



2025/5/29

令和7年度第1回シンビオ社会研究会講演会



カーボンネガティブエミッションを目指して

エネルギー理工学研究所
カーボンネガティブ・エネルギー研究センター
センター長・教授 野平俊之



自己紹介(略歴)

野平俊之(54歳) 専門:電気化学(熔融塩・イオン液体)

1989年 埼玉県立浦和高等学校卒業

1993年 京都大学工学部原子核工学科卒業(伊藤靖彦研)

1995年 京都大学工学研究科原子核工学専攻修了(伊藤靖彦研)

1998年 京都大学博士(伊藤靖彦研)

1998年 京都大学エネルギー科学研究科助手(伊藤靖彦研)

2007年 同 准教授(萩原理加研)

2007年 MIT Visiting Scientist (9カ月) (Prof. D. R. Sadoway)

2015年 京都大学エネルギー理工学研究所 教授

2022年 附属カーボンネガティブ・エネルギー研究センター 教授

現在に至る

専門分野と研究ポリシー

電気化学

- 電子とイオンが関わる化学現象の解明と応用をめざす学問体系
- 今後のエネルギー科学の中心を担うことが期待される学問分野

化学エネルギー ⇒ 電気エネルギー

例) 燃料電池

電気エネルギー ⇔ 化学エネルギー

例) 2次電池、水電解

電気エネルギー ⇒ 革新的物質生産

例) 電解精錬(AI: 白金より高価→200円/kg)

私の研究: Siでも同じことを



熔融塩(イオン液体)

- 熔融塩とは…「塩が溶解した液体」
 - イオンのみからなる
 - 化学的に安定、電気化学窓が広い
 - 種類を選べば、ほぼ全ての元素を扱うことが可能
 - 液体温度領域が広い
 - 熱媒体、反応媒体としても広く応用
- エネルギー科学応用の電解液として着目

私の目的) カーボンニュートラル実現のために

- ・新規太陽電池用シリコン製造法
- ・電力貯蔵用イオン液体2次電池
- ・希土類磁石のリサイクル
- ・CO2を有用物質へ(ダイヤモンド etc.)

研究ポリシー

- ・開始時点ではマイナーな分野
- ・独自のアプローチ法 (オリジナリティ)
- ・世界(特にエネルギー問題)を変え得るテーマ(実用時のインパクト)
- ・基礎データや理論も重視(学術的価値)

講演内容

1. エネルギー問題の背景
地球温暖化、CO₂排出量
2. カーボンニュートラル
世界と日本の状況、シナリオ
3. カーボンネガティブエミッション
従来技術
カーボンネガティブ・エネルギー研究センター(ICaNS)の紹介
4. 溶融塩電解を用いたCO₂からのダイヤモンド合成(私達の研究)
炭素の色々(ダイヤモンド、黒鉛、アモルファスカーボン)
ダイヤモンドについて
新しい合成法の原理
これまでの成果
まとめと今後の展望(夢)

エネルギー問題の背景：その前に

「事実」と「意見」を明確に区別すること

事実：本当にあったこと。誰でも確かめられること。

例1：地球が温暖化している。

例2：CO₂濃度が上昇している。

意見：ある人(たち)が考えたこと。

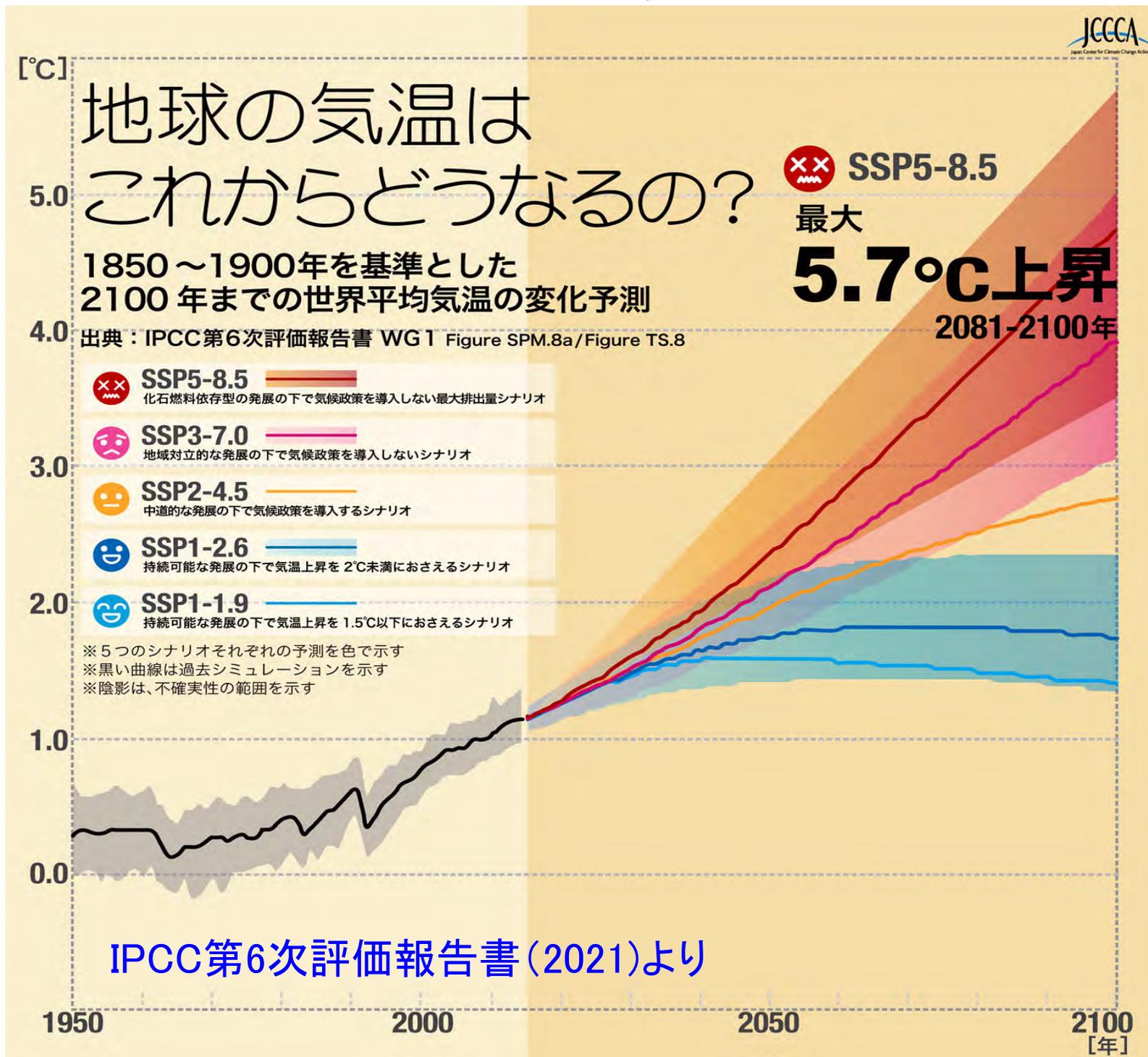
例1：地球温暖化の原因はCO₂である。

例2：地球の気温が2100年に最大5.7°C上昇する。

皆さんにお願いしたいこと

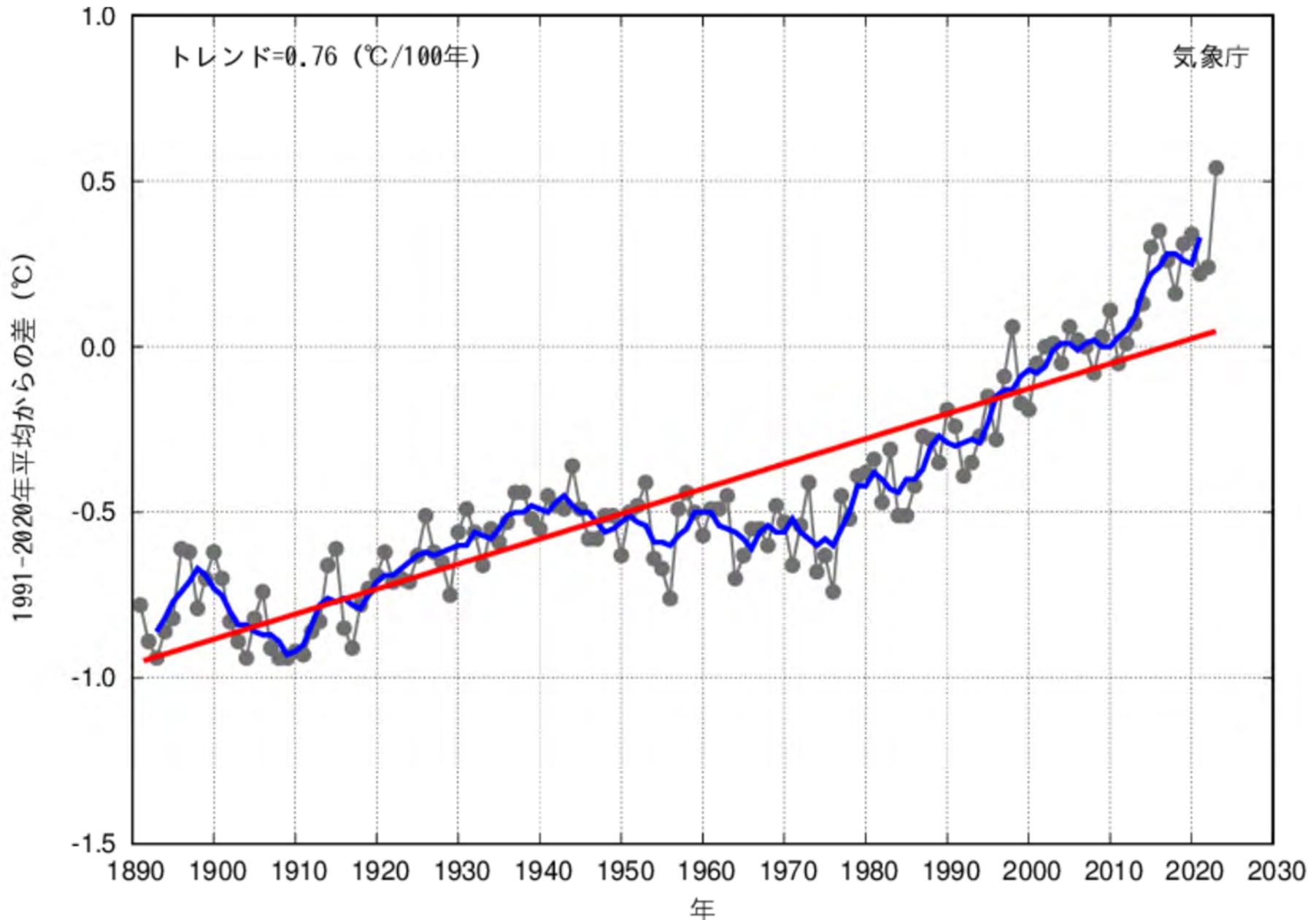
- 必要に応じて「自分で」事実を調べられるようになること
- 様々な意見を客観的に聞き、「自分の」意見を持つこと

1950～2100年までの気温変化(観測と予測)



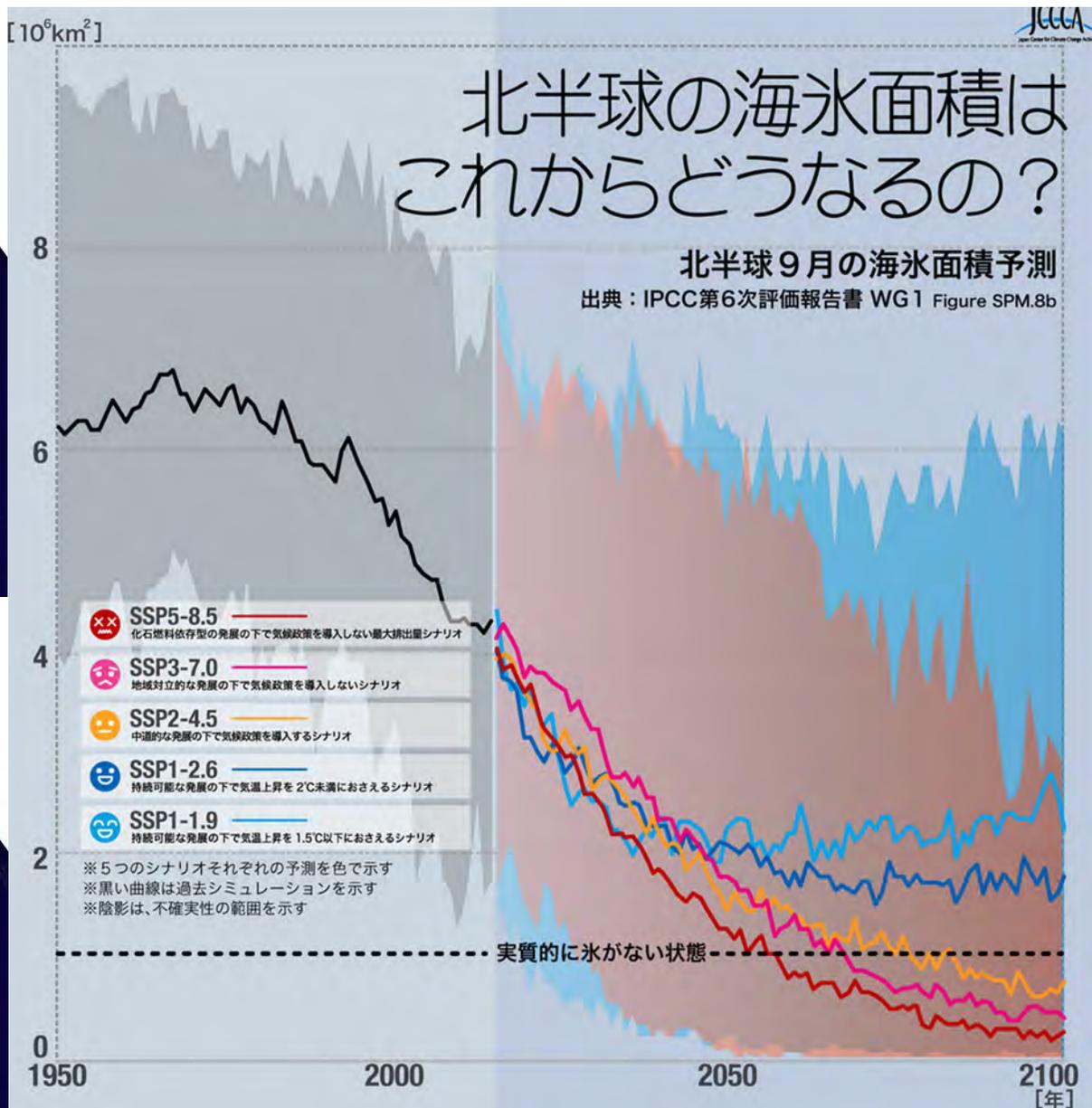
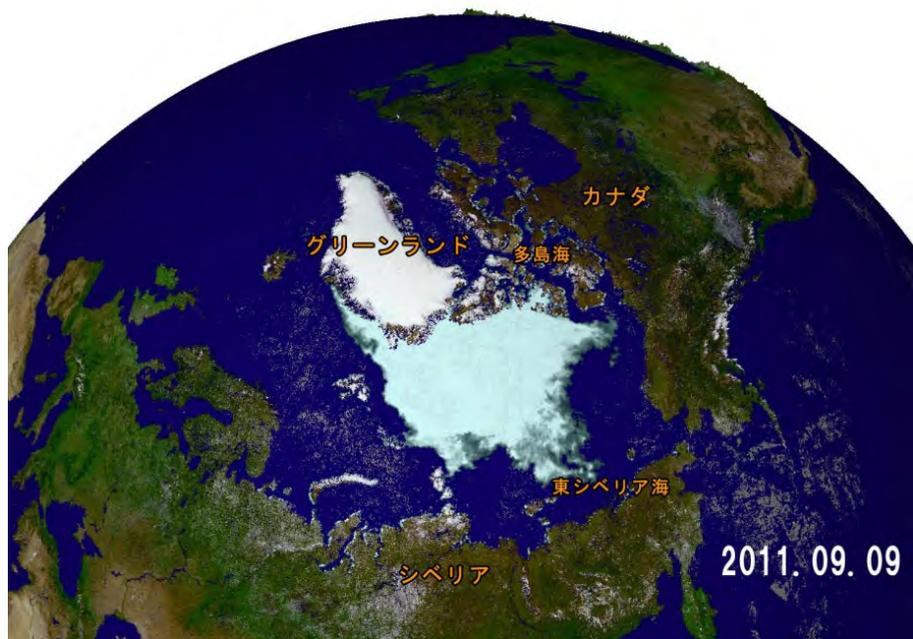
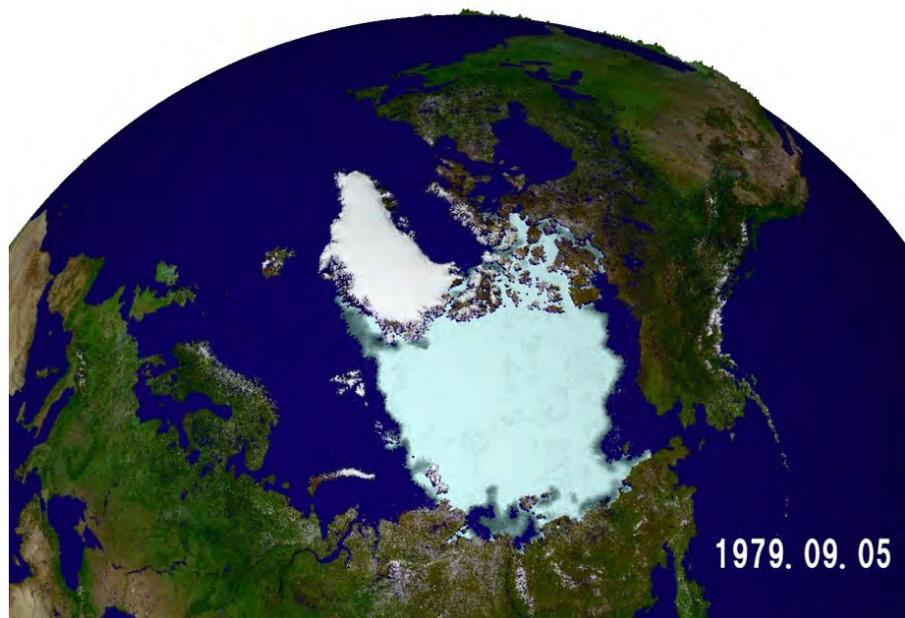
出典：全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト(<http://www.jccca.org/>)より

世界の年平均気温偏差(1891~2023年)



細線(黒):各年の平均気温の基準値からの偏差、太線(青):偏差の5年移動平均、直線(赤):長期的な変化傾向。基準値は1991~2020年の30年平均値。

北極海の海氷の変化

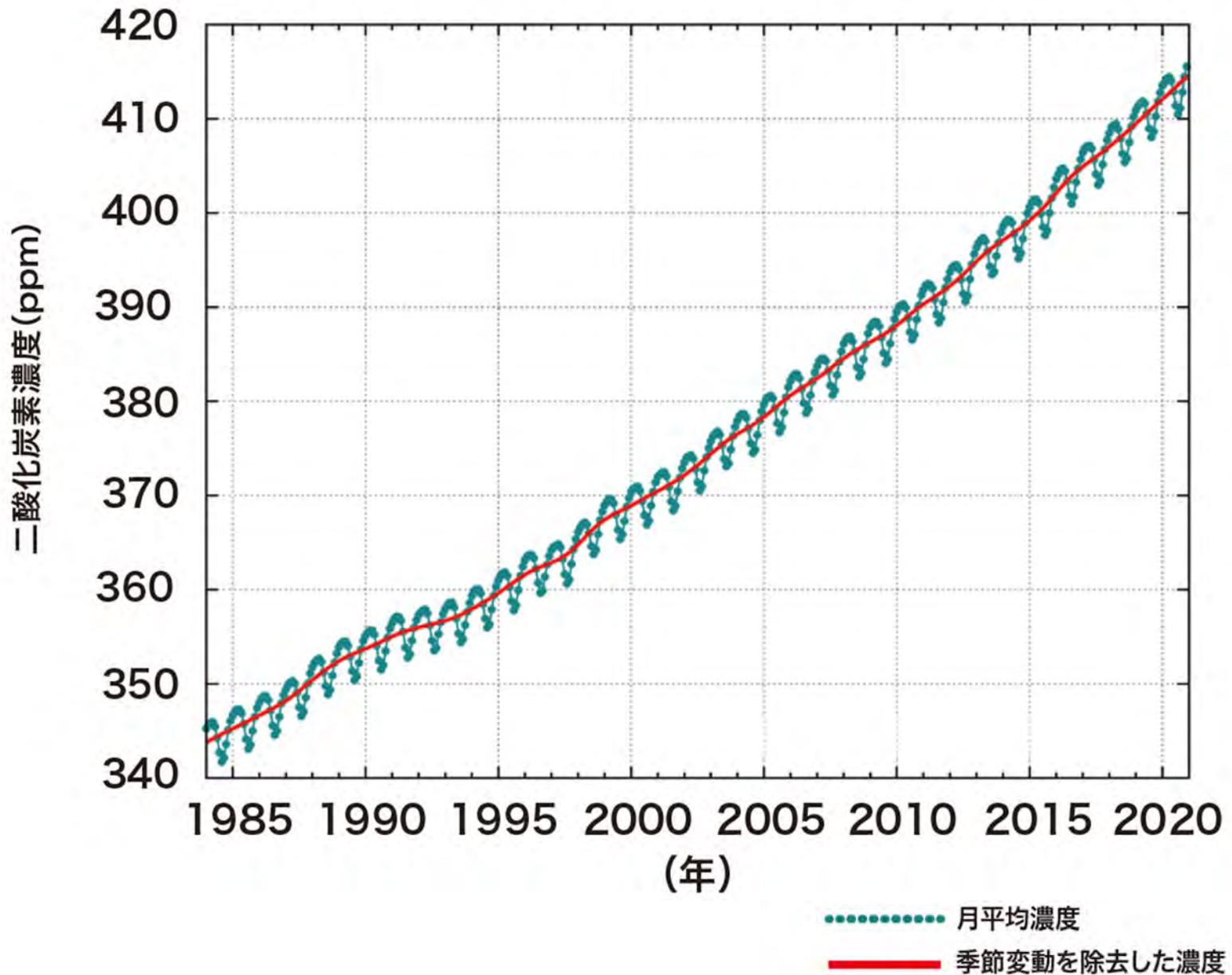


北極の海氷(2010~2019年)は、1979~1988年と比べて、海氷が一番少ない**9月で40%減少**、海氷が一番多い3月で10%減少

出典：JAXA地球観測センターホームページ

出典：全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト
(<http://www.jccca.org/>) より

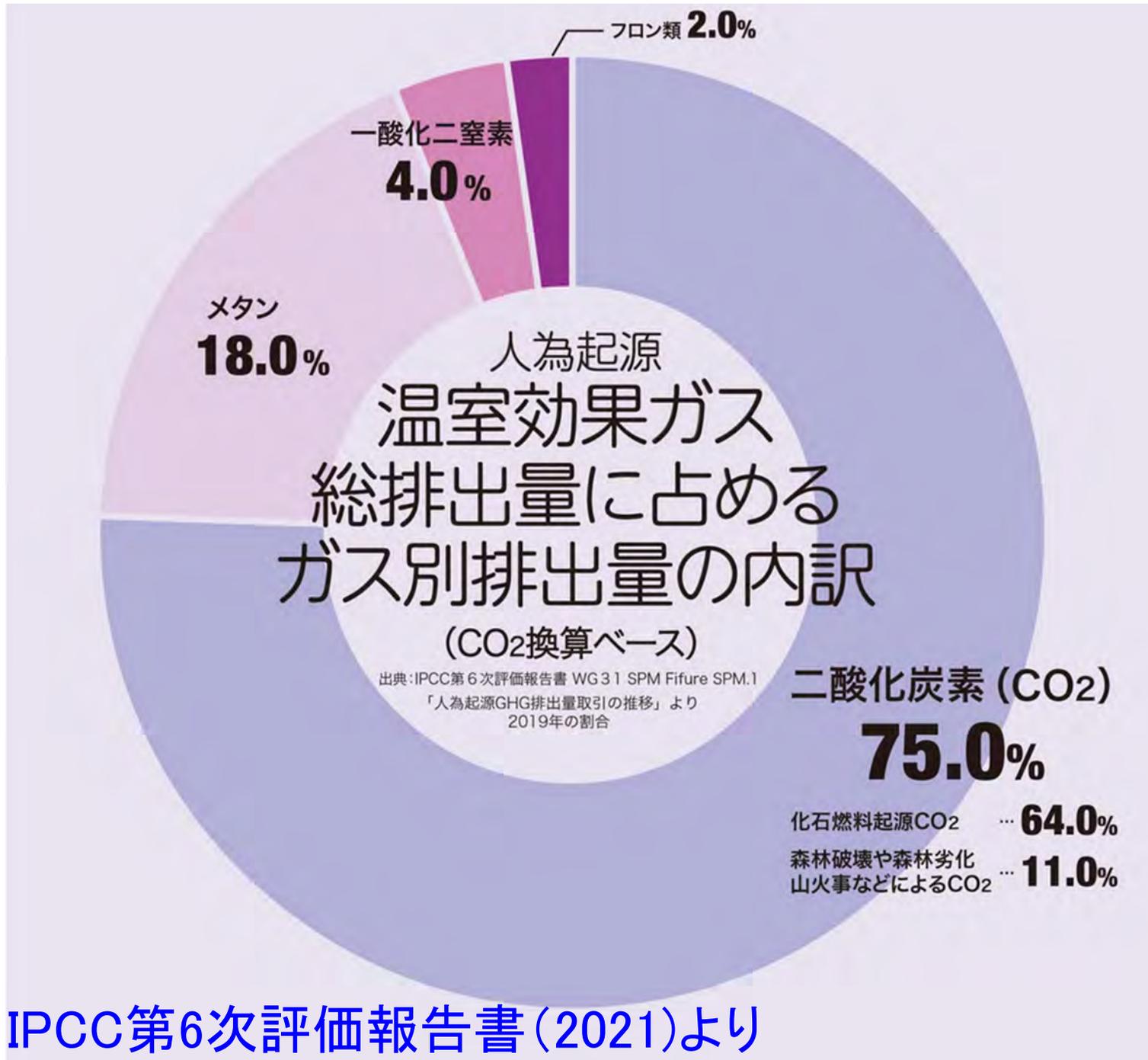
地球全体の二酸化炭素濃度の経年変化



出典: 全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト
(<http://www.jccca.org/>) より

出典) 温室効果ガス世界資料センター (WDCGG)
「地球全体の二酸化炭素の経年変化」(気象庁ホームページより)

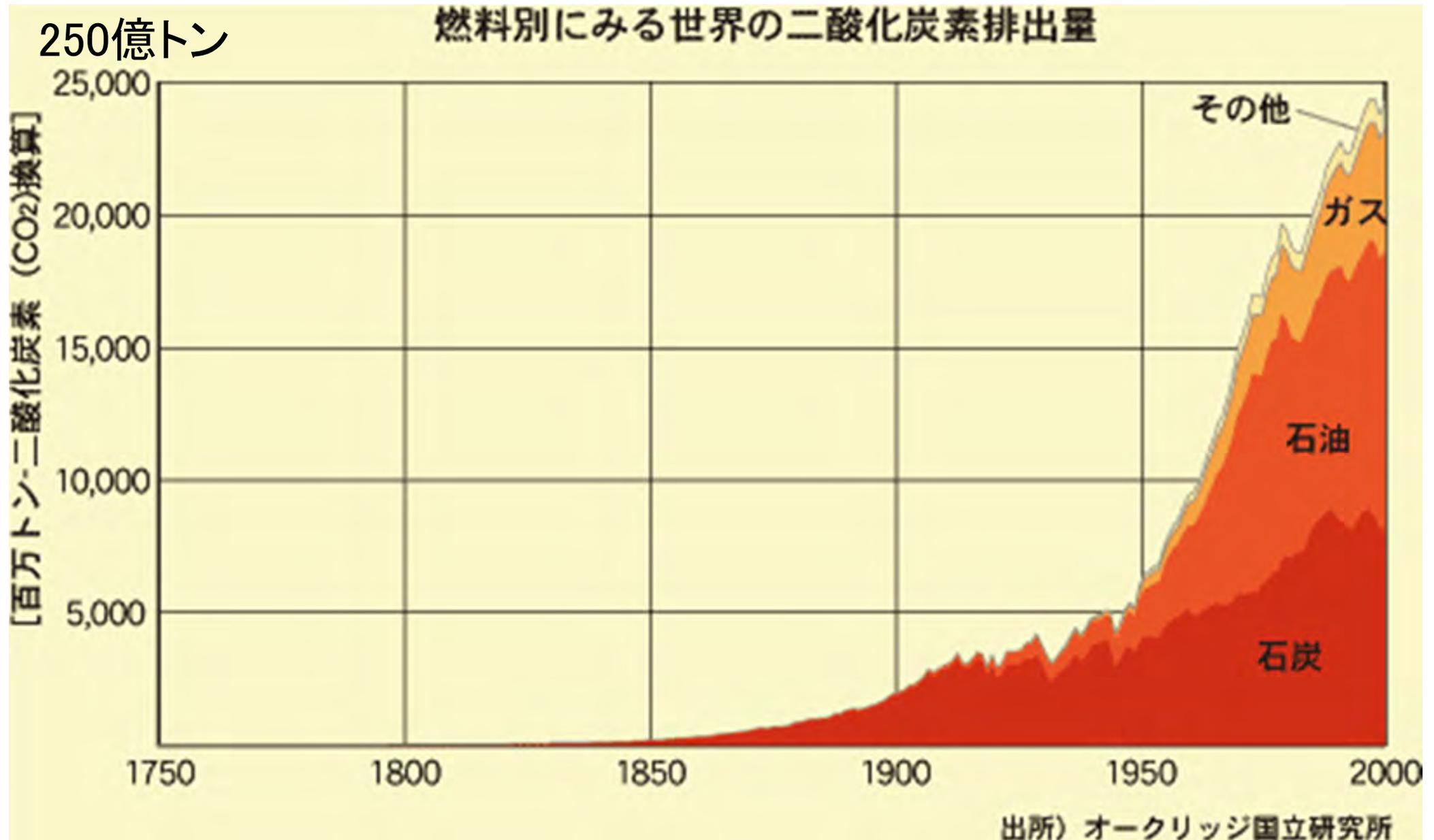
温室効果ガスの温暖化への寄与度



IPCC第6次評価報告書(2021)より

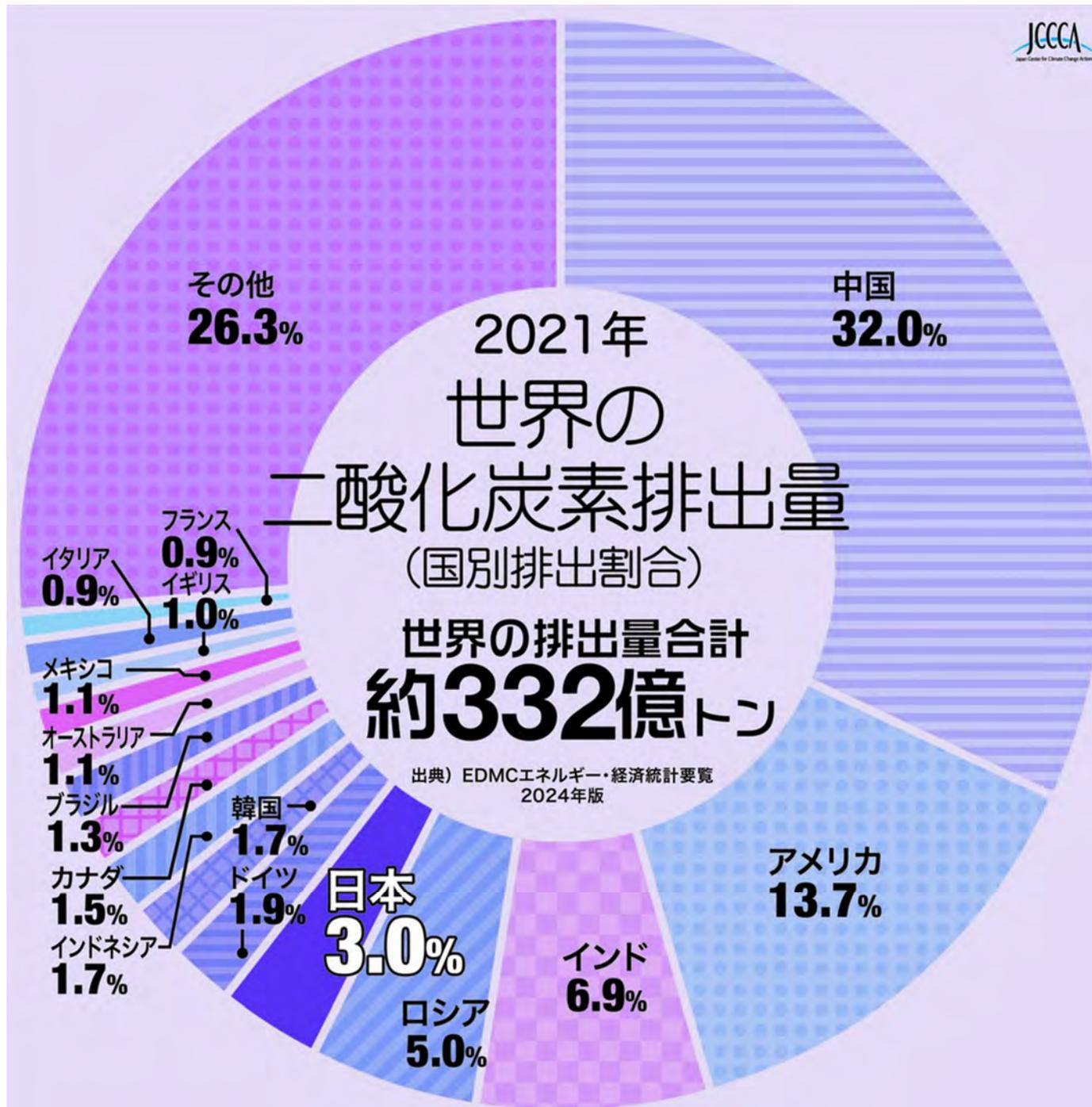
出典: 全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト(<http://www.jccca.org/>)より

世界の燃料別二酸化炭素排出量

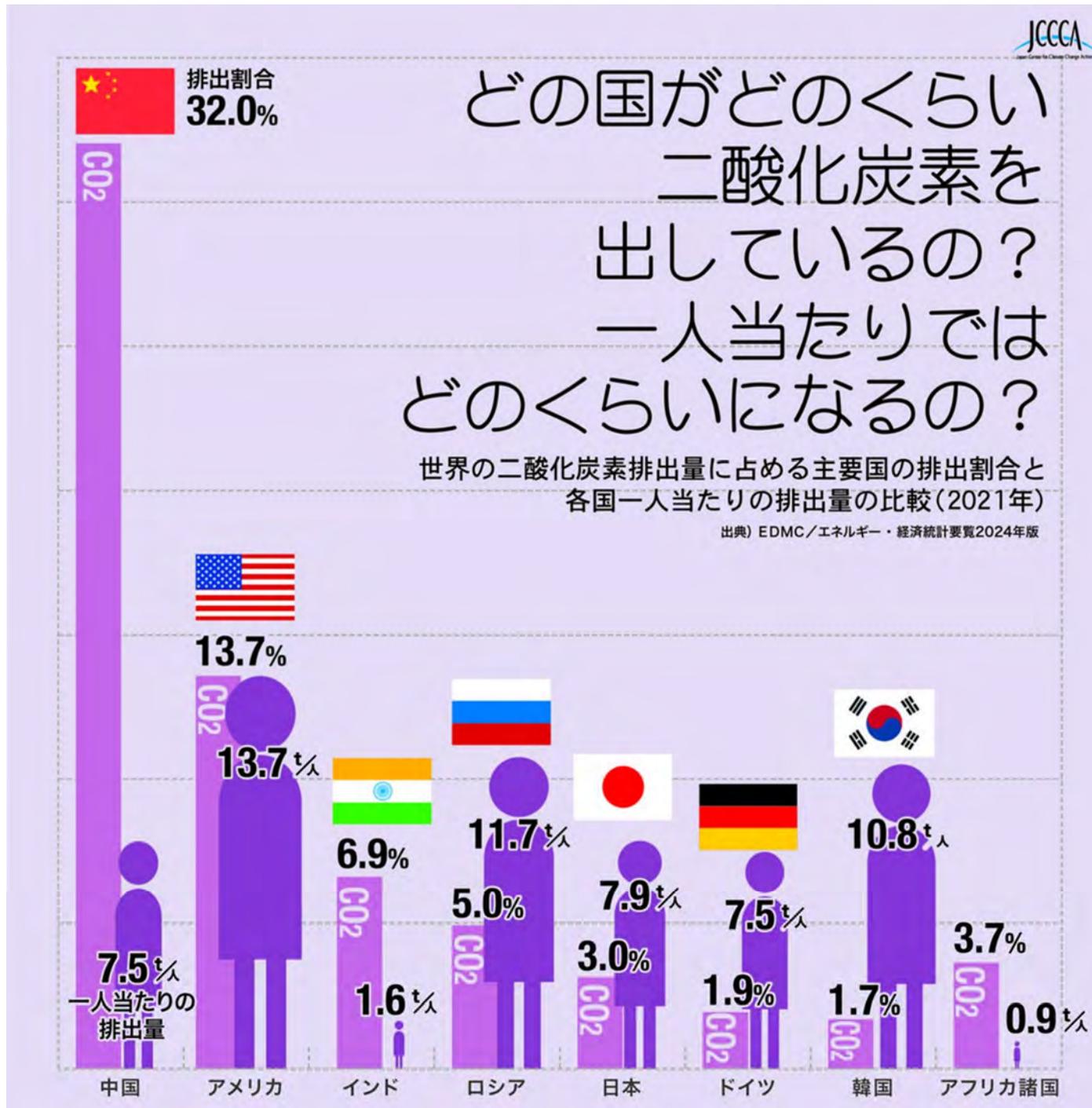


出典: 全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト (<http://www.jccca.org/>) より

世界の二酸化炭素排出量(2021年)



1人当たりの二酸化炭素排出量(2021年)



COP27(2022/11/6-18、エジプト・シャルムエルシェイク)

各国の削減目標



国名	削減目標	今世紀中頃に向けた目標 ネットゼロ ^(*) を目指す年など <small>(*) 温室効果ガスの排出を実質ゼロにすること</small>
 中国	GDP当たりのCO ₂ 排出を 2030 年までに 65% 以上削減 <small>※CO₂排出量のピークを 2030年より前にすることを目指す (2005年比)</small>	2060 年までに CO ₂ 排出を 実質ゼロにする
 EU	温室効果ガスの排出量を 2030 年までに 55% 以上削減 <small>(1990年比)</small>	2050 年までに 温室効果ガス排出を 実質ゼロにする
 インド	GDP当たりのCO ₂ 排出を 2030 年までに 45% 削減 <small>(2005年比)</small>	2070 年までに 排出量を 実質ゼロにする
 日本	2030 年度 において 46% 削減 (2013年比) <small>※さらに、50%の高みに向け、挑戦を続けていく</small>	2050 年までに 温室効果ガス排出を 実質ゼロにする
 ロシア	2030 年までに 30% 削減 (1990年比)	2060 年までに 実質ゼロにする
 アメリカ	温室効果ガスの排出量を 2030 年までに 50-52% 削減 <small>(2005年比)</small>	2050 年までに 温室効果ガス排出を 実質ゼロにする

各国のNDC提出・表明等、表現のまま掲載しています (2022年10月現在)

CO₂排出実質ゼロ



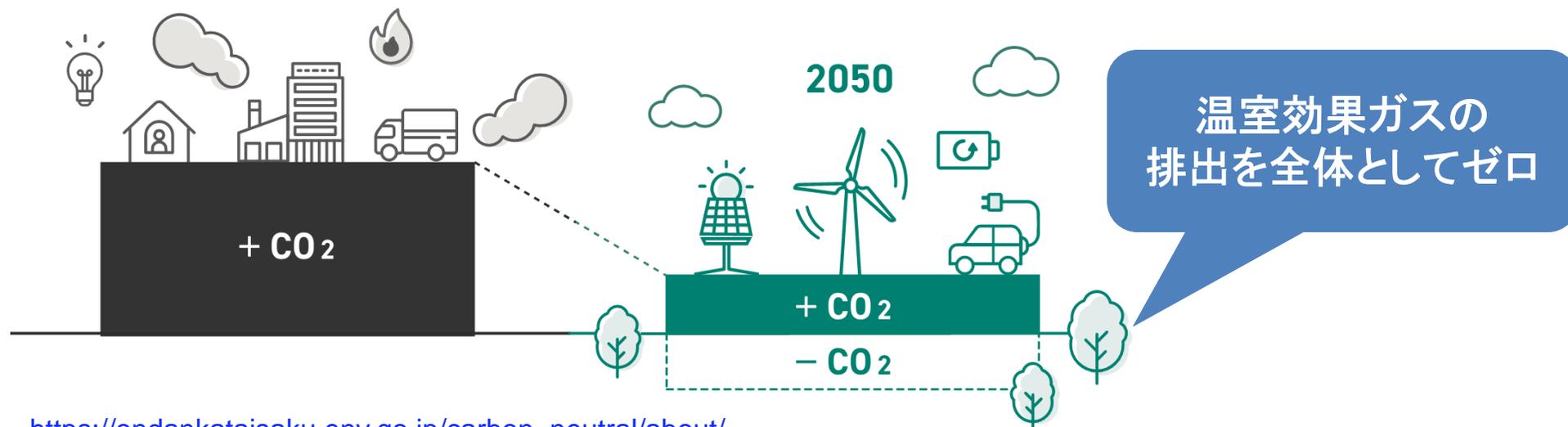
カーボンニュートラル

カーボンニュートラル実現の宣言(日本)

令和2年10月26日

第203回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説

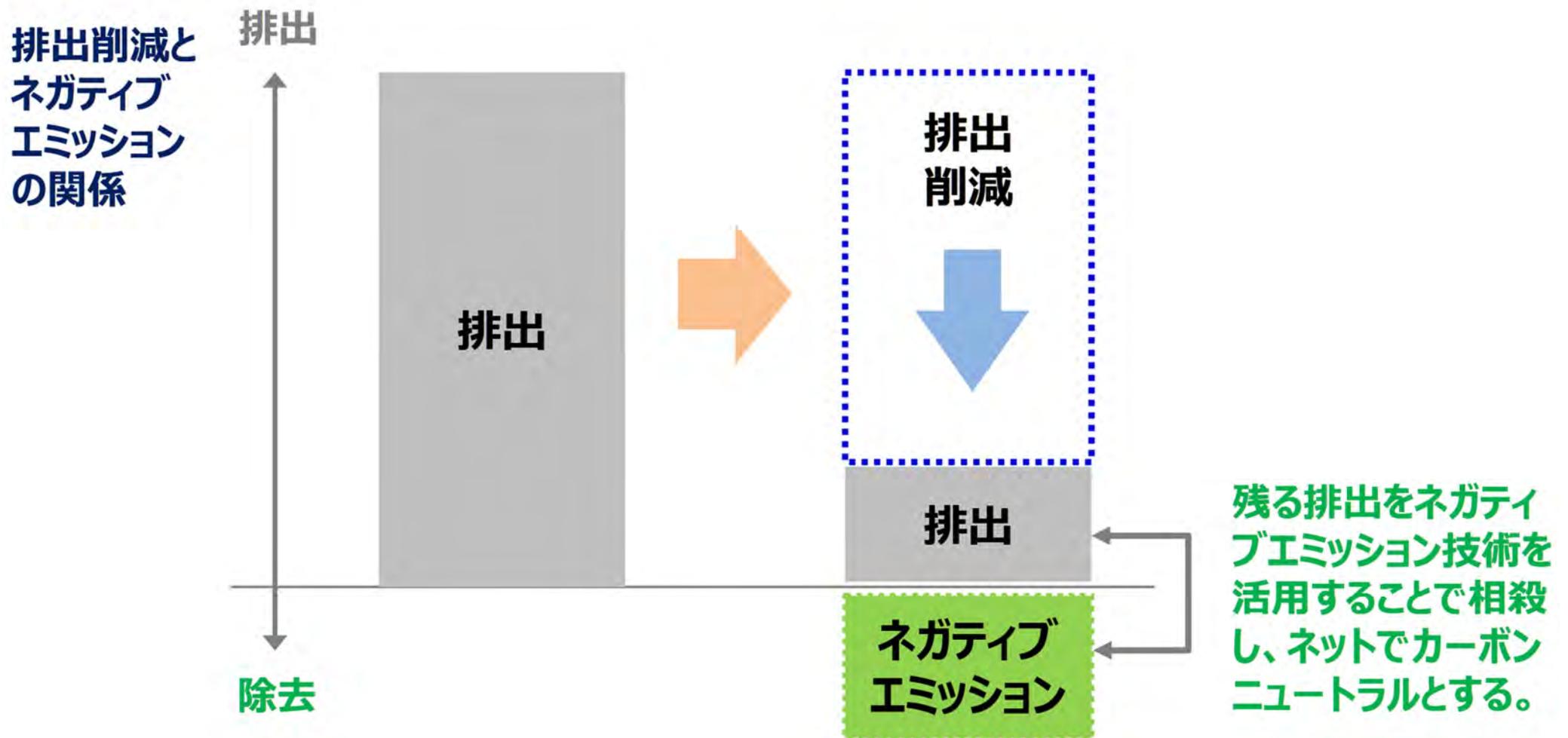
- 我が国は、2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことを、ここに宣言いたします。
- 省エネルギーを徹底し、**再生可能エネルギーを最大限導入**するとともに、安全最優先で原子力政策を進めることで、安定的なエネルギー供給を確立します。長年続けてきた石炭火力発電に対する政策を抜本的に転換します。



https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/

ネガティブエミッションとは？

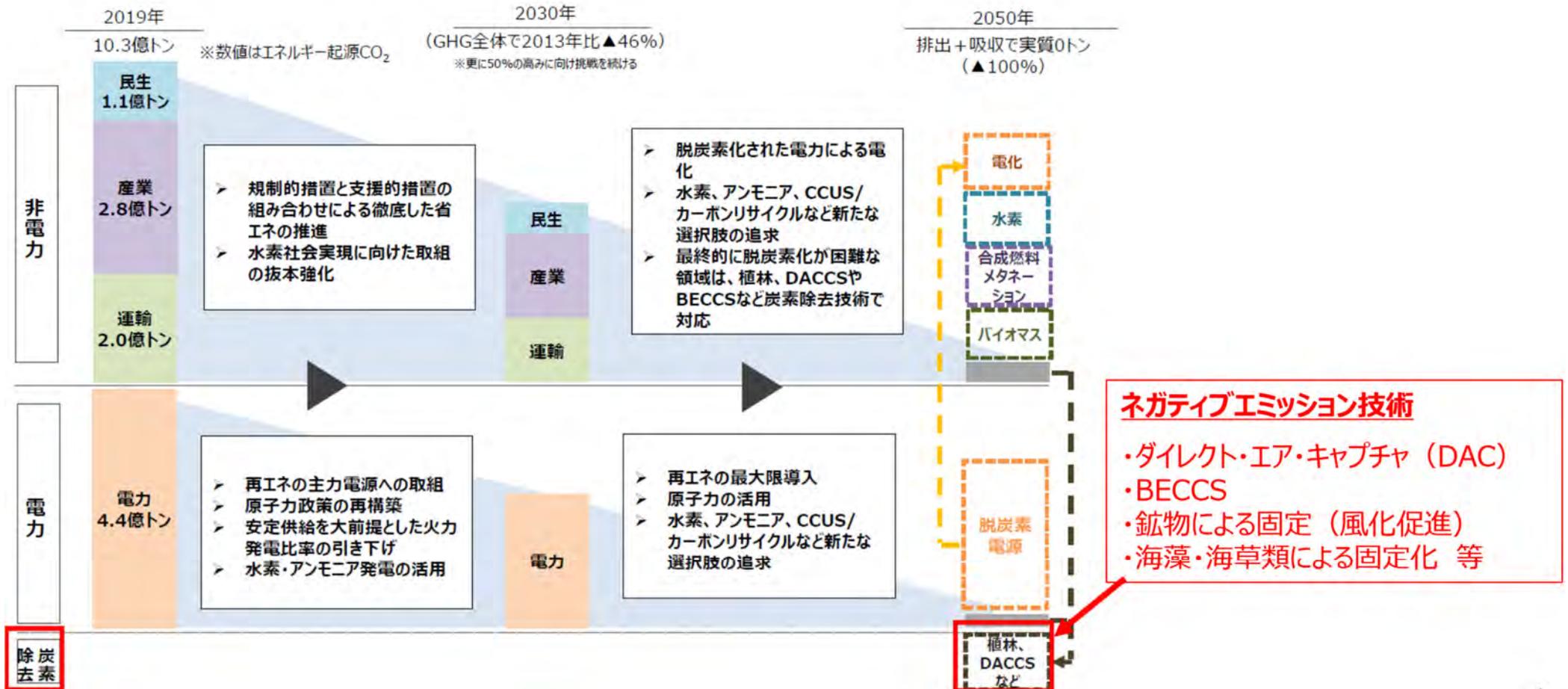
- ネガティブエミッション技術 (NETs): 大気中から人為的にGHGを回収し、それを長期間にわたって固定する技術
→炭素除去 (Carbon Dioxide Reduction) 技術とほぼ同義
- ネガティブエミッションの意義: 排出削減が困難な残余排出量の相殺



ネガティブエミッション技術の位置づけ

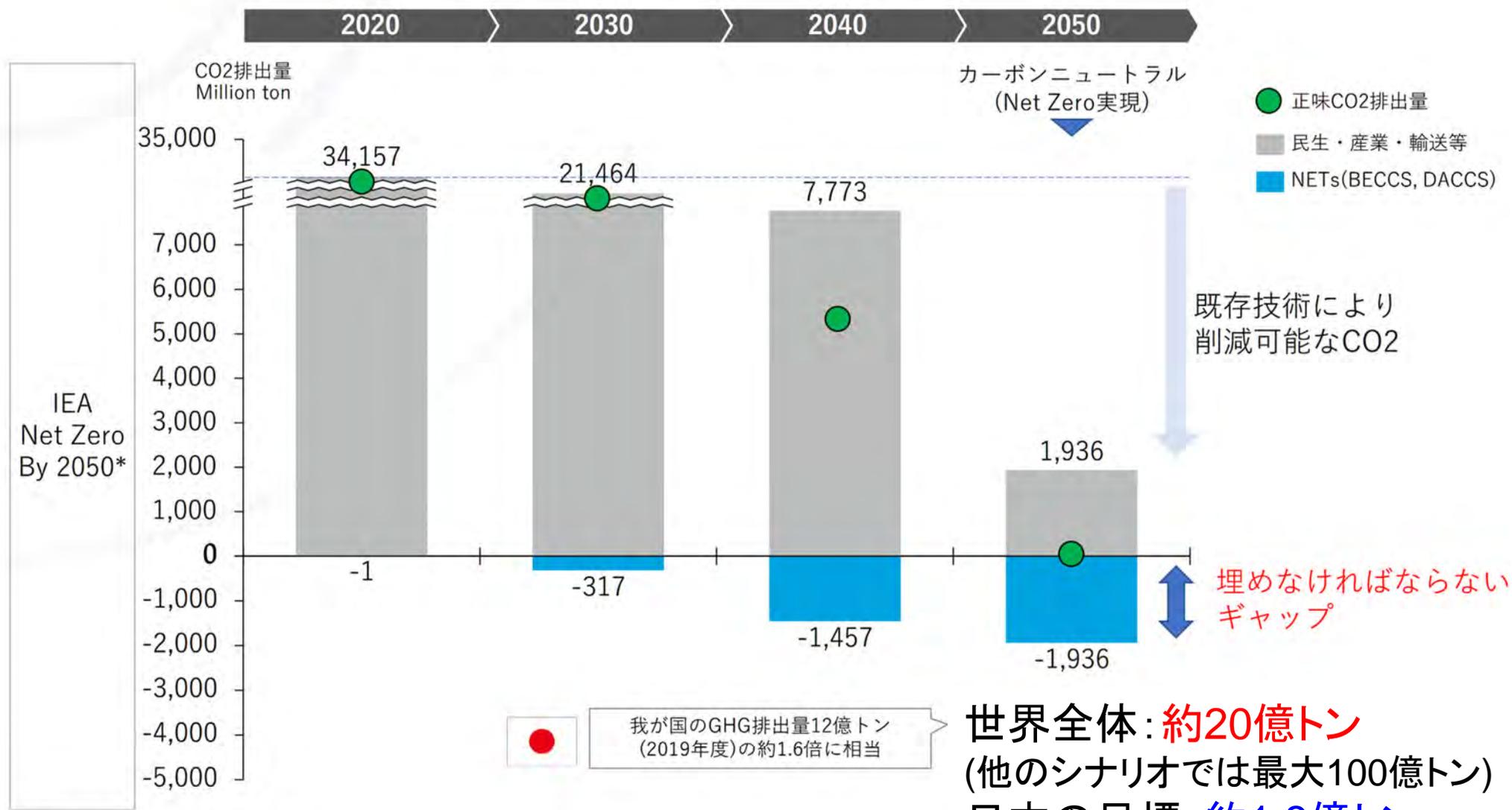
- 2050年カーボンニュートラルを達成するためには、どうしても避けられないGHG排出を吸収するネガティブエミッション技術が不可欠。（下記の炭素除去部分）
- 将来の成長産業の萌芽として、そのように技術を磨き、ビジネスとして育成していくか検討が必要。

カーボンニュートラル達成のイメージ(日本)



ネガティブエミッション技術の必要性(世界全体)

2050年のカーボンニュートラル実現には、既存技術では削減し切れないCO2を回収する必要がある



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

*IEA "Net Zero by 2050"のデータを基に作成。エネルギー起源CO2の排出量を表示

ネガティブエミッション技術(NETs)の候補

植林・再生林	植林は新規エリアの森林化、再生林は自然や人の活動によって減少した森林への植林。
土壌炭素貯留	バイオマスを土壌に貯蔵・管理する技術（自然分解によるCO2発生を防ぐ）。
バイオ炭	バイオマスを炭化し炭素を固定する技術。
BECCS	バイオマスの燃焼により発生したCO2を回収・貯留する技術。
DACCS	大気中のCO2を直接回収し貯留する技術。
風化促進	玄武岩などの岩石を粉砕・散布し、風化を人工的に促進する技術。風化の過程(炭酸塩化)でCO2を吸収。
海洋アルカリ化	海水にアルカリ性の物質を添加し、海洋の自然な炭素吸収を促進する炭素除去の方法。
植物残差海洋隔離	海洋中で植物残差に含まれる炭素を永久的に隔離する方法（自然分解によるCO2発生を防ぐ）。ブルーカーボンのみならず外部からの投入を含む。
海洋肥沃	海洋への養分散布や優良生物品種等を利用することにより生物学的生産を促してCO2吸収・固定化を人工的に加速する技術。大気中からのCO2の吸収量の増加を見込む。

ネガティブエミッション技術(NETs)の比較評価

分類	TRL	削減コスト \$/tCO ₂ *1	削減ポテンシャル GtCO ₂ /年 *2	土地利用 *3 m ² /tCO ₂ /年	削減効果 の確認 *4	日本での実 施の優劣 *5
海洋アルカリ化	3	305 10~600	11.0 2~20	0	要	○
海洋肥沃化	3	67 23~111	4.4 2.6~6.2	0	要	○
植物残渣海洋隔離	2	72 50~94	0.9 0.7~1	0	済	○
風化促進	4	128 50~200	3.0 2~4	29	要	○
DACCS	6	172 30~600	3.5 1~6	4	済	△
BECCS	7	135 60~200	5.6 0.5~15	379	済	△
植林・再生林	9	28 5~50	2.3 0.5~3.6	978	済	○
土壌炭素貯留	7	28 -45~100	4.1 0.4~8.6	0	要	○
バイオ炭	6	75 30~120	2.6 0.3~75	580	済	○
マテリアルとしての固定化 (DAC+炭酸塩化+土木・建築利用、木造建築、木質素材の循環利用)						

*1:2050年想定CO₂削減コストの中央値

*2:2050年の世界の削減ポテンシャルの中央値、陸上バイオ系は重複あり。

*3:年間1トンのCO₂削減に必要な面積、植林・再生林978は北海道全体(8.3万km²)で0.85億tCO₂/年の削減に相当、PVは10程度(効率18%, 稼働率12%, 0.5kgCO₂/kWhの電力を代替の場合)

*4:CO₂削減効果が確認されコンセンサスを得ているか

*5:諸外国との比較で日本での実施の優劣、DACCSとBECCSはCCSが必須でCCS適地の点で日本は劣後

出典:第6回グリーンイノベーション戦略推進会議WG発表資料,(2022),各種情報(文末参照)を元にNEDO-TSC作成資料を一部加筆

出典:経済産業省産業技術局「ネガティブエミッション技術について」、2022年2月

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/007_03_02.pdf

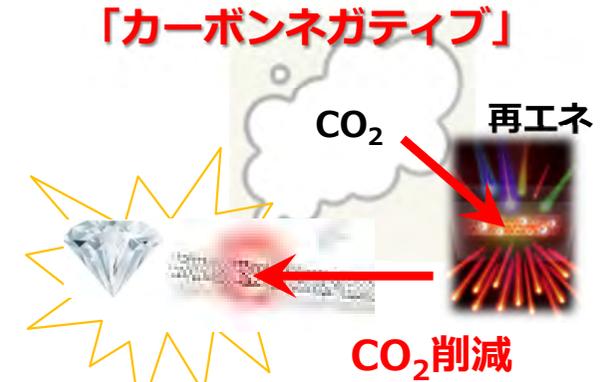
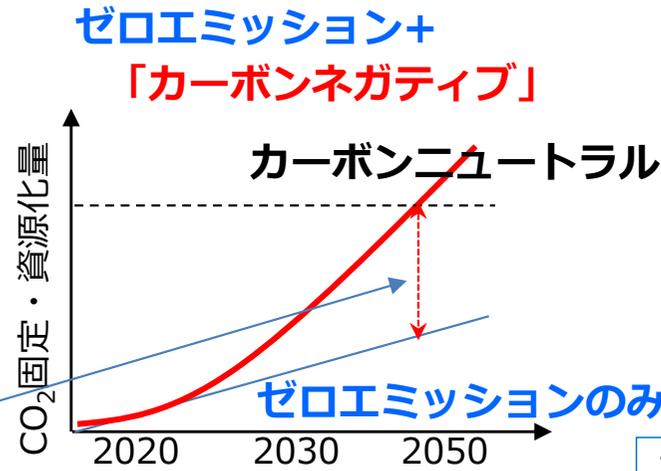
ネガティブエミッション技術の例





エネルギー理工学研究所＋エネルギー科学研究科2専攻＋工学研究科3専攻

CO₂
森林や海洋、
CCUS等によ
るCO₂吸収
だけでは限界



「カーボンネガティブ」技術の確立によるCO₂の固定化・資源化量の増大が必須：
「カーボンネガティブ」の学理・技術創出

1. CO₂回収の太陽エネルギー利用

広帯域太陽光
CNT波長選択・量子変換素子

in → out

高効率太陽熱発電
太陽熱化学合成
海水淡水化・汚染水浄化

有用エネルギー帯域に高効率変換

2. CO₂を資源に変換

原料
CO₂
H₂O

溶融塩電解

in → out

ダイヤモンド
有用副生物
H₂
CH₄

3. 炭素由来の化成品・半導体開発

原料
極限微生物

in → out

極限微生物・酵素による炭素材料合成

新半導体



ウェブサイト: <https://icans.iae.kyoto-u.ac.jp/>



京都大学 エネルギー理工学研究所

附属カーボンネガティブ・エネルギー研究センター



CARBON NEGATIVE

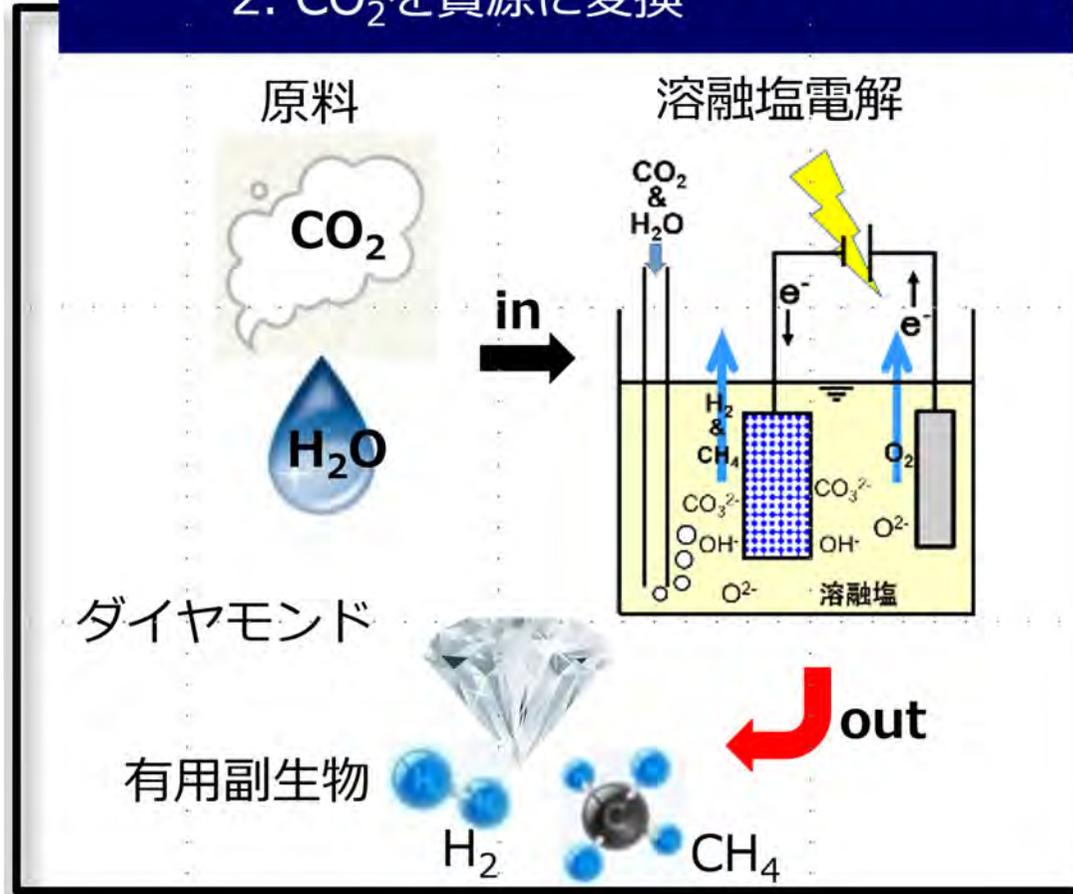
CO₂の固定利用・削減を目指して

ABOUT US

「カーボンニュートラル」から「カーボンネガティブ」へ

カーボンネガティブ・エネルギー研究センターでは、脱炭素社会実現のため、従来の「カーボンニュートラル」という概念の先にある「カーボンネガティブ」という積極的な二酸化炭素固定化・有効利用する概念を導入し、新たなエネルギーシステムを作り上げるための研究に取り組みます。また、「カーボンネガティブ」の概念に基づいて、脱炭素社会を牽引し支える次世代の人材育成に取り組んでまいります。

2. CO₂を資源に変換

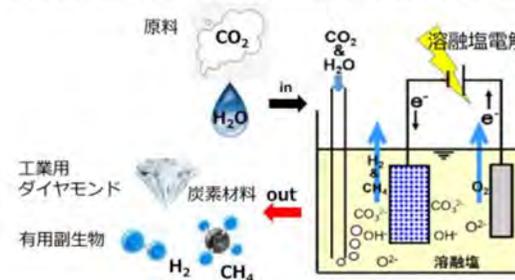


溶融塩を用いたCO₂からの新規ダイヤモンド合成法

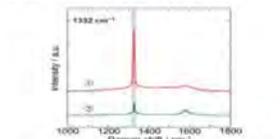
カーボンニュートラル社会を実現するためには、排出されるCO₂を回収・貯留(CCS)するだけでなく、CO₂を回収・有効利用(CCU)することが必要であり、CO₂の変換技術が注目を浴びています。我々は、炭素材料の中でも特に価値の高いダイヤモンドを変換先に選定し、溶融塩電解を用いたCO₂原料からのダイヤモンドの合成法を開発しました。下図に示す原理図のように、CO₂とH₂Oを溶融塩に溶かし、電解をすると炭素と水素が同時に生成します。これによりsp²・sp混成軌道を持つ炭素が炭化水素となって除去され、sp³炭素のみが成長することでダイヤモンドが生成します。これまでに、直径数μmのダイヤモンドの生成を確認しており、より大きなダイヤモンドを得るために電解条件の最適化に取り組んでいます。

エネルギー理工学研究所
野平研究室で提案&研究中

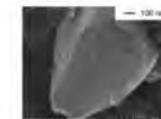
<https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/chemical/>



新しいダイヤモンド電解合成法の原理図



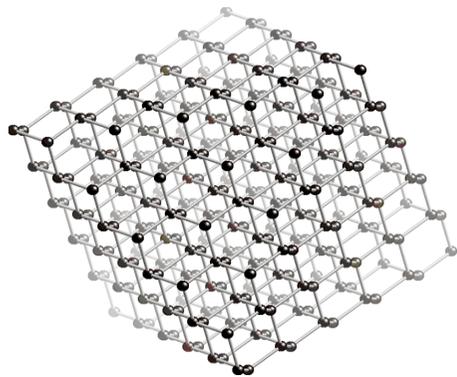
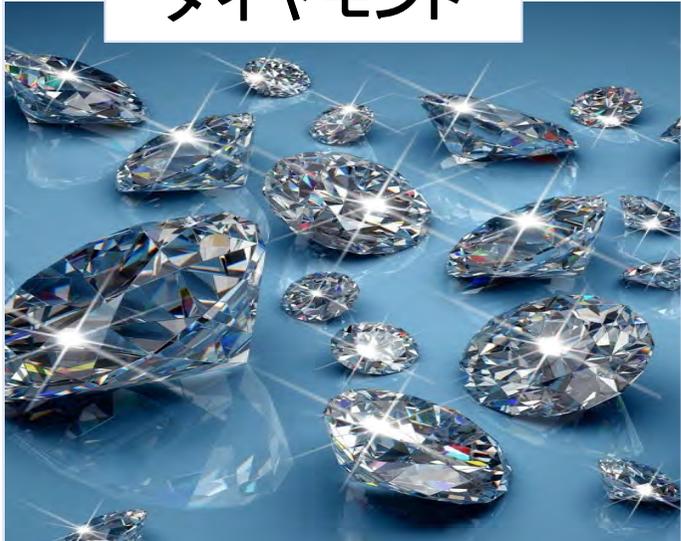
ダイヤモンドのラマンスペクトル



ダイヤモンドのSEM像

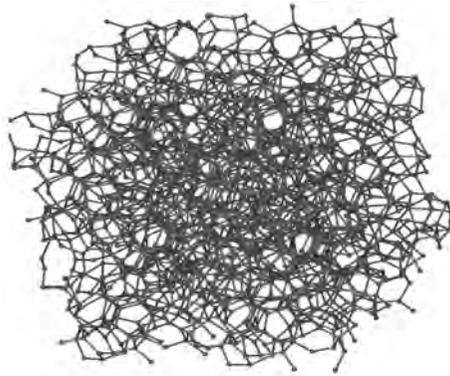
炭素(元素記号C)の同素体

ダイヤモンド



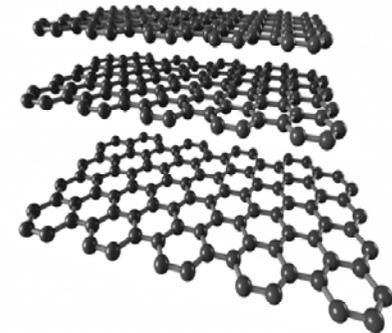
炭素原子が sp^3 混成軌道のみで三次元的に結合しており、面心立方(ダイヤモンド立方)構造をとる。

アモルファスカーボン



sp^2 混成軌道で結合している炭素と sp^3 混成軌道で結合している炭素が混在している。

黒鉛(グラファイト)



sp^2 混成軌道のみが平面的に重なり合った結晶

それぞれ炭素同士の結合状態が異なるため、異なる物理的、化学的性質を有する

熔融塩中における電気化学的なCO₂変換技術

熔融塩	温度	炭素源	特徴
Li ₂ CO ₃ - Na ₂ CO ₃ ⁻ K ₂ CO ₃ ⁻ Li ₂ SO ₄	1048 K	CO ₂	<p>黒鉛化度の高い グラファイトの 電析を目指し、 研究がされている</p> <p>[1] Y. Chen, M. Wang, S. Lu, J. Tu, S. Jiao, <i>Electrochim. Acta</i>, 331, 135461 (2020).</p>
Li ₂ CO ₃ - K ₂ CO ₃	1023 K	CO ₂	<p>電析された炭素のうち 50%~80% が カーボンナノチューブ</p> <p>[2] Z. Li, D. Yuan, H. Wu, W. Li, D. Gu, <i>Inorganic Chemistry Frontiers</i>, 5, 208 (2018).</p>
LiCl-Li ₂ O	1073 K	CO ₂	<p>得られたLi₂CO₃を内包したCNTや ナノ粒子のカーボンを燃焼し、 ナノダイヤモンドの合成</p> <p>電解反応での合成ではない</p> <p>[3] A. R. Kamali, <i>Carbon</i>, 51, 123 (2017).</p>

アモルファスカーボン、グラファイト、カーボンナノチューブの報告例は多数ある
 ダイヤモンド電解合成の報告例はない

ダイヤモンドについて

ダイヤモンドの生産

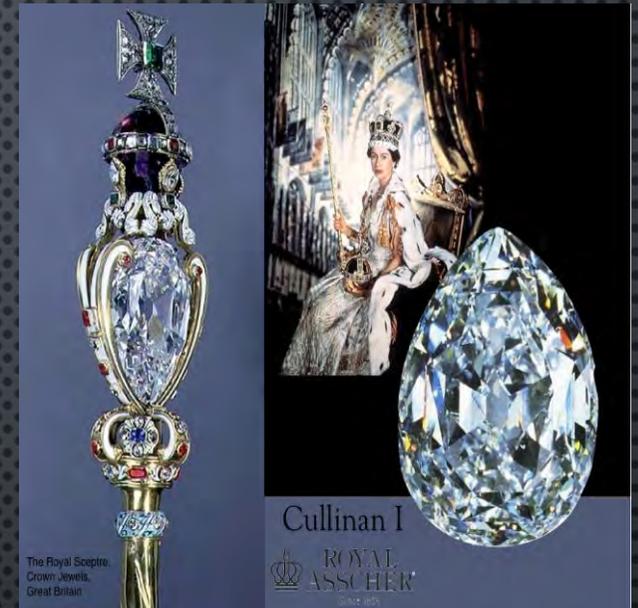
5600 ton の土中から、ダイヤモンドは 1 kg しか取れない！



[USGS, Minerals Yearbook 2010]

Cullinan I

「偉大なアフリカの星 (The Great Star of Africa)」と呼ばれる。王笏 (Royal Scepter) に飾られている。英王室の所有する世界最大級のカットダイヤモンド(530 carat)



<http://www.hamiltonjewelers.com>

- ・ 天然ダイヤモンド生産量 (世界) : 24 ton / year
- ・ 人工ダイヤモンド生産量 (世界) : 3000 ton / year

c.f.
金の生産量 (世界) : 3000 ton / year

価格

- ・ 原石 : 数千～数十万 円 / g
- ・ 宝飾用ダイヤモンド : 300,000 ~ 500,000,000 円 / g
- ・ 工業用ダイヤモンド : 500 円 / g

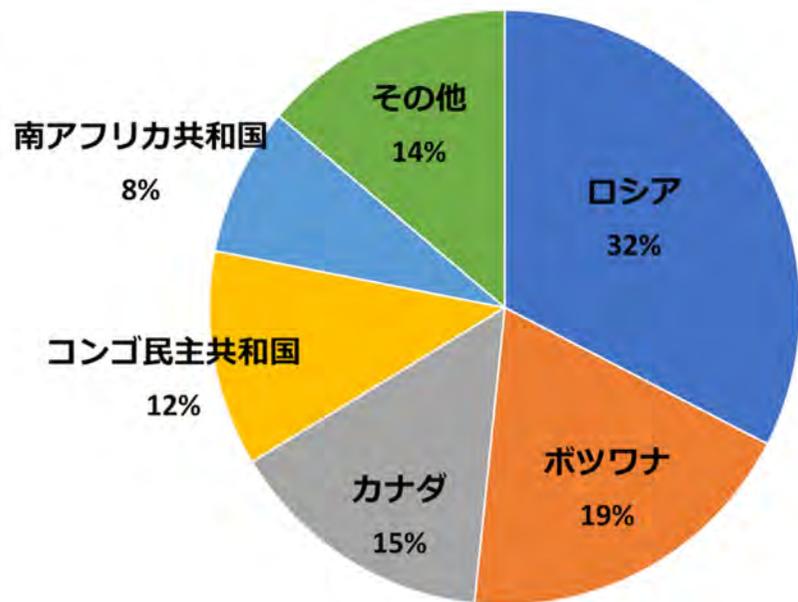
ギリシャ語のアダマス (Adamas)【征服しがたい】に由来するダイヤモンドは、その硬さと美しい光沢故、最も価値の高い宝石である。古くより王侯貴族に重宝されている宝石であり、現代では結婚指輪の定番となっている。



<http://www.tiffany.co.jp/>

世界のダイヤモンドの生産量

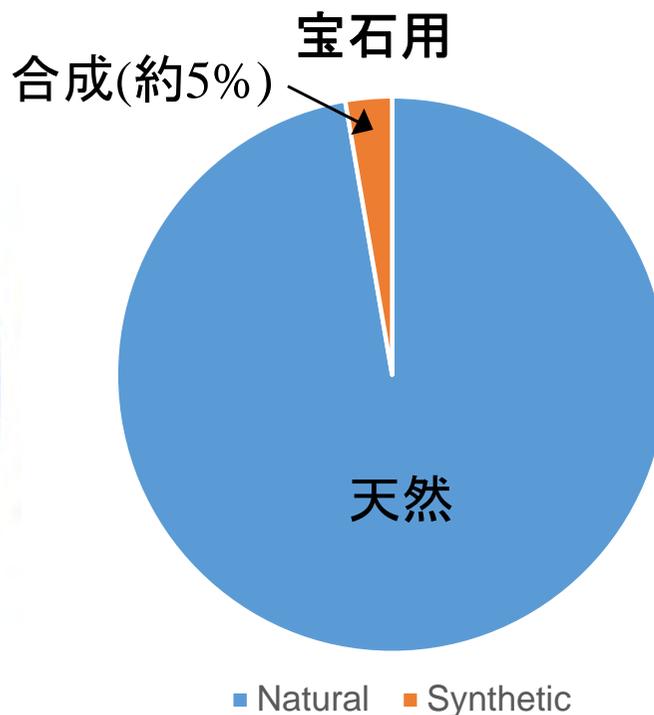
天然ダイヤモンド
国別生産シェア(2021年)



約1.2億カラット=24トン
(1カラット=0.2 g)

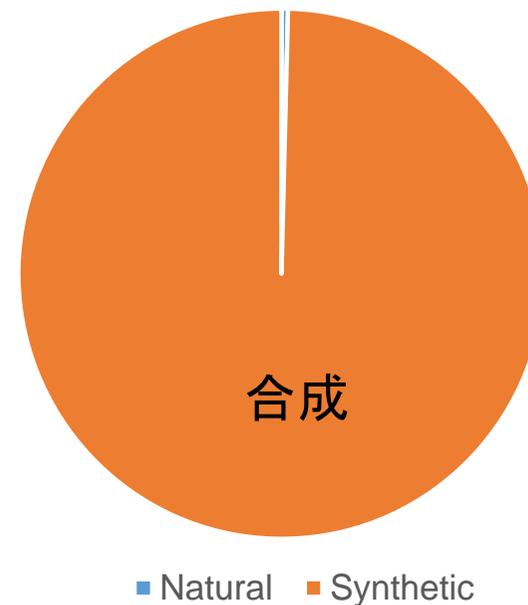


天然と合成の生産シェア(2017年)



約710万カラット=1.4トン

工業用



約3000トン
金の生産量と
ほぼ同じ

出典:ウェブサイト「資源について」
(<https://resource.ashigaru.jp/list/diamond/>)

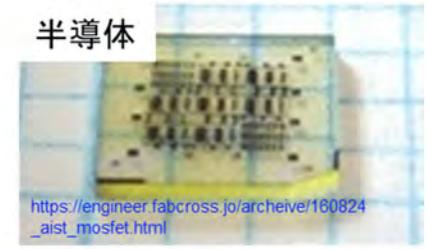
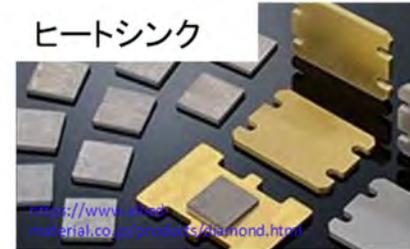
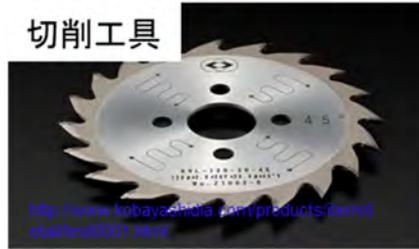
USGS 2018 Minerals Yearbook, DIAMOND,
INDUSTRIAL [ADVANCE RELEASE]

ダイヤモンドの特徴と同定法

特長

- 高硬度
- 高熱伝導性
- 高電子移動度
- ワイドバンドギャップ

宝石としてだけでなく、工業的に広く利用されている



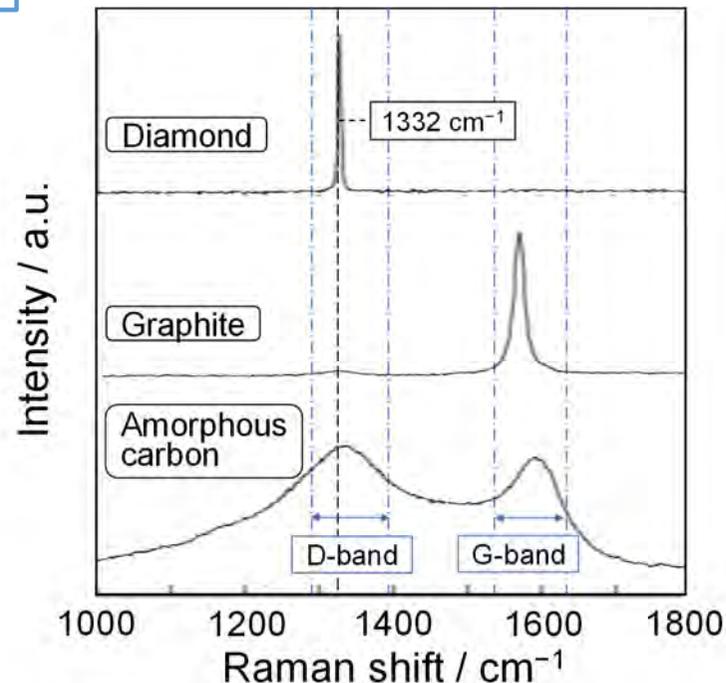
主要なダイヤモンド同定法^[1]

<ダイヤモンド>

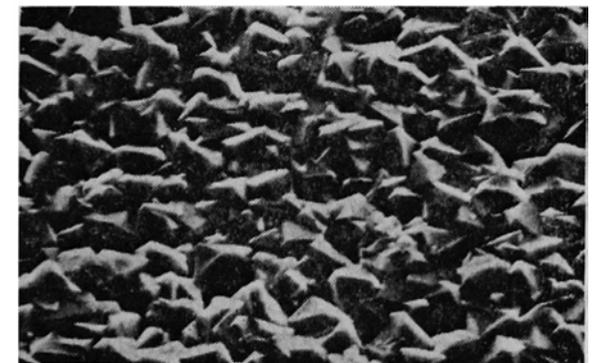
- sp^3 混成軌道を有する
⇒ ラマン分光にて 1332 cm^{-1} にシャープなピークを検出
- ダイヤモンド構造を有する
⇒ SEMやTEMで結晶性の形状を観察

[1] Jes Asmussen, D. K. Reinhard, *Diamond Films Handbook*, Chap. 1, Marcel Dekker, Inc. (2002).

炭素のRaman分光結果

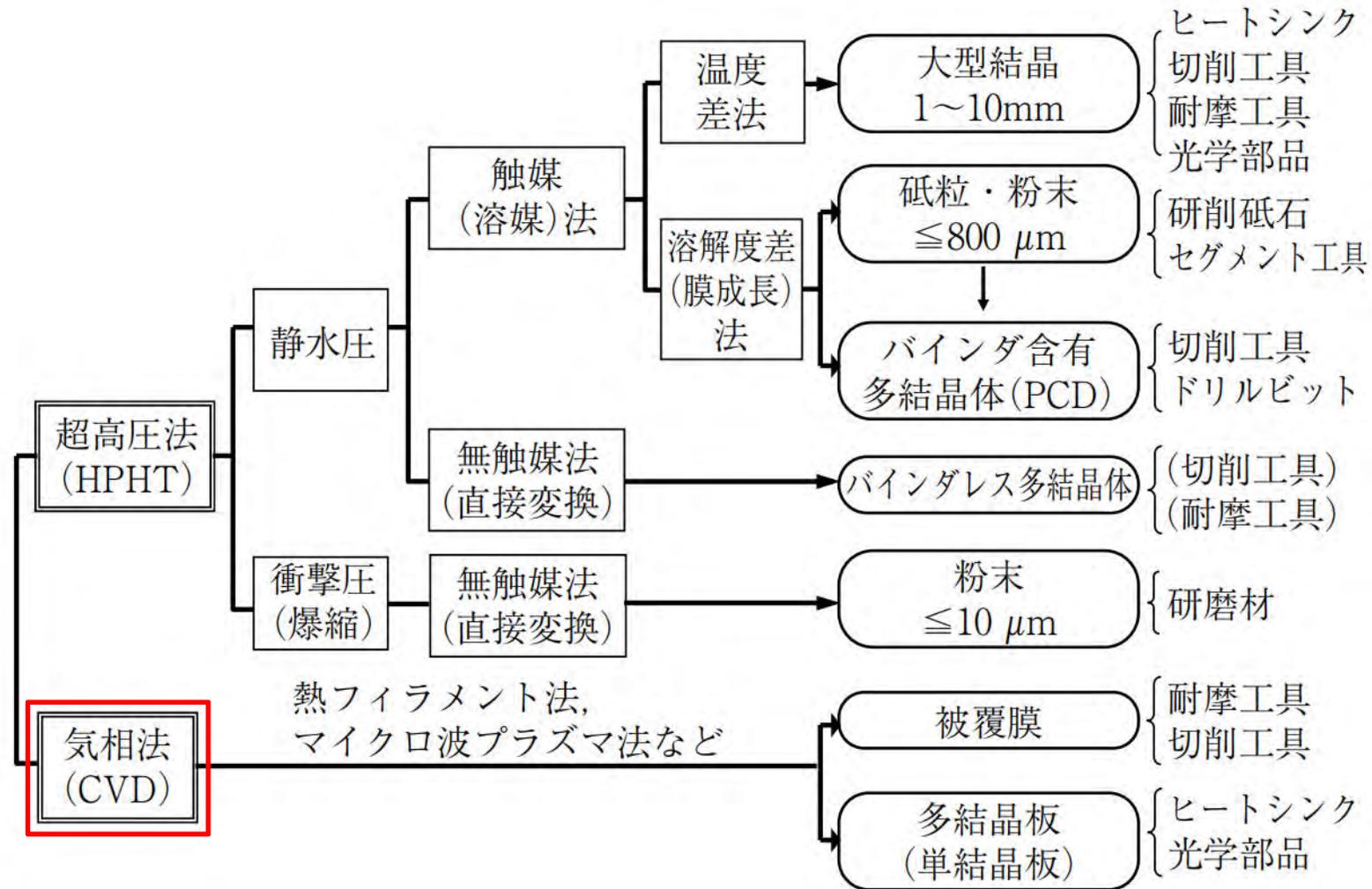


ダイヤモンドのSEM画像^[2]



[2] Y. Hirose, Y. Terasawa, K. Takahashi, K. Iwasaki, K. Tezuka, *OYOBUTURI*, **56**, 247 (1987).

従来のダイヤモンド合成法



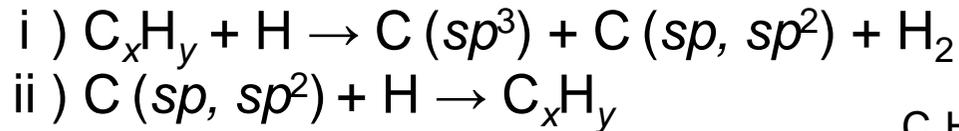
炭素材料学会, カーボン材料実験技術(製造・合成編), 株式会社国際文献社, 223-240 (2013)

いずれの合成法も、**生産コストが高く、装置の大型化が困難**

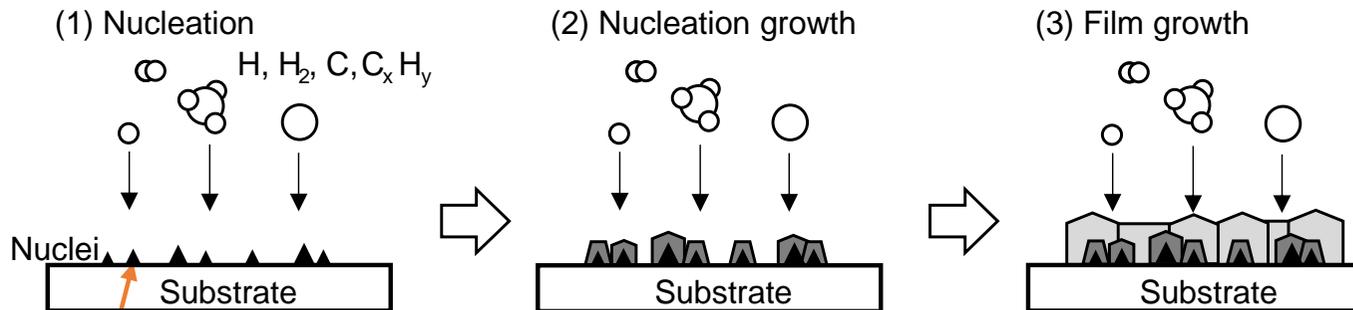
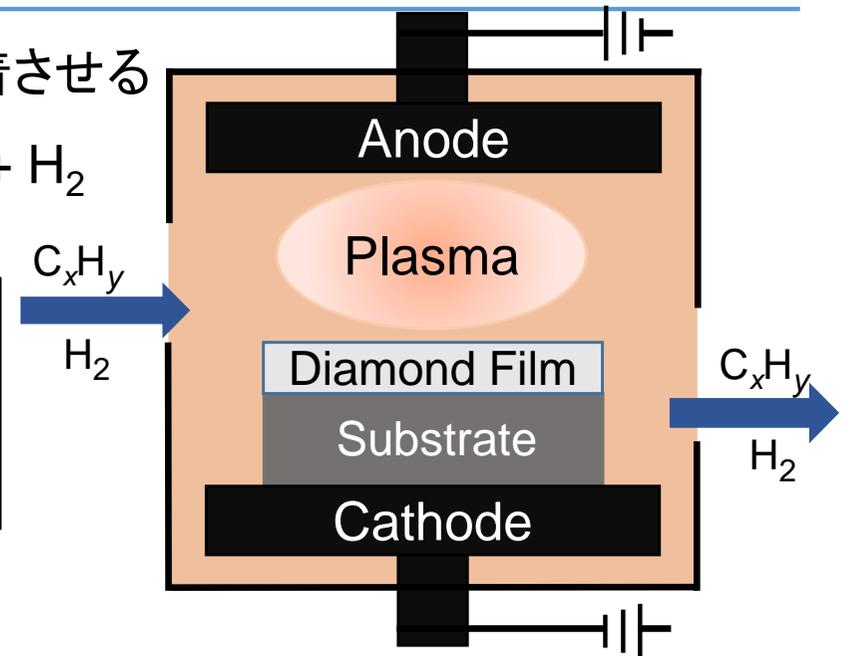
気相法の合成原理に着目

気相法(CVD法)の原理

炭化水素を解離、励起させ、炭素を基板上に蒸着させる



- ①炭化水素と原子状水素が反応し、
C(sp, sp²)、C(sp³)がそれぞれ生成
- ②原子状水素は、成長表面のC(sp, sp²)を優先的に除去
- ③C(sp³)が選択的に成長し、薄膜が形成



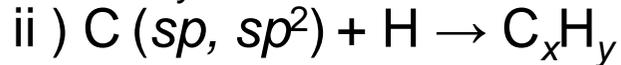
種付け処理したダイヤモンド

※種付け処理 (seeding)

核成長の起点とするため、ダイヤモンド微粒子を残留させる

気相法(CVD法)の原理

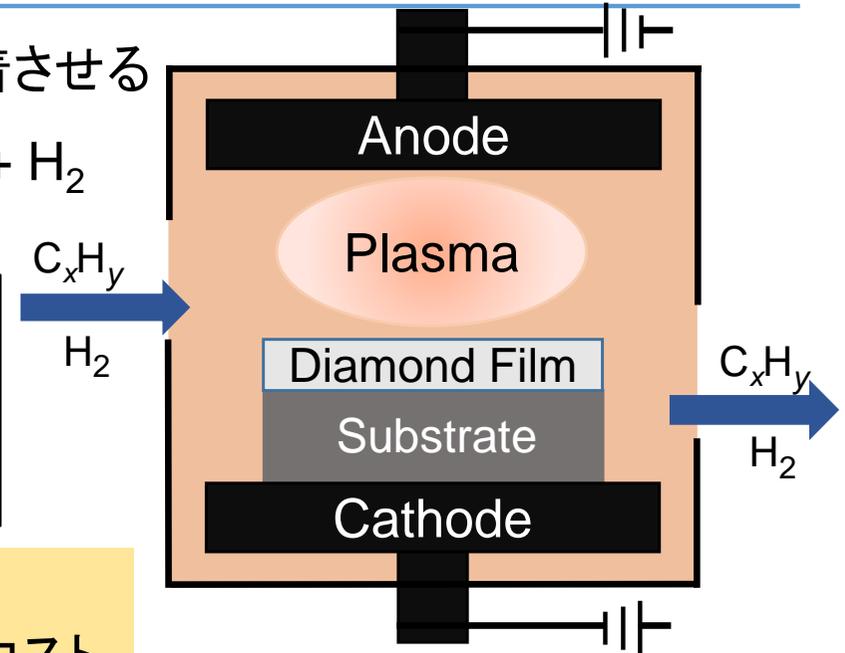
炭化水素を解離、励起させ、炭素を基板の上に蒸着させる



- ①炭化水素と原子状水素が反応し、
C(sp , sp^2)、C(sp^3)がそれぞれ生成
- ②原子状水素は、成長表面のC(sp , sp^2)を優先的に除去
- ③C(sp^3)が選択的に成長し、薄膜が形成

利点：高品質かつ膜状のダイヤモンドが合成可能

欠点：装置大型化困難、高エネルギー消費 → 高コスト

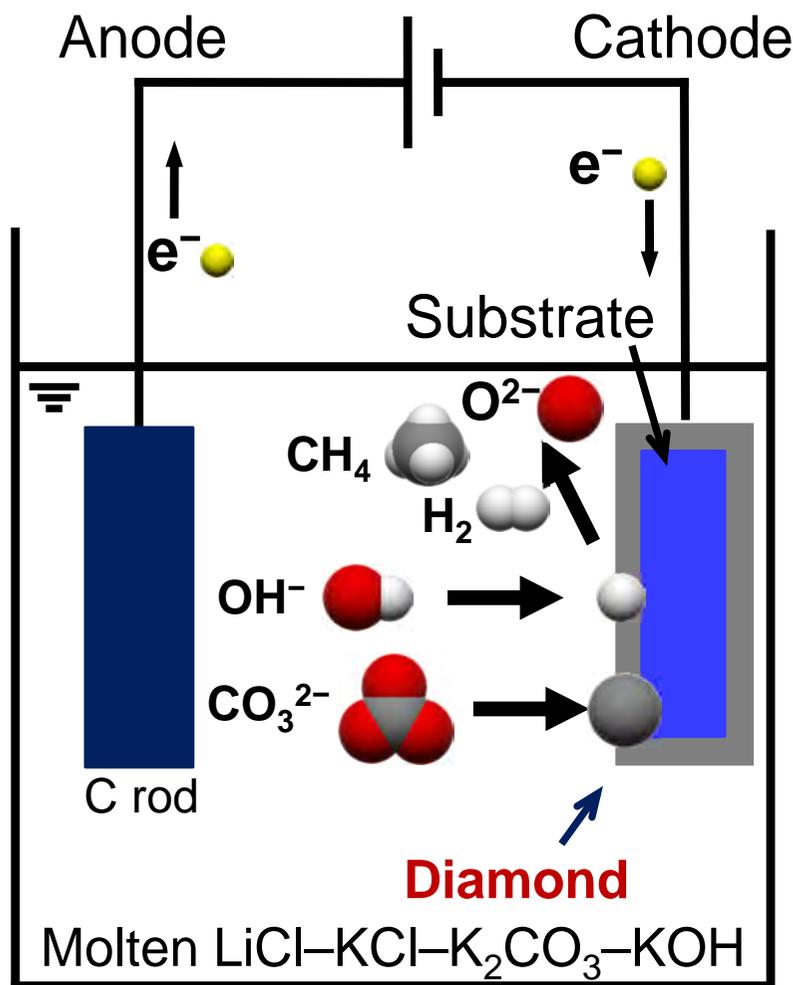


同様の反応を、「大型化可能な装置」かつ「低エネルギー消費」で実現できないか

熔融塩電解

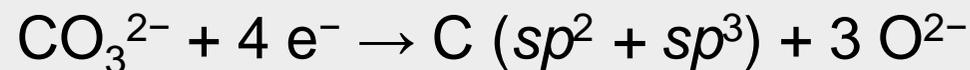
新規ダイヤモンド電解合成法の原理

熔融 $\text{LiCl-KCl-K}_2\text{CO}_3\text{-KOH}$ 中 ($650\sim 750^\circ\text{C}$) において

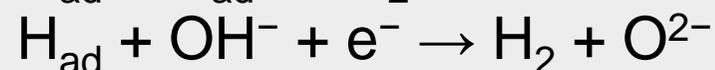
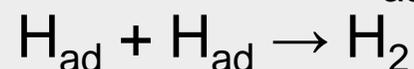


カソード反応

(1) 炭素の析出



(2) 水素の生成



(3) $\text{C} (sp^2)$ の除去



炭素と水素を同時に生成

➤ $\text{C} (sp^2)$ をメタンとして除去

➤ $\text{C} (sp^3)$ のみが選択的に成長

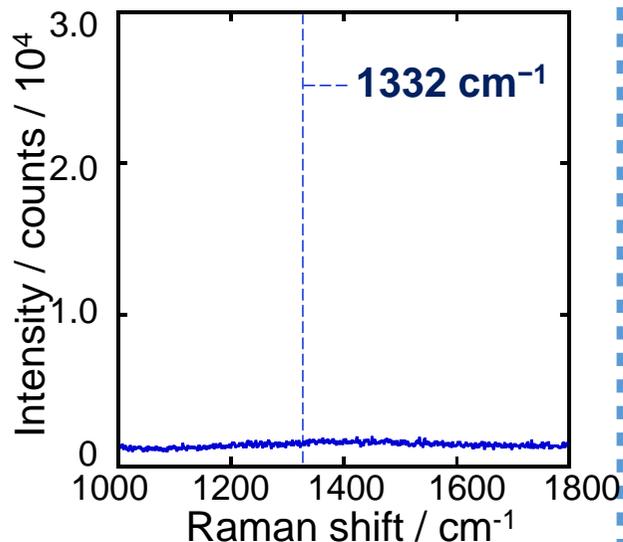
結果：試薬の K_2CO_3 と KOH を投入したときのダイヤモンド

Before

基板外観



Raman

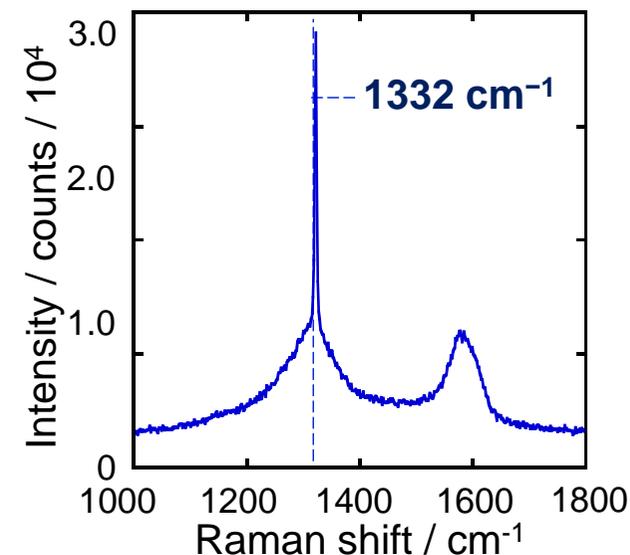


After

基板外観

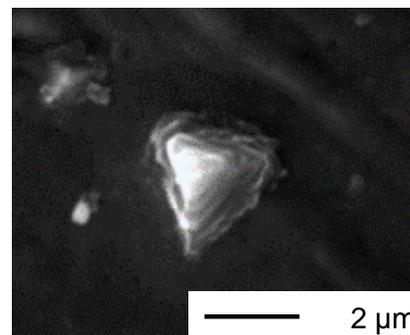


Raman



ダイヤモンドのシャープなピークを観測

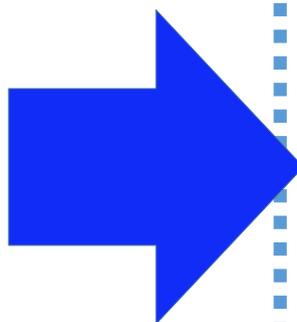
SEM/EDX



	at %
C	78.86
Ni	21.44

角ばった析出物を確認
炭素の析出を確認

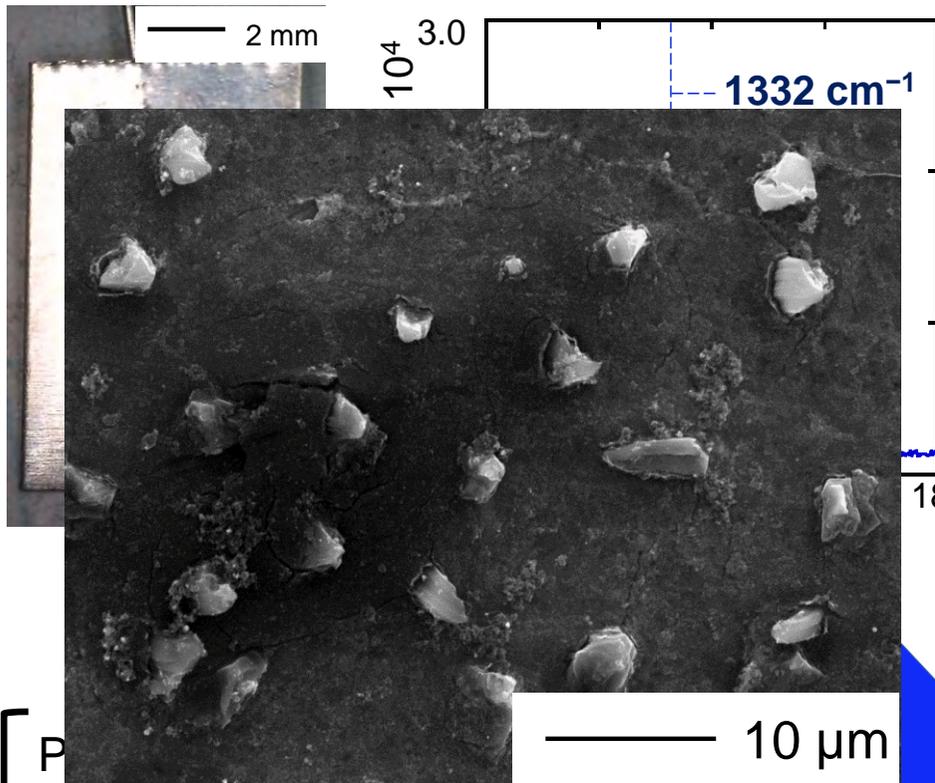
Potential : 1.10 V
Electric quantity : 10 C cm⁻²



結果：試薬の K_2CO_3 と KOH を投入したときのダイヤモンド

Before

基板外観



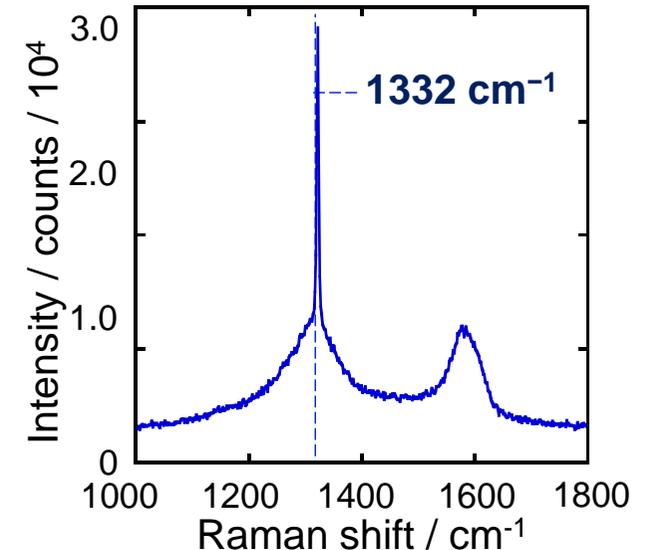
Raman

After

基板外観

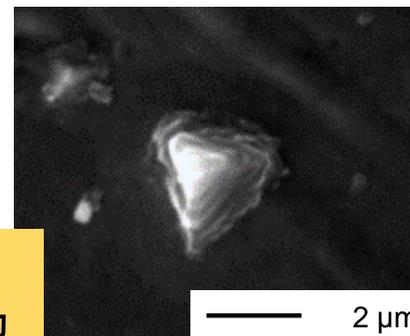


Raman



ダイヤモンドのシャープなピークを観測

SEM/EDX



	at %
C	78.86
Ni	21.44

角ばった析出物を確認
炭素の析出を確認

- ✓ 粒径は最大で約 $2\ \mu\text{m}$
- ✓ 1つのサンプルから多数のダイヤモンドを確認

CO₂(とH₂O)を原料とした電解ダイヤモンド合成

当日スライドで説明

実験装置：CO₂およびH₂Oを原料とした実証

当日スライドで説明

結果：様々な電位での定電位電解と解析

当日スライドで説明



Electrochemical Synthesis of Diamond in Molten LiCl-KCl-K₂CO₃-KOH

Yutaro Norikawa,^{1,*}  Yurina Horiba,¹ Kouji Yasuda,^{2,3,*}  and Toshiyuki Nohira^{1,*} 

Y. Norikawa, Y. Horiba, T. Nohira, *J. Electrochem. Soc.*, **170**, 052507 (2023). 10.1149/1945-7111/acd4f4

熔融塩でカーボンリサイクル CO₂からダイヤモンド

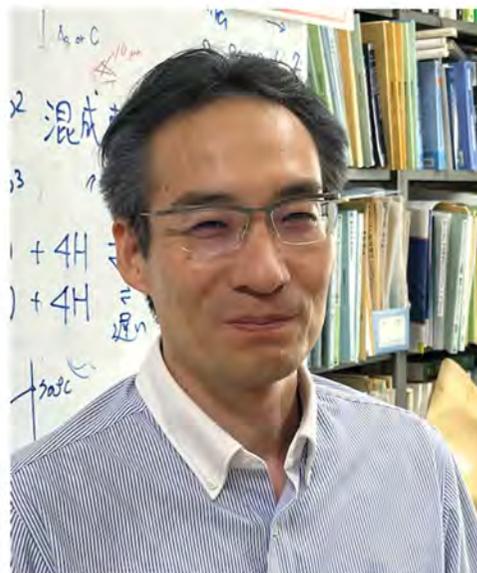
科学記者の目 編集委員 滝順一

2023/7/19 2:00 | 日本経済新聞 電子版

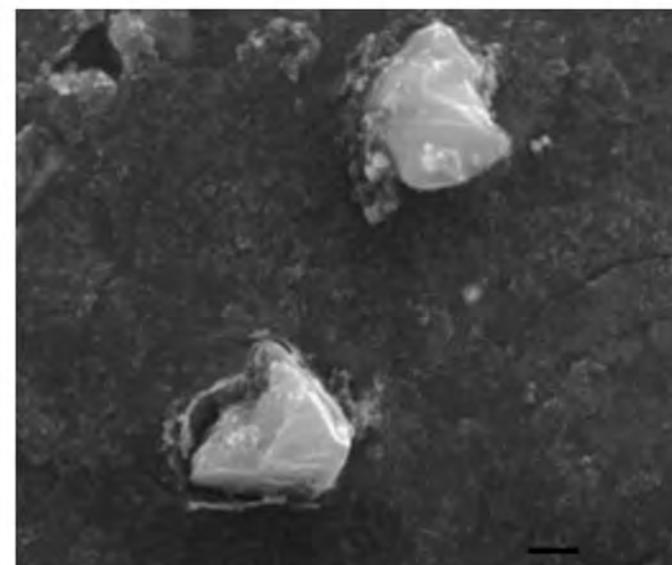
野平教授らが開発した手法は、塩化リチウムや塩化カリウムなどの混合熔融塩にCO₂と水を吹き込み、電気分解を行うものだ。陰極にダイヤモンドが析出しメタンガスが発生する。陽極側からは酸素ガスが生まれる。熔融塩の中でCO₂の炭素と酸素が分解された結果だ。

現状では陰極の金属の一部にダイヤモンドができる状態で陰極の全面にダイヤモンドの薄膜ができているわけではない。「原理的にCO₂リサイクルでダイヤモンドを作れると実証した段階」（野平教授）で、量産までにはまだ課題が多い。

難しいのは、炭素がダイヤモンド（3次元結晶）の形以外にグラファイト（黒鉛、2次元結晶）や結晶構造を持たないアモルファス（非晶質）など様々な形で析出する点だ。炭素の形態を決めるのに重要なのは水素の存在で、CO₂と一緒に水を吹き込んで、水が分解してできる水素の量などを微調整することによってダイヤモンドを作るのに成功した。



野平俊之・京都大学エネルギー理工学研究所教授



陰極上にできたダイヤモンドの粒子の電子顕微鏡写真=野平俊之教授提供

現在までのまとめ

熔融塩電解によるCO₂の資源化：

- アモルファスカーボンに加えて、ダイヤモンドも生成可能
- 副生物も有用：水素、メタンなど

研究課題：
目的物質の収率の向上
反応速度(電流密度)の向上
連続プロセスの開発



革新的「カーボンネガティブ技術」の確立へ