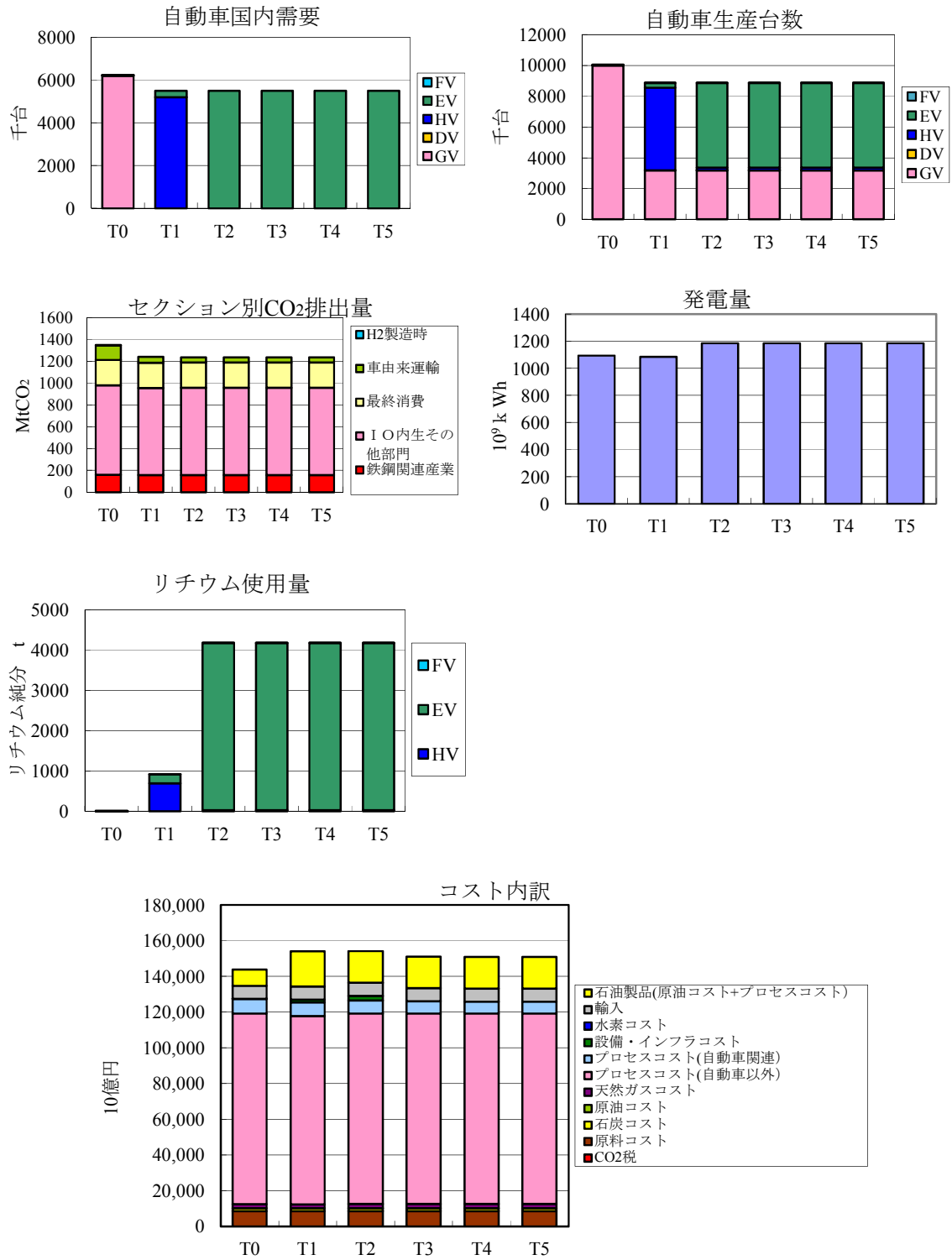


図 4-24 原油価格変動シナリオ③の CO₂ 最小化の分析結果

10) 原油価格変動シナリオ④

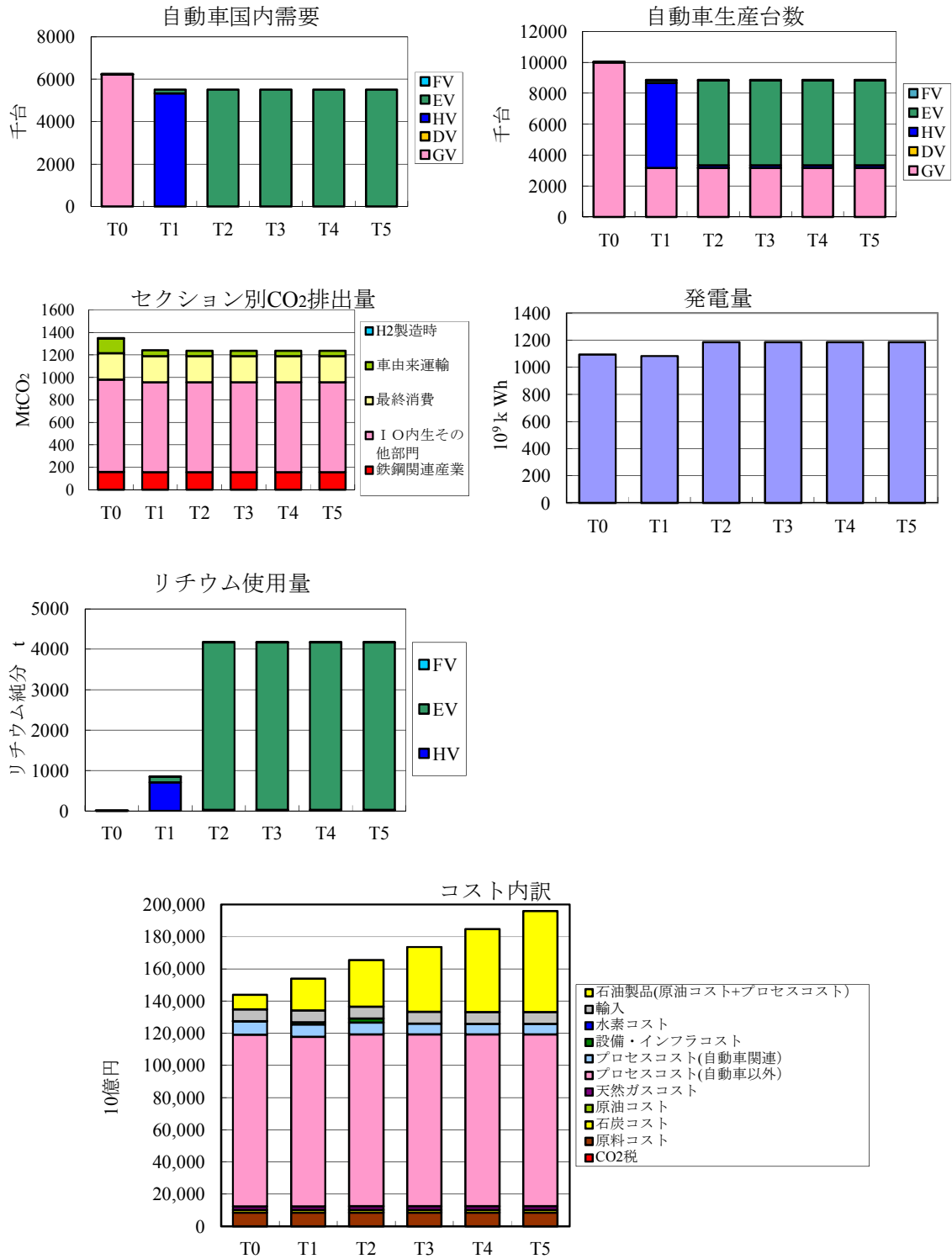


図 4-25 原油価格変動シナリオ④のコスト最小化の分析結果

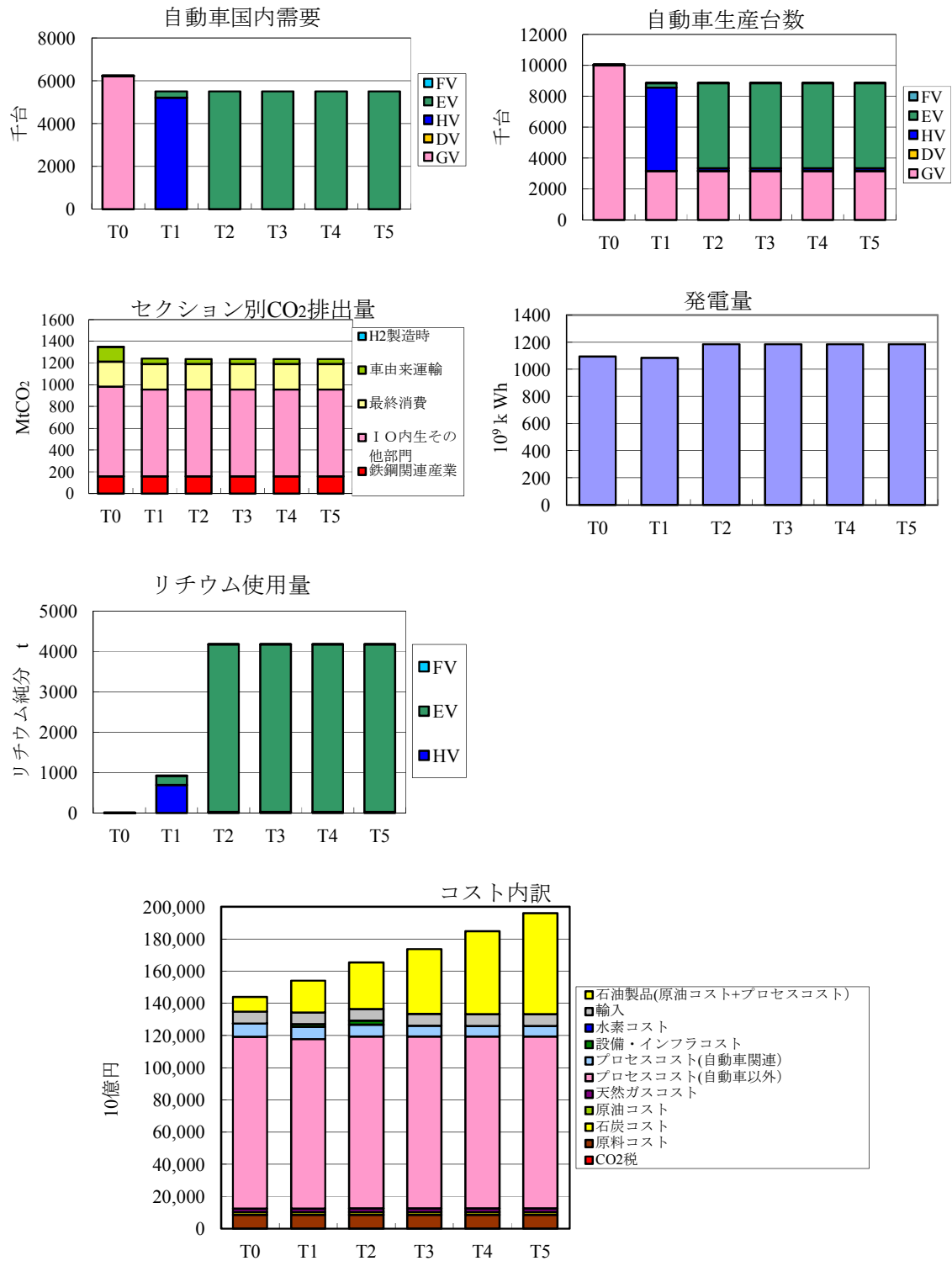


図 4-26 原油価格変動シナリオ④の CO₂ 最小化の分析結果

11) 原油価格変動シナリオ⑤

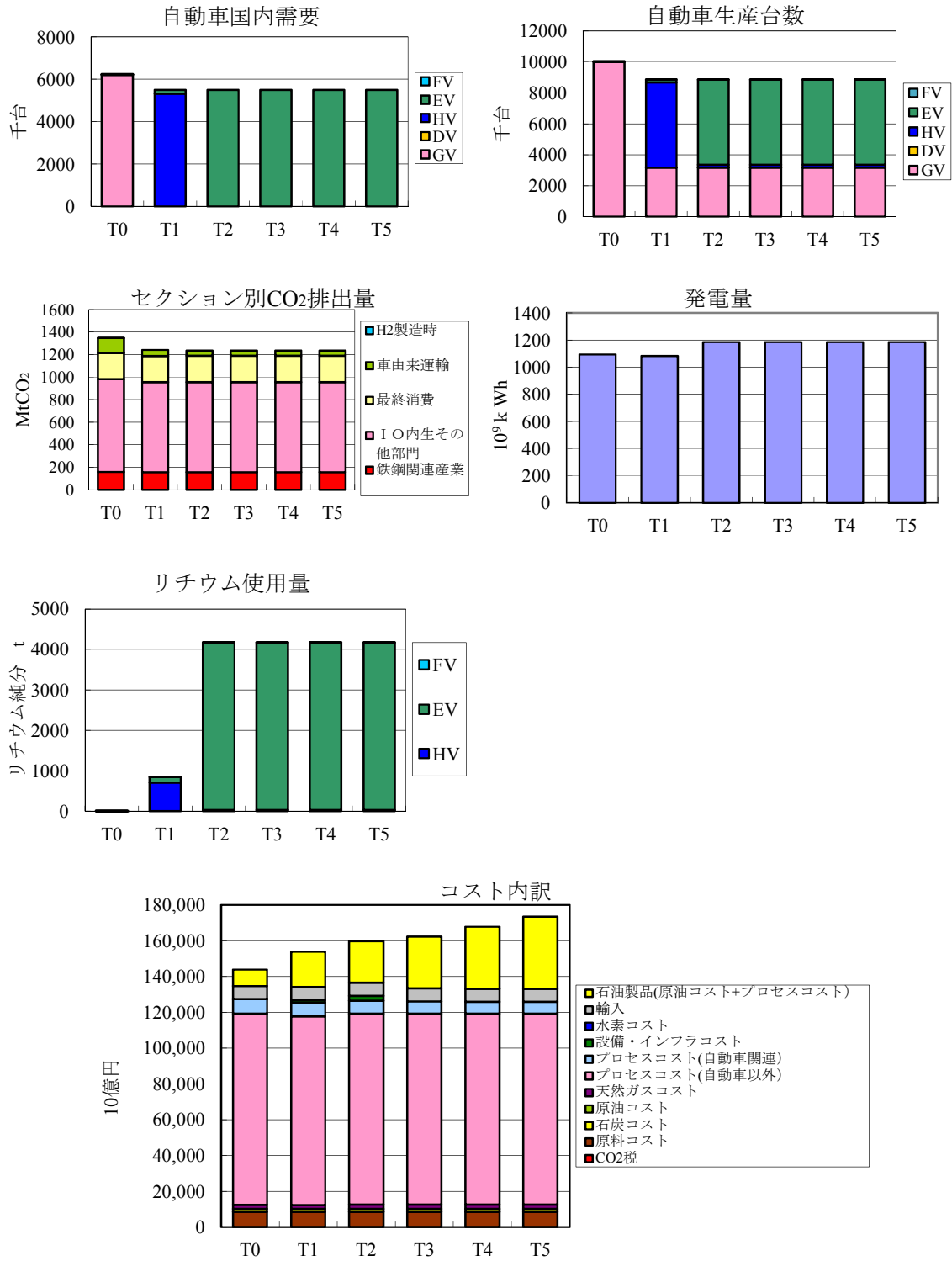


図 4-27 原油価格変動シナリオ⑤のコスト最小化の分析結果

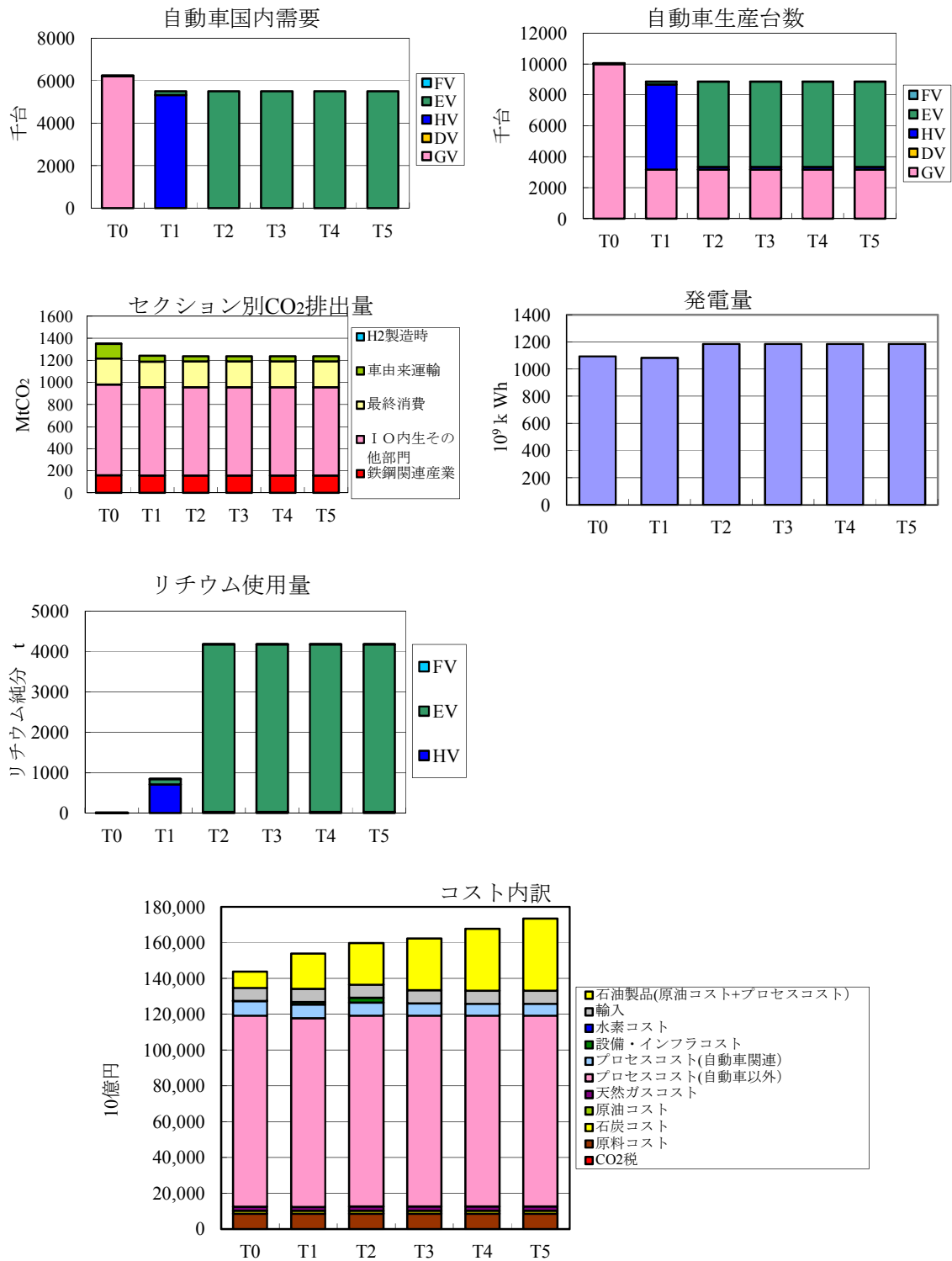


図 4-28 原油価格変動シナリオ⑤の CO₂ 最小化の分析結果

12) 原油価格変動シナリオ⑥

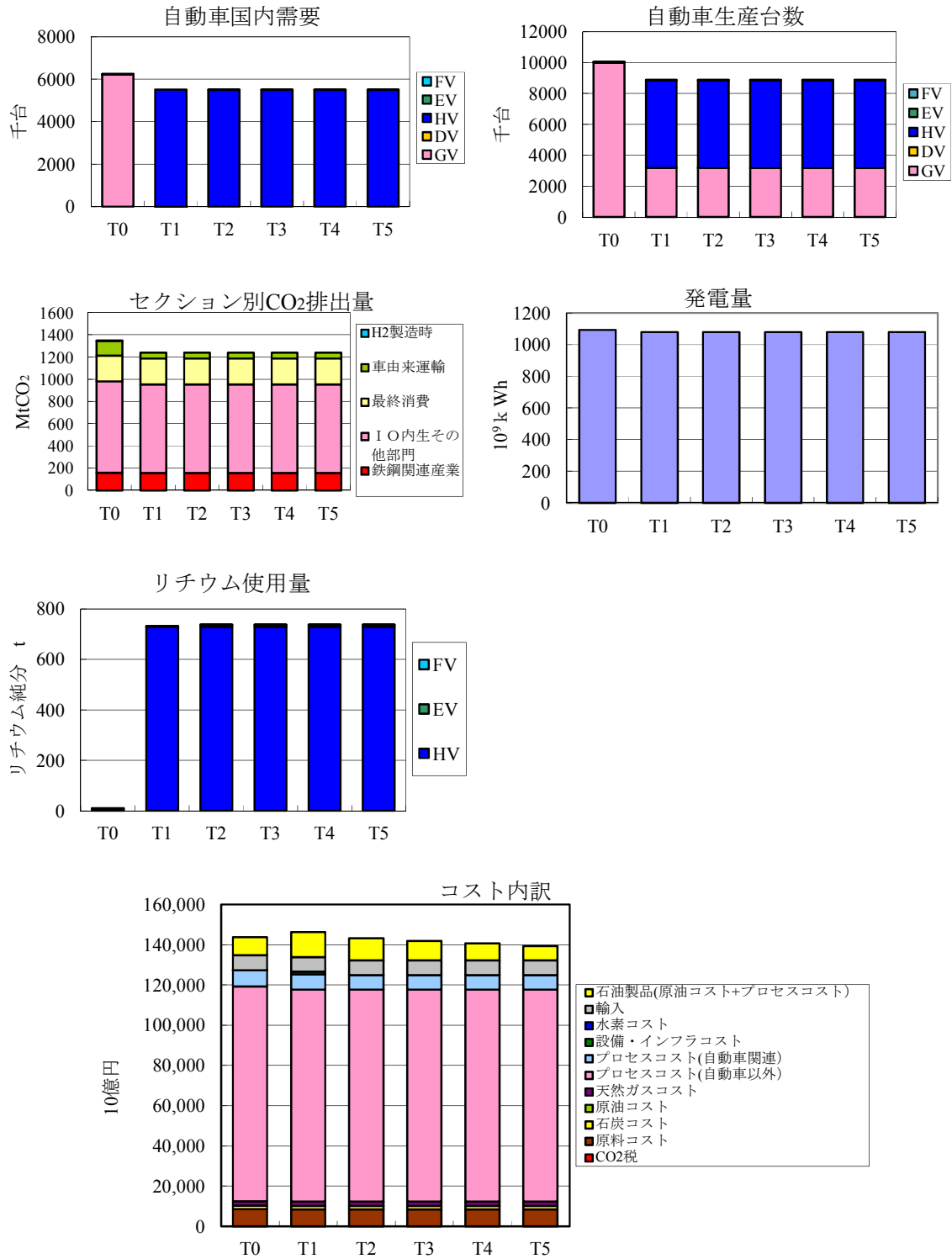


図 4-29 原油価格変動シナリオ⑥のコスト最小化の分析結果

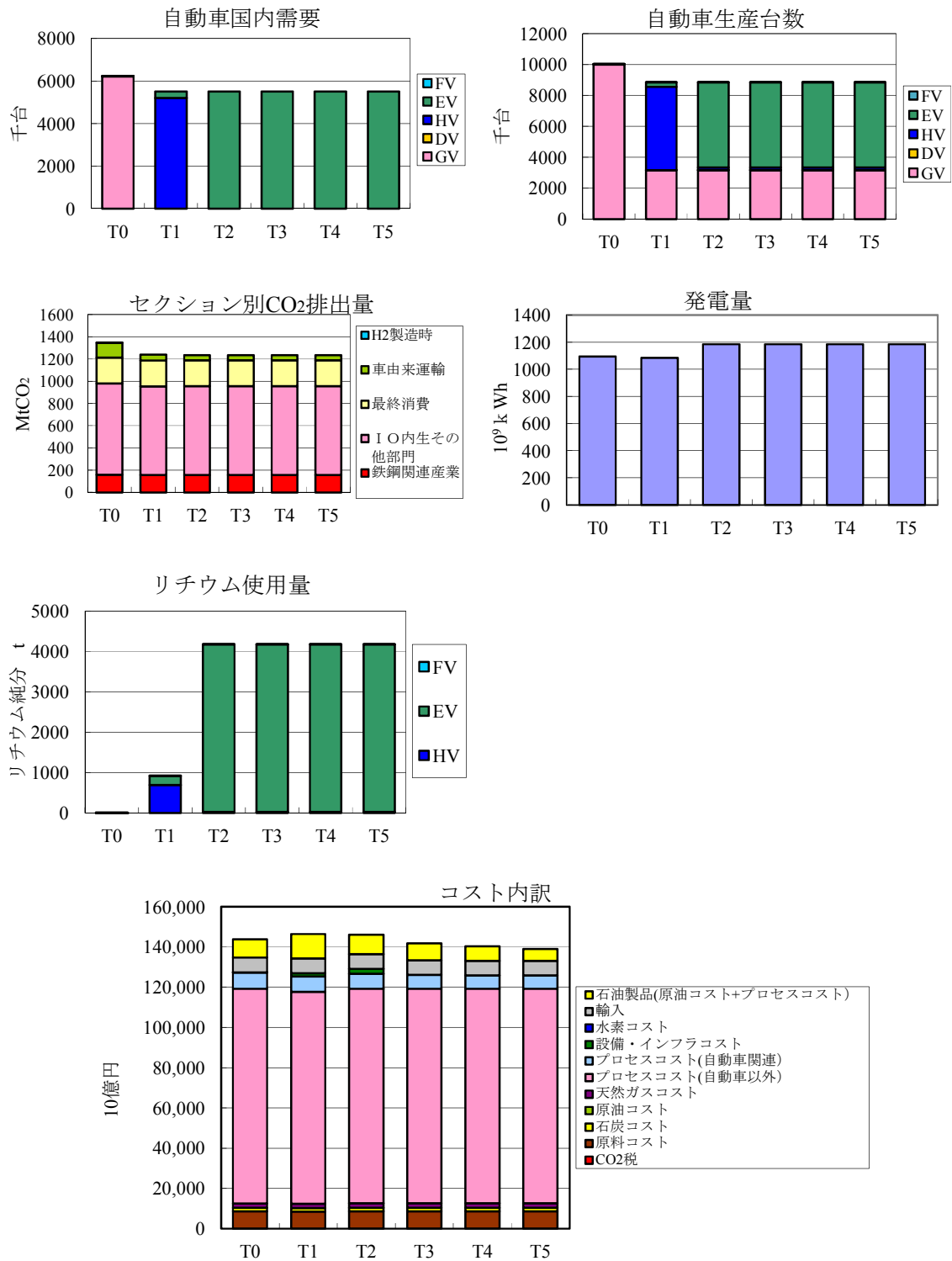


図 4-30 原油価格変動シナリオ⑥の CO₂ 最小化の分析結果

13) 需要量変動シナリオ①

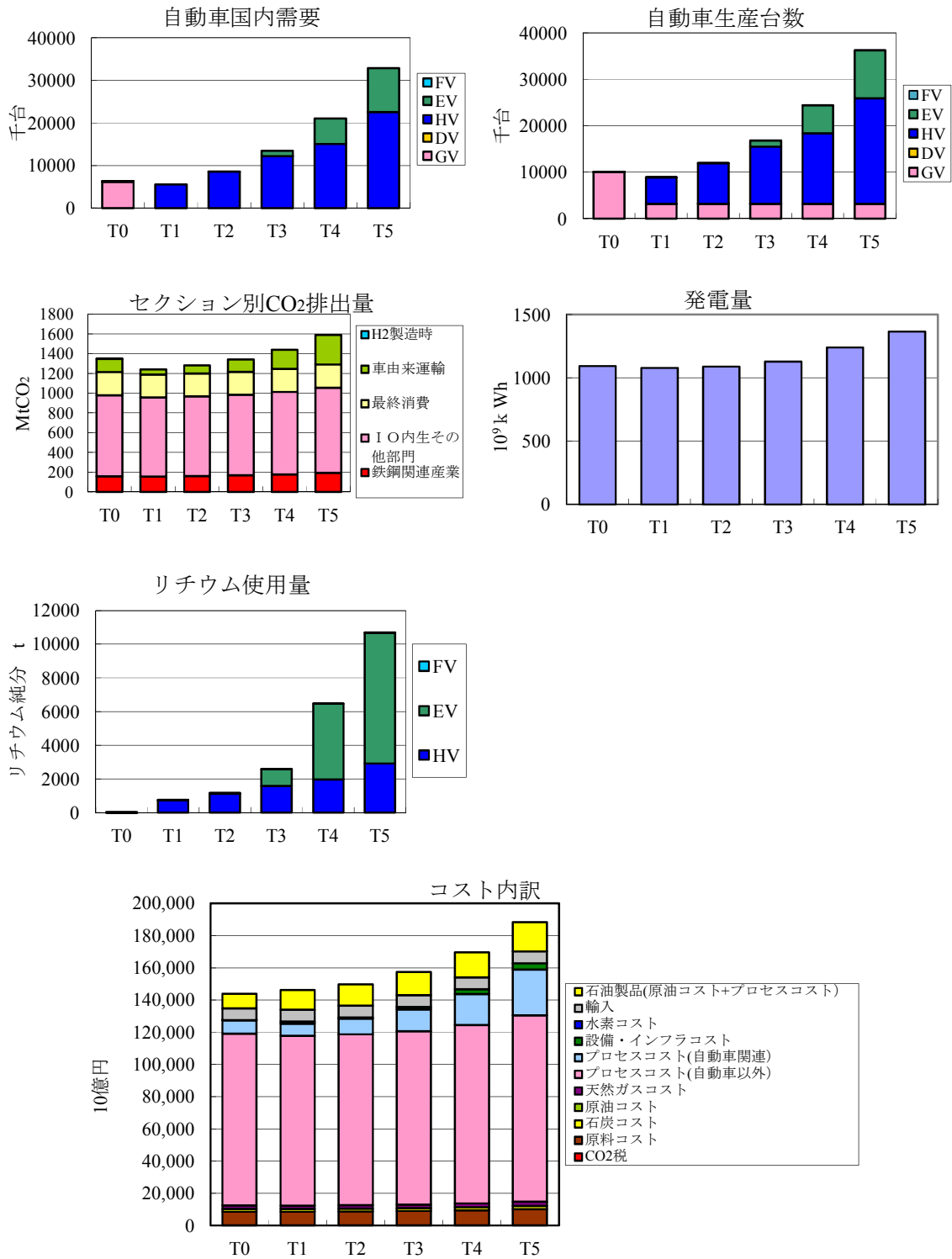


図 4-31 需要量変動シナリオ①のコスト最小化の分析結果

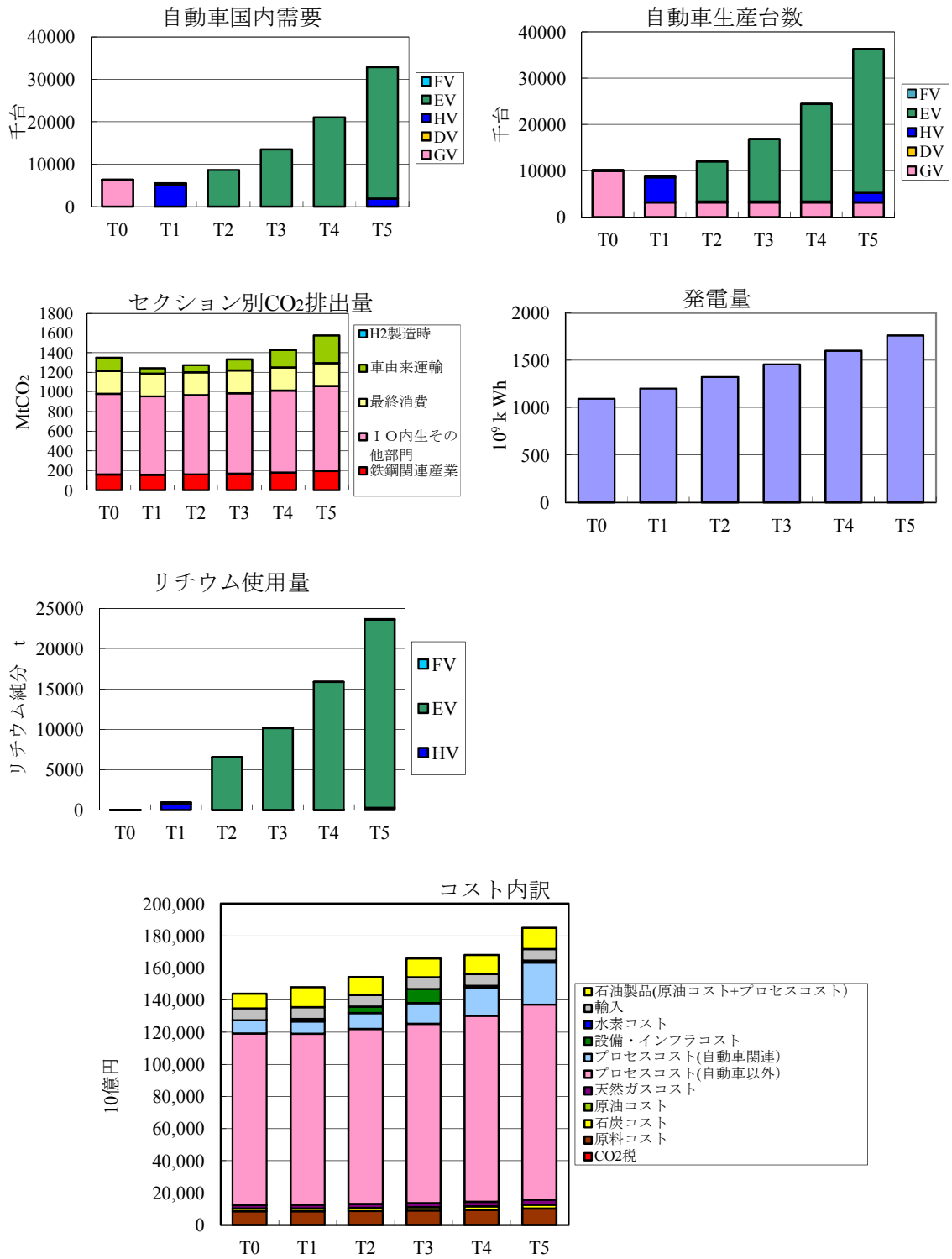


図 4-32 需要量変動シナリオ①の CO₂ 最小化の分析結果

14) 需要量変動シナリオ②

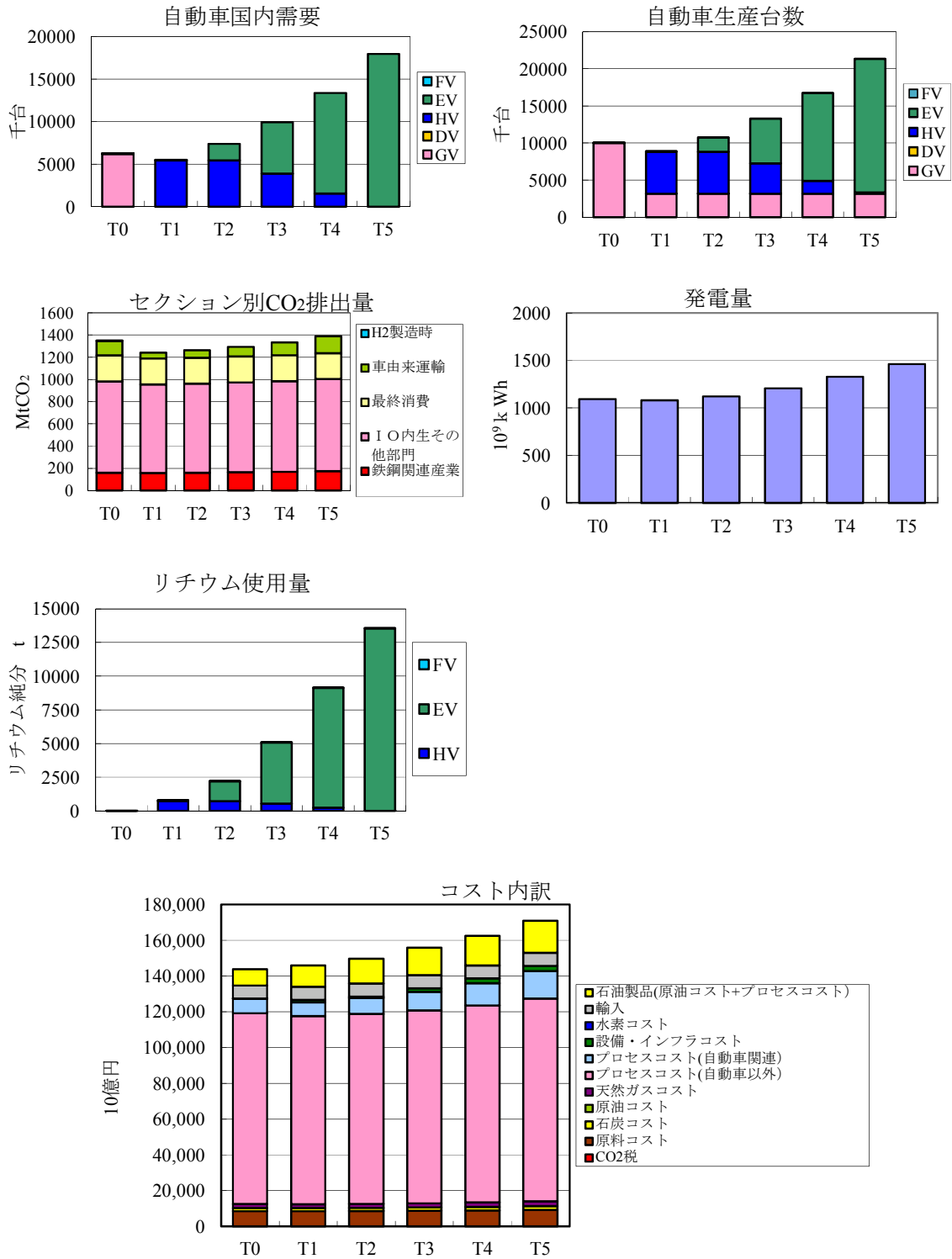


図 4-33 需要量変動シナリオ②のコスト最小化の分析結果

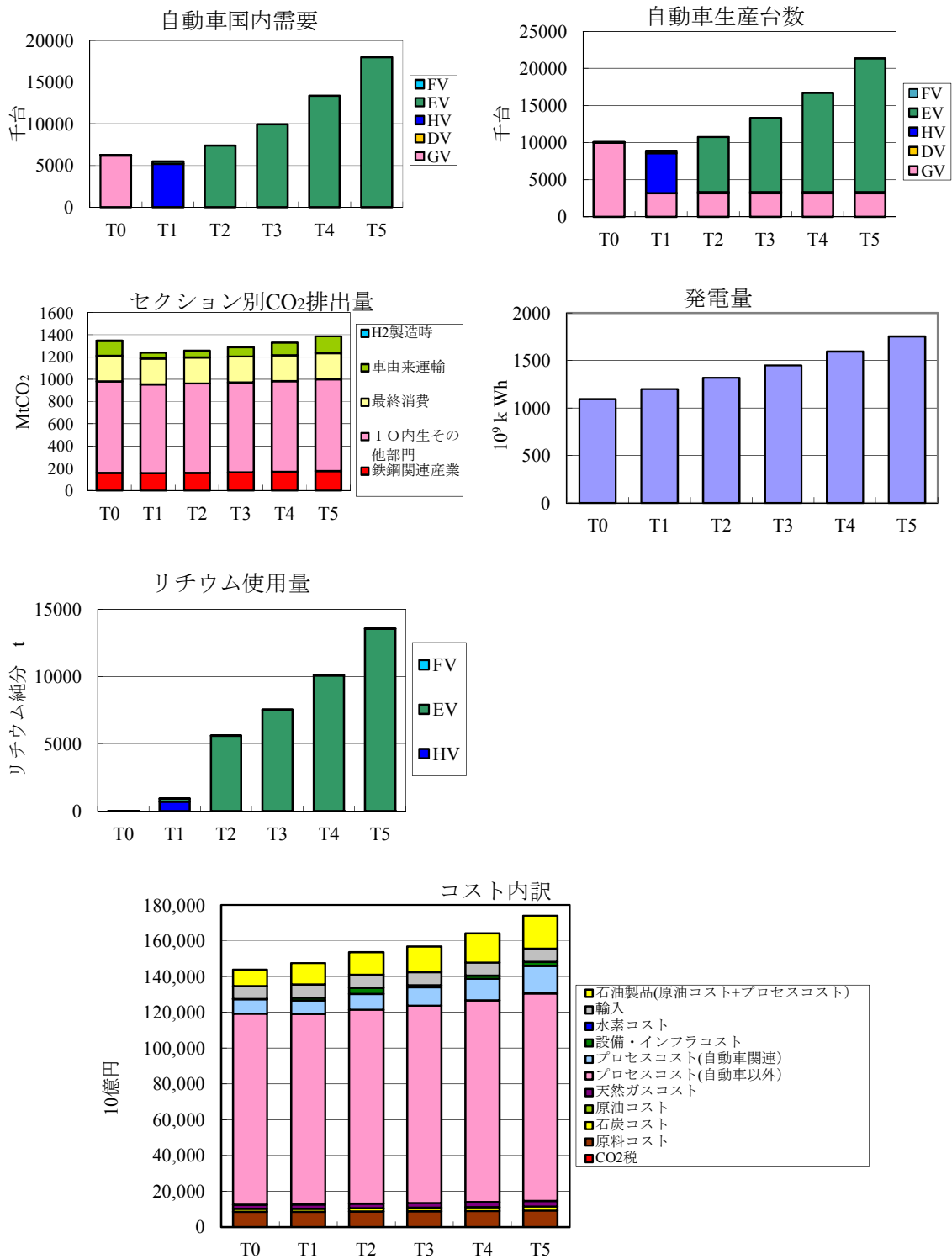


図 4-34 需要量変動シナリオ②の CO₂ 最小化の分析結果

15) 需要量変動シナリオ③

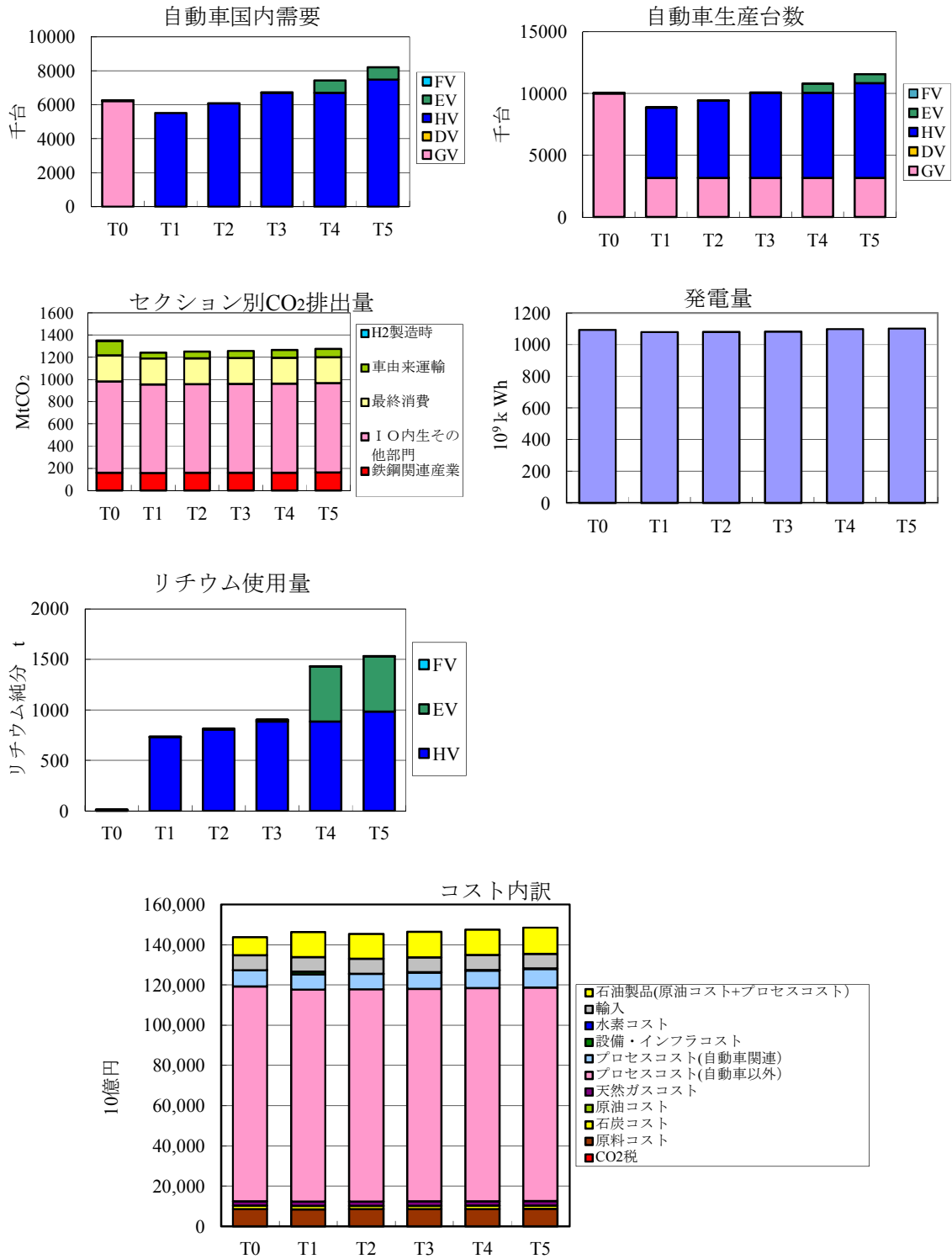


図 4-35 需要量変動シナリオ③のコスト最小化の分析結果

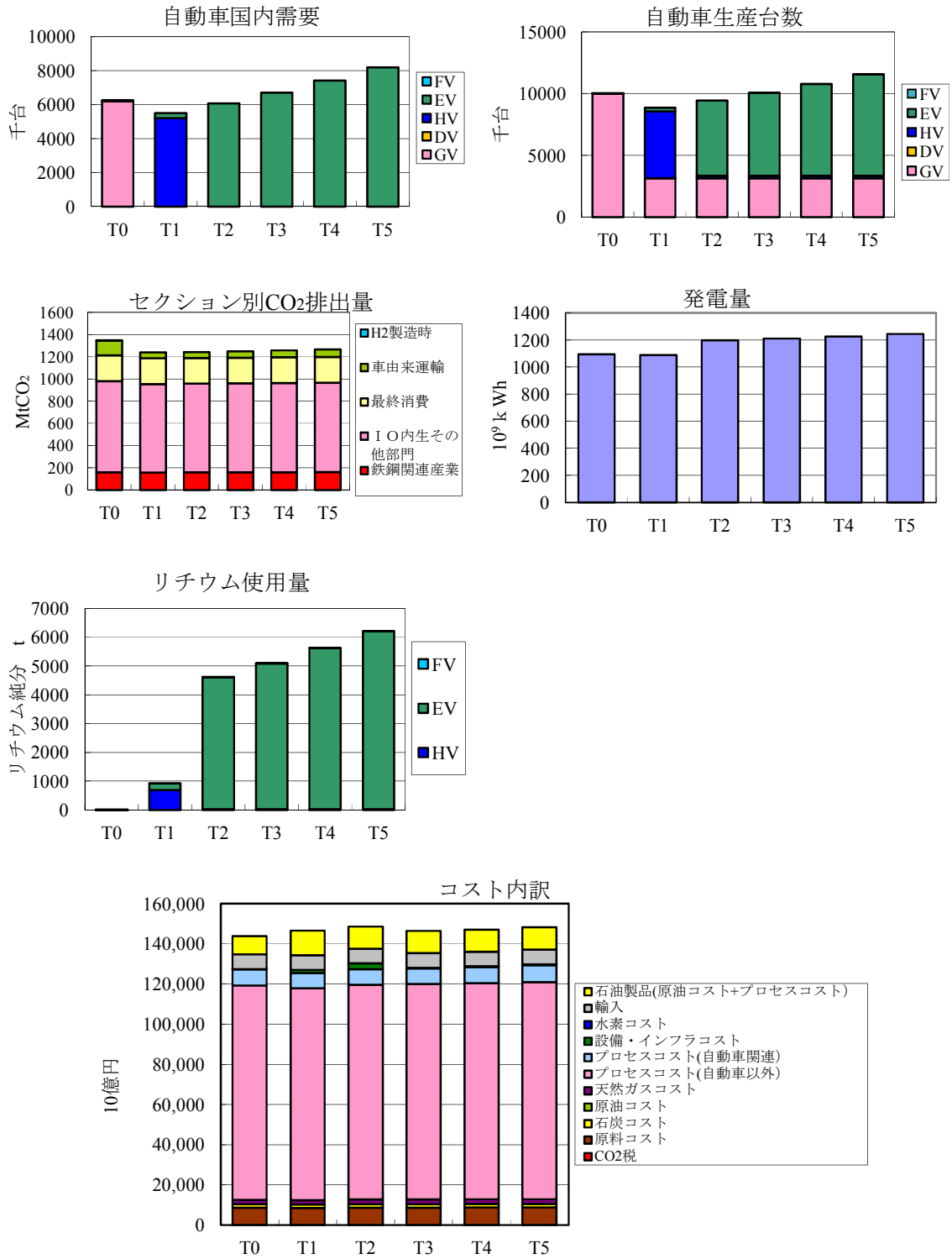


図 4-36 需要量変動シナリオ③の CO₂ 最小化の分析結果

16) 需要量変動シナリオ④

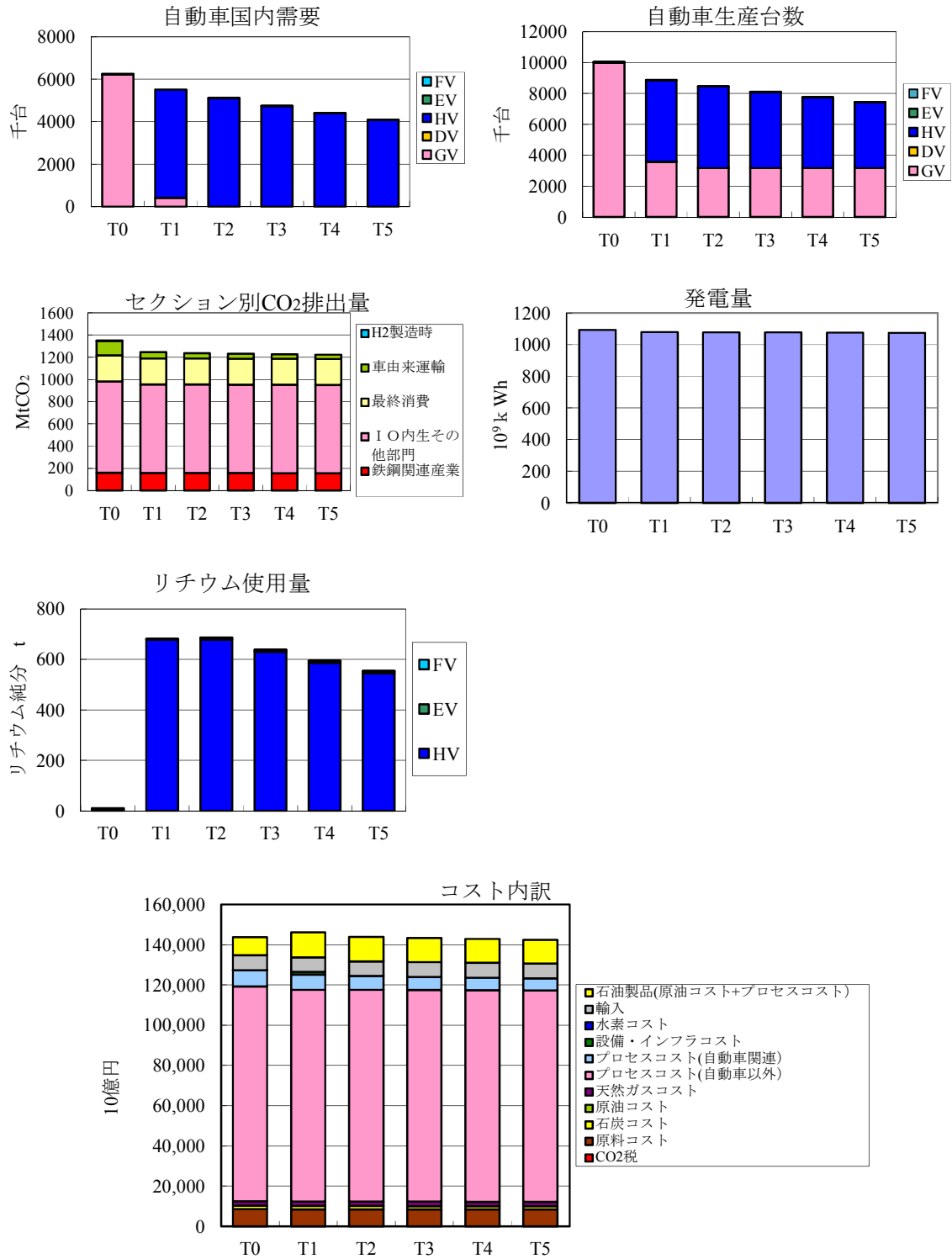


図 4-37 需要量変動シナリオ④のコスト最小化の分析結果

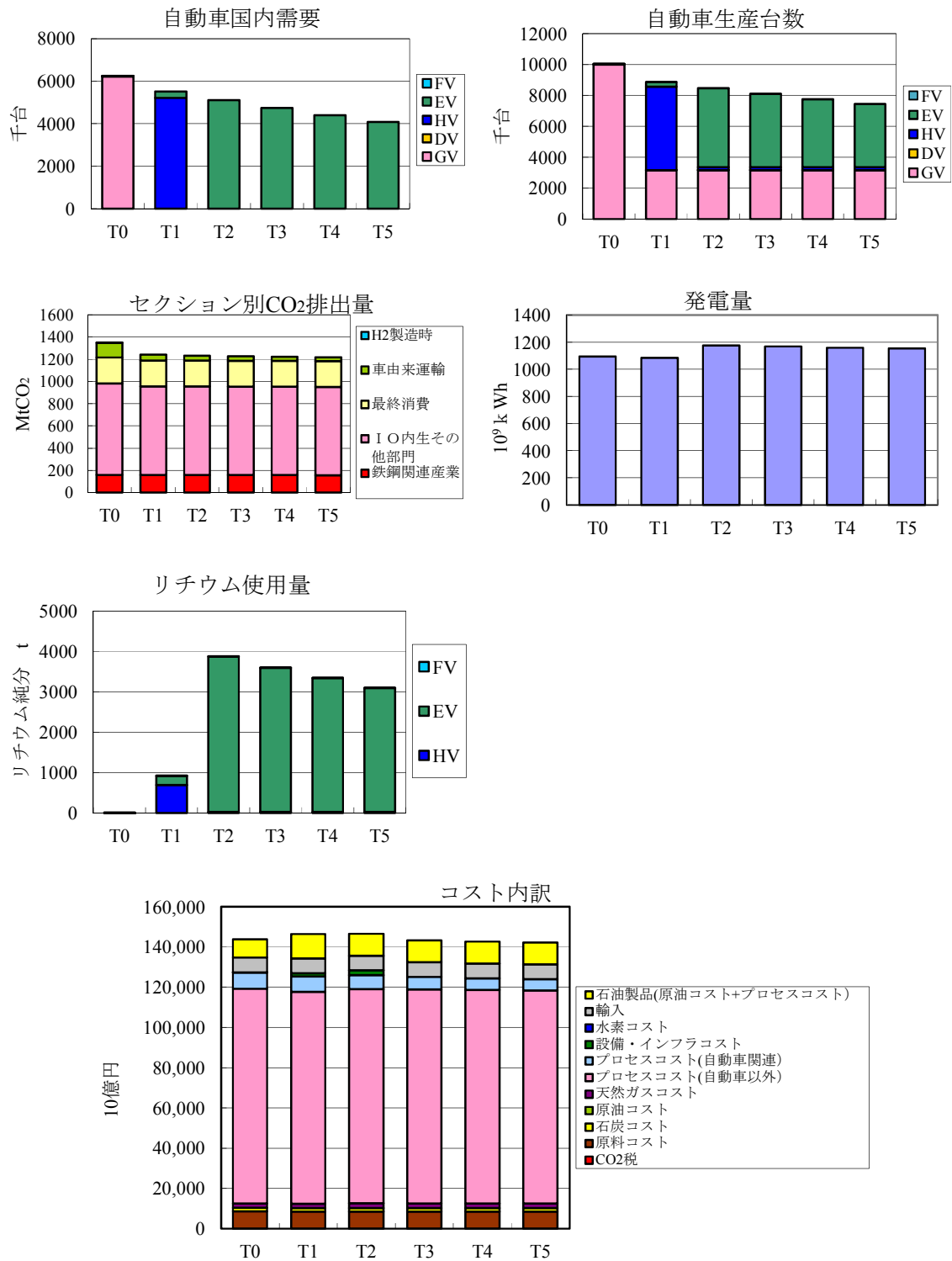


図 4-38 需要量変動シナリオ④の CO₂ 最小化の分析結果

17) 需要量変動シナリオ⑤

需要量変動シナリオ⑤は最適解が導出されなかった(結果が一意に求まらなかった)。これは、生産量に制限をかけていることが原因と考えられる。

18) 需要量変動シナリオ⑥

需要変動シナリオ⑥についても、最適解が導出されなかった。

19) 需要量変動シナリオ⑦

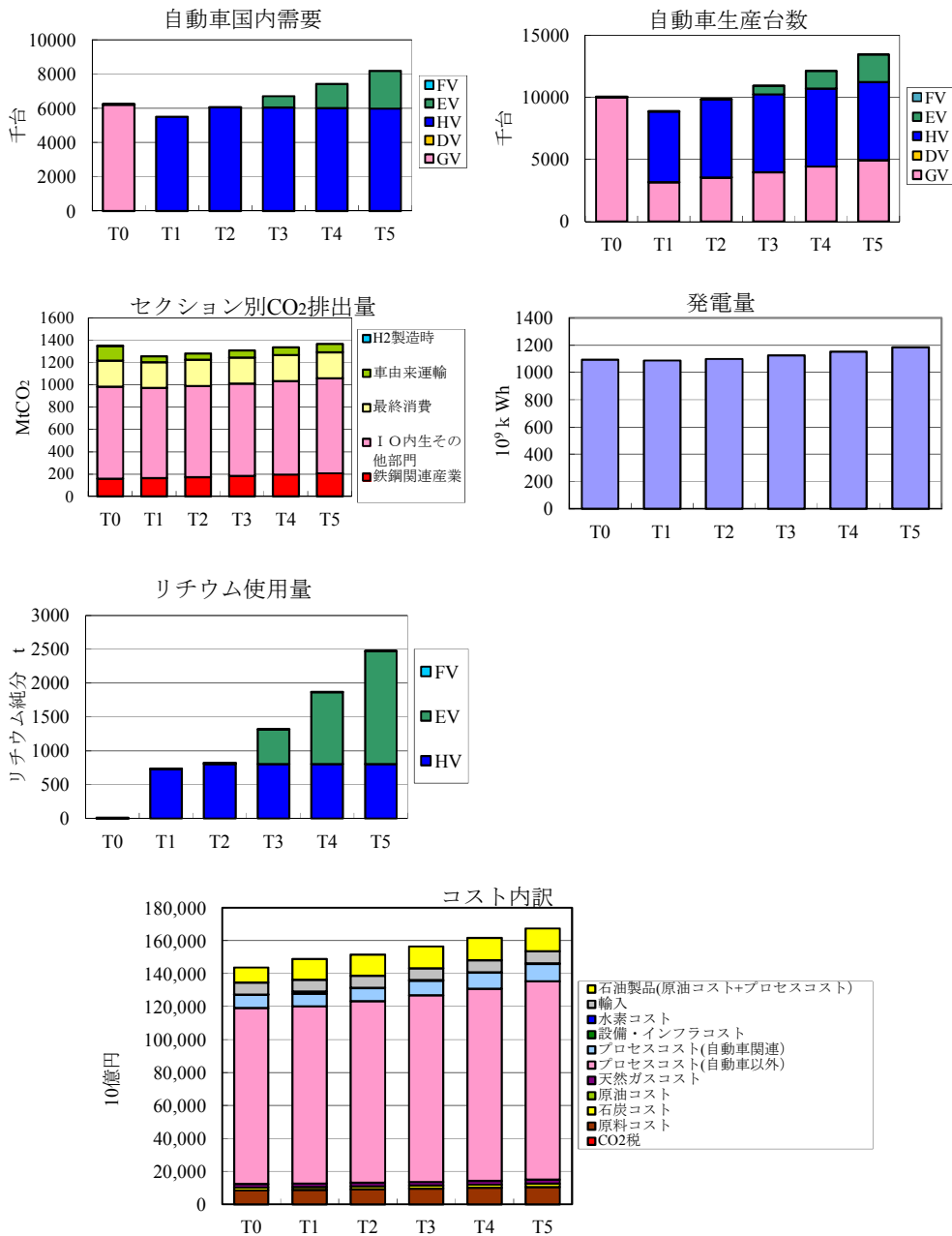


図 4-39 需要量変動シナリオ⑦のコスト最小化の分析結果

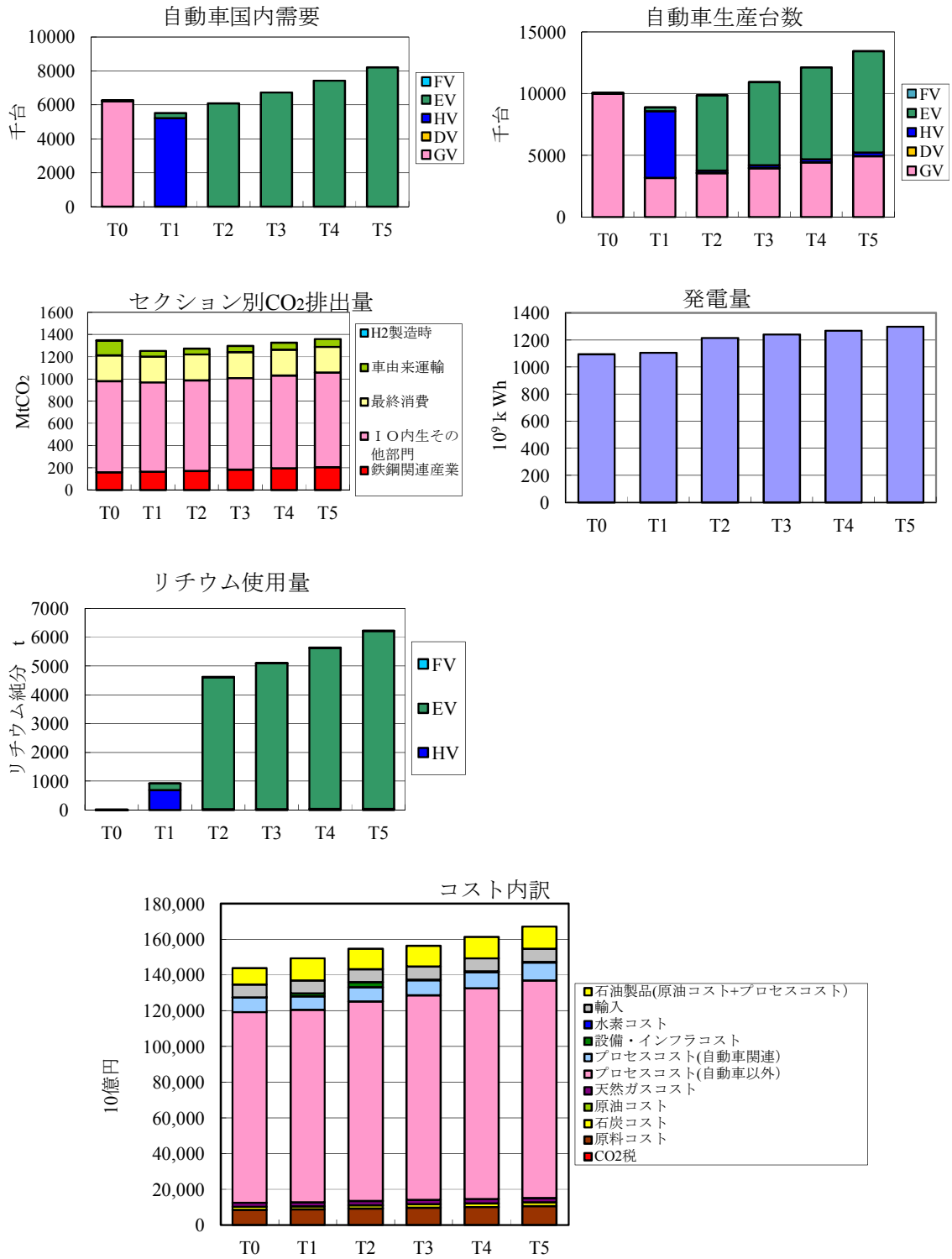


図 4-40 需要量変動シナリオ⑦の CO₂ 最小化の分析結果

20) 需要量変動シナリオ⑧

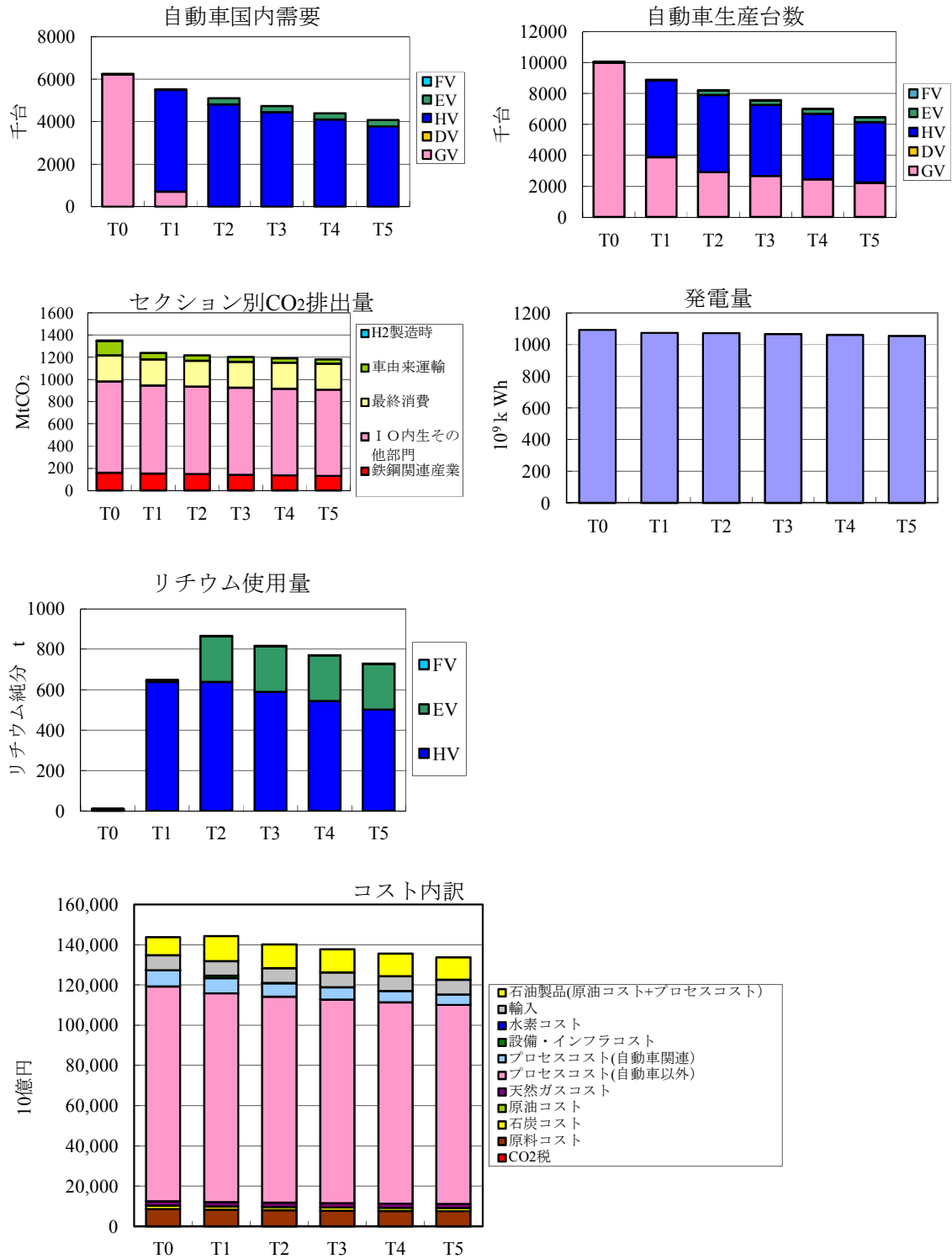


図 4-41 需要量変動シナリオ⑧のコスト最小化の分析結果

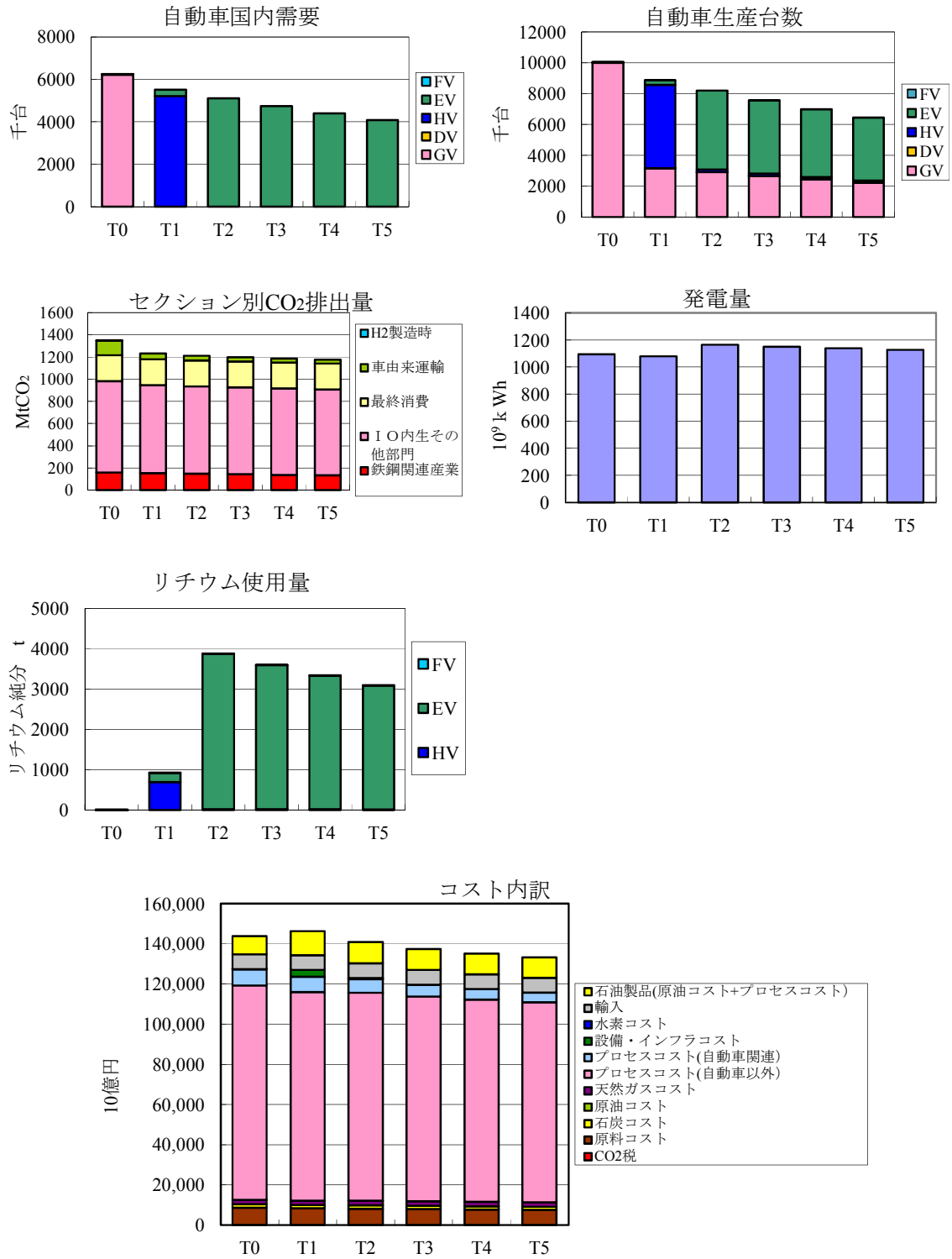


図 4-42 需要量変動シナリオ⑧の CO₂ 最小化の分析結果

21) 需要量変動シナリオ⑨

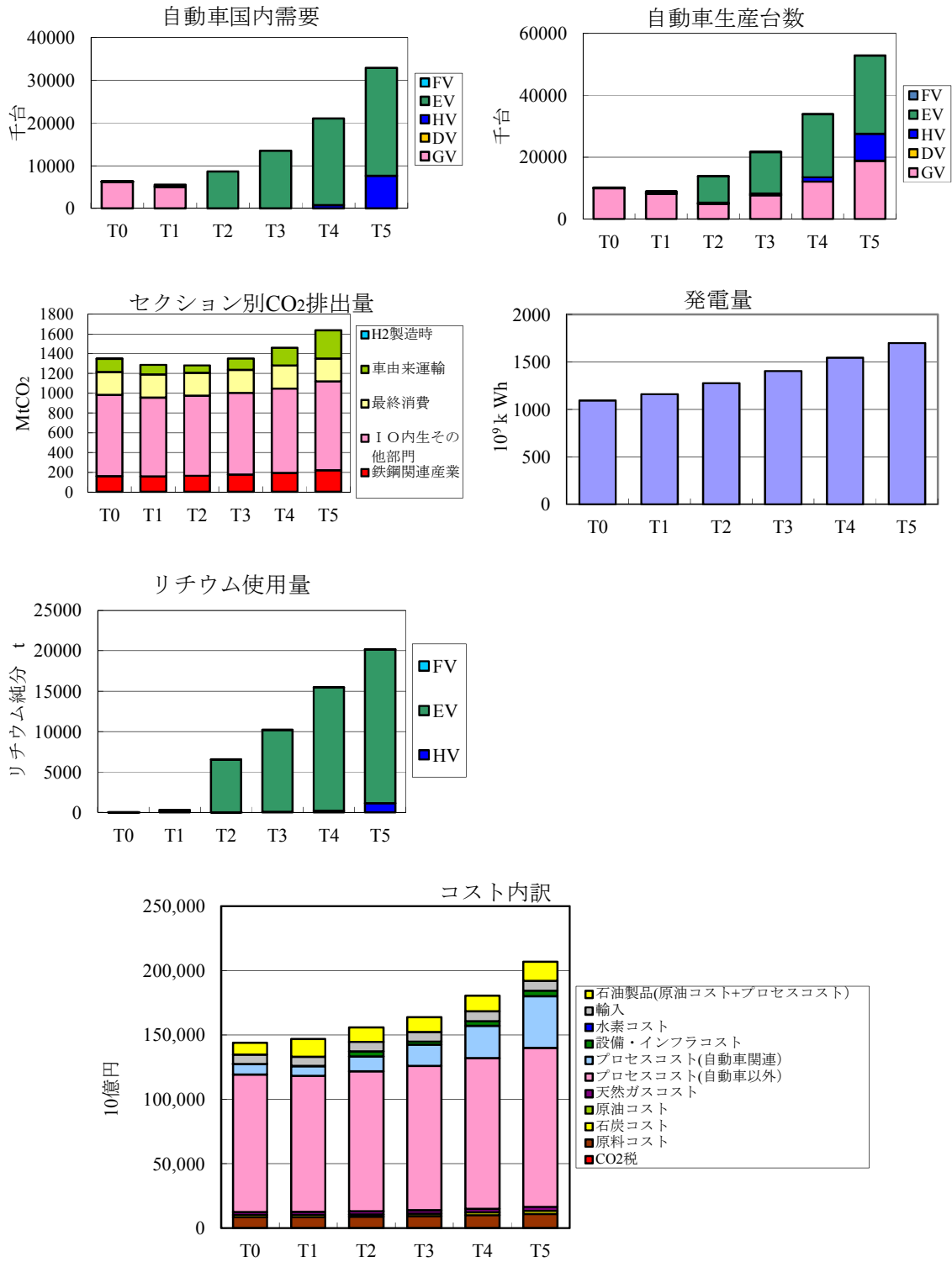


図 4-43 需要量変動シナリオ⑨のコスト最小化の分析結果

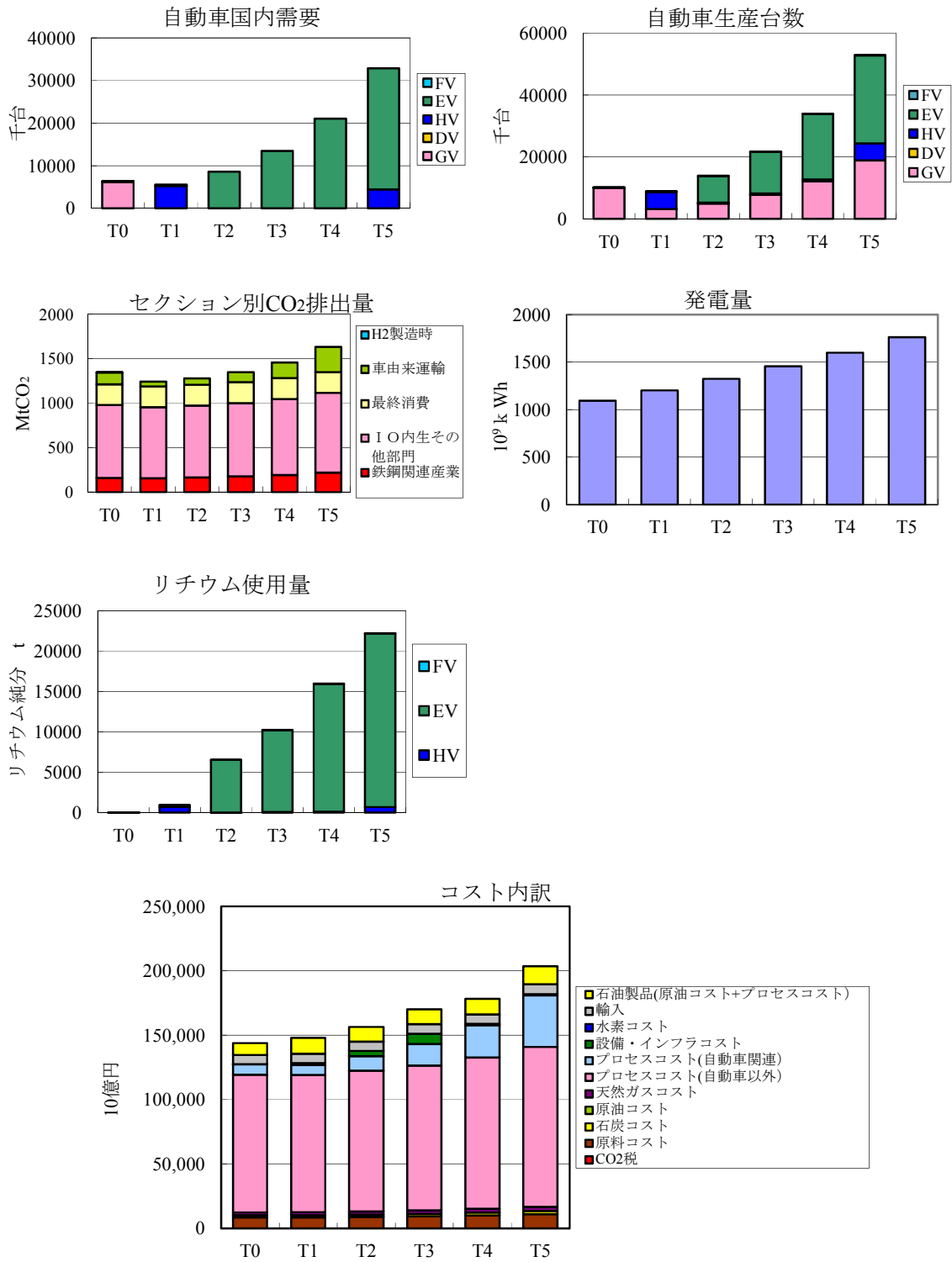


図 4-44 需要量変動シナリオ⑨の CO₂ 最小化の分析結果

22) 需要量変動シナリオ⑩

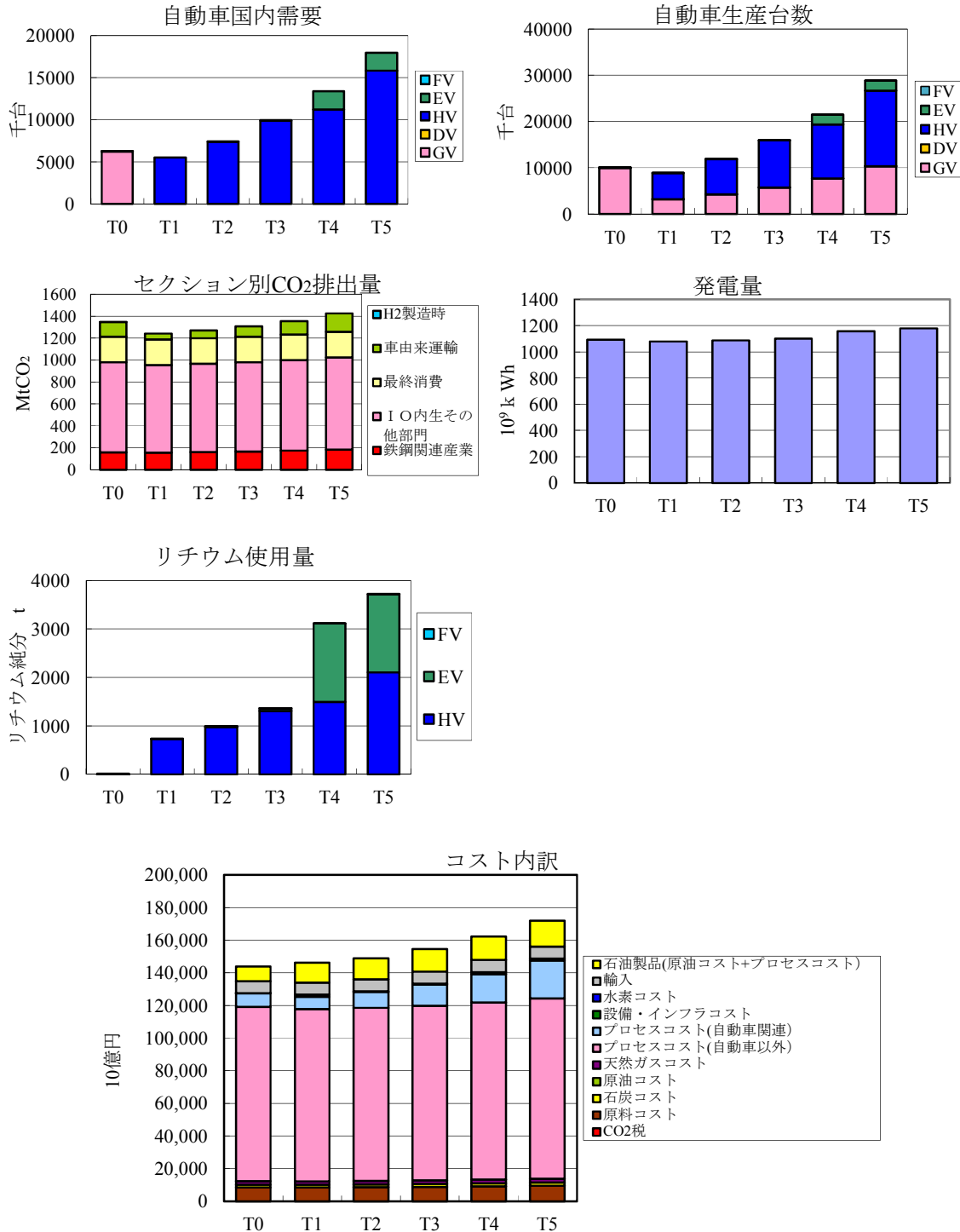


図 4-45 需要量変動シナリオ⑩のコスト最小化の分析結果

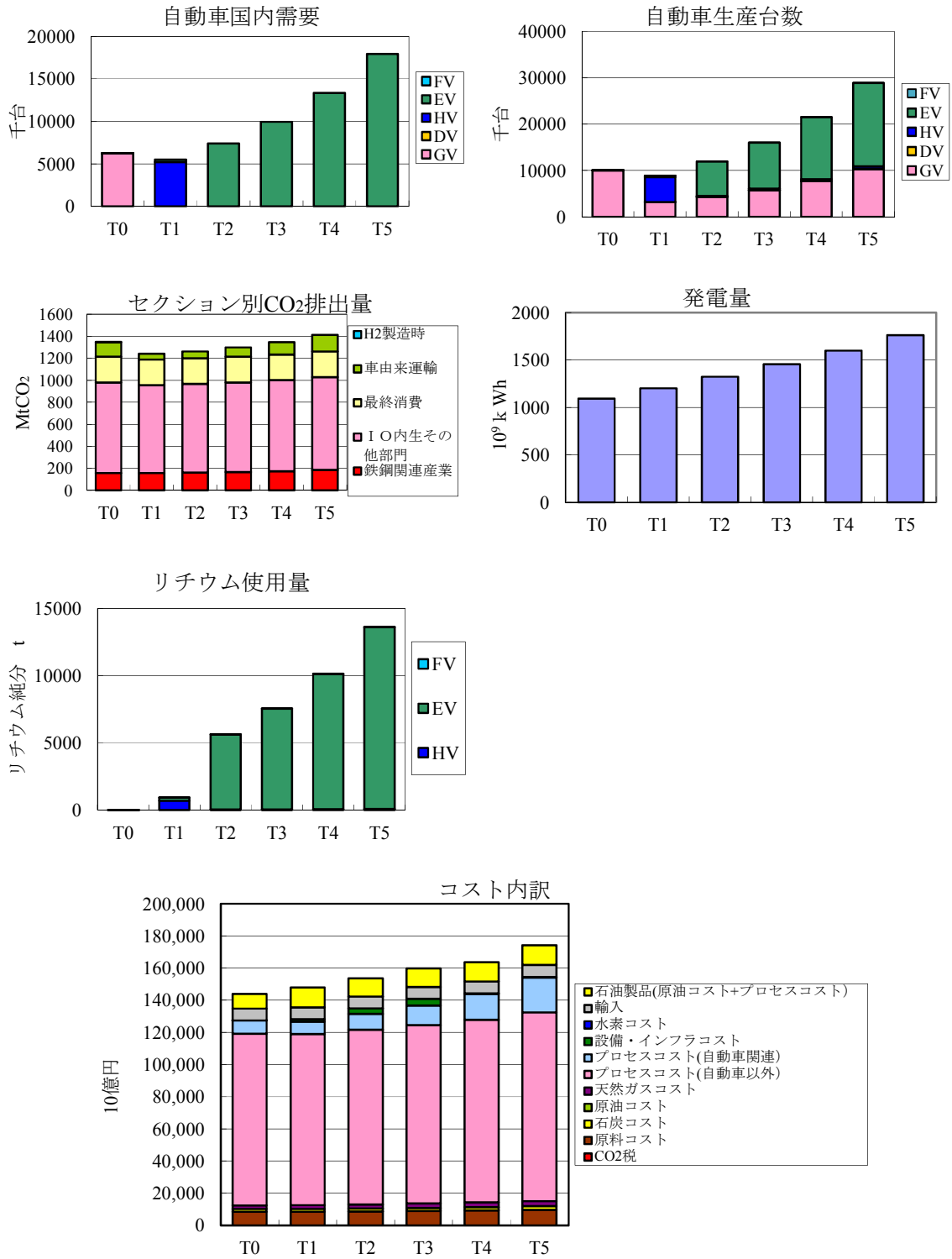


図 4-46 需要量変動シナリオ⑩の CO₂ 最小化の分析結果

23) 需要量変動シナリオ⑪

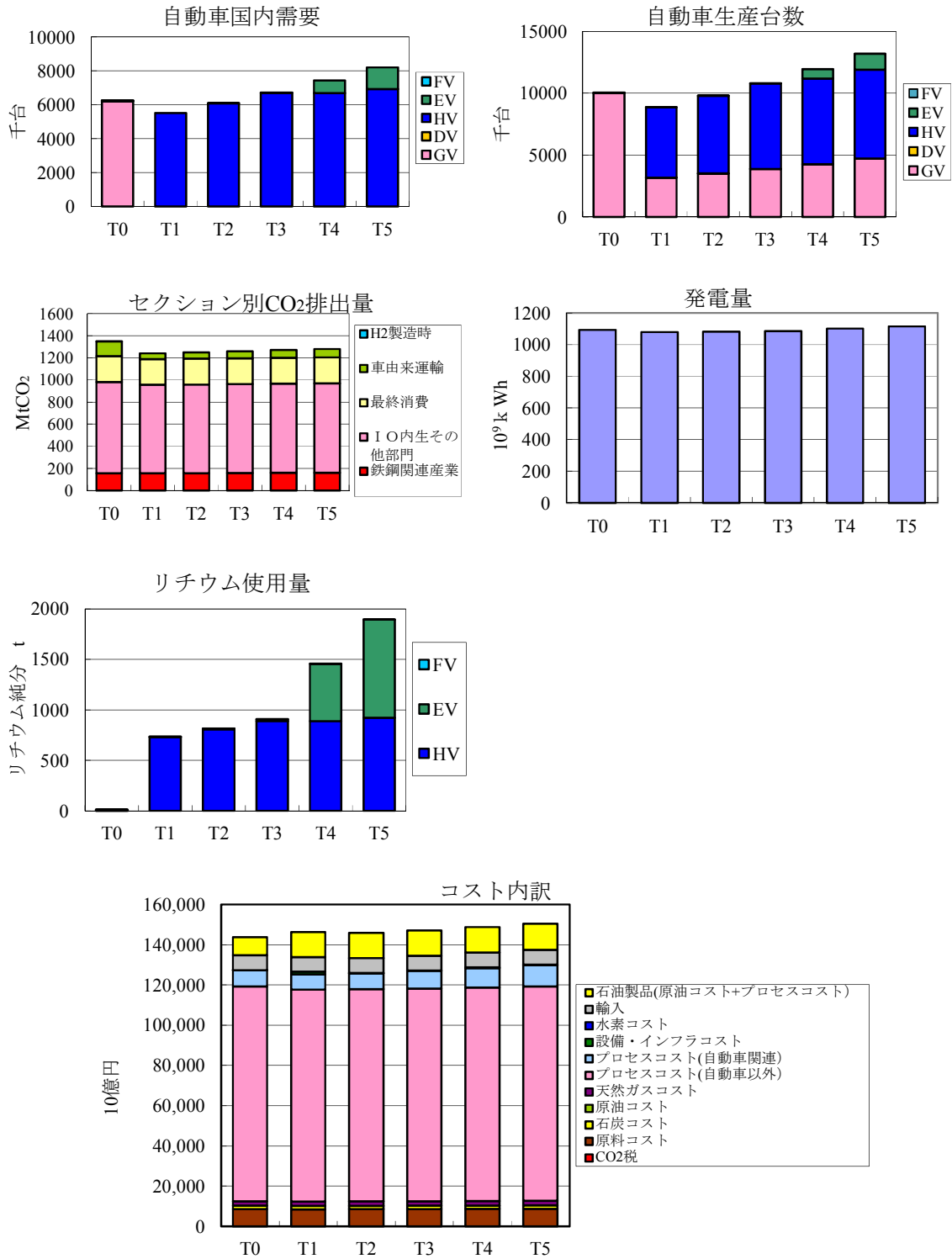


図 4-47 需要量変動シナリオ⑪のコスト最小化の分析結果

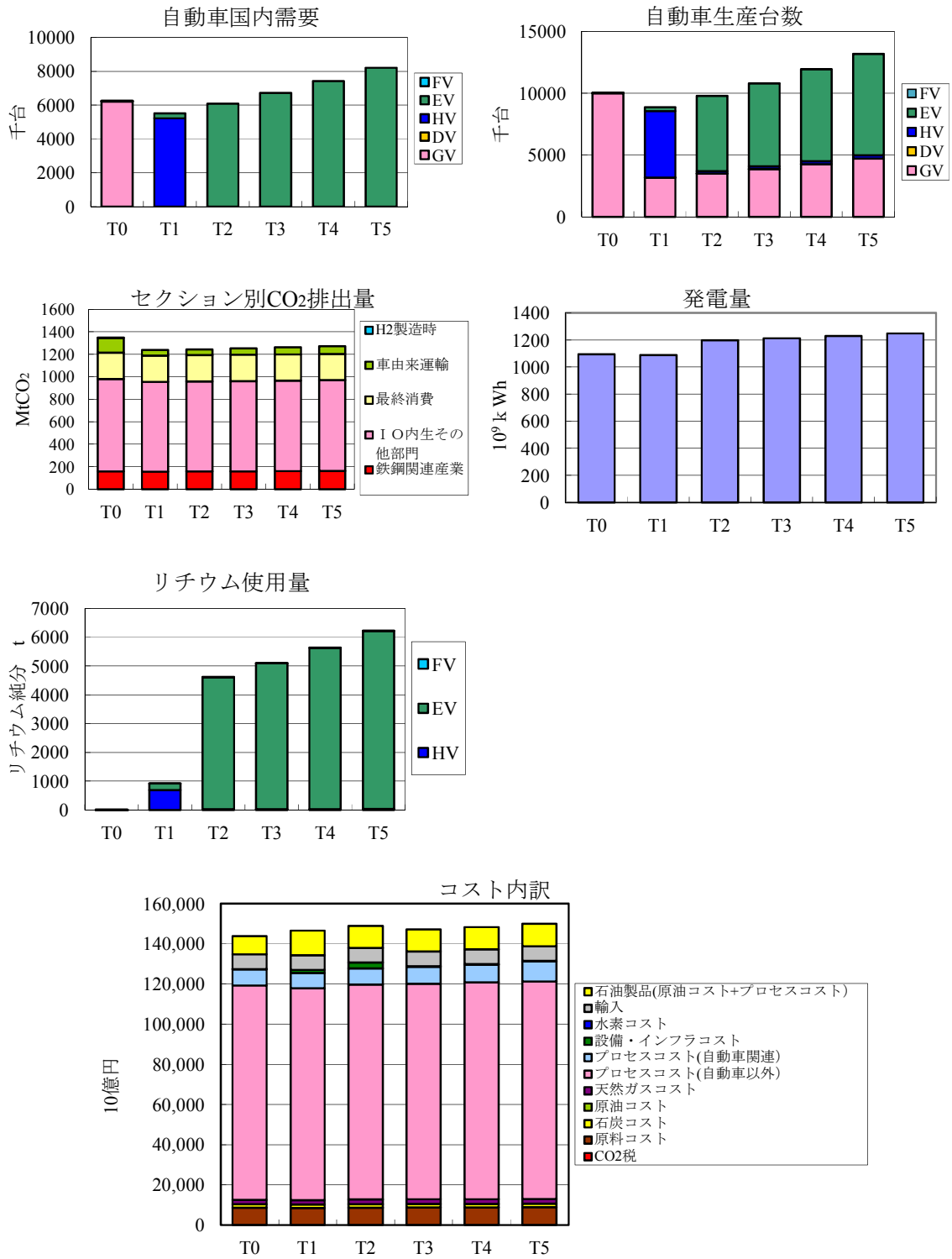


図 4-48 需要量変動シナリオ⑪の CO₂ 最小化の分析結果

24) 需要量変動シナリオ⑫

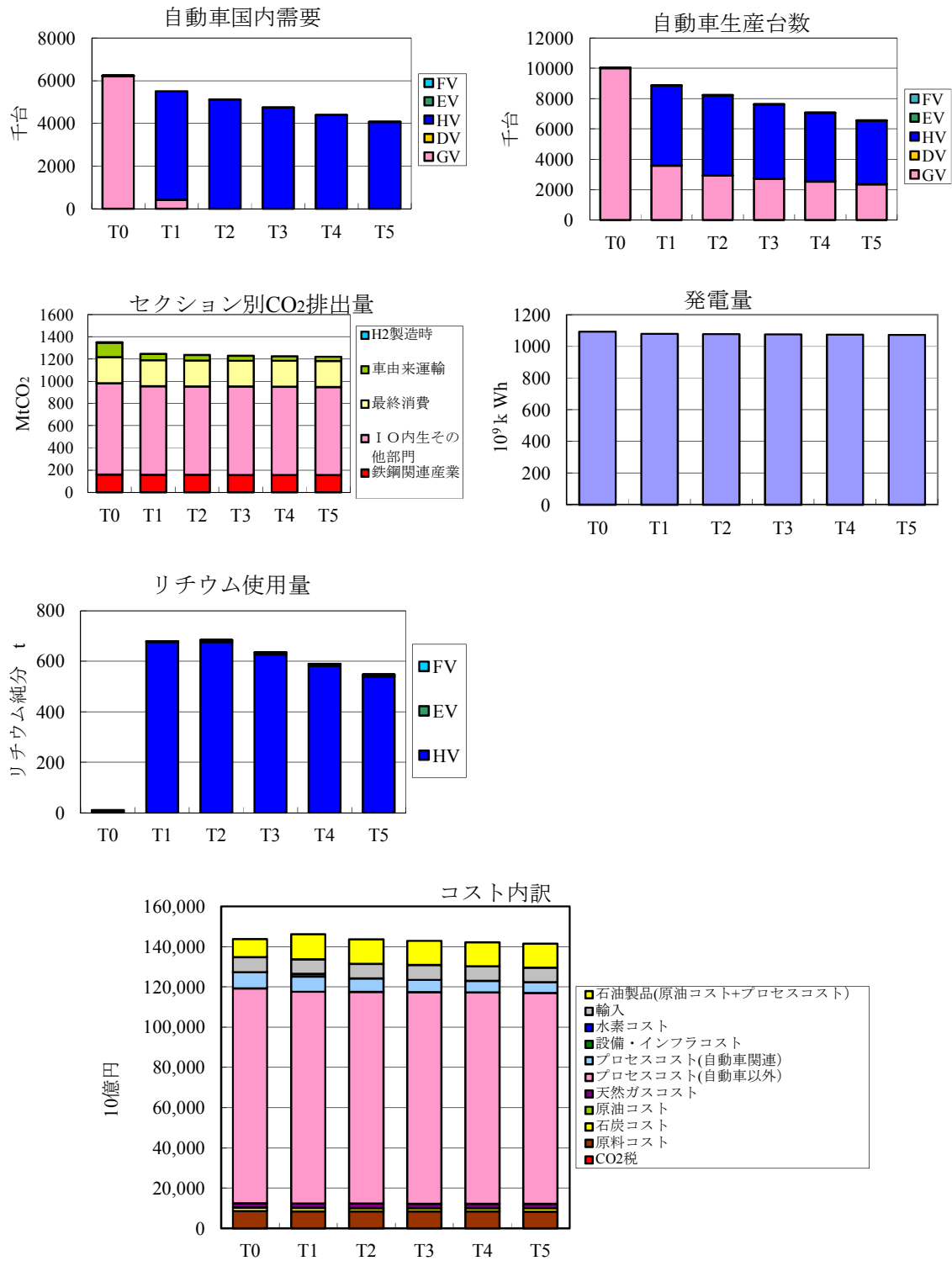


図 4-49 需要量変動シナリオ⑫のコスト最小化の分析結果

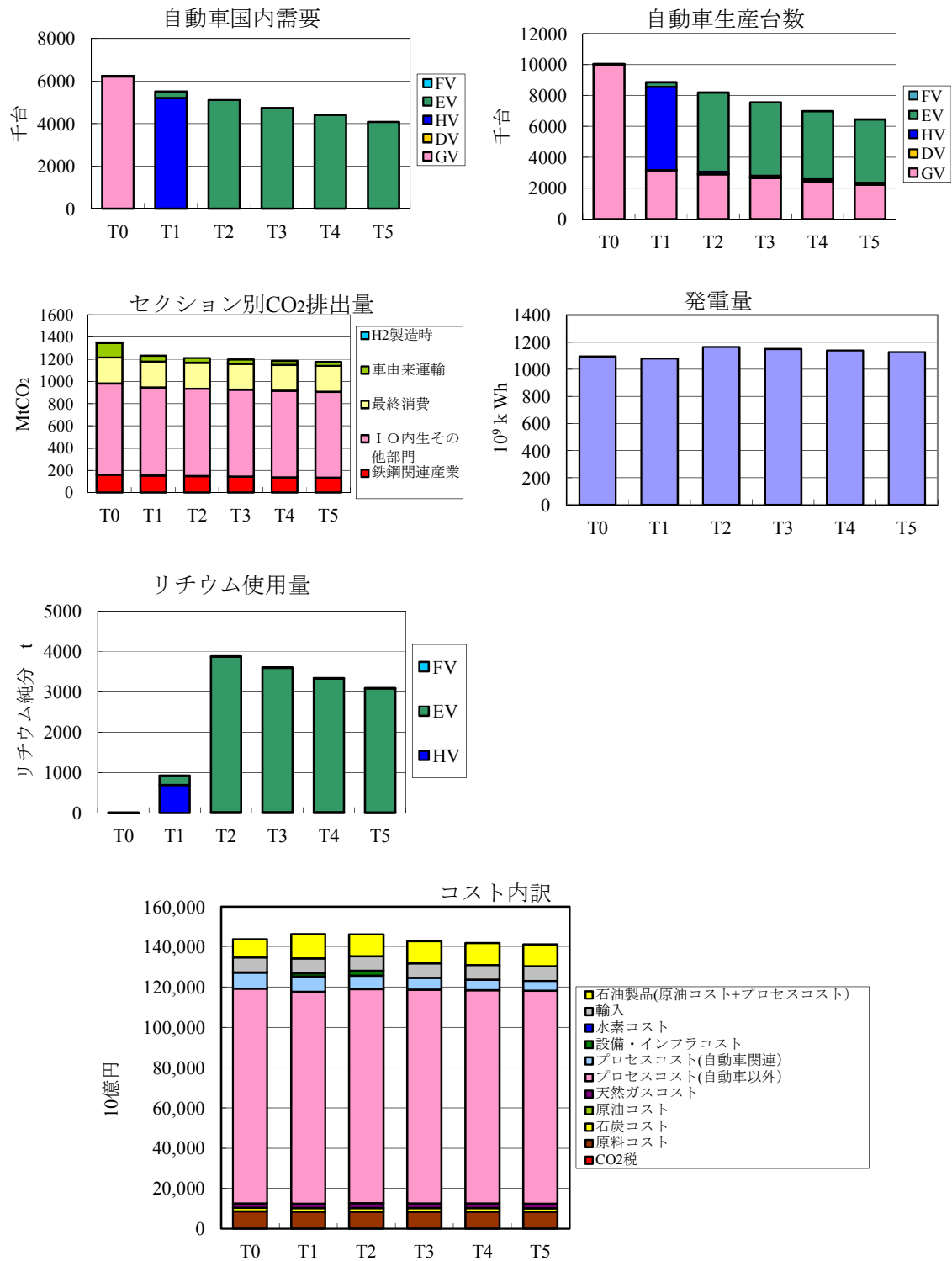


図 4-50 需要量変動シナリオ⑫の CO₂ 最小化の分析結果

25) 電池技術向上シナリオ①

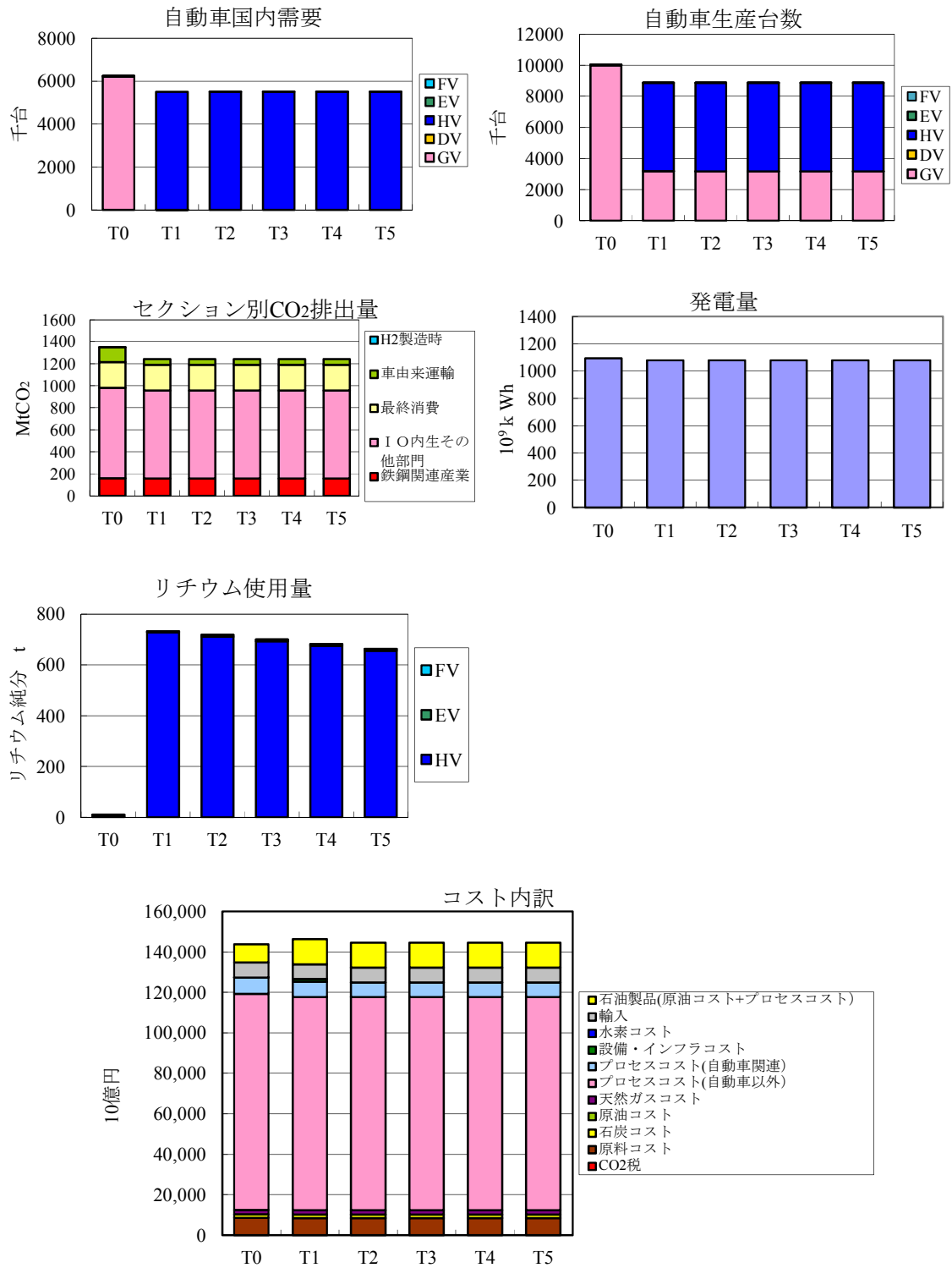


図 4-51 電池技術向上シナリオ①のコスト最小化の分析結果

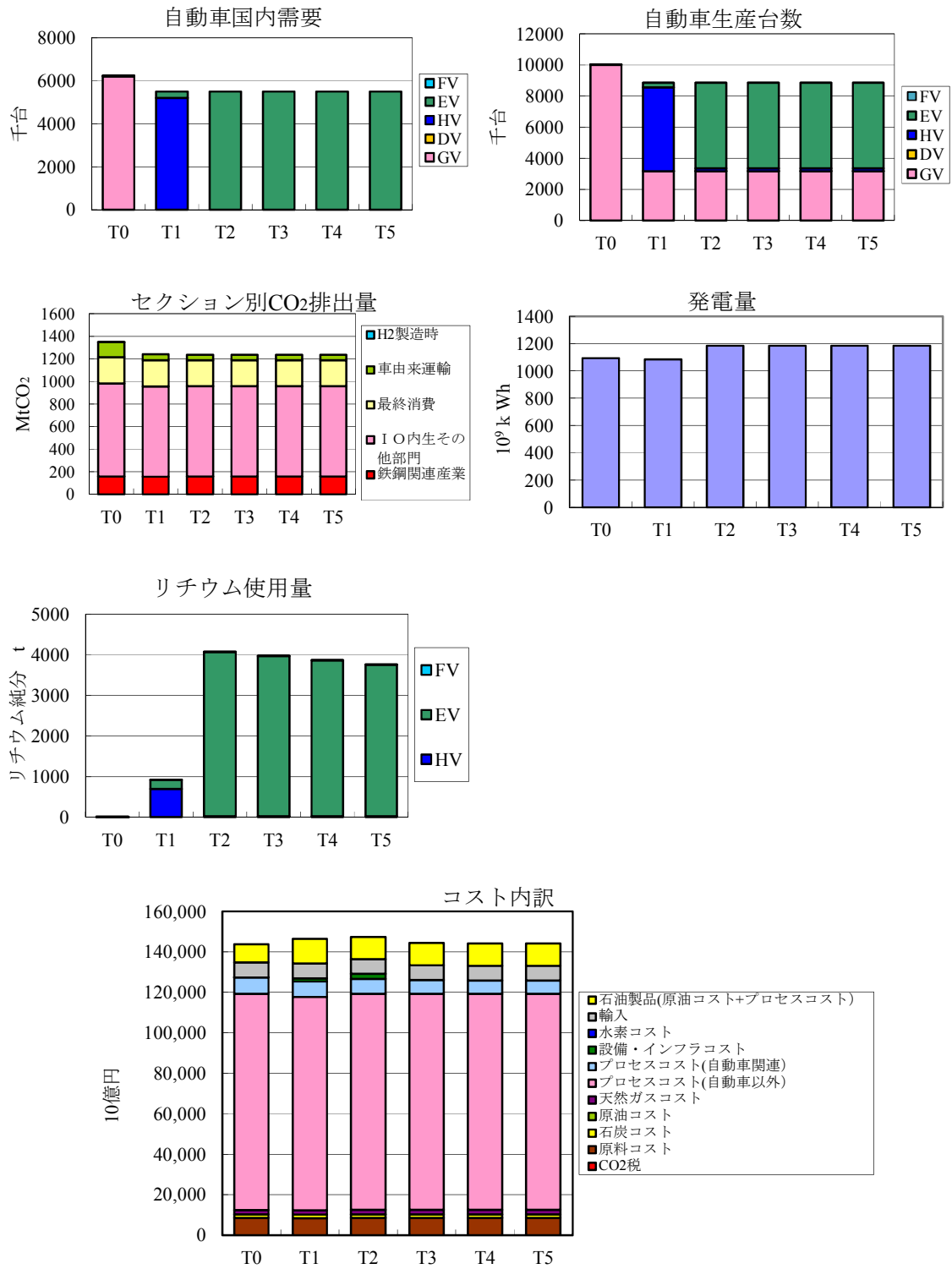


図 4-52 電池技術向上シナリオ①の CO₂ 最小化の分析結果

26) 電池技術向上シナリオ②

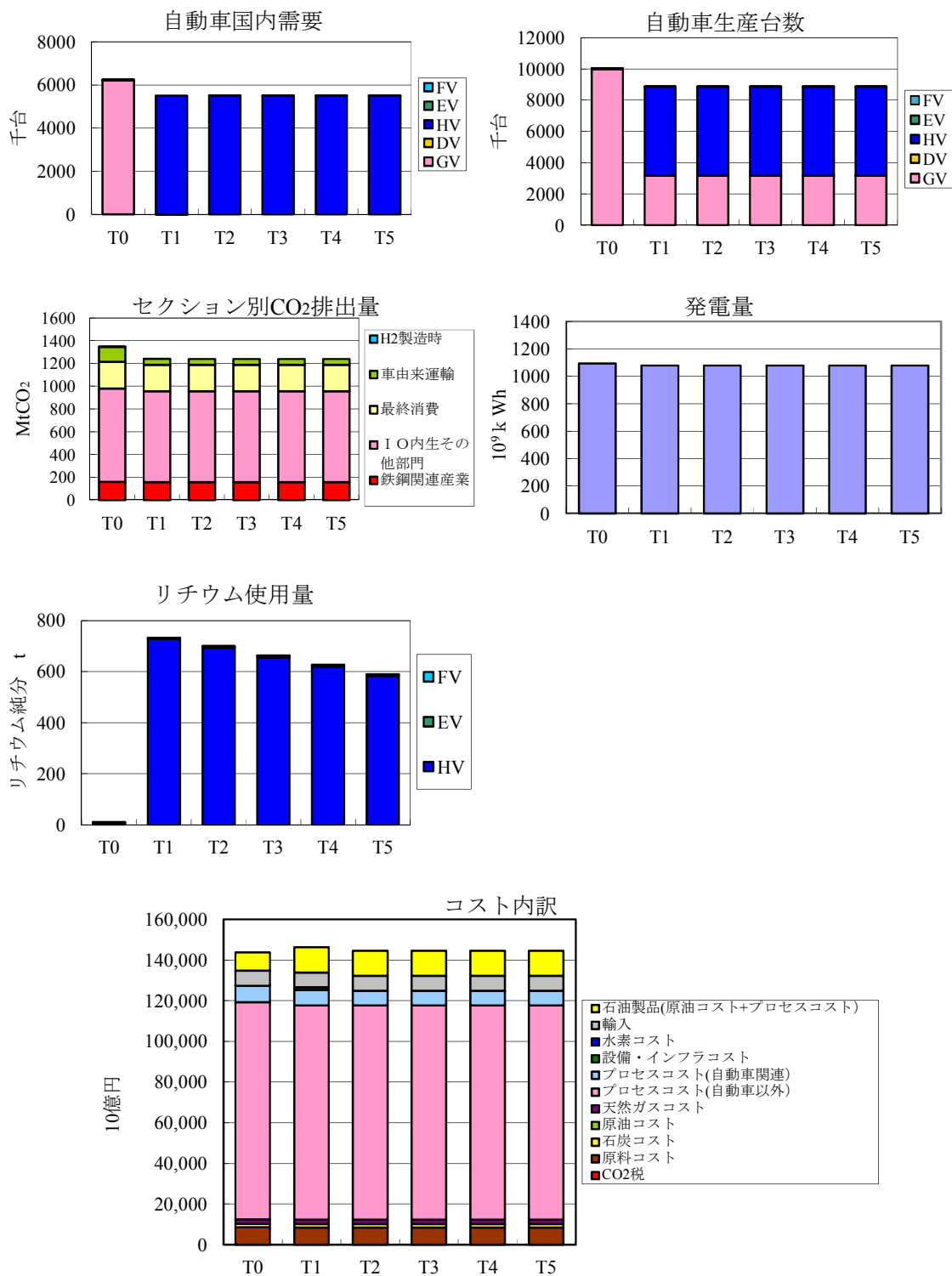


図 4-53 電池技術向上シナリオ②のコスト最小化の分析結果

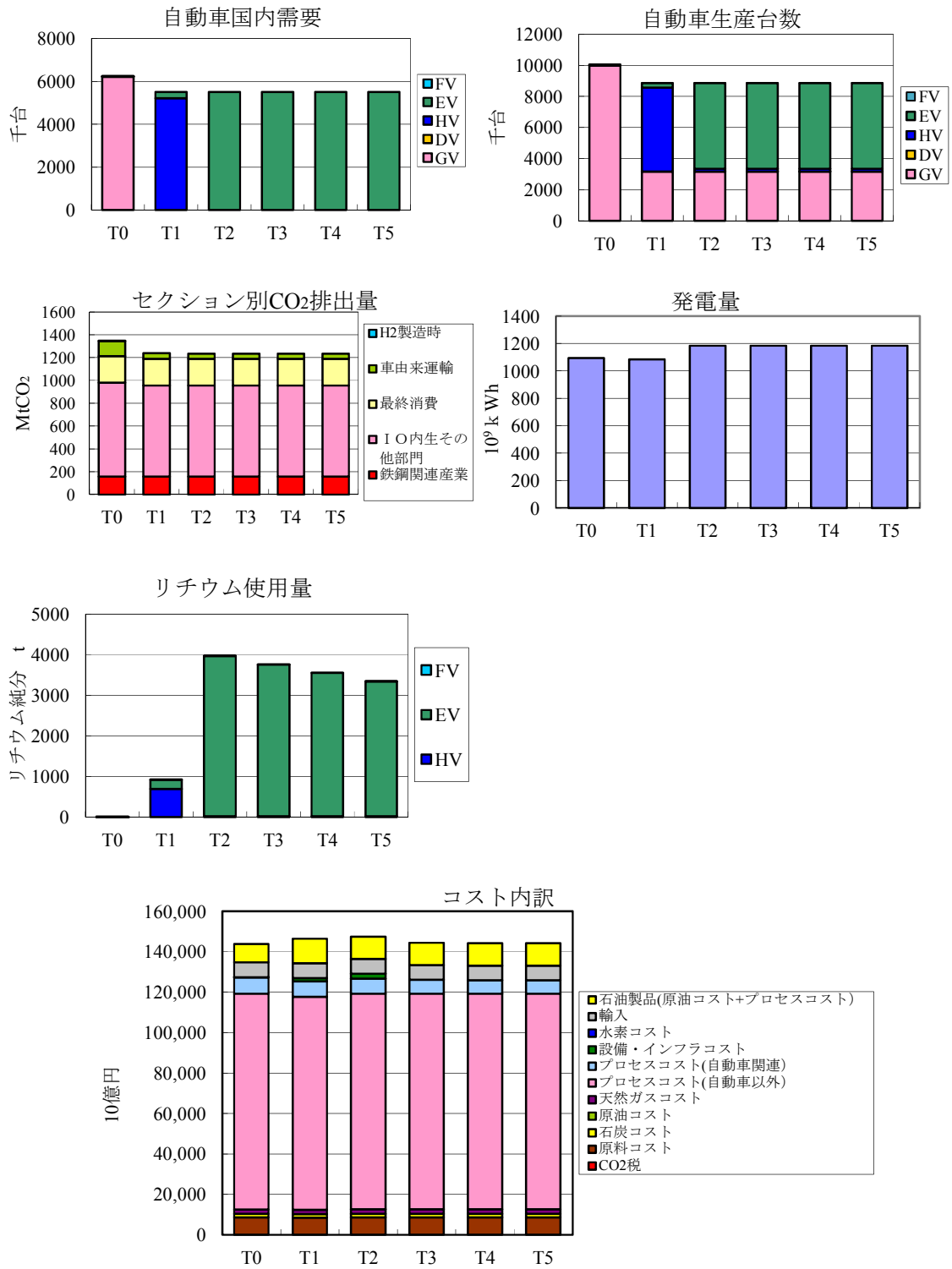


図 4-54 電池技術向上シナリオ②の CO₂ 最小化の分析結果

27) 電池技術向上シナリオ③

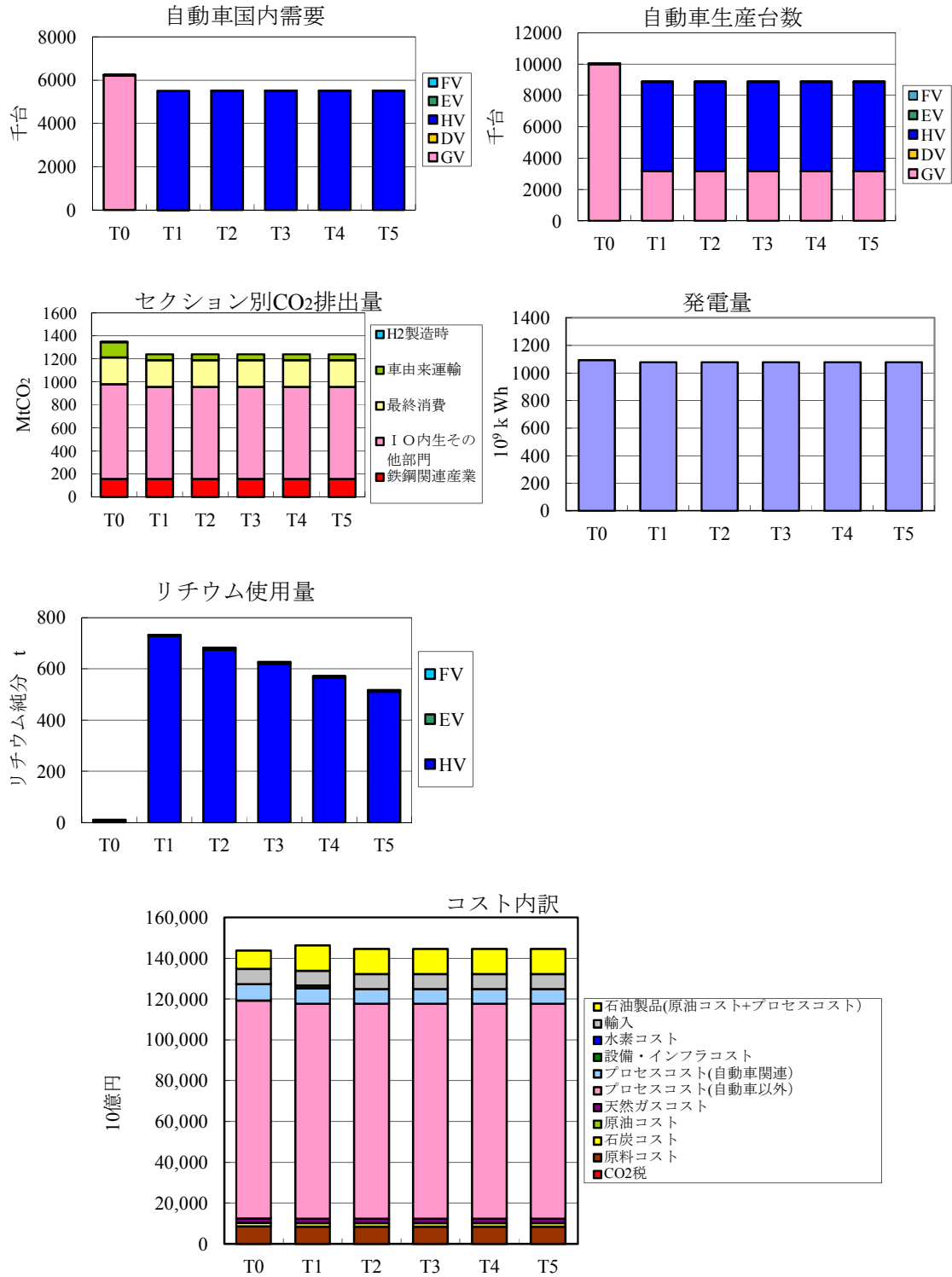


図 4-55 電池技術向上シナリオ③のコスト最小化の分析結果

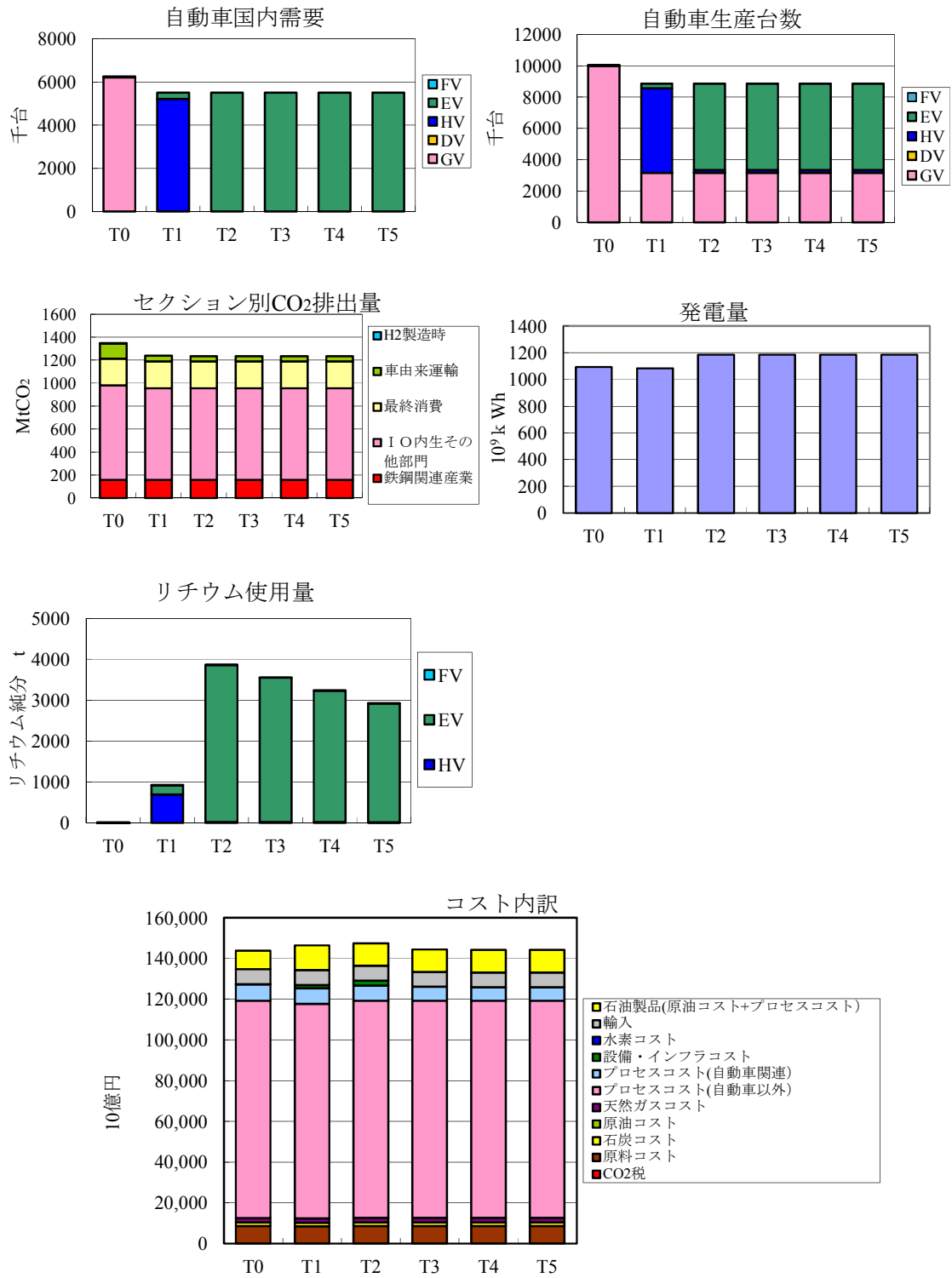


図 4-56 電池技術向上シナリオ③の CO₂ 最小化の分析結果

28) 電池技術向上シナリオ④

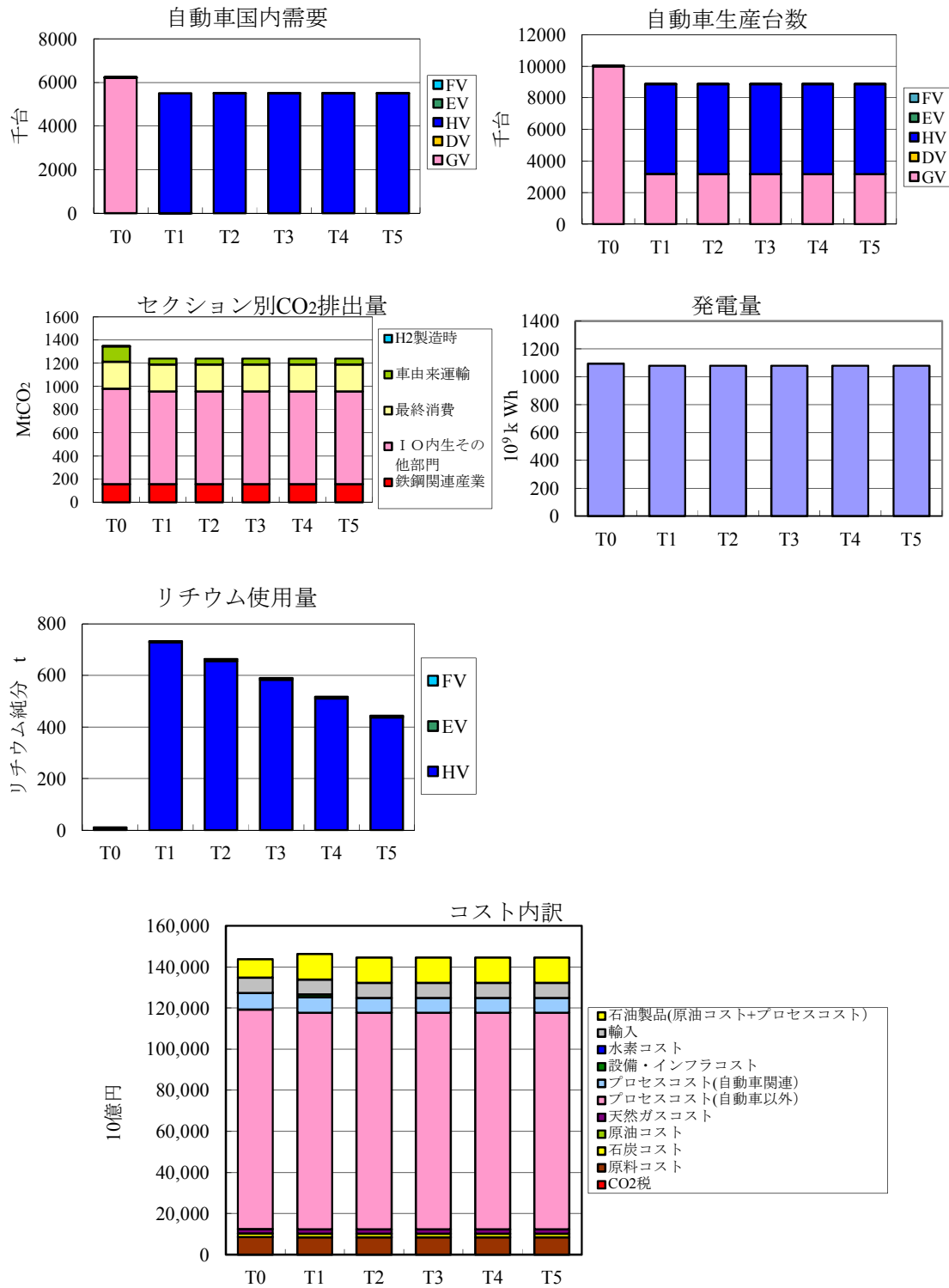


図 4-57 電池技術向上シナリオ④のコスト最小化の分析結果

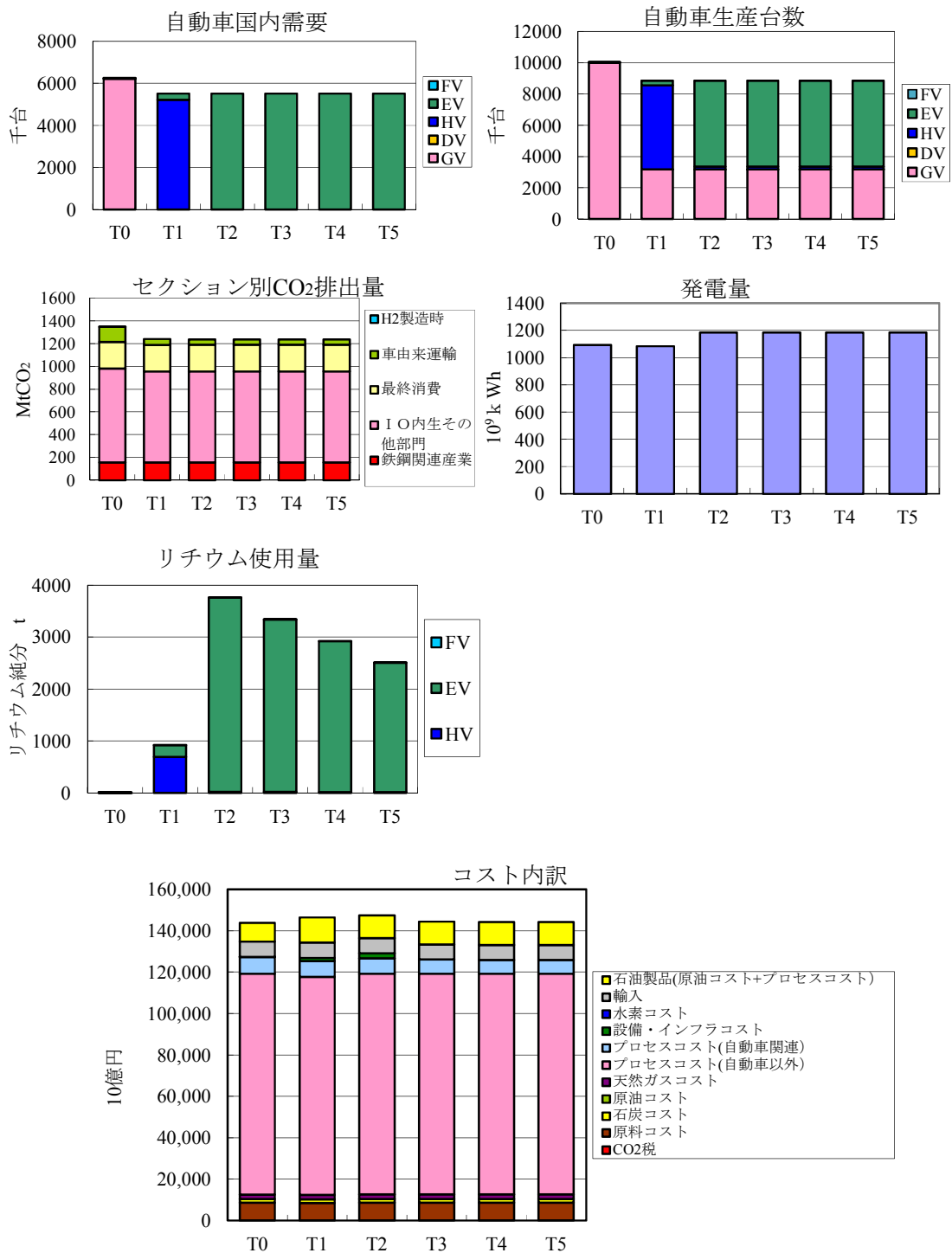


図 4-58 電池技術向上シナリオ④の CO₂ 最小化の分析結果

29) 電池技術向上シナリオ⑤

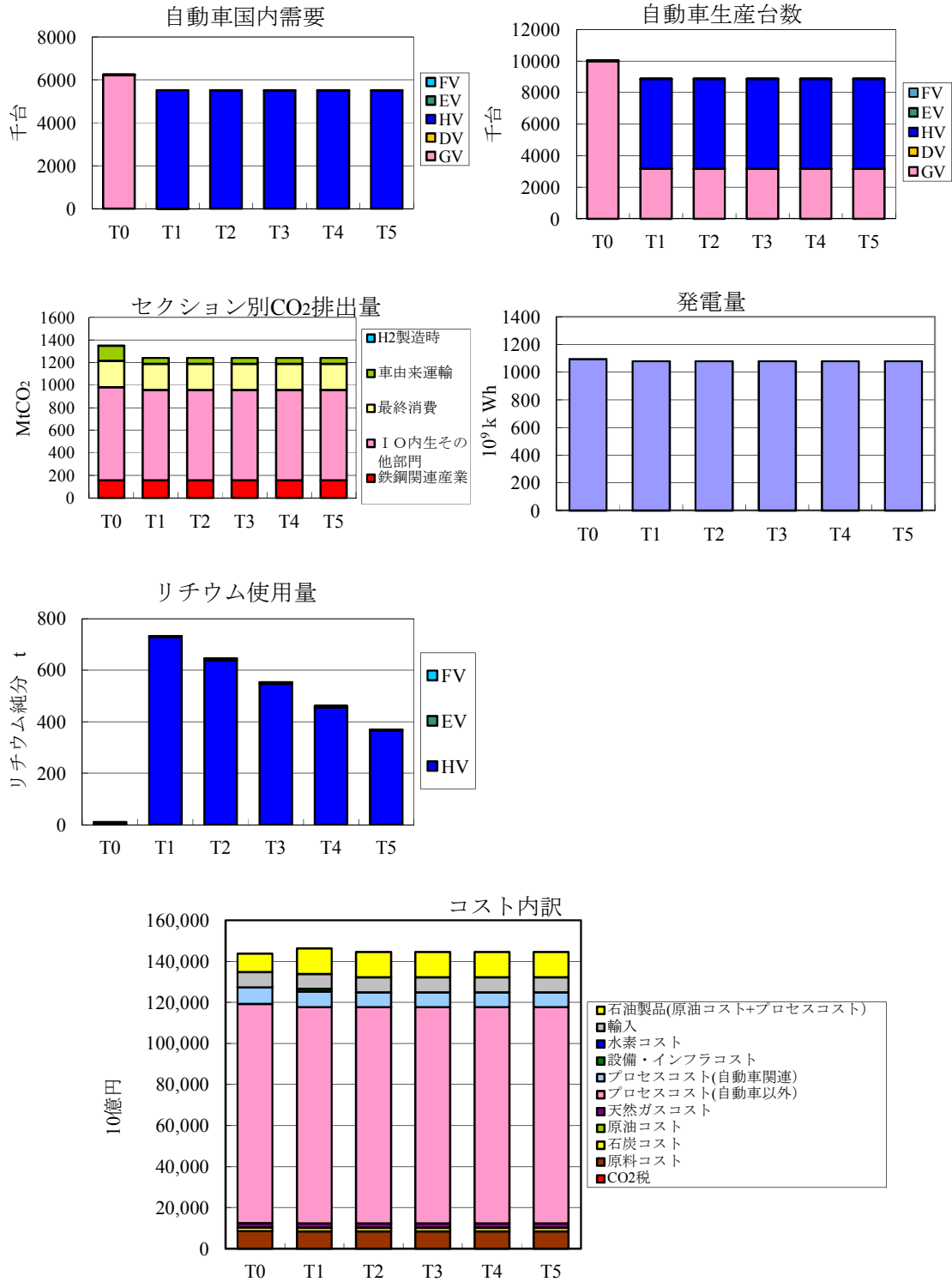


図 4-59 電池技術向上シナリオ⑤のコスト最小化の分析結果

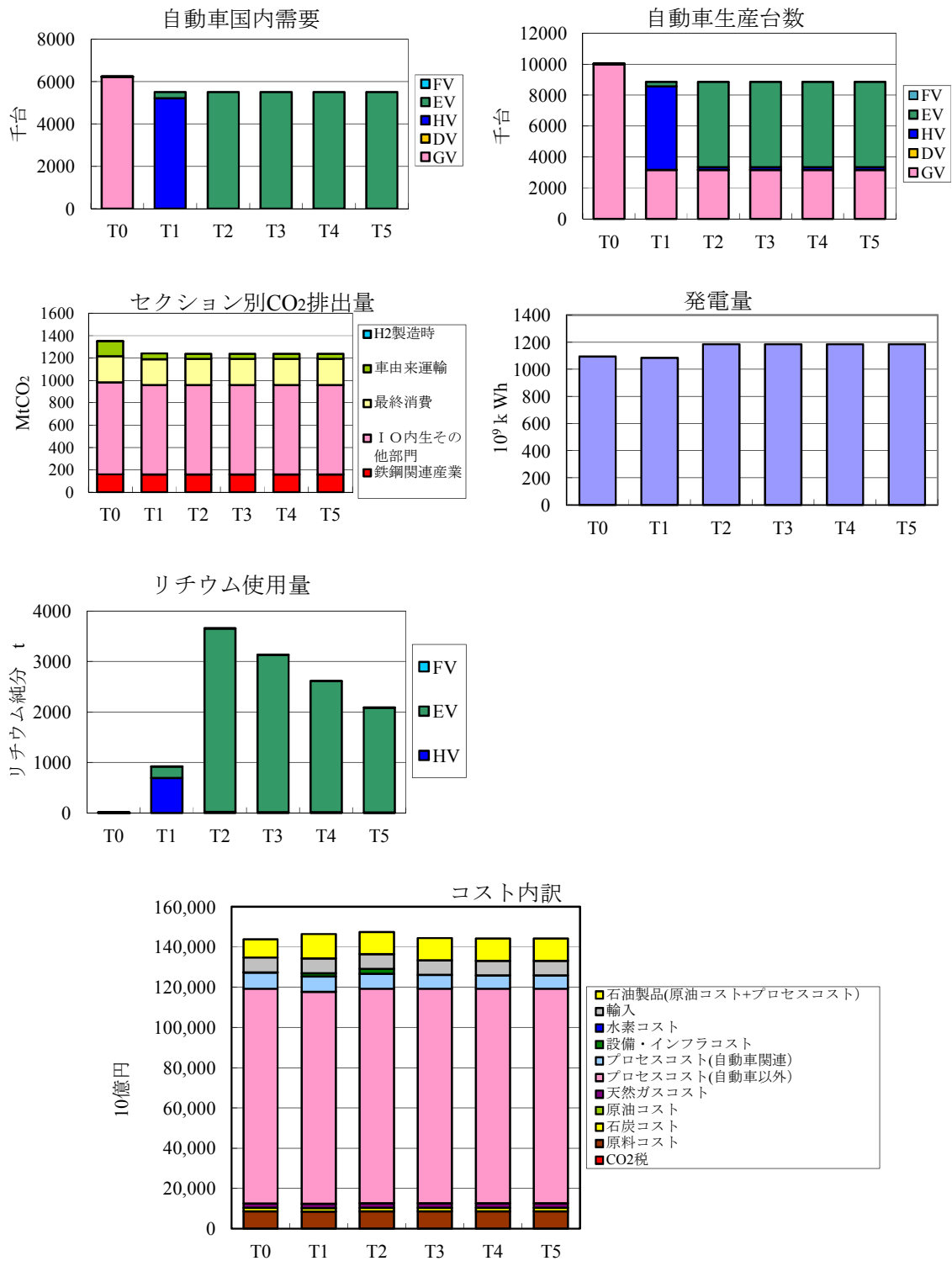


図 4-60 電池技術向上シナリオ⑤の CO₂ 最小化の分析結果

4.5. シナリオ分析結果のまとめ

(ア) 燃費向上シナリオ

表 4-4 燃費向上シナリオの T5 における CO₂ 排出量推計

シナリオ	コスト最小化シナリオ (MtCO ₂)	CO ₂ 最小化シナリオ (MtCO ₂)
燃費向上シナリオ①	1231	1227
燃費向上シナリオ②	1220	1218
燃費向上シナリオ③	1224	1220
燃費向上シナリオ④	1226	1206
燃費向上シナリオ⑤	1213	1201
ベースシナリオ	1241	1236

表 4-4 に、燃費向上シナリオの T5 における CO₂ の排出量、及び比較用のベースシナリオのデータを示した。どのシナリオにおいてもコスト最小化の分析結果と CO₂ 最小化の分析結果の国内需要が一致することはなかった。この結果から、モーターや電池の性能向上による消費電力量の減少だけでは CO₂ 排出量原単位が最小の電気自動車市場に影響することはないと思われる。

このシナリオでは、自動車利用の際の燃料の使用量が減少する。そのため、コスト最小化・CO₂ 最小化の両方のシナリオ分析において、CO₂ の排出量はベースシナリオに比べ減少する。また、コスト最小化シナリオ内での将来的な CO₂ 排出量が最小となるのは、ガソリン車が市場を占めるシナリオ□との結果を得る。エンジンの技術開発などにより燃費が向上するとき、GV シェアが高いままでも CO₂ は減少するが、この場合は 2010 年の GV の燃費最高値の約 2.5 倍、2009 年の平均燃費と比較すると約 4 倍まで燃費を向上させる必要がある (図 4-5 参照)。同様に、シナリオ□においても、2010 年の GV 最高燃費の約 1.9 倍、2009 年の平均燃費の約 2.8 倍まで燃費を向上させる必要がある。自動車工業会環境レポート 2010 より得たガソリン車の販売平均 10・15 モード燃費の 1995 年から 2009 年までの伸び率 2.68%(年間)で 2010 年から 2050 年まで燃費が向上した場合には、約 2.9 倍とシナリオ□の燃費まで向上する。しかしながら、保有平均や実走行燃費で計算した場合は上昇率が各々約 1.6 倍、1.3 倍となるなど、このシナリオ通りの燃費向上を実現させることは大変困難であると考えられる。

シナリオ□・□・□における自動車国内需要では、T2 以降は HV が市場を占める結果となった。この場合、リチウムの自動車生産への投入量は 736 t になり、これはマテリアルフローより得たリチウムイオン電池総重量の約 21%にあたるリチウムを使用する結果となる。

(イ) 原油価格変動シナリオ

表 4-5 に原油価格変動シナリオの T5 における CO₂ の排出量計算の結果を示す。原油価格が上昇するシナリオでは、T5 におけるコスト最小化シナリオの自動車国内需要は、原油価格上昇の影響が少ない電力を使用する EV が市場を占める結果となり、T5 における CO₂ 最小化と等しくなる結果を得た。シナリオでのリチウム使用量は年間 4170 t となり、これはマテリアルフローのリチウムの需要量（本研究の平成 23 年度研究報告書参照）の約 120% の値となる。また、原油価格が減少した場合はベースシナリオと同じ結果となった。

表 4-5 原油価格変動シナリオの T5 における CO₂ の排出量推計

シナリオ	コスト最小化シナリオ (MtCO ₂)	CO ₂ 最小化シナリオ (MtCO ₂)
原油価格変動シナリオ①	1236	1236
原油価格変動シナリオ②	1236	1236
原油価格変動シナリオ③	1236	1236
原油価格変動シナリオ④	1236	1236
原油価格変動シナリオ⑤	1236	1236
原油価格変動シナリオ⑥	1241	1236
ベースシナリオ	1241	1236

(ウ) 需要量変動シナリオ

表 4-6 に、需要量変動シナリオの T5 における CO₂ の排出量計算の結果を示す。CO₂ 排出量は自動車の生産や需要の増減に合わせて変動する。また、シナリオ②では T5 での自動車需要と CO₂ 排出量が、コスト最小化シナリオと CO₂ 最小化シナリオで一致した。

リチウム使用量は、コスト最小化の中で一番多いものでシナリオ⑨の T5 における約 2 万 t であり、これは 2007 年のリチウム輸入純量の約 5.8 倍ほどである。自動車生産量の伸びが 2008 年以前のように著しい場合には、大量のリチウム消費が起こる可能性が高い。

シナリオ①の CO₂ 最小化とシナリオ⑨の結果では、途中で EV のみの国内需要が続くものの、途中から HV の需要が見受けられる。これは、発電量の制限（1 期 1.1 倍まで）によるものと考えられる。これより急速に EV 需要増がみられる場合、発電量の確保または走行距離に対する消費電力を減らす技術の確保が重要となってくるだろう。

表 4-6 生産量変動シナリオの T5 における CO₂ の排出量推計

シナリオ	コスト最小化シナリオ(MtCO ₂)	CO ₂ 最小化シナリオ (MtCO ₂)
需要量変動シナリオ①	1590	1573
需要量変動シナリオ②	1388	1388
需要量変動シナリオ③	1275	1268
需要量変動シナリオ④	1222	1218
需要量変動シナリオ⑤	N.A.	N.A.
需要量変動シナリオ⑥	N.A.	N.A.
需要量変動シナリオ⑦	1366	1360
需要量変動シナリオ⑧	1178	1174
需要量変動シナリオ⑨	1635	1632
需要量変動シナリオ⑩	1426	1414
需要量変動シナリオ⑪	1280	1274
需要量変動シナリオ⑫	1219	1218
ベースシナリオ	1241	1236

(エ) 電池技術向上シナリオ

表 31 に電池技術向上シナリオの T5 における CO₂ の排出量計算の結果を示した。どの電池技術向上シナリオでも国内需要及び CO₂ 排出量はベースシナリオと等しい結果となる。そのため、このモデルでは価格にも CO₂ 排出量にもリチウムの使用量による影響はないと考えられる。

表 4-7 電池技術向上シナリオの T5 における CO₂ 排出量推計

シナリオ	コスト最小化シナリオ(MtCO ₂)	CO ₂ 最小化シナリオ (MtCO ₂)
電池技術向上 全シナリオ	1241	1236
ベースシナリオ	1241	1236

(オ) リチウム需要量の比較

各シナリオ別の結果をまとめると、ベースシナリオと燃費が向上した場合には HV、さらに燃費が上昇した場合は GV、原油が上昇した場合は EV、自動車需要が上昇した場合はその両方（主に HV）の需要が伸びる結果が得られた。図 4-61 に代表的なシナリオでの T5 におけるリチウム使用量を、2007 年使用量（本研究の平成 23 年度研究報告書、リチウムのマテリアルフローを参照）に加算したリチウム使用量グラフにして示す。ただし、①から⑥の番号は以下を示すとおりとする。

- ① 2007 年のリチウム需要の値

- ② ①の値と燃費向上シナリオ②(国内需要の大半がHV)のリチウム使用量の合計
- ③ ①の値と原油価格変動シナリオ①(国内需要の大半がEV)のリチウム使用量の合計
- ④ ①の値と需要量変動シナリオ④(国内自動車需要増加)のリチウム使用量の合計
- ⑤ ①の値と需要量変動シナリオ⑨(国内需要・輸出入量増加)のリチウム使用量の合計
- ⑥ ①の値と電池技術向上シナリオ③(リチウム使用率30%減少)でのリチウム使用量の合計

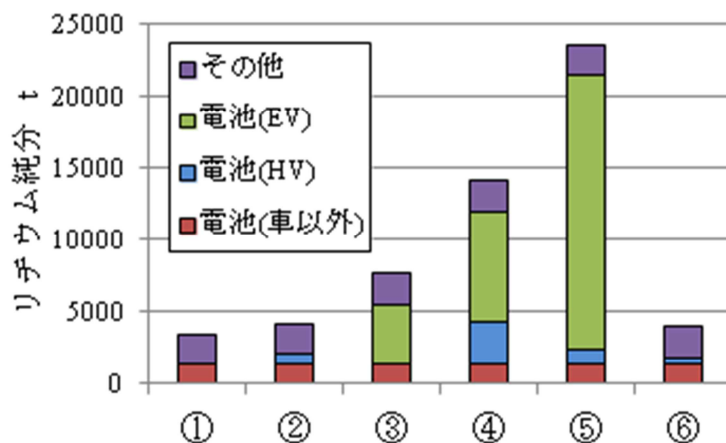


図 4-61 各シナリオのリチウム量比較

以上を各シナリオでの将来的なりチウム需要とした場合の 2007 年と比較した全リチウム需要増加割合と電池へのリチウム需要増加割合を表 32 に示した。

表 4-8 HV・EVが増加した時のT5におけるリチウム需要増加予測

	シナリオでの総需要	シナリオでのリチウムイオン電池への需要
	/2007年の総需要	/2007年のリチウムイオン電池への需要
①	1.0	1.0
②	1.2	1.6
③	2.2	4.2
④	4.1	9.1
⑤	6.8	16.3
⑥	1.1	1.4

一番需要が増えたのは⑤の国内需要も輸出入も増加したシナリオで、リチウム総需要では 2007 年の約 7 倍まで増加することが予想された。自動車の生産量が等しい場合でリチウム使用が一番多くなるのは、③の原油価格が上昇した時との結果を得た。

2050年におけるコスト最小化シナリオでCO₂排出量が最も減少したのは、生産量と輸出入量が減少するシナリオ、次いで燃費が向上しハイブリッドカーの市場になるシナリオであった。このままハイブリッドカーの燃費が向上し続ける場合、CO₂排出量もリチウム使用増加量も比較的少ない自動車市場となることが示唆された。循環型社会に向け、今後は燃費向上に向けた技術の向上を期待したい。

原油価格が今後も上昇を続ける場合、電気自動車の需要が高まり、リチウムの消費量が大幅に増加する可能性が本研究結果から示唆された。リチウムの埋蔵量はリチウム重量で2,916万tとされており蓄えはあるものの、供給力が追いつかない危険性もある。また、自動車国内需要や自動車生産量が増加し続けると、それに合わせてリチウムの使用量も大幅に増加することが予測される。この場合、原油価格の上昇などに伴うリチウム需要増を見据えたリチウム確保の必要性も高まり、リチウムの回収・再生の重要性も高まってくる。原油価格の変動に対応できるよう、長期的展望にたった資源戦略が重要となってくる。

本研究のシミュレーション分析では、自動車の需要予測に素材戦略モデルを使用した。このモデルの物量マトリックスデータは2000年のものがベースとなっている。最新の産業連関統計や、他の情報に適宜更新し、より正確な将来需要予測を継続的に行うことが今後の課題である。

5. 研究発表

著書

1. 中村崇, 有山達郎, 井上亮, 葛西栄輝, 北村信也, 佐藤修彰, 柴田悦郎, 柴田浩幸、「サステナブル金属素材プロセス入門ー循環型社会の構築のためにー」、アグネ技術センター (2009)
2. 町田 憲一監修, 中村 崇 レアアースの最新技術動向と資源戦略 ,121-126(2011.12)

査読論文

1. 狩野真吾, 白鳥寿一, 中村崇 : 使用済み小型電子・電気機器の回収試験と回収量評価, 資源と素材(J.MMIJ), 125,(10) 547-554 (2009)

総説・解説など

1. 中村 崇、小型電子機器のリサイクルを化学の視点から考える、化学と教育 58(1)、4-7 (2010.1)
2. 中村 崇、小型家電の回収システムの提案と技術開発 (A Proposal of Collecting System for Small Domestic Applicants and Technological Developments on Treating Them), 自動車技術, 63(11), 96-101 (2009.11)
3. 中村 崇, 白鳥寿一、レアメタルリサイクルで期待される粉体技術、粉体技術, 1(5), 16-21 (2009.5)
4. 中村 崇, 小型家電のリサイクルー人工鉱床の展開ー, 廃棄物資源循環学会誌別冊, 20(2), 70-76 (2009)
5. 中村 崇 “リサイクル工学の今を語る” 廃棄物処理施設技術管理者中央研究集会,1ー14,2010.6.
6. 中村 崇 “レアメタルのリサイクルと代替技術開発の現状” OHM,32ー37,2010.9.
7. 岡部 徹,中村 崇 “レアメタルをめぐる誤解を解く” OHM,44ー47,2010.9.
8. 中村 崇 “都市鉱山レアメタルリサイクル ” 三洋化成ニュース,(466),14-18(2011.5).
9. 中村 崇 “市中廃棄物からのレアアース元素リサイクルの試み ” 機能材料, 31(7) ,45-53 (2011.6)
10. 中村 崇 “クリティカルメタルの資源と循環使用 (Resources of Critical Metals and Their Recycling) ” 季刊 環境研究,(162),49-58(2011.7)
11. 中村 崇 “レアメタル、レアース元素のリサイクル ” 応用物理,80(8),663-668(2011.8)
12. 中村 崇 “小型家電に含有されるレアメタル等の回収・リサイクルのシステムと技術ーEU との比較を中心にー ” 都市清掃,64(303),450-457(2011.9)
13. 中村 崇 “レアメタルのリサイクル技術に関する最新研究 ” 産業と環境, 40(12), 53-56 (2011.12)

14. 中村 崇 “電子機器のリサイクルシステムと技術 ” 月刊 ディスプレイ, 18(5), 60-66 (2012.2)

国際会議

1. T.Nakamura, A strategy of metal resources for sustainable development in Japan, Workshop on Frontier Materials (FRONTIER-2009) Sendai, Japan, (2009,11.30-2009,12.2)
2. T.Nakamura, Recovery Technology of Rare Metals from Waste of Electric & Electronic Equipments, The ICEM9 Hanna, Japan (2009,11.25-2009.11.26)
3. S. Matsumoto, T. Nakamura, E. Shibata, M. Tanaka, T. Kamiya, Recovery of Rare Earth Metal in Nd-Fe-B Magnets from Wasted Electrical Appliances, The 10th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology (EARTH 2009), Korea, Jeju (2009.11.2-2009.11.6)
4. T.Nakamura, Present Status of Recycling of Non-ferrous Metals in Japan, China-Japan Joint Forum on Energy and Environmental Issues for Metallurgical and Material Processes. Kunming, China (2009.9.26-2009.9.29)
5. T.Nakamura and A.Muramatsu, and Y.Kawazoe, Development of Technologies for Reducing Indium Usage in a Transparent Conducting Electrode, Russian-Japanese workshop (review conference) “State of materials research and new trends in material science” Novosibirsk, Russia (2009.8.3-2009.8.5)
6. Takashi Nakamura, Etsuro Shibata, Toshikazu Shiratori “A Possibility of CRT Recycling in a Lead Smelter from an Environmental Point of View” Conference of Metallurgists 2010, 2010.10
7. Takashi Nakamura “E-Scrap Recycling in Japan ” Sustainability Symposium, オーストラリア, (2011.7)
8. Sylwia Oleszek, Mariusz Grabda, Etsuro Shibata, Takashi Nakamura “Studies on behaviour of copper during thermal treatment of E-waste ” 2011 IEEE International Conference on Waste Recycling, Ecology and Environment, China, Mianyang, (2011.10.15-2011.10.22)
9. Takashi Nakamura “E-Scrap Recycling System and Technologies in Japan” Fray Symposium, メキシコ, (2011.11)
10. Sayaka Ita, Etsuro Shibata, Takashi Nakamura “E-scrap Recycling System And Technologies In Japan ” Fray International Symposium, Mexico, Cancun, (2011.11.27-2011.12.1)
11. T.Nakamura “Recycling System and Technologies of Electronics Appliances Including LCD in Japan” The 18 th International Display Workshops, 日本, 名古屋市, (2011.12.7-2011.12.9)
12. Takashi Nakamura, A. Inaba “A Strategy of Metal Supply for Sustainable Development and Supporting Technologies for It in Japan ” TMS2012 141st Annual Meeting, アメリカ, フロリダ, (2012.3.12)

国内学会

1. 板明果、柴田悦郎、中村崇、ネオジム磁石を通した Nd と Dy の国内マテリアルフロー、第 159 回春季講演大会(日本鉄鋼協会)、(2010.3.29)
2. 中村 崇、クリティカルメタルの資源と循環使用、日本学術会議 材料工学シンポジウムー日本の生きるべき新しいパラダイムと材料工学ー、(2010, 1.29)
3. 中村 崇、金属素材から見た資源循環のシステムと技術、平成 21 年度循環型社会形成推進研究発表会、(2009.10.27)
4. 中村 崇、クリティカルメタル循環使用へのロードマップ、第 4 回産総研レアメタルシンポジウム、(2009.10.26)
5. 中村 崇、金属資源循環システム構築とその技術開発、日本表面科学会関西支部&日本真空協会関西支部合同セミナー2009、神戸 (2009.7.3)
6. 中村 崇、非鉄金属リサイクルの現状と課題ー非鉄金属企業の役割・期待ー、平成 21 年製錬現場担当者会議、東京 (2009.6.10-2009.6.12)
7. 中村 崇、ELV も含む廃電子機器からのレアメタルリサイクルの現状と将来、2009NEW 環境展、東京 (2009.5.26-2009.5.29)
8. 中村 崇 “資源循環型社会構築とその環境への影響” 第 24 回環境工学連行講演会 (2010.4)
9. 中村 崇 “リサイクル工学の今を語る” 平成 22 年度廃棄物処理施設技術管理者中央研究集会 (2010.6.21)
10. 中村 崇 “レアメタルリサイクルの現状と課題” 平成 22 年度九州環境クラスター大学 (2010.9)
11. 白鳥寿一、目次英哉、中村 崇 “EU の WEEE に関する最近の動向 ” 平成 22 年度資源素材学会秋季大会、(2010.9)
12. 板 明果、柴田悦郎、中村 崇 “自動車リサイクルにおける E-Scrap の回収問題 ” 平成 22 年度資源素材学会秋季大会、(2010.9)
13. 中村 崇 “電気炉ならびに高炉ダストの資源化に関する動向 ” 平成 22 年度資源素材学会秋季大会、(2010.9)
14. 中村 崇 “金属資源戦略とそのボトルネック ” グリーン・イノベーション実現に向けての材料研究課題と展望、日本、東京、(2011.6.1)
15. 中村 崇 “非鉄製錬における環境負荷元素の取り扱いの歴史と現状 ” 資源・素材学会平成 24 年度春季大会、東京、(2012.3)
16. 菊地 茂、板 明果、中村 崇 “希少金属含有製品のフロー・含有量の定量化と資源循環の現状 ” 資源・素材学会 平成 24 年度春季大会、東京、(2012.3)
17. 中村 崇 “レアメタルリサイクル技術の最近の動向と課題 ” レアメタルリサイクルセミナーin 福岡、(2012.2.8)