



MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS
OF DENMARK

デンマークが見据える 化石燃料を一切使わない社会

デンマーク王国大使館 エネルギー担当官 高橋叶 kantak@um.dk

August 2023



**MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS
OF DENMARK**

本日本話する内容

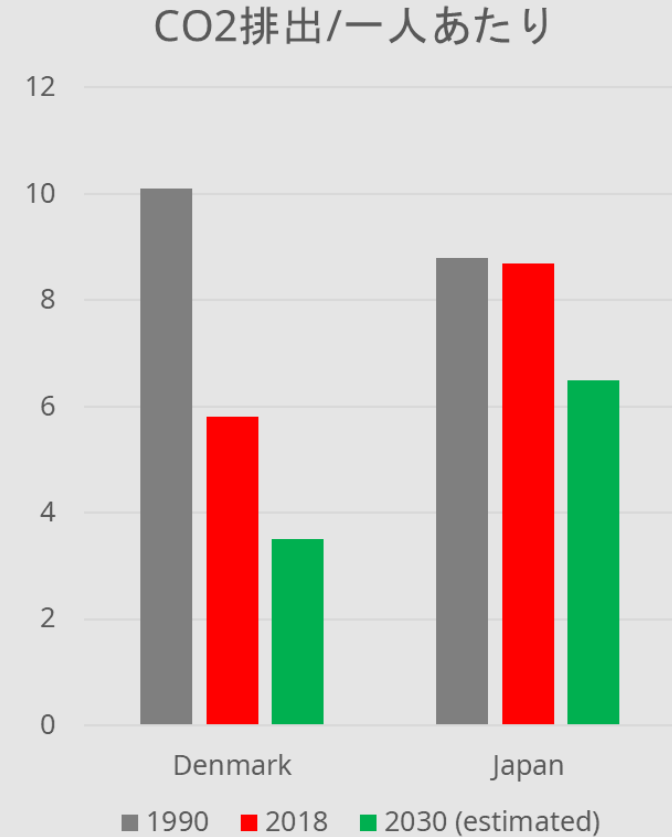
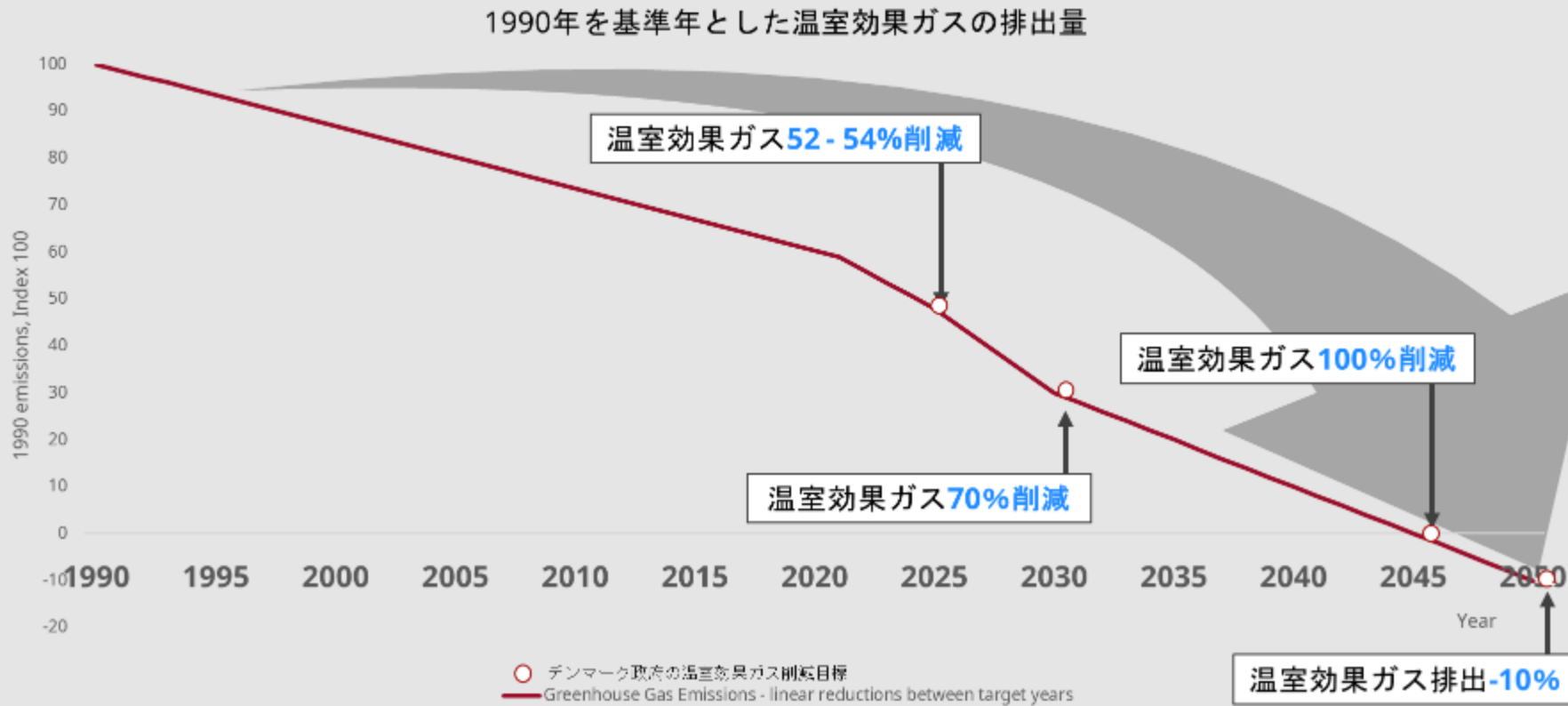
- デンマークの脱炭素政策
- なぜ脱炭素に取り組むのか
- デンマークのエネルギーシステム
- デンマークが描く脱炭素社会
- 日本の文脈でどう考えるか



Danish embassy, designed by Fumihiko Maki

デンマークの脱炭素政策

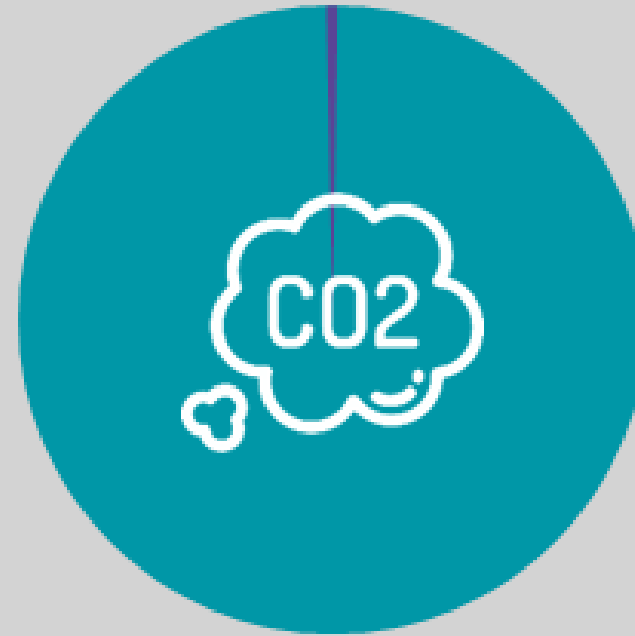
デンマークは2050年までにCO2の純吸収国に



しかしながら、デンマーク一国では...



... 世界人口に占める
割合は**0,07 %**

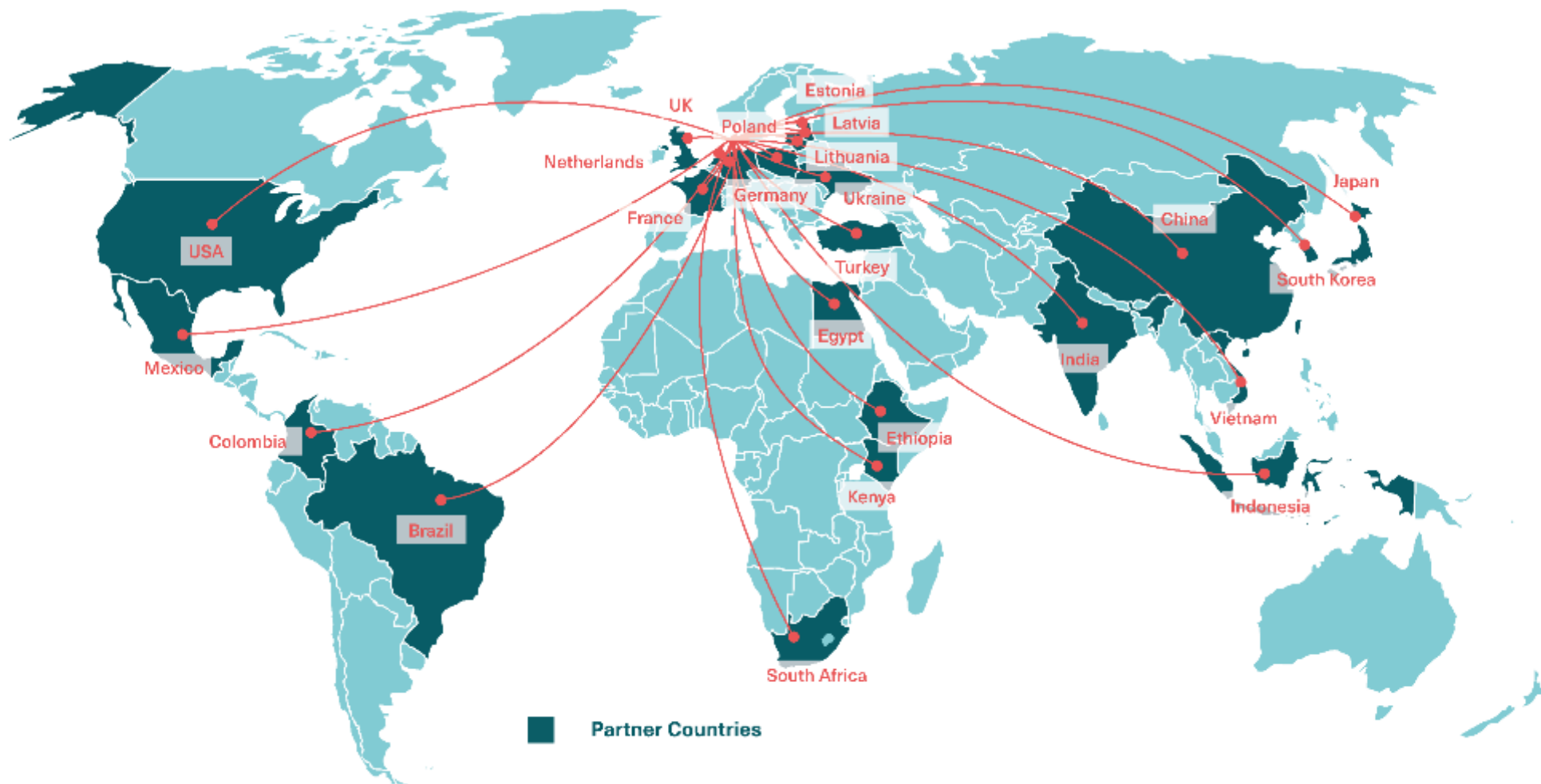


... グローバルなCO2排出
に占める割合は**0,1 %**



だからこそ、連携を

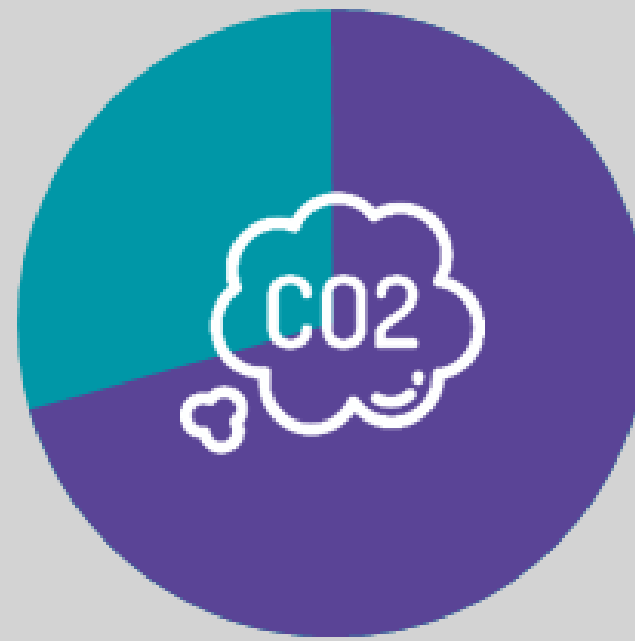
2023年3月現在、**24**か国と連携体制下に



結果として、パートナー国を合わせると...



... 世界人口に占める
割合は**61%**



... グローバルなCO2排出
に占める割合は**70%**

野心的取組は、国民からの要請



2019年選挙前、国会. Source: Folkets Klimamarch København/facebook

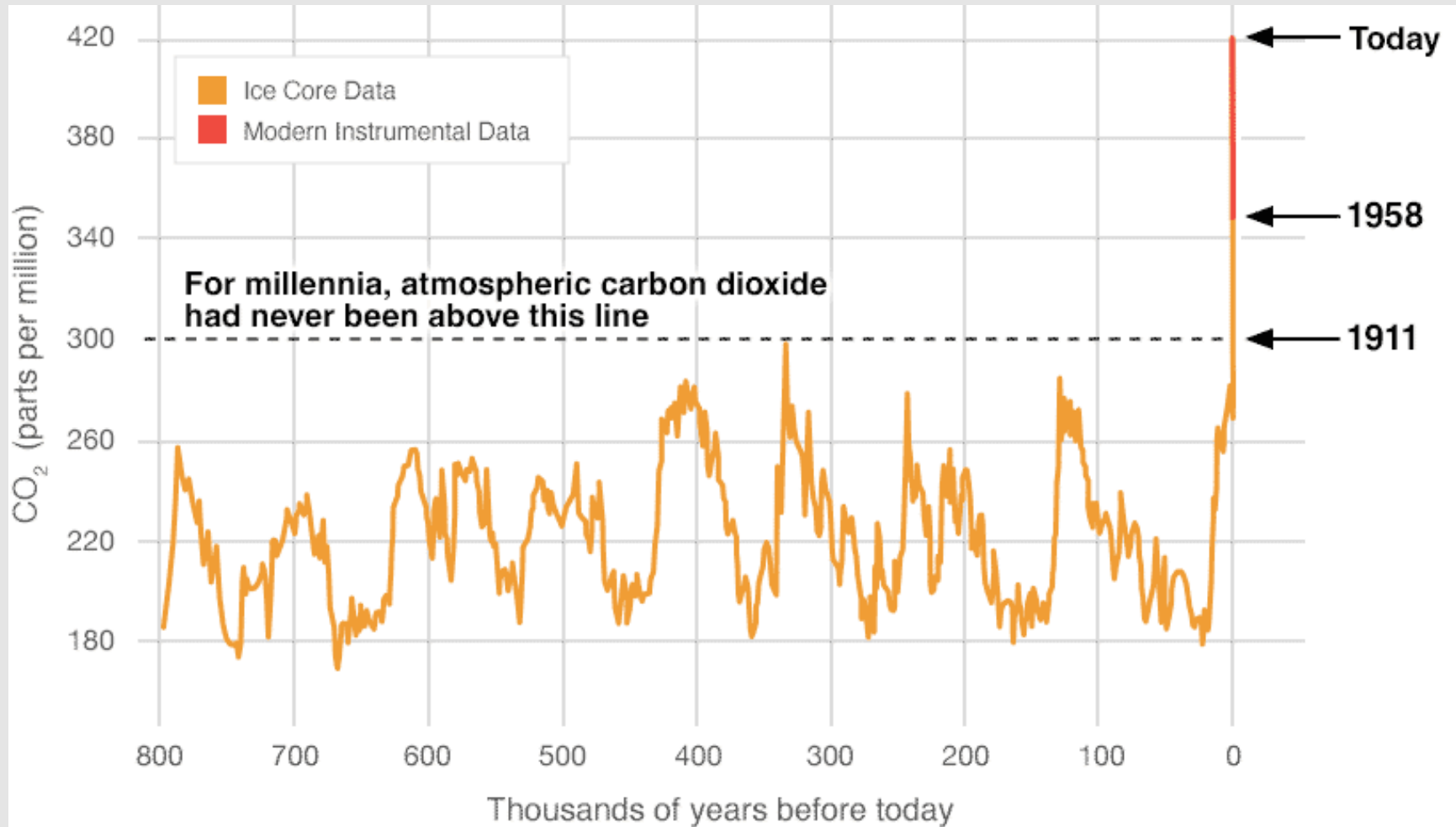
- 79%のデンマーク人が、気候変動は**21世紀最大の人類に対する脅威**と認識（欧州最大の割合）
- 2019年の選挙前、首都コペンハーゲンだけで**4万人**が集まりデモを実施
- 2022年の選挙前には12の都市でデモが行われ、コペンハーゲンだけで**5万人**が集結

なぜ脱炭素に取り組むのか

①気候変動の深刻性

CO2が気候変動を引き起こす

地球の気候は常に変動してきているが、CO2をはじめとした温室効果ガスのかつて例を見ないレベルの増加により、過去経験のない速度で変化が進んでいる

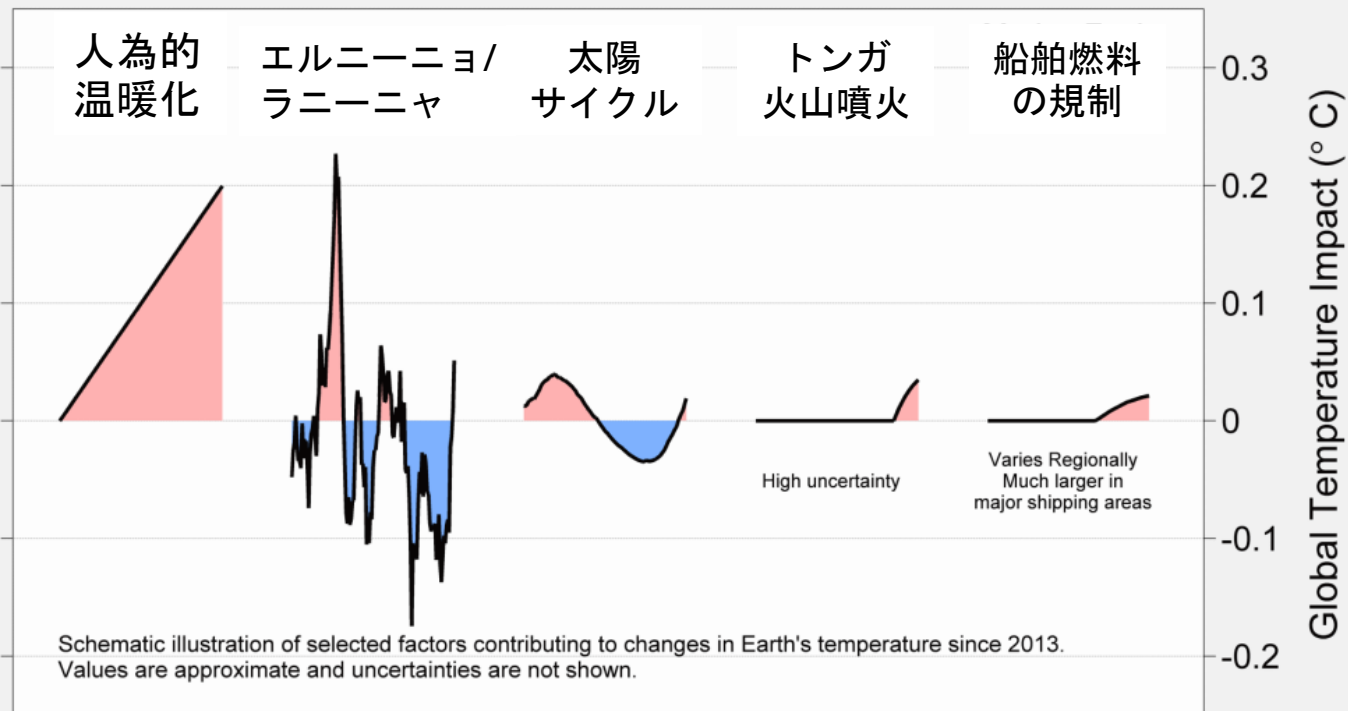


Source: NASA, [Carbon Dioxide | Vital Signs - Climate Change: Vital Signs of the Planet \(nasa.gov\)](#)
Data is reconstructed from ice cores from Greenland

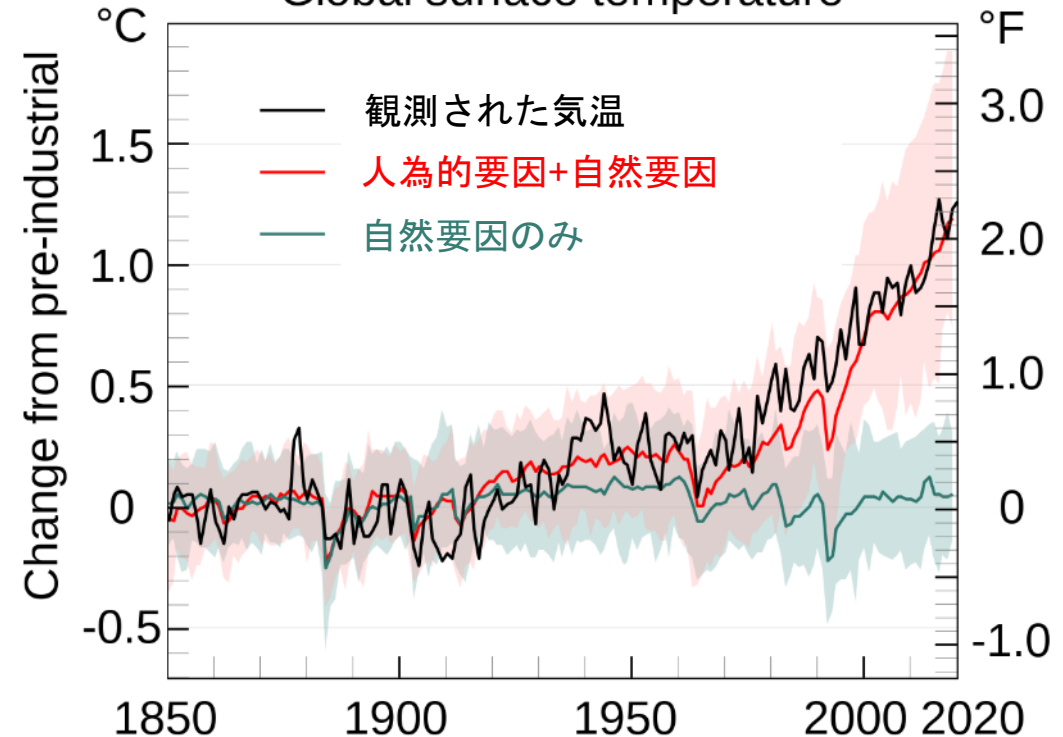
人類が気候変動を引き起こしているのは「疑う余地がない」

気候予測コンピューターモデルは人為的要因と自然要因を分けてシミュレーションでき、人為的影響なしでは現在の温暖化の状況を説明できない

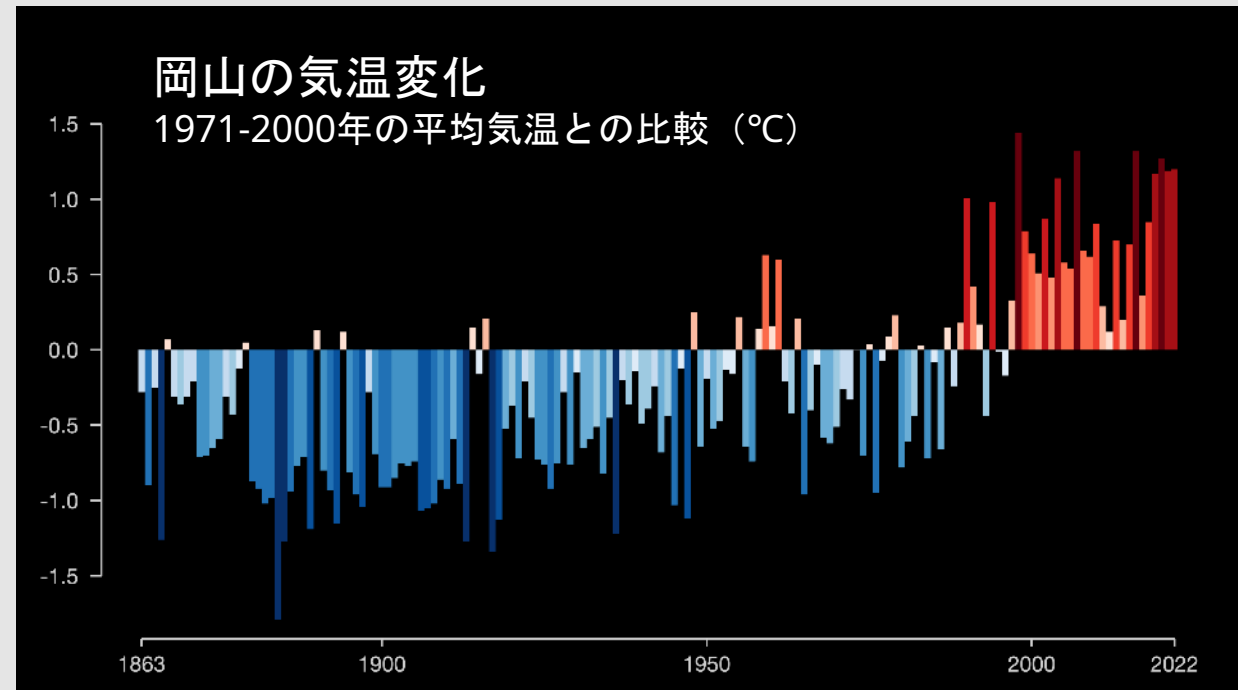
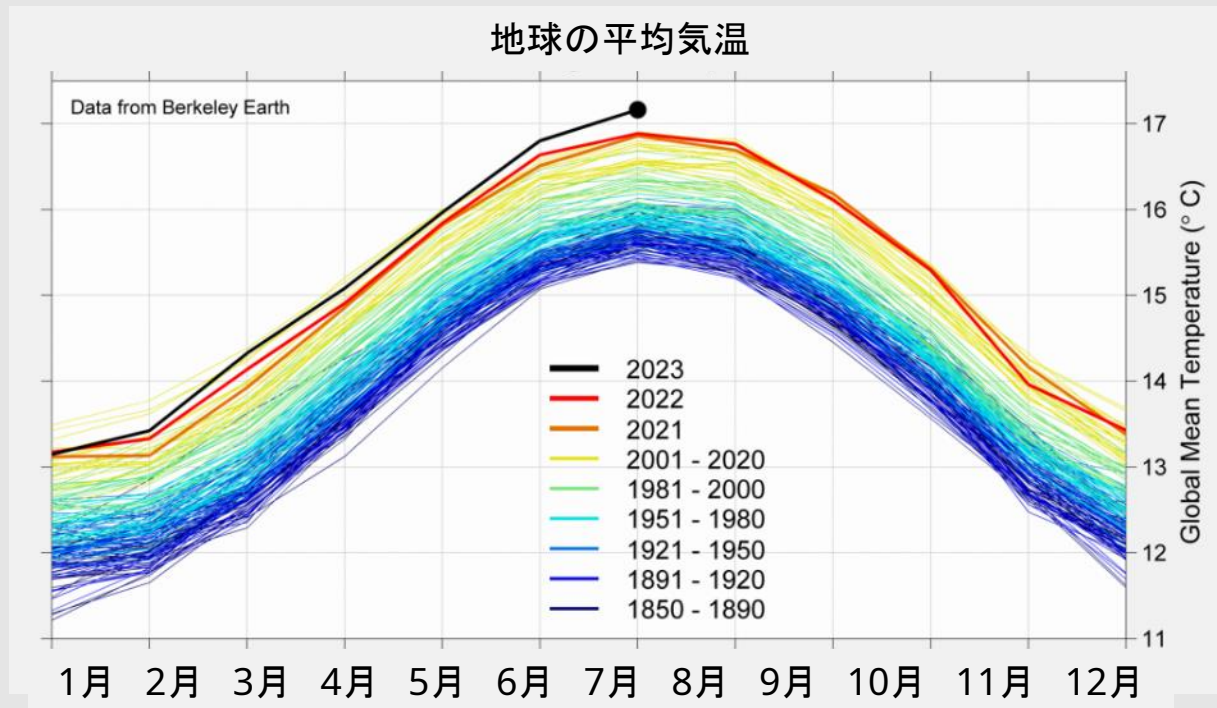
過去10年間の世界の気温変化への要因別寄与レベル



Global surface temperature

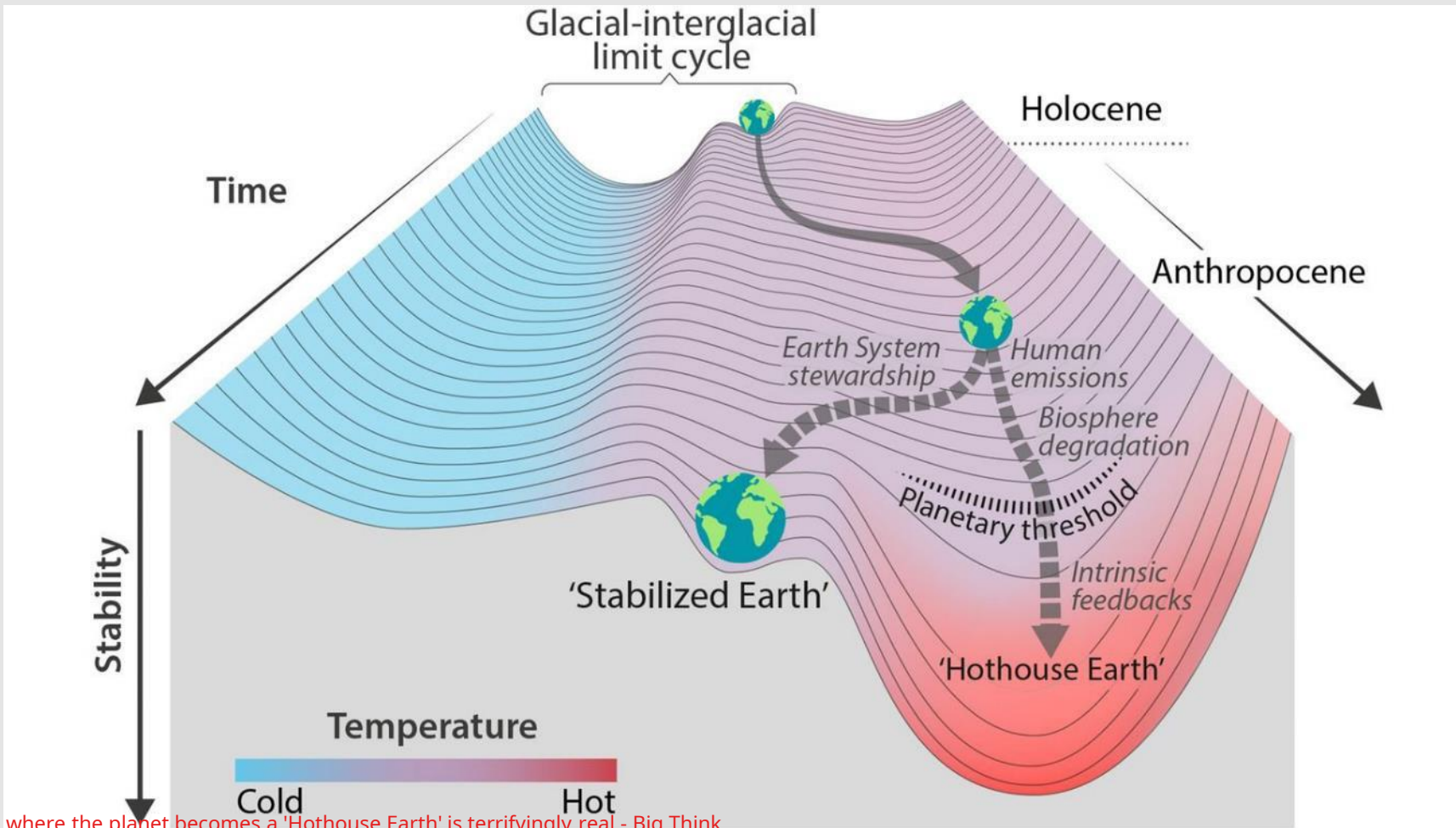


平均気温の上昇傾向はここまで明確に表れている



今行動しなければ、臨界点を超えるかもしれない

- 気候変動の進行は、気温の上昇とともに、干ばつや山火事等の頻発にもつながる
- 森林や永久凍土の消滅によりさらに大量のCO2が放出される負のスパイラルが起こり始めると、気候変動はさらに加速度的に進行し、不可逆的な影響をもたらす



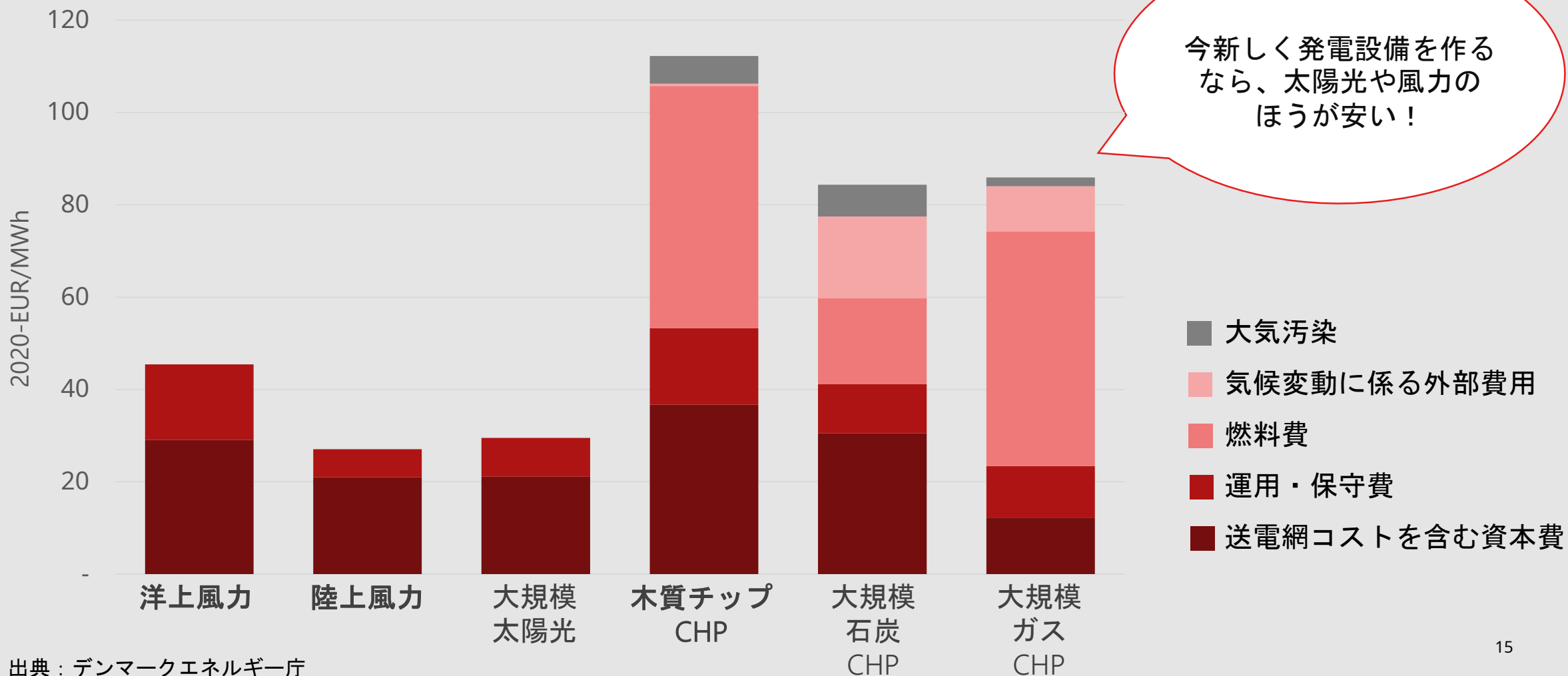
なぜ脱炭素に取り組むのか

② 経済的動機

理由①：コストが安価なため

太陽光や風力による発電コストは減少を続けており、従来の電源より安価になっている

デンマークの発電種別発電コスト



理由②：不安定な化石燃料価格からの自立

風力の発電コストは安定的に低減

×不安定

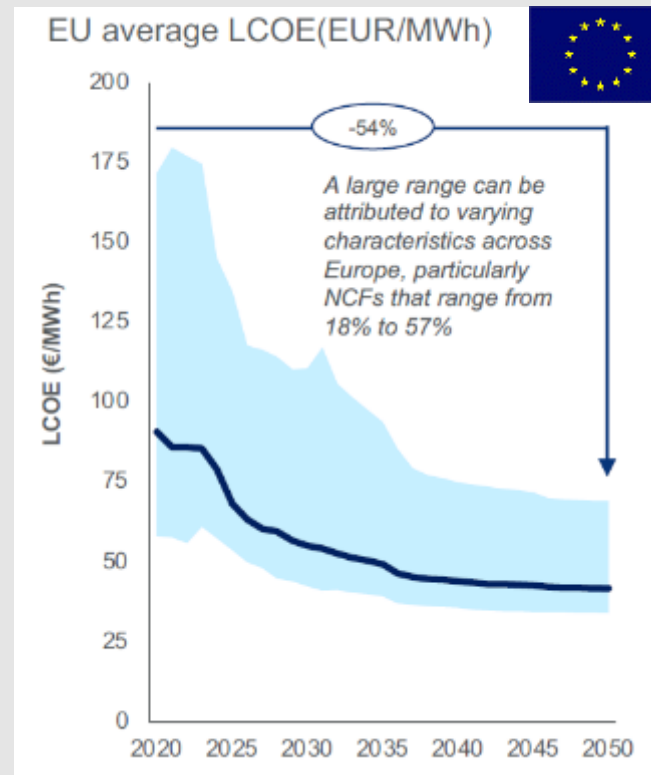
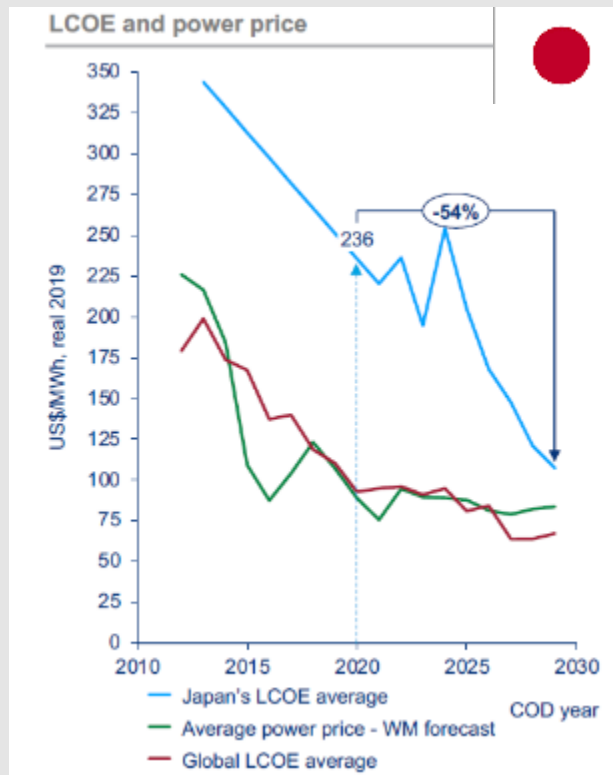
◎安定して
安くなる

洋上風力の発電コスト見通し

天然ガス
USD/MMBU



石炭
USD/Tons



出典：WoodMac, 2021

理由③：ロシアへのエネルギー依存からの脱却

ウクライナ侵攻を受け、北海周辺国・バルト海周辺国で洋上風力の拡大に合意



ロシアからの自立を進めるため、協力して風力開発を急ピッチで進める

2022
15 GW



2030
85 GW



2050
240 GW

理由④：ビジネスの機会を失わないため

グローバル企業の中には、取引先にも再エネ100%の達成を求める企業も



「再エネ100%じゃないなら、おたくとは取引しませんよ」

カーボンニュートラルを達成する20数年後には、化石燃料を用いるあらゆるものが無くなっているはず

起こりうる変化

1. 化石燃料価格の高騰・不安定化・高課税化
2. 化石燃料の流通インフラ維持が難しくなり、地方から先にガソリンスタンド等が撤退
3. あらゆる化石燃料駆動の製品や設備が座礁資産化する（持っけていても使えなくなる）

つかえなくなるもの

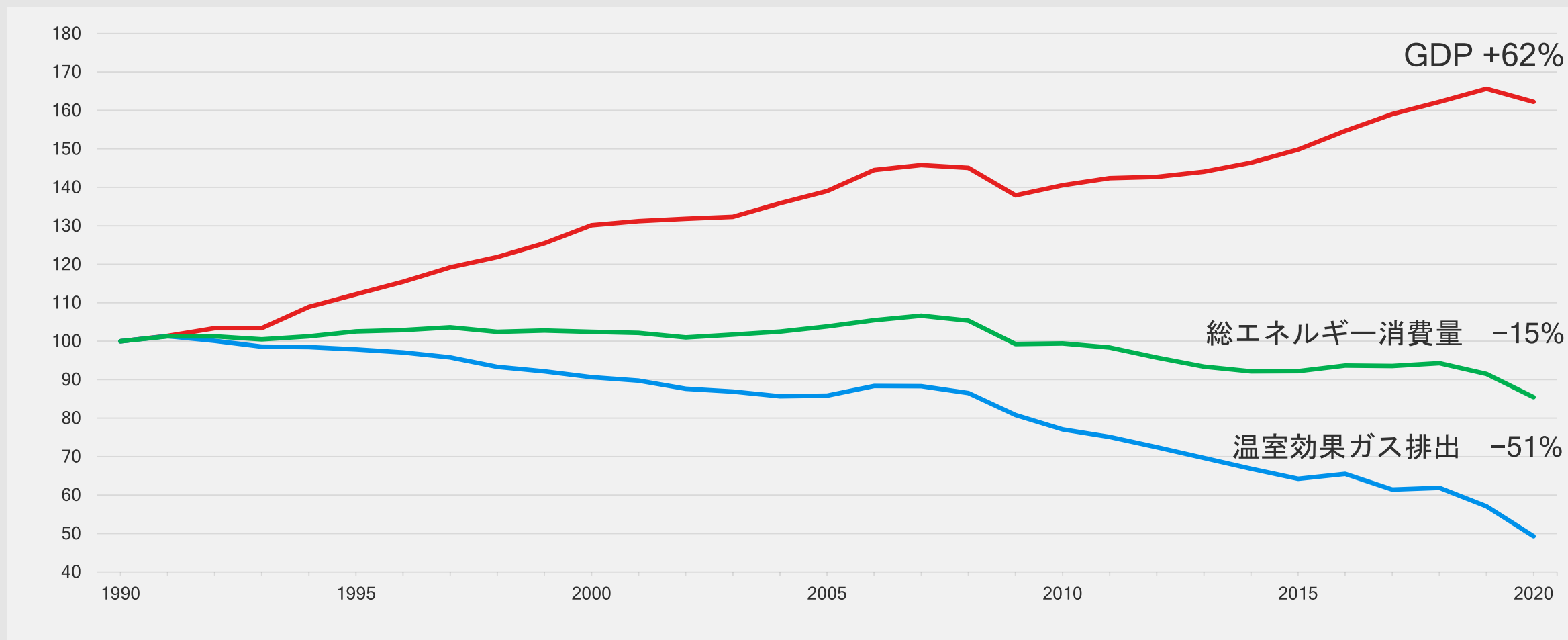
- ガソリン車
- ハイブリッド車
- 灯油ストーブ
- ガスストーブ
- 油駆動の農業器具
- ガス給湯器
- 石油・石炭・ガス火力発電
- 灯油・重油・ガスボイラー



変化が表面化してくる前に行動し、準備しておくことが重要

デンマークのエネルギーシステム

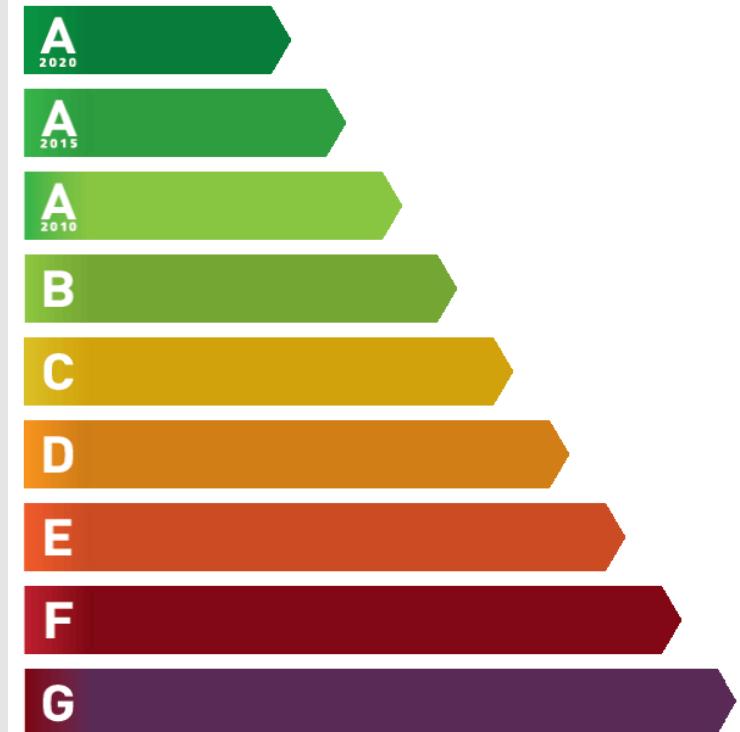
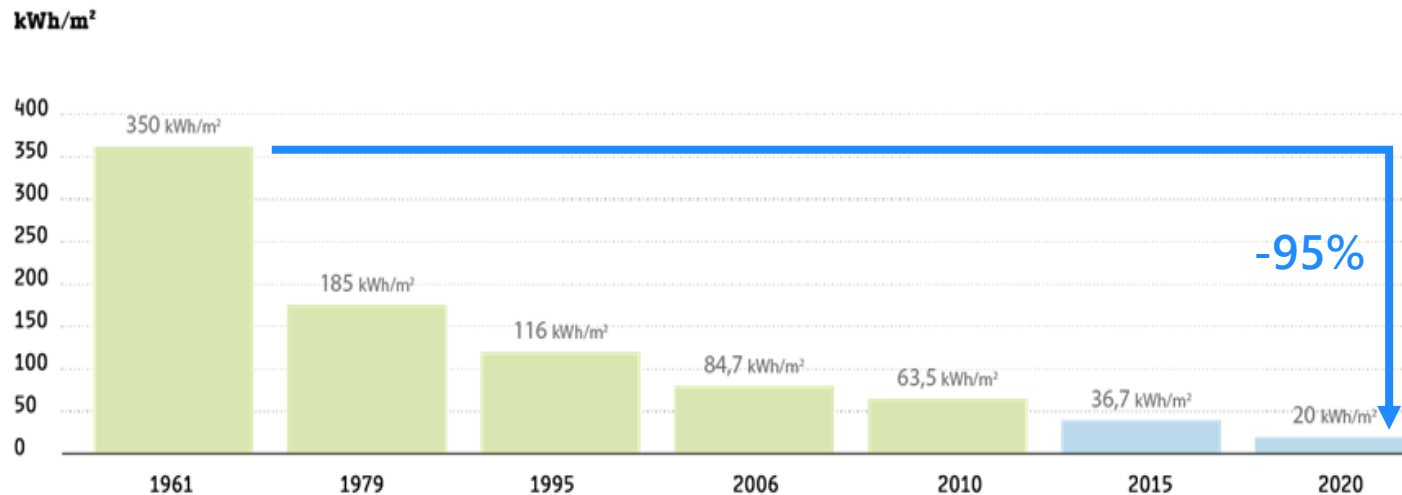
何より先にまず「エネルギー効率化」



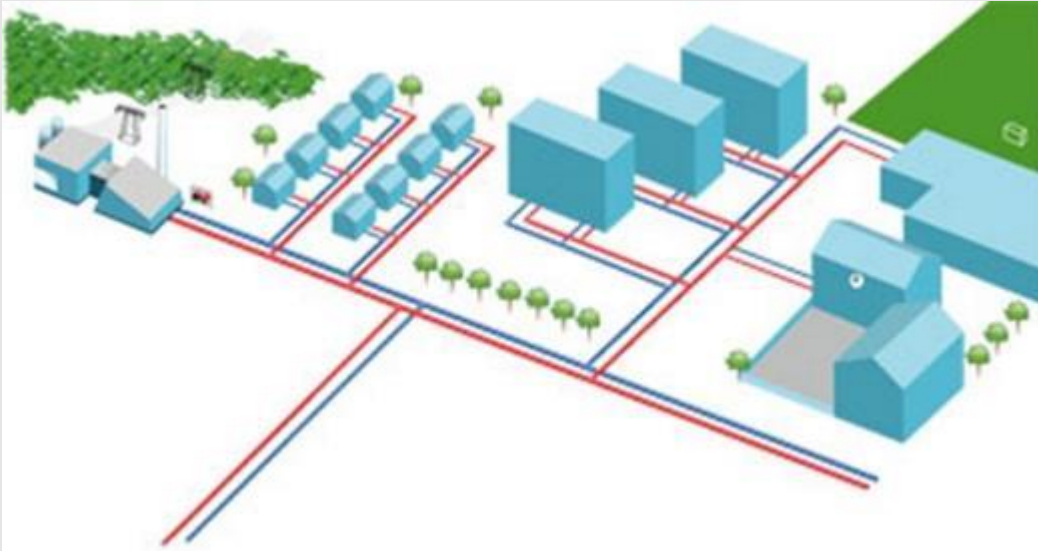
建物の断熱・気密は真っ先に取り組んできた

- 健康や仕事の効率、快適性等でもメリットは大きい
- 建物は長く使われるため、新築が最高レベルの基準で作られること、既存建築の改修を急ぎ進めることが重要

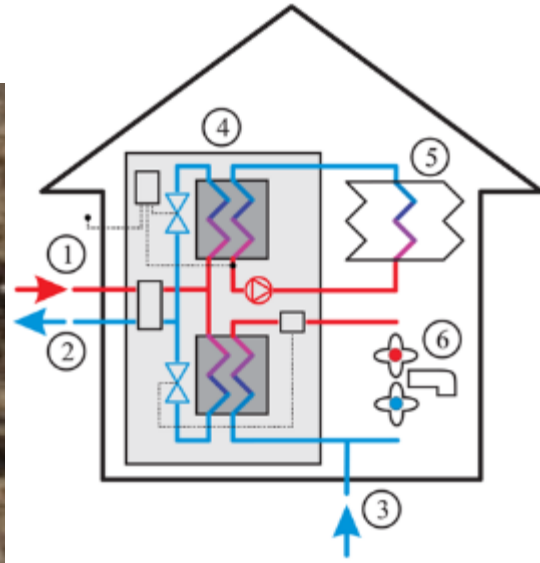
新築へのエネルギー性能基準
2020年からはほぼゼロエネルギー消費の基準へ



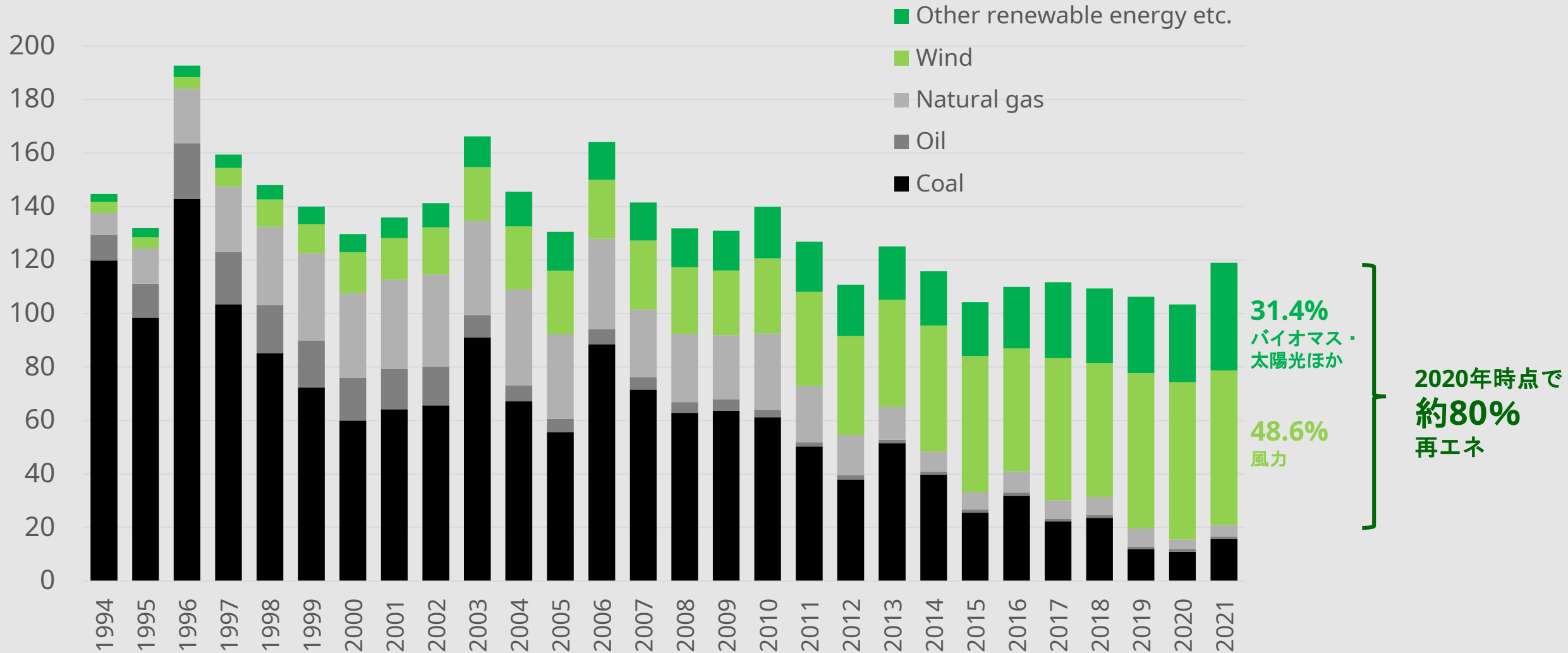
「地域熱供給」を活かしたあらゆる廃熱の回収



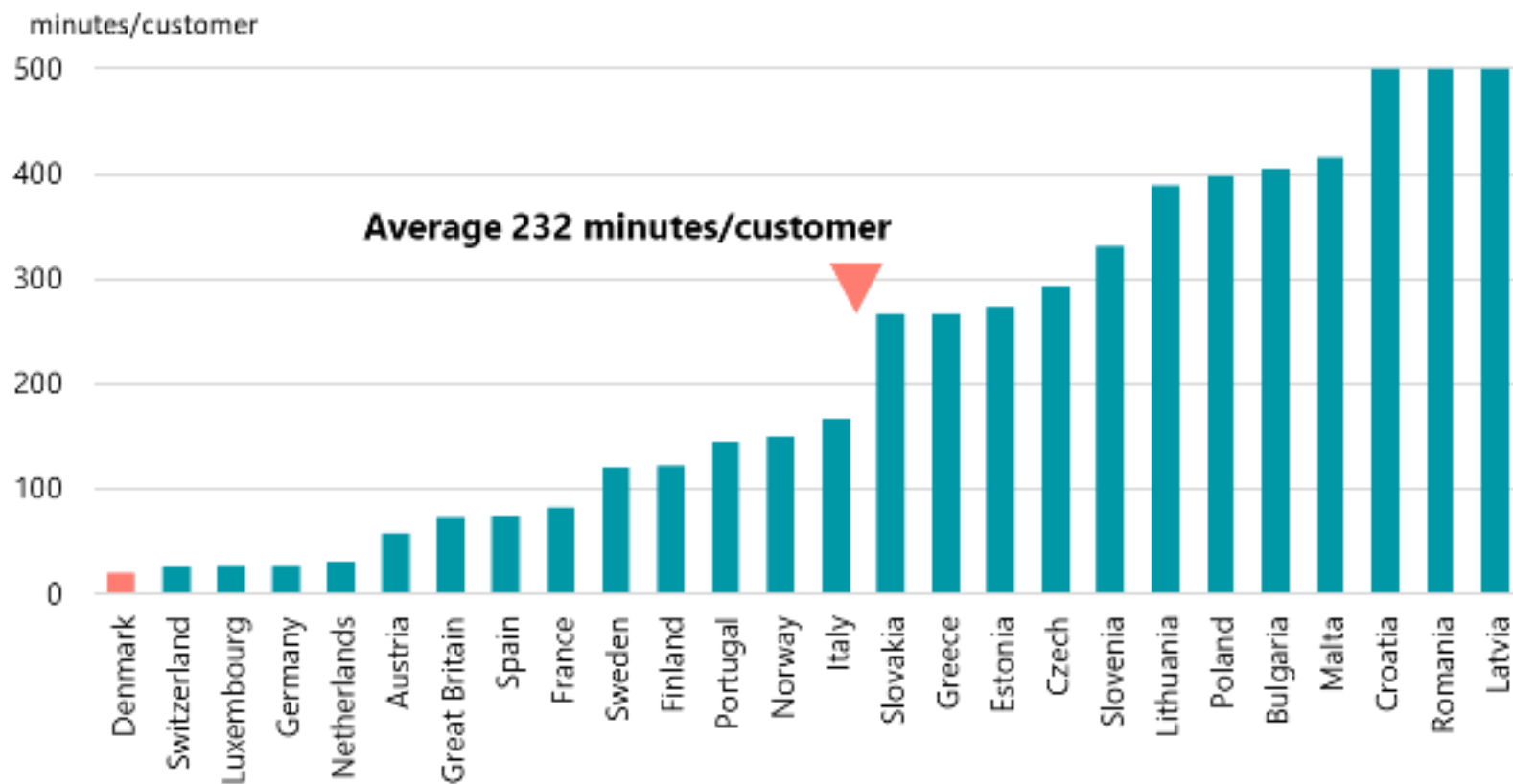
- 水道インフラのように張り巡らされた温水管で、暖房・給湯用の熱を地域単位で供給
- 発電所やごみ焼却場や工場、データセンター等あらゆる熱源からの廃熱を回収、地域で使う
- 需要家は使用した熱量に応じて熱料金を支払う（熱メーター）
- デンマークでは約65%の建物が地域熱供給に接続



デンマークの電力生産



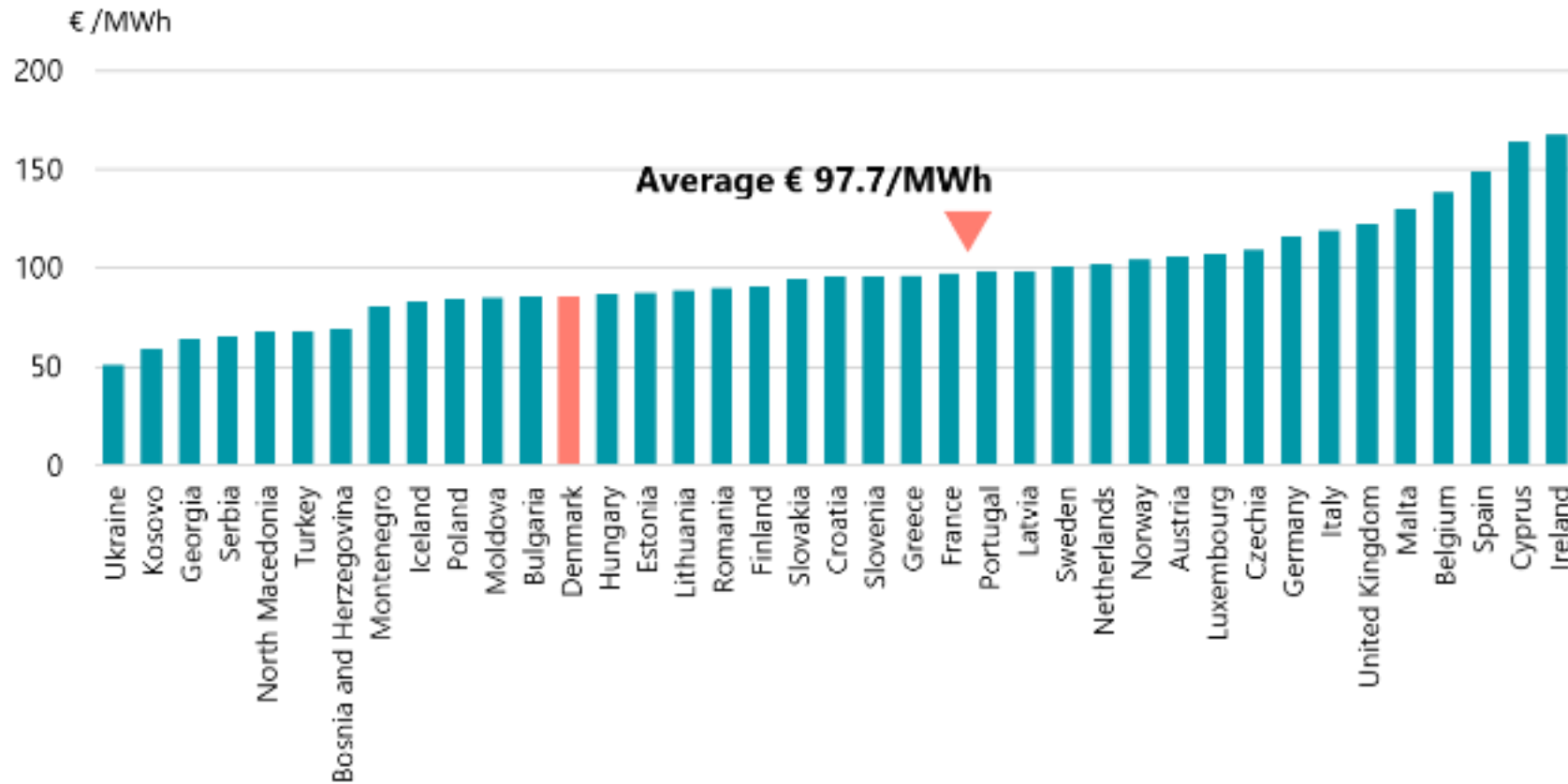
年間の停電時間(分):2010-2016平均



Security of Supply

欧州で最も
ハイレベルな
電力の安定供給

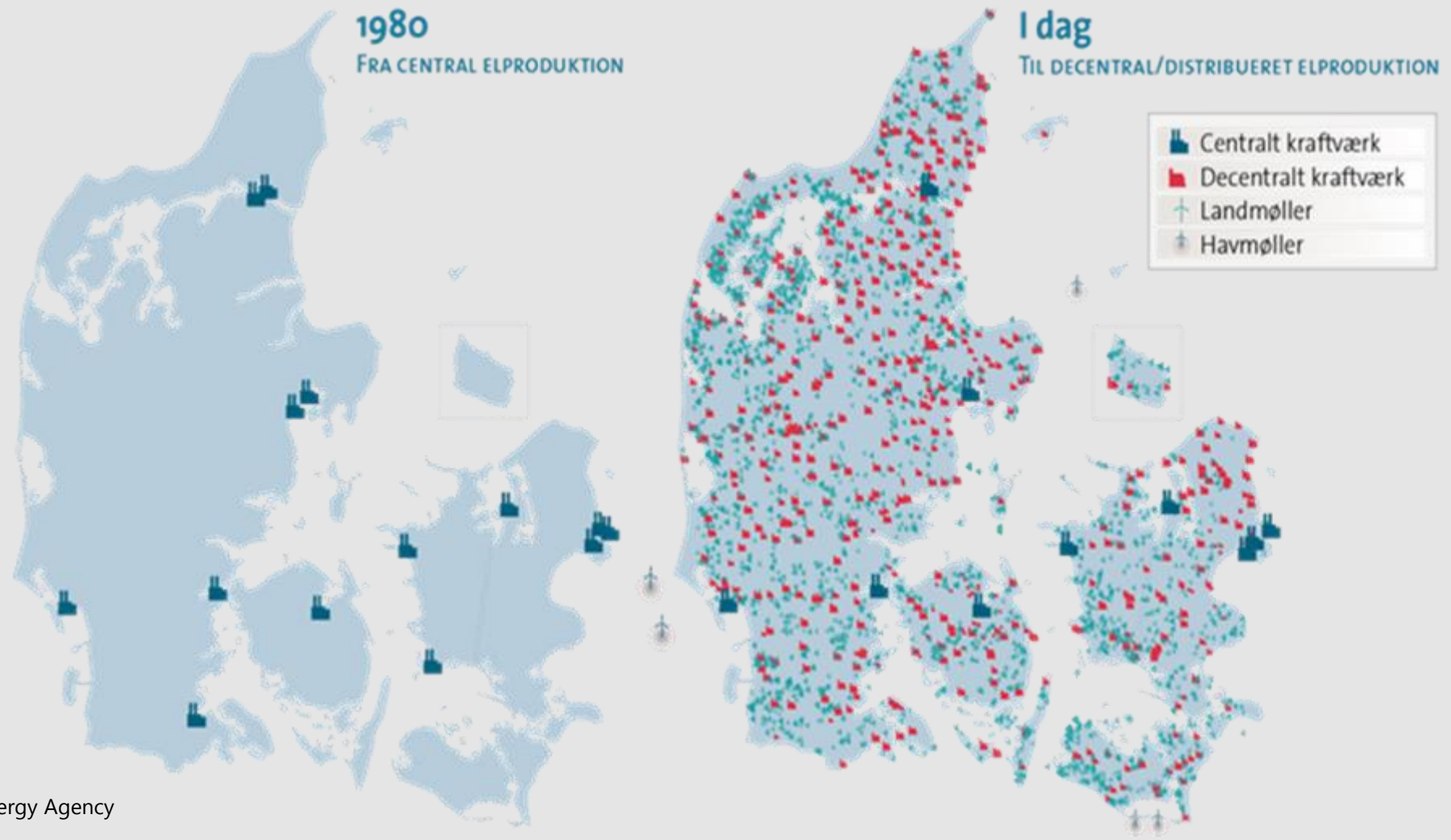
税関係を除いた電力料金:2019年



Costs

消費者の電力価格は欧州の平均より安価

大規模集中型から小規模分散型のエネルギーシステムへ



Source: Danish Energy Agency

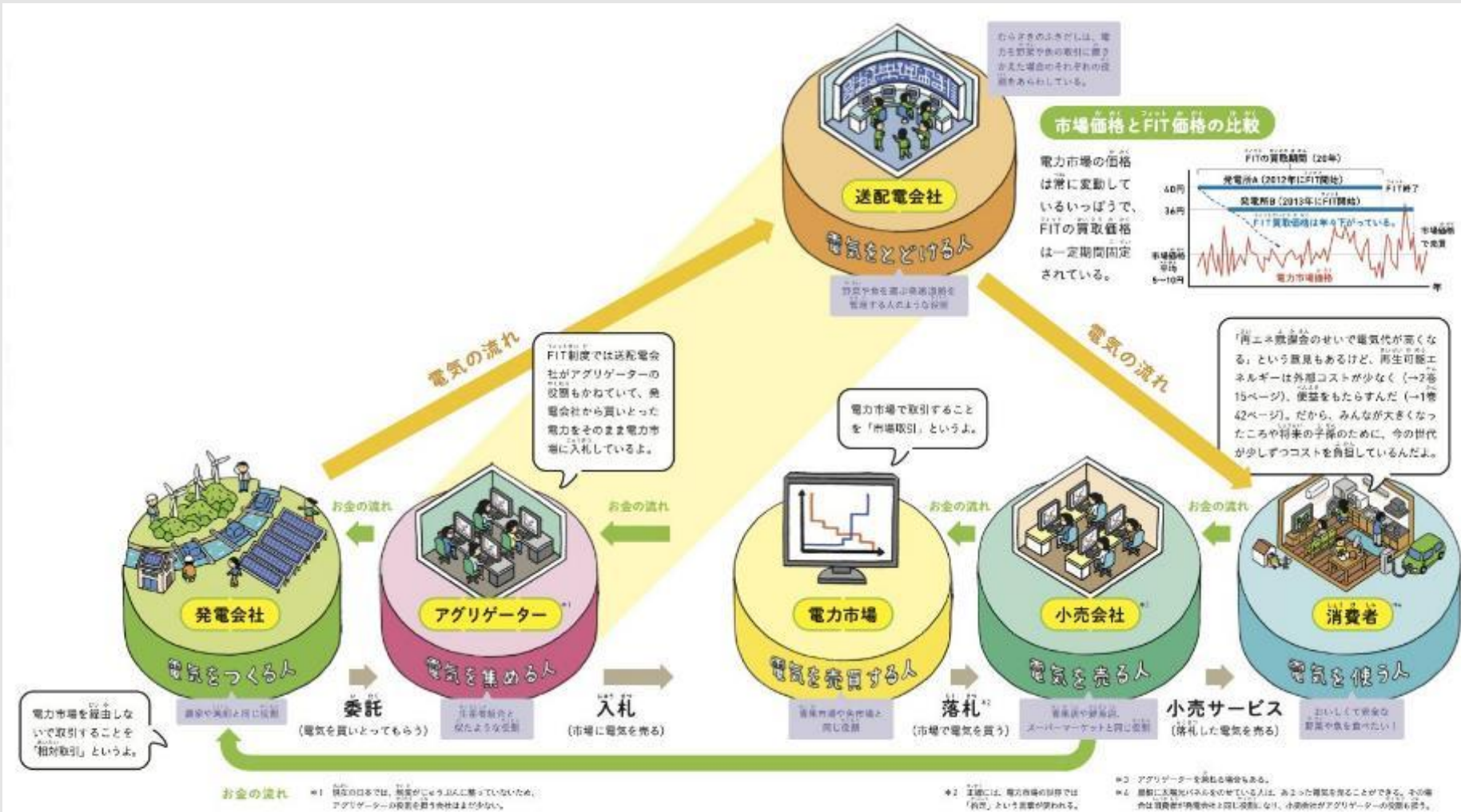
エネルギーシステムはスマートで柔軟でなければならない



- 太陽光や風力からの電力生産は変動する。
電力消費も同様
- 発電から消費まで、エネルギーシステム内ますます多くの要素が入ってくることになる。
これをいかにうまく繋いで賢くコントロールするかが鍵



電力は市場を通して届けられる



農家

→市場

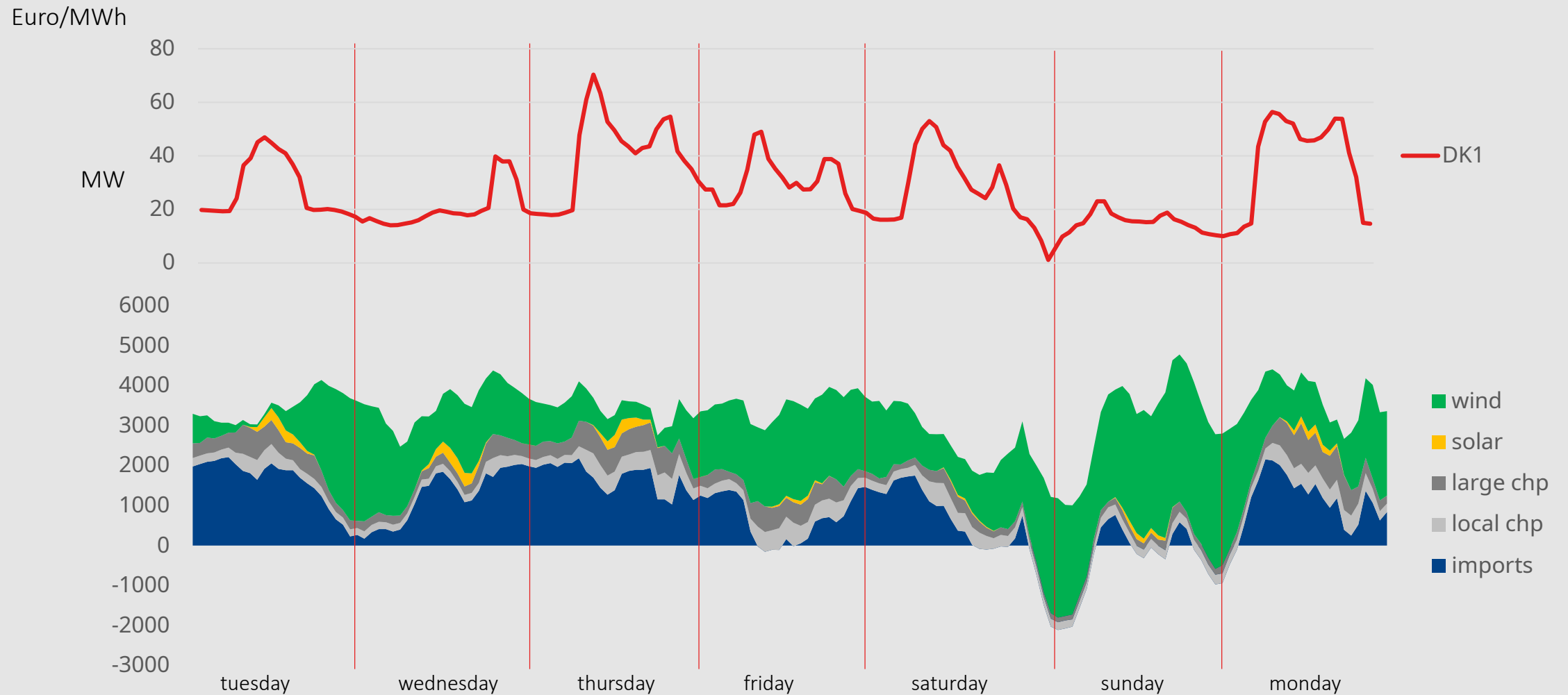
→スーパー

→家庭


野菜が流通する
しくみと大きな
流れは同じ

(出典) 安田陽監修:「再生可能エネルギーをもっと知ろう」シリーズ第3巻『持続可能な社会のために』(2021) p.22~23 ©岩崎書店


デンマークの電力市場価格




電力価格高騰時
(主に風力があまり発電
しておらず電力供給が足
りない時)

火力発電所 


- ✓ 電気が高く売れるため、
100%出力で稼働し出来る
だけ多く発電する

PtXプラント 

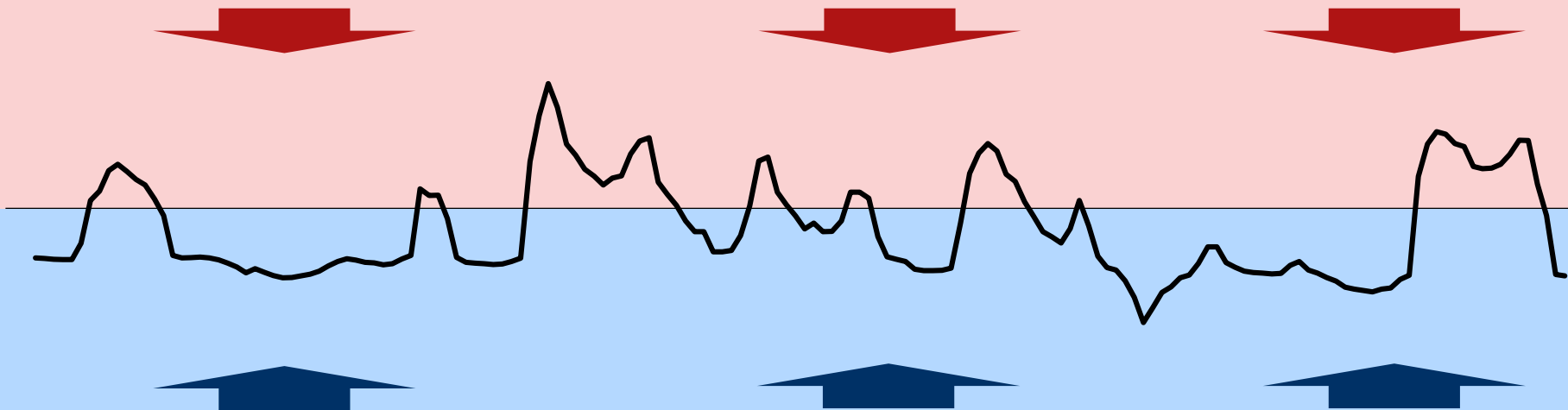
- ✓ 水素製造を止める

地域熱供給事業者 


- ✓ 蓄熱槽からの熱供給を優先

消費者 


- ✓ TVを切る
- ✓ 電気自動車に
貯めた電気を
つかう




電力価格低下時
(主に風力がよく発電
しており電力供給が余剰
な時)

火力発電所 


- ✓ 売電価格が低く売上より
燃料コストが高くなるの
で、発電所の出力を下げ
るか停止する

PtXプラント 

- ✓ 電気分解装置をフル出力で
稼働し安い電力で水素を生産

地域熱供給事業者 

- ✓ 安い電気で電気ボイラー等を
動かして熱を生産

消費者 

- ✓ 洗濯機を回す
- ✓ 電気自動車を
充電する

一般市民もスマホアプリで節約&需給調整に貢献できる



- 電力価格の増減予測、リアルタイムの変動
- いつ洗濯するか、EV充電するか、等を価格に応じて選択
- 家電の使用に伴うCO2排出量も時間帯ごとに算出
- このようなアプリが100万ダウンロードを超えた



デンマークの再エネ開発：初期

地域住民によるエネルギー協同組合が主導

- 1970年代の石油危機により甚大なダメージを受け、エネルギー効率化・エネルギー自給の機運が高まる
- それに伴い原子力の必要性が議論されるも、強力な市民運動が展開され、1985年に原子力の選択肢を放棄
- 「結集した反原子力ネットワークは、エネルギー協同組合の礎となった」（Mey, F. et al. 2018）
- 2001年までに建設された風力発電所のうち、86%が協同組合によるものだった（Ea Energy Analysis et al. 2017.）

風力開発普及期

風車の大型化に伴い、企業と地元との協働型が多くなる

2009－2020年：

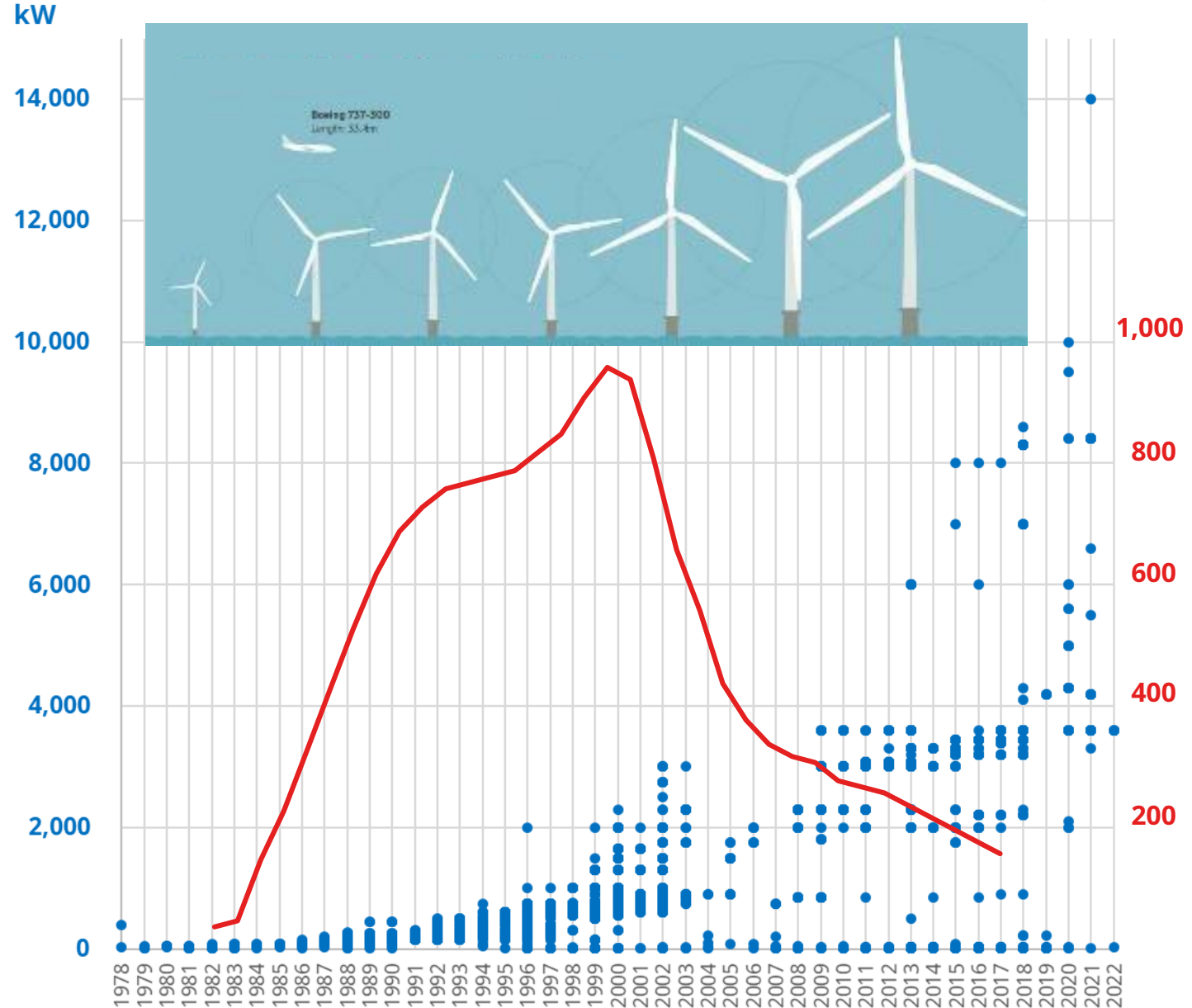
「所有権の一部を地元開放する」

仕組みが義務化

- ✓ 事業者は事業費の少なくとも20%を地元出資に開放する義務を負う
- ✓ 地元新聞等を通じた広報の実施義務
- ✓ 対象者は自治体内の18歳以上のあらゆる住民だが、風車から4.5km圏内の居住者が優先

地元主導は理想だが、地元単独ではハードルの高い大型事業が経済性に優れるのもまた事実...

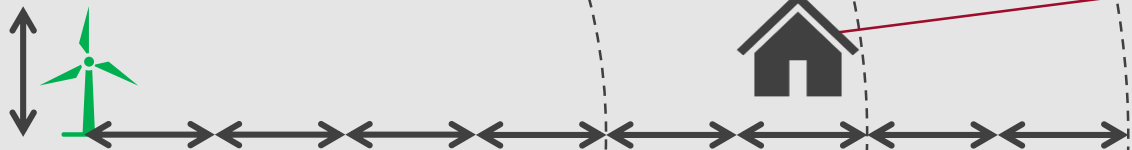
風車1基あたりの設備容量 / エネルギー協同組合数



出典: Danish Energy Agency / August Wierling et al. 2018. Statistical evidence on the role of energy cooperatives for the energy transition in European countries.

地元配慮の規制と補償

距離規制：最低でも頂上部高さの4倍の距離を確保



騒音規制：最大許容値 37~44dB

低周波騒音規制：最大許容値 20dB

減損価値
スキーム

風車の近隣住民の不動産価値
損失に対し、事業者が補償

不動産
売却
オプション

風車の高さ6倍までの不動産
所有者は、希望する場合事業者
に当該不動産を売却できる

再エネ
ボーナス

風車の高さ8倍以内の住民は、
風車の耐用期間にわたって
年間ボーナス（免税）を享受
できる

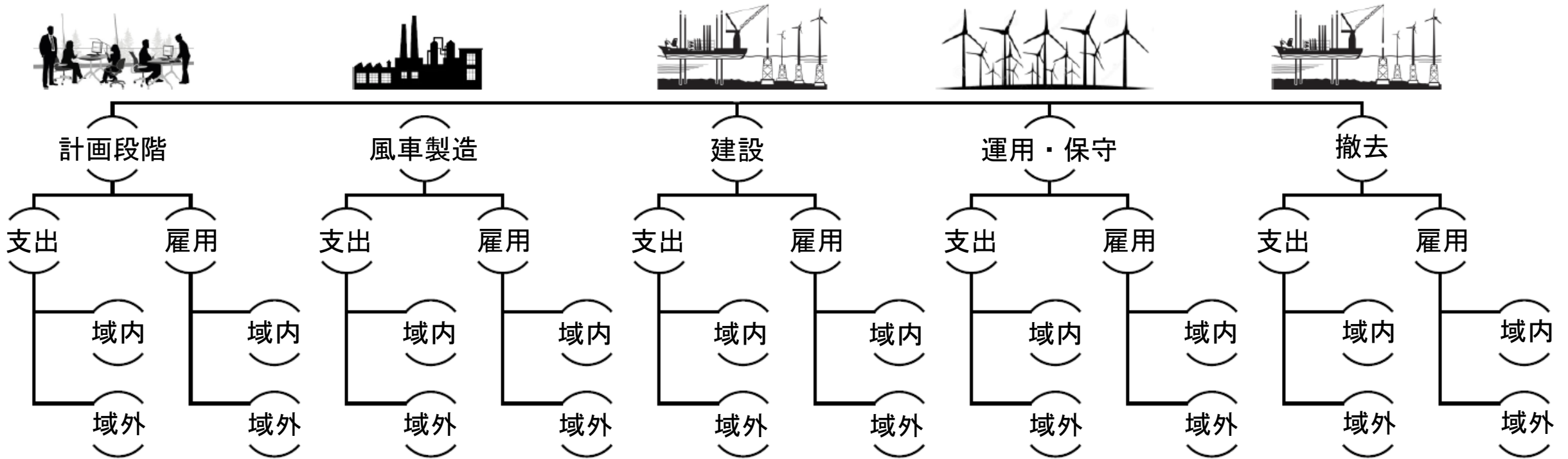
グリーン
ファンド

事業者による1MWあたり
125,000DKK（約250万円）の
支払いで得られる、地元のため
に使えるファンド



地域はどう動くべきか

計画段階から撤去まで、地域で担える部分をなるべく増やしたい



必要な調査・データ
収集を担える人材の
育成

地元部品メーカー等
の参入促進

建設作業の
人材育成・インフラ
投資

運用・保守の
人材育成・インフラ
投資

撤去作業受託や
当該区画の再活用

デンマークの描く脱炭素社会

長期視野の計画策定はデンマークの伝統



Climate Status and Projection

デンマーク全体、あらゆるセクターの2035年までの見通しとそれに伴う気候目標達成への進捗を整理

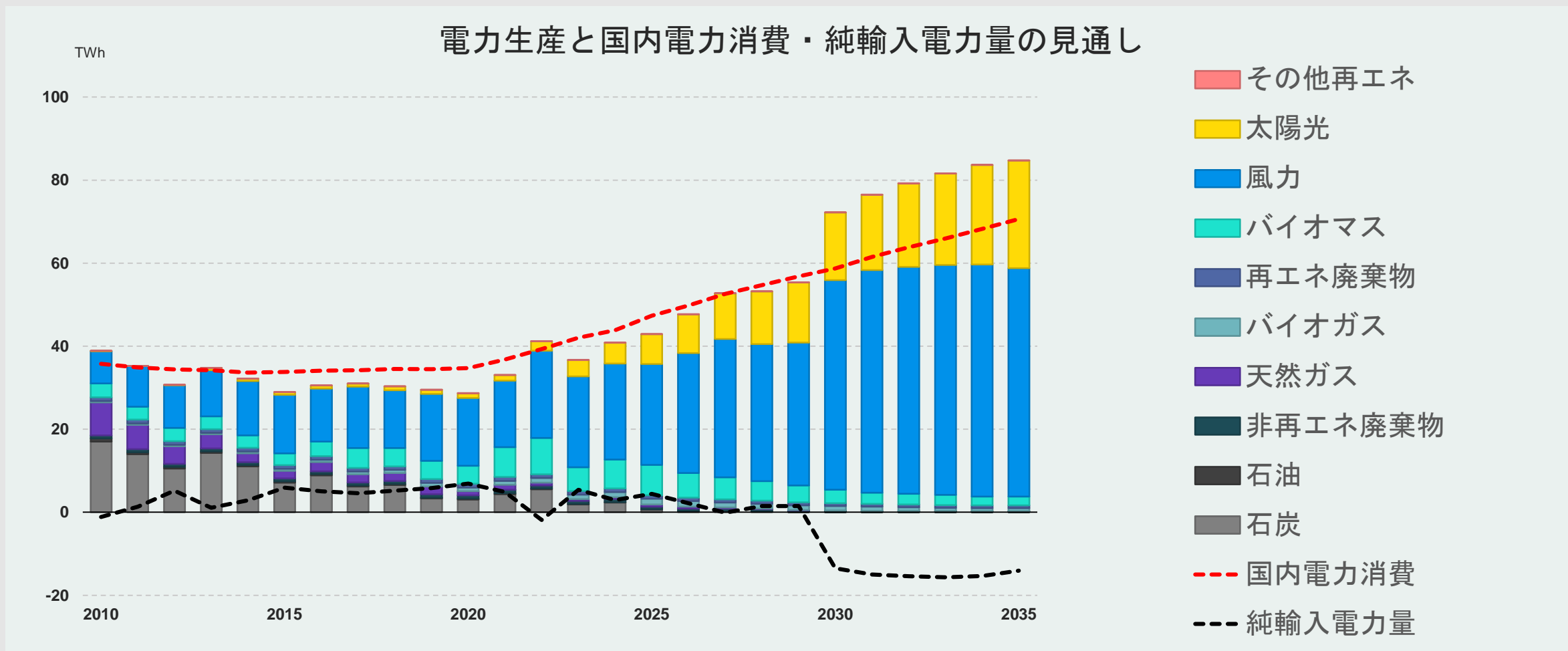


Analysis assumptions for Energinet

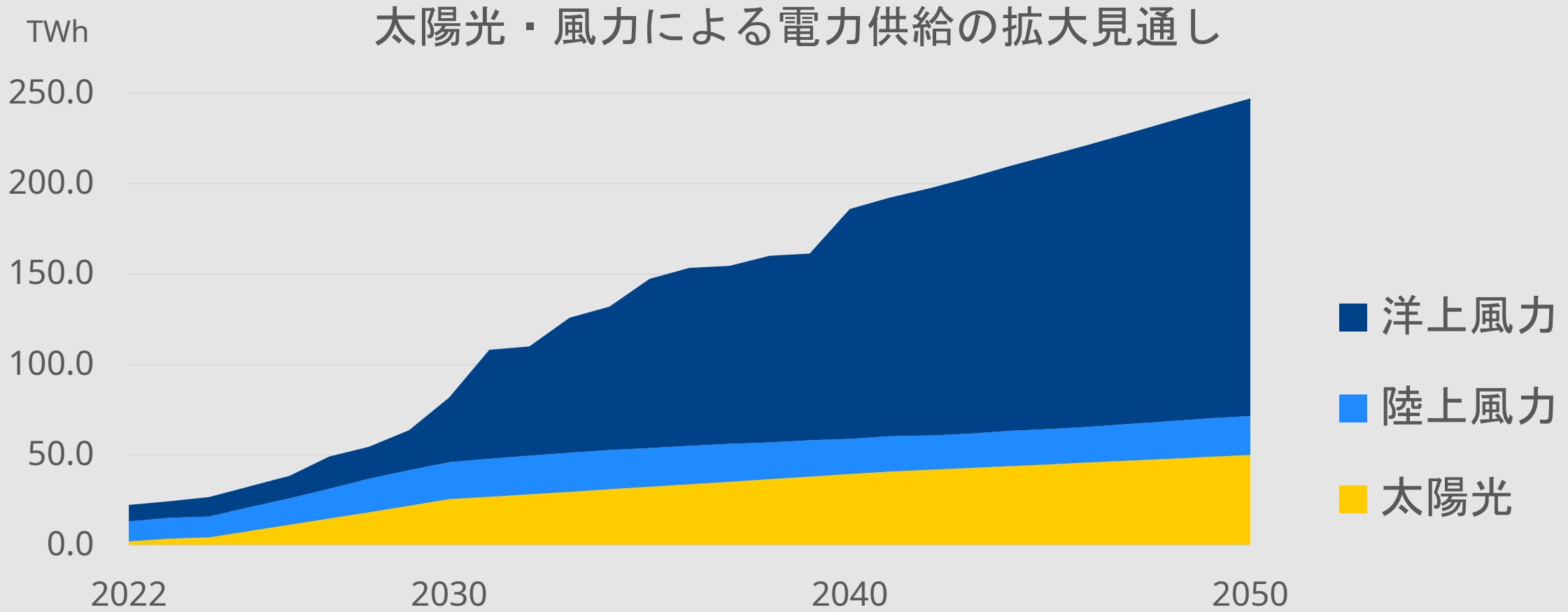
電力やガスの供給、需要の2050年までの見通しを整理。それにあたって必要なインフラ計画策定のための補助資料

電力供給のエネルギー転換

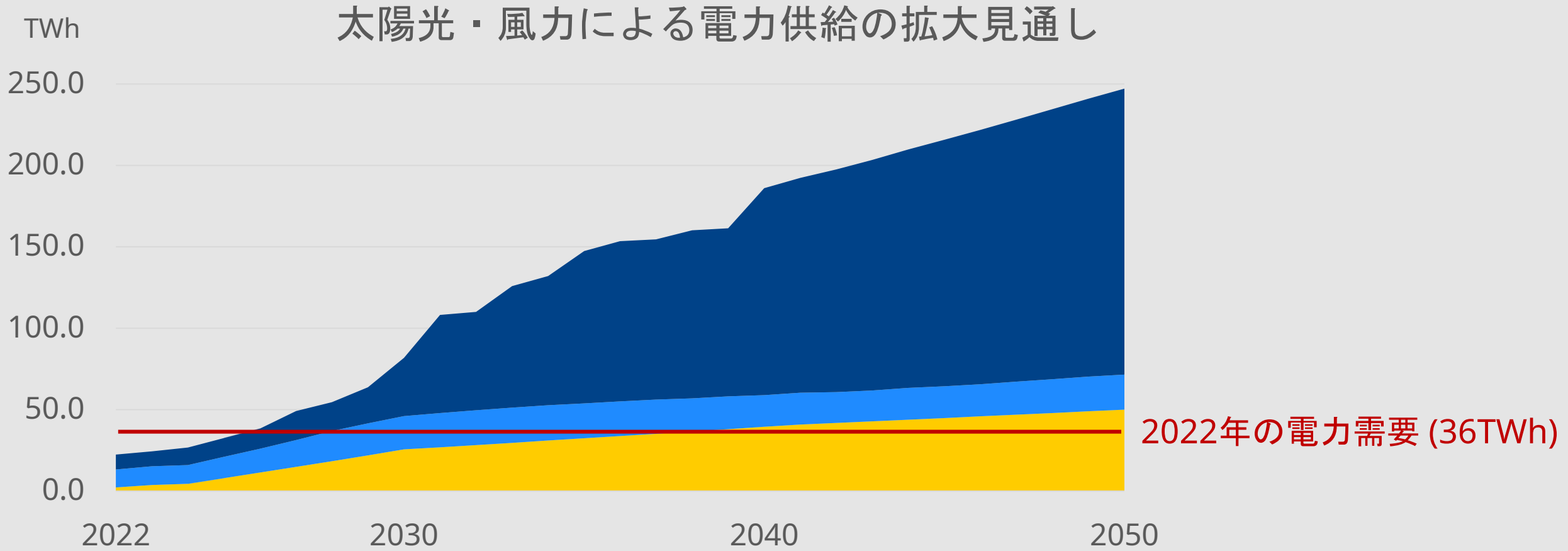
2035年には、国内消費の100%を超える電力が再エネによって生産され、デンマークは電力の純輸出国となる



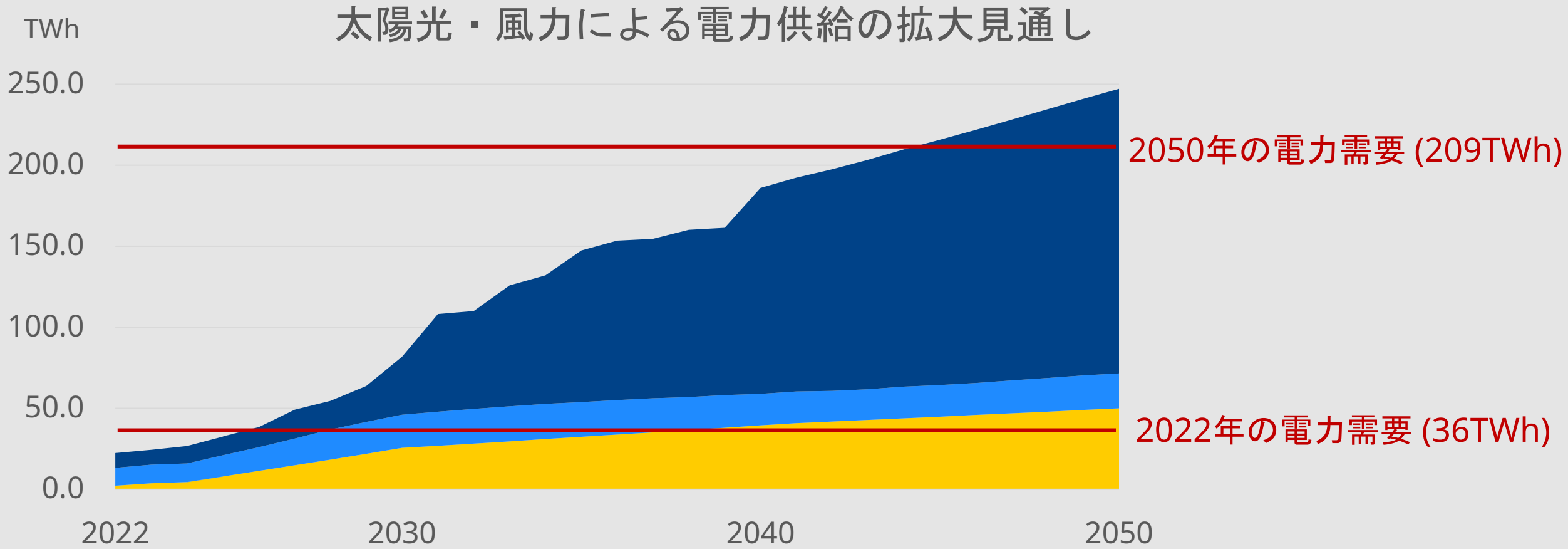
太陽光と風力の導入は**2035年**以降もさらに加速



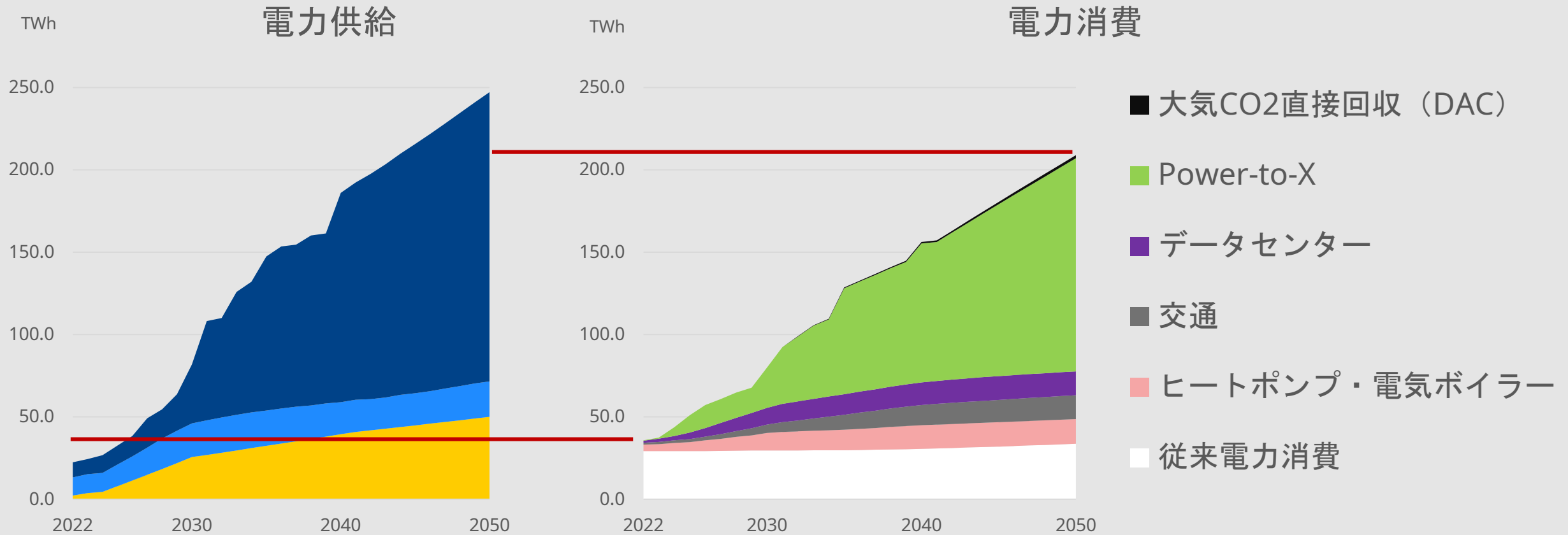
太陽光と風力の導入は2035年以降もさらに加速



太陽光と風力の導入は2035年以降もさらに加速

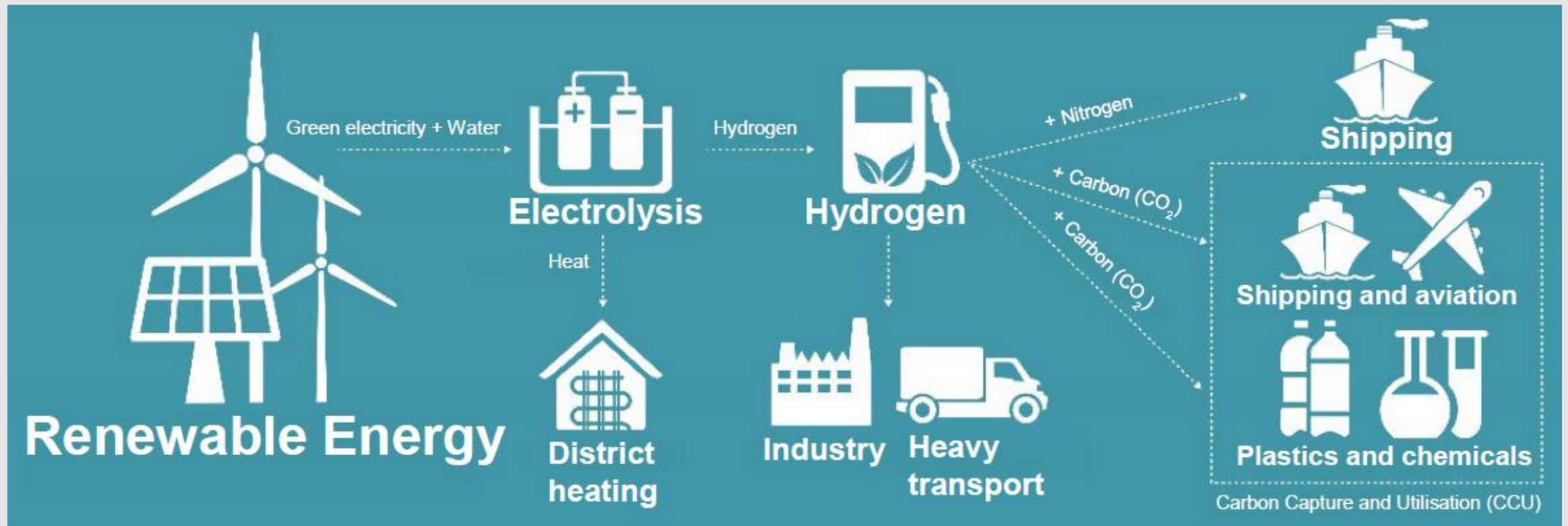


大量の再エネ電力をあらゆるセクターで活用するシステムへ



POWER-TO-Xとは？

- 電力（Power）を水の電気分解を経て他の何か（X）に変換する技術
Xの例：水素、アンモニア、合成燃料等



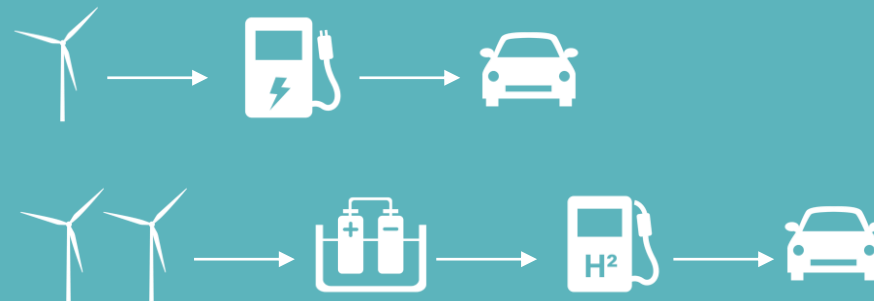
デンマークにおけるPTXの用途

—電化によるエネルギー効率化の例

- 直接電化はより少量の再エネ、エネルギーロスで可能
- 直接電化は安価な選択肢であり、分野によらず可能な限り優先されるべき
- 早すぎる段階でのPower-to-Xの適用はグリーン転換や温室効果ガス削減を遅らせる可能性がある
- 直接電化とPower-to-Xのエネルギー需要：
 - 水素自動車は電気自動車の2倍以上のエネルギーを消費
 - 暖房用途の水素ボイラーはヒートポンプと比較してエネルギー消費が約5倍

直接電化とPower-to-Xのエネルギー需要

電気自動車 vs 水素自動車



2倍以上のエネルギーが必要

暖房: ヒートポンプ vs 水素ボイラー



約5倍のエネルギーが必要



デンマークにおけるPTXの用途

—他に安価な選択肢がない分野に限定

- Power-to-Xは直接電化が可能な分野では競争力を持たない
- グリーン水素やe-fuelは中長期でバイオ燃料より安価になる見込み
- 船舶や航空分野では中心的役割を担う可能性大
- そのほか陸上交通、産業、農業や（軍事）防衛等の分野では不確実性が大きい
- 熱分野や電力生産においては、デンマークでは下記が安い
ため何ら役割を持たない:
 - 地域熱供給や暖房におけるヒートポンプ利用
 - ピーク電源としてのバイオガス利用

移行ポテンシャル:

Robust potential



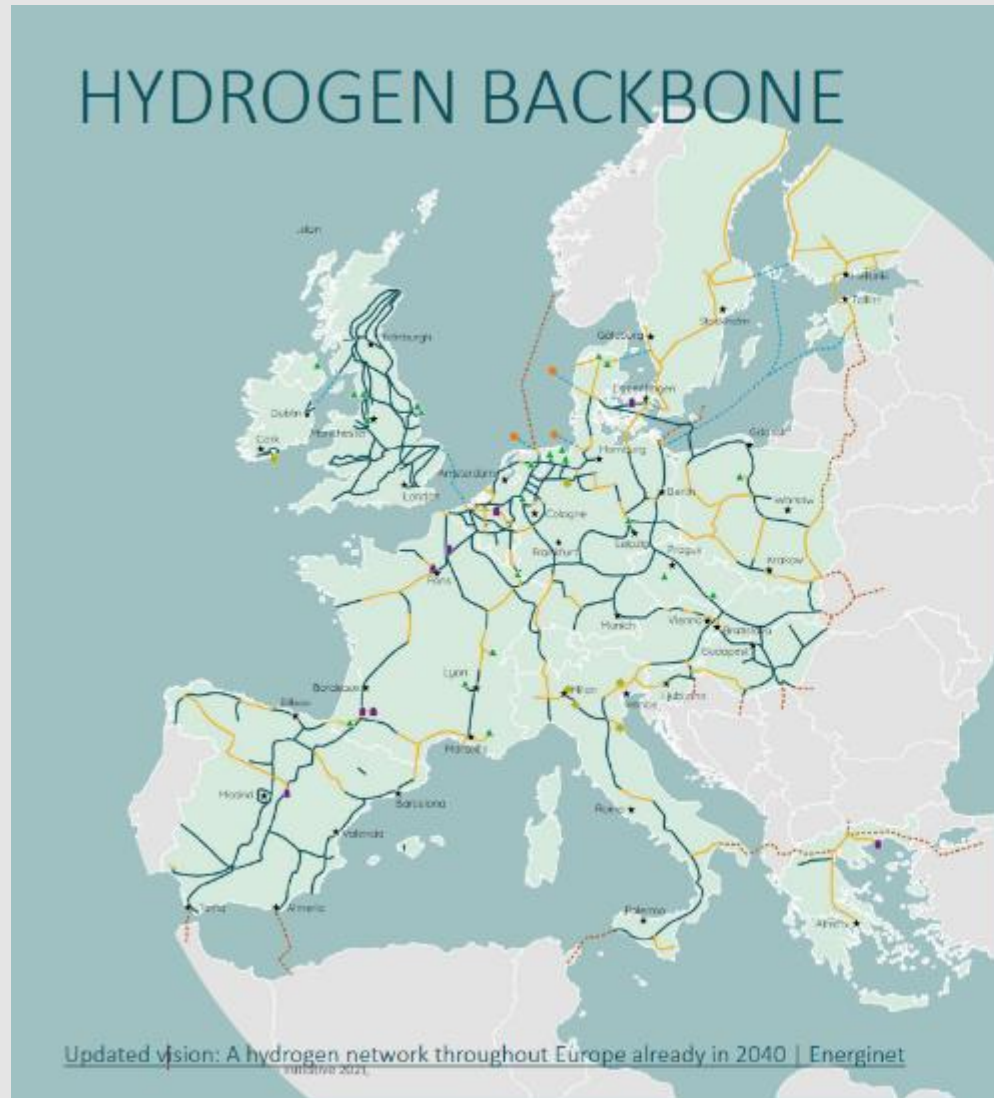
Robust potential of indeterminate



0% 25% 50% 75% 100%

● その他再エネ ● 直接電化 ● バイオ燃料・PtX

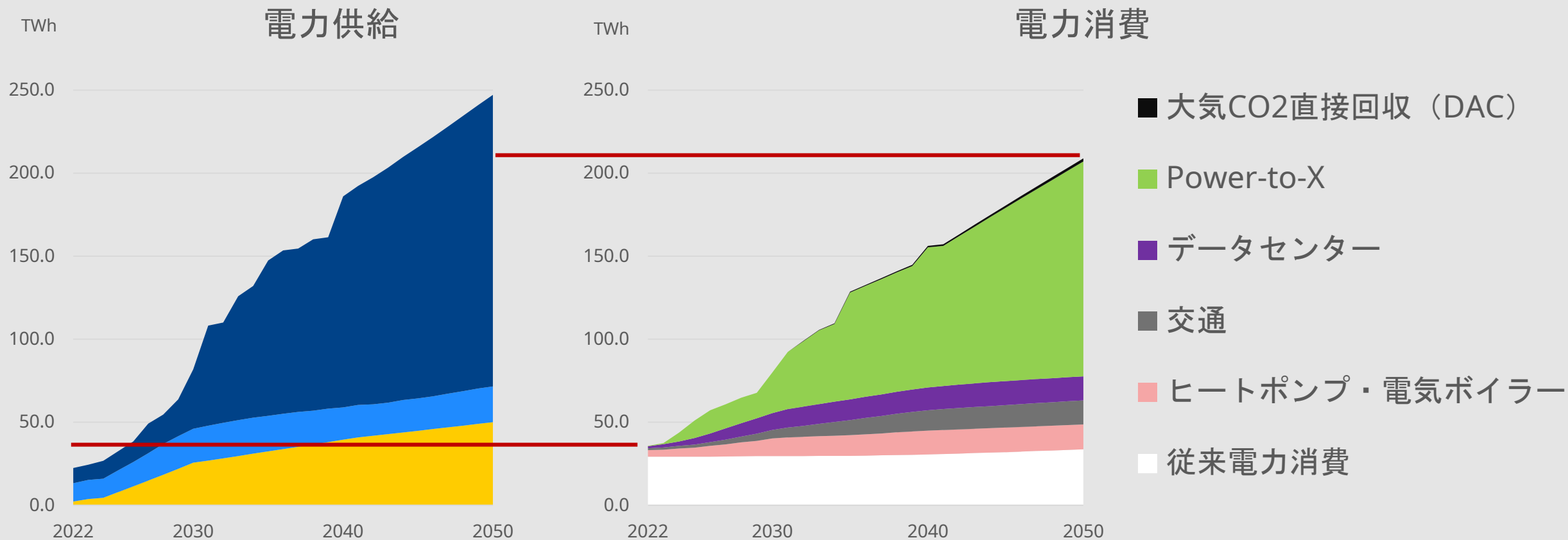
デンマークは今後、グリーン水素の純輸出国に



- European, regional and national planning and coordination of infrastructure **ENERGINET**
- 60-75 % of the backbone can be based on repurposed gas pipelines



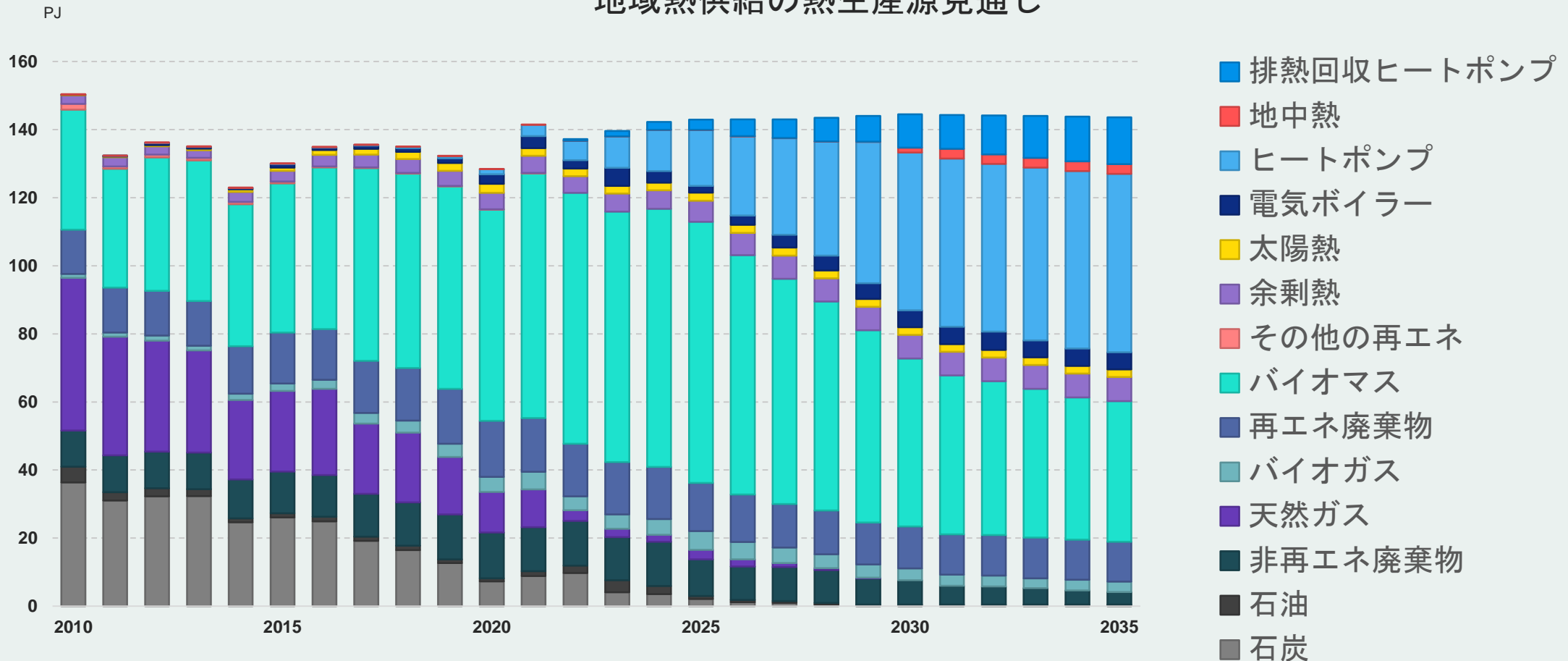
(再掲) 大量の再エネ電力をあらゆるセクターで活用するシステム



地域熱供給のエネルギー転換

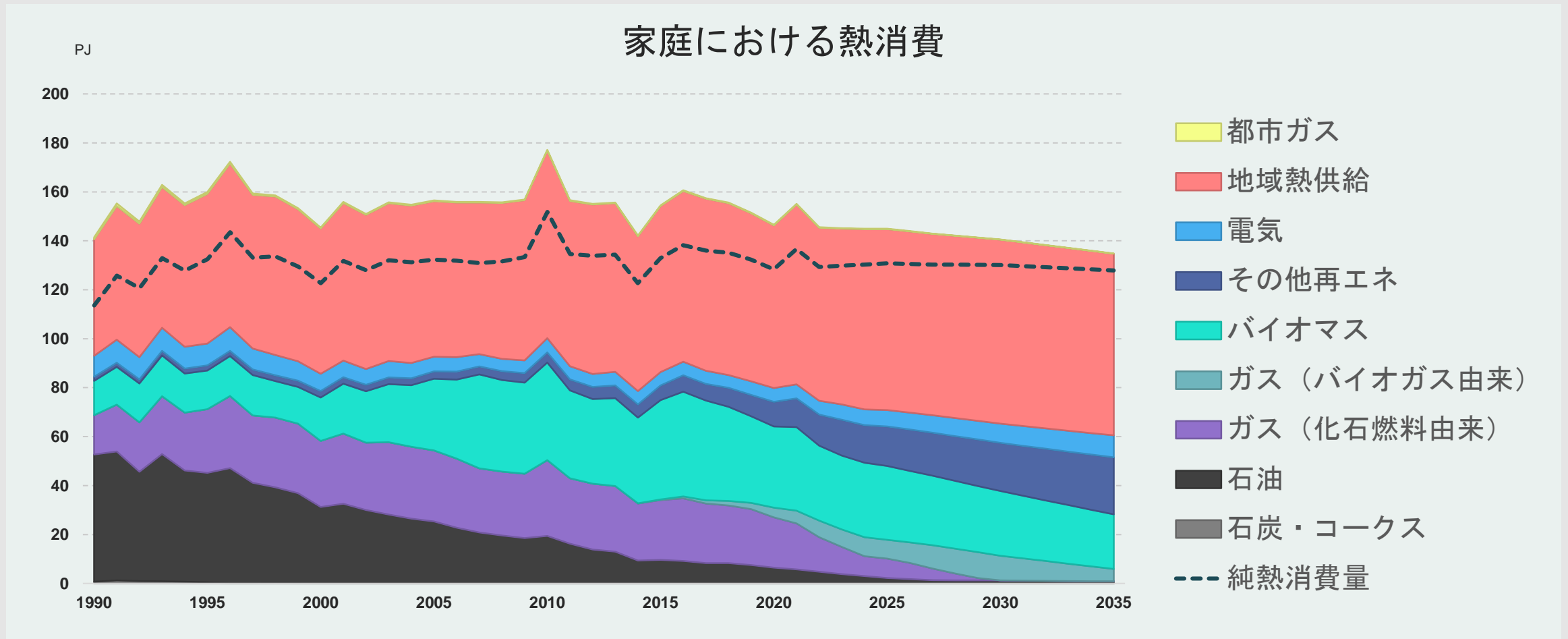
2035年には、97%の熱が再エネまたは再エネ由来電力によって生産される

地域熱供給の熱生産源見通し



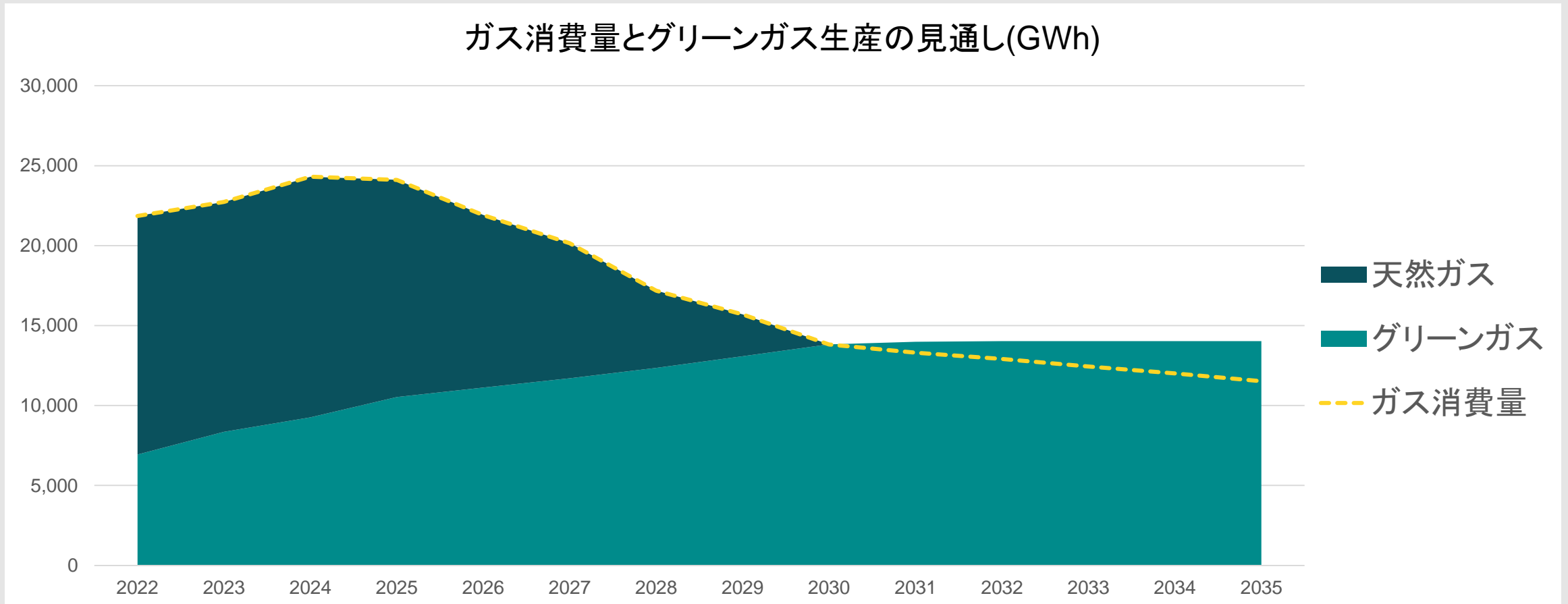
家庭の暖房・給湯のエネルギー転換

2035年には、ほぼ100%の熱が再エネまたは再エネ由来電力によって生産される
ないし再エネ率97%の地域熱供給から暖房・給湯を得る



ガスインフラのエネルギー転換

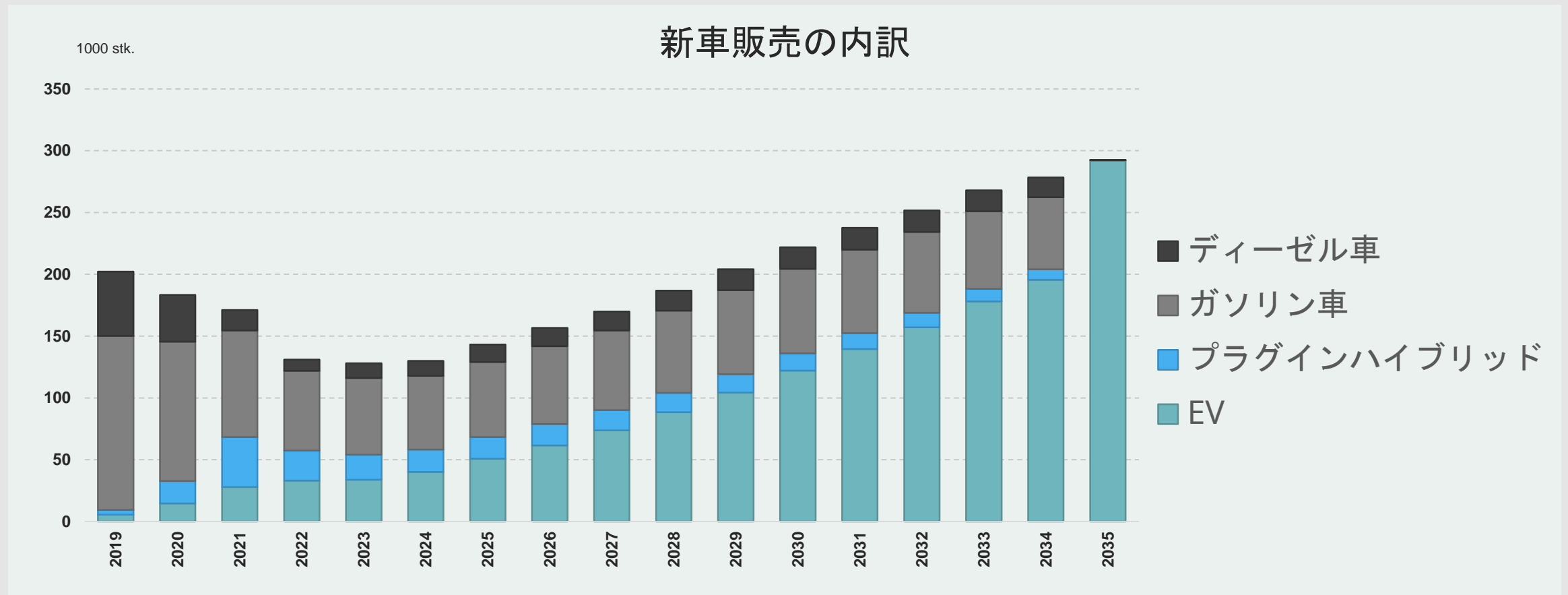
2030年までに、デンマークのガスインフラで供給されるガスは100%バイオガスとなり、余剰生産分は陸続きのドイツへ輸出されることになる



交通のエネルギー転換

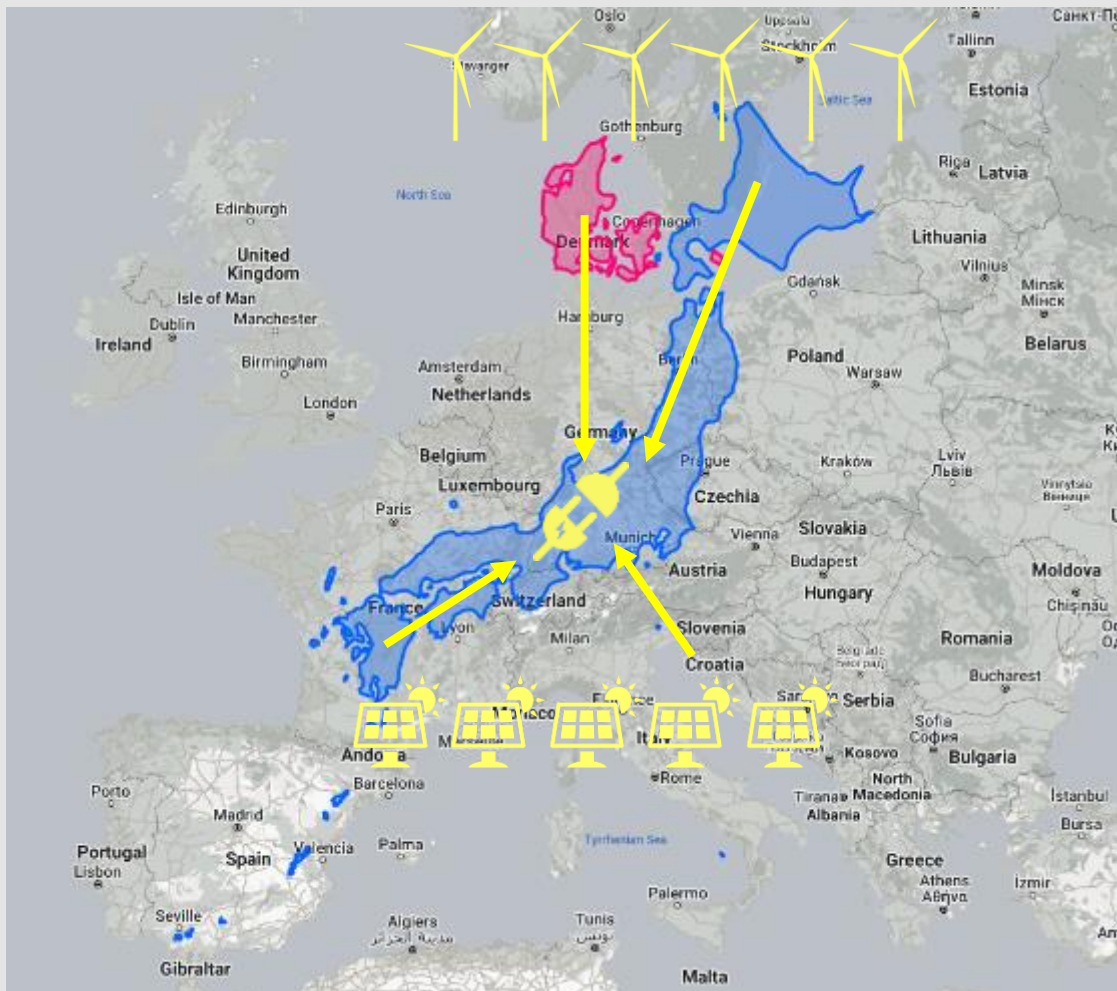
2035年には、新車販売の99.8%がEVに

同時点で電力は再エネ100%なので、EVの走行時CO2排出はゼロに

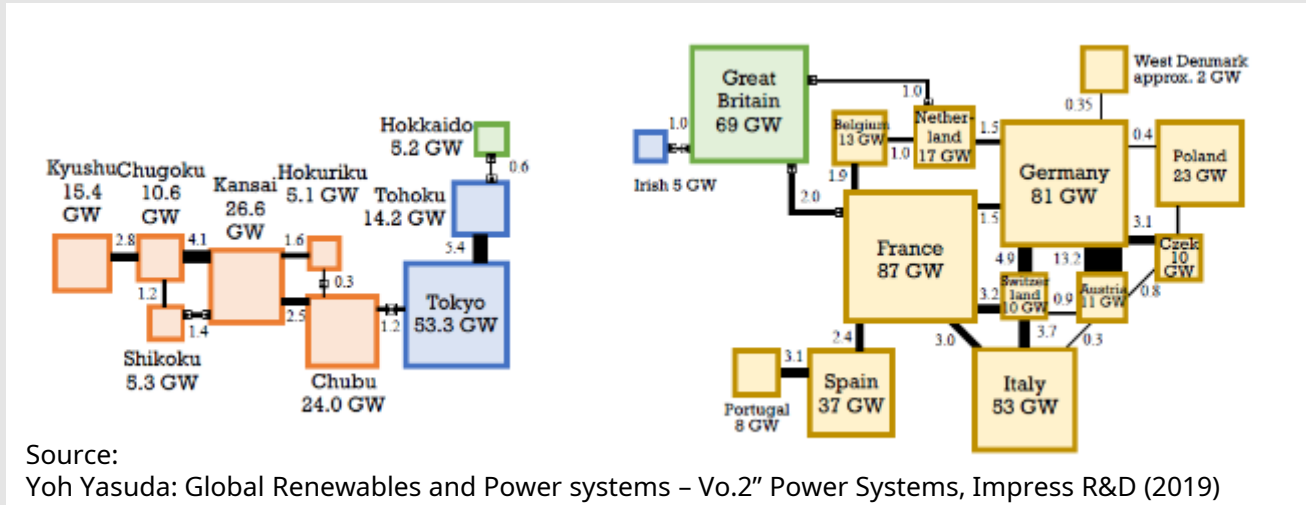


日本の文脈でどう考えるか

日本は太陽光と強風の海に恵まれた、3分の1スケールの欧州



Created with www.thetruesize.com

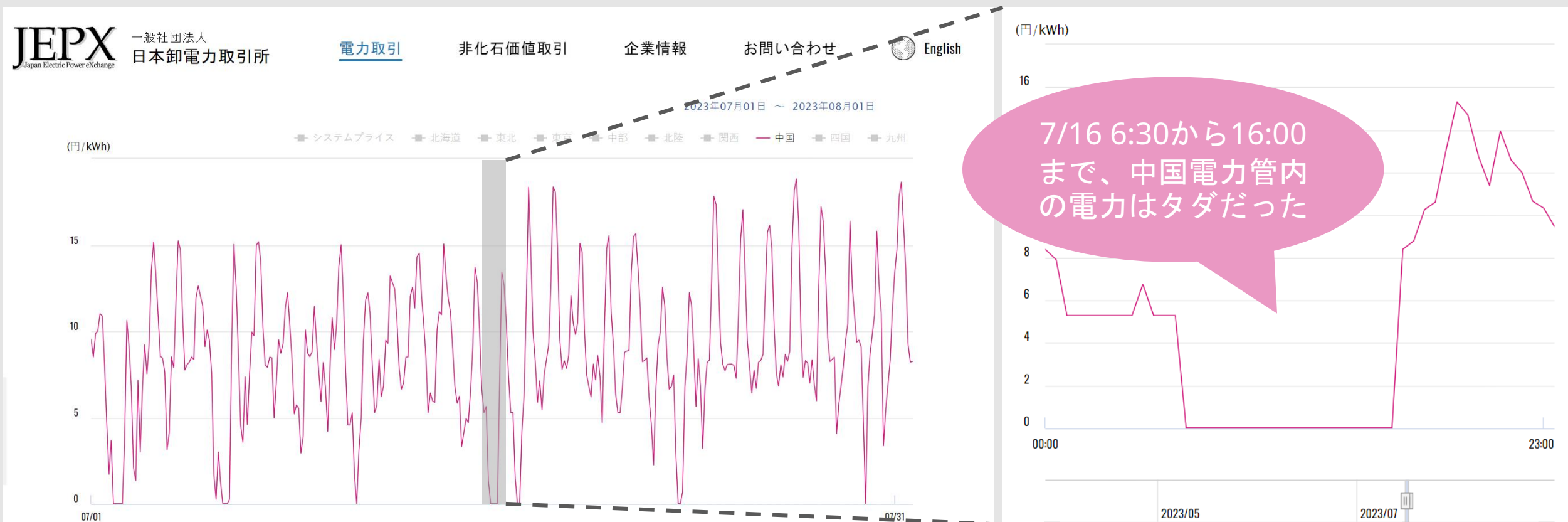


Source: Yoh Yasuda: Global Renewables and Power systems - Vo.2" Power Systems, Impress R&D (2019)

- 風は北に
- 太陽は南に
- 消費は中心部に
- デンマークの同期エリアは2つに分断：日本の50 Hz、60 Hzと類似

日本では太陽光が発電している時間ほど電気が安い

- 日本でも、デンマーク同様に電力市場があり、価格は常に変動している
- 昼間によく電気を使う世帯・企業等は、電力会社との契約を「市場連動型」に切り替えるのも一考



僕たちはどう生きるか

地域全体で取り組むこと

- 化石燃料が使えなくなることを前提とした、未来のビジョンづくり
 - 「行動しなかった場合」の帰結を正しく想定する
 - どこでどれだけ使っているのか
 - 今ある技術で転換できるものはどこか
 - 個々の建物や事業者の対応でなく、町全体でうまく繋いで最適化できないか
 - 100%自給を目指すのか、周辺地域と連携するか

個人レベルで取り組むこと

- 建物の断熱回収
- 屋根置き太陽光や薪ストーブなど家庭で取り組める再エネの検討
- 電力会社の契約の見直し、スマートな電気の消費
- 電気自動車への乗り換え
- 学習・議論・行動

強大な逆風こそ理想

送電系統運用者（TSO）Energinet社

「我々はエンジニアだから、我々のシステムに何ができるかを最もよく知っている」という考えから、「我々はエンジニアだから、社会が求める革新的なソリューションを開発しなければならない」と考えるようになった (Ackermann, 2006; Wittrup, 2018)