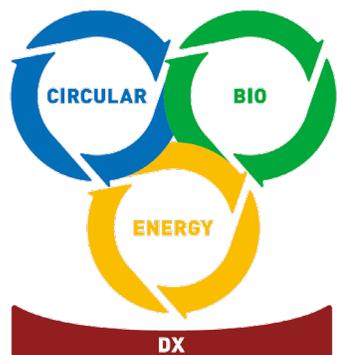




カーボンニュートラル社会実現に向けた再生可能エネルギーの役割拡大

2023年12月19日

仁木 栄



国立研究開発法人
新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）
技術戦略研究センター（TSC）



NEDOのミッション

エネルギー・地球環境問題の解決 **産業技術力の強化**

イノベーション・アクセラレーターとしてのNEDOの役割

技術戦略の策定、プロジェクトの企画・立案を行い、プロジェクトマネジメントとして、産学官の強みを結集した体制構築や運営、評価、資金配分等を通じて技術開発を推進し、成果の社会実装を促進することで、社会課題の解決を目指します。



TSCの体制（人員：81名）

2023年10月1日現在 ※兼務を除く

〔外部専門家（フェロー約30名）との「技術戦略ミーティング」を節目で開催〕



センター長

次長

調整課

企画課

技術領域担当ユニット

デジタルイノベーション

ナノテクノロジー・材料

サステナブルエネルギー

環境・化学

バイオエコノミー

新領域・融合（農水）

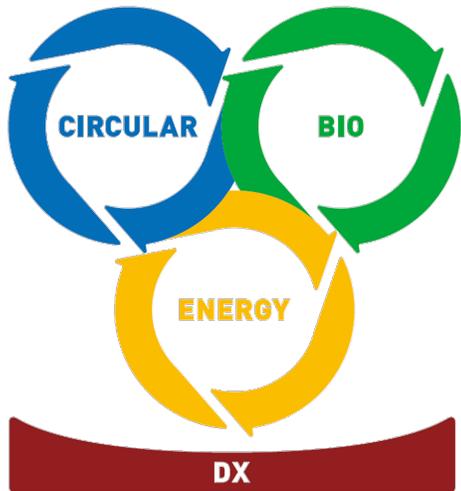
横断分析ユニット

海外技術情報

マクロ分析

標準化・知財

- 気候変動問題は人類共通の課題である。たとえ大きな困難が伴ったとしても、我々は、この**気候変動問題を乗り越え**、環境、経済、社会が調和を形成し、新しい価値が創造され続け、持続的に発展し続ける社会、すなわち「**持続可能な社会**」を目指す必要がある。
- エネルギー・環境分野の活動基軸として 「**持続可能な社会実現に向けた技術開発総合指針2023**」を公表した。
- 脱炭素社会の実現により気候変動を克服し、持続可能な社会を実現するために、①**サーキュラーエコノミー** ②**バイオエコノミー** ③**持続可能なエネルギー**の3つの社会システムの一体的な推進が不可欠であり、それを支える基盤として、④**デジタルトランスフォーメーション (DX)** の存在は欠かせない。



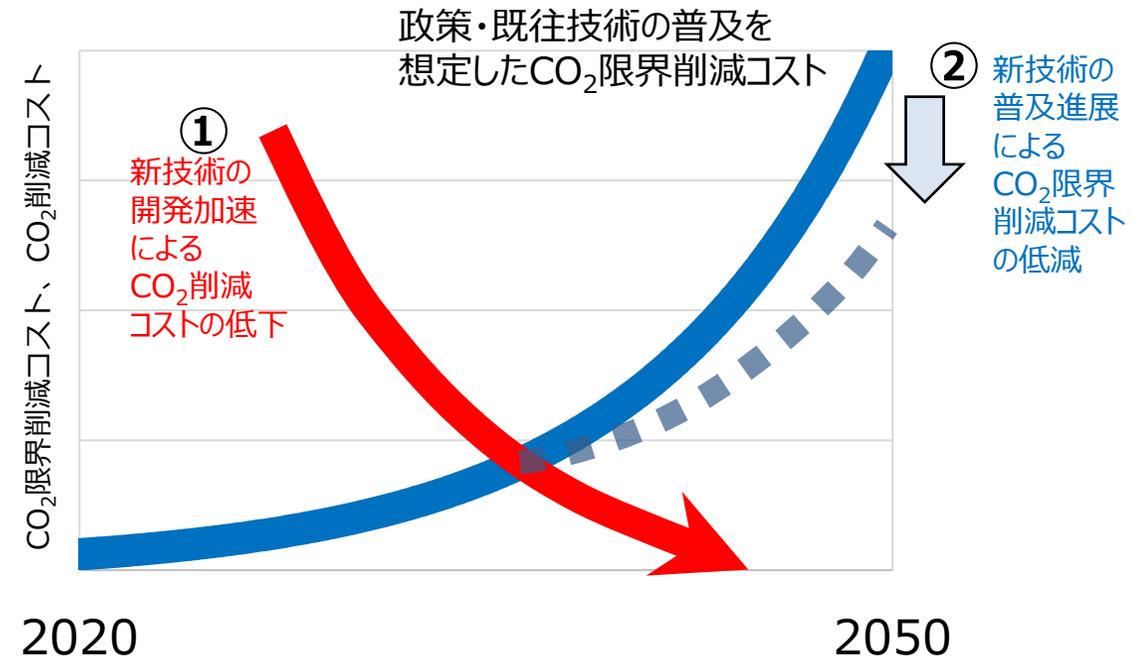
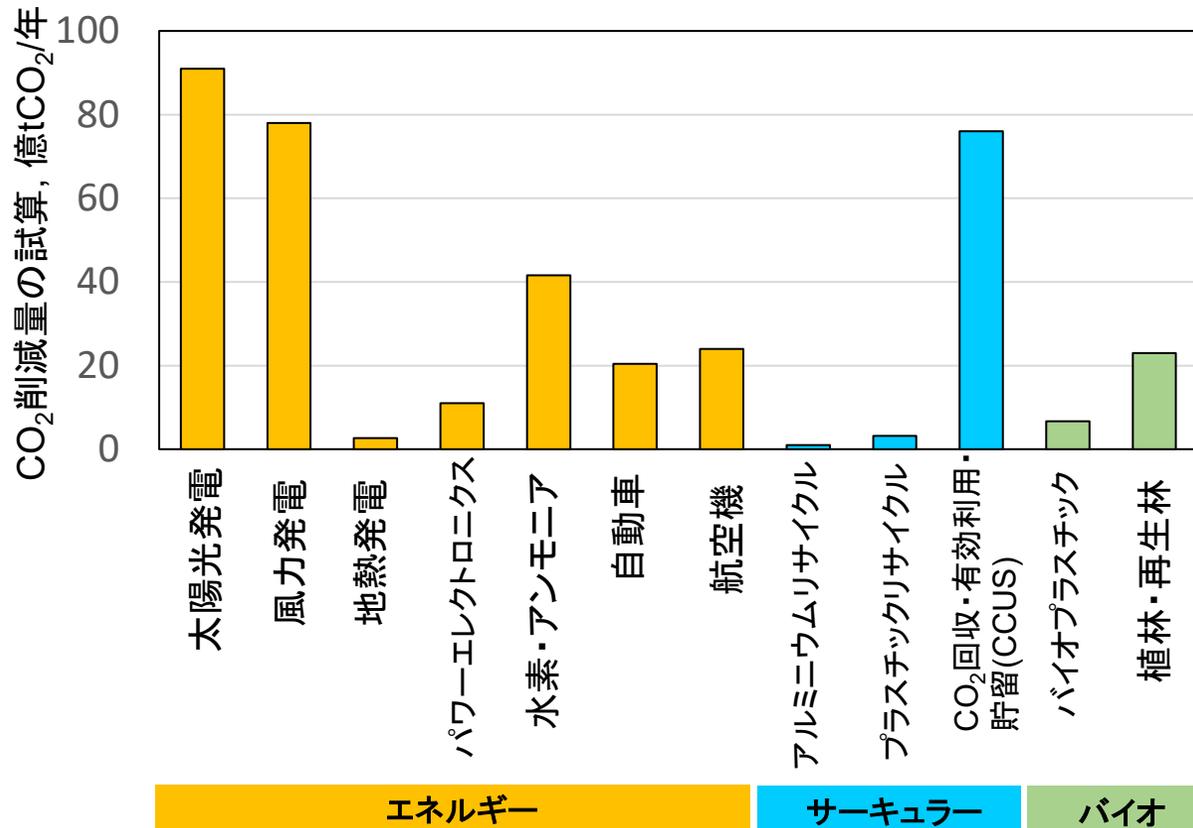
ブルー、グリーン、オレンジの3つの重なり合う円と矢印は、「3つの社会システム」が有機的に連携している様子を表現。
3つの社会システムの土台となる「DX」を**ワインレッド**で表現。

2023年8月公表

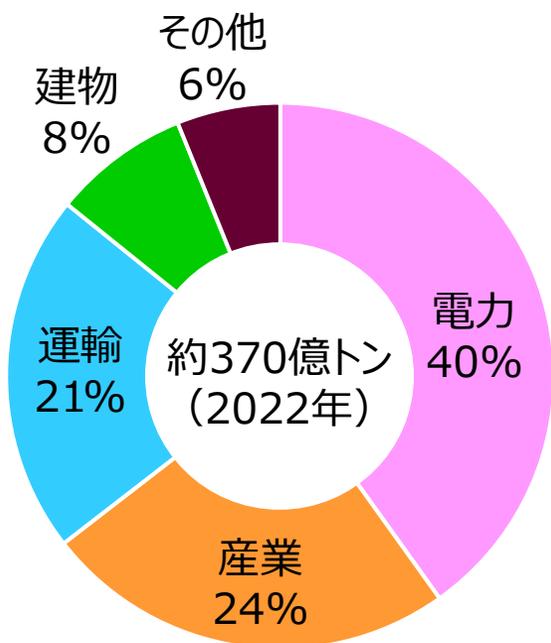
<https://www.nedo.go.jp/content/100964787.pdf>



- 2050年のカーボンニュートラルを見据えて、重要技術のCO₂削減効果を総合的・客観的に評価することを提唱する。
- 最新シナリオ等に基づいて、3つの社会システムとDXに関する重要技術のうちCO₂削減ポテンシャル（41技術領域）とCO₂削減コスト（9技術領域）を分析・試算を行った。
- 新技術の開発加速によって、CO₂削減コストが従来技術の限界削減コストを下回る時点から、急激に普及が進む。それによって限界削減コストを大幅に低減することが可能になり、対策費用の大幅な低減に貢献する。

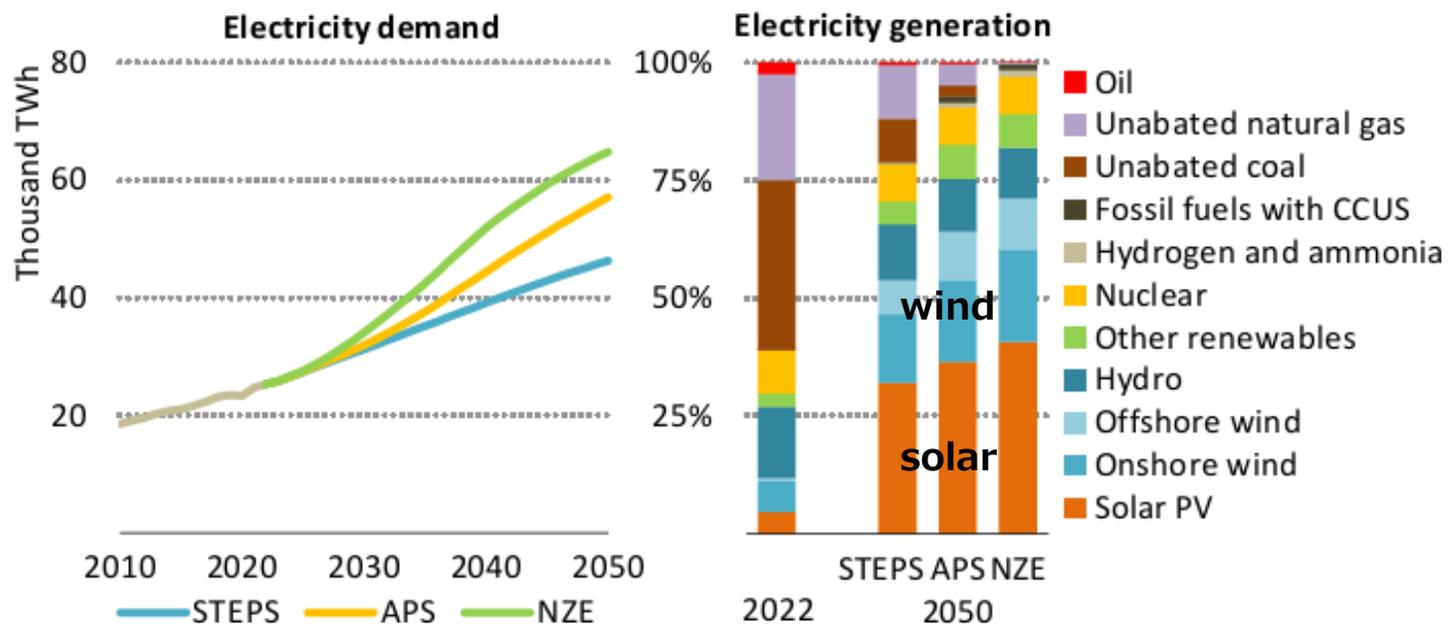


- 電力分野（熱を含む）は世界のCO₂排出量の40%を占めている。
- 2050年カーボンニュートラル実現のためには電力分野のゼロエミッション化が求められる。
- 再生可能エネルギーはCO₂削減に最も有効な技術のひとつである。
- 太陽光発電と風力発電はCO₂排出量の削減ポテンシャルが大きく、2050年に向けて大幅な導入拡大が期待されている。



出典：IEA World Energy Outlook 2023を
基にNEDO技術戦略研究センター作成

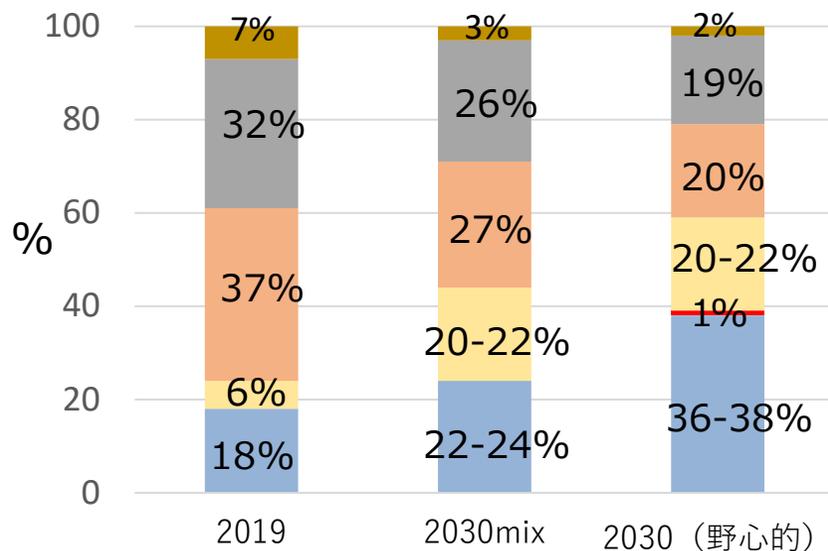
2050年の電力分野の電源構成



出典：IEA, World Energy Outlook 2023

- 日本政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指すことを宣言した。
- S+3Eを大前提に、再エネの主力電源化を徹底し、再エネに最優先の原則で取り組み、国民負担の抑制と地域との共生を図りながら最大限の導入を促す*1。
- H27に策定された2030年のエネルギーミックスの見直しが行われ、合計3,360～3,530億kWh程度（電源構成では36～38%）の再エネ導入を目指す野心的な目標が発表された*1。

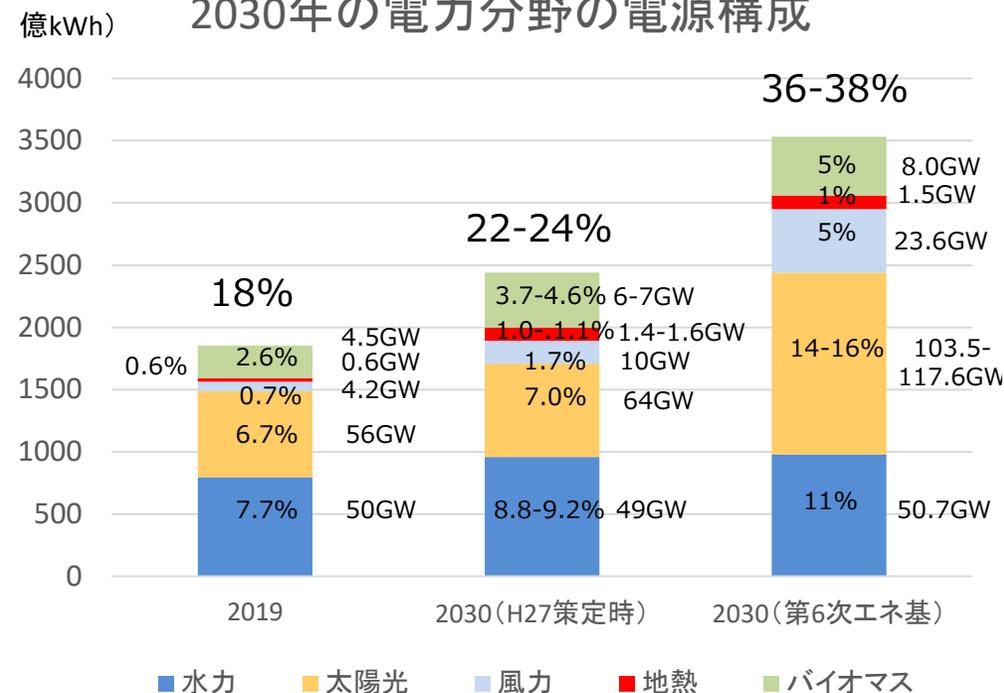
2030年エネルギーミックス



■ 再エネ ■ 水素・アンモニア ■ 原子力 ■ LNG ■ 石炭 ■ 石油等

*総合エネルギー調査会 基本政策分科会（7月21日）資料を基にTSCが作成

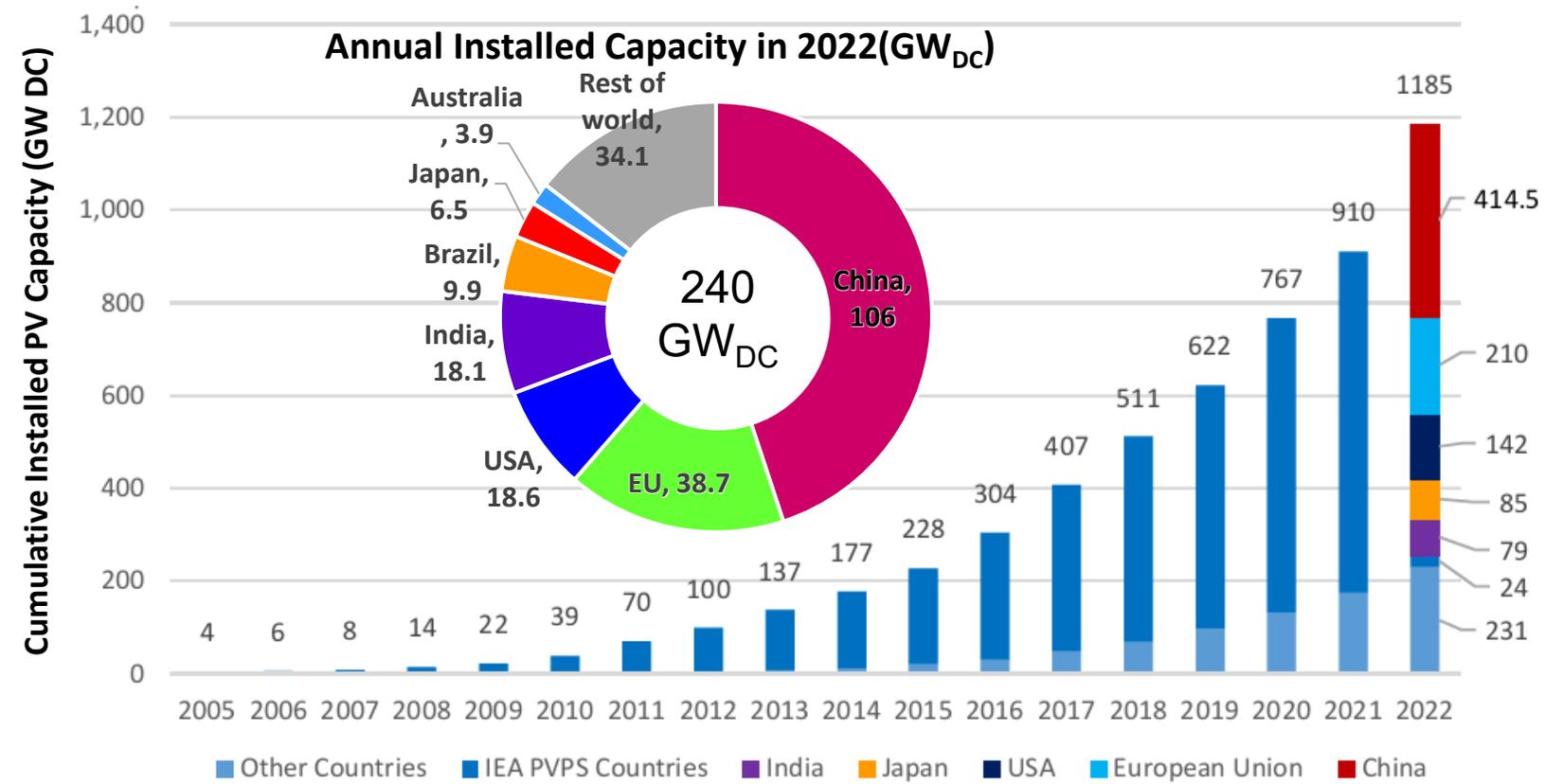
2030年の電力分野の電源構成



2030年総電力量：10,650億kWhを仮定（H27策定時）
2030年総電力量：9,400億kWhを仮定（第6次エネ基）

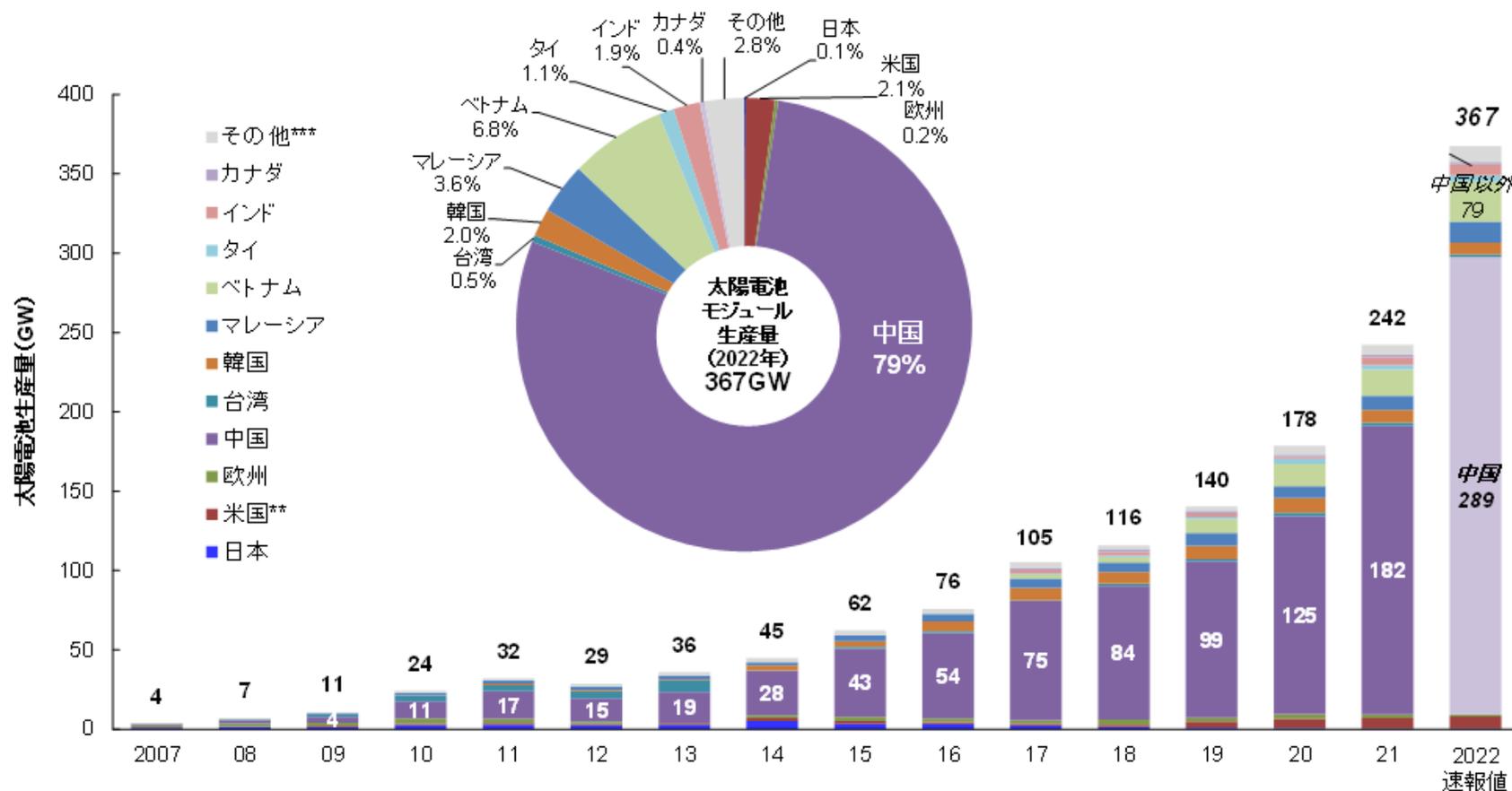
*1第6次エネルギー基本計画を元にTSCが作成

- 2022年での世界の累積導入量は1,185GW超、2022年の年間導入量は240GWに達する。
- 2022年には大きなマイルストーンである累積導入量1TWを達成し、PVはテラワット時代へと突入した。
- 太陽光発電は導入拡大が着実に進み、世界各地で最も安価な電源となっている。



出典: IEA PVPS, "Trends in Photovoltaic Applications 2023", "Snapshot of Global PV Markets 2023" を基にNEDO TSC作成

- モジュール市場の拡大が進む中、海外メーカーの低価格攻勢により、日本メーカーのシェアは2013年約13%から2022年約0.1%と近年大幅に低下している。
- 各種太陽電池において世界最高レベルの変換効率（Si：26.7%（カネカ）、CIS：23.4%（SF）、Ⅲ-V：37.9%（シャープ））を保持する等、いまだに日本の技術は世界トップレベルにある。



* 2013年までは太陽電池セル生産量、2014年からは太陽電池モジュール生産量で集計

**米国は2013年までは米州

***ベトナム、タイ、インド、カナダは2016年以前は「その他」に含まれる

出典：(株) 資源総合システム調べ（一部推定、2023年6月現在）

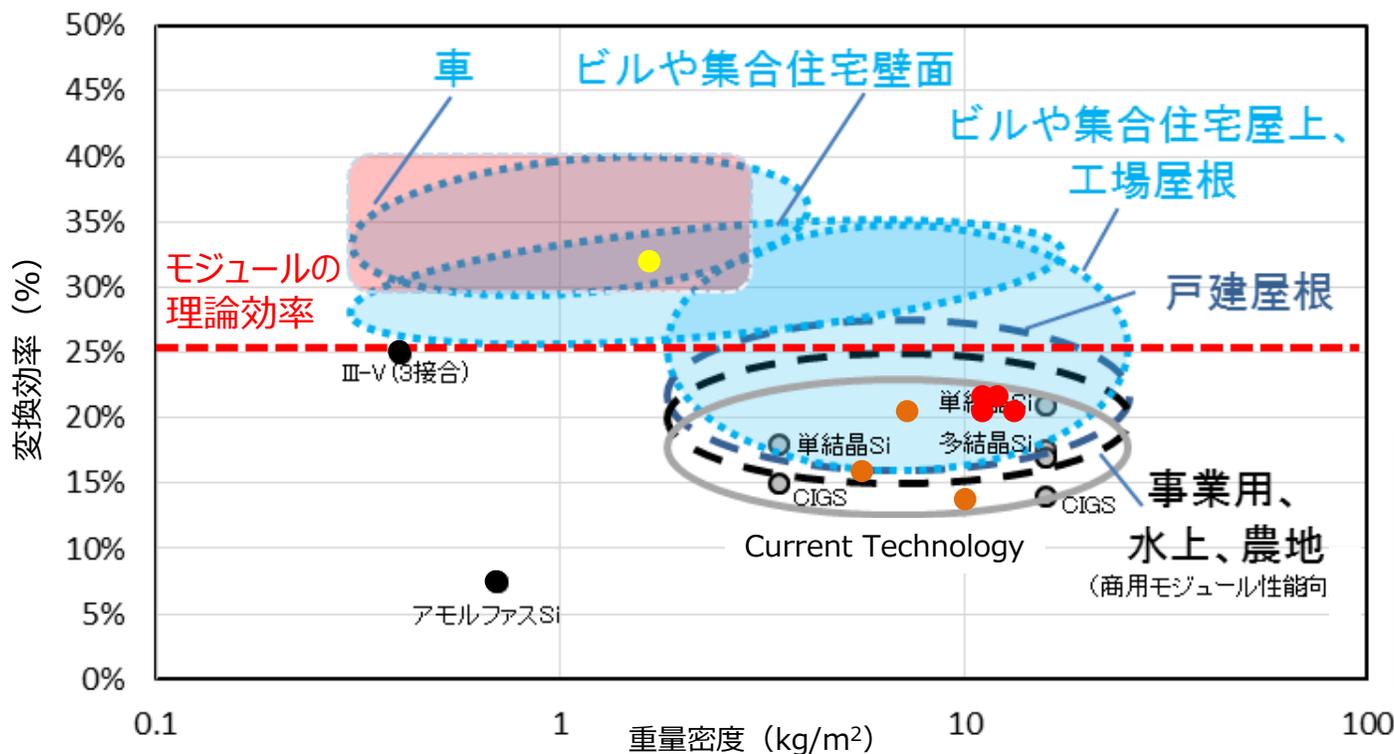
- 主力電源化に向け、今後も導入拡大が求められるが、設置に適した土地が減少している。これまで導入が進んでいない水上・農地・壁面・車載分野への対応が必要である。
- これらの新しい用途では、既存モジュールでは実現不可能な高い性能、例えば超高効率、軽量、高い意匠性、特殊な環境における長期信頼性などの付加的な性能が求められる。
- 日本の持つ薄膜太陽電池や結晶シリコンにおける高い技術力をもとに上記の要求を満たす新型の高性能モジュールを開発し、世界に先駆けて新市場を創出することが期待される。



Reference: Yamakura dam (Kyocera)



Reference:
https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2014/140616_3948.html (大成建設HP)



変換効率、重量データの出典: M.O. Reese, et al., Increasing markets and decreasing package weight for high-specific-power photovoltaics, Nature Energy (2018)



出典: 営農型発電設備の現状について(農林水産省,2018)



Reference: :
https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/28781301.html?_ga=2.75943123.774819704.1599699649-2016341029.1598338298 (トヨタHP)

- 様々な用途で大幅な高効率化が求められるが、単接合太陽電池は理論限界（約30%）に近づいている。更なる超高効率化に向けた技術の内、変換効率向上が最も進展しているのはタンデム技術である。
- タンデム太陽電池は異なる性質のセルを重ねあわせて作製されるが、トップセルには変換効率20%以上、長期信頼性（30年）、安価なプロセスが求められる。
- 現在、**安価で高性能なトップセルがない。高い技術力を持つ日本が優位。**
- ボトムセルには、日本の高レベルな技術を活用可能。（**結晶シリコン、CIGS**）

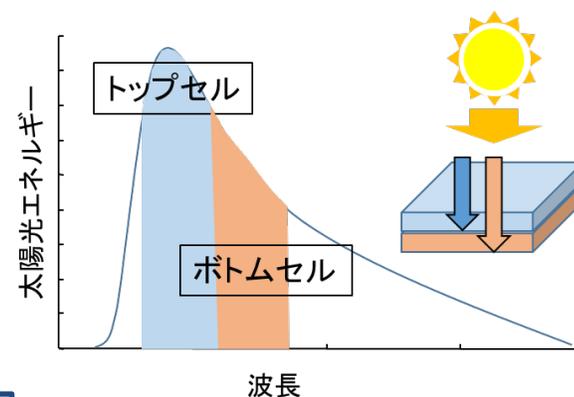
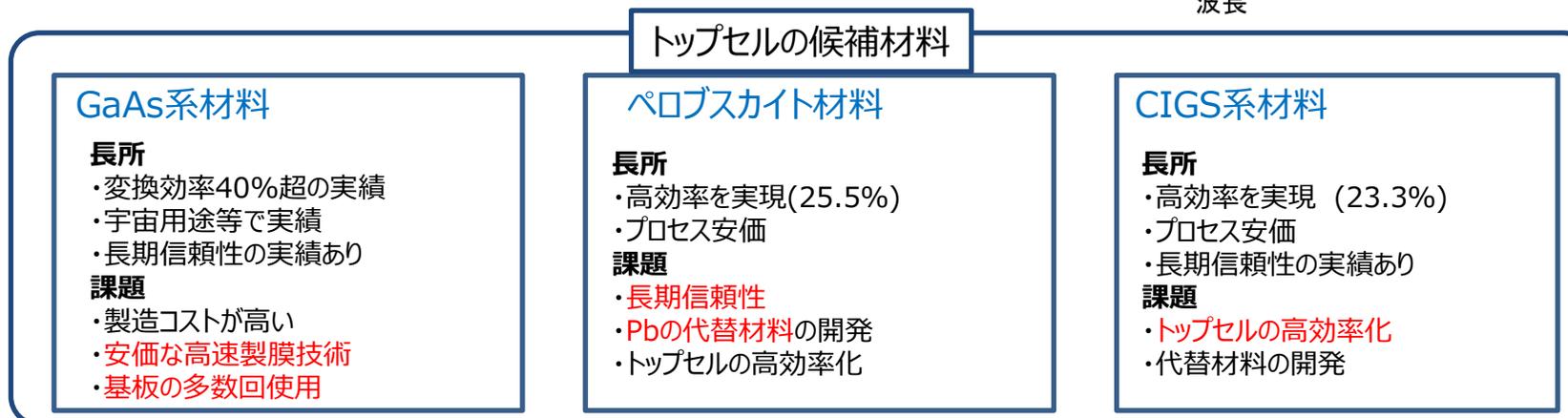


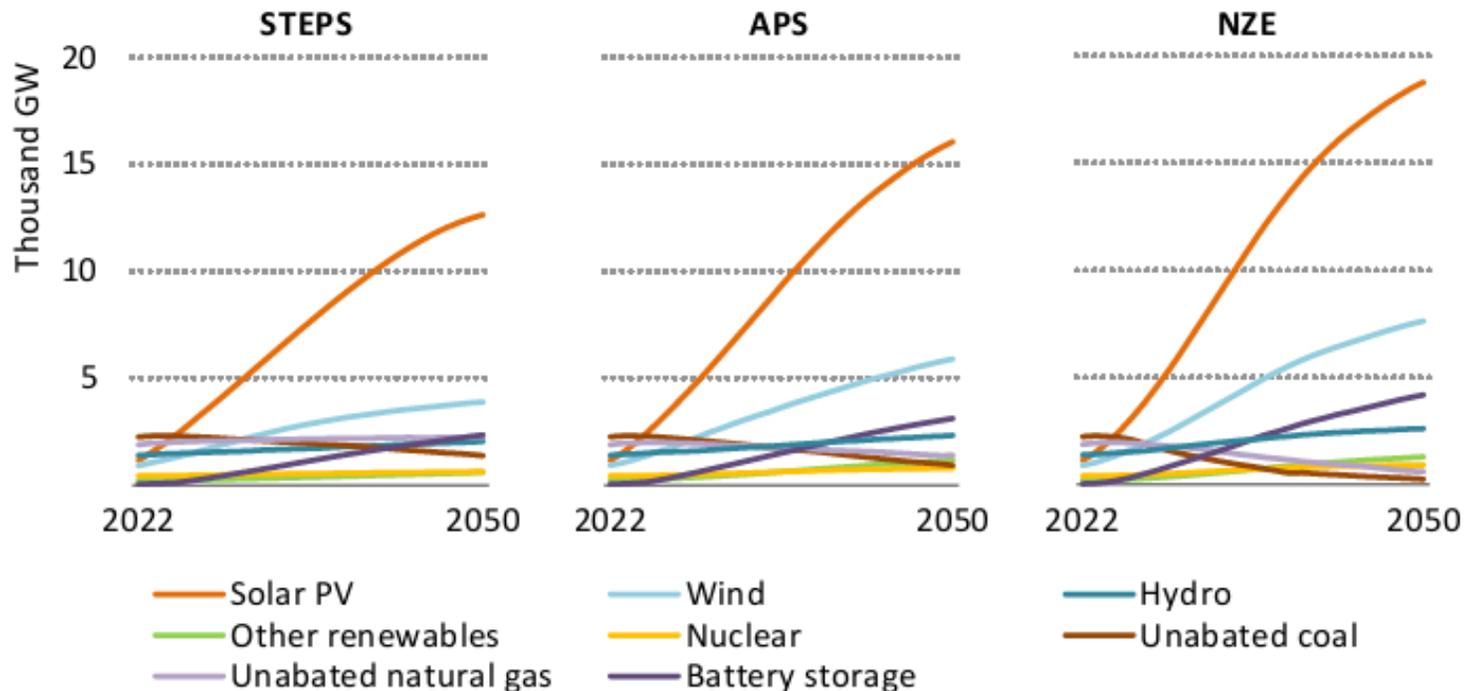
図 タンデム太陽電池の模式図



太陽光発電の持続可能化：最少の資源で最大の電力を

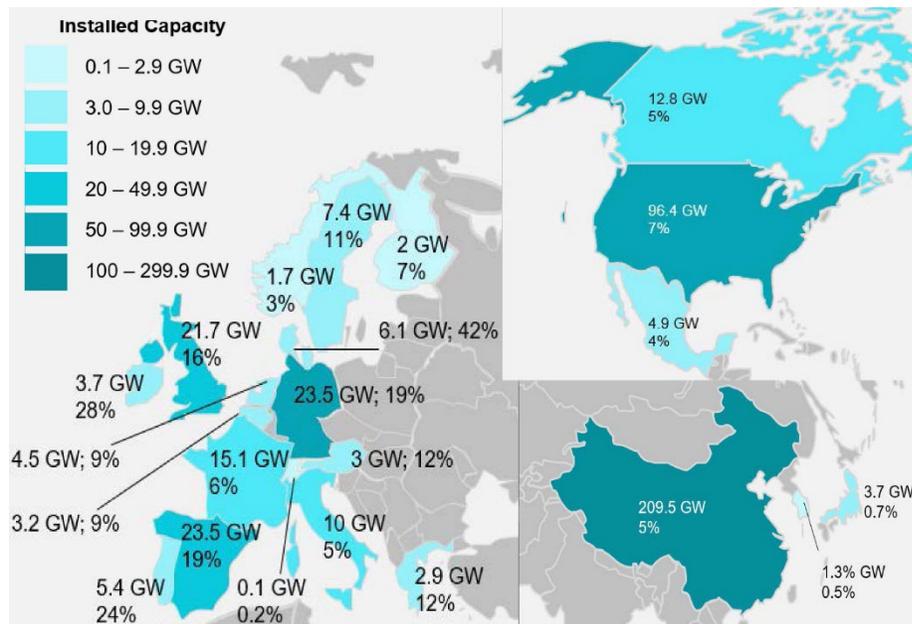
- 2050年CNの実現に向け、太陽光発電は**主力電源として中心的な役割**を期待されている。
- IEA Net Zero by 2050では太陽光発電は2050年19TW（現在の約20倍）の大量導入が見通されており、**原料供給リスク、大量廃棄**などさまざまな問題が顕在化する可能性がある。
- 太陽光発電を今後50年、100年と信頼できる主力電源として利用するには、**ライフサイクル通じての持続可能化**が求められる。

- これまで太陽光発電に求められてきた高性能化と低コスト化に加えて、今後は**持続可能性の切り口でのさらなる研究開発**が不可欠である。
- 2032年以降の置き換え需要も見据えて、海外メーカーとの差別化が図られれば、国内の太陽光発電産業の国際競争力向上にも繋がる



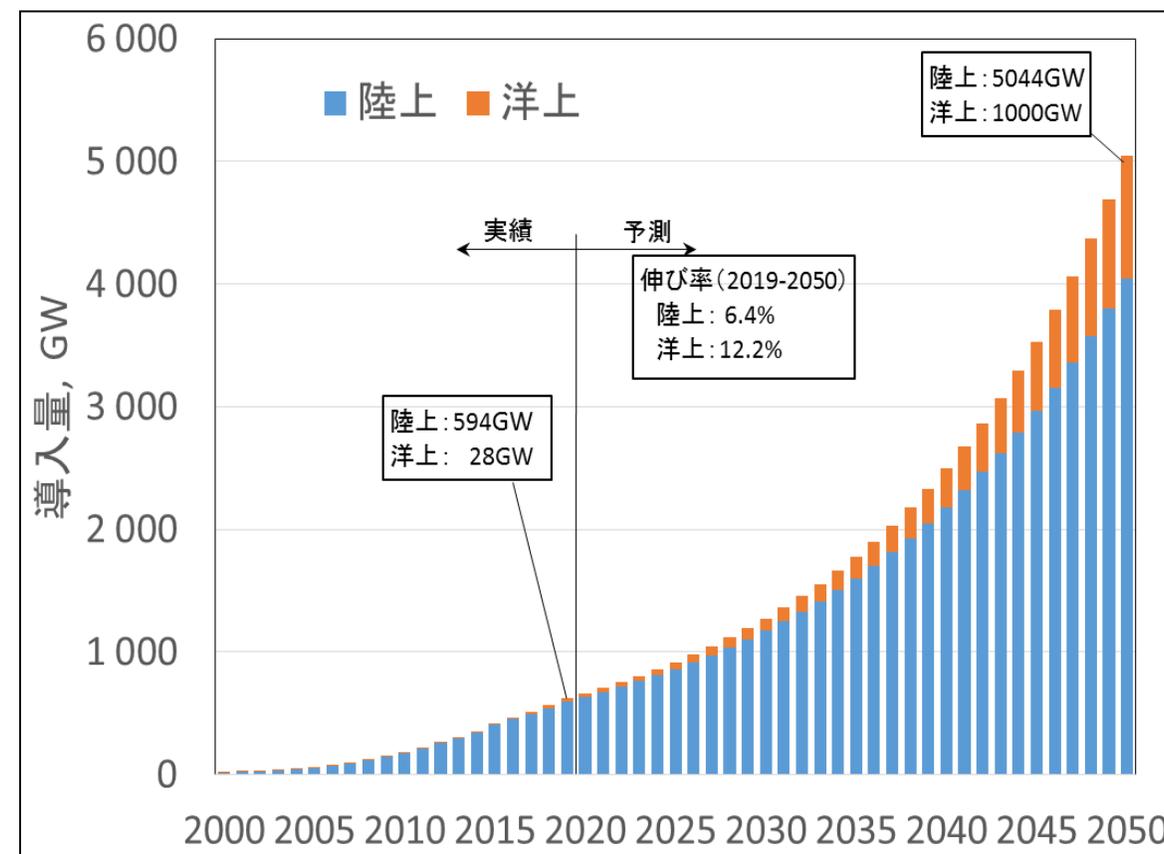
全世界での電力構成の見通し
出典：IEA World Energy Outlook 2023

- 全世界で592GWの風力が導入され、そのうち24GWが洋上風力
- IRENAは、全世界で2030年に陸上風力で1,787GW、洋上風力で228GW、2050年に陸上風力で5,044GW、洋上風力で1,000GWの導入を見積もっている。
- 洋上風力は2050年までに**2018年比で40倍までの拡大**が予測される。



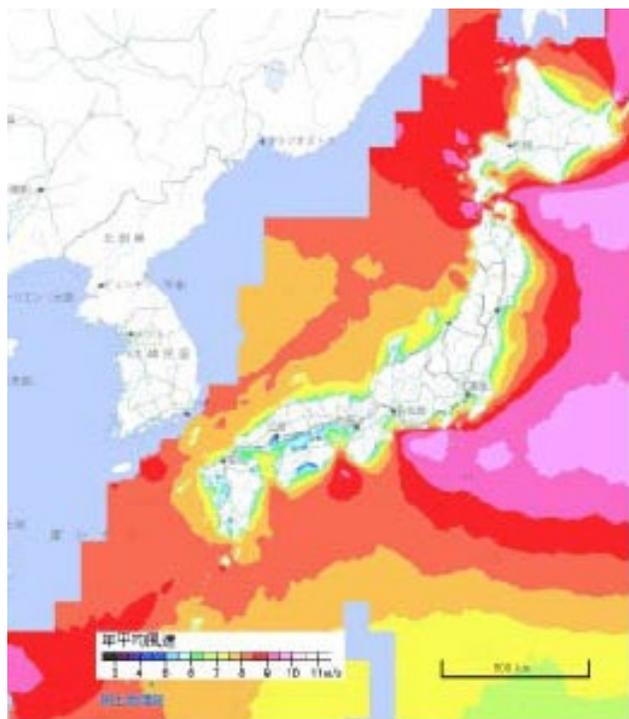
	I E A Wind TCP 参加国	世界統計
全導入容量 (洋上および陸上風力)	487.9GW	591.5GW
全洋上風力導入容量	23.4GW	23.7GW
2018年新規導入容量	40.8GW	51.3GW

出典：IEA Wind Annual report 2018



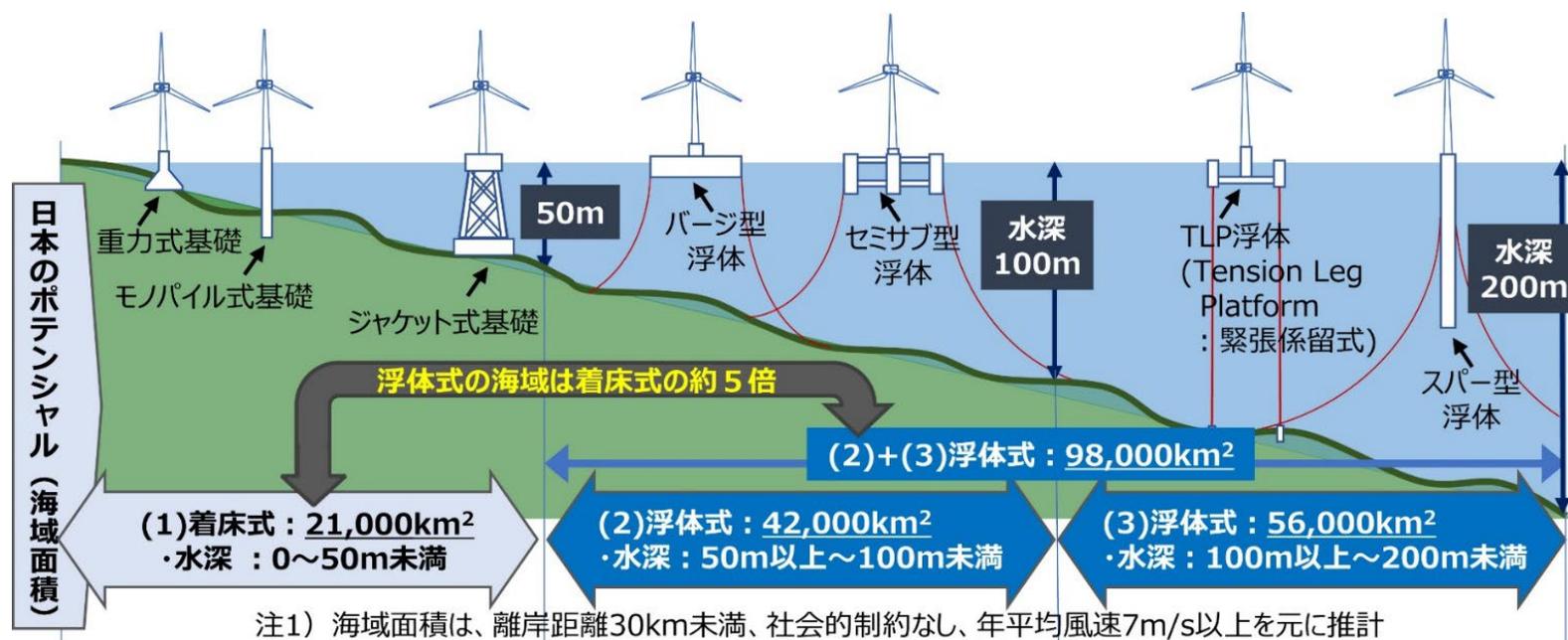
出典：実績は、IRENA Renewable Statistics 2020
2030年、2050年予測は、Future of Wind – A Global Energy Transformation Paper 2019
などを根拠にNEDO TSCにて作成

- 洋上風力発電は①大量導入、②コスト低減、③経済波及効果が期待され、再生可能エネルギーの主力電源化の切り札と位置づけられている。
- 水深によって様々な形式の洋上風力発電が検討されている。
- 遠浅な海岸が少ない日本では浮体式洋上風力発電への期待が大きい。
- 浮体式に適した海域は着床式の約5倍と見積もられている。



日本近海の洋上年間平均風速分布

NeoWins (洋上風況マップ)、
http://app10.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/top.html



出典：伊藤,日本の洋上風力技術開発ロードマップ、Global Offshore Summit-Japan 2021 (2021)

「洋上風力産業ビジョン（第1次）」案の概要

洋上風力発電の意義と課題

- 洋上風力発電は、①大量導入、②コスト低減、③経済波及効果が期待され、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札。
- 欧州を中心に全世界で導入が拡大。近年では、中国・台湾・韓国を中心にアジア市場の急成長が見込まれる。
(全世界の導入量は、2018年23GW→2040年562GW (24倍)となる見込み)
- 現状、洋上風力産業の多くは国外に立地しているが、日本にも潜在力のあるサプライヤーは存在。

洋上風力の産業競争力強化に向けた基本戦略

1. 魅力的な国内市場の創出

2. 投資促進・サプライチェーン形成

3. アジア展開も見据えた次世代技術開発、国際連携

官民の目標設定

(1) 政府による導入目標の明示

- ・2030年までに1,000万kW、2040年までに3,000万kW～4,500万kWの案件を形成する。

(2) 案件形成の加速化

- ・政府主導のプッシュ型案件形成スキーム（日本版セントラル方式）の導入

(3) インフラの計画的整備

- ・系統マスタープラン一次案の具体化
- ・直流送電の具体的検討
- ・港湾の計画的整備

(1) 産業界による目標設定

- ・国内調達比率を2040年までに60%にする。
- ・着床式発電コストを2030～2035年までに、8～9円/kWhにする。

(2) サプライヤーの競争力強化

- ・公募で安定供給等に資する取組を評価
- ・補助金、税制等による設備投資支援（調整中）
- ・国内外企業のマッチング促進（JETRO等）等

(3) 事業環境整備（規制・規格の総点検）

(4) 洋上風力人材育成プログラム

(1) 浮体式等の次世代技術開発

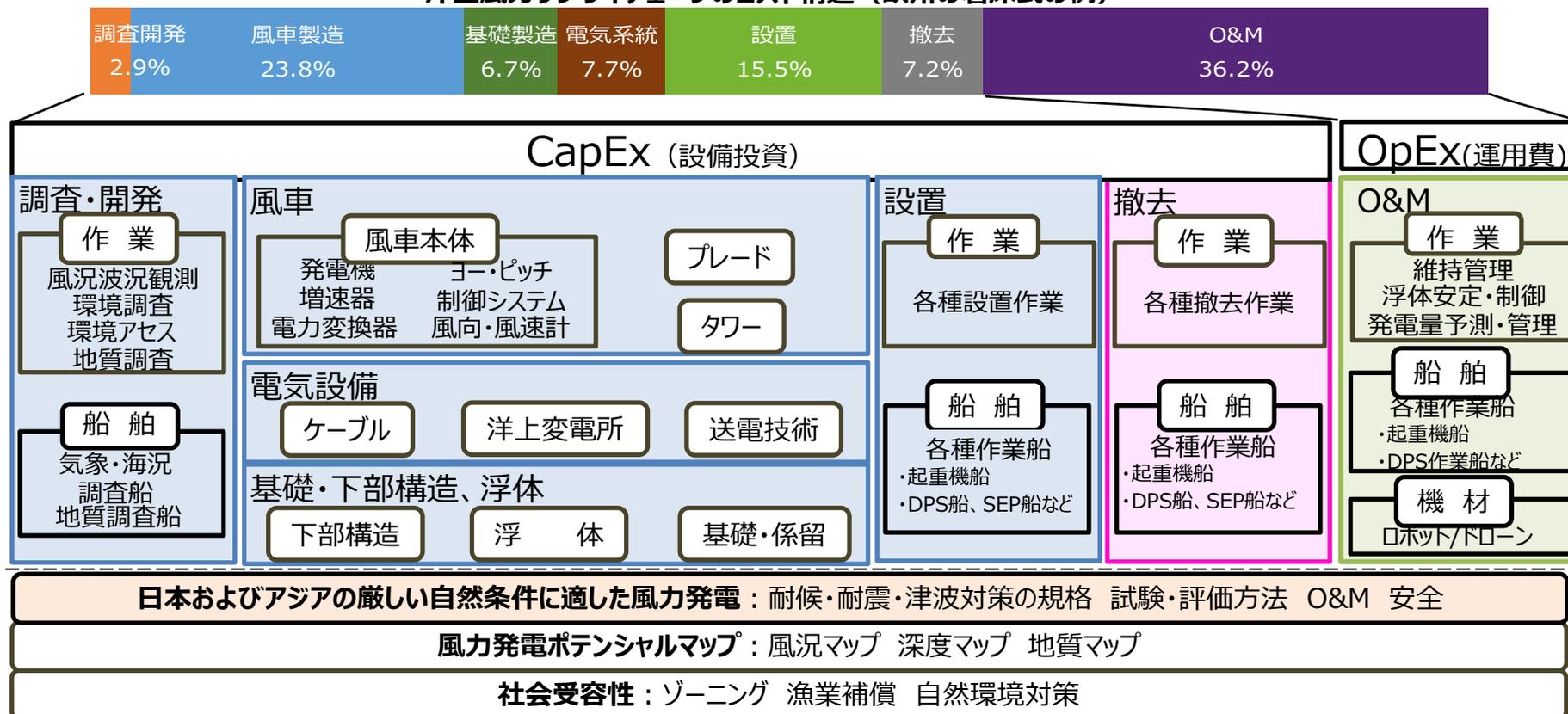
- ・「技術開発ロードマップ」の策定
- ・基金も活用した技術開発支援

(2) 国際標準化・政府間対話等

- ・国際標準化
- ・将来市場を念頭に置いた二国間対話等
- ・公的金融支援

- 欧州での着床式のコスト構造を示すが、調査開発、風車・基礎の製造や設置に加え、電気系統や撤去のコストを含むCAPEX（設備投資）と、O&MのコストであるOPEX（運用費）から成り立っている。
- 現状、日本における風力発電のコストは、先行する欧州と比較して高く、低コスト化は必須である。項目が多岐にわたっているため、一つのボトルネック課題を解決するだけでなく、調査開発から製造、設置、運転保守（O&M）、撤去に至る全ての分野でのコスト低減が不可欠である。

洋上風力サプライチェーンのコスト構造（欧州の着床式の例）



※DPS作業船：Dynamic Positioning System作業船（自動船位保持式作業船），SEP船：Self Elevating Platform（自己昇降式作業台船）

各項目は、第1回洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会作業部会資料3^{*1}、Guide to an offshore wind farm(BVG associates, 2019)^{*2}に基づきNEDO TSCIにて再構成

- 欧州では、世界最大となる英Kincardineの浮体式洋上風力が2021年に試運転を開始した。ノルウェーのHywind Tampenでは、Equinorがスパー型のコンクリート製浮体を用いたウインドファームの建設を進めており、2023年までに運転開始予定となっている。また2021年には、ノルウェーのStiesdal Offshore Windが水深200mの地点で新しいコンセプトのテトラスパー型浮体を用いたデモ機の試運転を開始した。
- 中国では、中国長江三峡集団(CTG)が5.5MW級セミサブ型浮体のデモ機（明陽智能MySE製5.5MW）を建設し、2021年に運転を開始したが、これ以降はまだ計画段階である。
- 米国はDOEが総額575万USDを用意し、大量導入に向けた浮体技術の開発や企業の連携、設計の最適化を行い、大量導入に向けたロードマップを描くことを計画している。
- 国内でも、GI基金事業を含め、様々なコンセプトの浮体式洋上風車の研究開発・実証が進められている。

【英 Kincardine】



浮体：セミサブ型・鋼製
 (米プリンシプルパワー WindFloat)
 風車：ベスタス製V164-9.5MW
 規模：47.5MW (5基)
 出所：<https://www.principlepower.com/projects/kincardine-offshore-wind-farm>

【ノルウェー Hywind Tampen】



浮体：スパー型・コンクリート製
 (ノルウェーEquinor)
 風車：シーメンスガメサ製SG8.0-167DD
 規模：88MW (11基)
 出所：<https://www.equinor.com/energy/hywind-tampen>

【ノルウェー テトラスパーデモ】

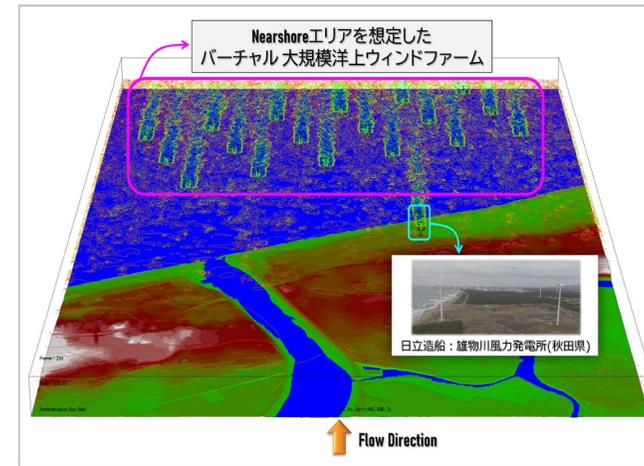


浮体：テトラスパー型・鋼製
 (ノルウェーStiesdal Offshore Wind)
 風車：シーメンスガメサ製SG3.6
 規模：3.6MW (デモ 1基)
 出所：<https://www.stiesdal.com/offshore/the-tetraspar-full-scale-demonstration-project/>

- 複数の風車を配置すると風車の後流の影響が発生する。ウィンドファーム全体での発電量を最適化するために、最適な風車の配置を行う必要がある。
- ウェイクのシミュレーションによる設置の最適化、発電量の予測から、ウェイクの制御による発電量最適化、さらに乱流の能動的な制御を可能にするウェイクマネジメントに至るまで、この技術の重要性は非常に高い。



大規模洋上ウィンドファームでの「風車ウェイク」相互干渉の可視化例(出典：C.B. Hasager et al, Wind Farm Wake (2013))



日本ではウィンドファームが比較的岸から近い場所に設置されるために陸地の影響を受けやすい。

出典：RIAM COMPACT HP 日経新聞朝刊に掲載 2020.6.23
 九大、東芝系・日立造船と組む
http://www.riam-compact.com/inc/media/nikkei_20200619.pdf

Wake Simulation
 最適な風車の配置

発電量予測
 システムの安定化

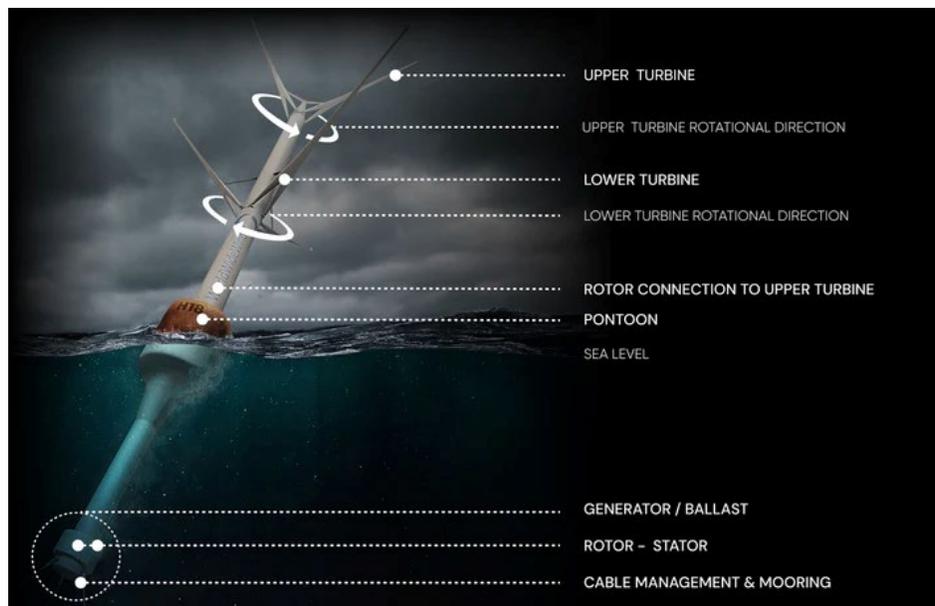
Wake Control
 発電量最適化

Wake Management
 乱流の能動的制御



- 風力タービンの主流は水平軸型で、3枚のブレードが風上に向かって回転するタイプが多い。
- 水平軸型は重い発電機をタワーの高い位置に置くため、重心が高くなることから基礎構造が大きくなる。特に浮体式では浮体の動揺が大きくなるため、浮体構造も大きくなり高コストになる。
- この課題の解決に向け、浮体と一体とした垂直軸型が提案され、開発が進められている。
- 垂直軸型では発電機を海面下にも配置でき、浮体動揺の抑制に寄与するだけでなく、回転軸についても比較的大きな傾斜を許容できることから浮体の小型化、低コスト化が期待される。

World Wide Wind（ノルウェー）



ノルウェーのEPCI事業者AF Gruppenと協力し、ノルウェー南西海岸のVatsにあるAFの作業基地で30kW試作機の試験を2023年中にも開始する。その後、1.2MWプロトタイプの開発を行う予定。

出所：<https://worldwidewind.no/>

アルバトロス・テクノロジー（日本）

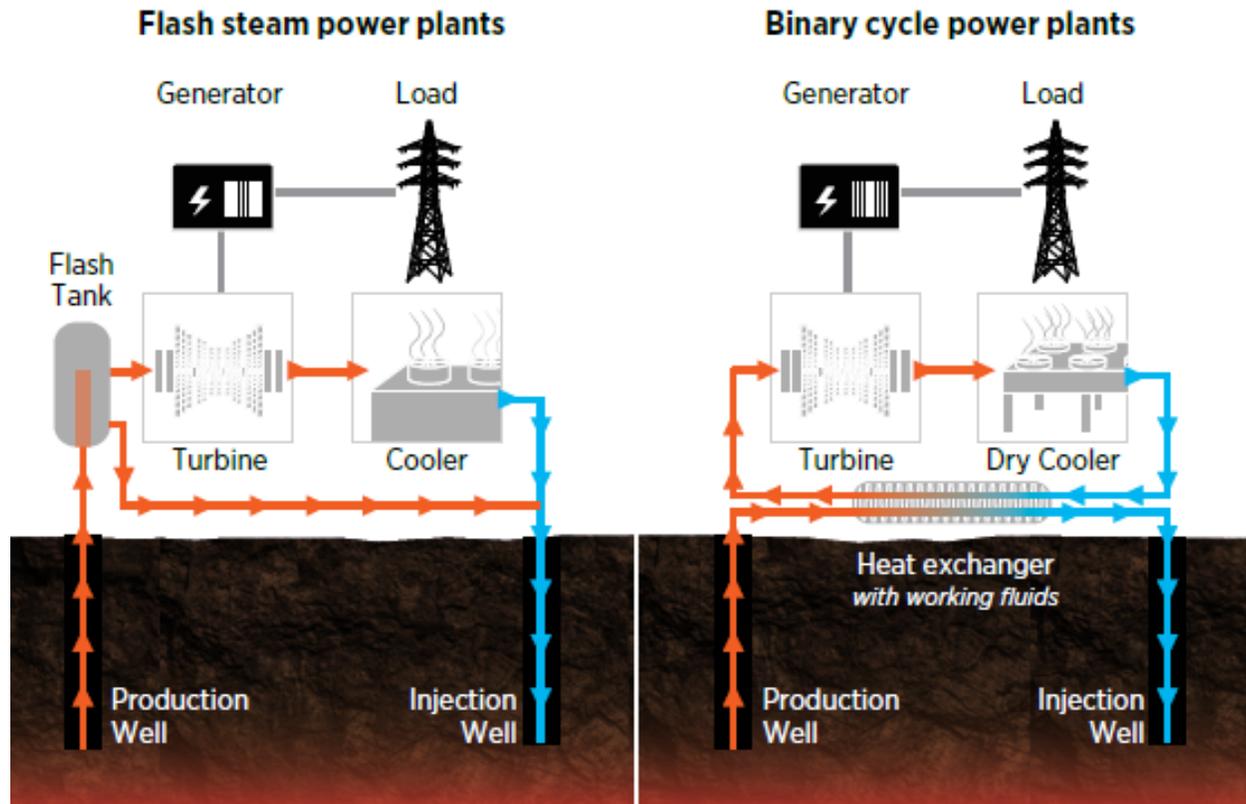


2022年、NEDO「新エネルギー等のシーズ発掘・事業化に向けた技術研究開発事業」に採択され、基盤研究を実施中。電源開発、東電HD、中部電力、川崎汽船との共同研究で、20kW試作機の実海域試験を2024年に計画。

出所：<https://www.albatross-technology.com/>

地熱発電の特徴

- 天候・季節等の自然条件に左右されず安定的な発電が可能なベースロード電源
- 二酸化炭素排出量が少ない国産のエネルギー源
- 災害時・緊急時には、近隣地域の非常用電源として利用可能
- 地熱エネルギーは熱利用にも貢献可能であり、地域の活性化にも資する



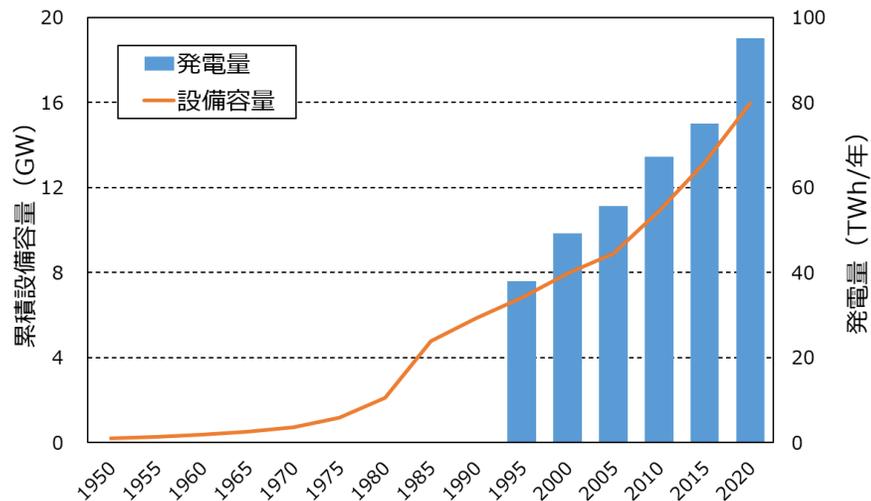
フラッシュ方式

- 高温の蒸気・熱水を利用
- 大規模化が可能
- 発電効率が高い
- 火力発電技術を流用可

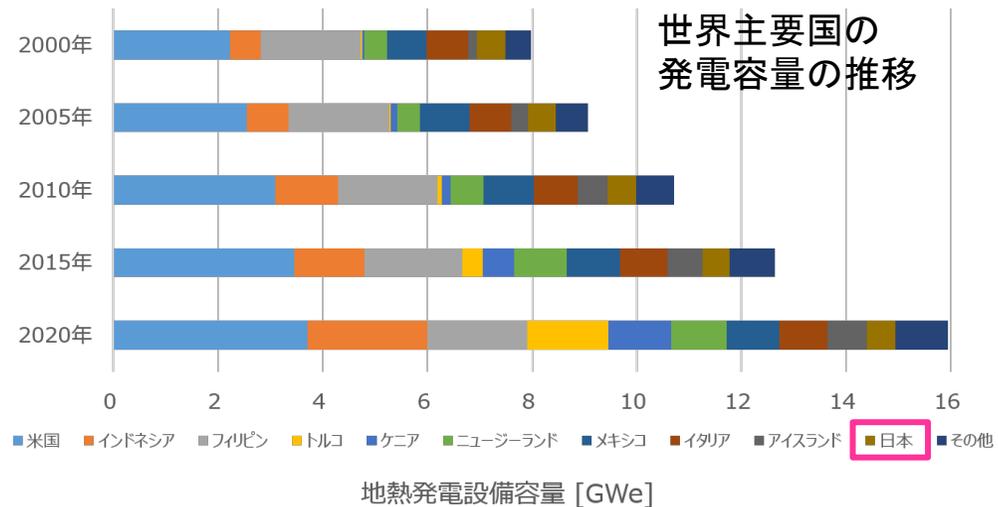
バイナリー方式

- 100℃以下の熱水を利用
- 熱水を全量還元可能
- 狭い敷地面積に設置可
- 熱交換器を使用するため、フラッシュ方式と比較して発電効率が低い

- 2020年時点で世界の総発電設備容量は15,950 MW、総発電電力量は約95.1TWh／年と報告されている。2010～2020年の期間における発電設備容量の増加率は年間約505 MWであった。
- 近年の地熱開発はトルコ、インドネシア、ケニア、アメリカ、アイスランドにおいて目覚ましい勢いで進んでいる一方、フィリピン、メキシコ、イタリア、日本では停滞傾向にある。



IEA Geothermal Implementing Agreement, Annual Report 2019 (OECD/IEA, 2019)及びProceeding of World Geothermal Congress 2020等を基にNEDO技術戦略研究センター作成



Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report (Proceedings of World Geothermal Congress 2020)等を参考にNEDO技術戦略研究センター作成

資源量：現状アクセス可能な地熱資源量が少ない

高傾斜掘削技術：国立・国定公園内の地熱開発の際、掘削コストが資源量に対して十分見合っていることが必須

円滑な合意形成：景観シミュレーションや土地改変面積低減等の環境対策を通じた合意形成の促進

コスト：開発リスクの低減、開発コストの低減が必要

探査技術：安価かつ高精度な探査技術の開発

掘削技術：IoT/AI技術適用による掘削モニタリング等を通じた掘削コストの削減

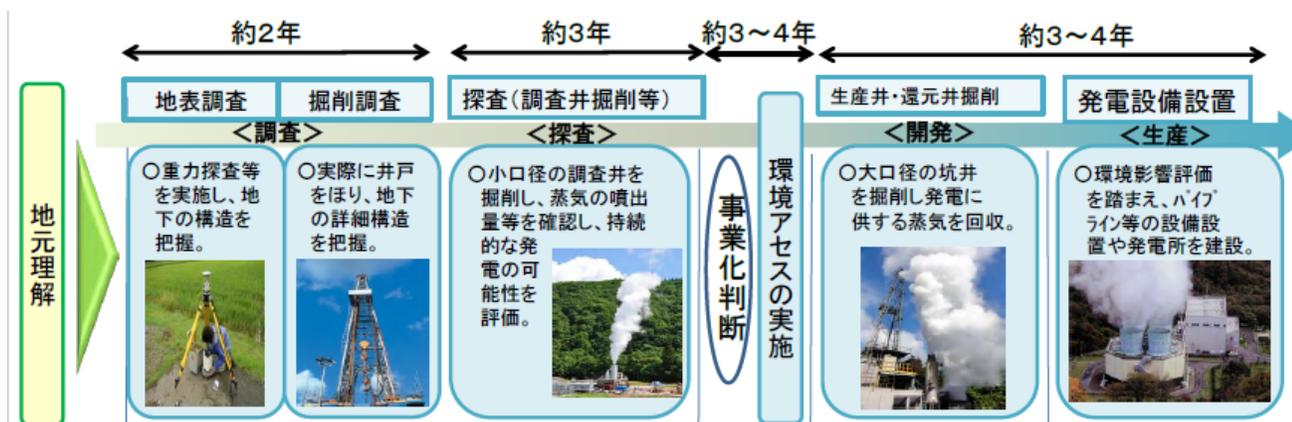
透水性改善技術：例えば水圧破砕等の適用により、未利用坑井での蒸気生産量を改善

スケール、腐食対策：スケール除去、付着防止技術や腐食対策による設備利用率の向上 など

リードタイム：調査から発電開始までに長い期間を要する。地元理解が課題

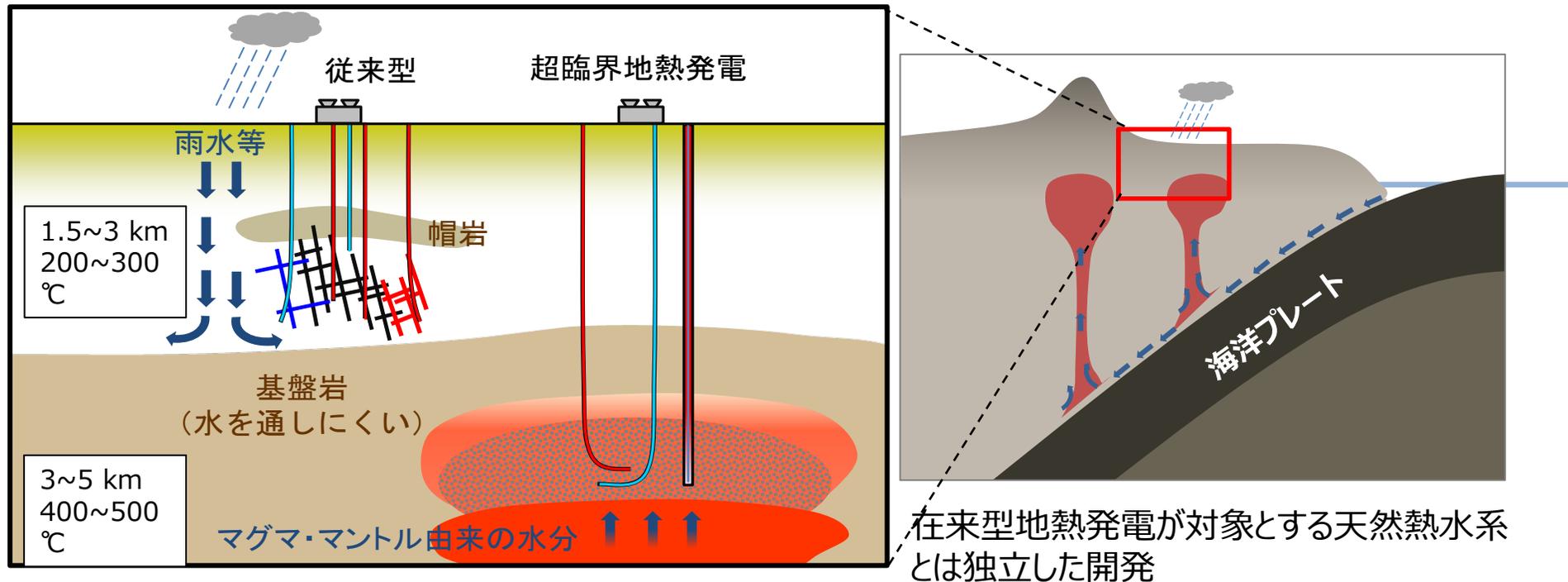
合意形成手法の確立：技術やデータと経済効果分析をパッケージ化

全量還元可能な新しい発電技術：地元理解を得やすい新しい発電技術の開発 など



出所：総合資源エネルギー調査会
省エネルギー・新エネルギー分科会
新エネルギー小委員会（第1回）
配布資料（METI, 2014）

- 我が国を代表とする沈み込み帯の近傍では、プレートテクトニクスによって地下に引き込まれた海水に起因する水分が高温・高圧（超臨界状態）で賦存していると考えられている。超臨界地熱発電は、この地熱資源を活用しようというもの。
- 在来型地熱発電が1地域あたり数十MW程度の規模であるのに対して、超臨界地熱資源が使えれば 1地域あたり100MW以上の規模が実現できると見込まれている。
- 超臨界地熱資源の蓋然性が高い地域（実際に高温領域が確認された地点）は国内に15地域以上存在し、新しい地熱資源として期待されている。



- 変動電力の平準化や貯蔵には貯蔵期間に応じてさまざまな方法がある
- 短周期変動へはキャパシタ、蓄電池、フライホイールが適し、数日から季節単位の長周期変動には揚水、水素によるエネルギー貯蔵が適する

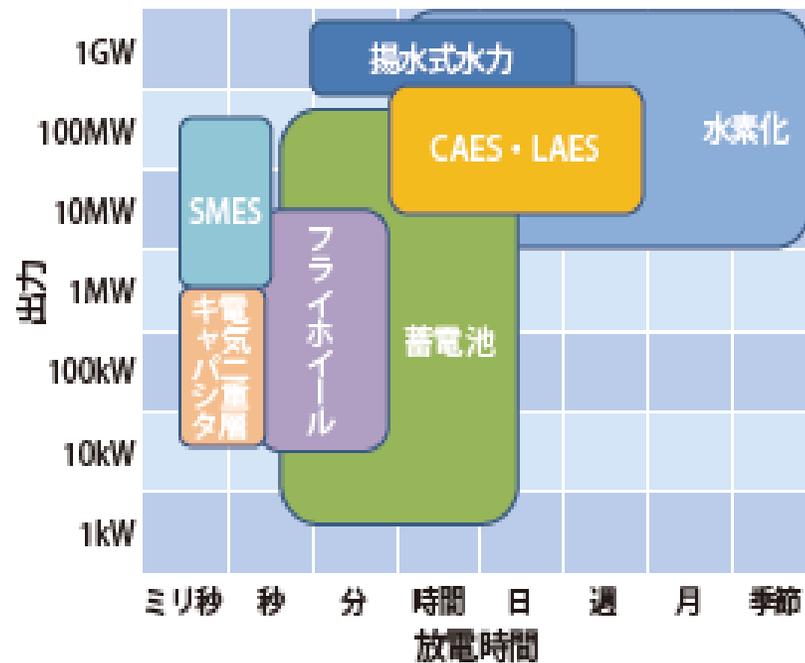


図15 電力貯蔵技術の各方式の出力・放電時間
出所：各種資料を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2017)

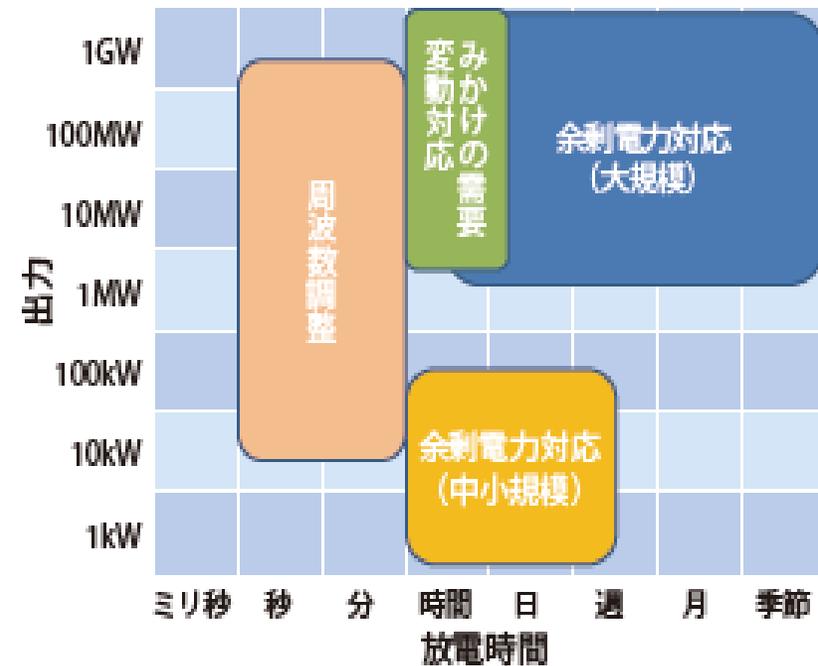
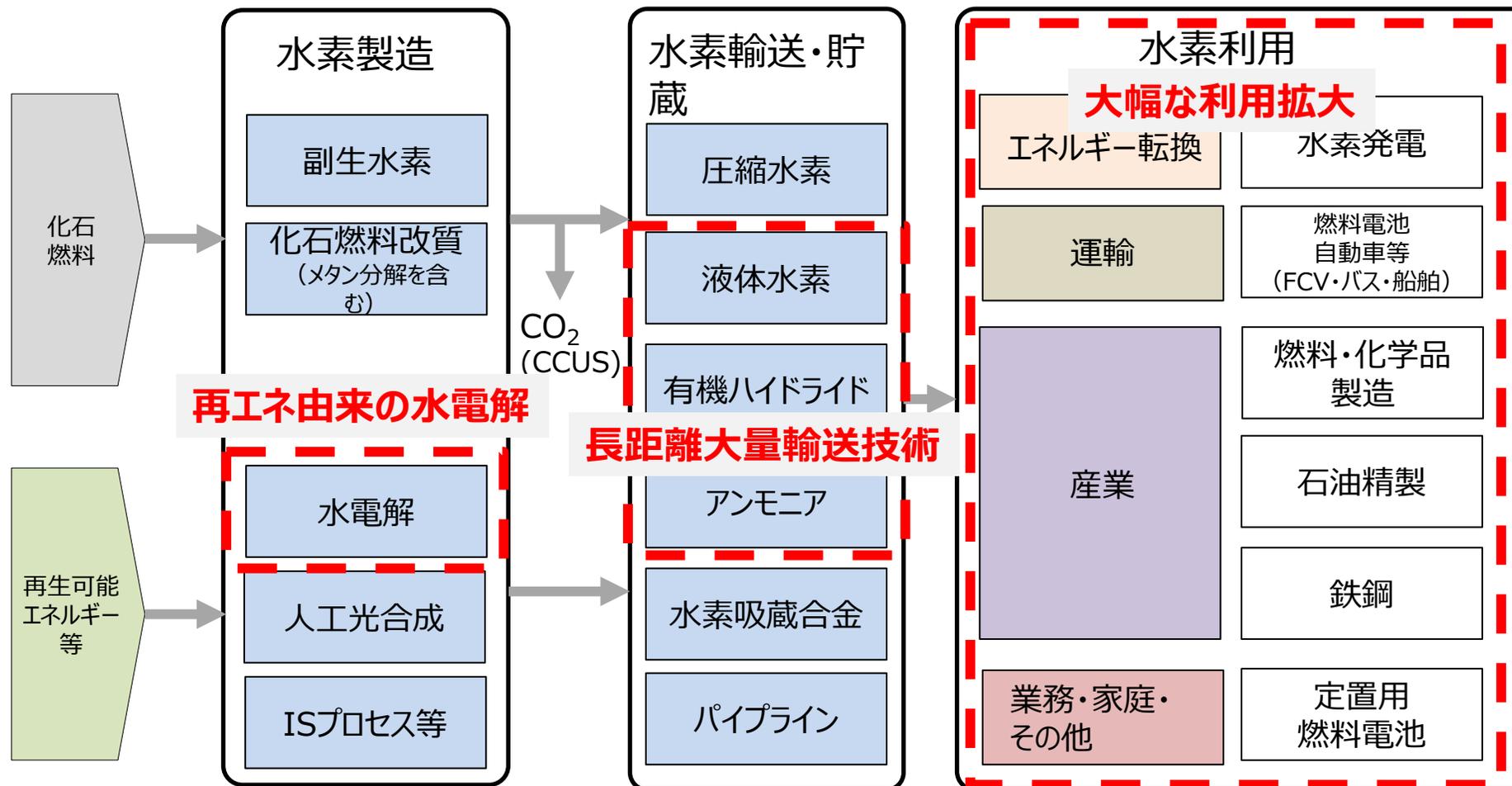
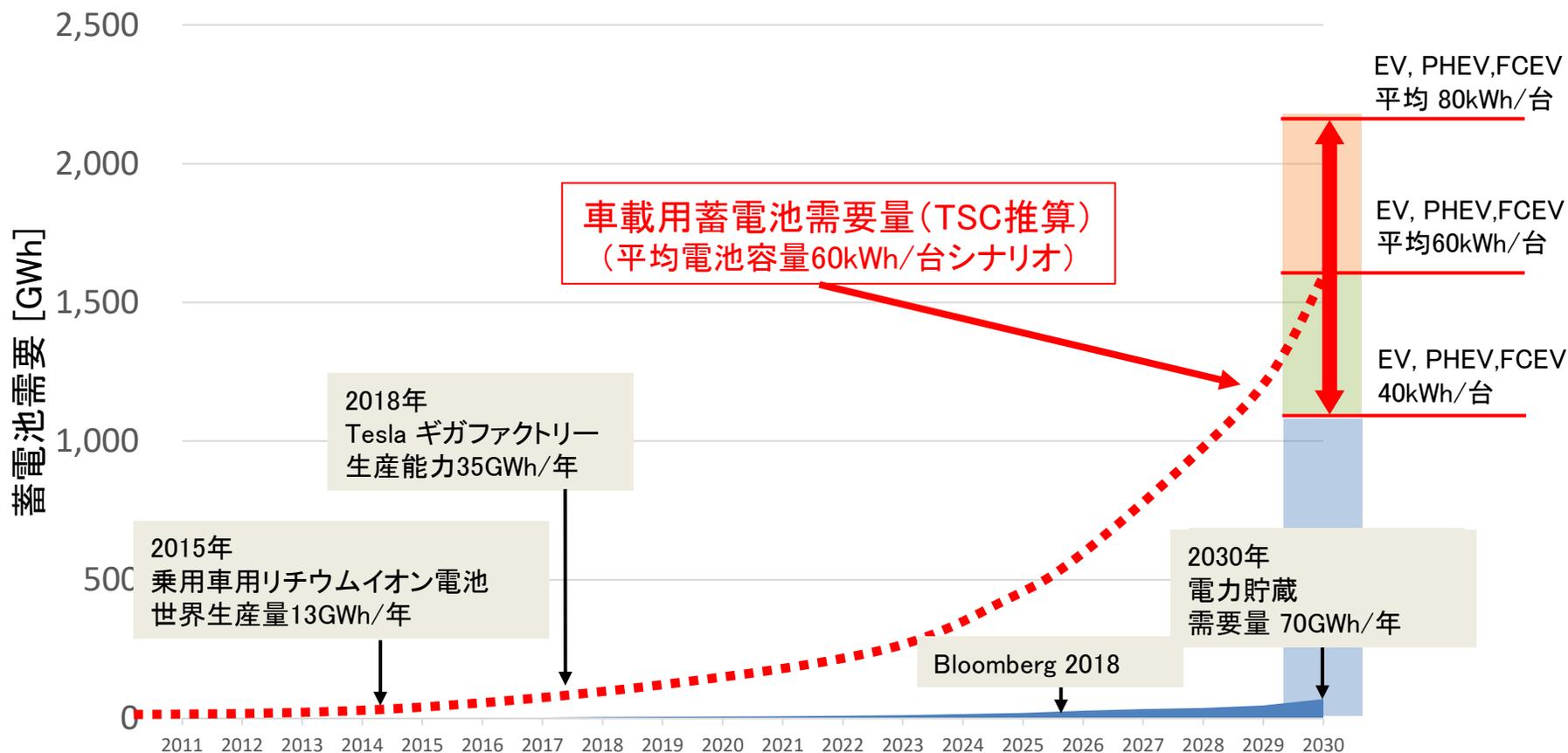


図16 各用途に必要な出力・放電時間
出所：各種資料を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2017)

- 水素は、CO₂フリーで製造可能で、輸送・貯蔵ができ、さらに利用時にCO₂を出さないなど、脱炭素化にむけた重要技術
- 日本の**エネルギー供給構造を多様化**させ、エネルギーの**脱炭素化**を実現する手段のひとつ
- CO₂フリー水素のコスト低減が課題



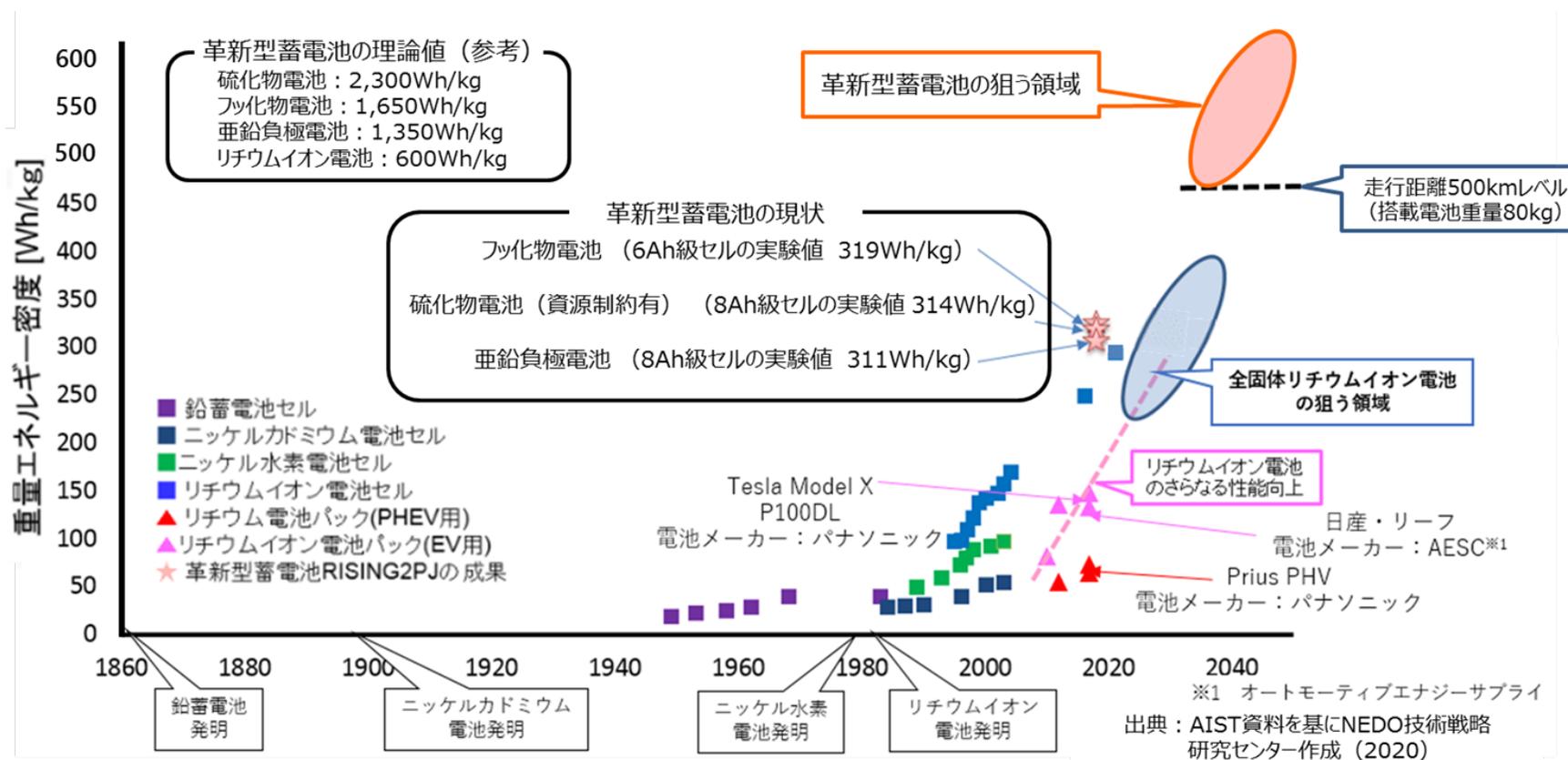
- 蓄電池は、①再生可能エネルギーの貯蔵、②電動自動車の利用拡大という点でCO₂削減に貢献する技術。
- 車載用蓄電池の需要は急拡大が見込まれることから、2030年における車載用蓄電池の需要は、電力貯蔵用の15-30倍と大幅に上回る見通しであり、**車載用蓄電池が蓄電池の主要マーケット**。



出典: 各種資料を基に技術戦略研究センター作成(2018)

※3 Long-Term Electric Vehicle Outlook 2017. Bloomberg(2017年)

- 車載用蓄電池は、時代とともに新しい電池が開発され、エネルギー密度が向上。
- 現時点の主力電池はリチウムイオン電池であるが、エネルギー密度の更なる向上が求められ、開発中の全固体リチウムイオン電池や、それを超える革新型蓄電池の研究開発が進められている。
- **2030年代には全固体リチウムイオン電池、2040年以降に革新型電池が主力になると考えられている。**



- 地球温暖化への対策を経済性成長の制約やコストと考える時代は終わり、国際的にも**成長の機会**と捉える時代に突入した。
- 2050年カーボンニュートラルの実現のためには、再生可能エネルギーの導入普及を中心に脱炭素化を進める必要がある。そのためには再生可能エネルギーのさらなる低コスト化と信頼性の向上が不可欠である。
- 変動再生可能エネルギーの導入拡大には高性能で低コストな蓄電池や水素製造・利用技術の開発とともに系統の増強も必要となる。グリーン水素（RE+水電解）では再エネのコスト低減が鍵となる。
- 再生可能エネルギーを中心とした電力ネットワークの強靱化・脱炭素化には、既存の発電技術のみに依存するのではなく、再生可能エネルギーを用いた調整力（上げDR、下げDR）や疑似慣性力など、革新的な技術開発も不可欠である。
- コロナやウクライナ・ロシア紛争によってサプライチェーンや原料確保の点で様々な問題が顕在化。風力、太陽光発電、蓄電池等の大量導入を進めるには、**安定的な原料確保、強靱なサプライチェーンの構築、材料リサイクルの効率向上**等も必要となる。
- GX達成には再生可能エネルギー以外の取り組み（例えば、CCUSやDX等）も重要であり、ブレイクスルーとなりうる技術シーズについてアカデミアに対する産業界の期待は大きい。
- 地球温暖化の問題は日本1国ですべて解決できるものではなく、国際的な連携やルール作りを通して世界全体で取り組むべき重要な課題である。

ご清聴ありがとうございました。

謝辞

- 「持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針2023」作成チームのメンバーに感謝します。また、資料の作成に協力いただいたサステナブルエネルギーユニットのメンバーに謝意を表します。