

特集記事・1

地球環境を考慮した排出ガス削減への鉄鋼業の取り組み

人為的CO₂排出源のマクロな構造と削減技術の方向性

Structure of Anthropogenic CO₂ Emission Sources and Perspectives for Reduction Technologies

中垣隆雄

Takao Nakagaki

早稲田大学理工学術院
教授

1 炭素循環と人為的CO₂排出源の概観

2015年9月に、国連サミットにおいて「持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択され、2030年までの15年間で持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals) の達成に対して努力することが約束された。SDGsの17ゴールの多くがエネルギー・環境に関係し、日本としても気候変動、エネルギー、持続可能な消費と生産等の分野を中心に、国内外においてアジェンダの実施に貢献していくとの方針が政府から発表された。また、同年12月には第21回気候変動枠組条約 (UNFCCC) の締約国会議 (COP21) にて採択されたパリ協定の第2条に、世界全体の平均気温の上昇を産業革命

以前よりも2℃高い水準を十分に下回り、さらに1.5℃以下に抑える努力の追求、第4条には今世紀後半における人為起源の温室効果ガスの排出量と吸収源による除去量とのバランスがそれぞれ明文化された。日本もパリ協定を批准していることから、達成に向けた努力義務が課せられており、提出した約束草案では2030年に2013年比で-26%を達成するとの目標を掲げ (Pledge)、5年ごとのGlobal Stocktakeで評価・見直し (Review) を受けることになっている。パリ協定の科学的根拠とされるIPCCのAR5では、世界的な気候変動と人為起源のGHG (Greenhouse Gas, 温室効果ガス) との関係性がExtremely likelyと表現された。図1の最新の地球全体の炭素循環 (The global carbon cycle)¹⁾によると、自然現象として大気と陸域・海洋でそれぞれ100 GtC/y (年間の

The global carbon cycle

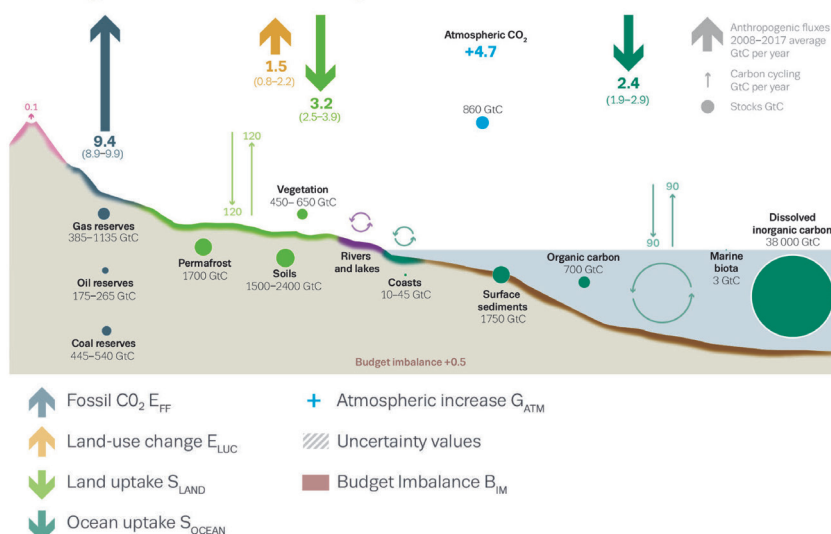


図1 地球全体の炭素循環 (The global carbon cycle)

ギガトンの炭素フロー) 程度の吸収と放出 (メタン等を含む) があり、土壌や海底堆積物、海洋中に溶解したCO₂ (CO₃²⁻やHCO₃⁻などを含む) などを巨大なCarbon sinkとして均衡を保っている。現在は、化石燃料燃焼によるCO₂ (9.4 GtC/y) や森林農地化・都市化に代表される土地利用の変化 (1.5 GtC/y) などの人為起源の大気放出と吸収 (陸域・海洋で5.6 GtC/y) が重なり、大気中のCO₂は4.7 GtC/y (2008~2017の平均値) 増加している。人類を含むあらゆる動植物は炭素の化合物で形成されて100 GtC/yの自然の炭素循環の一部となっており、人為起源か否かを問わずCO₂自体は毒性ガスでもない。ところが近代化とともに自然の炭素循環に対する人為的な活動の影響が数%レベルに達して温暖化問題を引き起こしており、気候安定化と持続可能性の点においては、パリ協定第4条の人為起源GHG正味排出量ゼロの目標に不可逆変化の前に到達しなければならないことになる。

国内の人為起源のGHGについては国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) がまとめてUNFCCCに提出しており、データも公開されている。2017年度のGHG排出量は2013年度から4年連続で減少してCO₂換算で1.292 Gt、そのうち92.1%がCO₂であった (図2)。CO₂はエネルギー起源と非エネルギー起源に大別され、それぞれ1110.9と79.3 Mtでエネルギー起源が93.3%を占めた。これらの積から、エネルギー起源のCO₂が温室効果ガスの86.0%と圧倒的な主要因であり、排出削減のメインターゲットとなっている。

それでは一旦CO₂から離れ、エネルギーに視点を移して国内のフローを見てみる。パリ協定の約束草案の基準となる2013年のエネルギーフローは図3²⁾の通りである。一次エネルギーとして再生可能エネルギーや原子力など1.64 EJ (エクサジュール=10¹⁸ J) の非化石と石炭・石油・天然ガスの合計21.02 EJの供給があり、そのうち9.30 EJを用いて3.84 EJの電力に変換し、民生家庭・業務、産業および輸送の各部門の電力需要に供給、残りは直接的に需要端で利用されている。このフローを横目に、再度GIOの部門別のCO₂排出

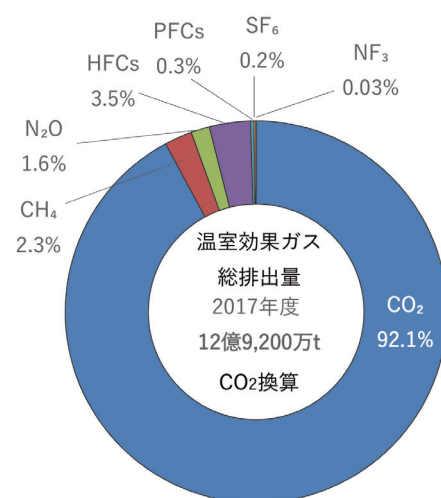


図2 総排出量に占める各種温室効果ガスの排出割合 (2017年度)
出典: 国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィスウェブサイト

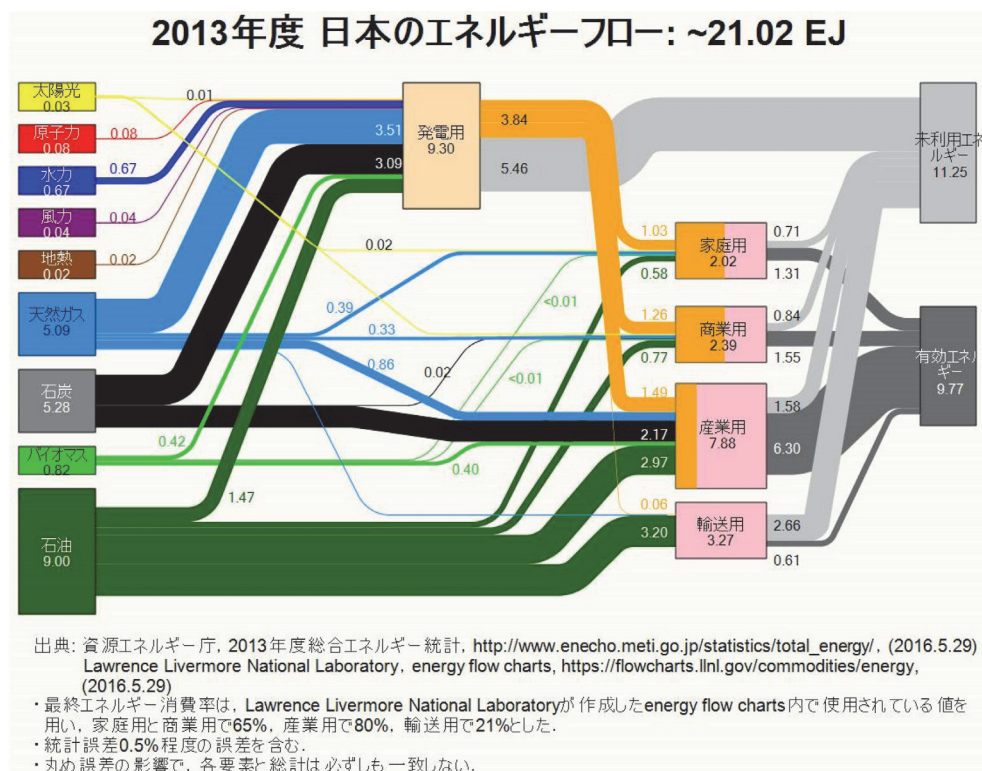


図3 2013年度の日本のエネルギーフロー (単位はEJ)

量（2017年度、図4（下））を見ると、エネルギー転換部門（電気事業者と熱供給事業者）が44.2%で最も多く、次いで産業（26.6%）、運輸（18.5%）の各部門となっている。エネルギー転換部門は最低限の自家消費を除き、全て他部門に電力や熱を送出していることから、最終需要端にエネルギー転換部門のCO₂を再配分（図4（上））すると産業部門が37.2%、残りは運輸（19.2%）、業務（18.7%）、家庭（16.7%）でほぼ同レベルの排出量になる。すなわち、エネルギー需給構造から見てCO₂排出量は、民生家庭・業務部門ではエネルギー転換部門の一次エネルギー源の影響を大きく受け、輸送部門では当該部門が直接調達する一次エネルギー源で決定されており、これは図3のエネルギーフローからも理解できる。

2 CO₂排出削減とエネルギーのメガトレンド

マクロフレームの人口動態や経済成長に大きく影響されるエネルギー需給について概観する。IEA（国際エネルギー機関）のWorld Energy Outlook 2018（WEO2018）によると、2017年の年間の世界の一次エネルギー需要（Total Primary Energy Demand, TPED）は約585 EJ、そのうち単独で調整機能のない風力、太陽光などのOther renewables（地熱等も含む）による供給は11 EJであった。IEAのEnergy Technology Perspectives 2017によると、2060年の予測として、リファレンス技術シナリオでは需要が843 EJまで増加、Other renewablesは+85 EJで約11%のシェアになる。これに対し、パリ協定に明記された2℃以内抑制のシナリオ（2DS）では、需要が664 EJに抑えられ、Other renewablesは+165 EJ増加して26%のシェアになると報告されている。これまでは経済成長とTPEDの増加に関係性が認められたが、これらを切り離し（デカップリング）、産業部門の二酸化炭素強度（CO₂ Intensity、ここでは1000ドルの付加価値に対するCO₂排出量でtCO₂/\$1000VAの単位）は2017年の0.27から2040年には0.12まで引き下げるとしたSustainable Development Scenarioも示している（同WEO2018）。

国内に視点を移すと、2018年7月に閣議決定した第5次エネルギー基本計画においても、政策の基本的視座である安定供給、経済的効率性、環境適合性および安全性、すなわち3E+Sと多層化・多様化した柔軟なエネルギー需給構造の構築は改訂前と変わっていない。2030年に向けた政策対応の中では、再生可能エネルギーの「主力電源化」が掲げられた以外は、ほぼ第4次エネルギー基本計画を踏襲している。再エネ（以降本稿では変動性再エネあるいは自然変動電源を意味するVariable Renewable Energy, VREと略記）については2030年までに着実に進展すると見られるが、課題と対策として発電コストの低減と調整力の確保が重要で、電力システム改革の進展と共に広域的・柔軟な調整に対応できる系統利用ルール（日本版コネクト&マネージ）や、蓄電池だけでなくネガワットやデマンドレスポンスなどを含むカーボンフリーの調整力開発が2030年までに可能な項目として挙げられている。一方、2050年とその先を見据えた超長期の方針についてもエネルギー基本計画の改訂に新規に盛り込まれた。パリ協定の約束草案として2050年までに80%削減を目指すとした現在から2030年までの延長線にはない長期目標に対し、経済産業省にエネルギー情勢懇談会が設置され、2050年に向けては複雑かつ不確実性に対応すべくあらゆる選択肢を追求する「エネルギー転換・脱炭素化を目指した全方位での野心的な複線シナリオ」（2018年3月30日エネルギー情勢懇談会参考資料、論点2-1）の採用が取りまとめられた。さらに次世代のエネルギーシステムが混沌とする中で、むしろそれを成長戦略と位置づけた長期戦略が2019年6月に閣議決定された。その中では特に水素導入の加速化に加え、CO₂の再利用による大気放散抑制について新たに言及された。その内容は、余剰風力が問題となったドイツを中心とした欧州で先行するPower to gasの動向を参考に、同時に発表されたカーボンリサイクル技術ロードマップ（図5）に基づいている。このような国内・国際的な方針決定から、2050年以降も見据えたエネルギーを取り巻くメガトレンドを抽出してみると、以下の3点が挙げられる。

Decarbonization：一次エネルギー源の低炭素化（脱化石化）

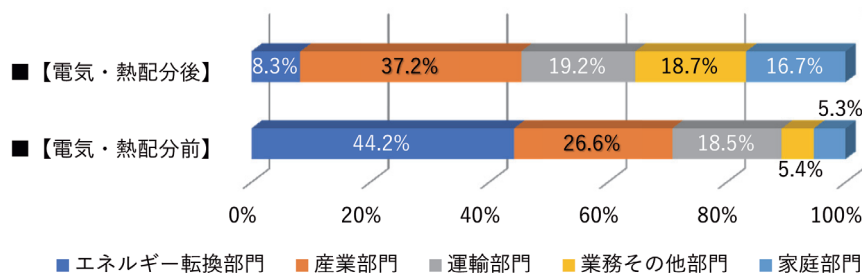


図4 部門別のCO₂排出量（2017年度、電気熱配分前・後）

出典：国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィスウェブサイト

Decentralization：民生部門を中心とした大規模集中型システムから小規模分散型システムへの移行

Electrification：輸送やものづくりを含むあらゆるエネルギー需要（効用）の電化（エネルギーキャリアとしての水素利用も含む）

すなわち、それぞれの需要端の部門での省エネはもちろん必要ではあるが、需要の形態を化石燃料の直接利用から電化にシフトする方向と、その電源の一次エネルギーをエネルギー変換部門か各部門での自家発電かを問わず、脱化石化する方向の二つが同時進行していくと見られる。電化のメガトレンドとして電気事業については、2030年のエネルギーミックス目標と0.37 kg-CO₂/kWhの排出係数目標に沿って、エネルギー供給構造高度化法によって年間販売電力量が0.5 GWh以上の小売電気事業者には非化石電源比率を44%以上にすることを求めている。

3 エネルギー転換部門のCO₂排出削減技術

メガトレンドは、国や地域の様々な制約や状況によってローカライズされることになる。エネルギー計画は国家戦略の重要な柱であり、国を境界としたエネルギーシステムにおける日本特有の制約や状況を電力中心に整理してみる。一日の24時間や季節、災害時の一時的な大変動も含むあらゆる時

間軸での変動を許容できる動的なエネルギー・物質フロー、全国津々浦々まで行き渡る送電・物流網による空間的に公平なサービス、有限な資源による便益の持続性と廃物処理の世代間リレーのいずれもが破綻せずに成立することが前提である。つまり、3E+Sで本質的に確保すべきは、「持続可能かつ、誰もが無理のない価格で安定的にエネルギーを利用できること」である。周囲を海洋に囲まれた島嶼国であり、現在の東アジア情勢を鑑みると陸続きの欧州のような国際連系線の実現は困難と見られ、備蓄可能な燃料と自立した安定な電源の確保は必要不可欠である。人口減基調ではあるものの1億2千万人強（2017年）が暮らし、世界第3位のGDPの創出に年間約1000 TWhの電力需要があるが、そのうち2/3は東京・中部・関西電力の3社の管内に集中しており、上位3社の40%は安定電源が欠かせない産業部門の需要である。国土は南北に長く、賦存量の多い北海道・東北と九州にVREが急速に導入されつつある。管内で地産地消に利用できる揚水発電は北海道と九州で0.8および2.35 GW程度に留まり、大消費地への広域融通も北北連系（0.9 GWに増強済み）や東西の50/60 Hz周波数変換（2027年までに3 GWに増強予定）の容量がボトルネックとなる。メガトレンドに沿ってVREを大量導入・主力化するための本質的な課題は、時空間の需給ミスマッチの解消であり、変動に対する調整力のFlexibility（柔軟性）と輸送・再変換も考慮した余剰の安価なStorage（蓄エネ）が主たる解決策のキーワードとなる。

- カーボンリサイクル：利用（Utilization）に焦点を当て、世界の産学官と連携しつつ研究開発によるイノベーションを図り、地球温暖化、エネルギーセキュリティ等の課題解決に貢献。

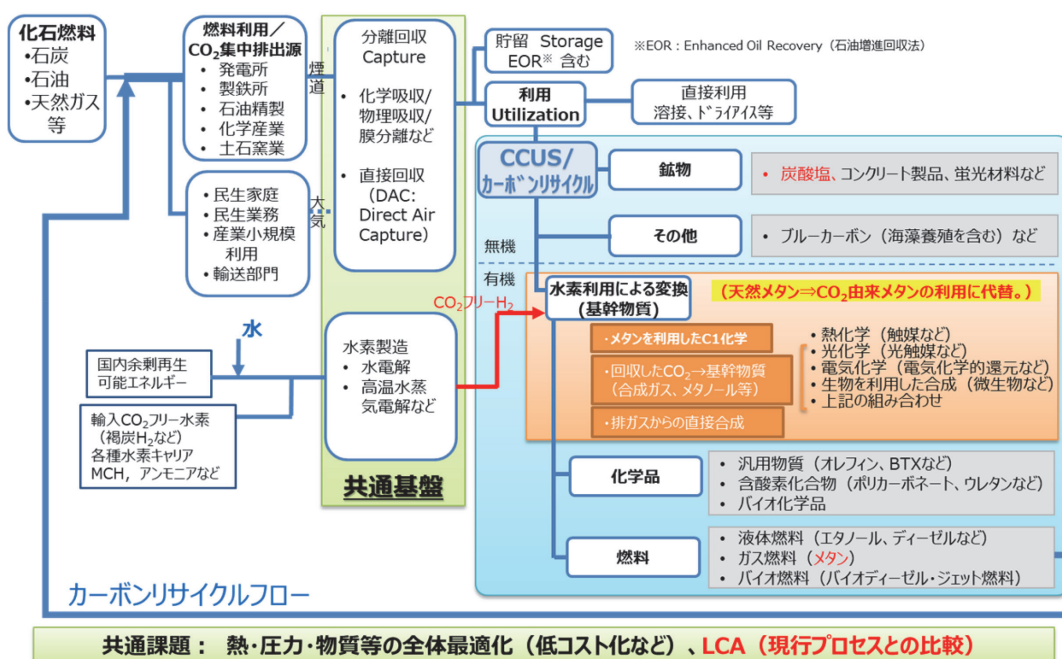


図5 カーボンリサイクル技術ロードマップ

出典：経済産業省カーボンリサイクル室（一部私案加筆）

このような状況から、効用の電化において重要性が増す発電のエネルギー転換部門の主たるCO₂排出源である火力発電は、必要な時に必要な分だけすぐに出せる「柔軟性と機動力」のある調整力電源、ガバナフリーや負荷周波数制御など回転慣性の機能提供による系統全体の周波数の安定化が主な役割であり、ランプレート向上、高速起動停止、熱効率の低下を最小限に留めた下げ代確保などの柔軟性向上とCO₂排出削減が課題となる。前述の通り、経済成長とCO₂排出量のデカップリングが本質的に目指すところであり、電化のメガトレンドからエネルギー転換部門で発電量を無理に押し下げる必要はない。

火力発電のCO₂の大気放散の実質的な回避は、できるだけ「入れない」「作らない」「出さない」の三つの基本対策に集約できる。火力発電は、化学的なエクセルギーを保有する燃料をInputとして、燃焼と熱機関によって熱的なエクセルギーを経由して動力のエクセルギーに変換（Conversion）し、不要な廃物を排出（Emission）するシステムと見なせる。Inputに対しては投入燃料の脱化石化として、炭素分が少ない低炭素燃料か、実質的に排出していないカーボンニュートラルな燃料への置換が対策となる。低炭素では石炭より天然ガス、さらに究極的には水素（キャリアとして炭素を含まないアンモニアを含む）が有利であり、カーボンニュートラルではバイオマスなどの利用が考えられ、いずれもできるだけ化石燃料のCを入れない対策となる。

Conversionでは需要に対してCO₂をできるだけ「作らない」ように少ないInputで変換する技術、すなわち高効率化に他ならない。しかしながら、A-USC（先進超々臨界圧火力発電）や1700℃級のGTCC（ガスタービン複合発電）など高

温化は限界に近く、高温化に伴うエクセルギー的なゲインの伸び代も小さい。温度に依存する熱的なエクセルギーの上限に縛られないためには、SOFCをトッピングとしたトリプルコンバインドサイクルやIGFC（石炭ガス化燃料電池複合発電）などがあるが、当面は寿命とコストが問題となる。この他、今後機会が格段に増える部分負荷運転での効率維持も実質的な作らない技術である。電気事業連合会の10社の基礎排出係数（2017年度実績）は、石炭火力比率の高い中国電力で0.669 kg-CO₂/kWh、北海道電力も0.666 kg-CO₂/kWhで高く、福島第一原発の事故で原子力は全て止まったままの東京電力エナジーパートナーは、天然ガス複合発電へのシフトが進み0.475 kg-CO₂/kWhとなっている。火力発電の技術ごとに発電所の建設から運転時の燃料消費、解体廃棄まで通したライフサイクルでのkWhあたりのCO₂排出量で見ると、図6³⁾の通り石炭を燃料とした場合、研究開発段階の700℃級のA-USCはおろか、1500℃級ガスタービンを用いたIGCCでも前述の0.37 kg-CO₂/kWhの達成は不可能である。天然ガス焚きにおいても、研究開発段階の1700℃級ガスタービンによる複合発電でも0.4 kg-CO₂/kWhである。水力発電や地熱発電の大幅な発電量増加は困難なため、前述の高度化法の目標をクリアするにはVREの積極的導入や原子力発電の再稼働を急ぐなど、年間発電量に対する火力発電の比率を下げることが基本となる。

「出さない」については文字通り最後の煙道から出さないことを意味し、そのためにはCO₂を分離回収して貯留あるいは人工的にカーボンニュートラル化した炭素循環燃料として再利用するしかない。作らない技術は部分負荷対策を除き新設火力でのみ対策が可能であって、電力市場の自由化が進行

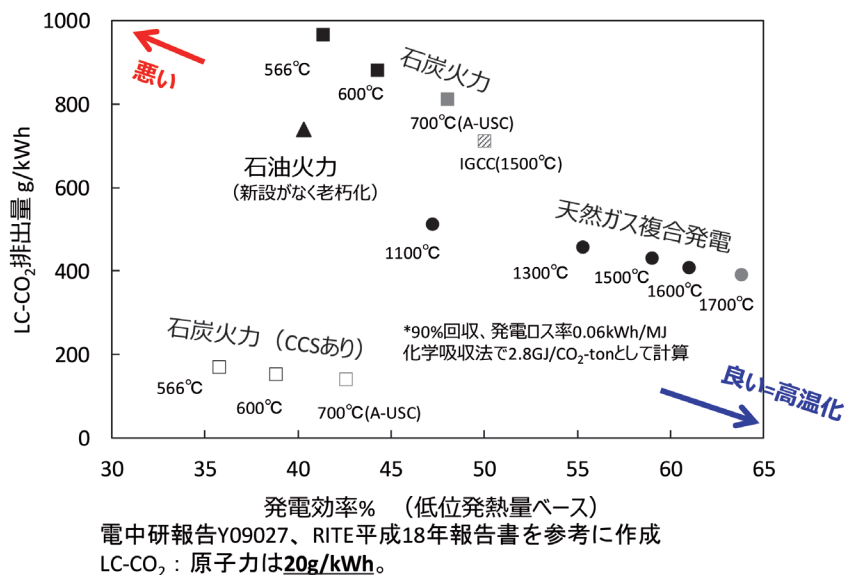


図6 火力発電の技術ごとのライフサイクルCO₂排出量と発電効率

中である現在では発電事業者にとって投資負担が大きいばかりか、リブレースしてもCO₂削減量の伸び代が80%削減とは程遠いことが難点である。一方、入れない技術は燃料調達为本質であり、高水素混焼率の場合は本体の燃焼器改造のための追加コストがかかるが、水素およびバイオマスの低混焼率あるいはカーボンリサイクル燃料利用であれば機材の改造や変更は最小限で済む。また、煙道から出さない燃焼後分離も既設火力へのレトロフィットが可能である。したがって、これまでは作らない技術への投資や研究開発が中心であったが、分離回収と低炭素燃料のコストが下がってくれば、導入の優先順位としては入れない>出さない>作らないの序列になると考えられる。

4 需要側のCO₂削減技術

需要側では徹底した省エネルギーを基盤としながらも、化石燃料の直接燃焼による熱や動力などの便益・効用発生を回避し、低炭素化された電源から送配電網あるいは太陽光などの自家発電によって同様の便益・効用が得られる電化へのシフトがメガトレンドである。その上で、部門ごとには次のような技術の方向性⁴⁾となる。

民生部門：民生部門の需要は電化が比較的容易である。家庭部門の熱需要は給湯・冷暖房用の90℃以下がほとんどであり、すでにオール電化住宅が普及している。寒冷地対応の電動ヒートポンプも開発されており、都市ガス網を利用して天然ガスや後述するCO₂フリー水素との合成メタンによる燃料電池コージェネレーションシステムも熱を使い切れば非常に高効率である。

輸送部門：移動途中でのエネルギー補給が容易な陸上輸送では、旅客・貨物の種別なく近中距離を中心に電動化し、ハイブリッド (HEV)、プラグインハイブリッド (PHEV)、燃料電池 (FCEV)、電動のみ (BEV) などいわゆるxEVに徐々に置き換わっていくと見られるが、航空機や長距離輸送船については電動化が困難と考えられる。例えばICAOによると2045年までに航空機需要は3倍に伸びるとされており、微細藻類等によるバイオ燃料の利用でCO₂排出量を削減する目標⁵⁾がある。CO₂フリー水素による合成燃料であれば航空機・長距離貨物船などのほか、電化しにくい陸上の重量長距離トラックなどにも対応できる。

産業部門：農林業で用いる窒素肥料の水素源もCO₂フリー化の動きがある。製造業の加熱プロセスについては、製品の品質や歩留まりに影響するため変更には困難が伴う。蒸気など構内ユーティリティの200℃以下の低温度であればヒートポンプで代替可能であるが、それ以上の温度はいわゆるジュール熱相当の加熱となり、電源が火力中心の間は燃料の直接燃

焼による熱発生よりもCO₂が低減することはない。したがって、それぞれの製造プロセス特有の操業温度帯で利用後に低下した排熱を化学再生や蓄熱輸送技術などによって有効利用し、燃焼熱を使い切ることが重要である。

産業部門で最大の鉄鋼業界では年間1億9千万トンのCO₂を排出しており、削減は火力発電と同じ三つの基本対策⁶⁾である。一旦還元された鉄は、スクラップとして鉄鉱石の還元よりもはるかに少ないCO₂排出でリサイクルされており、過去に用いられたコークスのエクセルギーは年数が経過しても還元鉄中に化学的に残存している。鉄鋼業もCOURSE50プロジェクトとして水素利用の他、バイオ系炭材の導入も検討しているが、それでもコークス・焼結鉱の投入による高炉を利用した間接還元法では石炭利用を完全には停止できない。また、スクラップが増えても、トランブエレメントの問題から電炉だけでは高品位鋼の生産は困難で、新たな鉄鉱石の還元をゼロにはできない。日本鉄鋼協会では、炉頂ガス中のCO₂を外部の非化石エクセルギー由来の水素あるいは電力で逆シフト、メタン化あるいはCOに直接電解し、炉内に熱源および還元剤として吹き込む「炭素循環製鉄 (ACRES)」が研究されてきた。図7⁷⁾に炉内容積5000m³、年間出鉄量3833kt/y (出鉄比2.1 t/m³/day) の高炉において、CO₂分離回収と固体酸化物形電気分解セル (還元率60%) を用いて30%の炉頂ガス中のCO₂をCOに還元したケースの炭素循環製鉄のカーボンフロー (kt/y) を示す。ACRES以外にも直接還元法へのシフトの他、酸素富化高炉や転炉をスクラップの再生や廃プラスチックの還元剤としての利用を含む循環システムにおける多機能のガス化センターとして複眼的に捉え、鉄鋼製品はもとより、電力・熱および合成ガスやCCUのためのCO₂原料や炭酸塩の建築骨材など、Polyproductionの供給ステーションとして発展させることも考えられる (図8)。

5 CO₂の大気放散抑制

5.1 水素とカーボンリサイクル

VREを大量導入・主力化するための重要な解決策として安価で利便性の高い蓄エネルギー技術が必要だが、水素は揚水発電・CAES・蓄電池などの他の技術との間に補完・連携あるいは競合がありうる。2019年3月に公表された水素・燃料電池戦略ロードマップには利用と供給において具体的な数値目標も示され、直近では豪州での褐炭ガス化+CCSによる水素で12円/Nm³、CO₂分離回収コストは2000円台/t-CO₂を実現するとしている。本命となる再エネ由来の水素コストは2030年以降、将来的に20円/Nm³、発電単価換算で12円/kWhが目標である。水素キャリアによる水素コスト評価については、エネ総工研による研究報告⁸⁾があり、積地コスト

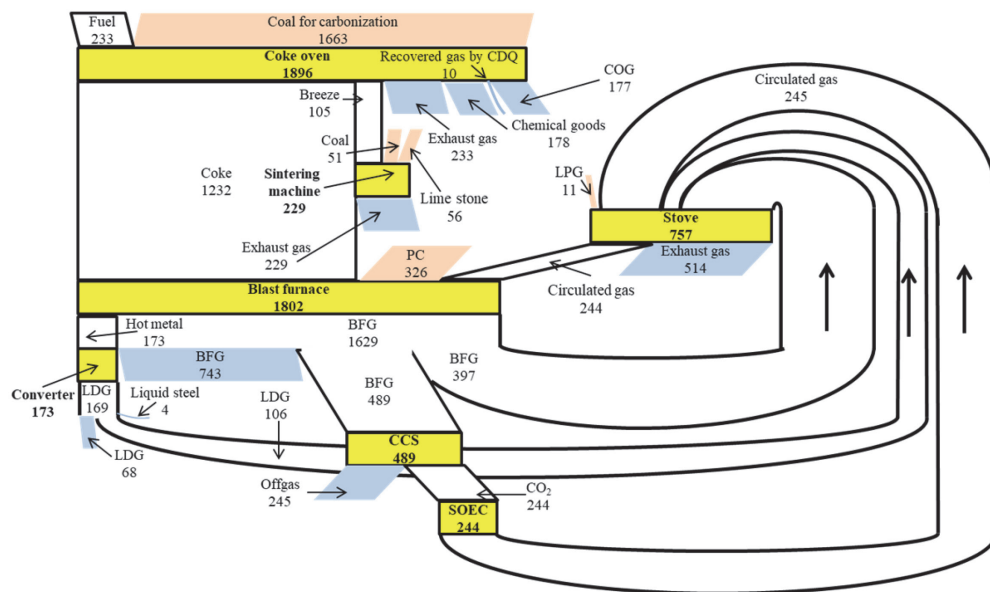
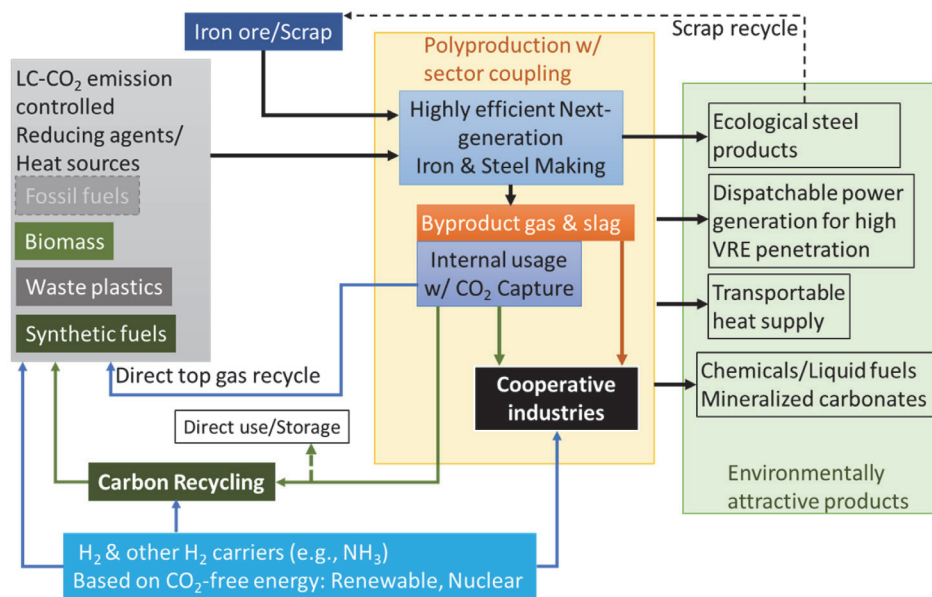
図7 炉頂ガス中CO₂の電気分解によるCO吹き込みを適用した炭素循環製鉄のカーボンフロー

図8 鉄鋼業のPolyproduction化によるCCUSの枠組み

は高いが再水素化が無視できる液化水素で25円/Nm³、アンモニアとメチルシクロヘキサン (MCH) で27円/Nm³ (いずれも2050年) である。また、太陽光発電に取って替えて蓄電池を組み合わせることで水電解セルの稼働率向上とkW容量の削減による製造システムを含む水素のコスト低減の可能性⁹⁾についても論じられており、国産の再エネ由来水素が手ごろな価格に近づくのも遠い将来ではないかもしれない。2℃シナリオ達成のためのエネルギーストレージの世界的な規模感としては、エネルギー技術展望2017年版に世界で現存する150 GWの揚水発電に対し、2060年までに400 GWの容量が必要と試算されている。水素は、揚水発電や蓄電池に比べて変換

ロスが多い欠点はあるが、貯水池など大規模な土木工事が不要で、キャリアを選べば保存期間も容量もほぼ無制限な点で優れている。概して数日～季節変動の平準化においては水素が向いているとされ、莫大なエネルギーストレージの主たる媒体としての期待は大きい。一方、メタンやメタノールなど炭素を含むが既存のインフラ活用や工業プロセスへの適用が容易なPower to X (水素も含むVRE変換の拡張概念) では、CO₂を分離回収して水素と合成するカーボンリサイクルとなる。官主導の技術開発ロードマップとしては、2017年9月に公開された内閣府総合科学技術・イノベーション会議のエネルギー・環境イノベーション戦略推進ワーキンググルー

プによるロードマップ (NESTI2050) があり、2050年頃の普及を目指したCO₂固定化・利用技術も挙がっている (図9)。CO₂は標準生成ギブスエネルギーが-394.4 kJ/molと極めて低い。そのため炭化水素化合物のCO₂ (+H₂O) を生成する酸化反応のΔGが大きく、反応速度の大きい高温でも平衡が生成系に偏っているため、天然に得られる化石燃料が安価で便利なプロセスの駆動力として利用されている。このようなCO₂を逆に燃料として再利用するには、水素あるいは直接電解などで酸素を分離し、さらに水素を添加して炭化水素等へ転換することになるため、再燃料化には発電で得た以上のエクセルギーを投入しなければならない。再燃料化技術の存在意義がCO₂の大気放散抑制であることから、用いられる水素の製造・輸送・貯蔵および還元・合成プロセスにおける追加的な投入エネルギーの全てにおいてCO₂フリーであることが望ましく、ライフサイクルで評価した場合にCO₂排出量が実質的に削減されていなければ意味がなく、しかも将来的に化石燃料と競合できるコストまで下げる必要がある。このようにCO₂の還元・炭化水素系化合物の合成によるCCU (カーボンリサイクル) には低くないハードルがあるが、提唱者であるOlahの論文¹⁰⁾をはじめとする多数の論説、海外で先行するプロジェクト等の概説を参考にすれば、技術・社会・経済の側面から次のような合理的な理由を見つけることができる。

炭素は生物圏、岩石圏、水圏、大気圏の存在量としては酸

素や鉄に比べると桁違いに少なく、無尽蔵とまでは言えない元素である。国内の化石燃料の供給と用途に焦点を絞ると、一次エネルギーベース (原油換算、2016年度、石油連盟「今日の石油産業2018」より) で約1/2が石油、石炭と天然ガスが約1/4ずつで、石油の約1/4が化学用原料である。様々な化成品や鉄鋼など、炭素が一定期間固定されている物質用途もあるが、それらの炭素フローは概算で燃料の約1/10程度である。カーボンリサイクル技術の一つとして既に実用化されているポリカーボネートをはじめ、様々なプラスチックの製造等が先行的に有望ではあるが、CO₂の80%削減の長期目標に対しては燃料用途でも上積みする必要がある。人為的な炭素循環スキームとしては大規模集中排出源の煙道からのCCUによる化成品・燃料化での導入が比較的ハードルが低いと考えられ、民生・輸送部門など分散排出源ではCO₂フリー電源による大気からの直接分離回収 (Direct Air Capture, DAC) が必要となる。これらの技術の導入意義は、化石燃料の採掘および消費ペースを下げ、新たなCO₂の大気放散量を削減することである。そのためには、同じ効用 (動力や熱など) の創出において、ワンスルーの化石燃料利用よりも確実に正味CO₂排出量が削減されねばならない。気体あるいは液化ガス燃料に関しては、水素あるいは水素キャリアとしてのアンモニアは直接燃焼や燃料電池によっても高効率な発電が可能であることから、水素ステーションや大容量の

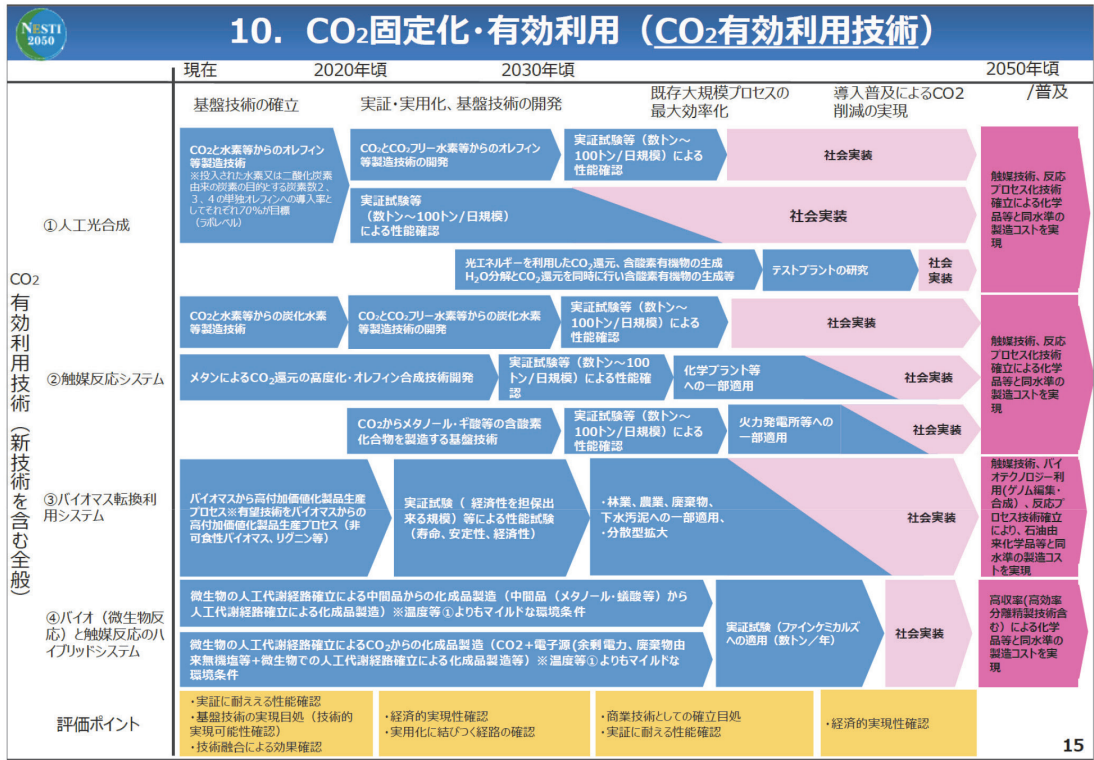


図9 NESTI2050のCO₂固定化・有効利用ロードマップ

水素貯蔵設備からの水素専用の導管が敷設されるエリアでは炭素循環による燃料の必然性がない。しかしながら、LNGの受け入れ基地、調整設備および26万kmを超える既設ガス導管の有効活用も重要な視点となる。日本ガス協会の調査事業によると既設の炭素鋼・ポリエチレン管は中低圧の水素供給には問題なく、シクロヘキセンを付臭剤とした漏洩検知も可能と報告している。すなわち、将来的には水素のみのエネルギー供給も技術的には可能と見られるが、天然ガス（＝主にメタンCH₄）から水素への置換における合理性を持った過渡期の技術は、橋渡しとしての性質も併せ持つことが望ましい。現在、石油精製工程で得られる様々な液体燃料については、これまでにC1化学としてメタノールを経由したMTGやメタン改質等で得たH₂/CO合成ガスのFischer-Tropsch法（FT合成）による製造技術は確立しており、ここでもメタンあるいはメタノールが基幹の物質として考えられる。輸送部門の液体燃料利用についても前述の通り、長距離の輸送船や航空機用の燃料は相当先まで高密度な炭化水素系の液体燃料に依存すると予測される。高温高压の触媒化学プロセスはバイオ系プロセスよりも格段に速く、大規模な培養設備も不要である。最後に、現在はナフサから製造されている基礎化学品として芳香族のBTXやエチレン・プロピレンなどのオレフィン類も、メタンや回収CO₂と水素から合成する触媒研究も多数成果が報告されている。これらの炭化水素系物質の製造過程を俯瞰すると、脱化石化とVREの大量導入に伴う電化・水素利用に立脚した次世代エネルギー社会の理想的なビジョンと現在を無理なく繋ぐために、例え初期には化石燃料であってもメタン・メタノールを原料とした製造過程にシフ

トしておき、徐々に回収CO₂と水素から合成した基幹物質に置換していくことは合理性を持った技術経路の一つと見ることができる（図10¹¹⁾）。前述の理想的なビジョンへの到達がいつになるかは不確実であるのに対し、国際公約のGHG削減目標は明確に期限があって先延ばしが困難であることから、CO₂を再利用するにも地下貯留の他、地上での完全固定化、あるいは何らかの形でFeed stockで大気放散を安定的に回避しておくことも必要となる。CO₂からの化合物の水素必要量としては、量論比において0.5モルで済むシュウ酸(COOH)₂ = CO₂ + 0.5H₂と4モル必要とするメタンCH₄ (+2H₂O) = CO₂ + 4H₂が両端であり、ギ酸(1モル)やポリエチレン(3モル)などもこれらの間に入る。将来の水素のみによるエネルギー供給に最も近いのはメタン、CO₂フリー水素量が十分に確保できない現状ではシュウ酸の方が有利であるが、含酸素系は燃料として低い発熱量とトレードオフとなる。水素源は真水であり、国内では容易に調達できるが、日照条件の良い海外などで海水や塩水層から汲み上げたかん水しか水源がない場合は、塩素発生回避のため脱塩処理が必要となり、追加のVRE電力を消費する。少しでも必要水素量を減らすには、CO₂の還元の水素を用いない方法としてCOと1/2O₂への直接電解法があり、固体酸化物形電解セルの研究開発も進んでいる。

5.2 水素に依存しないCO₂固定化法

再燃料化を含む有機系化合物への合成は、本質的にCO₂固定化期間が短い欠点がある。一方、無機固定においては水素が不要でCO₂固定化期間も極めて長く、地下貯留の補助的な

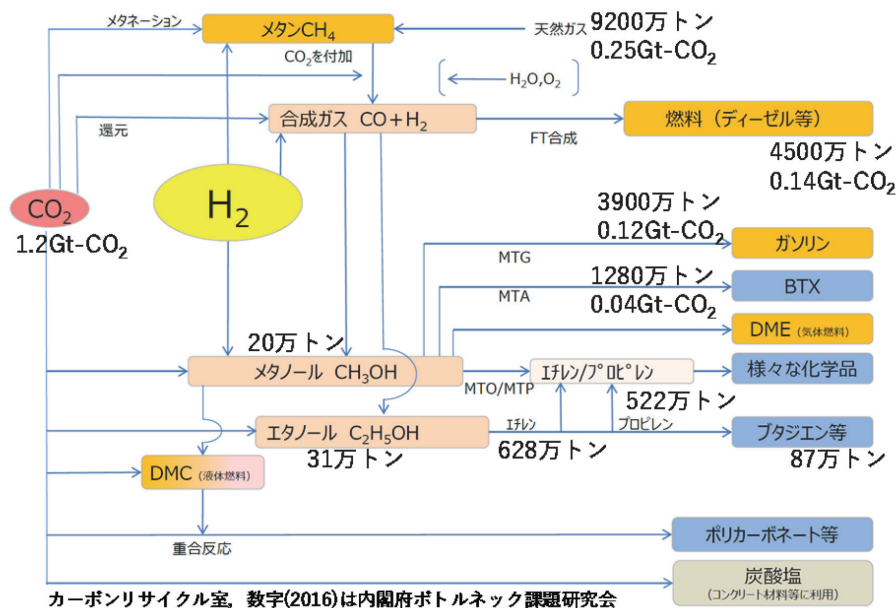


図10 燃料・化成品の流通量とCO₂

技術と位置づけられる。無機系の場合は、炭酸イオン (CO_3^{2-}) と安定的に結びつくカチオンとして岩石圏および海水中に豊富に含まれる元素が望ましく、アルカリ金属類 (ナトリウム、カリウム)、アルカリ土類金属類 (マグネシウム、カルシウム) および鉄などが候補である。カルシウムを例にとるとエクセルギーゼロの参照種は炭酸カルシウム (石灰石) であり、安定な物質である。消費量の多い用途としては製鋼の副原料やポルトランドセメントの原料などが挙げられるが、いずれも CO_2 を煅焼によって大気に放散した生石灰 (酸化カルシウム) として用いている。高炉スラグは高炉セメントの原料として有効に利用され、ポルトランドセメントの消費を抑制することで間接的に石灰由来の CO_2 を削減している。また、強アルカリであるコンクリートが、経年変化として大気中の CO_2 と反応して中性化し、鉄筋の錆の元凶になることはよく知られており、廃コンクリートでも CO_2 を鉱物として固定化 (Mineralization) できる¹²⁾。セメントの特殊混和剤によって CO_2 で硬化させる「 CO_2 SUICOM」¹³⁾ は Negative Emission を実現し、プレキャストコンクリートブロックなどで利用されている。マグネシウムについてもスラグ中の鉱物の他、廃かん水から MgO を再生可能エネルギーで抽出し、固気反応で炭酸塩化して骨材等で利用¹⁴⁾ する研究開発が進んでいる。

6 今後の展望とリスク

2°Cあるいは1.5°Cなどの目標設定が妥当かの議論はさておき、持続可能性のために53 Gt (CO_2 換算、2016年) のGHGの正味排出ゼロを目指すならば、再エネだけではカバーできない人為起源の20 Gt相当¹⁵⁾ の CO_2 、例えば焼却処分を余儀なくされる廃プラスチック、セメントのクリンカなど石灰由来、農業など人工的な土地利用、長距離輸送、調整力電源や極寒地の暖房の備蓄燃料利用はCCUSに依存することになる。そのなかでも植林や緑化、バイオマス燃料+CCS (BECCS)、自然鉱化・海洋吸収の人工的な促進などの Negative Emission Technologies (NETs) には大量の真水その他、広大な土地と肥料が必要で全て連環¹⁶⁾ (Energy, Water and Land-use nexus) している。これらは局所の生物圏への影響や土地利用の変化に伴う土壌固定量の変化によるフィードバックが不明で、NETsとしての確実な固定量の検証が困難¹⁷⁾ とも考えられている。再生可能エネルギー利用による産業界の脱炭素化については近年、主要機関から様々な論文¹⁸⁾ や報告¹⁹⁾ が発行されているが、回収 CO_2 由来の製品の利用あるいは廃棄まで通したLCAでの固定量の記述には疑問点が多い。この分野の議論が収斂するまでにはさらなる研究が必要と思われる。

次世代エネルギーシステムが、破壊的イノベーションを

伴って長期戦略に基づく最終到達点である正味排出ゼロに向かうのであっても、公正な移行 (Just Transition) が求められる。産業部門の長期的な競争力の確保や雇用と労働の質などは社会的要因によって大きく左右されるが、内需維持のための経済力 (=雇用確保) や、輸入資源との貿易収支の均衡を保つためこれまで強みであったものづくり産業を維持していくことも重要な選択肢である。製造業においては、アセンブリ産業の競争力低下が顕著であるのに対し、高機能の部素材産業は堅調である。しかしながら、人件費、市場の変化、資源自給率が劇的に改善する見込みは薄いことなどから製造業は海外シフトが進み、GDPシェアは下降線を辿っている。今後、日本がどのようなグランドデザインを目指すのかによって産業部門の需要は大きく変わる可能性がある。一方で、大きな技術的变化の中にあっても、エネルギーインフラなどの既存の資産を的確な余寿命診断や更新技術によって維持・保守しながら最大限活用する「橋渡しの技術 (Bridging Technologies)」を介在させることは、社会・経済的な観点からも十分に合理性を持つと考えられる。国際的には図11²⁰⁾ の通り、中国やインドの排出量が加速している。ダイベストメントに代表されるGHG排出削減の外圧が今後益々高まることが予測されるが、約束草案の2013年排出 CO_2 を例え80%削減しても1ギガ (10億) トン程度の寄与に過ぎない。いくつかの指標で限界削減費用を比較しても、パリ協定に対する日本の約束草案はかなり野心的な目標である (図12²¹⁾)。既

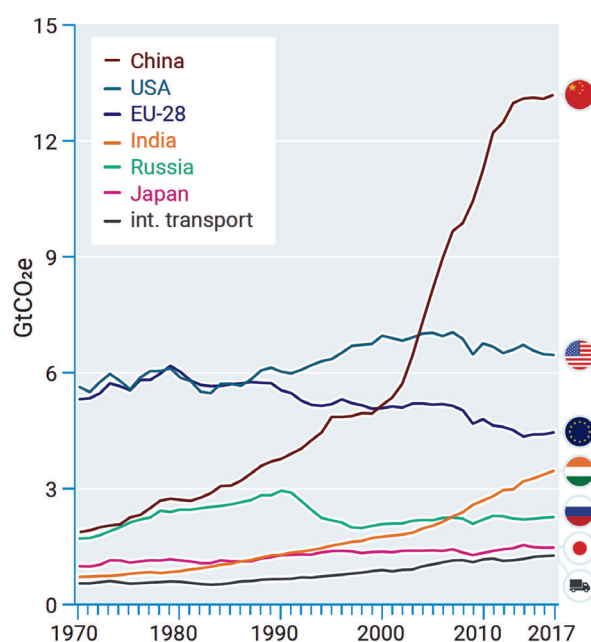


図11 主要排出国のGHG排出量の推移 (土地利用の変化による排出量は含まない)
国連環境計画 (UNEP) の Emissions Gap Report 2018 から転載、元データは文献¹⁷⁾

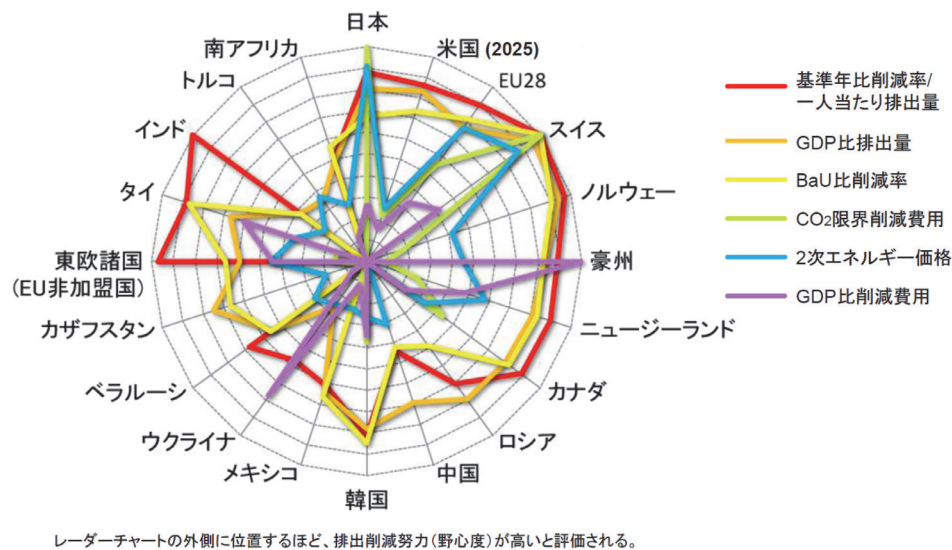


図12 各国のパリ協定約束草案目標の様々な指標での評価

に日本が持っている高い省エネ技術を海外展開すればもっと実効性があり、その研究開発と人材育成が経済力維持の観点からも重要と考えられる。

参考文献

- 1) C.L.Quéré, et al. : Earth Syst. Sci. Data, 10 (2018), 2141.
- 2) 中垣隆雄 : 化学工学, 80 (2016) 1, 29.
- 3) 化学工学会緊急提言委員会編 : ゼロから見直すエネルギー 節電, 創エネからスマートグリッドまで, 丸善出版, (2012)
- 4) 進化する燃料電池・二次電池 一反応・構造・製造技術の基礎と未来社会を支える電池技術—(最近の化学工学67), 化学工学会関東支部編, 三恵社, (2019)
- 5) 河口雄司 : 運輸と経済, 79 (2019) 3, 120.
- 6) 有山達郎 : 鉄と鋼, 105 (2019) 6, 567.
- 7) K.Suzuki, K.Hayashi, K.Kuribara, T.Nakagaki and S.Kasahara : ISIJ Int., 55 (2015) 2, 340.
- 8) 水野有智, 石本祐樹, 酒井奨, 坂田興 : エネルギー・資源学会論文集, 38 (2017) 3, 1.
- 9) 古山通久 : 日本エネルギー学会機関誌えねるみくす, 93 (2019) 3, 255.
- 10) G.A.Olah, G.K.Surya Prakash and A.Goeppert : J. Am. Chem. Soc., 133 (2011) 33, 12881.
- 11) <https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/houkousei.pdf>, (2019年8月アクセス)
- 12) H.J.Ho, A.Iizuka and E.Shibata : Ind. Eng. Chem. Res., 58 (2019) 21, 8941.
- 13) https://www.cgr.mlit.go.jp/ctc/tech_dev/kouryu/T-Space/ronbun/pdf/24_yamaguti/24_yamaguti_5-3.pdf, (2019年8月アクセス)
- 14) Y.Tsubuku, T.Nakagaki and C.A.Myers : GHGT-14, Melbourne, Australia, (2018)
- 15) 中垣隆雄, Corey Myers : 日本機械学会誌, 122 (2019) 1203, 8.
- 16) OECD : The Land-Water-Energy Nexus : Biophysical and Economic Consequences, OECD Publishing, Paris, (2017)
- 17) V.Heck, D.Gerten, W.Lucht and A.Popp : Nature Climate Change, 8 (2018) 2, 151.
- 18) A.M.Bazzanella and F.Ausfelder : Technology Study : Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry, DECHEMA, Frankfurt, Germany, (2017)
- 19) C.Philibert : Renewable Energy for Industry : From green energy to green materials and fuels, International Energy Agency Insight Series, (2017)
- 20) J.G.J.Olivier, K.M.Schure and J.A.H.W.Peters : Trends in global emissions of CO₂ and other greenhouse gases : 2017 report, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- 21) 秋元圭吾 : 約束草案の排出削減努力の評価と2030年以降の排出削減への道筋, ALPS国際シンポジウム講演資料, (2016年2月10日), (2016)

(2019年9月9日受付)