

カーボンニュートラル社会実現の為にイノベーション

Innovation to realize a carbon-neutral society

*松橋 隆治
東京大学**1. はじめに**

本稿では、エネルギー問題、気候変動問題に関する歴史を振り返ると共に、カーボンニュートラル（CN）社会の実現へと進む世界にとって重要なイノベーションについて考察する。そして、人類にとって困難な目標である CN 社会の実現について、その可能性を展望することとする。

2. 気候変動に関する人類の対応の歴史とカーボンニュートラル（CN）社会への展望**2-1. 気候変動に関する人類の対応の歴史**

本節では、気候変動問題に関する人類の研究と国際的な対応の歴史についてみていくこととする。

CO₂などの気体の持つ温室効果により、気候変動が起きる可能性については非常に古くから様々な科学者により指摘されていた。例えば、アレニウスは、1896年、自身の著書「宇宙の成立」の中で、大気中のCO₂濃度の増加と地球全体の気温の上昇との関連性に言及していた。1958年にはルベールとキーリングがハワイのマウナロア山頂と南極でCO₂濃度の計測を開始した。1964年には、真鍋博士らによって、CO₂濃度の増加と気温上昇の関係は、対流圏、成層圏を含めた大気鉛直温度分布のモデルが示され、ここから気候変動の研究は急速に進展した。¹⁾

一方、この気候変動に関する科学的研究の進展を受けて、国際的な政策の交渉の中で、本問題が扱われるようになったのは20世紀の後半から終盤にかけてである。地球環境問題への対応が正式な国際会議の中で初めて議論されたのは、1972年にスウェーデンのストックホルムで開催された国連人間環境会議であったといわれている。

気候変動への最初の具体的な国際的対応としては、1988年6月にカナダで行われたトロント・サミットが挙げられる。この会議では「先進国が率先して、2005年までに1988年時点のCO₂排出量の20%を削減する」という「トロント目標」がまとめられた。同じ1988年には世界最先端の知見を集約する場として「気候変動に関する政府間パネル：IPCC」が設置された。その後、IPCCは現在に至るまで七度にわたり報告書を発表し、気候変動に関する科学的な知見、社会・経済的な影響評価、対応策の三つの視点から、最も信頼できる科学的知見および対応策に関する情報を提供しつづけている。1992年6月にリオデジャネイロで開催された地球サミットにおいては、数々の地球環境に関する条約の一つとして気候変動枠組条約が締結された。また、本条約の内容を具体化し進展を促すため、1995年から年一回のペースで気候変動枠組条約締約国会議（通称COP）が開催されるようになった。そして、1997年12月に京都で開催されたのが、気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3京都会議）である。京都会議においては、先進国（韓国、メキシコ以外のOECD諸国+旧ソ連東欧圏）の2008年から2012年の温室効果ガス排出量の数値目標などを内容とする京都議定書が合意された。先進国の数値目標については、CO₂をはじめとした6種類の温室効果ガスが削減対象とされ、各国毎に1990年（一部のガスは1995年）の排出量を基準とした数値目標が定められた。同時にこの数値目標達成においては、国内措置のみでなく、共同実施、クリーン開発メカニズム（CDM）、排出量取引からなる京都メカニズムの利用を認めた。その後2004年末のロシアの批准により発効の条件を満たし、2005年2月に京都議定書は発効した。

2007年にIPCC（気候変動に関する政府間会合）の第4次評価報告書が発表されて以来、地球温暖化問題に対する世界的関心は更に高まった。2007年6月に開催されたハイリゲンダムサミットにおいても、地球温暖化への対応戦略が最重要課題として挙げられた。2008年より京都議定書の第一約束期間に入り、議定書に批

准した付属書 I 国では数値目標を遵守するための方策が進められる一方、京都議定書の第一約束期間が終了した後の 2013 年以降のポスト京都といわれる温暖化防止の枠組についての国際交渉が 2007 年の COP13 から開始された。この当時、京都議定書からは米国が既に離脱しており、発展途上国は議定書に批准しても温室効果ガスの削減数値目標を持っていなかった。2010 年にはメキシコのカンクーンにおいて COP16 が開催され、ポスト京都に関して、日本が京都議定書の延長に反対を表明し、米国、途上国を含む包括的目標の設定を求めた。2011 年 12 月に南アフリカのダーバンで開催された COP17 はダーバン合意を採択して閉幕した。世界第一位、第二位の温室効果ガス排出国である中国、米国をはじめ、京都議定書では国家の数値目標としては削減義務を負っていなかった主要排出国も新しい枠組みへの参加を約束したことがダーバン合意の大きな成果である。そして、2015 年 11 月 30 日にはフランスのパリにおいて、テロ事件直後の厳戒態勢の中、COP21 が開催され、2020 年以降の温室効果ガス排出削減の新たな国際枠組み、すなわちパリ協定が採択された。

表 1. パリ協定に基づく温室効果ガス削減目標²⁾

国・地域	2030年目標	2050年目標
日本	-46% (2013年度比) (さらに、50%の高みに向け、挑戦を続けていく)	表明済み
アルゼンチン	排出上限を年間3.49tに	表明済み
オーストラリア	-26 ~ -28% (2005年比) -35% 見直し	表明済み
ブラジル	-43% (2005年比)	表明済み
カナダ	-40 ~ -45% (2005年比)	表明済み
中国	(1) CO2排出量のピークを2030年より前にすることを目指す (2) GDP当たりCO2排出量を-65%以上 (2005年比)	CO2排出を2060年までにネットゼロ
フランス・ドイツ・イタリア・EU	-55%以上 (1990年比)	表明済み
インド	GDP当たり排出量を-33 ~ -35% (2005年比)	2070年ネットゼロ
インドネシア	-29% (BAU比) (無条件) -41% (BAU比) (条件付)	2060年ネットゼロ
韓国	-40% (2018年比)	表明済み
メキシコ	-22% (BAU比) (無条件) -36% (BAU比) (条件付)	表明済み
ロシア	1990年排出量の70% (-30%)	2060年ネットゼロ
サウジアラビア	2.78t削減 (2019年比)	2060年ネットゼロ
南アフリカ	2026年 ~ 2030年の排出量を3.5 ~ 4.2tに	表明済み
トルコ	最大-21% (BAU比)	-
英国	-68%以上 (1990年比)	表明済み
米国	-50 ~ -52% (2005年比)	表明済み

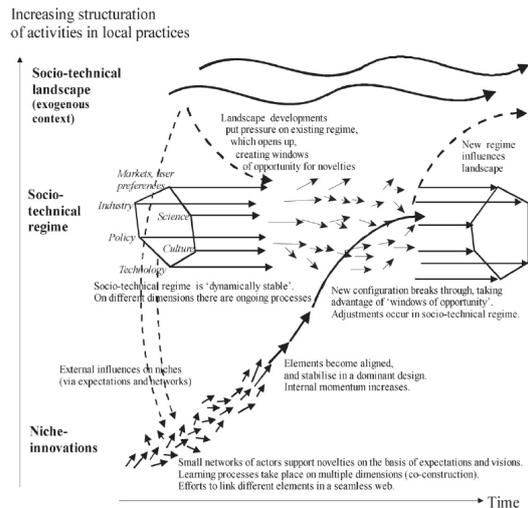


図 1. 社会技術体制移行の概念図³⁾

その後、2020年10月26日の所信表明演説において、当時の菅首相が2050年までのカーボンニュートラル社会を目指すことを明言した。その後、この2050年までのカーボンニュートラルの実現を法律に明記し、脱炭素に向けた取組・投資やイノベーションを加速させるとともに、地域の再生可能エネルギーを活用した脱炭素化の取組や企業の脱炭素経営の促進を図る「地球温暖化対策の推進に関する法律の一部を改正する法律案」が、2021年5月26日に成立した。世界全体の動向をみると、2050年、2060年、あるいは2070年までのカーボンニュートラル (CO2排出をネットゼロに) にコミットしたのは、表 1 に示すとおりであり²⁾、世界全体の数多くの国・地域が長期的にカーボンニュートラル社会の実現を目指していることが分かる。

2-2. 気候変動に関する社会技術体制の変化と今後の展望

図 1 は社会技術体制が変革する際の特徴や類型を論じた文献³⁾から引用したものである。エネルギーや気候変動に関する社会的な体制に関しても、図 1 の概念を元に歴史的な変化を辿ることができるため、以下では、本問題に関する人類の対応の歴史を概観しつつ、社会技術的な体制が変わる時点について考察する。

図 1 の中ほどにある「Socio-technical regime」とは、構成要素である科学・技術・産業・政策・市場・文化が相互に影響しあい、同時代において形成している安定的な構造を意味している。これに対し、図 1 の下部にある「Niche-innovations」が、社会技術体制の中に取り込まれ、調整を経て新たな社会技術体制へと移行する。あるいは図 1 の上部にある「Socio-technical landscape」が、現在の社会技術的な体制に対し圧力をかけることにより、新たな体制へ移行する機会を創ることとなる。

2-1で概観したように、19世紀末から20世紀の後半にかけて、気候変動に関する科学者の研究面からのアプローチがあり、これにより、人類の気候変動に関する知見が大いに深まったことは間違いない。このことは、図 1 でみるならば、下部からの「Niche-innovations」として社会技術体制における科学を中心とした要素を進展させたと考えられる。この科学の進展は、長い時間をかけて、上部の「社会技術的な光景」に変化をも

たらし、この変化が、気候変動問題に対する政策面での革新であるIPCCの設立やトロント・サミットから一連のCOPの会議などにつながったと解釈できる。そして、更にこうした事業が新たな「社会技術的な光景」を創成し、現在の「社会技術的な体制」に影響を与えて、パリ協定の締結など社会技術体制の中の政策面での革新が顕在化したものと考えられることができる。

また、日本においては、2011年の東日本大震災と福島第一原発の事故以降、電力システム改革が大幅に進展し、FIT制度等により太陽光発電などの再生可能エネルギー電源が爆発的に増加した。これらも日本における「社会技術的な光景」の変化として、社会技術体制の変革に影響を及ぼしたと考えられる。こうした中で、2020年10月28日に、当時の菅首相が2050年におけるCN社会の実現を宣言することとなり、その後の温対法改正を経て、日本においてもCN社会の実現が公約となっていったのである。

このようにみていくと、「社会技術的な体制」の変革は、下部にある「適所の革新」と上部にある「社会技術的な光景」と相互に影響しあいながら、漸進的に起きるものであるとも考えられる。ただし、筆者が40年近く本問題に携わってきた実感としては、長い歴史の中でも、ここ数年で大きな変革が起きているということである。それは、CN社会の実現という究極の（困難な）目標を見据えて、「存亡をかけてこの問題に取り組む」という決意が、特に産業界から感じ取れることである。一方で、産業界、行政、アカデミアのいずれも、CN社会の実現に向けた明確なビジョンやソリューションが描けているわけではない。したがって、今後、全ての関係者が、より一層の活発な意見交換を行うと共に、研究開発の一層の推進と実証実験等を進め、CN社会実現の為のビジョンを確立していく必要がある。

3. カーボンニュートラル（CN）社会実現のためのグリーンイノベーション

3-1. グリーンイノベーションの概念

シュンペーターはその著書「経済発展の理論」の中で、イノベーションを新結合という言葉で表し、プロセスイノベーション、プロダクトイノベーション、マーケットイノベーション、サプライチェーンのイノベーション、組織のイノベーションの五類型を掲げている。この五類型をカーボンニュートラル社会実現にあてはめた場合、表2のように各々のイノベーション類型に属する代表的な方策が考えられる。⁴⁾

表2. CN社会実現の為のグリーンイノベーション

プロセスイノベーション	石油危機後の日本のプロセスにおける効率改善や省エネ技術は一段落し、飽和傾向にあったが、エネルギー多消費産業のCN化という観点では、これまでとは抜本的に異なるプロセスイノベーションが求められている。
プロダクトイノベーション	エネルギーシステムのCN化の為に重要なプロダクトイノベーションとしては、蓄電池、電気自動車、電気分解装置、燃料電池自動車等が挙げられる。
マーケットイノベーション	カーボンプライシングに関連する排出量取引市場の創設などがこれに当たる。
サプライチェーンのイノベーション	エネルギーシステムのCN化が進展する中で、P2Gなど電気エネルギーから他のエネルギーキャリアへの変換が進み、サプライチェーンに変化が起きつつある。こうした変化はサプライチェーンのイノベーションとしてとらえることができる。
制度・組織のイノベーション	また、CN化する電力システムにおける需給調整市場などにおける制度設計は、革新的な技術の導入に大きく影響するため、大変重要である。

3-2. CN社会実現の為のグリーンイノベーション

プロセスイノベーションとしては、主として産業部門の省エネルギー技術の革新が該当する。著者はIPCCが設立された1988年から産業部門等の省エネ技術を評価してきたが、現在、大きな省エネルギーポテンシャルを持った追加的なプロセス技術は少なくなり、これによるCO₂削減の余地は中期的には小さいと考えてきた。しかし、CN社会の実現という、これまでと抜本的に異なる目的に照らして考えると、新たなプロセスイノベーションが待望されていることが明らかである。

例えば、鉄鋼業についてみると、一般社団法人日本鉄鋼連盟が2021年5月に発表した「我が国の2050年カーボンニュートラルに関する日本鉄鋼業の基本方針」⁵⁾によると、下記のように「ゼロカーボン・スチール」の実現に向けた挑戦の意思が示されている。

すなわち、「鉄鋼業自らの生産プロセスにおけるCO₂排出削減に取り組んでいく（ゼロカーボン・スチール）」

とする一方、その実現が、「一直線で実用化に至ることが見通せない極めてハードルの高い挑戦である」としている。また、「製鉄プロセスの脱炭素化、ゼロカーボン・スチール実現には、水素還元比率を高めた高炉法（炭素による還元）の下で CCUS 等の高度な技術開発にもチャレンジし、更に多額のコストをかけて不可避免的に発生する CO₂ の処理を行うか、CO₂ を発生しない水素還元製鉄を行う以外の解決策はない」とし、水素還元製鉄については、「有史以来数千年の歳月をかけて人類が辿り着いた高炉法とは全く異なる製鉄プロセスであり、まだ姿形すらない人類に立ちはだかる高いハードルである。」と記している。これより、「ゼロカーボン・スチール」実現の為にプロセスイノベーションが如何に困難なものであるかが分かる。

また、同様に、他のエネルギー多消費産業についても、本質的に困難なプロセスイノベーションに取り組もうとしている状況が分かる。例えば、セメント協会が公表している「カーボンニュートラルを目指すセメント産業の長期ビジョン」⁶⁾によると、以下のように記述されている。すなわち、セメントの主成分である酸化カルシウムを得るために石灰石を加熱処理する際に、 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ の反応により必然的に放出される CO₂ が全体の 6 割を占めるという性質があり、現状では代替する技術は存在しないとされている。そして、文献 6) では、様々な対策により、カーボンニュートラルに接近していく戦略が示されているものの、上記のプロセスによる CO₂ 排出を 0 にするようなプロセスイノベーションの技術が見通せているわけではない。

紙面の関係で他のプロセスイノベーションについては詳述を避けるが、カーボンニュートラルを目指すには、エネルギー多消費産業の抜本的なプロセスイノベーションが必須であること、また、現状では、その絵姿が見通せているわけではないが、そこへ向かって懸命に進もうとしている産業の姿勢は明確である。

次に、プロダクトイノベーションについてみると、エネルギーシステムの CN 化に向かって重要なプロダクトとしては、蓄電池、電気自動車、電気分解装置、燃料電池自動車等が挙げられる。これらはプロダクトの単体として、エネルギーシステムの CN 化に役立つ側面もあるが、再生可能エネルギーが電源構成において中心となるために必要な調整力の提供やエネルギー貯蔵の役割を担う意味で重要である。これらのプロダクトにより、CN 化する電力システムが安定し、更には P2G などにより、電気以外にもカーボンニュートラルなエネルギーキャリアを提供することができる。また、上述したプロダクトは、いずれも技術進歩による性能、効率、コストの向上が期待できるものであり、グリーンイノベーションの中核となる可能性がある。

次に、マーケットイノベーションの例としては、排出量取引などのカーボンプライシングを挙げる。2022 年に入り、日本国内でもカーボンプライシングに関する議論が急速に進展しつつある。すなわち、岸田政権の構想として GX 経済移行債、すなわちグリーン経済に移行するための債権を 10 年間で 20 兆円発行するというものがある。この償還財源としてカーボンプライスに関する制度の一つである排出量取引が考えられているのである。この政府のカーボンプライシングについての現状の案は、以下の通りである。⁷⁾

まず、排出量取引は 2026 年度頃から導入される予定である。また、排出量取引の発電部門の有償化は 2033 年度頃から導入するとされている。これは、排出枠の割り当てをグランドファーザー・ルールからオークション形式に変更することを示唆していると考えられる。一方、CO₂（排出）に対する賦課金は 2028 年度頃から導入するとされている。これは、炭素税のようなものであるが、税と賦課金の違いは、税率を変更する際に法律を改定する必要があるのに対し、賦課金の場合は法律を改定する必要がない。GX 経済移行債 10 年間 20 兆円は、上記の発電部門の排出枠の有償化と発電部門以外の賦課金で捻出することとなる見込みである。GX 経済移行債は年間 2 兆円なので、この金額と、本排出量取引制度で捕捉される CO₂ 排出量からカーボンプライシングの水準を推定できる。

また、日本においては、上記のようなキャップ&トレード方式ではなく、ベースライン&クレジットと呼ばれる方式による排出量取引の制度も施行されている。この代表例として Jクレジットがある。⁸⁾ これは、再生可能エネルギー電源、省エネルギー機器の導入、および森林経営などの取組による CO₂ などの温室効果ガスの排出削減量や吸収量を「クレジット」として国が認証する制度である。このクレジットは金銭価値を持つ証券として取引されている。これは、CO₂ 削減に貢献する技術の導入に向けた経済的なインセンティブとなる。

サプライチェーンのイノベーションについては下記のような例がある。すなわち、CN 化に向かうエネルギーシステムにおいては、電気エネルギーとガス体や液体のエネルギーキャリアの間での変換が重要になる。特に、再生可能エネルギー電源の大量導入に伴い、インバランスとなり、あるいは出力抑制される電気エネ

ルギーから、水電解装置により水素を生産し、更に CO₂ と水素の反応により、e-methane や e-fuel 等のガス体、液体燃料を生産することが重要となりつつある。これによって、電気事業、ガス事業、石油関連事業と区分されたサプライチェーンにも相互の複雑な関係が生まれ、新たなイノベーションが起きることとなる。

また、制度・組織のイノベーションとして、電力システムにおける需給調整市場などの新しい制度設計が、新たなイノベーションを生む契機になっていることを挙げる。例えば、三次②などの調整力提供の候補として、電気自動車などによる V2G の利用が期待されている。この需給調整市場の制度設計では、各種の調整力提供の条件が規定されている。例えば、アグリゲートする規模や応動の時間などが細かく規定されており、この規定によって、市場に参入する V2G の規模も影響を受けると考えられる。欧米で普及している周波数制御などの調整力区分では、制御の性能を評価し、その性能評価に応じて報酬を変えることも行われており、これらの制度設計も本分野でのイノベーションの進展に大きな影響を及ぼすであろう。このように、エネルギーシステムの CN 化においては、制度・組織のイノベーションは重要な項目である。

4. 終わりに

カーボンニュートラル (CN) 社会は、低炭素社会の延長上にあると考えがちである。しかし、CN 社会の実現に必要なイノベーションを考慮すると、低炭素社会の実現とは根本的に異なるものと考えたほうが良い。日本はこれまで漸進的な省エネルギーや CO₂ の削減を進めてきた。こうした漸進的な技術進歩を積み重ねることで、省エネルギーと CO₂ 削減の着実な実績をあげてきたことは事実である。

一方、CN 社会の実現には、上記のような漸進的な技術進歩とは異なる抜本的な技術革新が必要であることは本稿で述べた通りである。これまでのところ、日本の行政、産業界、アカデミア、国民の各界において、CN 社会に向かう意志を持った取り組みが開始されているものの確実なソリューションが見つからないわけではない。したがって、今後も、各アクターが、政策立案、技術の実証と実装、研究開発、普及啓発等を行うと共に、活発な意見交換を重ね、CN 社会実現の為の方向性を見出ししていくことが重要である。

参考文献

- 1) Manabe, S., & Wetherald, R. T. (1967). Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24, 241-259.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1967\)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2), 2023. 1. 10 access
- 2) 外務省, 日本の排出削減目標, https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000121.html, 2022. 10. 2 access
- 3) Frank W. Geels and Johan Schot, Typology of sociotechnical transition pathways, *Research Policy*, Volume 36, Issue 3, April 2007, Pages 399-417,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048733307000248>, 2022. 5. 10 access
- 4) Ryuji Matsushashi, Kae Takase, Green Innovation and Green Growth for Realizing an Affluent Low-Carbon Society. *Low Carbon Economy*, 2015, Vol. 6, pp87-95,
<http://dx.doi.org/10.4236/lce.2015.64010>, 2023. 2. 7 access
- 5) 一般社団法人日本鉄鋼連盟, 「我が国の 2050 年カーボンニュートラルに関する日本鉄鋼業の基本方針」, 2021年5月, <https://www.jisf.or.jp/news/topics/documents/CN2050.pdf>, 2023. 2. 1 access
- 6) 一般社団法人セメント協会, 「カーボンニュートラルを目指すセメント産業の長期ビジョン」, 2022年3月, https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/220324_01.pdf, 2023. 2. 4 access
- 7) 木内登英, カーボンプライシングをGX経済移行債の償還財源に: 負担先送りと脱炭素の実効性に課題, NRI+レッズ インサイト, https://www.nri.com/jp/knowledge/blog/1st/2022/fis/kiuchi/1201_2, 2023. 1. 7 access
- 8) Jクレジット制度, <https://japancredit.go.jp/>, 2022. 12. 17 access

*Ryuji Matsushashi

The University of Tokyo