

脱炭素社会の実現に向けた 将来シナリオの役割と課題

増井 利彦

国立研究開発法人国立環境研究所

科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会第
12期環境エネルギー科学技術委員会(第1回)
2024年1月30日

- 脱炭素社会の実現に向けたシナリオ研究の取り組み状況、シナリオ研究における課題
- シナリオを踏まえ、今後重点的に研究開発を支援すべき技術分野
- 国(文部科学省)として充実させるべき施策(例:大学におけるシナリオ研究への支援方策等)

国立環境研究所は、2021年6月30日の総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会(第44回)において、「日本の2050年脱炭素社会を実現する分析結果」を公表するとともに、2023年4月28日に開催された中央環境審議会 地球温暖化対策計画フォローアップ専門委員会において「2050年脱炭素社会実現に向けた排出経路分析」として、最新のNDCや温暖化対策計画を反映させた分析結果を報告してきた。本日は中環審での報告内容の一部を紹介するもので、詳細な試算結果は下記を参照して下さい。

https://www-iam.nies.go.jp/aim/projects_activities/prov/index_j.html

気候変動対策における「シナリオ」とは？

- 将来は多様であり、様々な不確実性が存在する。不確実性をゼロにすることはできない。こうした場合に取られる手法が「シナリオ」アプローチである。シナリオを通じて将来を予言するのではなく、将来を経験することが重要で、シナリオは意思決定の判断材料を提供してくれる。
 - 気候変動対策におけるシナリオでは、将来の温室効果ガス排出量に影響を及ぼす技術進歩や人口、消費行動、気候変動政策（緩和策や適応策）などについて、様々な条件を想定し、「モデル（数理モデル）」を用いて得られた統合的な結果が活用されている。
 - ✓ フォアキャスト：現状からの積み上げで将来像を描く。
 - ✓ バックキャスト：将来の目標を設定し、そこに至る道筋を描く。
- ※ 脱炭素社会の実現に向けた将来シナリオはバックキャスト型。

脱炭素社会に向けたシナリオ研究の取り組み状況、シナリオ研究における課題

- 国立環境研究所を含めて様々な機関が、脱炭素社会の実現に向けたシナリオを定量化している。
- シナリオ研究における課題
 - ✓ シナリオを定量化するモデルの課題: モデルは社会全体の一部分だけを取り扱う
 - モデルがもつ不確実性: モデル比較による検討は必要
 - モデルの透明性: 考慮できていない点は何か?
 - ✓ 異なる前提条件(ただし、モデルによって前提として必要となる項目が異なる)
 - 社会経済の動向
 - 個別技術の利用可能性、費用
 - 消費行動等の前提
 - ※ 過去の単純な延長では、脱炭素社会は実現しない。
 - ✓ シナリオの見せ方
 - 将来の予言ではない
 - 対象によって意思決定の判断材料となるような提示が必要(叙述的、定量的、ダウンスケール、等)
 - シナリオが対象としている範囲を明確にする(考慮していないことを明らかにする)
 - ✓ シナリオを利用する側の課題
 - シナリオやモデルを正しく理解した上で利用することが重要

モデル研究者の視点から気候変動対策シナリオを議論

- 2021年に「日本を対象とした温室効果ガス排出量の定量シナリオを有効に活用するためのモデルのあり方検討会」を大学コアリション(大学の力を結集した、地域の脱炭素化加速のための基盤研究開発)において実施。

- ✓ モデルとは何か？

- 統合評価モデルの定義と役割
- 自然科学を対象としたモデルなど他分野におけるモデルと統合評価モデルとの違いは何か？

- ✓ シナリオとは何か？

- シナリオの定義と役割
- モデルとシナリオの関係

- ✓ 政策決定者をはじめとするステークホルダーとモデル研究者の関係は？

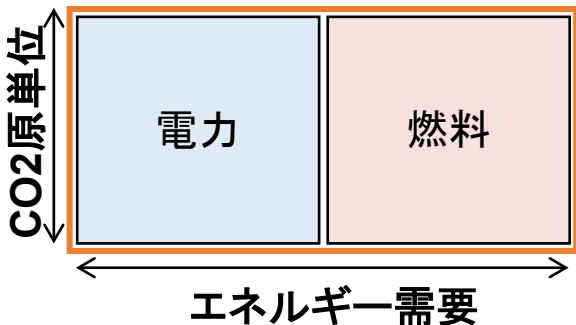
- モデルがブラックボックスという批判を避けるために必要こと
- ステークホルダーとの関係をどう構築していくか？
- ステークホルダーに求められるモデル・シナリオの理解

秋元 圭吾	地球環境産業技術研究機構
李 秀澈	名城大学
岩船 由美子	東京大学
歌川 学	産業技術総合研究所
江藤 諒	日本エネルギー経済研究所
大城 賢	京都大学
荻本 和彦	東京大学
小澤 暁人	産業技術総合研究所
落合 勝昭	日本経済研究センター
甲斐沼 美紀子	地球環境戦略研究機関
工藤 祐揮	産業技術総合研究所
黒沢 厚志	エネルギー総合工学研究所
小宮山 涼一	東京大学
杉山 昌広	東京大学
武田 史郎	京都産業大学
槌屋 治紀	システム技術研究所
日比野 剛	国立環境研究所
藤森 真一郎	京都大学
増井 利彦	国立環境研究所
松尾 雄司	立命館アジア太平洋大学
森 俊介	科学技術振興機構
和田 謙一	地球環境産業技術研究機構

脱炭素社会の実現に向けた対策の方向性

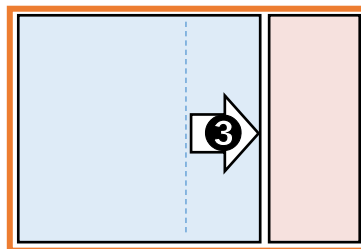
【削減対策とCO2排出量の関係】

現状のCO2排出量



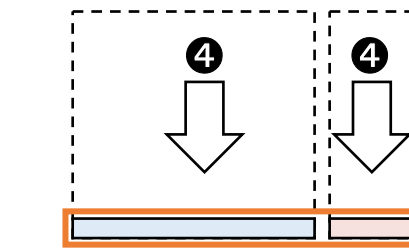
※1人々の効用等を維持または向上させつつ、エネルギー消費に繋がるような財やサービス需要を低減させること。

③ 電化 ※2

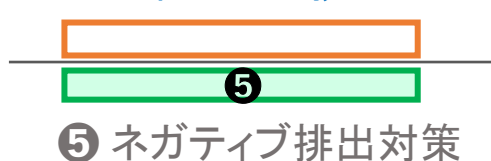


※2 内燃機関自動車から電気自動車、ボイラ・ストーブから電気ヒートポンプなどの電化はエネルギー効率改善の効果も持つ。

④ エネルギーの脱炭素化



2050年のCO2排出量



シナリオを踏まえ、今後重点的に研究開発を支援すべき 技術分野

技術分野

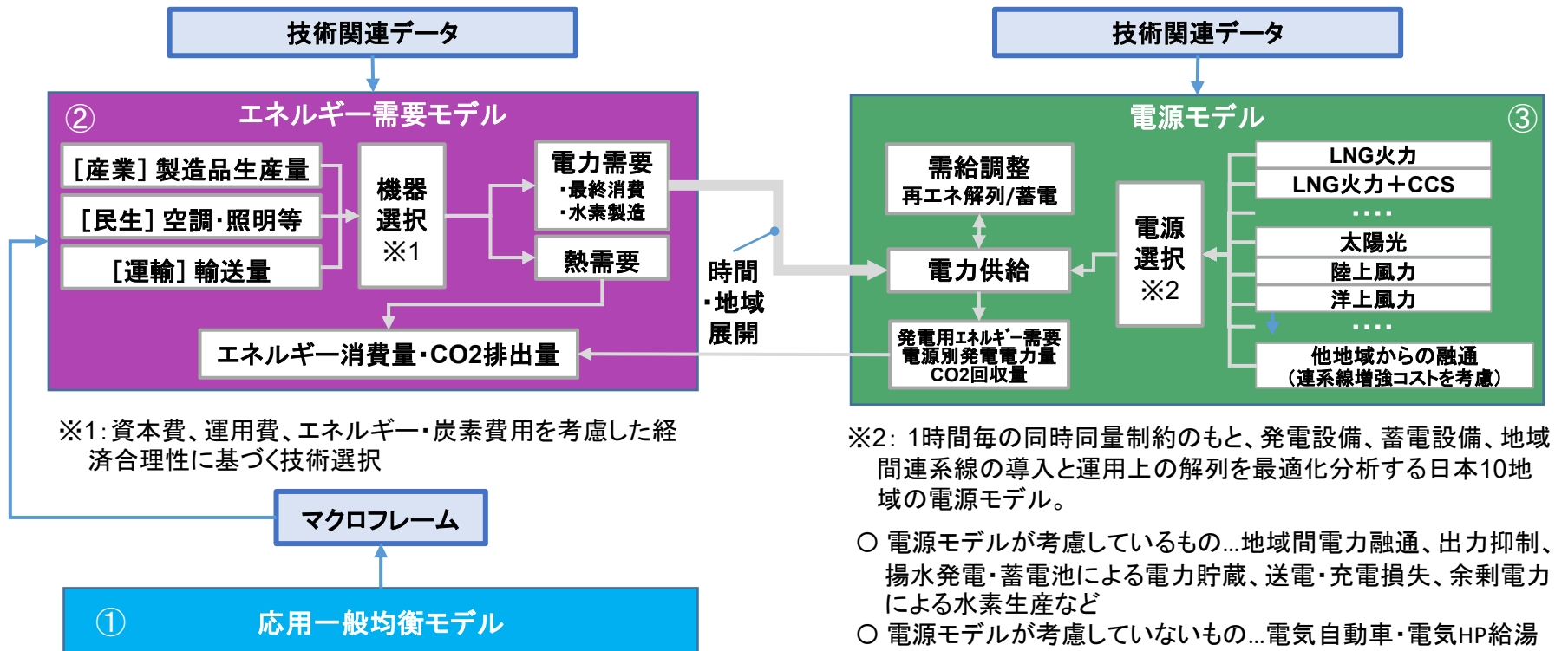
- エネルギー効率改善
- 電化
- エネルギーの脱炭素化
- ネガティブ排出対策

技術が存在するだけでは脱炭素社会は実現しない。社会変容を通じて脱炭素技術がいかに普及させるかも重要な課題

- 技術普及のための制度：長期を見据えた投資や脱炭素技術の普及を支援するような制度（カーボンプライシングを含む）
- エネルギーサービス需要低減：技術だけではなく、効用や豊かさを維持しつつ、無駄を省く

国立環境研究所の分析に用いたモデル群

- ・ 経済成長率や人口の想定を所与として、応用一般均衡モデルを用いて、将来におけるマクロフレームを設定(①)。続いて、エネルギー需要モデルにより、将来のエネルギー需要量を推計(②)。②で推計した年間電力需要量を1時間毎の地域別需要量に展開し、同時同量制約や地域間連系線制約を考慮できる費用最適化型電源モデルで発電設備構成及び供給構成を推計(③)。その結果をエネルギー需要モデルにフィードバックし、日本の全体のエネルギー需給量、CO2排出量を算定。



※2: 1時間毎の同時同量制約のもと、発電設備、蓄電設備、地域間連系線の導入と運用上の解列を最適化分析する日本10地域の電源モデル。

- 電源モデルが考慮しているもの...地域間電力融通、出力抑制、揚水発電・蓄電池による電力貯蔵、送電・充電損失、余剰電力による水素生産など
- 電源モデルが考慮していないもの...電気自動車・電気HP給湯機など蓄エネ設備やダイナミックプライシングを活用した需要サイドのエネルギー管理、域内の送配電網、慣性力確保など

日本においてNDCの延長で脱炭素社会は実現できるか？

分析に用いた3つのシナリオ

A「脱炭素技術進展シナリオ」(技術進展)

エネルギー効率改善、再生可能エネルギー技術について2030年まで計画通りに普及が進み、2030年以降もその速度で普及が進展。一方で、2030年以降に加速度的に大規模展開されることが期待される革新的脱炭素技術については、その展開が十分に進まない。

<GHGネットゼロシナリオ>

B「革新的技術普及シナリオ」(革新技術)

Aに対して、2030年以降に加速度的に大規模展開されることが期待される革新的な脱炭素技術の展開も十分に進展し、2050年GHG排出ネットゼロを実現するシナリオ。

C「社会変容シナリオ」(社会変容)

Bに加えて、デジタル化・循環経済の進展などの社会変容に伴って、人々の効用等を維持または向上させつつ財や輸送の需要が低減することを織り込んだシナリオ。

2050年GHG排出ネットゼロを実現。

2030年以降の大規模展開を想定した革新的な脱炭素技術

- ・ 新燃料(水素、合成燃料、アンモニア)・バイオ燃料の利用拡大
- ・ PV・洋上風力の更なる大量普及
- ・ 貨物自動車の電動化の進展
- ・ HP機器の更なる普及
- ・ 発電・産業におけるCCUS実装
- ・ ネガティブエミッション技術

想定した社会変容

- ・ マテリアルの効率的利用: シェアリング、長寿命化、循環利用、省資源設計など
- ・ 業務・通勤移動の低減: ICTによる移動需要の代替など
- ・ 貨物輸送の低減: マテリアルの効率的な利用による貨物輸送の低減など

2030年以降に加速度的な展開が求められる対策

		2030年※1	2030年以降※2
産業	鉄鋼・水素還元製鉄	(COURSE50 1基)	2040年代 実装
	セメント・CCUS	—	2030年代 実装
	化学・CO2原料化	—	2030年代 実装
運輸	貨物車(8トン以下)・電動車	新車 20~30%	2040年 電動車+脱炭素燃料 新車100%
	航空・持続可能な航空燃料(SAF)	(国内航空会社 SAF10%)	(国際航空分野CN)
	内航船舶・電気推進船等	—	2030年代 普及
	鉄道・燃料電池車両	—	2030年代 実装
新燃料	水素・アンモニア	計 300万トン (水素換算)	2050年 水素 2,000万トン アンモニア 3,000万トン
	合成メタン・既存インフラへの注入	1%	2050年 90%
再エネ	洋上風力	2030年 5.7GW 10GWの案件形成	2040年: 30~45GW案件形成
CCUS	地下貯留	—	2050年 1.2~2.4億トン(目安)

※1: 地球温暖化対策計画, 第6次エネルギー基本計画、SAF官民協議会

※2: GX実現に向けた基本方針, 「トランジション・ファイナンス」に関する技術ロードマップ

2050年ネットゼロ実現に向けた対策の柱

	家庭・業務	運輸	産業
① エネルギーサービス 需要低減	断熱強化、エネルギー管理	(エネルギー機器による) 移動・輸送需要の低減 ※1	財の需要低減 ※1 電炉利用拡大、クリンカ率 の低減
② エネルギー効率改善	家電機器、情報機器、業 務機器のエネルギー効率 改善	輸送機器のエネルギー効 率の改善	生産機器のエネルギー効率 の改善
③ 電化	空調、給湯、厨房の電化	自動車のBEV、FCV化 船舶、航空の電化	電炉利用拡大(再掲)、産業 用ヒートポンプ利用拡大
	電力	燃料	CCUS
④ エネルギーの 脱炭素化	再生可能エネルギー、原 子力、火力発電CCUS、ア ンモニア・水素発電、系統 対策(送配電強化、蓄電)	新燃料(水素、アンモニア、 合成燃料) バイオマス由来燃料	産業CCUS 火力発電CCUS BECCS
	土地	海洋	その他※2
⑤ ネガティブ排出対策 (NETs, CDR)	森林吸収源強化、農地土 壌吸収、BECCS(再掲)、 バイオ炭等	ブルーカーボン	コンクリートCO2吸収

※1: 詳細は「社会変容シナリオ」における財や運輸サービスの低減に関する想定 参照

※2: 本分析ではDACCS(大気中からのCO2を強制的に除去する技術)は含めていない。

「社会変容シナリオ」における 財や運輸サービスの低減に関する想定

部門	対象	対策	低減率	出典等
産業	鉄鋼	寿命延長、最適構造等	17%	・ IEA(2020)によると物質効率改善対策(寿命延長、構造最適化、再利用など)によって、2070年には29%の鉄鋼の需要が低減。これを参考に2050年に17%低減と想定。
	セメント	寿命延長、最適構造等	16%	・ IEA(2020)によると物質効率改善対策(寿命延長、構造最適化、再利用など)によって、2070年には26%のセメントの需要が低減。これを参考に2050年に16%低減と想定。
	紙	DX進展	30%	・ 国内紙・板紙生産量のうち、印刷用途は4割程度。DX進展によりこれらの需要が大幅に低減と想定。
	有機化学	循環利用、脱物質化	15%	・ IEA(2020)によると物質効率改善対策(リサイクル、再利用など)によって、2070年までに25%の一次化学物質の需要が低減。これを参考に2050年に15%低減と想定。
	自動車	カーシェア	15%	・ 国内販売台数の8割が乗用車。年間走行距離が4,000km未満の世帯が22%、4,000～8,000kmが26%(2020年度、環境省)。前者のほぼ80%、後者の50%がカーシェアに移行(1台を平均2～3世帯利用相当)と想定。
	衣類	退蔵衣類の活用、長期使用	10%	・ 国内衣類の新規供給量82万トン、廃棄量51万トン、リユース量15万トン、家庭における未着用衣類 139万トン(環境省・日本総研(2022))。左記対策により新規供給量の2050年1割程度の低減を想定。
	食料品、農水産品	食ロス低減	5%	・ 2019年度 食品ロス570万t(A)、摂取量5,658万t(B), $A/(A+B)=9\%$ (農林水産省統計値より引用・推計)。これを最大ポテンシャルとし、その半分程度の達成を想定。
運輸	旅客輸送	DX進展	20%	・ 通勤による移動の3割程度の低減、かつ、私事による移動の2割程度の低減された場合に相当。
		公共交通機関	2%	・ 2050年 自家用交通から乗換量 206億人km(温対計画 2030年目標の2倍, 自動車貨物輸送の1割程度相当)。
	貨物輸送	脱物質化	7%	・ 上記脱物質化対策による輸送量低減効果。財別輸送量データから推計。
モーダルシフト		10%	・ 2050年 鉄道へのモーダルシフト 119億トンkm, 船舶へのモーダルシフト 160億トンkmを想定(温対計画 2030年目標の2倍, 自動車貨物輸送の1割程度相当)。	

(出所) IEA (2020) Energy Technology Perspective 2020

環境省・日本総研 (2022) 環境省 令和2年度 ファッションと環境に関する調査業務

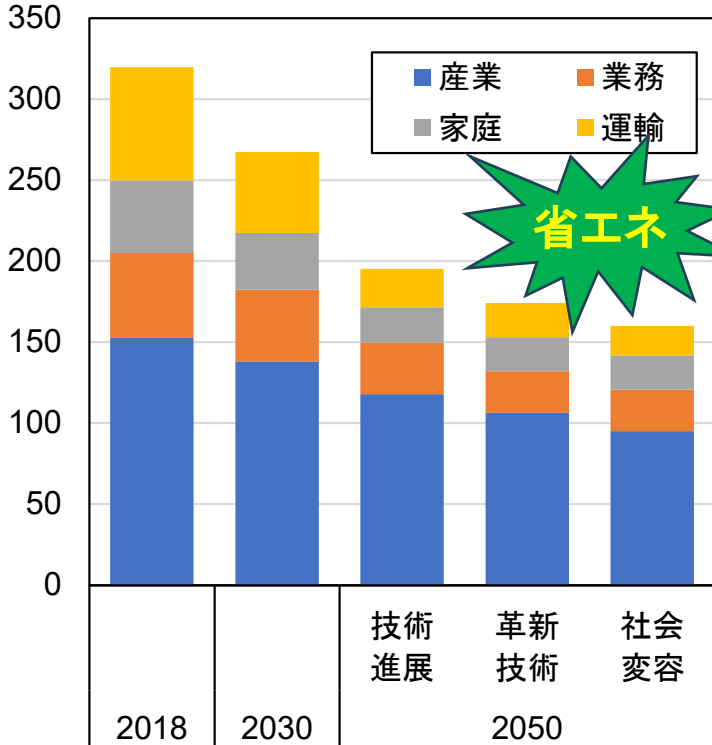
活動量の想定

	項目	単位	2018	2030	2040	2050
家庭部門	世帯数	千世帯	54,801	55,064	52,256	49,743
業務部門	業務延床面積	百万m2	1,903	1,965	1,881	1,757
産業部門	鉄鋼	粗鋼生産量(百万トン)	102.9	90.0	84.0	78.0
	セメント	セメント生産量(百万トン)	60.2	56.0	53.2	54.9
	有機化学	エチレン生産量(百万トン)	6.2	5.7	5.3	4.7
	紙パルプ	紙板紙生産量(百万トン)	26.0	22.0	20.6	19.8
	生活関連財	生産指数('18=1.00)	1.00	1.08	1.06	0.94
	機械	生産指数('18=1.00)	1.00	1.17	1.18	1.33
	その他製造業	生産指数('18=1.00)	1.00	1.00	0.99	0.99
輸送部門	旅客輸送量	10億人km	1,459	1,375	1,280	1,176
	貨物輸送量	10億トンkm	411	423	406	399

エネルギー消費量：省エネ、電化、燃料転換など、化石燃料を使わないように

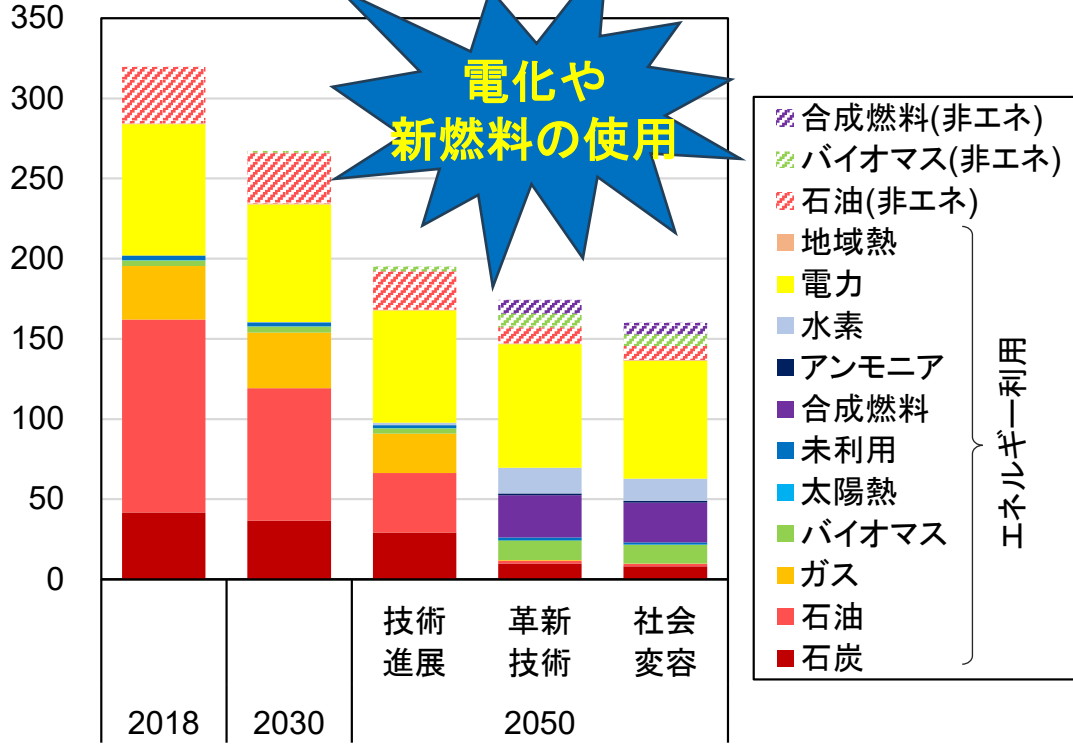
- 2050年の最終エネルギー消費は、2018年と比較して産業では4割弱の減少にとどまるが、**運輸は7割以上の減少**となる。**民生(業務・家庭)はともに5割以上の減少**となる。
- 2050年のエネルギー種構成については、脱炭素社会では、電化率の増加、合成燃料や水素の利用拡大によって化石燃料の消費は一部の用途に限られる。**社会変容が実現する社会で使用されるエネルギー消費量は、革新技術だけの場合と比較して少なくて済む。**

石油換算100万トン



【部門別最終エネルギー消費量】

石油換算100万トン

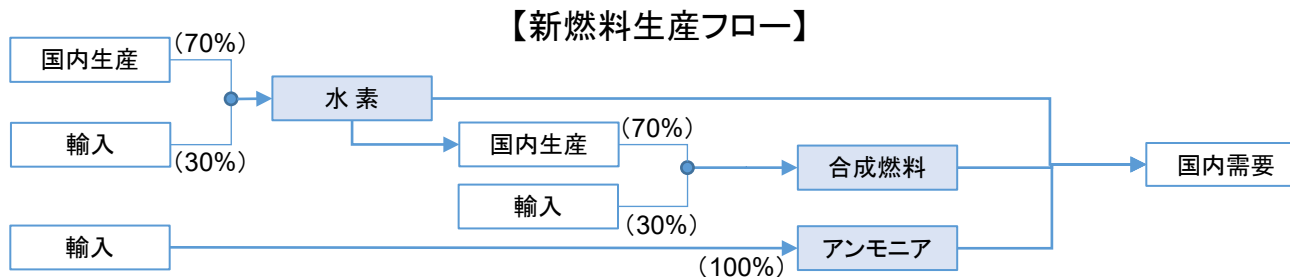


【エネルギー種別最終エネルギー消費量】

世界経済フォーラム

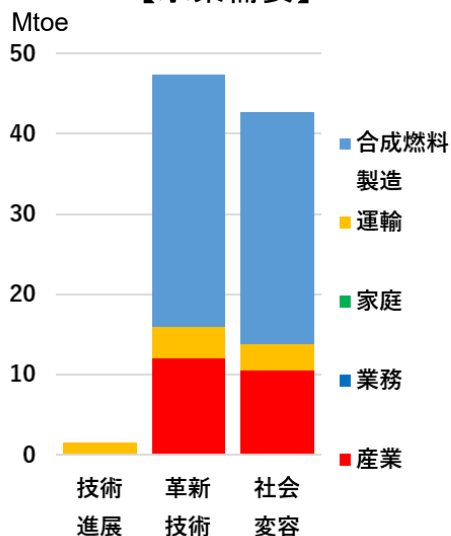
新燃料の国内生産比率の想定と需要量の結果

- ・ 2030年以降、CNに向けて新燃料の需要が増加。主な需要先は以下の通り。
 - 水素：産業部門 製鉄及び高温熱、運輸部門 FCV、合成燃料製造用
 - 合成燃料：産業部門 高温熱、家庭部門 都市ガス、運輸部門 貨物自動車・船舶・航空
 - アンモニア：運輸部門 船舶、火力発電用燃料

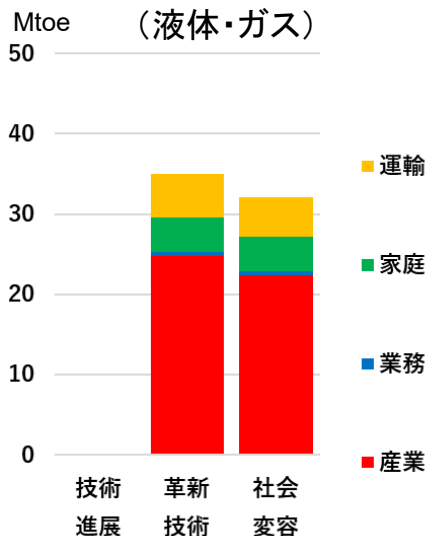


()内の数字は本分析における新燃料の輸入率依存率の想定。また、本分析では海外における新燃料生産はカーボンニュートラルな方法が採用されていること、また、海外で生産される合成燃料の炭素分は化石燃料起源ではないことを前提とし、その日本国内での消費に伴うCO2排出量はゼロとする。

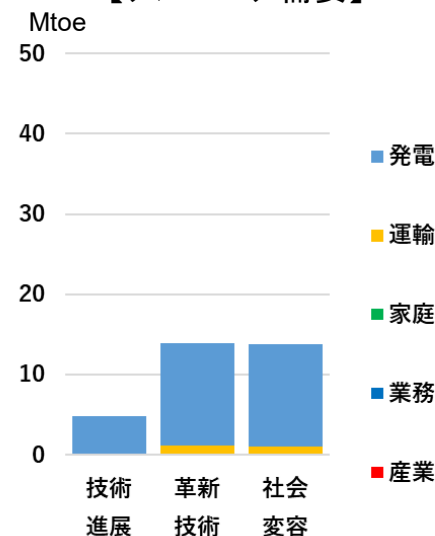
【水素需要】



【合成燃料需要】
(液体・ガス)

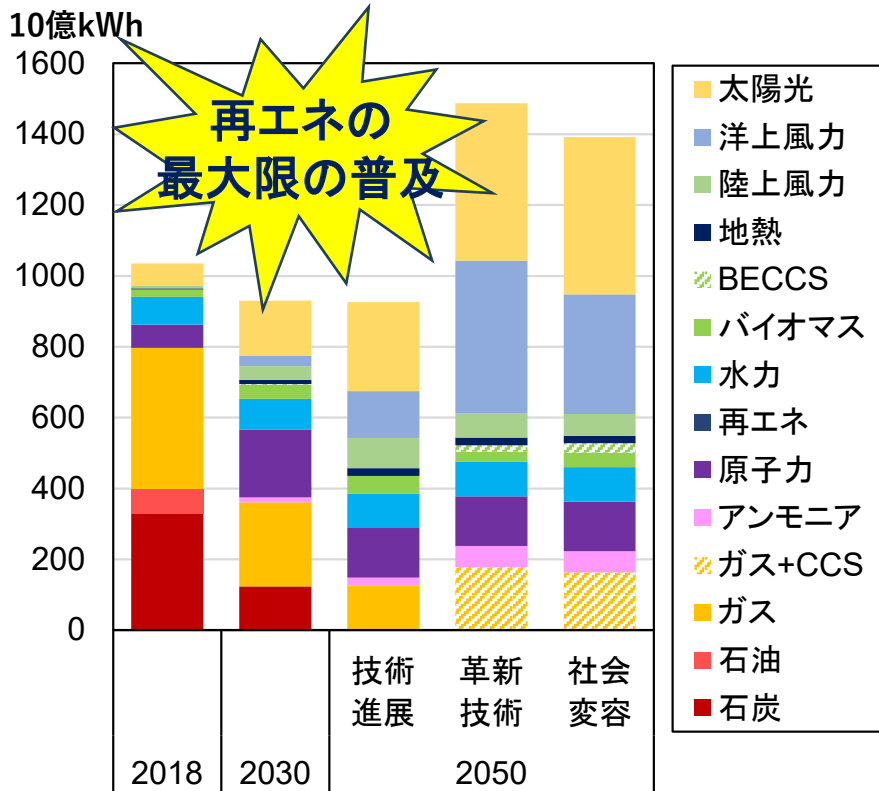


【アンモニア需要】

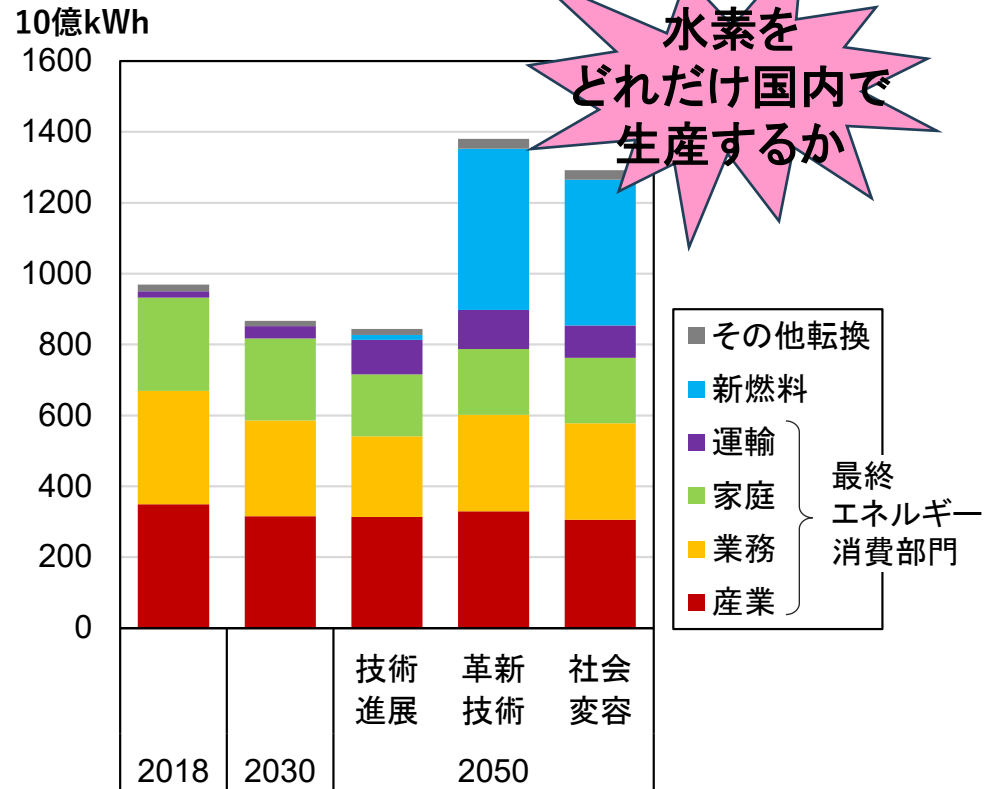


電力需要量と電源別発電電力量 再生可能エネルギーをどれだけ増やせるか？

- 2050年脱炭素社会の**発電部門における再エネの比率は70%以上**となり、その多くを太陽光と洋上風力が占める。
- 最終エネルギー消費部門の電力需要は、電化の拡大でも省エネにより2030年以降はほぼ横ばい。GHG排出実質ゼロを実現する社会では、**新燃料(水素など)生産用の電力需要の増加に伴い**、2050年の電力需要全体が4割程度増加する見込み。



【電源別発電電力量】

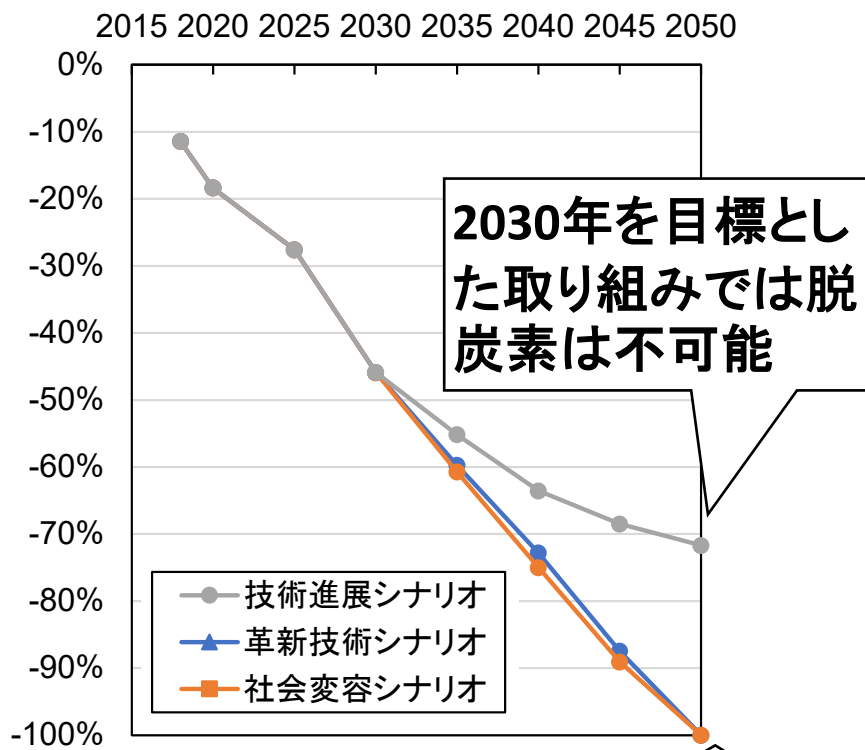


【部門別電力需要量】

温室効果ガス排出量

CO2をできるだけ減らすとともに吸収する取り組みも必要

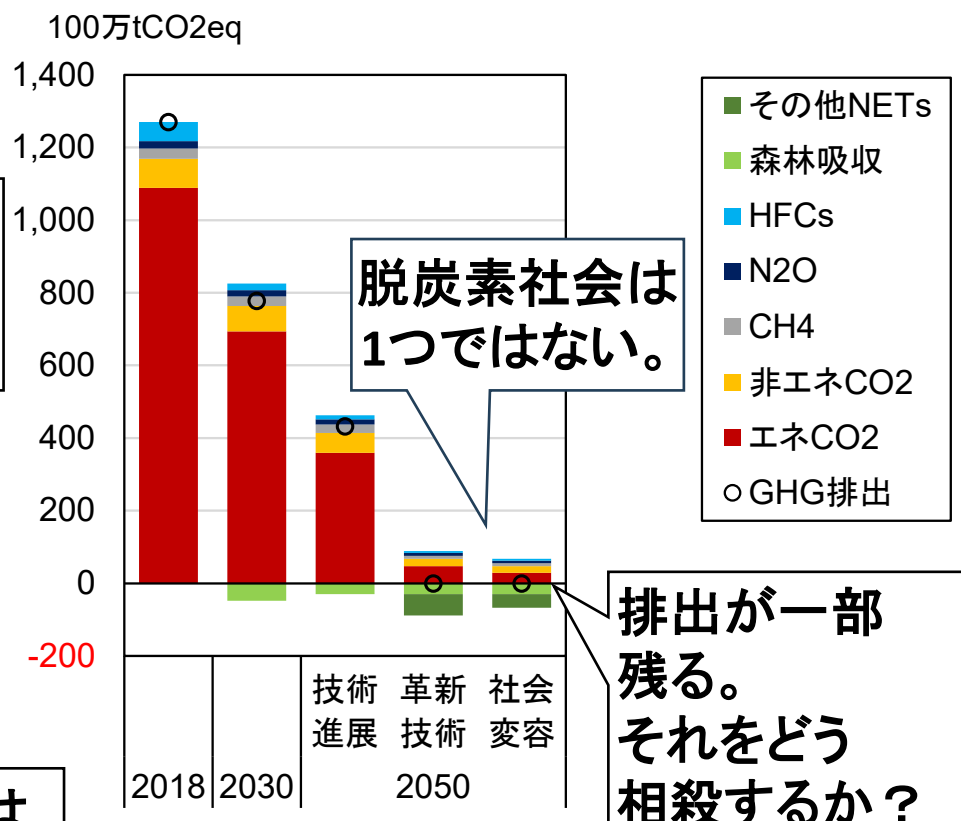
- 2030年の目標であるNDCの延長(技術進展シナリオ)では、2050年脱炭素社会は実現できない。
- 脱炭素社会でも化石燃料由来の炭素を含む合成燃料の消費もあり、全体としてCO₂排出量やエネルギー起源CO₂以外の排出量が残存するが、森林吸収などのネガティブ排出対策によって相殺され、GHG排出が実質ゼロとなっている。



2030年を目標とした取り組みでは脱炭素は不可能

【温室効果ガス削減率の推移】

実質ゼロは実現可能



脱炭素社会は1つではない。

排出が一部残る。それをどう相殺するか？

【GHG排出量】

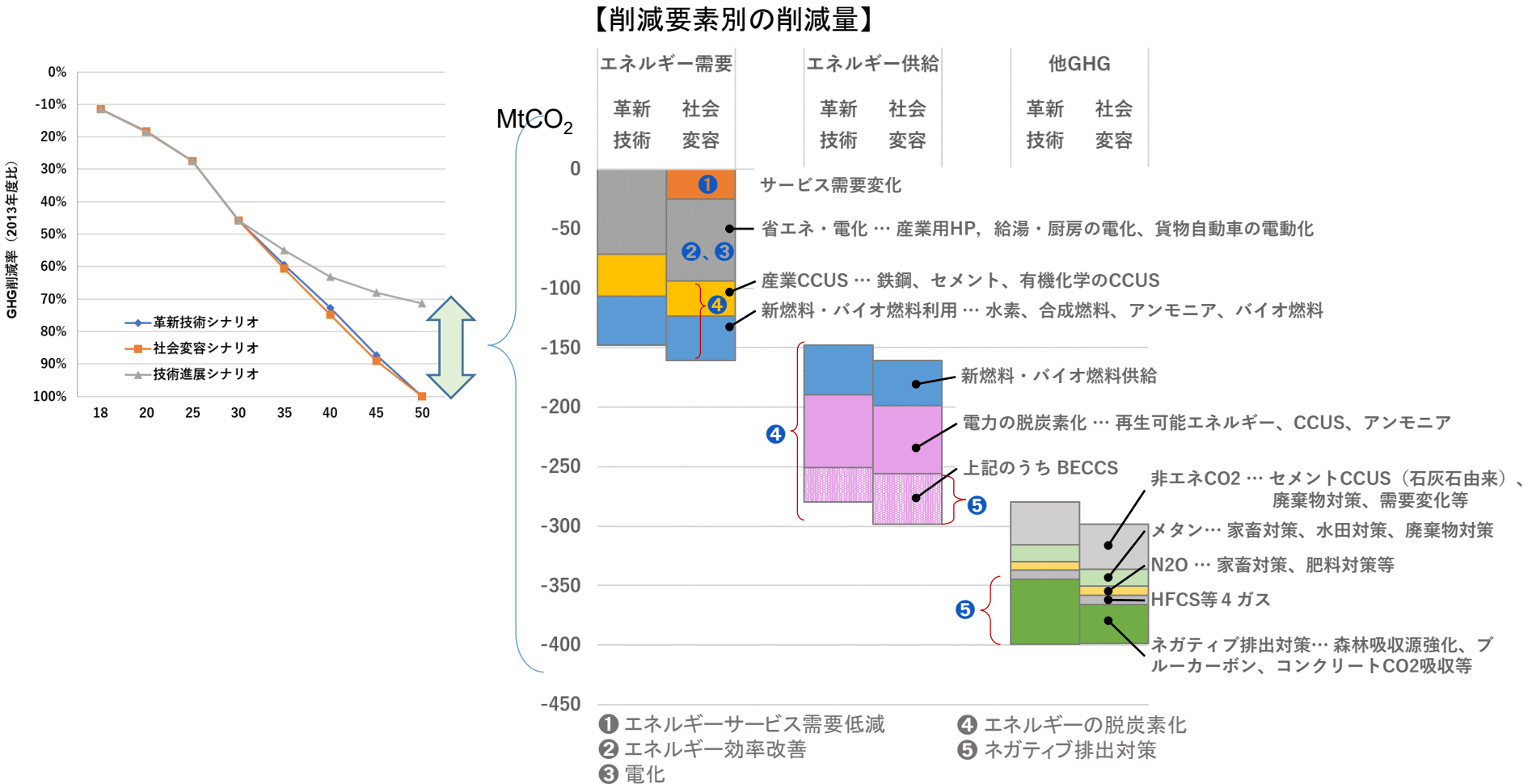
- その他NETs
- 森林吸収
- HFCs
- N₂O
- CH₄
- 非エネCO₂
- エネCO₂
- GHG排出

技術進展シナリオと革新技術・社会変容シナリオで 導入量の違いが生じる主な対策

部門・用途		2030年	2050年 技術進展	2050年 革新技術・社会変容	
産業	エネルギー多消費	水素還元製鉄	0%	50%	
		鉄鋼・セメントCCUS	0%	100%	
民生	給湯・厨房	電気HP給湯機(家庭)	38%	75%	80%
運輸	貨物自動車	BEV・FCV	6%	41%	76～78%
バイオマス			19Mtoe	23Mtoe	38～44Mtoe
新燃料		水素需要	0	1Mtoe	43～47Mtoe
再エネ	太陽光発電		111百万kW	202百万kW	357百万kW
	洋上風力		6百万kW	45百万kW	115～147 百万kW
CCUS	地下貯留		0	0	99～104 百万tCO2

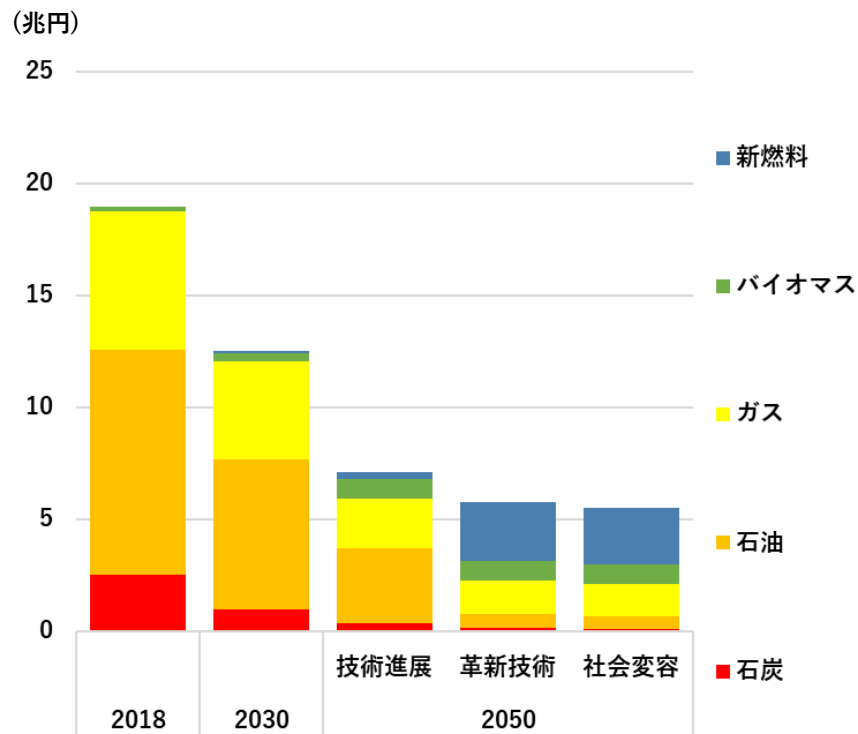
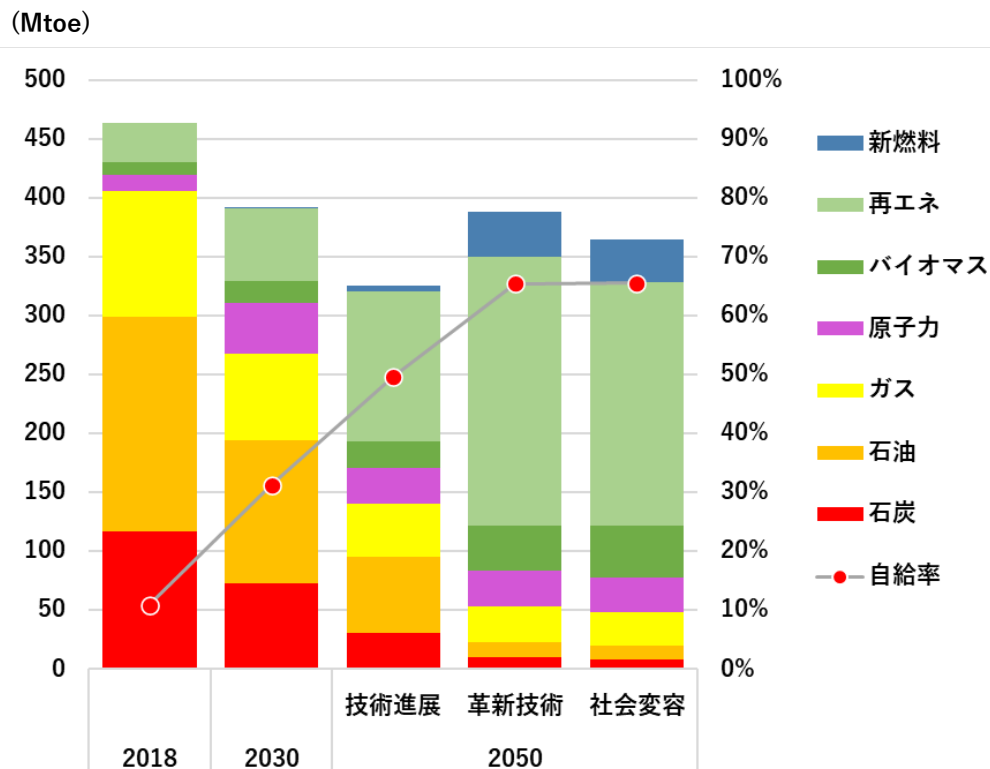
GHG削減量(シナリオ間比較)

- 革新技術・社会変容シナリオでは前述の削減の5つの柱による削減を更に顕在化させ、ネットゼロを実現。エネルギー需要側で148~161MtCO₂、エネルギー供給側で131~137MtCO₂、エネルギー起源CO₂以外で100~120 MtCO₂。特にエネルギーの脱炭素化(④)による削減量が大きな量を占める。



一次エネルギー国内供給とエネルギー輸入額

- 一次エネルギー国内供給は、現状は化石燃料が8割以上を占めるが、2050年には再生可能エネルギーが7割程度を占める。2018年11%のエネルギー自給率は2050年の革新技術・社会変容シナリオでは66%となり、大幅に改善。
- 2018年のエネルギー純輸入額は19兆円程度であるが、化石燃料に対する依存の低下によって輸入額は2050年には約10兆円以上低下する。
- 技術進展シナリオと革新技術・社会変容シナリオを比較すると、更なるCO2の削減は自給率の向上につながる。一方で、輸入額については、新燃料を一定程度輸入に依存することもあって両者に大きな差はない。



日本におけるGHGネットゼロに向けて (1)

2030年以降における革新的技術の社会実装

○ 2030年以降に加速度的な普及が期待される脱炭素技術について、その社会実装が十分に進まなかった場合には、GHGネットゼロの達成は難しくなる。

GHGネットゼロの実現に向けては、既に普及段階にある対策技術を着実に普及させていくとともに、以下に示すような革新的な対策技術を2030年以降、大規模展開させてしていくための後押しが今から必要である。

- 1) 需要側：
 - ① 社会変容（脱物質・輸送低減）
 - ② 素材生産の革新的技術
 - ③ 電化技術（産業用HP、電動貨物自動車）
 - ④ エネルギーの脱炭素化（CCUS、新燃料・バイオ燃料利用）
- 2) 供給側：
 - ① 新燃料供給
 - ② 再生可能エネルギー発電
- 3) 非エネルギー
 - ① セメント石灰石由来CO₂のCCUS
 - ② メタン・N₂O・HFCs等4ガス対策
 - ③ 森林吸収強化等

○ エネルギー由来のCO₂削減に向けて、上記対策を後押しを進めていくために投資が必要となるが、特に再生可能エネルギー発電、CCUS、新燃料の普及に対する投資額を増加させる必要がある。ネットゼロに向けた投資によって、エネルギー自給率は大幅に向上し、また、輸入額も現状よりも年間10兆円以上低減される見込みである。

日本におけるGHGネットゼロに向けて (2)

社会変容を通じた脱炭素社会の実現性の向上

- 一方で、デジタル化・循環経済の進展を前提とした社会変容は、エネルギーシステムに対する投資額を低減させる効果を有するために、脱炭素の推進に向けて合わせて実施すべき対策となろう。さらに、技術的・社会的な制約・不確実性が高い、新燃料、変動性の高い電力、ネガティブ排出対策などに対する依存を低減することにつながり、脱炭素社会の実現性を高めることに繋がる。

革新技术シナリオと社会変容シナリオとの比較

・ 投資額の低減(30年間の総投資額)	303兆円	→ 255兆円
・ 新燃料需要量の低減(水素需要量)	47 Mtoe	→ 43Mtoe
・ 発電電力量の低減(PV・風力発電量)	943億kWh	→ 843億kWh
・ ネガティブ排出に対する依存の低減	84MtCO ₂	→ 77MtCO ₂

- GHGネットゼロの実現には、革新的技術の社会実装と、(人々の効用等を維持または向上させつつ)エネルギー需要を低減させるような方向への需要側対策への社会変容を両輪して推進していくことの重要性が示された。

一方で、将来の技術開発や社会動向は不確実性が高いため、今後更に様々な可能性を視野に入れて検討を行う必要がある。

- ・ 経時的及び詳細セグメント毎の緩和策の障壁・導入可能性
- ・ 新燃料、バイオ燃料、CO₂貯留に関する海外依存に関する複数シナリオ
- ・ 再生可能エネルギー発電の導入可能量とその影響に関する複数シナリオ
- ・ 更なる社会変容の可能性

国(文部科学省)として充実させるべき施策

- 日本を対象とした脱炭素シナリオに対して、対策を実施する主体は自治体や企業、国民
 - ✓ 日本の脱炭素シナリオで示された内容を、関係するステークホルダーが必要とする情報や内容に転換することが必要。
 - 地域へのブレークダウン: 地域によって取り得る対策は異なる。各地域の大学等と連携して、国全体の脱炭素シナリオと整合した取組を検討する。
 - 国民や企業が脱炭素社会の実現に向けた取組が実行できるような内容に、叙述をわかりやすく充実させる。
- 革新的な技術の動向の把握
 - ✓ シナリオに盛り込むことが可能な新たな技術についての調査。
- (文部科学省が適任かは議論の余地はあるが) 日本の標準的なシナリオを検討する場が必要。
 - ✓ 2008年には内閣官房が中長期目標検討委員会を立ち上げ、モデルを扱う複数機関からなるチームが委員会に対して2020年の排出削減目標を決定するために必要な情報を提供。
 - ✓ 今求められているのは、脱炭素社会の実現に向けた道筋ではあるが、議論の共通の土台としてのシナリオは必要。

理想とするモデルとステークホルダーの関係

