

# 1. 5°C目標達成に向けたエネルギー需給に関わるシナリオ分析

## A Scenario Analysis on the Energy Demand and Supply Aiming for the 1.5°C Climate Target

田中勇伍\*・栗山昭久\*\*・岩田生\*\*\*・田村堅太郎\*\*  
Yugo Tanaka Akihisa Kuriyama Ikuru Iwata Kentaro Tamura

### **Abstract**

This research aims to develop a framework to explore scenarios which are compatible with the global 1.5°C climate target. This entails explorations of socio-economic scenarios, as well as technological assumptions on energy systems, which can be supported by stakeholders at the same time satisfying an emission benchmark. First, we set up three scenarios. Tech-driven Transformation Scenario assumes no transformation on the current socio-economic structure, but the maximum level of implementation of decarbonization technologies, such as renewable energy or imported hydrogen. Socio-economic Transformation Scenario assumes the maximum level of socio-economic structure changes, which are quantified through developing future input-output tables and future person-trip databases, reflecting the scenario narratives. Balanced Scenario assumes medium level of socio-economic change as well as technology implementation. Then, we quantified final energy consumptions, primary energy supplies, and GHG emissions for each scenario. As a result, by comparing them with a benchmark (cumulative GHG emission should not exceed 14.3GtCO<sub>2</sub>eq), we found that Tech-driven Transformation Scenario cannot stay under the benchmark, which implies the importance of socio-economic change. The scenario needs heavily to rely on negative emission technologies to achieve the benchmark by 2050. We conclude that the framework is useful to provide policy implications to identify possible pathways for a nation to achieve the global 1.5°C goal.

**Key words:** Climate change, 1.5°C target, Scenario analysis, Socio-economic scenarios

### 1. はじめに

パリ協定で合意された 1.5°C目標の実現に向け、世界各国が協調して温室効果ガス排出量の削減に取り組まなければならないことは論を俟たない。日本も 2030 年までに 46%削減 (2013 年比) する排出削減目標 (NDC) を提出し、2050 年までにカーボンニュートラルの実現を目指している。しかしながら、国連気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の最新の報告によると、50%の可能性で気温上昇を 1.5°C以内に抑えるために 2020 年以降に排出できる総 CO<sub>2</sub> 排出量 (残余カーボンバジェット) は約 500Gt であるのに対し、現状では世界全体で年間約 40t の CO<sub>2</sub> が排出されている<sup>1)</sup>。気温上昇を 1.5°C以内に抑制するために、2050 年までにカーボンニュートラルを実現するだけではなく、各国の NDC で想定する削減目標よりも、早期かつ大幅な排出削減に取り組まなければならない<sup>1)</sup>。

世界全体の残余カーボンバジェットには大きな不定性があり、それに加えて、このカーボンバジェットをどの国にどのように配分すべきか自明ではない。そのため、特定の国の排出経路が世界全体の 1.5°C目標に整合しているか、を一意に評価することはできない。他方、世界各国が協調して 1.5°C目標の実現を目指す上で、自国の温室効果ガス排出削減経路とその下での累積排出量が世界全体の残余カーボンバジェットに対して与える影響を把握し、より目標実現に貢献しうる排出削減経路を検討できるようにす

ることは重要である。

また、1.5°C目標の実現には、エネルギーシステムに限らない幅広い社会経済システム (土地、都市、交通、建物、産業システムなど) において、急速かつ広範囲に及ぶ移行 (transition) が必要であり<sup>2)</sup>、エネルギー分野だけでなく、幅広い分野における変革と統合された脱炭素ビジョンの構築が急務である。これまで、日本における気候変動に係る政策に対する示唆を得ることを目的としたシナリオ分析の多くは、エネルギーシステム以外の社会経済や人々の行動などに係る想定を所与の条件とし、ある時点でのエネルギーシステムからの二酸化炭素排出量を制約条件として分析を行うことで、エネルギー技術等に関する様々な不確実性を想定したうえで費用効率的な対策を特定することに貢献してきた。一方、1.5°C目標の実現のためには、エネルギーシステムに限らない社会経済システム自体をどのように変革していくか、という分野横断的な対策が求められる。また、こうした広い意味での対策を論じる場合、費用効率性だけでなく、定量化できないものも含め、多様な社会的便益を考慮し、社会構成員から支持を集めうるシナリオを模索することの重要性がより高まると考えられる。

そこで、本研究では、世界全体での 1.5°C目標に対して自国の排出量削減の観点からより大きな貢献を果たすシナリオを構築するため、社会経済システムや人々の行動パターンの変化と、エネルギーシステムの変化との関係性を踏まえ、日本における累積排出量がより小さくなる将来シナリオを、社会構成員の参加に基づいて構築するための方法論を検討する。

\*公益財団法人地球環境戦略研究機関 関西研究センター

〒651-0073 神戸市中央区脇浜海岸通 1-5-2 東館 5 階

E-mail : y-tanaka@iges.or.jp

\*\*公益財団法人地球環境戦略研究機関 気候変動とエネルギー領域

〒240-0115 神奈川県三浦郡葉山町上山口 2108-11

\*\*\*公益財団法人地球環境戦略研究機関 ビジネススクフォース

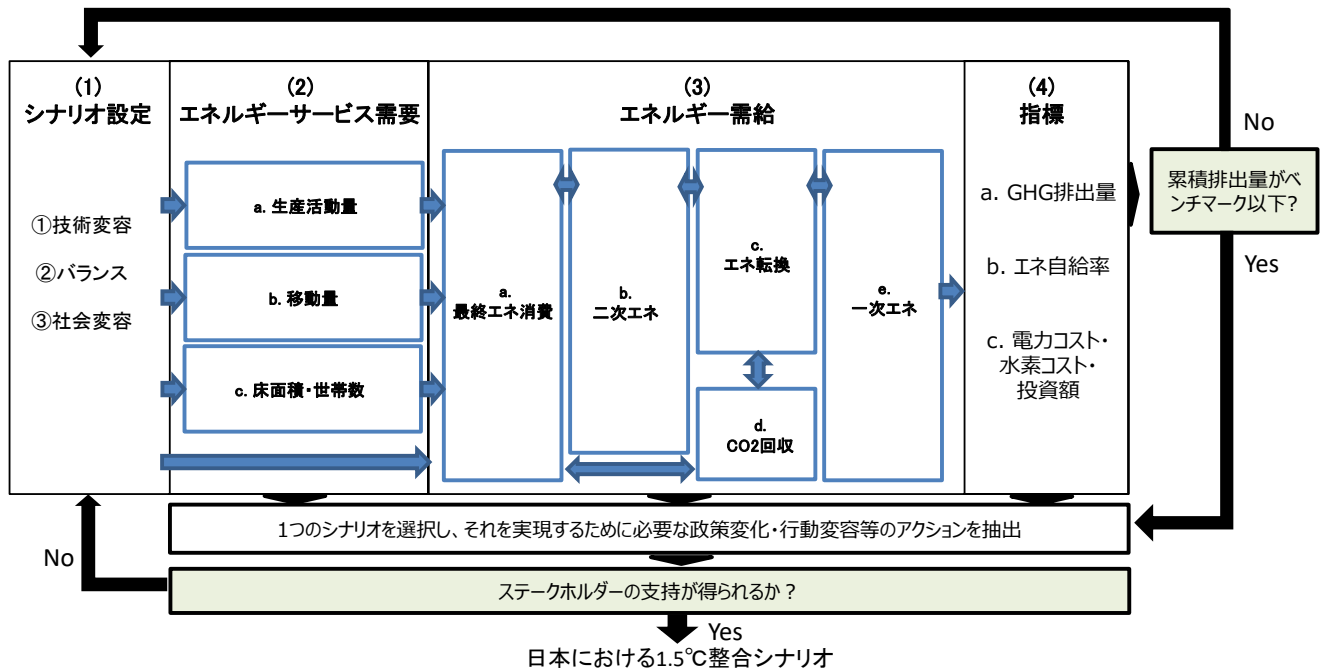


図 1. シナリオ構築の手順

## 2. 研究方法

### 2.1 シナリオ構築の手順

図 1 に示す通り、社会経済の変化とエネルギー技術の変化に関する複数のシナリオを設定したうえで、社会経済シナリオに基づいてエネルギーサービス需要を定量化し、エネルギーサービス需要とエネルギー技術シナリオに基づいてエネルギー需給を定量的に推計したうえで、温室効果ガス排出量（CO<sub>2</sub>以外については簡易的に推計）、エネルギー自給率、電力コスト・水素コスト・投資額を計算する。累積 GHG 排出量が 2.2 に示すベンチマークを上回る場合は、シナリオの内容を再検討し、同様のプロセスを繰り返す。次に、想定したシナリオの実現可能性を高めるために必要な条件を検討し、それをもとに政策変化や行動変容などのアクションリストを構築する。そして、推計結果とアクションリストをステークホルダーに示し、支持しうる内容となっているか確認し、支持されない場合は、その理由に関するフィードバックを元にシナリオの内容を再検討し、一定程度の支持が得られるまで同様のプロセスを繰り返す。

### 2.2 ベンチマークとなる累積排出量の検討

世界全体での残余カーボンバジェットに対する自国の排出の位置づけを明示的に意識するため、ベンチマークとなる累積排出量を定め、構築したシナリオがその水準を下回ることを要件とした。ベンチマークとして、Climate Action Tracker(2021)<sup>3)</sup>による 2020-2050 年の国ごとの累積 GHG 排出可能量 (14.3GtCO<sub>2</sub>eq、森林吸収源を含まない) を設定した。

### 2.3 ステークホルダーの参加方法

ステークホルダーの参加については、1.5°C目標に対するコミットメントを表明している民間企業 38 社に対して参加を募り、2022 年 11 月から 2023 年 8 月にかけて、計 4 回のワークショップを実施した。シナリオの内容に対する意見を聴取し、事後アンケート等を通じて一定の支持が得られたことを確認した。

### 2.4 各ステップの詳細

#### (1) シナリオ設定

本研究では、①社会経済システムのトレンド以上の変化を想定せず、再生可能エネルギーや輸入水素、二酸化炭素分離回収貯留 (CCS) や大気直接回収貯留 (DACCS) といった、エネルギー技術を最大限導入することで排出量の削減を図る技術変容シナリオ、それに対して、③デジタル化といった社会経済システムの変化を最大限に想定し、エネルギー技術の導入は緩やかになる社会変容シナリオ、また、②エネルギー技術の導入も社会経済システムの変化も両者の中間となるバランスシナリオ、の 3 つを設定した。人口については、国立社会保障・人口問題研究所<sup>4)</sup>を参照して設定し、GDP については日本経済研究センターの中期経済予測 (2023)<sup>5)</sup>を外挿補完し 2050 年に 660 兆円 (2015 年実質価格) と設定した (3 シナリオ共通)。

#### (2) エネルギーサービス需要の推計

##### a. 生産活動量

まず、デジタル・トランスフォーメーションによる無形資産投資の増加、産業の高付加価値化、製造業のサービス化、といった変化や、循環経済による素材利用の変化、浮体式洋上風力など新たなエネルギー技術の成長産業化、といっ

たシナリオ設定による生産活動量に対する影響を、産業連関表を加工することを通して分析した。小林ら(2021)<sup>6)</sup>の手法に従い、2015年時点の取引基本表の投入係数、最終需要、輸入係数を、シナリオに応じて修正することで、将来の各産業の生産額を推計した。生産額の変化率を足下の生産量に乗じることで、粗鋼・化学製品等の主要品目の将来の生産量を求めた。

より具体的には、取引基本表をシナリオ設定項目に応じて60部門×60部門に集約したうえで、先行研究を参照し、既存の産業連関表には存在しない電気自動車部門及び自動運転サービス部門、水素製造部門を新設した。また、発電部門及び電力施設建設部門の内に、再生可能エネルギー（太陽光、陸上風力、着床式洋上風力、浮体式洋上風力、その他再エネ）部門を新設した。そのうえで、例えば、デジタル化については、紙製品の投入減と情報サービス・対事業所サービスの投入増、全ての部門の付加価値の増、教育研究・情報サービスの最終需要増、家計における乗用車及びガソリンへの支出や自動車関連支出の減少と自動運転サービス部門に対する需要増、という形で産業連関表を加工し、投入係数・最終需要の変化として表現した。同様に、素材利用の変化については、紙・板紙・加工紙の生産におけるパルプの投入減と古紙の投入増、住宅・非住宅建築部門における木造建築物の割合増、飲食料品へのプラスチック製品投入減と紙製品投入増、によって表現した。エネルギー利用については、各部門の化石燃料投入減と電力投入及び付加価値（固定資本減耗）増、家計の化石燃料支出減と電力及び電気機器に対する需要増、再生可能エネルギー拡大による発電及び電力施設建設部門の投入係数の変化、によって表現した。なお、鉄鋼及び化学製品のリサイクルや製造プロセスの変化については、シナリオでは想定しているものの、財の価格が大きく変化することが想定され、産業連関表では扱うことが困難であるため、(3)エネルギー需給の分析においてのみ考慮することとした。

シナリオの具体的な設定内容については、様々な文献や専門家へのヒアリングをもとに想定しうる最大値を考察したうえで、「③社会変容シナリオ」では全ての変化の最大値を想定した（表1）。「①技術変容シナリオ」ではトレンド以外の変化は想定せず現状の産業構造・社会経済構造を維持しようとする想定、「②バランスシナリオ」ではトレンドに加えてその他の変化のポテンシャルの50%が実現する想定とした。

また、想定した項目の中でも2030年までに変化が進むもの（DXの推進など）と、2030年以降に変化が起こるもの（CASEの推進、浮体式洋上風力など）を区別し、2030年時点での生産活動量についても同様の分析を行った。

表1. 社会変容シナリオにおける社会経済諸元

要素	想定内容（2050年時点）
トレンド	人口減少、少子高齢化、国際動向等 最終需要及び輸出入が日本経済研究センター中期経済予測 <sup>5)</sup> のベースライン（標準シナリオ、2050年は2035年を横置き）水準まで変化
デジタル化	DXの推進 無形資産投資が100兆円程度まで拡大し、粗付加価値が現状より3割増。業務用建物建設が2割減。公務・情報通信・教育研究・対事業所サービスへの紙の投入が9割減。
	テレプレゼンス（オンライン会議、テレワーク、遠隔医療・教育）の推進 鉄道・航空移動需要が5割減。
	フィジカルインターネット・モーダルシフトによる物流効率化 貨物輸送の5割でシェアリング化が進展。
	CASE(Connected/Autonomous: 自動運転、Shared: シェアリング、Electric: 電動化)の推進 高齢化等による運転者数減・移動困難者数増に対応して完全自動運転自動車が普及。自家用車の6割がシェアリングに移行し、年間新規販売台数が5割減。自動運転により安全性が改善し車体用の鋼板が樹脂化。
素材利用	古紙利用の増加 紙・紙製品へのバージンパルプの投入が8割減となり、古紙投入が増加。
	建築へのCLT材活用 非木造建築の5割が木造化し、建設部門における国産木材利用が増加。
	機械部品の樹脂化 はん用・業務用・生産用機械に投入される鉄鋼の4割が樹脂製品に。
	脱プラの推進 飲食料品へのプラスチック製品投入が5割減少し、その半分が紙加工品に。
エネルギー	電化・省エネ化の推進 想定する電化・省エネ導入量に応じて化石燃料投入減と電力投入・電気機械の最終需要の増。
利用変化	浮体式洋上風力の成長産業化 想定する電源構成に合わせて建設部門の需要増と鉄鋼・機械等の投入増。
輸出構造の変化	サービスで外貨を稼ぐ経済への転換 製造業の輸出の50%を新たな基幹産業（情報通信サービス、研究開発、金融保険、インバウンド観光、小売）の輸出に付け替え

b. 移動量

まず、旅客輸送については、都市類型ごとに現状の人々の外出率・移動回数・距離・移動手段等を調査した全国都市交通特性調査（全国パーソントリップ調査）をベースに、シナリオの設定に合わせてそれらを変化させることで、将

来のパーソントリップデータを作成した。市区町村ごとに都市類型を設定し、これを適用することで、移動手段ごとの移動量の変化を推計した。

貨物輸送については、品目ごとに現状の輸送トンキロを調査した統計データをもとに、モーダルシフト、産業構造の変化や EC の拡大、循環経済の進展、フィジカルインターネットを始めとする物流インフラのシェアリングによる積載率の向上などの要素を勘案して品目ごとに輸送トンキロの変化率を想定し、輸送量の変化を推計した。なお、(1)で想定した社会経済の変化（テレワークによる通勤減など）及び上記 a. で推計した生産活動の変化（生産減による輸送量減など）を反映して推計を行った。

社会変容シナリオにおける主な想定内容は表 2 の通り。移動モードの変化は、ITF Transport Outlook 2021<sup>7)</sup>を参照して設定した(図 2)。技術変容シナリオは現状から変化がないものとし、バランスシナリオは現状からの変化が社会変容シナリオの 50%となるように設定した。

表 2. 社会変容シナリオにおける移動の基準年からの変化

	2030	2040	2050
外出率（平日）	0.9	0.65	0.4
外出率（休日）	0.76	0.6	0.44
1 回あたり移動距離	1.05	1.28	1.5
物流効率化による輸送量の変化	0.85	0.83	0.8

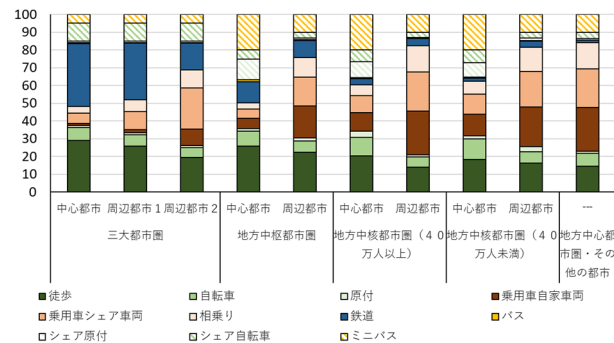


図 2. 社会変容シナリオにおける移動手段想定（2050 年）

c. 床面積・世帯数

各シナリオ共通の想定として、生産活動量の変化やストックの変遷を考慮して、国土交通省のロードマップ<sup>8)</sup>を参考に、床面積及び建築物ストックの断熱性能の変化を推計した。

(3) エネルギー需給

産業部門（鉄鋼、化学工業、窯業土石、その他）、業務部門（建物用途別、エネルギー用途別）、家庭部門（地域別、エネルギー用途別）、運輸部門（旅客／貨物、輸送手段別）のそれぞれについて、二次エネルギーごとの最終エネルギー消費量を推計した。

電化・省エネ対策については、2030 年に 130 ドル/tCO<sub>2</sub>、2050 年に 250 ドル/tCO<sub>2</sub> 程度のカーボンプライシングが導入され、非経済的な障壁を除去するための政策措置が行われていることを念頭に、導入量の最大値を検討し、全てのシナリオで最大限導入されることを想定した（厳密にコストを関数として対策導入量を決定しているわけではなくシナリオとして外生的に設定している点に留意が必要である）。主な想定内容は表 3 の通り。

表 3. 電化・省エネの主な想定内容（全シナリオ共通）

	2030	2040	2050
素材産業以外の産業部門における空調・動力・低温熱の電化	30%	60%	90%
素材産業以外の産業部門における高温熱の電化	0%	20%	30%
乗用車新車に占める EV/PHEV シェア	50%	100%	100%
家庭の新規給湯機器に占める HP シェア	55-65%	100%	100%

素材産業については、製造プロセスや使用原料の変化をシナリオごとに設定した（表 4）。

表 4. 素材産業の主な想定内容（2050 年）

	技術変容	バランス	社会変容
スクラップ由来の粗鋼生産量(基準年比)	1.15	1.8	2
鉄鉱石を還元する粗鋼生産のうち水素直接還元法の割合	1	1	1
化学製品原料のバージンナフサの割合	1	0.7	0.4
バージンナフサのうち水素由来原料比率	0.9	0.9	0.9
セメント製造のクリンカ代替割合	0.25	0.32	0.4
セメント製造のクリンカ再利用割合	0	0.2	0.4

次に、電力及び水素の供給方法についてシナリオを設定し、一次エネルギー供給量を推計した。再生可能エネルギーについては、各業界団体の目標値<sup>9)10)11)</sup>を参照して 5 年ごとの導入ポテンシャルを設定し、技術変容シナリオとバランスシナリオはポテンシャル上限、社会変容シナリオは上限以下で必要量が導入される想定とした。なお、技術変容シナリオとバランスシナリオについては、2035 年以降ペロブスカイトとシリコンのタンデム型太陽電池の導入により発電効率が向上する想定とした。なお、余剰電力を用いてグリーン水素製造を行う想定として別途電力需給シミュレーションを行い、国内での水素製造量を推計した（シミュレーションの詳細は、Kuriyama, et al. 2023<sup>12)</sup>を参照）。

**表 5. 再生可能エネルギーの想定内容(技術変容シナリオ, バランスシナリオ)**

	2030	2040	2050
太陽光発電 (AC ベース, GW)	125	219	300
太陽光発電 (発電電力量, TWh)	172	411	691
陸上風力 (GW)	26	35	40
洋上風力 (GW)	8	135	405
水電解装置 (GW)	0	81	350

**表 6. 再生可能エネルギーの想定内容(社会変容シナリオ)**

	2030	2040	2050
太陽光発電 (AC ベース, GW)	125	219	300
太陽光発電 (発電電力量, TWh)	172	342	465
洋上風力 (GW)	8	135	276
水電解装置 (GW)	0	81	222

火力発電については、既存の石炭火力発電は 2030 年までに 43GW が、2040 年までに全てがフェーズアウトし、既存の LNG 火力は、2040 年までに 60GW が、2050 年までに残り全てが水素専焼火力に改修されることを想定した (3 シナリオ共通)。

水素輸入については、政府目標 (2030 年 300 万トン、2040 年 1200 万トン、2050 年 2000 万トン) を上限として、国内再エネの余剰電力によるグリーン水素では不足する量を輸入する想定とした。

CO<sub>2</sub> 回収については、年間貯留量の政府想定値 (240MtCO<sub>2</sub>/年) を上限として、2035 年以降、累積排出量がベンチマークとして設定した水準に抑えられる規模まで DACS が導入される想定とした。

#### (4) 指標

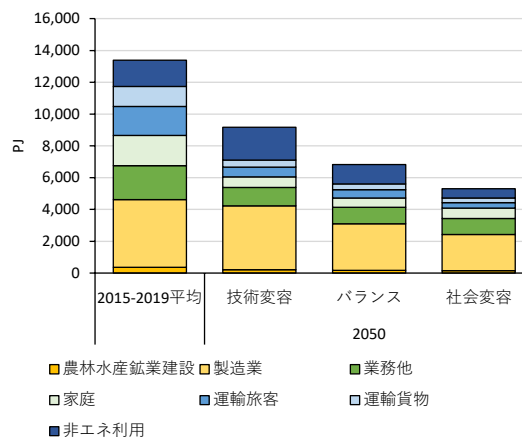
シナリオに基づいて推計されたエネルギー需給における、GHG 排出量、エネルギー自給率、電力コスト・水素コスト・国内投資額を推計した。本研究ではこれらをシナリオの内容と共にステークホルダーに提示してフィードバックを得ているが、本稿では紙面の都合上、GHG 排出量についてのみ説明する。

CO<sub>2</sub> については、一次エネルギーごとに排出係数を想定し、一次エネルギーの消費量に乗じたうえで、DACs 及び CCS による回収量を差し引くことでエネルギー起源及び非エネルギー起源の CO<sub>2</sub> 排出量を求めた。CO<sub>2</sub> 以外の GHG については、2013 年度の各ガスの排出量に外的に想定した変化率を乗ずることで求めた (全シナリオ共通)。さらに、これらの累積排出量を求めた。

### 3. 結果

#### 3.1 最終エネルギー消費量

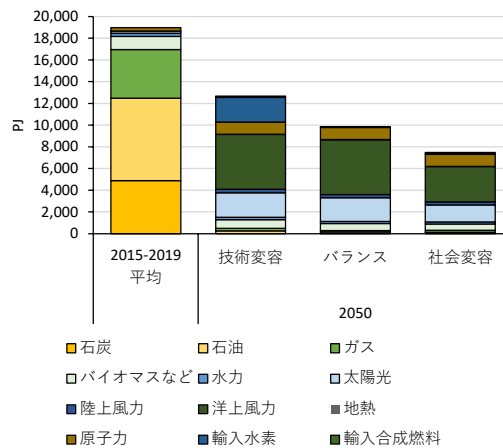
各シナリオのもとでの 2050 年の最終エネルギー消費量は、図 3 のようになった。社会経済変化と素材産業の製造プロセスの変化の想定が異なることで、大きくエネルギー需要に差が生じる。社会変容シナリオでは、2050 年の最終エネルギー消費量は現状比 60% 減となり、中でも運輸旅客が 81% 減と大幅に減少した。



**図 3. 各シナリオの最終エネルギー消費量 (2050 年)**

#### 3.2 1次エネルギー供給量

2050 年の 1 次エネルギー供給量は、図 4 のようになった。



**図 4. 各シナリオの 1 次エネルギー供給量 (2050 年)**

バランスシナリオと社会変容シナリオは、ほぼ全てのエネルギーを国内で賄い、エネルギー自立を達成している。技術変容シナリオでは、輸入水素が大きな役割を果たしているが、その他はバランスシナリオとほぼ同じ構成になっている。

#### 3.3 温室効果ガス排出量

エネルギー起源及び非エネルギー起源 CO<sub>2</sub> に加えて、簡易推計したその他の温室効果ガスを合算し、5 年ごとの温室効果ガス排出量を求め、時点間は線形補間した (図 5)。



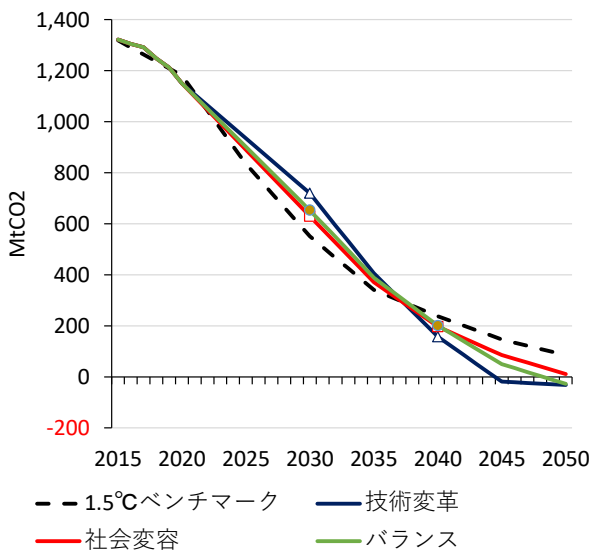


図 5. 各シナリオの温室効果ガス排出経路

いずれのシナリオも、2030 年前後においてはベンチマークとして設定した水準よりも高い排出量となっている。2020 年から 2050 年までの累積 GHG 排出量はいずれも 14.3Gt となっているが、技術変容シナリオでは 2045 年頃に 14.4Gt となり、ベンチマークを超過した。デジタル化をはじめとする社会経済の変容を想定している社会変容シナリオとバランスシナリオは、2038 年頃までの排出量が相対的に小さく、それにより 2050 年に至るまでベンチマークを超過することなく推移する。また、これらのシナリオは、ネガティブエミッション技術への依存度が大きく異なる(図 6)。

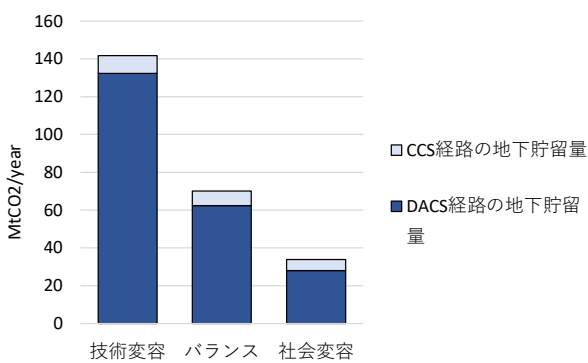


図 6. 各シナリオの CO<sub>2</sub> 年間貯留量

#### 4. 考察・まとめ

本研究では、1.5°C目標に向けて早期に大幅な排出削減を行うことを明示的に意識してシナリオを構築するための方法論を検討した。また本稿では、実際にそれを適用してシナリオ分析を行った結果を報告した。本研究の結果、以下の点を示唆された。様々な便益をもたらすデジタル化をはじめとする社会経済の変容を早急に進めていくことは、

1.5°C目標の実現可能性を高める。一方、こうした社会経済変容を想定しないシナリオでは、ネガティブエミッション技術を含む脱炭素技術を最大限導入することで、一時的に累積排出量がベンチマークを超過するものの、2050 年にはベンチマーク水準に抑えうる。また、いずれのシナリオにおいても、省エネ・電化の最大限促進や石炭火力の早期フェーズアウトといった対策がなければ、ベンチマークとして設定した累積排出量を超過する可能性が高く、1.5°C目標を追求するうえで、エネルギーシステムにおいて取りうるオプションの幅は非常に狭い。社会経済の変化には経路依存性 (Path dependency) やリバウンド効果を含め高い不確実性があり、ネガティブエミッション技術にはコストや CO<sub>2</sub> 貯留地点を含め高い不確実性がある。こうした不確実性を踏まえつつ、1.5°C目標を追求することを前提に、バランスの取れた施策を構築することが望ましい。本研究で構築した方法は、こうした政策的示唆を得るうえで有用であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) IPCC, 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report*.
- 2) IPCC, 2018. *Special report: Global Warming of 1.5°C*.
- 3) Climate Action Tracker, 2021. *1.5°C-consistent benchmarks for enhancing Japan's 2030 climate target*.
- 4) 国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口」
- 5) 日本経済研究センター(2023)「第 49 回中期経済予測：自由貿易推進と自前主義脱却でイノベーション拡大を」
- 6) 小林光・岩田一政・日本経済研究センター (2021)「カーボンニュートラルの経済学」(日本経済新聞出版)
- 7) International Transport Forum, 2021. *ITF Transport Outlook 2021*. OECD.
- 8) 国土交通省(2021)「脱炭素社会に向けた住宅・建築物における省エネ対策等のあり方・進め方」
- 9) 太陽光発電協会 (2020)「PV OUTLOOK2050」
- 10) 風力発電協会 (2023)「JWPA Wind Vision 2023」
- 11) 海洋技術フォーラム (2022)「我が国の浮体式洋上風力発電導入の数値目標に関する提言 (詳細版)」
- 12) Kuriyama, A., Liu, X., Naito, K. et al., 2023. *Importance of long-term flexibility in a 100% renewable energy scenario for Japan*. Sustainability Science.