

低温工学・超電導学会主催 一般公開 シンポジウム(2022年6月22日)

「カーボンニュートラル社会創出に向けてー低温工学・超電導技術の役割を語るー」

カーボンニュートラルの実現に向けた 電気学術・技術の役割と超電導技術への期待

東京大学 大学院新領域創成科学研究科

大崎 博之

カーボンニュートラルの実現に向けた 電気学術・技術の役割と超電導技術への期待

1. カーボンニュートラルに関わる動き
2. 電源構成と再生可能エネルギー
3. 電気学術・技術に関わるカーボンニュートラルへの取り組み
4. 超電導技術への期待
5. 電力分野における研究開発の例
6. 運輸分野におけるカーボンニュートラル
7. まとめ

カーボンニュートラル実現に向けた国内動向

菅総理所信表明演説(令和2年10月26日)

我が国は、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、すなわち**2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す**ことを、ここに宣言いたします。
もはや、温暖化への対応は経済成長の制約ではありません。積極的に温暖化対策を行うことが、産業構造や経済社会の変革をもたらし、**大きな成長につながるという発想の転換**が必要です。

地球温暖化対策推進本部(令和3年4月22日)

2050年目標と整合的で、野心的な目標として、**2030年度に、温室効果ガスを2013年度から46%削減**することを目指します。さらに、**50%の高み**に向けて、挑戦を続けてまいります。

地球温暖化対策の推進に関する法律(令和3年6月2日一部改正)

地球温暖化対策の推進は、(略)環境の保全と経済及び社会の発展を統合的に推進しつつ、我が国における**二千五十年までの脱炭素社会(略)の実現を旨として**、国民並びに国、地方公共団体、事業者及び民間の団体等の密接な連携の下に行われなければならない。

岸田総理所信表明演説(令和3年12月6日)

人類共通の課題である気候変動問題。この社会問題を、**新たな市場を生む成長分野**へと大きく展開していきます。
2050年カーボンニュートラル及び2030年度の46%排出削減の実現に向け、再エネ最大限導入のための規制の見直し、及び、クリーンエネルギー分野への大胆な投資を進めます。

2050年CNに伴う
グリーン成長戦略
(2021.6)

地域脱炭素
ロードマップ
(2021.6)

温対法改正
(2021.6)

地球温暖化対策計画
(2021.10)

- 2030年度の野心的な目標
→ 46%削減、
さらに50%に挑戦
- 部門別削減目標及び対策を強化

エネルギー基本計画
(2021.10)

- 2030年のエネルギーミックス:
再エネ 36~38%
原子力 22~20%
火力全体 41%
水素・アンモニア 1%

パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略
(2021.10)

- 2050年カーボンニュートラルに向けた基本的考え方、分野別のビジョン等

COP26にNDC(国が決定する貢献)提出
(2021.11)

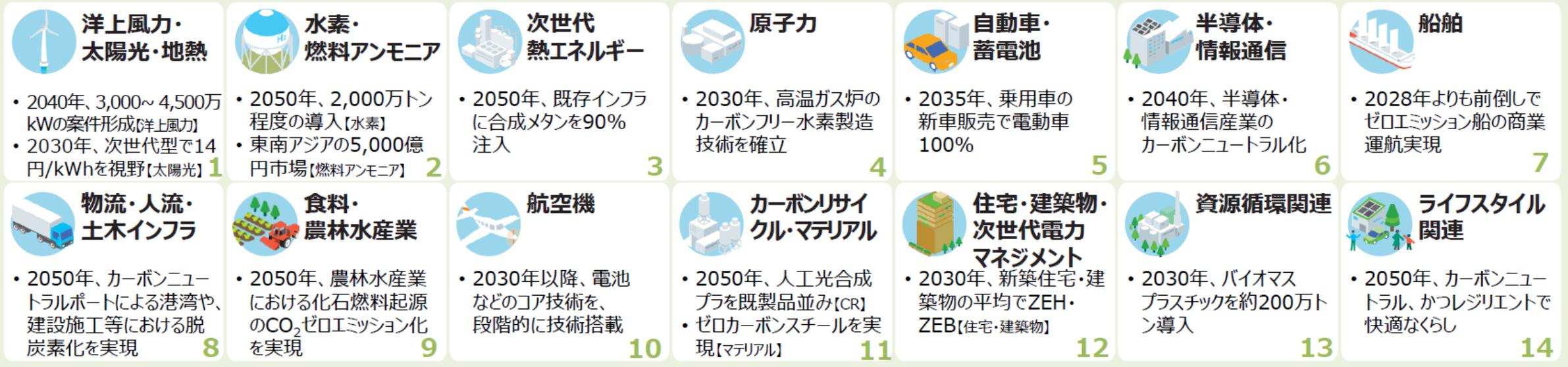
- 2050年カーボンニュートラルに向けた基本的考え方、分野別のビジョン等

グリーン成長戦略

- 温暖化への対応を、経済成長の制約やコストとする時代は終わり、「成長の機会」と捉える時代に突入している。
- 実際に、研究開発方針や経営方針の転換など、「ゲームチェンジ」が始まっている。この流れを加速すべく、グリーン成長戦略を推進する。
- 「イノベーション」を実現し、革新的技術を「社会実装」する。これを通じ、2050年カーボンニュートラルだけでなく、CO2排出削減にとどまらない「国民生活のメリット」も実現する。

2050年に向けて成長が期待される、14の重点分野を選定。

• 高い目標を掲げ、技術のフェーズに応じて、実行計画を着実に実施し、国際競争力を強化。 • 2050年の経済効果は約290兆円、雇用効果は約1,800万人と試算。



カーボンニュートラルに関わる動き

パリ協定(地球温暖化対策の国際的枠組み)

産業革命前からの平均気温の上昇を2°Cより十分下方に保持し、1.5°Cに抑える努力を迫るといった目標を掲げている

- パリ協定の目標を達成するために、日本、米国、英国やEUは2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを表明。
- 温室効果ガス削減の2030年目標

	日本	EU	英国	米国	中国
					
2020				2021年1月 パリ協定復帰 を決定	
2030	2013年度比で 46%減、さらに 50%の高みに向け て挑戦(温対会 議・気候サミット にて総理表明)	1990年比で 少なくとも 55%減(NDC)	1990年比で 少なくとも 68%減(NDC)	2005年比で 50~52%減 (NDC)	2030年までに CO2排出を減 少に転換 (国連演説)
2040					
2050	カーボン ニュートラル (法定化)	カーボン ニュートラル (長期戦略)	カーボン ニュートラル (法定化)	カーボン ニュートラル (大統領公約)	
2060					カーボン ニュートラル (国連演説)

2050年までのカーボンニュートラルを表明した国

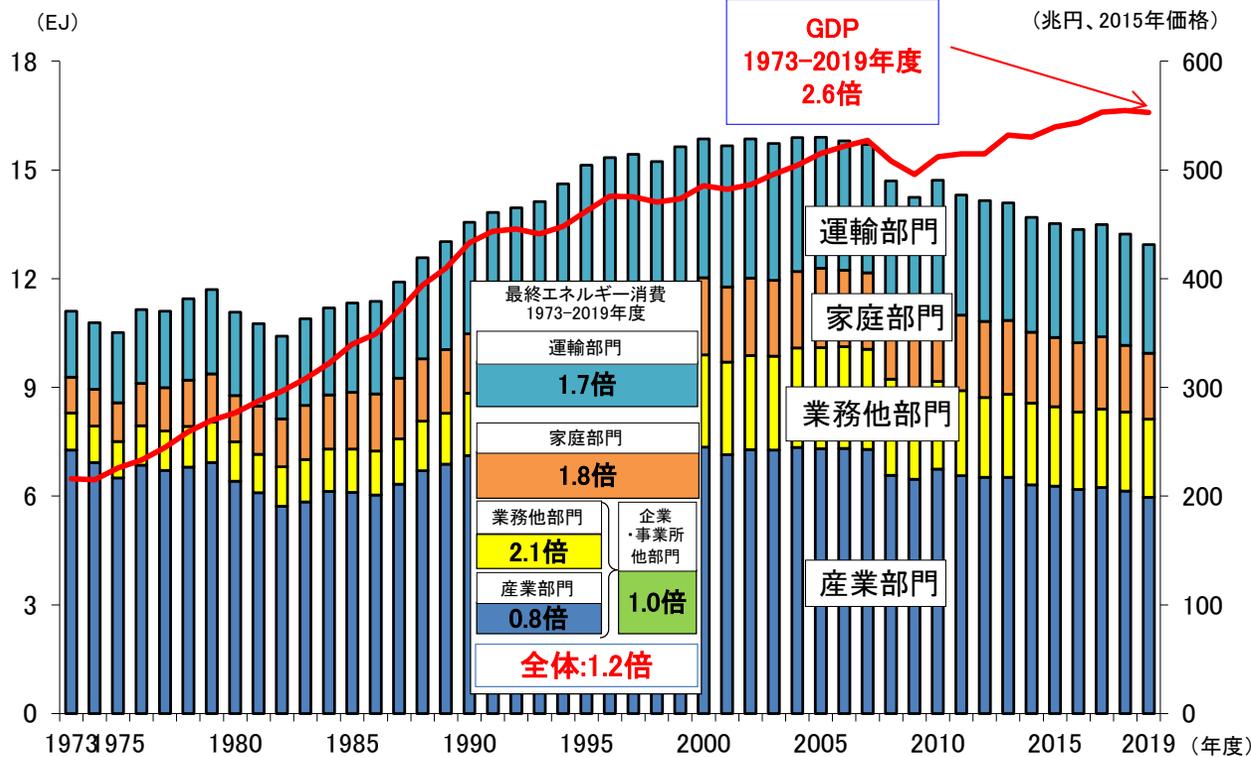


<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/1-2-2.html>

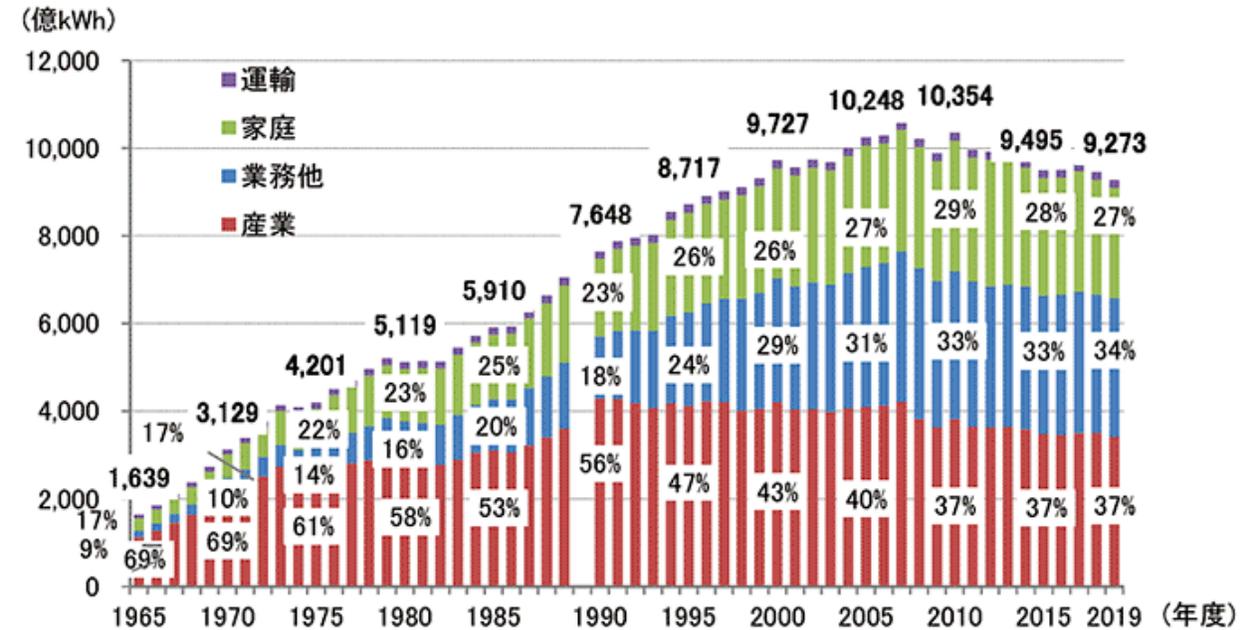
国内エネルギー動向

「令和2年度エネルギーに関する年次報告」（エネルギー白書2021）より

最終エネルギー消費と実質GDPの推移



部門別電力最終消費の推移



出典：資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」に基づく

- 2011年度からは東日本大震災以降の節電意識の高まりなどによって減少が進行
- 家庭部門・運輸部門ではエネルギー利用機器や自動車などの普及が進んだことから大きく増加

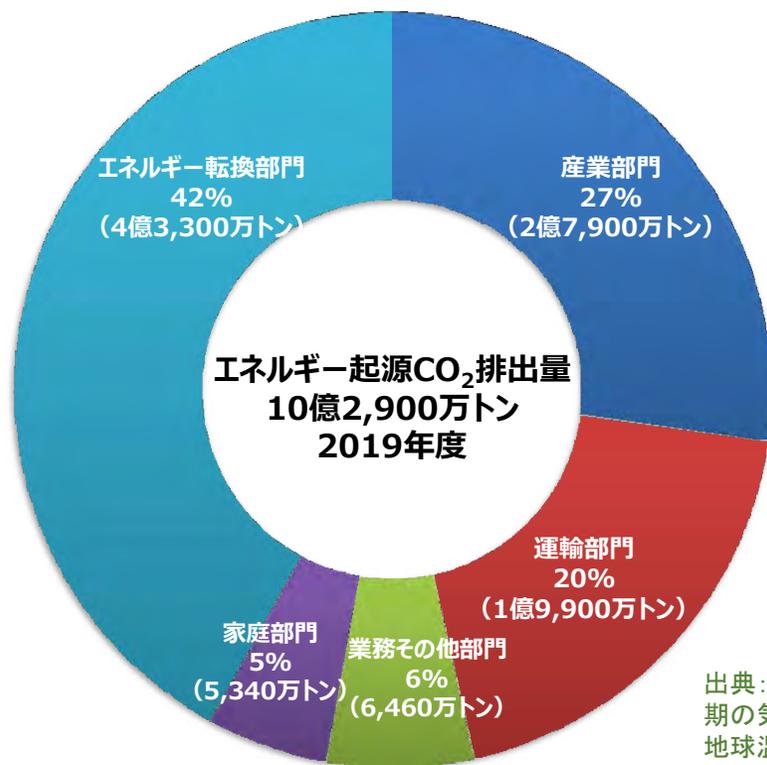
日本の温室効果ガス排出量

日本の温室効果ガス排出量

12億1300万トン(CO₂換算, 2019年度)のうち,
エネルギー起源CO₂が85%

エネルギー転換部門

エネルギー起源CO₂排出量の42%



脱炭素電源の導入推進

- ・再生可能エネルギーの主力電源化
- ・次世代電力ネットワークの構築

電化とデジタル化による省エネ

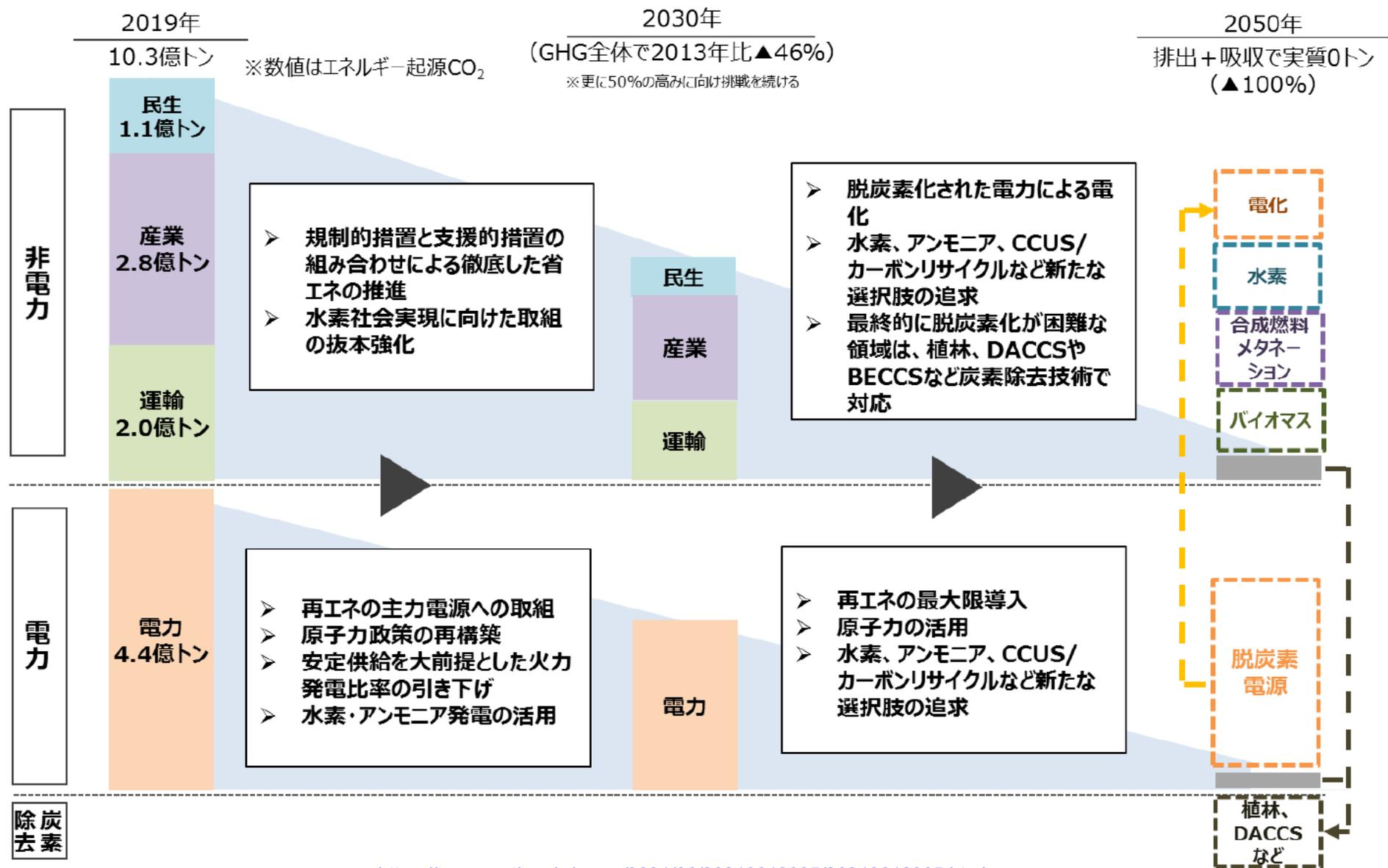
エネルギー貯蔵

脱炭素燃料・電源

水素・アンモニア・etc.

出典: 温室効果ガス排出の現状等, 経済産業省 第3回中央環境審議会地球環境部会 中長期の気候変動対策検討小委員会 産業構造審議会産業技術環境分科会 地球環境小委員会 地球温暖化対策検討ワーキンググループ 合同会合, 2021年2月26日

2050年カーボンニュートラルの実現へ向けて



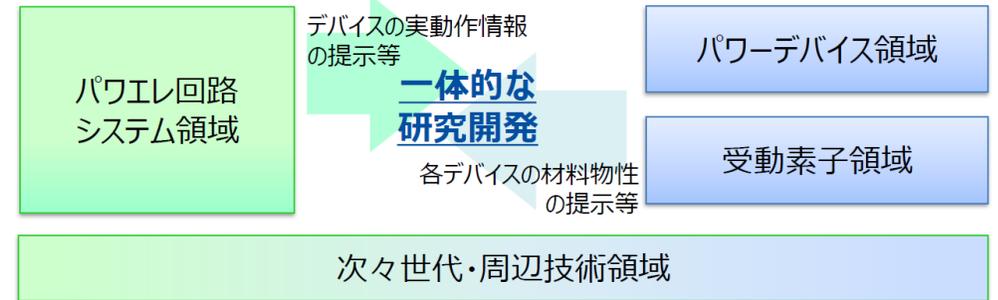
<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html>

文部科学省：カーボンニュートラルの実現に貢献する研究開発

カーボンニュートラル実現に貢献する革新的な脱炭素技術等の研究開発力強化

- 革新的な脱炭素化技術の基礎・基盤研究の推進
 - ✓JST未来社会創造事業「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域
 - ✓JST戦略的創造研究推進事業先端的低炭素化技術開発(ALCA)
- デジタル化時代を支える徹底した省エネルギーの推進
 - ✓革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業
 - ✓次世代X-nics半導体創生拠点形成事業
- 次世代蓄電池の研究開発の推進
- 地域の脱炭素化加速のための基盤研究の推進

GaN等の次世代半導体の特性を最大限生かし、パワーデバイス等のトータルシステムとしての一体的な研究開発を推進



長期的視点で環境エネルギー問題を根本的に解決

- ITER(国際熱核融合実験炉)計画等の実施
- 大型ヘリカル装置(LHD)計画

気候変動対策の基盤となる高精度な気候変動予測データの創出と利活用の強化

- 気候変動適応戦略イニシアチブ

令和4年度概算要求のポイント(科学技術関係)(文部科学省科学技術・学術政策局) 第66回科学技術・学術審議会総会資料より

JSTにおける低炭素社会実現のための事業

戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発 (ALCA)

【事業の目的・目標】

2030年の社会実装を目指し、低炭素社会の実現に貢献する革新的な技術シーズ及び実用化技術の研究開発や、優れた機械的特性をもつ軽量材料の開発、リチウムイオン蓄電池に代わる革新的な次世代蓄電池等の世界に先駆けた革新的低炭素化技術の研究開発を推進。

【事業概要・イメージ】

○ 実用技術化プロジェクト

- 2030年の社会実装を目指し、温室効果ガス削減に大きな可能性を有する世界に先駆けた革新的な技術シーズを発掘。
- 要素技術開発を統合しつつ実用技術化の研究開発を加速。

○ 特別重点プロジェクト

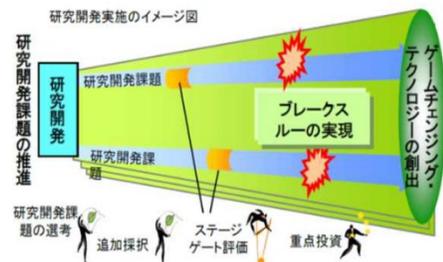
- 2030年の社会実装を目指して取り組むべきテーマについて、文部科学省と経済産業省が合同検討会を開催して設定し、産学官の多様な関係者が参画して共同研究開発を実施(「次世代蓄電池研究加速プロジェクト」を実施中)。

【事業スキーム】

支援対象機関: 大学、国立研究開発法人等

事業期間: 平成22～令和4年度

研究期間は原則5年間とし、**ステージゲート評価**を経て「実用技術化プロジェクト」へ移行(さらに最長5年間)



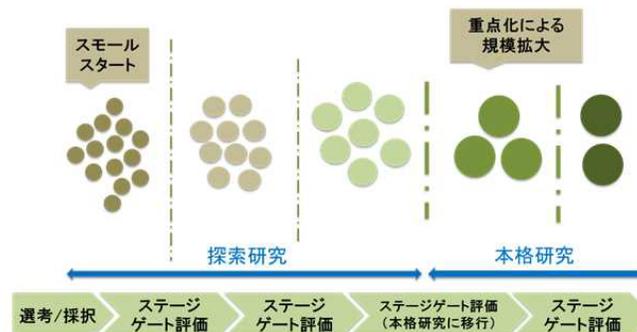
未来社会創造事業 「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域

【事業の目的・目標】

2050年の社会実装を目指し、エネルギー・環境イノベーション戦略等を踏まえ、温室効果ガス大幅削減というゴールに資する、従来技術の延長線上にない**革新的エネルギー科学技術の研究開発**を強力に推進。

【事業概要・イメージ】

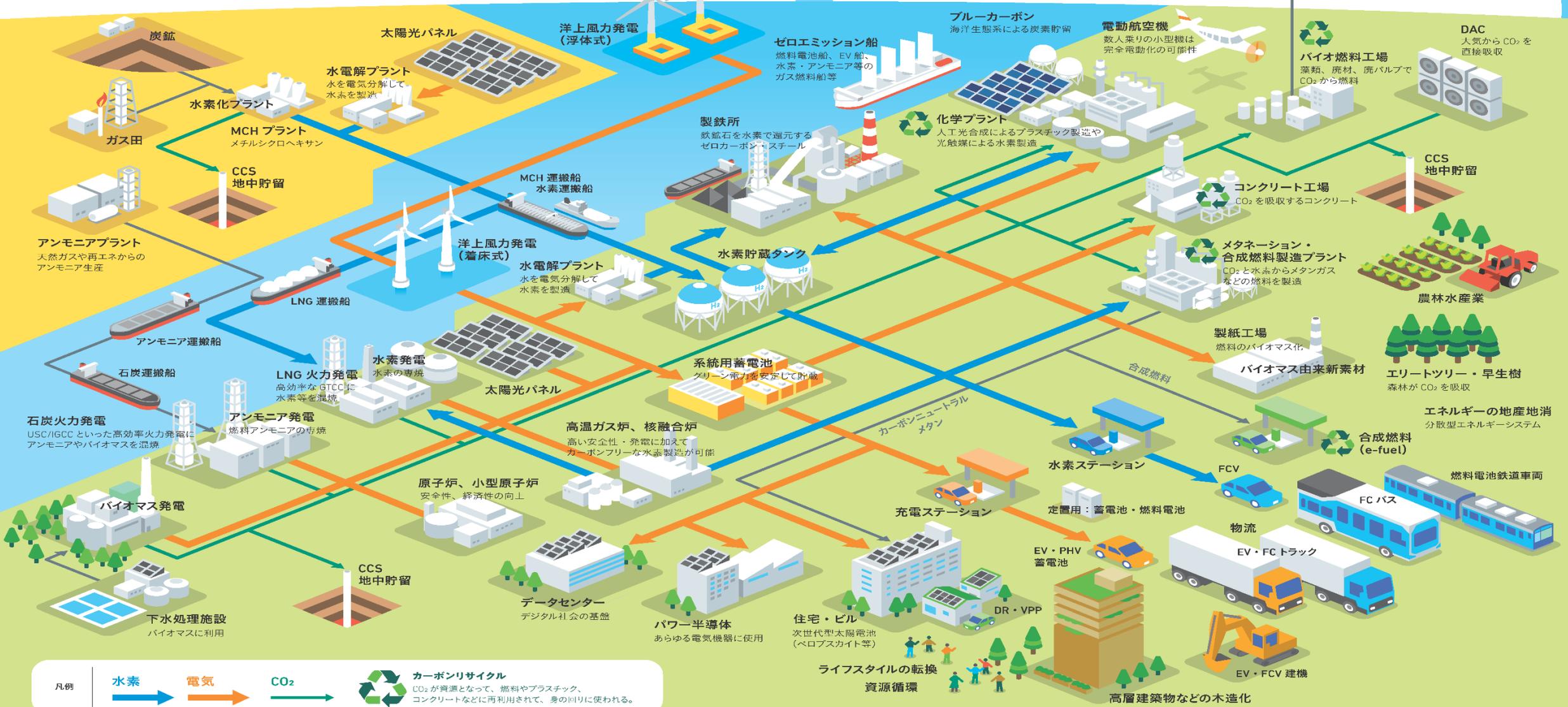
- 少額の課題を多数採択し、途中段階で目標達成度及びCO2排出量大幅削減の可能性の判断に基づく厳しい評価(**ステージゲート評価**)を経て、評価基準を満たした課題のみ次のフェーズに移行する仕組みを採用。
- また、低炭素社会の実現に向けた開発テーマに関連が深い有望な他事業等の技術シーズを融合する形での研究開発を実施。
- さらに、社会・経済的なインパクトや産業ニーズが大きく、分野共通のボトルネック課題が存在する領域をFAで特定し、連携して支援する仕組みを構築。基礎研究から実用化まで切れ目のない支援により、研究開発を強力に加速。



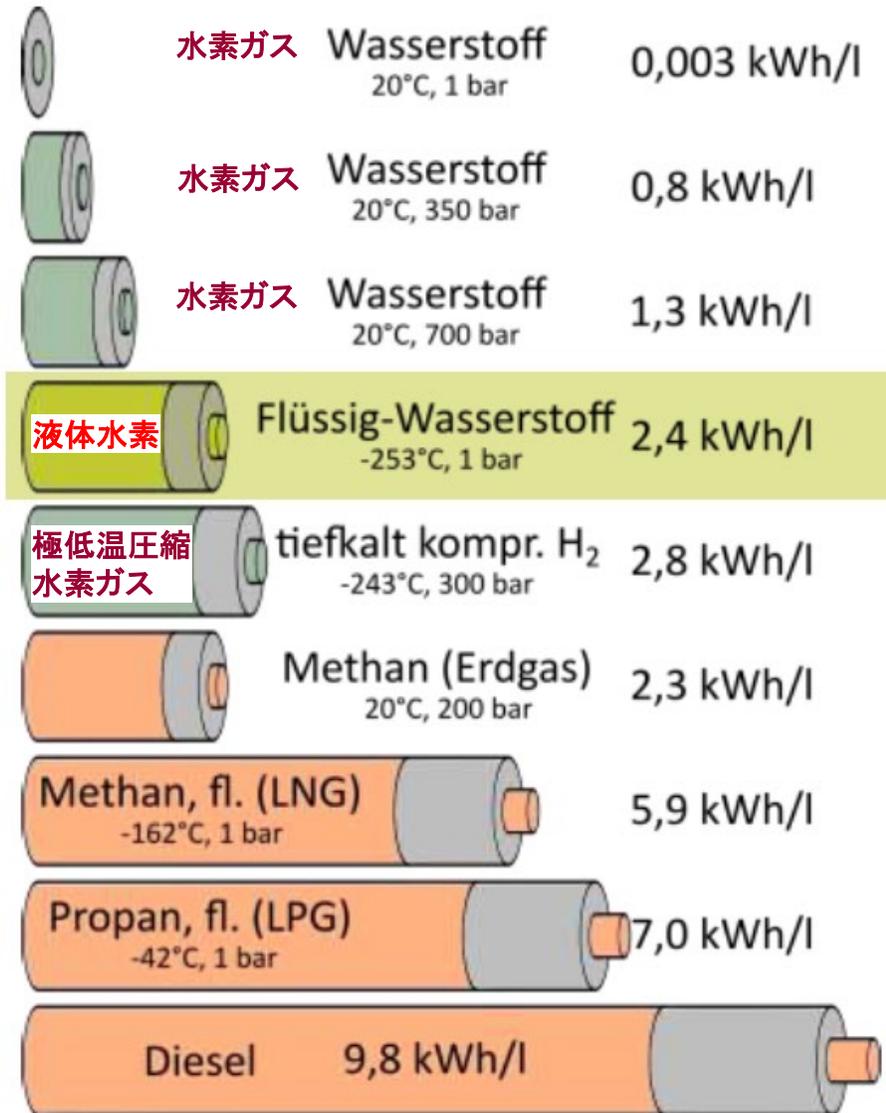
※ 先端的低炭素化技術開発 (ALCA) 事業の仕組みを発展させ、2050年の温室効果ガス削減に向けた研究開発を未来社会創造事業「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域として推進。

カーボンニュートラルの産業イメージ

電気はすべて脱炭素化し、産業部門の電化を進める
 水素は、発電・産業・運輸など幅広く活用されるキーテクノロジー
 CO₂は回収し、カーボンリサイクルや地中貯留 (CCS) へ



液体水素の特徴 – kWh/lの比較



M. J. Wolf: "AppLHy! – Wasserstoff und Supraleitung," ZIEHL VIII Workshop, April 5, 2022

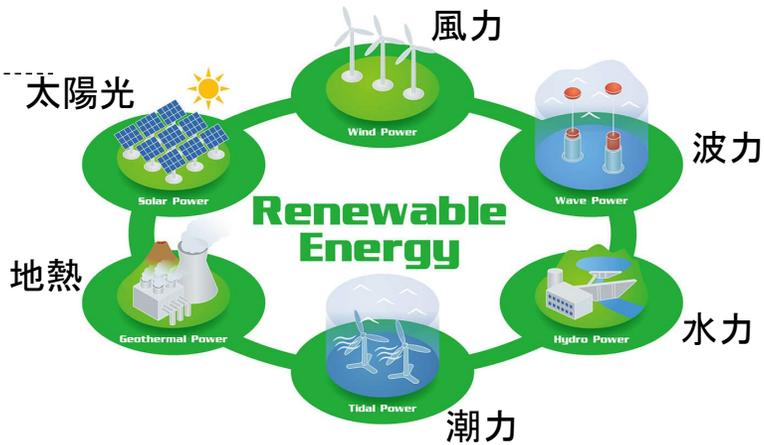
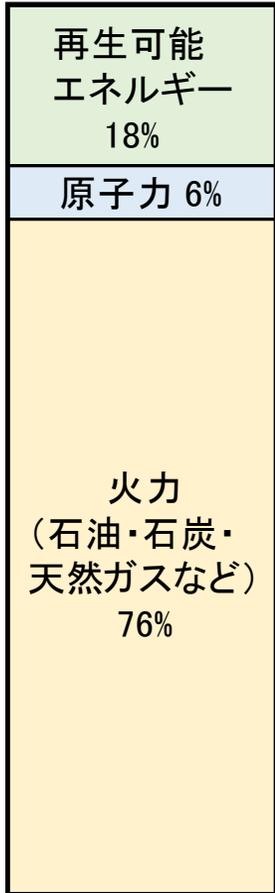
エネルギー基本計画

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energykijonkeikaku_2022.html.html

- エネルギー政策の基本的な方向性を示すために政府が策定するもの
- 内外のエネルギー情勢を鑑みて、少なくとも3年ごとに検討を加え、必要に応じて見直される
- 第6次エネルギー基本計画は2021年10月22日に発表
- 第5次エネルギー基本計画は2018年に策定
- 世界的に取り組みが加速している**気候変動問題**への対応
 - 「2050年カーボンニュートラル」(2020年10月に表明)
 - 「2030年度の温室効果ガス排出46%削減(2013年度比)、さらに50%削減の高みを目指す」(2021年4月に表明)
- 日本のエネルギー需給構造が抱える課題の克服
 - 気候変動対策を進めながらも「**S+3E**(安全性 + エネルギーの安定供給, 経済効率性の向上, 環境への適合)」という基本方針を前提にした取り組み

2019年度電源構成と再生可能エネルギー

2019年度



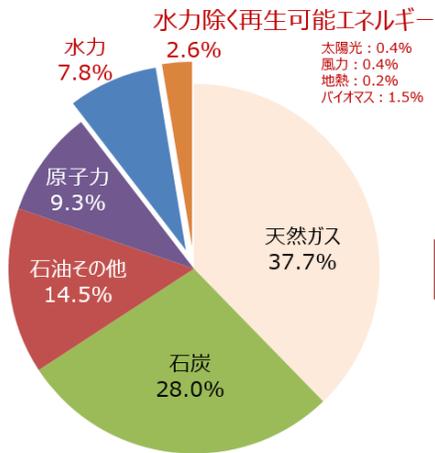
2019年度

- 電力部門からのCO₂排出量は、エネルギー起源CO₂排出量の約4割
- 2011年東日本大震災以降は多くの原子力発電所が停止し、火力発電が増大

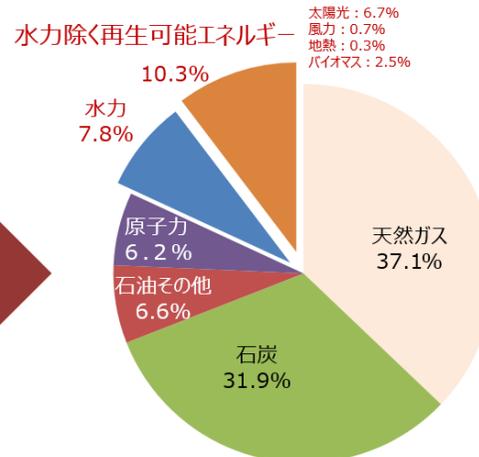
再生可能エネルギー

- 温室効果ガスを排出しない
- 国内で生産可能⇒エネルギー安全保障
- 世界的に発電コストが急速に低減し、他の電源と比較してもコスト競争力のある電源として導入量が急増

【発電電力量の構成 (2011年度)】
再エネ比率 = 10.4%



【発電電力量の構成 (2019年度)】
再エネ比率 = 18.1%



日本

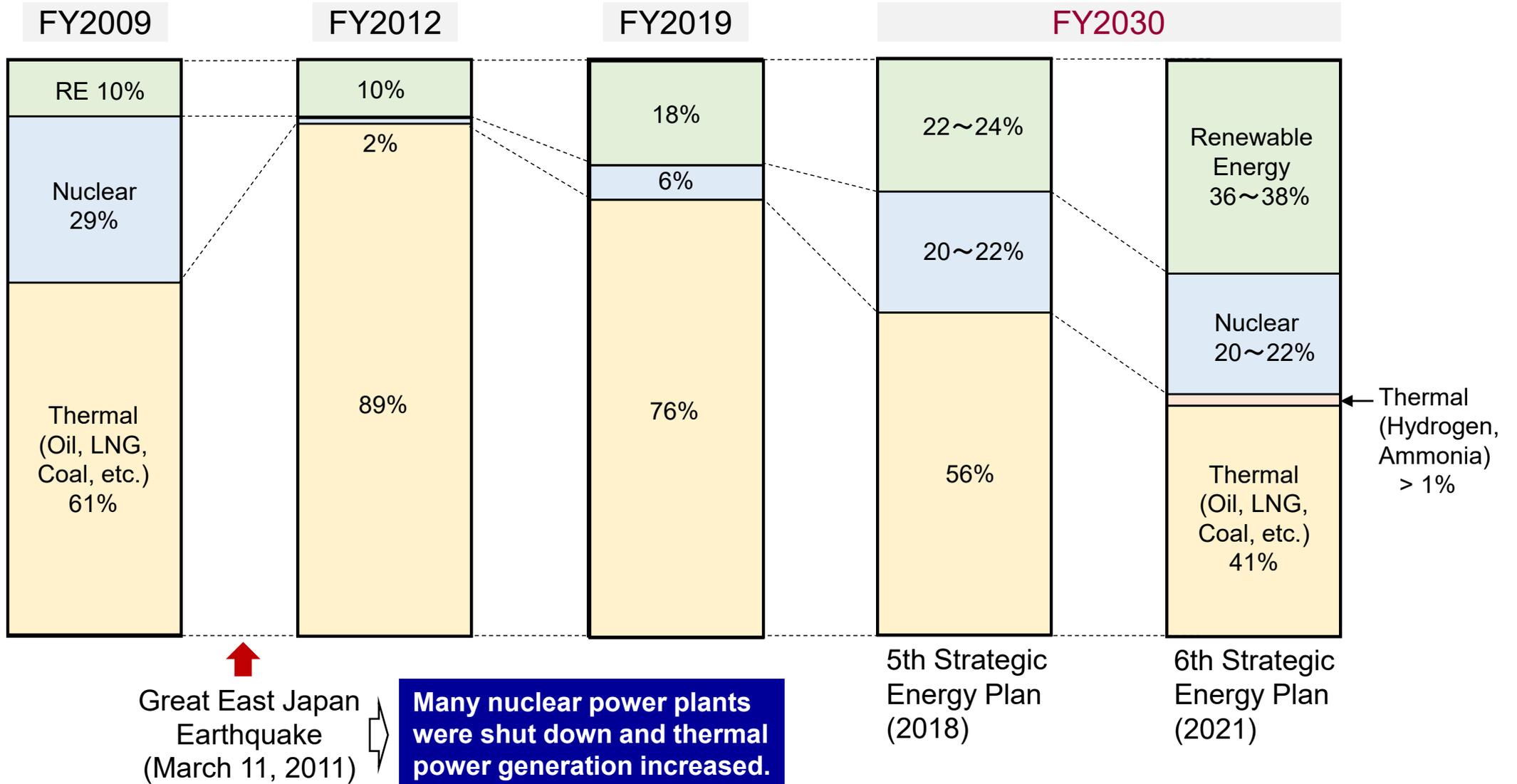
- 2012年7月にFIT制度 (固定価格買取制度) 導入
- 10%程度だった再エネ比率が2019年度には18%まで拡大
- 国土面積当たり・平地面積当たりの太陽光発電の導入量は主要国の中でも最大

再生可能エネルギーの主力電源化, 導入拡大への課題

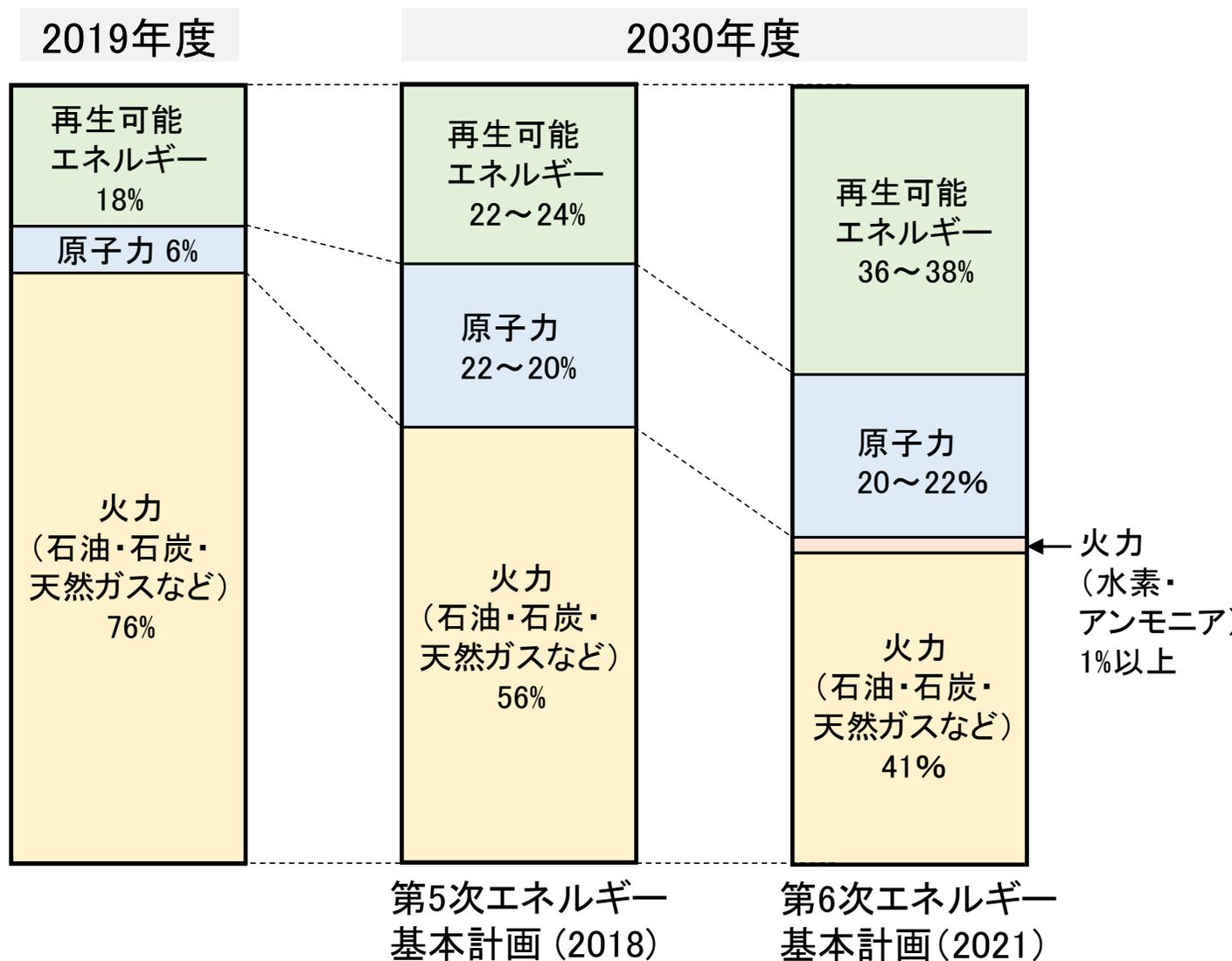
- コストの低減とFIT制度からの自立化
- 地域との共生・事業規律の強化
- 系統制約の克服に向けた取り組み
- 電源別の特徴を踏まえた取り組み

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/>

電源構成



エネルギー基本計画



2030年度の電源構成

第5次エネルギー基本計画 (2018年)

- 再生可能エネルギー: 22~24%
- 原子力: 20~22%
- 化石燃料を使う火力発電: 56%

第6次エネルギー基本計画 (2021年)

- 原子力: 第5次計画と同程度
- 再生可能エネルギー: 36~38%程度に拡大
- 水素やアンモニアを燃料とする火力: 1%以上導入
- 脱炭素電源の割合を6割程度

再生可能エネルギー 洋上風力

- グリーン成長戦略における重要分野の一つ
- 発電電力を需要地に輸送する送電システムの整備が必要
- 高圧直流送電システムの構築と運用のための研究開発

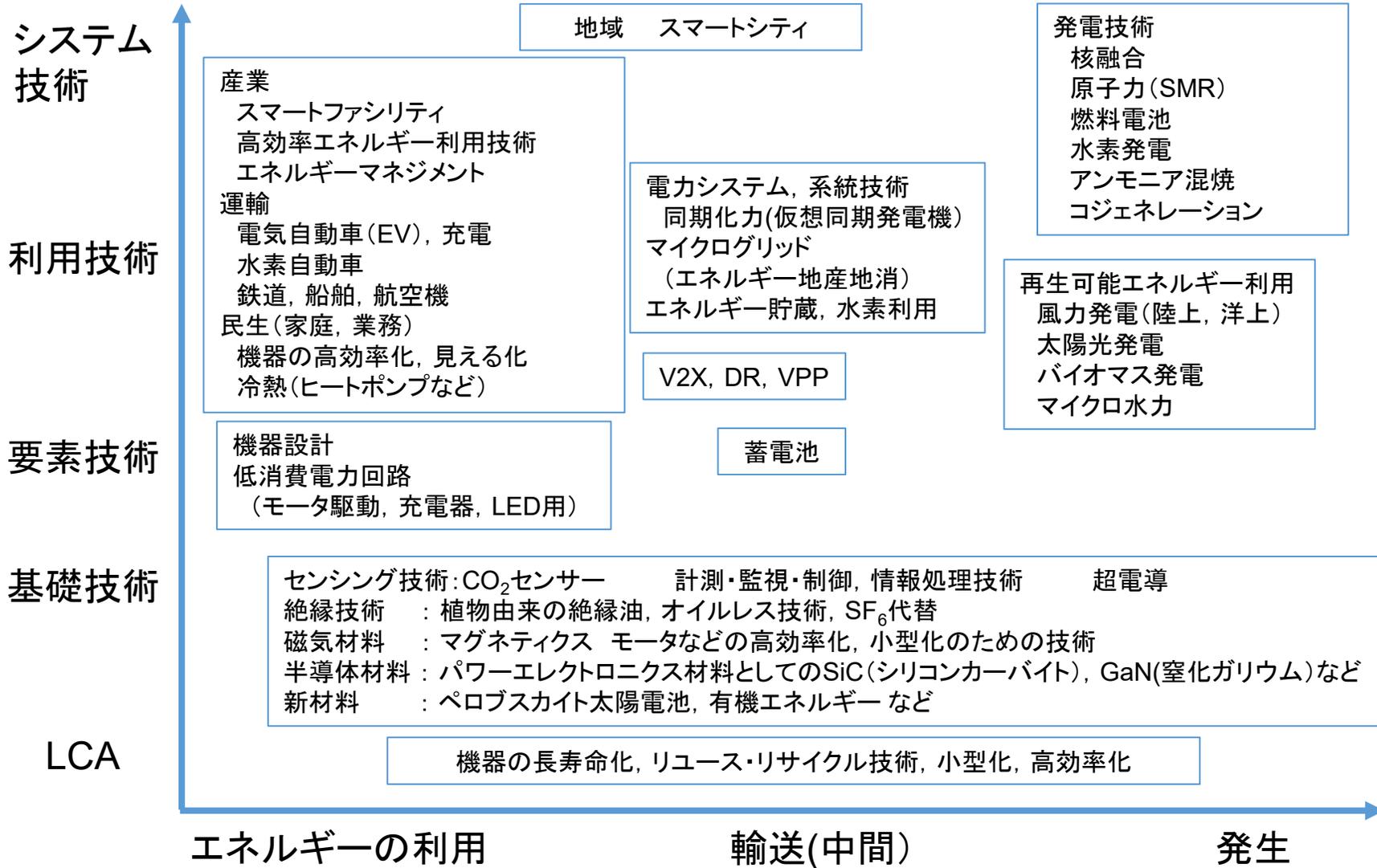
- 大容量蓄電池
- アンモニアや水素を燃料として用いる火力発電



2050年のカーボンニュートラルおよび2030年の温室効果ガス排出削減目標の達成へ向けて、研究開発の加速

電気学術・技術領域(電気学会の領域)

The Institute of Electrical Engineers of Japan

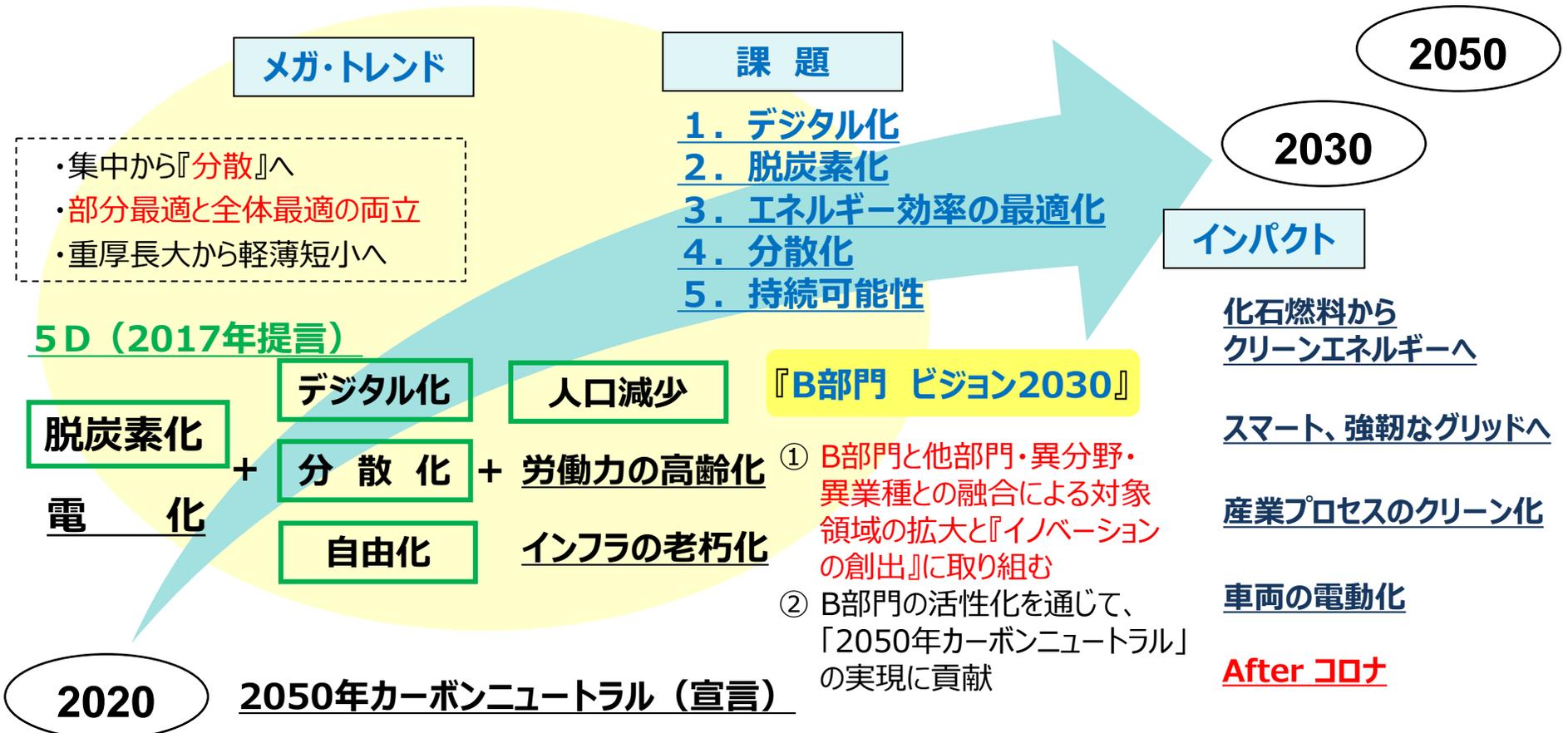


電気学会 電力・エネルギー部門 『2050年カーボンニュートラル』達成に向けて

B部門が描く新たな電力の役割

チャレンジャーとしての 電力・エネルギー

- ・低廉かつ低炭素で安定な電気の供給
- ・強靱なインフラのプラットフォームとしての経済の下支え
- ・新たな産業の創出（電化、グリーンエネルギーへの投資、EVインフラ、システムの近代化）
- ・自然環境への貢献（グリーンエネルギー、電化）
- ・Quality of Lifeの向上



電気学会 電力・エネルギー部門(B部門)関連技術の中長期展望

2050年カーボンニュートラルの達成に向けた課題毎に、2030年頃までに必要とされる**技術**を短期(～2,3年)、中期(5年)、長期(10年)で整理
 (下記表は抜粋)

小項目	デジタル化		脱炭素化		エネルギー効率の最適化		分散化		持続可能性	
	人の支援技術	モノの製造生産	再エネ・エネシス	電化の促進	送配電	サーマルマネージメント	マイクログリッド	VPP	3R	レジリエント
短期	AR,VR	アジャイル産業ロボット	大規模洋上風力	EV, HPシフト	需給予測	長距離熱輸送	スマートPCS	電力取引のための監視制御	メタルリサイクル推進	被害把握のための衛星画像解析
	行動分析・予測	アナリティクス	災害時の再エネ自立運転		直流送配電(遮断器等)	ポンプフリー冷却デバイスの高機能化	離島における再エネ活用	需要家機器のVPP制御	3Rビジネスモデル	早期復旧システムの構築
中期	AI・ビッグデータ活用	AI活用製造	スマートインバータ	V2G	多端子自励式直流送電	低熱源の有効利用	自立運転可能なマイクログリッド	蓄電池群としての調整力活用	生分解性材料の部分適用	電線の無電柱化推進
	自動運転	インフォマティクス	再エネ出力の予測精度向上	船舶の電動化	超電導回転機システムの要素技術	生活空間の温度能動制御	地産地消のエネルギー活用	電力のP2P取引	太陽光パネル等の再利用	台風等被害予測技術の高精度化
長期	自動故障復帰	高度SCMシステム	次世代太陽光発電	航空機の電動化	直流海底ケーブルによる地域間連系	極限環境適応型の長距離熱輸送	マイクログリッド間の連系	VPPの普及	リチウムイオン電池のリサイクル	非接触地中線給電
	全自動運転		蓄エネ,創エネ(水素)	完全自動運転EV	マルチホップ型ワイヤレス送電	高熱源の冷却技術の確立	DERMS	VPP取引監視のビジネス化	資源循環型電力機器	災害復旧用移動式変電所

電気学会 産業応用部門のカーボンニュートラルへのアプローチ

SDGs・カーボンニュートラル



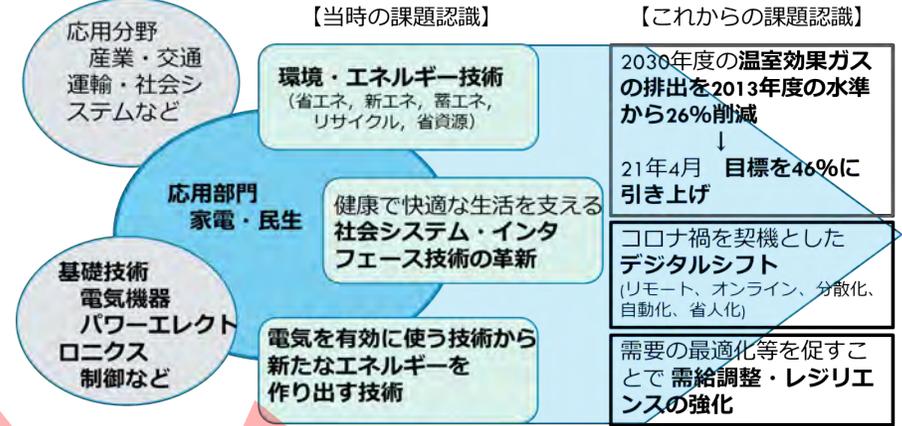
半導体電力変換技術委員会
電力変換技術の進化方向：高効率、高パワー密度、長寿命化、高性能化
=カーボンニュートラル

具体的な技術例)

1. 電動車両(xEV)普及拡大
インバータ
バッテリー充電器
補機電源
2. 蓄電技術の開発
バッテリー充放電回路
3. 産業用電源システムの高効率化
プラント用電源システム
4. 再生可能エネルギー普及拡大
太陽光発電用パワーコンディショナ
風力発電用パワーコンディショナ



当時の電気学会産業応用部門



経済産業省:2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略
<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html>

要素技術開発

社会実装

現状調査

現状調査と問題点の洗い出し、さらには問題点の改善に必要な要素技術開発や社会実装の推進

産業応用部門

電気機器・パワーエレクトロニクス・制御等の基礎技術から産業・交通運輸・社会システム・家電等の広い応用分野を網羅した活動

トリレンマ

- 資源・エネルギー・食糧
- 経済発展
- 環境保全

令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会パネルディスカッション

デジタル化が切り拓く 2050年カーボンニュートラル ー電力・エネルギー部門の挑戦ー

2021年8月25日

カーボンニュートラルの達成に向け、電力以外のあらゆる部門とのセクターカップリングとそれらを繋ぐデジタル化が必要との認識のもと、政府、学識者、送配電事業者、メーカ、電力データ事業者それぞれの立場から、電力のデジタルフォーメーションに向けた将来の課題と取り組みについて討論

論点1： 2030年の課題と取り組み
(2050年の達成に向けた段階的な取り組み)

論点2： 電力デジタルトランスフォーメーションに向けて



パネルディスカッションの概要

5Dをきっかけにエネルギー・トランスフォーメーションが進展

データを起点として、サイバー空間上で様々な産業が垣根を越えて繋がることで、今までにない共創・連携が創出

エネルギー産業の変革ドライバ **5D**

De-carbonization 脱炭素化

- GHGガス46%削減(2030年)
- カーボンニュートラル(2050年)

De-population 人口減少・過疎化

- 6割以上の地域で人口半減
- 日本の人口:8088万人(2065年)

Decentralization 分散化

- 分散化電源の普及
- 蓄エネルギー技術の普及(EV、HP給湯器等)

Deregulation 電力市場の自由化

- システム改革(電力・ガス)

Digitalization デジタル化

- 全ての産業がデータ×AI化
- 産業構造の変革

超電導技術への期待

超電導の特徴

- ・ 低損失
- ・ 高密度
- ・ 高磁場
- ・



超電導技術を応用した機器・システムの特徴

- ・ 高効率化
- ・ 大出力化
- ・ 軽量・コンパクト化
- ・ 高機能・新機能の実現
- ・



革新的次世代機器・システム 様々な課題を解決する技術として

- ・ エネルギー・環境問題の解決
(2050年カーボンニュートラル実現への貢献)
- ・ 強靱な社会インフラの構築
- ・ 水素技術の普及拡大へ向けた技術連携
- ・ 先端科学研究設備
- ・ 経済発展, 産業競争力強化
- ・ 高度医療技術, 高齢化社会への対応
- ・

実用(的)機器・システム

- ・ 医療用核磁気共鳴イメージング装置MRI
- ・ NMR装置
- ・ シリコン単結晶引き上げ装置
- ・ 重粒子線がん治療装置用回転ガントリー
- ・ 加速器
- ・ プラズマ磁気閉じ込め装置
- ・ 超電導リニア技術に基づく中央新幹線
- ・

回転機
電力ケーブル
限流器
鉄道・航空機
医療
核融合
その他

低炭素化だけでなく、2050年カーボンニュートラルを実現するのはチャレンジングな課題であり、革新的な技術が必要
⇒ 超電導技術に可能性・期待

導体に関わる重要要素技術の例

REBCO線材を使った大電流導体

- ・ Roebel導体
- ・ Conductor on Round Core (CORC) 導体
- ・ SCSCケーブル
低損失・大電流高密度導体 (⇒回転機電機子巻線への適用可能性など)

高温超電導機器の課題

- ・ 経済性, 運用性, 保守性, 信頼性
- ・ コイル化技術や機器設計・製作技術のさらなる向上が必要

変動性再生可能エネルギー源(VRE)大量連系時の課題

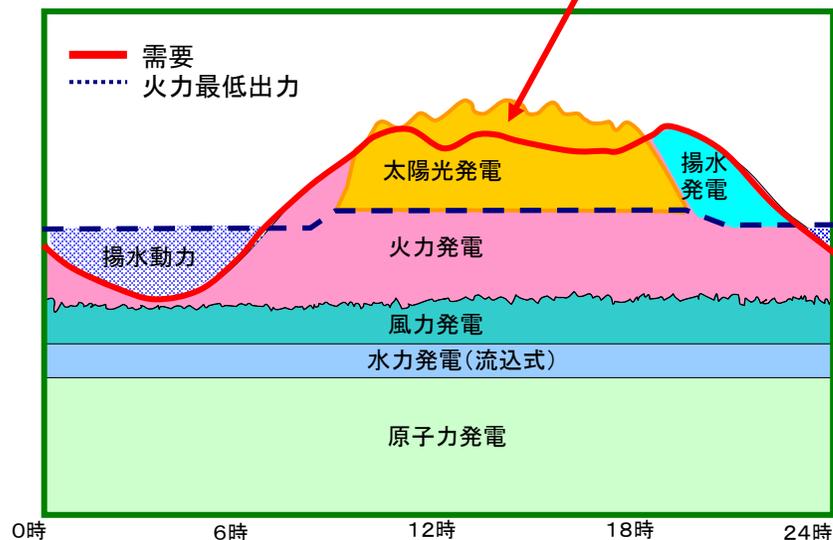
カーボンニュートラルを目指したエネルギー供給システム

- 再生可能エネルギー電源, 特に **変動性再生可能エネルギー源 (VRE)** の主力電源化
太陽光発電, 風力発電, etc.

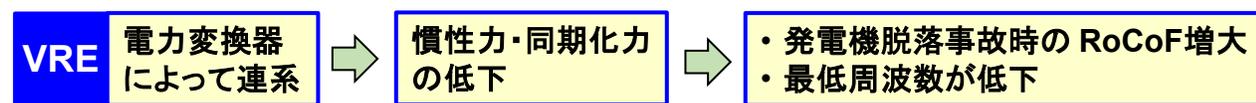
VRE大量連系時の課題

- 周波数・電圧調整力の確保
- 慣性力・同期化力の確保
- 送電容量の確保
-

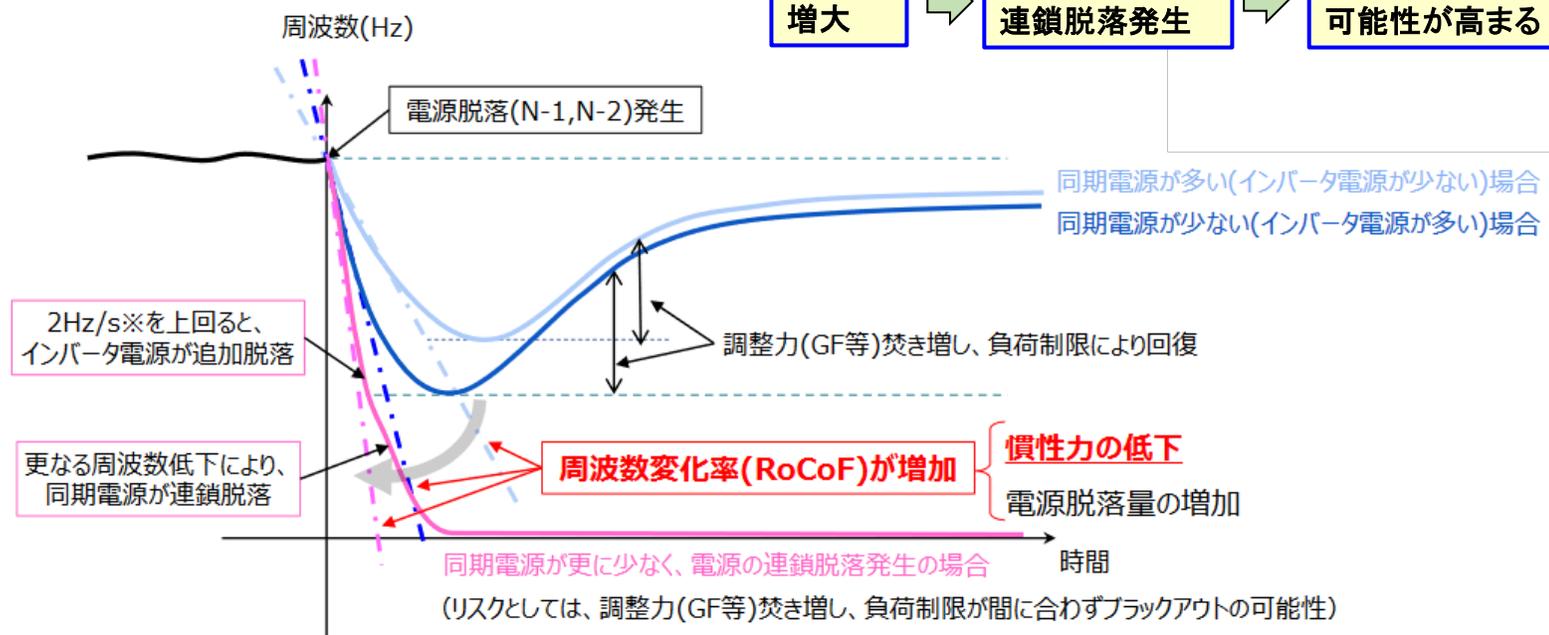
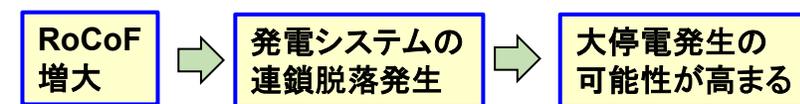
余剰電力の発生



周波数変化率(RoCoF)



一部の系統で問題が顕在化

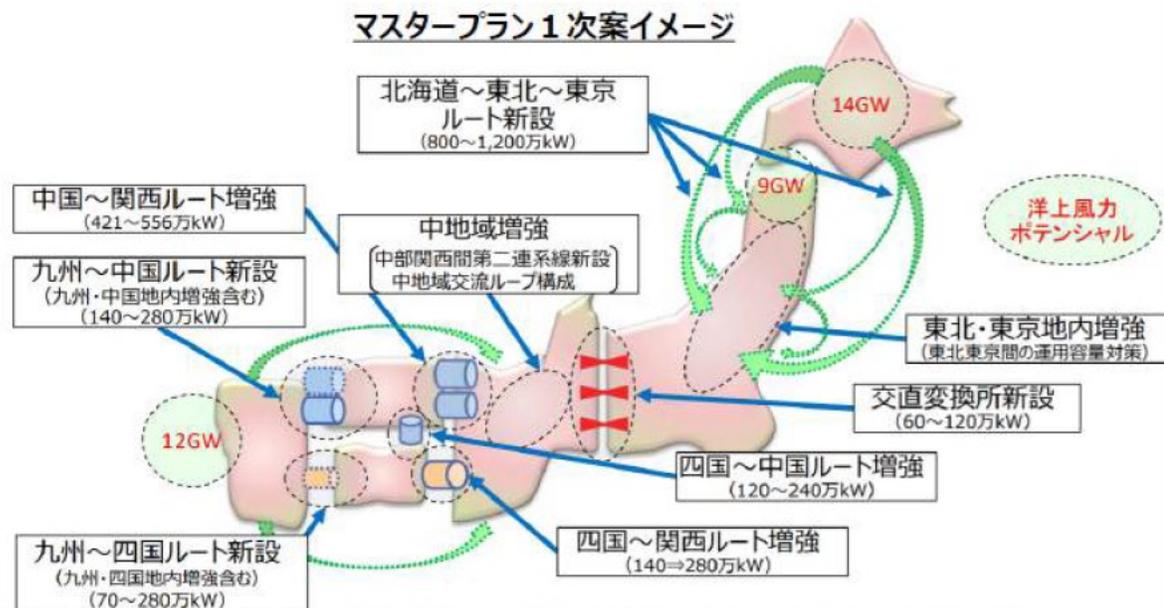


電力広域的運営推進機関 第64回調整力及び需給バランス評価等に関する委員会 資料3(2021/08/03)より

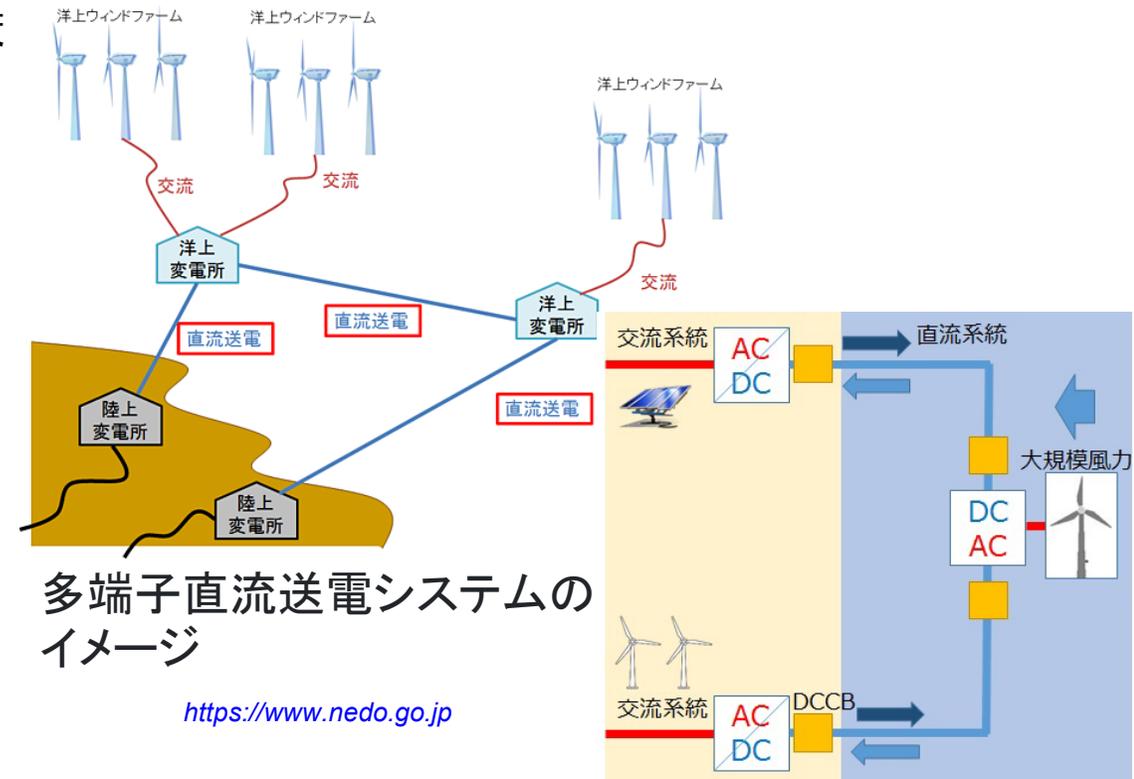
風力発電の大量導入を支える技術

カーボンニュートラルのためには風力発電の大量導入が必要であるが、風力発電の適地は偏在しており、かつ今後は洋上が有望であることから、これを支える技術が必要となる。

- 機器： 発電機技術（設計技術、磁性材料、絶縁材料などを含む）による小型化・高効率化
- 設置： 洋上での連系（直流多端子、海洋変電所）、海底ケーブル技術・敷設技術
- 電力輸送： 長距離輸送、系統接続
- 運転・保守・メンテナンス： 出力予測、遠隔監視・制御、落雷対策



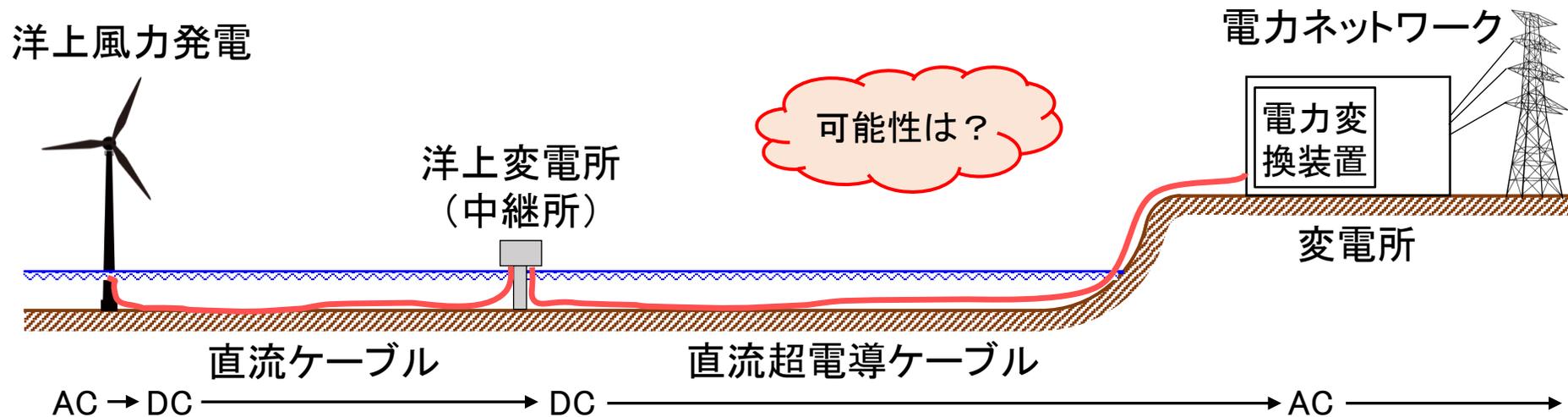
出所：第8回広域連系システムのマスタープラン及び系統利用ルールの在り方等に関する検討委員会（2021年3月25日）資料1



洋上風力発電と電力ネットワークを連系する超電導ケーブル

SuperNode社 (アイルランド)

- 再生可能エネルギー発電設備を電力システムに連系するための超電導ケーブルシステムの技術開発
- 2 GWを超える大電力送電が可能な直流送電システムの実現を目指す。
 - 超電導ケーブルによる洋上風力発電所の電力ネットワークへの接続
- 沖合の複数の風力発電設備からの電力を変電所(中継所)で集め、直流超電導ケーブルシステムを使用して電力システムに接続



風力発電設備で発電した交流電力をその場で直流に変換する場合
洋上変電所は中継所として機能するだけなので小型化が可能

超電導ケーブル

超電導ケーブルの特徴

- 大容量化やコンパクト化, 高効率・低損失化など
- 送電電圧の低電圧化が可能となり, 送電電圧階級の統合, 変電所設備の削減, 送電ルートが多様化

商業運転・実証試験

- 韓国電力公社がソウル近郊の22.9 kV電力ネットワークに, 50 MVA, 1 kmの三心一括型の超電導ケーブルを導入し, 2019年に商業運転を開始
- 中国・上海で, 2021年12月に35 kV, 2.2 kA, 1.2 kmの三心一括型超電導ケーブルの系統連系試験を開始

その他の応用可能性

- 洋上風力発電と電力系統を連系する超電導ケーブル
- 液体水素冷却高温超電導ケーブル
(液体水素輸送 + 電気エネルギー輸送)
- 鉄道や電動航空機など

SuperLinkプロジェクト(ドイツ・ミュンヘン)

- ミュンヘン南部と北部送電系統の間を長さ約12 kmの超電導ケーブルで接続することを検討
- 経済エネルギー省の資金援助を受けて2020年10月に開始(30ヶ月)
- 電力会社, NKT, Linde, THEVAなどが参加
- 110 kV, 500 MVAの電力を直径150 mmの既設管路に敷設した1本の超電導ケーブルで送電。三心一括型ケーブルで相電流は3 kA以上
- 過冷却液体窒素を冷媒とする密閉型冷却システム。中間冷却ステーションとポンプステーションが必要
- 150 mの超電導試験ケーブルの長期試験が2022年8月から実施予定

シカゴプロジェクト(米国)

- コモンウェルス・エジソン社(ComEd)が, 米国国土安全保障省(DHS)から資金援助を受けて実施
- 近隣変電所を相互に接続することにより余剰電力を共有し, 都市部での大きな故障電流を抑制することで, 停電の防止に貢献, すなわち, シカゴの電力網の耐障害性(Resiliency)を強化することが目的
- 12 kV, 3 kA, 62 MVA超電導ケーブルをシカゴのノースサイドの常設施設に設置して試運転を実施(2021年9月発表)。1年間の評価試験中。
ケーブル: Nexans社, 線材: AMSC社。

超電導ケーブル・限流器の実証試験

AmpaCityプロジェクト

- ドイツのエッセン市の中央駅に近い2つの変電所間約1 kmを, 10 kV, 40 MVA三相同軸型超電導ケーブルで接続し, 2014年4月から2021年3月まで実証試験
- 送電電圧: 従来110 kV ⇒ 10 kV
- 片側の変電所: 液体窒素タンク, サブクーラー, 循環用ポンプなどを設置
- ケーブルに直列に超電導限流器を挿入
- 中間接続部あり

限流器: 電力システムのレジリエンスを向上させながらも, それによって増大する事故電流を安全に限流する

ロシアではSuperOX社が220 kV, 1200 Aの超電導限流器を開発し, モスクワの変電所に設置した(2019年)

幅12mmのREBCO超電導線材約25 kmを使用
限流器は既設空心リアクトルと並列に接続

核融合への期待

- 現在、核融合実験炉ITERが国際協力で建設中(2025年ファーストプラズマ点火予定)
- JT-60SA: 日本・欧州共同実施, プラズマ体積がITERの1/6程度
- 英国にある核融合炉JETで最近, 過去の2倍を超えるエネルギーを取り出すことに成功したことの報告
- ベンチャー企業の参入や巨額の民間資金の流入など, 核融合炉の商用化へ向けた動きが世界的に活発化
- 英国の核融合ベンチャー、トカマク・エナジーが、球状トカマク型のST40実験装置で、プラズマ温度 1億度達成の報告
- Commonwealth Fusion Systems (CFS): 高温超電導マグネットと核融合実証炉SPARCの研究開発 (SPARCは、高温超電導マグネットを搭載するトカマク型核融合炉として2025年完工を目指している)

将来, 我が国のエネルギー基本計画にも電源として位置付けられて,
再生可能エネルギーと共に22世紀の基幹電源として確立されることを期待

超電導回転機の可能性

超電導回転機

- 電力応用: タービン発電機・風力発電機など
- 輸送システム応用: 船舶・航空機・自動車用など
- 産業応用, 他

様々な分野への適用可能性

界磁超電導機 と 全超電導機

- ▶ 小型軽量化
- ▶ 高効率・低損失化
- ▶ 液体水素冷却

手強い従来機器
従来機器も着実に進歩

国内での研究開発例

京都大学・中村先生(輸送機器用高温超電導誘導同期回転機)
九州大学・岩熊先生(航空機用全超電導回転機)
京都大学・白井先生(液体水素冷却超電導発電機)
企業, 東京海洋大学, 東京大学, 新潟大学, 他

ドイツKITの「高温超電導 + 液体水素冷却モータ」の検討例

回転子

- 液体水素冷却
- 永久磁石界磁を高温超電導コイルに

固定子

- 大きなギャップにより, 鉄心の歯がない設計が可能に

conventional e-motor of a passenger car¹⁾

Outer diameter: 0.3155 m
Rotational speed: 1500 rpm
Power: 22 kW
Power density: 1.5 kW/kg

LH₂ & HTS e-Motor

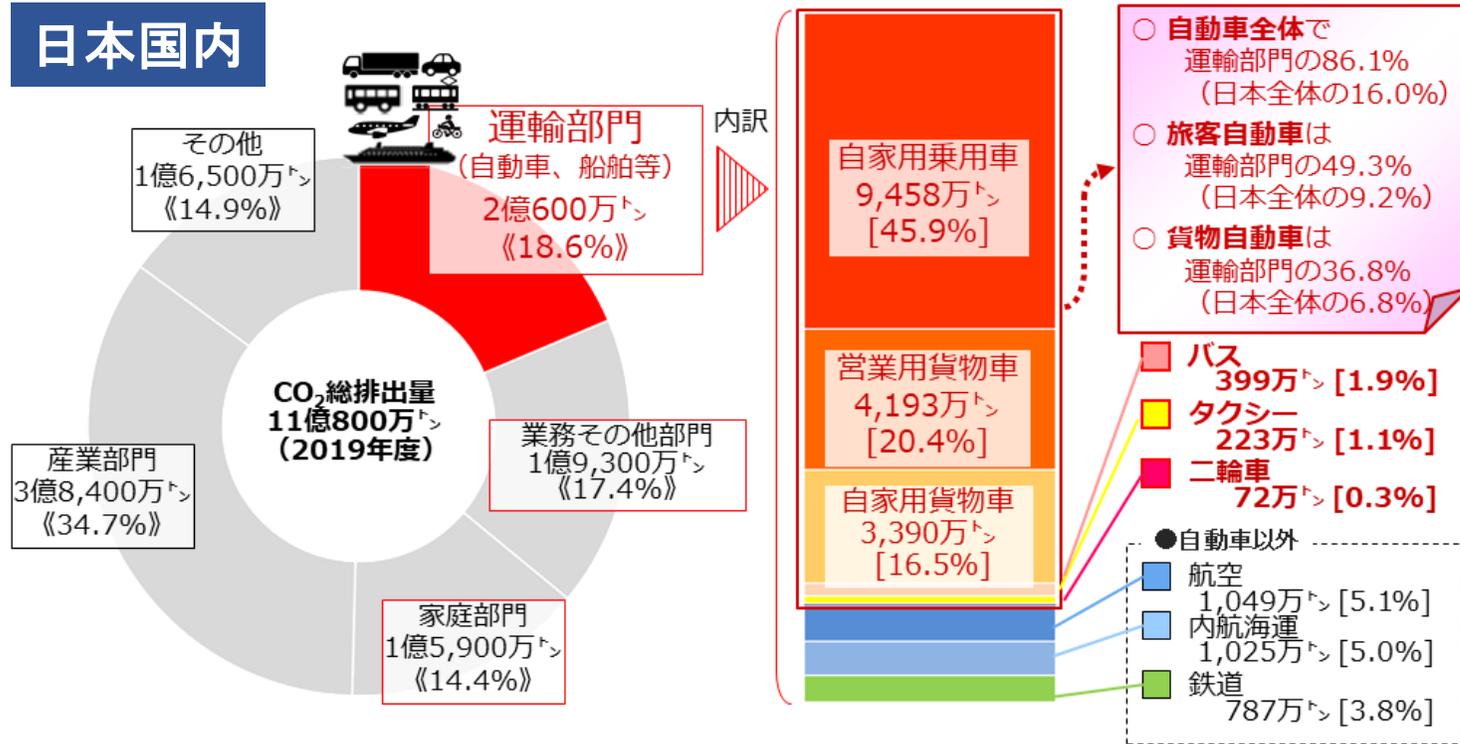
Outer diameter: 0.3155 m
Rotational speed: 1500 rpm
Power: 202 kW
Power density: 15 kW/kg

¹⁾ Honda Accord

M. J. Wolf: "AppLHy! – Wasserstoff und Supraleitung," ZIEHL VIII Workshop, April 5, 2022

運輸部門における二酸化炭素排出量

日本国内



全世界

(IEAのデータより)

2019年の部門別二酸化炭素排出量

部門	Gt-CO ₂	
運輸部門	8.5	27%
産業部門	12.3	
Buildings	8.7	
その他	1.9	

<https://www.iea.org/reports/greenhouse-gas-emissions-from-energy-overview/emissions-by-sector>

2018年の輸送機関別二酸化炭素排出量

輸送機関	Gt-CO ₂
乗用車	3.62
航空	0.93
貨物自動車	2.37
鉄道	0.08
船舶	0.86
その他	0.18

<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/transport-sector-co2-emissions-by-mode-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>

国土交通省HP「運輸部門における二酸化炭素排出量」より

https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html

輸送機関の温室効果ガス排出量の比較

温室効果ガス排出量 (g-CO₂/(人km))
平均値 (範囲)

IEAのデータより

<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/well-to-wheel-wake-wing-ghg-intensity-of-motorised-passenger-transport-modes>

自動二輪・三輪車	39	(21-69)
小型・中型自動車	148	(70-220)
大型自動車	211	(85-279)
バス & ミニバス	63	(37-124)
鉄道	19	(6-101)
航空機	123	(98-133)

運輸部門におけるカーボンニュートラル

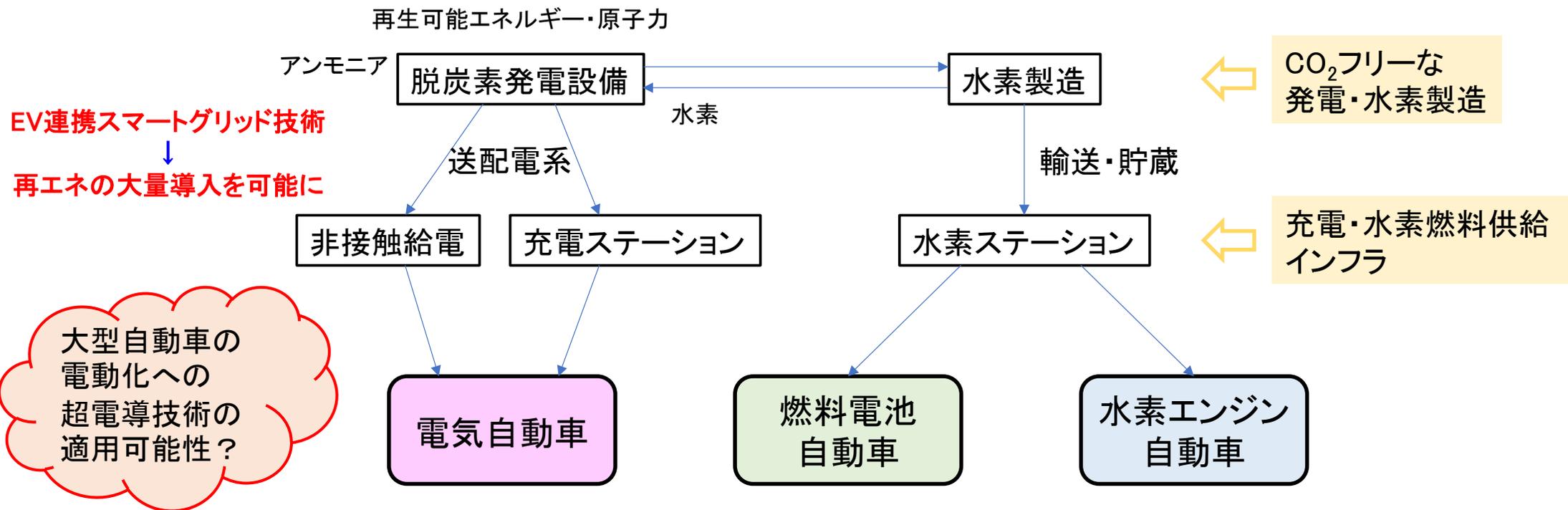
自動車

電気自動車, エンジンの高効率化, 水素などの代替燃料の導入等

発電の脱炭素化の
進展と深く関わる

電力システム側の脱炭素電源設備容量の
面から現実的な限界も

LCA的に十分な脱炭素化効果が
得られるかどうか評価・比較



鉄道分野のカーボンニュートラル

- CO₂排出の比較的少ない交通機関であり、モーダルシフトの転換先
- 鉄道事業者も2050年カーボンニュートラルへ向けた目標を設定
- 新幹線のような高速鉄道の省エネもさらに進展
- 車載蓄電池, 定置型蓄電池の利用
- 燃料電池車両
- エネルギー的に高効率な運行
- アセットの効果的活用
- 太陽電池パネルの設置
- 例: JR東日本グループ「ゼロカーボン・チャレンジ2050」

<https://www.jreast.co.jp/eco/>



ハイブリッド車両(燃料電池)試験車両(JR東日本)
HYBARI (HYdrogen-HYBrid Advanced Rail vehicle for Innovation)



ハイブリッド車両(ディーゼル発電+電動モータ駆動)
(JR九州)

鉄道分野

2050カーボンニュートラル

鉄道へのモーダルシフト

カーボンフットプリント削減

CO₂排出量削減

省エネ

超電導技術

- 超電導リニア
- 超電導ケーブル
- 超電導エネルギー貯蔵システム

鉄道分野のカーボンニュートラルの意義

鉄道の価値

- 鉄道は、基幹的な公益事業として日本の社会経済の発展を支えてきた。同時に、社会経済の活力が鉄道事業の活力の基盤。
- 環境面でも、大量輸送機関としてエネルギー効率が高く、電化も進んでいる。（鉄道輸送がないと仮定すると、運輸部門のCO2排出量が22%（4,500万 t=日本全体の4%）増加）

鉄道脱炭素の方向性

- 鉄道のCO2排出量は1000万トン（日本全体の1%）。
- 鉄道のCO2排出量の9割が電力由来であり、使用電力の4分の3が火力由来であるため、調達電力のあり方を「自分事」として考えることが前提。
- 取組みの局面と方向性は、以下のとおり。
 - ①使用エネルギーを「減らす」 [省エネ車両、省エネ駅、省エネ運行ダイヤ]
 - ②再生可能エネルギー等を「作る」 [再エネ発電（鉄道アセット・沿線地域）、余剰回生電力]
 - ③再生可能エネルギー等を「運ぶ」 [送電（地域・広域）、水素輸送（パイプライン・貨物）]
 - ④再生可能エネルギー等を「貯める」 [蓄電（鉄道アセット・沿線地域）、水素貯蔵施設（同左）]
 - ⑤再生可能エネルギー等を「使う」 [電気（鉄道事業・沿線地域）、水素（同左）]
- 取組みの持続可能性の観点から、事業性を確保。
- CNに向けた動きを成長の機会と捉え、研究開発・設備投資を促進。

鉄道脱炭素の意義

- 従来の①に加え、②～⑤に取り組むことにより、「鉄道の」脱炭素化に加え、「鉄道による」脱炭素化が可能に。これらの取組みには、一定の初期投資等が伴うため、当分の間、適切な支援を行うことにより、さらなる拡大が期待できる。
- 社会全体としては脱炭素化が困難な分野もあることを踏まえ、2050年カーボンニュートラルという「平均点」ではなく、100%を超えるCO2削減を目指すことも必要。
- これにより、基幹的な公益事業として、また、環境優位性の高い交通モードとして、社会経済の持続可能性をさらに高めるとともに、それを通じて鉄道事業の持続可能性を高める。（鉄道なくして脱炭素なし、脱炭素なくして鉄道なし）

鉄道の脱炭素化, 鉄道による脱炭素化

「鉄道の」脱炭素化、「鉄道による」脱炭素化のイメージ

①「減らす」、②「作る」、③「運ぶ」、④「貯める」、⑤「使う」

● 「鉄道による」脱炭素化

⑤「使う」: 公共施設、商業施設



②「作る」: 再生エネルギー発電



⑤「使う」: 家庭、EV車



④「貯める」
: 水素供給拠点



● 「鉄道の」脱炭素化

再生エネルギーの
生産量・消費量の拡大

②「作る」: 鉄道アセットを活用した再生エネルギー発電



①「減らす」: 駅の省エネルギー

Station

①「減らす」
: CO2フリー車両
: 省エネルギー車両
: 運行効率の改善

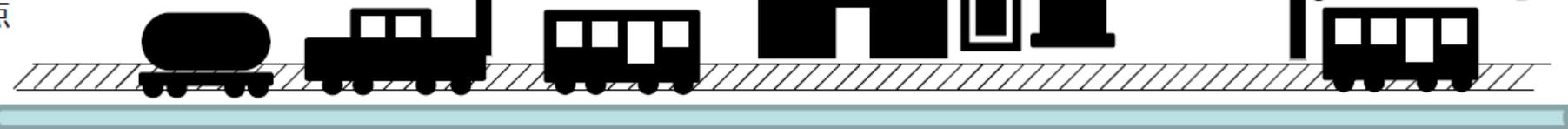
③「運ぶ」: 再生エネルギー送電

④「貯める」
: 蓄電池、水素貯蔵設備



③「運ぶ」 貨物鉄道による水素輸送

水素受入拠点



②「作る」: 再生電力

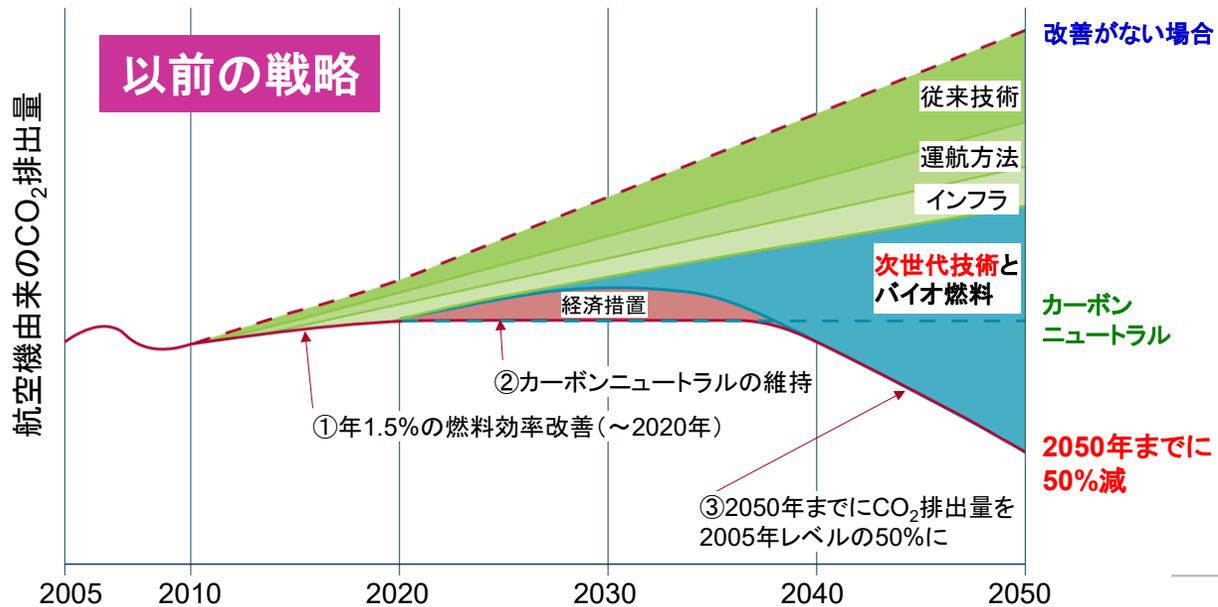
④「貯める」
: 水素供給拠点



⑤「使う」: 車両、駅施設等で使用

③「運ぶ」: 水素パイプラインの敷設

航空分野のカーボンニュートラル戦略



“REDUCING EMISSIONS FROM AVIATION THROUGH CARBONNEUTRAL GROWTH FROM 2020”, Working paper developed for the 38th ICAO Assembly September / OCTOBER 2013.

2050年時点でのCO₂排出量を2005年比で半減させる目標を設定した。

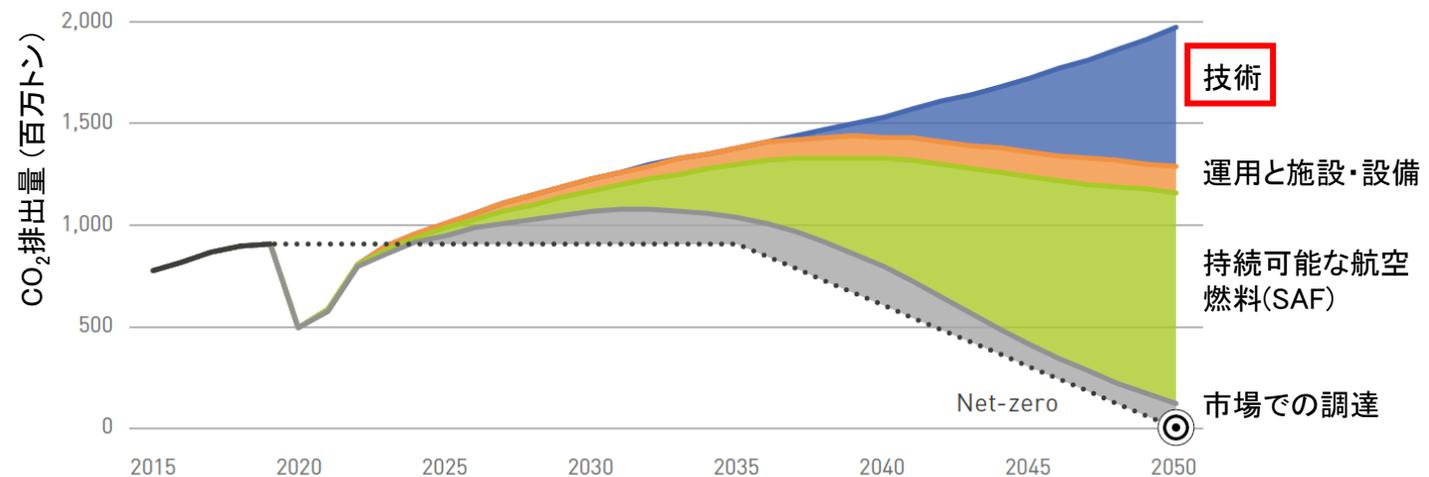
IATA Press Release No.5: IATA Welcomes New CO₂ Emissions Standard for Aircraft, 9 Feb. 2016
<https://www.iata.org/en/pressroom/2016-releases/2016-02-09-01/>

CO₂排出をネットゼロ(Net Zero)にする

2021年10月、航空輸送行動グループATAG (Air Transport Action Group) が、2050年までに国際航空におけるCO₂排出をネットゼロ(Net Zero)にすることを宣言

ICAOもこの宣言を歓迎し、IATAも総会で2050年ネットゼロを採択
 参考: ATAGが発行した報告書Waypoint 2050 report

	IATA	ATAG		
		シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
新技術	13%	22%	12%	34%
運用と施設・設備	3%	10%	9%	7%
SAF	65%	61%	71%	53%
市場での調達	19%	7%	8%	6%



航空機のCO₂排出ネットゼロへ向けて

1. 持続可能な航空燃料(SAF)
2. 水素ジェットエンジン
3. 推進系の電動化

持続可能な航空燃料 (SAF, Sustainable Aviation Fuel)

バイオジェット燃料, 合成燃料

- バイオジェット燃料: 植物や廃油などから作られる
 - 原油から作る燃料と比較して, CO₂排出量を80%程度減
 - 実用化がかなり進展
- SAFは燃料全体の重量の最大50%まで
- IATAの2050年CO₂排出量削減シナリオでは, 65%をSAFによって削減する戦略
 - 2050年, 少なくとも年間4億4,900万キロリットルのSAFが必要と試算
- 国土交通省: 2030年までに国内の航空会社が使う航空燃料の10%をSAFに置き換える目標を設定
- SAFの国産化
- 有志団体「ACT FOR SKY」の設立(2022年3月), 官民協議会の開催(2022年4月)

水素技術(燃料としての水素)

- 水素ジェットエンジン
- 燃料電池⇒電動推進
- 水素タービン発電⇒電動推進

水素航空機(水素ジェットエンジンを中心に)

技術的な課題や経済性の問題

- 体積エネルギー密度がジェット燃料の4分の1程度
- 燃焼温度や燃焼速度が高い
 - ⇒ 燃料タンクやエンジンを含む機体の大幅な設計変更要

Airbus社

- ゼロエミッション旅客機ZEROeのコンセプト機発表(2020年9月)
- 2035年までの水素航空機の実用化を目指す
- 地上および上空で試験を実施するデモンストレーションプログラム
- A380を利用した水素エンジンデモンストレーション機を発表(2022年), 2025年までに水素エンジン推進システムの評価を計画

国内

- NEDO: グリーンイノベーション基金事業/次世代航空機の開発プロジェクト(2021年度から最大10年間)
- 水素航空機向けコア技術開発
- 航空機主要構造部品の複雑形状・飛躍的軽量化開発

航空機の電動化

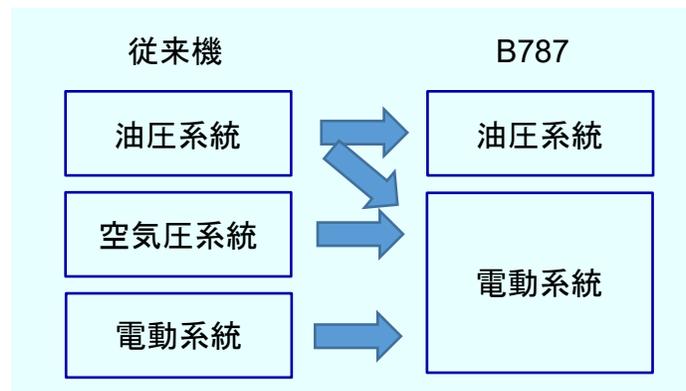
More Electric Aircraft (MEA)

油圧や空気圧アクチュエータの電動化など、装備品の電氣化 ⇒ 所要電力増大

- 燃料効率の向上
- 整備性の向上
- 安全性の向上

ボーイング787:

1 MW程度の電力を発電・利用



ハイブリッド電動推進

全電動ファン推進

推進系の電動化

メリット

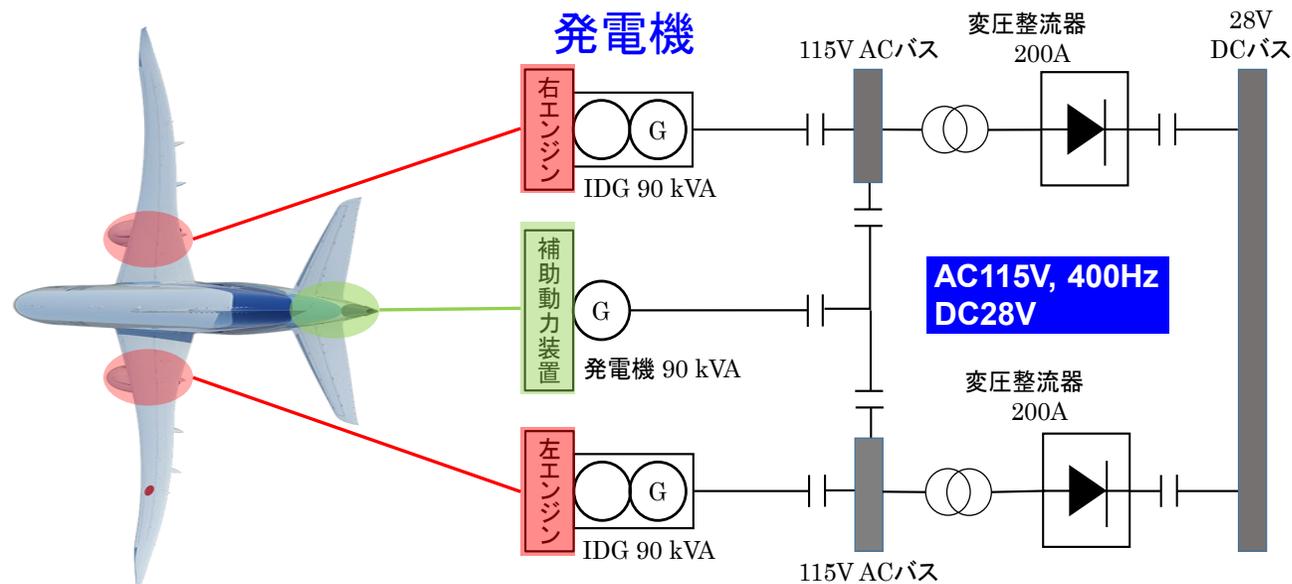
- CO₂排出量ゼロ／低減
 - 多発分散化による実バイアス比向上, 設計自由度向上による空気抵抗減など
- 運航費低減
 - 部品点数削減による整備コスト低減など
- 騒音低減
 - ファンの縮小やエンジン音が小さくなることによる騒音低減

課題

- 小型軽量化(高出力密度化)
- 高効率化
- 信頼性・冗長性の確保

航空機の電力供給系統

従来機 (B767など) の電力供給系統



$$90 \text{ kVA} \times 2 + 90 \text{ kVA} \times 1$$

(180 kVA)

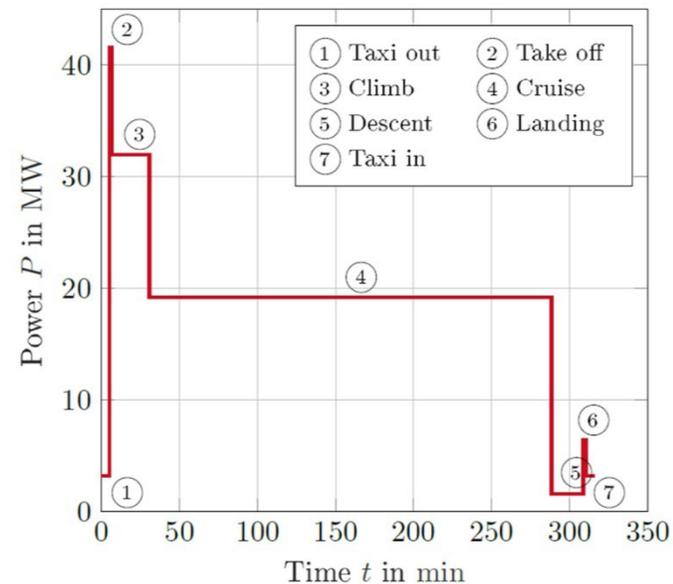
B787の電力供給系統:
(MEA)

$$250 \text{ kVA} \times 4 + 225 \text{ kVA} \times 2$$

(1000 kVA)

AC235V可変周波数
AC115V可変周波数
DC±270V
DC28V

推進に必要な電力



例: 220人乗りの航空機
約4,500 kmの距離を5時間で
飛行する場合の推進パワーの
時間変化

- ②離陸 (Take Off) 時 41 MW
- ③上昇 (Climb) 時 約32 MW
- ④巡航 (Cruise) 時 約20 MW

M. Boll, et al.; Supercond. Sci. Technol., Vol.33, No.4, 044014, 2020

推進系の電動化

さらに高い電圧が必要
(低圧環境での部分放電の問題があり)

電圧	±270V	±500V	±750V	±1000V
電流 (20 MW)	37 kA	20 kA	13 kA	10 kA
電流 (2 MW)	3.7 kA	2 kA	1.3 kA	1 kA

ハイブリッド電動推進航空機の推進系基本構成の例

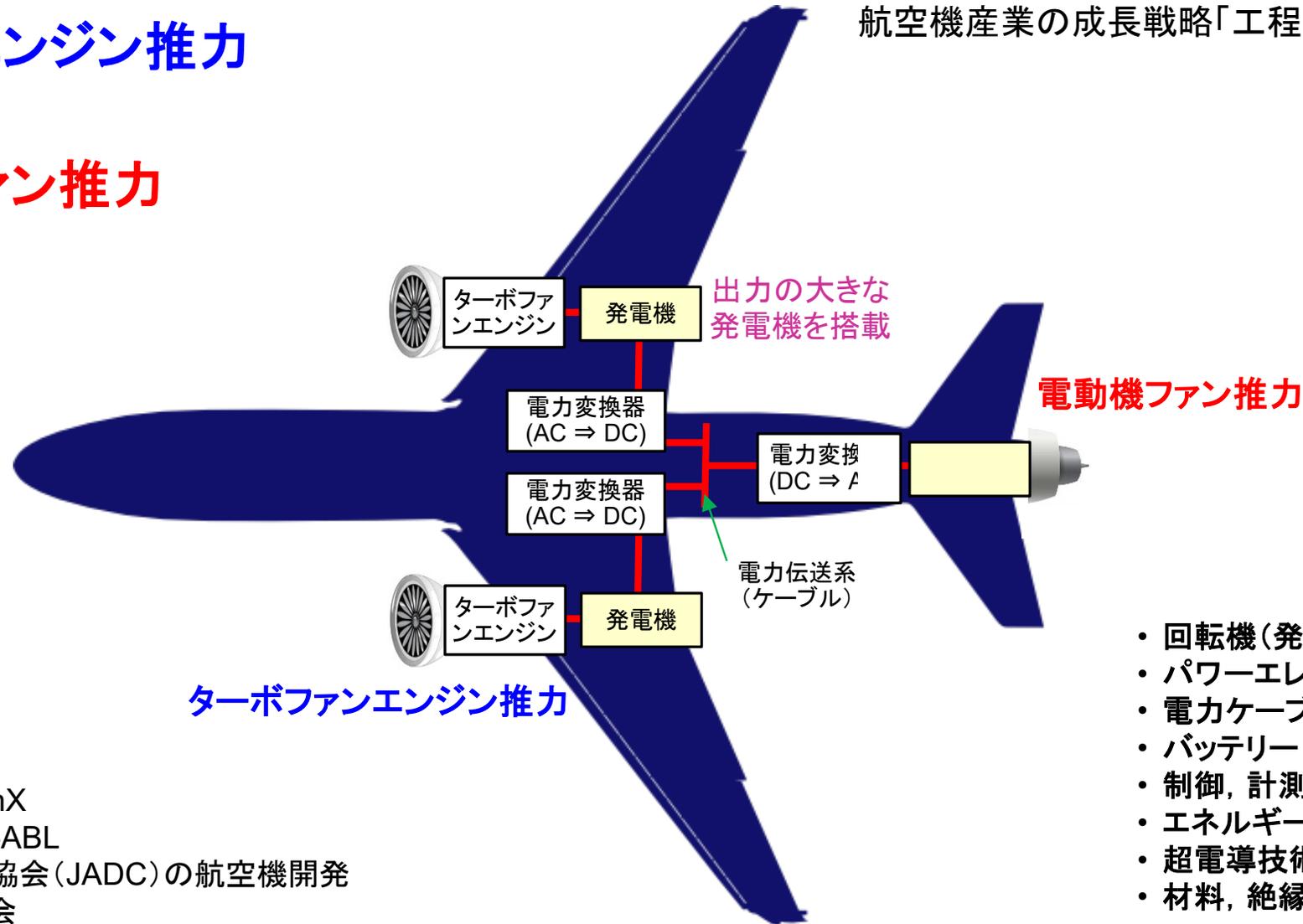
Partial Turbo-electric Propulsion

ターボファンエンジン推力

+

電動機ファン推力

航空機産業の成長戦略「工程表」にも組み込まれている

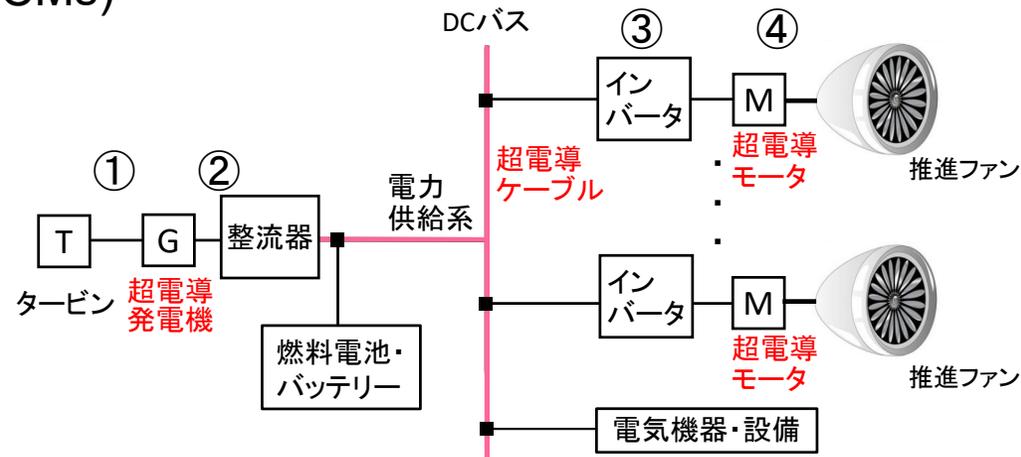
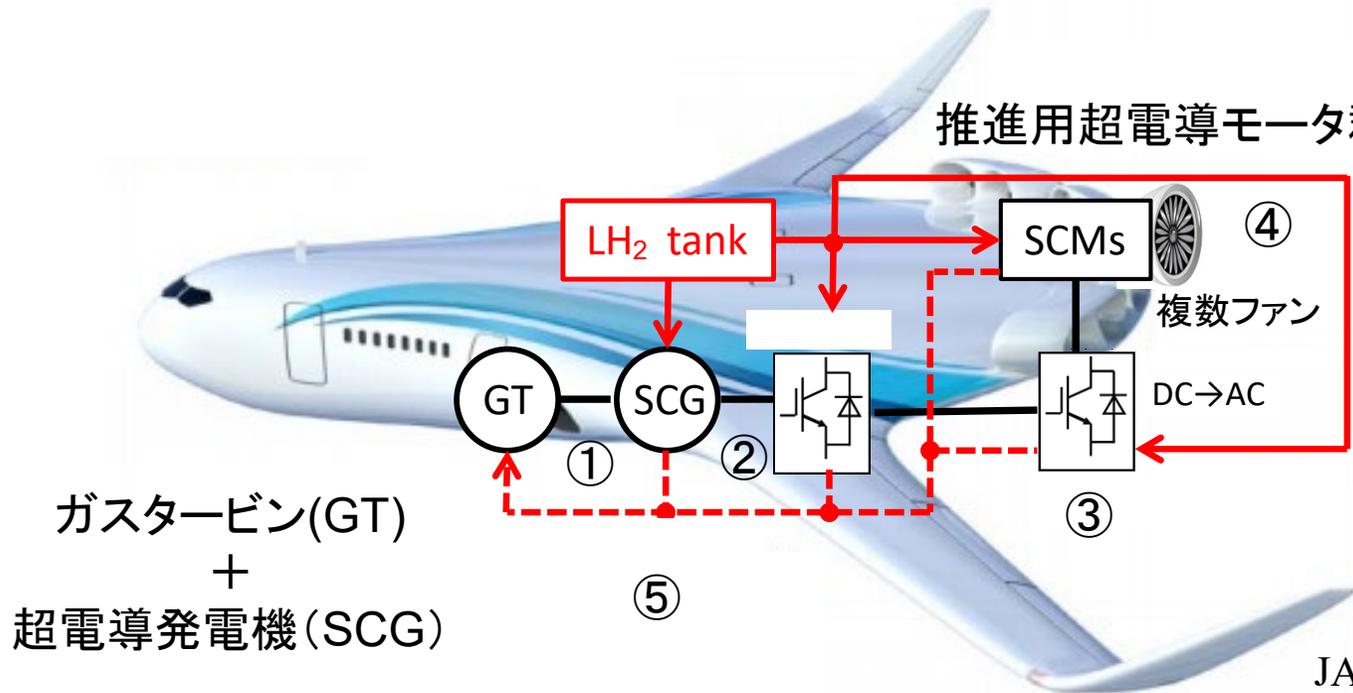


開発例, 検討例

- Airbus社のE-FanX
- NASAのSTARC-ABL
- 日本航空機開発協会 (JADC) の航空機開発 Next Stage勉強会

- 回転機 (発電機, モータ)
- パワーエレクトロニクス
- 電力ケーブル
- バッテリー
- 制御, 計測, センサ
- エネルギー管理
- 超電導技術
- 材料, 絶縁技術, 製造技術, ...

全電動ファン推進航空機の推進系基本構成の例（超電導技術導入）



- 水素ガス燃料を燃焼するガスタービンエンジン(GT)によって超電導発電機(SCG)を駆動(①)
- 発電電力を直流に変換(AC→DC)(②)
- 直流電力は機内の電力バス系統へ
- インバータで交流に変換(DC→AC)(③)
- 超電導モータ群(SCMs)でファンを駆動(④)
- 液体水素は、SCGやSCMs及び電力変換器の冷却に使用した後、水素ガスとしてエンジン燃料の一部として使用(⑤)

寺尾悠, 赤坂和紀, 大崎博之, 岡井敬一, 田口秀之: エアギャップ中の希薄ガスによる回転子冷却法を採用した電動航空旅客機推進系用全超電導モータの電磁設計, 2021年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 1-OS1-3, 2021

タービン発電機
AC/DC電力変換器(コンバータ)
電動機用 DC/AC電力変換器(インバータ)
推進ファン駆動用電動機
電力ケーブル
遮断器, 限流器
燃料電池, エネルギー貯蔵装置, 制御システム, 他

重要な要求事項

小型・軽量化
高効率

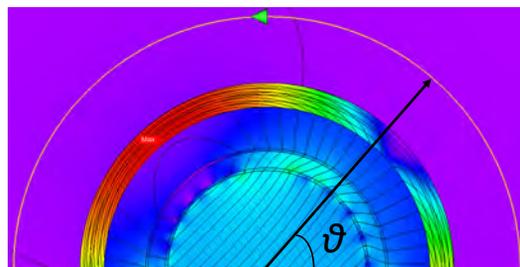
航空機電動推進システム用 全超電導回転機

高出力密度の全超電導回転機

仮定: 180人乗クラス (離陸最大推力 44 MW)

- モータ特性のパラメータ依存性
- 超電導巻線部の交流損失の低減
- 重量低減のための電磁設計

高出力密度 (kW/kg), 低損失化



20 kW/kgを超える出力密度が可能

さらに,

- 推進ファンシステム (推進ファン + 駆動モータ) としての設計
- 冷却システムの検討
 - 希薄ガスによる回転子冷却の可能性検討
- その他

大きな温度マージン
良好な J_c - B 特性
高い臨界温度 (> 90 K)

フジクラ HPより
<http://www.fujikura.co.jp/>

MgB₂ 電機子巻線

液体水素による 20 K冷却

Hypertech, MgB₂ wire

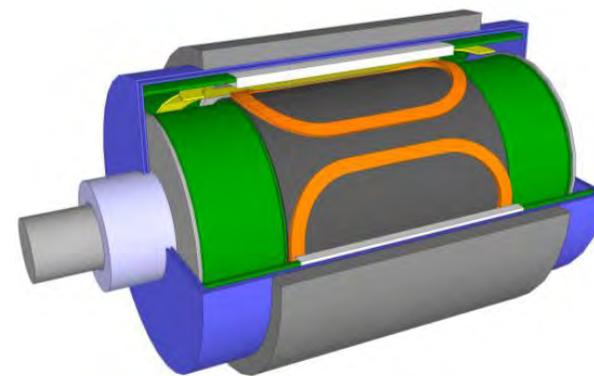
多心線
臨界温度39K
低コスト

交流損失の低減

REBCO界磁巻線

50 K程度での使用を想定

Back yoke 鉄損



カーボンニュートラルの実現に向けて

- エネルギーシステム
 - 安全性
 - 供給安定性
 - エネルギー安全保障
 - カーボンニュートラル
 - グローバル化・世界情勢
- 電動化と電源
- 水素(燃料・キャリア・貯蔵・冷媒・原料)
 - グリーン水素・ブルー水素・.....
- SAF・合成燃料
- 核融合発電
- 標準化, 資源, リサイクル, etc.
- 経済, 社会受容性, 諸制度, 政策, etc.

電力分野

運輸分野

産業分野

民生分野

将来のエネルギー計画

- 我が国の将来の安定なエネルギー供給(2050年以降, 22世紀)
- 長期的な技術開発・実用化ロードマップを策定, 実行の必要性

カーボンニュートラル

- 様々なステークホルダーが関わる
⇒ 協力・連携が必要
- 産学官民の連携の重要性
- 革新的技術の開発
- システムの社会実装

長期的な視点と柔軟な計画のもと, 持続可能な社会の基幹を担うエネルギーシステムの構築へ向けた研究開発と実用化の推進を期待

カーボンニュートラルの実現に向けた超電導技術への期待

エネルギー供給側		超電導技術等	水素
再生可能エネルギーの大量導入・主力電源化	出力変動補償	エネルギー貯蔵, 他	
	需要エリアへの送電	電力ケーブル, 他	
	洋上風力発電のグリッドへの連系	電力ケーブル, 他	
	短絡電流対策	限流器, 他	
グリッドの強化	送電容量の増強	電力ケーブル, 新規送電ルート, 他	○
	安定性の確保	エネルギー貯蔵, 発電機, 限流器, 他	
水素発電システム		回転機	○
高効率・低損失化		機器全般	○
核融合炉の早期実現		マグネット, 他	
エネルギー利用側			水素
脱炭素エネルギー源の利用		電力ケーブル, 限流器, エネルギー貯蔵, 他	○
省エネ	機器の高効率・低損失化	回転機, 電力ケーブル, 他	○
	利用法の最適化	(エネルギーマネジメント, 制御), 他	
輸送システムの電動化	自動車・船舶・航空機・鉄道	回転機, 電力ケーブル, 限流器, エネルギー貯蔵, 他	○
機器・設備の有効利用(⇒省エネ)		電力ケーブル, エネルギー貯蔵, 限流器, 他	

どの機器が効果的に適用できるのか？

カーボンニュートラルの実現に向けた超電導技術への期待

- **カーボンニュートラル, レジリエンス向上, 水素社会実現など, グローバルな重要課題の解決, 貢献へ**
- **技術開発やシステム実証には迅速性が求められる(競合技術も日々進歩)**
- **低炭素化だけでなく, 2050年カーボンニュートラルを実現するのは, 難易度の高い課題であり, 革新的な技術が必要 ⇒ 超電導技術に可能性**
- **実用化には新機能の実現や, 大幅な性能向上, 高い価格競争力などが必要**
- **実系統連系などの条件下で長期運転試験を行って, 性能や運転制御性, 信頼性, 保守性などを実証し, 十分な実用性をもつことを示すことが必要**
- **戦略的な研究開発と、高温超電導線材適用による応用機器の拡がりと展開を期待**