日交研シリーズ A－938

電気自動車の普及とエネルギー安全保障

電気自動車の普及とエネルギー安全保障に
関する研究プロジェクト

２０２６年１０月

公益社団法人日本交通政策研究会

1. “日交研シリーズ”は、公益社団法人 日本交通政策研究会の実施するプロジェクトの研究成果、本研究会の行う講演、座談会の記録、交通問題に関する内外文献の紹介、等々を印刷に付して順次刊行するものである。
2. シリーズはAよりEに至る5つの系列に分かれる。

   シリーズAは、本研究会のプロジェクトの成果である書き下ろし論文を収める。

   シリーズBは、シリーズAに対比して、より時論的、啓蒙的な視点に立つものであり、折にふれ、重要な問題を積極的にとりあげ、講演、座談会、討論会、その他の方法によってとりまとめたものを収める。

   シリーズCは、交通問題に関する内外の資料、文献の翻訳、紹介を内容とする。

   シリーズDは、本研究会会員が他の雑誌等に公けにした論文にして、本研究会の研究調査活動との関連において復刻の価値ありと認められるもののリプリントシリーズである。

   シリーズEは、本研究会が発表する政策上の諸提言を内容とする。
3. 論文等の内容についての責任はそれぞれの著者に存し、本研究会は責任を負わない。
4. 令和2年度以前のシリーズは印刷及び送料実費をもって希望の向きに頒布するものとする。

公益社団法人日本交通政策研究会

代表理事　竹　内　健　蔵

同　中　村　文　彦

令和2年度以前のシリーズの入手をご希望の向きは系列番号を明記の上、下記へお申し込み下さい。

〒102-0073 東京都千代田区九段北1-12-6
守住ビル　4階
公益社団法人日本交通政策研究会
電話（03）3263-1945（代表）
Fax （03）3234-4593
E-Mail:office@nikkoken.or.jp

日交研シリーズ A-938
令和７年度自主研究プロジェクト
電気自動車の普及とエネルギー安全保障
刊行：2026 年 10 月

電気自動車の普及とエネルギー安全保障に関する研究

Energy security issues arising from the spread of electric vehicles

主査：庭田 文近（城西大学総合政策学部教授）
NIWATA, Fumichika

要　旨

気候変動対策としての脱炭素社会への取り組みの１つとして、我が国でも自動車の電動化の流れが起きている。しかしながら、こうした動きは、国内のエネルギー構造に変革をもたらすとともに、エネルギー資源の多くを海外に依存している我が国にとって、エネルギー安全保障上の影響が生じる可能性が大きい。また、その一方で、アメリカでは 2025 年１月に大統領に返り咲いたトランプ政権が電気自動車促進策の撤廃や化石燃料の増産を表明しており、世界の自動車・エネルギーを巡る動きは混沌としてきている。

本研究では、我が国における内燃機関の自動車が電気自動車に全面的に代替された場合のエネルギー安全保障への影響を評価するため、世界の電気自動車市場の動向および各国のスタンスを調査するとともに、我が国における自動車のエネルギー転換について、石油輸入依存度や電力需要の変化、再生可能エネルギーの活用性、エネルギー供給の安定性からエネルギー安全保障を議論してきた。

第１章「世界 EV 市場はなぜ拡大し、なぜ鈍化するのか」は、世界の電気自動車市場の今後の盛衰可能性を示唆する要因やメカニズムを明確化させるべく、因果構造分析を行っている。第２章「EV 全面普及に伴う電力需給問題とリチウム循環経済の数理モデル分析」では、リチウムの中国依存を課題として、EV 普及に伴うリチウムの需給動態を数理モデルで分析し、2030 年代が資源安全保障上の最重要時期であり、リサイクル技術の早期確立が政策的急務であることを論じている。第３章「最適気候政策（DICE モデル）とエネルギー新技術」では、DICE モデルとその批判について紹介するとともに、ノードハウスの no regret policy に鑑み、エネルギー効率を高める新技術の実現可能性について考察している。

キーワード：電気自動車、エネルギー安全保障、気候変動、リチウムイオン電池
Ｋｅｙｗｏｒｄｓ：electric vehicles、energy security、climate change、lithium-ion batteries

目　　次

１章　世界 EV 市場はなぜ拡大し、なぜ鈍化するのか
——IEA Global EV Outlook 2025 に基づく EV 販売動向の因果構造分析 ……1
1.1　はじめに ……1
1.2　世界の EV 販売シェアの急拡大のメカニズム ……3
1.3　「コスト・製品・技術による EV の採用拡大」シナリオ（ルート A） ……5
1.4　「政策・インフラ・系統統合による拡大」シナリオ（ルート B） …… 14
1.5　「通商・マクロ・企業戦略の逆風」シナリオ（ルート C） …… 18
1.6　結論 …… 25

２章　EV 全面普及に伴う電力需給問題とリチウム循環経済の数理モデル分析…… 27
2.1　はじめに …… 27
2.2　先行研究レビュー …… 28
2.3　EV 普及と大規模電力貯蔵の実現可能性…… 30
2.4　電気自動車とリチウム循環経済の数理モデル統合…… 34
2.5　おわりに：全体のまとめと今後の課題…… 41

３章　最適気候政策（DICE モデル）とエネルギー新技術…… 43
3.1　はじめに …… 43
3.2　DICE モデルとその批判…… 44
3.3　エネルギー新技術 …… 56
3.4　おわりに …… 75

令和７年度研究メンバーおよび執筆者

（敬称略・順不同、※執筆者）

主　　査	庭田　文近	（城西大学 総合政策学部 教授）
メンバー	臼井　　功	（横浜国立大学 名誉教授）　※第３章
	關　　哲雄	（立正大学 名誉教授）
	朝日　譲治	（明海大学 名誉教授）
	樋口　清秀	（早稲田大学 名誉教授）
	上遠野武司	（大東文化大学 名誉教授）
	倉橋　　透	（獨協大学 経済学部 教授）
	朝日ちさと	（東京都立大学 都市環境学部 教授）
	藤井　秀昭	（京都産業大学 経済学部 教授）　※第１章
	村野　清文	（三井住友海上火災保険株式会社 顧問）
	矢澤　信雄	（公益社団法人未来工学研究所 シニア研究員）　※第２章
	森　由美子	（東海大学 政治経済学部 教授）

1章　世界 EV 市場はなぜ拡大し、なぜ鈍化するのか

――IEA Global EV Outlook 2025 に基づく EV 販売動向の因果構造分析[1]

1.1　はじめに

本稿は、国際エネルギー機関（International Energy Agency：IEA）が「Global EV Outlook」（2019 年から 2025 年までの公表）で報告した世界の電気自動車（Electric Vehicle，以下 EV）市場に関する調査研究および分析報告に基づいて、「世界の EV 市場動向」についての議論すべき重要 30 項目の論点を抽出して分析を加えたものである。ここに挙げる論点そのものは、それぞれが「世界の EV 市場の動向」を理解するうえで重要な論点ではあるが、同時に、論点相互間で有機的な関係をもつものでもある。これらのつながりを詳細に分析することは、世界の EV 市場が抱える「問題の構造」を正確に理解することにほかならない。

本稿では、**表 1.1** の「１．世界の EV 販売シェアの急拡大」のメカニズムを構造化して可視化することを試みた。「１．世界の EV 販売シェアの急拡大」の論点は、重要 30 項目の全体を、ある意味で、総括したものと位置づけられる。そこで本稿では、重要 30 項目の論点を踏まえながら、*Global EV Outlook 2025* などの情報に大きく依存するかたちで、世界 EV 市場の「問題の構造」を明らかにする。2026 年 5 月時点での世界 EV 市場は、中国の存在感が圧倒的である。2019 年から 2025 年までの事実に基づいて「世界 EV 市場はなぜ拡大し、なぜ鈍化するのか」との問題意識に立ち、世界 EV 市場の今後の盛衰可能性を示唆する要因やメカニズムを明確化するため、因果構造分析を行う。なお、本章では EV を BEV および PHEV 等のプラグイン車両を指すものとする。

[1] 本稿の多くの部分は、IEA, *Global EV Outlook 2025*（2025 年 5 月公表）および 2019 年～2024 年版の同報告書の記述内容と公開データに基づいて、それらに追加的な情報を加えて、Copilot の推論等を活用して整理ならびに分析をおこなったものである。考察と最終的な記述内容及び見解は筆者によるものである。

表 1.1　「世界の EV 市場の動向」についての 30 項目の論点

１．世界の EV 販売シェアの急拡大	16. EV 購入価格の地域格差
２．中国市場の圧倒的リード	17. TCO 優位性の拡大
３．欧州市場の停滞と政策転換	18. 補助金縮小と市場自立化
４．米国市場の政策不確実性	19. 中古 EV 市場の未整備
５．新興国市場の急成長	20. 低所得層アクセスと社会的公正性
６．中国の製造支配力	21. 充電インフラ不足
７．欧州の生産停滞と輸入依存	22. 高速充電・メガワット充電
８．北米のメキシコ生産拡大	23. スマート充電・V2G 統合
９．新興国での中国 OEM 現地生産	24. 電力需要と再エネ統合
10. 国際貿易摩擦と EV 関税競争	25. 水素インフラと FCEV の限定的役割
11. モデル数の急増	26. 貿易摩擦・関税リスク
12. SUV 偏重と小型車電動化の課題	27. GDP 成長鈍化と需要減退
13. 航続距離の最適化	28. 原油価格下落による EV 経済性低下
14. PHEV・EREV の台頭	29. OEM の電動化目標後退
15. バッテリー価格低下と LFP 普及	30. 税収減と公平な課税改革

（出所）IEA、*Global EV Outlook*（2019 年版～2025 年版）の内容に基づいて筆者が論点抽出

1.2　世界の EV 販売シェアの急拡大のメカニズム

1.2.1　世界の EV 販売市場の全体動向（2014～2024 年）

世界の電気自動車（Electric Vehicle，以下 EV）販売市場は、2014～2024 年の約 10 年間で急速な拡大を遂げた。2014 年時点における世界の EV 販売台数は約 50 万台、自動車販売シェアも 1%未満にとどまっていたが、その後は政策支援、技術革新、コスト低下が相互に作用し、市場は持続的に拡大した。2018 年には販売台数が約 200 万台、シェアは 2%程度に達し、2021 年には約 660 万台、シェア 9%へと急伸した。さらに 2024 年には世界販売台数が約 1,700 万台に達し、新車販売に占める EV シェアは 20%を超えている。

この拡大を支えた最大の要因は、バッテリー価格の大幅な低下である。電池パック価格は 2015 年比で約 70%低下し、EV の車両価格と総所有コスト（Total Cost of Ownership：TCO）の両面で競争力が高まった。加えて、モデル数の急増や航続距離の最適化が進展し、EV は一部の先進的消費者向け製品から、大衆市場向けの商品へと位置づけを変化させた。結果として、補助金に依存しない形での市場拡大が可能となり、EV 市場は自立化の段階へ移行しつつある。

1.2.2　地域別にみた EV 販売市場の動向

地域別にみると、中国市場が世界の EV 普及を主導してきた。2024 年の中国における EV 販売台数は約 1,100 万台に達し、世界全体の約 3 分の 2 を占めている。国内新車販売の約半数が EV であり、電池価格の大幅な低下、小型 EV の量産化、強力な産業政策がこの成長を支えてきた。

欧州市場では、2019 年以降、CO_2規制と購入補助金を背景に急成長したが、2024 年時点では販売シェアは約 20%で横ばいとなっている。とくにドイツなど主要国で補助金が縮小・廃止されたことが成長の鈍化要因となった。一方、英国やノルウェーでは ZEV 義務や税制措置により高水準の EV シェアが維持されている。

米国市場では、EV 販売は増加傾向にあるものの、2024 年時点の販売シェアは約 10%にとどまっている。車両価格の高さ、小型 EV の不足、政策の不確実性が普及の制約要因となっている。

他方、新興国市場では中国製 EV の価格競争力を背景に、東南アジアや中南米を中心として高い成長率がみられ、今後の拡大余地が大きい。

1.2.3　EV 車種構成の変化と特徴

過去 10 年間における世界の EV 販売市場は，車種構成の面でも大きな変化を示してきた。2014 年から 2017 年にかけては, プラグインハイブリッド自動車（Plug-in Hybrid Electric Vehicle、以下 PHEV）およびハイブリッド自動車（Hybrid Electric Vehicle、以下 HEV）が EV 販売の相当部分を占め，航続距離不安や充電インフラ不足への過渡的対応として市場を支えていた。一方，バッテリー式電気自動車（Battery Electric Vehicle，以下 BEV）の販売比率は当初限定的であった。

しかし，2018 年以降，電池価格低下と航続距離改善を背景として，BEV の販売は加速し，市場構成の中心へと移行した。とくに 2020 年以降は，中国および欧州市場を中心に BEV 販売が急増し，2024 年には世界の EV 販売の大半を BEV が占める構造が形成されている。これに対し，PHEV は欧州では環境規制の厳格化により比重が低下する一方，中国では一定の需要を維持している。HEV は EV 市場全体の成長のなかで相対的な存在感を低下させた。水素燃料電池車（FCEV）などその他の電動車は，技術的・インフラ的制約から販売規模は限定的にとどまっている。

加えて、レンジエクステンダー式電気自動車（Extended-Range Electric Vehicle、以下 EREV）は、駆動をすべて電動モーターで行い、内燃機関を発電専用として搭載する電動車である。外部充電が可能であり、日常走行はバッテリー電力で賄い、電力量が低下した場合のみ内燃機関が発電を行う点に特徴がある。このため走行性能や静粛性はバッテリー式電気自動車と同等である一方、長距離走行時の航続距離不安を大きく低減できる。

近年、EREV は中国市場において急速に販売が拡大している。2020 年以降、SUV セグメントを中心に投入モデル数と販売台数が急増し、2024 年には電動車販売全体の一割を超える規模に成長した。とくに理想汽車をはじめとする中国 OEM（Original Equipment Manufacturer, 以下 OEM）が EREV 専業に近い戦略を展開し、中大型車需要と高い親和性を示している。中国では EREV が新エネルギー車として制度上 EV に分類され、税制優遇の対象となる点も普及を後押ししている。このように EREV は、中国において実用性と制度適合性を兼ね備えた主要な電動車類型として確立しつつある。

さらに、EV 車種構成の観点では、過去 10 年間でモデル数と車種の多様化が著しく進展した。初期の EV 市場は小型車や特定用途車が中心であったが、近年ではスポーツ・ユーティリティ・ビークル（SUV）セグメントの比率が急上昇している。2024 年には、世界で販売される EV モデルの約 70%が SUV または大型車に分類されている。

一方、中国市場では小型車セグメントの電動化がほぼ完了しており、日常利用に適した低価格 EV が普及の中核を担っている。これに対し、欧州および米国では高収益を重視した SUV 偏重が続き、小型 EV の供給不足が価格プレミアムの要因となっている。航続距離について

は、平均値は約 340km 前後で推移しており、過度な長距離化ではなく、利用実態に応じた最適化が進んでいる。

以上のように、世界の EV 市場は地域ごとに異なる車種構成や普及経路を示しているが、とりわけ中国市場の圧倒的な存在が全体動向を規定してきた点は重要である。2024 年時点で世界 EV 販売の約 3 分の 2 を中国が占め、小型車からスポーツ・ユーティリティ・ビークルまで幅広いセグメントにおいて電動化が進展している。電池価格の大幅な低下、リン酸鉄リチウムイオン二次電池の高い普及率、ならびに中国 OEM による大量生産と迅速なモデル投入が、価格競争力とモデル多様化を同時に実現してきた。この中国主導の市場拡大は、新興国市場への波及を通じて世界全体の EV 普及を牽引する一方、欧州や米国市場における価格戦略や車種構成にも影響を与えている。したがって、世界の EV 市場は一様に成熟しているのではなく、中国を中核とした構造的拡大のうえに、地域ごとの制度や需要特性が重層的に積み重なり、結果として着実な普及拡大が実現されてきたと位置づけることができる。

次節以降においては、世界の EV 販売動向の因果構造について、「コスト・製品・技術による EV の採用拡大」シナリオを「ルート A」、「政策・インフラ・系統統合による拡大」シナリオをルート B、「通商・マクロ・企業戦略の逆風」シナリオをルート C として分けることにより、それぞれのシナリオにおけるポジティブ要因とネガティブ要因を可視化する。これらにより、3 種類のシナリオの違いによって、世界の EV 販売動向の因果構造と問題構造を理解することができる。

1.3 「コスト・製品・技術による EV の採用拡大」シナリオ（ルート A）

1.3.1 ポジティブ要因（因果構造）

（1）バッテリー価格低下と LFP（リン酸鉄リチウム）電池の普及（15）[2]

近年の EV 市場拡大において、バッテリー価格の低下は、EV の総所有コスト（Total Cost of Ownership：TCO）を改善し、内燃機関車（Internal Combustion Engine Vehicle，以下 ICE）との価格格差を縮小させる主要因となっている。国際エネルギー機関（International Energy Agency：IEA）によれば、2024 年の電池パック価格は世界平均で約 90 米ドル／kWh まで低下し、2015 年比で約 70%の下落となった。とりわけ中国では前年比約 30%の大幅な低下が確認され、欧州および米国でも 10～15%の低下がみられた。この価格低下を牽引しているのが、リン酸鉄

[2] 括弧内数字は表 1.1 のなかで示された項目番号を示す。以下同じ。

リチウムイオン二次電池（Lithium Iron Phosphate Battery，以下 LFP 電池）の普及である。

LFP 電池は、ニッケルやコバルトといった希少金属を使用しないため、原材料コストが低く、資源供給リスクが相対的に小さい。また、熱安定性が高く発火リスクが低いことから、安全性の面でも優位性を有し、都市型 EV や商用車用途に適している。こうした特性により、中国では 2024 年時点で LFP 電池の採用比率が 70%を超え、低価格帯 EV のモデル展開が加速した。もっとも、LFP 電池は、ニッケル・コバルト・マンガン系正極材リチウムイオン二次電池（Lithium Nickel Cobalt Manganese Oxide Battery，以下 NCM 電池）と比べてエネルギー密度が低く、航続距離は相対的に短いが、都市走行や短距離利用においては実用上十分な性能を確保している。

さらに、LFP 電池はサイクル寿命が長く、充放電を繰り返しても性能劣化が小さいため、中古 EV 市場や定置用蓄電池としての二次利用にも適合的である。以上のように、LFP 電池の普及とバッテリー価格低下は、EV の価格競争力と TCO 優位性を同時に高め、市場自立化を下支えする構造的要因として位置づけられる。

（2）TCO 優位性の拡大（17）

EV の総所有コスト（TCO）は、近年のバッテリー価格低下と性能改善を背景として、内燃機関車（ICE）との比較において明確な優位性を示しつつある。とくにバッテリー価格は 2015 年以降長期的な低下傾向にあり、上記のとおり、2024 年には世界平均で約 90 米ドル／kWh まで下落した。これにより EV の車両本体価格が引き下げられると同時に、航続距離の拡大や電費性能の改善が進み、走行コストおよび保守コストの両面で ICE 車との差が拡大している。

EV は構造的に可動部品が少なく、エンジンオイル交換や排気系部品の保守が不要であるため、維持管理費が低い。また、電力価格が相対的に安定している地域では、走行コストがガソリン車よりも一貫して低水準に抑えられる傾向が確認されている。これらの要因が累積することで、使用年数が長期化するほど EV の TCO 優位性は顕在化する。さらに、こうした EV の TCO 優位性の構造については、2026 年 2 月末以降の中東情勢の混乱を要因とする原油価格高騰が続く環境条件下では、EV の TCO 優位性は高まる公算が大きいとみられる。

一方、IEA の分析によれば、中国市場を中心に、すでに補助金を前提としない状況下でも、EV が ICE 車と同等、あるいはそれ以下の TCO を実現する事例が増加している。欧州や米国においても、補助金縮小後の段階において、電池価格の低下とモデル多様化が進めば、EV の市場競争力は中長期的に維持されると見込まれている。以上のように、TCO の観点からみた EV の経済性向上は、政策依存からの脱却と市場自立化を支える重要な基盤として位置づけ

られる。

(3) EV 購入価格の国・地域格差縮小（16）

EV 購入価格は、かつて国や地域間で大きな格差が存在していたが、近年はその差が段階的に縮小しつつある。IEA によれば、この動向の背景には、バッテリー価格低下、中国を中心とする生産集約、ならびに国際的なモデル展開の加速があるとされる。とくに中国では、電池パック価格の大幅な下落と量産効果により、小型 EV を中心に内燃機関車（ICE）と同等、あるいはそれ以下の価格での販売が一般化している。

2024 年時点で、中国市場では BEV（Battery Electric Vehicle（バッテリー式電気自動車））の約 3 分の 2 が同クラスの ICE 車よりも安価に提供されており、スポーツ・ユーティリティ・ビークル（Sport Utility Vehicle，以下 SUV）セグメントにおいても価格パリティが達成されつつある。この価格競争力は、中国の自動車 OEM（Original Equipment Manufacturer，以下 OEM）による小型車セグメントのほぼ完全な電動化と、LFP（リン酸鉄リチウム）電池の高い普及率によって支えられている。こうした低価格 EV は、輸出を通じて新興国市場にも波及し、タイやブラジルなどでは EV と ICE 車の価格差が急速に縮小している。

一方、欧州および米国では、依然として EV 購入価格にプレミアムが残存しているものの、その水準は徐々に低下している。欧州では補助金縮小が進むなかで、2 万 5,000 ユーロ未満の低価格 EV 投入計画が複数の OEM によって進められており、価格格差の是正が見込まれている。米国においても、政策要件付きではあるが、価格引下げとモデル多様化が進展している。以上のように、EV 購入価格の地域格差は、電池コスト低下と市場競争を通じて緩和されつつあり、世界的な普及の裾野を拡大する要因となっている。

(4) モデル数の急増（11）

近年の EV 市場においては、バッテリー価格低下を背景として、自動車 OEM による電動車モデルの投入数が急速に拡大している。IEA によれば、電池コストの低下は車両設計の自由度を高め、従来は価格制約から成立しにくかった小型車や中価格帯モデルの電動化を可能にした。この結果、量販セグメントを含む幅広い車種区分において、EV モデルの多様化が進展している。

とくに中国市場では、小型車からスポーツ・ユーティリティ・ビークル（SUV）セグメントに至るまで、多数の電動モデルが短期間に投入された。LFP（リン酸鉄リチウムイオン二次電池）の普及と垂直統合型サプライチェーンの確立により、OEM は低価格かつ差別化されたモデル展開を実現している。一方、欧州や米国においても、補助金縮小を見据えた中長期戦略として、価格帯や航続距離の異なる複数の EV モデルを同時に投入する動きが強まって

いる。

モデル数の増加は、消費者の選択肢を拡大すると同時に、EV に対する心理的・実務的障壁を低下させる効果を持つ。車種や価格帯、用途に応じた選択が可能となることで、EV は特定の先進的消費者層に限られた存在から、一般的な移動手段として位置づけられつつある。以上のように、モデル数の急増は、価格低下や TCO 優位性と相互に作用しながら、EV 採用を加速させる重要な構造要因として機能している。

(5) 航続距離の最適化（13）

EV の航続距離は、バッテリー効率の改善や車両の軽量化を背景として、過去 10 年間で着実に向上してきた。IEA によれば、世界における EV の平均航続距離は 2015 年から 2020 年にかけて大きく伸長し、その後は約 340km 前後で推移している。この動きは、単なる航続距離の最大化から、用途に応じた「最適化」へと技術開発の重点が移行していることを示している。

バッテリーセルの高効率化やエネルギー管理技術の進展に加え、車体の軽量化や空力性能の向上は、同一容量の電池でより長い走行距離を実現することを可能にした。とくに中国市場では、コスト競争力を重視する戦略のもとで、過度な大容量電池を避け、都市利用や日常走行に十分な航続距離を確保するモデル設計が主流となっている。これにより、車両価格と資源使用量を抑制しつつ、実用性を確保する構造が形成された。

航続距離の最適化は、「航続距離不安」と呼ばれる消費者の心理的障壁を低減する効果も有している。充電インフラの整備や高速充電技術の進展と組み合わさることで、必ずしも長距離航続を備えた車両でなくとも、実用上の不便は生じにくくなっている。以上のように、航続距離の最適化は、コスト低下や TCO 優位性と相互補完的に作用し、EV 採用を阻害してきた技術的・認知的障壁を緩和する重要な要因として位置づけられる。

(6) 高速充電・メガワット充電（22）

高速充電技術およびメガワット級充電の進展は、EV の長距離利用における利便性を大きく向上させ、普及拡大を下支えする重要な要素となっている。近年、150kW 以上の高速充電器の設置が世界的に拡大し、主要幹線道路における充電密度も着実に高まっている。これにより、長距離移動時における充電待ち時間が大幅に短縮され、航続距離に対する消費者の不安は緩和されつつある。

さらに近年は、トラックやバスなどの商用車、大型車両の電動化を視野に入れたメガワット級充電技術の導入が進んでいる。メガワット充電は、数百 kWh 規模の大容量バッテリーを短時間で充電することを可能にし、運行効率が重視される物流・公共輸送分野において、電

動化の実用性を飛躍的に高める技術である。とくに中国や欧州では、大型商用 EV と高出力充電インフラを一体的に整備する動きがみられ、長距離輸送や都市間輸送への適用が現実段階に入りつつある。

高速充電およびメガワット充電の普及は、単に利便性を向上させるにとどまらず、バッテリー容量の過度な拡大を抑制し、車両価格および資源投入量の最適化にも寄与する。このように、高出力充電インフラの整備は、乗用車から商用車に至る EV 利用範囲を拡張し、電動化の対象領域を広げる基盤として位置づけられる。

1.3.2　ネガティブ要因（因果構造）

SUV 依存への偏重（12）

近年の世界の EV 市場では、車種構成において SUV や大型車への偏重が進行しており、これは普及拡大に対する重要な制約要因となっている。2024 年時点で、世界に投入されている EV モデルの約 7 割が SUV や大型車、ピックアップトラックに集中しており、とくに米国では EV 販売の約 4 分の 3、欧州でも約 6 割を SUV が占めている。一方、小型セグメントにおける EV の供給は限定的であり、車種選択の幅が大きく歪んでいる。

SUV は車体重量と空気抵抗が大きく、大容量バッテリーを必要とするため、製造コストと車両価格が上昇しやすい。欧州では小型 BEV が同クラスの内燃機関車に比べて約 45％高く、SUV でも約 20％の価格プレミアムが残存している。米国においても BEV は平均で内燃機関車より約 30％高価であり、3 万ドル未満の BEV モデルが極めて少ないことが普及のボトルネックとなっている。この結果、燃料費や保守費を含めた総所有コスト（TCO）における EV の優位性は、SUV 中心の市場構成によって大きく損なわれている。

また、小型 BEV の不足は、都市部の短距離利用者や低所得層、集合住宅居住者といった潜在需要層へのアクセスを制限している。対照的に、中国では小型車セグメントで既に電動化された割合が約 9 割超に達しているとの推計もあり、低価格モデルの豊富さが急速な普及を支えている。以上のように、SUV 偏重は企業収益や消費者嗜好への短期的対応として合理性を持つ一方で、価格障壁を固定化し、EV 市場の裾野拡大と社会的包摂性を阻害する構造的課題として位置づけられる。

1.3.3　「コスト・製品・技術による EV の採用拡大」シナリオ（ルート A）が示す方向性

EV 市場の拡大を支える因果構造は、単一の技術進歩によって説明されるものではなく、コスト低下、製品設計、利用環境、消費者認知が段階的に連鎖する構造として理解する必要がある。因果構造マップ（ルート A）が示すように、この連鎖の起点に位置づけられるのが、

バッテリー価格低下と LFP（リン酸鉄リチウム）電池の普及である。

電池価格は 2015 年以降大幅に低下し、2024 年には世界平均で約 90 米ドル／kWh に達した。とくに中国では LFP 電池の普及により電池コストが急低下し、これが EV の車両価格および耐用年数を通じた総所有コスト（TCO）を同時に引き下げた。EV は構造的に保守費用が低く、走行コストも安定しているため、使用期間が長期化するほど TCO 優位性が顕在化する。この TCO 改善は、EV の競争力を補助金依存から切り離し、市場自立化を可能にする基盤となっている。

TCO 優位性の拡大は、EV 購入価格の国・地域間格差縮小にも波及する。中国では、小型車を中心に EV が ICE 車と同等またはそれ以下の価格で普及し、その価格競争力が新興国市場にも波及した。これにより、EV は特定の高所得層向け商品から、より広い所得層が選択可能な移動手段へと位置づけを変えつつある。

価格低下とコスト見通しの改善は、自動車 OEM の投資判断を変化させ、EV モデル数の急増をもたらした。小型車から SUV まで幅広い価格帯・用途のモデルが投入され、消費者の選択肢が拡大したことで、「EV は自分の利用に合わない」という心理的障壁が低下している。さらに、航続距離の最適化という設計思想への転換も重要である。過度な長距離化を避け、日常利用に十分な航続距離を確保する設計は、車両価格と資源投入量を抑制し、実用性と経済性の両立を可能にした。

この航続距離最適化は、高速充電およびメガワット充電の普及と相互に補完し合う。高出力充電インフラの整備により、必ずしも大容量バッテリーを搭載しなくても長距離利用が可能となり、航続距離不安は緩和されつつある。商用車・大型車においても、メガワット充電は運行効率を高め、電動化の適用範囲を拡張している。

一方、SUV 偏重はこの正の因果連鎖に逆方向から作用する要因である。大型 SUV は高価格・大容量電池を前提とするため、TCO 優位性を弱め、小型・低価格 EV の供給不足を招く。とくに欧米市場では、SUV 偏重が価格障壁を固定化し、EV 普及の裾野拡大を制約している。以上のように、EV 市場の持続的拡大は、コスト低下を起点とする正の因果構造をいかに強化し、SUV 偏重という逆因果を抑制できるかに左右されている。

図 1.1 では、こうした内容を可視化している。

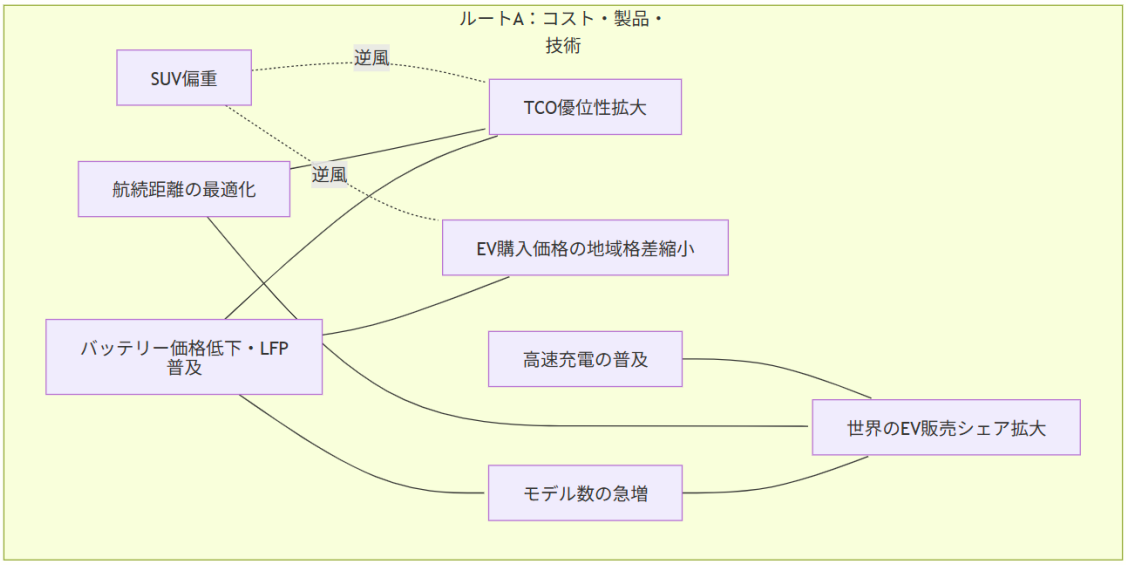


図 1.1　コスト・製品・技術による採用拡大【ルート A】　の因果構造

（註）電池価格低下（LFP 普及）→ TCO 優位性拡大／価格格差縮小 → モデル数急増 → 世界の EV 販売シェア拡大

航続距離の最適化 → TCO 優位性拡大 → 世界の EV 販売シェア拡大

高速充電・メガワット級の普及 → 受容性向上 → 世界の EV 販売シェア拡大

SUV 偏重は、TCO 優位や価格格差の面で逆風に働く

（出所）IEA、Global EV Outlook 2025 に基づいて筆者作成

1.3.4　推奨される政策支援の方向性

「ルート A」が示す EV 普及の因果構造は、「バッテリー価格低下」を起点とし、TCO 改善、価格格差縮小、モデル多様化、利用環境の向上を経て販売拡大に至る多段階の連鎖である。この構造を持続的に強化するためには、市場任せでは不十分な領域に政策支援を重点的に投入する必要がある。

第一に、バッテリー価格低下と LFP 普及の加速である。電池コストは EV 経済性の中核であり、次世代 LFP 電池や全固体電池に対する研究開発補助金の継続的投入が不可欠である。あわせて、リチウム・鉄・リンといった基礎原材料のサプライチェーンを安定的に確保する資源政策が求められる。さらに、電池リサイクルの義務化と補助制度を組み合わせることで、再利用・二次利用を通じたコスト低減と資源制約緩和を同時に実現できる。

第二に、TCO 優位性を明確に拡大する政策設計が重要となる。EV 購入時の登録税・自動車税の軽減といった税制優遇は、初期費用負担を下げる即効性を持つ。一方で、燃料課税改革は EV の相対優位性を左右する構造的要因である。ただし、日本では 2025 年末にガソリン暫定税率が廃止されており、EV と ICE 車の価格差が縮小する逆風となる可能性が高い。このため、EV 特化の保険制度やメンテナンスコスト低減策を組み合わせ、TCO 全体での優位

性を補完的に強化する必要がある。

第三に、EV 購入価格の地域格差縮小に向けたターゲティング政策が求められる。価格補助金を一律に配分するのではなく、低所得層や地方部といった価格感応度の高い市場に重点化することで、普及の裾野拡大効果が高まる。また、港湾や物流インフラの整備を通じて輸送コストを削減すれば、輸入 EV の価格低下にも寄与する。

第四に、モデル数の急増を後押しする制度環境の整備である。型式認証の迅速化や規制手続きの合理化は、新規モデル投入までの時間とコストを削減する。加えて、中小 OEM や新興メーカーへの開発支援は、小型車やニッチ用途 EV の多様化を促し、市場の選択肢拡大につながる。

第五に、航続距離の最適化を促す政策誘導が必要である。エコカー減税における航続距離要件を緩和し、都市型・短距離用途 EV も対象とすることで、過度な電池大型化を抑制できる。同時に、充電インフラ整備を進めることで航続距離不安を政策的に補完し、消費者の認知面の障壁を下げることができる。

第六に、高速充電およびメガワット充電への公共投資が不可欠である。高速道路 SA や物流拠点へのメガワット級充電器設置は、商用車・大型車の電動化を現実の選択肢とする。さらに、再生可能エネルギーと充電網を統合した電力系統強化は、長期的な運用コスト低減と脱炭素効果を高める。

最後に、SUV 偏重という逆風への政策対応も重要である。軽量・都市型 EV への開発インセンティブや補助金を設けると同時に、大型 SUV に対する CO_2規制を厳格化することで、市場構造を価格重視・効率重視の方向へ誘導できる。以上の政策支援は相互に補完し合い、「ルート A」における正の因果連鎖を持続的に強化する役割を果たすと位置づけられる。

1.3.5 「ルート A」に関連する政策支援の成功事例に基づく経済学的分析

「ルート A」に関連する各国の成功事例は、EV 普及が単なる市場競争の結果ではなく、政府介入によって市場の失敗を補完し、正の外部性を内部化した結果である点に共通性がある。とくにバッテリーコスト低下、モデル多様化、充電インフラ整備はいずれも、初期段階では民間主体のみでは供給が不足しやすい領域であり、政策支援が臨界点を越えるための決定的役割を果たした。

第一に、中国の NEV 政策と EU の European Battery Alliance は、規模の経済と学習効果を政策的に加速させた例として位置づけられる。バッテリー産業は固定費比率が高く、初期需要が不足すると単位コストが高止まりする典型的な産業である。中国では補助金と生産義務化によって需要を強制的に創出し、LFP 電池の量産規模を一気に拡大させた。その結果、生産経験の蓄積による学習曲線効果が顕在化し、過去 10 年で約 80%という急激な電池価格低下

が実現した。EU においても、域内生産支援と研究開発補助を組み合わせることで、サプライチェーンの外部依存に伴うリスクとコストを低減し、長期的な平均費用の引下げを図っている。

第二に、韓国や日本の航続距離・電池開発支援は、技術的外部性の内部化という観点から評価できる。高エネルギー密度電池や全固体電池の研究成果は、特定企業に帰属する便益を超えて産業全体に波及する。このため、民間企業だけでは投資が過少になりやすい。R&D 補助金や国家プロジェクトは、こうした外部性を考慮し、社会的に最適な研究水準を確保する役割を果たした。その結果、航続距離改善とモデル多様化が進み、製品差別化を通じて EV 需要の価格弾力性が低下し、市場が安定的に拡大する条件が整えられた。

第三に、日本および欧州の高速充電インフラ整備は、ネットワーク外部性の解消という経済学的意味を持つ。EV の利便性は、車両性能だけでなく充電ネットワークの密度に強く依存する。民間主体は「他者が設置しない限り自分も投資しない」という協調失敗に陥りやすく、政府による初期投資が不可欠となる。日本の 150kW 級急速充電器整備や、EU の TEN-T ネットワークは、利用者数が一定水準を超える臨界点を越えることで、EV 利用の限界効用を大きく高めた。この結果、航続距離不安が低減され、過度な大型バッテリー需要を抑制するという副次的なコスト低減効果も生じている。

第四に、日本の自治体による地域格差是正策は、普及初期における不均衡均衡を修正する政策介入と解釈できる。市場メカニズムのみでは、充電器は高所得・高需要地域に集中し、地方や観光地では供給不足が固定化されやすい。横浜市、札幌市、宇治市の事例は、公共部門が初期需要を下支えすることで民間投資を誘発し、地域間の利用条件格差を縮小した点に意義がある。

以上の成功事例に共通するのは、補助金、規制、インフラ投資を単独で用いるのではなく、因果構造に沿って組み合わせた点である。価格低下を通じた需要創出、ネットワーク外部性の克服、技術外部性の内部化が同時に達成されたとき、「ルート A」は自律的に機能し始める。すなわち、政策支援は恒常的な介入ではなく、市場が自立的成長軌道に入るための「初期条件整備」として位置づけられる点に、経済学的な核心がある。

1.4 「政策・インフラ・系統統合による拡大」シナリオ（ルートB）[3]

1.4.1 ポジティブ要因（因果構造）

「ルートB」は、電気自動車（EV）の普及を、車両コストや製品競争力ではなく、政策制度、インフラ整備、電力系統統合という公共的要因によって下支えする因果構造として位置づけられる。このルートの本質は、市場メカニズムのみでは解消されにくいインフラ不足や系統制約といった構造的ボトルネックを、政策介入によって緩和し、市場の持続的拡大を可能にする点にある。

第一の要因は、公平な課税改革である。従来、ガソリン税や自動車関連税は道路整備財源として重要な役割を果たしてきたが、EV の普及に伴い、これらの税収基盤は中長期的に縮小する。「ルートB」では、燃料課税や道路課金の見直しを通じて、EV 利用者も含めた公平な負担構造を構築し、充電インフラ整備や電力系統強化に必要な財源を安定的に確保することが重視される。この制度的基盤が確立されることで、インフラ投資の不確実性が低下し、民間投資を誘発する環境が整えられる。

第二に、充電インフラ不足の緩和が中核的要因として位置づけられる。EV の利便性は、車両性能のみならず、充電設備へのアクセス条件に大きく依存する。しかし、充電器整備は初期投資負担が大きく、利用者が少ない段階では採算が取りにくい。このため、公共投資と民間連携を組み合わせた整備が不可欠となる。高速道路、都市部、地方部における充電アクセスが改善されることで、「充電できない」という利用制約は実質的に緩和され、EV 利用の心理的・実務的障壁が低下する。

第三に、高速充電およびメガワット充電の整備は、単なる充電器数の拡充を超えた質的改善として重要である。150kW 級以上の高速充電や、メガワット級充電は、長距離移動時の充電時間を大幅に短縮し、EV の利用可能範囲を拡大する。とくに、物流車両やバスなど運行効率が重視される商用分野では、メガワット充電が電動化の前提条件となる。これにより、EV は都市内移動に限定されない汎用的な輸送手段へと位置づけが拡張される。

第四の要因は、スマート充電および V2G（Vehicle-to-Grid）統合である。EV 充電需要は時間帯によって電力系統に大きな負荷を与える可能性があるが、充電時間を制御するスマート充電や、EV を系統側に電力を供給する V2G を導入することで、ピーク時の負荷を分散し、系統安定化に寄与することが可能となる。EV は単なる電力需要主体ではなく、「分散型蓄電池」として機能し、電力システムの柔軟性を高める存在として再定義される。

---

[3] ルート B は EV 普及を阻むインフラ不足や系統制約を政策で緩和し、持続的な成長を支える仕組みをさす。

第五に、電力需要と再生可能エネルギーの統合が、「ルート B」の最終段階として位置づけられる。EV 充電を再生可能エネルギーの発電量が多い時間帯に誘導することで、出力変動の大きい再エネの利用率を高め、系統制約を緩和できる。これにより、EV が使用する電力の脱炭素化が進み、EV の環境価値そのものが最大化される。この段階では、EV 普及は単なる輸送部門の電動化にとどまらず、エネルギーシステム全体の脱炭素化と一体的に進展する。

以上のように、「ルート B」におけるポジティブ要因は、課税制度による財源確保 → インフラ不足の緩和 → 高出力充電による利便性向上 → 系統統合による持続可能性確保という因果連鎖を形成している。この構造が機能することで、補助金縮小後においても EV 市場は短期的な失速を回避し、長期的・持続的な拡大軌道を維持する基盤が形成されると評価できる。

1.4.2　ネガティブ要因（因果構造）

「ルート B」においては、政策・インフラを通じて EV 普及を下支えする正の因果構造が想定される一方、いくつかの逆風要因が短期的な普及を抑制する可能性がある。第一に、補助金縮小は、EV の初期導入段階において需要を顕著に鈍化させる要因となる。EV は依然として内燃機関車と比べて購入価格が高く、補助金は価格差を一時的に是正する役割を果たしてきた。そのため、補助金が急激に縮小される場合、価格感応度の高い消費者層を中心に購入が先送りされ、市場成長は短期的に停滞する傾向がみられる。

第二に、充電インフラ不足は、解消が遅れるほど EV 採用を構造的に抑制する要因となる。充電設備へのアクセスが不十分な状況では、航続距離不安が解消されず、EV の実用性に対する評価は低下する。とくに地方部や集合住宅居住者においては、充電インフラ不足が購入判断の決定的制約となりやすい。この結果、政策的支援が不十分な場合、EV 普及は都市部や特定層に偏在し、市場全体としての拡大テンポが抑制される。以上のネガティブ要因は、「ルート B」における正の因果連鎖を弱める要素として位置づけられる。

1.4.3　中立的要因（因果構造）

水素インフラおよび燃料電池車（Fuel Cell Electric Vehicle：FCEV）は、「ルート B」の因果構造において、中立的要因として位置づけられる。乗用車分野においては、水素供給インフラの整備コストが高く、需要規模も限定的であるため、EV との直接的な競合関係は弱い。一方、商用車分野では、長距離走行や短時間補給が求められる用途において、FCEV は一定の技術的優位性を有し、EV と補完的な関係を形成する可能性がある。ただし、水素インフラ整備は系統統合による EV の普及動態に直接影響を与える水準には至っておらず、現時点では

EV 市場拡大の主要な制約要因とも促進要因ともならない、限定的役割にとどまっている。

図 1.2 では、こうした内容を可視化している。

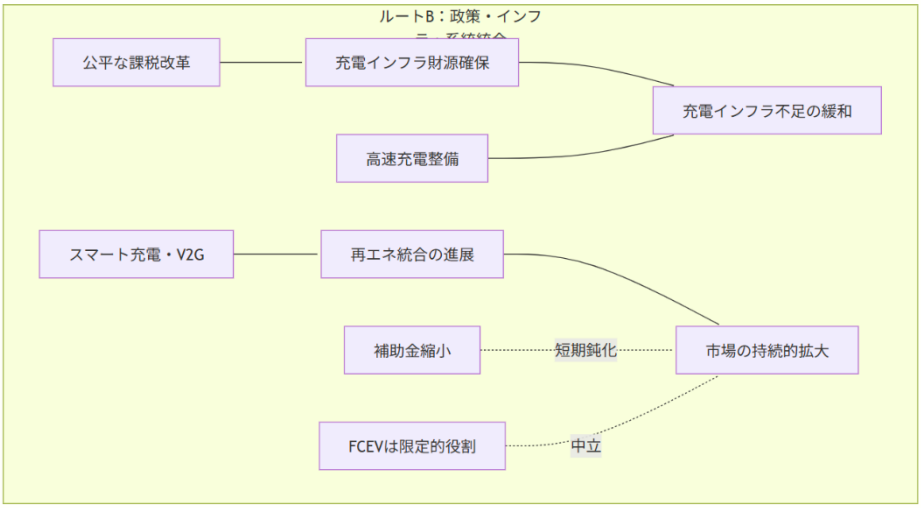


図 1.2　政策・インフラ・系統統合による拡大【ルート B】の因果構造

（註）公平な課税改革（道路課金等）→ 充電インフラ財源の確保 → 不足の緩和 → 市場拡大

スマート充電・V2G → ピーク緩和／再エネ統合 → 市場の持続的拡大

高速充電網の整備は不足の緩和に直結→ （市場の持続的拡大）

補助金縮小は短期的にシェアを鈍化

FCEV は乗用車では限定的役割

（出所）IEA、Global EV Outlook 2025 に基づいて筆者作成

1.4.4　推奨される政策支援の方向性

「ルート B」が示す EV 普及の因果構造は、車両コストや製品性能ではなく、政策制度、充電インフラ、電力系統との統合を通じて市場拡大を下支えする点に特徴がある。この因果構造を機能させるためには、以下のような政策支援を段階的かつ相互補完的に設計することが重要である。

第一に、充電インフラ不足の解消が最優先課題として位置づけられる。充電インフラは典型的な初期投資集約型インフラであり、需要が顕在化する前段階では民間投資が進みにくい。このため、公共投資と官民連携を組み合わせた整備が不可欠となる。日本政府は 2030 年までに充電器 30 万口の設置を目標に掲げ、補助金制度と規制緩和を併用して整備を進めている。とくに、高速道路、都市部、地方部を対象に急速充電器を重点配備することで、「場所による利用格差」を縮小し、EV 利用の実効性を高める効果が期待される。また、自治体と民間企業が協力する PPP（Public Private Partnership）モデルを活用することで、設置コストと運営リスクを分担し、効率的なインフラ展開が可能となる。横浜市の EV タウン構想は、こうした官民連携による先行事例として評価できる。

第二に、高速充電およびメガワット充電の普及である。充電器の単純な数量拡大だけでは、長距離移動時や商用利用における利便性は十分に確保されない。このため、高速道路サービスエリアや物流拠点において、150kW 級以上の高出力急速充電器を設置することが重要となる。日本では、高速道路における 150kW 級充電器の複数口化が進展しており、充電待ち時間の短縮と回転率向上が実現しつつある。これにより、EV は都市内移動に限定されない輸送手段として位置づけられ、普及対象領域が拡張される。

第三に、スマート充電および V2G（Vehicle-to-Grid）統合が、電力系統との整合性を確保するうえで重要である。EV 充電が無秩序に行われる場合、ピーク時の電力需要が増大し、系統制約が顕在化する可能性がある。スマート充電による充電時間制御や、V2G を通じて EV を蓄電池として活用することで、ピーク負荷の分散と系統安定化が可能となる。再生可能エネルギー由来の電力購入契約（再エネ PPA）と組み合わせることで、充電事業の収益性と系統価値を同時に高めるモデルも提案されている。あわせて、EV の充電制御に対して報酬を与える柔軟性報酬制度の導入は、利用者の行動変容を促す制度的手段として有効である。

第四に、再生可能エネルギーとの連携強化である。太陽光発電の出力が高い昼間時間帯に充電を誘導するナッジ政策は、再エネの有効活用と系統負荷緩和の両立を可能にする。環境省の実証事業では、昼間充電率の有意な上昇と CO_2削減効果が確認されており、行動経済学的手法を活用した政策の有効性が示されている。

最後に、公平な課税改革と補助金設計が、全体を支える制度基盤となる。ガソリン税や道路課金の見直しを通じて EV 普及下でも安定したインフラ財源を確保するとともに、補助金は車両購入からインフラ整備・再エネ連携型モデルへと重点を移すことが求められる。これにより、「ルート B」における因果構造は一過性ではなく、持続的な市場拡大を支える制度として機能すると評価できる。

1.4.5 「ルート B」に関連する政策支援の成功事例に基づく経済学的分析

「ルート B」に関連する政策支援の成功事例は、EV 普及が市場メカニズムのみでは十分に進展しない領域において、制度設計と公共投資がいかに経済的制約を緩和し得るかを示している。とくに充電インフラ整備、系統統合、行動変容促進策は、外部性や協調失敗といった市場の失敗に対する典型的な政策対応として評価できる。

日本の事例として、横浜市の EV タウン構想は、官民パートナーシップを活用した都市型インフラ整備モデルである。公共施設や商業施設と連携して急速充電器ネットワークを構築することで、立地リスクと初期投資負担を分散し、民間単独では採算が取りにくい段階での整備を可能にした。これは充電インフラが持つネットワーク外部性を公共部門が先行的に内部化し、EV 利用の限界効用を引き上げた点で経済学的意義が大きい。

また、高速道路における複数口・150kW 級急速充電器の整備は、インフラの「量」ではなく「質」を高める政策である。充電待ち時間の短縮と回転率向上により、長距離 EV 移動の時間コストが大幅に低下し、EV の利用範囲が拡張された。この効果は、消費者の期待効用を改善し、EV 需要の価格弾力性を低下させる方向に作用する。

さらに、環境省によるナッジ事業は、行動経済学的手法を用いて再エネ利用を促進した点に特徴がある。昼間充電を促す情報提供やインセンティブ設計により、充電行動が統計的に有意に変化し、CO_2排出削減効果が確認された。これは価格シグナルのみでは誘導が難しい行動変容を、低コストで実現した事例と評価できる。

海外では、カリフォルニア州の VGI（Vehicle Grid Integration）政策が注目される。EV の充電制御や放電能力を系統サービスとして評価し、報酬を与える仕組みを導入することで、EV を単なる需要主体ではなく、系統安定化に資する「価値ある資産」として位置づけた。これは EV が持つ柔軟性という正の外部性を市場取引に組み込み、社会的便益を民間の収益機会へと転換した制度設計である。

EU の TEN-T ネットワークも同様に、高速道路沿線に 350kW 級超急速充電器を整備することで、国境を越えた長距離 EV 移動を可能にした。広域ネットワーク整備により、個別国家では達成困難なスケールの経済を実現し、EV 普及の構造的制約を緩和している。

これらの成功事例に共通するのは、インフラ整備、制度設計、行動誘導を組み合わせることで、「ルート B」における因果構造を実質的に機能させた点にある。すなわち、EV 普及は車両技術だけでなく、エネルギー制度とインフラの設計次第で加速し得ることを、これらの事例は示している。

1.5 「通商・マクロ・企業戦略の逆風」シナリオ（ルート C）

1.5.1 ネガティブ要因（因果構造）

(1) 通商摩擦と関税リスク

「ルート C」は、EV 市場の拡大を阻害するネガティブ要因が、通商・マクロ経済・企業戦略を通じて連鎖的に作用する構造を示している。その出発点に位置づけられるのが、中国の圧倒的な製造支配力である。中国は EV 完成車およびバッテリーの製造において世界最大の生産能力とコスト競争力を有し、LFP 電池を中心とする量産体制によって低価格 EV を世界市場に供給してきた。この価格優位は、世界的な EV 普及を加速させる一方で、米国や EU における産業保護的な政策反応を誘発する契機ともなった。

とくに米国および EU では、中国製 EV の急速な流入が国内産業の競争力を脅かすとの認識が強まり、高関税や補助金要件による実質的排除策が導入・検討されてきた。この結果、国際摩擦は EV 市場において顕在化し、関税リスクが拡大する構造が形成された。問題構造マップが示すように、この関税リスクは、中国製 EV への依存度が高い欧州市場において特に大きな影響を及ぼす。輸入 EV のコスト上昇は、EV の購入価格を押し上げ、TCO 優位性を弱体化させることで、需要を抑制する方向に作用する。

こうした通商摩擦の影響は、マクロ経済環境の不安定化によってさらに増幅されている。2022 年 2 月以降のロシア・ウクライナ戦争は、欧州におけるエネルギー供給不安とインフレを引き起こし、実質所得の低下を通じて自動車需要全体を圧迫した。この局面では、ガソリン価格高騰により一時的に EV の TCO 優位性が強化されたものの、エネルギー価格の不安定性と経済成長の鈍化が消費者の耐久財購買を抑制し、EV 市場の拡大テンポは鈍化した。

さらに重要なのは、2026 年 2 月以降に想定された地政学的緊張として、米国・イスラエルとイランの武力衝突、およびそれに伴うホルムズ海峡封鎖の影響である。ホルムズ海峡は世界の原油輸送の要衝であり、封鎖は国際エネルギー市場に深刻な供給制約をもたらした。この結果、原油価格は再び急騰し、短期的には EV の運用コスト優位性を高める方向に作用した。しかし同時に、エネルギー価格高騰は世界経済全体の成長を押し下げ、金融引締めを通じて消費と投資を抑制する。IEA も指摘するように、マクロ経済の不確実性が高まる局面では、自動車メーカーは設備投資や新モデル投入を先送りしがちとなり、EV 市場の供給拡大は制約を受けやすい。

このように、通商摩擦と地政学的リスクが重なり合うことで、OEM の企業戦略にも逆風が生じる。関税や補助金要件の不確実性は、グローバルで統一的な EV 戦略の策定を困難にし、欧州や米国の OEM に電動化目標の修正や投資抑制を促す要因となる。その結果、モデル投入の遅れや車種選択肢の縮小が生じ、EV 市場の魅力は低下する。この供給面の制約は、需要の減退と相まって、欧州市場の停滞を招き、最終的には世界全体の EV 販売シェアの伸びを鈍化させる。

以上のように、「ルート C」が描く因果構造は、中国の製造支配力を起点とする通商摩擦が、地政学的ショックとマクロ経済不安定化を通じて増幅され、企業戦略の後退と市場停滞を招く連鎖として理解できる。この構造は、EV 普及が技術やコストのみならず、国際政治経済の動向に強く依存することを示しており、「ルート A」や「ルート B」の正の因果連鎖を相殺し得る重要なリスク要因として位置づけられる。

(2) 米国の政策不確実性

米国における EV 市場は、世界有数の規模と潜在的成長余地を有する一方で、2025 年以降、政策不確実性が顕在化し、構造的制約要因として一段と深刻化している。2024 年大統領選挙後の政権交代および議会構成の変化を受け、EV 補助金制度や排出規制をめぐる政策の一貫性は低下した。とくに、インフレ抑制法（Inflation Reduction Act：IRA）に基づく EV 購入税額控除は、2025 年後半以降、制度改変と早期終了が相次ぎ、2026 年初頭には個人向け購入補助金が事実上、利用可能性が著しく制限されている。あわせて、充電インフラ整備を支えてきた NEVI（National Electric Vehicle Infrastructure）プログラムについても、執行凍結や予算停止が発生し、政策の信認は大きく低下した。

このような政策環境の不安定化は、自動車 OEM にとって中長期の市場見通しを著しく困難にしている。EV 生産には電池工場、半導体供給網、専用プラットフォームといった巨額かつ不可逆的投資が必要であるが、補助金や排出規制の方向性が不透明な状況では、投資回収リスクが急激に高まる。実際、World Resources Institute（2026）[4]によれば、2025 年には米国内で少なくとも約 200 億米ドル規模の EV・電池関連製造投資が中止または延期されたと推計されている。複数の OEM が EV 専業化目標を修正し、ハイブリッド車への戦略回帰を進めている。

さらに、連邦政府と州政府の政策乖離も、不確実性を拡大させる要因となっている。カリフォルニア州をはじめとする一部州では ZEV 規制が維持・強化されている一方、連邦レベルでは排出ガス規制の緩和や EPA 規則の見直しが進み、全国的に一貫した制度枠組みは確保されていない。この政策断片化は OEM の製品戦略と供給計画を複雑化させ、市場効率性を低下させる。

こうした需要支援の後退と投資抑制が重なることで、米国 EV 市場は 2025 年に前年比マイナス成長に転じ、2026 年においても回復は限定的と見込まれている。米国市場の停滞は、世界第 2 位の EV 市場における需要減速を意味し、結果として世界全体の EV 販売シェア拡大を鈍化させる主要な逆風要因として位置づけられる。

(3) マクロ経済リスク

EV 市場の中長期的な拡大は、マクロ経済環境の影響を強く受ける。第一に、世界的な GDP 成長の鈍化が EV 需要の抑制要因として作用している。IMF（国際通貨基金）の 2026 年 4 月時点の世界経済見通しによれば、世界経済成長率は 2026 年に約 3.1%と、新型コロナ以前の

[4] https://www.wri.org/insights/us-state-of-electric-vehicles，2026 年 4 月 14 日（2026 年 4 月 25 日閲覧）を参照。

平均を下回る低成長局面が継続している。とくに先進国では成長率が 1.5%前後にとどまり、インフレ圧力と金融引締めの影響から、自動車を含む耐久消費財需要は停滞化している。この景気減速は、自動車市場全体の縮小を通じて、EV 需要にも下押し圧力を与えている。

第二に、原油価格動向の変動が EV の経済性に影響を及ぼしている。2025 年を通じて原油市場は供給余力の拡大と需要成長の鈍化から価格下落局面にあり、この期間においてはガソリン車の利用コストが低下し、EV の TCO（総所有コスト）優位性は相対的に縮小した。一方で、2026 年初頭以降は中東情勢の緊張激化とホルムズ海峡を巡るリスクの顕在化により、原油価格は再び高い変動性を示している。このような価格の不安定性は、消費者の燃料コスト見通しを曖昧にし､EV 選択による経済的メリットを認識しにくくする要因となっている。

これらの GDP 成長鈍化と原油価格変動が重なることで､EV 市場では需要が弱含みとなり、普及テンポは当初想定を下回る可能性が高まっている。その結果、世界全体における EV 販売シェアの拡大は減速し、マクロ経済環境は「ルート C」における重要な逆風要因として位置づけられる。

（4）OEM の戦略後退

2025 年以降、世界の主要自動車 OEM において、電動化戦略の後退あるいは柔軟化が明確に観測されている。この動きは単なる短期的調整ではなく、収益性、政策不確実性、需要実態の再評価という複数の構造要因が重なった結果として位置づけられる。

第一に、電動化目標の後退である。ホンダは 2025 年 5 月の公式事業説明会において、EV 市場成長の鈍化、規制・通商環境の変化を理由に、2030 年に EV 比率 30%とする従来目標の達成が困難になると明言した。同社は電動化関連投資額を約 10 兆円から約 7 兆円へ引き下げ、EV 専用生産体制の構築を一部延期すると同時に、HEV を「移行期における中核パワートレイン」と再定義している。この戦略転換はホンダ公式発表および複数の業界分析により確認されており、単なる後退ではなくリスク回避的な資源再配分と評価される。

米国 OEM でも同様の傾向が顕著である。フォードは 2025 年末に EV 戦略の抜本的見直しを行い、収益性の低い大型 EV や商用 EV 計画を中止・延期し、ハイブリッド中心のポートフォリオへ転換した。これは EV 部門の累積赤字と、連邦補助金・規制の持続性に対する不確実性を背景とするものであり、S&P Global および Bloomberg の分析でも「需要主導型投資への回帰」と位置づけられている。GM も同様に、EV 専業化の時期を後ろ倒しし、多様なパワートレイン併売戦略へと軸足を戻している。

第二に、EV モデル投入の減速が確認される。電動化投資の選別的抑制により、新規 EV 専用プラットフォームや派生モデルの開発が延期され、既存モデルの小改良や HEV・PHEV の拡充が優先されている。欧州では、ステランティスが「EV 普及ペースを過大評価していた」

ことを公式に認め、約 220 億ユーロ規模の減損と EV 供給網の縮小を実施した。この動きは欧米 OEM 全体に共通するリアルオプション的行動と解釈できる。

第三に、市場全体への影響である。OEM の慎重姿勢は、EV モデル数の増加ペースを鈍化させ、特に小型・低価格帯 EV の供給不足を長期化させている。IEA（国際エネルギー機関）や IMF（国際通貨基金）も、EV 普及が技術成熟段階に入りつつあるにもかかわらず、供給側制約によりスケールメリットの発現が遅延していると指摘している。モデル選択肢の拡大が停滞すれば価格競争は進まず、EV 市場全体の成長テンポは抑制される。

以上より、OEM の戦略後退は短期的な「EV 放棄」ではなく、不確実性下における投資リスク管理行動として合理的に説明可能である。一方で、この行動が累積的に作用することで、EV 市場の供給制約が固定化し、「ルート C」における世界 EV 販売シェア鈍化の主要因となっていることも、複数の信頼できる資料により裏付けられる。

(5) 社会的アクセス問題

EV 普及の持続性を左右する要因として、近年、とくに重要性を増しているのが社会的アクセス問題である。第一に、中古 EV 市場の未整備が挙げられる。新車 EV の普及が進展しても、中古車市場において価格形成や品質評価が確立されなければ、低所得層や価格感応度の高い消費者は EV へアクセスできない。現時点では、バッテリー劣化に対する不透明感、残存容量の評価基準の未標準化、保証制度の不十分さなどが、中古 EV 取引の障壁となっている。この結果、新車購入層と中古車依存層との間で EV 利用機会に大きな格差が生じている。

第二に、この中古市場の未成熟は、公平性の課題として顕在化する。EV 普及が高所得層や都市部居住者に偏在する場合、交通部門の脱炭素化の便益は特定層に集中し、環境政策としての社会的正統性が損なわれる。とくに集合住宅居住者や地方居住者では、充電インフラ制約と中古 EV 選択肢の乏しさが重なり、EV が事実上「選べない技術」となる可能性が高い。これは、効率性のみならず分配的公正の観点からも問題となる。

第三に、これらのアクセス制約は、EV 市場全体の成長抑制へと波及する。EV が新車市場の限られた層にとどまり、中古市場を通じた裾野拡大が進まない場合、保有台数全体の増加は鈍化し、量産効果や価格低下の進展も遅れる。IEA をはじめとする国際機関も、EV 普及が次の段階へ進むためには、中古市場の形成と社会的包摂性の確保が不可欠であると指摘している。

図 1.3 では、こうした内容を可視化している。

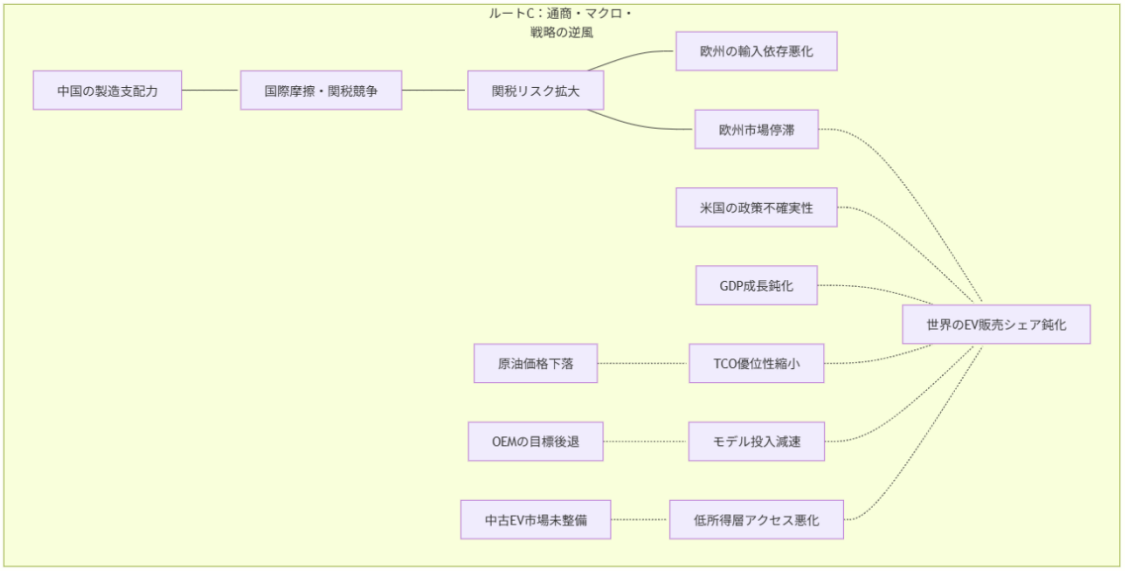


図 1.3　通商・マクロ・企業戦略の逆風【ルート C】の因果構造

（註）中国の製造支配力 → 国際摩擦・関税競争 → 関税リスク拡大 → 欧州の輸入依存悪化／市場停滞 → 世界シェア鈍化

米国の政策不確実性 → 世界シェア鈍化

GDP 成長鈍化・原油安 → 需要減退／TCO 優位縮小 → 世界シェア鈍化

OEM の目標後退 → モデル投入減速 → 世界シェア鈍化

中古 EV 市場の未整備 → 低所得層アクセス悪化 → 世界シェア鈍化

（出所）IEA、Global EV Outlook 2025 に基づいて筆者作成

1.5.2　推奨される政策支援の方向性

（1）通商摩擦・関税リスクへの対応

EV 市場が地政学的・通商的逆風に直面するなかで、第一に重要なのは国際協調と貿易ルールの再構築である。中国の製造支配力に対抗するための高関税措置は、短期的には国内産業保護に寄与する一方、EV 価格上昇を通じて普及を阻害する副作用を伴う。したがって、WTO（世界貿易機関）や地域経済連携協定を通じ、EV 完成車のみならず電池・パワーエレクトロニクスなど関連製品の関税安定化を図ることが不可欠である。あわせて、「EV 部品の原産地規則」を明確化し、サプライチェーンの透明性を高めることで、不確実性を低減する必要がある。

同時に、多国間サプライチェーンの強化が求められる。欧州・米国・アジア諸国が連携し、リチウムやニッケルなど電池原材料の共同調達や精錬能力の分散配置を進めることは、中国依存リスクを緩和する手段となる。いわゆるフレンドショアリング（friend-shoring）政策（自国と政治的価値観や安全保障上の利害を共有する「信頼できる国・地域（friends）」との間で、サプライチェーンや生産拠点を再構築・分散する政策概念）は、これまでのコスト効率だけ

でなく、供給安定性を重視した産業政策として位置づけられる。

(2) 米国・欧州の政策不確実性の緩和

第二に、EV 政策の長期的安定化が不可欠である。補助金や CO_2 規制が政権交代のたびに変更される状況では、OEM の投資は慎重化し、市場成長は抑制される。このため、EV 購入支援や排出規制、充電インフラ整備を包括した「クリーン交通法」のような枠組みを法制化し、政策の持続性を担保することが求められる。また、国内 OEM に対する R&D 支援や税制優遇を通じて、政策変動リスクを企業内部で吸収可能とする産業競争力強化策も重要である。

(3) マクロ経済リスクへの対応

第三に、マクロ経済リスクへの対応として、景気循環を考慮した柔軟な補助金設計が必要となる。景気低迷期には EV 購入補助金を一時的に強化することで、需要の急減を抑制できる。さらに、原油価格変動が EV の TCO 優位性を左右する点を踏まえ、炭素税や燃料課税によってガソリン車の価格優位を抑制しつつ、燃料価格に連動した補助金制度を導入することが、経済合理性の観点から有効である。

(4) OEM 戦略後退への対応

第四に、OEM の戦略後退に対しては、電動化義務とインセンティブの組合せが重要である。欧州型 ZEV 規制のように、最低限の電動化比率を義務付ける一方、新モデル投入補助金や技術開発税控除を付与することで、過度な負担を回避しつつ供給確保を図ることができる。さらに、公的ファンドを通じた EV スタートアップ支援は、技術競争を促進し、既存 OEM への牽制としても機能する。

(5) 社会的アクセス問題への対応

最後に、社会的包摂性の確保が不可欠である。中古 EV 市場の未整備は、低所得層の EV へのアクセスを制限し、普及の裾野を狭める。バッテリー残存価値評価の標準化、中古 EV 購入補助金や低利融資制度の整備により、中古市場を制度的に支援する必要がある。加えて、カーシェアリングやリースモデル、EV バス・EV タクシーといった公共交通との連携は、EV 利用機会の公平な提供に寄与する。

(6) 政策対応の共通原則

以上の政策支援に共通する原則は、国際協調と国内産業保護の均衡、短期ショック対応と長期制度設計の両立、そして公平性の確保である。これらを一体的に実行することで、「ルー

ト C」における逆風要因を緩和し、世界 EV 市場の持続的成長条件を再構築することが可能となる。

1.6　結論

――世界 EV 市場は「単線的成長」ではなく「条件付き拡大」の段階にある

本稿は、IEA の *Global EV Outlook*（2019～2025 年版）の報告に基づき、それに分析を加えて、世界 EV 市場の拡大と鈍化を同時に説明し得る因果構造の解明を目的としてきた。その分析結果から導かれる最も重要な結論は、世界 EV 市場の成長は不可逆的ではあるが、その進行速度と地域的広がりは複数の条件に強く依存する「条件付き拡大段階」に入っているという点である。

第一に、本稿で示した「ルート A」が明らかにしたように、世界 EV 市場をここまで押し上げてきた最大の推進力は、バッテリー価格低下を起点とする TCO 優位性の拡大である。とくに中国を中心とする LFP 電池の普及と大量生産体制は、EV を先進国の環境志向製品から、大衆市場向けの競争財へと転換させた。この構造は EV 市場の自己強化的成長（self-reinforcing growth）を可能にしており、EV 普及が一定水準を超えた後は補助金に依存しない自立的拡大が成立し得ることを示している。

しかし同時に、本稿の「ルート B」および「ルート C」が示すように、EV 市場の拡大は決して技術進歩だけでは完結しない。充電インフラ、電力系統、課税制度といった公共的基盤が不十分な場合、TCO 優位性や技術的完成度が高まっても、需要の顕在化は制約される。さらに、通商摩擦、政策不確実性、マクロ経済の変動、OEM 戦略の後退といった要因が重なった場合、市場は容易に減速局面へ移行する。この点で、EV 市場は「自然成長市場」ではなく、制度設計と国際環境に強く依存する構造的市場である。

とくに重要なのは、中国市場の圧倒的存在感が、世界 EV 市場全体の成長率そのものを規定している現実である。2024 年時点で世界 EV 販売の約 3 分の 2 を中国が占めており、欧州や米国の停滞は、中国市場の成長によって相殺されてきた。したがって、「世界 EV 市場の鈍化」とは、世界全体で一様に需要が後退する現象ではなく、中国主導の拡大構造と、欧米先進国市場における制度・需要制約との乖離が拡大している状態と解釈する方が適切である。

また、中古 EV 市場の未整備や低所得層アクセス問題が示すように、EV 普及は次の段階において「規模」だけでなく「分配」の問題を内包する。新車市場におけるシェア拡大だけでは、EV の社会的定着は達成されず、中古市場・公共交通・共有モデルを通じた包摂的普及が不可欠となる。

以上を総合すれば、世界 EV 市場は「拡大か停滞か」という二項対立では捉えられない。コスト・技術・制度が同時に噛み合う場合には加速し、いずれかが欠ければ即座に減速する、条件依存型の成長局面に移行している。本稿の因果構造分析は、EV 市場の将来を予測する際に、単年度の販売台数や政策動向ではなく、どの「ルート」がどの地域で優勢になっているかを見極める必要性を示唆している。すなわち、世界 EV 市場の将来は、技術の進歩そのものではなく、それを取り巻く制度と国際環境の設計次第で、大きく左右される段階に入っているのである。

参考文献

1) IEA, *Global EV Outlook*, 2019-2025.

２章　EV 全面普及に伴う電力需給問題と
リチウム循環経済の数理モデル分析

本稿に示された見解、分析および結論は、すべて著者個人のものであり、著者が所属する組織の公式な見解または立場を示すものではない。本稿の内容についての責任は、全面的に著者個人に帰属する。

2.1　はじめに

現在、世界中で「電気自動車（EV）」への関心が急速に高まっている。従来のガソリンエンジン車に代わって電気で駆動する車が普及すれば、走行時の排気ガスが大幅に減少し、パリ協定の目標達成に向けた地球温暖化対策として大きな効果が期待されている。実際に、ヨーロッパでは各国政府の補助金政策を背景に EV の販売台数が急速に伸びており、中国においても国策として EV 産業の育成が進められている。日本政府もまた、2035 年までに新車販売の 100%を電動車にするという野心的な目標を掲げている。

しかし、EV が普及すれば万事解決というわけではない。何千万台もの車が電気で走るようになれば、当然ながら電力の需要が大幅に増加する。その電気をどのように安定的に供給し、需要変動に対応しつつ蓄えるのかという問題が生じる。加えて、再生可能エネルギーの間欠性（天候による発電量の変動）への対応も一層重要になる。さらに、EV に搭載されるリチウムイオン電池の主要原料であるリチウムをどこから調達するのか、特にサプライチェーン全体における中国への依存度をどう低減するのかという資源問題も避けて通れない。

本稿は、日本交通政策研究会の基礎理論プロジェクトにおける研究発表をもとに、これらの問題を多角的に分析するものである。先行研究レビューの後、前半では、EV 全面普及時の電力需要の増大規模を推計するとともに、大規模電力貯蔵の技術的・経済的実現可能性を検証する。後半では、EV 普及にともなうリチウムの需給動態と中国依存度の時間的推移を、複数のサブモデルを統合した数理モデルにより分析した結果を報告する。

2.2　先行研究レビュー

EV の普及は、交通部門の脱炭素化を進めるうえで中心的な政策手段として位置づけられてきた。国際エネルギー機関（IEA）は、各国の EV 市場、政策支援、充電インフラ、電池需要、電力需要への影響を継続的に分析しており、EV はもはや一部の先進国に限定された技術ではなく、中国、欧州、米国を中心に世界的な普及段階へ移行しつつあると評価している（International Energy Agency [IEA], 2024a）。しかし、EV 普及に関する既存研究は、しばしば走行時排出量の削減効果や車両価格の低下、充電インフラ整備に焦点を当ててきた一方で、全面普及時に電力系統全体へ与える負荷や、リチウムなどの重要鉱物の長期的な需給構造を同時に扱う研究はなお限定的である。したがって、EV 化を単なる自動車技術の転換としてではなく、電力システム、資源供給、リサイクル産業、経済安全保障を横断するシステム転換として捉える必要がある。

第一に、EV 普及と電力需要に関する先行研究では、EV が年間電力需要を増加させるだけでなく、充電時間帯によってはピーク需要を大きく押し上げる可能性が指摘されている。Muratori and Mai（2021）は、交通部門の電化が単にエネルギー消費の燃料転換にとどまらず、電力需要の時間的形状を変化させる点を強調している。特に、多数の EV が夕方から夜間にかけて同時に充電される場合、既存の配電網や変電設備に局所的な負荷が集中する可能性がある。米国エネルギー省も、EV 充電が電力網に与える影響を評価する際には、総電力量だけでなく、充電行動、時間帯、配電網の地域差、需要管理技術を含めて検討する必要があると指摘している（U.S. Department of Energy, 2024）。この点は、本稿が年間追加電力需要だけでなく、ピーク電力需要への影響を重視する理由と対応している。

第二に、EV と電力系統の関係をめぐる研究では、スマート充電、デマンドレスポンス、V2G（Vehicle-to-Grid）が重要な緩和手段として検討されている。National Renewable Energy Laboratory の近年の報告は、EV を電力系統に統合する際には、無制御充電による負荷増大を避け、充電時間を需要の低い時間帯や再生可能エネルギーの出力が高い時間帯に誘導することが重要であると論じている（Borlaug et al., 2024）。また、Xu et al.（2023）は、EV 用電池が車載状態または退役後の二次利用を通じて短時間の系統用蓄電需要を補完しうる可能性を示した。これは、EV を単なる電力需要の増加要因として見るのではなく、分散型蓄電資源として活用する視点を提示するものである。ただし、V2G や二次利用は短期的・分散的な需給調整には有効であっても、国家規模で数か月分の電力を蓄えるような長期・大容量備蓄の代替手段にはなりにくい。このため、短時間調整と長期備蓄を区別して評価することが重要である。

第三に、蓄電技術の経済性に関する先行研究では、リチウムイオン電池の価格低下が EV

普及の主要な駆動要因として分析されてきた。Schmidt et al.（2017）は、エネルギー貯蔵技術の将来コストを経験率に基づいて推計し、リチウムイオン電池を含む蓄電技術において累積導入量の増加がコスト低下をもたらすことを示した。また、Ziegler and Trancik（2021）は、リチウムイオン電池技術のコスト低下率を再検討し、技術学習や生産規模拡大が価格低下に大きく寄与してきたことを明らかにしている。こうした研究は、EV 普及モデルにおいて学習曲線を組み込む理論的根拠を与える。ただし、学習曲線は過去の経験的関係に基づくものであり、将来においても同じ速度で価格低下が続くとは限らない。資源価格の上昇、地政学的リスク、供給制約、環境規制強化などが電池価格の下限を押し上げる可能性があるため、学習効果を過度に楽観的に扱うことは避ける必要がある。

第四に、EV 普及と重要鉱物に関する研究では、リチウム、ニッケル、コバルト、黒鉛、レアアースなどの供給制約が大きな論点となっている。IEA（2024b）は、クリーンエネルギー技術の普及に伴い重要鉱物需要が急速に増加しており、とりわけリチウム需要が強く拡大していることを示している。同報告書は、重要鉱物の採掘・精製・加工が少数国に集中していることを、エネルギー安全保障上の主要リスクとして位置づけている。EV の場合、電池製造だけでなく、その上流にある鉱石採掘、精製、正極材・負極材製造、セル製造に至るサプライチェーン全体が問題となる。したがって、EV 普及の持続可能性は、車両販売台数や充電インフラの整備状況だけでなく、電池材料の供給構造に大きく依存している。

第五に、リチウムサプライチェーンにおいては、中国依存度が特に重要な論点である。中国は EV 電池の製造能力だけでなく、リチウムを含む多くの重要鉱物の精製・加工工程において大きな存在感を持つ。IEA（2024b）は、重要鉱物供給の地理的集中がエネルギー転換の脆弱性を高めると指摘している。近年では、G7 諸国においても重要鉱物の備蓄、供給源多角化、精製能力の国内・域内整備が政策課題として浮上しており、重要鉱物は単なる産業政策上の投入財ではなく、経済安全保障の中核的対象となっている。これは、本稿がリチウムの純輸入量だけでなく、中国依存度の時間的推移をモデル化する理由と直接関係している。

第六に、リチウムリサイクルと循環経済に関する先行研究では、使用済み EV 電池の回収・再利用・再資源化が、将来の資源制約を緩和する重要な手段として位置づけられている。IEA（2024a）は、EV ストックの高齢化に伴い、2030 年代以降には電池リサイクルが EV サプライチェーンの循環化において中核的役割を果たすと述べている。しかし、リサイクルには不可避の時間差が存在する。すなわち、現在販売された EV の電池が使用済み資源として回収されるのは、車両寿命または電池寿命を経た後であり、普及初期から中期にかけては新規需要の急増にリサイクル供給が追いつかない。このタイムラグは、リチウム需給モデルにおいて決定的に重要である。リサイクル効率そのものが高まったとしても、回収対象となる使用済み電池の量が十分に蓄積されるまでは、輸入依存を大きく下げることは難しい。

以上の先行研究を総合すると、EV 普及をめぐる研究は、①EV 販売台数と電池価格の関係、②EV 充電が電力系統に及ぼす影響、③蓄電技術・V2G・スマート充電による系統安定化、④リチウムを含む重要鉱物の供給制約、⑤電池リサイクルと循環経済、⑥中国依存度を含む経済安全保障、という複数の研究領域に分かれて発展してきた。しかし、これらの論点を日本の EV 全面普及という具体的シナリオのもとで統合的に扱い、電力需要、ピーク負荷、大規模蓄電の限界、リチウム需給、リサイクル供給、純輸入量、中国依存度を一体的に分析する研究はなお十分ではない。本稿の貢献は、この研究上の空白を埋める点にある。すなわち、本稿は EV 普及を環境政策上の成功物語として単純に捉えるのではなく、電力インフラと資源循環の両面からその実現可能性を定量的に検討し、特に 2035 年から 2050 年頃にかけて生じうる電力・資源上の移行期リスクを明らかにするものである。

2.3 EV 普及と大規模電力貯蔵の実現可能性

2.3.1 研究の背景：なぜこの問題が重要なのか

EV 普及は世界的な潮流である。脱炭素社会を実現するための重要な手段として、各国政府が税制優遇や補助金制度を整備しつつ積極的に推進している。しかしながら、EV の台数が増加すると電力システムへの負荷も増大する。すべての車がガソリンの代わりに電気を使用するようになった場合、既存の発電所や送電網がその需要に耐えられるかが問われる。特に、電力系統の容量制約や配電網の局所的過負荷は、現実的な懸念事項として認識されつつある。

興味深いのは、世界の EV 政策が必ずしも一本調子で進んでいるわけではない点である。ホンダは EV 計画の一部見直しを行い、ハイブリッド車との併存戦略を模索している。EU（欧州連合）もまた、2035 年の EV 義務化スケジュールについて一部例外規定の導入を含む再検討に着手している。一方で中国メーカーは BYD をはじめとして低価格 EV を大量に生産し、過当競争とも言える状況が世界市場に生まれている。こうした複雑かつ流動的な状況の中で、冷静にデータに基づいた定量的分析を行うことが本研究の出発点である。

2.3.2 研究の目的

本研究では、次の 4 つの問いに答えることを目指す。第一に、日本の全登録自動車が EV に全面的に置換された場合、追加的な電力需要がどの程度の規模に達するかを定量的に推定すること。第二に、日本の現在の電力貯蔵能力がどの程度の水準にあるかを、主要な蓄電技術ごとに評価すること。第三に、エネルギー安全保障の観点から、仮に 3 か月分の電力を備

蓄するとした場合、それが技術的・経済的に実現可能かどうかを検証すること。そして第四に、これらの分析結果を踏まえ、現実的な政策の選択肢を提示することである。

「3 か月分」という数字の根拠は、日本がエネルギー資源の大部分を海外からの輸入に依存しており、地政学的リスクや自然災害などの理由で輸入が停止した場合に備えて、一定期間の電力備蓄を確保する必要があるという安全保障上の考え方に基づく。石油については「石油の備蓄の確保等に関する法律」に基づく国家備蓄制度があり、国家備蓄と民間備蓄を合わせておよそ半年分が確保されている。電力についても同様の戦略的備えが技術的・経済的に可能であるかという問いである。

2.3.3　EV 全面普及で電力需要はどう変わるか

以下、具体的な数字をもとに検討する。国土交通省の統計によれば、日本には現在約 7800 万台の自動車が登録されている。ここでは思考実験として、これらがすべて EV に置き換わったと仮定する。1 台あたりの年間走行距離を全国平均の 10,000 km とし、現行の EV が 1 km 走行するのに必要な電力量（電費）を 0.2 kWh とすると、全 EV が 1 年間に消費する追加電力は次のように算出される。

7800 万台 × 10,000 km × 0.2 kWh/km = 156 TWh（テラワット時）

日本の現在の年間電力消費量はおよそ 1,000 TWh であるため、EV 普及によって約 15.6% の電力需要が上乗せされることになる。この規模は決して小さくなく、たとえばスウェーデンやオーストリアといった中規模先進国の年間電力消費量に匹敵する水準である。換言すれば、一国分の電力インフラを新たに構築するのに相当する投資が必要となる可能性を示唆している。

2.3.4　ピーク電力の問題

電力の問題は、年間の総量だけではない。より深刻かつ喫緊の課題は「ピーク電力」の問題である。電力の需要は一日の中でも、また季節によっても大きく変動する。たとえば、夏季の猛暑日の午後にエアコンがフル稼働する時間帯には、電力需要は最大値に達する。このときの需要を「ピーク需要」と呼び、電力系統の設計においては、このピーク需要に対応できるだけの供給能力を確保することが不可欠である。

現在の日本のピーク需要は約 160 GW（ギガワット）である。ここに EV の充電需要が加わると、ピーク時の電力需要は約 302 GW に膨れ上がると推計される。すなわち、ほぼ 2 倍の水準に達する。仮に多くの労働者が夕刻の帰宅後に同じ時間帯に EV の充電を開始した場合、特定の配電区域において電力網が過負荷となり、停電や電圧低下を引き起こす可能性がある。これは発電所の増設、変電設備の容量拡大、送配電線の増強といった電力インフラ（社会基

盤）全般にわたる大幅な強化が必要であることを意味している。

2.3.5　日本の電力貯蔵能力の現状

次に、日本の電力貯蔵能力の現状について検討する。現在、日本で最も大きな電力貯蔵手段は「揚水発電（ようすいはつでん）」である。揚水発電とは、電力に余剰が生じている深夜や週末の時間帯にポンプで水を上部貯水池にくみ上げておき、電力需要が高まる時間帯に水を下部貯水池に落として水車を回し発電する仕組みである。これは「水の位置エネルギー」を利用した大規模蓄電手段であり、現時点では最も成熟した大容量エネルギー貯蔵技術のひとつとされている。

日本全国の揚水発電の設備容量は約 27 GW、エネルギー貯蔵量は約 216 GWh である。一方、日本の 3 か月分の電力需要はおよそ 250,000 GWh に達する。すなわち、現在の揚水発電の貯蔵量は 3 か月分の電力需要のわずか 0.1%にも満たず、両者の間には桁違いの隔たりが存在する。

2.3.6　3 か月分の蓄電は可能か

仮にこの不足分をリチウムイオン電池で補填する場合を検討する。必要な追加貯蔵量はおよそ 249,784 GWh であり、現在の電池コスト（約 200 $/kWh）を前提とすると、これだけの容量のリチウムイオン電池を製造するには約 50 兆ドル（日本円にして数千兆円）が必要となる。この金額は日本の GDP（国内総生産）の約 10 倍に相当する天文学的な規模であり、いかなる経済政策をもってしても実行不可能な水準である。

しかし、障壁はコストだけではない。大規模蓄電の実現には 4 つの大きな壁が立ちはだかっている。第一に、前述のとおり巨額の設備投資コスト。第二に、リチウムやコバルト、ニッケルといったレアメタル（希少金属）の資源制約であり、世界中でこれらの資源の争奪が激化し、価格の高騰と供給不安定性が顕在化している。第三に、電池の製造過程そのものが抱える環境負荷であり、原材料の採掘から精製・製造に至る工程が大量のエネルギーと CO_2 排出を伴う。第四に、物理的な設置スペースの問題であり、これだけの量の大型蓄電池を安全基準を満たしつつ設置できる場所を確保すること自体がきわめて困難である。

以上から、3 か月分の電力貯蔵を実現することは、現在の技術と経済的な制約のもとでは非現実的であると結論づけられる。

2.3.7　現実的な対策は何か

とはいえ、EV の普及を進めながら電力の安定供給を確保する方法がないわけではない。大規模蓄電という発想を転換し、需要側の管理と供給側の多様化を組み合わせることで、い

くつかの現実的な政策オプションが存在する。

まず「スマート充電」である。EV の充電時間を、電力需要が低い深夜帯や休日に誘導する仕組みであり、充電器のタイマー設定や、電力会社のサーバーとリアルタイム通信して最適な時間帯に自動充電を行う技術が開発・実証されている。また「V2G（Vehicle to Grid）」と呼ばれる、EV の蓄電池から電力系統へ逆に電力を供給する技術も注目されている。次に「デマンドレスポンス（需要応答）」がある。電力供給が逼迫した際に電力使用を自発的に控えた家庭や企業に対して経済的インセンティブを付与する仕組みで、ピーク需要を平準化する効果がある。

電源構成の面では、再生可能エネルギー（太陽光・風力・地熱など）の導入拡大が欠かせない。ただし、太陽光や風力は天候や時間帯に依存する間欠性電源であるため、これらを補完する形で、出力調整が容易な天然ガス発電（LNG 火力）や原子力発電も、安定的なベースロード電源として引き続き重要な役割を果たす。すなわち、ひとつの技術に過度に依存するのではなく、複数の電源を戦略的に組み合わせた「エネルギーミックス」の最適化が鍵となる。

2.3.8　海外の事例から学ぶ

海外に目を向けると、参考になる先行事例がいくつか存在する。ノルウェーは新車販売に占める EV の比率が 90%を超え、世界で最も EV 普及が進んだ国のひとつであるが、その成功の背景には豊富な水力発電資源がある。国の電力供給のほぼ全量を再生可能な水力でまかなっているため、EV 台数が急増しても電力供給の安定性への影響が比較的小さく、追加的な CO_2排出も最小限に抑えられている。

一方、アメリカのカリフォルニア州は太陽光発電を大幅に拡大しつつ、大規模蓄電池（メガバッテリー）の導入と時間帯別電気料金制度（夜間に充電すると割安になる料金体系）を組み合わせることで、EV 普及と電力安定供給の両立を図っている。同州ではまた、建築基準に EV 充電設備の設置義務を組み込むなど、インフラ整備の面でも先進的な取り組みを行っている。いずれの事例も、再生可能エネルギーの拡充と需要側の電力管理の工夫を組み合わせることが成功の鍵であることを示している。

2.3.9　第 3 節のまとめ

第 3 節の結論をまとめると次のようになる。日本で EV が全面普及した場合、年間電力需要は約 156 TWh（約 15.6%）増加し、ピーク需要はほぼ 2 倍の約 302 GW に達する。エネルギー安全保障の観点から 3 か月分の電力を蓄えるという発想は、約 50 兆ドルという天文学的なコストや希少資源の制約から、現状の技術水準では非現実的である。しかし、スマート

充電や V2G 技術、デマンドレスポンス、再生可能エネルギーの拡大、そしてスマートグリッド（次世代型の高度電力制御網）の整備を組み合わせれば、EV 社会への段階的な移行は十分に実現可能である。重要なのは、ひとつの解決策に依存するのではなく、供給側と需要側の多様な手段を総合的に組み合わせることである。

2.4　電気自動車とリチウム循環経済の数理モデル統合

2.4.1　本節の目的：何を明らかにするか

第 3 節までは EV 普及に伴う電力面の課題を検討した。本節では視点を資源供給の側面に転じ、EV の中核部品であるリチウムイオン電池に不可欠な原材料、とりわけリチウムの「資源面」に焦点を当てる。

具体的には、日本で EV が普及していく過程で、3 つの主要指標がどのように時間的に変化するかを、年次ベースで試算する数理モデルを構築した。第一の指標は「電池価格の低下」である。EV が普及すればするほど、電池の大量生産による「学習効果」（経験曲線効果）によって製造コストが逓減していくことが期待される。第二の指標は「リチウムの需要量・リサイクル回収量・純輸入量」の三者の動態である。EV の台数増加に伴いリチウムの需要が拡大し、一定期間後には使用済み EV から回収したリチウムのリサイクルが本格化する。第三の指標は「中国依存度」である。現在、リチウムの採掘・精製・電池製造に至るサプライチェーン（供給網）全体において中国が圧倒的なシェアを占めており、その依存度がどう推移するかは経済安全保障の観点からきわめて重要である。

2.4.2　モデルの感度パラメータ

数理モデルには、出力結果を大きく左右する「パラメータ」（設定値）がいくつか存在する。「感度パラメータ」とは、その値をわずかに変動させるだけでモデルの出力が大きく変わるような、モデル構造上きわめて重要な変数のことである。

最も重要なのは「普及速度」である。EV が早期に普及するほど、リチウムの需要ピークが前倒しになり、そのピークの規模も大きくなる。次に「学習率」がある。これは、EV の累積生産台数が 2 倍になるごとに電池の単位あたり製造コストがどれだけ低下するかを示す比率であり、価格低下の速さを決定する重要な経験的パラメータである。3 番目は「リサイクル」の立ち上がり速度である。使用済み EV から回収したリチウムのリサイクルが早期に本格化するほど、海外からの輸入への依存が低減する。最後に「材料強度」（原単位）がある。これは 1 台の EV に必要なリチウムの量を指し、全固体電池などの次世代電池技術の実用化や車

両設計の軽量化によって、この数値が低下すれば需要圧力が大幅に緩和される。

2.4.3　統合モデルの全体像

本モデルの全体像を、システム・ダイナミクスの手法に基づく因果ループ図で示す。因果ループ図とは、システム内の各変数間の因果関係を矢印で可視化し、正の影響（同方向の変化）と負の影響（逆方向の変化）を区別して表現する図のことである。

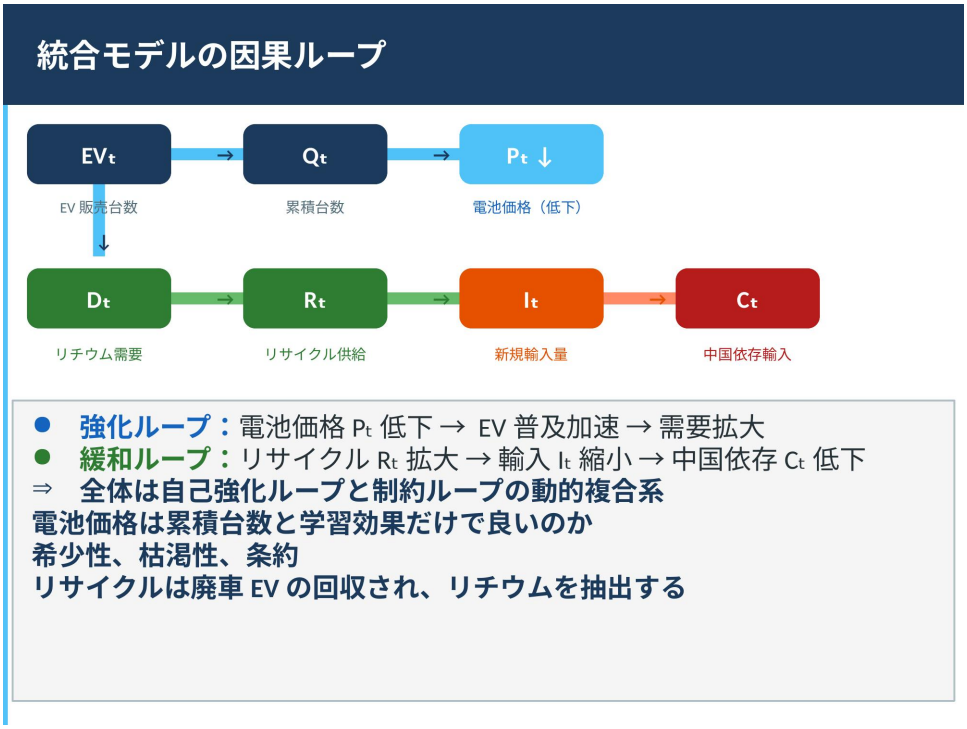


図 2.1　統合モデルの因果ループ図

この図の流れを上から順に説明する。まず、年間の EV 販売台数（EVt）が増加すると、市場における累積台数（Qt）が積み上がる。累積台数が増えると製造工程の最適化や規模の経済により「学習効果」が働いて、電池の単位あたり価格（Pt）が低下する。これが「強化ループ」（正のフィードバック）である。電池価格が下がれば EV の車両価格も低下し、消費者にとっての購入障壁が下がることでさらに販売台数が増え、累積台数が拡大し、一層の価格低下をもたらすという好循環が生まれる。

一方、EV 販売の増加はリチウム需要（Dt）を直接的に押し上げる。しかし一定の時間が経過すると、耐用年数を超えた古い EV の電池からリチウムが回収・リサイクル（Rt）されるようになる。リサイクル供給が増えれば、新たに海外から輸入する必要のあるリチウム量（It）が減少し、ひいてはサプライチェーンにおける中国からの輸入量（Ct）も低下する。これが「緩和ループ」（負のフィードバック）である。全体として、本モデルは価格低下を通じた需

要拡大という「自己強化ループ」と、リサイクルによる輸入抑制という「制約ループ」が複合的に作用する動的なシステムを表現している。

2.4.4　モデルの構成要素

統合モデルは、相互に連動する 3 つのサブモデルから構成されている。

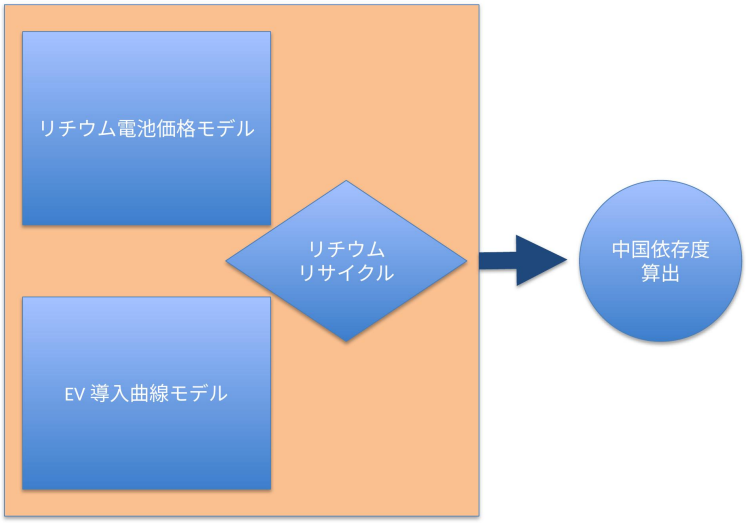


図 2.2　統合モデルの構成要素

第一が「リチウム電池価格モデル」であり、経験曲線の理論に基づき、累積生産台数の増加に応じて電池の単位価格がどのように逓減するかを算出する。第二が「EV 導入曲線モデル」であり、年ごとの EV 販売台数を S 字型の曲線（ロジスティック曲線）で予測する。新しい技術の普及は、導入初期にはゆっくりと進み、臨界点を超えると急速に加速し、最終的に市場が飽和するにつれて再び緩やかになるという S 字型のパターンをたどることが経験的に知られているためである。第三が「リチウムリサイクルモデル」であり、耐用年数を超えた使用済み EV からのリチウム回収量を推計し、純輸入量と中国依存度の時間的変化を算出する。

2.4.5　数式の解説

本モデルは 7 つの数式によって構成されている。各数式の機能と相互関係を明確にするため、以下の表にその意味をまとめた。

表 2.1　統合モデルの数式一覧と解説

番号	数式の意味	やさしい説明
(1)	EVt：年 t の EV 販売台数（ロジスティック曲線）	EV の年間販売台数を S 字カーブで予測する式。最初はゆっくり、途中で急増、最後に飽和する。
(2)	Qt：累積 EV 販売台数	過去の EV 販売台数をすべて足し合わせた数。これまでに世に出た EV の合計。
(3)	Pt：電池価格（学習曲線）	累積台数が増えるほど電池が安くなる。たくさん作るほどノウハウが蓄積される効果。
(4)	Dt：リチウム需要量	その年に売れた EV が必要とするリチウムの総量。
(5)	Rt：リサイクル回収量	寿命を終えた EV の電池から回収されるリチウムの量。バッテリー寿命（15 年）後に始まる。
(6)	It：新規輸入量	リチウム需要からリサイクル分を引いた不足分。足りない分は輸入が必要。
(7)	Ct：中国からの輸入量	輸入量のうち中国に依存している部分。リサイクルが進むと低下。

ここで重要な点を補足する。式(5)のリサイクル回収が開始されるまでには「バッテリー寿命」に相当するタイムラグ（時間差）が不可避的に存在する。本モデルではバッテリーの実効寿命を 15 年と設定しているため、2025 年に販売された EV の電池がリサイクル工程に投入されるのは 2040 年ということになる。この 15 年のタイムラグは、リサイクル供給が需要増加に追いつくまでの「脆弱期間」を生み出す構造的要因であり、モデルの出力結果に決定的な影響を与える。

2.4.6　リサイクル効率はどう変化するか

リサイクル効率（ηt、エータ・ティー）は、回収した使用済み EV の電池からどれだけの割合でリチウムを再抽出できるかを表す技術的指標である。本モデルでは、リサイクル技術の成熟に伴い、リサイクル効率は毎年 5 パーセントポイントずつ線形的に向上すると仮定している。すなわち、リサイクル開始 1 年後の効率は 5%、10 年後は 50%、20 年後には 100%（完全回収）に到達するという設定である。

これは数学的には $\eta t = \min(100, 5t)$（%）と表される。ここで min 関数は「小さい方をとる」という意味であり、効率が物理的上限の 100%を超えないように制約する役割を果たす。ただし、これはあくまで線形（直線的）な近似であり、技術発展の実態としては S 字型（ロジ

スティック型）の成長パターンのほうがより現実的である可能性が高い。すなわち、初期には基礎研究段階で進歩が遅く、中期に技術的ブレイクスルーにより急速に向上し、終盤には物理的限界に近づくにつれて改善が鈍化するというパターンである。この点は将来的にモデルの改良が必要な部分である。

リサイクル効率が上昇すると、中国依存度 δt（デルタ・ティー）は相補的に低下する。δt＝1－ηt という関係式が成立するため、リサイクル効率が 100%に到達すれば中国依存度は理論上ゼロになる計算である。もちろんこれは理想的なシナリオであり、現実にはリサイクル工程でのロスや品質劣化の問題が残るが、この関係式はリサイクル技術の向上が資源安全保障にとっていかに戦略的に重要であるかを端的に示している。

2.4.7　初期条件（2025 年のベースライン）

シミュレーションを実行するためには、モデルの「初期条件」すなわち出発点となるパラメータ値を設定する必要がある。本モデルでは、基準年を 2025 年とし、その時点の値を以下のように設定した。

表 2.2　初期条件（2025 年ベースライン）

EV 普及モデル	電池・リチウム	輸入・中国依存度
EV₀＝50,000 台（年間販売） Q₀＝60,000 台（累積販売）	P₀ ＝ 200 $/kWh　学習率 ＝ 18%　λ＝8 kg/台　l＝15 年（電池寿命）	η₀＝0%（リサイクル率）　I₀＝400 トン（輸入量）　δ₀＝100%（中国依存度）

これらの数値は、経済産業省や IEA（国際エネルギー機関）が公表している統計データ、および当該分野の学術論文に基づいて設定したものである。学習率 18%とは、EV の累積生産台数が 2 倍になるごとに電池の製造コストが 18%低下するという経験則を意味する。なお、BloombergNEF の調査ではリチウムイオン電池の過去の学習率は約 18〜20%とされており、本設定は保守的な見積もりである。λ＝8 kg/台は、現行の主流であるリチウムイオン電池を搭載した標準的な EV1 台あたりに約 8 キログラムのリチウム（炭酸リチウム換算）が使用されることを表している。

2.4.8　シミュレーション結果

以上のモデル構造と初期条件をもとに 2025 年から 2070 年までの期間についてシミュレーションを実行すると、政策的含意に富む興味深い結果が得られる。

まず、EV 販売台数の推移を図 2.3 に示す。ロジスティック曲線の特性に従い、2025 年の

年間 5 万台という初期段階から徐々に増加し、市場の転換点となる 2035 年前後から急速な成長局面に入る。その後、2045 年頃には年間約 200 万台に達し、市場の飽和に伴い増加率は鈍化していく。

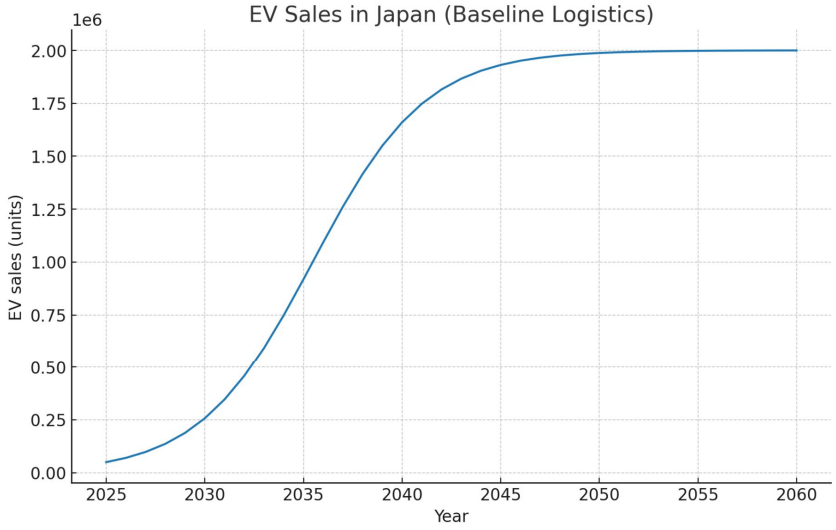


図 2.3　日本の EV 販売台数の推移推計

次に、リチウム資源のマテリアルフロー（物質の流れ）を図 2.4 に示す。実線＋丸マーカーがリチウム需要、破線＋四角マーカーの線がリサイクル供給、点線＋三角マーカーが需要とリサイクルの差分である純輸入量（ネットインポート）を表している。

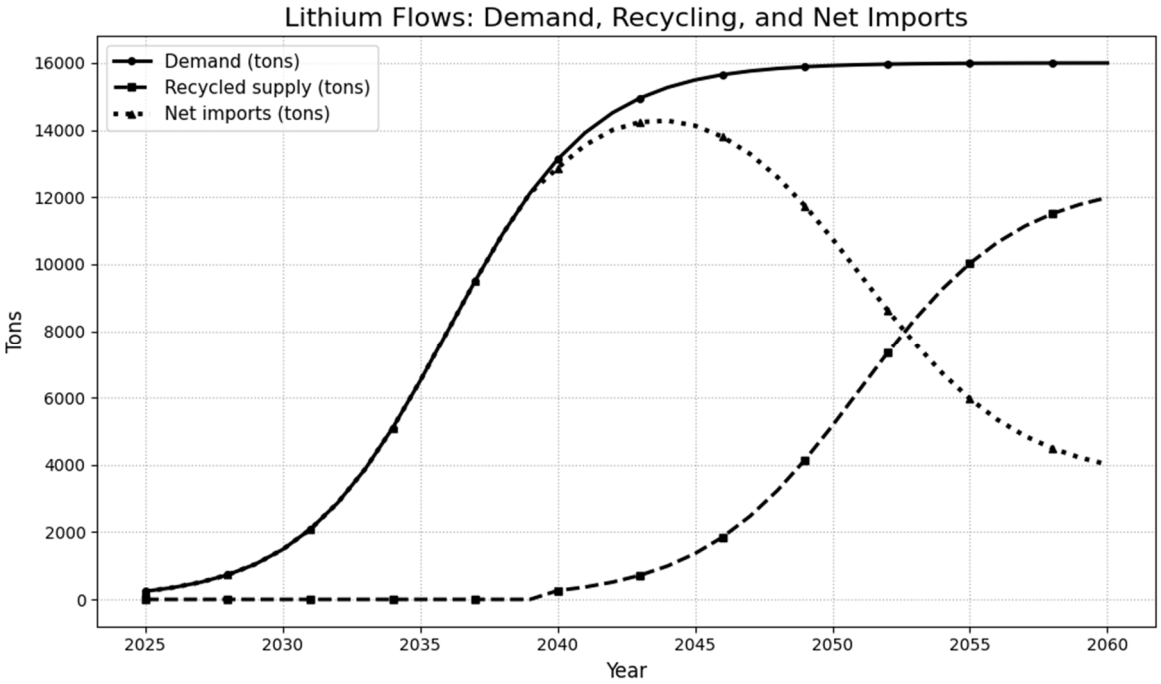


図 2.4　リチウムのフロー（需要・リサイクル・純輸入量）

このグラフから政策的に重要な点がいくつか読み取れる。第一に、リチウム需要は EV 普及の加速に伴って 2035 年頃から急増し、2050 年代に約 16,000 トンの水準で飽和（定常状態）に達する。第二に、リサイクルによる二次供給は、バッテリー寿命の 15 年というタイムラグが構造的に存在するため、2040 年頃からようやく有意な量として立ち上がり、その後は急速に増加して需要を補完していく。第三に、純輸入量は 2044 年頃に約 14,000 トンのピークを迎え、その後リサイクル供給が本格化するにつれて漸減していく。

すなわち、2035 年頃から 2050 年頃までの約 15 年間が、リチウム輸入への依存度が最も高まる「脆弱な期間」であることがモデルにより明確に示される。この構造的に脆弱な移行期間を、供給源の多角化や戦略的備蓄、リサイクル技術の前倒し開発などによっていかに安定的に乗り越えるかが、日本の資源戦略上の最重要課題である。

2.4.9　中国依存度はどう変わるか

最後に、中国からのリチウム輸入量の推移を示す（図 2.5）。

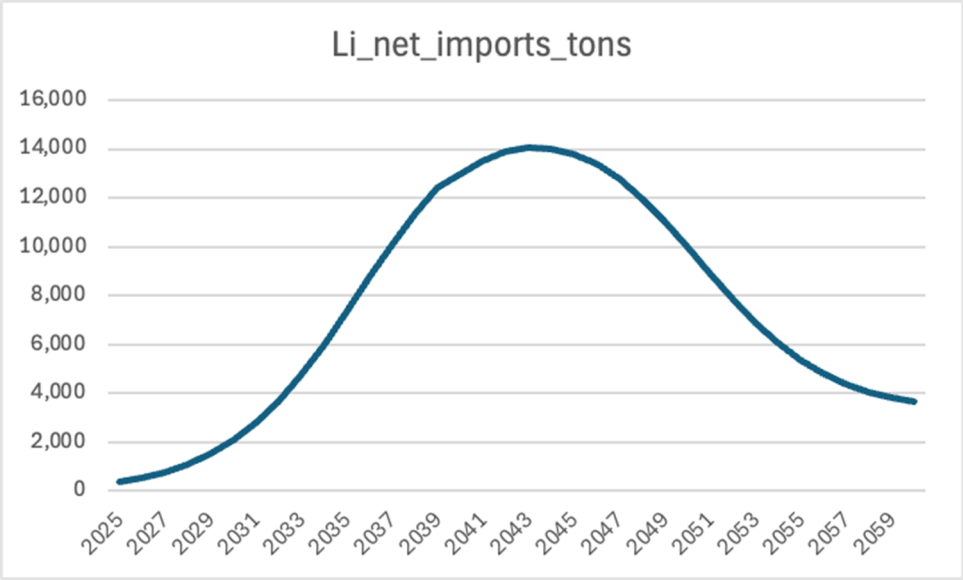


図 2.5　中国からのリチウム輸入量の推移

中国からのリチウム輸入量は 2043 年頃にピーク（約 14,057 トン）に達し、その後はリサイクル供給の拡大に伴い減少に転じる。2045 年にはリサイクル効率が理論上 100%に到達するものの、新車の供給台数と廃車台数との間には約 15 年のタイムラグが構造的に存在するため、中国からの輸入がほぼゼロとなるのは 2060 年以降である。改めて強調すると、2035 年～2050 年の約 15 年間が中国依存のリスクを最も強く抱える期間であり、とりわけ 2040 年代が資源安全保障上の最重要時期となる。この期間における供給途絶リスクへの備えが、政策立案上の喫緊の課題である。

2.4.10　モデルの限界と注意点

本モデルはあくまで「簡略化されたモデル」であり、現実の経済・技術システムのすべてを忠実に反映しているわけではない。モデルの解釈にあたっては、以下のような限界があることに十分留意する必要がある。

第一に、純輸入量の計算式 $It = \max(Dt - Rt, 0)$ は、リサイクル供給が需要を上回った場合（すなわちリチウムの輸出国に転じる場合）を考慮しておらず、余剰分の扱いが定義されていない。第二に、リチウムは EV 向けだけでなく、スマートフォン、ノート PC、定置型蓄電池（家庭用・系統用）など多様な用途で使用されているが、本モデルでは EV 向けのみを対象としており、他用途からの需要圧力を過小評価している可能性がある。第三に、リチウム鉱山の生産能力制約や地政学的リスクに起因する原材料価格の急変動は外生変数（モデルの外で決まるもの）として扱っており、モデル内部では内生化されていない。第四に、リサイクル効率は線形（直線的）に上昇すると仮定しているが、前述のとおり実際には S 字型（ロジスティック型）に変化する可能性が高い。

これらの限界はあるものの、本モデルの主たる目的は、リチウム需給の大局的なトレンド（傾向）を把握し、政策介入が最も効果的となる時期や重要な転換点を明らかにすることにある。個別パラメータの精密な推定よりも、システム全体のダイナミクスの理解と政策的示唆の抽出が重要である。

2.5　おわりに：全体のまとめと今後の課題

本稿では、日本における EV 普及が電力システムの需給構造とリチウム資源の循環経済の両面にもたらす影響を、定量的な分析に基づいて包括的に検討した。

第 1 節から 3 節では、日本の全登録自動車が EV に置換された場合、年間電力需要が約 156 TWh（約 15.6%）増加し、ピーク電力需要がほぼ 2 倍の約 302 GW に達することを示した。3 か月分の電力備蓄は約 50 兆ドルというコスト面から非現実的であるが、スマート充電や V2G 技術、デマンドレスポンス、スマートグリッド、そして再生可能エネルギーを含む多様な電源構成を戦略的に組み合わせることで、段階的な対応が十分に可能であることを論じた。

第 4 節では、EV の普及に伴うリチウムの需給バランスと中国依存度の時間的変化を、ロジスティック普及曲線・学習曲線・リサイクルモデルを統合した数理モデルにより分析した。純輸入量は 2044 年頃に約 14,000 トンのピークを迎え、中国依存度は 2036 年頃にピークに達した後に減少し 2045 年には理論上ゼロとなる。リサイクル技術の早期確立が経済安全保障上きわめて重要であると結論づけられる。

今後の研究課題としては、以下の諸点が挙げられる。第一に、リサイクル効率の S 字型（ロジスティック型）関数への拡張によるモデルの精緻化、第二に、EV 以外の用途（定置型蓄電池、モバイル機器など）を含むリチウム総需要の推計、第三に、為替レートの変動や地政学的リスクプレミアムがコストに与える影響の内生化、第四に、複数シナリオ（普及速度の高低、技術革新の進展度合いなど）を設定した感度分析の拡充である。また、研究会の諸先生方から頂いた有益なコメントをもとに、モデルの限界をより明確に記述し、政策提言の精度と実践的有用性を高めていくことが求められる。

EV 社会への移行はもはや避けられないグローバルなトレンドであるが、その移行を円滑かつ持続可能な形で成功させるためには、電力需給の安定化とリチウム資源の確保という 2 つの構造的課題に対して、統合的かつ長期的な視点で同時に取り組む必要がある。本研究がそのための政策議論の一助となれば幸いである。

参考文献

1) Borlaug, B., Wood, E., Fink, J., & others. (2024). *Integrating electric vehicles into the grid*. National Renewable Energy Laboratory.
2) International Energy Agency. (2024a). *Global EV outlook 2024: Moving towards increased affordability*. IEA.
3) International Energy Agency. (2024b). *Global critical minerals outlook 2024*. IEA.
4) Muratori, M., & Mai, T. (2021). The shape of electrified transportation. *Environmental Research Letters, 16*(1), 011003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcb38
5) Schmidt, O., Hawkes, A., Gambhir, A., & Staffell, I. (2017). The future cost of electrical energy storage based on experience rates. *Nature Energy, 2*, 17110. https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.110
6) U.S. Department of Energy. (2024). *Impact of electric vehicles on the grid*. U.S. Department of Energy.
7) Xu, C., Behrens, P., Gasper, P., Smith, K., Hu, M., Tukker, A., & Steubing, B. (2023). Electric vehicle batteries alone could satisfy short-term grid storage demand by as early as 2030. *Nature Communications, 14*, Article 119. https://doi.org/10.1038/s41467-022-35393-0
8) Ziegler, M. S., & Trancik, J. E. (2021). Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline. *Energy & Environmental Science, 14*(4), 1635–1651. https://doi.org/10.1039/D0EE02681F

3章　最適気候政策（DICE モデル）とエネルギー新技術

3.1　はじめに

2018 年のノーベル経済学賞は P. ローマーとともに W. ノードハウスが受賞した。スェーデン王立科学アカデミーによるとその理由は：前者はイノベーションを長期的なマクロ経済分析に組み込んだことであり、後者は気候変動を長期的なマクロ経済分析に組み込んだことである。本章では、後者のノードハウスの研究を取り扱う。その内容をより具体的に言うと、それは経済成長が地球環境に与える影響に関する研究である。彼はマクロ経済分析に気候変動を組み入れた地球温暖化の統合評価モデル（Integrated Assessment Models、IAMs）である DICE（Dynamic Integrated model of Climate and Economy）モデルを他に先駆けて作成した。それは本人だけでなく多くの研究者によって改良が重ねられ、現在では地球温暖化問題に対して経済学的に対処するための最も重要な方法の一つとなっている。

他方で、DICE モデルは恣意性が強いとして多くの批判にさらされてきた。モデルの恣意性は例えば、現時点の地球温暖化が将来に与える影響や割引率に関する想定の恣意性である。そしてそのようなモデルから導かれた結論、すなわち最適は特段の気候温暖化対策をとらないこと、も当然批判の対象となっている。そのような批判に対してノードハウスがとった態度は、いわゆる‘no regret policy’である。それは、地球温暖化に関する不確実性は大きいので、現時点で費用のかかる温暖化対策をとると、投じた費用が結果的に無駄になる可能性があるため、現時点では温暖化対策が無駄にならない（例えば、エネルギー効率を高める）投資を行うべきであるという考え方である。

本章では、DICE モデルとその批判について紹介するとともに、ノードハウスの no regret policy に鑑み、エネルギー効率を高める新技術の実現可能性について考察する。本章の構成は次の通りである：第 1 節は DICE モデルとその批判であり、その第 1 項において、DICE モデルを Nordhaus（1994）によりながら説明した後、第 2 項においてその批判を、主として Pindyck（2013、2017）によりながら述べる。第 2 節では、ノードハウスの no regret policy に鑑み、エネルギー効率を高める新技術として二酸化炭素（CO_2）の利用（第 1 項）、水素エネルギー（第 2 項）、核融合エネルギー（第 3 項）を取り上げ、考察する。なお、そのような新技術として再生可能エネルギーも考えられるが、拙著（2023）で取り扱ったので、本章では取り扱わないこととする。

3.2　DICE モデルとその批判

3.2.1　DICE モデル

経済成長や気候変動のような長期間にわたる現象の分析に有用なのは、最適成長理論の枠組みである。それは Ramsey（1928）によって開発され、Koopmans（1967）によって厳密に理論化され、Solow（1970）によって集約化された理論体系である。DICE モデルはこの理論体系をベースとし、それに温室効果ガス（greenhouse gases、GHGs）排出削減の最適経路を計算するための修正を加えたものである。ラムゼイモデルは目的関数と消費、生産、投資などに関する（経済的）制約式から成る。DICE モデルはこれに GHG 削減に関する地球物理的制約式を加えた 3 グループから成る。次に各グループの内容をやや詳しく見てみよう。

目的関数（第 1 グループ）

第 1 グループは最適化の目的に関する次の 2 式から成る。DICE モデルはラムゼイモデルをベースにしている故、目的はそれと同様に、現在から将来にかけての人々の消費から得られる効用の最大化である。すなわち

(1)　$\max_{\{c(t)\}} \sum_t U[c(t), L(t)](1+\rho)^{-1}$

(2)　$U[c(t), L(t)] = L(t)\{[c(t)]^{1-\alpha} - 1\}/(1-\alpha)$

ここに、Uは効用（社会的厚生）のフロー、$c(t)$はt期の 1 人当たり消費のフロー、$L(t)$は人口水準、ρは純社会的時間選好率である。実際の計算は 10 年刻みでなされる。したがって、すべてのフロー変数は 10 年当りのフロー量である。また、ρについてノードハウスは、気候変動対策としては 1%もしくは 0%が推奨されてきたが、3%（もしくはそれ以上）が貯蓄率や利子率の実績と整合的であるとして、3%を採用する。

効用Uの厳密な形は、$L(t)$に 1 人当りの効用$u[c(t)] = \{[c(t)]^{1-\alpha} - 1\}/(1-\alpha)$をかけたものと定義される。ここに、$\alpha$は消費水準の社会的価値付け尺度であり、効用関数の曲率、すなわち消費の限界効用弾力性、もしくは不平等回避率を示す。DICE モデルでは、$u[c(t)]$は$u[c(t)]\alpha \to 1$ という極限値をとった対数型（ベルヌーイ型）の$u[c(t)] = \log[c(t)]$が用いられる。

人口については、初期値を$L(1965)$=33.69 億人とし、それ以降はその伸びが一定率で減少し、最終的に人口は安定すると仮定された。すなわち、$g_L(t)$をt期における人口の伸び率、δ_Lを伸びの低下率とすると、$g_L(t) = g_L(t-1)(1-\delta_L)$である。ここに、$\delta_L$=0.195/10 年、$\delta_L(1965)$=2.03%である。

経済的制約（第 2 グループ）

第 2 グループは最適化の際の経済的制約に関連する 4 式から成る。式(3)はt期の社会全体の産出（GDP の総計）$Q(t)$が、技術$A(t)$、資本$K(t)$、労働$L(t)$の関数であり、コブダグラス

型の

(3) $Q(t)=\Omega(t)A(t)K(t)^{\gamma}L(t)^{1-\gamma}$

によって与えられることを示す。ここで、γは資本の産出に対する弾力性で、0.25 と想定された。$\Omega(t)$は排出削減と気候変動の産出に対する影響を表し、その具体的内容は式（13）で示される。技術進歩を示すパラメータ（全要素生産性）$A(t)$は外生的に与えられ、その伸び率の初期値は年率 1.41%、伸び率の低下率は 0.11/10 年と仮定された。

下の式(4)は産出が消費$C(t)$と粗投資$I(t)$に配分されることを示し、式(5)は 1 人当たり消費の定義式である。式(6)は資本ストックのバランス式で、1 期前の資本ストック$K(t-1)$はδ_kだけ減耗するとともに、その期の粗投資$I(t-1)$の分だけ増加することを示す。なお、$\delta_K = 0.1$と想定された。

(4) $Q(t) = C(t)+I(t)$

(5) $c(t) = C(t)/L(t)$

(6) $K(t) = (1-\delta_k)K(t-1) + I(t-1)$

気候・GHG・損害の関係式（第 3 グループ）

第 3 グループは経済活動、GHG 排出・濃度、気候変動の間の関係を示す 7 式から成る。次の 4 式は GHG の排出によって地球の温度が高くなるメカニズムを記述している。

(7) $E(t) = [1-\mu(t)]\sigma(t)Q(t)$

(8) $M(t) - 590 = \beta E(t-1) + (1-\delta_M)[M(t-1) - 590]$

(9) $F(t) = 4.1\{\log[M(t))/590]\ /\log(2)\} + O(t)$

(10) $T(t) = T(t-1) + (1/R_1)\{F(t) - \lambda T(t-1) - (R_2/\tau_{12})[T(t-1) - T^*(t-1)\}$

$T^*(t) = T^*(t-1) + (1/R_2)\{(R_2/\tau_{12})[T(t-1) - T^*(t-1)]\}$

式(7)は経済活動$Q(t)$と GHG 排出$E(t)$を結び付けるものである。排出される GHG の中で主なものは CO_2 であり、次いでフロン（CFCs[1]）であるので、モデルでは CO_2 とフロンのみが削減の対象となる。その無規制排出量からの削減率を$\mu(t)$とする。この$\mu(t)$の最適決定がモデルの重要な課題の 1 つである。また、規制がないときの総産出 1 単位当たりに発生する CO_2 等価排出量$\sigma(t)$は、経済成長に伴う炭素削減技術の進歩によって緩やかに低下するとされた。$\sigma(t)$の変化率の初期値は年率−1.25%、変化率の低下率は 0.11/10 年と仮定された。

式(8) は GHG の大気中の蓄積に関する式である。左辺の$M(t)$は大気中の GHG の濃度（蓄積量）であるので、左辺は工業化以前の炭素の均衡水準 5,900 億トンからのt期における変化分を表す。右辺の第 1 項の$\beta E(t-1)$ は、GHG の排出量のうち、β（＝0.64）だけが大気中に

[1] フロンが CFCs（chlorofleorocarbons、クロロフルオロカーボン類）を意味するのは狭義の場合である。広義には塩素を含まないフルオロカーボン、水素を含むハイドロクロロフルカーボン、臭素を含むハロンを含む。なお、本章の脚注はすべて筆者のものである。

保持されることを示す（残りは地上の植物に吸収される）。第 2 項の$(1-\delta_M)[M(t-1)-590]$は、$t-1$期における大気中の GHG の蓄積量の変化分$M(t-1)$が 10 年当りδ_M (=0.0833)ずつ深海に移動して減少していくことを示している。なお、Mの初期値M(1965)=6770 億トン（炭素換算）とされた。

GHG の蓄積は、放射強制力（radiative forcing）の増加による地表面の温暖化を通じて地球を温暖化する。放射強制力とは、大気圏外から地球に到達する太陽放射エネルギー量と、その一部が大気圏外へ再放射される地球放射エネルギー量と差分のことで、それがプラスならば、GHG が増加したことを意味する。式(9)は大気中の GHG 蓄積量$M(t)$と放射強制力$F(t)$（単位はワット/平方メートル）との関係を示す。なお、$O(t)$は他の GHG（主として CH_4 と N_2O）による影響を表す。この影響は分からないことが多いので、外生扱いされる。

式(10)の 2 つの式は、放射強制力と気候変動との関連を、大気および海洋上層部と、深海に分けて示している。放射強制力が強まると、まず大気層が暖められ、次いでそれが海洋上層部に及び、最後に深海が暖められる。この温度上昇のタイムラグは基本的には各層の熱慣性によって決まる。式（10）において、大気および海洋上層部の全地球的季節平均温度上昇は$T(t)$、深海の温度上昇は$T^*(t)$、上層の熱容量は R_1、下層のそれはR_2、τ_{12}は上層から下層への伝達率、λはフィードバックのパラメータである。

次の 3 式の中の上の 2 式は気候変動が与える経済的影響に関連する。

(11)　$D(t)=Q(t)\theta_1 T(t)^{\theta_2}$

(12)　$TC(t)=Q(t)b_1\mu(t)^{b_2}$

(13)　$\Omega(t)=(1-b_1\mu(t)^{b_2})/(1+\theta_1 T(t)^{\theta_2})$

式(11)は経済的損害$D(t)$を気候変動$T(t)$と結びつける式である。ノードハウスはこの関係はきわめて捉えにくいとした上で、損害は$Q(t)$と$\theta_1 T(t)^{\theta_2}$に比例するとした。ここに、θ_1は損害規模を表すパラメータ、θ_2は損害関数の非線形を示す指数項であり、それぞれの値は、θ_1 =0.00144、θ_2=2 と推定された。

式（12）は GHG 排出削減のための費用関数である。ノードハウスはこれまでにいろいろな費用関数の形状と大きさが示されてきた中で、式（12）を用いた。$TC(t)$は削減の総費用であり、それは$Q(t)$と$\mu(t)^{b_2}$に比例して発生するとされた。ここに、b_1とb_2は費用関数の規模と非線形を表すパラメータであり、それぞれの値はb_1 =0.0686、b_2=2.887 とされた。

式（13）は式(3)で用いられた、産出$Q(t)$に対する排出削減と気候変動の影響を示す係数$\Omega(t)$の内容を説明する式である。排出削減費用$TC(t)$および気候温暖化による損害$D(t)$の増加はともに GDP を減らすので、前者を GDP から差し引いた$Q((t)-TC(t)$と、後者を GDP 加えた$Q(t)+D(t)$との比をとり、これを$\Omega(t)$とした。すなわち、$\Omega(t)=(Q((t)-TC(t))/(Q(t)+D(t))$である。これは式（13）となる。

式(1)～（13）が DICE モデルを構成する。

シナリオの設定

ノードハウスは気候変動政策について、次の 7 つの異なるシナリオを設定し、DICE モデルを用いて分析を行った：

(1) 規制なしケース（基準ケース）：政府は GHG 抑制に何らかの手段を講じることも、温室効果による外部経済を内部化することも行わない。

(2) 最適政策ケース：さまざまな経済的・地球物理的制約や関係式の下で、効用の現在価値を最大化する。この場合、温暖化問題を内部化する政策として、一括還流を伴う炭素税賦課や、完全な削減実施を保障するシステムを伴う排出権取引などがとられる。

(3) 10 年遅れの最適政策ケース：温室効果に関する知見がより確実になる 10 年後まで最適計画の実施を遅らせる。

(4) 排出量を 1990 年水準に安定化させるケース：この目標は CO_2 と CFCs(CO_2換算)排出量の放射等価を 1990 年水準に安定化する（すなわち、排出量を年間 80.45 億炭素換算トンに制限する）という形で扱われる。

(5) 排出量を 1990 年水準より 20%削減するケース：これは多くの環境主義者やグリーンな政府の主張でもある。本書では CO_2 と CFCs(CO_2換算)の合計排出量を 1990 年水準より 20%削減するという形で扱っている。

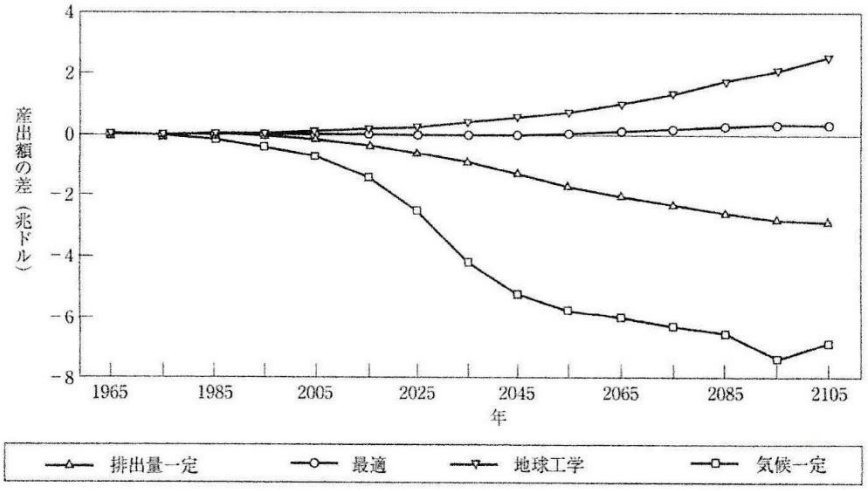
(6) 地球工学ケース：これは技術による抜本的な解決策で、例えば、入射太陽光の後方散乱や反射を大きくする物質の大気注入、植林による植生の生物量増加、海洋の炭素吸収の促進などを含む。ノードハウスは全米科学アカデミーの調査結果に基づいて、地球工学的解決策を経済的にコストがかからないものとして扱う。

(7) 気候安定化ケース：1985 年以降の GHG による気温上昇を 0.2 度/10 年間以下に抑え、1900 年以降の気温上昇合計を 1.5 度以下に抑える。

計算結果

ノードハウスは先ず上記の 7 ケースについての計算結果の全体像を 3 つの表で示した後に、7 ケースの中の(1)規制なし（あるいは(6)地球工学)、(2)最適、(4)排出量一定、(7)気候一定の 4 ケースについて、産出、GHG 排出量、大気中の GHG 濃度、全地球平均気温、1 人当たり消費などをグラフで示す。

図 3.1 は各ケースの世界生産の、規制なしケースとの差分がどのように変わるかを示す。その結果についてノードハウスは次のように述べる：この計算でわかった 1 つの驚くべき事柄としては、規制なしケースと最適政策を行うケースの差が、21 世紀を通して比較的小さいことである。これは、将来の温暖化レベル自体が穏やかなものであること、近時点における

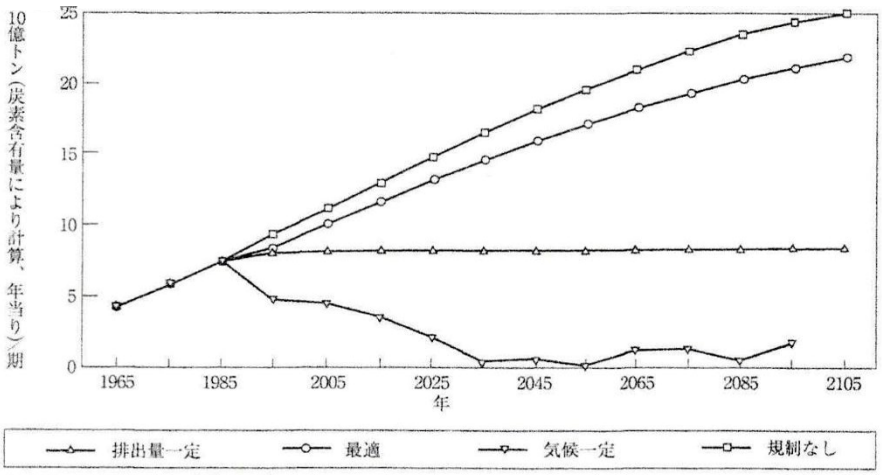


（出所：Nordhaus(1994) 図 5-1）

図 3.1　世界生産の差分（規制なしケースとの差分、1989 年価格、兆ドル）

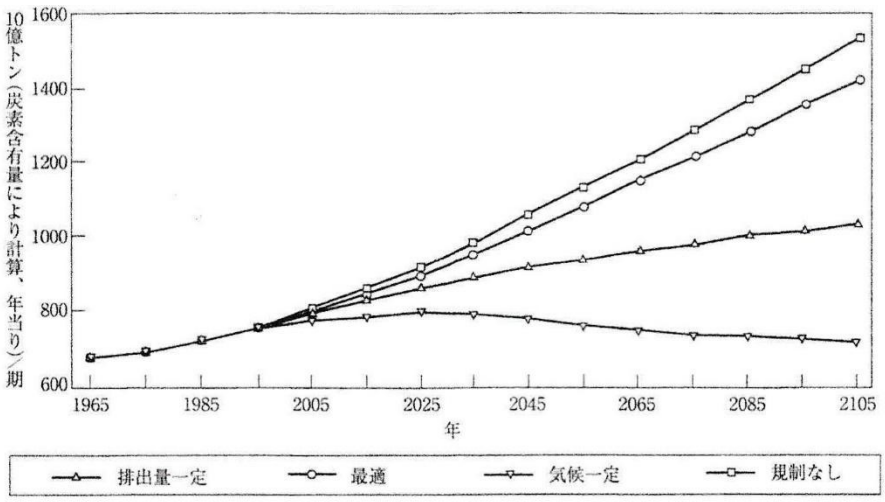
GHG 抑制レベルが低いことによる。…地球工学ケースと気候安定化ケース、そして排出安定化ケースは、基準ケースとの差が大きい。

図 3.2 と 3.3 はそれぞれ、各ケースの GHG 排出量と大気中の GHG 濃度の推移を示す。図 3.2 は 2075 年の年当り GHG 排出量の予測値が、規制なしの場合 219.6 億トン、最適の場合 190.1 億トンで、その差は 29.5 億トンであることを示す。また同図より排出量一定のケースにおいては、排出量は 2000 年以降に一定値に抑制されることが分かる。図 3.3 は大気中の GHG 濃度についてである。規制なしの場合、GHG 濃度は 1990 年の 7450 億炭素換算トンから 21 世紀末には 1 兆 5000 億炭素換算トンになる。最適排出規制によって、21 世紀末の GHG 濃度は 1000 億炭素換算トン強減少し、およそ 1 兆 4000 億炭素換算トンになる。



（出所：Nordhaus(1994) 図 5-2）

図 3.2　GHG 排出量（CO_2 と CFC_S のみ）

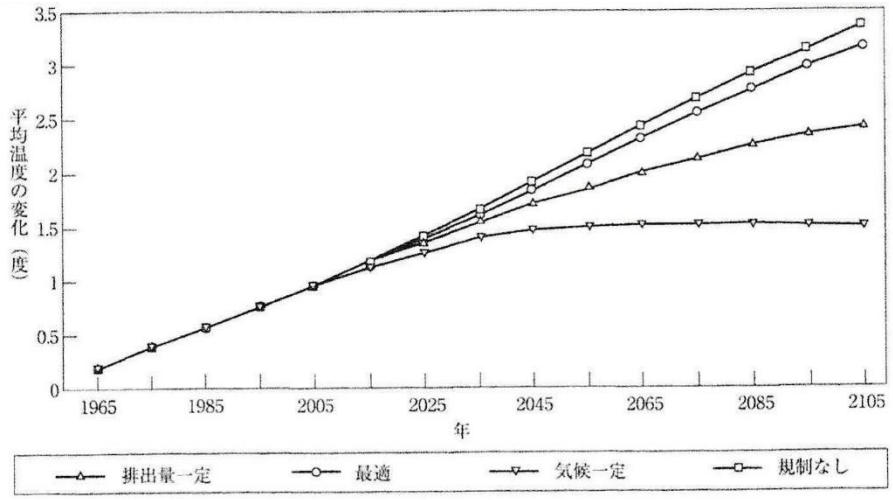


（出所：Nordhaus(1994) 図 5-3）

図 3.3　大気中の GHG 濃度（CO_2 と CFC_S のみ）

図 3.4 は各政策オプションが全地球平均気温に与える影響として、基準年の全地球平均気温からの温度上昇分を示す。それによれば、規制なしケースの全地球平均気温は 21 世紀末までに 3.4 度上昇、10 年ごとの気温上昇の平均は 0.24 度となった。最適ケースでは、全地球平均気温は 21 世紀末までに 3.2 度上昇、10 年ごとの上昇率は平均 0.22 度であった。最適ケースは他のケースに比べて平均気温上昇率の低下幅は小さく、21 世紀末までに規制なしケースより全地球平均気温が 0.2 度低下するにすぎない。

以上の結果についてノードハウスは次のように述べる：読者は、最適政策やもっと大胆な政策をとっても、濃度や気温への影響がきわめて小さいことに驚かれるかもしれない。その理由は簡単だ。われわれの推計によれば、温暖化による世界経済への影響は比較的小さく、3 度 の平均気温上昇によって、世界全体の生産は 1.3%程度しか影響されない。また温暖化抑制コストは、抑制割合の小さな政策をとるときにはとても低く、抑制割合が高まるにつれて急激に上昇する。… これ以外にも、あと 2 つ、最適ケースにおける温暖化抑制が小規模にとどまった理由がある。第 1 は、GHG がすでに排出され蓄積されてきたことによる。GHG 濃度上昇が気候に影響を与えるには時間差が存在することから、既排出分の気温上昇への影響は止められない。DICE によれば、GHG 濃度が 2000 年水準にとどまるとしても（これは、その後 20 年間に排出量を 70%削減するというかなり大胆な目標である）、全地球平均気温は基準年より 1.6 度上昇する。… ［第 2 は］GHG と温暖化の非線形関係にある。科学的研究によれば、均衡温暖化と CO_2 濃度の関係は対数的であるとされている。… この非線形性が意味するのは、CO_2 濃度の最後の数%を削減するような政策は、気温推移に比較的小さな影



（出所：Nordhaus(1994) 図 5-4）

図 3.4　全地球平均気温（1965 年からの変化）

響しか与えないということである。これは、経済システムの至る所で見られる、いわゆる収穫逓減法則とは正反対である。

3.2.2　DICE モデルの批判

本項では DICE モデルに対する批判を、R. ピンディック[2]による 2 つの論文を中心に見てみよう。先ず、Pindyck (2013)の「序」と「結論」の要旨を抄訳の形で述べよう。

序　CO_2 などの GHG の燃焼は望ましくない気候変動－地球温暖化、より大きな気候変化、ことによると海面上昇－に結果する。この外部費用が炭素の社会的費用（social cost of carbon、以下、SCC）である。その大きさには非常に大きな不同意が存在する：①影響は小さく、CO_2 1 トン当たり約 10 ドル、②SCC は大きく、CO_2 1 トン当たり約 200 ドル。米政府のワーキンググループは、ノードハウスのモデルを用いて平均 21 ドル（後に 33 ドルとアップデート）と推定した。しかし、IAMs は政策分析のツールとしてほとんど役立たずにする決定的な欠陥を持っている。さらに悪いことに、その利用は単に錯覚を起こさせる知識と明確さの水準を示唆し、人を誤らせうる。

結論　IAMs は代替的な気候変動政策を評価し、SCC を推定するためには、ほとんどあるいは何の価値もないと論じた。反対に、IAM に基づく分析は存在しない知識と明確さの水準を示唆し、インプットを恣意的に選択しうる故に、モデル作成者をしてほとんどあらゆる望ま

[2] ピンディックは MIT Sloan School of Management の東京三菱銀行経済学・ファイナンスの教授であり、市場構造、金融経済学、環境経済学、エネルギー経済学、投資決定や政策立案における不確実性の役割などに焦点を当ててきた。最近の彼は、伝統的費用便益分析についても関心を持ち、それが潜在的な破局回避政策に適用されると失敗することなどを主張している。

しい結果を得さしめる[3]。

説明したように、気候感度を決定する物理的メカニズムは、極めて重要なフィードバックループを含み、このフィードバックループの強さを決定するパラメータの値の大部分は未知である。気候変動の影響になると、さらに知らない。IAM の損害関数は理論的・実証的基礎がなく、完全にでっち上げである。それは単に、2℃や 3℃の温暖化の影響に関する共有信念（誤っているかも知れない）を反映するだけで、5℃以上気温が上昇したとき何が起こるか教えられない。しかも、IAMs が気候政策を分析するのに用いられるとき、損害関数は重くとられる。

最後に、IAMs は破滅的結果の可能性と性質について何も教えないが、気候変動政策にとって最も問題なのはまさにそのような結果である。恐らく、この点でなしうる最善は、破滅的結果の確率とありうる影響の推定値を思いつくことである。他の方法は自分自身を欺く。私の IAMs の批判は、我々はほんのわずかしか知らないので、今は気候変動について何もすべきでなく、もっと多く学ぶまで待つべきだととられるべきではない。全く逆である。GHG 削減政策を保険の 1 形態と考えることができる：社会は低確率の破滅は起こらない（あるいはより起こりそうにない）という保証に対して支払っているであろう。たとえ SCC の良い推定値がなくても、ワーキンググループの 21 ドル（あるいはアップデートされた 33 ドル）の数をラフで政治的に受け入れうる出発点としてとり、その金額の炭素税を課すことは意味がある。このことは炭素の社会的費用が存在し、社会的費用は消費者と企業が支払う価格に内部化されなければならないということを確立するのに役立つであろう。（たいていの経済学者はこのことをすでに理解しているが、政治家と公衆は異なる。）後に、SCC の真の大きさについてより多く学ぶにつれて、炭素税は増加あるいは減少するであろう。

以上、Pindyck（2013）の「序」と「結論」の要旨を紹介した。ピンディックは Pindyck（2017）において、上述の Pindyck（2013）では DICE モデルを含む IAMs は政策分析のツールとしてほとんど役立たずにする決定的な欠陥を持っていると論じたとし、その最も重要なものを次のように要約した：

(1) あるインプットー関数形とパラメータの値ーは恣意的であるが、モデルの結果に膨大な影響を持つ。1 つの例は割引率であり、最適削減に関するノードハウスとスターンの著しく異なる結論を導く[4]。

[3] 例えば、Hansel et al.(2020)は UN のパリ協定での気候目標、すなわち、国々は地球温暖化を 2℃より十分低く制限することと、1.5℃制限を積極的に追及すること、は適切にアップデートされた DICE モデルにおいて最適かも知れないことを示した。

[4] ノードハウスがしばしば用いる割引率は 3～6 パーセント、スターンのそれは 0～1.5 パーセント。

(2) 我々は気候感度、すなわち大気中の CO_2 蓄積の倍増による気温上昇についてほとんど何も知らないが、これは IAM の重要なインプットである。
(3) IAM の最も重要な部分の 1 つは損害関数、すなわち気温上昇と GDP あるいはその成長率との関係である。しかし、我々は事実上何も知らないので、恣意的に定式化するほかない。
(4) IAMs は GDP に非常に大きな影響を与える気温の 5℃を超える上昇のような壊滅的な(catastrophic)気候の結果、すなわち tail risk（一般的には、分布の尾(tail)にある故に発生確率は非常に低いが、発生すれば大きな損失をもたらすスク）について何も教えない。

続けて彼は、「私の評価は辛らつすぎ、IAMs モデルは代替的な気候政策を定式化し評価するのに役立つ」という議論は次を含むとする：
(1) 全てのモデルは欠陥を持っている－結局、あらゆるモデルは現実の簡単化－が、経済学者は常にモデルを作って利用する。
(2) 気候感度の不確実性あるいは正しい損害関数は、重要なパラメータに確率分布を割り当て、モンテカルロシミュレーションを走らせることによって扱い得るか？
(3) SCC を推定するおよび/あるいは特定の政策を評価するために可能な最良なモデルを発展させなければならない。換言すれば、高度に不完全なモデルを用いて作業することは全くモデル無しより良い。
(4) 最後に、IAMs を利用しないとき、いかにすれば SCC を推定し、代替的な GHG 削減政策を評価しうるか？　そうでなく、専門家の意見に頼るべきか？

ピンディックは上記の序文に続けて、IAMs は欠陥があっても政策を通知するのに役立つツールとして有用でありうるか？　これが本論文で取り組む問題であるとして、①まず、IAMs の利用と誤用を短く論じ、②次に不確実性に取り組み、③次に科学的な誠実性と透明性に向かい、④次に 3 つの追加的な問題を論じ、⑤最後に、もし IAMs でなければ専門家の意見に依存するのがベストであると議論した。そして、結論で次のように述べる。

結論

気候変動とその影響について知っていることと知っていないことについて正直で率直であることが必要なことを強調した。ファイナンス学者が投資家に「技術分析」を売ろうとしない（あるいは売るべきではない）と同様に、環境経済学者は IAMs が気候変動とその影響を予測できると、あるいは IAMs が SCC の大きさを教えうると主張すべきではない。

大気科学は進歩したが、次の月の天候、あるいは次のハリケーンがいつ来るかを予測しうるとは主張しない。天候の駆動力、GHG 排出がどのように天候に影響しうるかなどについて大きな進歩があった。しかしそのように進歩しても、IAMs は予測と政策分析には利用でき

ない。

モンテカルロシミュレーションはパラメータの正しい確率分布も正しい方程式も分からないので利用できない。かくしてベストな方法は、重要なパラメータについて感度分析を行うことである。

このことはIAMsが役立たないことを意味しない。IAMsは気候動学と気候・経済の相互作用の理解を深めるのに役立つ分析的・教育的工夫である。しかし、モデルが誤用されず、政府に対して売り込みされ過ぎないように、モデルの限界について明瞭で率直であることは必須である。

SCCの推定と気候政策の定式化の問題は、最大の問題が破滅的な気候事態の可能性という事実によってやや簡単化される。そのような事態はいかにありうるのか、それはいかに悪いのか？　この事態を避けるためには排出がどのくらい削減されなければならないのか？…なしうるベストは、少なくとも部分的には気候科学者と環境経済学者が供給する数値に依存して、これらの質問に対する妥当な答えを見つけること、すなわち専門家の意見を利用することである。この種の分析は簡潔、透明、理解容易であろう。それはカーテンを開け、気候変動とその影響についての信念を明らかにするのに役立つ。

以上、DICEモデルを含むIAMsに対するピンディックの批判を、Pindyck（2013、2017）によりながら紹介した。その批判の要点は、IAMs で用いられる関数形とパラメータの値は恣意的であるので、DICE モデルを含む IAMs は政策分析のツールとしてほとんど役立たずにする決定的な欠陥を持っているということである。この要点に限れば、ピンディックの批判は内在的なそれと言える（p.52 で述べた批判の第 4 点、すなわち tail risk に関する批判は外在的である）。

その他の批判

熊本（2002）はDICEモデルの欠点として次の4点を挙げる：①地球温暖化によって消費者が被る負の効用は、生産の減少を通じた間接的なものしか考慮されていない、②算出の過程において、オゾンの減少、 大気汚染やR&Dのようなその他の潜在的な市場の失敗を省略している、③被害関数、特に気候変化による発展途上国や自然の生態系の反応についてほとんど考慮していない。地球温暖化により、 被害を被る国は先進国のみならず、発展途上国や自然の生態系も同様であり、 これらへの影響を無視している、④不確実性の問題を除いている（閾値を明示的に示していない）。特に、地球温暖化の被害は連続的ではなく、気温の上昇が一定水準を超えると被害が急激に増加すると考えられている。以上のことから明らかなように、 ノードハウスは地球温暖化の被害を過小評価している。これらの批判は①を除いて外在

的と言える。

さらに熊本は次のように述べる：DICE モデルに代表されるような「早期の国際協定に基づく本格的な温暖化対策の必要性を必ずしも認めない」という意見を支持する学者は少なからず存在する。このような意見は、 no regret policy と呼ばれるものである。それは一般的には、何事かが発生するかは不確定の間は、発生することを想定した対応を行うことはせず、発生しなかったとしてもやっておく意味がある対処のみを行うというポリシーである。地球温暖化問題に関して言えば、地球温暖化についてはまだ不確実性が大きいので、現時点でコストのかかる温暖化対策を取ると、投じた費用が結果的に無駄になる可能性があるため、現時点では温暖化対策が無駄にならない政策（例えば、エネルギー効率を高める投資）を行うべきであるというものである。

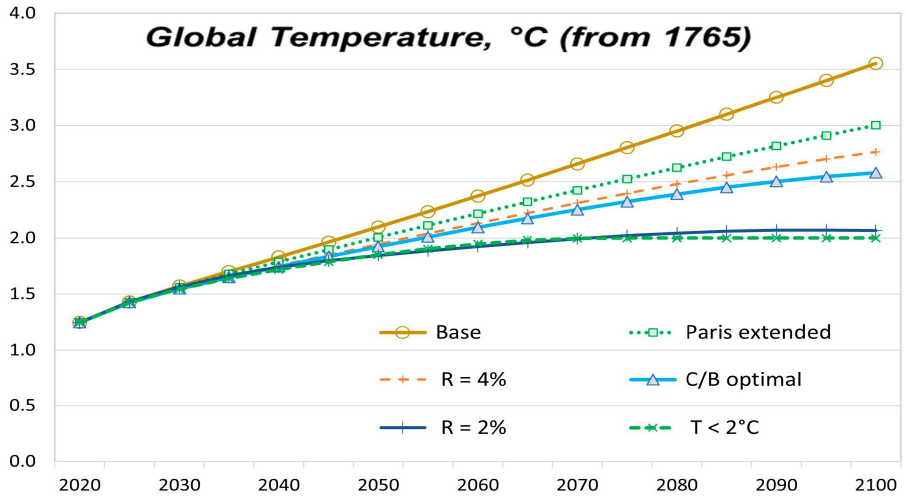
杉山(2019)はノードハウスがなぜ no regret policy という結論に至ったのかの理由の、ノードハウス自身の説明について次のように述べる：ノードハウスの説明は 2 点にわたる。第 1 に、温暖化対策の費用は、環境影響の費用と比較されなければならない、ということである。地球温暖化による環境影響があるというなら、それは冷静に温暖化対策の費用と比較をしましょう、というのがノードハウスの考え方である。対照的に、パリ協定の場合、なぜ 2℃を目標にしたのか、その根拠は示されていない。筆者の理解では、地球温暖化の被害が 2℃を超えると大きくなるという証拠は乏しいから、2℃を絶対的な目標として、それを達成することが温暖化対策の在り方だとする意見には、やはり違和感がある。第 2 に、温暖化対策への投資は、他の経済活動の為の投資と見比べられなければならないこと、すなわち温暖化対策投資には機会費用があるということである。温暖化対策に投資をすれば、その分 CO_2 は減って、温暖化による環境影響は減ることになる。しかしそれだけではなく、温暖化対策に投資をするということは、経済成長のための様々な資本への投資（道路、工場、学校、病院等の建設）が減ることになり、現在の人も未来の人もその分貧しくなる。未来のために良かれと思って温暖化対策をしても、それによって貧しくなってしまうのであれば、持続可能な経済開発とは言えない、ということである。

no regret policy に対しても当然多くの批判がある。例えば國則・松村(1999)は、 IPCC 報告書に発表された現在までの自然科学的な研究の蓄積を根拠に no regret policy は危険な考え方であると言及している。 確かに、遠い未来に技術革新よって大した費用なく炭素排出の削減に成功しても、それ以上に気候の変化がカタストロフィーを引き起こす閾値を越えてしまったら取り返しのつかない事態となり、人類の生存が危うくなって、過去の温暖化対策に関する過小評価を後悔しても遅すぎるということになるのである。以上の点からも、 ノードハウスの結果を全面的に受け入れるには抵抗があると言えよう。

なお、如上の批判を踏まえて、DICE モデルは何回か更新されてきており、最新の更新は Barrage & Nordhaus (2023) である。その冒頭に論文の意義（significance）が次のように述べられている：DICE モデルは、米国や他の政府によって、一貫したシナリオの作成や政策および不確実性の評価にだけでなく、炭素の社会的コストの計算にも用いられる、もっとも広く使われる気候変動統合評価モデルである。本研究は 2016 年版 DICE を更新し、分散不能リスクを含ませるためのアプローチを導入し、改訂された炭素サイクルを含み、被害の推定値を更新し、パリ協定および温度制限シナリオの結果を含む。彼らが得た重要な結論は次のようにまとめうるであろう（図 3.5 参照）：

- DICE2023 は DICE モデルの大規模アップデート版であり、非線形炭素循環の導入、気候モジュールの更新、非 CO_2GHG の内生化、割引率の引下げ、損害関数の強化など、主要部分の全面的な刷新が実行された。その結果、最適温度経路は従来より低くなり、SCC は大幅に上昇した。
- 2℃制約はその達成コストが前より低く見積もられたため、最適政策とほぼ同等の経済効果を持ち得た一方、1.5℃制約はコストが 1000 兆ドルとなるので、実質的に非現実的であった。
- パリ協定の延長政策は、最適政策と基準ケースの中間程度の効果を持つ。
- 基準ケースの SCC は 2020 年期で 66/t CO_2（2019 年ドル）と推計され、DICE2016 より大幅に上昇した。

以上である。このようなアップデートの結果であっても、次節に述べるエネルギー新技術の重要性は変わらない。



（出所：Barrage & Nordhaus（2023）図 3）

図 3.5　全地球平均気温（1765 年からの変化）

本節の最後に、上記の熊本の批判の①と②に関連してコメントしておく。その批判は地球温暖化や大気汚染などから消費者や生産者が受ける影響に関するもので、熊本は DICE デルがそのような影響として、生産の減少を通じた間接的なものしか考慮しておらず、大気汚染のようなその他の潜在的な市場の失敗を省略していると述べる。この批判は至当と思われる。その理由は環境経済学や厚生経済学においては、かかる影響は間接的なものではなく直接的なものとして、下の 2 式のように定式化されているからである：生産者数は 1、消費者数はmの経済を考える。生産者は各消費者が提供する労働$(l_1,\ldots,\ l_m)=l$を投入して、1 種類の消費財Cを生産すると同時に、環境汚染Zを排出する。この関係を生産関数

$$C = F(l, Z)$$

によって表す。他方、消費者iは消費C_i、労働供給l_i、環境水準$E = \bar{E} - Z$から正または負の効用を得（ただし、$\bar{E}$は汚染がないときの環境水準）、効用関数は

$$U_i = u_i(C_i) + v_i(E) + h_i(l_i)$$

と表されるとする。上記のモデルを簡単化し、消費者数を 1、労働供給量を$\bar{l}$と固定化してパレート最適の条件を求めると、$v'(\bar{E} - Z) = u'(F(Z; \bar{l}))F_Z$である。右辺は汚染の限界便益、すなわち、汚染を 1 単位増加させることによる消費財生産増加量F_Zが、どれだけ効用を増加させるかを表している。左辺は汚染の限界外部費用を表している。このパレート最適の条件を満たす汚染水準$Z = Z^*$は最適汚染水準と呼ばれる。

汚染排出が企業にとって費用とならない市場経済では、企業は消費財価格と賃金率の組(P, W)を所与として、利潤$\pi = PF(Z; \bar{l}) - W\bar{l}$を最大化するように行動する。最大化の 1 階の条件は$F_Z = 0$である。これはパレート最適の条件を満たさず、汚染の排出は過剰となる。これを是正するための代表的な手段としてピグー税がある。これは企業の汚染排出に課税して汚染排出量をZ^*に削減する方法である。

3.3　エネルギー新技術

本節では、ノードハウスの no regret policy に鑑み、エネルギー効率を高める新技術として CO_2 の利用（3.3.1）、水素エネルギー（3.3.2）、核融合エネルギー（3.3.3）を取り上げ、考察する。なお、本節は部分的に Wikipedia に負っている。

3.3.1　CO_2 の利用

CO_2 を利用するにはまず、工場や発電所などの大規模な汚染点源から排出される CO_2 を他

の成分と分離して直接的に回収しなければならない。CO_2の利用はその分離・回収を含めて、CO_2の回収・利用（carbon dioxide capture and utilization、CCU）と呼ばれる。また、回収されたが利用されなかったCO_2は、大気の影響のない貯留場所に輸送し、そこに貯留される。このCO_2の分離・回収・貯留のプロセスは、CO_2の回収・貯留（carbon dioxide capture and storage、CCS）[5]と呼ばれる。このCCSは上述のCCUとまとめてCCUSと呼ばれる。このようなCCUSは、大量のCO_2が大気中に放出されるのを防ぐことができる技術であり、カーボンニュートラル実現への有力な方策として、世界各国で導入拡大に向けた検討が活性化している。日本でも、CCUS に係る技術の確立やコストの低減、ビジネスモデルの構築、適地調査や事業化に向けた環境整備などの取り組みが行われている。

CO_2の分離・回収法

CO_2 の分離・回収法には、①燃焼後に行う（post-combustion）、②燃焼前に行う（pre-combustion）、③燃焼中に行う（純酸素を用いて燃焼させるoxy-combustion、oxy-fuel）の3通りがあり、①で利用される主な技術は化学吸収法、固体吸収法、物理吸収法、膜分離法、深冷分離法、②の主な技術は物理吸収法、物理吸着法であり、③の技術は酸素燃焼法と呼ばれる。また、代表的な貯留法としては、地中隔離法、帯水層貯留法、油槽・ガス層貯留法、鉱物固定法などがある。次にこれらの方法について、その他の方法を含めて簡単に説明しよう。

化学吸収法と物理吸収法は、どちらも対象ガスを吸収液に接触させることで CO_2 を分離する技術である。前者はアルカリ性の溶液を用いてCO_2を分離・回収するもので、アミンガス処理が代表的な技術である。後者は高圧でメタノール、ポリエチレングリコール等の溶解度を上げた液体にCO_2を物理的に吸収させ、分離・回収する手法である。この方法は大規模化が比較的容易であり、化学吸収法に比べて必要な熱量が小さく、排気ガス中に含まれる硫黄酸化物の影響による吸収液の劣化程度も小さい。また、固体吸収法はリチウムシリケートや酸化亜鉛などのCO_2のみを吸収するような固体に、CO_2を吸収させて分離・回収する手法である。

膜分離法は、セルロースアセテートなどの多孔質の高分子膜にガスを透過させ、透過速度の違いを利用して CO_2 を分離する方法である。この方法は膜の供給側と透過側の圧力差（CO_2分圧差）が分離回収の駆動力となるので、他の方法に比べて所要エネルギーを小さくすることができると期待される。深冷分離法はガスを圧縮液化し、蒸留により他の不純物を除去し、CO_2 を選択的に分離・回収する方法であるが、他の方法に比べて消費エネルギーやコストの面で劣るため、最近ではあまり用いられていない。

---

[5] CO_2の回収・隔離（carbon dioxide capture and sequestration）、CO_2の制御・隔離（carbon dioxide control and sequestration）など、さまざまな呼び方がある。いずれもCCSと略称される。

物理吸着法は、ゼオライト、活性炭、アルミナなどの多孔質で吸着能の優れた吸着剤に、CO_2を選択吸着させ、分離・回収する技術である。吸収した CO_2 を脱離する際のエネルギーが吸収液を用いる場合に比べて小さくなることから、分離・回収コストの低減が期待される。

酸素燃焼法はガラス製造、ごみ焼却、鉄鋼炉などの高温で大規模な燃焼を必要とする分野において、ボイラーや燃焼炉の支燃ガスに空気ではなく酸素を利用する方法である。この方法によると、窒素が含まれないため燃焼後の排ガス中の CO_2 が大きく、そのまま回収することができるという特長がある。

この他、低エネルギー、低コスト化に向けた新たな CO_2 分離・回収方法として、LNG（液化天然ガス）未利用冷熱の活用や、電気的に吸脱着する電解式セルスタックなどの新しい技術開発に取り組まれている。両者について簡単に説明しよう。前者について：LNG は－162°C に冷却された状態で貯蔵され、再ガス化する際に大量の冷熱が放出される。この冷熱は通常は捨てられてしまうので未利用エネルギーである。このエネルギーを、LNG を気化させて発電を行うことや CO_2 を分離・回収に利用することによって活用が可能となる。後者ににについて：電解式セルスタックは作用極と対極を持つ電気化学セルを複数層積層した構造で、CO_2 を効率的に吸着・分離し、再利用可能な形で回収する技術である。作用極には CO_2 吸着材が組み込まれており、電圧を印加することで電子のクーロン力により CO_2 を吸着し、電圧を変えることで CO_2 を脱離させる仕組みである。回収した CO_2 は再利用可能であり、持続可能な CO_2 資源化技術として期待されている。さらに、CO_2 分離回収機能を備えた高効率な発電技術である CO_2 回収型クローズド IGCC（Integrated Coal Gasification Combined Cycle、石炭ガス化複合発電）システムや、大気中の酸素ではなく金属酸化物中の酸素を利用して燃焼を行い、高濃度の CO_2 を分離・回収しうるケミカルルーピング燃焼技術、また大気中の CO_2 を直接回収する DAC（Direct Air Capture）技術など、さまざまな産業、幅広い用途に適用可能な CO_2 分離回収技術の開発・実証が行われている。

CO_2 の利用

分離・回収された CO_2 はプラスチックや合成繊維などの原料や燃料としてなど、下に示すように様々な方法で資源として利用されるか、利用されることなく貯留される。そのためには CO_2 を利用地あるいは貯留地に輸送する必要があり、輸送方法としては容器に入れてトラックや鉄道で輸送する、ローリーで輸送する、パイプラインで流す、船舶を利用するなど様々あるが、ここではこれ以上立ち入らない。

CO_2 の利用方法はドライアイスなどのように CO_2 のまま直接利用する方法と、燃料やプラスチックなどに変換して利用する方法に大別される。後者は「カーボンリサイクル」と呼ばれる（図 3.5 参照）。次に、これらの利用法について、経済産業省（2019）によりながらより

詳しく説明しよう。

CCU でこれまで一般的だったのは、原油増進回収技術（Enhanced Oil Recovery、EOR）と呼ばれる手法への利用とされる。たとえば自噴しなくなった油田にある原油をできるだけ回収するために、水などを圧力をかけて注入し（圧入）、岩石の小さな穴などに溜まっている原油を押し流すことが行われる。この時、水の代わりに炭酸ガスを圧入するのが CO_2-EOR である。現在一般的なもう一つの CO_2 の利用方法としては、ドライアイスや溶接などに直接利用する方法がある（CO_2-EOR も CO_2 の直接利用とも言いうる）。しかし、こうした方法だけでは、利用される CO_2 の量は限られる。

そこで、CO_2 を資源ととらえ、素材や燃料に再利用することで大気中への CO_2 排出を抑制するための研究開発をおこないイノベーションを進めていこうとする取り組みが、経済産業省が提唱するカーボンリサイクルである。CO_2 の利用先としては、①化学品、②燃料、③鉱物、④その他が想定されている。

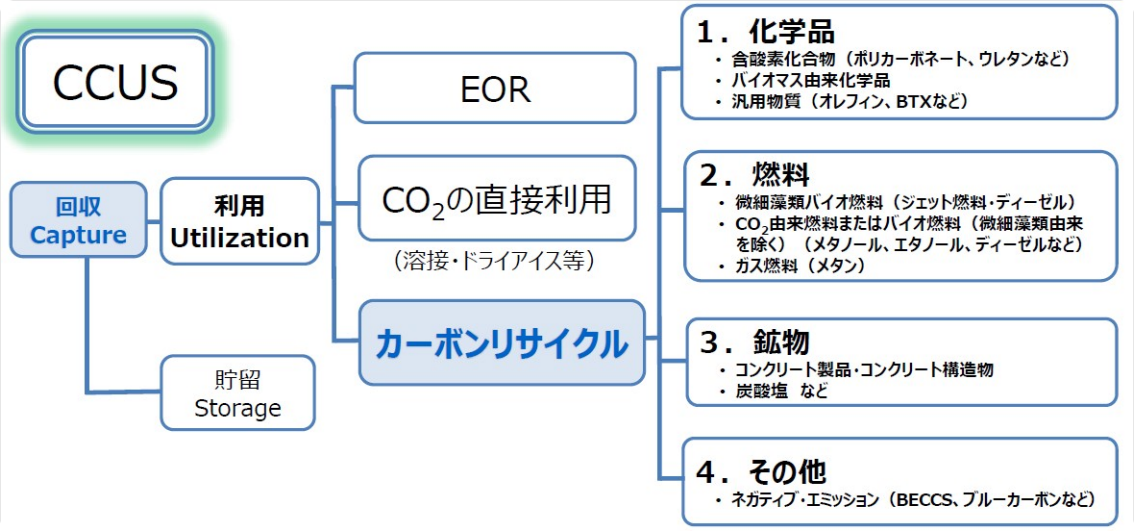
①化学品では、具体的には、ウレタンや、プラスチックの一種で CD などにも使われるポリカーボネートといった含酸素化合物（酸素原子を含む化合物）」が考えられている。また、バイオマス（建設廃材やエネルギー源として栽培される植物など、動植物に由来する有機物であって、エネルギーとして利用できるもの）由来の化学品や、汎用的な物質であるオレフィン（ポリプロピレンやポリエチレンなどの樹脂の総称）も利用先となりうる[6]。

②燃料では、光合成をおこなう小さな生き物「微細藻類」を使ったバイオ燃料や、バイオマス由来のバイオ燃料が CO_2 の利用先として考えられている。③鉱物では、コンクリート製品やコンクリート構造物が考えられている。具体的には、コンクリート製品などを製造する際に、その内部に CO_2 を吸収させるものなどである。最後に、④その他として、バイオマス燃料と CCS を組み合わせるベックス（BECCS、Bioenergy with Carbon Capture and Storage）、海の海藻や海草が CO_2 を取り入れることで海域に CO_2 が貯留する「ブルーカーボン」などが考えられている。これらは総称して「ネガティブ・エミッション」と呼ばれる。

以上を図示すると図 3.6 のようになる。なお、図中の BTX とはベンゼン(Benzene)、トルエン(Toluene)、キシレン(Xylene)の頭文字をとった総称である。また、炭酸塩とは炭酸カルシウムや炭酸マグネシウム、炭酸ナトリウムなど炭酸イオンを含む化合物の総称で、アルカリ土類金属であるカルシウム塩やマグネシウム塩を利用するものと、珪酸塩やアルミン酸塩の風化を促進させてこれを利用するものがある。

---

[6] CO_2 を他の物質の合成に利用する方法には、CO_2 と水素を触媒反応させてメタノールやジメチルエーテルなどを合成するものや、CO_2 とモノマーを共重合させるなどしてポリカーボネートなどの高分子を合成するものなどがある。



（出所：経済産業省(2019)）

図 3.6　CCUS

なお、2019 年当時これらの技術は、それぞれの分野では研究開発が進められ、一部では製品になっているものの、目標や進度はバラバラであった。そこで、このようなバラバラなものをまとめ、技術の現状を把握し、理解・認識を共有することで、研究開発が効果的かつスピーディーに進むようにするため、各分野で研究開発が必要な技術的な課題を整理し、公表したものが経済産業省(2019)である。そこでは、3 フェーズからなるカーボンリサイクルロードマップについて次のように述べられている：2030 年頃までを「フェーズ 1」とし、カーボンリサイクルに役立つあらゆる技術について開発を進めるとしている。2030 年以降、2050 年頃までは「フェーズ 2」として、CO_2 利用の拡大を狙う。ポリカーボネートや液体のバイオ燃料、コンクリート製品は普及しはじめると予想している。また、特に需要の高い汎用品をつくるような技術について、その後も重点的に開発に取り組んでいく。一方、CO_2 を分離・回収する技術も、2030 年頃までには低コスト化をはかる。2050 年以降の「フェーズ 3」では、さらなる低コスト化に取り組む。CO_2 を分離・回収する技術は、現状の 4 分の 1 以下のコストを目指す。ポリカーボネートなどの既存の製品は消費が拡大し、一方でオレフィンやガス燃料、汎用品のコンクリート製品はこの頃から普及しはじめることを狙う。

CO_2 は以上のほかに、人工光合成の技術を利用して酸素や水素、有機化学品を製造するのにも利用される。人工光合成は植物の光合成をまねて、先ず光エネルギーを使って水から酸素と水素を生み出し、次に CO_2 と生み出された水素を使ってオレフィンやギ酸などの有機化学品を作り出すというプロセスをとる。

CO_2 は上述のようにそのまま利用されるだけでなく、一酸化炭素や炭化水素に分解されても利用されうる。代表的な分解法としてはプラズマ分解法や電気分解法がある。前者で用いられるプラズマとは、高エネルギー状態にある気体の構成分子が電離して陽イオンと電子に分かれて運動している状態のことで、分子を電離したり、活性種を生成したりする能力がある。プラズマ分解法はこれを利用して CO_2 を一酸化炭素（CO）と炭素に分解する方法である。CO はメタノール、アンモニア、炭化水素などの化学品の原料となる。電気分解法は銅を電極とした場合、メタノール、エチレン、エタノール、炭化水素などの化学品を生成できる。これらの分解技術はカーボンニュートラル社会の実現に向けた重要なステップとされている。

貯留

分離・回収された CO_2 は、上述したような利用方法によって利用され尽くすわけではない。利用されなかった CO_2 は様々な方法で貯留される。その中の代表的な貯留法は、地中隔離法、帯水層貯留法、鉱物固定法などである。次にこれらの方法について簡単に説明しよう。

地中隔離法について　地中隔離法には、①炭層固定法、②帯水層貯留法、③油層・ガス層貯留法などがある。①は CO_2 が石炭に吸着しているメタン（コールベットメタン）より吸着されやすいという性質を利用して、地中の石炭層に CO_2 を封入し、メタンを回収する方法である。②は地中の帯水層に高圧の CO_2 を封入し、地下水に溶解させるなどして固定・貯留する手法である。日本では長岡で実証実験が行われた。③は地中の油槽やガス層に CO_2 を封入する手法である。前述の EOR と、採取がされていない油層やガス層に封入した後密閉する手法がある。

上記以外の地中隔離法には、鉱物固定（CO_2 を封入した地層内で反応させて鉱物化し固定する手法。技術的には研究段階にある）、CO_2 ハイドレート貯留（海底下の孔隙率の高い砂層で、CO_2 をハイドレート化（固体）させて貯留する手法で、日本周辺海域において貯留できる可能性がある海域が温度・圧力に基づいて検討されている）、ゲスト分子置換法（ハイドレート格子にメタン分子より CO_2 分子の方がトラップされやすい性質を用いて、メタンと置換する方法。米国やドイツで検討されている）などがある。

海洋隔離法について　主な手法として、①溶解・希釈と②海底貯留がある。①は大規模排出源で回収された CO_2 を海洋に注入する手法である。パイプラインを通して海洋の表層・中層に注入し溶解させる手法と、タンカーなどで輸送して海洋の中層・深層に注入し希釈させる手法とがある。前者では気体または液体、後者では液体として注入する。技術的には研究段階にあるが、パイプライン式はコストが安くなると予想されており、実現性は高いとされている。しかし、油田への封入が実用化されているほかは、多くがまだ研究段階にある。

CCUS に対する批判

CCUS に対しては次のような批判がある：①CCS を利用すれば、石炭発電所のスタックから排出される CO_2 を 85 - 90 %以上削減できる可能性があるが、石炭の採掘や輸送に伴う CO_2 排出量には効果がない。CCS システムは、CCS なしのシステムよりも 25 %多くのエネルギーと石炭燃焼を必要とするため、実際にはそのような排出量と純供給電力の単位あたりの大気汚染物質を増加させ、石炭の採掘、輸送、処理による生態学的、土地利用、大気汚染、水質汚染のすべての影響を増加させる、②CCS を利用して化石燃料で発電する方式と再生可能エネルギーで発電する方式の正味のエネルギー効率を比較したところ、2019 年の調査では前者より後者の方が投資収益率が良いことが判明した。したがって、気候危機の緩和においては、化石燃料による CCS よりも、拡張性のある再生可能な電力と蓄電の急速な拡大が望ましいと考えられる、③CCS に費やされた資金は気候変動に対する他の解決策から投資を逸脱させる、④化石燃料業界は CCS が実際には気候変動の解決策にならないことを認識しながら、化石燃料を利用し続ける口実として過大宣伝を行なっている。

なお、カーボンニュートラル自体に対しても、蓮見・高屋（2025）による次のよう批判がある：2050 年カーボンニュートラルは環境と社会の持続可能性という普遍的課題を GHG 排出量の定量的削減に還元し、その原因となる社会経済システムそのものの分析から目をそらさせるという根本的問題を含む。…いま求められているのは多様なステイクホルダーの利害に配慮しつつカーボンニュートラル実現への移行経路を共創し現実を変えていくことである。

3.3.2　水素エネルギー

水素エネルギーとは、水素（H_2）をエネルギー源として利用する形態の総称であり、その最大の特徴は、利用段階で CO_2を排出しないことである。水素エネルギーの利用形態は直接燃焼と、酸素と化学反応させて発電するという利用（燃料電池、Fuel Cell、FC）に大別されるが、何方の利用形態においても水しか排出しない。このクリーンな特性から、化石燃料に代わる次世代のエネルギーとして、世界中から大きな期待が寄せられているのである。両利用方法をやや詳しく見てみよう。

水素を直接燃焼させる方法

化学反応式は

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{熱エネルギー}$$

である。1kg の水素を完全燃焼するとき、この反応によって放出される熱エネルギーは約 120 メガジュールである。なお、この方法によれば、既存の火力発電所やエンジンの設備を大幅な変更なく活用できる可能性がある。

化学反応を利用する方法（燃料電池）

これは水の電気分解の逆の反応を利用している。水の電気分解と燃料電池の化学反応式は次のとおりである、

$$2H_2O + \text{電気エネルギー} \rightarrow 2H_2 + O_2$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{電気エネルギー} + \text{熱エネルギー}$$

この方法の大きなメリットは、エネルギー変換効率が非常に高いことである。化石燃料のように、燃料を燃焼させて熱エネルギーを運動エネルギーに変え、さらに電気エネルギーに変えるという多段階の変換がないため、エネルギーのロスが少なくなる。また、発電と同時に熱も発生するため、その熱を給湯などに利用する「コージェネレーション（熱電併給）」が可能である。これにより、エネルギー全体を無駄なく使うことができ、総合的なエネルギー効率は 90%以上に達することもある。この燃料電池の技術は、燃料電池自動車（FC Vehicle、FCV）や家庭用燃料電池（エネファーム）、さらには大規模な発電所など、幅広い分野での活用が進められている。

水素エネルギーが注目される背景

水素エネルギーが注目される背景には主に「脱炭素社会の実現」と「エネルギー自給率の向上」という 2 つの大きな目的がある。次にこれらについて簡単に述べよう。

(1) 水素エネルギーは脱炭素社会（カーボンニュートラル）の実現の切り札として期待されている。特に、すべてのエネルギー需要を電気で賄う電化だけでは対応が難しい次のような分野において水素は重要である：①鉄鋼や化学プラントなど、製造プロセスで高温の熱を必要とする産業分野、② 長距離トラックやバス、船舶、航空機など、大型で長距離を移動する輸送機器を利用しなければならないため、バッテリーの重量や充電時間の問題から、電気自動車（Electric Vehicle、EV）化が難しいとされる輸送分野、③電力需要が少ない時に余った電気を使って水素を製造・貯蔵しておき、需要が多い時や、天候が悪く太陽光や風力などの再生可能エネルギーでは十分な発電ができない時に、その水素を使って発電することで電力系統を安定化しうる発電分野。

(2) もう一つの重要な背景が、エネルギー安全保障の観点から見たエネルギー自給率の向上である。日本のエネルギー自給率は、2021 年度時点で 13.3%と、他の OECD 諸国と比較して非常に低い水準にある（経済産業省資源エネルギー庁（2023）「令和 4 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書）」）。このことは次のような大きなリスクとなる：①地政学的リスク、すなわち、産油国など資源国の政情不安や、国際紛争が発生した場合、エネルギーの安定供給が脅かされるリスク、②価格変動リスク、すなわち、エネルギーの価格が国際市場の動向や為替レートによって大きく変動するリスク。水素は特定の資源に依存する化石燃料とは異なり、水やバイオマスなどのさまざまな資源から製造できるので、このようなリスク

を避けることができる。

水素エネルギーの製造方法

現在、水素の製造方法は主に 3 つに分類され、製造過程での CO_2排出量の違いから、それぞれ「グレー」「ブルー」「グリーン」という色で呼ばれている。

(1) グレー水素

グレー水素は、天然ガスや石炭、石油といった化石燃料を原料として製造される水素である。製造コストが安く、現在、世界で製造されている水素の 9 割以上がこのグレー水素である。製造方法として「水蒸気改質法」がある。これは、天然ガスの主成分であるメタン（CH_4）を蒸気（H_2O）と反応させて、水素（H_2）と CO_2を取り出す技術である（化学反応式：$CH_4 + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + CO_2$）。

しかし、グレー水素には製造プロセスにおいて、1kg の水素を製造するために約 10kg もの大量の CO_2が排出されてしまうという決定的な課題がある。とはいえ、まずはグレー水素で水素の需要を喚起し、市場を創出しながら、後述するブルー水素やグリーン水素へと段階的に移行していくという重要な役割を担っている。

(2) ブルー水素

ブルー水素は、グレー水素と同じく化石燃料を原料とするが、CCS や CCU によって CO_2を大気中に放出しない水素のことである。ブルー水素は、本格的なグリーン水素社会が到来するまでの移行期間における、現実的かつ重要な選択肢として期待されている。

(3) グリーン水素

グリーン水素は、太陽光や風力、地熱といった再生可能エネルギーによって発電された電気を使い、水を電気分解して製造される水素である（化学反応式：$2H_2O$ + 再エネ電力 $\rightarrow 2H_2 + O_2$）。この方法の最大の特徴は、水素の製造から利用に至るまでの全工程において、CO_2を一切排出しないという点である。そのため、「究極のクリーンエネルギー」と呼ばれ、カーボンニュートラルを実現するための本命とされている。しかし、グリーン水素の普及には現時点で大きなハードルが存在する。それは再エネ電力の価格がまだ高いことや、高性能な水電解装置が非常に高価であることから、製造コストがグレー水素の数倍から十数倍になるということである。これらの点の改善が望まれている。

水素エネルギーの 3 つのメリット

水素エネルギーが次世代のエネルギーとして大きな期待を集めているのは、従来のエネルギー源にはない、数多くの優れたメリットを持っているからである。 その中でも特に重要なのは、次の 3 つのメリットである：①環境負荷の少なさ、②製造方法の多様性、③貯蔵・輸送の柔軟性。①と②についてはすでに説明したので、ここでは③について説明しよう。

③の貯蔵・輸送の柔軟性とは、水素はエネルギーを貯蔵・輸送する媒体（エネルギーキャ

リア）として非常に優れているということである。現在、電気を輸送する一般的手段は送電線であるが、それには送電ロスが発生する。また電気を貯める技術としては蓄電池が一般的だが、蓄電池は大規模な電力を長期間にわたって貯蔵するには、コストや設置場所、資源の制約などの面で限界がある。

一方、水素は気体や液体などの形で大量に貯蔵し、必要な場所まで輸送できる。水素は高圧のガスタンクや、-253℃の極低温で液化した液体水素タンク、あるいは水素吸蔵合金などの固体材料の中に、大量かつ長期間にわたって安定的に貯蔵することが可能である。また、再生可能エネルギーで発電した余剰電力を使って水を電気分解して水素の形に変え、それを貯蔵すれば、再生可能エネルギーを化学的に貯蔵できることになる。

さらに、貯蔵した水素は、高圧ガストレーラーや液体水素ローリーによる陸上輸送、パイプライン輸送、専用の液体水素運搬船による海上輸送などさまざまな方法で輸送できる。これらにより、例えば、日照条件の良い海外の砂漠地帯で太陽光発電によって大量にグリーン水素を製造し、それを日本まで船で輸送して利用する、といったグローバルなエネルギーサプライチェーンの構築も可能になる。また、国内でも、北海道や東北地方の豊富な風力で製造した水素を、大消費地である首都圏まで輸送するといった活用が考えられる。

水素エネルギーの 3 つのデメリット・課題

次の 3 つのデメリットが実用化への大きな壁となっている：① 製造方法によっては CO_2 を排出する、② 製造・輸送・貯蔵のコストが高い、③ 水素ステーションなどインフラの整備が必要。

水素をエネルギーとして利用するためには、製造拠点、輸送網、そして最終的な供給拠点といった一連のインフラが必要になる。例えば、FCV を利用するためには水素タンク、圧縮機、蓄圧器、プレクーラー、ディスペンサーなどを備えた水素ステーションの整備が必要である。このようなインフラ整備の課題は FCV だけに限らず、他の水素エネルギー利用の際にも共通して存在する。

水素エネルギーの主な活用方法

ここで 3 つの活用方法、すなわち水素発電、FCV、エネファームについて、その仕組みと役割を具体的に述べよう。

水素発電　水素発電は、水素を燃料として燃焼させ、その際に発生する熱エネルギーでタービンを回して発電する方法で、発電時に CO_2 を排出しないという特長を持つ。なお、水素発電には、再生可能エネルギーの天候による出力の変動を調整する機能をもっている。この点については既述した。

FCV　FCV は搭載したタンクの水素と、空気中から取り込んだ酸素を、燃料電池（FC スタック）内で化学反応させて電気を発生させ、その電気でモーターを駆動して走行する自動車で

ある。FCV の最大のメリットは、ガソリン車と遜色のない利便性にある。そして何より、走行中に排出するのは水だけであるので、環境性能は抜群である。また、FCV は「走る発電所」としての機能も持っている。大容量の電気を発電できるため、災害時などには外部給電機能を使って、避難所の電源や家庭の非常用電源として活用することができる。普及に向けた課題は、車両本体の価格がまだ高価であることと、水素を充填するための水素ステーションの数が限られている点である。

エネファーム　これは都市ガスや LP ガスから水素を取り出し、空気中の酸素と化学反応させて、家庭で使う「電気」と「お湯」を同時に作り出すコージェネレーション（熱電併給）システムである。エネファームの最大のメリットは、エネルギー利用効率が非常に高い点にある。大規模発電では発電時に発生した熱の多くは、利用されることなく捨てられるため、一次エネルギーの約 40%程度しか有効に利用できない。一方、エネファームは、電気を使う場所（自宅）で発電するため送電ロスがなく、発電時の排熱も給湯に利用するため、一次エネルギーの 90%以上を有効活用できる。

水素エネルギー普及に向けた国内外の取り組み

水素社会の実現のためには、国家レベルでの明確な戦略と、国際的な連携が不可欠である。ここでは、水素エネルギーの普及をリードする日本と、世界の主要国の取り組みについて紹介する。

日本の取り組み

日本は水素エネルギーに早くから着目してきており、政府は 2017 年 12 月、世界で初めてとなる水素に関する国家戦略「水素基本戦略」を策定し、2023 年 6 月に改定が行われた。改定された水素基本戦略では、次のようなより野心的で具体的な目標が設定されている：①供給目標については、水素の導入量を、現状の年間 200 万トンから、2030 年に 300 万トン程度、2040 年に 1,200 万トン程度、2050 年には 2,000 万トン程度へと拡大する、②コスト目標については、水素の供給コストを、現状の 100 円/Nm^3（ノルマル立方メートル）程度から、2030 年に 30 円/Nm^3、将来的には既存エネルギー（化石燃料や LNG）と遜色のない 20 円/Nm^3を目指す、③水電解装置の導入目標については、2030 年までに官民で 15GW（ギガワット）相当という世界トップクラスの導入目標を設定した。

これらの目標を達成するため、具体的には、今後 10 年間で 15 兆円規模の官民投資を呼び込むことを目指し、水素の製造から利用までのサプライチェーン構築や技術開発に対して、大規模な財政支援を行っていくことが盛り込まれている（参照：経済産業省 資源エネルギー庁「水素基本戦略」）。

グリーン成長戦略

2021 年 6 月に策定されたこの戦略の中で、「水素・アンモニア産業」は、洋上風力や自動

車・蓄電池などと並ぶ 14 の重要分野の一つとして明確に位置づけられ、具体的な施策として創設された 2 兆円規模のグリーンイノベーション基金によって水素関連では以下のような大規模なプロジェクトが支援されることになった：①大規模水素サプライチェーンの構築のための、海外で製造したクリーンな水素を日本へ輸送・供給する一連の技術実証、②次世代型水電解装置の開発として、グリーン水素の製造コストを大幅に下げるための、高性能で安価な水電解装置の開発、③水素発電技術の開発のための、水素ガスタービンの開発や、既存の火力発電所での水素混焼・専焼技術の実証、④P2G（Power to Gas）技術[7]の開発のための、再生可能エネルギーの余剰電力から水素を製造し、パイプラインで供給・利用するシステムの開発。

海外の取り組み

欧州連合（EU）　2020 年に「欧州水素戦略」を発表。特に再生可能エネルギー由来のグリーン水素の導入に非常に積極的で、2030 年までに域内で 1,000 万トンのグリーン水素を製造し、さらに 1,000 万トンを輸入するという野心的な目標を掲げている。

ドイツ　EU の中でも特に水素技術に力を入れており、2020 年に「国家水素戦略」を策定。国内でのグリーン水素製造能力を強化する。

アメリカ　2022 年に成立した「インフレ抑制法（Inflation Reduction Act、IRA）」において、クリーン水素の製造に対して大規模な税額控除を導入した。これにより米国内でのグリーン水素やブルー水素の製造コストが劇的に下がると見られている。

中国　世界最大の水素生産国であり、消費国でもある。政府は 2022 年に「水素エネルギー産業発展中長期計画」を発表し、グリーン水素の比率を高めていく方針を示した。特に、FCV の普及に力を入れており、世界最大の FCV 市場となることを目指している。

オーストラリア　豊富な太陽光や風力といった再生可能エネルギー資源と広大な土地を活かし、世界有数のグリーン水素・アンモニアの製造・輸出国となることを目指している。

このように、各国はそれぞれの強みを活かしながら、水素エネルギーの覇権を巡る競争を繰り広げている。一方で、水素の製造・輸送には国境を越えた協力が不可欠であるため、技術の標準化やサプライチェーン構築に向けた国際的な連携も活発化している。

3.3.3　核融合エネルギー

核融合発電は軽い核種同士が融合してより重い核種になるとき発生する熱エネルギーを利用して発電を行うもので、現在実用化が目指されている核融合発電では、融合される核種

[7] 再生可能エネルギー発電から生じる余剰電力を利用して水を電気分解し、水素、メタン、合成ガス、LPG、アンモニアなどの気体燃料に変換・貯蔵する技術。

として最も軽い原子の同位体である重水素（2 重水素、deuterium、D）と 3 重水素（tritium、T）が用いられ[8]、融合後にヘリウム 4（^{4}He）の原子核と中性子（neutron、n）が生成されるとともに、17.6 メガエレクトロンボルト（MeV）のエネルギーが放出される[9]。この核融合反応を化学記号で書けば

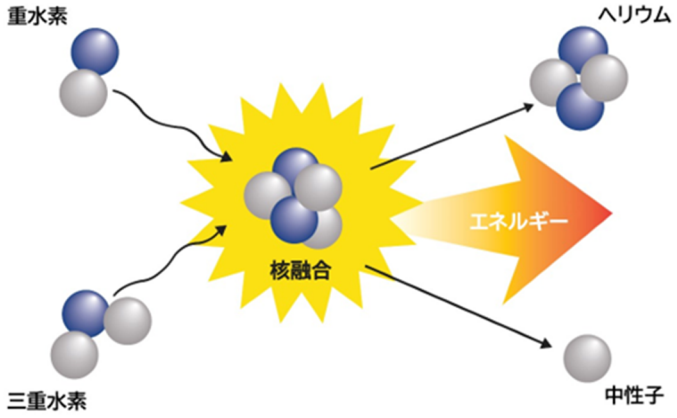
$$D + T \rightarrow {}^4He + n + 17.6MeV$$

である、この反応は D-T 反応と呼ばれる（図 3.7 参照）。

上式に示された、反応によって放出されるエネルギー17.6MeV は 1 回の反応によるものである。融合される水素の質量と放出されるエネルギー量との具体的関係は、A.アインシュタインが提唱した相対性理論から導かれる関係式 $E = mc^2$によって説明される。ここにE はエネルギー（ジュール[10]）、mは質量（kg）、cは光速（m/秒）を表す。核融合反応が起きると、質量が 0.3～0.4%減ることが知られている。これは質量欠損と呼ばれる。これをΔmと表すと、放出されるエネルギーは$\Delta E = \Delta mc^2$である。

$$\Delta m = 0.0038(\text{kg})、c^2 = 8.99 \times 10^{16}((\text{m}/\text{秒})^2)$$

とすると、$\Delta E = 3.42 \times 10^{14}$となる。すなわち、融合される水素の質量が 1kg のとき、放出されるエネルギーは3.42×10^{14}ジュール=342 兆ジュール=342 テラジュールである。これは同じ質量のウランによる核分裂反応のおよそ 4.5 倍、同質量の石油を燃やして得られるエネルギーの 800 万倍に達する。



（出所：京セラ「核融合とは？」）WEB

図 3.7　D-T 反応

[8] 核種とは原子核の組成、すなわち原子核の中の陽子と中性子の数、およびエネルギーの状態によって規定される特定の原子の種類のことである。また、同位体とは同じ原子番号を持つ核種同士のことを言う。

[9] 1MeV=100 万 eV、1eV≒ 1.6×10^{-19}ジュール。

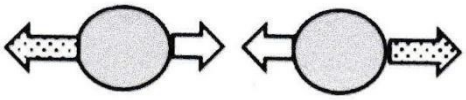
[10] 1 ジュール＝1 ワット秒＝約 0.24 カロリー

なお、核融合は太陽をはじめとする恒星が生み出すエネルギーの源である。太陽は 46 億年前の誕生以来長い時間にわたって膨大なエネルギーを生み出し続け、今も約 1.5 億キロメートル先の地球に光と熱を送り続けている。実は、この太陽で起きている核融合反応は、上記の D-T 反応とは異なる p-p 連鎖反応と呼ばれる反応である。それは 4 つの陽子（軽水素の原子核、プロトン、p）が 3 段階にわたって衝突を繰り返し、最終的にヘリウムを生成し、エネルギーを放出する反応である。このように反応の種類は異なるが、太陽と同じ核融合反応を人類の手で生み出し、発電に使用することを目指すのが核融合発電の研究開発である。それ故、この研究は「地上に太陽をつくる」研究とも呼ばれるのである。次にこの研究の歴史を簡単に振り返ってみよう。

研究の歴史

「原子物理学の父」と呼ばれる E. ラザフォードの弟子の J. コッククロフトは 1928 年、E. ウォルトンとともに陽子加速器の実験に取り組み始め、1932 年に自ら開発した加速器を用いて、陽子に高いエネルギー（数キロエレクロンボルト、keV）[11]を与えて入射粒子として加速し、標的のリチウムの原子核に衝突させると、両者は融合し莫大なエネルギーが放出されること、すなわち核融合反応（nuclear fusion）を発見した。この実験は、ある元素を人工的に別の元素に変換させた最初の実験でもある。

このような核融合反応は、2 つ以上の原子核が十分な時間近づいたときに起こり、原子核を引き寄せる核力（図 3.8 の白矢印）が、原子核を引き離す電磁気力の一種であるクーロン斥力（図 3.8 の黒玉矢印）を上回ったとき、より重い原子核に融合する。しかし、D-T 反応を利用する核融合において陽子同士を融合させようとしても、両者はプラスの電荷を持っているので、地球上の平常の状態では融合させることはできない。そのため核融合反応は後に発見された核分裂反応ほどには当初は着目されなかったのである。なお、太陽などの恒星における核融合は、恒星の持つ大きな質量から生じる重力によって核力が斥力を上回ることによって生じる。



（出所：勉強嫌いの放物 A18）WEB

図 3.8　陽子間に働く力

[11] 1keV=1000eV。

D-T 反応による核融合を地球上で起こすためには、重水素や 3 重水素などの原子を超高温に加熱してプラズマ状態にし、超高圧の狭い場所に閉じ込めておく必要がある。そのための 3 条件を具体的に言えば、①温度：1 億 2000 万度以上、②密度：1cc 当たり 100 兆個以上、③閉じ込め時間：1 秒以上（ローソン条件）ということである。プラズマ状態では分子が電離、つまりプラスの電荷を持つ陽イオンとマイナスの電荷を持つ電子に分かれて激しく運動しているため、プラズマは容器の壁を破って外に出てしまう。このことを防ぐためにプラズマを容器の壁から離して閉じ込めておく必要がある。この閉じ込めの方式は磁場閉じ込め方式と慣性閉じ込め方式に大別される。前者は 1950 年代に米ソ冷戦下の水爆開発競争の副産物として案出され、後者は 1960 年代にレーザー技術の発展に伴って工夫された。これらは上記のローソン条件を満たし核融合を実現する 1 つのブレークスルーであった。

核融合発電の利点（エネルギー問題解決の切り札）

この核融合発電は、重い核種が（核）分裂する際の熱エネルギーを利用する原子力発電と比べ、次のような利点を持つとされる。

・核分裂による原子力発電と同様、温暖化ガスである CO_2 の排出がない。
・核分裂反応のような連鎖反応がなく、暴走が原理的に生じない。
・海水中に 1/7000 の割合で存在する重水素を利用でき、資源は豊富に存在する。
・原子力発電で問題となる高レベル放射性廃棄物が生じない。（定期的に交換されるダイバータやブランケットといったプラズマ対向機器は高ベータ・ガンマ廃棄物と呼ばれ、高い放射能を持つ。ただし、開発が進められている低放射化材料を炉壁に利用することにより、放射性廃棄物の浅地処分やリサイクリングが可能となる。）
・従来型原子炉での運転休止中の残留熱除去系のエネルギー損失や、その機能喪失時の炉心溶融リスクがない。
・磁場閉じ込めによる核融合エネルギーの研究開発は、軍事用技術と原理が異なるため、安全保障上の制約が少ない。

次に、磁場閉じ込めの代表例としてトカマク方式とヘリカル方式、また、慣性閉じ込めの代表例としてレーザー方式の 3 つを紹介しよう。

（1）トカマク方式（磁場のかご＋プラズマに電流を流し閉じ込める）

上述のように、プラズマは分子が電荷をもつ陽イオンと電子に分離している状態にある。電荷を持つ粒子は磁力線に沿って運動するという性質があるため、プラズマの周りに電磁石を置いて強力な磁場を発生させてプラズマを閉じ込め、更に加熱することで、超高温の核融

合プラズマを生成するというのが磁場閉じ込め方式である。

トカマク方式は、トロイダル磁場コイル（TF コイル）と呼ばれる D の形をしたコイルを円状に並べて、コイルの中にドーナツ状の磁場を発生させ、さらに、中心ソレノイドコイル（CS コイル）と呼ばれるドーナツの中心にあるコイルでプラズマに誘導電流を流すことによりドーナツの断面を回るような磁場を発生させる。これら 2 つの磁場の重ね合わせによりねじれた磁場を形成し、プラズマを閉じ込めるのである（図 3.9 左参照）。ちなみに、誘導電流を半永久的に流すことは現実的に不可能であるため、プラズマを長時間閉じ込めるためには、加熱装置を使用して電流を流し続ける必要がある。トカマク方式は図 3.9 左の〔 〕内に示されているように、日本、欧州連合、アメリカ、ロシア、中国、韓国、インドの 7 極（34 ヶ国））が国際協力する ITER（イーター、これは正式名称）機構の核融合実験炉 ITER やそれを補完する大型トカマク装置 JT-60SA で採用されている。

（2）ヘリカル方式（ねじれたコイルを使い閉じ込める）

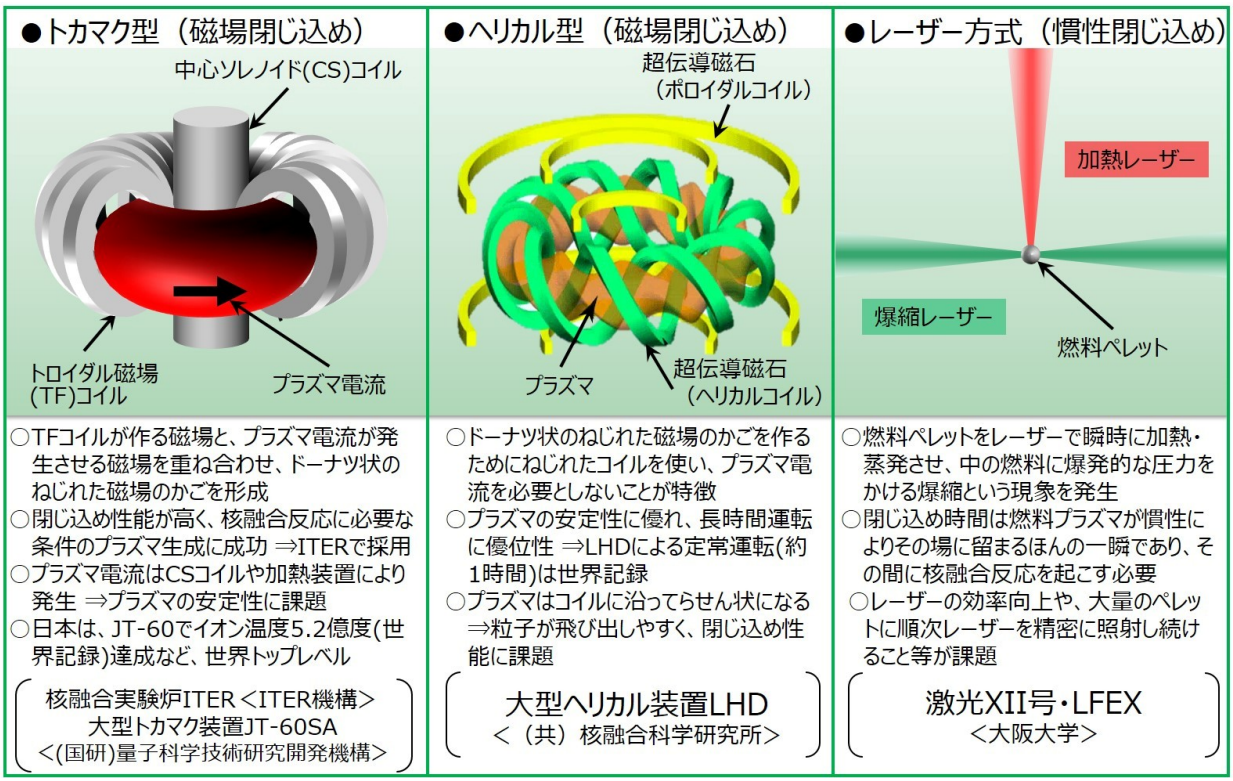
トカマク方式と同様に、ドーナツ状のねじれた磁場でプラズマを閉じ込めるが、磁場を作るために、ヘリカルコイルというねじれたコイルを使用する（図 3.9 中参照）。複雑な形状のコイルであるため製作の難易度が高い一方、運転時にはプラズマに電流を流す必要がないという特徴がある。トカマク方式と比べると、長時間の運転を得意とするが、プラズマを閉じ込める性能に課題がある。日本では図 3.9 の〔 〕内に示されているように、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）等で採用されている。

（3）レーザー方式（強力なレーザーで瞬間的に反応を起こす）

本方式は強力なレーザーを、燃料を封じ込めたペレットに照射し、爆縮を起こして核融合反応を発生させる方式である（図 3.9 右参照）。爆縮とは、極めて強力なレーザーを 10 億分の 1 秒程度というごく瞬間的に燃料ペレットに当て、表面を爆発的に蒸発させ、その爆発的な圧力でペレットに封じられた燃料を瞬時に圧縮させるという現象である。この圧縮された燃料がレーザーにより瞬時に加熱されることで、超高温、超高圧となり、核融合反応が起こる。瞬間的な核融合反応を繰り返すためのレーザー技術の効率向上や、大量のペレットに順次レーザーを精密に照射し続けることなどが課題である。日本では図 3.9 右の〔 〕内に示されているように、大阪大学レーザー科学研究所にある激光 XII 号等で実験されている。

各国の動向

現在、世界の各国は核融合発電の実現に向けて、国独自の方法で、あるいは数か国が協力しながら、激しい開発競争をくり広げている。その競争主体としては近年では、国家だけでなく、スタートアップを含む民間企業も数多く見られるようになった。ここで、主要諸国の開発競争における動向を見てみよう。



（出所：文部科学省「核融合研究」）

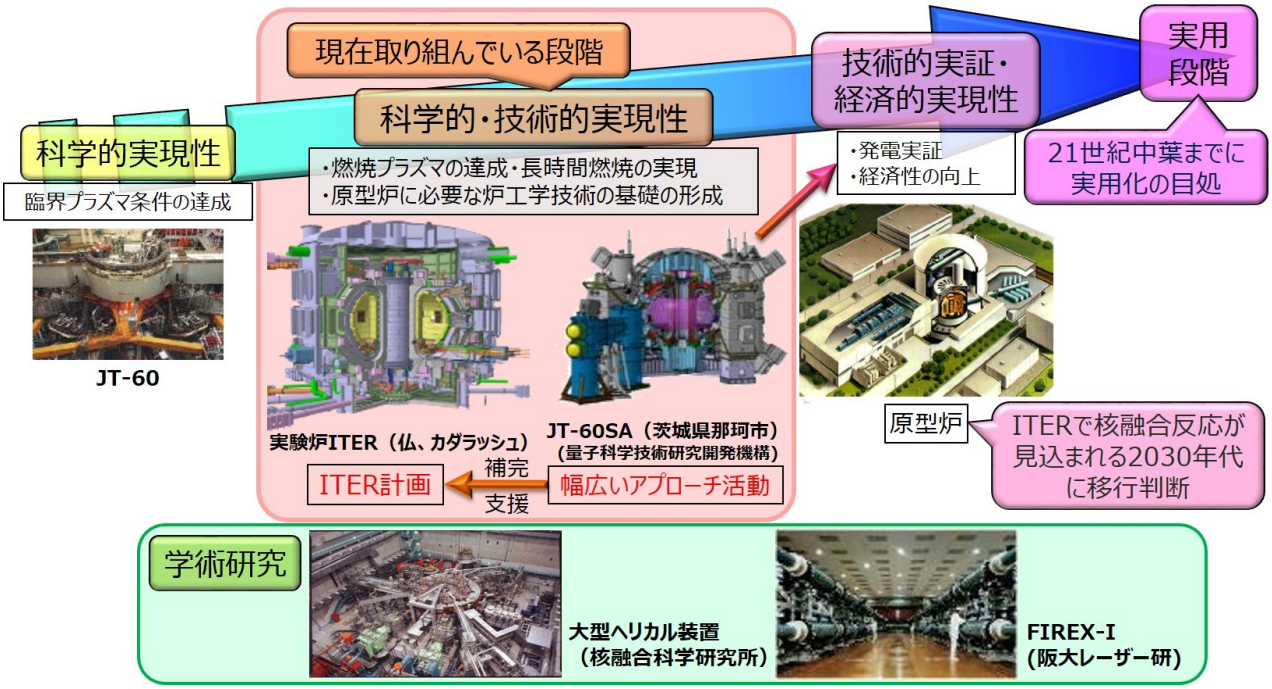
図 3.9　閉じ込め方式

まず日本について文部科学省の資料によって見てみよう（図 3.10 参照）。そこでは、核融合エネルギーの実現に向けた研究開発の段階を、下述のように大きく三段階に分け、その各々を核融合の 3 つのマイルストーンとして、それぞれの目標に向けた研究開発を実施しているとされる。

第一段階は科学的実現性の確立を目指す段階。具体的には、核融合プラズマ生成に必要な加熱エネルギーより、そのプラズマで実際に核融合反応（D-T 反応）が起きたときに出るエネルギーの方が大きくなる状態（臨界プラズマ条件）の達成が課題である。

第二段階は科学的・技術的実現性の確立を目指す段階。具体的には、①核融合プラズマが加熱を止めても核融合エネルギーにより持続する状態（自己点火条件）の達成、②核融合プラズマの長時間維持に道筋を付けること、③核融合実験炉の建設を通した炉工学技術の発展、④核融合中性子に耐えうる材料の開発、⑤核融合エネルギーから熱を取り出す技術等が課題である。現在取り組んでいる段階がこの段階である。

第三段階は技術的実証・経済的実現性の確立を目指す段階である。具体的には、実際に発電を行うとともに、その経済性の向上を目指して必要な課題に取り組む。そのために、核融合原型炉 DEMO の建設、運転等を行うことが検討されている。これらの段階を経て、実用段階である商用炉を目指す。



（出所：文部科学省「核融合研究」）

図 3.10　核融合発電のマイルストーン

日本を含めた各国の動向を表にまとめると、表 3.1 のようになる。各国は開発競争に、表 3.1 のように、独立して参加するだけでなく、数か国が協力して参加することもある。後者の例として、日欧米露中韓印が ITER 計画を推進していることを挙げることができる。また、日欧は ITER 計画の補完などを含む、より広範な取組(Broader Approach)に関する BA（ビーエー）協定を締結して研究開発を実施している。日本は ITER 計画における準ホスト国、BA 活動のホスト国として主導的な役割を果たしている。

既述のように、核融合発電の国際競争における近年の特徴の一つはスタートアップ企業の積極的な活動である。それは開発の主力が国家からスタートアップ企業に移りつつあるように感じさせる。下に世界の代表的なスタートアップ企業の動向を表にまとめて示す。

表 3.1 と 3.2 より、核融合発電が商用利用されるのは、早くて 2030 年代、遅ければ 2050 年代と見通されていることが分かる。この見通しに関連して、小西哲之京都フュージョンエンジニアリング CEO・京都大学名誉教授は次のように述べる：フュージョンは、技術的にはもう実現可能なところまで来ています。おそらく 2050 年には実用化されているでしょう。そしてそのときには世界中のどこでも、無線などを通じて常に電気が供給され、携帯もパソコンも常に充電されている状態になっているのではないかと想像します。一方、そうしたフュー

表 3.1　各国の動向

	戦　　略	発電実証炉/目標年	実施主体
アメリカ	民間企業に補助金を与えて競争させ、商用化を進める	エネルギー省(DOE)のロードマップでは 2030 年代半ばまでに商用炉の実現を目指す	民間主導による官民連携
イギリス	政府が明確な道筋を定めて出資し、官民が提携して開発する	STEP*（球状トカマク）/2040 年	政府主導による官民連携
中国	核融合発電実現のための事業を国家戦略として行う	CFETR**（従来型トカマク）/2030 年代	中国政府
日本	イーター計画に積極的に参加	JA-DEMO（従来型トカマク）/2045 or 50 年	未定

*Spherical Tokamak for Energy Production、**China Fusion Engineering Test Reactor

（出所：筆者作成）

表 3.2　スタートアップ企業の動向

企　業　名	動　　向
Commonwealth Fusion Systems(CFS)（米）	小型高温超伝導トカマク炉。累計で 3000 億円以上の資金を調達。実証炉 SPARC を 2027 年までに稼働させ、その技術を基に 2030 年代前半に 400MW 級の商用炉 ARC の運転開始を狙う。
TAE Technologies（米）	炉を損傷する中性子を出さない水素とホウ素による核融合法を採用。累計で 1800 億円以上の資金を調達。2030 年までに 30～50 万 kW の商用炉プロトタイプの製造を目標にし、すでに先行機 Norman が稼働中。
Helion Energy（米）	磁場閉じ込めと慣性閉じ込めを組み合わせた磁化標的核融合（Magnetized Target Fusion、MTF）を追求。マイクロソフトとの契約に基づき、2028 年から 50MW の商用電力供給を計画。
Tokamak Energy（英）	球状トカマク炉。実験炉を 2026 年までに建設・稼働させ、2030 年代半ばまでに 85MW 級の発電パイロットプラントを完成させる計画。
Helical Fusion（日）	ヘリカル炉、国立核融合科学研究所のスピンアウト企業。持続的かつ安定的な定常発電を目指し、2030 年代の発電実証を見据える。
京都フュージョンエンジニアリング（日）	京都大学発のスタートアップ企業。累計で 162 億円の資金を調達。プラズマ加熱装置、ブランケット・熱サイクルシステム、燃料サイクルシステムなどの核融合発電の中核技術を世界に先駆けて開発。2030 年代の発電実証を目指す。

（出所：筆者作成）

ジョンの実用化が果たされた際には、実現させたい一つの夢が私たちにはあります。それは、二酸化炭素を回収して地球の中へと戻すことです。むずかしい話ではありません。フュージョンのエネルギーを利用して炭素を固定すればよく、そのための方法も今開発しています。核融合炉を 1000 基使えば、200 年ほどで地球の気候を元に戻せると考えています。…（Newton 別冊『核融合最前線』ニュートンプレス）

さて、上記の 200 年先の夢物語は別にして、核融合発電が商用利用されるのは、CO_2 の利用や水素エネルギーと同様に早くて 2030 年代、遅ければ 2050 年代と見通されているので、これらのエネルギー技術だけでは、2050 年カーボンニュートラルという目標は達成できないことになる。再生可能エネルギーの利用拡大が重要と考えられる。

3.4　おわりに

ノードハウスはマクロ経済分析に気候変動を組み入れた地球温暖化の統合評価モデルである DICE モデルを他に先駆けて作成し、それが現在では地球温暖化問題に対して経済学的に対処するための最も重要な方法の一つとなっていることにより、2018 年にノーベル経済学賞を受賞した。しかし、DICE モデルは現時点の地球温暖化が将来に与える影響や割引率に関して恣意性が強いなど、多くの批判にさらされてきた。そしてそのようなモデルから導かれた結論、すなわち最適は特段の気候温暖化対策をとらないこと、も当然批判の対象となってきた。そのような批判に対してノードハウスがとった態度は、いわゆる no regret policy である。それは、地球温暖化に関する不確実性は大きいので、現時点で費用のかかる温暖化対策をとると、投じた費用が結果的に無駄になる可能性があるため、現時点では温暖化対策が無駄にならない（例えば、エネルギー効率を高める）投資を行うべきであるという考え方である。

本章では、DICE モデルとその批判について紹介するとともに、ノードハウスの no regret policy に鑑み、エネルギー効率を高める新技術として、CO_2 の利用、水素エネルギー、核融合エネルギーを取り上げ、その実現可能性について考察した。その結果、これらの新技術が商用利用されるのは、早くて 2030 年代、遅ければ 2050 年代と見通されていることが分かった。したがって、この見通しによれば、上記のエネルギー技術だけでは、2050 年カーボンニュートラルという目標は達成できないことになる。再生可能エネルギーの利用拡大が重要と考えられる。

参考文献

1) Barrage, L. and W. D. Nordhaus（2024）, Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 121（13）, 1-8.
2) Hänsel, M. C., M. A. Drupp, D. J. A. Johansson, F. Nisje, C. Azar, M. C. Freeman, B. Groom and T. Sterner（2020）, Climate economics support for the UN climate targets, *Nature Climate Change* vol.10, 781-9.
3) 蓮見雄・高屋定美編著(2025)『カーボンニュートラルの夢と現実　欧州グリーンディールの成果と課題』文真堂。
4) 経済産業省(2019)「カーボンリサイクル技術ロードマップ」令和元年（令和 3 年改訂)。
5) Koopmans, T.（1967）, Objectives, constraints, and outcomes in optimal growth models, *Econometrica*, 35, 1-15.
6) 熊本尚雄(2002)「地球温暖化問題対策の統合評価モデル」『一橋研究』26(4) 31-47。
7) 國則守生・松村敏弘(1999)「環境問題と国際協調：地球温暖化を中心として」『経済研究』50(1) 32-43。
8) Nordhaus, W. D.（1994）, *Managing the Global Commons : The Economics of Climate Change*, Massachusetts Institute of Technology　（日本語版：室田泰弘・山下ゆかり・高瀬香絵訳（2002）『地球温暖化の経済学』東洋経済新報社)。
9) Pindyck, R. S.（2013）, Climate Change Policy: What do the Models Tell Us?, *Journal of Economic Literature,* 51(3), 860-72.
10) Pindyck, R. S.（2017）, The Use and Misuse of the Models for Climate Policy, *Review of Environmental Economics and Policy*, 11-1 100-14.
11) Ramsey, F. P.（1928）, A mathematical theory of saving. *The Economic Journal*（December）, 543-59.
12) Solow, R. M.（1970）, *Growth Theory: An exposition*, Oxford University Press.
13) 杉山大志「ノーベル経済学賞を獲得したノードハウスの DICE モデル」（WEB)。
14) 臼井功（2023）「再生可能エネルギーとコモンズ論」『電気自動車用充電施設整備の課題と展望』日交研シリーズ A－875, 59-91。

日交研シリーズ目録は、日交研ホームページ
https://www.nikkoken.or.jp/publication_A.html を参照してください

A-938　電気自動車の普及とエネルギー安全保障

電気自動車の普及とエネルギー安全保障に
関する研究プロジェクト

2026 年 10 月　発行

公益社団法人日本交通政策研究会