

甲斐沼美紀子（国立環境研究所・地球環境戦略研究機関）

大城賢（みずほ情報総研株式会社）

日比野剛（みずほ情報総研株式会社）

増井利彦（国立環境研究所）

## 1. 国の概要

### 1.1 大幅削減と持続可能な開発に向けた状況

日本における経済活動は、化石燃料の国内埋蔵量が少なく、輸入に依存していることが特徴である。こうした状況は、日本が経済成長を実現するために国内の石炭や水力から輸入された石油にシフトした 1950 年代以降、エネルギー安全保障は重要問題とみなされてきた。1970 年代の第一次石油ショック以降、日本のエネルギー政策の優先順位は、エネルギー安全保障、環境保全、経済効率性という 3 つの柱のもと、石油への依存度を押さえるために、特に原子力開発、LNG、輸入石炭を中心としたものに移行した。エネルギー安全保障と気候変動問題への焦点は、再生可能エネルギーの開発と原子力発電の優位性を高め、原子力発電は 2011 年 3 月の東京電力福島第一原子力発電所の事故まで最も重要なエネルギー資源であると見なされていた。

エネルギー戦略は、2011 年以降に見直され、革新的エネルギー・環境戦略(2012)やエネルギー基本計画は、原子力発電への依存率を低下させると結論づけた。2012 年の原子力発電所からの発電電力量は 2010 年と比較して大幅に削減し、最終需要部門での大幅な省エネにも関わらず、化石燃料の輸入、特に LNG の輸入が増大した。

原子力発電への依存率を低下させたまま 2050 年までに 1990 年の温室効果ガス排出量に対して 80%削減するという排出目標を達成するためには、エネルギーサービス需要を削減することと省エネ技術の拡大によってエネルギー消費量を削減するとともに、再生可能エネルギーのシェアを拡大することが必要不可欠となる。再生可能エネルギーの分布は一様ではなく、地域間の電力融通が必要となる。再生可能エネルギーの供給能力が高い地域は、関東地方のような電力需要の多い地域ではなく、北海道地方や東北地方といった地方である。しかしながら、現状の電力の地域間連係は十分ではなく、こうした地域間連係の強化は重要な課題となっている。

### 1.2 温室効果ガス排出量：現状の排出量、駆動力、過去のトレンド

土地利用起源を除く 2010 年の温室効果ガス排出量は、二酸化炭素換算で 1256MtCO<sub>2</sub> であり、そのうち二酸化炭素が大部分を占める（1191MtCO<sub>2</sub>、94.8%）（図 1a）。部門別の排出量から、発電部門、産業部門、運輸部門の 3 部門における排出量が多い。発電部門では、大規模な輸入石炭や LNG の燃焼のために CO<sub>2</sub> 排出量が多い（原子力発電のシェアが低下する前の 2010 年の時点でも）。産業部門では、日本経済における主要なプレーヤーでありエネルギー需要も多い。運輸部門では、旅客、貨物ともに自動車輸送が増加している。そのうえ、業務部門や家庭部門におけるシェアは大きくはないが、これらの部門からの排出量は、家電製品等のエネルギー消費機器の普及拡大により、増加傾向にある。1990 年以降、産業部門からの排出量は減少傾向にあり、運輸部門からの排出量も 2000 年以降減少傾向にある。排出量のトレンドは、1990-2007 年は緩やかに増加する傾向にあったが、近年は大幅に変動している（経済危機後の 2008-2010 年に排出量は 8%減少したが、2010-2012 年には福島

第一原子力発電所事故により化石燃料の輸入量が増加し、排出量は7%増加した。

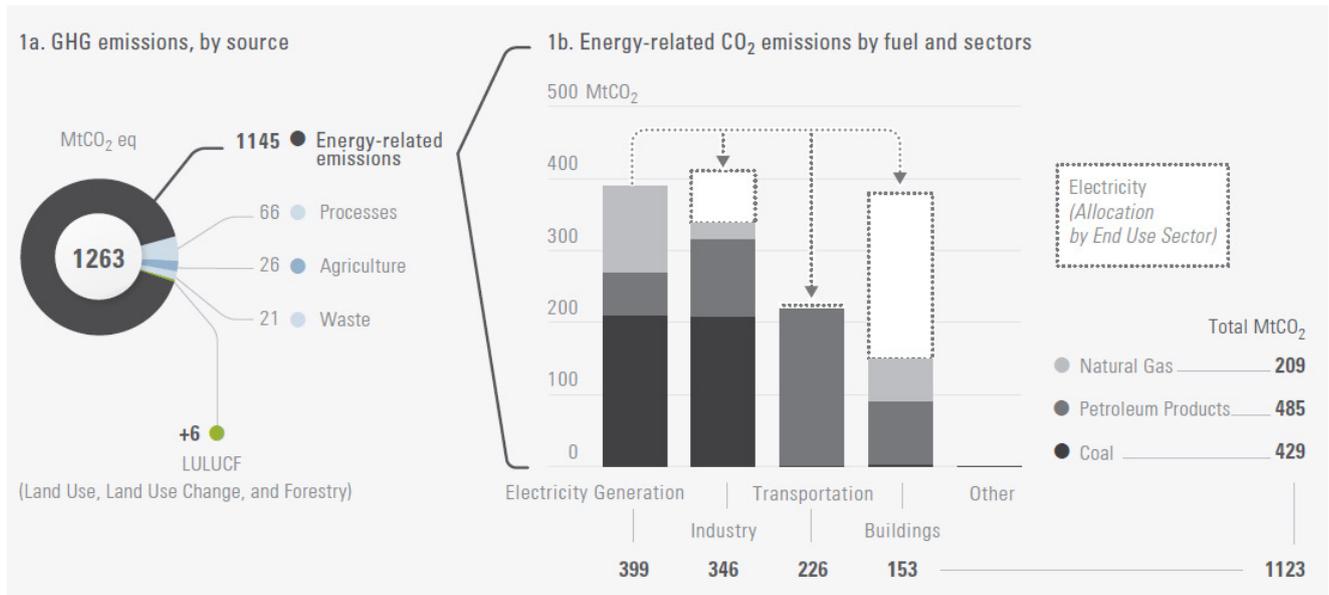


図1 2010年の温室効果ガスおよび二酸化炭素排出量

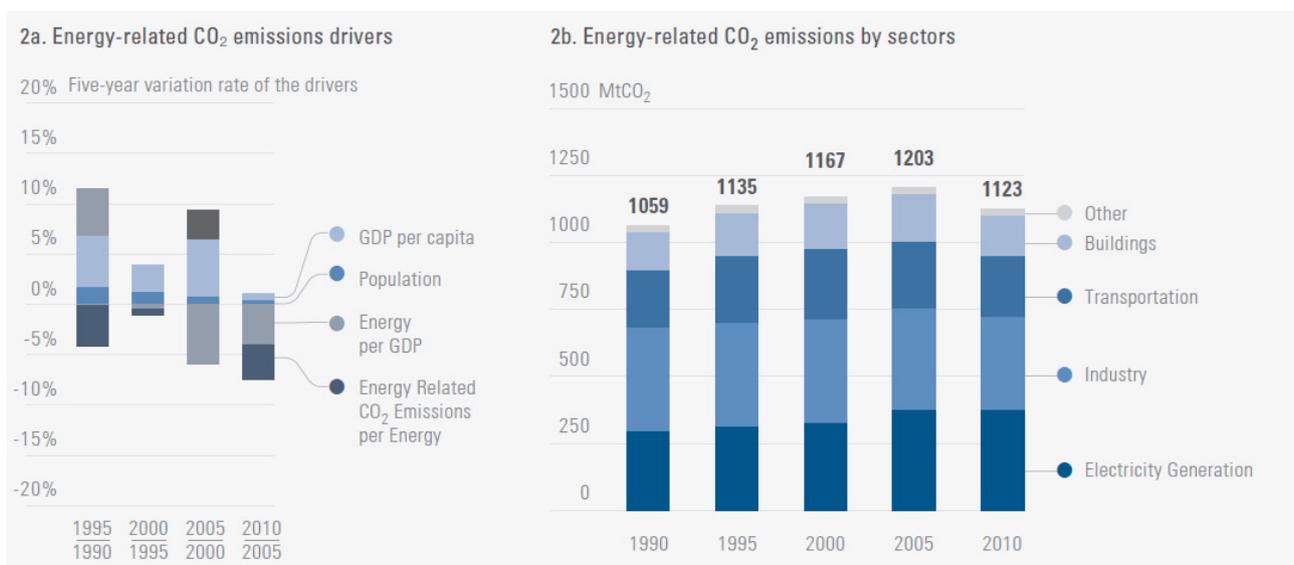


図2 1990年から2010年の二酸化炭素排出量経年変化

2007年は、1990年から2010年の間で、最もGHG排出量が多い年で、京都議定書の基準年(KPBY)と比較して15%増加している。2010年における総GHG排出量(土地利用起源を除く)は、KPBYの排出量と比較して0.4%減少している。2010年以降、温室効果ガス排出量は増加し始め、2012年は二酸化炭素換算で1,343 MtCO<sub>2</sub>となっており、KPBYと比較して6.5%の増加となった。京都議定書第一約束期間の間、温室効果ガス排出量はKPBYと比較して1.4%増加した。一方で、土地利用起源の二酸化炭素吸収量および京都メカニズムクレジットを勘案するならば、第一約束期間の温室効果ガス排出量は1,156 MtCO<sub>2</sub>となり、KPBYよりも8.4%の減少となる。図2は、茅方程式の要因別に1990-2012年の燃料燃焼由来二酸化炭素排出量の経年変化を示したものであり、日本経済において、エネルギー効率を持続的に普及させることで産出エネルギー強度を年率平均0.7%減少させることが可能だということが言える。その他の要因は期間中、明確な効果を上げていない。2007年まで、一人

当たりの GDP 成長率は二酸化炭素排出量増加の主な駆動力となっていたが、世界的な景気後退により 2008 年および 2009 年には相当量の減少となっている。2011 年および 2012 年には、エネルギー効率の改善貢献と炭素強度の増加が均衡しており、その主な要因として、2011 年におこった東日本大震災後による原子力発電所の停止、そしてその結果としての化石燃料使用量の増加が挙げられる。

## 2. 国の大規模な脱炭素化への道

### 2.1 大規模な脱炭素化への道の実例

#### 2.1.1 全体的な評価

少子高齢化の流れで、日本の総人口および労働人口ともに 2010 年から 2050 年にかけて著しく減少することが予想されており、表 1 に示すようにそれぞれ 24%、39%の減少が見込まれる。人口減少にもかかわらず、総 GDP の安定した上昇を確保するために一人当たりの GDP の連続的上昇を計画している（2010 年に約 5.38 兆米ドルから 2050 年に 8.37 兆米ドル）。

日本における大規模な脱炭素化への道は AIM/Enduse モデル<sup>1</sup>を使用して評価を行う。表 1 に、日本における大規模な脱炭素化への道の推計に用いられている主な社会経済指標をまとめている。指標は中央環境審議会の技術 WG による仮定を、人口の推計は国立社会保障・人口問題研究所の推計を用いている。日本の大規模な脱炭素化シナリオの実例において、温室効果ガス排出量削減の長期目標は最終需要部門におけるエネルギー需要の大規模削減、そして、CCS の配備を含む発電部門の脱炭素化を達成することである。

一人当たりの GDP の持続的な成長と並行して、エネルギー効率、炭素強度の両方を改善することが中長期における二酸化炭素排出量の実質的削減のための主要駆動力となる。2050 年の最終エネルギー消費量は実質的に減少し、2010 年レベルで約 50%を占める（図 3 右）。特に、運輸部門では、中長期におけるエネルギー需要削減のペースが最も早く、家庭部門、業務部門、産業部門がそれに続く。公共交通への移行、燃焼効率の改善、輸送サービスの効率向上によって運輸部門における二酸化炭素排出量の削減が促進される。

エネルギー需要の減少および再生可能エネルギーの展開によって、化石燃料への依存が 2010 年比で実質的に減少する。ほぼ完全な原子力の段階的な廃止にもかかわらず、2050 年における化石燃料の消費量は 2010 年比で約 60%に落ちる。それは一次エネルギー供給量の約 35%の減少、2050 年の一次エネルギー総供給量の約 40%（水力含む）をしめる再生可能エネルギーの割合の上昇によるものである（図 3 左）。化石燃料の間で、天然ガスと石油（非エネルギー使用を含む）が 2050 年に存在する一方で、石炭は炭素強度が高いため、段階的にほぼ使用されなくなる。天然ガスは炭素強度が低いため、石油・石炭の代わりに中期に増加する。しかし、エネルギー需要の減少と大規模な再生可能エネルギーの展開に従って 2050 年までに 2010 年と同じレベルまで落ちる。それゆえ、CCS を配備しない天然ガスはつなぎの技術となる。

表 1 主要な社会経済指標

|                                     | 2010  | 2050  | Variation 2010/2050 |
|-------------------------------------|-------|-------|---------------------|
| GDP (trillion JPY <sub>2000</sub> ) | 538   | 837   | +56%                |
| Population (million)                | 128   | 97    | -24%                |
| Active population (Million)         | 82    | 50    | -39%                |
| GDP per capita (US\$/cap)           | 38003 | 82116 | +116%               |

*Source: Central Environmental Council, 2012. Report on measures and policies after 2013.*

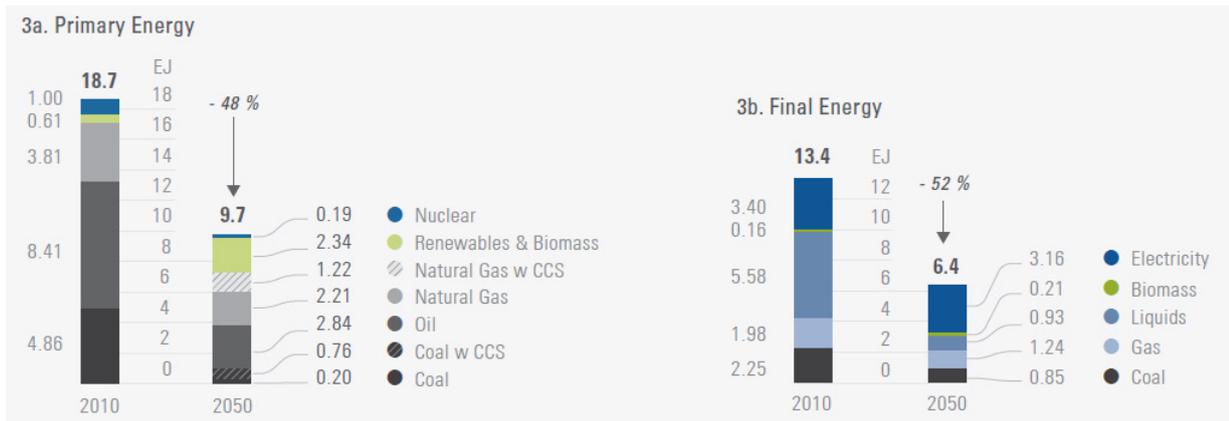


図3 エネルギーの経路（起源別）

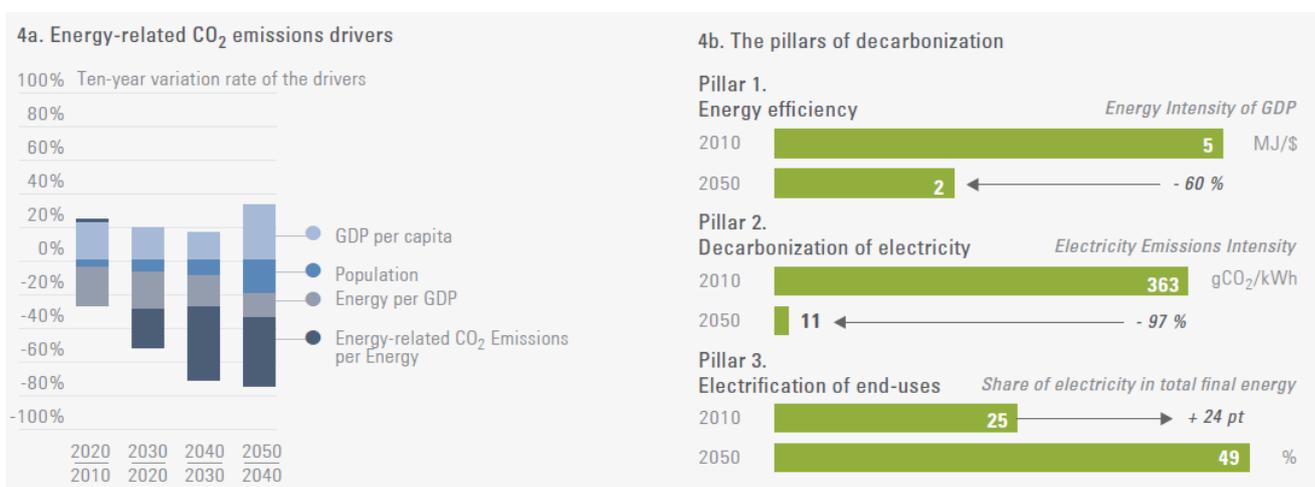


図4 エネルギー関連の二酸化炭素排出量駆動力（2010-2050年）

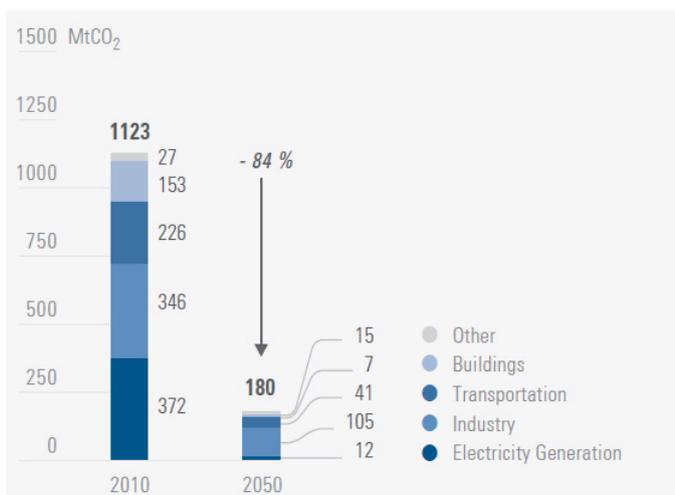


図5 エネルギー関連の二酸化炭素排出量経路（部門別、2010-2050年）

注1 AIM/Enduseモデルは逐次動学のモデルで、中長期緩和政策評価のための技術選択モデルであり、国立環境研究所、京都大学、みずほ情報総研株式会社によって共同開発された。このモデルはす

でに日本の緩和目標の評価に適用されている。大規模な脱炭素化への道に適用されたモデルは、日本の AIM/Enduse モデルの多地域バージョンである。すなわち、このモデルは 10 の地域から構成され、再生可能エネルギーの潜在量やエネルギー需要の特徴といった地域差を考慮に入れたものである。10 の地域は一般電気事業者 10 社の供給エリアと概ね一致する。

## 2.1.2 部門評価

### 発電部門

原子力は徐々に廃止されると仮定される（広範囲にわたる議論は次節を参照）。CCS を配備していない石炭火力発電は 2050 年までに段階的に全廃される。再生可能エネルギーは中・長期的に開発され、大規模な太陽光発電および風力発電の配置によって総発電量の約 59% に達する（図 6）。さらに、天然ガス（CCS 付）は需給調整の役割も担い、2050 年の総発電量の約 3 分の 1 にあたる。再生可能エネルギーと CCS 付ガス発電の大規模な開発のために、発電の炭素強度は 2050 年にはほぼ 0 になる。

2050 年には、約 199MtCO<sub>2</sub> が CCS 技術によって貯留され、累積貯留量は 3,096MtCO<sub>2</sub> に達する。これは背斜構造における二酸化炭素貯留ポテンシャルの約 60% に相当する（日本の坑井・震探データは地球環境産業技術研究機構（RITE）によって推計されたもの<sup>2)</sup>）。

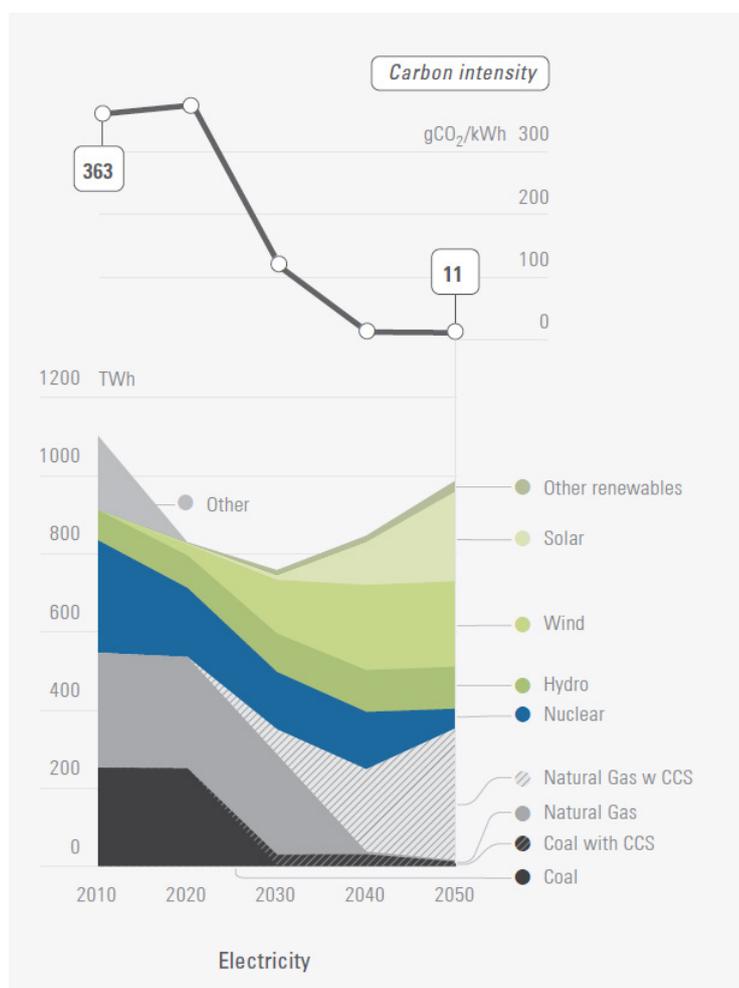


図 6 エネルギー供給の道筋（資源別）

注 2 構造的帯水層の基礎試錐データのある二酸化炭素貯留ポテンシャルは約 5.2Gt にあたる。さら

に、既存の石油/ガス領域において貯留ポテンシャルは約 3.5Gt になる。加えて、総貯留ポテンシャルの最大容積は帯水層全体の貯留量を含めると 146Gt になる (<http://www.rite.or.jp/English/lab/geological/survey.html>)。環境省の報告書によると、貯留最大容積の約半分は、2050 年までに経済性を有する可能性がある。

## 産業部門

産業部門はもっとも大きな排出部門である。産業部門の二酸化炭素排出は 2050 年の温室効果ガス総排出量の約 40% になる。これは高温熱の化石燃料需要が低炭素エネルギー源に置き換えることが難しいからである。活動水準を見ると日本産業の再構築に合わせてエネルギー集約型部門の活動が減速していることが分かる。粗鋼生産量では-23% (2010 年 111Mt から 2050 年 85Mt)、セメントは-11% (2010 年 56Mt から 2050 年 50Mt) の減少となっている。エネルギー効率と相まって、30%以上の化石燃料エネルギー消費量の削減が確保される。

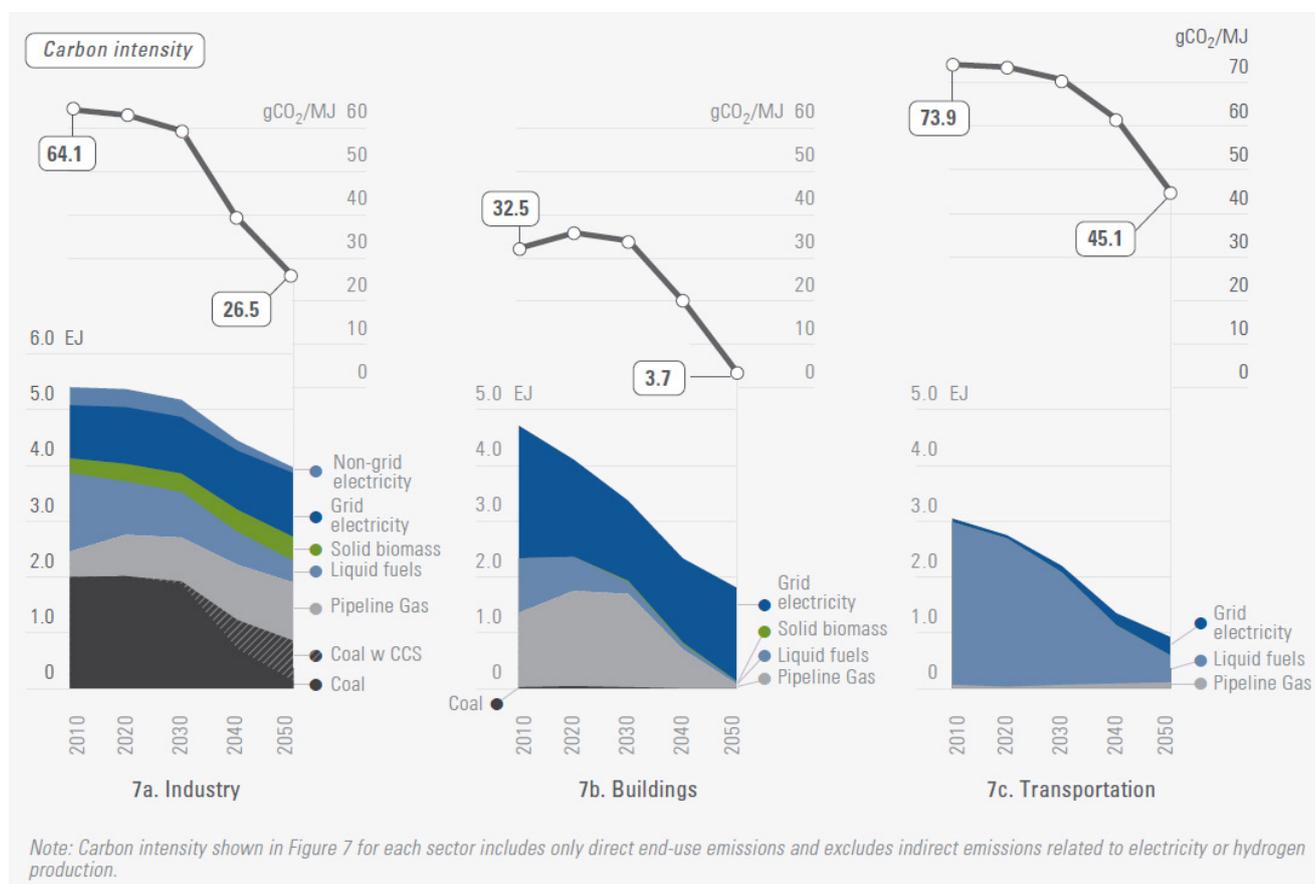


図 7 各部門のエネルギー使用経路 (化石燃料別、2010-2050 年)

## 建築部門

家庭および業務部門では最終エネルギー需要が約 60%削減され、業務床面積の不動性 (+3%のみ、2010 年 18.3Mm<sup>2</sup> から 2050 年 19Mm<sup>2</sup>) および世帯数が 17%減少するとともに、業務部門のエネルギーサービスのニーズが減少するためである。注目されるのは、化石燃料 (とりわけガス) が過渡期 (2030 年まで) において重要であり続けることである。このため、電気が長期的に見てエネルギーの主要源となる前に炭素強度が一時的に上昇することが説明できる。そして、2050 年のこの部門におけ

る炭素強度の大きな減少を保証するものである。

## 運輸部門

運輸部門では、2050年の二酸化炭素排出量は1990年比でほぼ80%削減され、これは日本の温室効果ガスの約17%をしめる（図4参照）。一人当たり流動量の伸び率に相当する旅客総流動量が減少（旅客移動需要-10%）する状況で、生産物に関する貨物輸送の分離の18%がエネルギー効率の組み合わせによって可能になり、電気自動車、燃料電池自動車などガソリンを燃料としない手段（運送）が普及し、エネルギー消費のほぼ50%に達する。石油依存の化石燃料と置き換わり、2050年における化石燃料の炭素強度の継続的な減少を保証する（図7c）。

## 2.2 試算の前提

### 低炭素技術オプション

日本のシナリオにおいては、非常に幅広い種類の低炭素技術が反映されている。その例として、以下のものを含んでいる。

- 発電部門：発電効率の改善、石炭火力やガス火力へのCCS施設の設置、T&D（送電）ロスの低減、風力発電、太陽光発電、地熱、バイオエネルギー
- 産業部門：エネルギー効率改善、産業プロセスにおいて実行可能な電化、天然ガス利用、製鉄とセメント石灰製造におけるCCS、農機具の燃費改善、バイオエネルギー利用、窒素肥料管理
- 建築部門：建築物のエネルギー効率改善、高効率機器、電気ヒートポンプ、電気温水器、エネルギー管理システム
- 運輸部門：エネルギー効率改善、ガス大型トラック、電気自動車、水素自動車

### 原子力発電

日本において、原子力発電の将来の利用可能性は、現時点では不確定であり、原子力発電所からの発電や原子力発電所の利用は、国際エネルギー機関によって報告された世界エネルギー見通し2013の新政策シナリオの前提に従うこととした。シナリオでは、原子力発電所の寿命は、1990年までに建設された施設については40年、それ以降に建設された施設については50年とし、2013年から2035年の間に、3GWの原子力発電設備が加わるとした。これらの前提と、すべての設備における設備利用率を70%と設定すると、原子力発電所からの発電電力量は2050年に約50TWhとなる。

### 地理的な炭素貯留ポテンシャル

既存研究に従って、CCS技術は2025年から利用可能であるとし、年間のCO<sub>2</sub>貯留量は2050年に200MtCO<sub>2</sub>/年まで増加すると仮定した。CO<sub>2</sub>の貯留のポテンシャルは、約5GtCO<sub>2</sub>と設定した。CCS技術は発電部門及び産業部門において適用可能とした。発電部門では、石炭火力とガス火力発電の両方に、CCS技術をもった設備を利用可能としたが、CCSを設置したバイオマス（BECCS）については対象外とした。産業利用では、鉄鋼部門とセメント部門において利用可能とした。2050年に鉄鋼部門とセメント部門において貯留されたCO<sub>2</sub>の量は、それぞれ60MtCO<sub>2</sub>、20MtCO<sub>2</sub>に達する。CCS技術によるCO<sub>2</sub>回収率は、すべてのCCS技術に対して最大90%と仮定した。

### 電力の地域間融通

日本では再生可能エネルギーの大きなポテンシャルを持つ地域は大規模な電力需要地域と異なり、地域間融通の強化は地域の再生可能エネルギー資源をより有効に活用するのを促進するのに役立つ。代表的なシナリオでは、電力融通の強化によって、80%削減目標を達成するための炭素価格が、9%低下する。その理由は、北海道及び東北地方における再生可能エネルギーからの発電が、日本で最大の電力消費地である関東地方において利用が可能となるためである。東北地方と関東地方の間の電力融通の容量は、2010年から2050年の間に3倍となった。

#### デマンドサイドマネジメント

バッテリー搭載の電気自動車（BEV）の普及、ヒートポンプ給湯器、電気から水素への変換器が、デマンドサイドマネジメントの推進を通じて、電力システムに対して柔軟性をもたらす。2050年には日中の電力需要のピークは、オフピークの需要に対してより大きくなり、太陽光発電の導入が大幅に促進されている。

### 2.3 代替経路と経路の頑健性

#### 原子力発電のない脱炭素経路

代表的な排出経路は、徐々に原子力発電がフェードアウトすることを考慮している。しかし、2030年には電力生産の18%、2050年に5%をそれぞれ占めている。しかしながら、2013年の末から原子力発電所は稼働しておらず、原子力規制庁による安全審査中にあり、将来的にはすべての原子炉が廃止となる可能性もある。このため、DDPの頑健性を評価するためには原子力の段階的な廃止を考慮した経路を検討することは価値がある。そこで、この経路では、すべての原子力発電が、2014年以降に見通されている再稼働を行わないことを仮定した。

この代替経路では、CCSのない石炭火力やガス火力が原子力の廃止によって生じる電力不足を埋め合わせる移行期間において、より高い炭素強度となる。しかしながら、代表的な経路と比較した原子力廃止経路の影響は、長期的には小さい結果となった。これはどちらも2050年の原子力のシェアが小さいためである。2050年における80%削減は、再生可能エネルギーやCCS付き天然ガスの追加的な拡張によって可能となる。

#### CCSの導入が少ない脱炭素経路

脱炭素経路の実現可能性がCCSの利用可能性に大いに依存していることから、将来の頑健性評価のために、制限されたCCSシナリオを準備した。このシナリオでは、貯留されるCO<sub>2</sub>が年間100MtCO<sub>2</sub>（代表的シナリオの半分と仮定）であり、累積的な貯留量が1550MtCO<sub>2</sub>になるとした。長期の排出削減目標を到達することは、長期的な電力供給において、CCS付きのガス火力発電に代えて、再生可能エネルギー、とりわけ太陽光や風力発電、の大幅な増加によって達成することができる。このシナリオでは、電力供給における再生可能エネルギーのシェアは2050年に約85%に達し、天候等による出力変動が生じ得る再生可能エネルギー源のシェアは63%に達する。このため、電力システムにおいて統合するための更なる挑戦が課されることになる。揚水発電やバッテリー搭載の電気自動車を用いたデマンドサイドマネジメントのような柔軟性を提供する技術の活用が、大量の価値ある再生可能エネルギー（VREs）を統合するのに役立つ。

### 2.4 追加的な対策と大幅な低炭素経路

以下のような対策が、大幅な脱炭素化の際には検討される必要がある。

### 革新的な低炭素技術の更なる開発と普及

表 2 で示した技術は、2050 年までに実用化が見込まれる省エネ技術である。その一方、特に産業部門においては、シナリオ分析で想定されている水準を超えた低炭素技術のエネルギー効率の更なる改善と、革新的な技術の開発が、排出量を削減する追加的なポテンシャルとなる。さらに、電力融通やデマンドサイドマネジメントの強化のようなシステム技術が、効果的な大幅な脱炭素に貢献する。

表 2 主要な低炭素技術

| Sector                                | Technologies   |
|---------------------------------------|--|
| Electricity                           | Efficiency improvement of power generation, Coal and gas with CCS , Reduced T&D (Transmission & Distribution) line losses, Nuclear power, Wind power, solar PV, Geothermal, Bioenergy, Reinforcing electricity interconnection |
| Transport sector                      | Energy efficiency improvement, Gas-powered HDVs, Vehicle electrification, Hydrogen vehicle   |
| Residential and commercial sectors    | Improvement of the energy-efficiency performance of buildings, High-efficiency equipment and appliance, Electric heat pump water heaters, Energy management system   |
| Industrial sector (incl. agriculture) | Energy efficiency improvement, Electrification where possible, Natural gas use, CCS for iron making and cement lime, Fuel economy improvement of agricultural machine, Bioenergy use, Nitrogen fertilizer management           |

### 生活水準を維持しつつエネルギーサービス需要を減少するライフスタイルの変化

代表的なシナリオと代替的なシナリオのどちらにおいても、大幅なライフスタイルの変化とエネルギーサービス需要の減少は考慮しなかった。しかしながら、行動の変化は、生活水準を維持しつつエネルギー需要を削減する更なるポテンシャルを持っている。たとえば、先進国の物質ストックは飽和しており、発展途上国も将来、先進国に追い付くであろう。サービス経済あるいはストック経済の高まりは物質需要を削減し、その結果、エネルギー需要も削減させることが可能となる。こうした効果を分析することは、大幅な脱炭素経路のより正確な評価につながる。

### 物質需要とそのエネルギーサービス受容の変化

代表的なシナリオと代替的なシナリオのどちらにおいても、物質生産の大幅な変更は考慮しなかった。しかしながら、既存のインフラのストック水準や将来の人口減少から、ストックの水準を維持するような少量の物質生産で十分にやっていけそうである。たとえば、先進国の鉄のストックは、1 人あたり 4.9~10.6 トンと見積もられている、物質生産量が管理されると、産業部門におけるエネルギーサービス需要はさらに減少し、CO2 排出量も削減することが可能となる。

### エネルギー消費量を削減するように計画された都市への再開発

都市における排出量やエネルギー需要のさらなる削減は、自家用車から公共交通へのシフトや廃熱の再利用を行うことで、達成することが可能となる。さらに、都市における緩和行動は、しばしば複数のコベネフィットをもたらさう。

未利用エネルギーが容易に利用可能となるような工場の再配置

電力融通の強化は今回のシナリオにおいては、選択肢として考慮されてきたが、工場の再配置は再生可能資源や廃熱の熱の効率的な利用に貢献する。特に、現状では、低温の熱の大部分は廃棄されている。様々な産業の配置や産業と民生部門の間の配置が適切に組織化されていると、配置を再検討することによりエネルギー効率の改善や熱利用の余地が生まれ、更なる CO2 排出量が削減される。

## 2.5 挑戦、機会、そして可能となる条件

### エネルギーシステムの転換

日本において大幅な脱炭素化は、エネルギーシステムの大規模な転換を必要としている。とりわけ、太陽光や風力といった天候によって出力変動が生じ得る再生可能エネルギー源（VRE）を電力システムに統合するためには多大な挑戦が必要となる。今回のシナリオ分析では、揚水発電のような柔軟性をもたらす設備が建設されると、VRE の大規模な普及を保管するようになる。さらに、デマンドサイドマネジメントは効果的なオプションであるが、単独で市場メカニズムによって実行されることはないので、ダイナミックプライシングのような追加的な施策が必要となるであろう。

### 大幅な脱炭素化の経路の国民の支援の拡大

低炭素技術の普及の速度は、国民の支援によって大きく左右される。一般に、低い割引率は低炭素技術を普及するための更なる機会を提供する。低炭素技術の普及によって、コベネフィットや負の副次効果など幅広い影響が生じるために、技術に対する国民の支援は、経済的な障壁とともに社会的な課題を巻き込むかもしれない。

## 2.6 短期的な優先順位

### 高い炭素強度のインフラによるロックインの回避

発電所や建築物のようなインフラのいくつかは、ここ数年に建設されたものは 2050 年においても残存することから、ロックインのリスクを引き起こす。石炭火力発電と同様に、ガス化複合サイクル発電は 2050 年には CCS 装置が導入される必要があり、利用可能な最高の技術の導入に加えて、CCS の導入が可能となるような新しい設備が必要となる。

### 節電の継続

2011 年に生じた東日本大震災のあと、東京電力福島第一原子力発電所事故とその他の被害を受けた発電所の停止による停電を回避するために、電力需要は減少した。こうした行動は、大規模な脱炭素化にとって有効であるといえる。

### エネルギー輸入価格の短期的な影響の抑制

2011 年以降、日本においては、国際的な原油価格の上昇や円安、原子力発電所の停止のために、化石燃料の輸入額が増加した。化石燃料需要を削減するような大幅な脱炭素化に向けた迅速な行動は、短期的な経済影響について低減することにも貢献する。