第一部　講演２

『機器・システムの省エネ設計に向けた技術的寄与』

大崎　博之

（東京大学教授，日本学術会議連携会員，電気学会 前会長）

構成

「機器・システムの省エネ設計に向けた技術的寄与」

1. カーボンニュートラルを目指す上での省エネの重要性

- 省エネ
- エネルギー需要と一次エネルギー供給
- エネルギー基本計画における省エネ
- 一次エネルギー供給と最終エネルギー消費のモデル試算例

2. 省エネのための技術的要素

- IEA 高エネルギー効率なエンドユーザ向け機器に関する技術協力プログラム
- 電気機器・システムの省エネ

3. 機器・システムの省エネの事例（運輸部門を中心に）

- 運輸部門におけるCO_2排出量
- 自動車分野における省エネ，カーボンニュートラル
- 鉄道分野における省エネ，カーボンニュートラル
- 航空分野における電動推進化
- 超電導で拓くカーボンニュートラル社会

省エネ

経済産業省 資源エネルギー庁 省エネポータルサイト
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/

1970年代に2度発生したオイルショックの影響で，省エネルギーの推進が急務とされた。
（1973年：第1次オイルショック，1979年：第2次オイルショック）

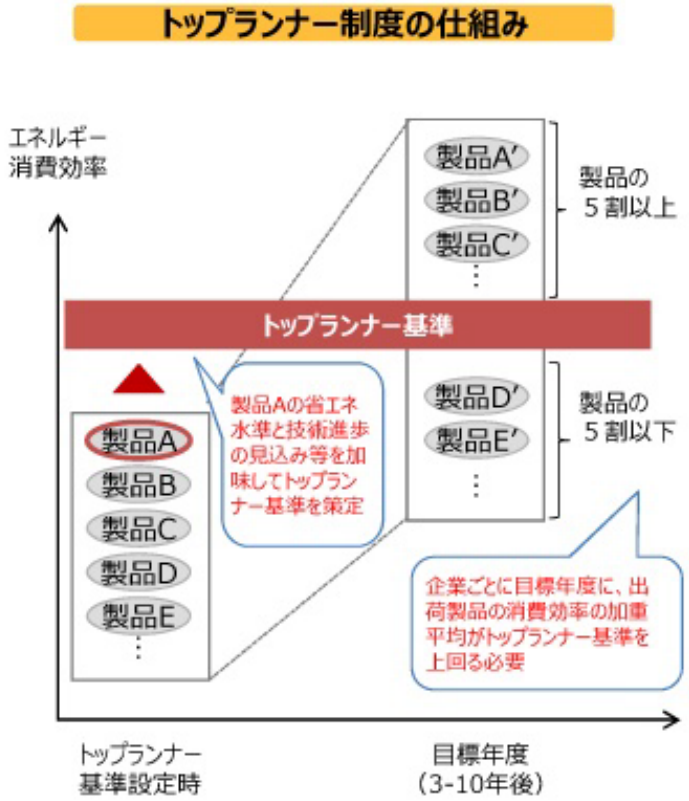
過去50年で約4割のエネルギー効率改善を実現した。

省エネ法

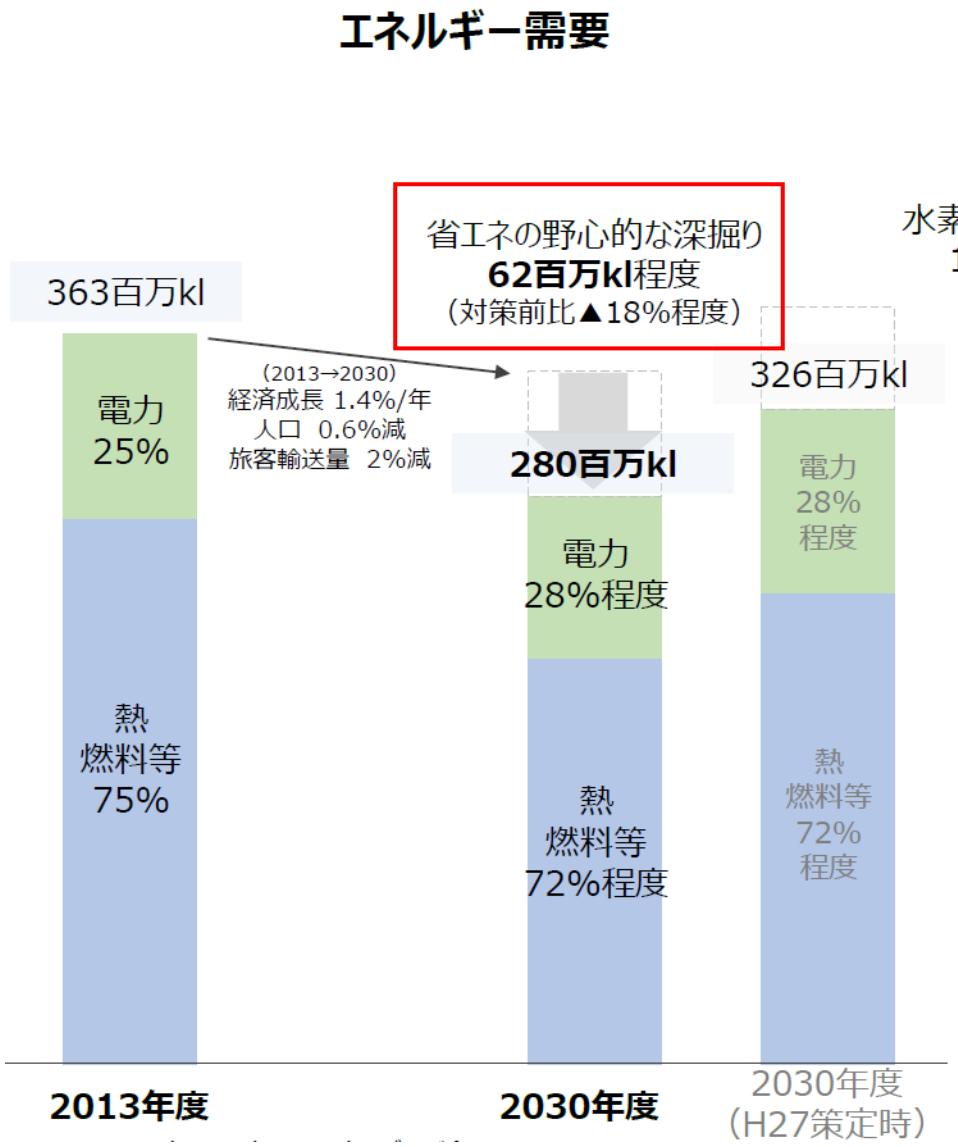
- 正式名称「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」
- オイルショックをきっかけにして1979年に制定された法律
- 国民経済の発展への寄与を目的に，経済的社会的環境に応じて燃料資源を有効利用するためのエネルギー使用の合理化や電気需要の平準化に関する所要の措置を定めている。
- 2018年 省エネ法の改正

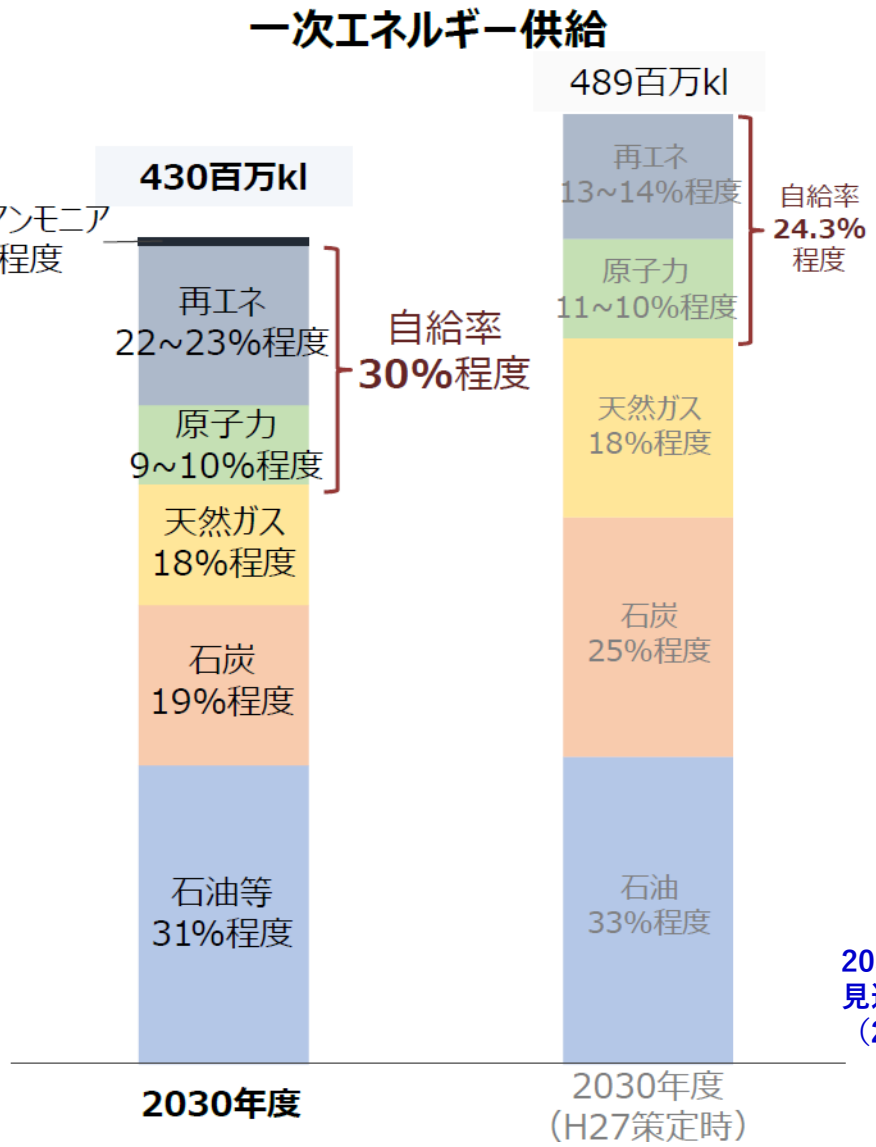
トップランナー制度

- 対象となる機器や建材の製造事業者や輸入事業者に対し，エネルギー消費効率の目標を示して達成を促すとともに，エネルギー消費効率の表示を求めている。



エネルギー需要と一次エネルギー供給





2030年度におけるエネルギー需給の見通し（関連資料）
（2021年10月，資源エネルギー庁）

第6次エネルギー基本計画（2021年10月）における省エネ

【方針】
① 進捗が順調な対策や更なる政策目標を掲げている対策は省エネ量を上方修正
② 進捗に一定の遅れが見られる対策は省エネ量を維持しつつ，更なる対策を検討
③ 進捗が全く見られない又は著しく遅れている対策については，その理由を明らかにし，省エネ量堅持を指向しつつも，対策を抜本的見直し
④ 社会や技術の変化等を踏まえ，新たな対策の積み上げ

2030年度省エネ量目標値（万kL）

	2019年度（実績）	2030年度目標（2015年度策定時）	2030年度目標	増加分
産業部門	322	1,042	1,350程度	300程度
業務部門	414	1,227	1,350程度	150程度
家庭部門	357	1,160	1,200程度	50程度
運輸部門	562	1,607	2,300程度	700程度
合計	1,655	5,036	6,200程度	1,200程度
最終エネルギー消費量	*35,000*	*37,700*	*35,000*	*対策無の場合*

2030年度におけるエネルギー需給の見通し（2021年10月）より）

徹底した省エネの更なる追求

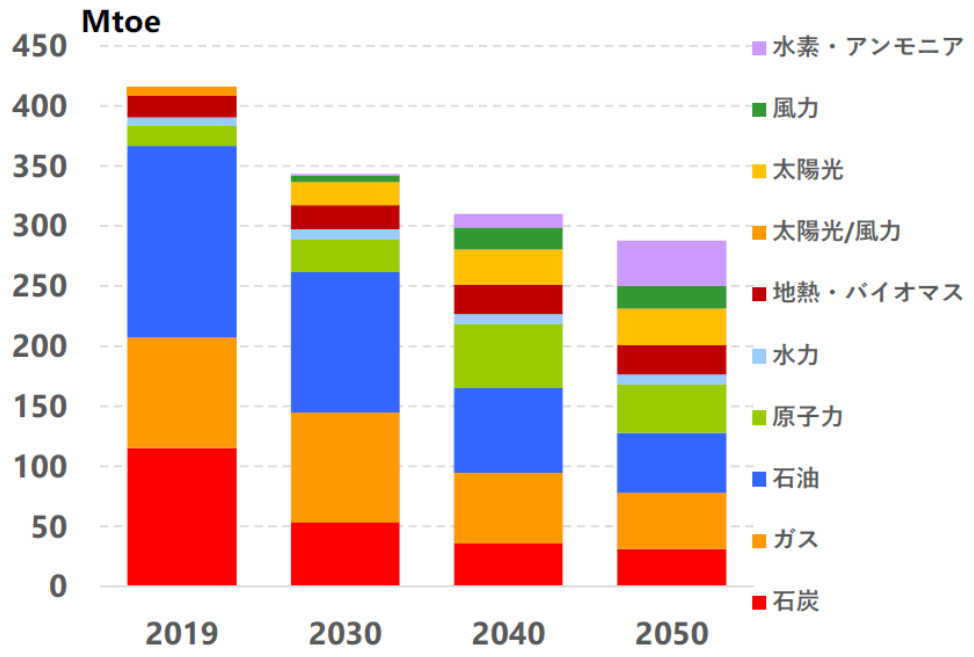
- 産業部門
  - エネルギー消費原単位の改善を促すベンチマーク指標や目標値の見直し
  - 「省エネ技術戦略」の改定による省エネ技術開発・導入支援の強化
- 業務・家庭部門
  - 2030年度以降に新築される住宅・建築物についてZEH・ZEB基準の水準の省エネ性能の確保
  - 建築物省エネ法による省エネ基準適合義務化と基準引上げ
  - 建材・機器トップランナーの引上げ
- 運輸部門
  - 電動車・インフラの導入拡大
  - 電池等の電動車関連技術・サプライチェーンの強化
  - 荷主・輸送事業者が連携した貨物輸送全体の最適化
  - AI・IoTなどの新技術の導入支援

一次エネルギー供給と最終エネルギー消費のモデル試算例 2050年までの見通し

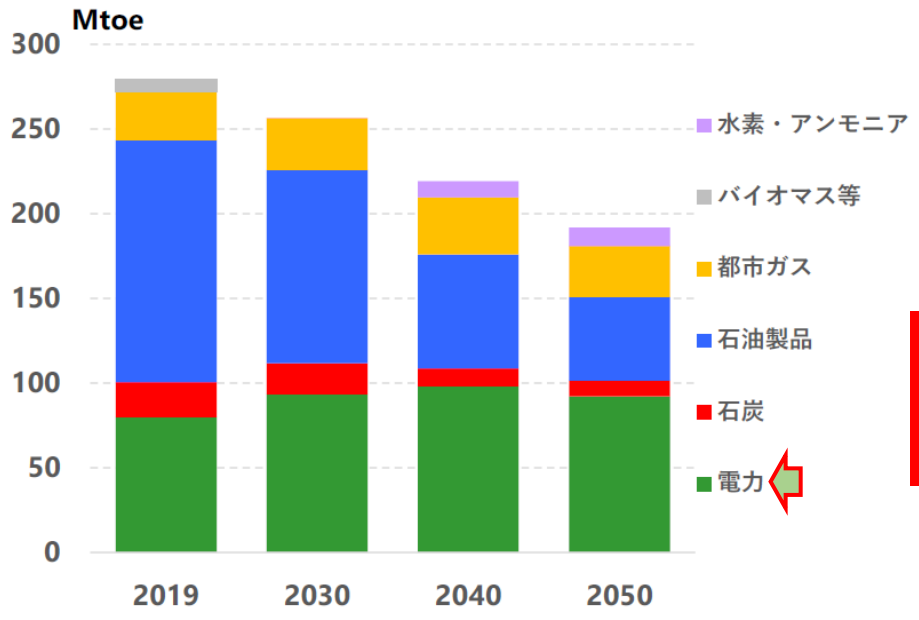
（原子力発電17基，60年稼働の場合）

toe：石油換算トン（tonne of oil equivalent）

一次エネルギー供給



最終エネルギー消費



電気エネルギーの消費割合の増加

↓

電気エネルギー消費量増加抑制の必要性

↓

2050年カーボンニュートラルを達成するためには，

◆ 電化の推進
◆ 電気機器・システムの省エネ（高効率化）

が重要

「2030年・2050年の脱炭素化に向けたモデル試算」（2022年9月28日，経済産業省資源エネルギー庁 第50回総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 資料）より

IEA 高エネルギー効率なエンドユーザ向け機器に関する技術協力プログラム（IEA 4E TCP）

https://www.iea-4e.org/

International Energy Agency (IEA)　国際エネルギー機関
Technology Collaboration Programme on Energy Efficient End-Use Equipment (4E)

Annexes

- モータシステム
- 電子デバイス・ネットワーク
- 固体照明
- パワーエレクトロニクス技術
- 製品のエネルギー効率の動向
- コネクテッドデバイスアライアンス

最近の出版物の例

- データセンターのエネルギー効率化に関する政策：スコープ, 動向, データの可用性（2023年2月）
- 新しいバッテリー技術（2022年12月）
- 変換器損失に関するラウンドロビン（2022年12月）
- スマート照明：エネルギー消費に影響を与える新機能（2022年11月）
- エネルギー管理プロトコルガイド（2022年11月）
- モバイルデバイスの効率化（2022年11月）
- スマートデバイスの標準化（2022年10月）
- 相互運用性（2022年10月）

電気機器・システムの省エネ（高効率化）

- システム
- 電気機器
- パワエレ機器
- 電子デバイス・パワーデバイス
- 受動部品（インダクタ, キャパシタ, ･･･）
- 材料（磁性材料, 導電材料, 絶縁材料, 構造材料, ･･･）

・機器・システム設計
・ネットワーク
・運用
・制御

モータ（東芝）

SiCパワーモジュール
（三菱電機）

太陽光発電設備（ドイツ）

例：エアコンの省エネ

◆ハードウエア開発
- インバータ搭載率：100%
- エネルギー消費効率の改善率2027年目標：13.4%（壁掛形）
  （2027年度の目標基準値6.51 - 2016年度実績値5.74）/ 5.74×100
  ＝約113.4%

①圧縮機の性能向上
- 新冷媒対応
- 圧縮機モータ効率
- 制御用電機品効率向上，機械損失・熱損失低減

②送風系の性能向上

③熱交換器の性能向上

◆状態センシング
- 人：位置，人数，活動量，体感温度
- 部屋：間取り，家具配置，日射，温度
- 周囲環境：外気温，気象情報等

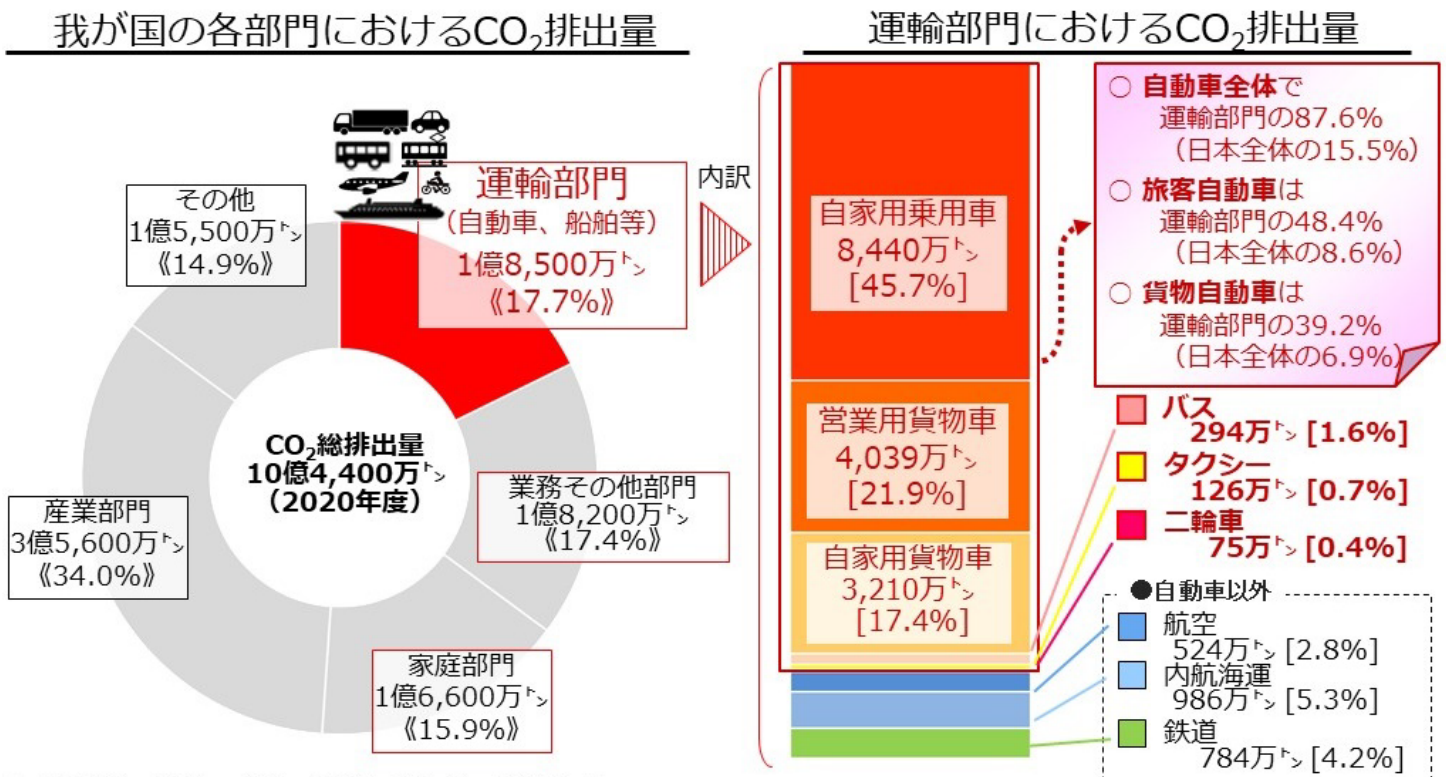
◆データ分析・学習・予測
- 生活パターン学習（起床，就寝，外出）
- 部屋特性（負荷条件，方位）
- 体感温度，室温の変化予測

◆省エネ制御
- 生活パタンに合わせて無駄な空調削減
- 不在時の出力低下
- 気流による体感温度の効果的な低下
- 冷房送風のハイブリッド

運輸部門におけるCO_2排出量

日本国内

2020年度における日本のCO_2排出量（10億4,400万トン）のうち，運輸部門からの排出量（1億8,500万トン）は17.7%を占めている。

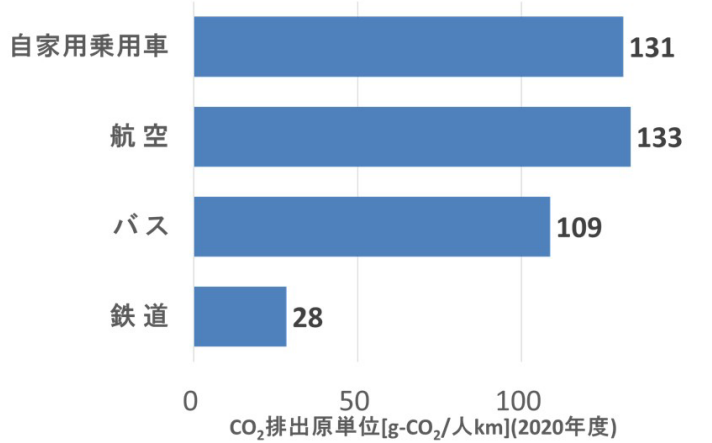


※ 端数処理の関係上、合計の数値が一致しない場合がある。

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

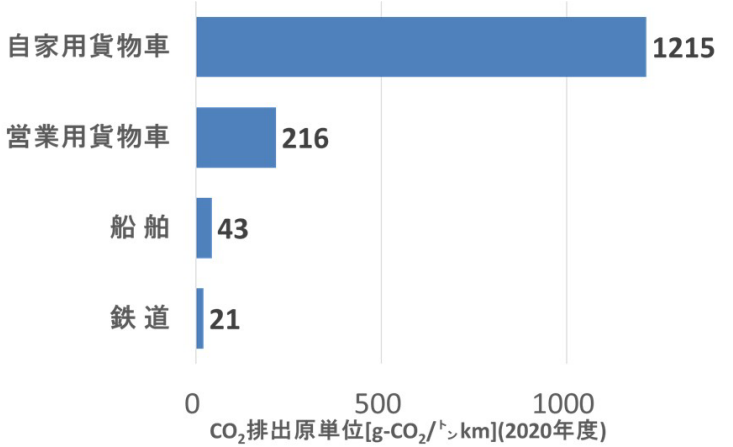
自動車全体では運輸部門の87.6%（日本全体の15.5%），うち，旅客自動車が運輸部門の48.4%（日本全体の8.6%），貨物自動車が運輸部門の39.2%（日本全体の6.9%）を排出している。

輸送量当たりの二酸化炭素の排出量（旅客）



※温室効果ガスインベントリオフィス：「日本の温室効果ガス排出量データ」、国土交通省：「自動車輸送統計」、「航空輸送統計」、「鉄道輸送統計」より、国土交通省 環境政策課作成

輸送量当たりの二酸化炭素の排出量（貨物）



※温室効果ガスインベントリオフィス：「日本の温室効果ガス排出量データ」、国土交通省：「自動車輸送統計」、「内航船舶輸送統計」、「鉄道輸送統計」より、国土交通省 環境政策課作成

自動車分野における省エネ，カーボンニュートラル

水素
バイオ燃料
合成燃料

EV連携スマートグリッド技術
↓
再エネの大量導入を可能に

技術開発

小型高出力化・高トルク化
- 銅損低減，冷却性能向上
- 高電圧化
- 高絶縁耐圧化

高効率化
- 渦電流損低減
- 磁石設計
- トポロジー最適化
- セグメントコイル方式

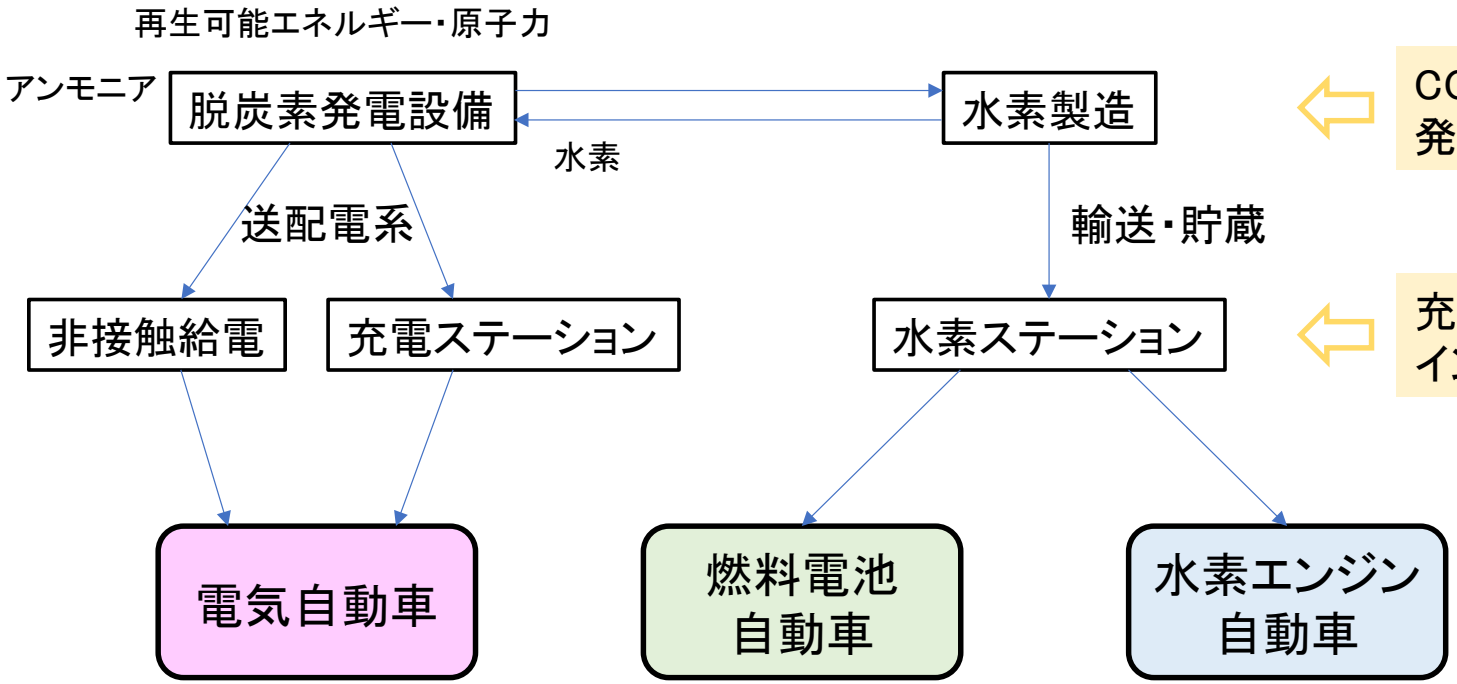
低コスト化

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



CO_2フリーな発電・水素製造

充電・水素燃料供給インフラ

パワーデバイスの高性能化（耐圧，周波数）
磁性材料の高機能化，コンデンサ（フィルム）の高度化
自動運転，走行中給電

カーボンニュートラルのための技術の開発を先導的に推進

鉄道分野における省エネ，カーボンニュートラル

鉄道

- CO_2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

鉄道分野のCO_2排出量：日本全体の約0.9%

（9割は電力由来，うち75%は火力由来）

⇨ 鉄道利用の促進，モーダルシフト

鉄道を魅力的に

取り組み例

- CO_2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
- 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
- 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

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/

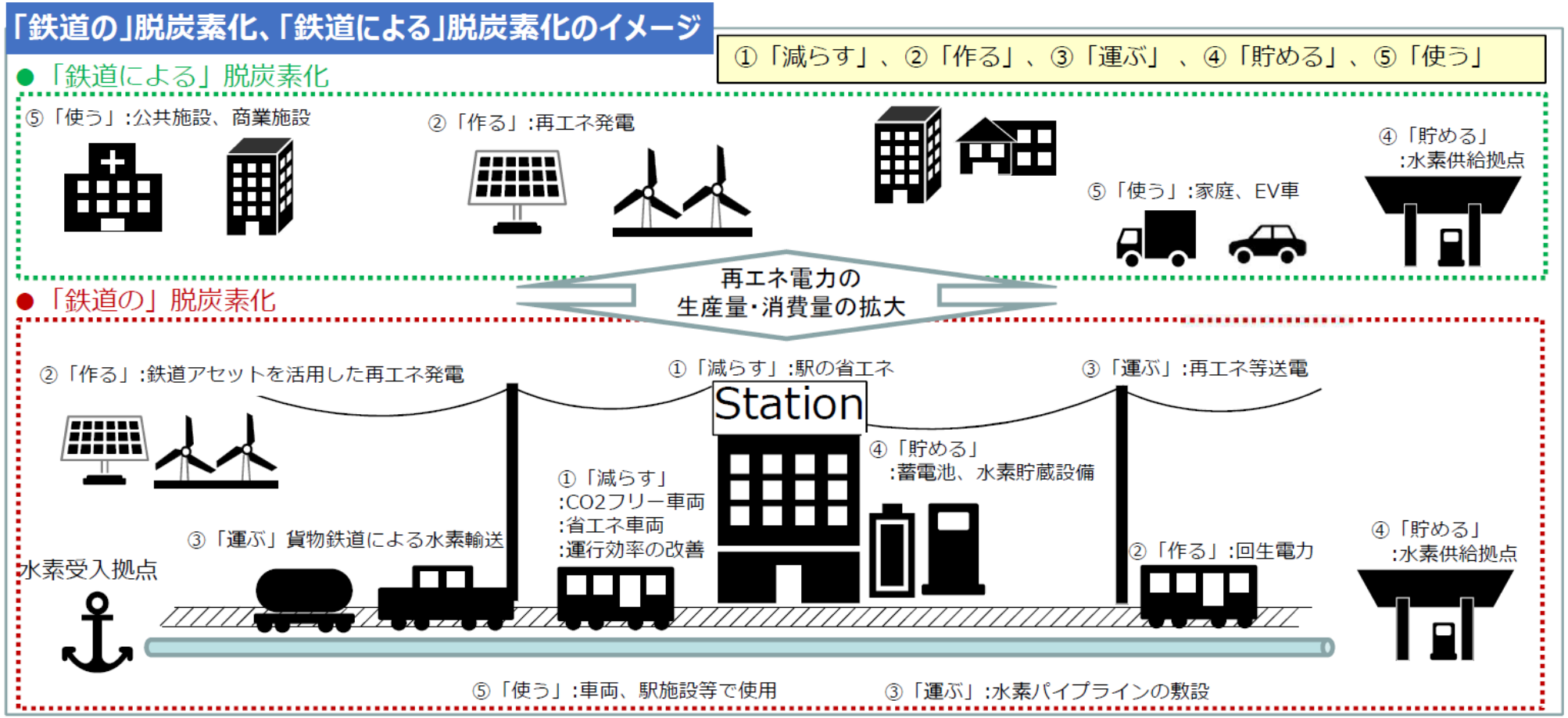
次世代技術の開発
高性能化

鉄道の機器・システムで
活用するための技術開発

持続可能な社会

- 省エネ・省資源
- リサイクル・リユース
- 規制（水素，他）

鉄道分野における省エネ，カーボンニュートラル



国土交通省「鉄道分野のカーボンニュートラル加速化検討会」資料より　https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr1_000071.html

わが国のカーボンニュートラルへの貢献

CN対応のエネルギーシステム・電力システムの構築に貢献

鉄道負荷を良質な負荷へ
（総需要抑制，電力変動抑制）
水素社会構築への貢献

鉄道電力設備

駅施設

鉄道分野のカーボンニュートラル

電化・水素・バイオ，損失低減

省エネ，省資源，省力

鉄道車両の脱炭素化

鉄道事業のための主要なエネルギー：
電力 ＋ 軽油

電力： 電力の購入，自社発電所

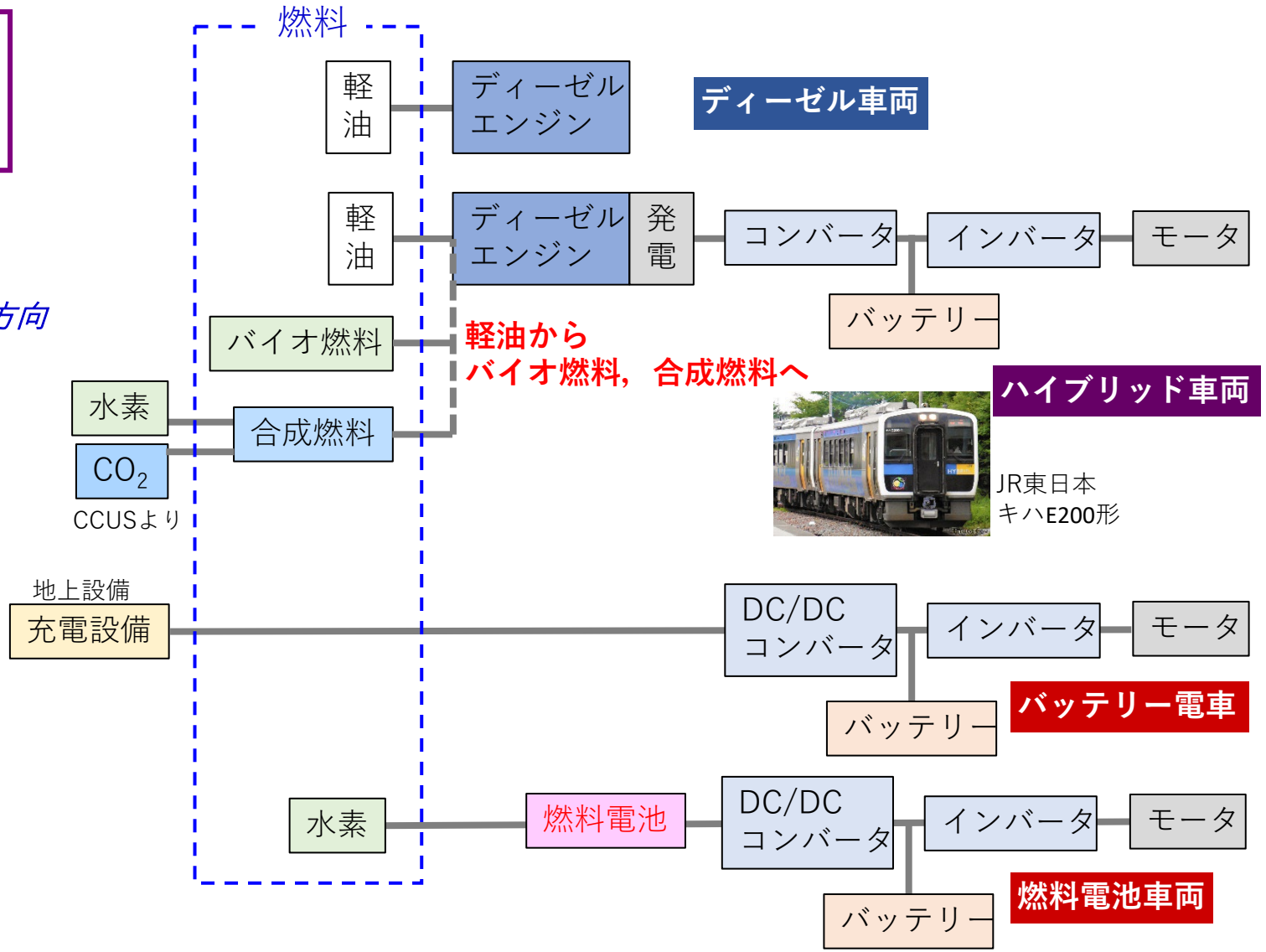
軽油： ディーゼル車両用
軽油を燃料とするディーゼル車両は廃止の方向

電動化

- **ハイブリッド車両**（シリーズハイブリッド）
- **軽油からバイオ燃料，合成燃料へ**
- **バッテリー電車（架線レス，充電設備）**
- **燃料電池車両（水素車両）**

JR東日本の燃料電池ハイブリッド車
HYBARI

JR九州のバッテリー電車
BEC819系電車 DENCHA



鉄道電気機器・システムの省エネ（低損失化）

電化（電動化）が進み，ピーク電力や電力量の増大

抑制が必要

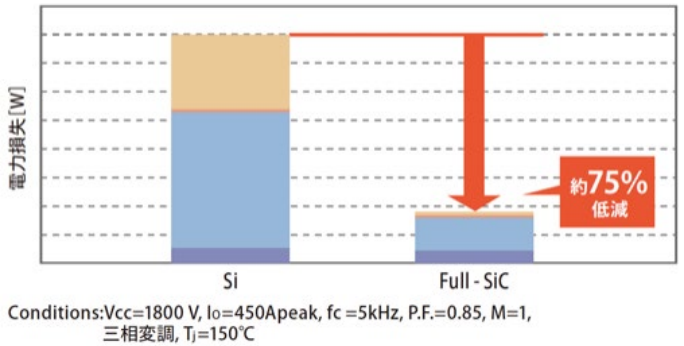
⇒ **省エネの重要性**

電車の省エネ

- 機器の高効率化・軽量化
  - ➢ インバータ（パワーエレクトロニクス技術，パワーデバイス）
  - ➢ モータ
- 制御技術
- 回生ブレーキ（回生率の向上）
  - ➢ エネルギー貯蔵設備（バッテリー等）
- バッテリー（蓄電池）
- 省エネ運転

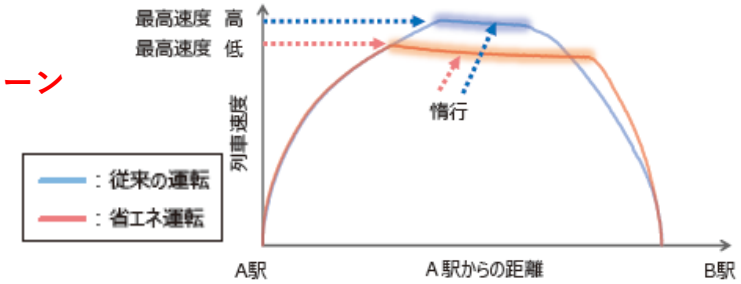
ブレーキ時のエネルギーの回収，利用

SiCパワーモジュール（三菱電機）



シリコン(Si)との電力損失比較（三菱電機）

最適運転パターン
速度カーブ



JR東日本ニュース(2021.9.7)より

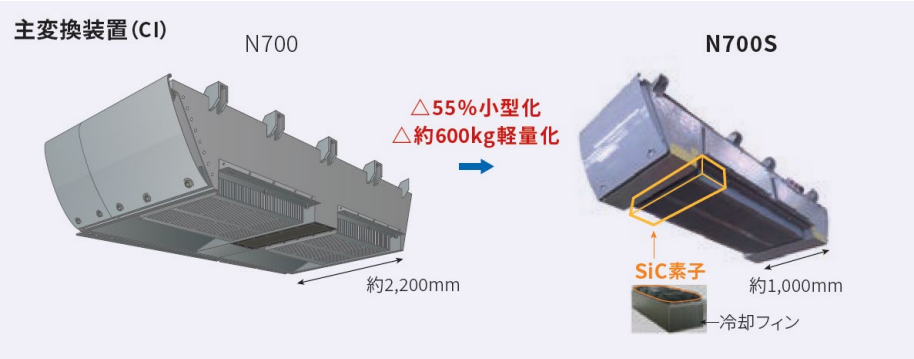
モータとVVVFインバータ
（東芝）
東京メトロ向

東海道新幹線・東京メトロの例

東海道新幹線N700Sの電力消費量の低減

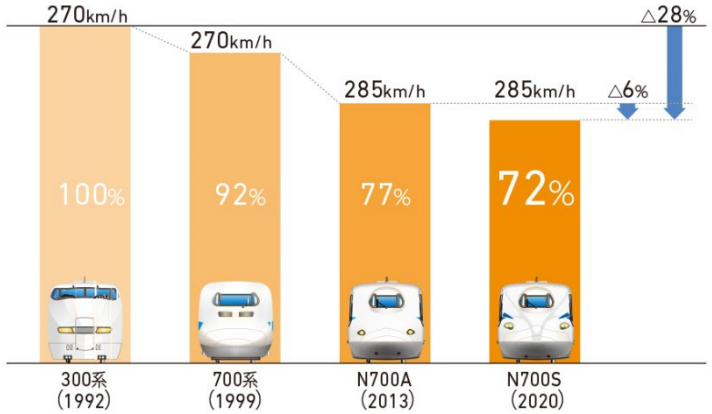
- SiC素子駆動システムの採用
- 車両の軽量化
- 走行抵抗の低減等

⇒ N700Aタイプに対して6%削減



6極駆動モーター

6極モータにより，
1台車あたり約140kg
の軽量化

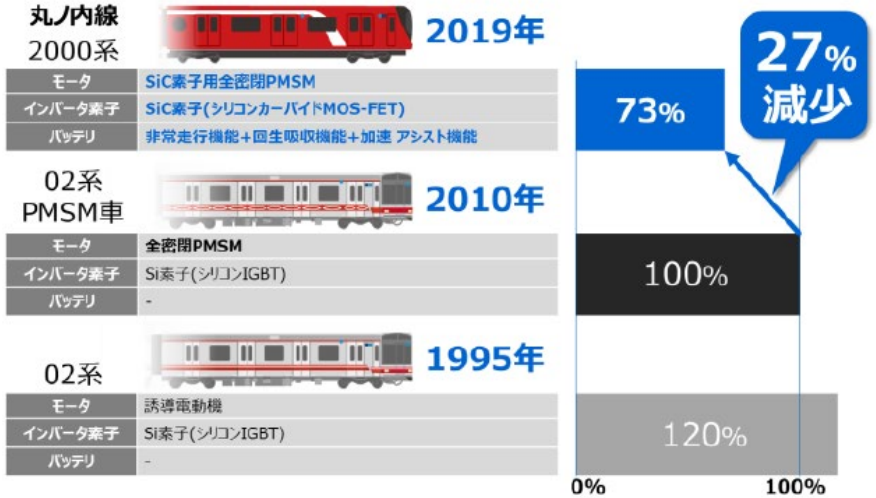


電力消費量の比較

https://jr-central.co.jp/

東京メトロ丸ノ内線2000系

- 全SiC素子適用インバータ
- 全閉型永久磁石同期モータ
- 非常走行用電源装置



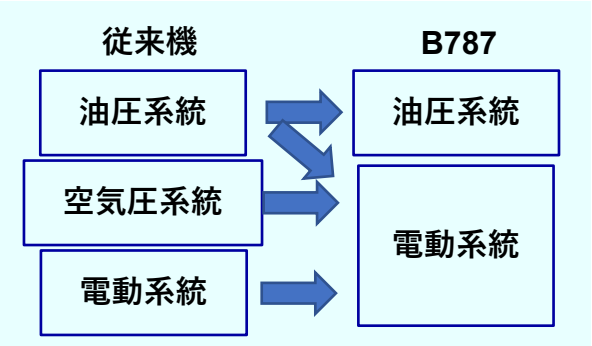
https://www.tokyometro.jp/

航空機の電動化

More Electric Aircraft (MEA) → **ハイブリッド電動推進** → **全電動ファン推進**

油圧や空気圧アクチュエータの電動化など，
装備品の電気化 ⇒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 (B787)：
1 MW 程度の電力を発電・利用



B767の電力供給系統：
90 kVA × 2 ＋ 90 kVA × 1
(180 kVA)
AC115V 400Hz
DC28V

B787の電力供給系統：
250 kVA × 4 ＋ 225 kVA × 2
(1000 kVA)
AC235V可変周波数
AC115V可変周波数
DC±270V，DC28V

推進系の電動化

メリット

- CO_2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
- 電圧　（低圧環境での部分放電の問題）

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）
離陸時 41 MW，上昇時 32 MW，巡航時 20 MW
M. Boll, et a;. Supercond. Sci.Technol., Vol.33, No.4, 044014, 2020

電圧・電流

20 MW時

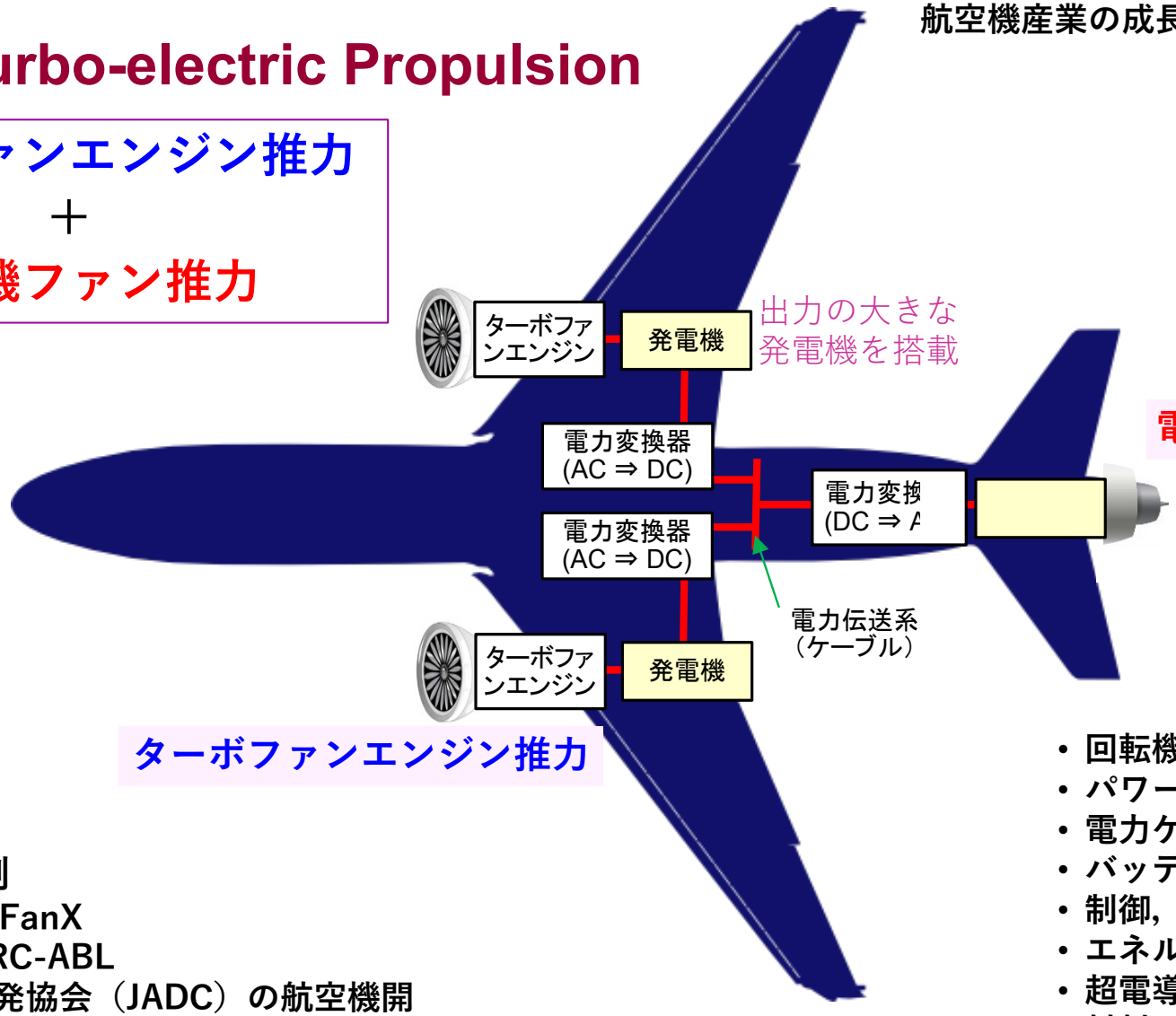
電圧	±270V	±500V	±750V	±1000V
電流	37 kA	20 kA	13 kA	10 kA

ハイブリッド電動推進航空機の推進系基本構成の例

航空機産業の成長戦略「工程表」にも組み込まれている

Partial Turbo-electric Propulsion

ターボファンエンジン推力
＋
電動機ファン推力



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
- エネルギーマネージメント
- 超電導技術
- 材料，絶縁技術，製造技術，・・・

NASA 亜音速単葉エンジン機 (SUSAN)

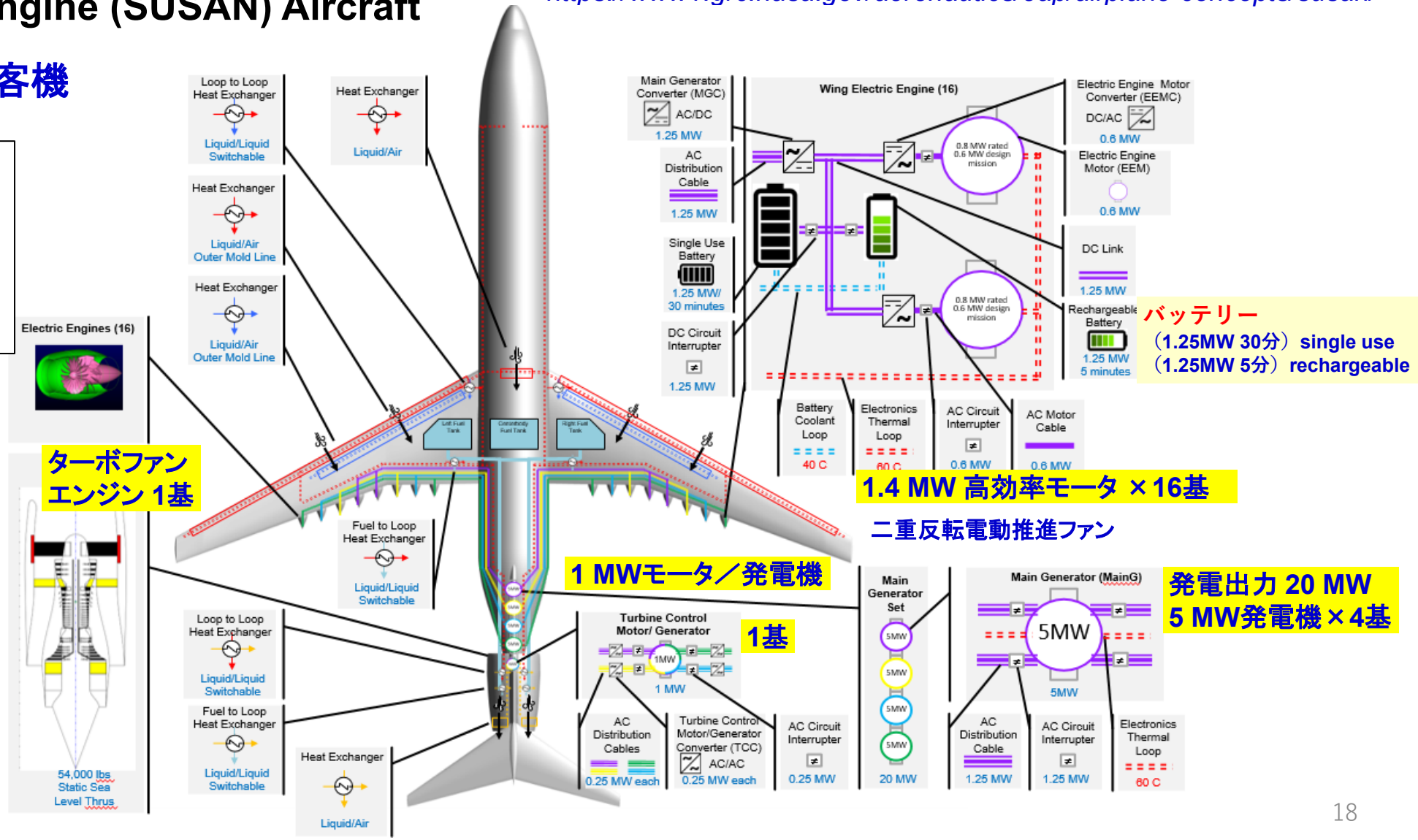
Subsonic Single Aft Engine (SUSAN) Aircraft

https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/airplane-concepts/susan/

リージョナル・低コスト旅客機

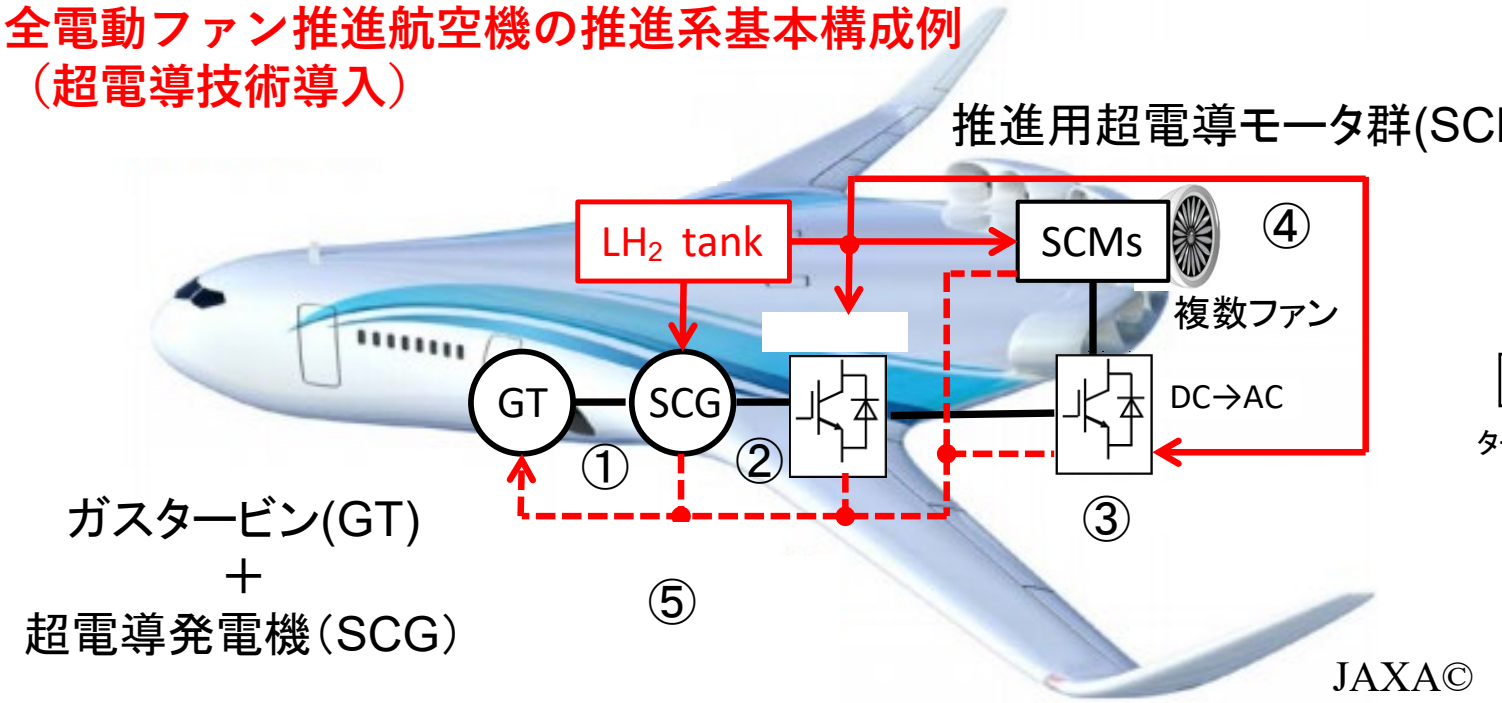
- 2040年サービス開始想定
- ハイブリッド分散システム
- 総出力20MW
- 180席
- 機体後尾に設置された1基のターボファンエンジンで発電

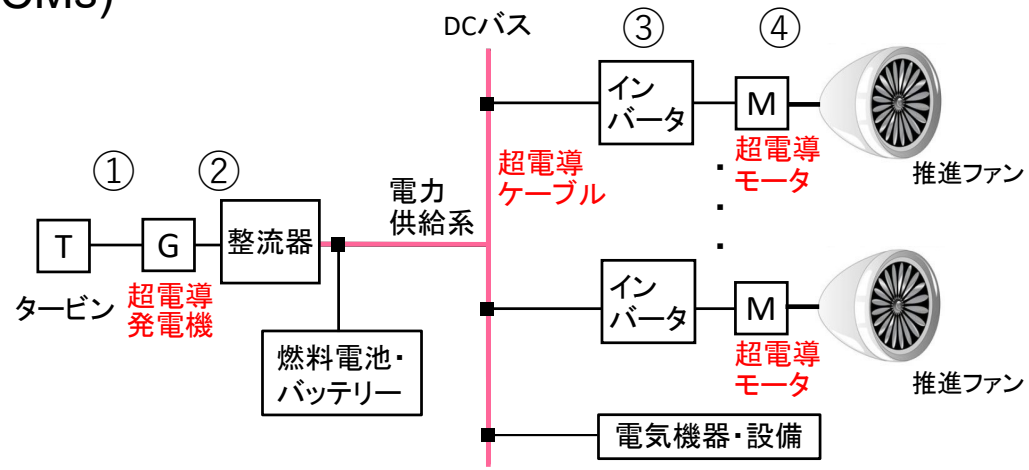
航続距離： 設計2500マイル
（経済性750マイル）
速度　　： マッハ0.80



（参考）電動航空機用の超電導回転機の研究開発

全電動ファン推進航空機の推進系基本構成例
（超電導技術導入）



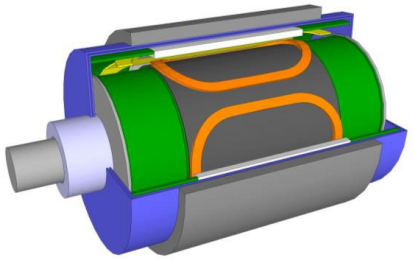


寺尾悠, 赤坂和紀, 大崎博之, 岡井敬一, 田口秀之: エアギャップ中の希薄ガスによる回転子冷却法を採用した電動航空旅客機推進系用全超電導モータの電磁設計, 2021年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 1-OS1-3, 2021

- 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

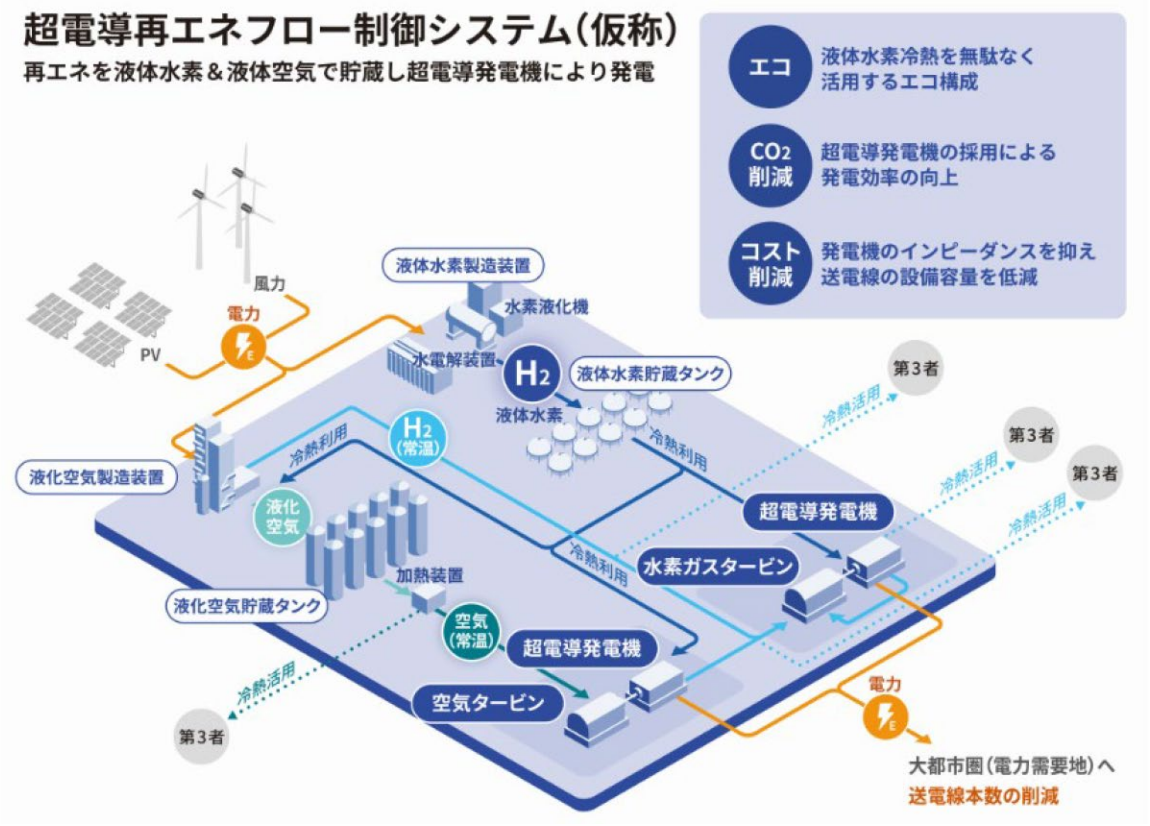
全超電導回転機の設計例と課題

- 重量低減のための電磁設計
- 超電導電機子巻線の交流損失の低減
- 回転子損失の低減
- 冷却方法



超電導で拓くカーボンニュートラル社会

産業競争力懇談会COCN 2022年度プロジェクト
「超電導で拓くカーボンニュートラル社会」
最終報告書（2023年2月9日）より



超電導再エネフロー制御システム（仮称）の機能

- 系統の安定化（慣性力・同期化力の供給と低インピーダンス化による系統安定度の改善）
- 系統の電力需給バランス調整
- 季節間エネルギー貯蔵（エネルギー安全保障）

水素・超電導コンプレックス

- 液体水素を中心とし，超電導の利点を活用した産業集合体
- 液体水素の冷熱を段階的に利用する冷熱カスケード利用，およびプラントから排出される排熱の回収利用を組み合わせることにより，コンプレックス全体での熱効率の改善と，液体水素の冷熱利用による超電導装置の導入推進
- 超電導装置が提供するベネフィット（磁場，大電流，放射光，ビーム，中性子など）により新たな価値やプロダクトを創生

http://www.cocn.jp/report/

まとめ

「機器・システムの省エネ設計に向けた技術的寄与」

1. カーボンニュートラルを目指す上での省エネの重要性

- 一次エネルギー供給と最終エネルギー消費は2050年まで減少していくが，電気エネルギーの消費割合は増加する見込み
- 電気エネルギー消費量の増加を抑制する必要あり

2. 省エネのための技術的要素

- 2050年カーボンニュートラルを達成するためには，
  - ◆電化の推進，
  - ◆電気機器・システムの省エネ（高効率化），

  が重要

3. 機器・システムの省エネの事例

- 日本のCO_2排出量の2割弱を占める運輸部門の省エネ，カーボンニュートラルについて，鉄道と航空分野を中心に紹介した