
低炭素化のためのエネルギーチェーンと カーボンエネルギーの考え方

東北大学 工学研究科 電気エネルギーシステム専攻
先端電力工学共同研究講座
山本博巳



APEL | Advanced Power
Engineering Lab

TOHOKU
UNIVERSITY

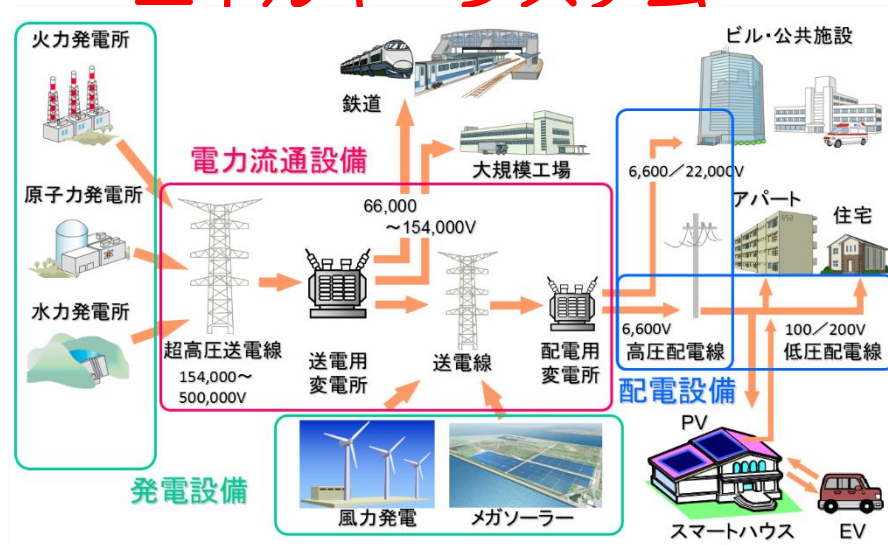
説明の概要

- 0. 東北大学 電気エネルギーシステム専攻 先端電力研(APEL)
- 1. 背景
 - カーボンニュートラル目標
- 2. エネルギーチェーン
- 3. カーボンエネルギー概念とその応用例
 - 火力発電、歴史的なエネルギー消費への応用
- 4. エネルギーチェーンとカーボンエネルギーの応用
 - 給湯と自動車への応用
- 5. まとめ

先端電力研 (APEL) (1997年発足) 東北大学と東北電力が共同でエネルギーシステムの課題を研究

エネルギーシステム

環境問題



再エネとの調和

事業者

東北電力

情報

支援

研究

東北大学 大学院
電気エネルギーシステム専攻
(先端電力工学共同研究講座)

先端電力研 (APEL)

主な研究テーマ

主な研究テーマ

- ◆ 将来の電気・エネルギー需要の予測と低炭素化の研究
- ◆ 電気エネルギー利活用によるエネルギーチェーン全体の低炭素化の研究
- ◆ カーボンニュートラルのエネルギーチェーンにおける電気、水素、電気利用機器の役割の研究

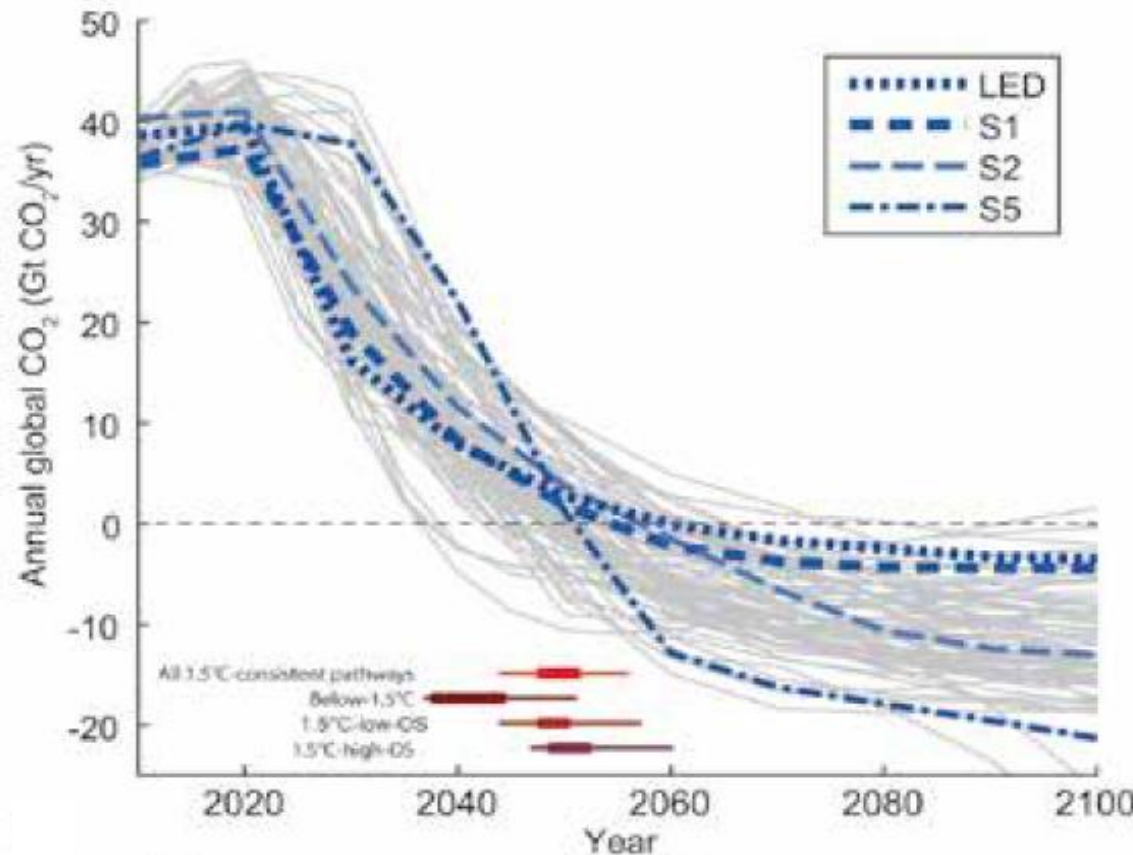
応用分野と波及効果

- 電気エネルギー利活用を考慮した将来のエネルギー需要の計算
- 低炭素エネルギーチェーンに向けての電力関連設備の形成と運用
- カーボンニュートラルの地域エネルギービジョンの提示



背景：カーボンニュートラル目標

なぜ2050年カーボンニュートラル？ 1.5℃シナリオにおける世界のCO₂排出量の推移

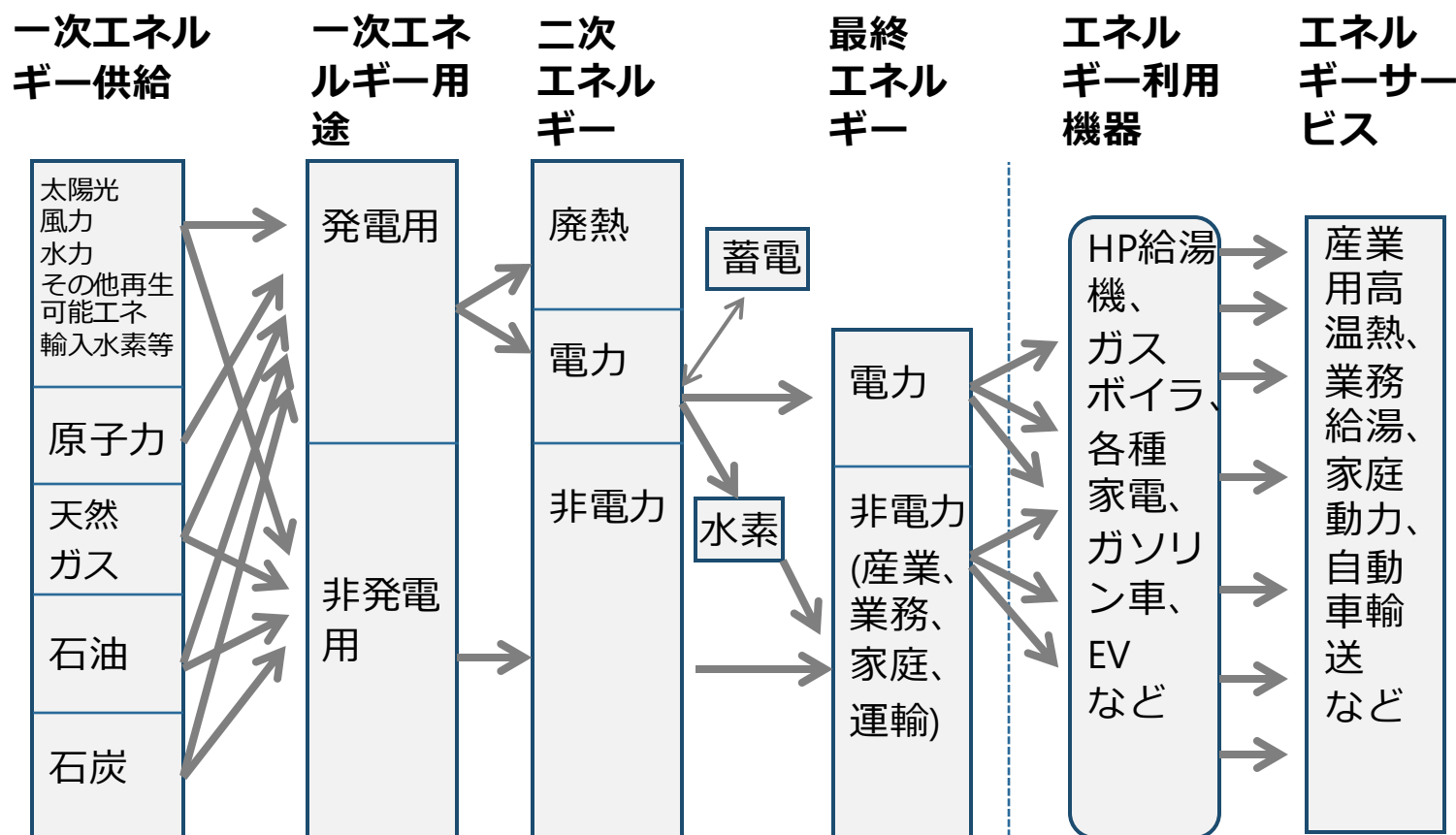


- 気温上昇
1.5℃以下にするCO₂排出量推移 (多くのモデルで計算)
- 2050年前後に世界でゼロエミッション
- 今世紀後半にCO₂ネガティブ

出典：IPCC SR15

エネルギーチェーン

- エネルギーの生産から加工、消費、エネルギーサービス供給に至るエネルギーの連環。CO₂の大幅削減のためには、個別の低炭素対策だけでなく、エネルギーチェーンの構造変化を含めた低炭素対策が重要。



カーボンエネルギー概念 背景： エネルギーとCO₂の関係は直感的にわかりにくい

- エネルギーからのCO₂排出量を直感的に把握しにくい。
- CO₂原単位がわかりにくい（覚えにくい、単位変換がある）。
- エネルギーCO₂の認識の分断 ⇒ CO₂の削減が難しい原因の一つ。（省エネ法と温暖化対策法）
- エネルギーとCO₂を一体的に削減することが理想
- カーボンエネルギー(carbon-related energy)の提案。
- カーボンエネルギー：CO₂原単位を使わないで、エネルギー単位で、CO₂にほぼ比例する数値を開発。

カーボンエネルギー概念 背景

火力発電の投入エネルギーとCO2排出量は2枚の図で表示される

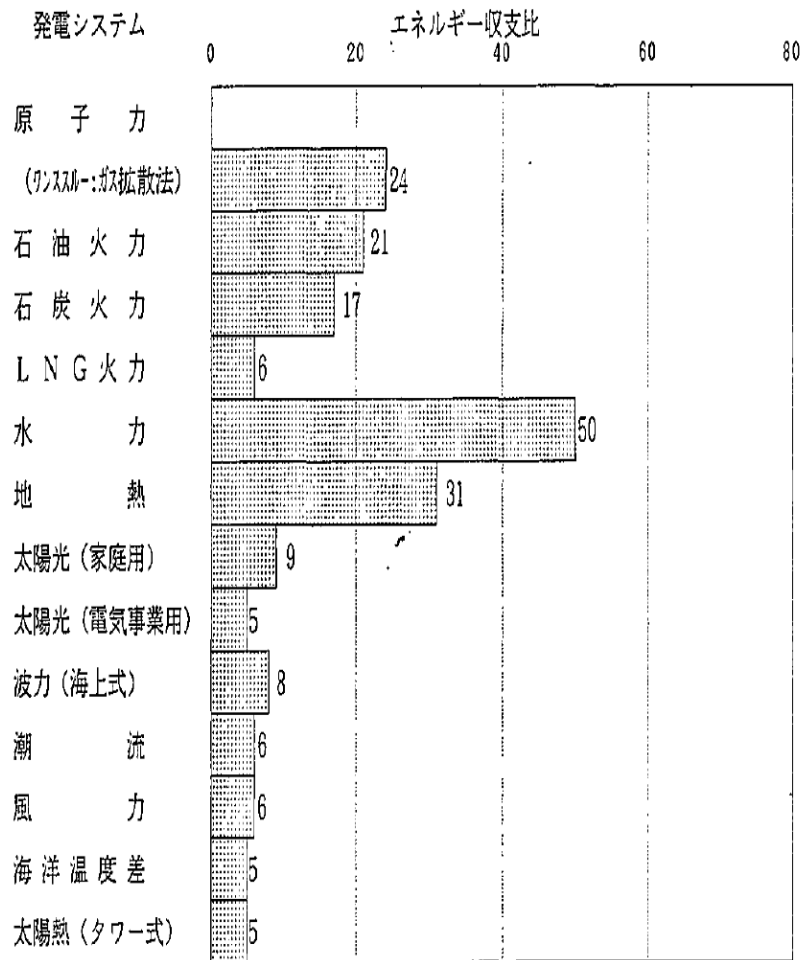


図9 発電システムのエネルギー収支比 (寿命30年)
Fig.9 Energy ratio of power generation system

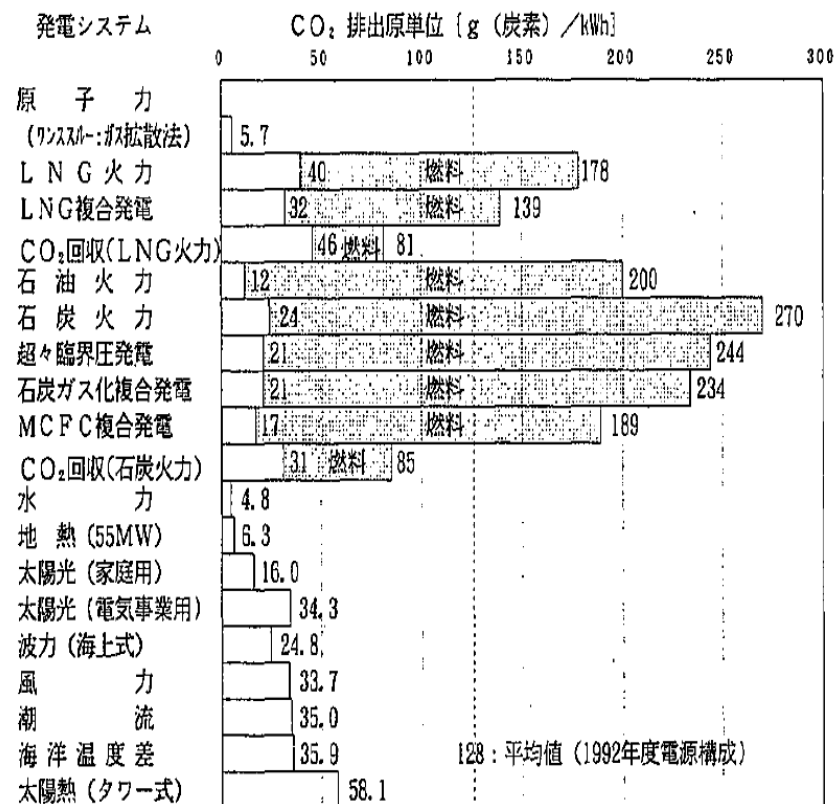


図 各種発電プラントの温暖化影響
Fig. Greenhouse gas emission factor of different power generation systems

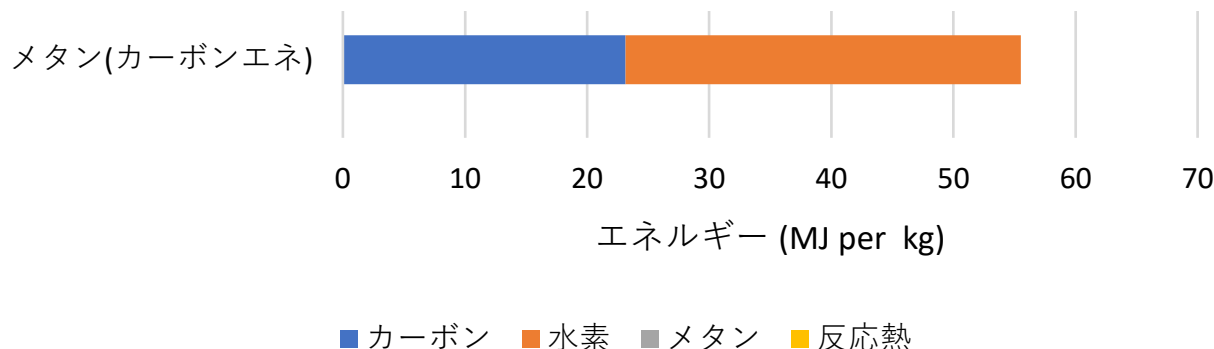
カーボンエネルギー(CE)の概念

- カーボンエネルギーとは、炭化水素を対象とした実用的な概念
- 定義

$$\text{カーボンエネルギー} = \frac{\text{炭化水素のエネルギー} \times (\text{炭素質量} \times \text{炭素発熱量})}{(\text{炭素質量} \times \text{炭素発熱量} + \text{水素質量} \times \text{水素発熱量})}$$

つまり、炭化水素の持つエネルギーを炭化水素成分のCとHの発熱量により案分。

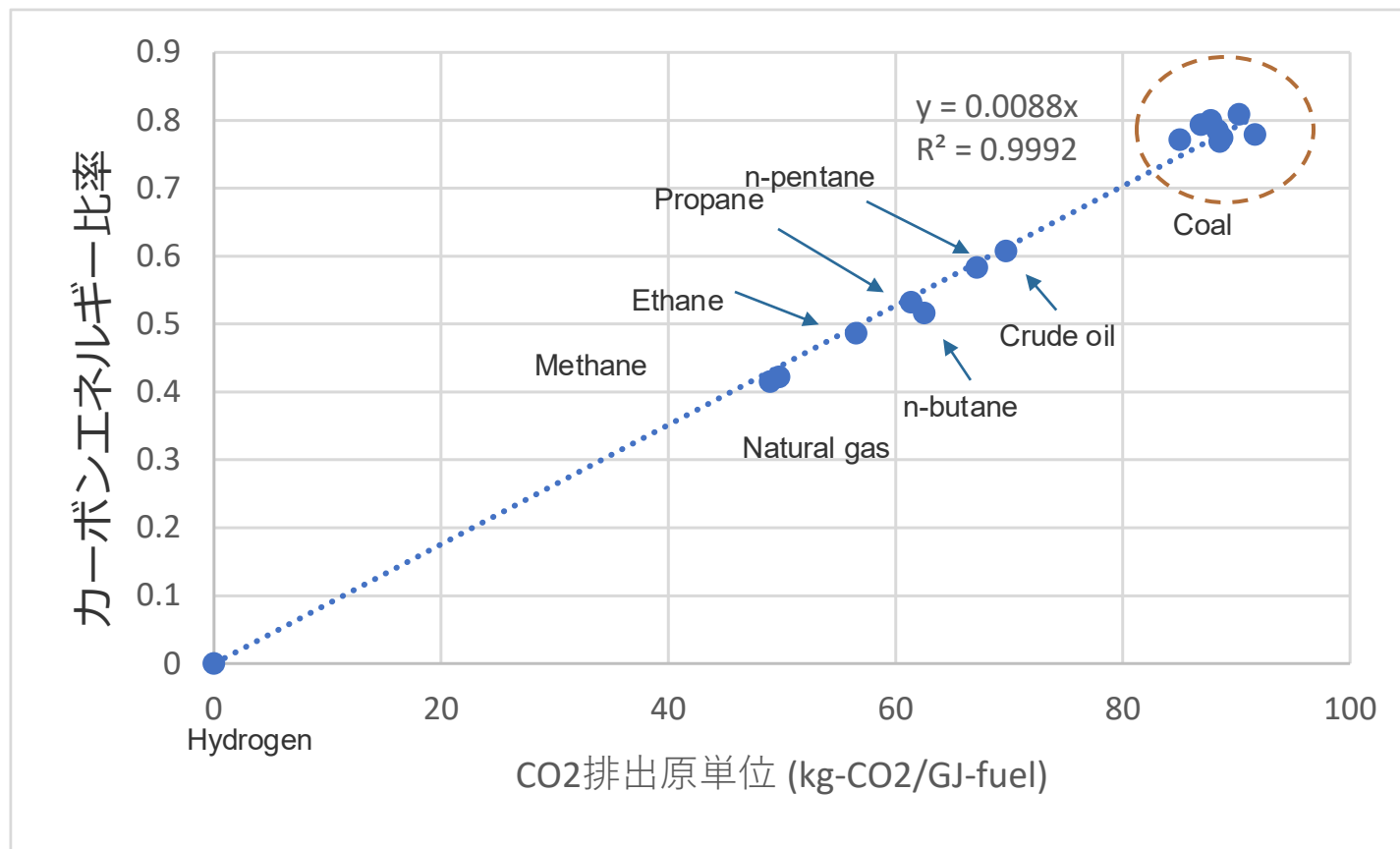
- カーボンエネはCO₂排出量に非常に強く相関。(決定係数99.9%以上)
- 例：メタン(CH₄) 発熱量 55.5 MJ/kg。
質量比率 C : H = 12 : 4 = 0.75 : 0.25
C発熱量: 33.9MJ/kg、H発熱量142.0MJ/kg (HHV)
- カーボンエネ比率 = $0.75 \times 33.9 / (0.75 \times 33.9 + 0.25 \times 142.0) = 0.42$
メタン1kgのカーボンエネルギー = $55.5 \text{ MJ} \times 0.42 = 23.3 \text{ (MJ)}$



出典：H. Yamamoto & K. Yamaji, J. Japan Institute of Energy (2021.06).

カーボンエネルギー

炭化水素燃料1GJあたりのCO2排出量とカーボンエネルギー



炭化水素燃料に関して、CEとCO2排出量は非常に相関が高い。R2>0.999
カーボンエネ（CE）比率はCO2排出原単位と非常に相関が高い。

出典：H. Yamamoto & K. Yamaji, J. Japan Institute of Energy
(2021.06).

カーボンエネルギーとCO2

- ◆ カーボンエネ比率：燃料成分のカーボン発熱量による按分比率
0から1に規格化された値。

	天然ガス	石油	石炭
CO2原単位 (kg-CO2/GJ)	50.2	69.7	88.3
CEレシオ	0.42	0.61	0.79

- カーボンエネルギーの特徴：
- CO2原単位を用いない。単位変換を行わない。
- エネルギー単位で表示。

石炭のカーボンエネルギー $\equiv$ 石炭のエネルギー $\times$ 0.8

石油のカーボンエネルギー $\equiv$ 石油のエネルギー $\times$ 0.6

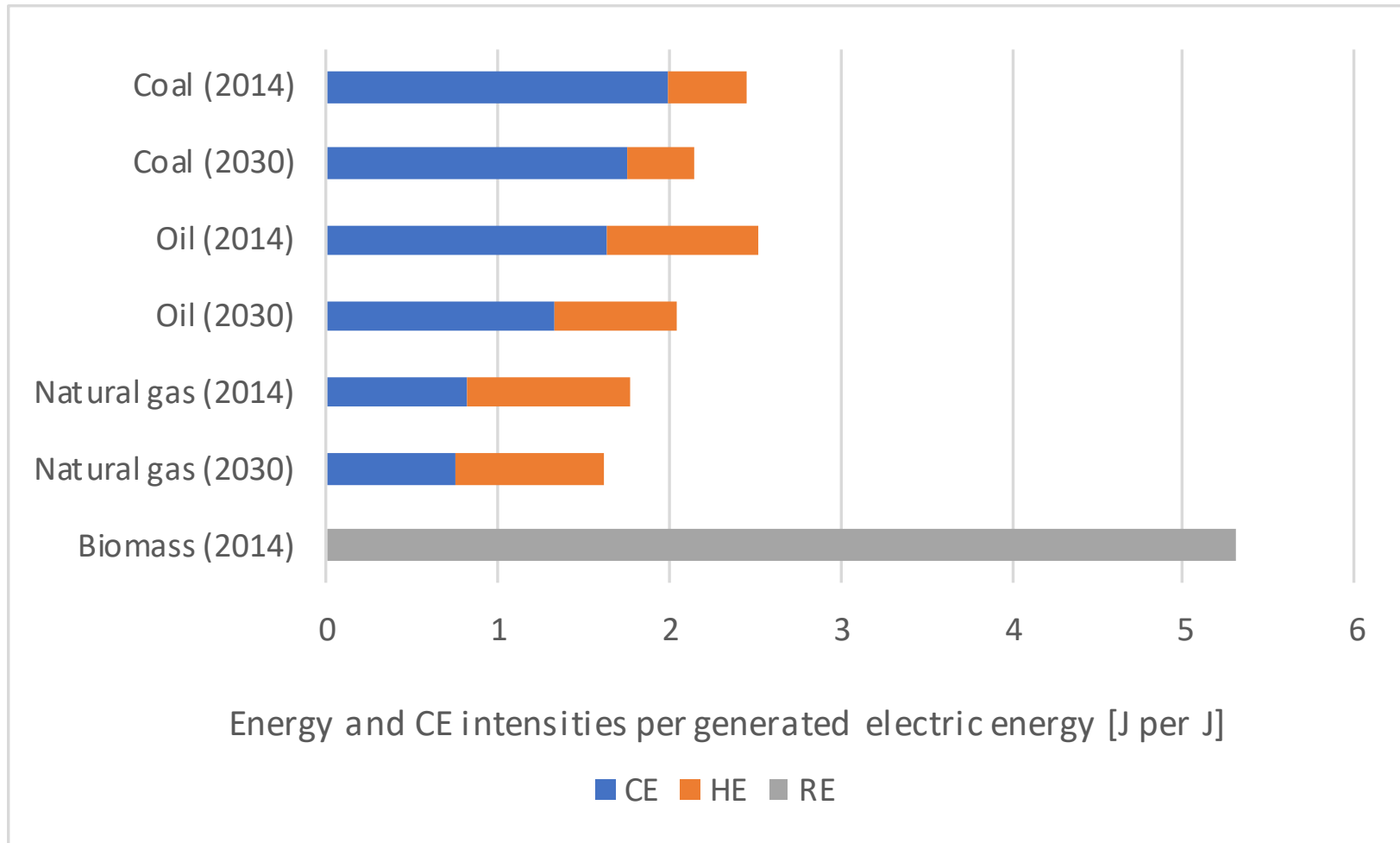
天然ガスのカーボンエネルギー $\equiv$ 天然ガスのエネルギー $\times$ 0.4

- エネルギーとカーボンエネルギーを同一の図表で表示可能。

省エネルギーのアナロジーとしての省カーボンエネルギー (CO₂排出量削減と同じ効果)。

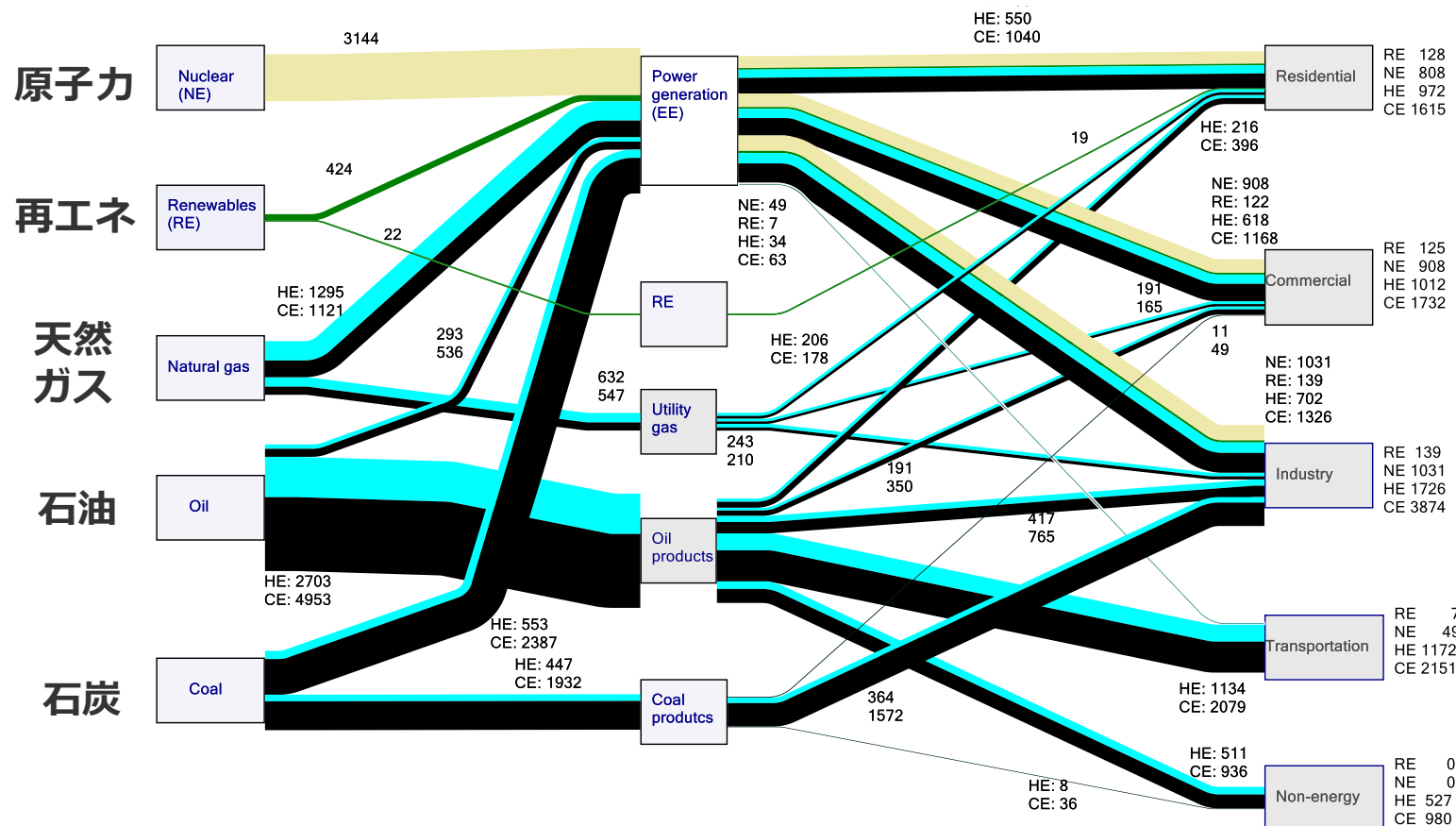
CO ₂	カーボンエネルギー
CO ₂ 量	カーボンエネルギー
CO ₂ 排出削減	省カーボンエネルギー
CO ₂ 原単位 (=CO ₂ /エネルギー)	カーボンエネルギー比率 (=カーボンエネルギー/エネルギー)
CO ₂ 排出枠	カーボンエネルギー消費枠
CO ₂ のキャップアンドトレード	カーボンエネルギー消費枠のキャップアンドトレード
CO ₂ 排出枠取引	カーボンエネルギー消費枠取引
CO ₂ 税	カーボンエネルギー消費税
CCSによるCO ₂ 排出削減	CCSによるカーボンエネルギーのオフセット

カーボンエネルギーの応用例 火力発電のエネルギー効率とカーボンエネ(CO2) (発電1MJあたりの投入エネルギーと投入カーボンエネルギー)



エネルギー投入量とカーボンエネ (CO2) を一体的に表示

わが国のエネルギーチェーン (2010年度, 日本、単位PJ、電力部門のカーボンエネは再配分表示)(エネルギーチェーンとカーボンエネ (CO2)を1枚で表示)



CE
カーボン
エネ

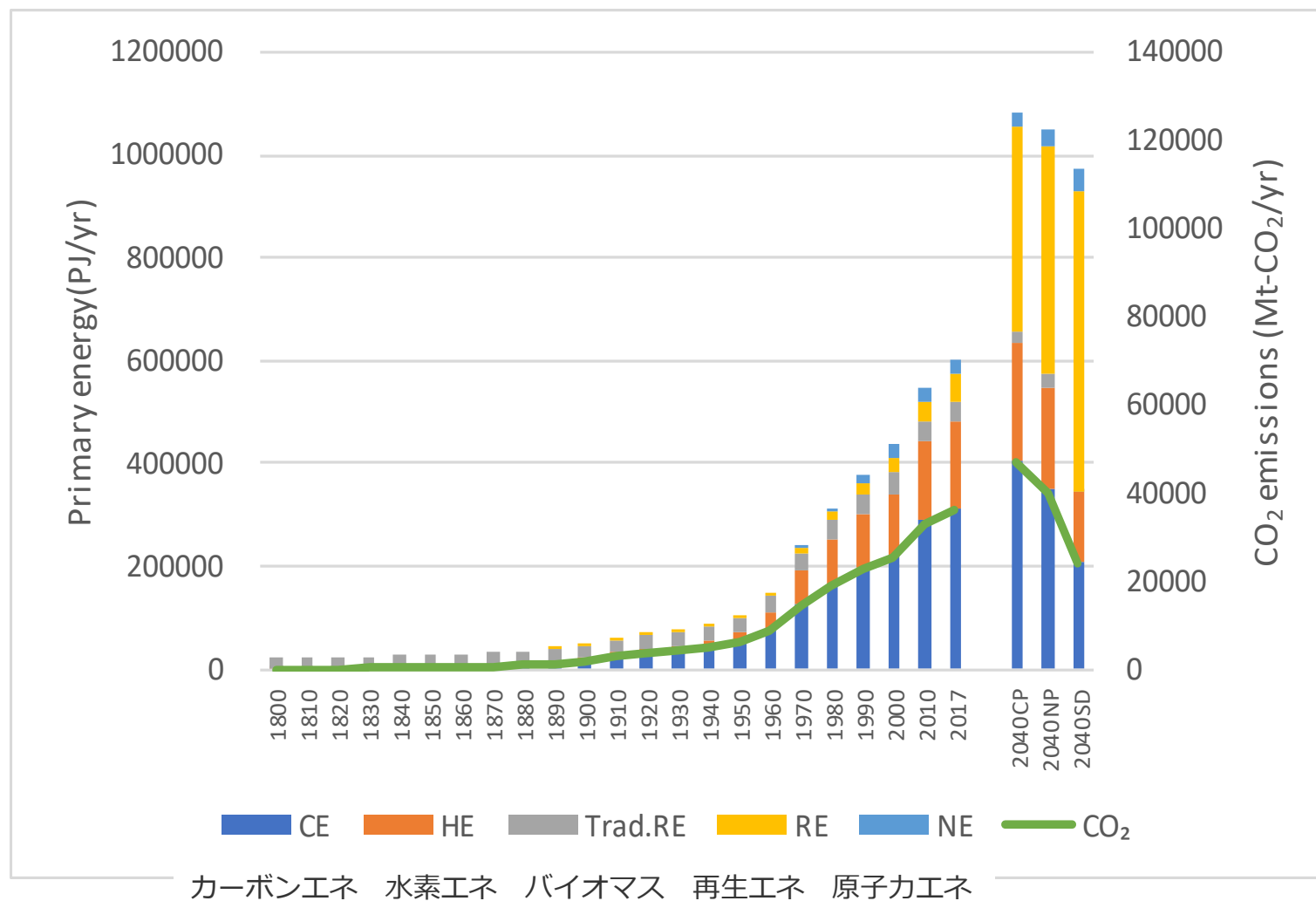
HE
水素関連
エネ

NE
原子力
エネ

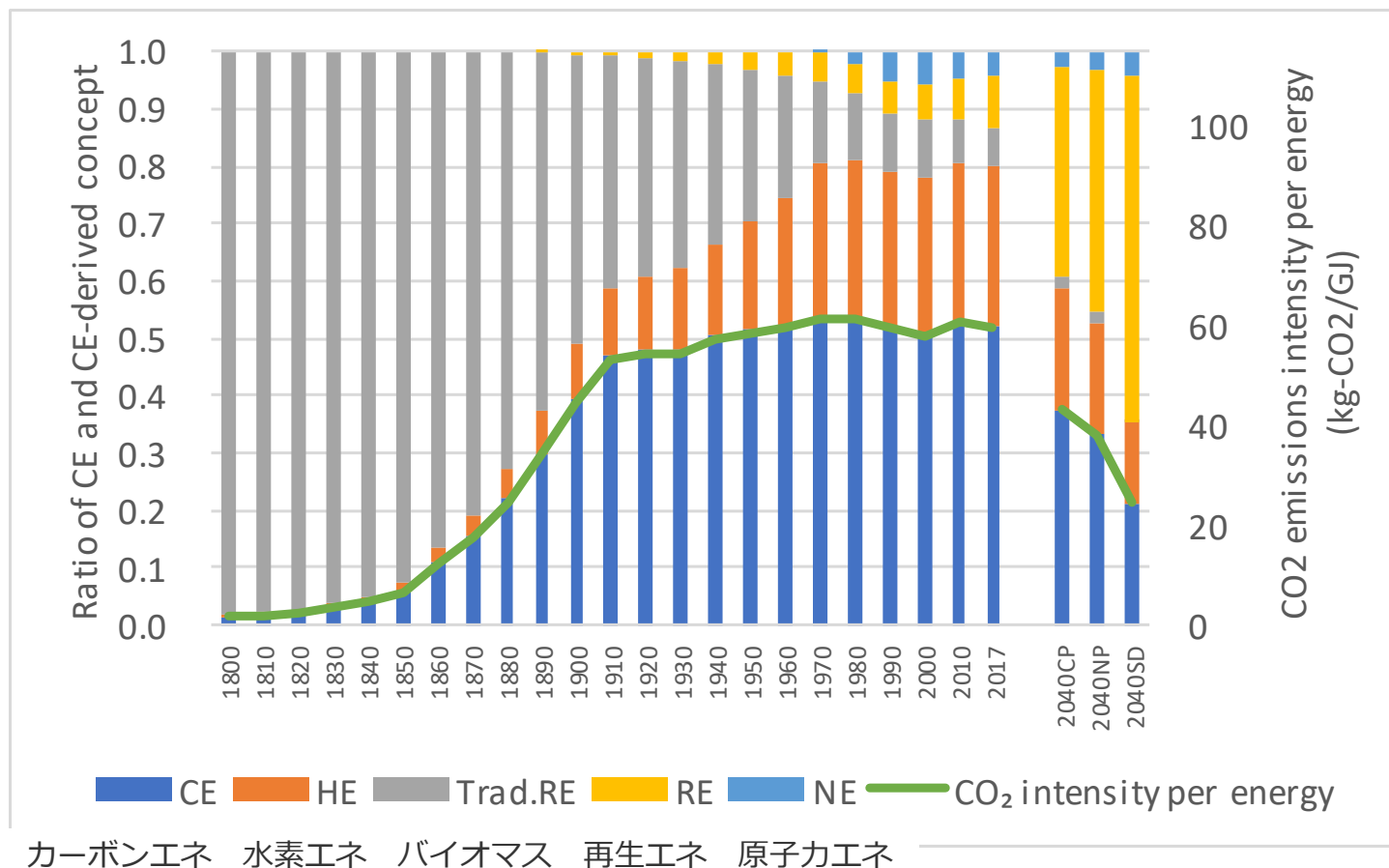
RE
再生可能
エネ

電気エネは
カーボンエネ等に還元

カーボンエネルギーの応用例： 世界の歴史的な一次エネルギー、カーボンエネルギー、CO2排出量

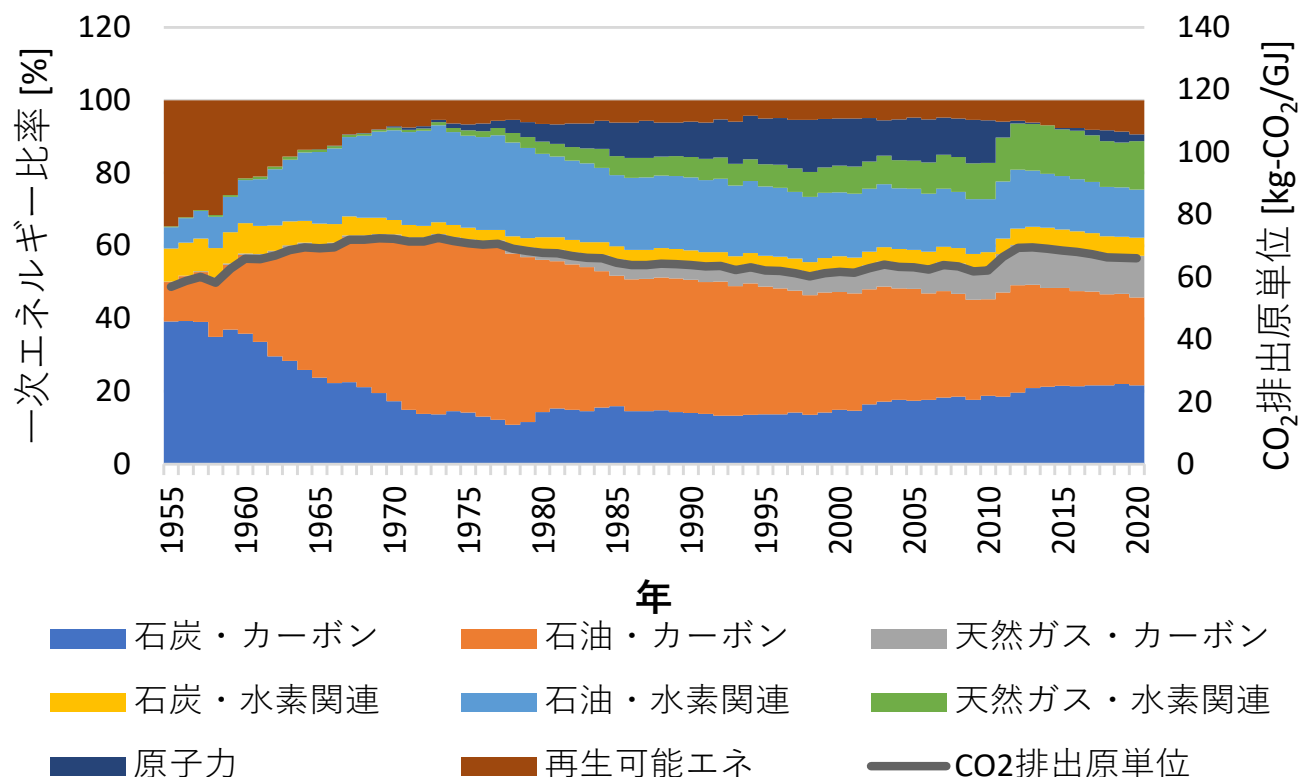


カーボンエネルギーの応用例： 世界の歴史的なカーボンエネ(CE)比率とCO2排出原単位



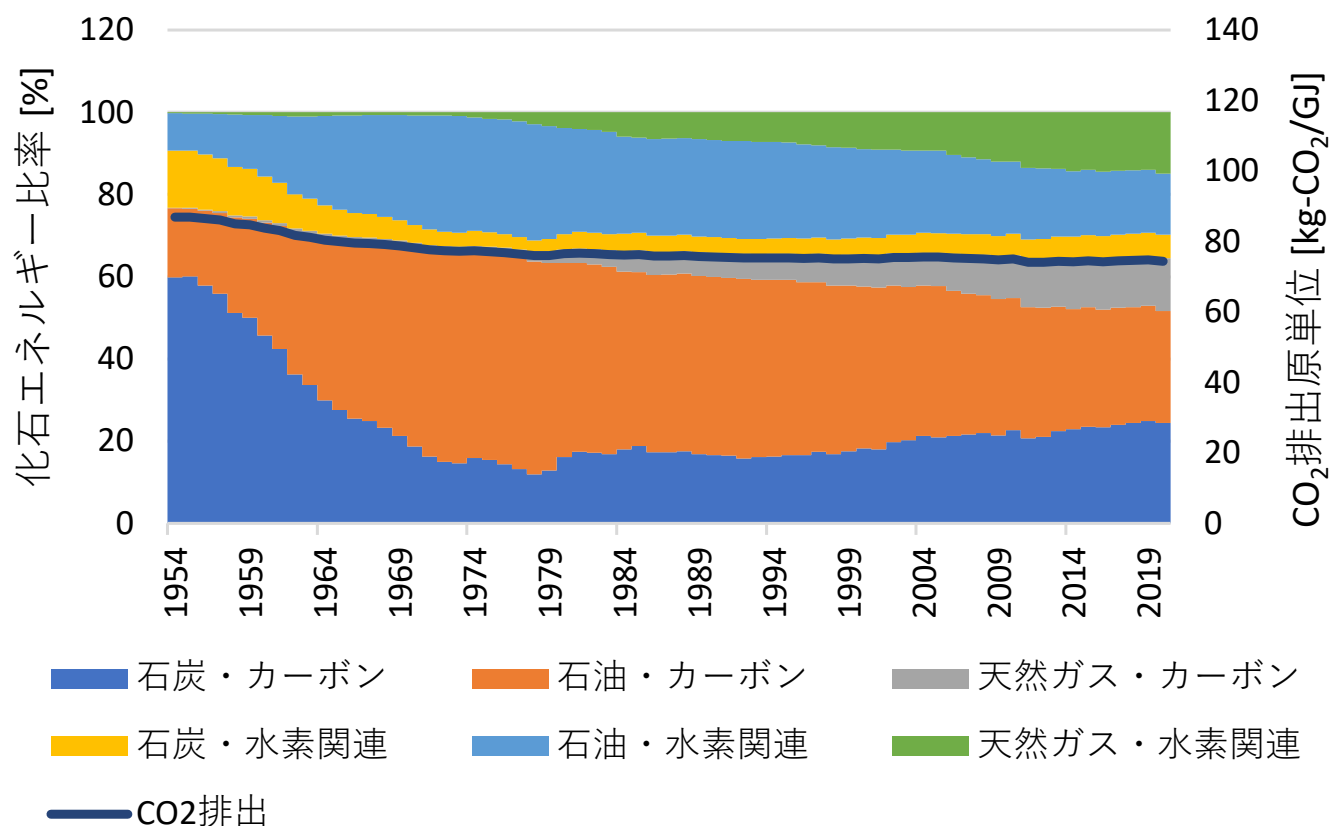
カーボンエネルギーの応用例：日本のCO2排出原単位への応用

- CO2排出原単位では、変動要因の明示は困難
- カーボンエネルギー比率では、変動要因の明示が可能。
- 50-60年代の再エネ減少、70-90年代の原子力増加、最近の原子力減少と再エネ増加



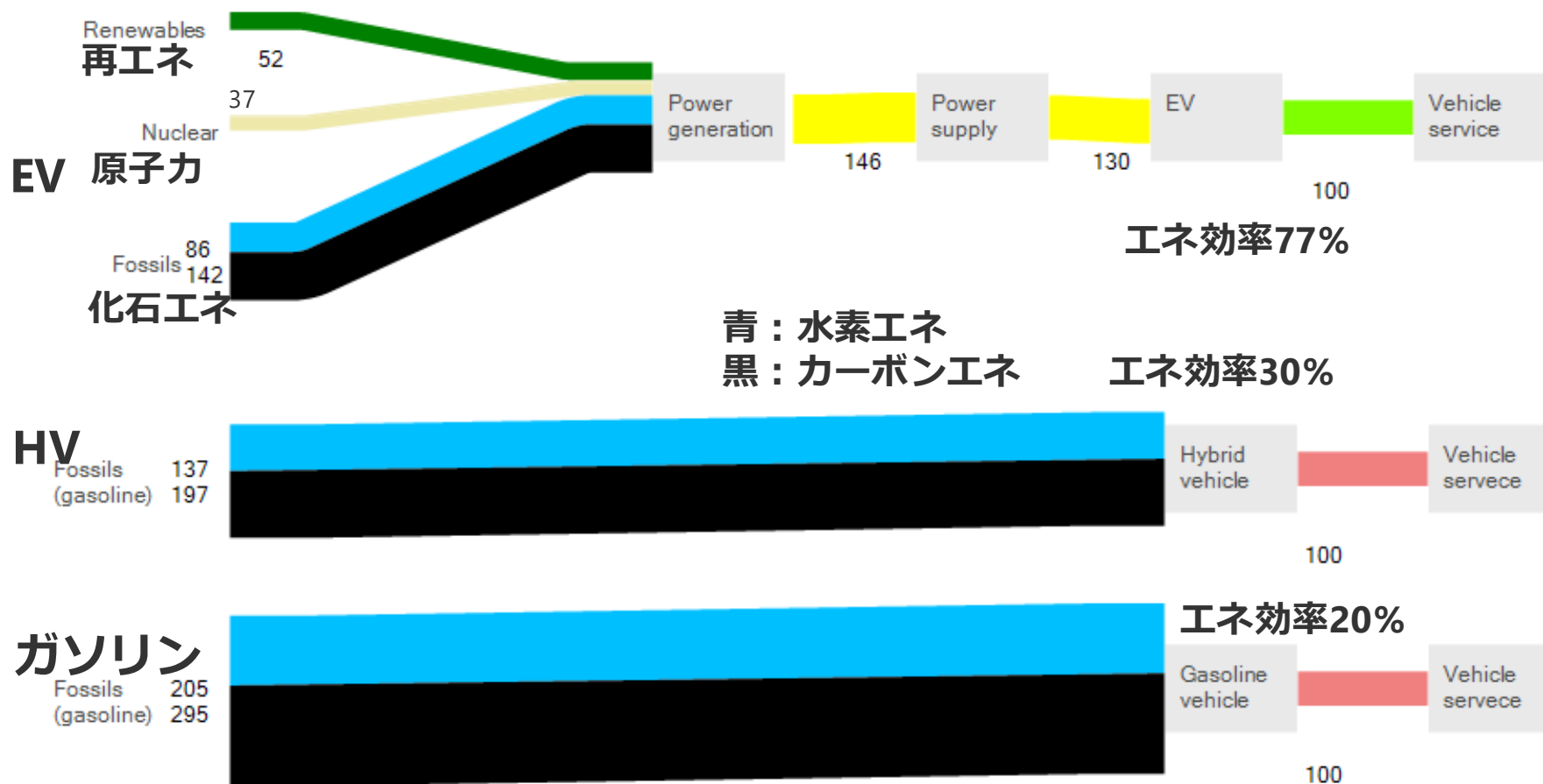
カーボンエネの応用例：日本の化石エネのCO₂排出源単位への応用

- 化石エネのCO₂排出原単位
- 石油は減少、天然ガスと石炭の両方が増加。



エネルギーチェーンとカーボンエネルギーの応用

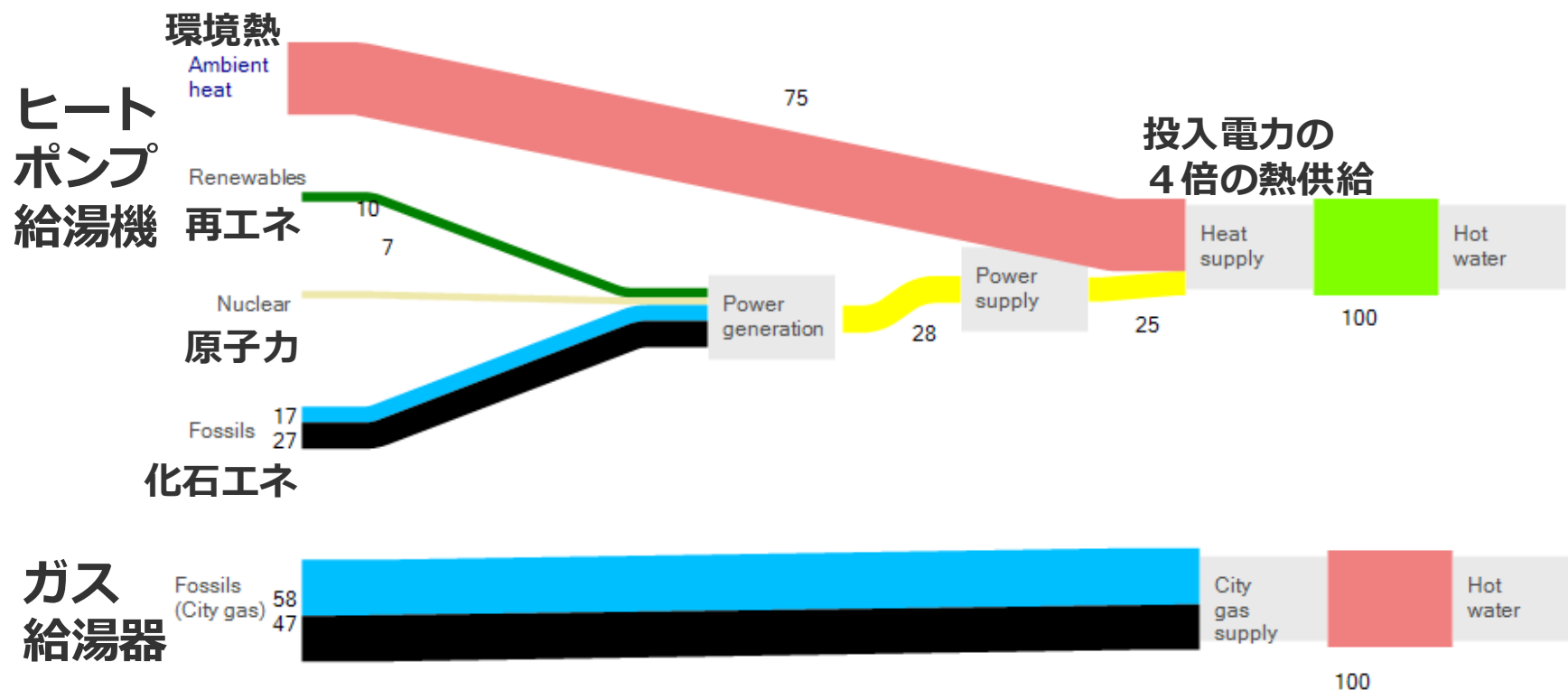
運輸部門・自家用車（供給サービスを100とする。2023年度電源構成）



1次エネルギー消費 : EV 317、HV 333、ガソリン 500
 カーボンエネルギー消費 : EV 142、HV 197、ガソリン 295
 EVはHV(ハイブリッド) に比べて省カーボンエネ(CO2削減)

エネルギーチェーンとカーボンエネルギーの応用

家庭・給湯（供給サービスを100とする。2023年度電源構成）



1次エネルギー消費：ヒートポンプ 61 (プラスヒートポンプで利用する環境熱 75)、ガス 105

カーボンエネルギー消費：ヒートポンプ 27、ガス 47

ヒートポンプ給湯機は、環境熱(空気の持つ熱)を利用するため、省エネ・省カーボンエネ(CO2削減)

環境熱は、EU、IEA(一部)、わが国(一部)で再エネの一つとされる。

まとめ

1. エネルギーチェーン：一次エネルギーからサービスまでの連鎖
2. カーボンエネルギー概念の提案

カーボンエネルギー(CE)はCO₂排出量と強く相関する
カーボンエネはエネルギー単位(ジュール)で表現される。

3. 火力発電・わが国のエネルギーチェーンへの応用

従来2つの単位・2つの図表で記述されていたエネルギーとCO₂排出量を1つのエネルギー単位、1つの図表で表示し、認識しやすくする。

4. 世界、わが国への時系列データへの応用

カーボンエネルギー(CO₂)の削減は順調ではない。

カーボンエネ比率 (CO₂原単位) はここ数十年ほぼ一定。要因の明示。

5. 個別エネルギーチェーン (給湯、自動車) への応用

ヒートポンプ給湯器、電気自動車は、省エネ・省カーボンエネ (CO₂削減) に有効。

他のプロセスも評価可能。