

2050年ネットゼロ排出目標達成に向けた二酸化炭素輸出の有効性の検討

奥脇隆之介

京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻修士1回生

1 はじめに

地球規模で気候変動が深刻化する中、温室効果ガス（Greenhouse Gases; GHG）の排出削減は国際社会の重要な課題となっている。IPCC が公表した第6次評価報告書（AR6）によれば、地球の平均気温はすでに産業革命以前より約1°C上昇している（IPCC, 2022）¹⁾。2020年における日本のCO₂排出量は中国、米国、インド、ロシアに次いで世界第5位である。この状況を踏まえ、日本政府は2021年10月に地球温暖化対策計画を閣議決定し、2050年ネットゼロ排出目標と呼ばれる2050年までにGHGの排出を実質ゼロとする方針を明示した。

気候変動対策の戦略分析には、統合評価モデルと呼ばれる経済、エネルギー需給、土地利用などを考慮したシミュレーションモデルが用いられる。複数の統合評価モデルを用いて2050年ネットゼロ排出目標を分析した Sugiyama et al. (2024)²⁾では、目標達成にむけて、再生可能エネルギーの拡大、エネルギー需要側の電化に加えて、二酸化炭素除去技術（Carbon Dioxide Removal; CDR）による二酸化炭素排出量の相殺が必要であることを指摘している。Oshiro (2023)³⁾では、2050年ネットゼロ排出目標達成には、様々な戦略がネットゼロ排出目標達成にむけた中心戦略になりうることを示されている。排出権取引を考慮しない全てのシナリオに共通して、CDRが導入されることを指摘した。大気中から回収した二酸化炭素の処理方法として、二酸化炭素を利用する二酸化炭素回収・利用（Carbon Capture and Utilization: CCU）や帯水層や枯渇油田などの地層に貯留する二酸化炭素回収・貯留（Carbon Capture and Storage: CCS）といった技術が想定されている。CCUの有効性について世界全域を対象に調査した Oshiro (2024)⁴⁾では、気候変動緩和策としてCCUを主要な戦略とした場合、排出削減は可能であるが、緩和費用が高騰することを報告した。一方で、CCSの有効性は既に証明されており、対象範囲を日本を限定した Otsuki et al. (2024)⁵⁾ではCCSの価格を高い想定を置いた場合でも年間最大導入量まで導入されることから、CCSの脱炭素化への貢献度は高いと結論付けている。

CCSによる二酸化炭素の地中貯留は、カーボンニュートラルな社会の実現に向けた有望な手段として注目されているが、貯留可能な地質構造には限りがあることにも留意が必要である。日本は二酸化炭素の貯留先として利用可能な枯渇油ガス田をほとんど有さないこ

とから、貯留先の確保は重要な課題である。貯留ポテンシャルに対する懸念から、国内で回収された二酸化炭素を、適した地層を有する海外の国々へ輸出する戦略が検討されている。実際に、経済産業省によって事業の確立を支援する「先進的 CCS 事業」に選定された 9 事業のうち 4 事業がマレー半島などの海外を貯留先としている(経済産業省,2024)⁶⁾。日本が今後温室効果ガスを削減していく上で、回収後の二酸化炭素を海外へと輸送し、貯留する戦略が注目を集めている。ネットゼロ排出目標達成にむけた既往研究ではすでに幅広い戦略の検討が行われているものの、回収後の二酸化炭素を輸出することが想定されておらず、輸出が行われた際のエネルギーシステム全体に与える影響やその有効性は明らかになっていない。

ここまでの背景を纏めると以下の通りである。日本が温室効果ガスを大規模に削減するために、再生可能エネルギー等の利用に加えて二酸化炭素を回収する CDR の重要性が高まっている。既往研究では、回収した二酸化炭素を新たに合成燃料などに利用する CCU の貢献は限定的であること、長期的に地中へと貯留する CCS の重要性が高いことも指摘されている。貯留ポテンシャルへの懸念から、海外の貯留層へと二酸化炭素を輸送し、貯留する戦略が高い関心を集めている一方で、二酸化炭素を海外へ輸送する戦略を考慮した既往研究は存在せず、ネットゼロ排出目標達成にむけた有効性は明らかになっていない。よって、本研究では二酸化炭素の海外輸送を考慮した脱炭素化シナリオを定量化し、エネルギーシステム全体への波及的な影響や緩和費用を明らかにする。その上で、戦略的有效性を検討することを通して、今後の脱炭素化戦略にむけた新たな示唆を提示することを目的とする。

2 手法

2.1 研究の概要

本研究では、計算期間を 2010 年から 2050 年までとし、技術選択モデルである AIM-Technology-Japan(Asia-Pacific Integrated Model-Technology-Japan)モデルを用いる。回収後の二酸化炭素を海外に輸出し貯留する戦略の影響を評価するために、輸出量の上限量 z 変更し、2005 年から 2050 年の日本の最終エネルギー消費量や一次エネルギー供給量を算出する。本研究の全体像を図 1 に示す。

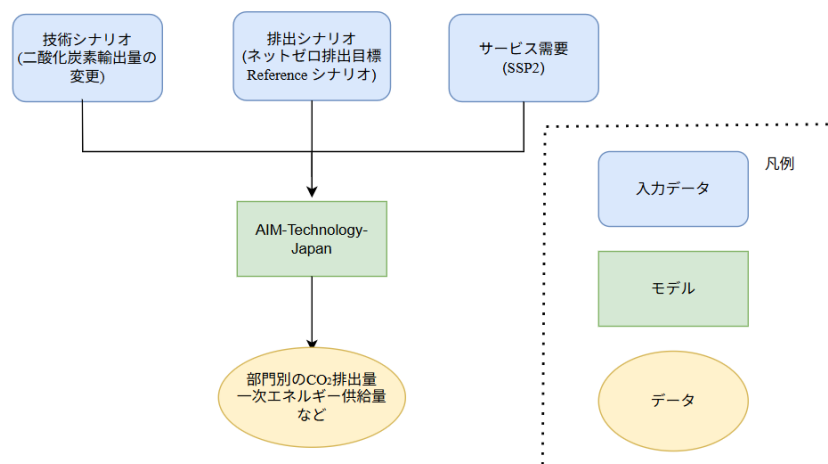


図 1 本研究の全体像

2.2 AIM-Technology-Japan モデル

本モデルはエネルギー需要，供給部門におけるエネルギー技術を詳細に扱うことができる。人口や GDP から推計されるサービス需要および，各種技術のエネルギー効率，初期費用，運用費用を外生的に与えて，エネルギーシステムコストが最小となるように内生的に技術の導入・稼働状況を決定し，GHG 排出量やエネルギー需要を推計する。二酸化炭素の回収方法として、CCS 付き化石発電やバイオマスエネルギーによる二酸化炭素の回収・貯留(Bioenergy with Carbon Capture and Storage; BECCS)と，直接空気回収貯留技術(Direct Air Capture with Carbon Storage; DACCS)を想定している。これまで、貯留先として国内の貯留層のみを想定していたが、本研究では、新たに海外の貯留層への輸送を追加した。本モデルでは、国内で貯留する二酸化炭素量を示す仮想的な機器を想定し、年間 1kt-CO₂ を運送する能力あたりの初期費用や運用費用を課している。回収地や貯留先に関わらず一律に 500km の輸送とし、輸送に係る費用と、初期費用を各貯留層に応じて想定している。今回、二酸化炭素の海外輸送を想定する機器を新たにフローに追加することで、国内貯留層と海外輸出を選択できるように変更した。海外の貯留に係る費用として、国内輸送費と船舶輸送を想定した。国内の輸送費は、国内貯留の輸送費と同様に 500km の輸送にかかる費用とした。二酸化炭素の輸送船として、一回の積載量が 4000t-CO₂/回である船舶を想定し、船舶輸送に係る費用は DEA(2020)⁷⁾を参考に想定した。本研究では、「先進的 CCS 事業」を参考に東南アジアの仮想国を貯留先に想定した。先進的 CCS 事業にも選定されているマレーシアと日本の間を航行する LNG 船の運航に係る日数が、エネ

ルギー研究所(2006)⁸⁾によると、5 日程度であり、積みおろしの日数を考慮し、年間 10 往復できる輸送船とした。不確実性の考慮のために、往復数に関する感度分析を 4 章にて行う。詳細な式体系や想定については Oshiro et al. (2021)⁹⁾を参照されたい。

2.3 シナリオ

本研究で用いるシナリオは表 1 の通りである。排出制約と二酸化炭素排出輸出量と国内貯留量の上限を変更した計 9 シナリオを想定した。全てのシナリオに共通して、GDP や人口を示す社会経済シナリオとして中庸的な SSP2 を用いた。詳細は Riahi (2017)¹⁰⁾を参照されたい。輸出量の上限を変化させるために、二酸化炭素輸出を想定しない Noexport シナリオ、二酸化炭素輸送量を 50Mt-CO₂、100Mt-CO₂、150Mt-CO₂を上限とした CO2_50 シナリオ、CO2_100 シナリオ、CO2_150 シナリオとした 4 シナリオを想定した。排出制約として、ネットゼロ排出目標を排出制約として課し、国内貯留の不確実性を評価するために、国内貯留量 100Mt-CO₂、300Mt-CO₂をそれぞれのシナリオに想定した。シナリオ名 100CO2_50 シナリオであれば、国内貯留量の上限が 100Mt-CO₂、輸出量の上限が 50Mt-CO₂ である。以上のようなシナリオに加え、排出制約を課さない Reference シナリオを加えた計 9 シナリオを想定した。

表 1 本研究で用いたシナリオ

シナリオ名	排出制約	CO ₂ 国内貯留上限	CO ₂ 輸出量上限
Reference シナリオ	なし	上限なし	上限なし
100Noexport シナリオ	あり	100Mt-CO ₂ /年	輸出なし
100CO2_50 シナリオ			50Mt-CO ₂ /年
100CO2_100 シナリオ			100Mt-CO ₂ /年
100CO2_150 シナリオ			150Mt-CO ₂ /年
300Noexport シナリオ		300Mt-CO ₂ /年	輸出なし
300CO2_50 シナリオ			50Mt-CO ₂ /年
300CO2_100 シナリオ			100Mt-CO ₂ /年
300CO2_150 シナリオ			150Mt-CO ₂ /年

3 結果

3.1 部門別二酸化炭素排出量

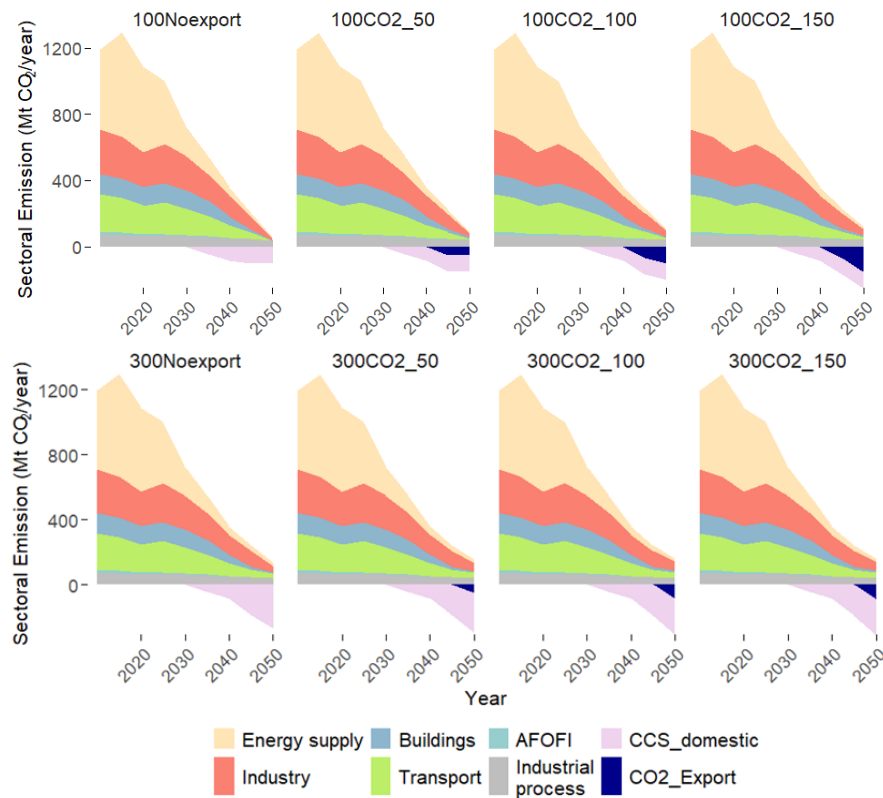


図 2 部門別二酸化炭素排出量

図 2 に各部門の二酸化炭素排出量を示す。どのシナリオでも負の排出量を用いて 2050 年時にネットゼロ排出目標を達成している。海外輸出を想定したシナリオでは、一定量、輸出が実施される結果となった。一方で、実施量にはシナリオ間で違いがあることが示された。国内貯留量の上限が 100Mt-CO₂/年の場合、上限量まで輸出をしている一方で、300Mt-CO₂/年を国内貯留量の上限と想定した場合、上限量まで実施されていない。また、二酸化炭素輸出の実施時期もシナリオ間で違いがあり、100CO₂_50 シナリオ、100CO₂_100 シナリオ、100CO₂_150 シナリオでは 2040 年頃から、300CO₂_50 シナリオ、300CO₂_100 シナリオ、300CO₂_150 シナリオでは 2045 年頃から実施される結果となった。

3.2 一次エネルギー供給

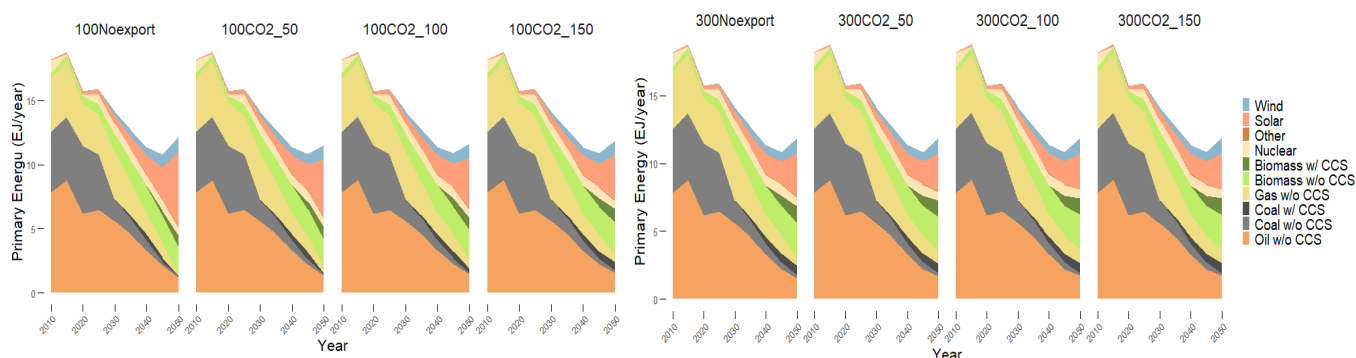


図 3 各シナリオにおける一次エネルギー供給とその内訳

一次エネルギー供給量を図 3 に示す。海外への輸送量を同じ上限量を想定したシナリオを比較すると、国内貯留量が 300Mt- CO_2 /年を上限としたシナリオにおいて、太陽光や風力といった再生可能エネルギーが減少している。海外輸送量の上限を増加させていくと、太陽光や風力といった再生可能エネルギーが減少、CCS 付石炭や CCS 付バイオマスによるエネルギー供給量が増加している。

3.3 電源構成

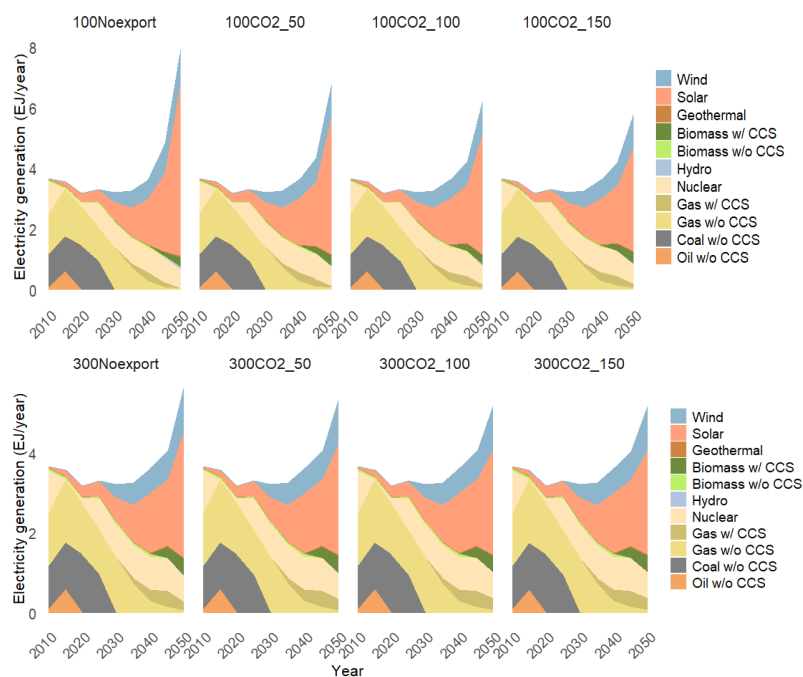


図 4 各シナリオにおける電源構成

電源構成を図4に示す。2050年時の総発電量は100Noexportシナリオが最も多く、およそ8EJ/年の結果となった。輸出量が増加すると太陽光や風力といった再生可能エネルギーのシェアが縮小し、CCS付ガスや原子力のシェアが拡大した。

3.4 最終エネルギー消費

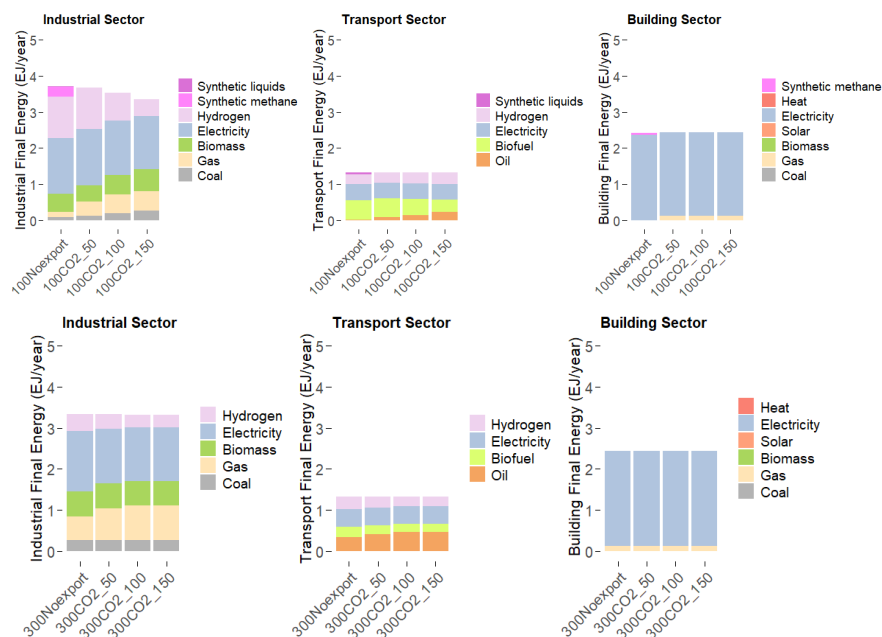


図5 2050年時の各部門別の最終エネルギー消費量

2050年時の部門別の最終エネルギー消費量を図5に示す。どのシナリオにおいても、最終エネルギー消費量は民生部門が1.5EJ/年程度、運輸部門が2.5EJ/年であった。一方で、産業部門で最終エネルギー消費量はシナリオ間で異なり、国内貯留が100Mt-CO₂/年のシナリオ下では、二酸化炭素の輸出上限が上がるにつれて、石炭や天然ガスの消費量が増加し、水素の需要量が減少した結果、総量が減少している。運輸部門では、石油の消費量が増加し、バイオ燃料の消費量が減少する結果となった。民生部門の最終エネルギー消費量の内訳では、二酸化炭素輸出量の上限に関わらず、エネルギー消費量のほぼ全量が電気である。また、300CO₂_50シナリオと比較して、300CO₂_100シナリオにおける産業部門、運輸部門における化石燃料の消費量は増加した。一方で、300CO₂_100シナリオと300CO₂_150間では、化石燃料の消費量に大きな違いはない結果となった。

3.5 緩和費用

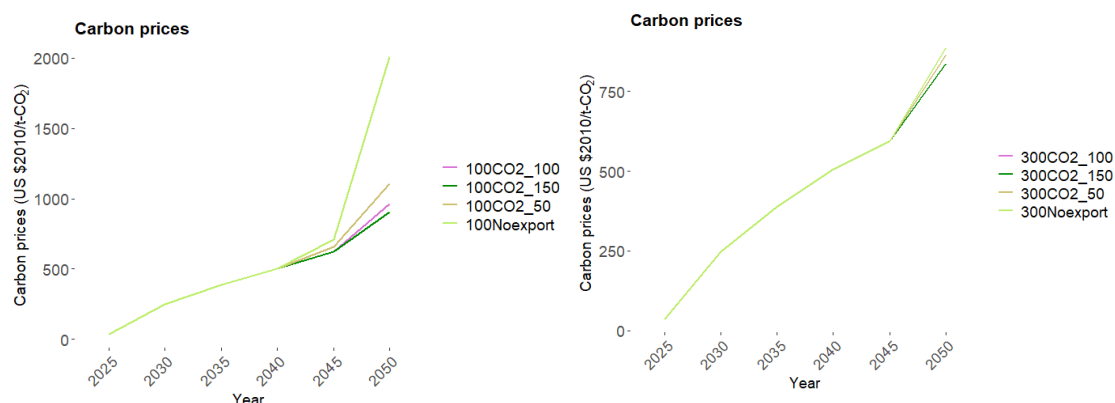


図 6 各シナリオにおける炭素価格

各シナリオの炭素価格を図に示す。100Noexport シナリオにおける 2050 年時の炭素価格がおよそ 2000US\$2010/t -CO₂ と他のシナリオと比較しても高い結果となった。輸出を想定した 100CO₂_50 シナリオでは 1200US\$2010/t -CO₂、100CO₂_100 シナリオでは 1000US\$2010/t -CO₂、950US\$2010/t -CO₂ と減少している。一方で、国内貯留の上限が 300Mt-CO₂/年のシナリオでは輸出量に関わらず、減少はしているものの、2050 年時の炭素価格がおよそ 900US\$2010/t -CO₂ になっておりシナリオ間で大きな違いは見られなかった。

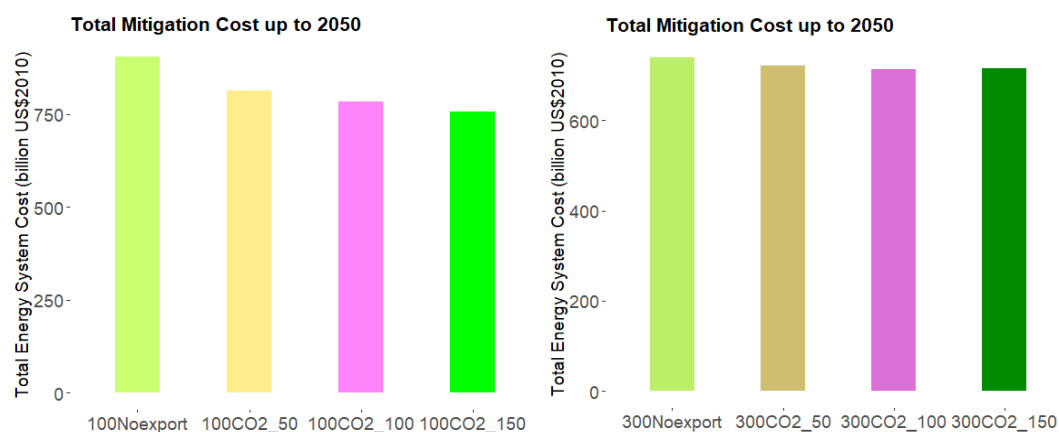


図 7 各シナリオにおける累積エネルギーシステムコスト(Reference 比、割引率 5%)

Reference 比の累積エネルギーシステムコストを図 7 に示す。炭素価格と同様に、国内貯留の上限量が 100Mt-CO₂ のシナリオでは、輸出量が上昇するにつれて、累積エネルギー

ーシステムコストが減少する結果となった。一方で 300Mt・CO₂/年を国内貯留の上限にした場合、どのシナリオでもおよそ 700billion US\$2010 の結果となった。

4 考察

4.1 脱炭素化にむけた二酸化炭素輸出の検討

本研究では、国内貯留層のポテンシャルを年間 100Mt/年に限定した場合、各シナリオで想定した上限量まで二酸化炭素輸出が実施された。国内貯留層が十分量確保できないような状況では、海外へ輸送が有効なオプションであると考えられる。また、100Noexport シナリオと比較して、輸出を想定したシナリオでは炭素価格や累積エネルギーシステムコストが大幅に下がる結果となった。以上のことから、国内貯留が十分に利用できない場合、二酸化炭素輸出が脱炭素化の困難度や経済損失を軽減する有効なオプションになりえるといえる。一方で、300CO₂_100 シナリオ、300CO₂_150 シナリオでは二酸化炭素輸送が上限量まで実施されず、海外への輸送量は国内貯留層の影響を受けることも示された。国内の貯留層が十分に利用可能な場合、海外の貯留層と比較して、安価な国内の貯留層が優先的に利用されたと考えられる。二酸化炭素輸出の有無による炭素価格や累積エネルギーシステムコストの変化も比較的小さい結果となっている。二酸化炭素輸出の実施によって炭素価格は減少しているものの、国内貯留層が十分に利用できる場合、脱炭素化への貢献は限定的だと考えられる。

4.2 二酸化炭素輸出がエネルギーシステムに与える波及的な影響

本研究では、二酸化炭素貿易がエネルギーシステム全体に与える影響も明らかとなった。具体的には、国内貯留量の上限が同じシナリオにおいて、二酸化炭素貿易の上限量が増加すると、水素の需要量が減少し、化石燃料の消費量が増加した。特に国内貯留量を年間 100Mt・CO₂/年に制限した場合、輸出量の上限が高くなると、産業部門や運輸部門において、水素の需要量が減少し、石炭や石油の需要量が増加した。排出制約下では水素が導入されていたが、二酸化炭素を海外に輸送できる場合、排出削減困難な産業部門や、運輸部門では化石燃料の使用が続き、二酸化炭素を回収し海外に貯留することが選択された。その結果、累積エネルギーシステムコストが減少したと考えられる。輸出量の上限の増加により、総発電量に対する太陽光や風力といったシェアが小さくなり、石炭や天然ガスの

シェアが拡大することも明らかになった。二酸化炭素輸出の拡大によって太陽光や風力のへの依存も軽減され、系統安定性への懸念も払拭できると考えられる。民生部門におけるエネルギー需要量は、全てのシナリオに共通して大部分が電気であり、二酸化炭素輸出の有無に関わらず民生部門では電化を推し進めていくことの重要性が示された。

4.3 感度分析

本研究では、架空の国と年間 10 往復できる積載量 4000t-CO₂/回の二酸化炭素輸送船を想定した。初期費用は、運行回数に大きく依存する。具体的には、一年間に 1 Mt-CO₂/年運べる輸送船の初期費用と運用費用を与えており、年間の往復数が二倍になれば、費用が半分になる。本研究では、国内貯留量の上限が 300Mt-CO₂/年におけるシナリオでは、国内貯留が実施され、上限量まで輸出されない結果となった。よって本章では、国内貯留量の上限を 300Mt-CO₂/年、海外輸送量の上限を 150Mt-CO₂/年とした年間の往復数を 15,20 往復できる輸送船を想定し、感度分析を行った。

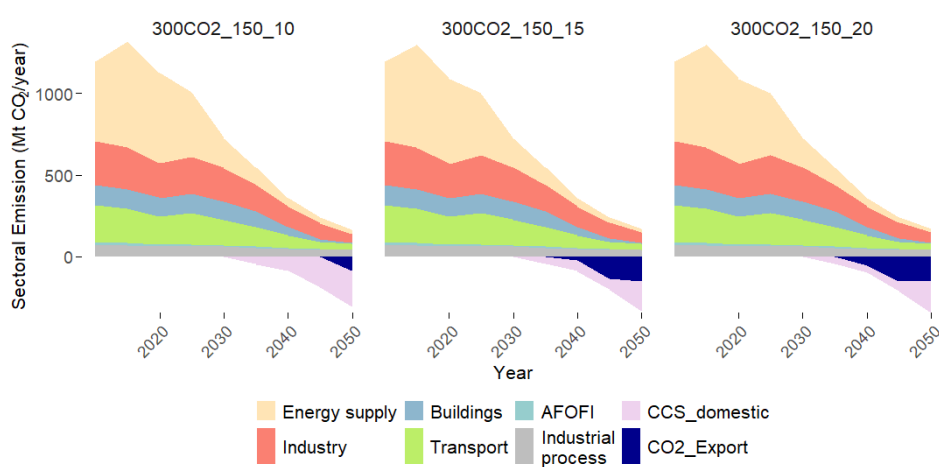


図 8 感度分析における各シナリオの二酸化炭素排出量

図 8 に感度分析における各シナリオの二酸化炭素排出量を示す。国内貯留量の上限を 300Mt-CO₂/年、海外輸送量の上限を 150Mt-CO₂/年とした。15 往復のシナリオでは 2050 年に上限量、20 往復のシナリオでは 2045 年に上限量の 150 Mt-CO₂/年に到達する結果となった。この結果を踏まえると、より往復数の多い輸送船であれば、より幅広い状況下で有効なオプションになりうるということが考えられる。

5 本研究のまとめ

本研究では二酸化炭素輸出を考慮した脱炭素化シナリオを定量化し、カーボンニュートラルな社会の実現にむけた有効性を検討することを通して、今後の脱炭素化戦略にむけた新たな示唆を提示することを目的とした。AIM-Technology-Japan モデルに回収後の二酸化炭素の貯留先として、海外の貯留層を追加し、国内と海外の貯留層の上限量を変更した。一次エネルギー供給量、部門別最終エネルギー消費量、電源構成、炭素価格、累積エネルギーシステムコストに関する分析を行った。結果として、排出制約下で二酸化炭素輸出を想定した全てのシナリオにおいて、二酸化炭素の輸出が行われた。国内貯留量の上限を年間 100Mt-CO₂/年とした場合、どのシナリオにおいてもそれぞれの輸出量の上限まで二酸化炭素輸出が行われた。加えて、二酸化炭素の海外輸送の実施によって大幅に炭素価格や累積エネルギーシステムコストといった緩和費用が大幅に減少した。また、輸送量が増加するにつれて、再生可能エネルギーの減少、産業、民生部門における水素の消費量の減少と化石燃料の消費量の増加が結果として得られた。一方で、輸出量は国内貯留量の利用可能量からの影響を受けることも明らかになっている。国内貯留量の上限が年間 300Mt-CO₂/年まで拡大したシナリオでは、輸出量が 100Mt-CO₂/年程度で留まり、上限量まで実施された後は再生可能エネルギーや水素の消費量の変化も小さいことが示された。加えて、炭素価格や累積エネルギーシステムコストの減少幅も小さい結果となった。

以上のようなことから、今後、日本がネットゼロ排出目標達成に向けて、回収後の二酸化炭素輸出を海外の貯留層に輸出する戦略的有効性は高いと結論付ける。特に、国内貯留層が十分に利用できない場合は有効な戦略であることを踏まえ、脱炭素化にむけた中心戦略として技術投資や貯留先の国家との関係調整を含めた制度設計を包括的に行っていくべきである。また、産業や運輸といった削減困難な部門においても化石燃料の使用を継続できることから、エネルギーシステム全体の脱炭素化の困難度を緩和する選択肢であることも示唆されている。国内貯留量が十分使用可能なシナリオにおいても、実施されているされることを考慮すると、幅広い状況下においても有効な戦略であると考えられる。一方で、海外の貯留層にも限界があり、恒久的に持続可能なエネルギーシステムではないことを踏まえると、段階的に化石燃料の使用から脱却を果たさないといけない。しかしながら、二酸化炭素を海外の貯留層へと輸送する戦略は、化石燃料からの急速な脱却を緩和し、脱炭素化に伴う緩和費用の軽減を可能にする極めて有効な戦略であると結論付ける。本研究の留意点として、海外貯留に係るコストとして、貯留層と年間 10 往復することが可能な積載量 4000t-CO₂ の輸送船の初期費用と運用費用を想定した。将来的に炭素市場が形成された場合、炭素価格がさらに上乗せされる可能性や、貯留に係る費用を日本が負担

する可能性が考えられる。政治的、制度的な不透明性によるコスト想定の不確実性は高いものの、本研究で想定した年間 10 往復は実際の検討されている貯留先との航行日数を鑑みるとかなり保守的な想定である。以上のことを踏まえると、本研究の結論を覆すほどのものではないといえる。今後の展望として、国内の状況の国内貯留層を変更したが、再生可能エネルギーの費用など、より幅広い社会状況を考慮した上での二酸化炭素貿易の有効性の検討を行う必要がある。世界各国、特にアジア圏の排出量が多い国との競合を表現するためにも、全世界を対象としたモデルとの接続を行うことで、更なる政策的示唆を提言できると考える。

【参考文献】

- 1)IPCC(2022): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. A. Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley, Eds.) Cambridge University Press
- 2) Masahiro Sugiyama, Shinichiro Fujimori, Kenichi Wada, Etsushi Kato, Yuhji Matsuo, Osamu Nishiura, Ken Oshiro, Takashi Otsuki. Residual emissions and carbon removal towards Japan's net-zero goal: a multi-model analysis. *Environmental Research Communications*. 2024. 6. 5
- 3) Oshiro, K., & Fujimori, S.(2024): Mid-century net-zero emissions pathways for Japan: Potential roles of global mitigation scenarios in informing national decarbonization strategies,*Energy and Climate Change*, 5, 100128.
- 4) Oshiro, K., Fujimori, S., Hasegawa, T., Asayama, S., Shiraki, H., & Takahashi, K.(2023): Alternative, but expensive, energy transition scenario featuring carbon capture and utilization can preserve existing energy demand technologies,*One Earth*, 6(7), 872–883
- 5) Otsuki, T., Shibata, Y., Matsuo, Y., Obane, H., & Morimoto, S.(2024): Role of carbon dioxide capture and storage in energy systems for net-zero emissions in Japan,*International Journal of Greenhouse Gas Control*, 132, 104065.
- 6)経済産業省「先進的 CCS 事業」
<https://www.meti.go.jp/press/2024/06/20240628011/20240628011.html>
- 7) DEA(2024): *Technology Data for Carbon Capture, Transport and Storage*.
- 8) エネルギー研究所(2006,10 月) 世界の LNG 船市場に係る調査(変化の途上、あらたなビジネスモデルを探る LNG 船)
https://eneken.ieej.or.jp/report_detail.php?article_info_id=1359

9) Oshiro, K., Fujimori, S., Ochi, Y., & Ehara, T., Enabling energy system transition toward decarbonization in Japan through energy service demand reduction, *Energy*, Vol.227, pp.120464, 2021

10) Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M.(2017): The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change*, 42, 153–168.