



「カーボンニュートラル」と原子力

電力中央研究所 特任役員 企画グループ
長野 浩司

東京都市大学オンラインシンポジウム
2021年7月7日

 電力中央研究所

報告の内容

1. 前提：脱炭素化と電化

- 最大限の再エネ導入を仮定しても、国内ではCO₂フリーkWhが不足する

2. 「カーボンニュートラル」実現の態様

- 正の排出を負の排出で相殺：切り札は？

3. カーボンニュートラル時代の原子力

- 期待と現実的課題

1. 前提：脱炭素化と電化

前提：脱炭素化と電化

■ 基本公式

脱炭素化 = 電化 × 電源の低炭素化 (× 削工ネ)
(+ 負の排出)

■ 電化による省CO₂効果

- 電力の高エクセルギー効果
 - 電源の低炭素化
- } 相乗効果

■ 再生可能エネ（PV、風力）を最大限導入しても、CO₂フリーのkWhが不足する

- 電化による電力需要増を賄い切れない

CO₂排出量「大規模削減」と「ネットゼロ」の差異

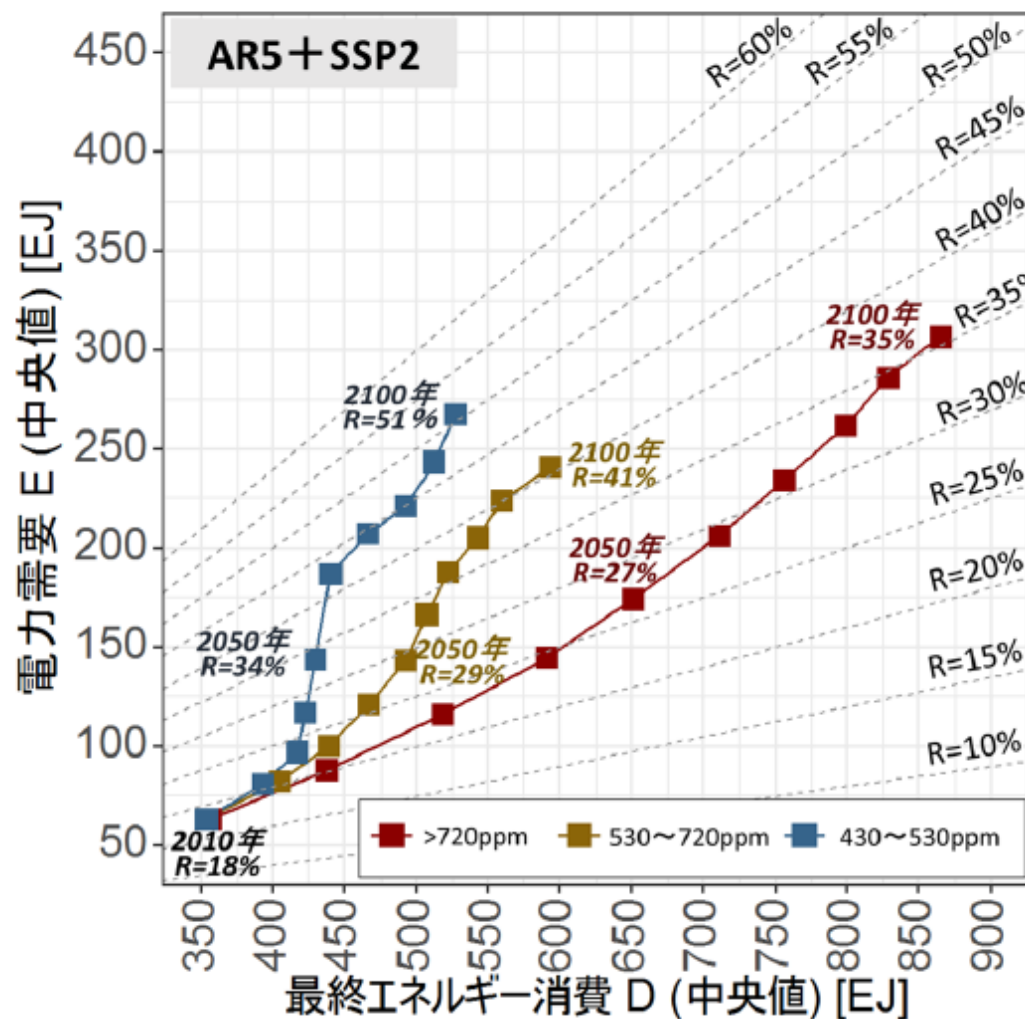
■ 「脱炭素化」の2つの相

- 「純(genuine) 脱炭素化」：△100%⇒排出量正味0%
- 「準(quasi) 脱炭素化」：排出量大規模削減
e.g. △80%⇒基準年排出量の20%排出が許容される

■ 「純脱炭素化」と「準脱炭素化」は、全く異なる

- 準脱炭素化：許容される排出枠を産業部門や公共部門間で「最適配分」する自由度を持つ→合理主義
 - ✓その実現には、既に多くの課題の克服が必要
- 純脱炭素化：正の排出に対して、同量の「負の排出」で相殺しなければならず、配分の自由度がない→原理主義
 - ✓その実現には、質的に全く異なる課題が重畳

CO₂排出抑制と電化：世界の長期予測



- 大気中CO₂濃度を抑制する（=CO₂排出量の小さい）シナリオほど、電化率R（=E/D）が大きい

出典：坂本「CO₂の長期大規模削減と電化－排出制約下における電化の促進と電力需要の関係性－」電力経済研究No.65、電力中央研究所(2018)

https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/pdf/periodicals65_09.pdf

補足：「削エネ」についての注記

- （広義の）省エネ＝高効率化＋削エネ
- 削エネ＝エネルギーサービス需要の削減
 - GDPや産業構造、ライフスタイルなどの変革、つまり「私たちの社会の立ち姿」の規定に係る
- 長期的なCO₂排出量の大規模削減においては、削エネは「最終手段」として不可欠（⇒スライド#11）
- 「我慢の省エネ」とは異なり、AI/IoT等を用いた「需要の能動的最適化」による削エネは、効果的かつ有益
 - 電化とのマッチングにも優れる

茅恒等式 (*Kaya Identity*)

ある地理的範囲及び時間範囲において、常に次式が成り立つ

$$CO2 = \frac{CO2}{E} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{GDP}{POP} \times POP$$

ここに、

$CO2$: CO_2 排出量

$CO2/E$: 一次エネルギー消費あたり CO_2 排出量 (炭素強度)

E/GDP : GDPあたり一次エネルギー消費量 (エネルギー原単位)

GDP/POP : 人口一人あたりGDP

POP : 人口

右辺のいずれかの項が1%増える／減る とき、左辺も1%増える／減る。

CO_2 排出量削減とは、一人あたりの豊かさを最大にしつつ、炭素強度とエネルギー原単位を下げる

茅恒等式の応用： 電力部門と非電力部門への分割

- ある地理的範囲のCO₂排出量は、電力使用(EE)によるものと電力以外の使用(NE)によるものの和で表される

$$CO2 = CO2_{EE} + CO2_{NE}$$

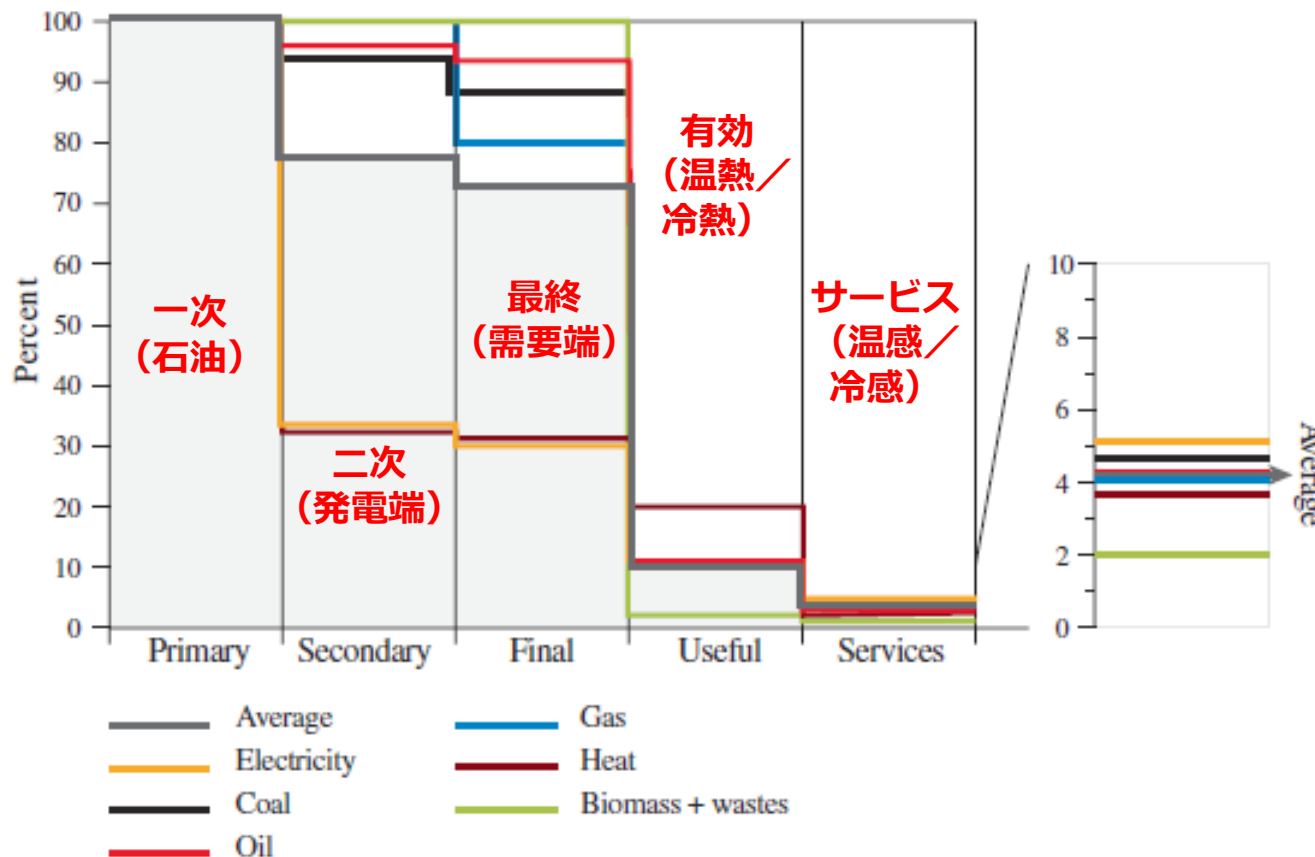
- 各々のCO₂排出量は、一次エネルギー消費量あたりCO₂原単位と、一次エネルギー消費量の積で表される

$$CO2_{EE} = \frac{CO2_{EE}}{EE_p} \times EE_p, \quad CO2_{NE} = \frac{CO2_{NE}}{NE_p} \times NE_p$$

- 一次エネルギー消費のうち、最終的にエネルギーサービスとして消費された割合は、エクセルギー (η) として定義される (→次頁)

$$\eta_{EE} = EE_s / EE_p, \quad \eta_{NE} = NE_s / NE_p$$

電力のエクセルギー効率



出典：Global Energy Assessment, Chapter 1: Energy Primer (2012)より改変

図は、一次エネルギーが含有していたエネルギーのうち、各段階で利用可能な残存割合（サービス段階ではエクセルギーExergy、OECD加盟国平均）

赤字は、石油火力発電によるエアコン使用の場合を例。

- 電力は、発電時（一次→二次）の損失は大きいですが、輸送・使用段階での効率が高く、エクセルギー効率が最も高い

茅恒等式の応用：

電力部門と非電力部門への分割（続き）

- エネルギーサービス需要は、電力で満たされるものと、電力以外で満たされるものから成り、電力で満たされるものの割合（電化率）を α とおくと、次式で整理される

$$E_s = EE_s + NE_s$$

$$EE_s = \alpha \times E_s, NE_s = (1 - \alpha) \times E_s$$

- 以上の式展開をまとめると、以下を得る

$$CO2_{EE} = \frac{CO2_{EE}}{EE_p} \times EE_p = \frac{CO2_{EE}}{EE_p} \times \frac{EE_s}{\eta_{EE}} = \frac{CO2_{EE}}{EE_p} \times \frac{\alpha \times E_s}{\eta_{EE}}$$

$$CO2_{NE} = \frac{CO2_{NE}}{NE_p} \times NE_p = \frac{CO2_{NE}}{NE_p} \times \frac{NE_s}{\eta_{NE}} = \frac{CO2_{NE}}{NE_p} \times \frac{(1 - \alpha) \times E_s}{\eta_{NE}}$$

電化の省CO₂効果：定式化

■ 基本式

$$CO2 = CO2_{EE} + CO2_{NE}$$

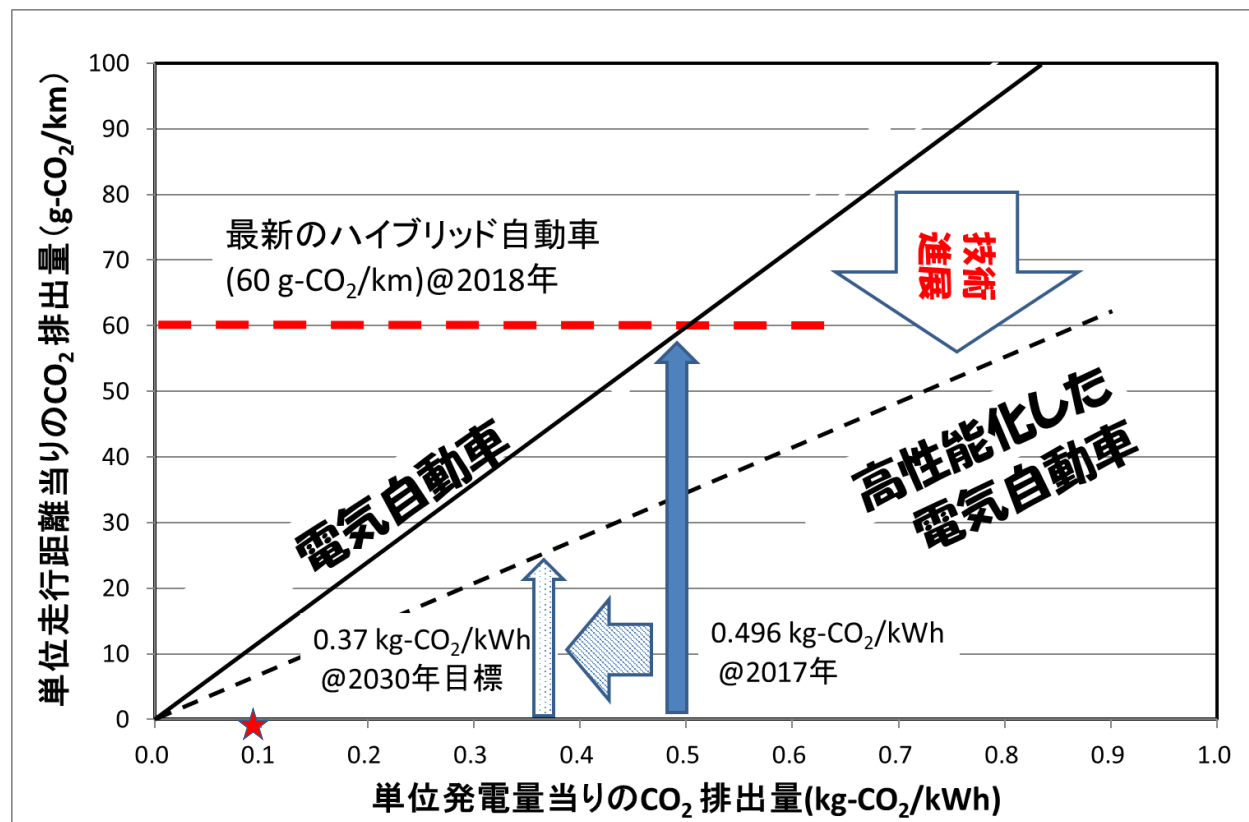
$$= \left\{ \underset{\substack{\uparrow \\ \text{電化率}}}{\alpha} \times \left(\frac{CO2_{EE}}{EE_p} \times \frac{1}{\eta_{EE}} \right) + (1 - \alpha) \times \left(\frac{CO2_{NE}}{NE_p} \times \frac{1}{\eta_{NE}} \right) \right\} \times \underset{\substack{\uparrow \\ E_S \text{ の削減} \\ (\Rightarrow \text{削工ネ}) \\ \text{によっても、} \\ \text{CO}_2 \text{ 排出削減} \\ \text{は可能}}}{E_S}$$

↑
エネルギーサービス需要
 E_S のうち、電力による
部分のCO₂排出係数
↑
エネルギーサービス需要
 E_S のうち、電力以外に
よる部分のCO₂排出係数

電化 ($\alpha \uparrow$) に伴う省CO₂効果は、以下の両面の相乗効果として発揮される

- 電力の高エクセルギー効果 ($\eta_{EE} > \eta_{NE}$)
- 電源の低炭素化／ゼロ炭素化 ($CO2_{EE}/EE_p \rightarrow 0$)

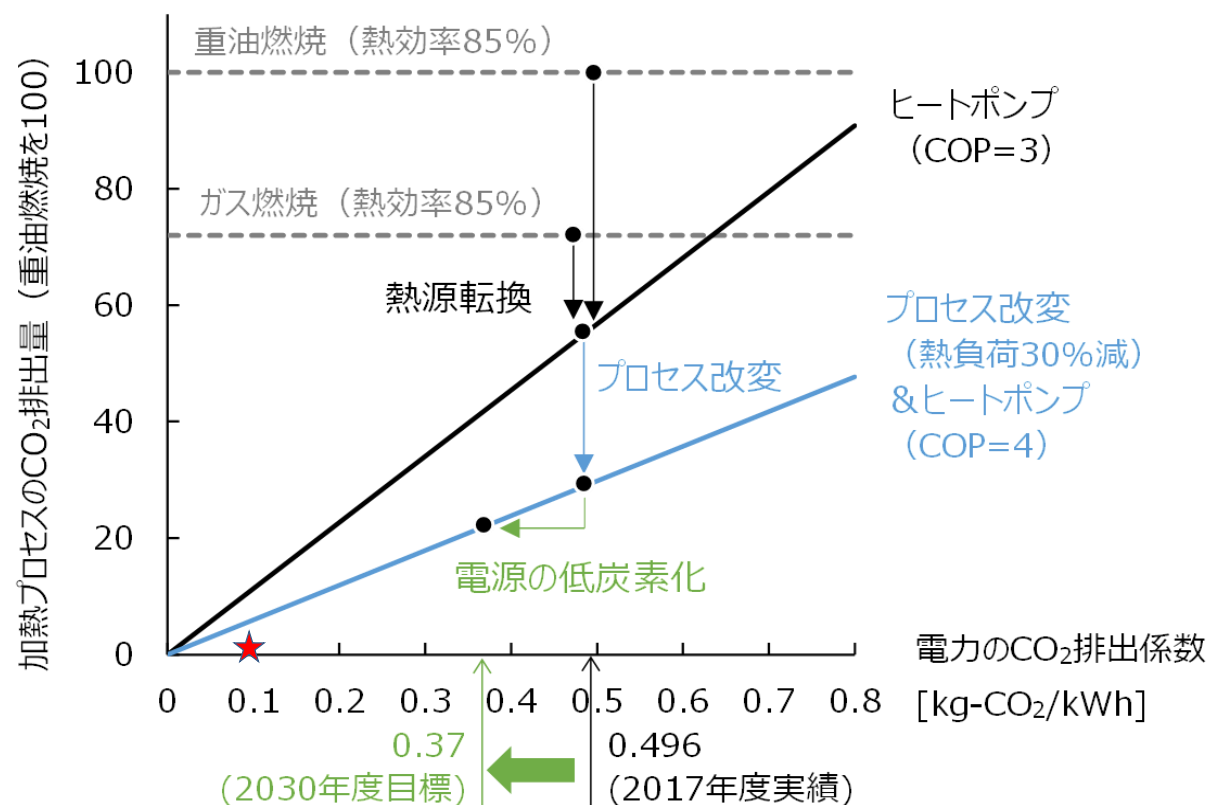
定量的検証（１）：電気駆動車



参考：池谷「EV本格普及に向けた充電インフラ構築の動きと課題」
電気学会誌Vol.133,
No.1, p.10-12 (2013)

■ 電化と電源の低炭素化の相乗効果が顕著

定量的検証（２）：産業用HP

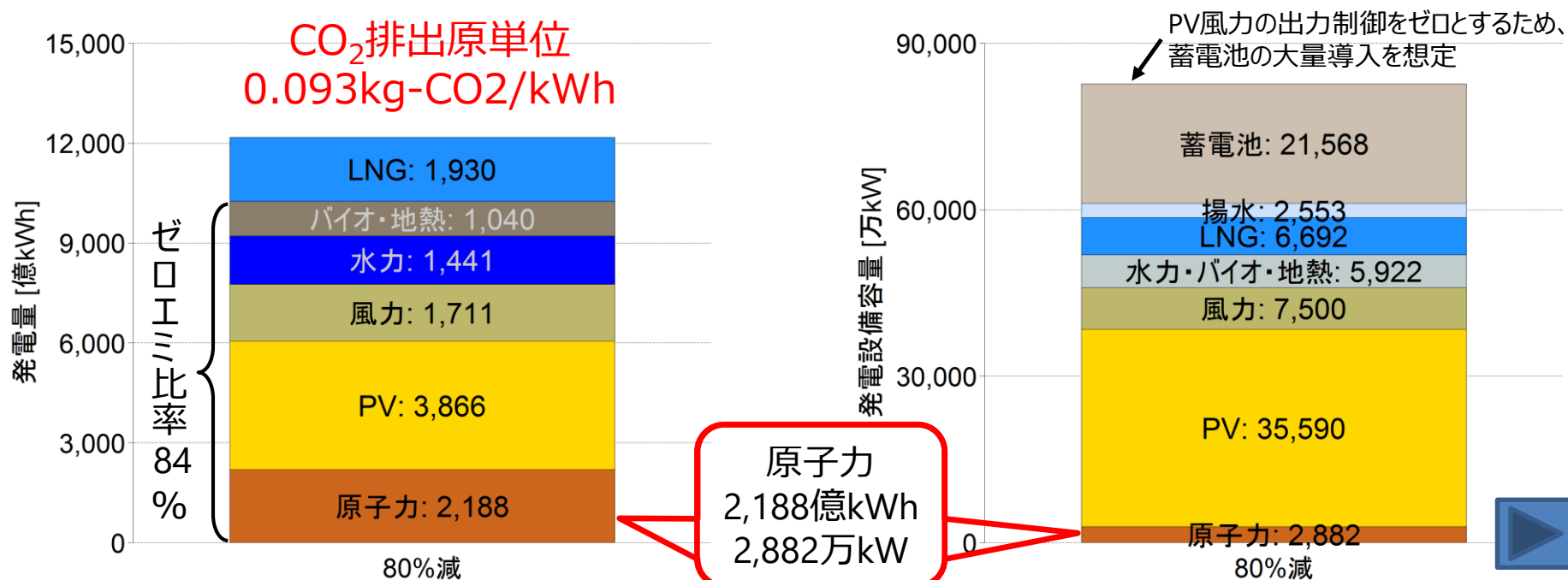


出典：甲斐田「技術進展で適用範囲拡大－産業用ヒートポンプ」電気新聞 2020年2月3日版第10面

■ 技術進歩による高効率化で、相乗効果の一層の助長を期待

2050年CO₂△80%試算例：2050年の電源構成

- 電力部門の排出量を2050年に約6,500万t-CO₂とする条件の下で、最大規模の再エネ導入ポテンシャルが実現し、出力制御をしないという前提で、CO₂排出量制約が許す範囲で火力電源（簡単化のためLNGのみとして試算）を運用するが、周波数制御の制約（回転機が系統需要の1/2を担う）を満たさない
- その結果、2050年の原子力発電の発電電力量は約2,200億kWh（設備利用率を86.7%と想定した場合、設備容量では約2,900万kW）必要となる



2. 「カーボンニュートラル」実現の態様

－ 正の排出を負の排出で相殺：切り札は？ －

「2050年カーボンニュートラル」

10月26日 菅総理 所信表明演説

https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html

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

2021年1月18日 菅総理 施政方針演説

https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2021/0118shoshinhyomei.html

2050年カーボンニュートラルを宣言しました。もはや環境対策は経済の制約ではなく、社会経済を大きく変革し、投資を促し、生産性を向上させ、産業構造の大転換と力強い成長を生み出す、その鍵となる

関連資料



1. はじめに
 2. ネットゼロ排出をめぐる
科学と政策の動向
 3. 英国とEUにおける
ネットゼロ排出シナリオの分析
 4. SR15における
ネットゼロ排出シナリオの分析
 5. 考察：ネットゼロ排出達成時の
CO₂排出・除去の態様
 6. おわりに
- 補論 ネットゼロ排出達成時の
エネルギー関連の諸指標

坂本将吾、堀尾健太：ネットゼロ排出達成時におけるCO₂排出・除去の態様、電力中央研究所報告Y20001、2020年10月
<https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/Y20001.html>

[ホーム](#) ▶ [審議会・研究会](#) ▶ [エネルギー・環境](#) ▶ [グリーンイノベーション戦略推進会議](#) ▶ 第3回
ション戦略推進会議

第3回 グリーンイノベーション戦略推進会議

開催日

2020年11月11日

開催資料

- ▶ [議事次第（PDF形式：143KB）](#) 
- ▶ [配布資料一覧（PDF形式：70KB）](#) 
- ▶ [資料1 委員名簿（PDF形式：120KB）](#) 
- ▶ [（参考）グリーンイノベーション戦略推進会議の設置について（令和2年11月11日改訂版）（PDF形式：176KB）](#) 
- ▶ [資料2 議事概要（第2回グリーンイノベーション戦略推進会議）（PDF形式：464KB）](#) 
- ▶ [資料3-1 グリーンイノベーションに係る政府の動向（PDF形式：380KB）](#) 
- ▶ [資料3-2 英国・EUにおけるカーボンニュートラルシナリオについて（PDF形式：1,405KB）](#) 
- ▶ [資料3-3 IPCC1.5度特別報告書におけるネットゼロシナリオについて（PDF形式：1,526KB）](#) 
- ▶ [資料3-4 脱炭素社会に向けた対策の考え方（PDF形式：1,247KB）](#) 
- ▶ [資料4 2050年カーボンニュートラルに向けたグリーンイノベーションの方向性（PDF形式：1,907KB）](#) 
- ▶ [資料5 グリーンイノベーション戦略推進会議 検討スケジュール（案）（PDF形式：210KB）](#) 

本日、梶山大臣は、小泉環境大臣と共に、第3回グリーンイノベーション戦略推進会議に出席しました。先月、菅総理は所信表明演説で、2050年にCO2の排出量と吸収量が同じになる **#カーボンニュートラル** 実現を目指すことを表明しており、この会議では、鍵となる革新的イノベーション促進策を議論します。

[Translate Tweet](#)



温度上昇と累積CO₂排出量の近似的な比例関係

2013-14年 IPCC第5次評価報告書（AR5）で初めて示された

- 温度上昇とCO₂排出とを直接紐づけ（⇔GHG濃度）
- 温度上昇を一定のレベルに抑えるためには、累積CO₂排出量を抑える必要がある（**ネットゼロ排出の議論の出発点**）

CO₂以外のGHGには成り立たない
SR15でも、これらのガスについては
ネットゼロ排出に達しないことを
示している

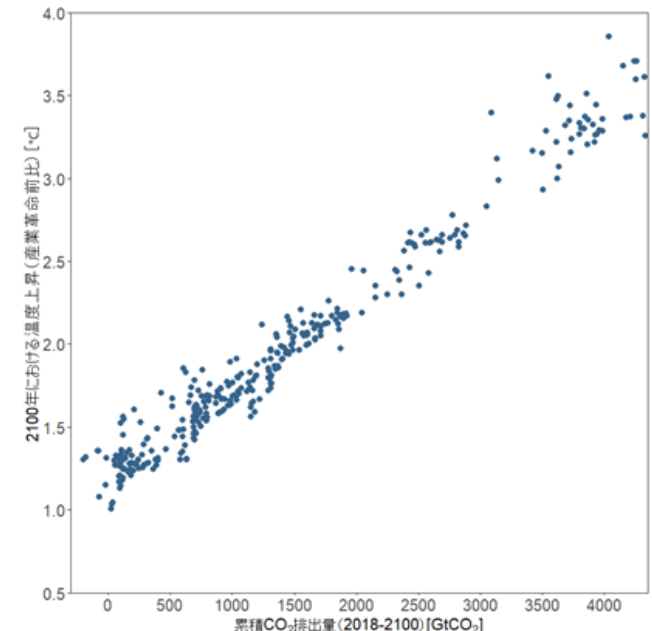


図 累積CO₂排出量と温度上昇

関心の高まり

2015年12月 パリ協定（第4条1項）

「今世紀後半に、温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡を達成」

⇒世界全体でネットゼロ排出を目指すことを、明示的に位置づけ

2018年10月 IPCC1.5℃特別報告書（SR15）

1.5℃及び2℃の温度上昇に対応する、グローバルなCO₂のネットゼロ排出の達成時期が明記された（1.5℃：2050年頃、2℃：2070年頃）

2019年6月 日本「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」

「我が国は、最終到達点として「脱炭素社会」を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現していくことを目指す」

※脱炭素社会：今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡（世界全体でのカーボンニュートラル）を達成すること

諸外国におけるネットゼロ排出目標

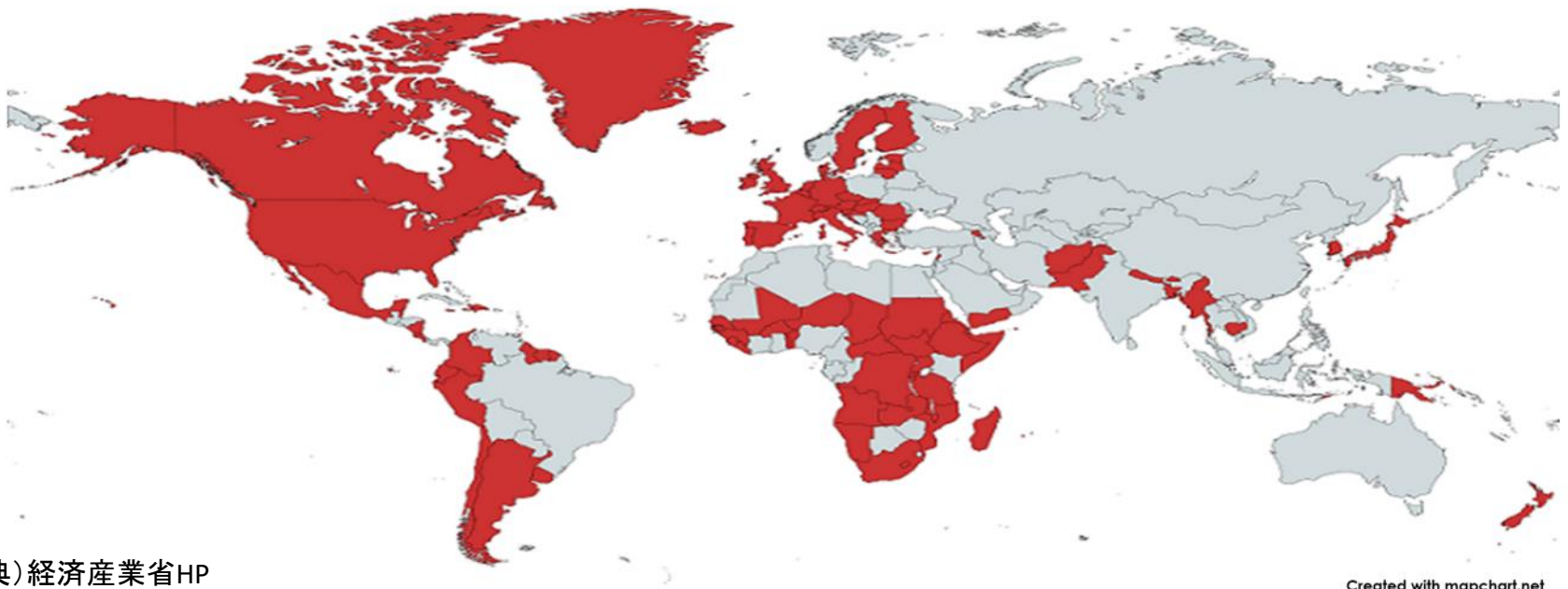
ネットゼロ排出の達成を、長期的な目標として宣言する国が増えている

- **Climate Ambition Alliance**（欧州と途上国を中心に120か国が賛同）
- **中国**（昨年の国連総会で習近平国家主席が、2060年ネットゼロ表明）

2050年までのカーボンニュートラルを表明した国

124カ国・1地域

※全世界のCO2排出量に占める割合は37.7%（2017年実績）



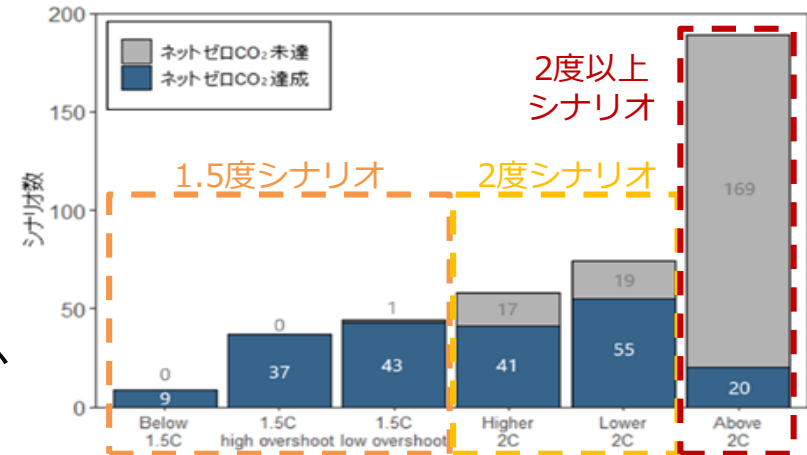
（出典）経済産業省HP

Created with mapchart.net

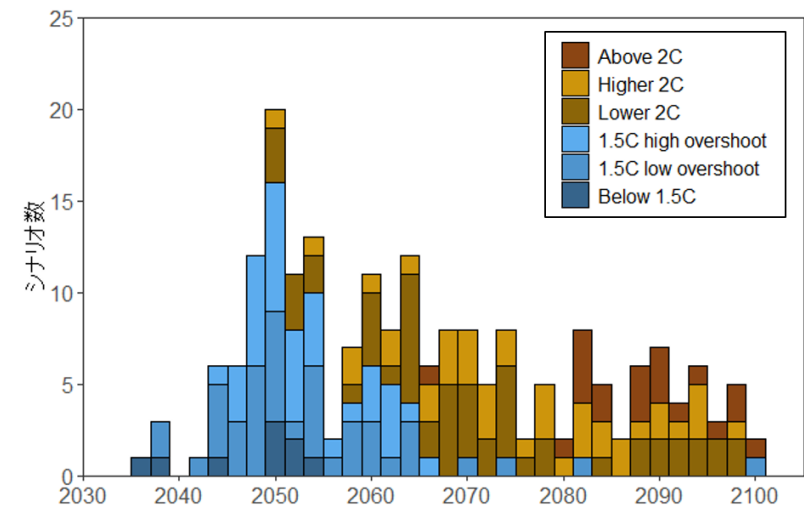
SR15におけるネットゼロ排出シナリオ

SR15シナリオデータ

- IPCC1.5度特別報告書（SR15）では、世界中の研究機関によって作成された411のシナリオについて、温度上昇の度合いに基づいてカテゴリーを区分し、分析
- このうち、「CO₂のネットゼロ排出」を達成するシナリオは205（右上図）
- シナリオ毎に「ネットゼロCO₂排出達成年」が記録されている（右下図）
- これを「ネットゼロ排出達成時」とみなして、当該時点のCO₂排出・除去、及びエネルギー関連の諸指標を分析



SR15におけるネットゼロ排出シナリオの数
※横軸はSR15のシナリオカテゴリー



ネットゼロCO₂排出達成年の分布

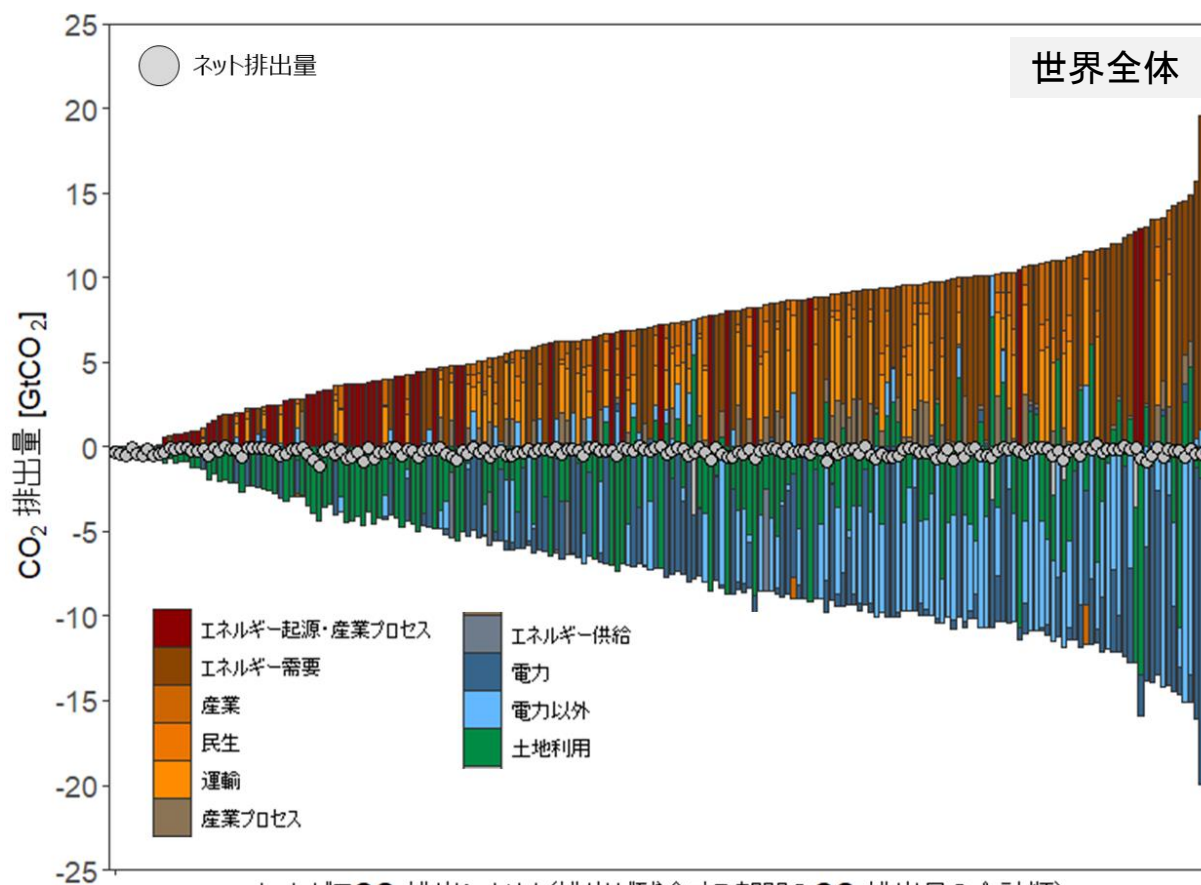
IPCC SR1.5 Scenario Database

<https://db1.ene.iiasa.ac.at/IPCCSR15DB/dsd?Action=htmlpage&page=about>

ネットゼロ排出達成時

CO₂排出・除去①

ネットゼロ排出達成時に残存するCO₂排出の量や内訳は様々



ネットゼロCO₂排出シナリオ(排出が残余する部門のCO₂排出量の合計順)

ネットゼロ排出達成時のCO₂排出量

SR15DBのCO₂排出量の主な部門

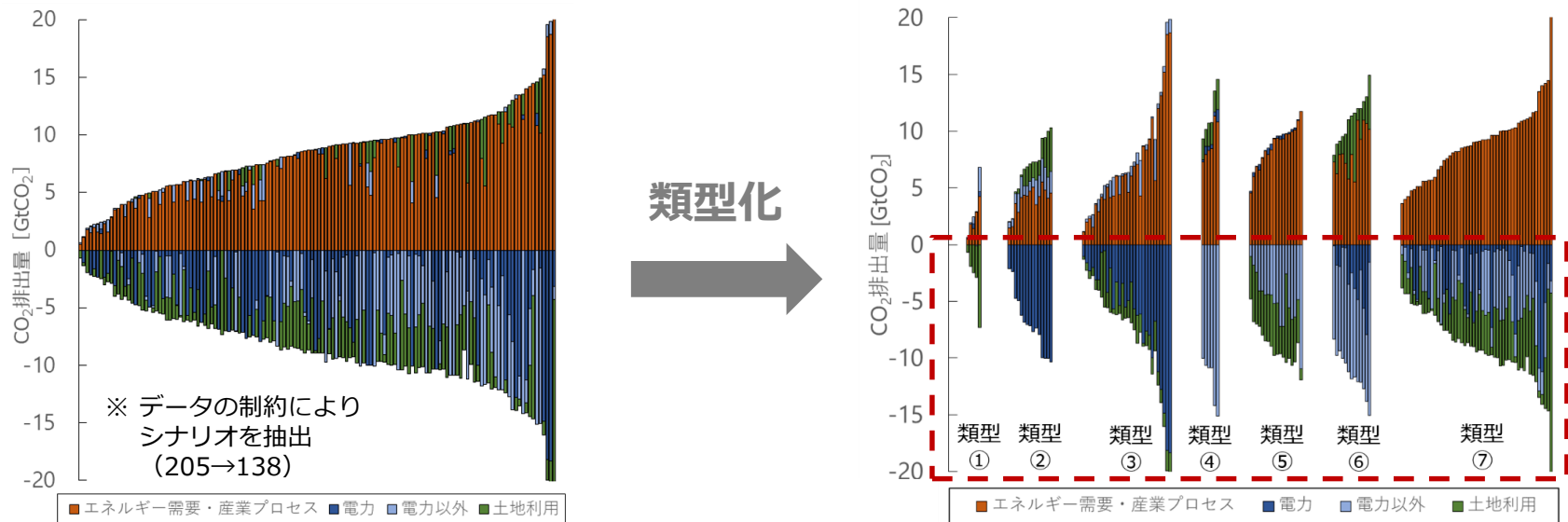
エネルギー 起源	エネルギー 需要	産業
		民生
		運輸
	エネルギー 供給	電力
		液体燃料
		ガス
		熱
固体燃料		
産業プロセス		
土地利用		

※CO₂排出量は5年または10年刻みで報告されているため、線形補完により、1年ごとの部門別の排出量を推計している(そのため、ネット排出量は厳密にゼロにはなっていない)

ネットゼロ排出達成時

CO₂排出・除去②

排出量の符号がわかる3つの部門（**土地利用**、**電力**、**液体燃料**）に着目
部門ごとの正負の**組合せ**により、7つに類型化



排出量がマイナスとなる部門では**二酸化炭素除去（CDR: Carbon Dioxide Removal）**を導入
(ただし、その他の部門では入らない、というわけではない)

想定されている主なCDR技術（ネガティブエミッション技術、NETsとも呼ばれる）

土地利用 : 植林

電力 : CO₂回収・貯留付バイオエネルギー（BECCS）*燃料使用時にCO₂を回収

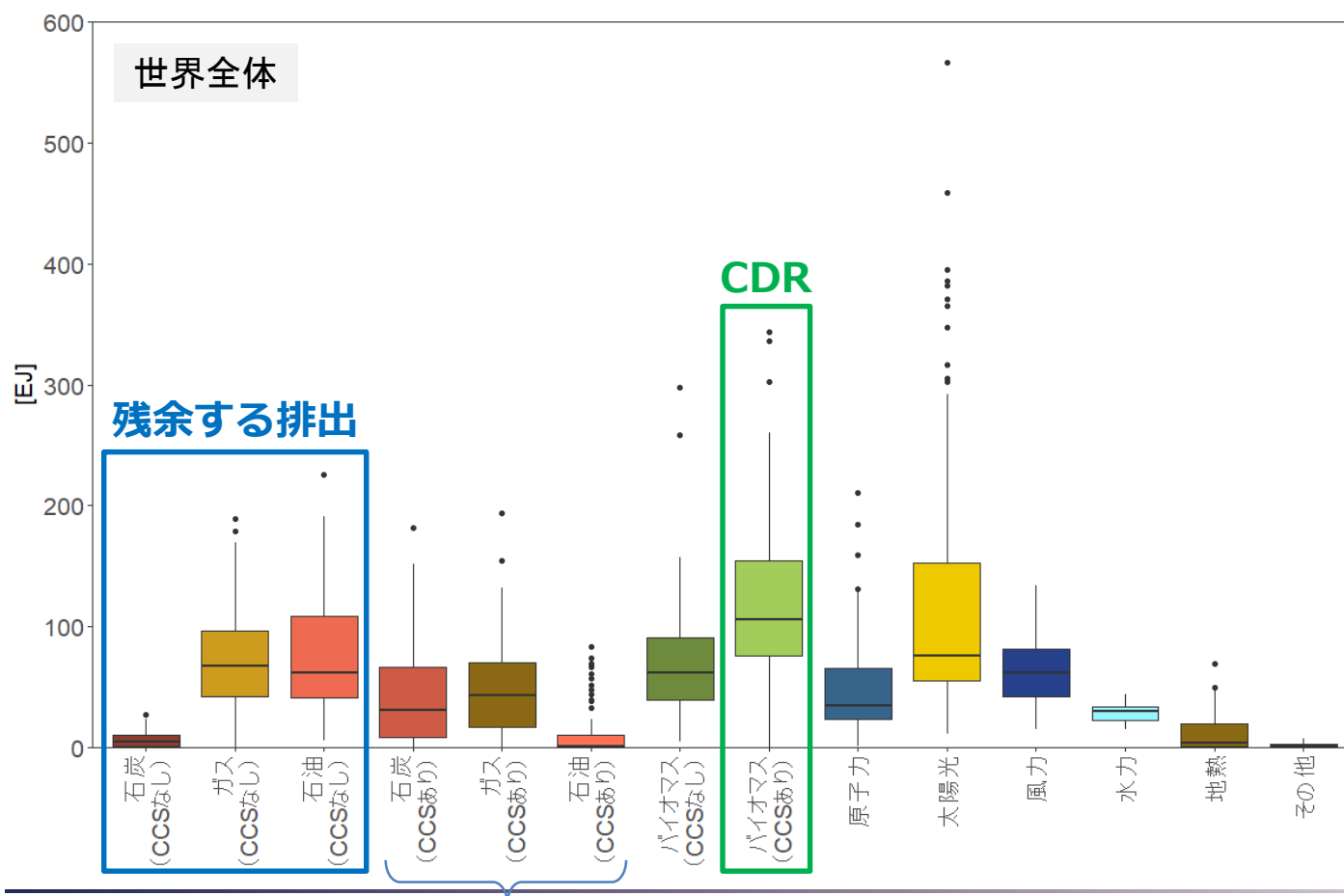
液体燃料 : CO₂回収・貯留付バイオエネルギー（BECCS）*燃料製造時にCO₂を回収

（注）SR15の時点では、直接空気回収・貯留（DACCS）を想定したシナリオは極めて少なかった

ネットゼロ排出達成時

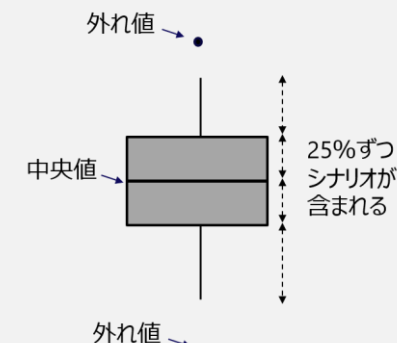
一次エネルギー

- CCSなしの化石燃料とBECCSが、それぞれ残余する排出とCDRに対応
- CO₂排出・除去の態様の多様性は、これらのばらつきを反映したもの



グラフ（箱ひげ図）の見方

データのばらつきを視覚的に表している
 ばらつき大：箱・ひげが広い
 ばらつき小：箱・ひげが狭い

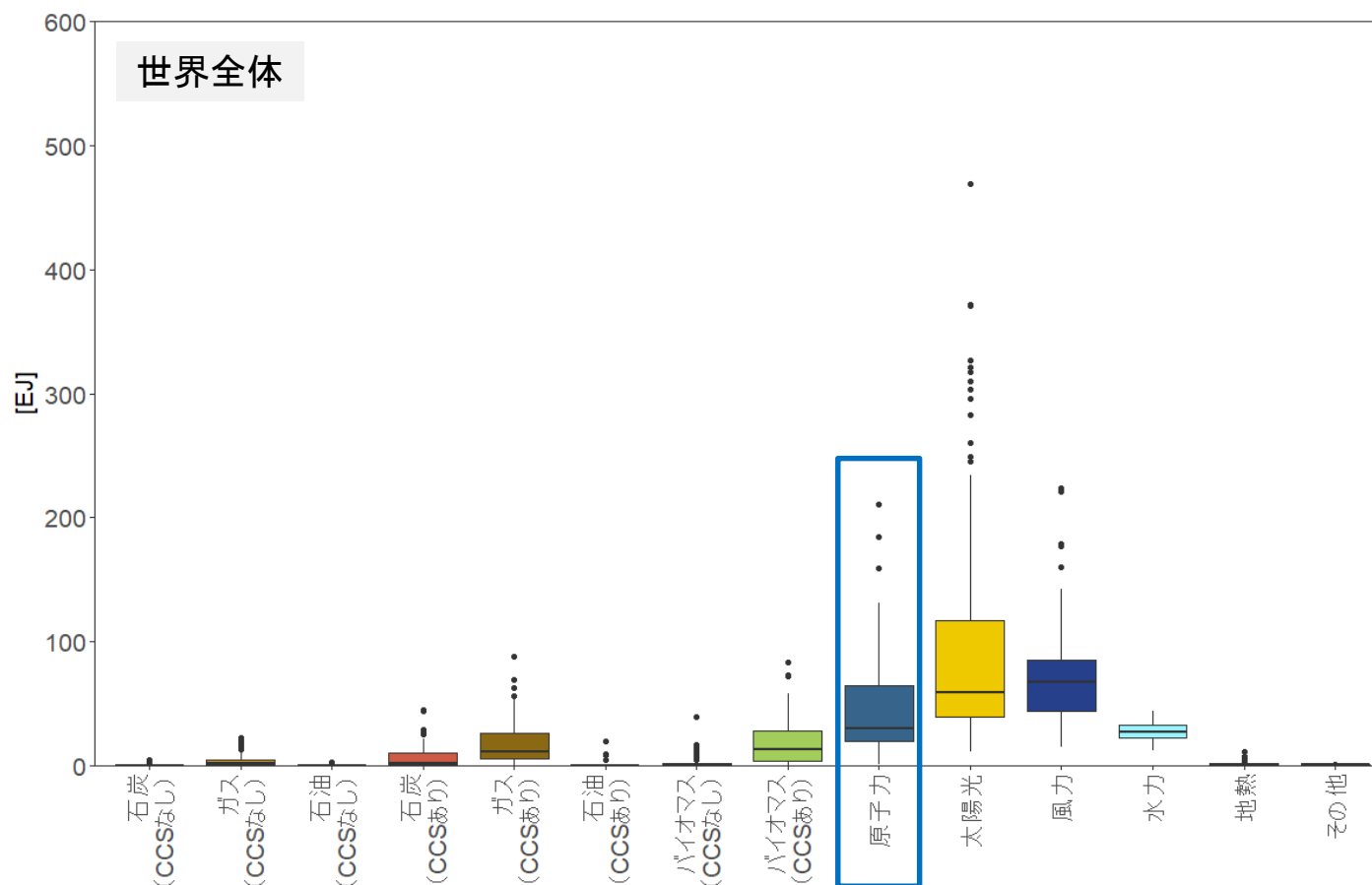


※グラフは、SR15における
 ネットゼロ排出シナリオのう
 ち、類型化に用いた138シナ
 リオのデータ(推計値)に基
 づく

ネットゼロ排出達成時

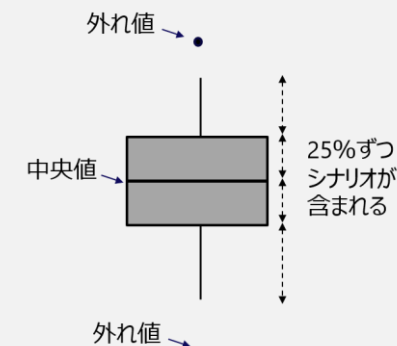
発電電力量

- 低炭素電源が大半：風力、PV、水力、原子力、BECCS、CCS付火力
- ただし、シナリオごとの電源構成は、中央値の大小関係とは異なる



グラフ（箱ひげ図）の見方

データのばらつきを視覚的に表している
 ばらつき大：箱・ひげが広い
 ばらつき小：箱・ひげが狭い

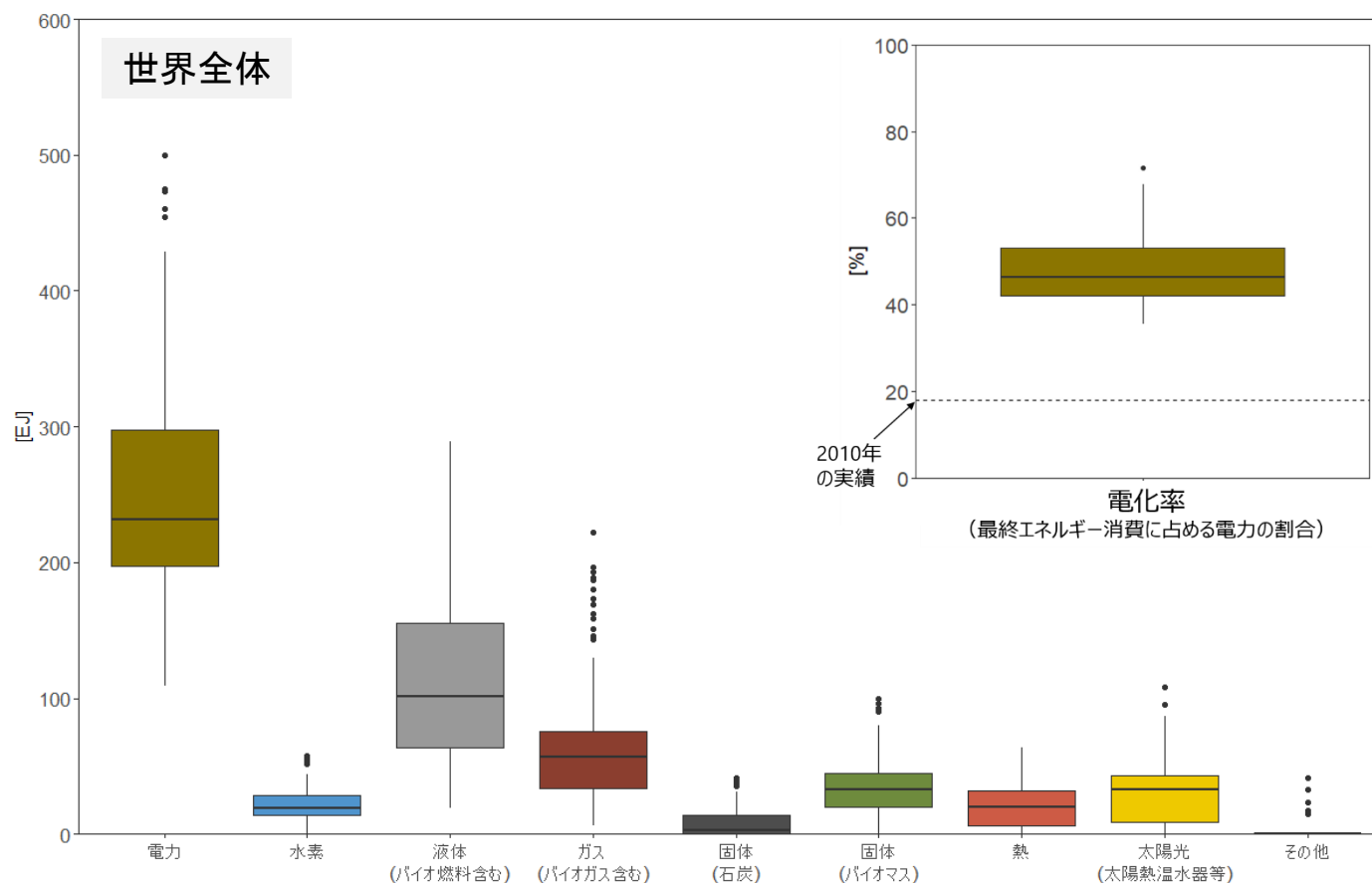


※グラフは、SR15における
 ネットゼロ排出シナリオのう
 ち、類型化に用いた138シナ
 リオのデータ(推計値)に基
 づく

ネットゼロ排出達成時

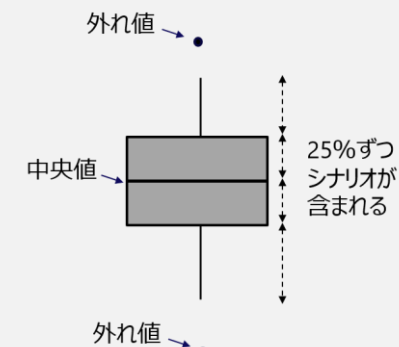
最終エネルギーと電化率

- 電力が最も主要なエネルギーキャリア（電化率の中央値は約46%）
- 液体・ガス・石炭の一部が、残余する排出に対応



グラフ(箱ひげ図)の見方

データのばらつきを視覚的に表している
 ばらつき大：箱・ひげが広い
 ばらつき小：箱・ひげが狭い



※グラフは、SR15における
 ネットゼロ排出シナリオのう
 ち、類型化に用いた138シナ
 リオのデータ(推計値)に基
 づく

小括

- カーボンニュートラル実現の態様は多様
 - 炭素除去技術の導入の想定の違いが大きい
- 大多数のシナリオで、脱炭素化は「電化」と「無炭素電源の拡大」によって達成されている
 - 電力のゼロエミッション化への要求は強い
- 電力部門は、再エネ・原子力・CCUS火力など無炭素電源への置き換えに加えて、NETsの導入の負担をも強いられる可能性あり

3. カーボンニュートラル時代の原子力 －期待と現実的課題－

カーボンニュートラルと原子力

「カーボンニュートラル」の意味

- パリ協定と合わせて、**気候変動対策に関する長期的な潮流が定まった**
- 「カーボンニュートラル」の実現には社会・経済の大変革が必要
- 日本のエネルギー政策の立脚点は、従来の“3E+S”から、「カーボンニュートラル」に移行する（あるいは、既に移行した）

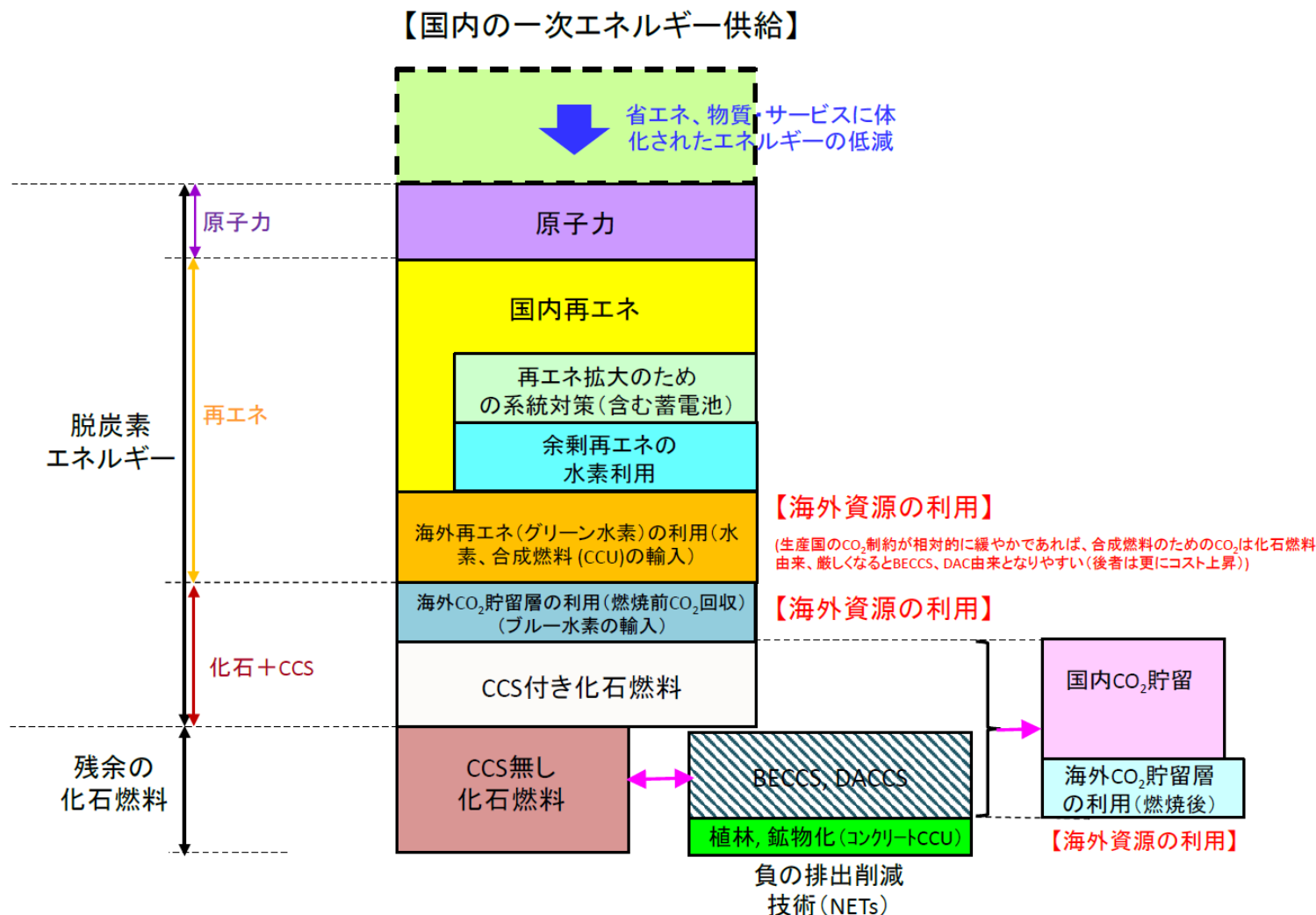
原子力の位置づけ

- 無炭素電源（エネルギー源）として、「カーボンニュートラル」を目指すor達成したエネルギーシステムの中で果し得る役割は大きいが、何をすればそのチャンスを確保できるのか？

第5次エネルギー基本計画（2018年）

燃料投入量に対するエネルギー出力が圧倒的に大きく、数年にわたって国内保有燃料だけで生産が維持できる**低炭素の準国産エネルギー源**として、優れた安定供給性と効率性を有しており、運転コストが低廉で変動も少なく、運転時には**温室効果ガスの排出もない**ことから、安全性の確保を大前提に、**長期的なエネルギー需給構造の安定性に寄与する**重要なベースロード電源である

残余する正の排出を負の排出で相殺



(出典)第3回グリーンイノベーション戦略推進会議 資料3-4「脱炭素社会に向けた対策の考え方」(地球環境産業技術研究機構)

Without nuclear power, the world's climate challenge will get a whole lot harder

Opinion by Fatih Birol and Rafael Mariano Grossi

🕒 Updated 2236 GMT (0636 HKT) October 9, 2020

国際エネルギー機関(IEA)と国際原子力機関(IAEA)の
両事務局長による共著

If the world is to meet **energy security** and **climate goals**, clean energy must be at the core of post-Covid-19 economic recovery efforts. Strong growth in **wind** and **solar** energy and in the use of **electric cars** gives us grounds for hope, as does the promise of emerging technologies like **hydrogen** and **carbon capture**.

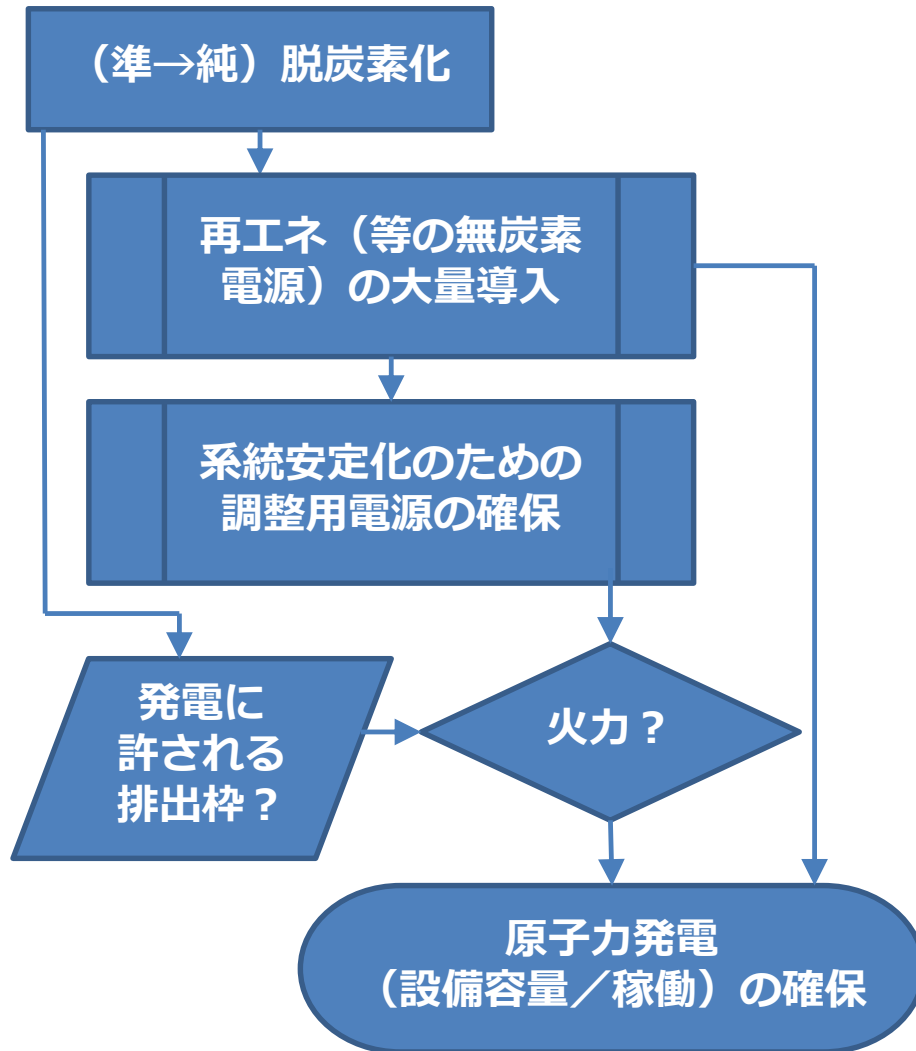
But the scale of the challenge means we cannot afford to exclude any available technologies, including **nuclear power** — the world's second-largest source of low-carbon electricity after hydropower.

Three main priorities

- **Preserve** : 長期運転
- **Renew** : 新設（ファイナンス、規制）
- **Innovate** : 小型モジュラー炉・次世代炉、発電以外の価値（水素等）

<https://edition.cnn.com/2020/10/09/opinions/without-nuclear-power-the-worlds-climate-challenge-birol-grossi/index.html>

原子力が必要とされる論理



- 純脱炭素化へ向かう中で、火力発電の寄与の低下は不可避？
 - 系統安定化のため、回転機発電としての原子力への期待が高まる？
- 資本集約的技術
 - 初期の資本投資は巨額だが、運転中の経費（燃料費、運転維持費）は安価
 - 卸電力市場の機能が（収益・投資回収の予見性から）重要
 - ✓ FIT-CfD、RABモデル等の制度的支援策も必要？
- 「分散」の進展？
 - SMRなど、需要・系統規模に適合する出力へのニーズ？

日本国民は原子力を選びなおすか？

- 少なからぬ日本人が、過去に原子力を社会的に選択した記憶を持たず、「押し付けられた(involuntary)」ものと受け取っているのではないか。
 - Voluntaryなもの（喫煙、自家用車…）より、メリットの認識は低く、リスクなどデメリットの認識は高い。
- カーボンニュートラルが原子力への光明となるか？
 - CO₂排出削減＝電化×電源の低炭素化（×省エネ）
 - 日本では、再エネを最大限導入したとしても、CO₂フリーkWhが不足する。
 - ✓ 原子力の潜在的な活躍余地は大きい。
 - 長期運転、新增設・リプレース、SMR・次世代炉などのオプションを持ちつつ、kWh以外の価値（系統安定化、熱・水素の製造）などにも活路を求めていくべき。

ご清聴ありがとうございました。

IR 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry