

3-2 日本の産業界の脱炭素化 課題と機会

Bloomberg NEF 日本オフィス代表
黒崎美穂

はじめに

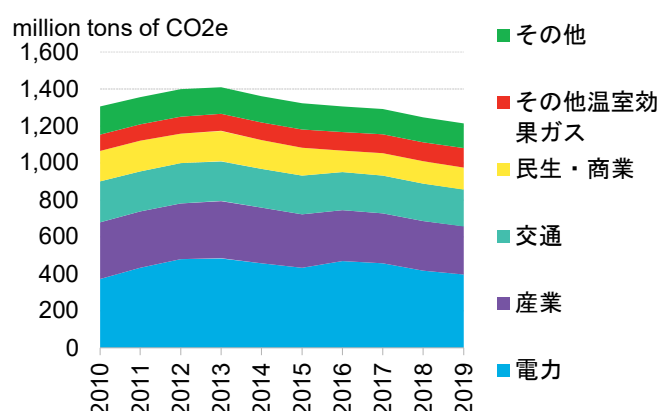
産業から排出される温室効果ガスは日本全体の約4分の1を占める。これは、発電分野に次いで二番目に大きな排出量となる。その排出の多くは化石燃料の使用に起因する。これらの産業は最も排出削減が困難なセクターとして世界的にも認識されており、鉄鋼やアルミニウム、セメント、化学業界がこれに属する。現在、200を超える企業がカーボンニュートラル、及び排出量実質ゼロを宣言しているが、その方法や道筋は未だ不明確なものも多い。この章では、産業界の脱炭素への選択肢を考察する。

3-2-1 産業界の削減目標値

産業は日本の温室効果ガス排出量の23%を占める（2019年度の集計、図1）。2030年の削減目標は、2013年を基準年とした場合37%であり、この値は現在を基準年とすると、追加的に24%を削減しなければいけないことになる。2050年に実質ゼロを達成することを鑑みると、2030年から2050年の削減幅の方が大きいことになる（図2）。

世界的に、産業は達成困難（Hard to Abate）なセクターに分類される。技術が既に確立されている再生可能エネルギーの導入だけでは、産業は脱炭素を達成することができない。他の技術が必要であることを意味している。産業の最終エネルギー消費に占める電気の割合は21%にしか及ばない（図3）。この21%をいくらクリーンにしても残りの79%の排出量は減らない。鉄鋼業ではこの値がさらに小さくなり15%となっている。

図1：日本の温室効果ガス排出量 セクター別内訳



出所：国立環境研究所

図 2：セクター別 2030 年削減目標値と 2050 年ネットゼロ

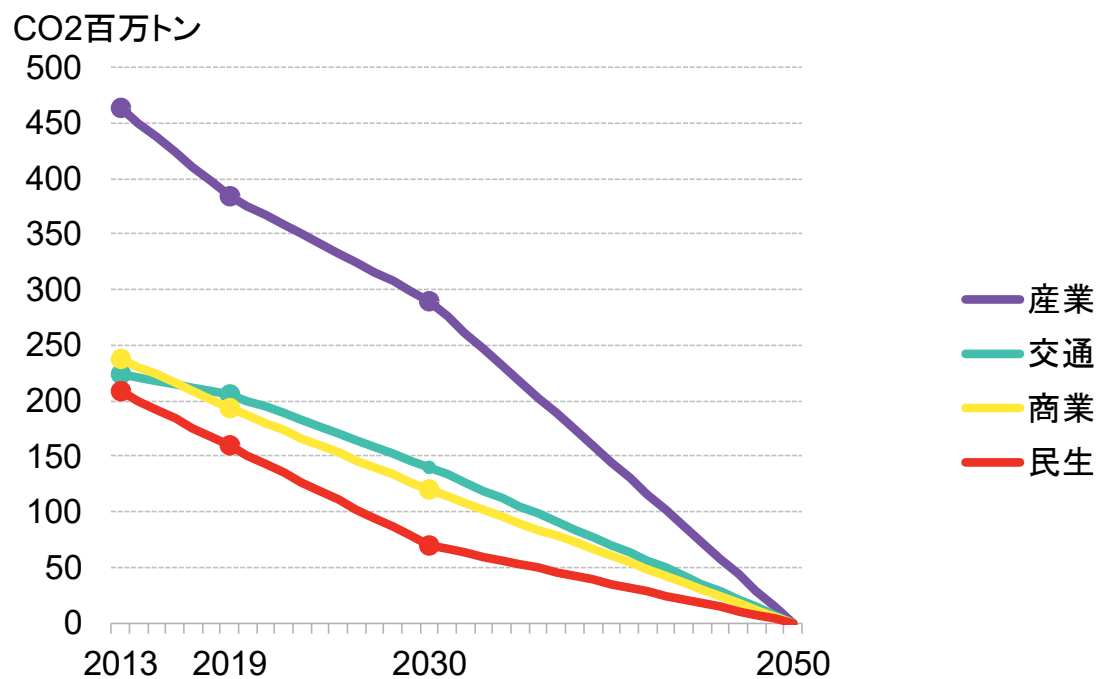
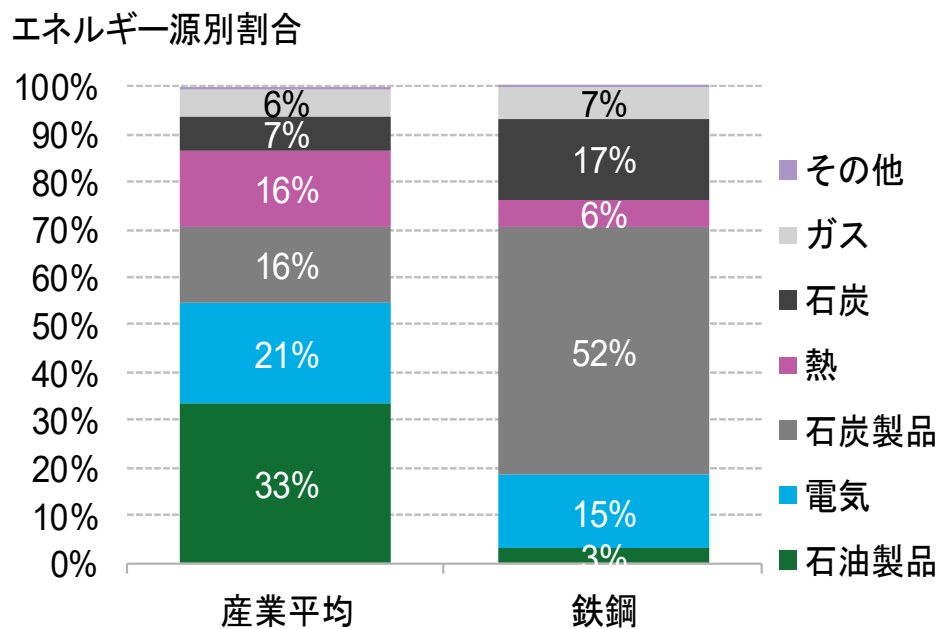


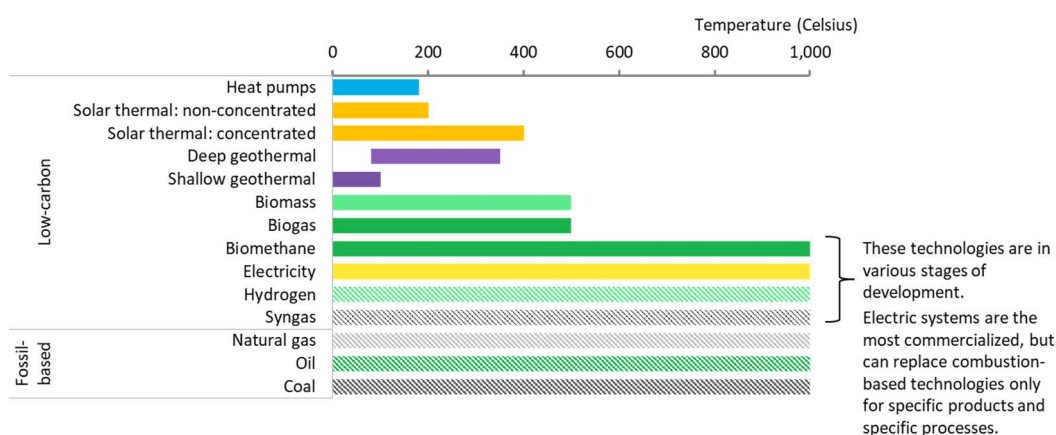
図 3：産業及び鉄鋼業の最終エネルギー消費内訳



もう一つの大きな要因は、高熱を利用する業種が多いことである。高熱を提供できる技術、例えば水素を使った技術がまだ発展途上であること、またコスト高であることから、化石燃料を使用した熱提供の方法が経済的に安い選択肢となっている（図 4）。日本は特にその高熱を必要とする業種が他国に比べて多いのが特徴である（図 5）。

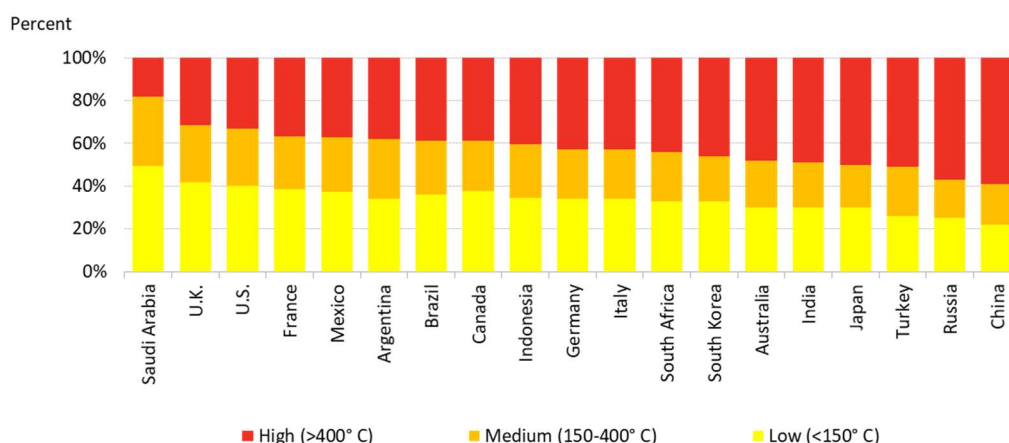
しかしながら、脱炭素の選択肢は多くあり、世界の多くの企業は既に脱炭素に向けた活動を始めている。

図 4：燃料別熱技術と最高出力時の温度



出所：Oxford Energy Institute, BloombergNEF, EHPA, IEA-SHC. 注記: Shaded technologies/fuels were not included in the scope of this analysis.

図 5：G20 諸国の産業界の熱温度分類

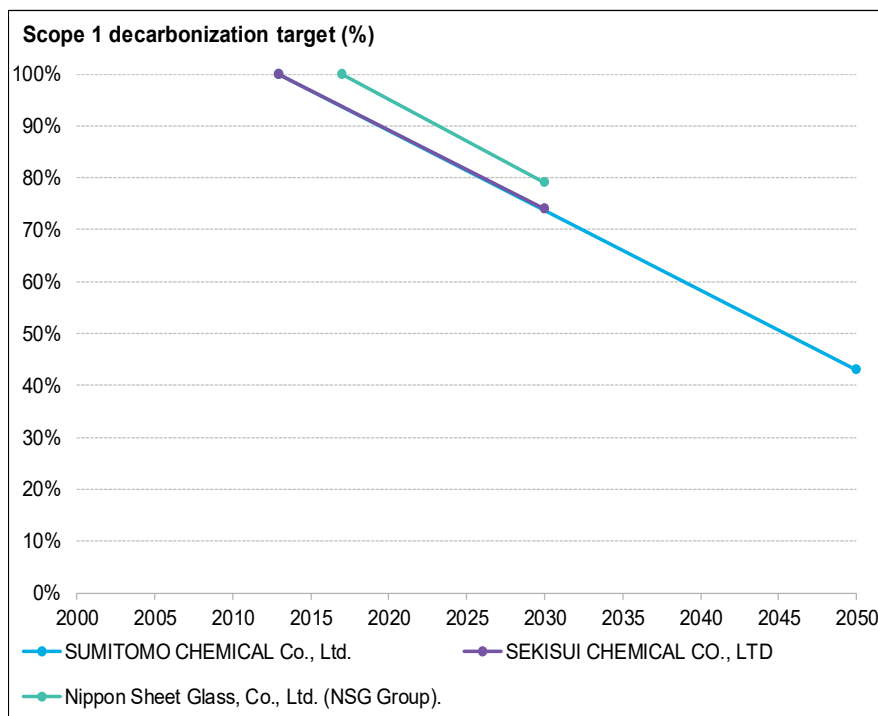


出所：IEA, IRENA. 注記: Based on total energy consumed by industry in each country

3-2-2 企業の脱炭素活動は野心的か

日本にはすでに 200 を超える企業が排出実質ゼロを宣言している。一方で、その方法論、或いは、道筋と目標値の設定が 1.5 度目標に沿っているかどうかを明確に示している企業は全てではない。世界的に科学的根拠に沿った目標値の設定を企業に促しているサイエンス・ベース・ターゲット・イニシアチブ (SBTi) によると、日本のメンバー企業は 167 社であり、そのうち 83% の企業が 2 度、もしくは 2 度以下、或いは 1.5 度に沿った目標設定を行っている (2021 年 11 月 16 日時点)。産業から SBTi に参加している企業は多くないが、日本板硝子、住友化学、積水化学がメンバー企業である。いずれの企業も 2050 年のネットゼロ設定には至っていない (図 6)。

図 6：SBT 設定企業のスコープ 1 目標値



出所：SBTi

目標値設定だけではなく、脱炭素への行動が世界の同業企業と比べて遅れているというのも分かってきた。ブルームバーグ NEF のトランジションスコアでは、金属及び鉱工業関連セクターに属する企業の気候移行リスクの値、及び企業がネットゼロにどれだけ準備ができているかを図る指標を提供している。このトランジションスコアでは、日本の鉄鋼三社が同業他社に比べ、特に以下の 4 つのカテゴリーにて取り組みが遅れていることを示している。

- 需要サイドからのリスク低減(demand risk mitigation)：石炭プロジェクトからの撤退、これから需要が伸びる金属への投資
- 将来を見据えた気候変動経営(forward looking climate management)：気候変動関連の開示とマネジメント、イノベティブな企業文化
- カーボンリスク・マネジメント：電化などへのプロジェクト投資
- 低炭素技術ソリューション：水素や CCUS へのプロジェクト投資

鉄鋼業種は日本の排出量の 12% を占めており、産業の中では最大の排出業種である。エネルギー効率技術によって、2013 年に比べ排出量は 13% 削減されたが、今後の脱炭素への取り組みには、エネルギー効率に加え、電化や再生可能エネルギーの利用、リサイクル、新しい脱炭素技術に総合的に取り組む必要がある。特に、低炭素技術への取り組みに関しては、世界的には ArcelorMittal 社が他を抜いている（表 1）。日本製鉄は鉄のリサイクル容量は比較的大きいが、他の低炭素技術の分野で後れを取っており差は大きい。

表 1：主な鉄鋼会社の低炭素技術への取り組み比較

	Steel production in 2020 (million tons)	Electrification rate (% of capacity)	Recycling capacity (% of production)	Hydrogen projects	CCUS projects
ArcelorMittal	78.46	22%	15.6%	7	5
China Baowu Steel	115.29	0%	1.0%	2	0
Nippon Steel	41.58	18%	18.8%	1	1
JFE Holdings	24.36	12%	10.0%	0	0

出所：ブルームバーグ NEF、[World Steel Association](#)，注記：data as of October 2021.

3-2-3 産業界の脱炭素への道筋

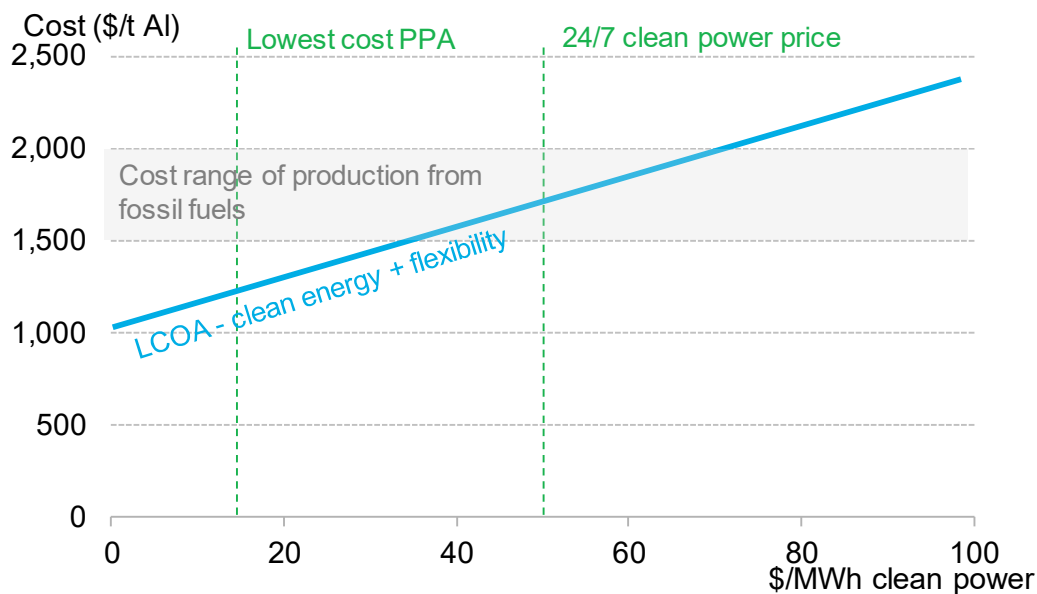
産業は主に 4 つの脱炭素の選択肢があり、どれか一つを選択するのではなく、いずれは総合的にどれも必要になるであろう。それらは、電化と再生可能エネルギー、リサイクル、水素、そして二酸化炭素回収・貯蔵技術である。この章では一つずつ詳細を解説する。

3-2-3-1 電化と低コストの再生可能エネルギー

再生可能エネルギーが最も安い電源である地域では、一般的に再生可能エネルギーを使用することで、低コストで排出削減ができる。アルミニウムを溶かす工程や、鉄鋼のリサイクルの工程などでは、すでに電気の使用がエネルギー使用量の大半を占めているため、再生可能エネルギーが提供されるだけで排出削減が可能である。

それと同時に、製造過程でかかるコストも削減することができる。ブルームバーグ NEF の分析によると、一次（プライマリー）アルミニウムの製造において、化石燃料と同等のコストで行うことができることが分かった（図 7）。鉄鋼製造業者は、再生可能エネルギーを電炉で使用し、鉄スクラップを製造で用いることによって、製造過程から排出される二酸化炭素の削減を行おうと計画している企業が増えてきた。

図 7：均等化一次アルミニウム製造コストと再生可能エネルギーのコスト



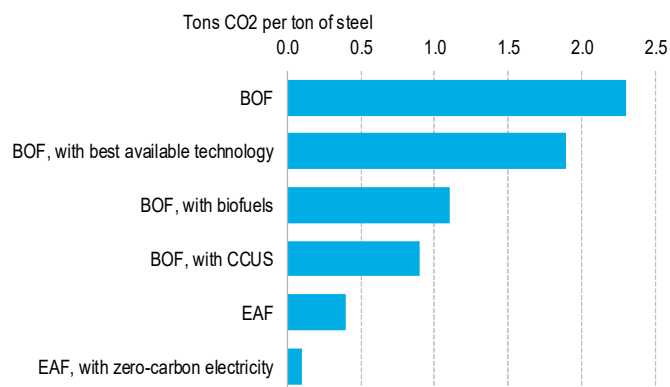
出所：ブルームバーグ NEF 注記：Lowest cost PPA is for U.S. projects tracked by BNEF

しかし、大半の産業部門の製造工程では電気を大量には使用しない。プラスチック製造ではガスや石油を使用し、セメント製造や製鉄で高炉を用いる場合は石炭から熱を得ている。この製造プロセスを電化することを多くの企業で模索している段階である。

日本の産業界の電化と再エネの選択肢を考えるうえで二つの重要な点がある。一つは電化そのものへの取り組みと、もう一つは再生可能エネルギーの調達である。

鉄鋼業界を例にとると、石炭を用いる高炉よりも、電炉の方が排出量が少ないのだが（図 8）、電炉の普及は粗鋼生産量に対して 24%にとどまり、他の国に後れを取っている（図 9）。

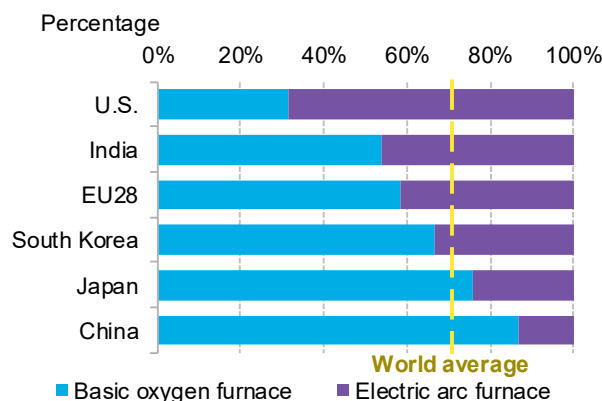
図 8：鉄鋼製造方法別の二酸化炭素排出量



出所：Material Economics, 2018, The circular economy: a powerful force for climate mitigation, BloombergNEF.

Note: BOF = basic oxygen furnace, DRI = direct reduction iron, CCUS = carbon capture, utilization and storage, EAF = electric arc furnace.

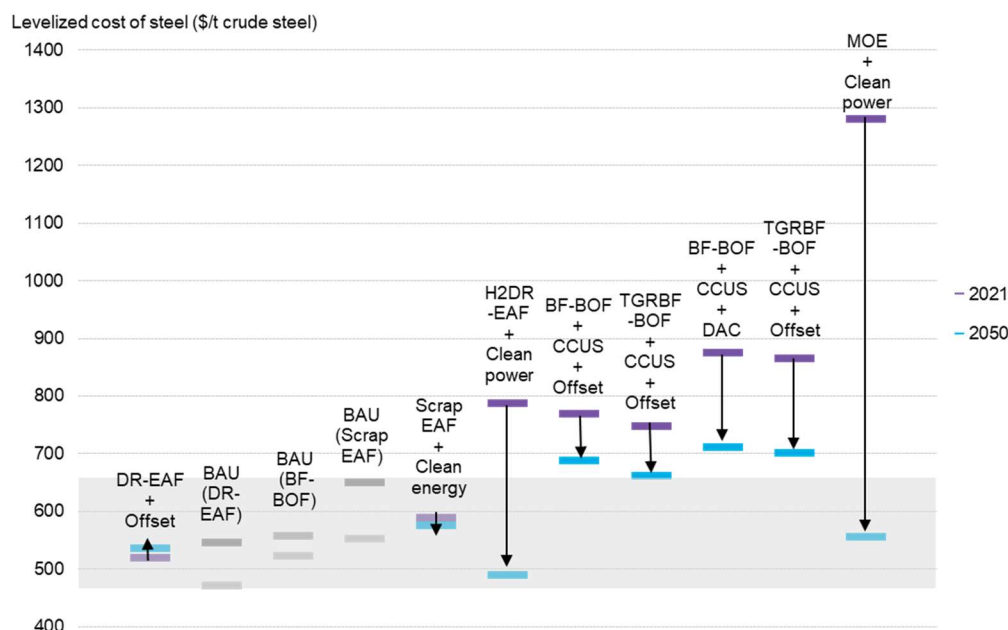
図 9：国や地域別、鉄鋼の製造方法



出所：Bureau of International Recycling, World Steel Association, BloombergNEF

ブルームバーグ NEF の調査によると、グローバルでは 2050 年には再生可能エネルギー、そして再生可能エネルギー由来の水素と電炉の組み合わせが、鉄鋼業の最も低炭素手段となることがわかっている（図 10）。つまり、再生可能エネルギーが今後日本でどれだけ低コストになるかによって、鉄鋼における脱炭素手段のコストに影響を与えることとなる。

図 10：ゼロカーボンスチールの均等化コストと現行コストの比較

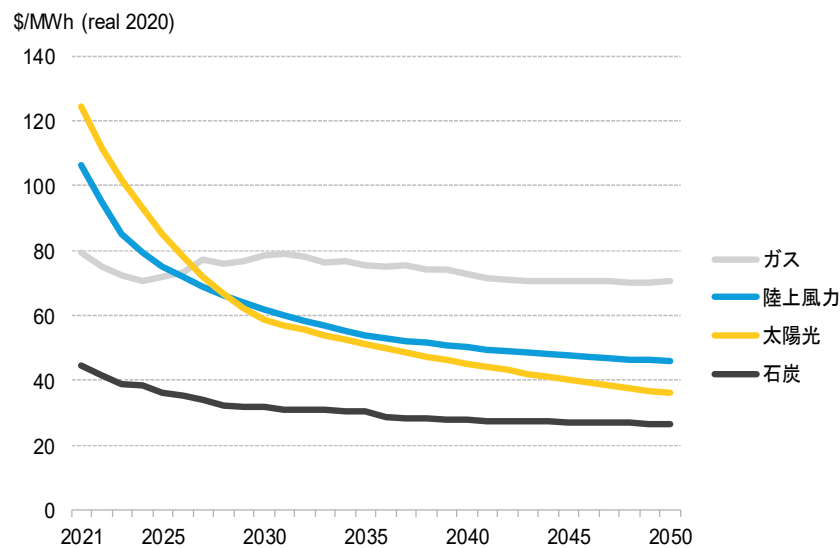


出所：ブルームバーグ NEF 注記：Note: BF-BOF = blast furnace basic oxygen furnace, DR-EAF = direct reduction electric arc furnace (gas-based), TGR = top gas recycling, DAC = direct air capture, H2 = hydrogen, MOE = molten oxide electrolysis, CCUS = carbon capture storage & utilization

日本の再生可能エネルギーの均等化発電コストは化石燃料に比べて未だに高い。多くの重工産業に属する企業は、自家発電設備を有しており、それらは主に石炭火力発電所であることが多かった。既存の石炭火力発電コス

トは 2050 年まで、どの電源よりも低廉であり続けることが大きな要因である（図 11）。

図 11：太陽光と陸上風力の均等化発電コストと既存の石炭及びガス火力の限界費用



出所：ブルームバーグ NEF

また、再生可能エネルギーの調達方法は日本では限られており、その調達量も拡大の余地が小さい。現在、最も安価な選択肢は自社所有の屋根上太陽光発電である。しかしながら、重工業のような需要が大きく 24 時間電気を必要とする業種には、屋根上太陽光だけでは足りないのが事実である。海外では、コーポレート PPA (Power Purchase Agreement: 電力調達契約) が主流であるが、日本では未だ発展途上である。これは規制的な要因であり、少しずつ改善が図られている。

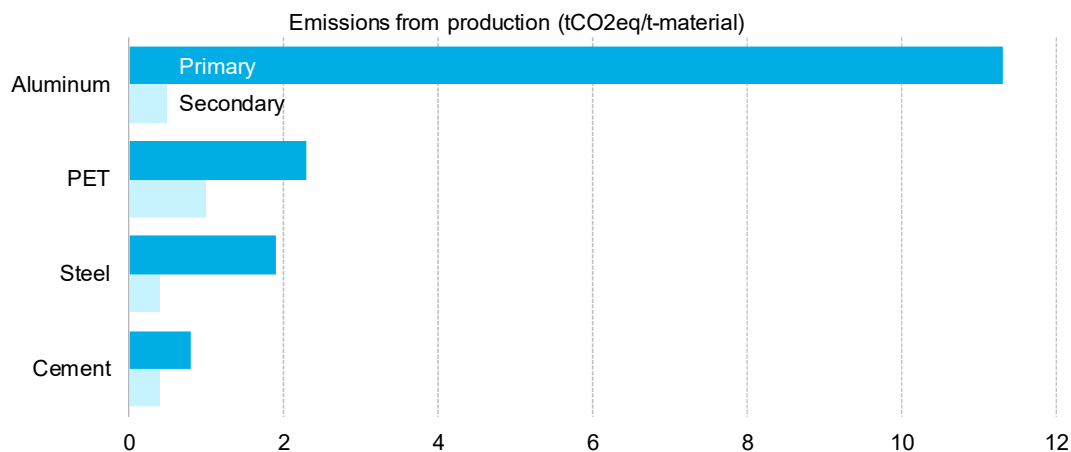
規制の制限があるものの、産業界では少しずつ再生可能エネルギーへの切り替えを行う企業も出てきている。例えば、旭化成は現在 37% を占める石炭火力発電を 2030 年までには廃止すると宣言している。この流れは、アップルなどの大企業が取引先に対して再生可能エネルギーの調達を求める活動に発端があるが、産業界もこのような活動の影響を多く受けていることは間違いなく、今後再生可能エネルギーの使用は産業界で拡大していくことだろう。

3-2-3-2 リサイクル

素材をリサイクルされたスクラップで代替し製造することで、劇的に排出量は削減される。例えば、鉄鋼やセメント、プラスチックは、原材料から製造するのに比べて、その削減率は 50% を超える。アルミニウムは、さらに大きい 96% である（図 12）。リサイクルは、セメント以外の多くの産業で、成熟したプロセスが既に備わっており、原材料から製造するよりも大体はコストが安く抑えられる。これは脱炭素の最良の一步目として捉えられている。

しかしながら、リサイクルされた材料の供給は過去の生産量と、廃棄物のリサイクル処理量に依存している。一方、需要は増加しているため、過去にはリサイクル素材の価格が跳ね上がり、そのため、ある国々では価値の高いリサイクルプラスチックや金属の輸出を禁止するまでに及んだ。

図 12：一次（新規）素材と二次（リサイクル）素材の排出量の違い



出所：ブルームバーグ NEF、Ashby 2009

日本でも多くの産業でリサイクルのプロセスが整備されているが、今後はそのスクラップ供給量と価格を注意深くモニタリングしていくことが重要であろう。

3-2-3-3 水素

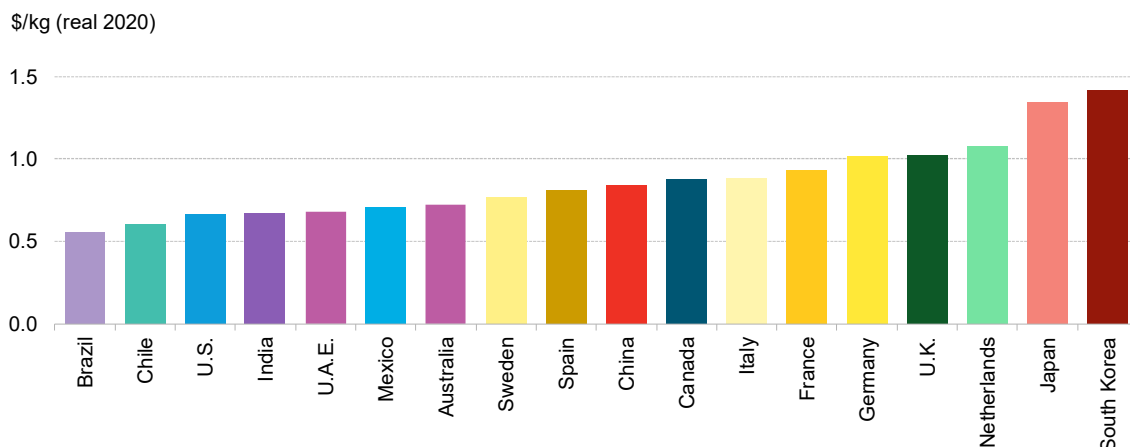
水素は産業界のどの業種でも使用できるため汎用性が高く、再生可能エネルギーから製造することが可能である二酸化炭素を排出しない燃料である。水素の製造拡大が進み、規模の経済が成立すれば、現在の中国やインド、欧州の天然ガス価格と同等のレベルにまでコスト競争力が増す見込みである。

日本は水素を輸入することを主眼に置いて水素戦略を構築し、かつ、主な使用用途は消費者向けのものが多かった。燃料電池乗用車や燃料電池バス、エネファームなどの燃料電池がその例である。水素は、需要が大きければ大きいほどコストメリットが働くため、産業界向け用途を水素戦略の中に大幅に入れるべきである。また、その際には需要先だけでなく、製造、輸送、貯蔵、そしてそれを支える政策に至るまでの全てのバリューチェーンを考慮した水素戦略ロードマップを策定するべきである。

日本の再生可能エネルギー由来の水素は他国に比べて高い（図 13）。それは、日本の再生可能エネルギーが高いからであるが、ブルームバーグ NEF の調査によると、2050 年時点では、輸入する再エネ由来の水素よりも国内産の再エネ由来水素の方が安くなる見込みである（図 14）。

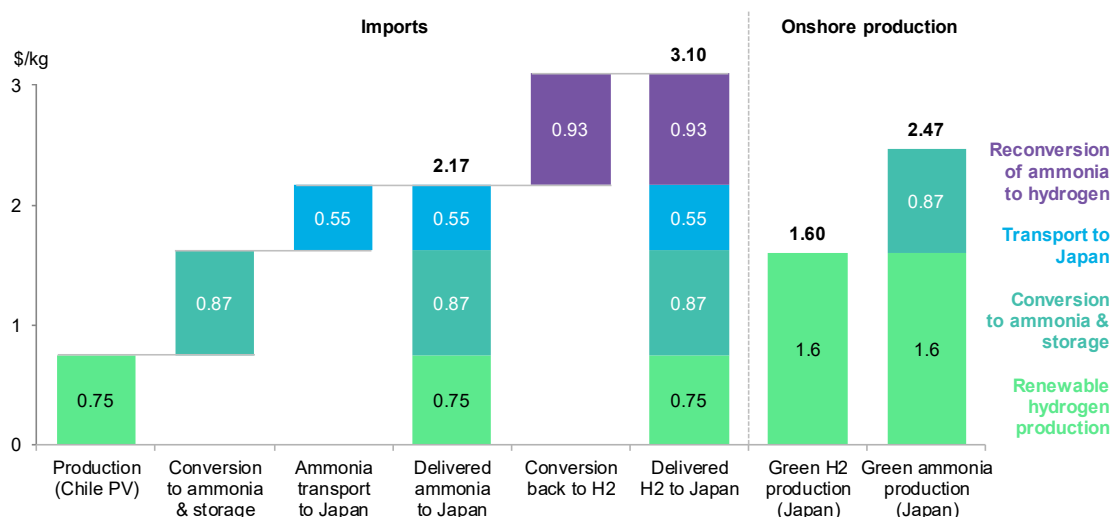
また、現在は化石燃料由来の水素が、CCS 付きの化石燃料由来の水素や再エネ由来の水素よりも安いだが、2039 年には、再エネ由来の水素の方がほかの二つよりも安くなることも同様の分析結果からわかる。

図 13：再生可能エネルギー由来の水素の均等化コスト（2050 年）



出所：ブルームバーグ NEF 注記：Levelized cost of hydrogen (LCOH) assuming our optimistic projection for alkaline electrolyzer costs. Costs would be 6% higher in 2030 and 18% higher in 2050 if the conservative projection for electrolyzer costs is used instead.

図 14：日本への輸入水素と国内産水素のコスト比較（2050 年）



出所：ブルームバーグ NEF 注記：Transport cost for a 17,110km voyage from Punta Arenas to Tokyo in 2050

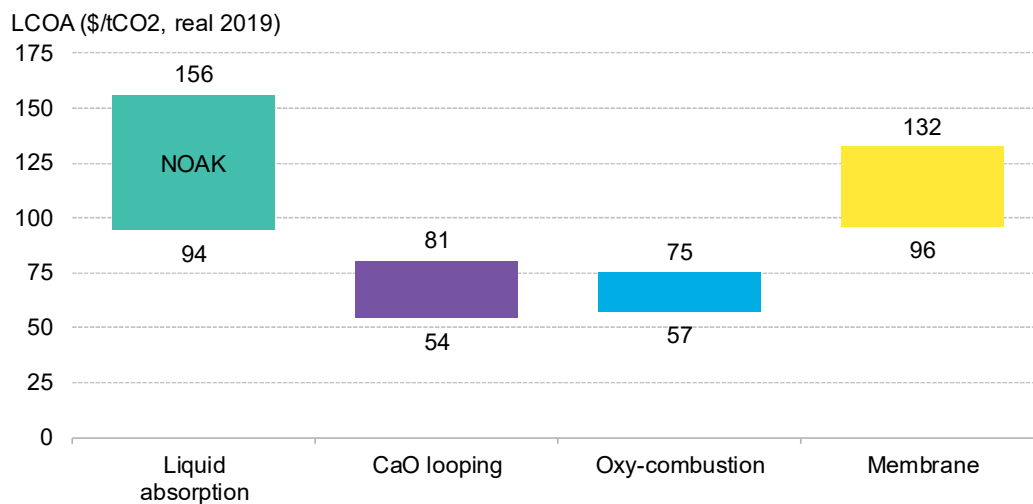
したがって、産業の水素活用のためには、輸入や化石燃料由来の水素の活用と同時に、再エネ由来の国内産の水素を活用していく方法も検討していくべきである。そのためには、水素製造のための再生可能エネルギー施設の立地、水素の輸送と貯蔵と需要地がクラスターとして存在することが最もロスが少ないため、水素の地理的な全体最適を鑑みたロードマップを策定すべきである。

3-2-3-4 二酸化炭素回収・貯蔵技術

化石燃料を使用した比較的新しい施設や設備では、二酸化炭素を回収する機器を導入することで排出量を低減しながら、施設を継続して運用することができる。今日では、まだ、一定規模の二酸化炭素回収設備は商業化を迎えていない。しかし、多くの設備が導入されれば、規模の経済が働くことで、この技術は拡大を見せるだろう。CCSはそのサイトの排出量を最大9割削減することができるが、残りの1割はオフセットを使うこととなる。

CCSはセメント産業に特に適している。セメント業はセメント生産に欠かせない化学反応からの排出量が多く、脱炭素の選択肢が限られている。セメント生産からの排出量の半分は、原材料である石灰石を細かく砕き、クリンカを生成する際の焼成プロセスで排出される。この際、高熱を必要とする以外に、カルシウムと二酸化炭素が化学反応で排出されるのである。つまり、高熱を提供するための燃料を燃やす際の排出、及び石灰石の化学反応からの排出、どちらにもCCSは対応することが可能である。今現在コストは高いが、技術開発業者によると、欧州やカナダのカーボン価格の水準にまでコストを下げる事が可能だと推測されている（図15）。

図 15：セメント製造プラント用の二酸化炭素回収コスト予測



出所：ブルームバーグ NEF. NOAK is Nth-of-a-kind representing costs once the technology has scaled, capturing 90% of emissions.

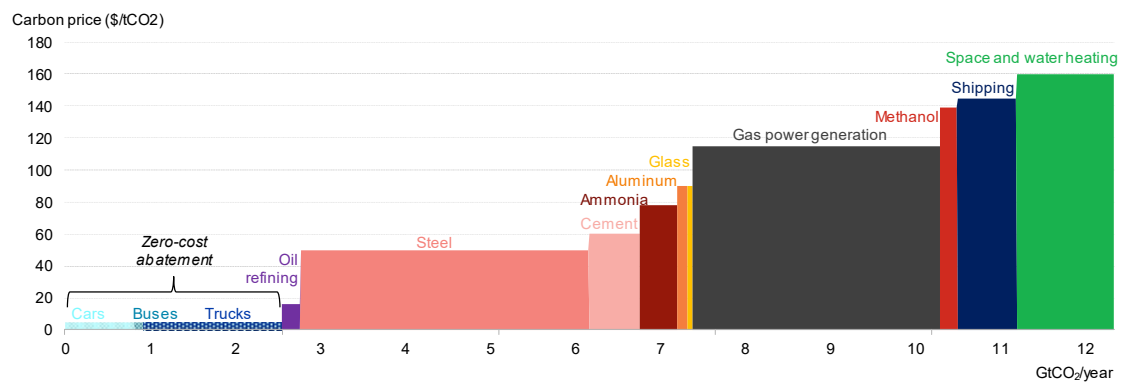
日本では、CCSが産業界において脱炭素の鍵となる技術であることは間違いないが、全ての排出量を回収できる脱炭素の解決策のように扱われており、この技術だけに頼りすぎるのはあまりにもリスクが高い。CCSの技術が確立し、世界的にプラント数が増加し、コストが下がり、プラントの立地の問題や二酸化炭素の発生地と回収・貯蔵地などの全体のCCSバリューチェーンの設計が完了する頃に、本格的に脱炭素の戦力となるであろう。それまでは、再生可能エネルギーのような、確立されている技術を着実に導入することが重要である。また、二酸化炭素を海外のCCSプラントに輸出するという計画は、輸送費がかかることや、輸送のためのタンカーなどの技術費用がかさむだけでなく、エネルギー安全保障の解決につながらないため、本末転倒である。

3-2-4 カーボンプライシングやその他の政策サポート

以上4つの技術的な選択肢を考察したが、2050年カーボンニュートラル達成にはすべての選択肢が必要となる。更に1.5度目標を達成するためには、できる限り早期に排出削減を多く行うことが重要である。そこで重要となるのは、カーボンプライシングである。

水素を例に挙げると、ブルームバーグ NEF の調査によれば、二酸化炭素1トンあたり100ドルのカーボンプライシングを設定すれば、再エネ由来の水素が導入され化石燃料を代替することで、世界の排出量の22%を削減できる。水素1キログラムあたり1ドルの再エネ由来の水素と、化石燃料由来の水素が経済的に同等となるためには、鉄鋼製造では二酸化炭素1トンあたり50ドル、セメント製造では60ドル、アンモニア合成には78ドル、そしてアルミニウムやガラス製造には90ドルのカーボンプライシングの設定が必要である（図16）。

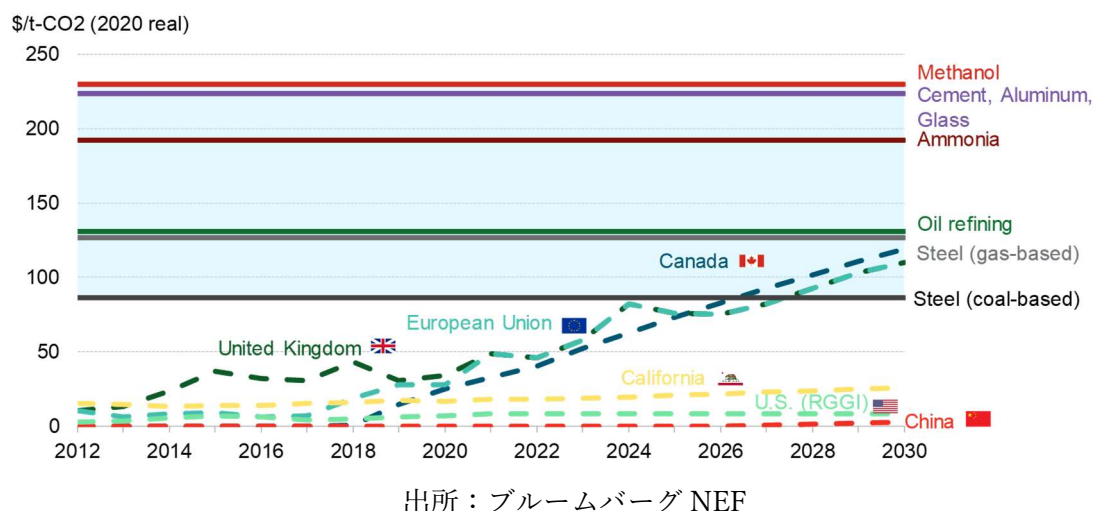
図16：キログラムあたり1ドルの再エネ由来水素の場合の産業別限界削減費用曲線（2050年）



出所：ブルームバーグ NEF 注記：sectoral emissions based on 2018 figures. Renewable hydrogen delivered at \$1/kg to large users, \$4/kg to road vehicles. Aluminum emissions for alumina production and aluminum recycling. Cement emissions for process heat. Refinery emissions from hydrogen production. Road transport and heating emissions are for the segment that is unlikely to be met by electrification only, assumed to be 50% of space and water heating, 25% of light-duty, 50% of medium-duty trucks, 30% of buses and 75% of heavy-duty trucks.

しかしながら、今現在、水素が化石燃料と経済的に同等となるだけのカーボンプライシングを設定している市場はない。イギリス、欧州、カナダは2030年までにそのような価格に達成するであろう。日本はまだトン当たり3ドル程度であり、成長に資する、かつ排出削減に有効的であるためには、100ドルを最終的な価格として設定できるよう議論を進めるべきである（図17）。

図 17：キログラム当たり 2 ドルの再エネ由来水素が化石燃料と経済的に同等になるために必要なカーボン価格



カーボンプライシングのような政策規制に加え、その他の規制的な目標設定や補助金、投資は、特に高熱を必要とする産業の脱炭素には必要である。例えば、再生可能エネルギー由来の熱の導入目標値設定や、産業の熱の削減目標値設定、電化のための研究開発補助金などである。

政府は削減量と経済的負担を考慮した最も効果的な手段である政策、及び、長期的な脱炭素ロードマップを策定して、それを段階的に導入するべきである。

3-2-5 結論

気候変動対策において、短期的な経済的負担ばかりが議論に上げられるが、脱炭素達成は長期戦である。長期的に日本の産業が気候変動を通じて成長するために、水素やアンモニア、CCSなどの新しい脱炭素技術に積極的に関与しつつ、本業の製品をゼロ・カーボンにしていくことも求められている。世界では、ゼロ・カーボン・スチールや、グリーン・セメント、グリーン・アルミニウムなど、大手企業が競って製品化を急いでいる。これら供給網の川下の企業だけでなく、川上の企業である金属や鉱物を扱う企業も、採掘や精製の過程でのゼロ・エミッション化を目指している。このような新たなゼロ・エミッション経済圏にて日本企業が競争力を発揮するためには、まずは脱炭素の目標を 1.5 度目標に沿って立てることと、その目標を達成するためにバックカスティングで中間目標値と共に具体的な手段を計画していくことが重要である。

政府は企業の脱炭素を促すための野心的な削減目標値と技術的なロードマップを産業ごとに設け、脱炭素技術が経済的に有利になるためにカーボンプライシングを導入するべきである。最終的な価格設定を 100 ドルとし、段階的に導入することで、導入までのリードタイムを技術確立などに充てることが可能であることと、忠実に削減している企業にはインセンティブとして働くことがメリットとなるであろう。また、脱炭素技術が高コストである場合は、補助金も考慮すべきであるが、補助金を外すタイミングが重要である。企業の競争を促し、コストが競争によって低下するタイミングを早めに設定することで、イノベーションや効率化が加速するであろう。