

日本のエネルギーのカーボンニュートラル化に向けた論点

大槻貴司

横浜国立大学 / 一般財団法人日本エネルギー経済研究所

2024年10月28日 東京大学「カーボンニュートラル移行の加速に向けた統合知に基づく社会シナリオ」セミナーシリーズ

謝辞 本講演資料の一部はJST低炭素社会実現のための社会シナリオ研究事業JPMJCN2302およびJSPS科研費JP23K13696を受けて実施されました。なお、本講演の内容は大槻個人の見解です



所属

本務 | 横浜国立大学

兼務 | 日本エネルギー経済研究所

専門

エネルギーシステム工学・エネルギー経済・数理計画法を用いたエネルギーシステム分析

研究対象

最適なエネルギーミックスや気候変動緩和策の経済性

重要鉱物の観点から実現可能なエネルギーシステム

エネルギー安全保障を考慮したCO₂削減戦略

再生可能エネルギーの資源量

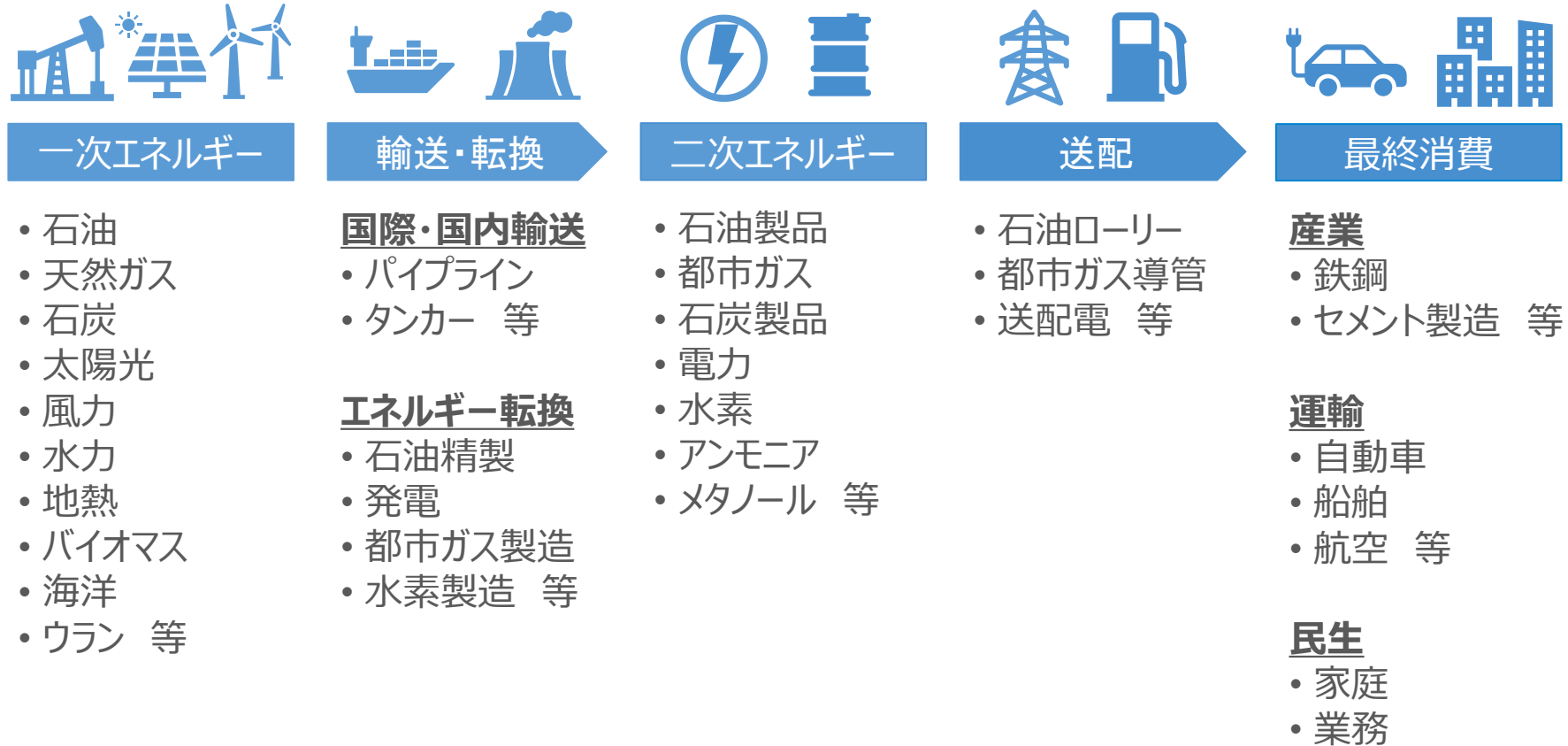
- 1 発電において「特効薬」的なCO₂削減技術は存在していない。
再エネに加えて、既設原子力発電所の活用やCO₂回収・貯留（CCS）、水素キャリアも重要である
- 2 熱・燃料の需要へのCO₂対策—特に、電化のポテンシャル—に関する精査が必要ではないか
- 3 グリーン水素キャリアの低コスト化に向けては、技術開発と共に、国内外の再エネ適地の確保が重要

目次

1. エネルギーシステム分析について
2. 電力のカーボンニュートラル化に向けた研究事例
3. 需要の電化ポテンシャルや水素の経済性に関する研究事例
4. おわりに

エネルギーシステムとは？

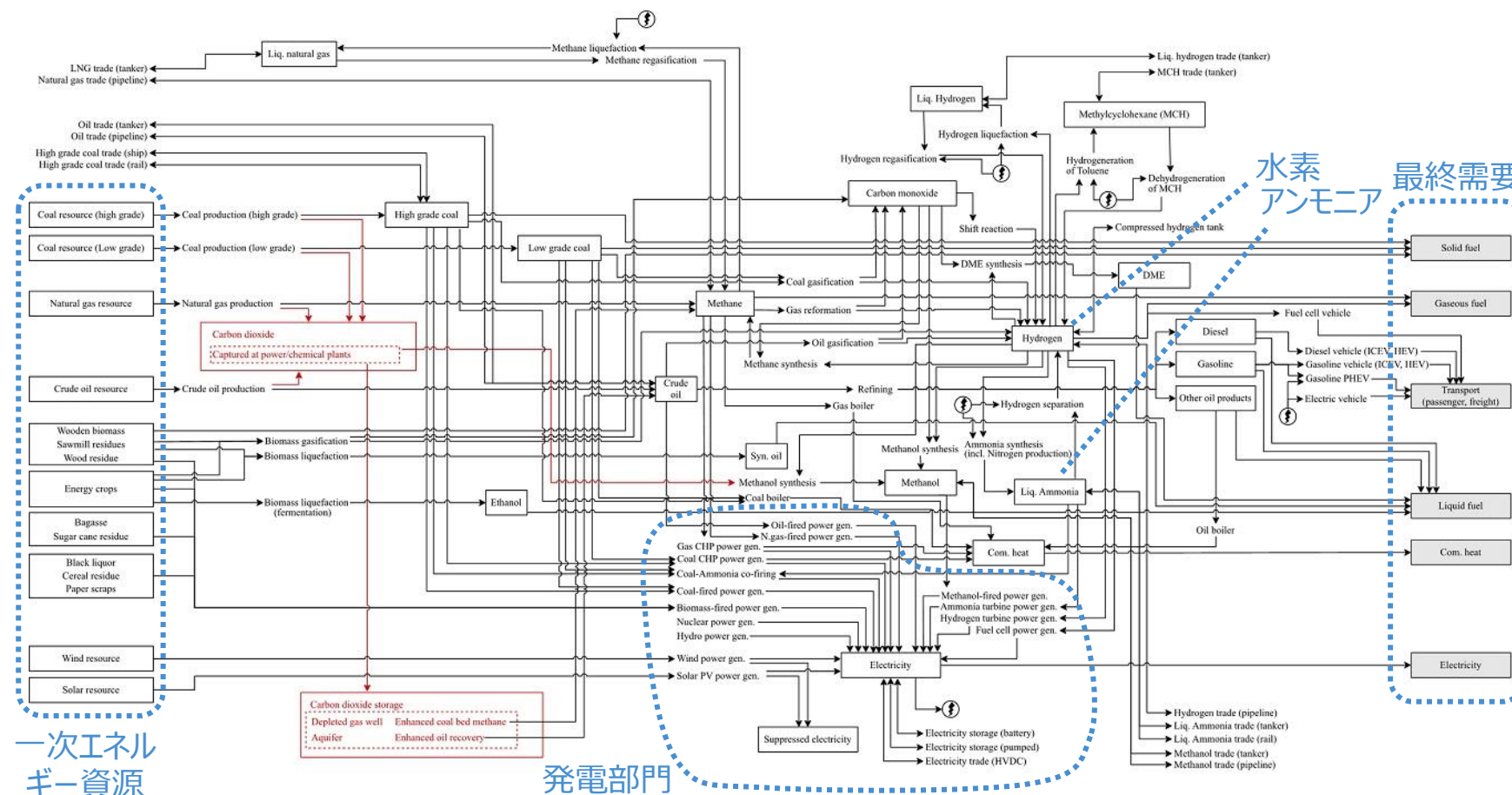
エネルギーの生産から輸送、転換、消費にわたる物流の体系のこと



エネルギーシステムモデルとは？

- ・ エネルギーシステムの構成要素の連関を数式で表現したコンピュータプログラムのこと
- ・ 入力条件（エネルギー需要や資源量、エネルギー価格などの想定）に応じた将来のエネルギーミックスや技術選択を計算できる

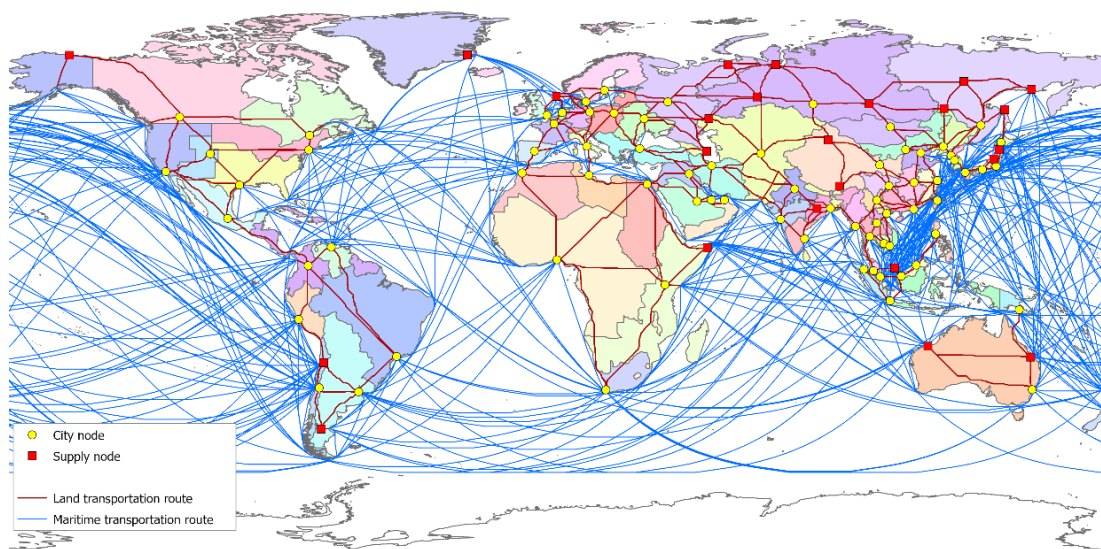
エネルギーシステムモデルの構成要素の例



- ・ エネルギーシステムを費用最小化問題として定式化したもの
- ・ CO₂排出量上限や1時間レベルの電力需給バランスなどの各種制約条件の下で、経済合理的なエネルギー需給を計算する

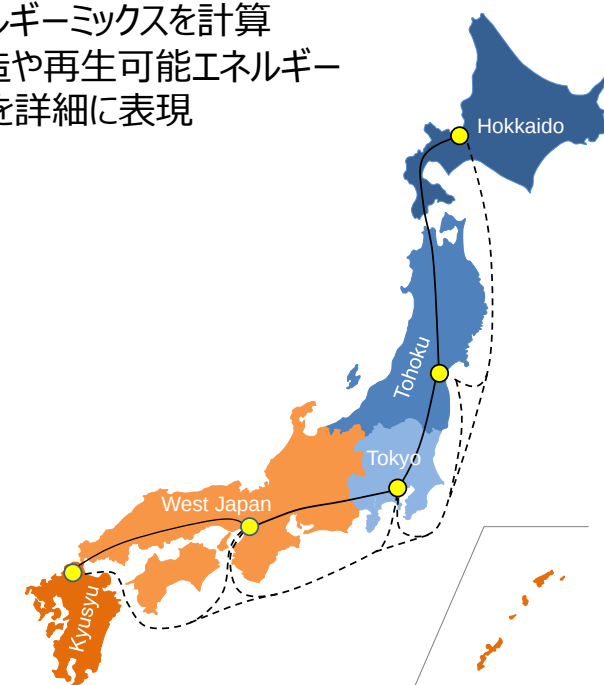
世界モデル NE_Global

- ・ 2050年までの世界100地域のエネルギーミックス・貿易を計算
- ・ 電力は1時間刻みで需給計算。太陽光・風力発電の出力特性を考慮



日本モデル NE_Japan

- ・ 2075年までの日本のエネルギーミックスを計算
- ・ 日本のエネルギー需給構造や再生可能エネルギーの地理的・時間的な特性を詳細に表現



査読付き論文

1. 香山治彦, 近藤茂貴, 松本茂, 崎元謙一, 尾羽秀晃, 大槻貴司, 高本学, 2050年カーボンニュートラルの実現に向けた電力システムに関する考察, 電気学会論文誌B（電力・エネルギー部門誌）, 144(9), pp.503-511, (2024)
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)
3. Takashi Otsuki, Yoshiaki Shibata, Yuhji Matsuo, Hideaki Obane, Soichi Morimoto, Role of carbon dioxide capture and storage in energy systems for net-zero emissions in Japan, International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 132, 104065, (2024)
4. 大槻貴司, 尾羽秀晃, 松尾雄司, 森本壮一, 日本の2050年カーボンニュートラルに向けたエネルギー構成：再生可能エネルギー100%の電力供給の限界費用分析, エネルギー・資源学会論文誌, 44(3), pp.115-125, (2023)
5. 大槻貴司, 尾羽秀晃, 川上恭章, 下郡けい, 水野有智, 森本壮一, 松尾雄司, 2050年CO2正味ゼロ排出に向けた日本のエネルギー構成：自然変動電源の立地制約を考慮した分析, 電気学会論文誌B（電力・エネルギー部門誌）, 142(7), pp.334-346, (2022)

審議会資料

1. 尾羽秀晃, 森本壮一, 柴田善朗, 大槻貴司：“地域条例・建物特性を考慮した太陽光発電の導入ポテンシャル評価”, 総合エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会／電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会（第67回）資料3（2024）
2. 大槻貴司, 柴田善朗：“合成メタン等の製造・供給費用試算”, 経済産業省資源エネルギー庁 第9回メタネーション推進官民協議会 資料3-4（2022）
3. 松尾雄司, 遠藤聖也, 尾羽秀晃, 森本壮一, 柳澤明, 大槻貴司：“2030年・2050年の脱炭素化に向けたモデル分析”, 経済産業省資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 第50回基本政策分科会 資料2（2022）
4. 松尾雄司, 大槻貴司, 尾羽秀晃, 川上恭章, 下郡けい, 水野有智, 森本壮一：“2050年カーボンニュートラルのモデル試算”, 経済産業省資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 第44回基本政策分科会 資料6（2021）

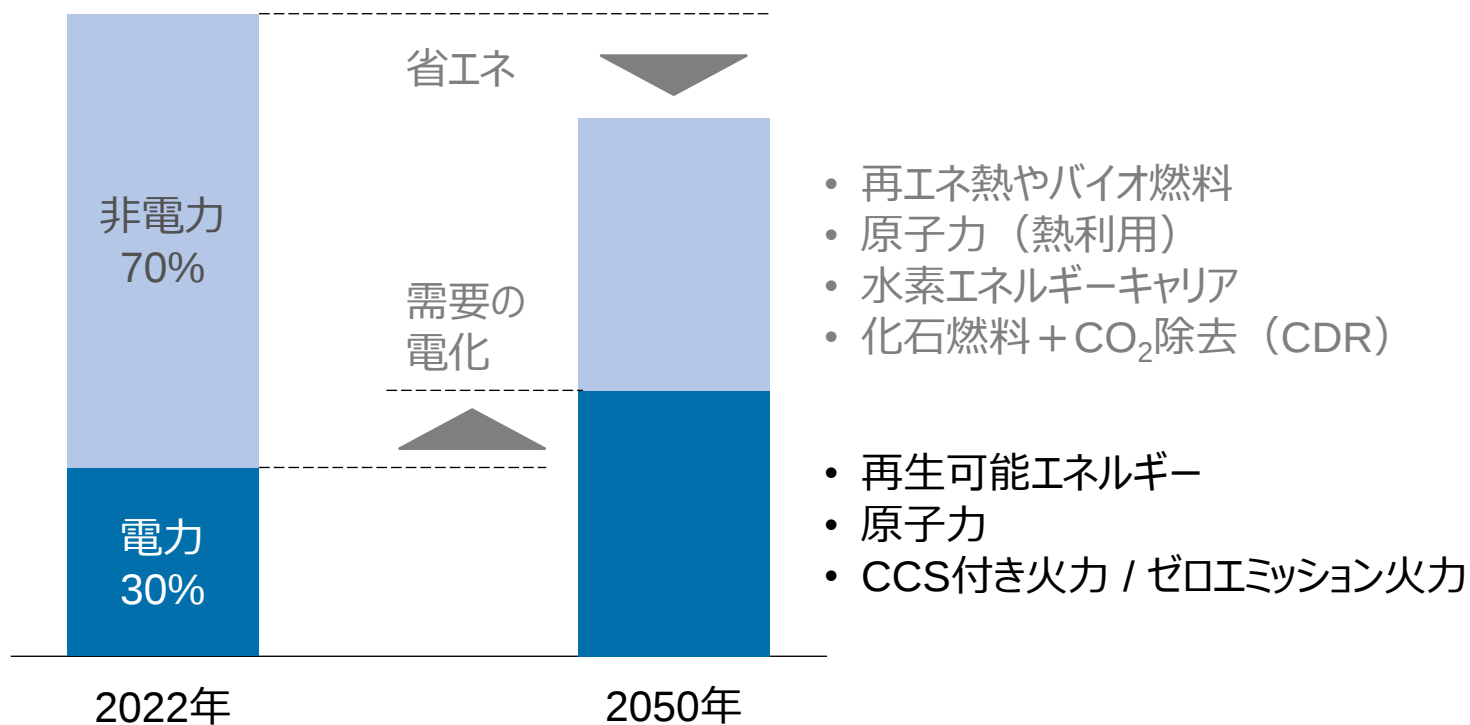
目次

1. エネルギーシステム分析について
2. 電力のカーボンニュートラル化に向けた研究事例
3. 需要の電化や水素の経済性に関する研究事例
4. おわりに

日本のエネルギー需給における電力の位置付け

- ・ 2022年の日本の最終エネルギー消費のうち、電力の比率は30%である
- ・ 2050年に向けては、省エネルギーに加えて、需要の電化と電源のカーボンニュートラル・ネガティブエミッション化が必要とされる

日本の最終エネルギー消費のイメージ



日本の電源選択はどうしていきべきか？

2050年カーボンニュートラルに向けたケース分析

- ・ 第43回～第44回基本政策分科会（2021年5月～6月）にて日本エネルギー経済研究所（IEEJ）を含む5団体がモデル分析を報告
- ・ IEEJは下記の6ケースを試算した。いずれのケースにおいても、エネルギー起源CO₂を2050年に正味ゼロとする制約を課している

ケース設定 – 2050年断面の想定

ケース名	CCS	原子力	火力発電	陸上風力	洋上風力	営農型太陽光
ベース	国内:1億tCO ₂ /年 国外:1.5億tCO ₂ /年	60年運転・ 建設中3基新設	最適化	森林設置なし (23.4GW)	領海内 (405.1GW)	なし
CCS拡大	国内:2億tCO ₂ /年 国外:3億tCO ₂ /年					
原子力拡大	国内:1億tCO ₂ /年 国外:1.5億tCO ₂ /年	ベースの2倍の 設備容量へ拡大	バイオマス火力・国内 再エネ水素火力のみ	森林設置あり (295.9GW)	領海・接続水域 (650.6GW)	あり (54.6GW)
RE100		廃止				
ベース*		60年運転・ 建設中3基新設	最適化			
RE100*		廃止	バイオマス火力・国内 再エネ水素火力のみ			

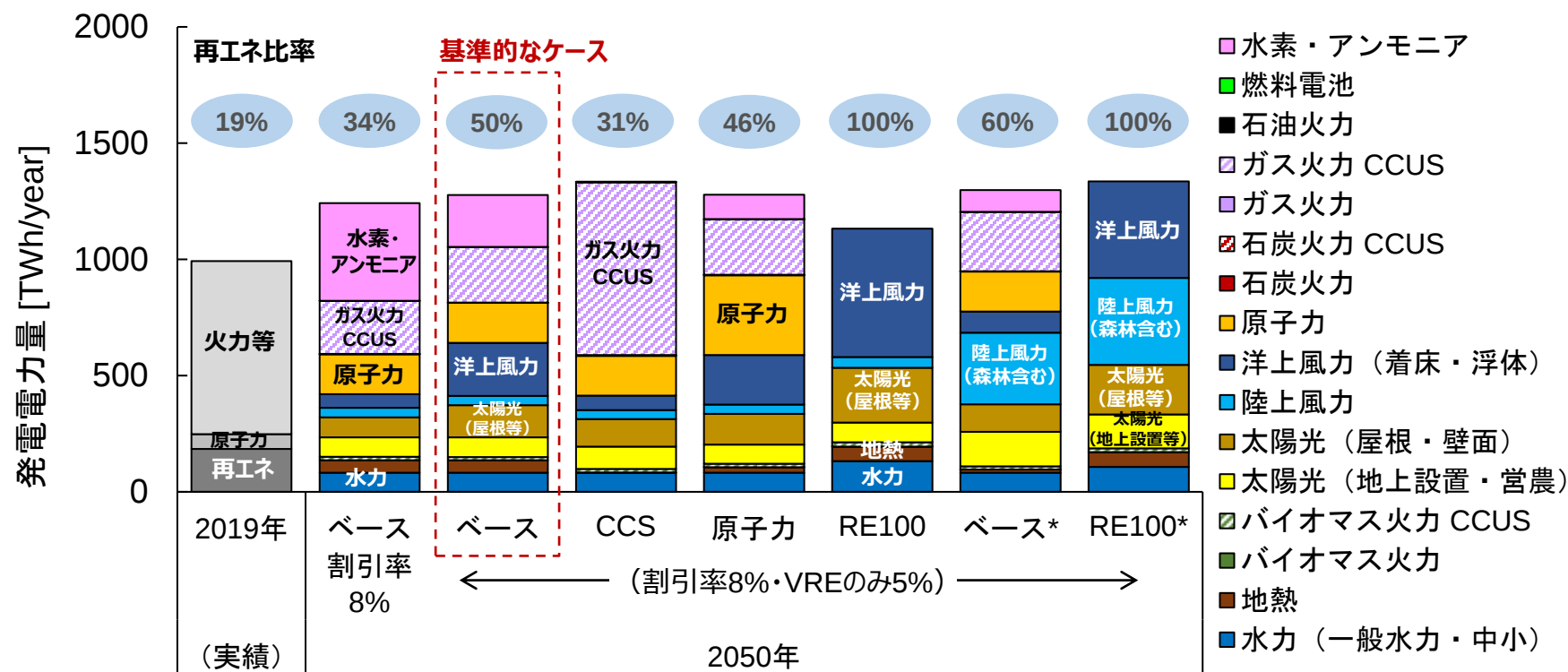
注：2021年当時の分析想定に基づく結果である点には注意されたい。

出典：松尾，大槻ら：“2050年カーボンニュートラルのモデル試算”，経済産業省資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 第44回基本政策分科会 資料6（2021年6月30日）

2050年の電源構成 — 現時点で特効薬的な技術は存在しない

- ・ ベースケースでは、再エネに加えて、原子力発電やCCS付き火力、水素・アンモニア火力などの様々な電源が活用されている
- ・ 各技術のコストや導入ポテンシャルには様々な不確実性がある。様々な対策を組み合わせる戦略が重要と考えられる

2050年の電源構成



注：2021年当時の分析想定に基づく結果である点には注意されたい。

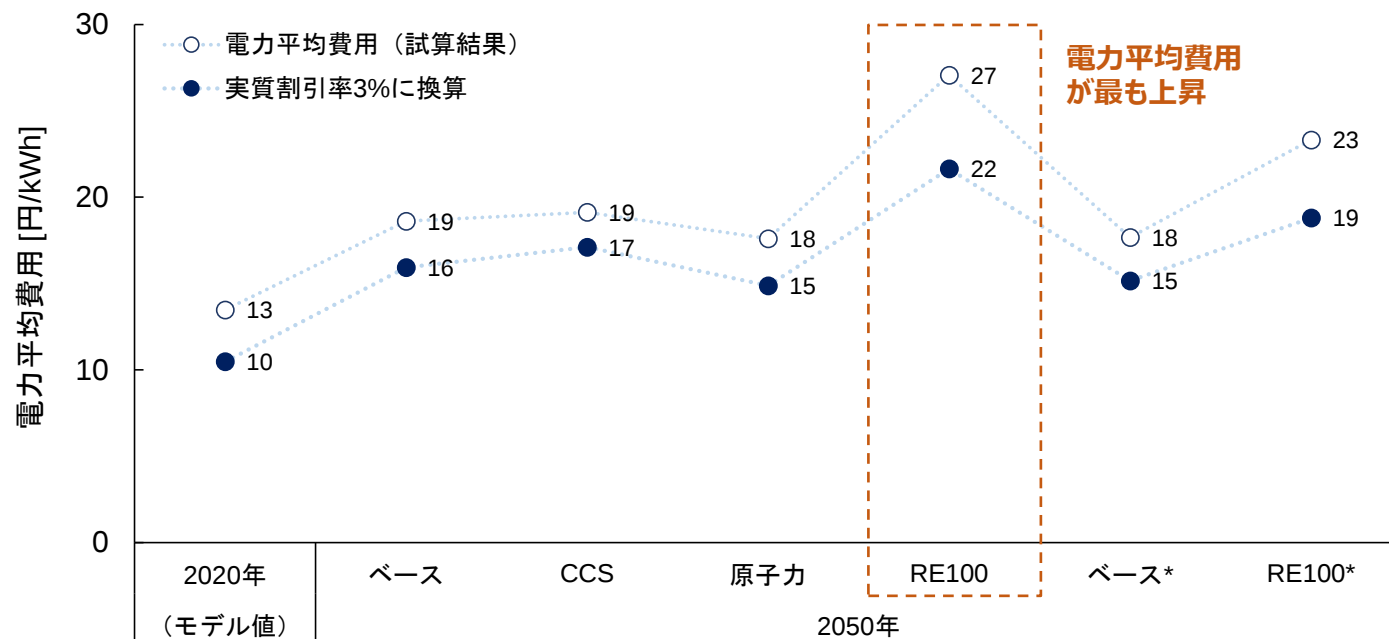
出典：松尾，大槻ら：“2050年カーボンニュートラルのモデル試算”，経済産業省資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 第44回基本政策分科会 資料6（2021年6月30日）

システム全体から見て最適な再エネ導入量を目指す必要がある

- 日本全体で再エネ電力100%を実現する場合には、比較的高価な再エネ技術種の導入が必要となり、加えて統合費用（例えば、季節性を均すための費用）も必要となるため、電力の平均費用・限界費用の両方で上昇する可能性がある
- 2021年分析時は再エネ比率5割程度が最適と評価。今後は、近年の再エネの技術進展および制約条件を加味した分析が重要

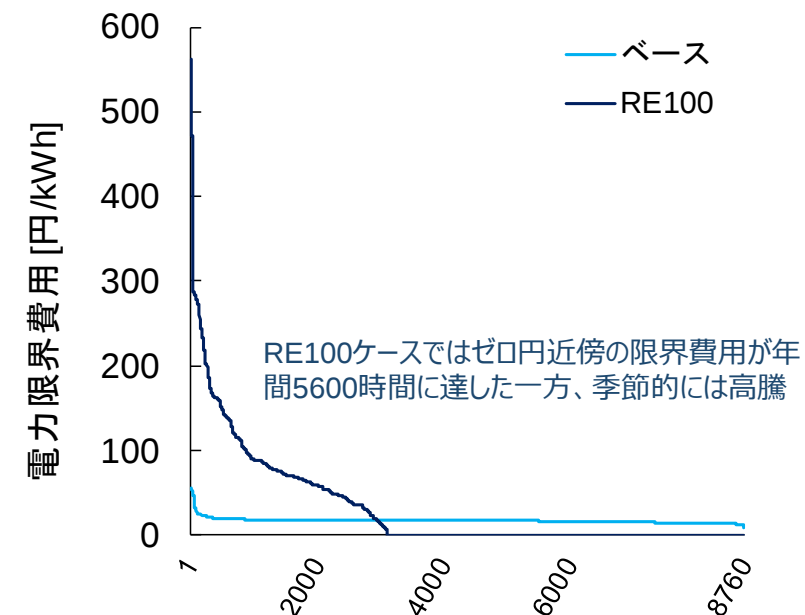
電力平均費用

発電に要した費用を総発電電力量で除したもの



2050年の1時間値電力限界費用の持続曲線

限界費用は1単位の電力を追加生産する際の費用

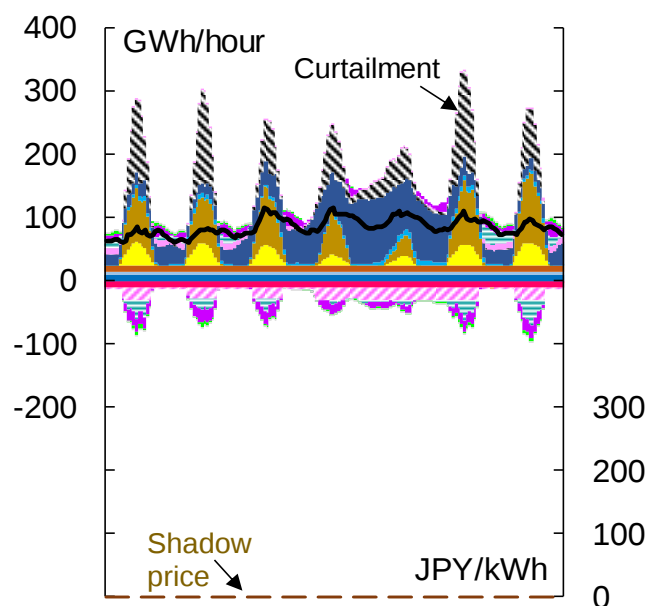


RE100ケースの1時間値電力需給バランス

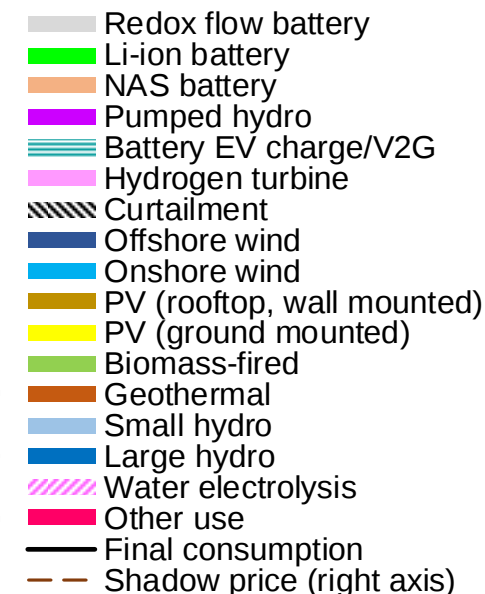
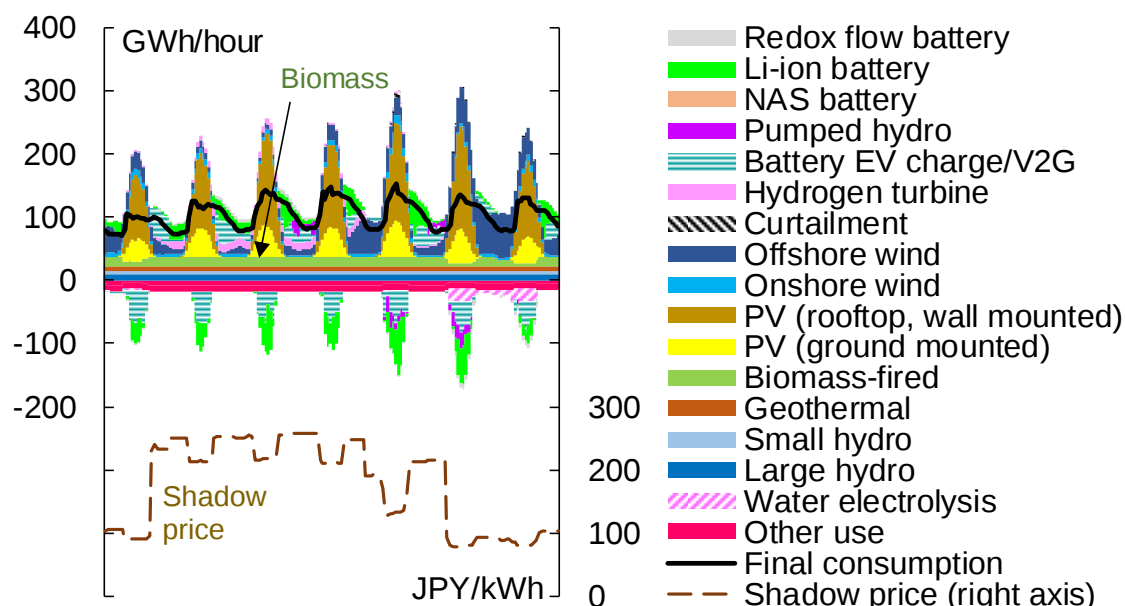
- ・ 5月には、電力負荷の低下に対して再エネ出力が増加するため、電力が余剰状態となり、ゼロ円近傍の限界費用が頻発している
- ・ 対して、夏季や冬季には電力負荷が上昇する一方、再エネ出力はそれほど大きくないため、余剰電力は発生せず限界費用が上昇

RE100ケースにおける2050年の1時間値電力需給

5月のある1週間



8月末-9月頭のある1週間



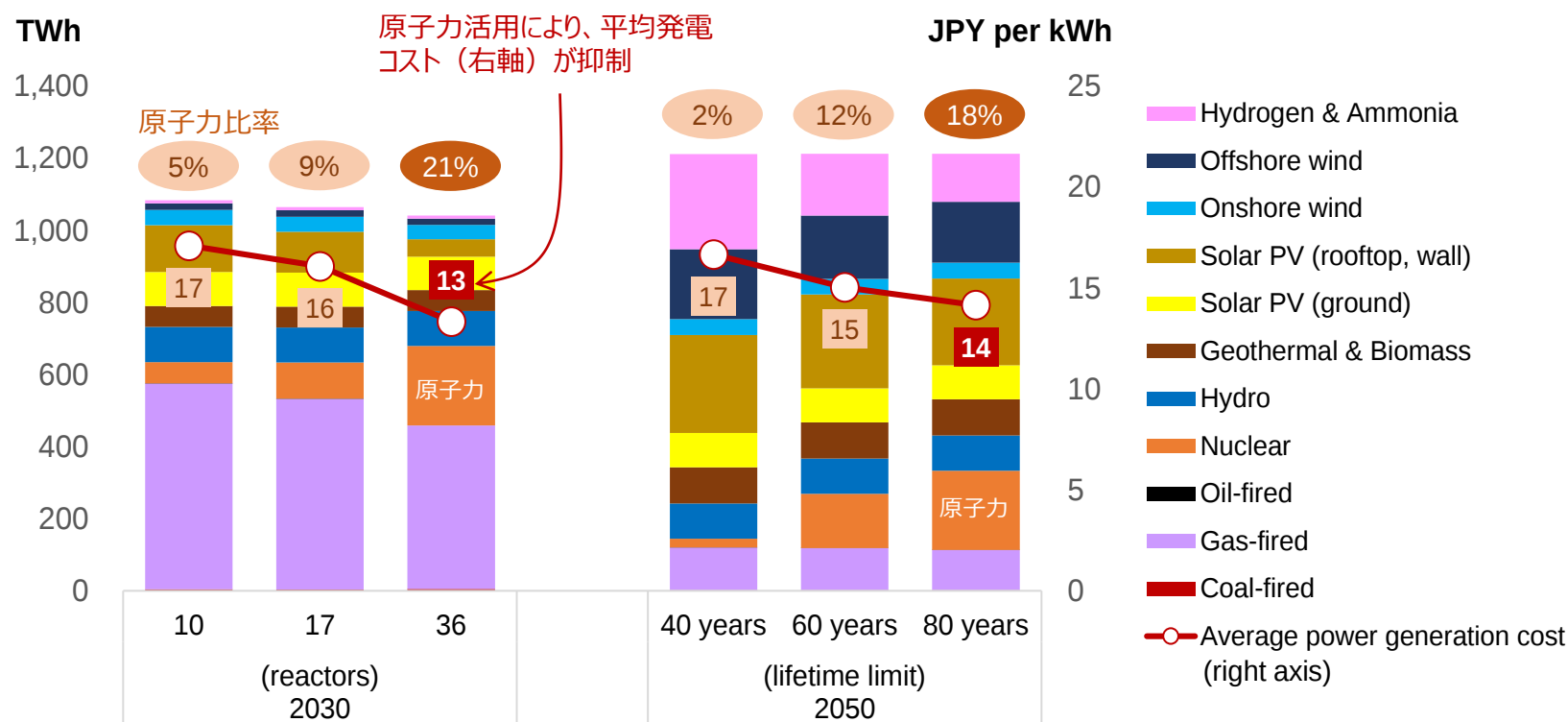
補足：図中のShadow priceが電力限界費用を示している。

出典：大槻ら、電学論B、142(7), pp.334-346, (2022) ; 大槻ら、エネルギー・資源学会論文誌、44(3), pp.115-125, (2023)

既設原子力発電所の活用は電力コストを下げる

- ・ 既設原子力発電所の再稼働や運転期間に関する感度分析を実施
- ・ 再稼働の進展や運転期間の延長によって輸入燃料費や再エネ費用が節減され、平均発電費用は低減する試算結果が得られた。既設設備の活用は中長期的に重要である

原子力発電所の再稼働数や運転期間が電源構成・電力コストに及ぼす影響



注：2022年当時の分析想定に基づく結果である点には注意されたい。

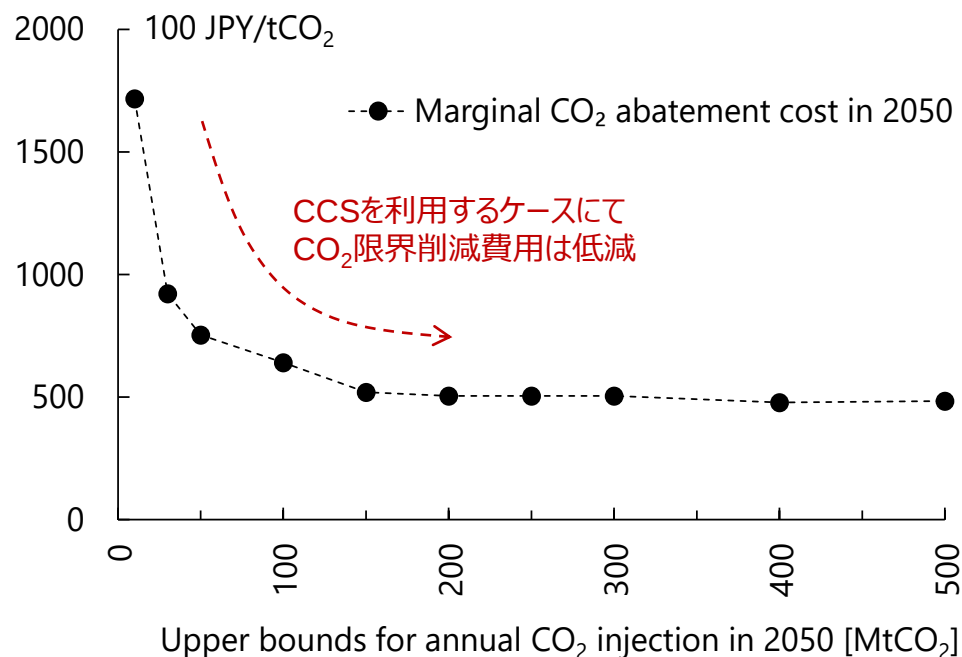
出典：松尾, 遠藤, 尾羽, 森本, 柳澤, 大槻「2030年・2050年の脱炭素化に向けたモデル試算」, 総合資源エネルギー調査会 第50回基本政策分科会, (2022年9月28日)

カーボンニュートラルの実現にはCCSも重要な選択肢である

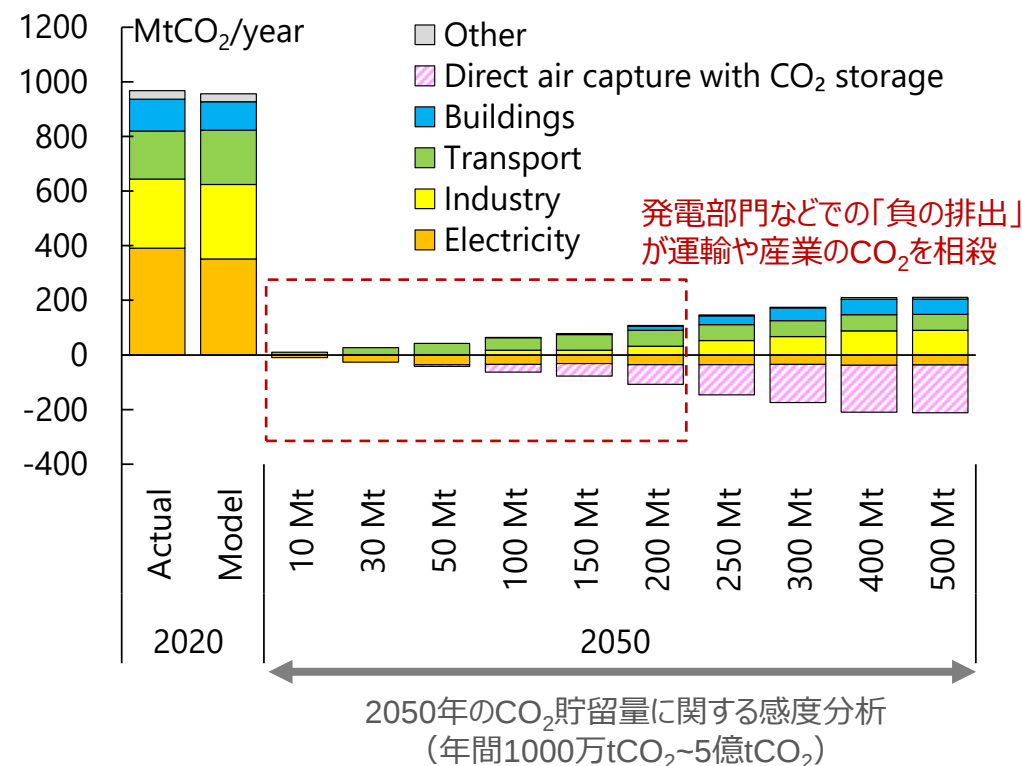
- ・ CCSはCO₂削減費用の抑制に寄与。バイオマス火力発電や天然ガス火力発電、DACとの組合せが合理的と評価されている (Otsuki et al., 2024)
- ・ 特に、ネガティブエミッションの創出がHarder-to-abateな部門のCO₂削減において経済合理的な選択となる可能性

CCSの実施量がCO₂削減費用に及ぼす影響

2050年のCO₂限界削減費用



部門別CO₂排出量



原子力

- 2050年に向けては安全性が確認された既設炉の活用が重要
- 新設炉はリードタイムの観点 – 各種調査・環境アセスに約8年、建設工事に約12年要する

CCS

- 発電の低炭素化やネガティブエミッションの観点から重要
- 国内の貯留ポテンシャルやコスト、事業リードタイム等の不確実性がある

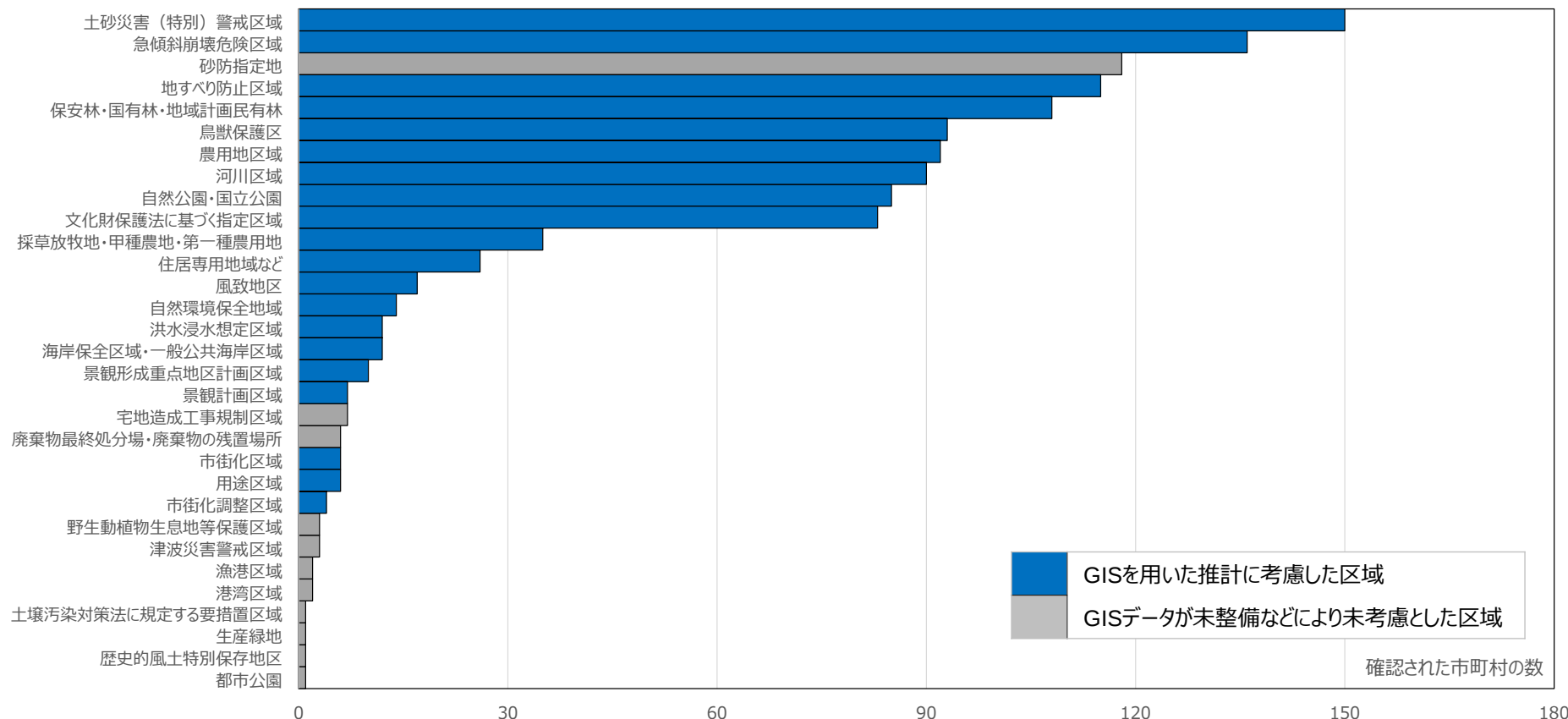
再エネ

- 再エネの導入拡大や主力電源化は重要
- 地域共生や社会的受容性、現実性を考慮した再エネポテンシャルの精査が必要
 - 地上設置型太陽光 – 地域条例の影響
 - 屋根設置型太陽光 – 屋根の形状や向き、パネル設置可能面積比率などの精緻化
 - 営農型太陽光 – 農作物や農法、気候などに応じた遮光率の整理や、系統接続の観点
 - 風力発電 – 陸上風力は森林設置・生態影響の考え方、洋上風力はレーダー制約等

災害防止や自然環境・景観保護のための区域で太陽光発電が規制される傾向がある

- ・ 市町村の条例にて太陽光発電の設置が規制されている区域を抽出した
- ・ 調査対象市町村は2024年3月までに規制条例を制定されていることが確認された263の市町村

抑制区域に指定されている区域（市町村の頻度の高い順）

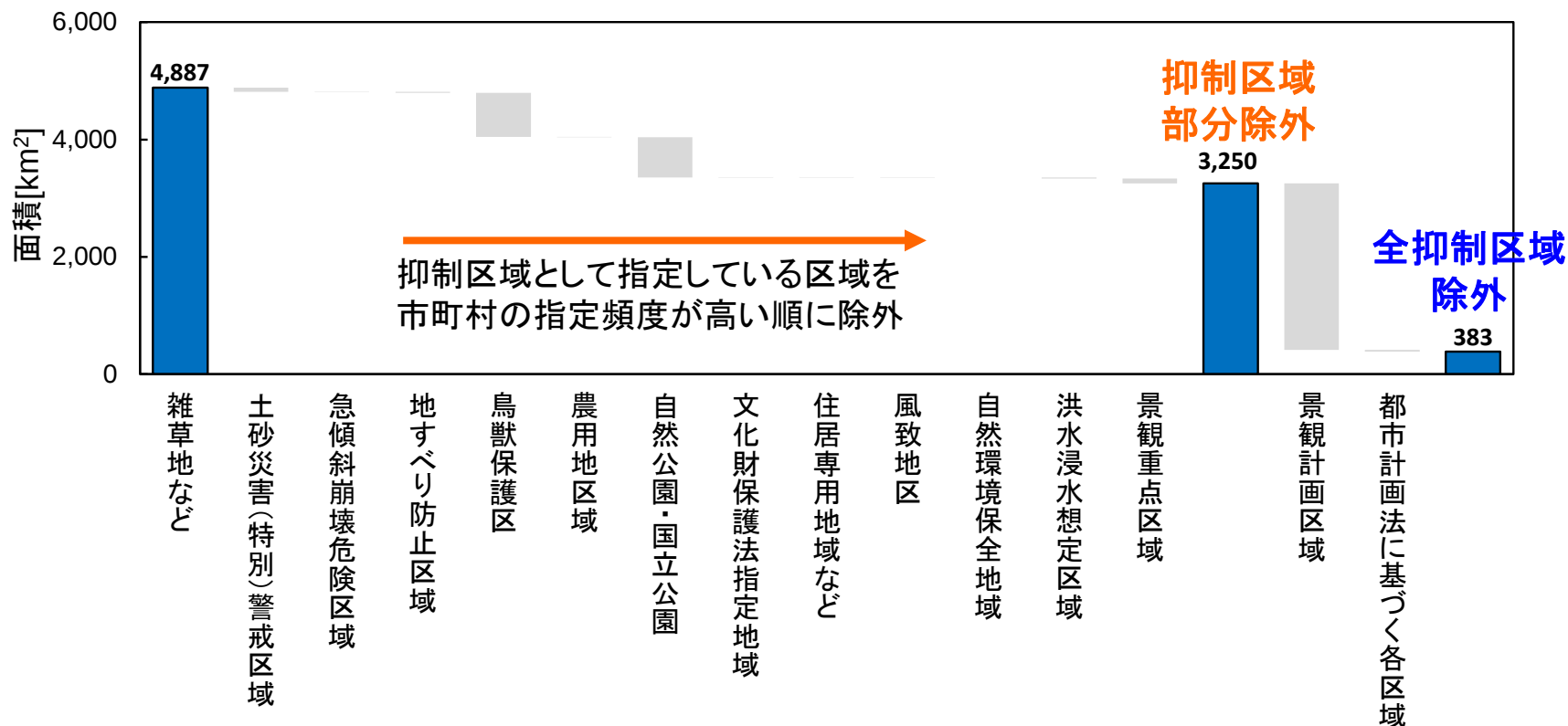


出典：尾羽秀晃，森本壮一，柴田善朗，大槻貴司：“地域条例・建物特性を考慮した太陽光発電の導入ポテンシャル評価”，総合エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会／電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会（第67回）資料3（2024）

災害防止や自然環境保護に関する区域を除くと、地上設置太陽光のポテンシャルは約1/3減少

- ・ 全国土面積（372,835km²）のうち、雑草地・裸地・しの地・再生困難な荒廃農地（計4,887km²）に導入可能と仮定した場合の試算
- ・ なお、太陽光発電の適地は陸上風力発電と競合する場合も多く、その点にも留意が必要である

抑制区域を頻度順に除外した面積



地上設置型PVのポテンシャル

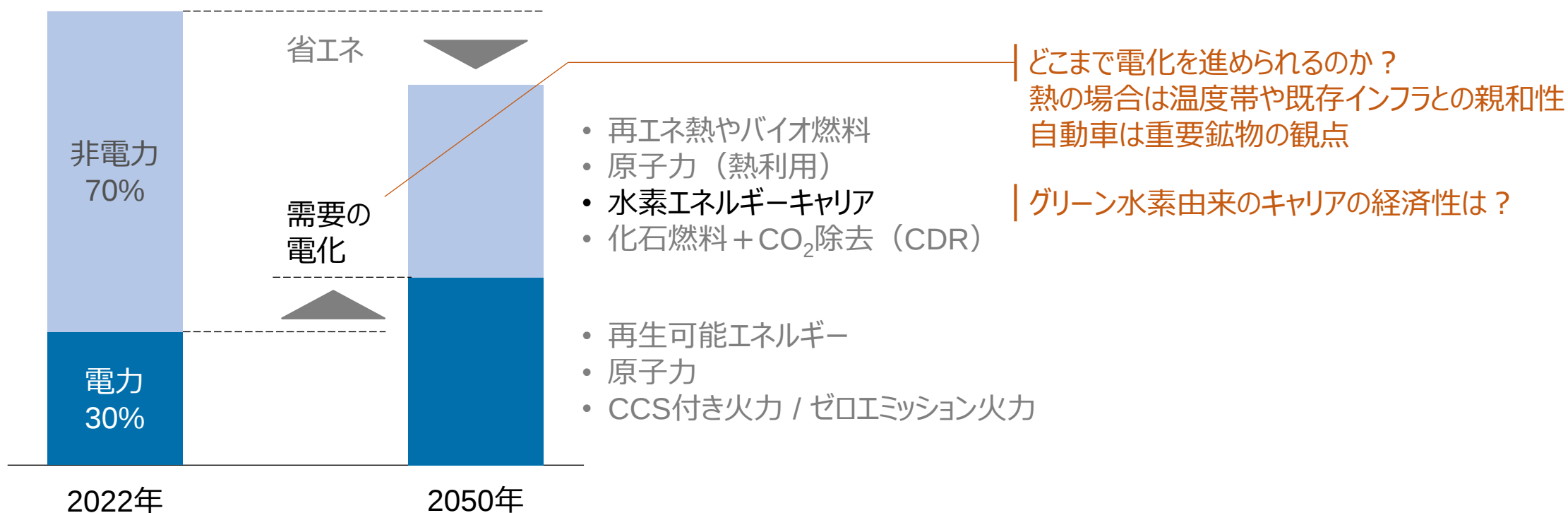
抑制区域除外無し	542GW
抑制区域部分除外 うち風力競合場所	361GW 253GW
全抑制区域除外 うち風量競合場所	43GW 23GW

目次

1. エネルギーシステム分析について
2. 電力のカーボンニュートラル化に向けた研究事例
3. 需要の電化や水素の経済性に関する研究事例
4. おわりに

- ・ 日本の最終エネルギー消費の7割は熱や燃料
- ・ この部分の排出削減策として電化やバイオ燃料、水素エネルギーキャリアなどがあるが、それらの精査が必要である

日本の最終エネルギー消費のイメージ

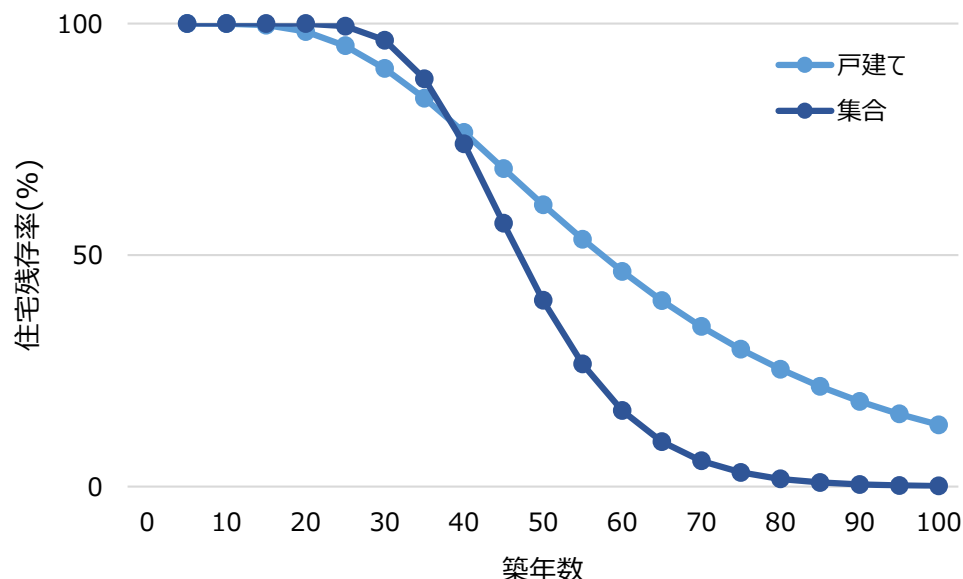


家庭の電化 — 既築建物ストックをどのように考えるか

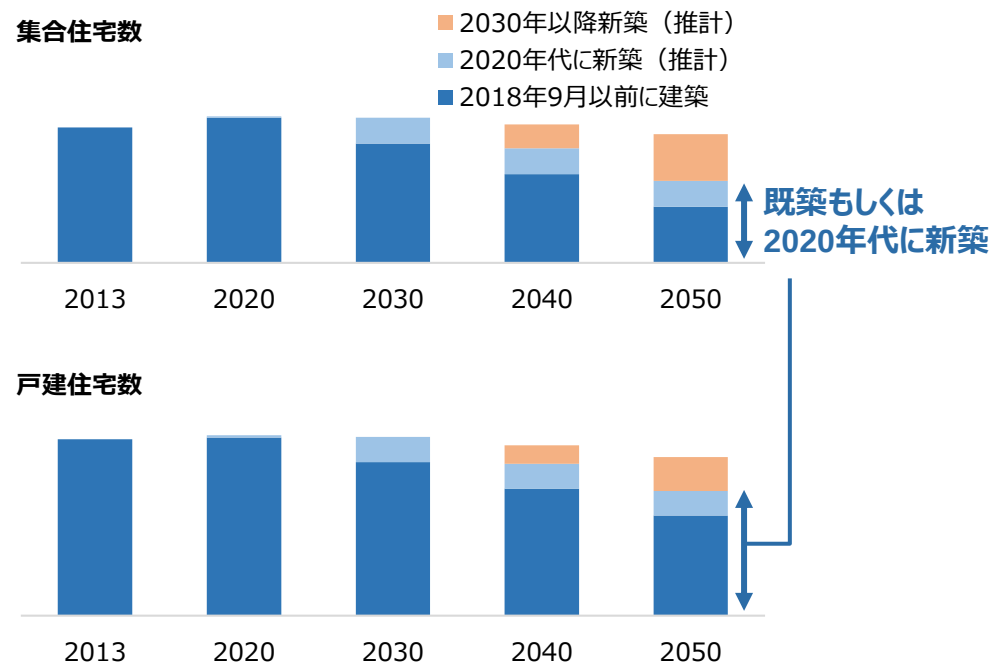
- ・ 家庭のCO₂削減に向けて給湯・厨房の電化が期待される一方、既築住宅ではスペース等の制約から貯湯槽の設置が難しいケースがある
- ・ 現在の住宅ストックに一定の残存曲線を仮定すると、既築もしくは今後数年間で建設される住宅が2050年にもある程度残存する
- ・ 電化への対応が難しい住宅のCO₂にも対応するため、合成メタンや水素、オフセットなどの可能性も検討しておく必要がある

住宅残存率曲線の想定

対数正規分布式を用いて住宅設備残存率を推計した
パラメータは既往研究（小松ら, 2002; 小松, 2011; 山田ら, 2024）を参照



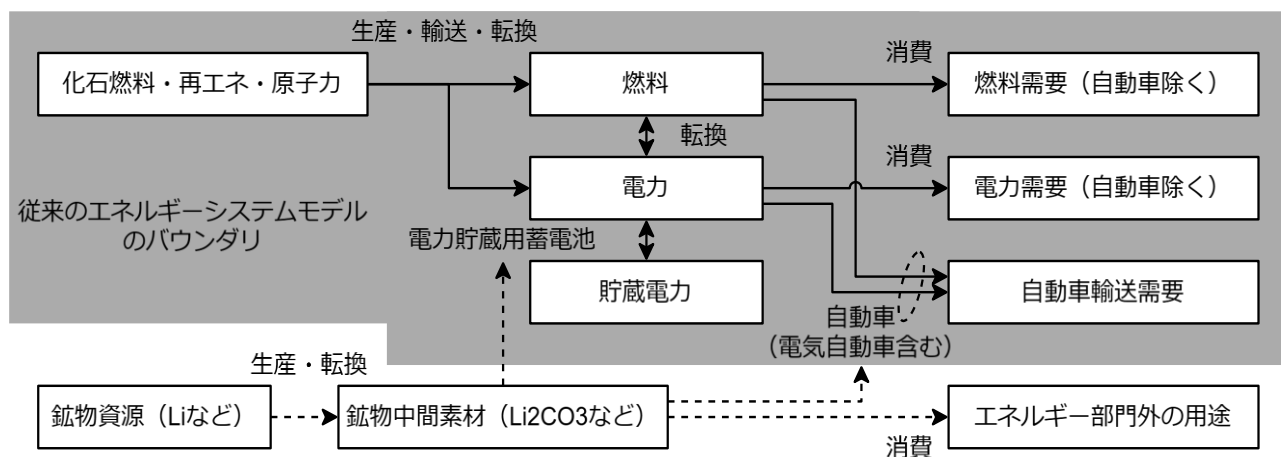
既築住宅数の残存数推計例



- ・ エネルギー・鉱物需給を統合的に取り扱う世界モデルにより、リチウム・コバルト・ニッケルの資源制約が自動車電動化に及ぼす影響を試算
- ・ 重要鉱物のリユース・リサイクルを考慮しない場合、三元系リチウムイオン蓄電池は重要鉱物の資源量に制約される可能性が示唆
- ・ リン酸鉄リチウムイオン（LFP）蓄電池など、重要鉱物使用量が少ない技術の重要性が高まるも、現状ではサプライチェーンが特定国に偏る

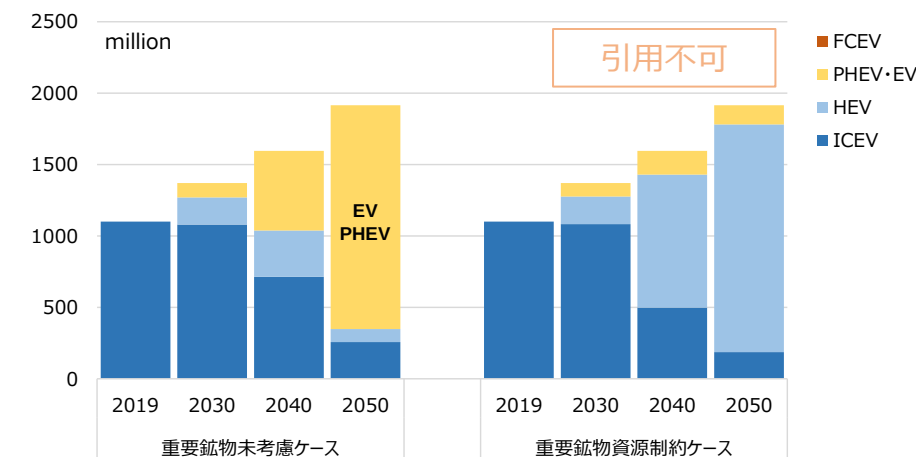
エネルギー・鉱物需給モデルのフロー

従来のエネルギーシステムモデルに鉱物資源を考慮



世界の乗用車保有台数の試算例

- ・ PHEVやEVにて三元系リチウムイオン電池を仮定（LFPは未考慮）
- ・ その場合、コバルトの資源量制約によりPHEVやEVの導入量は抑制



変動性再エネ電力由来の水素キャリアについて、製造から国内送配手前までの費用を積み上げ的に試算した

ケース	製造国	国際輸送キャリア	国内送配キャリア	
① 海外合成メタン（革新技術）	国外 (中東の再エネ電力由来)	液化合成メタン	合成メタン	
② 海外合成メタン（既往技術）				
③ 海外液化水素		液化水素	水素	
④ 海外メチルシクロヘキサン（MCH）		メチルシクロヘキサン		
⑤ 海外アンモニア（水素分離）		液化アンモニア	液化アンモニア	
⑥ 海外アンモニア（直接利用）				
⑦ 海外MCH+国内メタン合成	国内 (再エネ電力由来)	メチルシクロヘキサン	合成メタン	
⑧ 国内合成メタン（革新技術）		なし		
⑨ 国内合成メタン（既往技術）				

分析の考え方

- ・ 海外・国内での水素キャリア製造～国内送配前までの費用を考慮。
- ・ 大規模なサプライチェーンや設備を想定。具体的にはメタン換算（熱量等価）で10万Nm³-CH₄/h規模。^{注1}
- ・ 分析対象年は具体的には特定しないが、2030年より後の長期的な時間軸を想定してパラメータを設定。

主な諸元

- ・ メタン合成に関連する諸元は主に事業者ヒアリングから設定。^{注2}
他方、水電解や液化水素・MCH・アンモニアはIEA「The Future of Hydrogen」(2019)の想定に依拠。
- ・ 割引率は同文献（IEA (2019)）にならい8%と想定。為替レートは113円/USDと想定。^{注3}
- ・ 海外生産国は同文献を基に、太陽光・風力ハイブリッド型の再エネ条件が比較的優れている中東を想定（下表）。^{注4}
- ・ 国内再エネの想定も同文献に依拠。再エネ発電単価は6.3cent/kWh、設備利用率は19%と想定。

項目	本分析	豪州	チリ	米国	中東	出典・考え方
海外再エネ単価・ 設備利用率 ^{注2}	2.5cent/kWh, 29%	3.1cent, 26%	2.3cent, 23%	3.1cent, 28%	2.5cent, 29%	IEA「Future of Hydrogen」(2019)
輸送距離	12 000km	7 000km（豪州西部）	17 000km	17 000km（メキシコ湾）	12 000km（ペルシャ湾）	YNU推計

注1：合成メタンのチェーン規模は年間で8.8億Nm³-CH₄相当（日本の都市ガス消費量（メタン換算）の約2.2%程度）。

注2：合成設備費は本資料12頁を参照されたい。CO₂回収費用は2000円/tCO₂を想定。

注3：IEA(2019)では2017年価格米ドル基準で想定が作成されているため、本試算でも2017年価格や為替レートを仮定。なお、中東地域では水供給が制約となりうるが、本試算では海水淡水化技術を想定して、その費用を織り込んでいる。

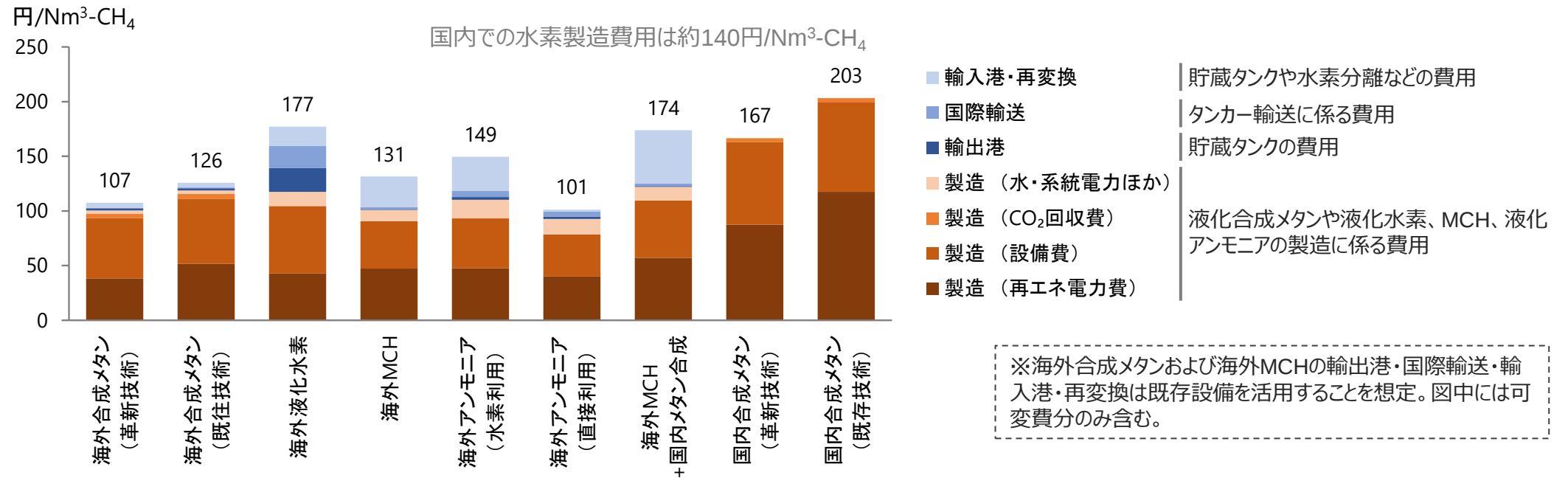
注4：IEA(2019)におけるLong-termの変動性再エネの想定。単価と設備利用率は変動性再エネを最適に組合せた際の値（long term priceおよびOptimized full load hours）。

グリーン水素サプライチェーン費用の推計例

- ・ グリーン水素の主なコスト要因は再エネ電力費と水素キャリア製造設備費
- ・ 経済性の改善に向けては、技術開発によるキャリア製造設備費の低減と共に、国内外の安価な再エネ確保が極めて重要である

供給費用の推計結果

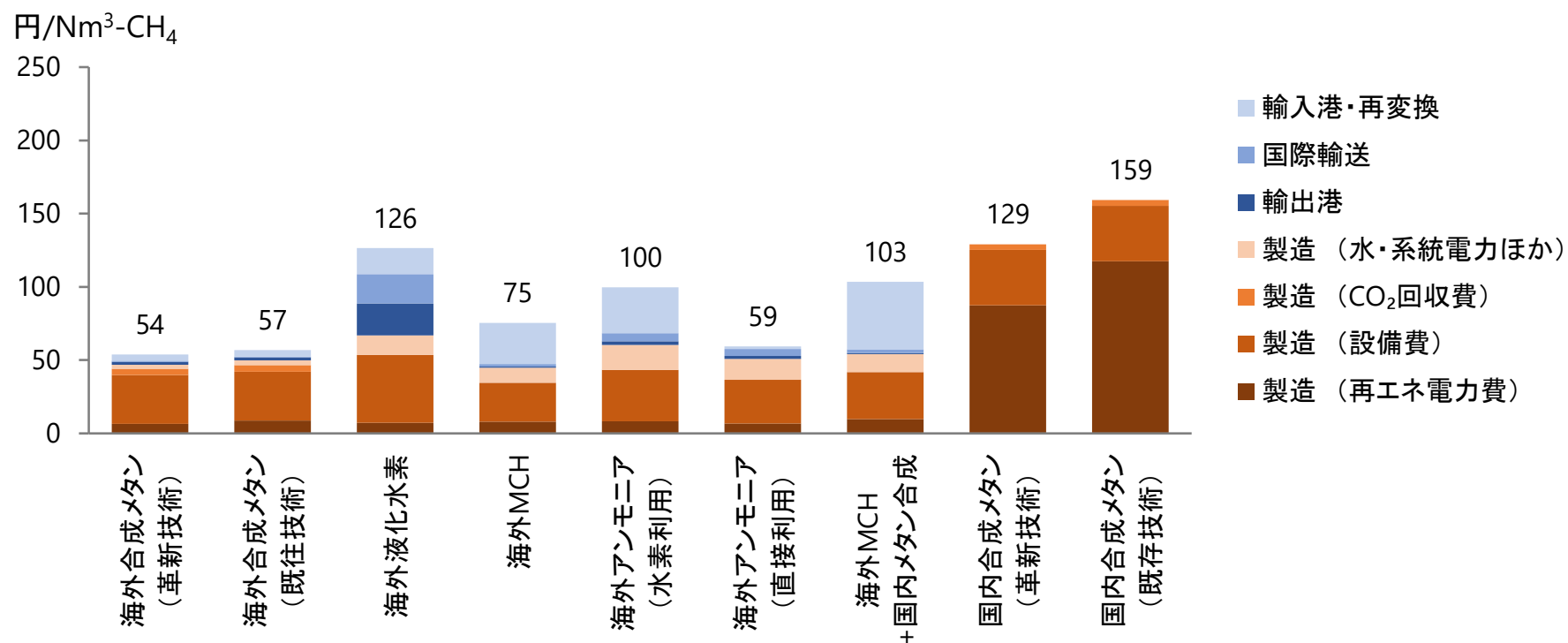
2030年より先の長期を想定した推計値



合成メタンの輸入価格目標達成に向けて

- ・ 日本政府は合成メタン価格の目標水準として40~50円/Nm³-CH₄を掲げている
- ・ 海外再エネをより安価（0.6cent/kWh）に調達、かつ、メタン合成技術の技術進展（設備費の半減）が達成された場合、海外合成メタンの供給費用は54円/Nm³-CH₄と推計された。

海外再エネ単価と設備費の両者が安価なケース



注：グリーン成長戦略策定当時（2021年6月）のLNG価格水準。

出典：大槻貴司，柴田善朗：“合成メタン等の製造・供給費用試算”，経済産業省資源エネルギー庁 第9回メタネーション推進官民協議会 資料3-4（2022年11月22日）

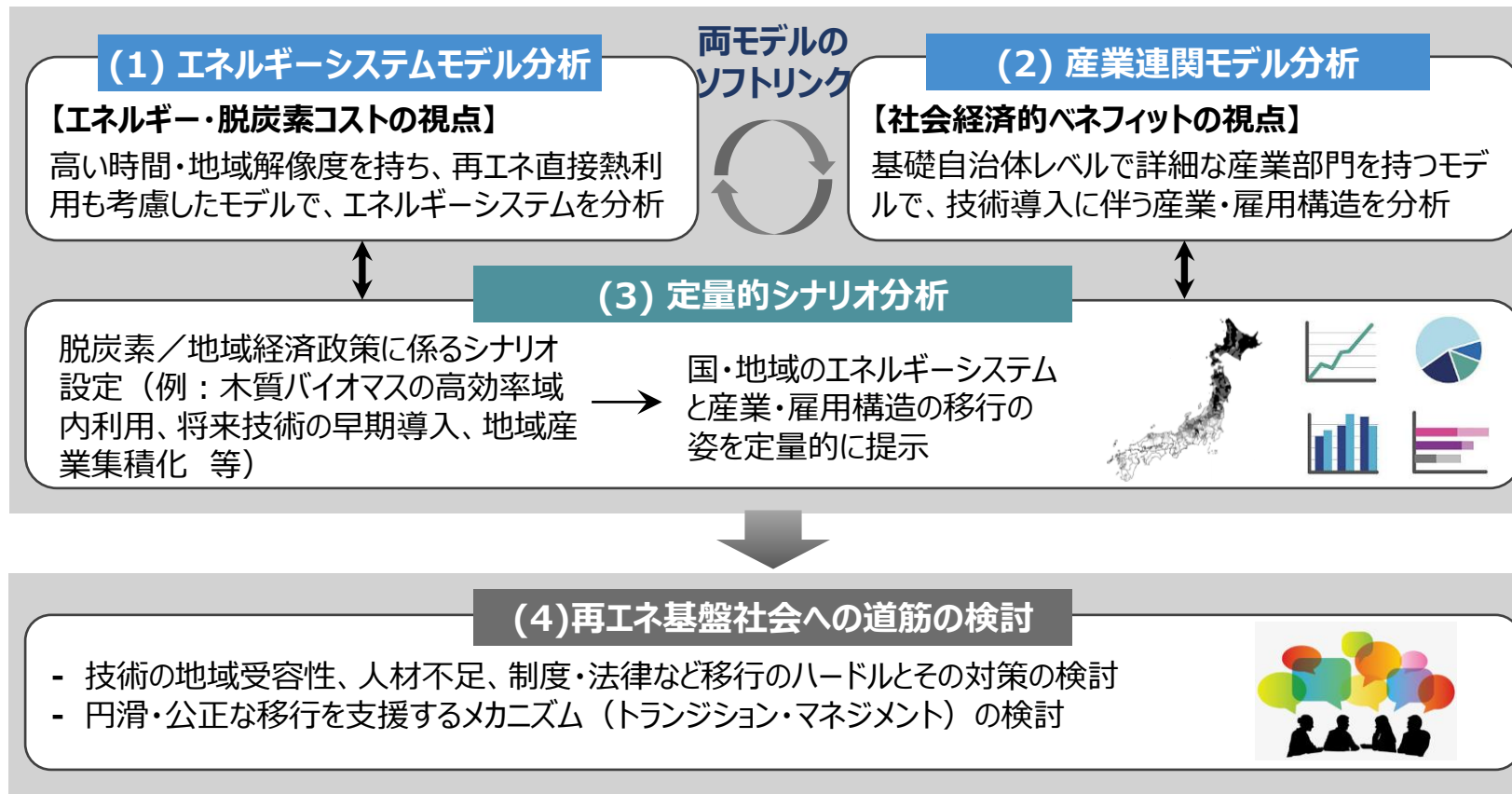
目次

1. エネルギーシステム分析について
2. 電力のカーボンニュートラル化に向けた研究事例
3. 需要の電化や水素の経済性に関する研究事例
4. おわりに

- ・ 2050年カーボンニュートラルの達成に向けては多様な道筋が存在しうる。それぞれの長短や不確実性への対応を踏まえた上で、エネルギー計画を策定することが重要である
- ・ エネルギーシステムコスト最小化の観点からは、2050年の発電部門における再エネ比率は約5割が最適と評価され、残りの比率は原子力やCCS付き火力、水素・アンモニア火力が担う結果が得られた。各技術のコストやポテンシャルを考慮すると、「特効薬」的な発電技術は存在していない。複数の技術オプションが必要となると考えられる
- ・ 熱や燃料は日本の最終エネルギー消費の約7割を占めており、そのカーボンニュートラル化に向けた方策の精査が必要である。需要家や対策技術の特徴を踏まえて、熱・燃料の対策を考えていく必要がある
- ・ グリーン水素由来のエネルギーキャリアは再エネ電力費とキャリア製造設備費が主なコスト要素である。経済性の改善に向けては、技術開発によるキャリア製造設備費の低減と共に、国内外の安価な再エネ確保が極めて重要である
- ・ 原子力発電や再エネ、CCSのポテンシャル、水素サプライチェーン構築における不確実性を考えると、現状ではバランスのとれたエネルギーミックスを目指すことが望ましいのではないか
- ・ 本資料ではエネルギーシステムに着目した研究を紹介したが、今後は社会経済システム（産業や雇用など）の観点からの議論も極めて重要である

地域特性を活かし価値を創造する再エネ基盤社会への道筋

- ・ 2050年に向けた国・地域のエネルギーシステムと産業・雇用構造の移行の姿を分析し、脱炭素におけるコストとベネフィットを提示する計画
- ・ 横浜国大 本藤教授を研究代表者として実施中。当研究室もエネルギーシステムの分野で参画



ご清聴ありがとうございました

大槻貴司

横浜国立大学 / 日本エネルギー経済研究所



大槻研究室ウェブサイト
コンタクト等はこちらにございます