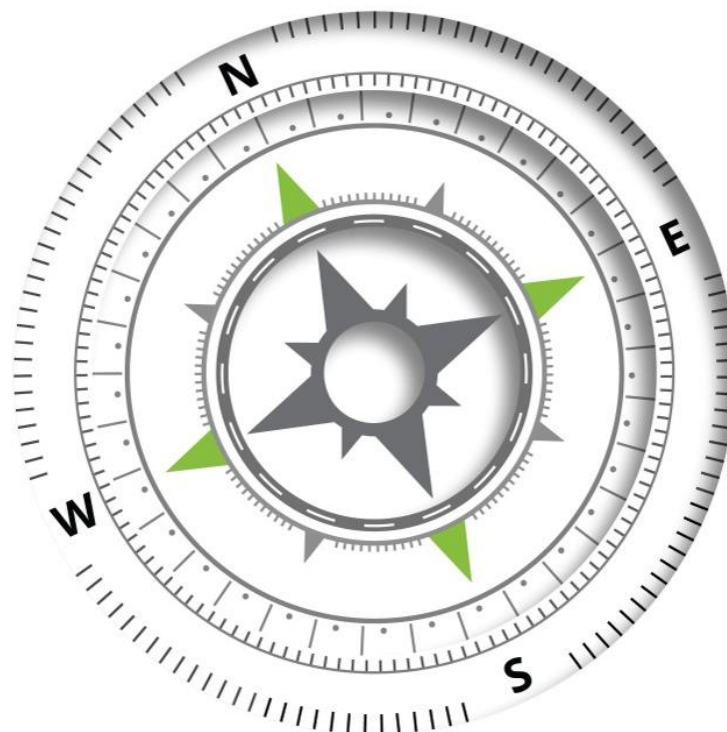




カーボンニュートラル社会に向けたシナリオ分析

デロイト トーマツ コンサルティング 合同会社
2021年6月30日

1 D-TIMESについて

1	D-TIMESについて
2	前提条件について
3	シミュレーション結果について

【D-TIMESについて：概要】

IEAのETSAPで開発が進む「TIMES」を用いて将来のエネルギーの在り方を分析

TIMESの概要

TIMES*1 とは

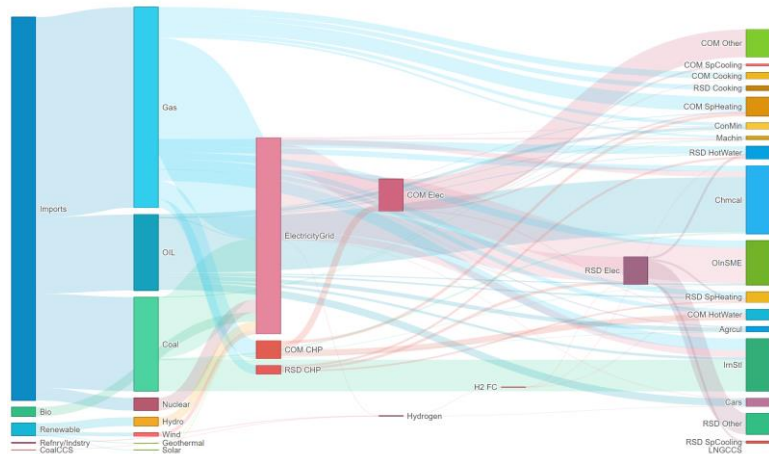
- IEA*2のETSAP*3で開発が進められている長期のエネルギーの在り方を分析するプログラム
- IEAや各国政府の長期エネルギーシナリオの分析において活用されている
- 将来のエネルギー需要やエネルギー供給・輸送設備の技術データ等をインプットすることにより 最も経済合理性のある技術の組み合わせ(電源構成等)を解として出力

何を分析できるのか

- 複雑化する将来のエネルギー需給構造をコスト最小化等を目的関数にして計算することができる

【分析結果例】

一次エネルギーの供給、転換、セクターへの供給の最適解



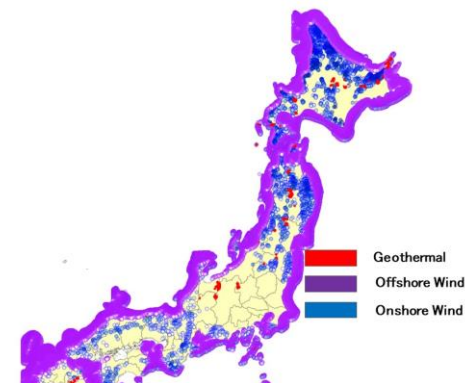
何をインプットするのか

- エネルギーに係る様々な情報をインプット

【系統情報】



【再エネの導入可能量】

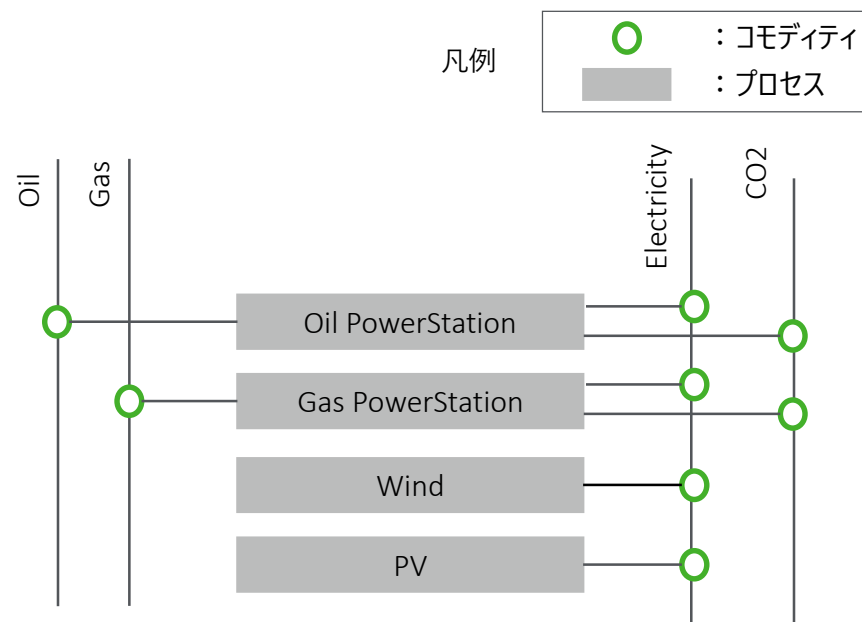


⇒その他、人口動態、発電所情報(能力、位置)等をInput

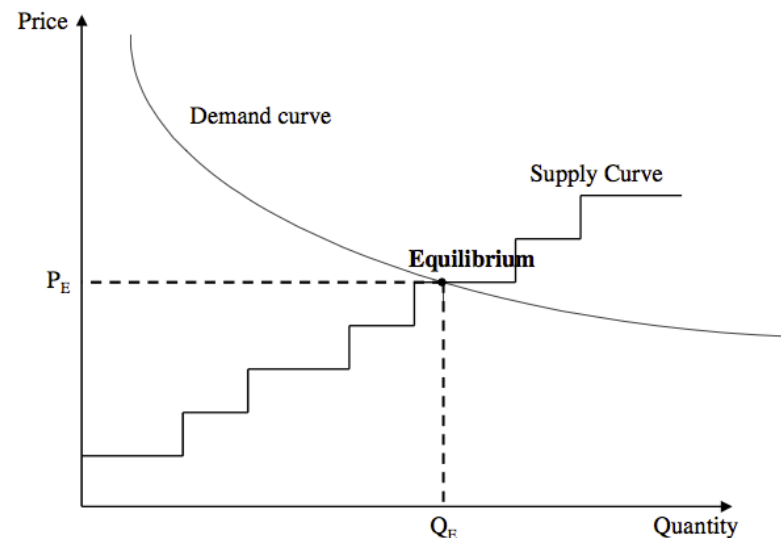
【D-TIMESについて：概要】

燃料や各種エネルギーを指すコモディティと、エネルギー変換を実施するプロセスから構成されており、市場均衡を満たす、かつコスト最小化になるように計算される

インプット・アウトプットのスキーム



市場平衡の考え方



【コモディティ】

- コモディティは、燃料や各種エネルギー（電気・熱）、CO2等を指す

【プロセス】

- 各種コモディティ（石油や天然ガス等）を他のコモディティ（電気やCO2等）に変換するプラントや機能
- プロセスで変換された電気は自動車や熱交換器等に送られるスキームを構築

【市場平衡の考え方】

- 対象期間におけるエネルギー需要を満たすエネルギーシステムをコスト最適化になるように計算
- 各時間帯別の投資決定は、対象期間全体を踏まえて行われる
- 全てのマーケットにおいて市場平衡が満たされる場合、便益は最大となる

2 前提条件について

1	D-TIMESについて
2	前提条件について
3	シミュレーション結果について

【検討目的】

系統・電源構成の柔軟性に基づき、カーボンニュートラル社会においてコストが最小となるケースと再エネが大量に導入される2つのケースの検討を実施

検討目的

■ 2050年カーボンニュートラルの実現を前提に2ケースをシミュレーション

➤ コスト最小化ケース

- ・ カーボンニュートラル社会実現に向けて再生可能エネルギー・再稼働原子力発電所・火力発電所を活用し、コストが最小化になるケースを検討

➤ 再エネ大量導入ケース

- ・ カーボンニュートラル社会において再生可能エネルギーが95%導入され、その他既存電源（原子力・火力）を代替するケースを検討

■ 上記2ケースの検討にあたっては、制約条件を設けずに、導入ポテンシャルやコスト情報、系統情報をインプットデータとして、内生的に最適な電源構成を試算

■ また、需給調整機能として系統増強を検討するとともに、発電側では蓄電池（EV含む）、揚水及び水素による余剰吸収、需要側ではコージェネによる下げDRも含め検討

シナリオ名	CO2削減目標	再エネ導入量
■ コスト最小化ケース	・ 2030年 46%削減 (2013年比) ・ 2050年 カーボンニュートラル	コスト最小化の条件の下、内生的に算出
■ 再エネ大量導入ケース		全発電電力量に占める再生可能エネルギーの割合を95%と設定

【前提条件】

2050年のカーボンニュートラルに向けて、CO2削減目標に合わせて最適化計算するケースと、再エネ割合を外生的に高めに設定して最適化計算するケースでシミュレーションを実施

前提条件（エネルギー需要・インフラ・貯蔵・燃料）

前提条件		コスト最小化ケース・再エネ大量導入ケース共通	参照元
エネルギー需要	家庭部門	■ 都道府県毎の人口推移を基に計上	■ 国土交通省：1kmメッシュ別将来推計人口
	産業部門	■ 業種別にサービス単位で計上（鉄鋼、化学、食品煙草、繊維...等） ■ 産業部門の非電力需要は検討対象外 ■ 省エネ効果（2050年まで毎年1%）を考慮	■ 省エネルギーセンター：エネルギー・経済統計要覧（EDMC）
	業務部門	■ 用途別にサービス単位で計上（冷房、暖房、給湯、厨房、動力他） ■ 延床面積に都道府県毎のGDPを考慮	
	運輸部門	■ 車両をサービス単位で計上（貨物はトンキロ、旅客は人キロ試算） ■ 都道府県毎の人口推移を考慮	
エネルギーインフラ・貯蔵	系統	■ 一次変電所（上位から2つ目）までの変電所の系統容量を考慮 ■ 系統拡張も考慮（拡張コスト（20万円/MW/km））	■ OCCTO：データベースおよび広域系統長期方針＜参考資料＞
	蓄電池	■ 15万円/kW・耐用年数10年を考慮	■ 資源エネルギー庁：新エネルギーシステム課「定置用蓄電池の価格低減スキーム」
	揚水発電	■ 現状設備より変化なし	■ 資源エネルギー庁：電力調査統計
燃料	水素	■ 国内生産水素のみ（輸入水素導入なし） ■ 水素コストは余剰電力を活用するとして内生的に計算（グリーン水素のみ）	—
	化石燃料	■ 石炭：68\$/tonne(2025)、61\$/tonne(2040) ■ 原油：57\$/barrel(2025)、53\$/barrel(2040) ■ 天然ガス：5.4\$/Mbtu(2025)、5.7\$/Mbtu(20540)	■ IEA：World Energy Outlook 2020
	アンモニア	■ 国内生産アンモニアのみ（輸入アンモニア導入なし）	—

【前提条件】

2050年のカーボンニュートラルに向けて、CO2削減目標に合わせて最適化計算するケースと、再エネ割合を外生的に高めに設定して最適化計算するケースでシミュレーションを実施

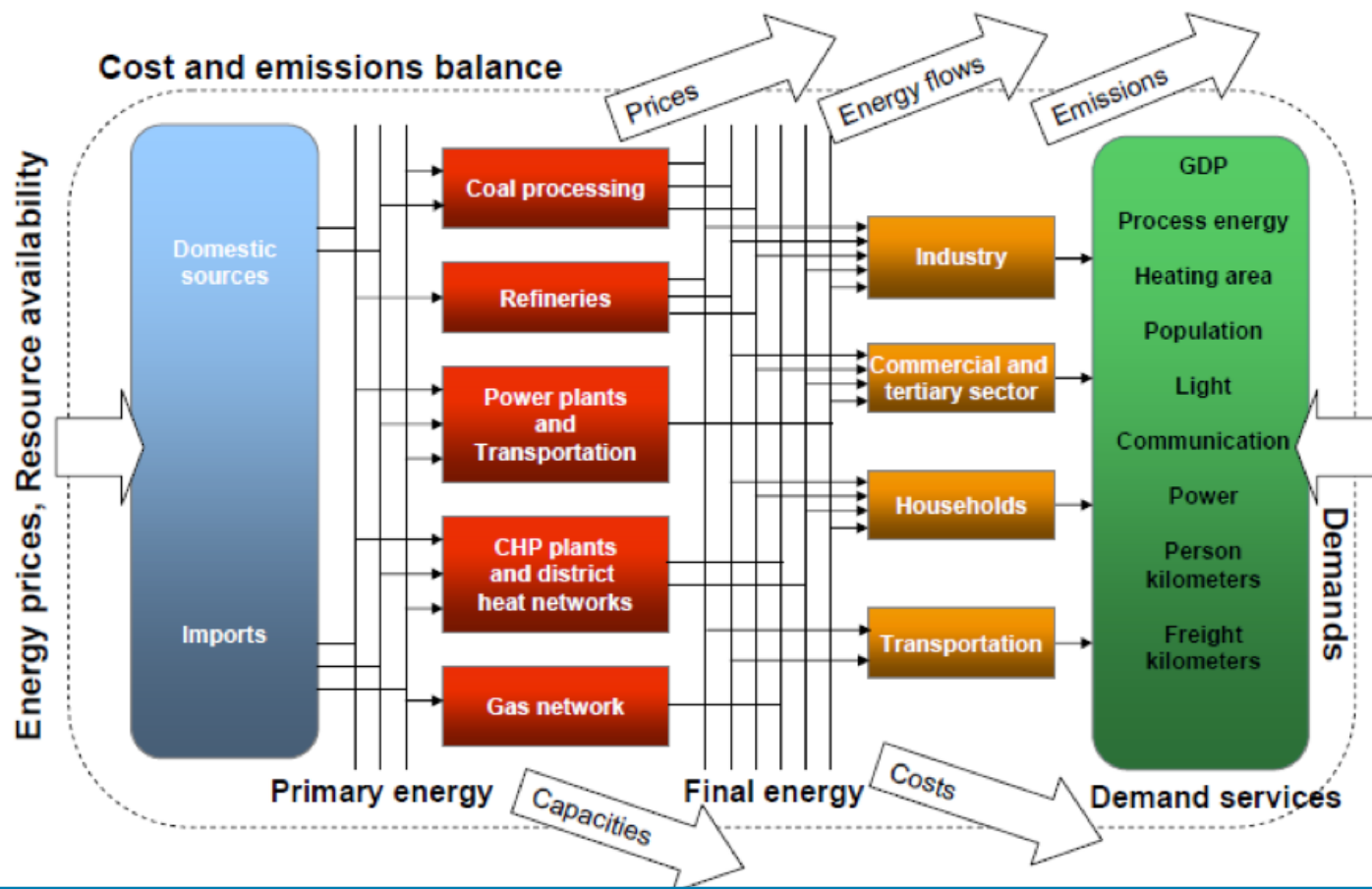
前提条件（発電：再エネコスト等）

前提条件			コスト最小化ケース		再エネ大量導入ケース		参照元	
制約条件：CO2削減目標			■ 2030年 46%削減 (2013年比) ■ 2050年 カーボンニュートラル ※森林吸収量約4,700万t-CO2を考慮				■ 環境省：2018年度（平成30年度）の温室効果ガス排出量（確報値）	
発電	再エネ導入可能量		■ CO2削減目標に合わせてコスト最小化計算		■ 再エネ割合を最大値に設定して計算		■ 環境省や経済産業省の日射量情報や風況マップを基に作成	
	再エネコスト	太陽光	■ メガソーラー17.2万円/kW、住宅用太陽光23.4万円/kW ※空間整備費は、レベル1：0円/㎡、レベル2：5,000円/㎡、レベル3：10,000円/㎡で設定				■ コストWG：発電コスト検証WG【再生可能エネルギー】（令和3年4月）	
		洋上風力	■ 50.7万円/kW ※再エネポテンシャルにより資本費は上記価格を基準に変動あり					
		陸上風力	■ 19.3～32.9万円/kW ※再エネポテンシャルにより資本費は上記価格を基準に変動あり					
		水力	■ 33～90万円/kW					
	原子力		■ 60年廃炉と設定 ■ 再稼働あり				—	
	火力 + CCS		■ CCS付き火力でリプレースありと設定 ■ CCSの貯留量は2050年：91MtCO2を上限として設定				■ RITE：2050年カーボンニュートラルのシナリオ分析（中間報告）	

【エネルギーフローのイメージ】

各種制約条件を設定することで、コスト最小化をベースとした電力価格や電源構成等を出力する

入出力のイメージ

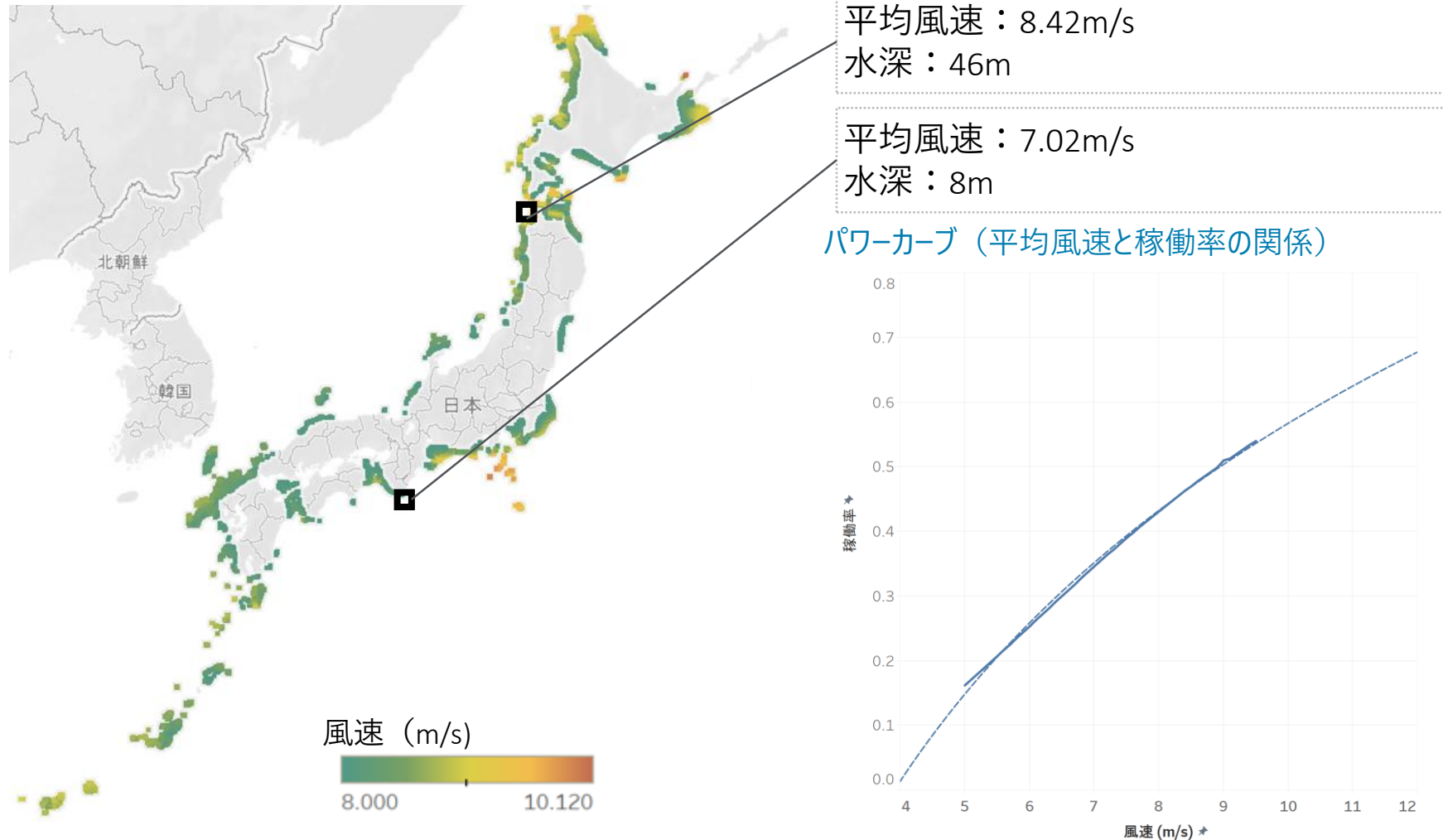


CO2排出量削減目標値を制約条件とし、コスト最小化をベースとした電力価格やエネルギーフロー、電源構成等をアウトプットとして出力する

【再生可能エネルギーの地域特性】

どこに建設するかで建設費用と年間発電電力量が大きく異なる

例：着床式洋上風力発電



【系統情報について】

主要基幹送電線の送電容量を反映することで系統制約を再現した

系統の対象



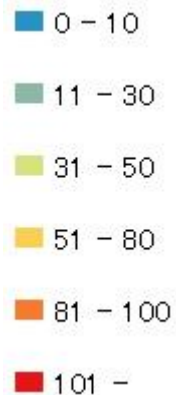
電力会社	対象電圧
北海道電力	275kV, 187kV
東北電力	500kV, 275kV
東京電力	500kV, 275kV
中部電力	500kV, 275kV
北陸電力	500kV, 275kV
関西電力	500kV, 275kV
中国電力	500kV, 220kV
四国電力	500kV, 187kV
九州電力	500kV, 220kV
沖縄電力	132kV

*ノードは変電所を指す、出所：OCCTOを基にDTC作成

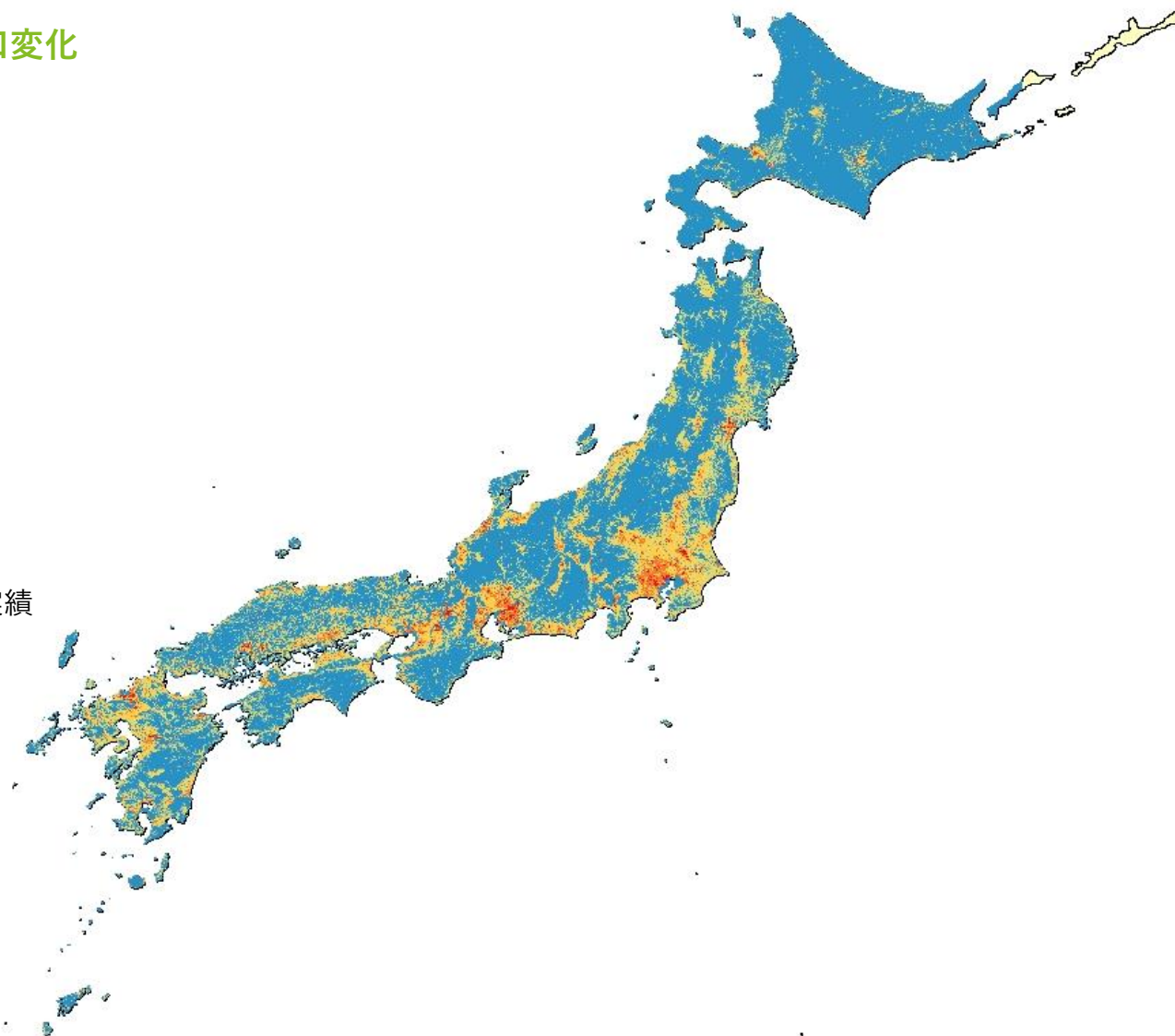
【人口動態について】

地域によって変化が大きく異なる将来推計人口を反映した

2050年へ向けての人口変化



注：100 = 2010年実績

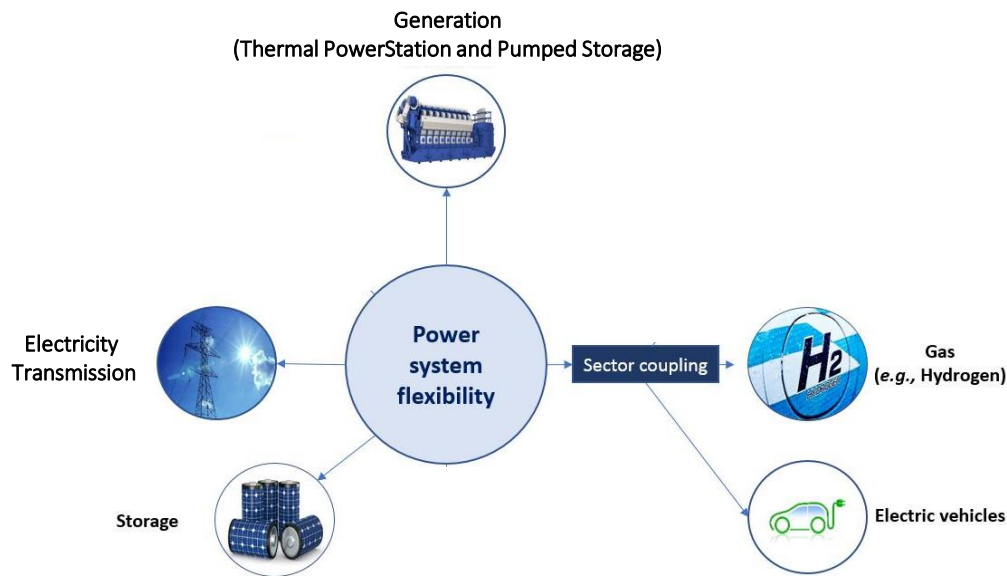


【柔軟性メカニズムの反映】

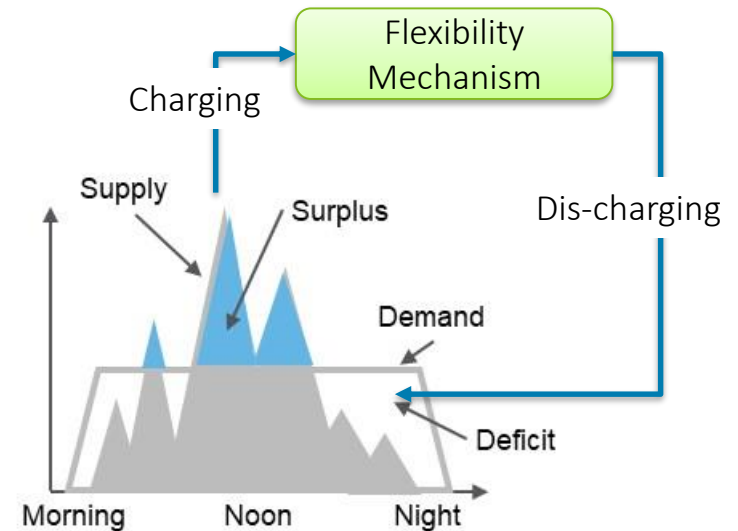
TIMESはFlexibility Mechanismを考慮したモデルで計算される

TIMESにおけるFlexibility Mechanisms

Flexibility Mechanismsの構成



Flexibility Mechanismsの運用パターン



電力供給の余剰分をセクターカップリングを通じて各種エネルギーに変換する機能や貯蔵する機能をモデル化することで柔軟性を考慮している

3 シミュレーション結果について

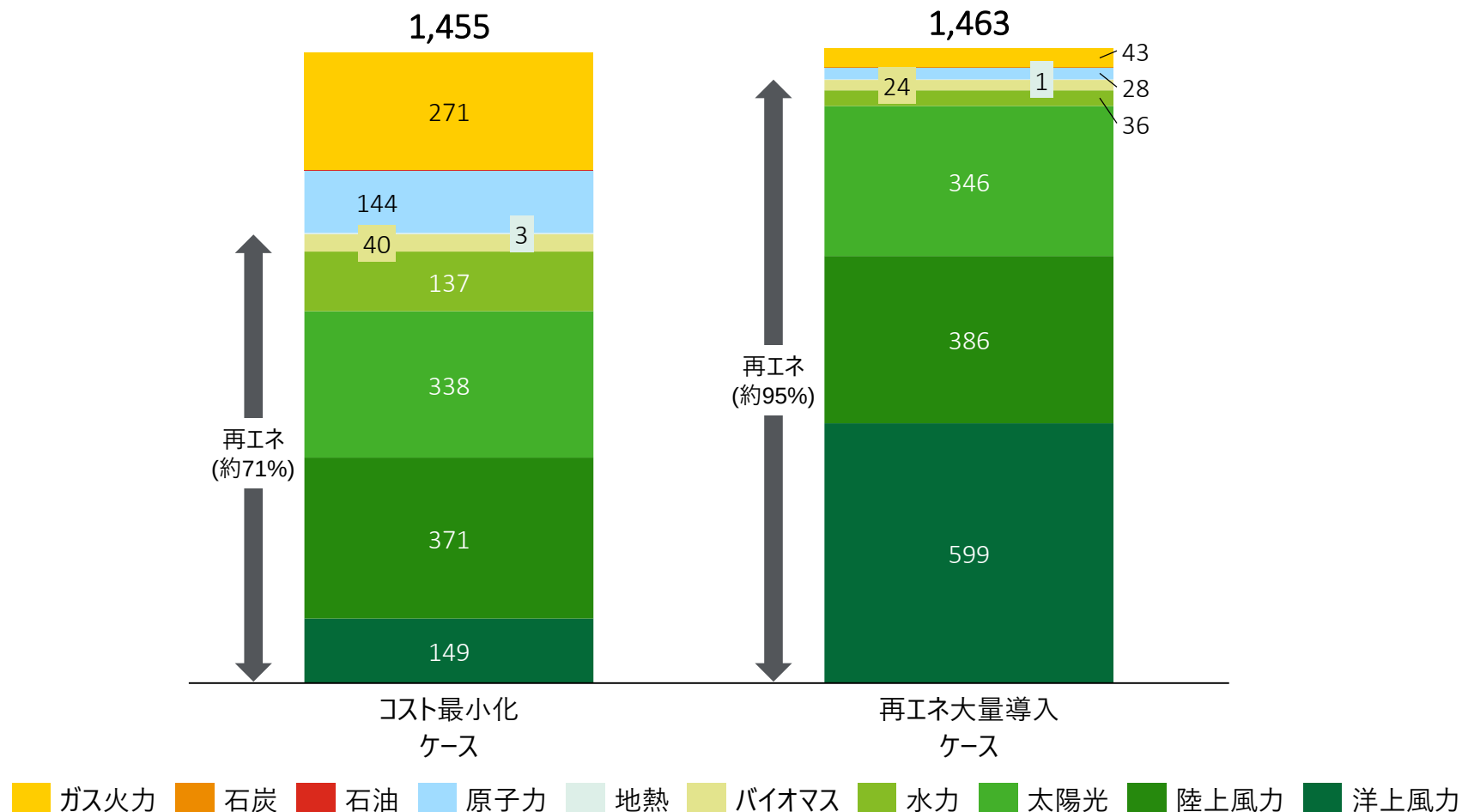
1	D-TIMESについて
2	前提条件について
3	シミュレーション結果について

【シミュレーション結果：発電電力量】

両ケースとも発電電力量は約1,450TWhとなり、コスト最小化ケースでは再エネが約71%導入される

カーボンニュートラル社会における2050年の電源別発電電力量

単位：TWh



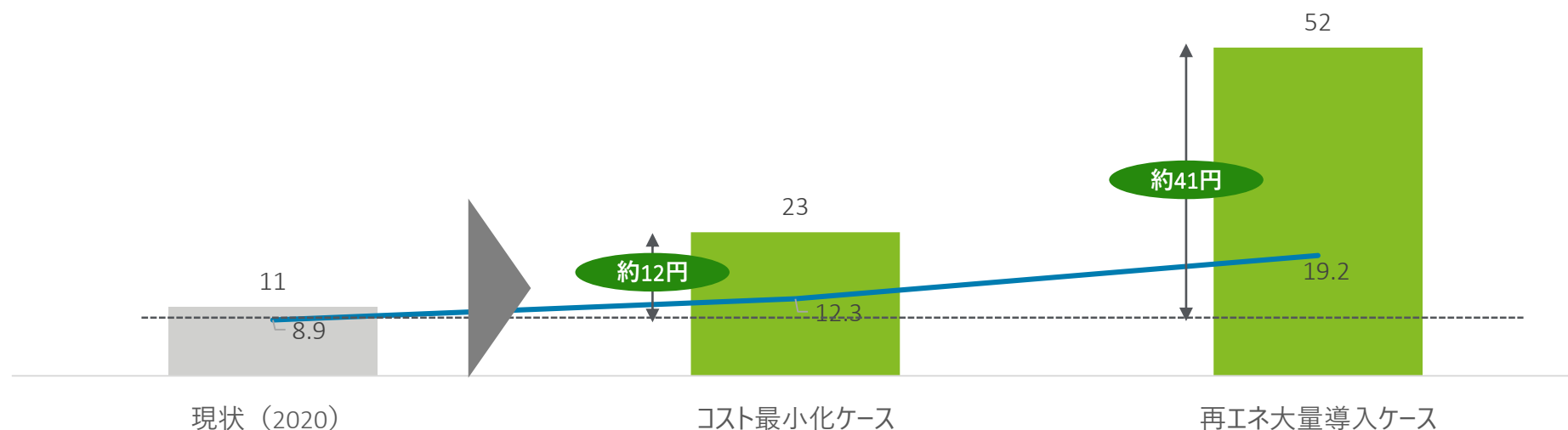
【シミュレーション結果：発電に係る費用（円/kWh）】

2050年のカーボンニュートラル社会では、約12円/kWhの電力限界費用上昇が起こる可能性があり、再エネ大量導入する場合は約41円/kWhまでの上昇もあり得る

カーボンニュートラル社会における発電に係る費用の比較

単位：円/kWh

■ 発電限界費用 — 発電平均費用



- 発電限界費用に対し、発電平均費用は緩やかに上昇
- 再エネが大量導入するケースでは柔軟性が低いため、最後の1kWhの発電に係るコストが高い
- 柔軟性が高い程、発電限界費用と発電平均費用の差分が小さい

注）シミュレーション結果をベースとして、DTCが各種公表資料に試算したもの。

発電限界費用：発電設備のインシヤル・ランニングを考慮した発電限界費用と蓄電池、系統費用を推計したもの。

発電平均費用：発電設備のインシヤル・ランニングを考慮した発電平均費用と蓄電池、系統費用を推計したもの。

実際の電力需要者に課せられる電力料金は、この数値に電力・小売会社の各種費用・利益、及び再エネ賦課金などが加算されるため、実際の電力料金とは異なる。

【シミュレーション結果：蓄電池導入量・稼働率（GW、％）】

再エネ最大導入ケースでは、需給調整のために大量の蓄電池が必要

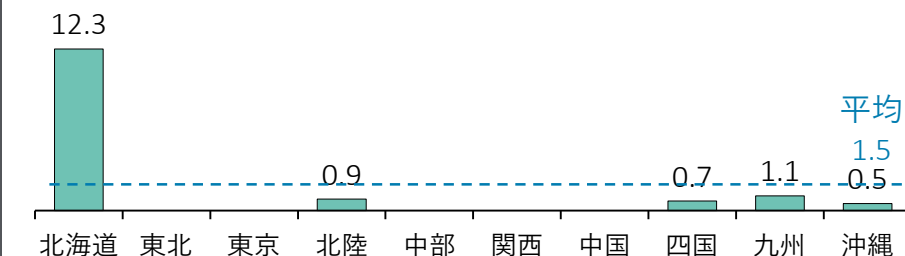
地域別の蓄電池導入量・稼働率

コスト最小化ケース

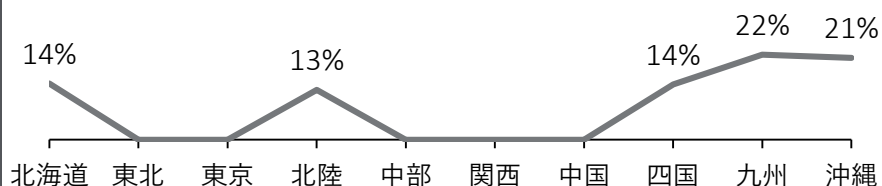
合計: 17GW

導入量 (GW)

平均
1.5



稼働率 (%)

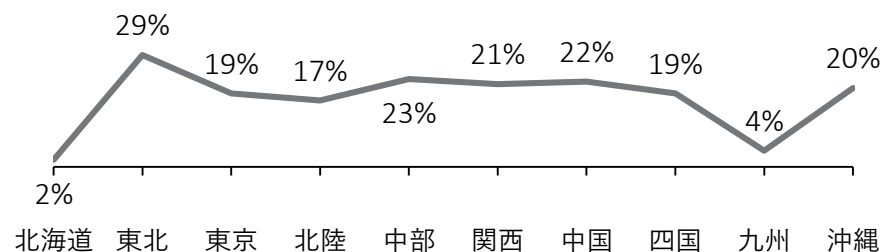
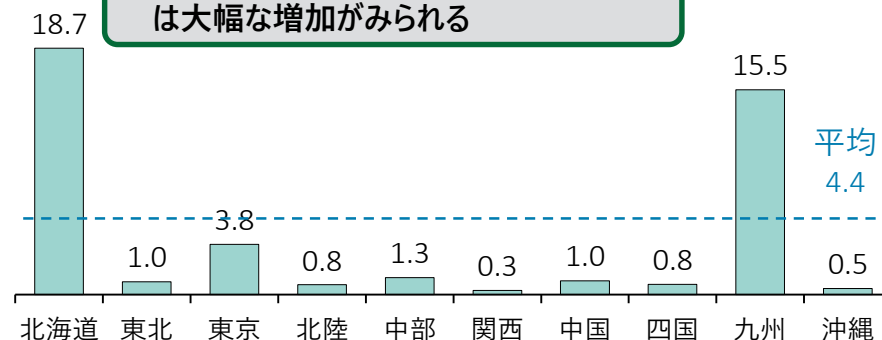


再エネ大量導入ケース

■ 全地域において蓄電池の導入量が増加する。特に再エネポテンシャル高い地域では大幅な増加がみられる

合計: 44GW

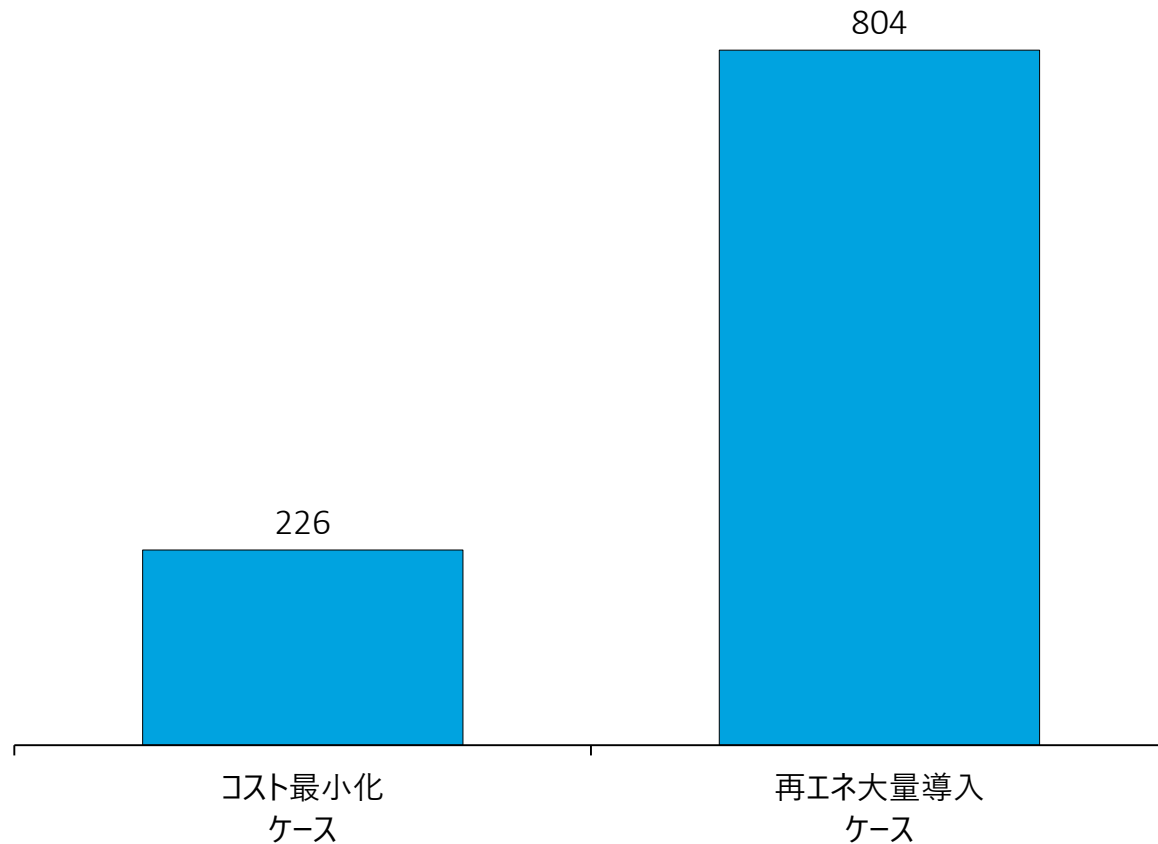
平均
4.4



【シミュレーション結果：水素生産（万トン）】

再エネ大量導入ケースでは、蓄電池に加えて水素による需給調整も大きく増加実施

カーボンニュートラル社会における水素生産量



*本シミュレーションでは、水素需要は発電、燃料電池、自動車（旅客・貨物）を含む

【シミュレーション結果：燃料電池導入量・稼働率（GW、％）】

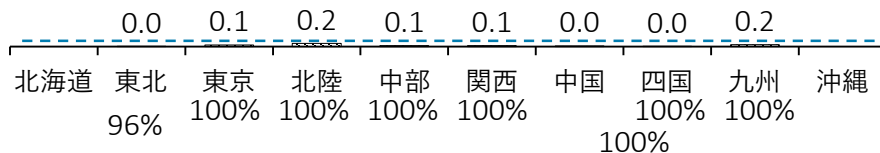
再エネ大量導入ケースでは、製造された水素を活用し燃料電池による需給調整も実施

地域別の燃料電池導入量・稼働率

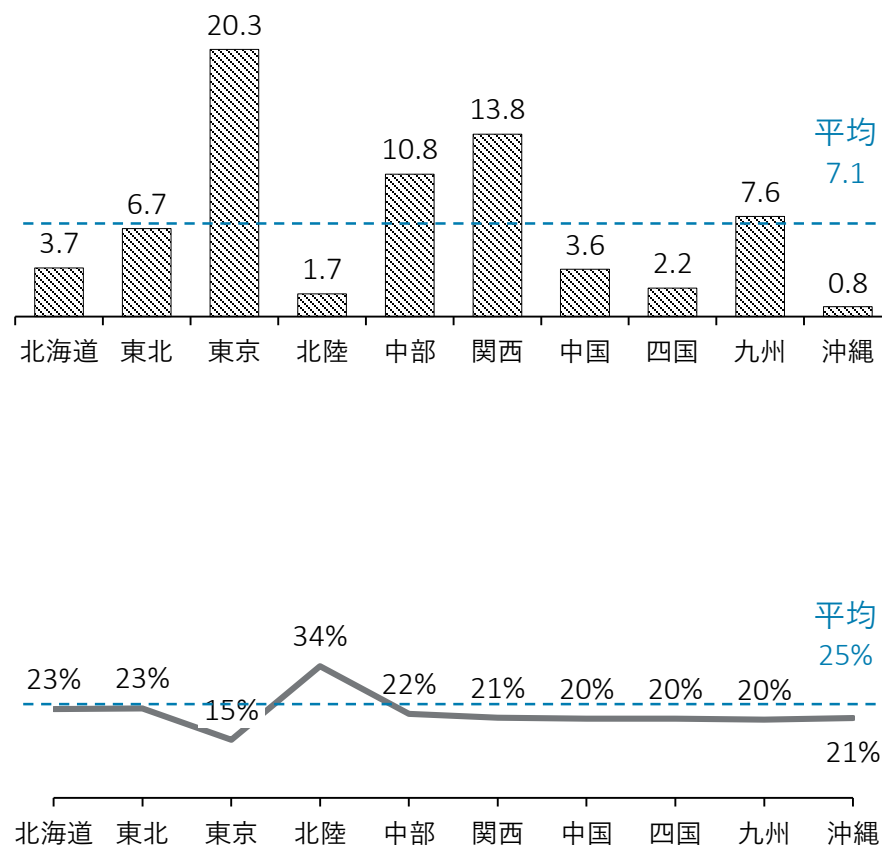
コスト最小化ケース

導入量 (GW)

稼働率 (%)



再エネ大量導入ケース

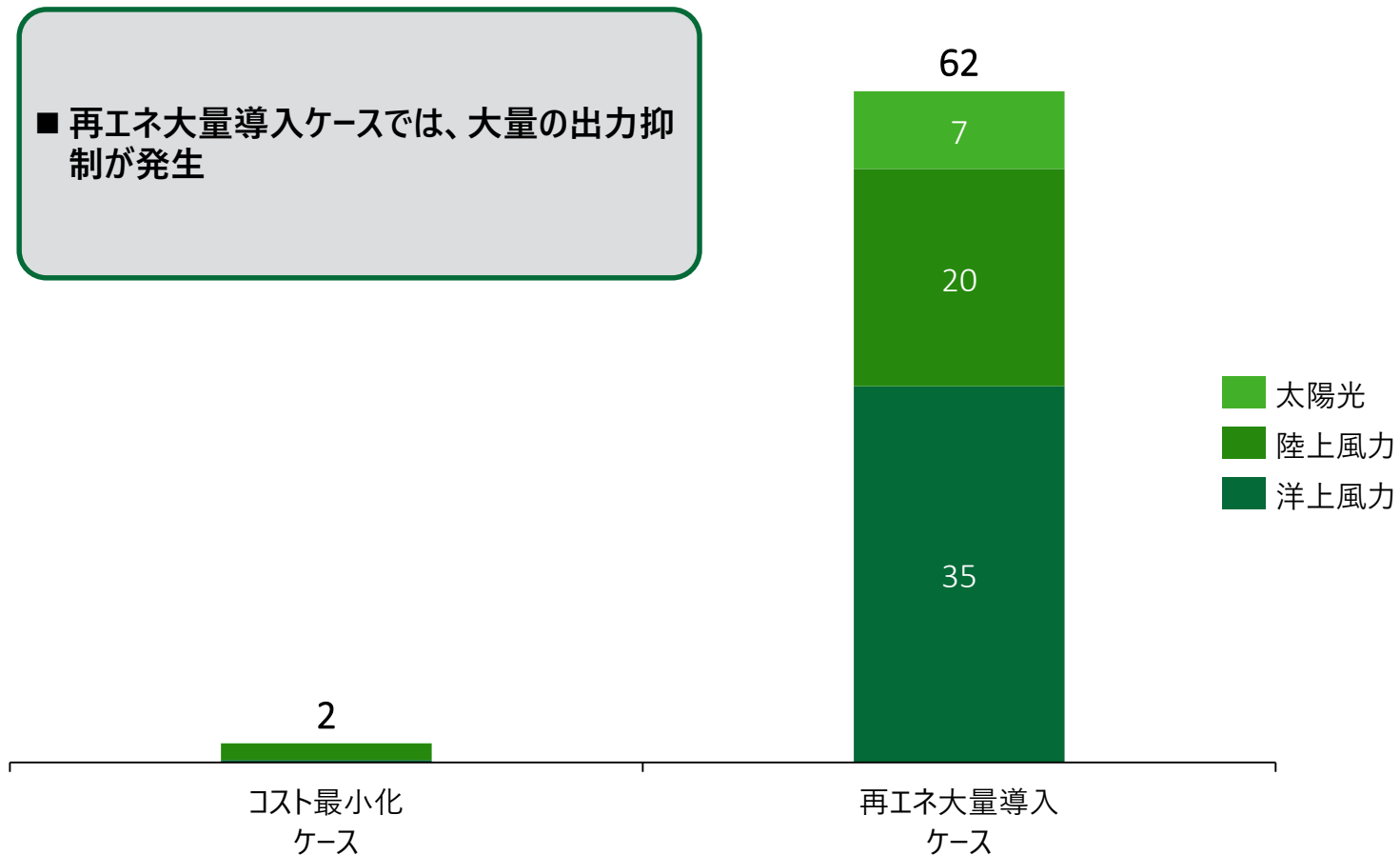


【シミュレーション結果：出力抑制（TWh）】

再エネ大量導入ケースでは、蓄エネしても経済合理性が成立しないものは出力抑制を実施

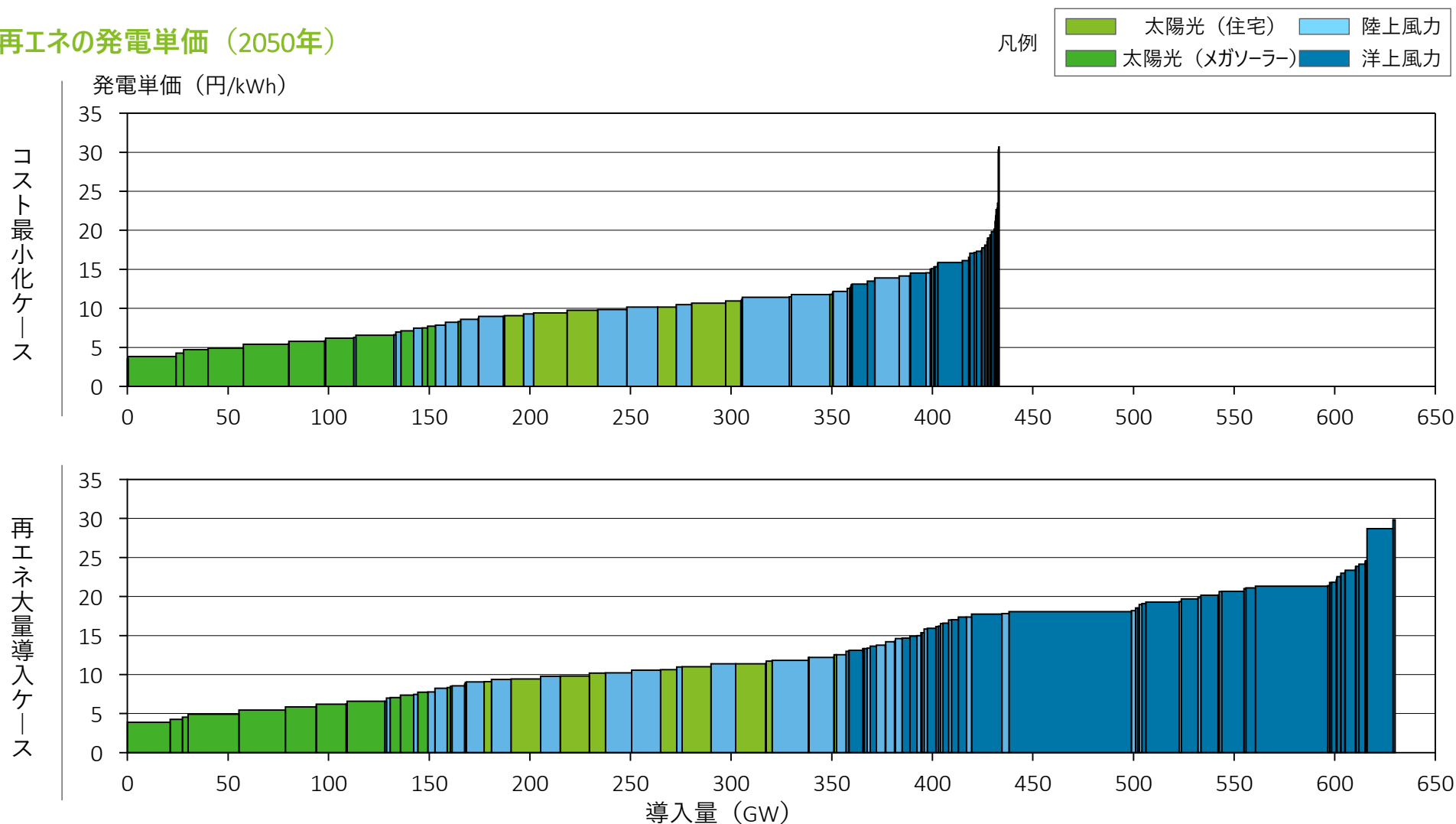
カーボンニュートラル社会における出力抑制量

単位：TWh



【再エネの発電単価の分布】 ケースによって導入される再エネが異なる

再エネの発電単価（2050年）



※出力抑制を含めた発電端のコストで安い順に並べたものであり、インフラコストは未計上。

※最終的な電源構成は、インフラコスト、火力はCCSなどのコストなどが乗ったうえでのコスト最小化を目的として最適構成される。

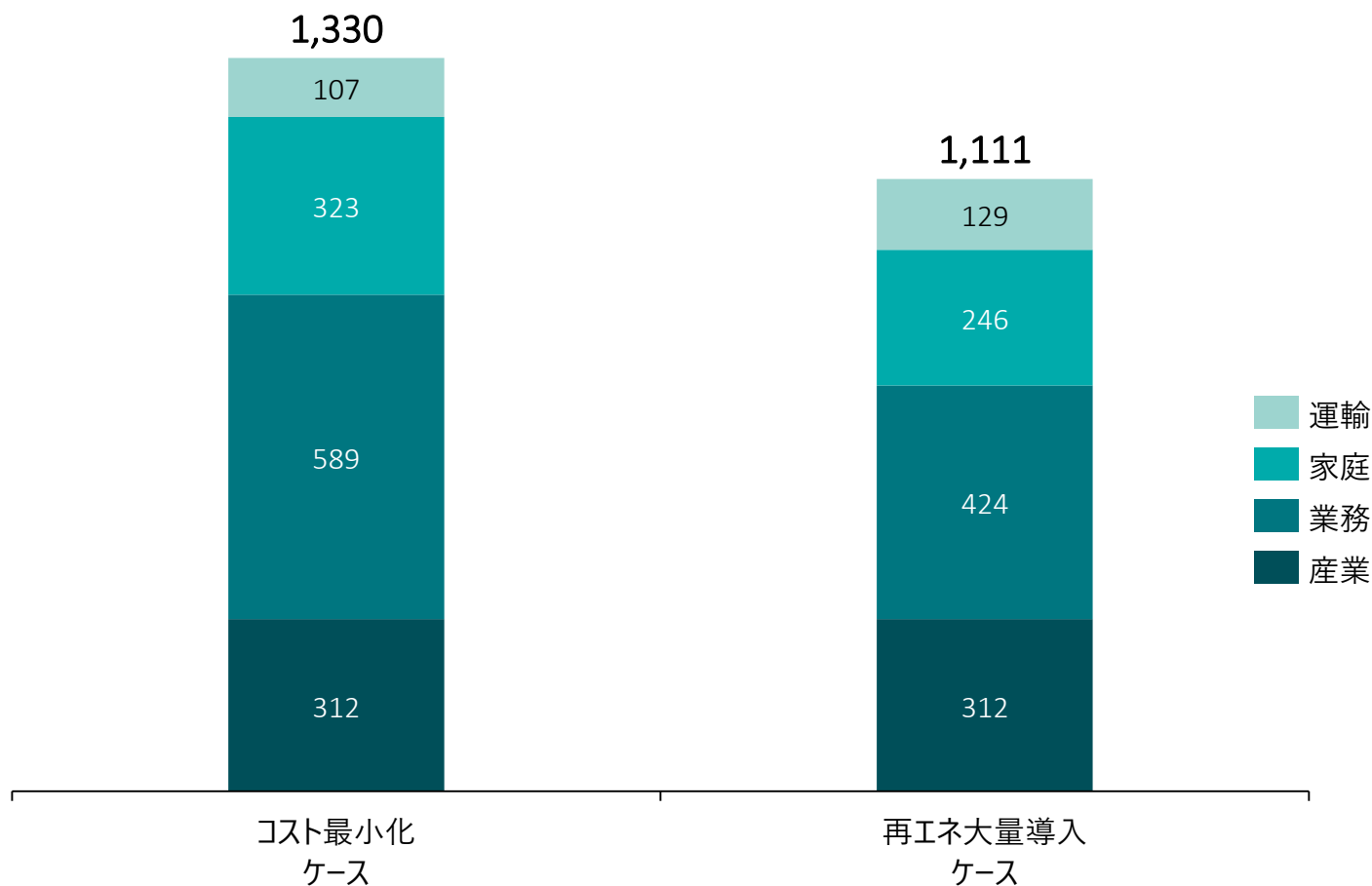
まとめ

- カーボンニュートラル社会実現には、発電電力量に占める再生可能エネルギーは71%、電力価格が約2倍となる結果を得た。
- 再エネ大量導入ケースでは、柔軟性メカニズムの一つである火力発電所のかわりに、再エネ出力抑制、蓄電池、水素での需給一致が行われる。再エネ大量導入により、自然条件の良くない場所にも再エネ発電所建設を行うこととなり、発電費用上昇を招く。
- ただし、今回の二つのシナリオは、技術情報は同じものであり、再エネの大量導入量が違いである。これは、再エネ大量導入ケースでは、火力発電の有する柔軟性の活用が限定的になる結果、カーボンニュートラル社会でエネルギーシステム全体が柔軟性を持たないことにより電力価格に影響を与えることを示したものである。
- 今回はあくまでも、技術などの情報は固定でのシミュレーションの実施であり、2050年へ向けての不透明性を考慮したさらなるシミュレーションの実施が必要。
 - **【発電技術の不透明性】**再生可能エネルギーの価格低下、性能の大幅向上も期待できる。再生可能エネルギーのみでなく、CCSの導入可能量などもカーボンニュートラル時代のエネルギーシステムに大きな影響を与える可能性がある。
 - **【柔軟性技術の不透明性】**カーボンニュートラル社会で、再生可能エネルギーが主力電源化する中、柔軟性メカニズムの詳細検討が重要。個別発電技術のみではなく、エネルギーシステム全体の視点から、柔軟性メカニズムの多様化・低価格化することによる電力価格への影響などの検討が必要。
- 2050年の時間軸で考えると、技術に関しての不透明性は高い。これらの不透明性を組み合わせて、多数のケースでのシミュレーションを実施することで、どのような技術開発がカーボンニュートラル社会実現に必要なものであるのか、どのビジネスモデルが有効であるのかなどの検討が可能となる。

(ご参考)【シミュレーション結果：電力需要 (TWh)】
最終的な電力需要は以下の通り

カーボンニュートラル社会における電力需要

単位：TWh



デロイト トーマツ グループは、日本におけるデロイト アジア パシフィック リミテッドおよびデロイト ネットワークのメンバーであるデロイト トーマツ 合同会社ならびにそのグループ法人（有限責任監査法人 トーマツ、デロイト トーマツ コンサルティング 合同会社、デロイト トーマツ ファイナンシャル アドバイザリー 合同会社、デロイト トーマツ 税理士 法人、DT 弁護士 法人およびデロイト トーマツ コーポレート ソリューション 合同会社を含む）の総称です。デロイト トーマツ グループは、日本で最大級のビジネス プロフェッショナル グループのひとつであり、各法人がそれぞれの適用法令に従い、監査・保証業務、リスク アドバイザリー、コンサルティング、ファイナンシャル アドバイザリー、税務、法務等を提供しています。また、国内約30都市以上に1万名を超える専門家を擁し、多国籍企業や主要な日本企業をクライアントとしています。詳細はデロイト トーマツ グループ Web サイト（www.deloitte.com/jp）をご覧ください。

Deloitte（デロイト）とは、デロイト トウシュート マツ リミテッド（“DTTL”）、そのグローバル ネットワーク組織を構成するメンバー ファームおよびそれらの関係法人（総称して“デロイト ネットワーク”）のひとつまたは複数を指します。DTTL（または“Deloitte Global”）ならびに各メンバー ファームおよび関係法人はそれぞれ法的に独立した別個の組織体であり、第三者に関して相互に義務を課しまたは拘束させることはありません。DTTL および DTTL の各メンバー ファームならびに関係法人は、自らの作為および不作為についてのみ責任を負い、互いに他のファームまたは関係法人の作為および不作為について責任を負うものではありません。DTTL はクライアントへのサービス提供を行いません。詳細は www.deloitte.com/jp/about をご覧ください。

デロイト アジア パシフィック リミテッドはDTTLのメンバーファームであり、保証有限責任会社です。デロイト アジア パシフィック リミテッドのメンバーおよびそれらの関係法人は、それぞれ法的に独立した別個の組織体であり、アジア パシフィック における100を超える都市（オークランド、バンコク、北京、ハノイ、香港、ジャカルタ、クアラルンプール、マニラ、メルボルン、大阪、ソウル、上海、シンガポール、シドニー、台北、東京を含む）にてサービスを提供しています。

Deloitte（デロイト）は、監査・保証業務、コンサルティング、ファイナンシャル アドバイザリー、リスク アドバイザリー、税務およびこれらに関連するプロフェッショナル サービスの分野で世界最大級の規模を有し、150を超える国・地域にわたるメンバーファームや関係法人のグローバル ネットワーク（総称して“デロイト ネットワーク”）を通じFortune Global 500®の8割の企業に対してサービスを提供しています。“Making an impact that matters”を自らの使命とするデロイトの約312,000名の専門家については、（www.deloitte.com）をご覧ください。

本資料は皆様への情報提供として一般的な情報を掲載するのみであり、デロイト トウシュート マツ リミテッド（“DTTL”）、そのグローバル ネットワーク組織を構成するメンバーファームおよびそれらの関係法人（総称して“デロイト ネットワーク”）が本資料をもって専門的な助言やサービスを提供するものではありません。皆様の財務または事業に影響を与えるような意思決定または行動をされる前に、適切な専門家にご相談ください。本資料における情報の正確性や完全性に関して、いかなる表明、保証または確約（明示・黙示を問いません）をするものではありません。またDTTL、そのメンバーファーム、関係法人、社員・職員または代理人のいずれも、本資料に依拠した人に関係して直接また間接に発生したいかなる損失および損害に対して責任を負いません。DTTLならびに各メンバーファームおよびそれらの関係法人はそれぞれ法的に独立した別個の組織体です。