



一橋大学イノベーション研究センター

東京都国立市中2-1
<http://www.iir.hit-u.ac.jp>

本ケースの著作権は、筆者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本ケースに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】一橋大学イノベーション研究センター研究支援室
TEL: 042-580-8423 e-mail: chosa@iir.hit-u.ac.jp

カーボンニュートラル実現に向けたイノベーションの可能性

～エネルギーシステム変革の歴史・構造を踏まえたグリーンイノベーション政策の方向～

一橋大学イノベーション研究センター

市川類

2021年11月17日

概要

近年、2050年までのカーボンニュートラルの実現は、世界的な最重要関心事項であり、世界各国においては、その実現のために、成長戦略の一環として、グリーンイノベーションの推進に取り組んでいる。一般的に、カーボンニュートラルの実現については、多くの困難があることは理解されつつも、イノベーション推進によるその実現への期待は高く、また、その実現可能性は完全には否定できない。

しかしながら、そのカーボンニュートラルのイノベーションによる実現については、過去の事例を踏まえると社会への普及まで含めてどの程度の時間を要するのか、再生可能エネルギーの導入普及以外にどのような技術システムのイノベーションが必要なのか、また、これらのイノベーションを経済成長につなげるにはどうするかなどといった、イノベーションによる実現可能性やその理論からみた政策の方向については、これまで必ずしも十分に議論はなされていない。

このような問題意識のもと、本ワーキングペーパーにおいては、2050年までのカーボンニュートラルの実現に向けて、これまでのエネルギー分野とそのシステムにおけるイノベーションに係る歴史と、将来のカーボンニュートラル型エネルギーシステムとのその実現に向けたイノベーションとその政策のあり方の両面から考察を行うことにより、イノベーションによる実現可能な範囲の輪郭を捉え、その政策の方向を提示することを目的とする。

具体的には、過去のイノベーションによるエネルギーシステム改革の歴史からみると、カーボンニュートラル実現には過去に前例がない急速でのシステム転換が求められること、近年の日本を含む先進国でのCO₂排出量の減少はエネルギー消費と経済成長とのデカップリングの進展が大きな要因であり、そのカーボンニュートラルの実現には特に発展途上では大きな困難があること、日本においても近年再エネの進展は進みつつあるが産業政策的には必ずしも成功しなかったこと、また、今後再生可能エネルギーの普及拡大のみではカーボンニュートラルの実現は困難であり、供給安定性及び供給可能性（エネルギー安全保障）の観点から、システム自体の抜本的な改革とそのため多様な技術のイノベーションをセットで推進することが喫緊の課題であること、そのためには、蓄電・水素システムについて物理化学的視点からの技術的な可能性を見極めるとともに、デジタル技術による全く新たな分散型調整システムの設計が不可欠であることなどについて考察する。

その上で、カーボンニュートラル型エネルギーシステムの特徴を指摘した上で、カーボンニュートラルを実現するためのイノベーション政策としては、環境規制として位置付けに加え、長期的な目標の社会的共有という特徴を踏まえて、バランスの取れたイノベーション政策の構築の必要性であること、また、経済成長における汎用技術としてのエネルギー技術の位置付けとその歴史を踏まえると、カーボンニュートラルの実現だけでは必ずしも経済成長は見込まれず、デジタルイノベーションなどとの連携の下で取り組むことが必要であることなどを論点として提示する。

目次

概要	1
目次	2
1. 問題意識	3
2. エネルギー革命の歴史と経済成長から見たカーボンニュートラル	6
(1) エネルギー革命、エネルギーシステムの変遷、経済成長の波及の歴史	6
(2) 近年のエネルギー革命と経済成長との関係の変化	10
(3) カーボンニュートラル型エネルギーシステムへの転換	13
3. 日本の地球温暖化対策の歴史とカーボンニュートラル目標	17
(1) 地球温暖化問題の経緯	17
(2) 日本における地球温暖化対策に係るこれまでの経緯	21
①日本にこれまでの取組の経緯（全体像）	21
②日本のこれまでのCO ₂ 排出量と今後の目標	26
③日本における再生可能エネルギー政策を巡る動向	30
(3) 日本のグリーンイノベーション政策を巡る経緯と特徴	36
4. カーボンニュートラル型エネルギーシステムへの変革	41
(1) カーボンニュートラル型のエネルギーシステムの構造	41
(2) カーボンニュートラル型エネルギーシステムに求められる機能要件	46
①エネルギーシステムにおける供給安定性と供給可能性	46
②電力供給安定化のための蓄電・水素関連施設・設備の導入	48
③デジタル技術による分散型電力調整システムの整備	51
5. カーボンニュートラル実現に向けたグリーンイノベーション政策	53
(1) グリーンイノベーションに対する期待とその政策	53
(2) カーボンニュートラル型グリーンイノベーション政策の特徴	55
(3) 経済成長に向けたグリーンイノベーション政策の在り方	59

1. 問題意識

<本ワーキングペーパーの問題意識>

本ワーキングペーパーにおいては、カーボンニュートラル実現に向けたエネルギー技術・システムに係るイノベーションについて議論する。

近年、2050年までのカーボンニュートラルの実現は、世界的な最重要関心事項であり、その実現に向けたイノベーションに係る取組みは、もはや世界的な潮流となりつつある。日本においても、2020年10月、菅総理大臣（当時）が2050年のカーボンニュートラル達成の宣言¹したことを踏まえ、政府は、デジタル分野に加え、カーボンニュートラル達成のための対応であるグリーン分野を、成長戦略の柱として位置付け、両分野におけるイノベーションの推進に積極的に取り組んでいる。

2050年までにカーボンニュートラルを実現するという事は、現在の化石燃料を中心としたエネルギーシステムから、全く新たなエネルギーシステムに、あと約30年間で転換することを意味する。このような急速なエネルギーシステムの転換は、世界の歴史からみても前例はなく、その実現は全く容易ではない。実際に、世界的にその必要性は共有されつつも、その実現を困難視する見方も少なくない²。一方、政府は、このカーボンニュートラルの実現を、可能な限り「イノベーション」の推進を通じて達成しようと考えており³、そのため、イノベーションに対する期待は非常に高い。

しかしながら、そのイノベーションによる実現については、過去の歴史を踏まえると社会への普及まで含めてどの程度の時間を要するのか、再生可能エネルギーの普及以外にどのような技術・システムのイノベーションが必要なのか、また、これらのイノベーションを経済成長につなげるにはどうするかなどといった、イノベーションによる実現可能性やその理論からみた政策の方向については、これまで必ずしも十分に整理されていないのが現状である。

このような問題意識のもと、本ワーキングペーパーにおいては、2050年までのカーボンニュートラルの実現に向けて、これまでのエネルギー分野におけるイノベーションに係る歴史と、将来のカーボンニュートラル型エネルギーシステムのその実現に向けたイノベーションのあり方の両面から考察を行うことにより、イノベーションによる実現可能な範囲の輪郭を捉え、その政策の方向を提示することを目的とする。

¹ 官邸「グリーン社会の実現」

<https://www.kantei.go.jp/jp/headline/tokushu/green.html>

² 例えば、日本政府のグリーン成長戦略（2021年6月）においても、「「発想の転換」、「変革」といった言葉を並べるのは簡単だが、カーボンニュートラルを実行するのは、並大抵の努力ではできない。」としている。

なお、日本財団の「18歳意識調査「第34回－脱炭素－」要約版」（2021年2月25日）によると、60.4%が「「2050年カーボンニュートラル」を評価する」としている（評価しないは10.3%）のに対し、「「2050年カーボンニュートラル」を実現可能だと思う」は14.4%（可能でないは35.4%）に留まっている。

https://www.nippon-foundation.or.jp/app/uploads/2021/02/new_pr_20210225_5.pdf

³ 例えば、以下を参照。

岡田 広行：東洋経済 解説部コラムニスト「経産省幹部が語る「カーボンニュートラル」の難路 日本式のやり方でベストな方策を追求していく」2021/08/29

<https://toyokeizai.net/articles/-/451291>

なお、現在人類が直面する地球環境問題としては、カーボンニュートラルという目標を設定する気候変動（地球温暖化）問題以外にも、生物多様性、サーキュラーエコノミー（循環型経済）、水問題など、多様な問題が取り上げられている。また、気候変動（地球温暖化）問題の原因とされる温室効果ガスには、化石燃料起源の CO₂ 以外にも、それ以外の起源による CO₂ や、メタンやフロン類などがある⁴。しかしながら、本ワーキングペーパーでは、気候変動問題への対応としてエネルギーシステムの在り方の観点のみから議論するものとし、したがって気候変動問題のうち、化石燃料起源の CO₂ についてのみを取り扱う。

また、CO₂ を初めとする温室効果ガスによる地球の気候システムへの影響については、主として、IPCC（国連気候変動に関する政府間パネル）による現時点での科学者による見解に基づくものであり、特に近年の異常気象と呼ばれる事象の関係を含ま一部疑義が呈されているのは事実である⁵。しかしながら、既に世界各国がカーボンニュートラルの実現に向けて取り組んでいること自体は紛れもない事実であり、本ワーキングペーパーでは、温室効果ガスによる地球の気候変動への影響に係る科学的事実関係やカーボンニュートラルの実現の必要性などについては議論しない。

<本ワーキングペーパーの構成>

上述の問題意識の下、本ワーキングペーパーでは、まず、前半（第二章、第三章）において、エネルギーに係る過去のイノベーションの歴史とその政策について分析、考察する。

次章（第二章）においては、まず世界全体のエネルギー革命と経済成長の歴史の流れの中で、カーボンニュートラルがどのような位置付けになるかについて分析、考察する。具体的には、まず、汎用技術としてのエネルギー技術の位置づけとそのイノベーションによるエネルギー革命の位置づけ、過去の薪から化石燃料（石炭、石油、天然ガス）へのエネルギーシステムの転換の歴史を踏まえた上で、経済全体へのイノベーション波及効果との関係を整理する。その上で、近年のエネルギー消費と経済成長の関係を分析することにより、先進国において経済成長とエネルギー消費のデカップリングが進む一方、途上国において引き続き経済成長と併せてエネルギー消費が増大する傾向にあり、カーボンニュートラル実現に大きな困難を有することを明らかにする。また、このようなイノベーションの歴史を踏まえ、2050年のカーボンニュートラルの実現には、過去に前例がない急激な速度でのシステム転換が求められることを、そのシナリオの一つである IEA によるマイルストーンの紹介も含めて示す。

第三章では、そのような中、日本において、これまで地球温暖化対策としてどのように目標を定めて、また、カーボンニュートラルの実現に向けどのようなイノベーション政策を進めようとしているのかについて分析、整理する。具体的には、地球環境／地球温暖化問題の歴史を振り返ったあと、過去 30 年間に渡る日本政府の地球温暖化対策における目標設定とその達成状況や、再生可能エネルギーに係るこれまでの政策とその普及状況について分析を行う。これにより、日本においても、近年の CO₂ 排出量は減少傾向にあるが、その要因の多くは、経済成長とエネルギー消費のデカップリングによるものであること、また再生可能エネルギーの導入量は、FIT 制度の導入により従来の想定よりも飛躍的に伸びてきているも

⁴ 地球温暖化の原因となっている人為起源の温室効果ガスとしては、化石燃料起源の CO₂（65%）、森林破壊や森林劣化、山火事などによる CO₂（11%）、メタン（16%）、一酸化二窒素（6.2%）、フロン類（2.0%）とされる。

<https://www.jccca.org/global-warming/knowledge01>

⁵ 特に、例えば、杉山 大志『地球温暖化のファクトフルネス』2021/2/7 など。

の、産業政策的には必ずしも成功しなかったこと等を論じる。その上で、これまでの政府によるグリーンイノベーション戦略の経緯を振り返ったあと、現在のカーボンニュートラル実現に向けたグリーン成長戦略の特徴について整理する。

後半（第四章、第五章）においては、将来のカーボンニュートラルを実現するために必要なエネルギーシステムの改革の方向を明示した上で、それらを達成するために必要なイノベーションの政策のあり方と経済成長との関係について論点を提示する。

第四章では、上記のグリーン成長戦略を踏まえた上で、カーボンニュートラル実現に必要なエネルギーシステムへの改革の方向性について論じる。具体的には、まずは、カーボンニュートラル実現のための今後のエネルギーシステムの改革の方向を明示するとともに、特に、日本が目指そうとしているシステムの特徴についても論じる。その上で、エネルギーシステムの中で今後重要性の増す電力システムに関し、単に再生可能エネルギーの導入普及だけではなく、安定供給及びエネルギー安全保障の観点から、システム自体の抜本的な改革とそのための多様な技術のイノベーションをセットで推進することが喫緊の課題であることを指摘する。その際、蓄電・水素関連設備・施設・システムを組み込むにあたって、その物理化学的視点からの技術的な可能性を見極めるとともに、デジタルを活用した全く新たなアーキテクチャによる分散型調整システムの設計が不可欠であることなどを提言する。

最後、第五章では、カーボンニュートラル実現に向けたグリーンイノベーションの推進政策のあり方について、論点を提示する。具体的には、カーボンニュートラルの実現に向けたイノベーションへの期待の内容と、特にカーボンニュートラル問題におけるイノベーション政策を巡る特徴として、環境規制としての正当性と、長期的な社会的目標の共有という点があることを指摘した上で、カーボンニュートラル実現に向けたイノベーション政策の在り方について、排出・経済規制の在り方、環境規制とイノベーションに係る理論、社会的共有目標の観点から分析、バランスの取れたイノベーション政策の構築の必要性を指摘する。その上で、第二章の議論を踏まえ、カーボンニュートラルの実現のためのイノベーションのみでは、必ずしも経済全体へのイノベーションの波及効果は見込まれないことを指摘しつつ、これらのイノベーションを成長戦略として経済成長につなげるための視点を論点として提示する。

2. エネルギー革命の歴史と経済成長から見たカーボンニュートラル

本章においては、まず世界全体のエネルギー革命と経済成長の歴史の流れの中で、カーボンニュートラルがどのような位置付けになるかについて分析、考察する。

まず第一節においては、汎用技術としてのエネルギー技術の位置づけとそのイノベーションによるエネルギー革命の位置づけ、過去の薪から化石燃料（石炭、石油、天然ガス）へのエネルギーシステムの転換の歴史を踏まえた上で、経済成長全体へのイノベーションの波及効果との関係を整理する。

その上で、第二節において、近年のエネルギー消費と経済成長の関係を分析することにより、先進国において経済成長とエネルギー消費のデカップリングが進む一方、途上国において引き続き経済成長と併せてエネルギー消費が増大する傾向にあり、カーボンニュートラル実現に大きな困難を有することを明らかにする。

さらに、第三節においては、このようなイノベーションの歴史を踏まえ、2050年のカーボンニュートラルの実現には、過去に前例がない急激な速度でのシステム転換が求められることを、そのシナリオの一つであるIEAによるマイルストーンの紹介も含めて示す。

これらの議論により、以下のことを明らかにする。

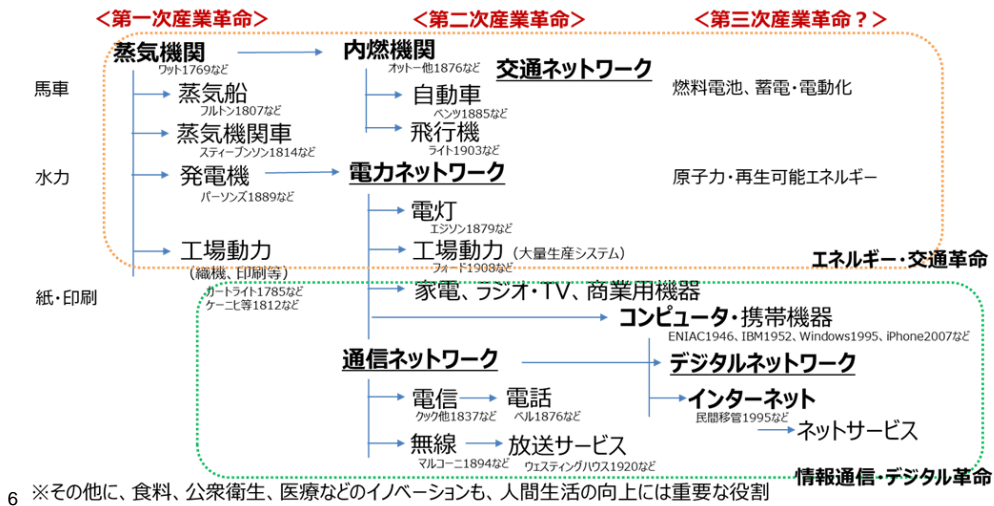
- これまでの化石燃料革命、電力革命と比較して、再生可能エネルギーの導入普及が経済成長や社会全体のイノベーションに与えるインパクトは、現時点で考えられる限り、比較的小さいこと
- 近年、先進国を中心としエネルギー利用と経済成長に係るデカップリングが進展する一方、発展途上国では経済成長に伴いエネルギー利用の増大が続いており、カーボンニュートラルの実現により困難を抱えていること。
- 2050年までのカーボンニュートラル実現のためには、エネルギーシステムについてその過去のイノベーションの歴史からみても、また現在のトレンドから見ても、これまでに前例のない急速な転換が必要であり、必ずしも容易ではないこと。

（1）エネルギー革命、エネルギーシステムの変遷、経済成長の波及の歴史

<産業革命としてのエネルギー・交通革命>

エネルギー・交通技術は、情報通信・デジタル技術と並んで、いわゆる汎用技術、すなわち、ほぼ全ての産業が利用する、広い範囲で多様な用途に使用され得る基幹的な技術として位置づけられ、人類史の登場以来、産業革命を初めととして、世界全体のイノベーションの進展や経済成長を牽引してきた技術である。このうち、エネルギー・交通技術は、人間の「物理的能力」を拡大するものとして、また、情報通信・デジタル技術は、人間の「知的能力」を拡充するものとして、各産業の生産性の向上とそれによる経済の成長を牽引する技術として位置づけられる。

図1：産業革命におけるエネルギー・交通革命の系譜



また、エネルギー・交通技術による産業革命としては、石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料を採掘・生成・利用し、燃焼するとともに、蒸気機関・内燃機関によって、動力を得るための一連のイノベーションによってことが可能になった「化石燃料革命」と、それらの化石燃料を利用して発電機を通じて電力を創出し、変電器や情報システムを含む電力ネットワーク（電力網）の一連のイノベーションを通じて社会全体に対して電力エネルギーの供給が可能になった「電力革命」の二つの分けることができる。

具体的に、「化石燃料革命」としては、第一次産業革命では、蒸気機関による石炭利用が、また、第二次産業革命では、内燃機関による石油の利用が、イノベーションによって可能となるとともに、それらを採掘、精製・加工、運搬（パイプラインによる輸送を含む）、利用する技術のイノベーションが進展し、インフラ・社会システムとして投資、整備されることにより、これらのエネルギーを利用するネットワークシステムが構築されてきた。また、「電力革命」は、第二次産業革命の一部として、これらの化石エネルギーを一次エネルギーとして利用し、発電機を通じた発電技術が開発されるとともに、電力網に係る技術イノベーションが進展し、インフラ・社会システムとして投資、整備されることによって、社会全体に供給されるインフラが整備されてきた。

いずれも、鍵となるエネルギー転換技術に係る革新的・継続的なイノベーションの進展に加え、そのエネルギー供給・利用に係る多様なシステム技術に係る多数のイノベーションが互いに連携しながら進展することによって、その供給システム全体が「エネルギーシステム」として社会に普及することにより、エネルギーを利用する幅広い分野でのイノベーションを創出・波及してきた。

<エネルギー技術・システムのイノベーション～その転換・改革の歴史>

これらのうち、化石燃料革命が中心となる、一次エネルギー供給に係るエネルギーシステムとしてのイノベーションとその転換は、過去において、どのように変遷してきたのであろうか。

一次エネルギー供給に係るエネルギー種に係る変遷については、Marchetti (1977) の研究を踏まえ、ローズ (2019) ⁷は、世界における一次エネルギーは、歴史的に見ると、新

⁶ 出典：筆者作成

(木炭)、石炭、石油、天然ガスと転換してきており、(当時においては、) 今後、原子力、再生可能エネルギー(再エネ)へ転換していくことが見込まれていたとしており、それらのエネルギー種の転換には、おおよそ半世紀～一世紀を要してきたことが指摘されている⁸(図2参照)。

このように新しいエネルギーシステムが社会に普及するのに時間を要する理由は、社会は学習システムであり、新しいエネルギー源が市場に受け入れられるまでには、社会に受け入れられるべく技術の改良が継続的に繰り返さされ、信頼を得て多様な分野で安定的に利用されるようになるまでには、時間を要するためであるとしている。

図2：世界の一次エネルギーの歴史的進化 (Marchetti,1977)⁹

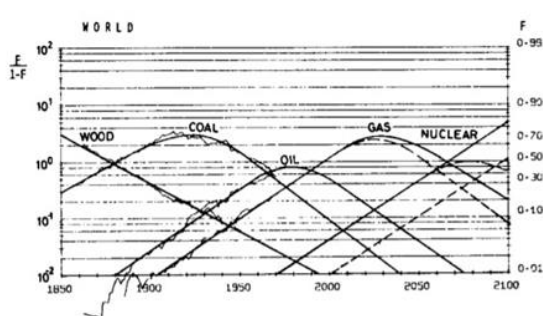


Fig. 7(a). Historical evolution of the primary energy mix for the world. Wiggling lines are statistical data, smooth lines computed. Some values for the actual market fractions are given on the right side of the figure. The effect of introducing a new source of primary energy (1% in year 2000), solar, fusion or else, is indicated by the dashed lines. This effect appears minimal on conventional sources, and dramatic only on nuclear, but in the second half of the next century.

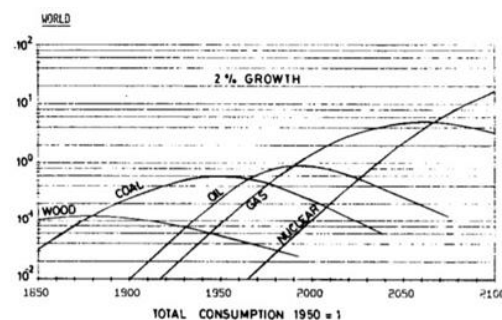


Fig. 7(b). World primary energy consumption in absolute terms (total for 1950 taken as unit). Secular growth rate assumed to remain 2%. Nuclear penetration assumed to be 4% in year 2000. Total oil consumption may be compatible with reserves but this is highly improbable for gas. A faster nuclear penetration and the vigorous introduction of a new source of energy during the next 20 years (fusion, solar?) may correct this incongruity and could be considered a demand from the market and not just an optional alternative.

また、これらの化石燃料に係るエネルギーシステムの転換においては、イノベーションを通じて、従来のエネルギー源では実現できなかった機能が新たに可能となることにより、そのエネルギーを利用する分野における新たなイノベーションの波及を引き起こすとともに、当該エネルギーを供給するエネルギーシステムが時間をかけて構築されたきたと言える。例えば、薪からは石炭への転換においては、暖房・熱源代替だけではなく、蒸気機関が利用可能になることにより、工場などの動力や鉄道・船舶など幅広い分野のイノベーションを引き起こすと同時に、石炭の供給システムが時間をかけて整備・効率化されてきた。石炭から石油への転換においては、当初は照明用から始まったが、その後内燃機関が利用可能となることにより、自動車・飛行機などの幅広いイノベーションを引き起こすと同時に、採掘・精製から供給に至る一連の供給システムが構築されてきた。さらに、天然ガスは、石炭よりも煙害の少ないクリーンなエネルギー源として、暖房・熱源需要や発電需要の代替が進むとともに、パイプラインを含むその供給システムが整備されてきた。

なお、上述の図2は、1970年代半ば時点のものであるが、ルイス・デ・ソワ(2007年)の改訂版にみられるように、その後、石油・天然ガスの供給量は維持・増加しつつも、石炭

⁷ リチャード・ローズ、『エネルギー400年史—薪から石炭、石油、原子力、再生可能エネルギーまで』秋山勝 訳、草思社、2019年

⁸ ローズ(2019)では、マルケッティの研究(1979など)を評して、ルイス・デ・ソワ(2007)は、「一つのエネルギー源が市場の1~10パーセントの占有率を獲得するまでに40~50年がかかり、1パーセントの時点から、最終的に市場の半分を占めるまでには、ほぼ1世紀の時間がかかる点だ」と説明している、としている。(位置No.7904)

⁹ C. Marchetti, "Primary Energy Substitution Models: On the Interaction between Energy and Society", Technological Forecasting and Social Change 10. 345-356 (1977)
<https://cesaremarchetti.org/abstracts.html>

の相対的な位置付けは当時の予想通りには減少せず、一方、原子力については当初急速に拡大したものの、その後伸び悩んでいる。その結果、この40年において、一次エネルギーに係るエネルギーシステムの大きな転換が起きなかったことを意味しており¹⁰、実際に、現時点では、化石燃料である石炭、石油、天然ガスそれぞれが棲み分けながら併存するという状況になっており、実際に、現在は、これらの化石燃料が世界全体の一次エネルギー消費量の約85%（それぞれ約27%、約33%、約24%）を占めている。

一方、原子力は、その導入が開始された当初は、「クリーンで無尽蔵の可能性を秘めた新エネルギーとしてもはやされた」¹¹が、その後普及が進まず、2017年には、それまでの40年以上に及ぶ開発の歴史において、原子力開発が世界的に初めて減少に転じている¹²。その理由としては、科学的な誤った認識の普及も含め、社会に受容されなかったこと¹³に加え、そのような社会受容性の中で、技術の特質上、イノベーションの本質である「試行錯誤を通じた技術の向上」を図ることが、そもそも許されない技術であったことがその要因であると指摘されている¹⁴。

このような流れの中で、再生可能エネルギーを中心とする「カーボンニュートラル型」のエネルギーシステムが、今後、イノベーションを通じて、どのように社会に受け入れられ、どのような速度でシステムとして普及すること可能なのか（すなわち、2050年までに可能なのか）が論点になる。

<エネルギー技術・システムのイノベーションの波及効果>

また、このようなエネルギーシステムに係る技術・イノベーションは、上述のとおり、汎用技術としての波及効果の高さが故に、世界の経済成長を牽引してきたと言える。すなわち、これらのエネルギーシステムが登場し、製造工程など社会の各分野における熱源利用と動力化や、これらのエネルギーを動力として活用した交通・物流のネットワークの整備が進展することにより、それらを利用する多様な産業とサービスが創出されるとともに、電力の利用による様々な製品・サービスが創出された。特に、石油と内燃機関は、自動車・飛行機を初

¹⁰ ローズ（2019）

¹¹ ローズ（2019）（位置 No.7594）

¹² ローズ（2019）（位置 No.7750）

¹³ 具体的には、放射線被ばくが微量でも遺伝的な悪影響をもたらすという直線閾値なし（LNT）モデルが、その後否定されたにも関わらず、一般の人たちに低線量の放射線の恐怖を植え付け、反原発運動を勢いづかせたことに加え、これまでの三度にわたる世界的な原発事故（スリーマイル、チェルノブイリ、福島）により、欧米そして日本において「圧倒的な政治的な抵抗を受け」たこと。ローズ（2019）（位置 No.7962）

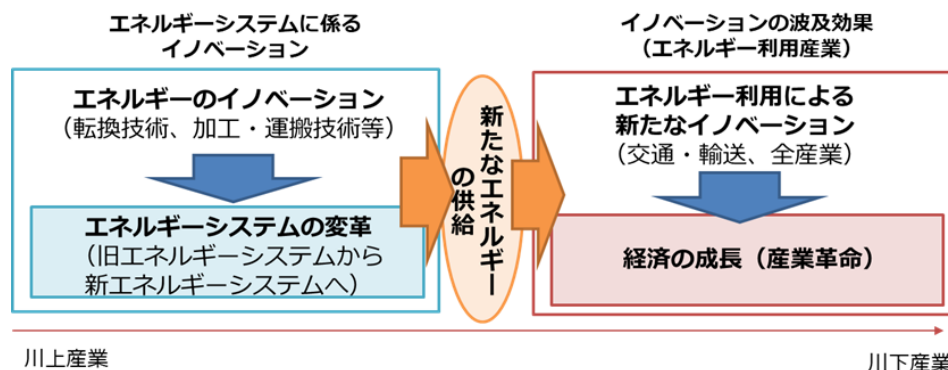
¹⁴ リドレー（2021）によると、原子力は、1960年代には「いつの日かがメーターが要らないほど安価になる」と言われたが、その実現が困難となった理由は、原子力はイノベーションの実績の決定的要素に合わない技術であること、すなわち「やってみて学習する」には、発電所が大きく費用がかかるため、実験でコストを削減することが不可能であったことが挙げられている。（位置 No.765）

また、実際に、1980年代に西側諸国で原発建設が中止された理由は、規制強化によるコスト高騰が要因であり、規制機関の要求に対応するため、書類を作成するホワイトカラーの労働者が急増し、また、新たな規制で1970年代には、メガワット当たりの鋼鉄、コンクリート、配管、電線の量は、それぞれ41%、27%、50%、36%増大したとしている（位置 No.790）。このようなコストの高い過剰規制によって、原子力の普及とイノベーションが阻害され、それがゆえにシステムの安全性が低下したと指摘している（位置 No.777）。

マット・リドレー、『人類とイノベーション：世界は「自由」と「失敗」で進化する』大田直子 訳、ニュースピックス（2021/3/3）

めとする交通革命を引き起こし、物流形態を初めとする全ての産業のイノベーションや人々のライフスタイル形態を発展させた。また、電力の普及は、全ての産業における動力や電子機器の利用に係るイノベーションを促進させるとともに、各種家電機器のイノベーションを通じて人々のライフスタイルを大きく変化させるとともに、多くの新たな産業を創出した。これらが、産業革命と呼ばれる所以である。

図3：汎用技術としてのエネルギー技術のイノベーションと経済成長・産業革命



なお、化石燃料以降の一次エネルギー源としては、新たに、原子力、再生可能エネルギー（太陽光発電、風力発電、地熱発電など。以下、再エネ）が登場してきている。これらの技術・イノベーションは、化石燃料の登場と比較して、産業革命としての他の産業界や経済全体への波及効果・インパクトは、少なくとも、現時点では、比較的小さいと考えられる。すなわち、原子力にせよ、再生可能エネルギーにせよ、原則として、電力としてエネルギー供給が行われる¹⁵ものであり、その際、その発電される電力は、これまで化石燃料で発電される電力とは、原則、品質・機能が異なるものではない。したがって、（桁違いの低価格をもたらすようなものでなければ）川下部門での新たなイノベーションを引き起こすものではないと位置づけられる。なお、蓄電技術などは、電力の利用可能性の範囲を拡大させるものであり、場合によっては、産業界や新たなイノベーションに大きな影響を与えうるものである。

このような視点からの、再生可能エネルギーを中心とする「カーボンニュートラル型」のエネルギーシステムの経済成長への波及効果については、第5章において再度検討する。

（2）近年のエネルギー革命と経済成長との関係の変化

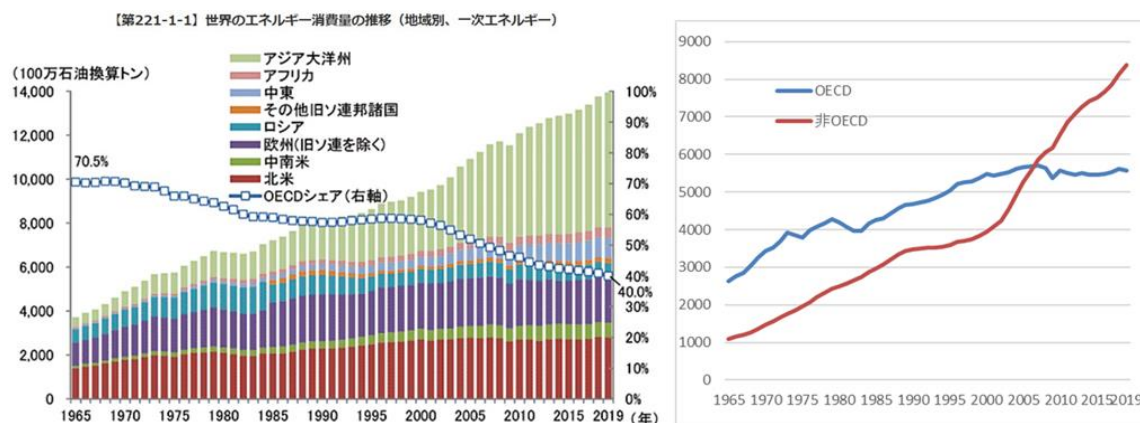
前述のとおり、エネルギー技術は汎用技術であり、そのエネルギーシステムに係る革新的・継続的なイノベーションの進展が、川下産業におけるイノベーションに波及し、その結果、世界の経済成長を牽引してきた。また、このため、エネルギーの利用は経済全体の付加価値源として機能しており、その結果、エネルギー消費の増大と経済成長の進展は関連することが従来から指摘されている。

それでは、近年、このエネルギー消費と経済成長の関係はどのようになっているのだろうか。近年においても、世界のエネルギー消費量は、全体として引き続き増大傾向にある。た

¹⁵ ただし、原子力は、原子力潜水艦など、動力などとしても利用される。また、太陽光は、熱源としても利用されうるとともに、将来的には人工光合成などの技術が実用化する可能性もある。

だし、そのエネルギー消費量を、地域別で見ると、先進国と途上国で大きな違いがある。すなわち、先進国（OECD 諸国）では、概ね 90 年代半ば以降、エネルギー消費量は伸び悩んでいるのに対し、一方、中国を含む途上国では、概ね 2000 年以降急速に増大しており、概ね 90 年代後半の 2 倍にまで増加している（図 4 参照）。

図 4：世界のエネルギー消費量の推移（地域別）¹⁶



(出典) 資源エネルギー庁「令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）」2021年6月

上述のとおり、このような世界のエネルギー消費量は、一般的にこれまで、経済成長とともに増加すると言われてきた¹⁷。実際に、現在でも、特に発展途上国においては、急速な経済成長に伴い、（経済成長ほどではないにせよ）エネルギー消費量も急速に増大している。これに対し、先進国においても、発展途上国ほどではないにせよ、着実に経済成長が進んでいるのに対して近年はむしろエネルギー消費量は伸び悩むあるいは減少するという、いわゆるエネルギー消費と経済成長との「デカップリング」¹⁸が進んでいると指摘される。例えば米国においては、概ね 1970 年代半ば以降、経済成長の伸びとエネルギー消費量のデカップリングが進展していることが示されており（図 5 参照）、このような傾向は他の先進国でも見られる（日本におけるデカップリングについては、第 3 章で示す）。

図 5：経済成長とエネルギー消費のデカップリング（米国の事例）¹⁹

¹⁶ 出典：資源エネルギー庁「令和 2 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2021）」2021 年 6 月。右図は、同データに基づき、筆者作成。

¹⁷ たとえば、エネルギー白書 2021 においても、「世界のエネルギー消費量（一次エネルギー）は経済成長とともに増加を続けており、」としている。

¹⁸ 内閣官房グリーン成長戦略「デカップリングとは何か」

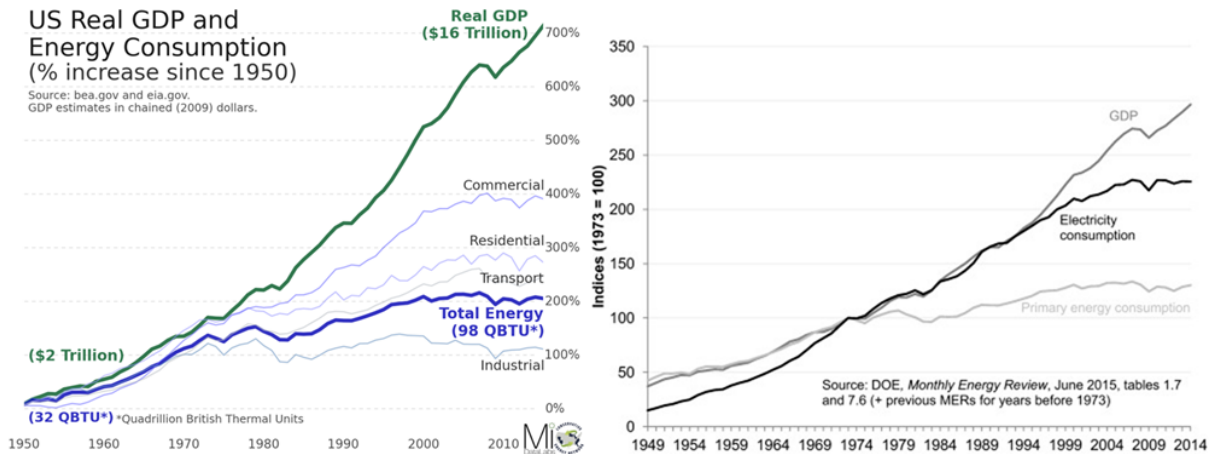
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/greenenergy/green_growth_strategy/decoupling/index.html

¹⁹ Richard F.HirshJonathan G.Koomey, “Electricity Consumption and Economic Growth: A New Relationship with Significant Consequences?”, The Electricity Journal Volume 28, Issue 9, November 2015, Pages 72-84

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619015002067?casa_token=yuZGJ8-S67IAAAAAA:N6bwBJYxEt31rCvIsO7zh8S_LWCsoVLLuljt-t5uLufbjwLVzkZWot2rVsu0XHUM_ntWFju4aMty

US economic growth outpaces increasing energy consumption across all sectors.

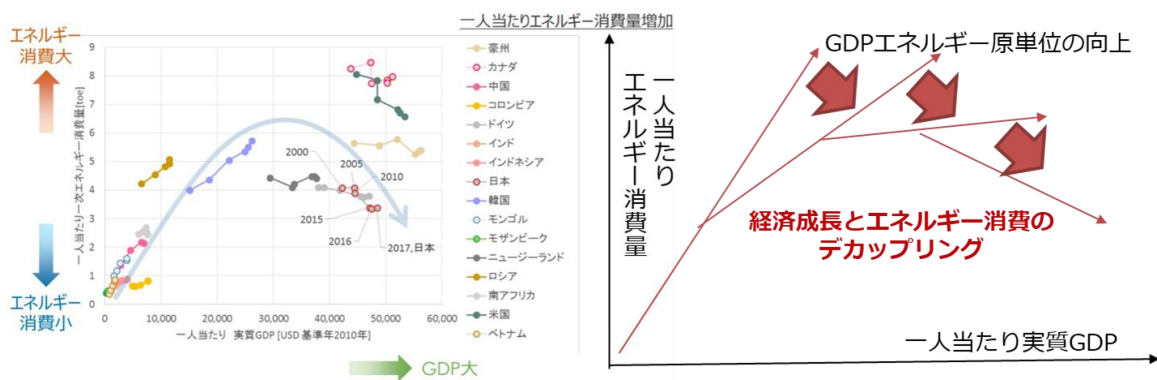
https://www.reddit.com/r/dataisbeautiful/comments/4dlyu5/us_economic_growth_outpaces_increasing_energy/



この結果、近年、発展途上国においては、一人当たり GDP の増大・経済成長に伴い、引き続き、一人当たりエネルギー消費量は増大するのに対し、先進国においては、そのレベルは国によって異なるものの²⁰、GDP の増大・経済成長につれて、一人当たりのエネルギー消費量は漸減する傾向にあることが指摘される（図6参照）。

このような経済成長とエネルギー消費のデカップリングの要因は、一般的には、GDP エネルギー消費原単位の継続的向上、すなわち、広い意味での社会全体での省エネルギーの進展によるものと説明される。実際に、発展途上国においても、先進国と同様、対 GDP あたりのエネルギー消費量は、急激に減少する傾向にあることが示されている²¹。その結果、経済レベル（一人当たり実質 GDP）が低水準である場合には、旺盛な経済成長と併せてエネルギー消費量もそれなりに増大するのに対し、経済が高水準になると、エネルギー消費と経済成長のデカップリングが進展し、経済成長にあたって、エネルギー消費は必ずしも増加しない傾向にあるものと整理される（図6右図参照）。

図6：一人あたりエネルギー消費量と一人当たり GDP の国別傾向²²



²⁰ 世界各国の一人当たりのエネルギー消費量は、平均気温の差、産業構造の差、人口密度を含む社会システムの差など、当該国の地域・エネルギー事情によって大きく異なる。

²¹ 資源エネルギー庁「令和2年度エネルギーに関する年次報告」（エネルギー白書2021）2021年7月【第211-2-1】実質GDP当たりのエネルギー消費の主要国・地域比較

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/2-1-1.html>

²² 石油天然ガス・金属鉱物資源機構「平成30年度JOGMEC石炭開発部成果報告会海外炭開発高度化等調査（①世界の石炭事情）」2019年7月16日

<http://www.jogmec.go.jp/content/300363239.pdf>

それでは、何故、近年において、世界でのこのような実質 GDP に対するエネルギー消費原単位が減少し、また、その中で、このような先進国を中心とした経済成長とエネルギーのデカップリングが進展しているのであろうか。今後、より詳細に分析を行う必要があるものの、概ね、以下の2つの視点から説明されるものと考えられる。ただし、いずれの説明も、同じ事象を別に観点から説明しているに過ぎないという可能性もある。

- まずは、エネルギー投入による経済成長への限界生産性が、経済が成長し時間が経つにつれ、逡減している可能性である。これは、革新的なエネルギー技術とその後の継続的なイノベーションによるその高度化と普及が十分に進み、その結果、エネルギー利用による川下分野での更なるイノベーションが起こりにくくなってきているという解釈である。その際、発展途上国のように経済レベルが低い場合（一人当たり実質 GDP が低い場合）においては、まだ高度なエネルギーシステムや川下分野での効率的なエネルギー利用が十分に普及していないため、エネルギー投入による経済成長（イノベーション）に対する限界生産性は高く、経済成長においてエネルギー消費（投入）は重要な要素であると整理される。しかしながら、経済レベルが高くなるにつれ、エネルギー投入による経済成長に対する限界生産性が逡減していくとの解釈である。言い換えれば、経済レベルが低い場合には、多量のエネルギーを投入することによって経済成長が可能であるが、その後、経済成長に伴い社会全体の効率性が向上し、社会全体のエネルギー消費の効率化が進むため、エネルギー投入による経済成長に限界が生じるという解釈である。
- また、その限界生産性の裏腹の議論として、近年の情報通信・デジタル技術の進展に伴い、特に先進国を中心に、経済成長・生産性向上に係る付加価値源が、従来のエネルギーからデジタルへと移行しつつあることもその要因として考えられる。その結果、エネルギー消費が減っても、デジタル技術によるデータの利活用により GDP が増大しているとの解釈である。

いずれにせよ、近年のエネルギー消費と経済成長との関係を踏まえると、先進国では、既にエネルギー需要が安定し、非エネルギー依存型の経済発展形態に移行しているため、カーボンニュートラルが実現が比較的容易に可能であるのに対し、発展途上国では、経済成長のためにもエネルギー需要の増大が今後とも見込まれ、そのためにも現在利用可能である化石燃料に基づく既存のエネルギーシステムの拡大に依存せざるを得ない、という南北問題が存在することを意味する。

（3）カーボンニュートラル型エネルギーシステムへの転換

<カーボンニュートラル型のエネルギーシステムの転換>

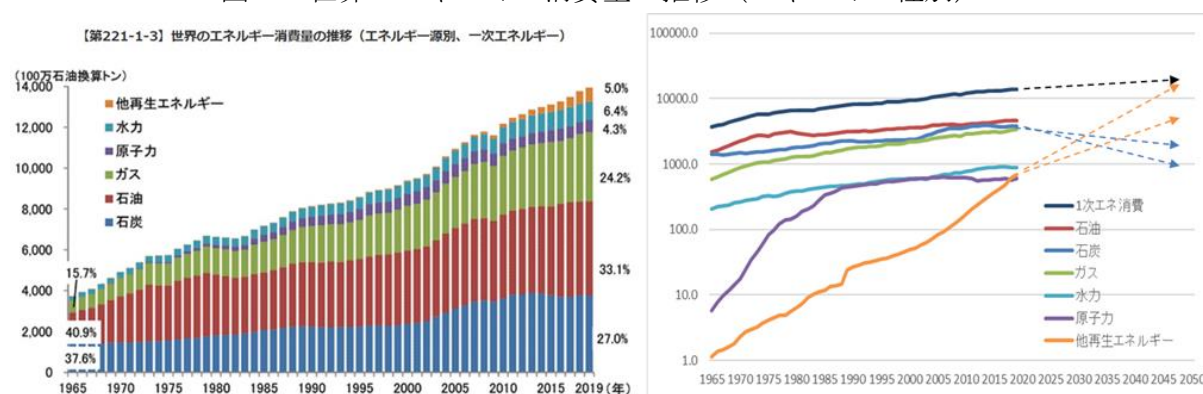
このような中、2050年までのカーボンニュートラルの実現に向けて、今後30年以内に、再生可能エネルギーは主力エネルギーとなりうるか、さらに、現在の石炭、石油、天然ガスを、（CO2回収とのセットによるものを除き）原則ゼロにすることができるのか、という論点になる。特に、これまでの地球温暖化対策においては、省エネの推進や、石炭から天然ガスへの転換が大きな役割を担っていたが、今後カーボンニュートラルを実現するには、根本的にそのエネルギーシステムの転換が必要になるが、それが可能なのが課題になる。

図7は、1960年代以降のエネルギー種別の世界のエネルギー消費量の推移を示したものであり、右図は、それを対数表示で示したものである。この図からは、再生可能エネルギーについては、概ね2000年以降、特に欧州を中心に再生可能エネルギーの導入普及が政策的に積極的に進められた結果、その導入増加率（傾き）は高い水準に転じており、「仮にこの増加率が今後も維持されるとすれば」（すなわちトレンドだけをみると）、2050年までに、主力エネルギー源となる勢いであるとみることが可能である。ただし、その勢いを維持するには、これまでの通り政策的な勢いを維持するとともに、試行錯誤を通じてイノベーションが進展し、そのエネルギーシステムが、社会の中に受け入れられていくことに前提になる。

一方で、現在の主力エネルギー源である、石炭、石油、天然ガスについては、世界全体のエネルギー需要の増大に伴って、近年においても、引き続き増加傾向にある。今後カーボンニュートラルを世界全体で実現していくためには、これら三つの化石燃料エネルギー源を、可能な限りゼロに近づけていくこと（例えば、あと30年間で石炭、石油、天然ガスの消費量を現在の8割強から、あと30年間で例えば1割以下などにする）が求められる。これは、これまでの化石燃料の消費量の増大傾向を踏まえると、世界的にはかなり急激な抑制政策への求められることになり、実際には、現時点でも使えるような化石燃料関連施設・設備の強制的な廃棄や、（特に発展途上国などにおいては）経済成長に必要な不可欠で現時点で技術的に利用可能な化石燃料施設・設備の新設禁止など、非常に厳しい政策的措置が必要になることを意味する。

これまでの一次エネルギー転換の歴史においても、いくつかの政府規制や取組の影響はあったものの、原則としては、市場メカニズムを通じて、新たなイノベーションにより創造的破壊が生じ、エネルギーシステムの転換がなされてきたことを踏まえると、このようなカーボンニュートラルの実現に向けては、世界各国において、前例のない、かなり強力な措置が必要になるものと評価される。

図7：世界のエネルギー消費量の推移（エネルギー種別）²³



<世界のCO₂の排出量の推移から見たカーボンニュートラルの実現の可能性>

このような世界におけるエネルギー消費量の増大に伴い、世界のCO₂排出量についても増大傾向が続いている。具体的には、概ね、世界的に地球温暖化対策の取組が開始され始めた1990年と比較して、約30年後である2019年には、世界のCO₂排出量は、約1.6倍に増加している。このような傾向を踏まえると、今後、約30年後である2050年までにカー

²³ 出典：資源エネルギー庁「令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）」2021年6月。右図は、同データに基づき、筆者作成。

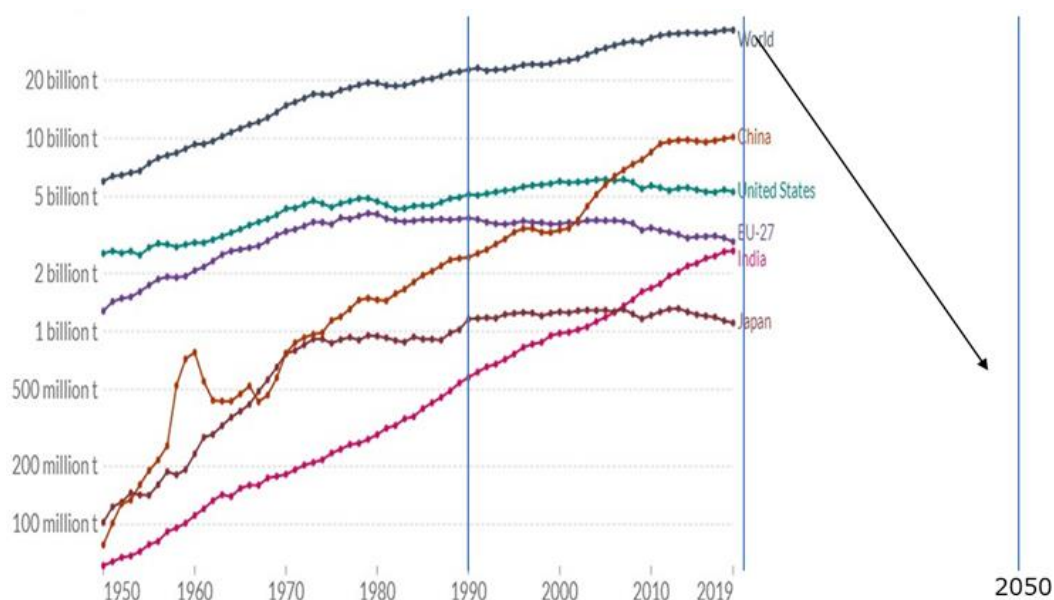
ボンニュートラルとして、世界全体の CO2 排出量をゼロに近づけることはかなりの困難を伴うものと評価される（図 8 参照）。

ただし、排出地域別をみると、米国、欧州では、1970 年以降 CO2 の排出量は概ね安定化してきており、特に 1990 年以降は概ね減少傾向にある。この理由としては、先進国においては、上述の通り、省エネの進展を含む経済成長とのデカップリングによりエネルギー消費量が伸び悩んでいることに加え、石炭から天然ガスへのエネルギー転換、再生可能エネルギーの拡大などの省 CO2 に向けたエネルギー構造転換が、発展途上国よりも進んでいることが要因であると考えられる。また、その際、京都議定書を初めとした先進国における地球温暖化対策が功を奏している可能性もある。

これに対し、中国を初めとするその他地域においては、1990 年以降、急速に CO2 排出量が増大してきており、2019 年時点で 2 倍以上に増加している（ただし、中国においては、その経済成長にも関わらず、2014 年以降は CO2 の排出量の伸びは押えられている）。特に、増加率の高いアジア太平洋地域では、旺盛なエネルギー需要に答えるため、石炭の消費量が増大しており、CO2 の排出量の増大を加速する大きな要因になっている。

このような図をトレンドとして見る限りは、2050 年のカーボンニュートラルの実現に向けて、先進国では、努力次第によっては、その実現は全く不可能ではないように見えるのに対し、発展途上国では経済発展との兼ね合いも含め、その実現はかなり難しいものと評価される。

図 8：世界の二酸化炭素排出量の推移（対数表示）²⁴



<カーボンニュートラル実現に向けたマイルストーン（IEA）>

IEA（国際エネルギー機関）は、2021 年 5 月、「Net Zero by 2050 Roadmap for the Global Energy Sector」を発表した。これは、2050 年までに世界全体でネットゼロ（カーボ

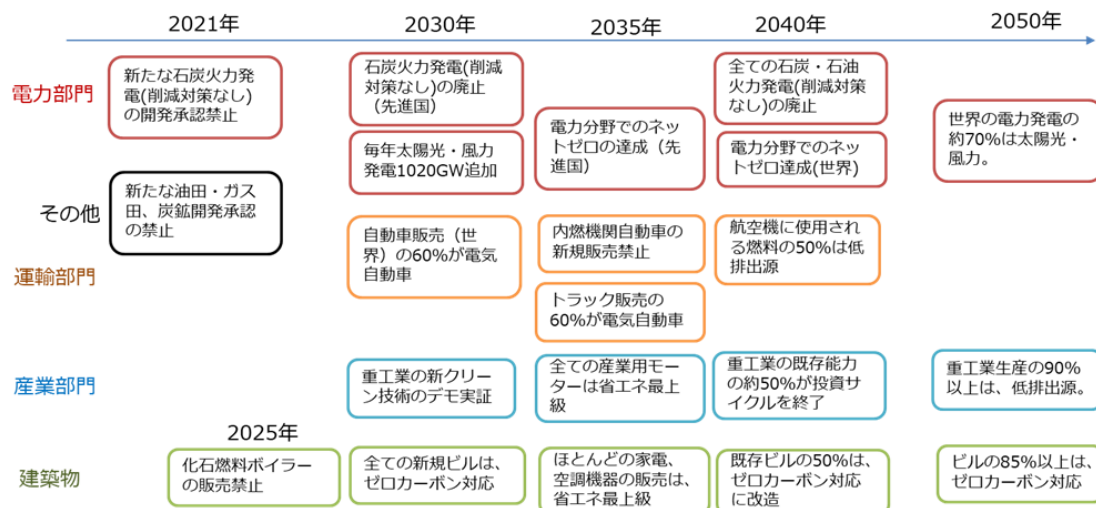
²⁴ 出典：Our World in Data: CO2 Emissions

<https://ourworldindata.org/co2-emissions>

ンニュートラル) を実現するとした場合、その一つのシナリオとして、今後いつまでのどのような対応が必要なのかにつきそのロードマップを示すものである。それを読むと、カーボンニュートラル実現には、如何に困難な意思決定を伴う政策的取組が求められるかを示すものとなっている。

具体的には、既に現時点で、石炭火力の新設の禁止²⁵、油田・ガス田、炭鉱の新規開発の禁止が求められるとともに、**2035**年までに先進国における電力分野でのネットゼロの達成、内燃機関自動車の販売禁止などが必要としている(図9参照)。

図9：ネットゼロに向けた鍵となるマイルストーン



²⁵ なお、2021年11月に英国グラスゴーで開催されたCOP26では、石炭火力の段階的廃止を目指して議論がなされたが、インド等途上国の反対により「段階的削減」にとどまったと報道されている。

3. 日本の地球温暖化対策の歴史とカーボンニュートラル目標

前章では、世界全体のエネルギー革命と経済成長の歴史の流れの中で、カーボンニュートラルがどのような位置付けになるかについて分析、考察したが、本章では、そのような中、日本において、これまで地球温暖化対策としてどのように目標を定めて、また、カーボンニュートラルの実現に向けどのようなイノベーション政策を進めようとしているのかについて分析、整理する。

まず、第一節において、地球環境／地球温暖化問題の歴史を振り返ったあと、第二節において、過去 30 年間に渡る日本政府の地球温暖化対策における目標設定とその達成状況や、再生可能エネルギーに係るこれまでの政策とその普及状況について分析を行う。これにより、

- 日本においても、近年の CO2 排出量は減少傾向にあるが、その要因の多くは、経済成長とエネルギー消費のデカップリングによるものであること
- 再生可能エネルギーの導入量は、FIT 制度の導入により従来想定よりも飛躍的に伸びてきているものの、産業政策的には必ずしも成功しなかったこと

等を論じる。

その上で、第三節において、これまでの政府によるグリーンイノベーション戦略の経緯を振り返ったあと、現在のカーボンニュートラル実現に向けたグリーン成長戦略の特徴について整理する。

(1) 地球温暖化問題の経緯

<地球環境問題への関心の高まり>

地球環境問題として、人類の活動が地球規模の環境問題に与える影響について関心が高まってきたのは、概ね 1970 年ごろからであり、特にローマクラブの「成長の限界」と米国連邦政府の「西暦 2000 年の地球」が有名である²⁶。

このうち、ローマクラブは、MIT 教授のメドウズ氏が主導し世界の有識者によって 1970 年創設された団体であり、1972 年に「成長の限界」と題した研究報告書を発表した²⁷。同報告書では、「このまま人口増加や環境汚染などの傾向が続けば、資源の枯渇や環境の悪化により、100 年以内に地球上の成長が限界に達する」と警告し、10 ほどの示した各種シナリオのうち、再生する速度以上のペースで地球上の資源を人間が消費し続けると仮定したシナリオでは、世界経済の崩壊と急激な人口減少が 2030 年までに発生する可能性があるとしている。なお、メドウズ氏は、その後も 1992 年、2004 年に著書を発表している²⁸。

²⁶ 環境庁「平成 4 年版環境白書」1992 年
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h04/8264.html>

環境省「平成 25 年版環境白書」2013 年
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/zu/h25/html/hj13010202.html>

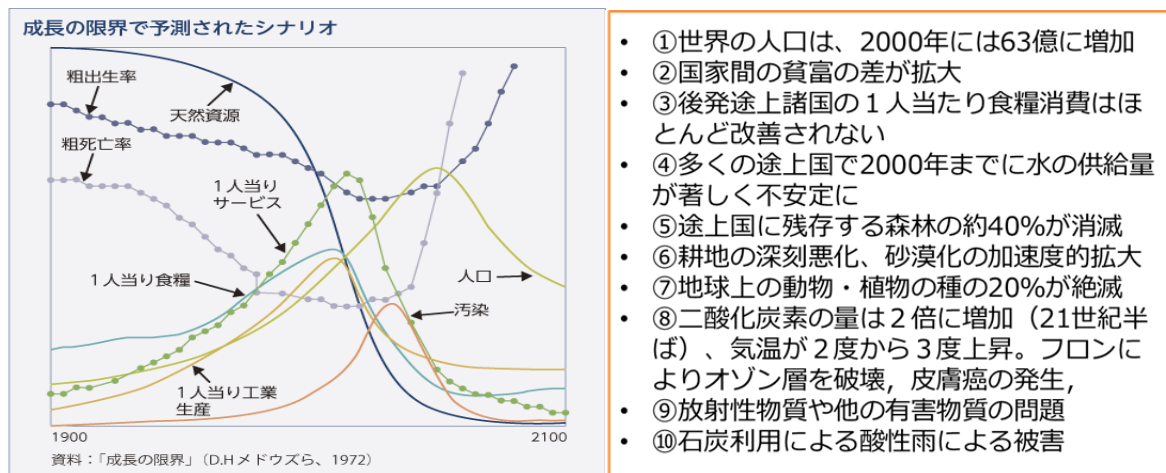
²⁷ ドネラ H.メドウズ、『成長の限界—ローマ・クラブ「人類の危機」レポート』ダイヤモンド社 (1972/5/1)

<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/zu/h25/html/hj13010202.html>

²⁸ <http://www.nord-ise.com/note/2018/01/post-3.html>

また、米国カーター政権による諮問（1977年）に基づき、米国環境問題諮問委員会は、1980年に「西暦2000年の地球（Global 2000 Report to the President）」²⁹を発表した。この「西暦2000年の地球」の「第一部：予測」では、人口、国民総生産、気候、技術、食料、漁業、森林、水資源、エネルギー、燃料資源、非燃料資源、環境の12項目について記載しており、このうち「気候」として気候変動問題（地球温暖化問題）にもついても予測を示している。

図10：ローマクラブ「成長の限界」（左図）³⁰、米国政府「西暦2000年の地球」（右図）



これらの報告書は、地球規模の環境問題に対する世界の関心、特に、地球には限界があり、人間の活動規模が拡大する中、その制御が必要であるという世界の認識を高めたものとして評価される。また、これらで示された指摘については、そのシナリオの一部は現状でもあてはまっているとの指摘もある³¹。

しかしながら、人間の活動が地球規模に与えるこのような影響は、本来は非常に複雑なメカニズムで構成されるものであり、当時の科学的知見に基づく単純化されたシミュレーションでは予測に限界があること、また多くの予測は、現行技術を前提とした既存トレンドの延長でなされることから、これらの予想の多くが現在までに的中したとは必ずしも言えないとの指摘もありうる。また、例えば「西暦2000年の地球」でさえ、その後の米国政府の政策には十分反映されなかったとの指摘もある³²。

<地球温暖化問題（気候変動問題）の経緯>

一方、このように地球環境問題への関心が高まる中、科学の進歩に伴い地球の大気の仕事みについての理解が進んだこともあり、1970年代頃から、科学者間で地球温暖化の問題が注目されるようになり、具体的には、1979年に「第一回世界気候会議」が開催されている。また、上述のように1980年の「西暦2000年の地球」にも地球温暖化問題が含まれている。

²⁹出典：アメリカ合衆国政府、『西暦2000年の地球 1 人口・資源食料編 (アメリカ合衆国政府特別調査報告)』家の光協会 1980年、同『西暦2000年の地球 2 環境編 (アメリカ合衆国政府特別調査報告)』家の光協会 1981年

<https://kotobank.jp/word/%E8%A5%BF%E6%9A%A62000%E5%B9%B4%E3%81%AE%E5%9C%B0%E7%90%83-158890>

³⁰ 出典：環境種平成25年版「環境白書」2013年

³¹ <https://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2021/07/2040-3.php>

³² <https://kaken.nii.ac.jp/file/KAKENHI-PROJECT-26550114/26550114seika.pdf>

その後、1985年に、地球温暖化に関する初めての世界会議（フィラハ会議）をきっかけに、二酸化炭素による地球温暖化の問題が大きくとりあげられるようになった。

1988年には、国連環境計画（UNEP）と世界気象機関（WMO）によって、地球温暖化に関する科学的側面をテーマとした政府間の検討の場として「気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）」が設立された。同IPCCは、その後、これまでに報告書を5回発表し（それぞれ、1990年、1995年、2001年、2007年、2014年）、これらの報告書は、気候変動問題に係る世界各国の政策や世論に大きな影響を与えている。

その後、1990年に開催された「第2回世界気候会議」において、国連のもとで気候変動枠組条約を作成することが決議され、1992年5月の国連総会で同条約は採択されるとともに、同年6月にリオデジャネイロで開催された「地球サミット」（いわゆるリオサミット）で同条約に係る署名が開始され、同条約は94年3月に発効した。

この気候変動枠組条約の発効を踏まえ、1995年から、国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）が、毎年開催されることになり³³、その中では、特に、1997年のCOP3で採択された「京都議定書」（2005年発効）、また、2015年のCOP21で採択された「パリ協定」（2016年発効）が、世界の地球温暖化対策に係る政策に大きな影響を与えている。

図1-1：世界における地球温暖化問題に係る経緯³⁴

- 1979年：「第1回世界気候会議」：気候変動研究の推進を提言
- 1985年：地球温暖化に対する初めての世界会議（フィラハ会議@オーストリア）
- 1988年：IPCC（気候変動に関する政府間パネル）創設
※これまでに5回の報告書を発表（90年、95年、01年、07年、14年。現在6次の報告書に向け準備中）
- 1990年：「第2回世界気候会議」、国連で条約を作成することを決定。
- 1992年：国連総会で「気候変動枠組み条約」採択、「地球サミット@リオ」で署名開始（94年発効）
- 1997年：COP3にて「京都議定書」採択（05年発効）
- 2015年：COP21にて「パリ協定」採択（16年発効）

特に、最近では、2015年に採択されたパリ協定において、「今世紀後半のカーボンニュートラルを実現するために、排出削減に取り組むこと」を目的とするとされたこと、また、2018年10月に発表されたIPCCの「1.5°C特別報告書」³⁵において、「産業革命以降の温度上昇を1.5度以内におさえるという努力目標（1.5度努力目標）を達成するためには、2050

³³ 過去の主なCOPの一覧は、以下の通り。

環境省「国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）・京都議定書締約国会合（CMP）・パリ協定締約国会合（CMA）」

<http://www.env.go.jp/earth/copcmcpma.html>

³⁴ 出典：全国地球温暖化防止活動推進センター「いつから地球温暖化が問題とされるようになったのか」等より筆者作成。

<https://www.jccca.org/faq/15922>

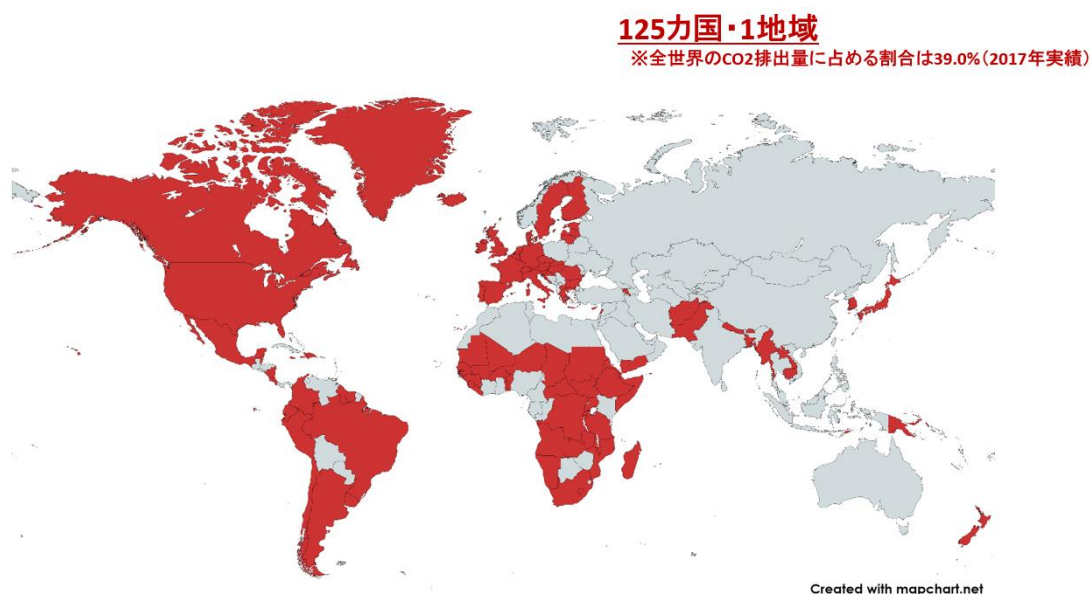
³⁵ 環境省「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）「1.5°C特別報告書（*）」の公表（第48回総会の結果）について」（2018年10月7日）

<https://www.env.go.jp/press/106052.html>

年近辺までのカーボンニュートラルが必要」と指摘されたことを踏まえ、欧州を初め世界各国において、「2050年のカーボンニュートラル実現」を目指す動きが国際的に広まり³⁶、2021年4月現在、世界の125カ国・1地域が、2050年カーボンニュートラル実現の宣言をしている（図12参照）。日本でも、菅内閣総理大臣（当時）が、2020年10月に、同内容の表明を行っている。

ただし、本ワーキングペーパー執筆時点では、発展途上国の主要国である中国は2060年を目標、インドは2070年を目標³⁷、また資源国であるロシアは2060年を目標³⁸、サウジアラビアも2060年目標³⁹とするなど、やはり発展途上国や資源国におけるカーボンニュートラルの実現については、その困難性が伺える⁴⁰。

図12：2050年までのカーボンニュートラルを表明した国⁴¹



³⁶ 資源エネルギー庁「カーボンニュートラル」って何ですか？（前編）～いつ、誰が実現するの？」（2021年2月16日）

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_neutral_01.html

2021年1月20日までに、日本を含む124カ国と1地域が、2050年までのカーボンニュートラル実現を表明している。

³⁷（2021年11月発表）

<https://jp.reuters.com/article/climate-un-modi-idJPKBN2HM38A>

³⁸（2021年10月発表）

<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGR13CIW0T11C21A0000000/>

³⁹（2021年10月発表）

<https://www.jetro.go.jp/biznews/2021/10/8b41e884336d06cf.html>

⁴⁰ なお、同じく資源国であるオーストラリアは、2021年10月になって、2050年カーボンニュートラル実現を発表している。

<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20211026/k10013322191000.html>

⁴¹（出典）資源エネルギー庁「2050年までのカーボンニュートラルを表明した国」（2021年4月末時点）

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/green_growth_strategy.html

なお、主要国の2030年中期目標と2050年長期目標（2021年3月時点）については、以下を参照。内閣官房「気候変動対策推進のための有識者会議（第1回）」事務局参考資料2（資料4-3）（2021年3月31日）

<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kikouhendoutaisaku/dai1/gijisidai.html>

<世界のCO2排出量における日本の位置付け>

なお、2018年時点で、世界の二酸化炭素排出量のうち、日本の割合は3.2%である。世界の人口における日本の人口の割合は1.6%（2021年）⁴²、また、世界のGDPにおける日本のGDPの割合は5.8%（2019年）⁴³であることから、日本は、人口一人当たりでは世界平均の約2倍排出しているが、GDPあたりでは世界平均の6割弱と位置づけられる。

言うまでもなく、日本のみがカーボンニュートラルを実現したとしても世界全体で3.2%しか削減されないことを踏まえると、地球温暖化対策としては、世界全体でのCO2排出量の削減の視点で行われなければ意味がない。このためには、約3割弱を占める中国、約15%を占める米国、9%強を占める欧州、約7%を占めるインドなど⁴⁴との連携した取組が進めることが圧倒的に重要となる。しかしながら、本ワーキングペーパーでは、まずは、その前提として日本国内での実現可能性との観点のみから議論を行うものとする。

（2）日本における地球温暖化対策に係るこれまでの経緯

①日本にこれまでの取組の経緯（全体像）

それでは、このような世界における地球温暖化対策に係る議論の中で、日本はこれまでCO2排出削減に向けてどのような目標を設定し取り組んできたのであろうか。以下においては、日本政府のこの30年間の地球温暖化対策政策について、特に削減目標の設定とその実績に焦点をあてて整理をする⁴⁵。なお、本ワーキングペーパーでは、個別の対策内容やその評価については議論しない。

<90年代～2010年前半まで（主に2020年までの目標）>

日本における地球温暖化対策としての具体的な取組は、1990年10月に「地球環境保全に関する関係閣僚会議」において決定された「地球温暖化防止行動計画」⁴⁶に遡る。これは、その後1992年に採択されることになる気候変動枠組条約に先んじて取り組むという位置づ

⁴² 国連人口基金（UNFPA）「世界人口白書2021」

<https://eleminist.com/article/1643>

⁴³ 外務省経済局国際経済課「主要経済指標」（2021年）

https://www.nomura.co.jp/el_borde/view/0049/#:~:text=2019%E5%B9%B4%E3%81%AE%E4%B8%96%E7%95%8C%E5%85%A8%E4%BD%93.%E3%81%A6%E3%81%84%E3%82%8B%EF%BC%88%E5%9B%B3%EF%BC%89%E3%80%82

⁴⁴ 全国地球温暖化防止推進センター『データで見る温室効果ガス排出量（世界）』

<https://www.jccca.org/global-warming/knowledge04>

CO2排出量の世界各国の内訳

<https://earthene.com/media/58>

⁴⁵ 主な動きは、以下を参照。

全国地球温暖化防止活動推進センター『地球温暖化をめぐる日本と世界の主な出来事（年表）』

<https://www.jccca.org/global-warming/trend-japan/history>

⁴⁶ 地球温暖化防止行動計画（公布日：平成2年10月23日）地球環境保全に関する関係閣僚会議決定

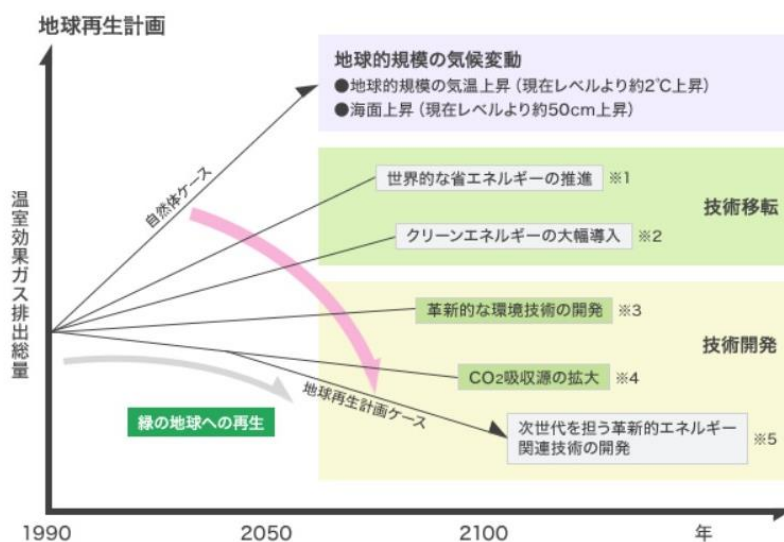
<https://www.env.go.jp/hourei/03/000015.html>

<https://www.env.go.jp/earth/cop3/bousi/kodo-1.html>

けであり、同計画においては、「一人当たりの CO2 排出量について、2000 年以降概ね 1990 年レベルでの安定化を図る」ことを目標とした。

なお、その同計画には、長期的なビジョンとしての「地球再生計画」が含まれている⁴⁷。これは、当時の通産省が提案したもの⁴⁸であり、省エネ、クリーンエネルギー、CO2 吸収源などの開発・普及を通じて、今後 100 年かけて地球環境を再生していくというビジョンを示したものであり、日本政府は、その後の G7 サミット（ヒューストン）や IPCC など本計画の内容を提案している。本計画は、必ずしもカーボンニュートラルまでを目標としたものではないが、世界の CO2 排出量の増大傾向を反転させ、ゼロに近づけていくというというビジョンを、当時の日本が主導して提案していたという意味で注目される。

図 1 3 : 地球再生計画 (1990 年) ⁴⁹



その後、1992 年の気候変動枠組条約の採択、リオサミットを経て、1997 年に京都議定書が採択され、日本は、第一約束期間（2008 年～2012 年）での温室効果ガスの排出量を、

⁴⁷ 「長期的視点に立つて、世界各国が協調して科学的基盤の整備、省エネルギー・省資源の推進、クリーンエネルギーの導入、革新的な環境技術の開発、温室効果ガス吸収源の拡大、次世代エネルギー技術の開発等に取り組む総合的かつ長期的ビジョン(地球再生計画)づくりの共同作業の必要性の国際的合意形成に努めてきたが、今後、行動計画を踏まえ、その具体化の促進に努めていく必要がある。」

⁴⁸ 公益財団法人地球環境産業技術研究機構「地球再生計画」

<https://www.rite.or.jp/system/research/new-earth/about/>

地球再生計画の長期的目標

https://atomica.jaea.go.jp/data/fig/fig_pict_01-05-02-01-08.html

https://atomica.jaea.go.jp/data/fig/fig_pict_01-05-02-01-09.html

地球再生計画とは

<https://kotobank.jp/word/%E5%9C%B0%E7%90%83%E5%86%8D%E7%94%9F%E8%A8%88%E7%94%BB-157805>

本城薫「通産省における地球環境技術研究開発」地質ニュース 465 号、10-11 頁、1993 年 5 月

https://www.gsj.jp/data/chishitsunews/93_05_02.pdf

小林紀（財団法人地球産業文化研究所）「地球温暖化問題と国際動向 IPCC を中心に―」1991 .2.5

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jie1922/70/3/70_3_204/pdf

⁴⁹ 出典：公益財団法人地球環境産業技術研究機構「地球再生計画」

<https://www.rite.or.jp/system/research/new-earth/about/>

1990年比で6%削減することを約束した。これを踏まえて、日本政府は、1998年6月に「地球温暖化対策推進大綱」⁵⁰を決定し、森林吸収、京都メカニズム等による削減分を除く、CO₂等の削減については、1990年比で2.5%削減を目指すこととした。また、同大綱は、2002年に改正され⁵¹、その中で、上記2.5%削減のうち、エネルギー起源のCO₂削減目標については、±0%にすると詳細化⁵²された。なお、その後京都議定書が2004年に発効した後は、京都議定書目標達成計画（2005年策定、2006年、2008年改正）として閣議決定し、同目標の実現に向けて推進することとなる。また、上記大綱の発表のあと、1998年10月には、基本法である地球温暖化対策推進法が制定され、その後同法は、2002年、2005年、2008年、2013年、2016年、2021年にそれぞれ改正されていくことになる⁵³。

京都議定書に規定された第一約束期間のあとの、第二約束期間（2013年～2020年まで）に関しては、日本は当初参加しないこととしたものの⁵⁴、COP16のカンクン合意（2010年11月）に基づき数字を登録することとした。その際、当時の民主党政権は、2010年に、2020年までに「90年比で25%削減」を目標として決定し、事務局にその数字を登録するとともに、その旨を記載した地球温暖化対策基本法案を閣議決定、国会提出を二回行う（3月、10月）ものの、政局の混乱に伴い同法案は成立せず、廃案となる⁵⁵。その後、2011年の東日本大震災に伴い多くの原子力発電所が停止せざるを得なくなり見込みが立たなくなったことを踏まえ、2012年末に成立した自民政権のもとで、上記の25%削減の方針を撤回し、2020年の目標として「2005年比で3.8%減」を登録とすることし、2013年11月の地球温暖化対策推進本部にてその旨が報告されている⁵⁶。

<2000年後半～現在（2030年以降の目標）>

一方、京都議定書後の世界全体の目標のあり方を見据えて、2007年5月、当時の安倍政権（一次政権）は、「美しい星50（クールアース50）」⁵⁷として、世界のCO₂排出量を

⁵⁰ 「地球温暖化対策推進大綱－2010年に向けた地球温暖化対策について－」1998年6月19日、地球温暖化対策推進本部決定

⁵¹ 環境省「地球温暖化対策推進大綱について」（2002年3月19日）

<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/taiko/index.html>

⁵² エネルギー起源のCO₂削減目標は±0%、非エネルギー起源二酸化炭素・メタン・一酸化二窒素は▲0.5%、革新的技術開発及び国民各界各層の更なる地球温暖化防止活動の推進は▲2.0%とされた。

⁵³ 環境省「地球温暖化対策推進法の成立・改正の経緯」

<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keii.html>

⁵⁴ 外務省「京都議定書に関する日本の立場」2010年12月

https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/kiko/kp_pos_1012.html

⁵⁵ 安部 慶三（環境委員会調査室）「温暖化対策主要3施策をめぐる動向と課題～国内排出量取引制度、地球温暖化対策税、再生可能エネルギー全量買取制度～」立法と調査 2011.1 No.312

https://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou_chousa/backnumber/2011pdf/20110114141.pdf

<http://www.kiconet.org/iken/kokunai/archive/pr20101201.pdf>

⁵⁶ 地球温暖化対策推進本部（第27回）2013年11月15日

<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai27/gijisidai.html>

環境省「COP19に向けた温室効果ガス削減目標について」

http://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai27/siryou1_1.pdf

⁵⁷ 環境省「安倍総理が地球温暖化問題に係る戦略「美しい星50」を世界に向けて提案されました」

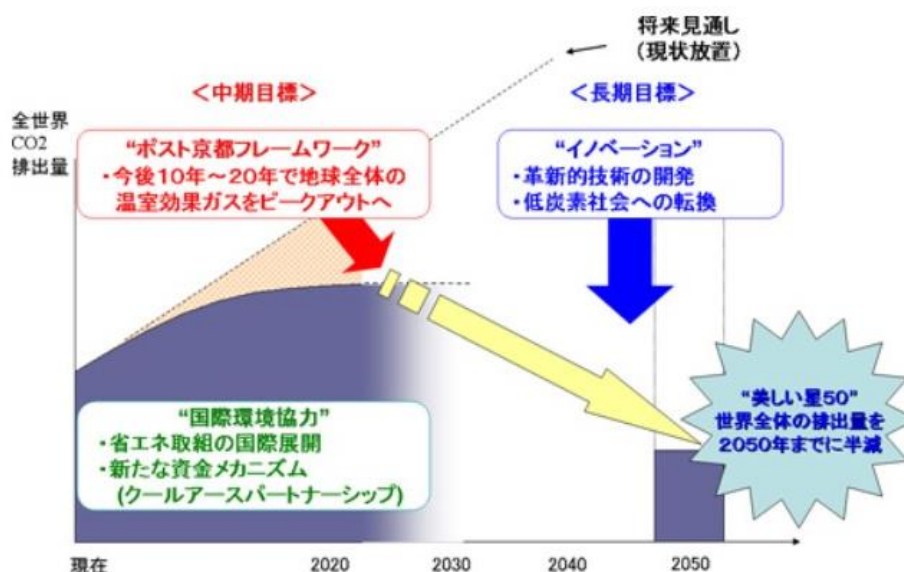
<http://www.env.go.jp/earth/info/cool-earth-50/>

官邸「地球温暖化対策に関する内閣総理大臣演説 美しい星へのいざない「Invitation to 『Cool Earth 50』」～3つの提案、3つの原則～（2017年5月24日）

<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/243518/www.kantei.go.jp/jp/abespeech/2007/05/24speech.html>

2050年までに半減することを世界の目標に掲げることを提案・発表し、その後G8（ハイリゲンダム会議）においても説明し、この方向につき合意された⁵⁸。これに基づき、その後の福田政権は、2008年1月に「クールアース推進構想」を発表しており（図14参照）、その具体的方策として、イノベーションによる推進を打ち出している。

図14：クールアース推進構想（2008年）⁵⁹



その後、その「世界全体での半減」実現するためには、先進国はより踏み込んだ取組が必要との認識のもと、2009年11月に発表された気候変動交渉に関する日米共同メッセージ等において「2050年までに80%削減」の目標が含まれたことから、民主党政権下において、上述の地球温暖化対策基本法案（2010年。その後廃案）にもその旨記載されるとともに、2012年の第4次環境基本計画⁶⁰においても、世界全体として2050年までに半減、また、日本の長期的な目標として2050年までに80%の排出削減を目指す旨が記載されることになった。また、2015年のパリ協定の採択を踏まえて、2016年5月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」⁶¹においては、長期目標として2050年までの80%削減が再度明記されると

⁵⁸ 外務省「G8ハイリゲンダム会議2007」

<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/summit/heiligendamm07/index.html>

外務省「地球温暖化問題に係る新提案「クールアース50」」2008年2月

<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/kiko/coolearth50/index.html>

<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/243518/www.kantei.go.jp/jp/abespeech/2007/06/08press.html>

⁵⁹ 出典：環境省：G8環境大臣会合@神戸

<https://www.env.go.jp/earth/g8/meeting/index.html#coolearth>

⁶⁰ 第四次環境基本計画（2012年4月）（pp69）

https://www.env.go.jp/policy/kihon_keikaku/plan/plan_4.html

⁶¹ 2013年の地球温暖化対策推進法改正により、それまでの京都議定書目標達成計画に代わって策定されることとなったもの。

地球温暖化対策計画（閣議決定）2016年5月13日

<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/taisaku.html>

<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/domestic.html>

<https://www.kantei.go.jp/jp/sinqi/ondanka/index.html>

ともに、その数字を踏まえ、2030年の目標として「2013年度比で26%削減」が新たに設定された⁶²。

その後、上述の通り、2018年10月のIPCCの「1.5°C特別報告書」の発表をもとに、2050年までのカーボンニュートラルを宣言する国々が相次いだことを踏まえ、2020年10月、当時の菅総理が所信表明演説において、日本でも2050年にカーボンニュートラルを目指すことを宣言し⁶³、その後、2021年の地球温暖化対策推進法改正においても、その旨（2050年カーボンニュートラル実現）が記載されることになった⁶⁴。また、それを踏まえて、2021年4月に開催された地球温暖化対策推進本部⁶⁵において、2030年の目標が2013年度比で46%削減に引き上げられることが決定され、同年9月に改定された地球温暖化対策計画⁶⁶にその旨明記されることになった。

図15：日本の地球温暖化対策の経緯⁶⁷

	90年代	00年代	10年代	20年代
国際動向	92年(94年発効) 気候変動枠組条約	97年(05年発効) 京都議定書	08年リーマンショック	15年(16年発効) パリ協定
国内動向 (温暖化対策 関連)	90年 地球温暖化防止 行動計画	98年温暖化対策基本法 (02, 05, 08, 13, 16, 21年改正) 98年(02年改正) 地球温暖化対策 推進大綱	09~12年民主党政権 11年東日本大震災 10年(廃案) 地球温暖化対策 基本法案	16年 地球温暖化 対策計画
2010年 目標	00年以降90年 レベルで安定化	第一約束期間に90年比6%減 (森林・京メカ除き1~2%減)		
2020年 目標			20年までに 90年比25%減	
2030年 目標			13年 25%減を撤回 05年比3.8%減	
2050年 目標	地球再生計画 (世界の排出量を 100年後までにゼロ)		50年までに90年 比80%減(世界 全体で半減)	12年環境基本 計画50年までに 90年比80%減
国内動向 (エネルギー政策 関連)		02年エネルギー政策基本法 03年1次計画 05年 再エネ12% 原子力42%	07年2次計画 10年3次計画 10年 再エネ約20% 原子力約50%	14年4次計画 15年 再エネ22~24% 原子力20~22%
国内動向 (再エネ推進 (環境イノベー ション関連)	93年 ニューサンシャイン計画	02年RPS法公布 03年 地球温暖化対策 技術研究開発の推進	08年, 13年 環境エネルギー 技術革新計画	12年FIT法公布 12年 革新的エネルギー 環境戦略
			16年 エネルギー・環境 イノベーション戦略	20年 革新的環境 イノベーション戦略
				21年 グリーン 成長戦略

このように、長期的な世界のCO2削減目標については、当初は「地球再生計画」「クールアース推進計画」など日本が主導的にリードしてきたものの、パリ協定、IPCC報告書の流れの中で、欧州をはじめとする世界全体の目標の引き上げが進み、日本もその後追随するという流れに変化してきていることが読み取れる。

⁶² なお、この2013年を基準年とした理由は、東日本大震災後の原発停止に伴い最もCO2排出量の高かった年であるためと考えられる。

⁶³ 参考としてその舞台裏。

要地正義、菰田馨「菅首相、2050年カーボンニュートラル宣言の舞台裏」日経エネルギーNEXT2020/10/26

<https://project.nikkeibp.co.jp/energy/atcl/19/feature/00001/00036/>

⁶⁴ 環境省「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の閣議決定について」2021年3月2日

<http://www.env.go.jp/press/109218.html>

⁶⁵ 第45回地球温暖化対策推進本部 議事要旨(2021年4月22日)

<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai45/gijiyousi.pdf>

⁶⁶ 地球温暖化対策計画(案)(2021年9月3日)

<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai47/gijisidai.html>

⁶⁷ 出典：筆者作成

②日本のこれまでのCO2排出量と今後の目標

＜日本のCO2排出量の目標に対する実績と新たな目標＞

それでは、これまでの日本のCO2排出削減目標に対して、その実績、すなわちCO2排出量の推移は、マクロ的にみてどのようなになっているのであろうか。

1990年以降の日本におけるCO2排出量の推移とその実績を、図16に示す。日本のCO2の排出量は、長期トレンドで見ると、1990年以降2000年代半ばにかけては漸増しているのに対し、概ね2007年以降は減少に転じてきていることが読み取れる。ただし、その際、2009年にはリーマンショックによる経済低迷により急減する一方、2012年には東日本大震災に伴う原発の停止に伴い急増し、その後2013年をピークに、右肩下がりでもCO2排出量は減少してきており、その結果、2019年には2013年比で16%減少している。

これらの推移の中で、これまでの過去の各種目標の達成状況については、以下の通り評価される。

- 90年に決定した「2000年以降90年レベルで安定化」という目標については、必ずしも達成していない（90年比で、概ね1割弱増）。
- 京都議定書に基づく「90年比6%削減目標（第一約束期間2008年～12年）」については、正式に達成されたことが、2016年に環境省から発表されている⁶⁸。この6%削減は、森林吸収や京都メカニズムによる対応を含むものであり、化石燃料起源CO2排出量に係る目標（90年比±0%目標）については、2009年前後のリーマンショックによる経済低迷に伴うCO2排出量減少によって、同目標が達成できた面が少なくないと考えられる。
- 第二約束期間（2020年目標）に関して登録した数字（当初90年比25%減、その後05年比3.8%減に見直し）については、2019年実績を見る限り、90年比▲4.8%、05年比▲14.4%という結果であり、当初の登録目標は全く達成していないが、少なくとも見直し後の目標に対しては大幅に超えて達成しているものと評価される。

図16：日本の二酸化炭素排出量の推移と今後の目標⁶⁹



⁶⁸ 環境省「京都議定書第一約束期間の削減目標達成の正式な決定について（お知らせ）」2016年4月5日 <https://www.env.go.jp/press/102374.html>

⁶⁹ 出典：筆者作成

このような中、上述の通り、日本政府は、2050年カーボンニュートラルの実現のため、2030年の削減目標を13年比で46%に削減することを、2021年10月に決定した。この目標をトレンドだけで評価すると、2050年までのカーボンニュートラル実現には必要な経過点であるし、2013年からの減少トレンドを見ると不可能ではないとの見方も可能である。

しかしながら、リーマンショック、東日本大震災による原発停止の影響を踏まえると、減少傾向はむしろ、概ね2007年以降（1306百万トン）から始まっているものであり、また、そのこれまでの減少要因を分析しなければ、その実現可能性は評価できない。

<近年の日本のCO2排出量の減少傾向に係る要因分析>

それでは、日本において、概ね2007年以降、このようにCO2排出量が減少している要因は一体何なのであろうか。

まず、この期間の中における日本のCO2排出量の減少は、エネルギー供給量・消費量の減少が大きな要因であるといえる。実際に、日本の最終エネルギー消費量は、概ね2000年代半ばをピークに減少しており、2019年における日本のエネルギー供給量は、2005年と比較して約16.5%減少していることから、この要因でほとんど説明が可能と言える（図17参照）。

その上で、この間の一次エネルギー供給のエネルギー種の割合の変化（図18右図）と比較しつつ、より詳細に要因を分析すると、概ね以下の点が指摘できる。

- 1990年から2010年頃にかけて最終エネルギー消費量は大幅に増大したのに対し、全般的にCO2排出量の増大の幅はそれを下回っている。これは、特に1990年代を中心に、石油から天然ガスへのエネルギー種の転換が進んだことが大きな要因であると考えられる。ただし、90年代後半以降は石炭も増加している。
- 2011年～13年にかけて、エネルギー消費量は大きくは変わっていないのに対し、CO2排出量が急増している。これは言うまでもなく、原発の停止とそれに伴う化石燃料（特に、石油、天然ガス）の増大に伴う影響である。
- 2014年以降においては、エネルギー消費量の減少に対し、より急速にCO2排出量が減少している。これは、再生可能エネルギーの確実な増大と原発の再稼働による影響であることが読み取れる。

したがって、概ね2007年以降の日本のCO2排出量減少には、エネルギー供給量・消費量の減少に加えて、原発の停止によるCO2排出量の増大を相殺するという意味で再生可能エネルギーの利用増大も寄与しているといえることができる。

図17：日本の最終エネルギー消費量の推移（右図は1990年=1とした図）⁷⁰

⁷⁰（出典）資源エネルギー庁「令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）」2021年6月。右図は、同データ等をもとに、筆者作成（1990年=1とした）。

【第211-1-1】最終エネルギー消費と実質GDPの推移

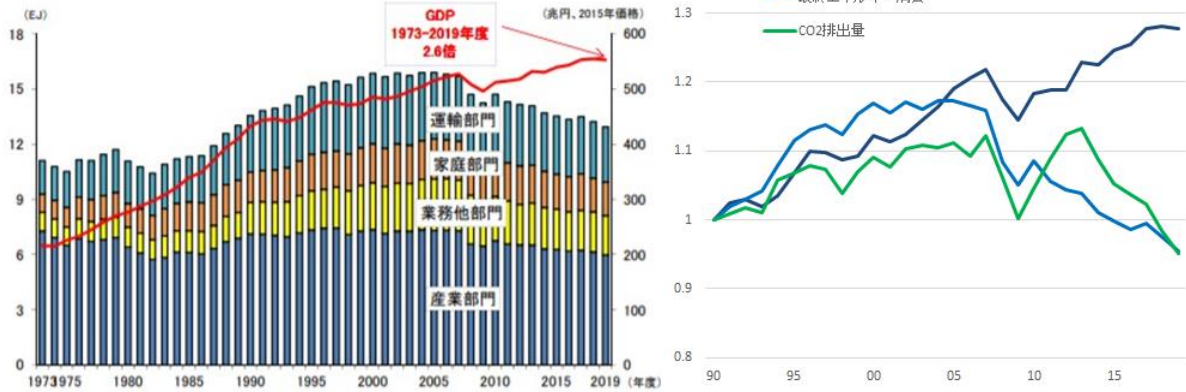
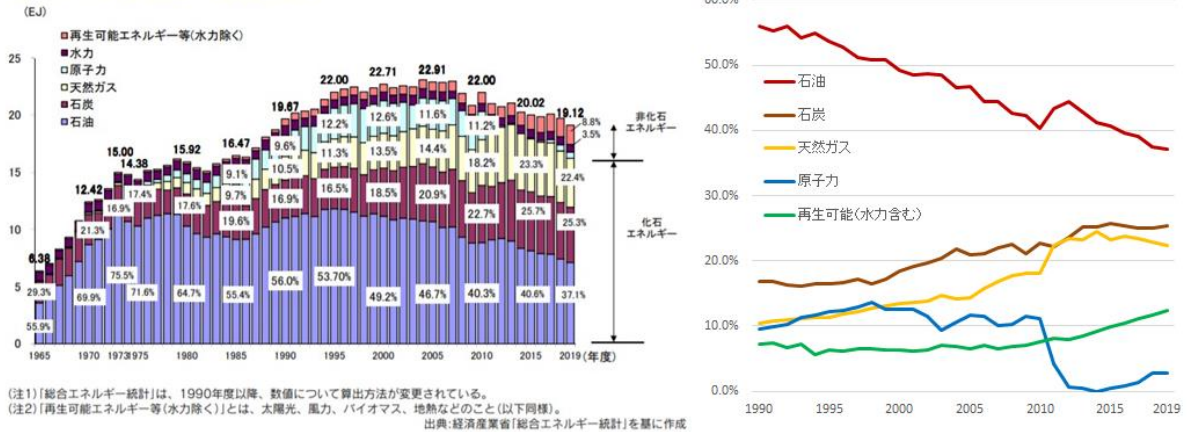


図18：日本の一次エネルギー供給量の推移（右図はその割合の推移）⁷¹

【第211-3-1】一次エネルギー国内供給の推移



それでは、何故、概ね2000年半ば以降、日本におけるエネルギー消費量・供給量が減少しているのでしょうか。これは、日本においても、概ね2000年以降、他の先進国と同様、経済成長とエネルギー消費のデカップリングが進んでいるためであると考えられる。実際に、図17右図をみると、概ね2000年頃までは、最終エネルギー消費量の増大が、経済成長率を上回っていたのに対し、それ以降においては、実質GDPは小幅ながらも増加傾向にあるのに対し、最終エネルギー消費量がそれを下回って減少傾向に転じていることが読み取れる。また、図19は、日本のGDPエネルギー原単位の推移を示したものである。これを見ると、日本のGDPエネルギー消費原単位は、石油危機以降省エネの進展により急速に減少したが、その後、1980年代半ばから2000年代半ばまではほぼ一定であった。しかしながら、概ね2000年半ばごろからは再度効率改善が着実に進んでいることが読み取れる。

図19：実質GDPとエネルギー効率の推移⁷²

⁷¹（出典）資源エネルギー庁「令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）」2021年6月。右図は、同データ等をもとに、筆者作成。

⁷²（出典）資源エネルギー庁「令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）」2021年6月。

【第211-1-2】実質GDPとエネルギー効率(一次エネルギー供給量/実質GDP)の推移



(注1)「総合エネルギー統計」は、1990年度以降の数値について算出方法が変更されている。
 (注2) 1993年度以前のGDPは日本エネルギー経済研究所推計。
 出典: 経済産業省「総合エネルギー統計」、内閣府「国民経済計算」を基に作成

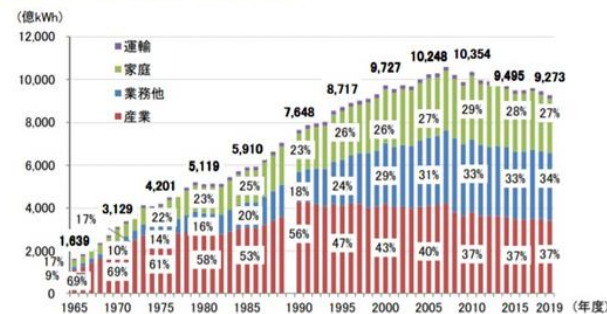
この近年における経済成長とエネルギー消費のデカップリングの理由については、今後詳細な分析が必要である。ただし、一般的には、個別産業における省エネ（エネルギー効率化）の進展の効果に加え、エネルギー多消費産業から少消費産業への転換などといった産業構造の転換効果もありうると考えられ、また、そのいずれもの背景として、第二章で記述の通り、社会のデジタル化の進展と付加価値源のエネルギーからデジタルへの移行のなども影響も含まれている可能性もある。

ただし、将来を見通した場合、今後、このような省エネや社会のエネルギー消費の効率化が続くとしても、一次エネルギー源の大半を化石燃料に依存する限り、カーボンニュートラルを達成することは根本的に無理であり、今後、カーボンニュートラルを実現するためには、これまでの延長の取組ではなく、エネルギー供給構造（エネルギーシステム）の抜本的な改革（エネルギー種の転換）が求められることになる。

なお、電力の最終消費量で見た場合、同じく2005年にピークを迎えているが、2019年度は2005年度と比較して9.5%減と、一次エネルギー消費の削減幅よりは低い（図20）。これは、社会全体の「電化（電力化）」の方向を示しているものと解釈される。

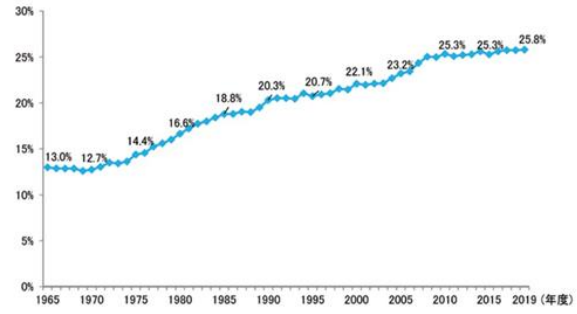
図20：日本の電力最終消費量と電力化率の推移⁷³

【第214-1-1】部門別電力最終消費の推移



(注1)「総合エネルギー統計」は、1990年度以降、数値の算出方法が変更されている。
 (注2) 民生は家庭部門及び業務他部門（第三次産業）。産業は農林水産畜産建設業及び製造業。
 出典：経済産業省「総合エネルギー統計」を基に作成

【第211-3-3】電力化率の推移



(注1) 電力化率 (%) = 電力消費/最終エネルギー消費×100。
 (注2) 「総合エネルギー統計」は、1990年度以降、数値について算出方法が変更されている。

⁷³ (出典) 資源エネルギー庁「令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）」2021年6月

③日本における再生可能エネルギー政策を巡る動向

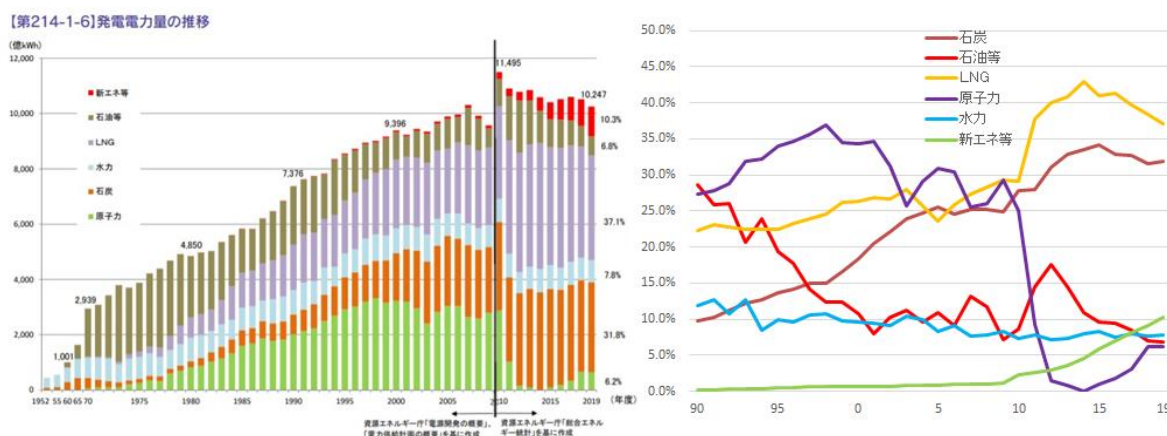
<一次エネルギー、発電電力量における再生可能エネルギーの割合>

上述のとおり、カーボンニュートラルを進めるには、社会としてエネルギーを利用する限り、省エネや社会全体のエネルギー消費の効率化だけでは不十分であり、非化石エネルギー（再生可能エネルギー（水力を含む）、原子力）の利用を抜本的に拡大し、エネルギーシステムの改革を行うことが必須となる。

2019年時点において、一次エネルギー供給における割合は、水力が3.5%、再生可能エネルギー（水力を除く）が8.8%、原子力が2.8%であり、また、これを発電電力量でみると、それぞれ、6.8%、10.3%、6.2%となっている。その際、特に、概ね2010年頃から、再生可能エネルギーの割合が急増してきていることが特徴的である。

図 2 1：日本の発電電力量とその割合の推移

74



<これまでの再生エネルギー政策の経緯>

それでは、今後特に増加が期待されている再生可能エネルギーは、日本において、これまで、どのような経緯で普及してきたのであろうか。

再生可能エネルギーのうち特に太陽光発電（太陽電池）については、日本は、従来から、研究開発面と初期の需要創造において積極的に取り組んできた歴史を有する。

具体的には、第一次石油危機を踏まえ、当時の通産省は1974年からサンシャイン計画として、太陽光発電や地熱などの研究開発に対する積極的な取組を開始した。また、第二次石油危機を踏まえて1980年に制定された「石油代替エネルギーの開発及び導入の促進に関する法律（代エネ法）」により新たにNEDOが創設され、このサンシャイン計画はこのNEDOを通じて統一的に推進されることになった。その後、サンシャイン計画は、1993年にニューサンシャイン計画の一部として統合されている。

特に太陽光発電については、サンシャイン計画当初（1974年当時）において、その価格を「2000年までに1/100にする」という野心的な目標を掲げたが、実際に、1998年時点ま

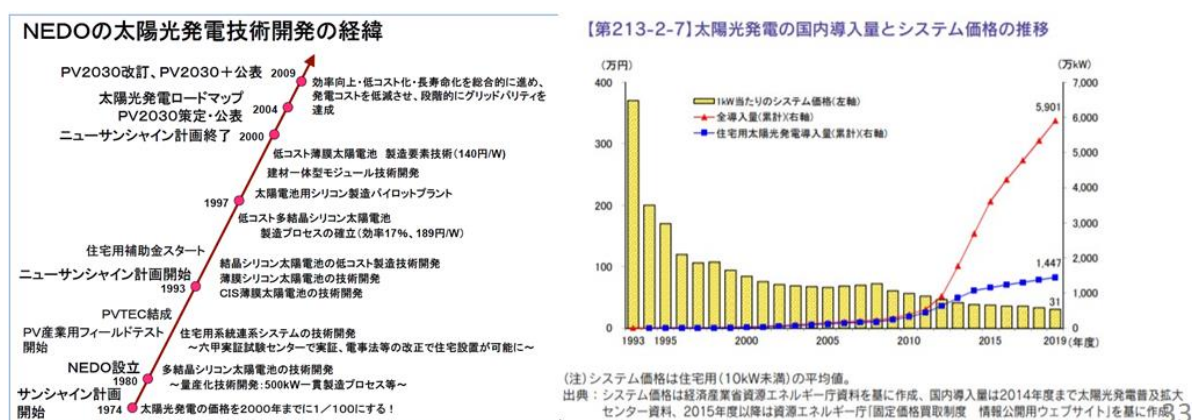
74（出典）資源エネルギー庁「令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）」2021年6月。右図は、エネルギー種別割合（同データに基づき、筆者作成。）

で、太陽電池製造コストを約 1/30 強までに削減することに成功したと報告されており⁷⁵、その後実際に 1/100 以下という目標を達成したとされる。

また、1990 年代には、太陽光発電のコストが低下しつつあることを踏まえ、導入普及の施策が推進されることになる。具体的には、1992 年には、電力会社による自主的な余剰電力買取制度が始まり、家庭設置の太陽光発電の導入推進が始まった。また、京都議定書が採択された 1997 年には、「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法（新エネ促進法）⁷⁶」が公布され、新エネルギー導入普及に係る補助金が強化されることになる。これにより、家庭用太陽光発電の導入も一層推進され、また、ラーニングカーブを通じて、導入コストも一段と低下することになる。その結果、この時期、日本の太陽電池産業は、世界の中でもトップクラスに位置づけられることになる。

なお、風力発電分野については、サンシャイン計画／ニューサンシャイン計画では必ずしも重点化されておらず、その結果、研究開発面でも実用化でも、世界（特に欧州）に対して後塵を拝することになる。

図 2 2：日本の太陽光発電技術開発の経緯とシステム価格の推移⁷⁷



このように、太陽光発電を初めとする再生可能エネルギーのコスト低下を踏まえ、世界的に再エネの導入普及への関心が高まることになる。その際、特に先進国においては、電力業界に対して再生可能エネルギーで発電した電力の購入を義務付ける法律が推進されることになるが、このうち、欧州諸国は、電力事業者に対し再エネで発電した電力の固定価格での購入を義務付けるいわゆる FIT 制度 (Feed in Tariff : 固定価格買取制度) を導入したのに対し、米国各州政府は、電気事業者への再エネで発電された電力の一定量の購入義務付けを行ういわゆる RPS (Renewable Portfolio Standards) 制度を導入するなど、対応が分かれた。このような中、日本は、より市場メカニズムを活かすことのできる RPS 制度を導入すること

⁷⁵ 資源エネルギー庁編「新エネルギー便覧 平成 10 年度版」(通商産業調査会 1999 年 3 月)、p223「表 4-1 ニューサンシャイン計画の成果(1/2)」

https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_01-05-02-01.html

⁷⁶ <https://www.power-academy.jp/learn/glossary/id/903>

⁷⁷ 出典『NEDO 再生可能エネルギー技術白書』平成 22 年 7 月 27 日

https://mitsuishi.blogspot.com/2012/02/blog-post_579.html

出典：社団法人日本エネルギー学会新エネルギー部会セミナー「太陽光発電技術開発の現状」

予稿集 p7 小井沢和明、日本の太陽光発電技術の開発戦略

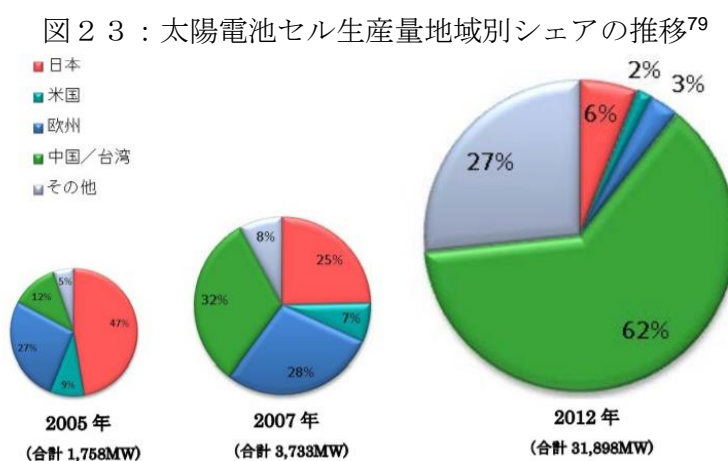
https://www.jpo.go.jp/resources/report/qidou-houkoku/tokkyo/document/index/24power_cond.pdf

とし、2002年、「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法（RPS法）⁷⁸」が公布された。

このRPS制度は、価格の比較的高い太陽光発電というよりは、むしろ価格の比較的に安い風力やバイオマス発電の推進に資する一方、コスト増に伴う料金値上げは電力業界の判断で行わざるを得ないため、電力業界の慎重な姿勢により、高い目標量設定は必ずしもなされにくく、また、市場メカニズムを通じたコスト削減圧力をかけることが可能となるため、再エネ事業者による無制限な導入は行われぬという特徴を有する。これに対し、FIT制度は、買取価格の設定次第では、再エネ事業者はリスクフリーで参加することが可能であり、高コストの太陽光発電であっても強力で導入を推進することが可能であるとともに、それによるコスト上昇分は自動的に電力料金として消費者に上乗せされ負担される仕組みであるため、電力業界も比較的抵抗は少なく、急速な導入促進が可能である一方で、急激な電力消費者価格の上昇という悪影響を引き起こす可能性が生じるという特徴を有する。

このため、RPS制度を導入した日本では、太陽光発電の導入は伸び悩む一方で、FIT制度を導入した欧州等において、太陽光発電を中心に再生可能エネルギーの導入が急速に進んだ。ただし、FIT制度では、高い買取価格の設定、それによる急速な導入、それに伴う急激な電力価格・消費者負担の上昇、それを抑えるための買取価格の急速な引き下げ、それに伴う導入の急激な停止、というバブルの発生とその崩壊を引き起こしがちであり、実際に、スペイン、ドイツ、イタリアなど多くの欧州諸国で、このバブルの発生と崩壊が起きている。

一方、この時期においては、それまで世界のトップ5を独占していた日本の太陽電池産業は、急速に競争力を失うことになる（図2-3参照）。その理由としては、①欧州を中心とするグローバルな太陽電池セルに係る急激な需要増大の中で、国内企業は、国内の動向に視野が奪われ、また、急増する世界的な需要に対して生産設備の増強の判断が遅れたこと、②太陽光の単位面積あたりの変換効率向上など新技術・品質重視指向で、中国企業等のコスト重視の技術・投資戦略に敗北したことなどが挙げられる。いずれにせよ、このような中、太陽電池セルに係る世界的な需要増大に対して、中国・台湾系企業が、積極的な投資、低価格戦略により、世界の市場を急速に席巻することになる。



⁷⁸ <https://www.kankyo-business.jp/dictionary/010055.php>

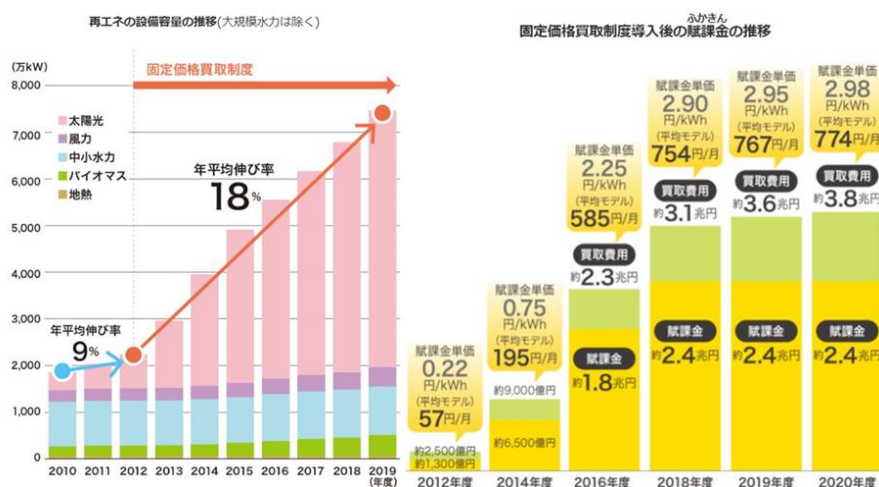
⁷⁹ NEDO「太陽光発電開発戦略（NEDO PV Challenges）」2014年9月
<https://www.nedo.go.jp/content/100575154.pdf>

このように、日本での再生可能エネルギー、特に太陽光発電の導入が、世界と比して伸び悩む中、日本においても欧州型の FIT 制度を導入すべきとの世論が高まり、政府は、2009 年に、太陽光余剰電力固定改革買取制度を導入するなどの取組を行うとともに、東日本大震災後の 2011 年 8 月には、民主党政権下において、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法（再エネ特措法：FIT 法）」⁸⁰が成立し、2012 年 7 月より施行された。

これにより、日本においても、太陽光発電を中心に再生可能エネルギーの導入普及は急速に進んだ。実際に、特に FIT 制度が導入される前の 2010 年ごろから、また、FIT 制度の導入に伴い、太陽光発電を中心に再生可能エネルギーの導入が急速に進み始めたのは前述の通りである。ただし、欧州の FIT 制度と同様に、急速な導入に伴い、電力価格・消費者負担（賦課金）が大幅に上昇するというバブルの発生を含め様々な問題が生じたため、その後、買取価格も急速に引き下げることにより年間導入量を抑えるための取組を進めている。また、それらの生じた様々な問題に対応するため、2016 年に法改正（2017 年施行）を行うとともに、2020 年にも法改正を行い、新たに FIP（Feed in Premium）への制度改革が行われている（2022 年施行予定）。

なお、FIT 制度に伴う電力消費者への負担金は、2020 年度で、既に年間約 2.4 兆円（概ね消費税 1%相当）に達している。これは日本の年間 CO2 排出量の 2.5%に相当し、したがって日本の CO2 排出量 1%減少に 1 兆円を要したとの試算もある⁸¹。ただし、現時点では、太陽光発電の買取価格もかなり引き下がっており、またそのため年間の再エネ導入量も一時期よりは若干減少していることに加え、上述の通り制度の見直しも行われたことから、今後、再エネの導入普及に伴い右肩上がりである賦課金が急速に増大する訳では必ずしもないと考えられる。しかしながら、過去の再エネ導入に係る負担は当面（原則 20 年間）続くことになることに加え、今後更に目標達成のために再生可能エネルギー導入量を拡大するとした場合には、更なる賦課金が拡大を通じて国民負担が増大する可能性もある。

図 2 4：FIT 制度導入後の再エネの設備容量と賦課金の推移⁸²



⁸⁰ https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/FIP_index.html#fip_setsumeikai

⁸¹ 杉山 大志（キャノングローバル戦略研究所）【研究ノート】1%イコール1兆円——固定価格買取制度の費用対効果、2021年7月7日 https://cigs.canon/article/20210707_6021.html

⁸² 資源エネルギー庁『日本のエネルギー 2020 年度版 「エネルギーの今を知る 10 の質問」』
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2020/002/#section3>

<新エネ導入目標（2030年）の推移と今後の見込み>

このように、2010年ごろから、また特に2012年のFIT制度の導入後は、日本においても太陽光発電を中心に再生可能エネルギーの導入が進展し、現時点で発電電力量の約10%に相当する（水力を除く）に至っている。その際、このような導入の進展は、過去の再生可能エネルギーの導入・普及見通しと比較して、どのように評価されるのであろうか。

エネルギーの導入見通しについては、資源エネルギー庁が定期的に長期需給見通しを発表しているが、2030年における再生可能エネルギーの導入割合については、早くは、2005年の需給展望に見られる。しかしながら、現時点で振り返ってみると、全体的には、当時の技術・価格レベルを踏まえ、保守的な低めの見通しを発表してきたと評価される。

具体的には、2005年時点での需給見通し⁸³では、2030年における再エネ（水力を除く）の割合は、新エネ進展ケースでさえも4%程度に留まっている。ただし、それでも当該目標における太陽光発電の目標は、2005年当時の数10倍を想定するものであり、当時RPS制度の下では非常に野心的な目標であった。

その後、欧州での再エネ導入が進展し、FIT法の導入が議論される中、2010年の民主党政権下の需給見通し⁸⁴においては、概ね10%程度（正式には、水力を含む再エネ全体で2割程度）を引き上げられ、また、当該需給見通しは、2010年6月に閣議決定された第3次エネルギー基本計画にも記載された。ただし、その後の東日本大震災の発生に伴い、特に原発の見通しが立たなくなったことを踏まえ、同基本計画自体は白紙撤回されている⁸⁵。

その後、2015年に発表された需給見通し⁸⁶では、原子力の割合を引き下げ一方、再エネ（水力を除く）の割合については概ね14%程度（正式には、再エネ全体で22～24%）に引き上げられ、これは、2018年の第5次エネルギー基本計画⁸⁷でも踏襲されている。

一方、上述の通り、2019年に既に再エネ（水力を除く）の割合は、上述の通り10%を超えるまで伸びてきている。このような中、2020年10月の菅総理のカーボンニュートラル宣言と、それを踏まえた決定された2030年までのCO2削減目標46%減を踏まえ、資源エネルギー庁は、2021年7月、36～38%程度（水力を除くと、おそらく26～28%程度と推

⁸³ 総合資源エネルギー調査会需給部会『2030年のエネルギー需給展望』2005年3月（pp111）

<https://selectra.jp/sites/default/files/pdf/g50328b01j.pdf>

（参考）総合資源エネルギー調査会需給部会『2030年のエネルギー需給展望（中間とりまとめ原案）要約版』2004年6月

https://www.isep.or.jp/shimin-enecho/presen_pdf/0801_metipresen.pdf

⁸⁴ 資源エネルギー庁『2030年のエネルギー需給の姿』

<https://www.env.go.jp/council/06earth/y060-96/ref02-4.pdf>

⁸⁵ 大嶋健志・鍋谷淳（経済産業委員会調査室）『電力需給対策の経緯とエネルギー政策見直しの検討』立法と調査 2012.6 No.329（参議院事務局企画調整室編集・発行）

https://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou_chousa/backnumber/2012pdf/20120601148.pdf

⁸⁶ 経済産業省『長期エネルギー需給見通し』2015年7月

https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/past.html#energy_mix

⁸⁷ 『エネルギー基本計画』2018年7月

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703_02.pdf

定) との見通し案を発表⁸⁸し、この数字は、同年 10 月に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画にも反映されている⁸⁹。

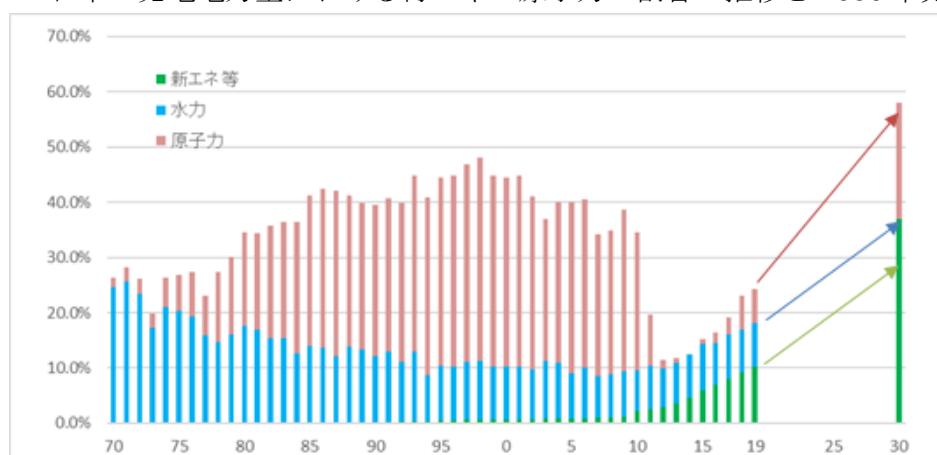
図 2 5 : 2030 年の発電電力量における再エネ・原子力の割合見通し⁹⁰

	「2030年のエネルギー需給の展望」 2005年3月 (新エネ進展ケース)	「2030年エネルギー需給の姿」 2010年6月	「長期エネルギー需給見通し」 2015年7月	「エネルギー基本計画素案」 2021年7月
再エネ	約14%	約20%	22~24%	36~38%
水力以外	約4%	—	—	—
水力	約10%	—	8.8~9.2%	—
原子力	約40%	約50%	22~20%	20~22%

このように、2030 年の再生可能エネルギー目標が、（今から見ると）当初は低く設定され、その後急激に引き上げられてきた大きな要因は、まず FIT 導入以前においては、FIT の導入による再エネ導入の効果や価格低減効果を想定できなかったことがあげられる。

一方、2021 年に決定された 2030 年目標（36~38%）については、単純に FIT 制度導入以降の伸び率のトレンドを単純に延長すれば、それほど困難ではないようにみることができるし（図 2 6 参照）、また、近年の再エネ（太陽光等）の発電コストの低下傾向が引き続き続けば、社会全体として追加コスト負担が少なく達成することはそれほど困難でないようにも見える。一方、今後の新たな FIP 制度の下でどの程度の経済負担（消費者負担）を見込むのかという問題や、そもそもの日本における再エネの潜在資源量の問題に加え、今後、次章で示す新たなエネルギー・電力システムへの改革に必要なコストを踏まえると、必ずしも容易ではないと見ることも可能である。

図 2 6 : 日本の発電電力量における再エネ・原子力の割合の推移と 2030 年見通し⁹¹



⁸⁸ 第 6 次エネルギー基本計画（案）に対するパブリックコメント（意見募集）

https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/opinion/public.html

⁸⁹ 経済産業省「第 6 次エネルギー基本計画が閣議決定されました」2021 年 10 月 22 日

<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html>

⁹⁰ 出典：各種資料より筆者作成

⁹¹ 出典：資源エネルギー庁「令和 2 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2021）」2021 年 6 月のデータに基づき、筆者作成。

(3) 日本のグリーンイノベーション政策を巡る経緯と特徴

<グリーンイノベーション政策の歴史>

この30年間の地球温暖化問題への関心の高まりの中、再生可能エネルギーの普及促進施策も含めて、政府全体の地球温暖化対策に向けた技術・イノベーション面での戦略策定の取組も行われてきている。その際、日本政府内での「イノベーション」の概念の浸透・普及⁹²や日本政府（内閣府等）の組織体の変化⁹³もあるが、全体的に、研究開発戦略から、イノベーション戦略、成長戦略へと、その位置付けが変化してきている。

具体的には、2001年に創設された総合科学技術会議は、各技術分野の技術戦略を策定する中で、2003年に「地球温暖化対策技術研究開発の推進について」⁹⁴を発表している。また、ポスト京都議定書の議論がなされる中、その対応戦略として、2008年に「環境・エネルギー技術革新計画」⁹⁵を発表している。その後、2012年には、民主党政権において、エネルギー・環境会議が「革新的エネルギー環境戦略」⁹⁶を発表しているが、再度自民党が政権を回復した後、総理指示のもとで「環境・エネルギー技術革新計画」の改訂版⁹⁷を2013年9月に発表し、その内容をCOP19（ワルシャワ）において説明している。

ここまでは、技術に対する研究開発と実用化の支援政策が中心であったが、その後、イノベーション・成長戦略としての意味合いが強くなる。具体的には、総合科学技術・イノベーション会議（2014年に総合科学技術会議から改組）は、2016年に、パリ協定を踏まえた総理指示に基づき、「エネルギー・環境イノベーション戦略（NESTI）」⁹⁸を発表した。また、パリ協定において「温室効果ガスについて低排出型の発展のための長期的な戦略を立案し、及び通報するよう努力すべき」と記載されていることを踏まえ、2019年6月、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」⁹⁹を閣議決定するとともに、同長期戦略に基づき、総合科学技術イノベーション会議の上位組織である統合イノベーション戦略会議（2018年設立）は、2020年1月に「革新的環境イノベーション戦略」を決定した¹⁰⁰。

⁹² 例えば、日本政府の科学技術基本計画において「イノベーション」という用語が使われ始めたのは、概ね第3次計画（2006年）、第4次計画（2011年）ごろからである。

⁹³ 内閣府の総合科学技術会議は、2014年に総合科学技術・イノベーション会議に名称変更された。

⁹⁴ 総合科学技術会議「地球温暖化対策技術研究開発の推進について」2003年4月21日

<https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihu27/haihu-si27.html>

⁹⁵ 総合科学技術会議「環境エネルギー技術革新計画」2008年5月19日

<https://www8.cao.go.jp/cstp/sonota/kankyoene/kankyoene.html>

⁹⁶ エネルギー・環境会議「革新的エネルギー・環境戦略」2012年9月14日

<https://www.kantei.go.jp/jp/topics/2012/pdf/20120914senryaku.pdf>

<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/index.html>

⁹⁷ 総合科学技術会議「環境エネルギー技術革新計画」2013年9月13日

<https://www8.cao.go.jp/cstp/sonota/kankyoene/kankyoene.html>

⁹⁸ 総合科学技術・イノベーション会議「エネルギー・環境イノベーション戦略(NESTI2050)」2016年4月19日

<https://www8.cao.go.jp/cstp/nesti/index.html>

⁹⁹ 「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（2019年6月11日閣議決定）

https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/long-term_strategy.html

<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai40/pdf/gaiyou.pdf>

¹⁰⁰ 統合イノベーション戦略推進会議「革新的環境イノベーション戦略」2020年1月21日

<https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui048/siryo6-2.pdf>

なお、同戦略は、経産省の革新的環境イノベーション戦略検討会において検討がなされた。

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/kankyo_innovation/index.html

その後、2020年10月の菅総理のカーボンニュートラル宣言を踏まえ、2020年12月に、経済産業大臣が成長戦略会議において「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」¹⁰¹を発表するとともに、2021年6月には、内閣官房（成長戦略の事務局）、経産省を中心とする9省庁連携による同戦略の確定版（改正版）を発表した¹⁰²¹⁰³。

これらの各戦略において対象とする技術・産業の推移をまとめると図27の通りである。当初は、2030年までの技術とそれ以降の技術に分け、特に前者は省エネルギー技術と再生可能エネルギー技術が重要な役割を果たしていたのに対し、パリ協定署名以降は、省エネルギー技術の役割が相対的に減少するとともに、技術戦略から産業戦略へと変化し、また、政策ツールも、研究開発から多様なツールの活用への変化しつつあることが読み取れる。

図27：政府における地球温暖化関連の研究開発・イノベーション・成長戦略¹⁰⁴

「地球温暖化対策技術研究開発の推進について」2003年4月※1	「環境エネルギー技術革新計画」2008年5月※1	「環境エネルギー技術革新計画」2013年9月※1	「エネルギー・環境イノベーション戦略（NESTI 2050）」2016年4月※2	「革新的環境イノベーション戦略」2020年1月※3	「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」2021年6月※4
CO2削減ポテンシャルを踏まえた技術の選定	短中期／中長期的CO2削減削減技術のレビュー	総理指示を踏まえた37の革新技術の特定とその施策	総理指示を踏まえ革新技術の特定	パリ協定に基づく成長戦略。16のアクションプラン	2050/CN宣言を踏まえ、14の成長分野
<中長期的観点から重要な技術> （重点的取組） ・自動車燃費改善に向けた技術開発 ・省エネ型二酸化炭素分離回収技術開発 ・二酸化炭素貯留技術開発 ・燃料電池技術開発 ・高効率石炭ガス化発電 ・森林育成技術開発 （導入普及早期） ・省エネ型住宅・建築技術開発 ・太陽光発電技術開発 ・エネルギー有効利用資源循環システム ・バイオマス利用開発 ・フロン代替技術 <将来の環境調和型社会構築に向けた重要な技術> ・水素製造・供給システムの開発 ・定置型高効率二次電池開発 ・廃棄物処理の高度化・再資源化開発	<短中期的対策（2030年頃まで）に必要な技術> （大きな削減効果） ・軽水炉の高度利用 ・高効率火力発電（石炭・天然ガス） ・ハイブリッド車・プラグインハイブリッド車・電気自動車、燃料電池自動車、高効率照明、高効率ヒートポンプ、省エネ家電・情報機器 （地域全体での取組） ・省エネ住宅、HEMS/BEMS、CASBEE ・バイオマス利活用技術、高効率鉄道車両、交通物流の高度化、エネルギーの面的利用、テレワーク （削減効果を向上） ・再生可能エネルギー（太陽光・風力）と電力貯蔵（2次電池・キャパシタ）、定置型燃料電池、高効率火力発電と二酸化炭素回収・貯留（CCS） <中長期的対策（2030年以降）に必要な技術> ・原子力（次世代軽水炉、高速増殖炉サイクル技術、第三世代太陽電池、水素製造技術、水素還元製鉄	<短中期的（2030年頃まで）に開発する技術> ○生産・供給分野 ・高効率石炭火力、高効率天然ガス発電、風力発電、太陽エネルギー、地熱発電、海洋エネルギー、原子力等 ○消費・需要分野 ・次世代自動車、高効率航空機・船舶・鉄道、高度道路交通システム、革新的デバイス、革新的構造材料、エネルギーマネジメントシステム、省エネ住宅・ビル、高効率エネルギー産業利用、高効率ヒートポンプ、革新的製造プロセス ○流通・輸送分野 ・燃料電池、高性能電力貯蔵、蓄熱・断熱技術等 ○その他 ・メタン等温室効果ガス削減技術、温暖化適応技術、地球観測・気候変動予測 <中長期的（2030年頃以降）の実用化を目指す技術> ・二酸化炭素回収・貯留（CCS）、人工光合成、バイオマス利活用、水素製造・輸送・貯蔵、超電導送電、植生による固定 ・核融合、宇宙太陽発電や窒素循環の適正化	<システム統合> ・統合システム技術・CO2最小化シミュレーション技術 ・次世代パワーエレクトロニクス、センシング技術、超電導応用 <省エネルギー> ・革新的生産プロセス（膜分離、革新触媒） ・超軽量・超耐熱材料構造材料 <蓄エネルギー> ・次世代蓄電池 ・水素等製造・貯蔵・利用 <創エネルギー> ・次世代太陽光発電（ペロブスカイト、量子ドット） ・次世代地熱発電（高温岩体、超臨界） <CO2固定化・有効利用> ・CO2革新的分離・回収技術、CO2有効利用技術	<エネルギー転換> (1)再生可能エネルギーを主力電源に (2)デジタル技術を用いた強靱な電力ネットワークの構築 (3)低コストな水素サプライチェーンの構築 (4)革新的原子力技術/核融合の実現 (5)CCUS/カーボンリサイクルを見据えた低コストでのCO2分離回収 <運輸> (6)多様なアプローチによるグリーンモビリティの確立 <産業> (7)化石資源依存からの脱却（再生可能エネルギー由来の電力や水素の活用） (8)カーボンリサイクル技術によるCO2の原料化など <暮らし・家庭・その他・横断領域> (9)最先端のGHG削減技術等の活用 (10)ビッグデータ、AI、分散管理技術等を用いた都市マネジメントの変革 (11)シェアリングエコノミーによる省エネ/テレワーク、働き方改革、行動変容の促進 (12)GHG削減効果の検証に貢献する科学的知見の充実 <農林水産産・吸収源> (13)最先端のバイオ技術等を活用した資源利用及び農地・森林・海洋へのCO2吸収・固定 (14)農畜産業からのメタン・N2O排出削減 (15)農林水産業における再生可能エネルギーの活用&スマート農林水産業 (16)大気中のCO2の回収	<エネルギー関連産業> (1)洋上風力・太陽光・洋熱産業（次世代再生可能エネルギー） (2)燃料アンモニア産業 (3)次世代熱エネルギー産業 (4)原子力産業 <輸送・製造関連産業> (5)自動車・蓄電池産業 (6)半導体・情報通信産業 (7)船舶産業 (8)物流・人流・土木インフラ産業 (9)食料・農林水産業 (10)航空機産業 (11)カーボンリサイクルマテリアル産業 <家庭・オフィス関連産業> (12)住宅・建築物産業 (13)資源循環型産業 (14)ライフサイクル関連産業

（注）※1：総合科学技術会議、※2：総合科学技術・イノベーション会議、※3：統合イノベーション戦略会議、※4：内閣官房+9省庁

<「グリーン成長戦略」のポイント>

上述の通り、2021年6月、内閣官房（成長戦略の事務局）を含む9省庁連携による「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（以下、グリーン成長戦略）というを発表した（実際には、経産省が主導）。

¹⁰¹ 経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」2020年12月25日
<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html>

¹⁰² 内閣官房、経済産業省、内閣府、金融庁、総務省、外務省、文部科学省、農林水産省、国土交通省、環境省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」2021年6月18日
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html

¹⁰³ なお、上記戦略は、二つとも、経済産業省の「グリーンイノベーション戦略推進会議」において、関係省庁の参加のもと、2020年7月から検討がなされている。なお、当初は、「革新的環境イノベーション戦略」を踏まえ、2050年の技術確立を目指した全体構想の再整理を行うべく、設置されたものである。

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/index.html

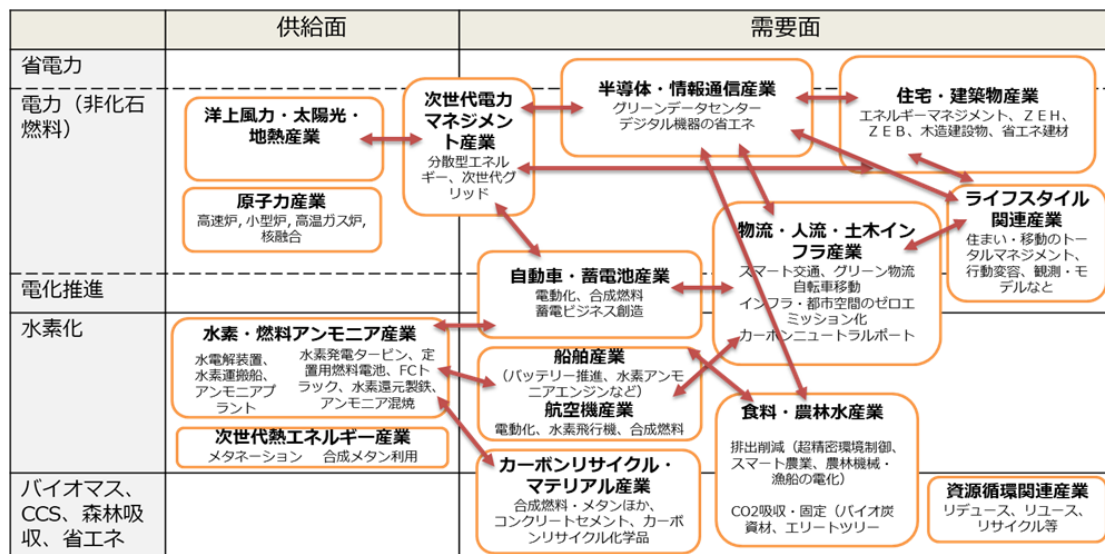
¹⁰⁴ 出典：各種資料より筆者作成

このグリーン成長戦略の特徴の一つは、まずは、成長戦略の対象産業分野として14分野を指定していることである。具体的には、再エネ関連産業、自動車・蓄電池、半導体・情報通信産業、電力マネジメント産業などを重点とする図28に掲げる14分野であり、それぞれの分野において、個別の成長戦略を策定するとともに、2020年度第3次補正予算によりNEDOに造成した2兆円の「グリーンイノベーション基金」を活用し、今後10年間にわたって、研究開発等の支援を進めることとしている。

なお、この14分野の選定に関しては、「足下から2030年にかけて市場が立ち上がるものから、2050年にかけて市場が立ち上がってくるものまで、成長に至る時間軸が異なる14分野を取り上げ」としており、実際には、経産省のグリーンイノベーション戦略推進会議の了承を経て決定されている。しかしながら、どのような基準に基づきこの14分野が選定されたのかは不明であるとともに¹⁰⁵、その分野の分け方をみると、各省庁の所掌（縦割り）を踏まえて分野が設定されていることが推測される¹⁰⁶。

いずれにせよ、この14分野を、今後のエネルギーシステムの変革の方向を踏まえつつ、それぞれの主たる関係も含めて、整理すると図28の通り位置づけられる。

図28：グリーン成長戦略における「14の成長が期待される分野」の位置付け¹⁰⁷



¹⁰⁵ 実際に、分野によっては何故成長分野として挙げられているのか不明な分野もある（例えば、「次世代熱エネルギー産業」「ライフスタイル関連産業」「資源循環関連産業」など）

¹⁰⁶ 具体的には、経産省以外で言うと、「船舶産業」「物流・人流・土木インフラ産業」⇒国土交通省、「食料・農林水産業」⇒農林水産省、「ライフスタイル関連産業」「資源循環関連産業」⇒環境省。（「原子力産業」⇒文部科学省）

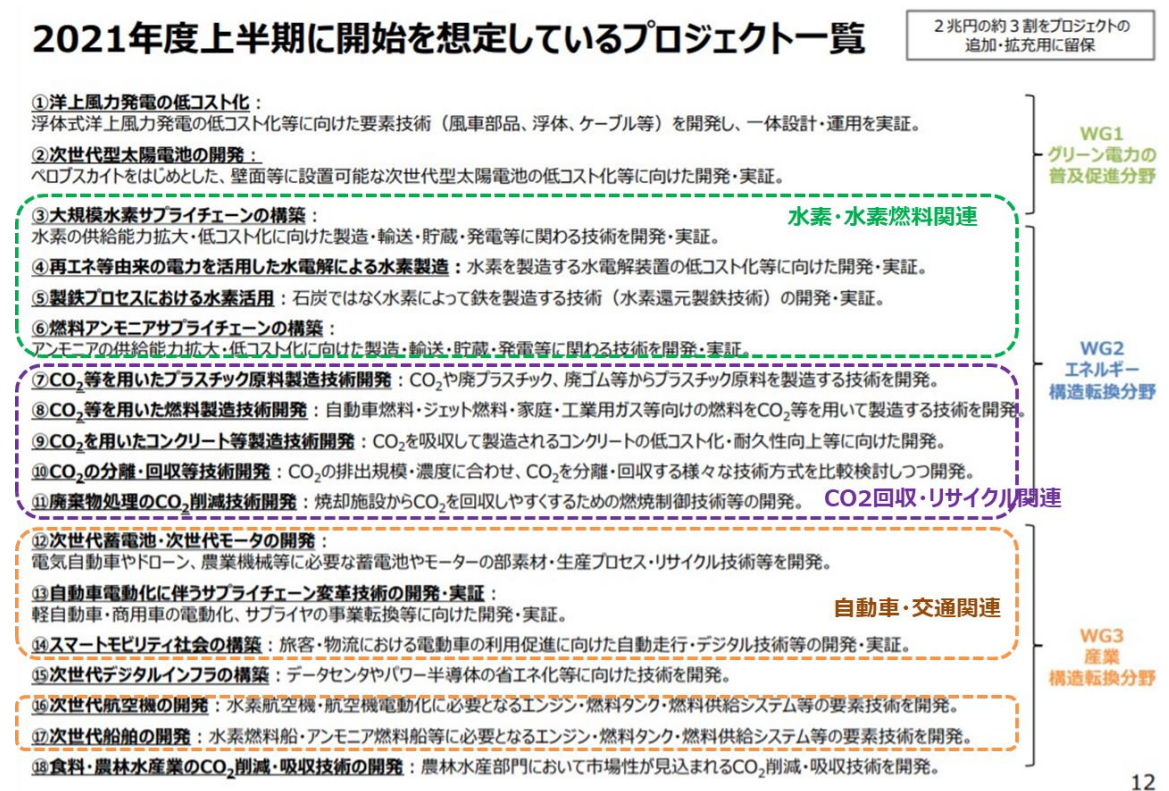
なお、この内閣官房+9省庁連名の報告書（21年6月報告書）と経産省報告書（20年12月）では、同じ14成長分野となっているが、それぞれ微妙に異なる。具体的には、「洋上風力産業」⇒「洋上風力・太陽光・地熱産業」、「燃料アンモニア産業」「水素産業」⇒「水素・燃料アンモニア産業」、「次世代熱エネルギー産業」の追加、「住宅・建築物産業/次世代型太陽光産業」⇒「次世代・建築物産業・次世代電力マネジメント産業」

¹⁰⁷ 出典：筆者作成

（注）なお、上記図においては、整理の都合上、実際の21年6月報告書の14分野と比較して、「船舶産業」と「航空機産業」を一つに括るとともに、「住宅・建築物産業・次世代電力マネジメント産業」を二つに分けて括っている。

また、上述のグリーンイノベーション基金事業に関しては、2021年度上半期において18のプロジェクトが開始される予定となっている（図29参照）。これを見ると、少なくともプロジェクトの数の観点からは、日本の戦略の特徴として、エネルギー構造転換分野として「水素・燃料アンモニア産業」と「カーボンリサイクル・マテリアル産業」に対して、重点的に配分していることが伺える。また、産業構造転換分野としては、自動車・交通関連分野のプロジェクト数も多いのも日本の特徴である。

図29：グリーンイノベーション基金事業：2021年度上半期開始予定のプロジェクト¹⁰⁸



12

また、このグリーン成長戦略のもう一つの特徴は、上述の予算関連の施策だけではなく、世界的な流れを踏まえつつ、多くの金融的措置や情報開示の措置の検討・実施が行われていることである（図30参照）。具体的には、グリーンファイナンス、トランジションファイナンス、情報開示（TCFDなど）などである。

なお、規制改革・標準化に関しては、いわゆる新技術の需要を創出するような規制の強化、規制緩和、国際標準化等には積極的に取り組むとしているが、旧技術に対する環境規制については、必ずしも明確に触れていない。特に、市場メカニズムを用いる経済的手法（カーボンプライシング等）や、炭素税に関しては、今後、専門的・技術的な議論が必要としており、この点については、第5章で再度議論する。

¹⁰⁸ 出典：経済産業省産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会「資料2 グリーンイノベーション基金事業の今後の進め方について」2021年4月6日

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/003.html

なお、点線の囲い部分は、筆者が追記。

（参考）「グリーンイノベーション基金事業の基本方針 2021年3月12日

<https://www.meti.go.jp/press/2020/03/20210312003/20210312003.html>

図30：グリーン成長戦略：分野横断的な主要政策ツール

項目	概要
予算	<ul style="list-style-type: none"> グリーンイノベーション基金：NEDOに10年間で2兆円の基金を造成、重点分野ごとに、意欲的な2030年目標を設定。民間企業の研究開発・設備投資を誘発
税制	<ul style="list-style-type: none"> カーボンニュートラルに向けた投資促進税制（特定の設備機器導入に対する特別償却） 経営改革に取り組む企業に対する繰越欠損金の控除上限を引き上げる特例の創設 研究開発税制の拡充
金融	<ul style="list-style-type: none"> グリーンファイナンス：2021年度中にグリーンボンドガイドラインの改訂等 トランジションファイナンス：2021年5月、基本指針策定 イノベーションファイナンス：ゼロエミチャレンジ（脱炭素化イノベーションに取り組む企業の見える化） リスクマネー支援：グリーン投資促進ファンド（DBJ）、ポストコロナ成長ファシリティ 情報開示：TCFD（気候関連財務情報開示タスクフォース） 環境整備：ソーシャルボンド発行に係るガイドライン、マーケット情報等の提供、グリーン国際金融センター、ESG評価機関の在り方、国際会計基準財団の枠組み策定など
規制改革・標準化	<ul style="list-style-type: none"> 規制改革：水素、洋上風力、自動車・蓄電池など 標準化の推進：市場の拡大、新市場形成・差別化、安全・安心等 カーボンプライシング：クレジット取引、炭素税、国境調整措置
その他	<ul style="list-style-type: none"> 国際連携 大学の取組推進：人材育成、経済波及効果の分析手法 2025年日本国際博覧会 グリーン成長に関する若手WG

4. カーボンニュートラル型エネルギーシステムへの変革

本章では、前章のグリーン成長戦略を踏まえた上で、カーボンニュートラル実現に必要なエネルギーシステムへの改革の方向性について論じる。

まず、第一節において、カーボンニュートラル実現のための今後のエネルギーシステムの改革の方向を明示するとともに、特に、日本が目指そうとしているシステムの特徴についても論じる。

その上で、第二節において、エネルギーシステムの中で今後重要性の増す電力システムに関し、単に再生可能エネルギーの導入普及だけではなく、供給安定性及び供給可能性（エネルギー安全保障）の観点から、システム自体の抜本的な改革とそのための多様な技術のイノベーションをセットで推進することが喫緊の課題であることを指摘する。

また、その際、蓄電・水素関連設備・施設・システムを組み込むにあたって、その物理化学的視点からの技術的な可能性を見極めるとともに、デジタルを活用した全く新たなアーキテクチャによる分散型調整システムの設計が不可欠であることなどを提言する。

（1）カーボンニュートラル型のエネルギーシステムの構造

第三章で分析したとおり、これまでの日本における地球温暖化対策としてのCO₂の排出量の減少は、主として、電力分野におけるエネルギー種の変更（石油から天然ガスへの転換や、再生可能エネルギーの一部導入など）及び非電力分野を含む省エネの推進（経済成長とのデカップリング）によるものである。

しかしながら、カーボンニュートラルの実現とは、原則として、化石燃料を利用しないということの意味する。このため、今までの化石燃料中心のエネルギーシステムの延長による取組では全く対応できず、これまでの戦略を抜本的に見直し、再生可能エネルギー（非化石エネルギー）を中心とする全く新たな「カーボンニュートラル型のエネルギーシステム」を構築する必要があることを意味し、また、2050年を目標とするには、あと30年以内にその構築し、変革を行う必要があることを意味する。

本章では、カーボンニュートラル型のエネルギーシステムとして、現行の化石燃料中心のエネルギーシステムを、具体的にどのように改革しなければいけないのか、また、どのようなイノベーションが求められるのかについて考察する。

<カーボンニュートラル型エネルギーシステムの基本的構造>

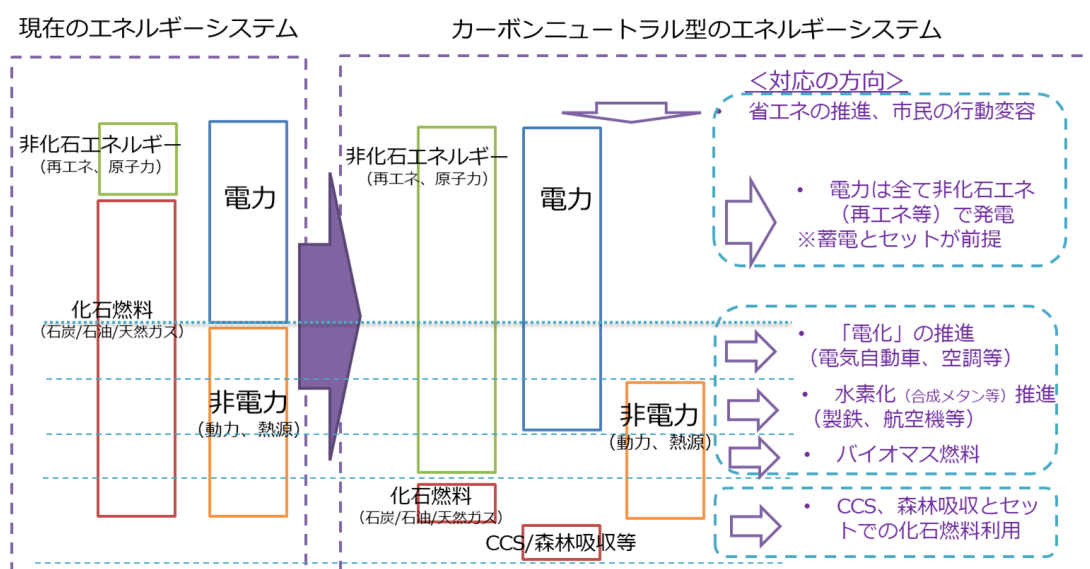
カーボンニュートラル型のエネルギーシステムの基本的な方向については、IEAの報告書（Net Zero by 2050）¹⁰⁹において、「脱炭素の7本柱」¹¹⁰として記載されている。基本的に

¹⁰⁹ 中山 寿美枝（J-POWER 執行役員、京都大学経営管理大学院 特命教授）IEA 「Net Zero by 2050 Roadmap for the Global Energy Sector」 概要（その1）－政策決定者向け要約から－
<https://ieei.or.jp/2021/06/expl210601/>
IEA Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector Flagship report — May 2021
<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

は、「火力発電を含む化石燃料利用システム」を中心としたエネルギーシステムから、「再生可能エネルギー発電による電力システム」を中心とするエネルギーシステムへの転換であり、具体的には、以下の方向と言える（図3 1 参照）

- 「電力部門の再エネ化と省エネルギーの推進」：電力は、原則全て**再生可能エネルギー**を中心とする非化石エネルギーで供給されることになる。その際、再生可能エネルギーは、需要に応じて発電することができないため、蓄電を含む新たな電力供給ネットワークを構築することが前提となる。その際、エネルギー消費における電力の割合が大きくなるにつれ、特に電力分野を中心とした**省エネ**が重要になる。特に今後電力需要の急増が見込まれるデジタル分野での省エネ対応に加え、デジタル技術を活用した各種の効率的なシステムの構築などの省エネの推進が重要になる。また、電力には限らないが、デジタル・オンラインの利用も含め、**市民の行動変容**も重要である。
- 「非電力部門の非化石エネルギー化」：まずは、自動車、空調、厨房も含め、従来ガソリン、天然ガス、石炭などで供給していた需要分野は、可能な範囲で**電力化**を推進することになる。その上で、電力化できない動力（一部自動車や、船舶、航空機など）や熱源（産業用途など）については、非化石エネルギーで発電した**水素及び水素燃料**による代替を進めることになる。その際、水素そのものの燃焼・動力化に加え、水素を通じた合成メタンや燃料アンモニアの生成も選択肢になりうる。また、再生可能エネルギーとしての**バイオマスエネルギー**の活用も視野に入る。
- 「化石燃料利用とセットでのCO2吸収」：これらの技術で対応できない部分（電力部門、非電力部門）は、引き続き化石燃料で対応することになるが、それに対応する部分の**CO2吸収**（CCUS：二酸化炭素回収・利用・貯留や、森林吸収など）をセットで進めることになる。

図3 1：カーボンニュートラル型のエネルギーシステムへの変革¹¹¹



¹¹⁰ 具体的には、「エネルギー効率化（省エネ）」「行動変容」「電力化」「再生可能エネルギー」「水素と水素燃料」「バイオエネルギー」「CO2回収・利用・貯蔵」の7つ

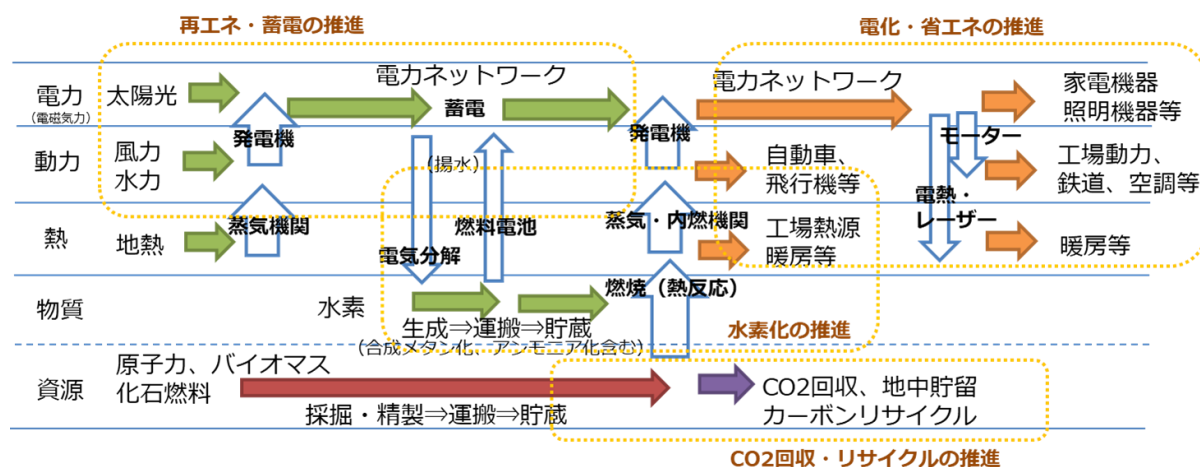
¹¹¹ 出典：筆者作成

このうち、「電力部門の再エネ化と省エネルギーの推進」は、概ねこれまで地球温暖化対策として取り組んできた内容を、引き続き加速して取り組むという位置づけになるが、カーボンニュートラル型のエネルギーシステムを実現するには、さらに「非電力部門の非化石エネルギー化」「化石燃料利用とセットでのCO2回収」がさらに追加して取り組むべき課題になると位置づけられる。

<歴史的な流れから見たカーボンニュートラル型エネルギーシステムの構造>

このようなカーボンニュートラル型のエネルギーシステムは、これまでの化石燃料中心のエネルギーシステムとは、どのような関係に位置づけられるのであろうか。それを、エネルギーを「資源・物質（化学エネルギー）」、「熱（熱エネルギー）」、「動力（力学エネルギー）」、「電力（電磁気エネルギー）」に分け、それぞれのエネルギーの転換技術で示したのが図32である。

図32：既存のエネルギーシステムとカーボンニュートラル時代のエネルギーシステム¹¹²



まず、これまでのエネルギーシステムは、赤と橙の矢印部分である。第二章で記載した通り、化石燃料革命によって、石炭と蒸気機関の利用により、化石燃料から熱源と動力源を得ることになり、また、石油と内燃機関の利用により自動車等での利用が可能となった。また、電力革命によって、発電機を通じた電力の創出と電力ネットワークにより、照明、電子機器に加え、動力や熱源としても利用されることになり、その結果、現代のエネルギーシステムの骨格ができた。その後、天然ガスの利用も拡大するとともに、非化石エネルギーである原子力の利用も開始されたが、この骨格は変わらない。

それでは、今後、カーボンニュートラル型のエネルギーシステムは、どのようなものになるのであろうか。これは、以下のように整理することができる。

- まず、既存の電力ネットワーク（橙の部分）は、引き続き活用される。その際、現在化石燃料によって熱、動力を得ている利用についても、可能な限り、原則「電力化」が推進されることになる。その際、電力の利用に関しては、引き続き、デジタル技術等を活用することによる省エネを推進することが望まれる。
- その上で、緑の矢印部分が、新たな（分散型の）電力システムとして新たに追加される。再生可能エネルギーは、原則（バイオマスや太陽熱など一部を除き）全て電

¹¹² 出典：筆者作成

力として供給されることになるが、次節で示すように、火力発電がなくなる前提では、蓄電システムとセットで構築し、その上で、既存の電力ネットワークと接続することが前提になる。

- 次に、現在、化石燃料によって熱、動力を得ている利用のうち、「電力化」できない利用に対しては、水素・水素燃料に係るエネルギーシステムが構築される（緑の矢印部分）。このシステムでは、再生可能エネルギーで発電した電力を「物質（化学エネルギー）に転換し、それらを燃焼し、動力化することによって、対応するものであり、その物質としては、水素及び水素から生成される物質（合成メタン、燃料アンモニア）が中心になる。
- 一方、赤の矢印部分（原子力、バイオマスを除く）については、原則として、廃止されることになる。ただし、紫の矢印部分（CO2回収・リサイクル）を構築する程度において、利用が可能とされる。

<日本型のカーボンニュートラル型エネルギーシステムの構造的特徴>

カーボンニュートラル型のエネルギーシステムの基本的な構造は、上述の通りであるが、現在においても、各国のエネルギー供給構造は、自然状況を含む地理的な事情や、技術発展に係る歴史的経緯等によって、全く異なるのと同様に、これらのカーボンニュートラル型のエネルギーシステムの構造も、国によって異なるものになると考えられる。

その際、カーボンニュートラル型のエネルギーシステムに関し、日本では、電源構成における再生可能エネルギーと原子力の割合が大きな話題になることが多い。しかしながら、それ以外にも、電源構成あるいは水素供給における「火力発電（化石燃料利用）+CO2回収」の割合をどうするか、水素燃料とバイオマス燃料の割合をどうするか、回収したCO2をどのように貯蔵・リサイクルにするかなどは、地域によって異なってくるものと考えられる。また、場合によっては、水素燃料やバイオマス燃料に係る輸出入割合なども重要になる。

そのような中、日本のグリーン成長戦略をみると、全般的に、火力発電+CO2回収への依存、（バイオ燃料に対する）水素燃料への重点化、CO2回収におけるカーボンリサイクルへ重点化が特徴的であると言える。

例えば、カーボンニュートラルにおける電源構成については、IEAでは、9割を再生可能エネルギーでの発電を見込むが、日本のグリーン成長戦略では、その参考値として「2050年に、再エネが発電量の約50~60%、水素・アンモニア発電が10%程度、原子力・CO2回収前提の火力発電が30~40%程度を占める」としている。すなわち、日本の場合は、世界全体（IEA）の見込みと比較して、原子力はもとより、火力発電が多いことに加え、一般的に日本が強みの有するとされる水素・アンモニアを発電に利用しようとしていることが特徴であると言える。（なお、IEAの記述では、2050年に水素の2割程度は火力発電に利用されるとしている¹¹³。）

また、それに伴い、CO2回収に取り組む必要があるが、その際、単にCO2を回収して地中に埋めるというよりは、日本ではCO2を貯留する地層が少ないこともあって、カーボンリサイクルとして活用する方向で、素材・マテリアル産業戦略として位置づけていることが特徴的である。実際に、成長が期待される14分野の一つとして「カーボンリサイクル・マテリアル産業」が位置づけられるとともに、経産省は、これまでカーボンリサイクル技術ロ

¹¹³ IEA, pp75

ードマップの策定、改訂を行ってきており¹¹⁴、また、上述の通り、グリーンイノベーション基金の執行においても重点化されている。

なお、一方で、化石燃料代替としてのバイオマスエネルギー利用に係る記述は比較的が少ない。これは、日本の自然・地理的条件では、その調達が必ずしも容易ではないことがその理由であると考えられる。

図 3 3 : カーボンニュートラルに向けたエネルギーシステムの構造 (IEA、日本) ¹¹⁵

	IEA報告書の脱炭素化に係る7本柱	日本のグリーン成長戦略の記載
省エネ・行動変容、電力部門の脱炭素化	<p>省エネ：建物、自動車、家電、産業の省エネソリューションが利用。2020年代の省エネの改善率は、過去20年平均の約3倍にすることが必要。</p> <p>行動変化：市民の行動変化が不可欠。自動車による旅行の代わりに、散歩・自転車、公共交通機関、長距離飛行機での旅行の取りやめなど（4%削減）</p> <p>再生可能エネルギー：2050年までに90%の世界の電力は、再生可能エネルギーから。うち、太陽光と風力が約70%。</p>	<p>「電化により、電力需要が増加することが見込まれる中で、省エネ関連産業を成長分野として育成」</p>
非電力部門の脱炭素化	<p>電力化：電力源はよりクリーンになり、化石燃料利用であった分野の電力化。電気自動車・バス・トラック、ヒートポンプ、鉄鋼分野における電気炉。</p> <p>水素・水素燃料：電力が経済的に代替できない分野、バイオエネルギーが必要に対応できない分野を埋める。水素燃料ベースの飛行機・船舶、鉄鋼・化学など重工業での水素利用。</p> <p>バイオエネルギー：持続可能なバイオエネルギー。飛行機・船舶などの燃料、暖房・電力供給のための天然ガス代替。クリーンな調理用エネルギーを有さない26億人のため。</p>	<p>「再生可能エネルギーは、最大限導入」「火力については、CO2回収を前提とした利用を、選択肢として最大限追求」「水素発電は、選択肢として最大限追求」「原子力については、可能な限り依存度を低減しつつ、（略）、再稼働を進める」</p> <p>※「2050年には発電量の約50～60%を再生エネで、水素・燃料アンモニア発電は10%程度、原子力・CO2回収前提の火力発電は30～40%程度を参考値」</p> <p>「電力部門以外（産業・運輸・業務・家庭部門）は、電化が中心となる」</p> <p>※「電化の進展により約3～4割電力需要が増加」</p>
化石燃料利用の相殺	<p>CCUS：既存のエネルギー資産からの排出への対応、セメントなどの排出削減が困難な分野での対応、当面の水素生成過程における低排出化、大気からCO2の除去。</p>	<p>「熱需要には、水素などの脱炭素燃料、化石燃料からのCO2の回収・再利用も活用」「熱需要においてはガス供給事業の在り方を、次世代の熱エネルギー供給として対応」「産業部門では、水素還元製鉄など製造プロセスの変革やマテリアル産業の成長が必要」「運輸部門では、電動化を推進しつつ、バイオ燃料や水素燃料を利用」「業務・家庭部門では、住宅・建築物のネット・ゼロ・エネルギー化や電化、水素化、蓄電池活用」</p>

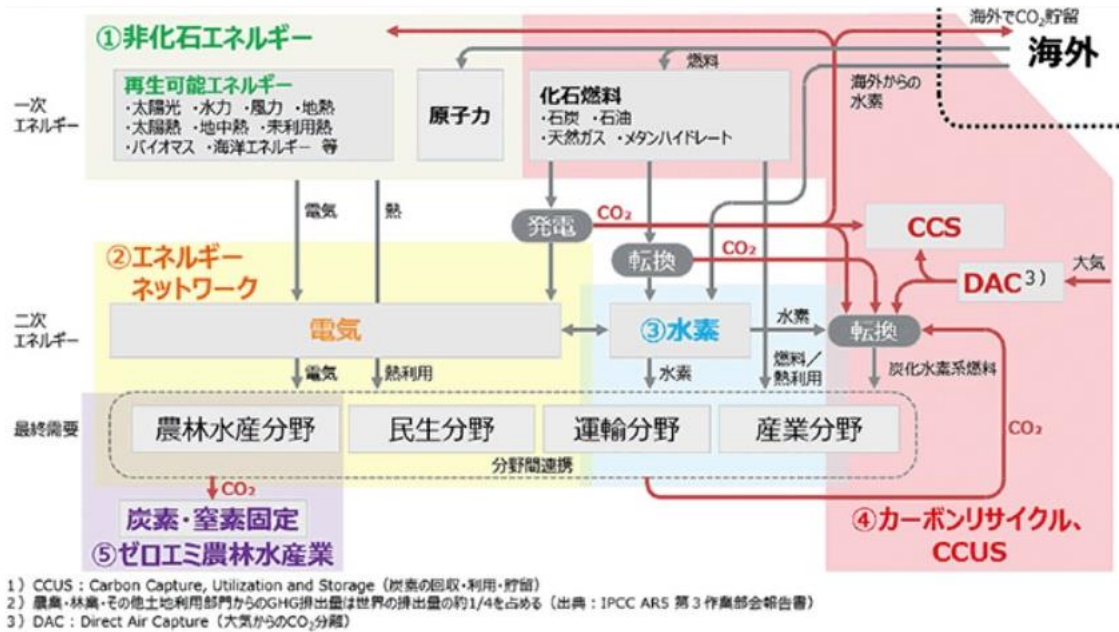
なお、水素燃料の利用に関しても、日本では、少なくとも当面は、再生エネで発電した電力を利用して水素を生成するのではなく、天然ガスの改質によって得られた水素を利用することを想定している。例えば、2020年1月の革新的環境イノベーション戦略で支援されている図（図34参照）では、引き続き火力発電（+CCUS）を利用することに加え、化石燃料からの転換による水素の生成なども矢印として記載されている。もちろん、水素燃料に係るエネルギーシステムを構築するにあたっては、まずはコストの安い天然ガスの改質から始めるということは、一つの戦略であるとは言える。

¹¹⁴ 経産省のカーボンリサイクル技術ロードマップ検討会では、2019年6月に「カーボンリサイクル技術ロードマップ」を発表、また、2021年7月には、同ロードマップの改訂版を発表している。

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/

¹¹⁵ 出典：各資料より、筆者作成

図 3 4 : イノベーション・アクションプランにおける 5 つの重点技術領域



(2) カーボンニュートラル型エネルギーシステムに求められる機能要件

①エネルギーシステムにおける供給安定性と供給可能性

＜エネルギーシステムにおける供給安定性と供給可能性に係る課題＞

一般的に、エネルギーシステムにおいては、3E+S、すなわち、安全性 (Safety) を大前提とし、自給率 (Energy Security)、経済効率性 (Economic Efficiency)、環境適合 (Environment) が重要であるとされ、現行のエネルギーシステムにおいてもこれらを同時に達成するべく取組が進められている。その際、特に日本においては、化石燃料 (石油・石炭・天然ガス) のほとんどを海外に依存しているため、Energy Security を「自給率」として解釈しているが、そもそも Energy Security の観点からは、需要変動に対する供給安定性や非常時における供給可能性の視点も重要である。実際に、現在の電力システムにおける需要変動に対する供給安定性は、火力発電による調整力に依存しており、また、電力を含むエネルギーシステム全体の非常時の供給可能性は、石油の備蓄を含めた化石燃料の物質としての保管可能性に依存している。

今後、カーボンニュートラル型のエネルギーシステムの構築にあたっては、需要に対する供給安定性と非常時の供給可能性を確保することが必要になる。その際、一般的に、カーボンニュートラル型における主要一次エネルギー源となる非化石エネルギー (再生可能エネルギー、原子力) は、いずれも国内で供給されるものであり、「自給率」という意味では、供給安定性はあるとされる¹¹⁷。しかしながら、再生可能エネルギーは、そのままでは物質としての保存は不可能であるため、需要変動に対してもまた非常時においても、その供給安定性

¹¹⁶ 2020年1月に「革新的環境イノベーション戦略」

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/1-3-3.html>

¹¹⁷ もちろん、原子力の燃料 (核燃料) であるウランは、そのほとんどを海外に依存しているが、備蓄可能という趣旨で、国産エネルギーでみなすこととする。

に欠ける。また、原子力は、非常時の供給可能性は有するが、需要変動に対する調整力には欠ける。

今後、カーボンニュートラル型のエネルギーシステムへの改革を進めるにあたっては、このような需要変動に対する供給安定性や非常時における供給可能性をシステムに組み込む必要があるが、現時点ではほとんど議論がなされていないのが現状である。

<供給安定メカニズムとしての蓄電／火力システム>

カーボンニュートラル型のエネルギーシステムにおいては、これまで以上に電力システムの役割が重要になる。その際、電力エネルギーは、原則として、保存することができない。このため、その安定供給のためには、「常に」ネットワーク内での需要と供給が一致している必要がある。その際、現行の電力システムでは、需要変動に応じて火力発電（石炭、石油、天然ガス）の出力・供給を調整することによって対応している。すなわち、現行の電力システムでは、火力発電の供給力、調整力、慣性力¹¹⁸に依存して、その安定性を確保している。

一方、再生可能エネルギーの主力である太陽光発電や風力発電は、そもそも天候によってその発電電力量が変動する。このため、電力構成におけるその導入割合が増大すれば、ネットワーク（電力網）上にある火力発電の出力調整能力では対応できなくなる。実際に、FIT制度において急増した再生可能エネルギー設備に対して調整対応ができず、電力会社が接続拒否を行う事例が既に生じている。

今後、カーボンニュートラル型の電力システムでは、再生可能エネルギーの割合がさらに増大する一方、これまでその調整の役を担っていた火力発電がそもそも原則廃止の方向になることを踏まえると、本件に係る対応は、実務上も喫緊の課題であると言える。特に、理論的に考えると、仮に、天候によって変動する再生可能エネルギーの時間ごとの発電量が完全に予測できたとしても、例えば、天候不順によって一日間全く発電できないリスクを考えると、需要変動に対する安定供給のための設備として、一日の最大需要量を満たす火力発電の設備を維持し必要な化石燃料を備蓄し続けるか、あるいは、一日の総需要量に相当する電力量に相当する何らかの蓄電設備を導入し、十分な蓄電を備えておくことが不可欠になる。また、そのリスクとして対応すべき日数は一日であるとは限らず、さらに非常時のリスクも考慮する必要が生じる。

このため、カーボンニュートラル型の電力システムでは、再生可能エネルギーという不安定な発電設備を最大限導入しつつ、その電力の需要に対する供給安定性や非常時における供給可能性を確保することが必要であり、そのためには、以下の2点が重要になる。

- ①蓄電を含めた電力の供給安定性（エネルギーセキュリティ）を確保するための必要な規模の施設・設備の導入。これらの設備としては、蓄電設備・システムに加え、水素燃料関係の設備・システムの導入が検討されるが、必要に応じて、火力発電施設の維持+CO₂回収装置の導入が含まれる。これらの電力の供給安定化のための設備は、再生可能エネルギーのエネルギーシステムへの組み込みに必要不可欠なものであり、再生可能エネルギーの発電施設に対する支援とセットで導入を推進することが求められる。

¹¹⁸ 資源エネルギー庁「令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）」2021年7月

【第123-1-4】火力発電の特性と再エネ拡大に当たっての課題
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/1-2-3.html>

- ②このような多数の再生可能エネルギーの発電施設や蓄電施設等と接続された電力ネットワーク上の電力需給を調整するための分散型システム。すなわち、これまでは火力発電による中央集権的なITシステムに基づく電力調整システムとなっているが、今後は、デジタル技術を活用したより高度な分散型の電力調整システムを追加的に構築していく必要がある。

②電力供給安定化のための蓄電・水素関連施設・設備の導入

<電力供給安定化のための施設の種類とそのバランス>

上述のとおり、今後、再生可能エネルギーの大量導入により不安定化する電力システムを安定化するための施設・設備として、以下の3種類の導入整備が必要とされる¹¹⁹。

- **蓄電池**（電気エネルギーとしての保存）：電気エネルギーとしての保存・調整（厳密には電気化学エネルギーとしての保存）のための蓄電池の大量導入。一般的には、特に短期的な需要変動に対して有効であると考えられる。なお、蓄電池の形態としては、電力用の大型蓄電池、各家庭・業務用の定置用蓄電池、電動自動車などがある。（なお、定置用に関しては、経済産業省は、「定置用蓄電システム普及検討会」¹²⁰を開催し、2021年2月に、結果とりまとめを発表している。）
- **水素燃料への転換**（化学エネルギーとしての保存）：電力エネルギーを、一旦、化学エネルギー、すなわち物質に変換して保存、調整するための設備。具体的には、特に、水の電気分解等により生成する水素や水素関連燃料への転換が対象になる。このような水素燃料などの転換は、特に、中期的なエネルギーの保存・調整において有効であると考えられる。
- **化石燃料による火力発電とCO₂吸収とのセット**：非常時対応も含めて、上記変動の一部の対応のために、引き続き、既存の火力発電の能力を活かす方法も。その際は、CCUSなどとのセットあるいは、再エネ起源の水素・アンモニア等による発電などが考えられる。なお、一般的に原子力は、ベースロード電源として有効な役割を果たすもの、出力調整に限界があるため、調整能力としてはあまり期待できない。

これらの、それぞれの安定化施設・設備の導入規模については、それぞれの必要性、リスク、コスト・効率性を踏まえた上で、判断することが求められる。具体的には、短期的な変動に対する調整に加え、一日の需要変化・サイクルに対する調整、中長期的な天候不順や需要の増加に対する調整対応、非常時における発電能力の確保など、そのリスクと必要なコストを踏まえた上で、バランスの取れた導入量を検討する必要がある。なお、非常時用としての火力発電を活用とした場合、普段は使わない火力発電の施設を常時維持する必要がある、そのためにもコストを要することを含めて検討する必要がある。

<蓄電・水素関連施設・システムの実現に向けたイノベーション>

上述の電力の供給安定化の実現にあたっては、既存火力発電/CO₂回収装置の整備に加えて、特に、蓄電関連設備と水素関連設備のイノベーションが重要になる。

¹¹⁹ なお、それ以外にも物理的エネルギーとして保存・調整する方法として、旧来技術としては揚水発電があり、また、海外では地下への圧縮空気の注入なども検討されているが、いずれも一般的に、日本では増設の余地は少ないとされるため、本ワーキングペーパーで触れない。

¹²⁰ 経済産業省「定置用蓄電システム普及拡大検討会」

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/storage_system/index.html

蓄電技術は、今後とも重要なコア技術であると位置づけられる。具体的には、電力用の蓄電池もあるが、それ以外に、定置用の蓄電技術に加え、電動自動車に搭載した蓄電池などを電力ネットワークに分散的に接続し、電力需給の調整を図ることが視野に入る。また、蓄電池は、電力ネットワークの安定化や電動自動車の性能向上に資するだけでなく、各種携帯機器、IoT機器の使用期間延長を通じて、各種のイノベーションの波及を引き起こしうる重要技術であると考えられる。

水素関連技術は、他国と比しても、日本がこれまで積極的に投資をしてきた分野であり、日本が技術的に相対的な強みを有する分野である。実際に、日本は、従来から燃料電池技術に積極的に投資してきたことに加え、2017年12月には、政府（の再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議）は、「水素基本戦略」を発表している¹²¹。特に、カーボンニュートラル型のエネルギーシステムにおいては、再生可能エネルギーにより発電した電力を使って水分解によって生成した水素（いわゆる「グリーン水素」¹²²）を利用することが原則となるが、導入普及段階の当初では、まずは天然ガスの改質によって得られる製造コストの安い水素（いわゆる「グレー水素」）を活用し、技術が確立し転換コストが削減されてから、CO₂の回収を伴う水素（いわゆる「ブルー水素」）や「グリーン水素」等に移行していくという戦略はあると考えられる。

また、これらの水素への転換技術に加え、適切な保管・輸送・利用技術も併せて確立し、イノベーションを推進することが求められる。その際、それらの水素の一部は、再度電力に転換することが求められる。その水素の電力への転換に関しては、定置用あるいは車載用の燃料電池として一旦電力を蓄積し、その上で電力として再度取り出す方法に加え、水素を燃焼し、水素ガスタービンを回すことにより再度電力を得る方法がある。また、水素を燃焼することにより特に「電力化」が困難な利用分野における熱あるいは動力として利用することも期待されている。具体的には、燃焼することにより高熱源として利用するほかに、同じく水素ガスタービンを回すことにより動力を得て、航空機や船舶などの交通機関などに利用するための研究開発が進められている。また、水素をそのまま貯蔵・輸送・利用する以外にも、窒素を加えて、より扱いやすい燃料アンモニアに転換することにより、その後他の燃料と併せて混焼する技術開発も進められている。さらには、水素を二酸化炭素と反応させることにより、合成メタンを生成し、天然ガスと同様に貯蔵・輸送を行い、熱あるいは動力等として利用する技術も開発が進められている。

¹²¹ 内閣官房「再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議」

https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/index.html

なお、現在の経済産業省の水素戦略については、「水素・燃料電池戦略協議会」の資料を参照。

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/index.html

¹²² 再生可能エネルギー由来電力を利用した水電解技術で製造される水素を「グリーン水素」、また、化石燃料（メタン）の水蒸気改質プロセスにCCUS（CO₂回収・利用・貯留）を組み合わせることでCO₂を排出しない水素を「ブルー水素」と呼ぶ。また、化石燃料（メタン等）の水蒸気改質プロセスにより生成するものの、CO₂を回収しないものを「グレー水素」と呼ぶ。そのほか、原子力発電による電力を用いて製造される水素を「イエロー水素」と呼ぶ。

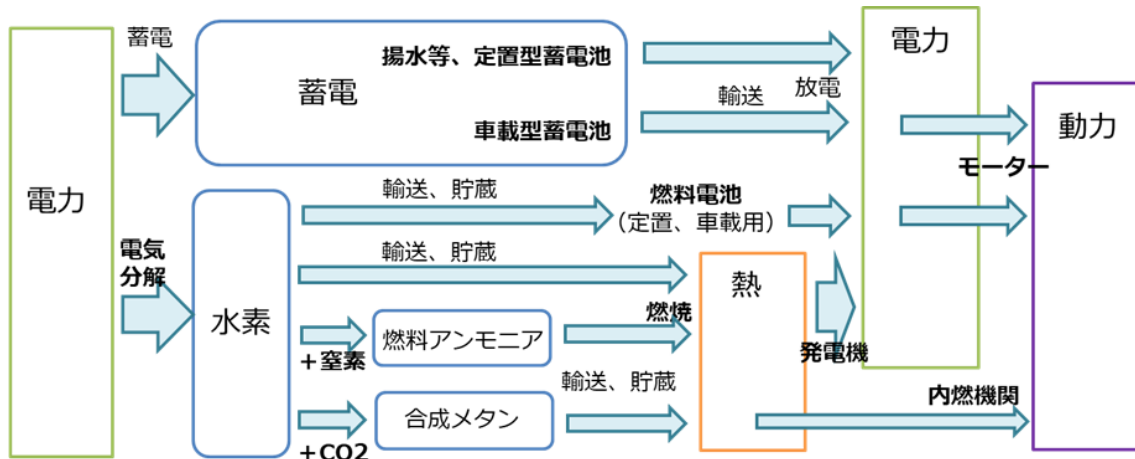
<https://seikeidenron.jp/articles/19641>

<https://sustainablejapan.jp/2021/02/10/%E3%82%B0%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%B3%E6%B0%B4%E7%B4%A0%E3%83%BB%E3%83%96%E3%83%AB%E3%83%BC%E6%B0%B4%E7%B4%A0/58912>

なお、なお、天然ガスなどを分解することにより、水素と固体炭素を取り出すという技術も開発されつつある（「ターコイズ水素」）

<https://www.jetro.go.jp/biznews/2020/12/06d3c0f59b5aa05e.html>

図35：蓄電と水素化によるエネルギーシステムの構築¹²³



<供給安定性なエネルギーシステムの全体での効率性の検討>

このような供給安定性の確保された電力システムの構築にあたっては、これらの蓄電・水素関連設備や火力発電+CO₂回収設備のイノベーション・導入普及を、再生可能エネルギーの導入普及に係る取組とセットで推進することが必要になる。

また、これらの技術・施設に係る今後の導入普及は、それぞれに係るエネルギー転換・輸送・保存に係るコストはもちろんのこと、そのエネルギーとしての利用可能な範囲、取扱の容易性などに依存するものであり、このような技術スペックは、今後のそれぞれのイノベーションの進展に大きく依存する。ただし、それぞれのエネルギー変換等の工程においては、物理化学的法則・理論の観点から、必然的に最低限のエネルギー損失限界は想定し得るものであり、特に、電力で生成した水素燃料を再度燃焼により発電するというプロセスは、エントロピー的な視点からみて無駄が生じることは理論計算上明らかである。

したがって、今後、各種触媒の開発を含めイノベーションによるコスト削減に向けた取組は必要であるものの、その前提として、物理化学的エネルギー的な観点からの理論値・限界値を押えた上で、開発を進めることが必要になる。具体的には、例えば、以下のようなプロセスについて、それぞれの理論値・限界値の比較を踏まえつつ、それぞれのメリットを生かした開発戦略を立てることが重要になる。

- 再生可能エネルギー等によって発電された電力に関し、蓄電池に充電し放電する場合と、当該電力を使って水素を生成、運搬し、燃料電池を利用して発電した場合の比較
- 再生可能エネルギー等によって発電された電力と、その電力を使って水素を生成、運搬し、燃焼することによって得られる電力との比較。あるいは、当該水素を利用してアンモニアを生成、運搬し、燃焼することによって得られる電力との比較¹²⁴。

¹²³ 出典：筆者作成

¹²⁴ なお、水素とアンモニアのコスト見込み比較については、以下の資料（p 8）などを参照。

経産省「燃料アンモニア導入官民協議会中間取りまとめ」2021年2月

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/nenryo_anmonia/20200208_report.html

経産省燃料アンモニア導入官民協議会

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/nenryo_anmonia/index.html

また、化石燃料等の燃焼によって電力を発電する一方で、発生した CO2 を回収、リサイクル・処分する場合との比較

- 再生可能エネルギー等を利用して電力を発電し、当該電力を用いて水素を生成、合成メタンを生成、運搬し、燃焼する場合¹²⁵と、天然ガスを運搬し燃焼する一方、発生した CO2 を回収、リサイクル・処分する場合との比較

③デジタル技術による分散型電力調整システムの整備

現在の電力ネットワーク（電力網）では、各電力会社の中央給電司令所において、電力網（ネットワーク）に係る需要状況をリアルタイムで把握し、その予測に基づき火力発電所での発電を指示することにより、ネットワーク内の電力の需給を調整する仕組みとなっている。

今後、不安定で調整能力を有さない多数の再生可能エネルギー発電設備がネットワークに接続され、また、これまで調整の役割を担っていた火力発電の割合が減少するとすると、明らかに対応が困難になることが見込まれる。また、さらに、上述の電力の供給安定化のための蓄電・水素関連設備を導入した場合、これらの多数の施設を全体として調整する全く新たな需給調整システムが必要となる。

このような新たな電力需給システムについては、以前「スマートグリッド」として話題になったが、現在まで必ずしも検討が十分に進んでおらず、また、カーボンニュートラルに対応する新たな電力網システムの在り方は、まだ検討の緒に就いたところであるのが現状である。具体的には、経産省は、2018年から、「次世代技術を活用した新たな電力プラットフォームの在り方研究会」¹²⁶を開催し検討を進めるとともに、グリーン成長戦略の一つとして、「次世代電力マネジメント産業」を指定し、また、電力の安定供給のための調整力の整備やシステムの強化の必要性を記載し¹²⁷、そのデジタルによる制御・調整の必要性は記載している¹²⁸。しかしながら、このような数多くの再生可能エネルギー発電設備と蓄電・水素関連設

¹²⁵ メタネーション推進官民協議会

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/index.html

¹²⁶ 次世代技術を活用した新たな電力プラットフォームの在り方研究会

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/denryoku_platform/index.html

¹²⁷ グリーン成長戦略における具体的な記載は以下の通り。

「この安定供給のメリットを、電化社会で十全に発揮するには、分散するエネルギーリソースの価値を集約し、デジタル制御と市場取引等で活用するビジネスの推進や、それを可能にするグリッドの構築につながる次世代電力マネジメント産業の育成が必要となる。」

「これに加えて、電力のレジリエンス・防災機能を強化していくことがその前提となる。例えば、電気自動車の導入や冷暖房機器の電化が進む中においても、豪雪・津波・地震など有事の際に電力の安定供給が可能となるよう、調整力の整備やシステムの強化に取り組むとともに、一時的に供給が途切れた場合でも自給自足が可能となるような仕組みについても、技術・コスト面の状況を勘案しながら活用を促していくことが求められる。」

¹²⁸ グリーン成長戦略における記載は、以下の通り。

「また、2050年カーボンニュートラルを目指す上では、こうしたエネルギーの需給構造の実現だけでなく、電力ネットワークのデジタル制御も課題となる。グリーン成長戦略を支えるのは、強靱なデジタルインフラであり、グリーンとデジタルは、車の両輪である。」

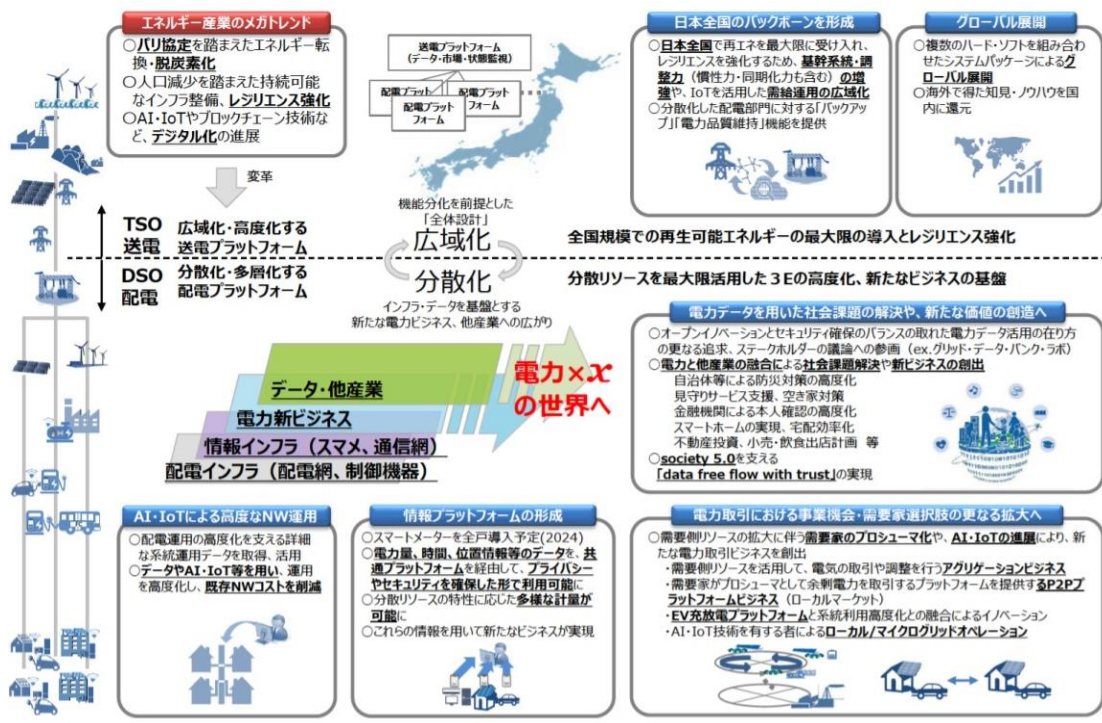
「したがって、デジタルインフラの強化が必要であり、半導体・情報通信産業を成長分野として育成していく必要がある。例えば、電力部門では、系統運用の高度化を図るスマートグリッドや、天候に

備と接続されるネットワークにおいて需給を制御するためには、デジタル技術による分散型調整システムの組み込みが不可欠になると考えられるものの、グリーン成長戦略においても、また、上記研究会の報告書の将来像を見ても、まだ具体策が決まっていなように見える（図3 6 参照）。

このデジタル技術による新たな電力の分散型調整システムの在り方については、今後早急な検討が必要と考えられるが、その際、例えば、以下のような視点で検討を進めることが考えられる。

- 現在の中央集権的な電力プラットフォームについては、最終消費者までつながっているためそのまま生かすとし、その上で、多数の分散型調整システムを追加する形式を想定する。
- 当該多数の分散型調整システムは、そのシステム内で一定の自律性を有し電力を安定化する機能を有すること想定。具体的には、複数の再生可能エネルギー発電と蓄電システムをアグリゲートした上で調整し、必要な電力量を供給できる仕組みを有する。
- 中央集権的システムと分散型調整システムの接続（インターフェース）においては、インターネット同様、いくつかの分散型システムに障害が起きても、全体で対応できるようにするとともに、必要に応じていつでも追加できるようなスケラビリティを確保する。

図 3 6：次世代技術を活用した新たな電力プラットフォームの将来像¹²⁹



より出力が変動する太陽光・風力の需給調整、インフラの保守・点検作業等は、デジタル技術で対応していく必要がある。」

¹²⁹ 経産省 第 8 回 次世代技術を活用した新たな電力プラットフォームの在り方研究会「資料 7 事務局提出資料」2019 年 7 月 16 日

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/denryoku_platform/008.html

5. カーボンニュートラル実現に向けたグリーンイノベーション政策

前章で記載したとおり、カーボンニュートラルを実現するには、再生可能エネルギーだけでなく、新たなエネルギーシステムを構築すべく、数多くの、かつ、それぞれ連携されたイノベーション（普及に向けた投資によるコストダウンも含む）を必要とする。これらを踏まえ、本章では、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推進政策のあり方について、論点を提示する。

まず、第一節において、カーボンニュートラルの実現に向けたイノベーションへの期待の内容と、特にカーボンニュートラル問題におけるイノベーション政策を巡る特徴として、環境規制としての正当性と、長期的な社会的目標の共有という点があることを指摘する。その上で、第二節において、カーボンニュートラル実現に向けたイノベーション政策の在り方について、排出・経済規制の在り方、環境規制とイノベーションに係る理論、社会的共有目標の観点から分析、バランスの取れたイノベーション政策の構築の必要性を指摘する。

また、第三節においては、第二章の議論を踏まえ、カーボンニュートラルの実現のためのイノベーションのみでは、必ずしも経済全体へのイノベーションの波及効果は見込まれないことを指摘しつつ、これらのイノベーションを成長戦略として経済成長につなげるための視点を論点として提示する。

(1) グリーンイノベーションに対する期待とその政策

<カーボンニュートラル実現に向けたイノベーションに対する期待>

現在、カーボンニュートラルの実現に向け、世界各国が、イノベーションによるその実現に期待し、また、そのために非常に多額の投資を行い競争している。

ここで、イノベーションの対象は、再生可能エネルギーや各種のエネルギー転換設備の実用化だけではなく、それらのエネルギーの保存、運搬から利用までも含めたエネルギーシステム全体の構築までも含まれるものである。また、それぞれが単に技術的に実用化されるだけではなく、既存エネルギーと比較して遜色のないレベルまでコスト面で競争的になる必要があり、さらには積極的な投資と継続的改善を通じて 2050 年までの世界全体での普及までを目指すものである。このようなカーボンニュートラルの実現のためには、第2章で見たとおり、過去に前例の見ない速度・規模でイノベーションとその普及が進む必要があり、非常に多くの困難があることが想定される。

そもそも、カーボンニュートラルの実現には、まずは、イノベーションの推進を通じて、その新たなエネルギーシステムに係る技術的な実現可能性が確保されることを前提として、

- 既存の化石燃料を中心とするエネルギーシステムと比較して、エネルギー価格が高くなり経済全体に影響を与えることになったとしても、社会全体としてそれを受け入れ負担するとの判断をするか、あるいは、
- 既存の化石燃料を中心とするエネルギーシステムでのエネルギー価格と同等までさらに引き下がることを期待するか

の判断がいずれなされることになると考えられる。その際、当然、政府としては、現時点におけるそのイノベーションに係る目標としては、必須条件かどうか、あるいは、実現可能かどうかはともかくとして、その後者の「そのイノベーションによって、投資額の回収も含めて、新たなエネルギーシステムとして、既存の化石燃料中心のエネルギーシステムによるエネルギー供給よりも、同等あるいはより安価な価格での供給がなされること」を期待することになる。具体的には、再生可能エネルギーの発電コストに加えて、蓄電システムなどの電力安定化システムに係るコストも含めて、化石燃料による発電コストを下回ることが期待される。

<カーボンニュートラルに向けたイノベーションのメカニズムとその政策>

一般的に、イノベーションは、社会のニーズに対応すべく、主として市場メカニズムを通じて¹³⁰、各企業が互いに競争をしつつ、また、必要に応じ連携することによって、その時点で利用可能な技術やシステムの新たな組合せ（新結合）を生み出し、それを実現することによって生じる。過去におけるエネルギー技術に係るイノベーションとそれによるエネルギーシステムの転換、すなわち、これまでの薪から石炭、石炭から石油、天然ガスへの転換も、原則としてこのようなメカニズムによって実現されてきたと考えられる。もちろん、これらも詳細に見れば、これまでにおいても、環境・安全規制などの国の政策がイノベーションに与える大きな要因となっている。

また、イノベーションにおいては、多くの場合、性能・機能面あるいは価格面で既存システムと比較してメリット（既存システムでは機能を提供できない新たなメリットも含む）を打ち出すことが可能な分野を特定し、当該特定分野からまずは実用化・普及を図り、その後更なる継続的イノベーションの進展による機能の拡大やコストの削減等を通じて、より幅広い分野での実用化・普及へと拡大するというプロセスを経ることになる。このようなプロセスの結果として、旧システムから新システムへの転換が生じることになる。

このような中、カーボンニュートラルの実現に向けたシステムの転換を進めるべく、国・政府としては、どのようなイノベーション政策・産業政策を取るべきか、また、どのようにすればこのような前例のないような速度のイノベーションを推進できるかということが課題になる。実際に、世界各国において、積極的なグリーンイノベーション促進策が行われており、日本においても、前章で説明したとおり、グリーン成長戦略として、研究開発支援ほか多様な政策メニューを打ち出している。

その際、そもそもイノベーションは、創造的破壊であるがゆえに、当該イノベーションにより破壊され、衰退する既存産業が存在する。カーボンニュートラルの場合、化石燃料関連の産業やその利用産業（自動車産業を含む）がそれに相当する。これらの既存産業を有する国においては、このような産業の衰退は国民経済にも大きな影響を与えかねないとの認識のもと、上述のグリーンイノベーション政策と併せて、産業構造調整政策が積極的に進められることになる。例えば、自動車産業では、ガソリン車から電動車への構造転換・調整が、積極的な産業政策として進められることになる。

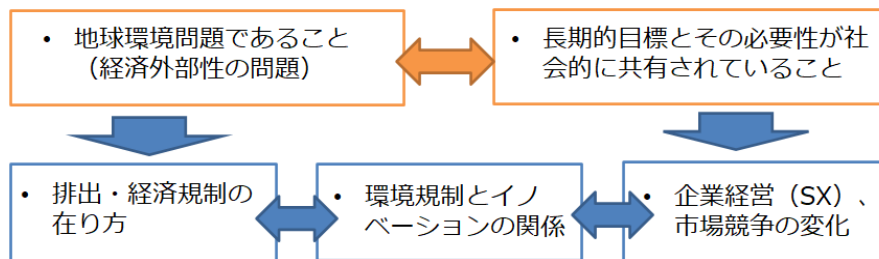
このようなイノベーション政策・産業構造調整政策を推進するにあたって、特にカーボンニュートラル問題における特徴としては、以下の2点が挙げられる。

¹³⁰ 例えば、ウィリアム・J・ボーダル「自由市場とイノベーション - 資本主義の成長の奇跡」勁草書房、2010年12月25日

- ①地球環境問題であること。すなわち、経済学の観点からは、共有地の悲劇と称されるような、外部不経済による「市場の失敗」が生じる問題であり、国の関与の必要性が正当化される。具体的には、CO2の大気中への排出は、社会全体に損失を与えるが、それは、市場メカニズムの前提となる「所有権（あるいは排出権）」が設定されておらず、個々の企業の損失としてカウントされないがゆえに、個々の企業は適切な行動がなされないという経済学的視点である。
- ②イノベーションの目標が世界で共有されていること。すなわち、通常イノベーションの場合は、企業家が社会ニーズを独自に見つけ出して、ビジネス展開を行うが、カーボンニュートラル実現に係るイノベーションについては、地域あるいは企業等によって重点に差異はあるとしても、その基本的な方向性は世界中の多くの人によって共有されており、世界中の多くの企業が同じ方向に向けイノベーションに取り組もうとしているという点である。

次節においては、この2点を踏まえたカーボンニュートラル実現に向けたイノベーション政策の特徴について、三つの観点から論じる（図37参照）。

図37：カーボンニュートラルに係るイノベーション政策の特徴



(2) カーボンニュートラル型グリーンイノベーション政策の特徴

<①排出・経済規制のあり方（外部不経済の問題）>

カーボンニュートラルを含む地球温暖化問題は、上述のとおり、経済学的観点からは、典型的な外部不経済の問題であり、それがゆえに、国の関与の正当性が生じる。その具体的な国の関与の方法として、その内部化を図るべく、排出規制（基準など）、排出量の割当と排出権取引制度、炭素税などの制度の創設が考えられる。なお、これらの施策は、一般的に、外部不経済を内部化すべく、排出者に対して経常的な負担を課すものであり、したがって、本来は、イノベーションに係る補助金などは含まれない。ただし、国の関与という意味では、排出抑制施策として正当化されうるものと考えられる。

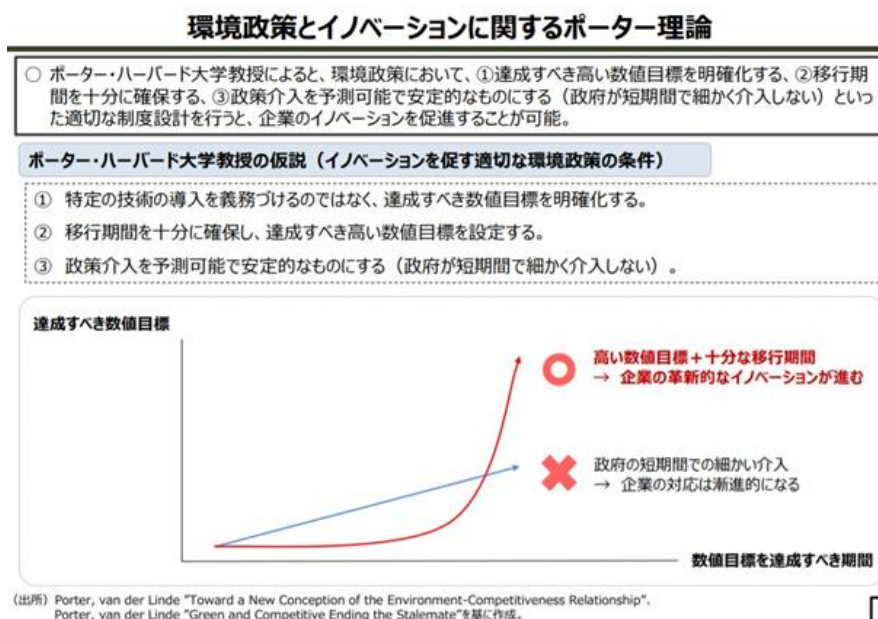
このような外部不経済の解消に向けた施策は、一般的に、既存産業（排出型産業）と新規産業（非排出型産業）におけるオペレーショナルな競争条件を調整するという重要であるし、地球温暖化問題への対応という観点からは正当化されるものと考えられる。しかしながら、それらの施策によって、必ずしも直ちに新規産業のイノベーションが生じ、実用化・価格低下とその普及が進展する訳ではないこと、また、実際面としては既存産業への影響が大きいことはもちろん、既存システムに依存している現在の経済社会全体への影響も非常に大きいということに留意する必要がある。このため、それらの施策の導入シナリオは、メリット・デメリットのバランスを踏まえ、時機を見計った上での取組が求められることになる。

なお、日本のグリーン成長戦略では、クレジット取引や炭素税などについても記述がなされているが、いずれも、慎重な書きぶりとなっている¹³¹。その上で、経産省は、2021年2月から経済的手法等のあり方に係る研究会を開催し、同年8月に中間整理をまとめている¹³²。

<②環境規制とイノベーションに係る理論（ポーターの議論）>

カーボンニュートラルの実現に向けて、排出・経済規制などの環境規制は正当化されるとして、日本政府は、環境政策がイノベーションに与える影響として、M.ポーターの議論を引用している。具体的には、内閣官房（成長戦略会議）や経産省の資料においては、図38のような資料が用いられ、①特定の技術の導入を義務付けるのではなく、達成すべき数値目標を設定する。②移行期間を十分確保し、達成すべき目標を設定する。③政策介入を予測可能で安定的なものとする。という3点を条件として挙げている。

図38：環境政策とイノベーションに関するポーター理論（内閣官房資料）¹³³



¹³¹ 具体的には、以下のような記載となっている。

「政府が上限を決める排出量取引は、制度設計次第ではCO2排出総量削減が進むなどの利点がある一方で、経済成長を踏まえた排出量の割当て方法の在り方などの課題が存在していることを踏まえつつ、引き続き、専門的・技術的に議論を進める。」

「炭素税は、価格が一律に定まるため、事業活動への影響等について予見可能性が高いといった利点がある一方、企業の現預金を活用した投資を促すという今回の成長戦略の趣旨との関係や、排出抑制効果の不確実性などの課題が存在しており、日本が既に導入済である「地球温暖化対策のための税」や、その他のエネルギー諸税、FIT賦課金等の負担も踏まえつつ、引き続き専門的・技術的に議論を進める。」

¹³² 経済産業省「世界全体でのカーボンニュートラル実現のための経済的手法等のあり方に関する研究会」

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_neutral_jitsugen/index.html

¹³³ 成長戦略会議（第2回）資料2基礎資料「環境政策とイノベーションに関するポーター理論」

（2020年11月6日）

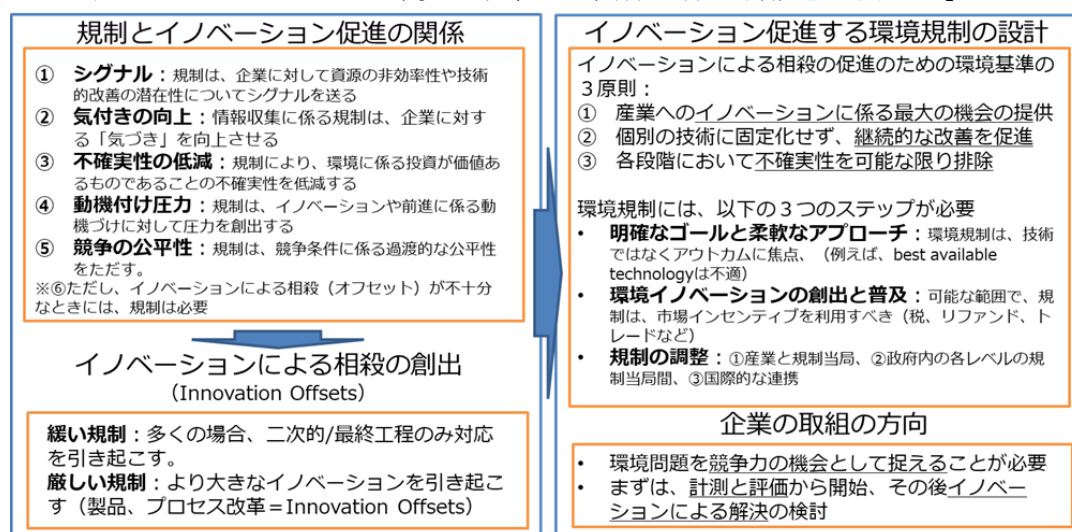
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/seichosenryakukaigi/dai2/index.html>

経済産業省「グリーンイノベーション基金事業の今後の進め方について」2021年2月22日

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/pdf/001_04_00.pdf

なお、ポーターの原論文¹³⁴では、必ずしも上述のような3点柱について明確にまとめている訳ではない。同論文では、（短期的な）緩い規制というよりは（長期的な）厳しい規制がイノベーション相殺（オフセット）を引き起こすとの理解の下で、①産業へのイノベーションに係る最大の機会の提供、②個別技術に固定化せず継続的な改善を促進、③不確実性を可能な限り排除という3原則に基づき、①明確なゴールと柔軟なアプローチ、②環境イノベーションの創出と普及（市場インセンティブの利用）、③規制の調整の3つのステップが必要としている（図39参照）。

図39：Mポーター「環境と競争力の関係に係る新概念に向けて」¹³⁵



このようなポーターの議論をカーボンニュートラルに係る問題にあてはめた場合、そもそもカーボンニュートラルは明確で長期的な目標があるという意味で、同理論の「明確な（高い）ゴールと柔軟アプローチ」によく適合しており、したがって、イノベーション促進的な環境規制となりうると解釈すること可能である。ただし、これを現状の日本政策の取組とあてはめてみると、以下のような論点について、今後のいずれかのタイミングで検討する必要が出てくると考えられる。

- 1) カーボンニュートラルに係る長期的な国としての目標（すなわち、2050年までのカーボンニュートラルの実現）は広く社会に共有されているものの、その将来における具体的な規制の方向（例えば、化石燃料利用に係る規制など）は、まだ必ずしも明示されていないこと。

¹³⁴Michael E. Porter and Claas van der Linde, “Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship”, Journal of Economic Perspectives — Volume 9, Number 4 — Fall 1995 — Pages 97–118

<https://pubs.aeaweb.org/doi/pdfplus/10.1257/jep.9.4.97>

Michael E. Porter and Claas van der Linde, “Green and Competitive: Ending the Stalemate”, Harvard Business Review

https://kentlundgren.se/artiklar/vetenskapliga/Porter_Linde_1995.pdf

¹³⁵ 出典：Michael E. Porter and Claas van der Linde, “Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship”, Journal of Economic Perspectives — Volume 9, Number 4 — Fall 1995 — Pages 97–118 より筆者作成

- 2) ポーターの論文では市場インセンティブの活用を推奨しているが、日本政府は、そのための措置（例えば、排出権取引や炭素税など）は、まだ示されていないこと。
- 3) イノベーション促進策として、現時点では、技術を特定した研究開発支援策が進められていることを踏まえると、今後、状況の変化に応じたその柔軟な見直しが必要になること。

<③：社会的共有目標（SX とイノベーション競争）>

また、カーボンニュートラルに係る問題におけるもう一つの特徴としては、上述のとおり、社会としてその達成目標が広く共有されていることが挙げられる。このことは、上記のポーターの理論に基づく政府の環境規制のあり方にも影響するとともに、社会の関心の高まりを踏まえた企業の自主的な経営上の取組にも影響を与えていると評価される。

特に、企業経営の観点からは、カーボンニュートラルへの関心の高まりを踏まえて、近年、サステナビリティ経営（サステナビリティ・トランスフォーメーション：SX）¹³⁶への関心が高まっている。このサステナビリティ経営は、坂野・磯貝（2021）によると、「長期で利益を出し続けるために、リソース配分を行うこと」¹³⁷としている。具体的には、企業は、これまで、環境・社会価値に対して「貢献する」というスタンスに基づき CSR などの取組を行ってきたのに対し、今後、企業は、気候変動問題は「長期的」に自らの経済価値を損ない得るとの認識のもとで、企業経営の外部経済の内部化を自ら主体的に進めるべく、自らの経営課題として気候変動問題に積極的に対応するという経営スタンスをとることが SX であると整理される。また、そのため、自ら率先して、その解決のためのイノベーションと事業構造の改革に取り組むことこそが SX であると位置づけられる。なお、この SX は、企業の進むべき「方向」として取組であり、企業が取り組むにあたっての「手段」としての DX（デジタルトランスフォーメーション）との連携の必要性も指摘される。

このようなサステナビリティ経営（SX）への関心が高まっている背景としては、単に社会的に気候変動問題に対する関心が高まっているということだけではなく、国際環境 NGO や金融機関が積極的に取り組み、事業会社等に対して積極的に働きかけを行っていることが背景にある。また、それだけではなく、（上記ポーターの議論とも関連して）いつ政府による環境規制がなされても仕方ないという状況下における、企業経営としてのリスク回避行動であるとも解釈することができる¹³⁸。特に、化石燃料関係の産業など既存エネルギーシステムに関わる深く産業にとっては、カーボンニュートラルの実現は否応なく自らのビジネスの喪失を意味するものであり、カーボンニュートラルの必要性を受け入れる限り、事業転換

¹³⁶ 例えば、坂野 俊哉, 磯貝 友紀 (PwC ジャパン) 『SX の時代 ～究極の生き残り戦略としてのサステナビリティ経営』日経 BP (2021/4/8) など。

なお、カーボンニュートラルに限った話ではないが、経産省は「サステナブルな企業価値創造に向けた対話の実質化検討会」を 2019 年 11 月から開催し、2020 年 8 月に中間とりまとめを発表している。

経産省「サステナブルな企業価値創造に向けた対話の実質化検討会中間取りまとめ～サステナビリティ・トランスフォーメーション（SX）の実現に向けて～」

https://www.meti.go.jp/shingikai/economy/sustainable_kigyo/index.html

その他にも、グリーントランスフォーメーション（GX）戦略（経団連、デロイトトーマツなど）、気候変動経営（EY ストラテジーアンドコンサルティングなど）などとも呼ばれる。

¹³⁷ 具体的には、①その企業が市場から長期にわたって求められる続けること、②供給を長期的に維持すること、③社会からも信頼し続けること、としている。

¹³⁸ 坂野・磯貝（2021）位置 No3013

とそのためのイノベーションに係る取組は、経営上の喫緊の課題であると理解することも可能である。

また、このカーボンニュートラルに係る目標が世界的に共有されているという事実は、市場競争としてのイノベーション環境にも大きな影響を与えられと考えられる。すなわち、カーボンニュートラル実現に向けて、世界各国の多数の企業が、ビジネス機会として概ね同じ方向のイノベーションに競争して取り組んでおり、このため、カーボンニュートラル市場は「レッドオーシャン」であると位置づけられる可能性もある。一方、そのイノベーション推進にあたっては、その目標が社会的に共有されていることから、企業間連携も比較的進みやすいという事情も生じると考えられる。

（3）経済成長に向けたグリーンイノベーション政策の在り方

＜カーボンニュートラル型エネルギーシステムへの転換に係る経済波及効果＞

今後、多くのイノベーションによってカーボンニュートラル型のエネルギーシステムが構築された場合、この新たなエネルギーシステムは、旧エネルギーシステムと比較して、地球環境に優しい（外部不経済の少ない）という観点から、世界にとって望ましいものとなる。

その上で、その構築にあたってなされる多くの投資（イノベーション投資を含む）には、短期的な GDP 牽引効果があることに加え、これらの投資によって構築される新たなエネルギーシステムにより、2050年には非常に大きな市場規模を有する新産業構造を形成されるなどの大きな経済効果が指摘される。

しかしながら、このように形成される新たなエネルギーシステムに係る産業構造は、原則として、既存のエネルギーシステム（化石燃料中心のエネルギー供給・利用システム）の産業構造の代替としての位置付けられるものである。したがって、仮に、新たなエネルギーシステムが旧システムと比較して全く同じ機能・価格のエネルギーの供給・販売・利用を提供するだけであれば、経済全体としては、そのシステムの交替（転換）によって新たな付加価値を持つものとはならず、GDP 全体としての成長をもたらすことはない整理される。新たなエネルギーシステムへの投資も、原則としては、旧システムの更新投資の代替にしか過ぎないと整理される。

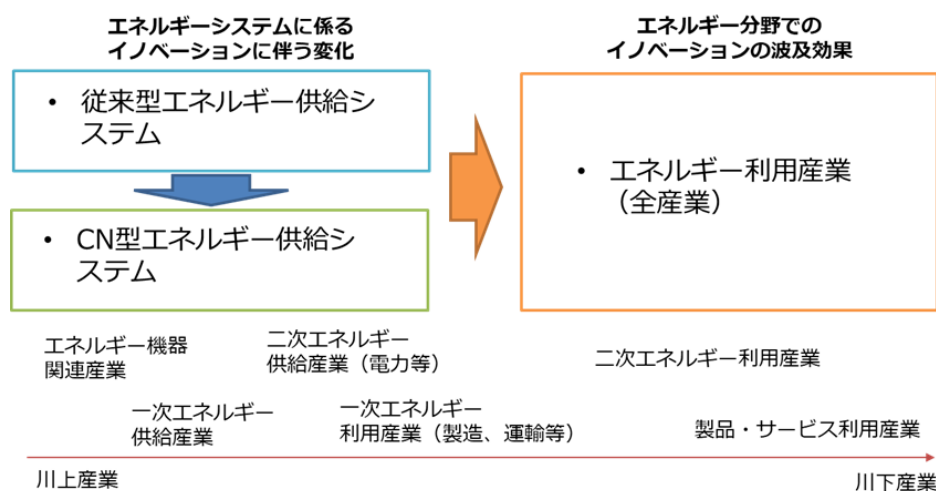
例えば、化石燃料で発電した電力システムから、再生可能エネルギーで発電した電力システム（安定化に係るシステムを含む）に転換した場合、発電され供給される商品として電力が、同じ価格で同じ機能（安定性など）の電力として供給される限り、広い意味での電力供給システム内のプロセスの転換（プロセスイノベーション）の一環にしか過ぎない。したがって、そのような転換自体では、原則として、社会全体として産業総体の拡大をもらすものではなく、また、下流工程における新たなイノベーションを引き起こすものではない。また、例えば、製鉄工程において、従来のコークス（石炭）を利用していた方法から、水素を利用した還元方法に変更した場合においても、従来とは異なる機能又は価格の鉄鋼製品を生み出さなければ、原則として、当該鉄鋼関連産業の拡大や下流工程でのイノベーションをもたらすものとはならない。また、自動車に関して、従来のガソリン車から電動車に転換した場合においても、原則としては、自動車としての機能の向上あるいは価格の低下をもたらさなければ、自動車産業が拡大することはない。ただし、もちろん、いずれの場合も、「環境にや

さしい」という機能が、市場で評価されることはあるし、いずれにせよ、地球環境の観点からは望ましい転換であるとは言える。

一般的に、イノベーションを通じた旧産業システムから新産業システムへの転換（交替）は、新たな産業システムで提供される商品・サービスが、従来の産業システムで提供される商品・サービスと比較して、機能面あるいは価格面で優位性を示すことによって生じる。また、そのような優位性を示すことによって、その川下産業における新たなイノベーション（イノベーションの波及）を引き起こすものであり、特にエネルギー・交通分野においては、第二章で述べたとおり、その汎用性がゆえに、そのイノベーションの波及の範囲が非常に広く、経済全体の成長に大きく寄与しうるものとなる。したがって、逆に言えば、カーボンニュートラル型のエネルギーシステムが、化石燃料型のエネルギーシステムと比較して、優位なエネルギーを供給できなければ、経済成長への波及効果も限定的であると言える。

なお、環境・経済規制の導入により、既存エネルギーシステムによるエネルギー供給を制限し相対的に高価格なものとするることにより、新たなカーボンニュートラル型エネルギーシステムによるエネルギー供給の価格が比較的高くても、その普及を進むように取り組むという政策的な選択も考えられる。その場合、もちろん地球環境全体にとっては望ましいという判断はあるものの、経済のみ観点からすれば、短期的には、川下産業（エネルギー・交通利用産業）の経済活動を萎縮させ、経済全体には大きなダメージを与える可能性が高い。ただし、長期的には、第2章での得たとおり、経済成長とエネルギー消費のデカップリングが進展する中、省エネルギーに係るイノベーションや投資が進み、そのダメージとしての影響は軽減される可能性もある。

図40：カーボンニュートラルに係るイノベーションの経済成長への影響¹³⁹



＜グリーンイノベーションの経済成長への波及効果とデジタルとの連携＞

日本のグリーン成長戦略において、「この戦略により、2030年で約140兆円、2050年に約290兆円の経済効果（注）が見込まれる」とし、その経済効果の注釈として、「経済効果は、企業からのヒアリング等を通じて得られた今後の市場規模予測や輸出拡大等を積み上げて試算した。将来の市場にどのような成長の可能性があるかを試算したものであり、関

¹³⁹ 出典：筆者作成

連産業への波及効果や、新製品・サービスの創出によって生じ得るマイナス影響は考慮していない。」としている。

この成長戦略における計算の積み上げの内容は不明であるが、おそらく、新たなエネルギーシステムにおける各セクターの市場規模の予測を積み上げたものではないかと考えられる。しかしながら、この新たなエネルギーシステムの市場規模は、上述のとおり、当該システムが旧エネルギーシステムと比較して同様の機能・価格でのエネルギー量（商品・サービス）を提供する範囲において、既存のエネルギーシステムと同じ市場規模であることを意味する。したがって、言い換えれば、グリーンイノベーションという創造的破壊によって、新たに290兆円規模の新市場が創出される一方、290兆円規模の化石燃料を中心とする旧産業の市場が失われ、結果290兆円規模の産業構造の転換であると捉えることが適切である可能性が高い。すなわち、成長戦略としてグリーンイノベーションを推進し、カーボンニュートラル型の新たなエネルギーシステムに係る関連市場が多く成長したとしても、それらが単に既存の化石燃料システムの代替である限りにおいては、経済全体の長期的な成長には必ずしもつながらないことに留意することが必要である。（ただし、もちろん、地球環境問題の解決には、大きく寄与することには言うまでもない。）

それでは、このような、グリーンイノベーションを通じたカーボンニュートラル型の新たなエネルギーシステムの構築という取組を、経済全体の成長につなげるにはどうすればよいのであろうか。例えば、以下のような経済成長への波及効果が考えられる。

- ①もちろん、まずは、新たなエネルギーシステムにおいて、従来とは異なる機能・価格のエネルギーを供給できるようになることが本筋である。第二章で記載した通り、過去においては、薪から石炭、石炭から石油、天然ガスへの転換や電力システムの登場によって、エネルギー利用者は、新たな付加価値を有するエネルギーを獲得することが可能となり、それによって川下産業における多様なイノベーションが波及的に生じてきてきた。再生可能エネルギーが中心となる新たなエネルギーシステムにおいても、例えば、イノベーションにより圧倒的な価格低下を実現することによって、川下産業において、新たなエネルギー需要を刺激、拡大し、また、イノベーションの波及を促進する可能性もありうる。
- ②また、直接的なエネルギー供給システムとしてのイノベーションの波及効果は少ないとしても、グリーンイノベーションによって新たに創出された技術が、幅広い波及効果をもたらす可能性もある。例えば、蓄電技術や水素関連技術が抜本的に進展することにより、IoT機器など幅広い分野におけるデジタル機器などにおける利用可能となり、それによってイノベーションの波及効果を引き起こす可能性は十分にありうる。
- ③さらに、もう一つは、省エネによるイノベーション効果である。本ワーキングペーパーでは、省エネ技術のイノベーションについてはあまり議論してこなかったが、経済成長とエネルギー消費のデカップリングが進展する中、省エネ技術、特にデジタル技術を活用した社会システム全体の省エネ化の推進は、幅広い川下産業におけるイノベーションの推進と経済成長に大きく寄与する。日本の成長戦略においても、新たな電力調整システムの構築との関係も含めて、デジタルとの連携の必要性を強調している¹⁴⁰。

¹⁴⁰ 具体的な記載は、以下の通り。

今後、グリーンイノベーションを通じて、カーボンニュートラル型のエネルギーシステムを構築していくためには、上述のような経済全体への波及効果も見据えた上で取り組んでいくことが望まれる。

「また、2050年カーボンニュートラルを目指す上では、こうしたエネルギーの需給構造の実現だけでなく、電力ネットワークのデジタル制御も課題となる。グリーン成長戦略を支えるのは、強靱なデジタルインフラであり、グリーンとデジタルは、車の両輪である。したがって、デジタルインフラの強化が必要であり、半導体・情報通信産業を成長分野として育成していく必要がある。例えば、電力部門では、系統運用の高度化を図るスマートグリッドや、天候により出力が変動する太陽光・風力の需給調整、インフラの保守・点検作業等は、デジタル技術で対応していく必要がある。また、輸送部門では、クルマ、ドローン、航空機、鉄道が自動運行されることは、国民の利便性を高めるだけでなく、エネルギー需要の効率化にも資する。さらに、工場では、FAやロボット等により、製造は自動化される。業務・家庭部門では、再生可能エネルギーと蓄電池をエネルギーマネジメントシステムで組み合わせて最適制御するスマートハウスや、サービスロボットの登場により、快適な暮らしが実現するだけでなく、エネルギーの有効利用も図られることとなる。」