

2. 俯瞰対象分野の全体像

2.1 分野の範囲と構造

地球温暖化問題に代表される地球的規模の環境問題と、エネルギー使用に起因した二酸化炭素（CO₂）の排出削減などのエネルギー問題は、相互に深く関係しており一体不可分である。したがって、CRDS では「環境」と「エネルギー」を「環境・エネルギー」という一つの科学技術分野として捉え、「環境制約や資源制約を克服し持続的な経済成長と人間社会の発展を図るために必要となる、広範で多様な学術分野を含む課題駆動の科学技術分野」と定義して俯瞰検討を進めた。

2.1.1 分野の範囲

2014 年 4 月に閣議決定された「エネルギー基本計画（第四次）」によれば、「安全性（Safety）」を前提として、「エネルギーの安定供給（Energy Security）」、「経済効率性の向上（Economic Efficiency）」による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に「環境への適合（Environment）」を図る、いわゆる「3 E+S」を同時に克服するための取り組みを進めることの重要性が掲げられている（経済産業省資源エネルギー庁、2014a）。エネルギー分野の俯瞰では、このような我が国のエネルギー政策の基本的視点に立ちながら俯瞰を進める。

環境分野では、まず、環境は人の健康を含む生命の持続性の基盤であることから「次世代のための環境」を俯瞰の際の前提とした。そして、環境に影響を及ぼす事象を予測し先手を打つという考え方が必要であり、対策が事後対応的であった異常気象や自然災害をも対象に含め、「環境設計・創造」という基本理念のもと、普遍的な課題解決型科学技術の記載を目指した。また、さまざまな社会状況が変化しつつある 2015 年という時点を強く意識することとした。

なお、本報告書での環境分野の俯瞰については、環境を「人と関わりあう物理空間および生態系」と定義する。具体的には、大気、水、土壌、生態系、地下資源などを想定する。大深度以下の地下空間や宇宙空間は、人との直接の関わり合いがあったとしても限定されるので、ここでは対象としない。また、環境問題については、人間活動に伴って生じる環境負荷、すなわち、資源の採取や廃棄物・汚染物質の排出による資源・環境の劣化とそれに伴う人間やその他の生物に対する悪影響と定義する。環境の劣化には、枯渇と汚染がある。枯渇とは、化石燃料など人間のタイムスケールでは再生が不可能な資源の採取や、再生可能であっても過剰利用によって持続可能なレベルを超えた資源の採取と利用である。汚染とは、自然の浄化能力の範囲を超えた量の物質が水、大気、土壌などの環境中に放出され、残留することである。

2.1.2 俯瞰の枠組み

環境・エネルギー分野を「エネルギー供給」、「エネルギー利用」、「原子力」、「環境」の4区分に分類して俯瞰調査を行った。「エネルギー供給」区分では、前述のとおり、我が国のエネルギー・フローならびに資源輸入量と CO₂ 排出量の関係を概観し、エネルギー需給構造を 2013 年版よりも一層大局的に捉えて俯瞰した。「エネルギー利用」区分では、エネルギーを利用する側からの視点を重視し、俯瞰構造を見直した。さらに、2013 年版では取り上げなか

った「原子力」区分と「環境」区分についても俯瞰調査を実施し、今後取り組むべき主要な92の研究開発領域を抽出し、将来の社会的な期待や要請に基づいて整理した。

環境・エネルギー分野の俯瞰図を図2.1.1に示す。環境・エネルギー分野は、社会的期待を最上位層に配した階層構造をしており、階層の一つに技術課題・研究開発課題が組み込まれているものと捉えることができる。具体的には、「持続可能な社会の実現」という社会的期待（第1階層）を実現するために事業領域（第2階層）が存在し、その事業を実施するための手段が構成技術課題（第3階層）によって提供されている。これらの技術を実現するために共通要素技術課題（第4階層）や、それらを支える学術研究領域（第5階層）が存在している。

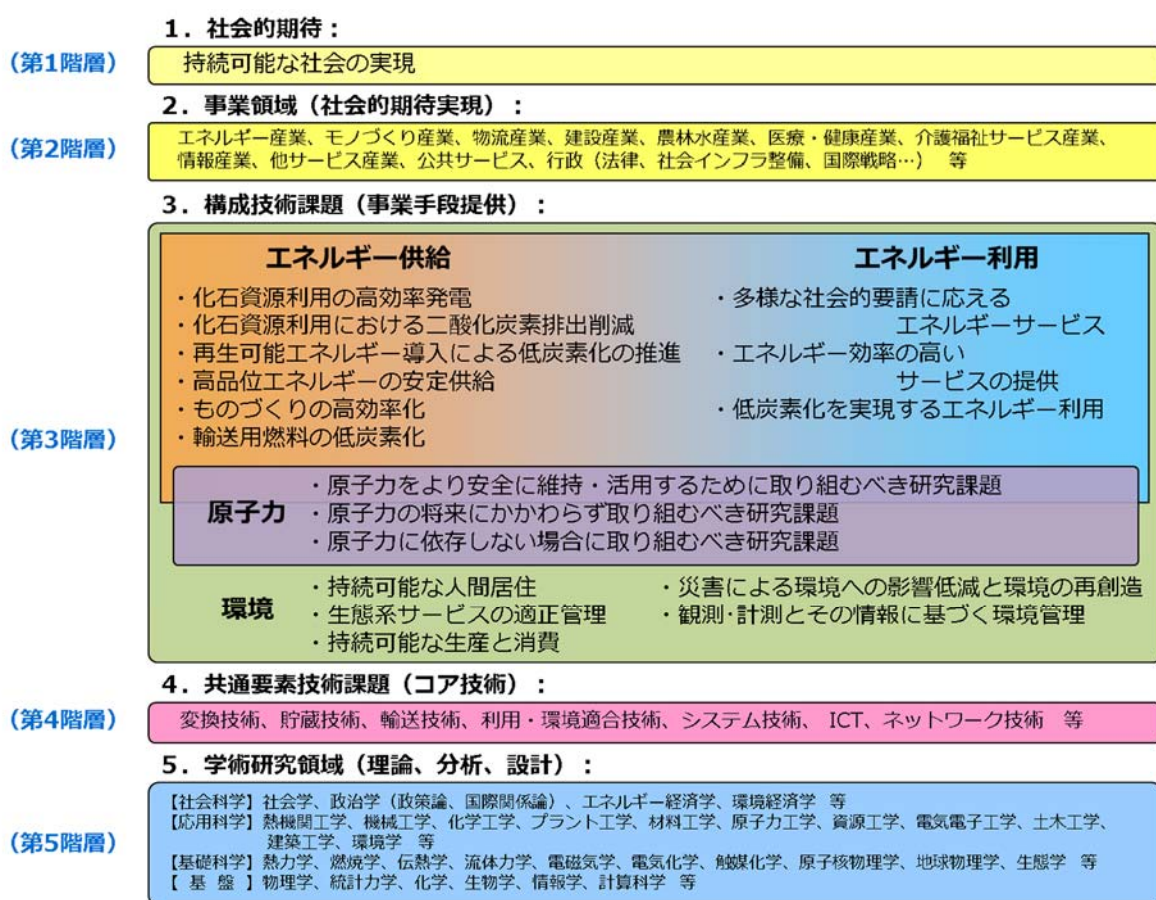


図 2.1.1 環境・エネルギー分野俯瞰図

2.2 分野の歴史、現状及び今後の方向性

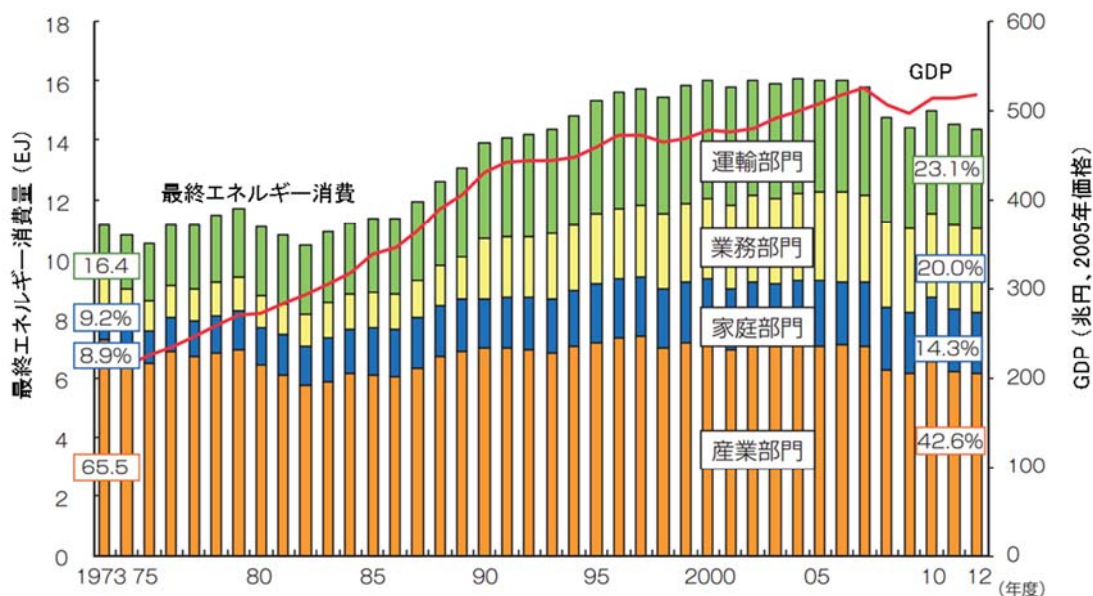
2.2.1 分野の歴史と現状

（1）エネルギーに関わる日本社会の変化

エネルギー需給構造の変化

図 2.2.1 に、我が国の近年の最終エネルギー消費量と GDP の推移を示す。70 年代の 2 度の石油危機を契機に、政策効果も相まって産業部門を中心に省エネルギーが急速に進展し、しばらくはエネルギー消費量を増やすことなく安定した経済成長を達成してきた。80 年代後半から、低位な原油価格や省エネルギーの一巡により、エネルギー消費は増加に転じ、1995 年頃以降は経済の停滞もあってエネルギー消費は微増に留まっていた。その後、2008 年のリーマンショックを起点とした世界的金融危機による景気悪化や、2011 年の東日本大震災後の節電・省エネの進展、生産減少の影響もありエネルギー消費量は漸減傾向にある。

産業部門では、省エネルギーの徹底によるエネルギー消費原単位の改善（経済産業省資源エネルギー庁、2014b）および生産拠点の海外移転の進行（内閣府、2012）、産業構造の変化などにより、石油危機後大きく減少に転じ、その後緩やかな増減はあるものの、2012 年度の消費量は 1973 年を下回っている。一方、民生部門、運輸部門は、利便性の追求、電化・情報化の進展、モータリゼーションの進展により、石油危機後一貫して増加傾向にあったが、2000 年以降は横ばいないしは微増で推移している。



（注1）J（ジュール）＝エネルギーの大きさを示す指標の一つで、1MJ＝0.0258×10³原油換算kl。

（注2）「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3）構成比は端数処理（四捨五入）の関係で合計が100%とならないことがある。

出典：資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」、内閣府「国民経済計算」、日本エネルギー経済研究所「エネルギー・経済統計要覧」を基に作成

図 2.2.1 最終エネルギー消費量の推移と経済成長（エネルギー白書、2014）

コラム1：エネルギー源別輸入価格・輸入量推移

エネルギー源別の輸入価格および輸入量を以下の図に示す。原油およびLNGは価格の変動が大きく、原料炭と一般炭は価格変化が小さい傾向にある。また、それぞれの輸入量は輸入価格ほど大きな変化は見られない。

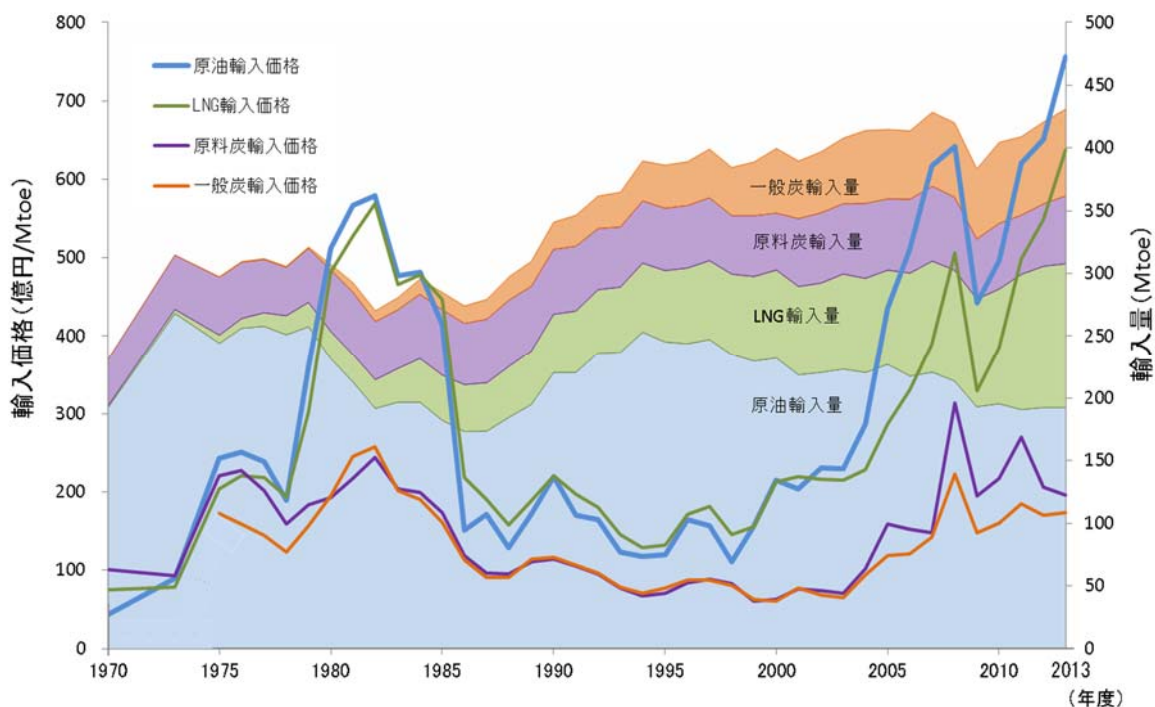


図 エネルギー源別の輸入価格と輸入量の推移

（日本エネルギー経済研究所. 2015 年. エネルギー・経済統計要覧を基に作成。）

※単位あたり平均発熱量を基に $1 \text{ Mtoe} = 1 \times 10^{13} \text{ kcal}$ として試算。

例えば、原油の場合、以下の式により試算。

輸入量 (Mtoe) = 輸入容量 (L) × 平均発熱量 (kcal/L) × 10^{-13} (Mtoe/kcal)

※一般炭については一部該当データがないため 1975 年以降について記載。

コラム2：石油換算トン

エネルギー分野では、それぞれのエネルギー源が原料や国によって様々な異なる単位が用いられている。例えば石油はリットル (L) やバレル (bbl)、石炭や天然ガスはキログラム (kg) などの単位で表記される。これら単位の異なる原料をエネルギーとして比較するために、同一の単位として、「toe：石油換算トン」が用いられることがある。

なお、IEA では 1 toe を $4.1868 \times 10^{10} \text{ J}$ (ジュール) としている。エネルギーごとの発熱量 (J) を基にその数値を石油換算トンとしてあらわすことが可能である。

エネルギー消費の変化にともなって一次エネルギー供給量も変化してきた。図 2.2.2 に示すように、一次エネルギー供給の総量は 1990 年に約 20.2 EJ であったが 2010 年には約 23.1 EJ となり、2013 年には約 21.7 EJ となっている。またその内訳にも変化がみられた。1990 年から 2010 年の間には石油の一次エネルギーに占める割合は、57.1%から 43.7%に減少する一方、石炭（16.7%→21.6%）、天然ガス（10.2%→17.3%）や原子力（9.4%→10.8%）の割合が増加した。

2010 年から 2013 年の間には石油の一次エネルギーに占める割合は 45.9%に増加したが、供給量は微減し、石炭（23.9%）と天然ガス（22.6%）はさらにシェアを伸ばした。一方、原子力は国内の原子力発電所が稼動していないことから、大きく減少し一次エネルギー供給量は約 0.1 EJ となり、全体に占める割合は 0.4%となっている。再生可能エネルギーは、2012 年 7 月から開始された再生エネルギーの固定価格買取制度（FIT：Feed-In Tariff）を受け発電設備としての導入が急速に進んだため、一次エネルギー供給量は約 1.6 EJ なり、全体に占める割合も増加している（7.2%）。しかし、化石燃料のシェアは依然として高く、1990 年以降微減に留まっている。

また、全体のエネルギー消費量はここ数年減少傾向にあるが、2011 年以降、原子力発電所が停止している分のエネルギー供給を化石燃料で補っているために、CO₂ の総排出量および一人当たり CO₂ 排出量は増加している（1990 年比で約 1.12 倍）（図 2.2.3）。なお、同様の理由により、エネルギー自給率は 2010 年から 2013 年の間に大幅に低下している（18.1%→6.0%）。

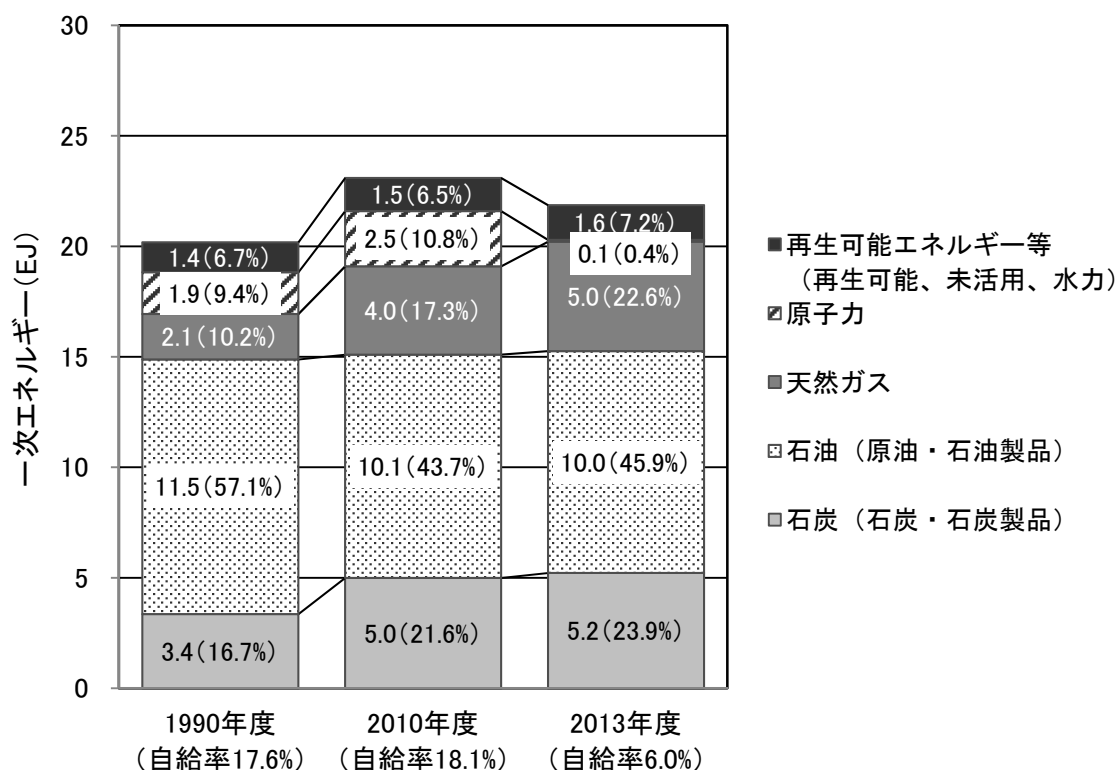
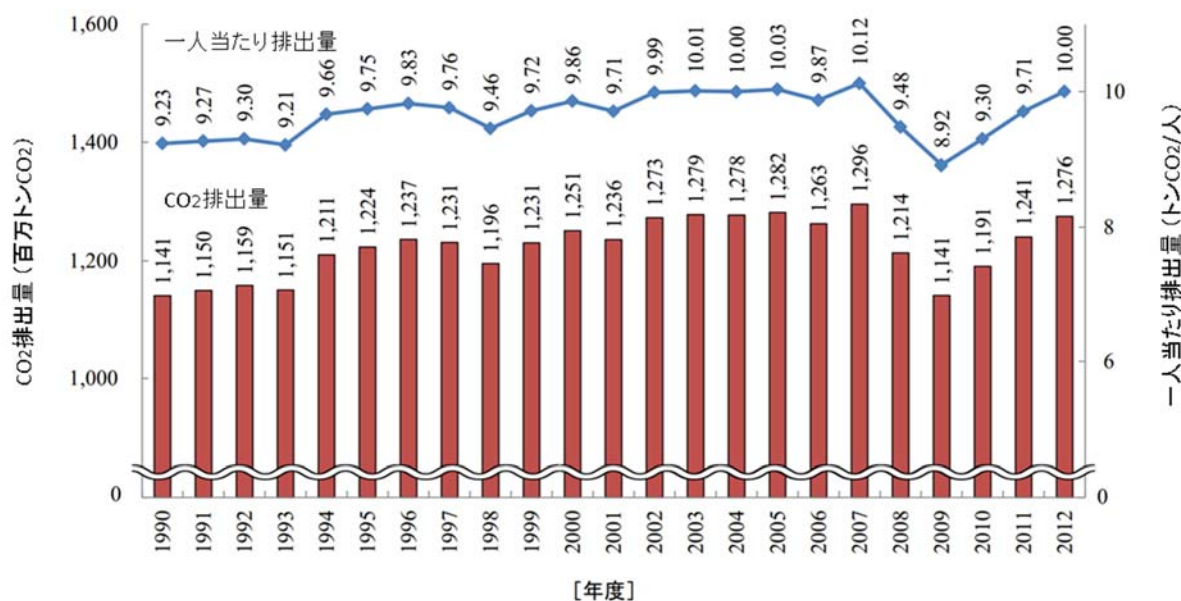


図 2.2.2 一次エネルギー量内訳とエネルギー自給率

(1 EJ=10¹⁸ J 2013 年度総合エネルギー統計（経済産業省資源エネルギー庁、2014c）より作成)

図 2.2.3 CO₂総排出量および一人当たりCO₂排出量の推移

(独立行政法人 国立環境研究所：日本国温室効果ガスインベントリ報告書より)

2011年3月の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故後、2013年9月に関西電力大飯原子力発電所3号、4号が停止して以来、国内のすべての原子力発電所が停止した。その後、原子力発電所20基の新基準への審査申請が行われているが、審査書案が了承されたのは、九州電力川内原子力発電所1号、2号、関西電力高浜原子力発電所3号、4号の4基のみであり、2015年の再稼働に向けて地元への説明、準備が進められている。熱量基準で見たエネルギーの流れ（図2.2.4）を見ると、一次エネルギー供給は、原子力では2010年の2.49 EJ/年から2013年には0.08 EJ/年と大幅に減少している。これに伴い、天然ガスが24%、石炭が5%増加している。特に、発電部門では、化石燃料の割合が約87%と大幅に増加しており、CO₂排出量増加に繋がっている。また、2012年のFIT開始に伴い、再生可能エネルギーは9%増加している。

FIT開始後の設備導入容量および認定容量（図2.2.5）、発電電力量および買取金額（図2.2.6）を見ると、2014年12月末時点で、7,401万kWの設備認定がされ、そのうち1,582万kWが稼働している。認定設備のうち、太陽光が7,088万kW（96%）を占め、特に非住宅用が6,745万kW（91%）を占めている。一方、導入容量は、非住宅用の太陽光は、1,253万kWと認定容量の19%にしかすぎない。買取発電量および買取金額は、2012年56億kWh（1,780億円）、2013年181億kWh（5,790億円）、2014年4月～12月210億kWh（7,504億円）となっており、2014年度は約280億kWh（約1兆円）に達すると予想され、また、現状認定された全設備が稼働した場合の買取金額は、年間2.7兆円になると予想されている。再生可能エネルギー、特に太陽光の設備導入、認定の急拡大は、買取負担、系統接続容量の不足など、多くの課題が顕在化しており、経済産業省でも議論が行われている。FITの見直しを含め、我が国のエネルギーベストミックスがどうあるべきか、早急な議論が必要である。さらに、FITからの脱却、すなわちグリッドパリティ実現に向けて長期的な研究開発戦略を進めていく必要がある。

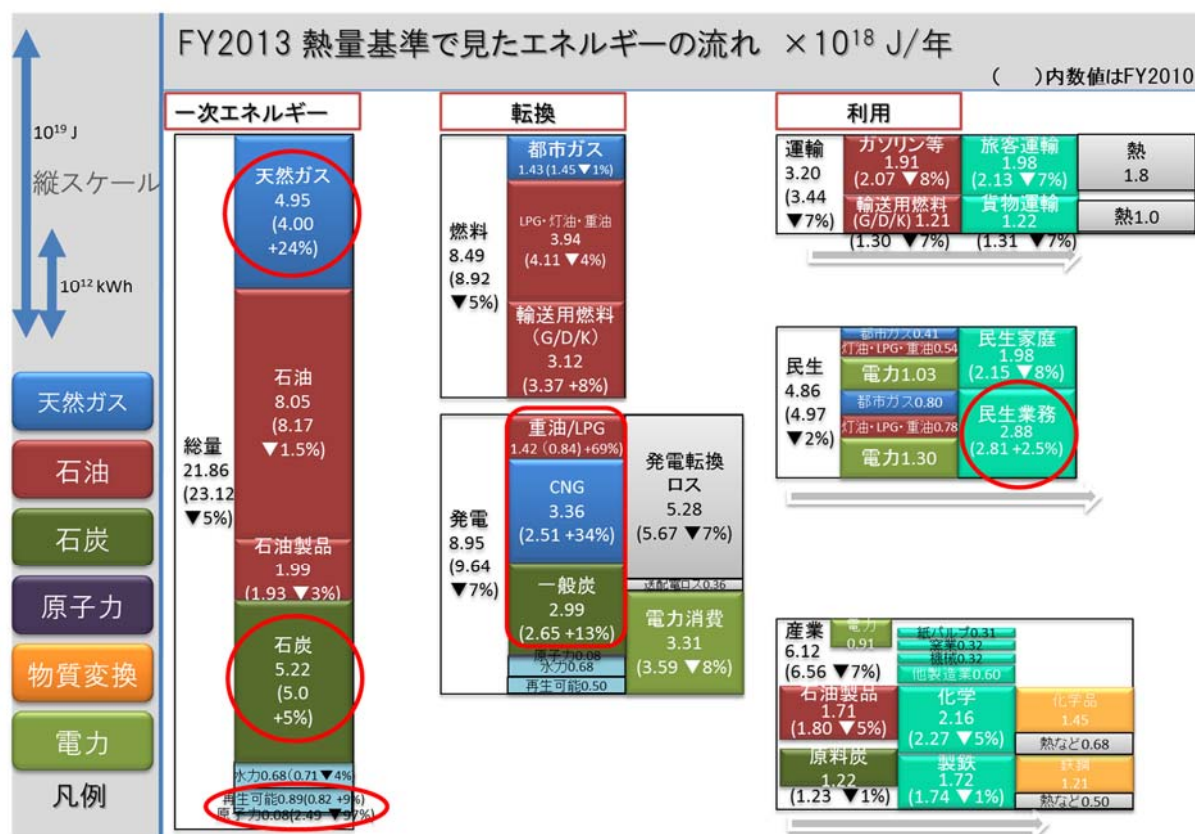


図 2.2.4 2013 年度の我が国のエネルギー・フロー

(2010、2013 年版総合エネルギー統計（経済産業省資源エネルギー庁、n.d.a）を基に CRDS が作成。赤枠部はエネルギー利用が増加している領域を示す。)

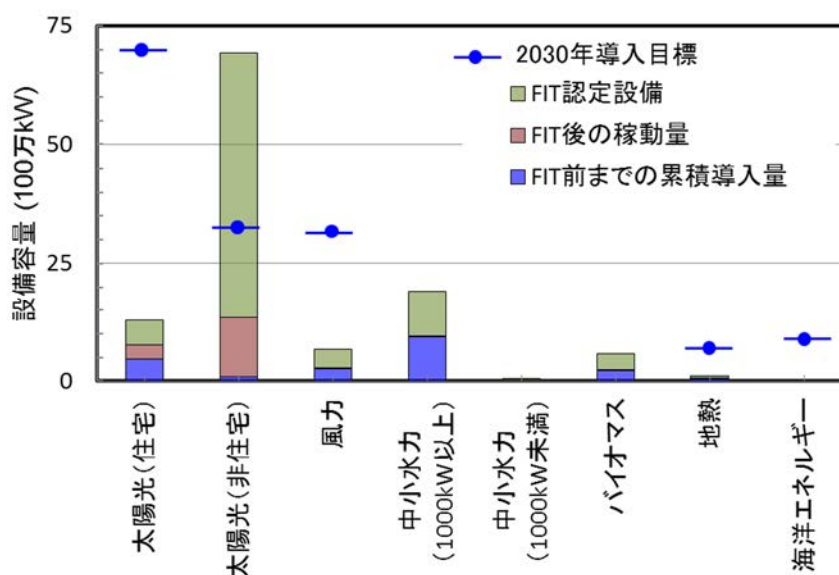


図 2.2.5 FIT 開始以降の再生可能エネルギー導入容量および認定容量

(固定価格買取制度 情報公開ウェブサイト（資源エネルギー庁、n.d.）を CRDS 加筆。導入量の根拠については、NEDO（2009）、NEDO（2014）、日本風力発電協会（2012）、自然エネルギー政策プラットフォーム（2012）、バイオマス活用推進会議（2014）、環境省（2011a）、CRDS（2014a）等に基づく。)

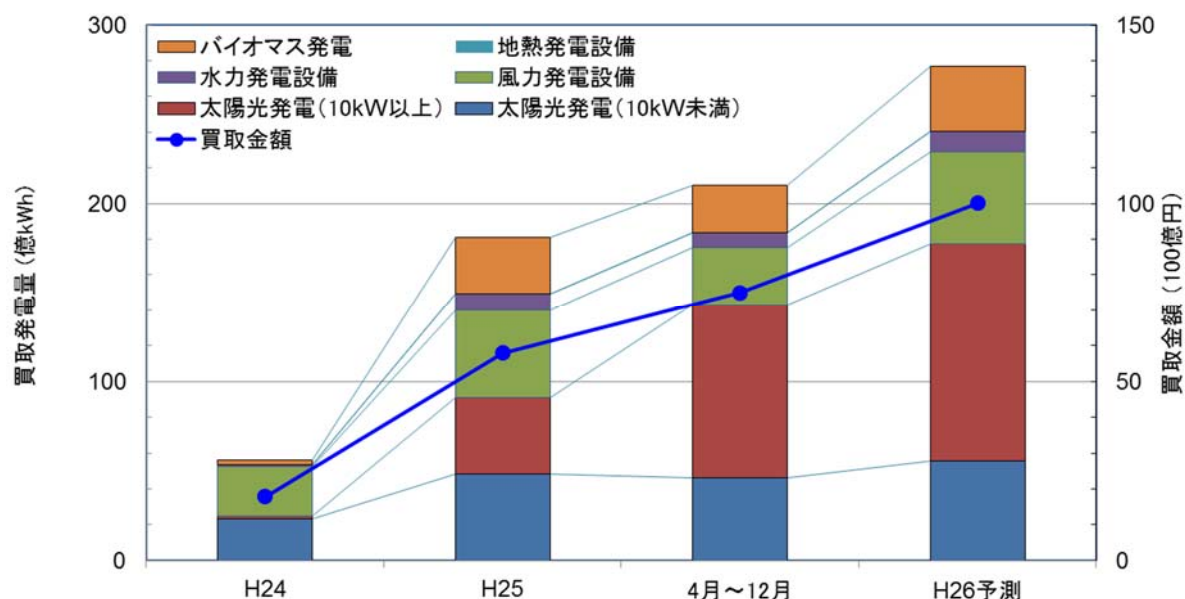
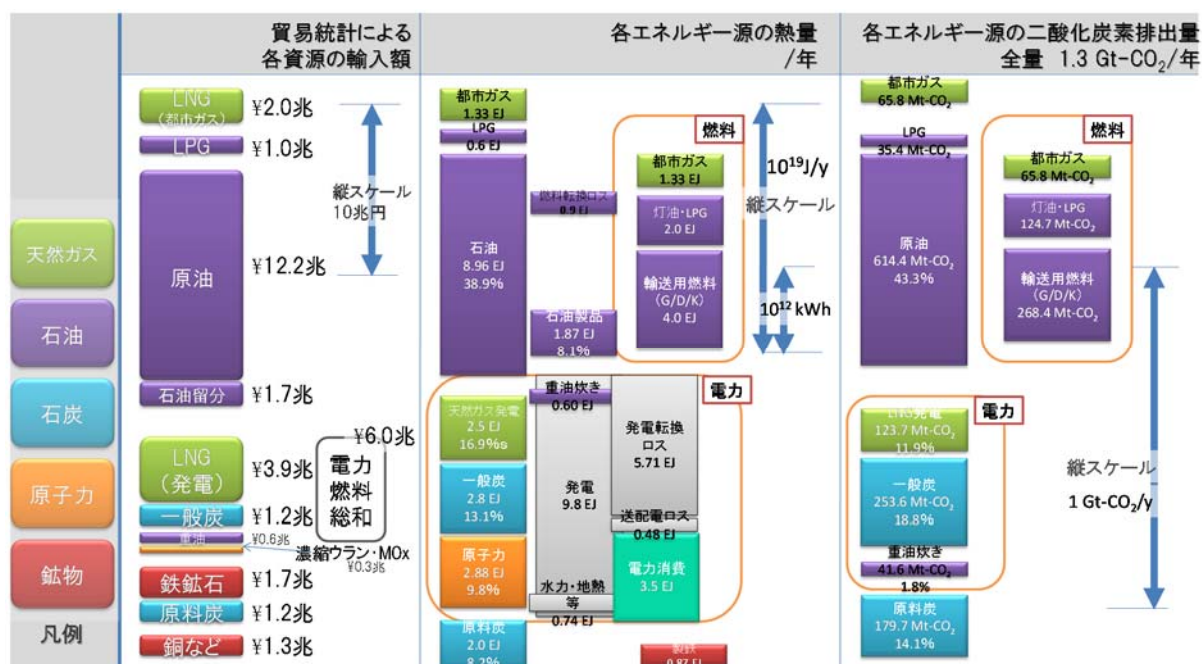


図 2.2.6 FIT 開始以降の再生可能エネルギー買取発電量および買取価格

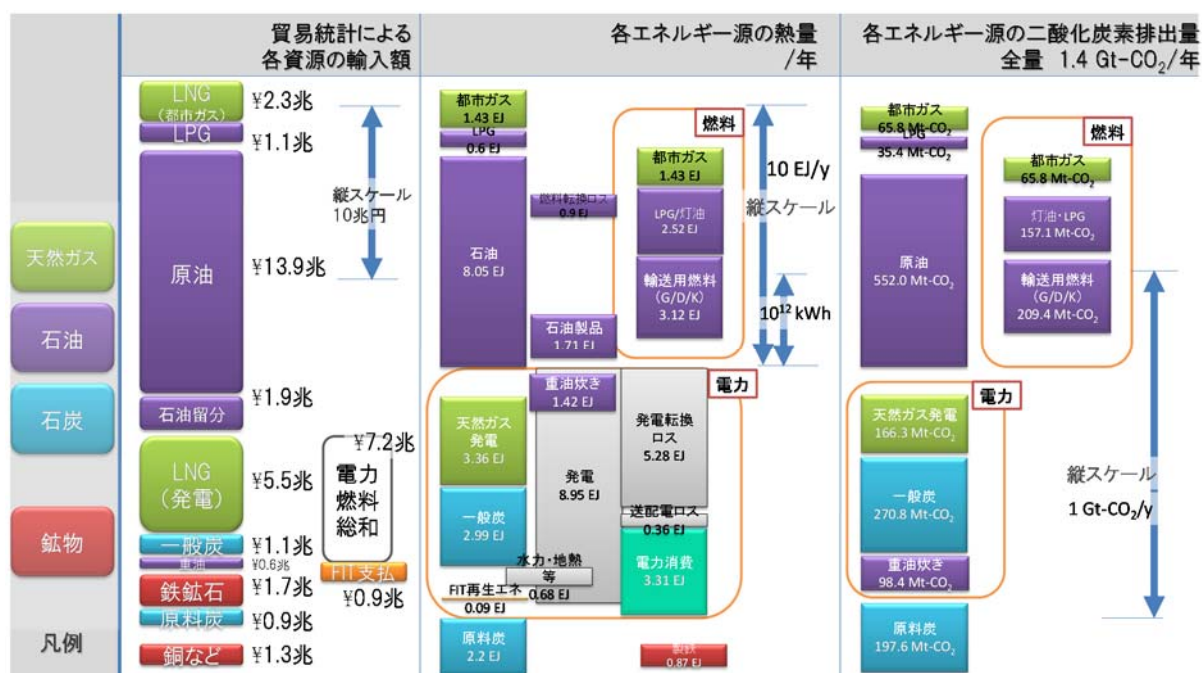
(固定価格買取制度 情報公開ウェブサイト（資源エネルギー庁、n.d.）をCRDS加筆）

エネルギー分野の全体像を把握するには、我が国のエネルギー需給構造全体ならびに産業・社会ニーズを捉えることが必要である。そこで、前回(2013年)の俯瞰報告書(CRDS、2014a)と同様に、我が国のエネルギー・フロー(図 2.2.4)、貿易統計からみた各資源の輸入額、エネルギー量(熱量換算)、CO₂排出量(図 2.2.7)、および熱量基準で見た我が国へのエネルギー供給国(図 2.2.8)を概観した。エネルギー・フローは、エネルギーの需給構造を俯瞰的に理解するのに極めて有効である。これらの図を詳細に分析すると、以下のようなさまざまな課題が浮かび上がる。

我が国は化石資源に乏しく、ほとんどのエネルギー源を海外からの輸入に依存している。一次エネルギー源の調達においては原油の中東依存度が約 90% に及び、エネルギー供給体制には根本的な脆弱性を抱えている。地政学的リスクを踏まえ、ロバストな資源確保のための対策強化が必要である。また、2013 年は約 28 兆円もの国富を費やして輸入したエネルギー資源(約 22 EJ/年)が最終消費されるまでには、さまざまなエネルギー損失が生じ、有効に使用される割合は 4 割程度と見積もられる。電力部門では、約 9 EJ/年の一次エネルギー源から 3.3 EJ/年の電力を得るに留まっており、発電や送配電における損失が大きい。電力への転換効率の改善が課題である。石油を燃料に転換する過程での損失も大きく、約 1 割が排熱となっていることから、蒸留工程での熱回収利用技術などが必要といえる。同様の技術は、エネルギー多消費産業である化学産業の省エネルギーに大きく寄与すると考えられる。一方、運輸部門ではとりわけ自動車における熱としてのエネルギー損失が大きく(図 2.2.4 右上の灰色部)、新技術による高効率化が望まれる。暖房や給湯として使われる低位熱需要に対して多くの電力が使われている現状も改善の余地がある。そして最後に、再生可能エネルギーは一次エネルギー源としては、いまだに 4%と小さな割合を占めるに過ぎないが、2012 年 7 月に FIT が開始されて以降、太陽光発電を中心に飛躍的に拡大しており、FIT 賦課金による国民負担の抑制、系統連携技術やその貯蔵・利用を可能とする技術が必要である。

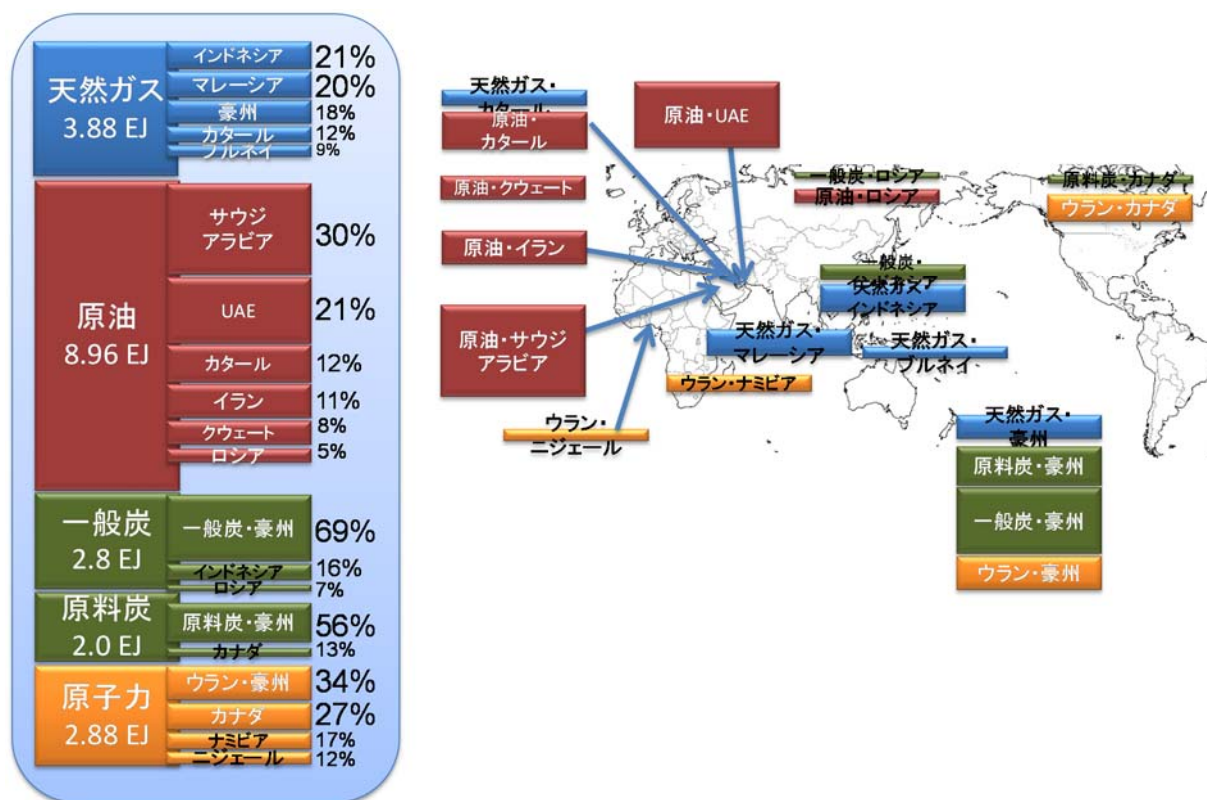


2010 年

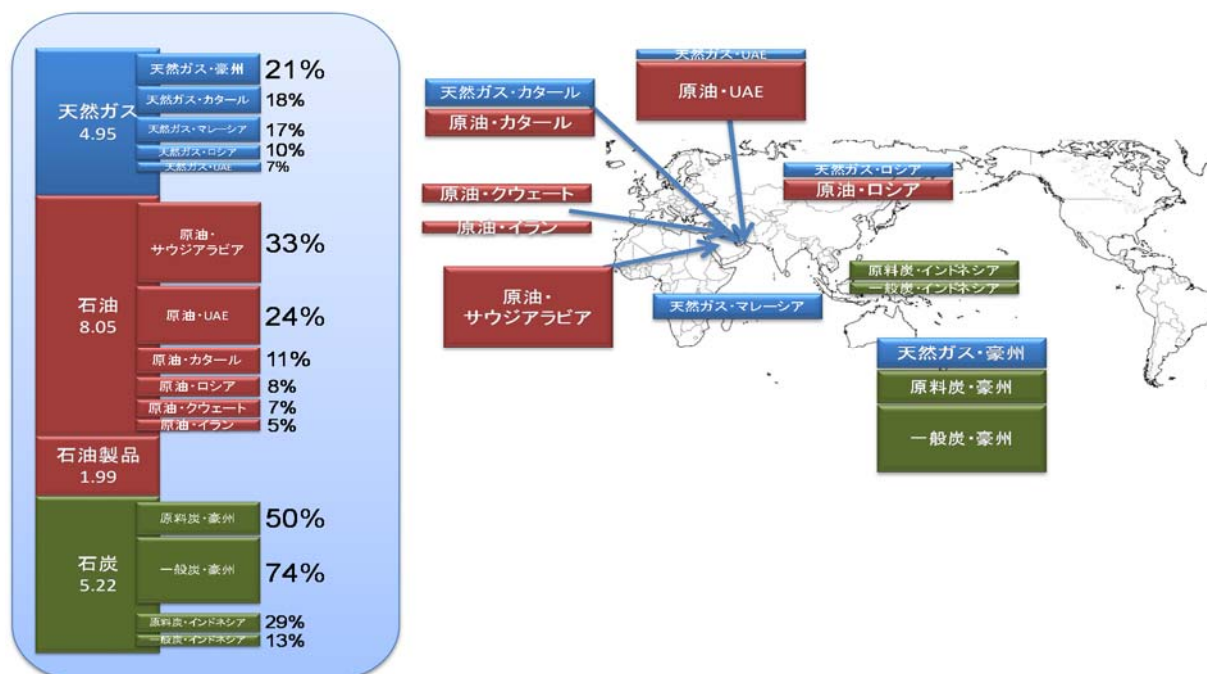


2013 年

図 2.2.7 貿易統計からみた各資源の輸入額、エネルギー量（熱量換算）、CO₂ 排出量
 (1 EJ=10¹⁸ J、金額：財務省貿易統計（2014 年度版）、熱量：経済産業省資源エネルギー庁総合エネルギー統計（2014 年分）、CO₂：国立環境研究所発行「産業連関表による環境負原単位データブック」を基に CRDS が算出)



2010 年度



2013 年度

図 2.2.8 熱量基準で見た我が国へのエネルギー供給国
 (2013 年版総合エネルギー統計 (経済産業省資源エネルギー庁, n.d.b、
 財務省貿易統計 (財務省、2014) を基に CRDS 作成)

コラム3：日本の原油備蓄

我が国では、石油の備蓄の確保等に関する法律（石油備蓄法）に基づき、国家による石油備蓄と石油精製業者等民間による石油備蓄が実施されている。2014年3月末現在、国家備蓄（約4,796万kL）、民間備蓄（約3,610万kL）を合わせ、約8,406万kLの石油（原油と石油製品）が備蓄されている。これは、国内の石油消費量を基に計算すると約193日分に相当する。

（独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構ホームページ基礎情報：備蓄データ
http://www.jogmec.go.jp/library/stockpiling_oil_004.html）

エネルギー政策の変遷

我が国の戦後のエネルギー政策は、1973年と1979年の二度にわたる石油危機を大きな区切りとして改編された。石油危機が発生した70年代から80年代にかけて、エネルギーの安全保障が重視されるようになり、それまでの石油依存からエネルギー資源の多様化に重心が移り、代替エネルギーの導入、省エネルギーの促進によって脱石油が進められた（表2.2.1）。さらに、この間、石油に代わる新エネルギーの技術開発を推進するサンシャイン計画、省エネルギーの技術開発を推進するムーンライト計画が開始された。

また、高度成長によって我々の生活水準が向上する一方で地域環境問題が顕在化し、化石資源の利用に伴う煤塵、SO_x（硫黄酸化物）、NO_x（窒素酸化物）などの排出低減対策が進められることとなった。さらに、当時は経済が安定成長から低成長へ移行しつつあったが、少資源国である日本は産官学が連携して省エネ技術・環境対策技術の開発に戦略的に取り組み、自動車ほか製造機器・設備で圧倒的な世界競争力を有するに至った。

90年代に入り、金融の自由化や東西冷戦の終結により世界が急速にグローバル化すると同時に、リオデジャネイロで開催された国連環境開発会議（地球サミット、1992年）や、先進国の温室効果ガス（GHG）の排出削減を定めた京都議定書の採択（1997年）など、地球温暖化問題への対応の必要性が国際的に高まった。めまぐるしく変化する世界情勢に対し、日本はバブルの崩壊から立ち直る有効な政策手段は見出せず、経済は低迷し始めた。なお、この間に省エネ法の改正（1998年）により「トップランナー制度」が導入され、省エネ家電や自動車の普及が促進されることとなった。

2000年代からは新興国の急成長が目立ち始め、世界のエネルギー資源・環境問題はいつそう難しい局面となった。また情報化のさらなる進展が多様な利便性をもたらすとともに世界の金融不安定化を引き起こすなど弊害も生み始めた。こうしたなか、我が国ではエネルギー政策基本法が制定（2002年）され、それに基づくエネルギー基本計画（第一次）が閣議決定（2003年）されることにより、3Eの同時充足を基本方針とした総合的なエネルギー政策が進められるようになった。

2010年代からは、東日本大震災や福島第一原子力発電所事故などにより、国内外のエネルギーを取り巻く環境は大きく変化していった。そのため、これまでのエネルギー政策の見直しが図られるようになり、その検討をする上では、3EにS（安全性）を加えるということが基本方針となった。また、国民の間にも再生可能エネルギー導入、脱原発（原子力への依存度低下）、省エネルギー化への機運が高まっていった。

こうした背景のなか、政府一丸となってエネルギー政策を検討するという考えのもと、関

係閣僚により構成される「エネルギー・環境会議」が設置された（2011年）。この会議では、原子力への依存度の低下や、グリーンエネルギー（省エネ、再生可能エネルギー）推進などの方針を示した「革新的エネルギー・環境戦略」や、グリーンエネルギー拡大に向けたロードマップを示すことを目的とした「グリーン政策大綱（骨子）」が策定された（2012年）。

再生可能エネルギーに関しては、その導入促進に向けて、再生可能エネルギーの FIT が開始されている（2012年）。

原子力に関しては縦割り行政の弊害を除去し、原子力利用における安全確保に必要な施策の策定や、関連事務を一元的に取り扱う組織として、原子力規制委員会が設置された（2012年）。同委員会において、福島第一原子力発電所の事故の教訓や国内外からの指摘を踏まえ、世界で最も厳しい水準の新規制基準が定められた（2013年）（原子力規制委員会、2013）。

また、2013年には省エネ法が改正され、電気の需要の平準化推進や、トップランナー制度の対象を建築材料（断熱材など）や LED に拡大するといった措置が追加されている。（資源エネルギー庁、2014d）

2014年4月にはエネルギー基本計画（第四次）が閣議決定された。同計画では、エネルギー政策の基本的視点（3E+S）を確認したうえで、各エネルギー源の位置づけと政策の基本的な方向が示されている。例えば、再生可能エネルギーについては、重要な低炭素の国産エネルギー源と位置づけられ、2013年から3年程度は導入を最大限加速していくとされている。原子力については、安全性の確保を大前提に、エネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源と位置づけられ、リスク最小限化のために万全の対策を尽くすといった方針が示されている。（経済産業省資源エネルギー庁、2014a）

表 2.2.1 エネルギー・環境政策の変遷

年代	主な政策的取組み	科学技術関連の主な政策的取組み	重視された側面
～ 70・80年 代	背景: 石油危機(73年、79年)を契機とした脱石油機運の高まり - 原子力基本法(55年) - 原子力委員会設置(56年)、日本原子力研究所設立(56年) - 公害対策基本法(67年) - 大気浄化法改正法(マスキー法)(70年) - 公害国会(70年) - 環境庁発足(現環境省)(71年) - 国連人間環境宣言(ストックホルム)(72年) - 自然環境保護法(72年) - 資源エネルギー庁発足(73年) - 石油需給適正化法(73年) - 原子力エネルギー促進(電源三法)(74年) - 国立公害研究所発足(現国立環境研究所)(74年) - 省エネルギー促進(省エネ法)(79年) - 石炭利用拡大に関するIEA宣言(石油火力新設の禁止等)(79年) - 核兵器不拡散防止条約発効(NPT)(70年)、日本批准(76年) - 代替エネルギー促進(代エネ法)(80年) - 日米原子力協定発効(88年)	日本科学技術情報センター(JICST)設立(57年) 新技術開発事業団(JRDC)設立(61年) サンシャイン計画(74年) ムーンライト計画(78年) 新エネルギー総合開発機構設立(現NEDO)(80年) 地球環境技術研究開発(88年)	公害への対応 エネルギー安全保障 経済効率性の追求 都市・生活型環境汚染への対応 地球規模環境問題への対応
90年代	背景: 温暖化対策の要請の高まり(地球サミット92年、京都議定書97年) - 地球サミット(リオデジャネイロ)(92年) - 温暖化対策基本法(環境基本法)(93年) - 新エネルギー促進(新エネ法)(97年) - 気候変動枠組条約COP3(京都)(97年) - トップランナー制度導入(省エネ法改正)(98年)	ニューサンシャイン計画(92年) 科学技術基本法(95年) 第1期科学技術基本計画(96～00年) 科学技術振興機構(JST)設立(96年)	環境性の追加 原子力エネルギーの推進 国際的取組への貢献 3Eの同時達成 循環型社会・持続可能性の追求
00年代	背景: 安定供給・効率・環境の同時達成志向の高まり、資源価格の高騰 - 循環型社会形成促進基本法(00年) - エネルギー政策基本法(02年) - エネルギー基本計画(03年)、二次計画(07年)、三次計画(10年) - 京都議定書発効(05年)、第一約束期間(08～12年) - 気候変動枠組条約COP15(コペンハーゲン)(09年) - エネルギー供給構造高度化法(09年) - 新成長戦略(10年)	研究開発プログラム方式(01年) 第2期科学技術基本計画(01～05年) 第3期科学技術基本計画(06～10年)(環境・エネルギー等の分野別推進)	電力市場の部分自由化 エネルギー安全保障の再認識 環境性の再認識
11年 以降	背景: リスク対応を含めた安全性の重視 - 生物多様性条約COP10(名古屋)(10年) - エネルギー・環境会議発足(11年)、革新的エネルギー・環境戦略(12年)、グリーン政策大綱(骨子)(12年) - 再生可能エネルギー固定価格買取制度(12年) - 原子力安全・保安院解体、原子力安全規制委員会(12年) - 省エネルギー法改正(13年) - エネルギー基本計画(四次計画)(14年) - 福島再生可能エネルギー研究所(産総研)(14年)	第4期科学技術基本計画(11～15年)(グリーンイノベーション関連施策) 日本再興戦略(13年) 科学技術イノベーション総合戦略(13年) SIP、ImPACT開始(13年)	安全性の追加(3E+S) 経済再生 東日本大震災からの復興 電力市場改革

※エネルギー・環境会議（2011）、（独）産業経済研究所（2011）、（一社）高度情報科学技術研究機構（n.d.）、CRDS（2014a）他を基にCRDSが作成。

環境政策の変遷

明治以降の日本の環境対策の端緒は上水道の普及に始まる公衆衛生対策であろう。当時は環境問題として意識されていなかったであろうが、明治政府はコレラなど伝染病対策の一環として水道条例を 1890 年に制定した。続いて、1900 年に下水道法と汚物清掃法を制定し、上下水と廃棄物に係る制度を整えた。

政府が公害対策に着手するのは戦後になってからである。1958 年に水質二法（水質保全法と工場排水規制法）、1962 年にばい煙規制法、1967 年に公害対策基本法が制定された。しかし、当時の科学技術の水準では公害と健康影響との因果関係に不確実性が大きく、実用的な公害対策技術も限定的であり、さらには、公害対策が経済発展を阻害するという懸念が政府や財界に根強くあったために、本格的な公害規制は行えなかった。政府が公害対策に本格的に着手したのは 1970 年に開催されたいわゆる公害国会以降であり、現在の日本の環境対策の大枠はこの時点に作られた。さらに、1973 年と 1979 年の石油危機を経て、1979 年にエネルギーの使用の合理化に関する法律（省エネ法）が制定され、日本は本格的に省エネルギーに取り組むことになる。

生態系保全については、古くから入会地や漁業権といった慣習法によって自然資源の保全が図られてきた。1918 年には鳥獣保護及狩猟ニ関スル法律（鳥獣保護法）の制定（旧狩猟法の全部改正）が、1931 年には国立公園法（現在の自然公園法）が制定された。1950 年に制定された文化財保護法は、貴重な生物や生息地などを天然記念物として保護してきた。

80 年代に入ると、産業公害や生活排水などに由来する大気汚染、水質汚濁は一定の解決を見るようになり、汚染物質の環境基準達成率もかなり向上した。その一方で、過去の廃棄物や排水の不適正処理などに起因する市街地での土壌汚染というストック型の汚染が顕在化してきた。このため、2002 年には土壌汚染対策法が制定され、状況把握や対策の実施が定められた。

さらに、80 年代以降、オゾン層の破壊、気候変動、生物種の絶滅に代表される地球規模の環境問題や、野生生物の国際取引、廃棄物の越境移動、酸性雨など、越境する環境問題の重要性が広く認識されるようになった。それらに対処するため国際社会は、国際条約を制定して取り組みを行ってきた。そうした、国際的取り組みの機運がひとつの頂点に達したのが、1992 年にブラジルのリオデジャネイロで開催された地球サミットである。この会議では、持続可能な開発に向けての取り組みが議論され、リオ宣言やアジェンダ 21 が採択されたほか、気候変動枠組条約と生物多様性条約への署名が行われた。しかし、現実に対策を実施する段階に至ると、先進国と開発途上国との間での対立が解消されず、先進国間でも日米欧の足並みは揃わず、開発途上国間でも産油国、中進国、後発開発途上国などの間で意見が分かれ、国際社会が一体となった取り組みが進められているという状況には至っていない。

日本政府は地球サミットの成果に基づいて、1993 年に環境基本法を制定した。また、先進国の中では環境アセスメント法制化が遅れていたが、1997 年に環境影響評価法を制定した。

90 年代になると、それまでの産業公害に象徴される加害者と被害者が明確な問題から、加害者と被害者の関係が不確実なものへと問題の性質が変化してきた。気候変動では、市民のすべてが GHG を発生させている加害者であるが、被害者は将来世代であり、彼らが被る影響には不確実性が大きい。ゴミ問題も同様であり、全員が加害者である一方で、被害者の所在と被害状況は明確でない。そのために、汚染源に加える規制的手法だけでなく、経済的手

法が多く用いられるようになってきた。2012年度から実施された「地球温暖化対策のための税」や、現在、過半数の市町村で実施しているゴミ収集手数料などはその例である。

市民や民間団体（NGO）、事業者の参加が、近年の環境政策の実施の中で重要な位置を占めてきている。環境問題に限らず政府が命令などを定める場合には、1993年に制定された行政手続法によってパブリックコメントを行うことが定められた。環境基本法はNGOや事業者が行う環境保全活動を国が支援することを定めている。法律に基づく環境アセスメントでは住民の意見聴取が定められている。1997年に改正された河川法は河川整備計画の策定にあたっての住民参加を促している。

企業活動の分野では、1996年に制定されたISO 14001に基づく環境マネジメントシステムの認証取得に始まり、環境分野をはじめとする企業の社会的責任（CSR：Corporate Social Responsibility）が強く求められるようになった。CSRは企業の本来活動とは離れた付随的活動である場合が多かったが、近年では、本業を通じて持続可能な活動や社会的問題を解決しようとする共通価値の創造（CSV：Creating Shared Value）を目指す企業も現れてきた。

環境問題は未然防止を最優先とすることは当然であるが、すでに起きてしまった問題の事後処理や今後想定される問題に対する対応策も適切に実施する必要がある。気候変動では、これまで緩和策が重視されてきたが、将来の気候変動が不可避と考えられるようになって適応策が注目されるようになり、2009年のコペンハーゲン・アコードでも言及された。生態系の回復も課題であり、2002年に自然再生推進法が制定されている。さらには、阪神淡路大震災や東日本大震災の経験を踏まえ、防災だけでなく減災のあり方が各方面で考えられるようになってきた。

電力市場の構造変化

発電所で発電された電気は、送電線、変電所、配電線という経路をたどって各需要家に供給されている。そのため、電力供給システムは発電部門（発電所）、送電部門（発電所から変電所まで）、小売（配電）部門（変電所から需要家まで）に大別される。

日本には、発電から小売までを一貫して行う垂直統合型の電力会社が地域ごとに1社ずつ、日本全体では10社ある。1964年に制定された電気事業法の下、これらの一般電気事業者を中心とした独占的な電力供給が行われてきた。しかし、バブル経済の崩壊後は、電気事業の高コスト構造や内外価格差の是正を目的として、表2.2.2に示すように制度改革が行われてきた。その結果、2013年度時点では販売電力量の家庭向けを除く60%が自由化対象になっているが、特定規模電気事業者（PPS）である新電力のシェアは4%にとどまっている。

2011年3月の東日本大震災、福島第一原子力発電所事故を受けて、①電力の安定供給の確保、②電気料金の最大限抑制、③需要家の選択肢や事業者の事業機会を拡大する、ことを目的として、2013年4月に「電力システムに関する改革方針」が閣議決定され、2013年11月に電気事業法の一部を改正する法律（平成25年法律第74号）の附則に「改革プログラム」を定めた。この目的の下で、①広域系統運用の拡大（2015年広域的運営推進機関設立）、②小売及び発電の全面自由化（2016年目処）、③法的分離の方式による送配電部門の中立性のいっそうの確保（2018年～2020年）、の電力改革を行うこととしている。電力自由化に向けては、現在もさまざまな議論が行われており、真に目的を達成するための取り組みが今後とも欠かせないものである（経済産業省資源エネルギー庁、2013a、2013b）。

表 2.2.2 電気事業に関する制度改革の動き

年	改革の主な内容
1995年	・発電部門への新規参入の拡大 ⇒ 発電市場に競争入札制度（競争原理）を導入 ・特定の供給地点における電力小売事業の制度化 ⇒ 特定電気事業制度を創設
1999年	・電力小売部門における一部自由化の実施（契約電力2kW以上） ⇒ 大口需要家に対する電力小売事業を一般電気事業者以外にも開放
2003年	・電力小売部門における一部自由化の拡大（契約電力50kW以上） ・送配電部門に係るルール策定・監視等を行う中立機関の創設 ⇒ 電気事業者や学識経験者からなる電力系統利用協議会 ・全国大の卸電力取引市場（JEPX）の整備
2008年	・卸電力取引所の取引活性化に向けた改革 ・送電網利用に係る新電力（新規参入事業者である特定規模電気事業者、PPS）の競争条件の改善 ・安定供給の確保および環境適合に向けた取り組みの推進（グリーン電力卸取引の導入など）
2013年	・「電力システムに関する改革方針」閣議決定 ・「改革プログラム」：広域的運営推進機関の設立（2015年設立）【第1段階】
2014年	・「改革プログラム」：電気の小売業への参入の全面自由化（2014年法案提出、2016年目途に実施）【第2段階】
2015年	・「改革プログラム」：法的分離による送配電部門の中立性のいっそうの確保、電気の小売り料金の全面自由化（2015年法案提出、2018年～2020年までを目途に実施）【第3段階】

ガス市場の構造変化

国内のガス市場は、天然ガスを中心とした都市ガス事業と石油系の LPG 事業がそれぞれ 65%、35% の販売比率で国内の需要家に供給している。この都市ガス事業はガス事業法での一般ガス事業を指しており、許可を受けた一般ガス事業者が設定された供給区域内の利用者に導管でガス供給を行う事業である。1995 年からの四度にわたる小売自由化に係わる段階的制度改革により、年間契約数量 10 万 m³ 以上の大口利用までは利用者が供給者を自由に選択できるようになっている（図 2.2.9）。これら改正により自由化された大口供給の販売量のうち新規参入者の販売割合が 15.3%（2012 年度）を占めるようになった。さらに総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 ガスシステム改革小委員会においてガスの小売全面自由化を実現する新制度の設計の検討が行われ、2015 年 1 月に報告書として公表された。この報告書によると小売の全面自由化、ガス導管事業に係る制度とガス導管網の整備促進、導管部門の更なる中立性確保の在り方、需要家保安に係る責任の在り方などについてまとめられており、2017 年を目途に実施することが適当とされている。

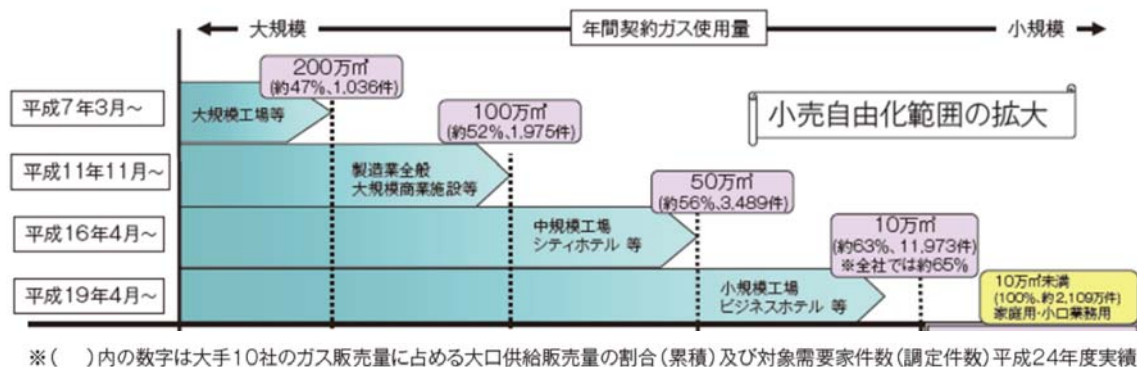


図 2.2.9 ガス事業における制度改革の動き（エネルギー白書、2014）

（2）分野の研究開発施策の推移

エネルギー分野の主要な研究開発関連施策

近年のエネルギー関連主要施策の変遷についてはすでに表 2.2.1 に述べたが、このうち研究開発関連施策について以下に説明を加える。

政府はこれまで、通商産業省（当時）を中心に、第一次石油危機直後に始まった「新エネルギー技術開発計画（サンシャイン計画）」（1974～1992 年）、続く「省エネルギー技術開発計画（ムーンライト計画）」（1978～1992 年）、中央省庁再編により終了した「エネルギー・環境領域総合技術開発推進計画（ニューサンシャイン計画）」（1993～2002 年）と、エネルギー技術の開発に対して長期にわたる研究開発投資を行ってきた。これらの計画に含まれる合計 23 の国プロに対する政府予算は総額 1 兆 4 千億円にも上る（2002 年価格。導入普及対策費を含む）（木村ら、2007 年）。

サンシャイン計画は石油代替を主な目的として、太陽エネルギー、地熱エネルギー、石炭エネルギー、水素エネルギーの 4 テーマを重点技術として推進された。ムーンライト計画は省エネルギー技術の開発を目的として、エネルギー転換効率の向上、未利用エネルギーの回収・利用、エネルギー利用効率の向上、エネルギー供給システムの安定化などを重点的に進めた。これらの計画は、当初は工業技術院（当時）が主体となって推進し、1980 年に「新エネルギー総合開発機構（現在の新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）」が設立されてからは NEDO が中心となって推進した。

ニューサンシャイン計画は、サンシャイン計画、ムーンライト計画および地球環境技術開発計画が、1993 年の国立試験研究所の再編成にともなって統合され作られたものである。そこでは太陽光発電や燃料電池発電などに関する基本技術の確立、研究開発成果の実用化、ならびにその普及の加速化、持続可能な成長とエネルギー環境問題の同時解決を目指した革新的な技術開発などが取り組まれた。

上記 3 計画による効果に関しては、上述の木村ら（2007）による「保守的な見積もり」によれば、実用化に結びついた 10 の国プロによる省エネ効果および CO₂ 削減効果を 23 のすべての国プロへの投資額で除すると、それぞれ約 6 万円/kL と約 2 万円/t-CO₂であったという。同著者らはこれらの結果を踏まえて、同国プロの費用対効果は「概ね妥当であった」と評価している。

2001 年の中央省庁再編で国プロとしてのニューサンシャイン計画は終了し、代わって「研究開発プログラム方式」と呼ばれる方式が導入された。これに伴ってそれまでのプロジェクトもこの新方式の下に再編された。

時期が前後するが、我が国では「科学技術基本法」が 1995 年に制定され、これ以降は 5 年ごとに策定される「科学技術基本計画」に基づき国の研究開発関連施策が進められることになった。第 1 期基本計画（1996～2000 年）では、「地球環境、食料、エネルギー・資源等の地球規模の諸問題の解決に資する科学技術の研究開発を推進する」ことが示された。第 2 期（2001～2005 年）では、エネルギー分野を「国の存立にとって基盤的で、国として取り組むことが不可欠な領域」の一つとして位置づけ、燃料電池、太陽光発電、バイオマスなどの新エネルギー技術、省エネルギー・エネルギー利用高度化技術、核融合技術、次世代の革新的原子力技術、原子力安全技術などの研究開発が推進された。さらに第 3 期（2006～2010 年）では、エネルギー分野は「重点的に推進する分野」の一つとしての資源配分対象となった。直近の第 4 期基本計画（2011～2015 年）では、世界的なエネルギー需給逼迫や地球温暖化問題への懸念が高まる中、環境と経済の両立を図るため、エネルギーの安定供給確保や環境への負荷低減に貢献する省エネ技術、再生可能エネルギー技術、原子力技術などの研究開発を推進することとされた。具体的には、

①エネルギー源の多様化

原子力エネルギーや再生可能エネルギーの利用の推進、水素／燃料電池の研究開発、化石燃料の開発・利用の推進など

②エネルギー供給システムの高度化、信頼性向上

電力供給システム、電力貯蔵、ガス供給システムなど

③省エネルギー対策の推進

民生部門：住宅・建築物、空調・給湯・照明、情報家電・通信機器など

運輸部門：自動車、航空機・船舶など

産業部門：製造プロセス、組立・加工など

などが、重要な研究開発課題として取り組まれた。現在、第 5 期基本計画（2016 年～）の策定に向けた議論が進められており、その中で地球の持続的発展を脅かす、資源・エネルギー問題や地球温暖化・気候変動など諸課題の解決に世界各国との協調、協力の下でしっかりと取り組んでいくことの必要性が示されている（文部科学省、2015）。

また、2013 年には「科学技術イノベーション総合戦略」、「日本再興戦略・JAPAN is BACK-」が、2014 年には「科学技術イノベーション総合戦略 2014」、「「日本再興戦略」改定 2014—未来への挑戦—」がそれぞれ閣議決定された。「日本再興戦略」では、「環境・エネルギー制約の克服」と「クリーン・経済的なエネルギー需給の実現」に向けた取り組みの必要性が示されている。また、「科学技術イノベーション総合戦略」では、「クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現」に向けた重点的課題ならびに具体的な取り組みの内容と工程表が示されている。エネルギーに関連する科学技術関連施策は基本的にこれらの方針に従って検討が行われ、実施されている（首相官邸、2014a, 2014b）。

エネルギー分野の政策における戦略性

エネルギー分野はあらゆる経済・社会の状況（人口動態、産業構造、資源国際市場など）に大きく影響を受ける。そのためエネルギー政策は時代に沿って徐々に変化を続けてきた。また、前述のとおり、関連の科学技術や研究開発も政策によって戦略的に推進され、大きな進展を続けてきた事実がある。

しかし、現状は、そうした国としての戦略性あるいは一体的な動きがやや弱まっているようである。例えば 21 世紀初めの 10 年は、日本の政策は再生可能エネルギーに関する研究開発に消極的な傾向があった。特に地熱と海洋エネルギー（波力など）については、2002 年から東日本大震災に至るまで、国による研究開発事業がほとんど策定されない状況が続いた。

1997 年に成立した新エネルギー法（新エネルギー利用等の開発及び導入の促進に関する法律）では、これらのエネルギーは支援対象外とされ、2008 年の同法改定でも地熱はバイナリー方式（熱水とは別の流体を循環させる方式）のみが対象とされた。その理由は、地熱のフラッシュ方式（熱水でタービンをまわす方式）は技術が開発済みであるため、海洋エネルギーは技術が未熟で実用化に程遠いためとされた。

太陽光は新エネルギー法の対象となり研究開発は続いたが、1994 年から実施された住宅用太陽光発電導入補助事業が 2005 年度で打ち切られる（その後 2009 年度に再開）など普及政策には一貫性がなかった。このことが日本の太陽光発電関連の製造業の国際競争力を伸び悩ませることにもなった。

電力に関しては、インテリジェント化と低い故障率により高質の電力網を達成していたが、電力供給を地域独占とする制度を前提としていたため、少数の集中大型発電プラントと多数の需要者を意図した電力網に特化していた。そのため再生可能エネルギーやコジェネレーション（熱電併給）などの、多数の分散した電源をサポートするスマートグリッド技術に関しては、基礎となる技術研究は行われていたにもかかわらず、応用研究が停滞していた。2010 年になってようやく経済産業省が「次世代エネルギー・社会システム実証事業」として実証実験を開始した。

そもそも、国民各層に同意、共有されるエネルギー総合計画は見当たらず、それを基に立案されるエネルギー研究開発総合計画も存在しない（CRDS、2012）。エネルギー分野は科学技術政策上の重点分野の 1 つとして位置づけられてはきたものの、府省が連携した一体的な取り組みは十分機能していない。こうした中、2011 年 3 月の東日本大震災と福島第一原子力発電所事故の発生は未曾有の広域災害をもたらし、我が国全体の社会・経済・行政システムの再構築を迫るものとなった。米国では 1977 年にエネルギー省を、英国では 2008 年にエネルギー・気候変動省を設置し、単一の省の傘下でエネルギー関連課題を総合的に議論し計画を策定する体制を整えている。エネルギーの安定供給と利用に加え、地球環境問題、社会経済問題や産業の国際競争などを含めた総合的な視点から、我が国のエネルギー総合計画立案を進め、研究開発から市場導入までの各セクターの協働体制を築くことが求められる（CRDS、2012）。

環境分野の主要な研究開発関連施策

戦後の急速な高度経済成長期に発生した各地の深刻な公害問題を背景に、1967 年に公害対策基本法が成立した。本法律は、公害対策の総合的推進を図り、もって国民の健康を保護す

るとともに、生活環境を保全することを目的としており、個別の発生源への対応にとどまらず、未然防止や環境の保全への各種取り組みがなされることとなった。科学技術においては、政府が公害の防止に資する科学技術の振興を図るため、試験研究の体制の整備、研究開発の推進およびその成果の普及、研究者の養成など必要な措置を講ずることを義務付け、国の委託調査研究では、調査測定に関するものから、有害物質の人体および農林水産物への影響など環境の保全に関するもの、発生源対策としての処理技術に関するものまで広い範囲にわたり実施された（文部科学省、1969）。

しかし、オゾン層の破壊や気候変動、生物種の絶滅などの地球規模の環境問題や廃棄物問題などの複合的な問題が認識されるようになると、従来の施策の枠組みを超えた対処が求められるようになる。ブラジルで開催された地球サミットの成果を踏まえ、環境の保全について基本理念と施策の基本事項を定めた環境基本法が 1993 年に成立した。環境基本法では、基本理念の一つとして、環境の保全が科学的知見の充実の下に環境保全上の支障の未然防止を旨として行われなければならないと定めている。また、環境保全に関する基本的施策として、環境の変化の機構の解明や負荷の低減に関する技術に加えて、環境が経済から受ける影響等を総合的に評価する方法の開発等、自然科学のみならず、人文・社会科学の分野も通した環境保全に関する科学技術の振興を図ることを規定するとともに、そのために国が試験研究体制の整備や、研究開発の推進及びその成果の普及、研究者の育成等の措置を講ずることを定めている。また、環境の状況の把握などのための調査の実施や監視等の体制の整備についても、国が講ずるべき施策として位置付けている。

なお、環境基本法の第十五条では、環境の保全に関する基本的な計画（環境基本計画）を定めることを政府に課しており、環境基本法に基づいて 1996 年 12 月に閣議決定した「環境基本計画」では、科学技術の振興を環境保全に係る共通の基盤的施策の重要な柱と位置付けた。現在 2012 年に閣議決定された第四次環境基本計画が実施されており、以下の 9 つの優先的重点分野や震災復興、放射性物質による環境汚染対策が示されている。

➤ 9 つの優先的に取り組む重点分野

1. 経済・社会のグリーン化とグリーン・イノベーションの推進
2. 国際情勢に的確に対応した戦略的取組の推進
3. 持続可能な社会を実現するための地域づくり・人づくり、基盤整備の推進
4. 地球温暖化に関する取組
5. 生物多様性の保全及び持続可能な利用に関する取組
6. 物質循環の確保と循環型社会の構築
7. 水環境保全に関する取組
8. 大気環境保全に関する取組
9. 包括的な化学物質対策の確立と推進のための取組

➤ 震災復興、放射性物質による環境汚染対策

- ・ 東日本大震災からの復旧・復興に際して環境の面から配慮すべき事項
- ・ 放射性物質による環境汚染からの回復等

日本の科学技術政策の中心となる科学技術基本法は、既述の通り 1995 年に制定され、この法律に基づき 1996 年から 4 期にわたり科学技術基本計画が策定されてきた。第 1 期（1996～2000 年）では、「地球環境、食料、エネルギー・資源等の地球規模の諸問題の解決に資す

る科学技術の研究開発を推進する」ことが示された。第2期（2001～2005年）では、国家的・社会的課題に対応した研究開発の重点化が図られ、重点化する4領域の1つに、人の健康、生活環境の保全、人類の生存基盤の維持に不可欠であるとして環境分野が指定された。第3期（2006～2010年）では、引き続き重点推進4分野の一つとして環境分野が指定され、優先的な資源配分対象とされた。そして現在の第4期（2011～2014年）では、従来の「分野別推進戦略」から国が取り組むべき政策課題をあらかじめ設定する「課題解決型推進戦略」に転換し、環境・エネルギー分野でのイノベーションを目指す「グリーンイノベーションの推進」を掲げている。「グリーンイノベーションの推進」のうち「社会インフラのグリーン化」では次の事項をあげている。

- ・ 高効率な交通及び輸送システムの構築
- ・ 社会インフラと一体となった巨大ネットワークシステム
- ・ 総合水資源管理システムの構築と実証実験・海外展開
- ・ 資源再生技術の革新、レアメタル、レアアース等の代替材料の創出に向けた取組
- ・ 地球観測、予測、統合解析技術の強化と情報活用
- ・ 気候変動や大規模自然災害に対応した、都市や地域の形成、自然環境や生物多様性の保全、森林等における自然循環の維持、自然災害の軽減、持続可能な循環型食料生産の実現等に向けた取組

この基本計画の方向性のもと、毎年策定される科学技術イノベーション総合戦略や、科学技術イノベーション総合戦略に基づき編成される、科学・技術関係予算の重点化・効率化のための科学・技術重要施策アクション・プランにおいても、環境分野に関する記載があり、環境省による環境研究総合推進費のほか、各府省などによる競争的資金においてさまざまな研究開発が実施されている。

その他、生物多様性国家戦略 2012-2020（2012年9月閣議決定）や第三次循環型社会形成推進基本計画（2013年5月閣議決定）、環境エネルギー技術革新計画（2013年9月総合科学技術会議決定）などの国家戦略や計画でも、環境に関する研究開発の方向性について言及している。

（3）俯瞰区分ごとの技術の動向

エネルギー分野の特徴

エネルギーは我々の生活に必要な不可欠なものであり、社会経済活動を支える重要な役割を担っている。それゆえにエネルギーに関連する技術開発テーマは実社会が直面するさまざまな課題に立脚したものが大半である。また、社会導入時の種々の課題が技術開発の大きなボトルネックとなる事例もしばしばみられる。

このように、エネルギー分野はニーズ指向の科学技術分野であり、エネルギー関連技術は材料からシステム技術までさまざまな研究領域の要素技術を複雑に組み合わせた総合技術であるといえる。そのため、関連する学術分野は工学、理学、社会学、経済学、行政学など多岐にわたっており、課題解決には多様な科学技術知識の動員が必要である。

エネルギー分野における社会的な課題を考えると、エネルギーそのものは目的ではなく、地球環境が持続的であり、かつその中で人々が生き甲斐をもって暮らせる豊かな社会を築くための手段である、という点は常に留意すべきと思われる。しかしながら、エネルギーを利

用する実際の場面では、一般に、その由来が問われることのないままに、大半が動力、電力、あるいは熱として最終消費される。したがって安価で、大量で、かつ安定な供給だけがエネルギーに対する要件となりがちであるが、持続的なエネルギーの利用という観点からは、環境に対する負荷の軽減や安全への配慮も欠かせない。

以上より、エネルギー分野における科学技術、研究開発は深刻化する資源制約や環境制約を克服し、安定かつ経済的なエネルギー需給を安全に実現することにより、持続可能で豊かな人間社会を構築していくことが目的といえる。我が国におけるエネルギー分野の研究開発は、これまで述べてきたような経緯の中で産学官が連携して一定の技術進展を達成してきた。

環境分野の特徴

環境分野もエネルギー分野と同様に、関連する学術分野が多岐にわたることや社会での課題に立脚した技術開発が行われることなどの共通点をもち、社会の変化に応じてその特徴は変遷してきた。

環境は人類の生存基盤であるが、世界経済の拡大、人口の増加、技術の多様化などに伴い、環境問題は多様化している。そして、多様化した環境問題は相互に関係し合い、複雑化している。例えば、気候変動は、水循環を変化させ、生態系に影響を及ぼすが、それがさらにフィードバックして気候変動を進ませる結果をもたらす可能性がある。さらに、経済のグローバル化に伴い、環境問題もグローバル化している。先進国の厳しい炭素排出規制が開発途上国の炭素排出を増加させる炭素リーケージのような問題もあれば、ある国の大気汚染が直接に近隣諸国に影響を及ぼすこともある。このような問題は、一国だけの努力では解決不可能である。

一方で、科学技術の進歩は、新たな環境問題の原因となるとともに、環境問題を解決する手段を提供してきた。オゾン層破壊はその一例である。科学技術が生み出した CFC などのフロンガスは成層圏のオゾン層を破壊することが、科学者によって明らかにされた。そして、オゾン層破壊の実態が明らかになることで、世界は対策に乗り出し、新たな技術によって CFC を代替することが可能となった。現在、オゾン層は徐々にではあるが、回復の方向に向かうと考えられている。

また、環境問題は人間の経済活動が原因であるために、科学技術だけで解決することも困難である。問題解決の技術が社会的・経済的に受容可能であるかを検証することを避けて通ることはできない。例えば、原子力発電は地球温暖化対策や化石燃料の消費削減に有効な技術であるが、その社会的受容性が問われている。

環境分野の特徴は研究者コミュニティの構成にも現れている。一つの例として「環境科学会」の発足があげられる。本学会発足のきっかけとなった 1977～1987 年実施の科学研究費補助金「環境科学特別研究」では、スタート以来参加経験者の実数は 2,800 名を超え、おのおのが従来固有の学会において行ってきた環境関連の研究を一堂に集める役割を果たした。この「環境科学特別研究」が終了するにあたり、それまでの研究成果の蓄積と人的な集積を存続させることが動機となり、1987 年に環境科学会が発足することとなった。現在も専門家・研究者の有機的連携のもと、学際的かつ総合的に調査・研究しその成果の普及と啓発を進めることを目的に運営されている（2013 年 12 月末現在の学会員 1,076 名）（環境科学会、n.d.）。一方で、固有の分野においても研究開発は進められ、さまざまな学会の中で環境に関

する分科会などの組織が存在している。環境工学分野では、各学会の連携を深めるための取り組みとして「環境工学総合シンポジウム」が毎年開催されている。2014年には24回目のシンポジウムが、約40の学会・団体の協賛のもと実施された（日本機械学会、n.d.）。研究機関連携の例としては「環境研究機関連絡会」があげられる。環境研究に携わる国立研究所や国立大学法人の情報交換・連携を目的に2001年に設置され、これまで12回の環境研究シンポジウムが実施された（環境研究機関連絡会、n.d.）。

環境問題の解決には、自然科学的視点に加え人間的社会的事象をも含めた文理融合型研究開発が必須であることから、人文科学・社会科学系分野でも研究開発が実施されてきており、研究者はあらゆる分野にわたり分布している。環境分野は問題解決を目指す視点からの取り組みが特に必要とされることから、分野やフェーズを超えた統合的な視点で課題解決型の研究開発や取り組みを進める体制がとりわけ必要とされている。

エネルギー供給区分

エネルギー供給の観点からは、まず発電機器・プラントの効率の継続的な改善があげられる。とりわけ火力発電プラントの熱効率は図2.2.10の通り大きく改善されてきた（経済産業省資源エネルギー庁、2013c）。蒸気タービン（ST）によるシンプルサイクル（1機関）からガスタービン（GT）と蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル（2機関複合）へと変わり、現在は高温型燃料電池である固体酸化物形燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）を付加したトリプルコンバインドサイクルが開発段階に入り、実用化に向けたロードマップが描かれている。

ガスタービンの熱効率向上は高温化、そして高圧化により進められてきた。前述のムーンライト計画では、特に材料・伝熱技術など高温化技術が開発され、その後も公的な研究開発投資を通じて高温化が進められた。火力発電はCO₂の排出に関しても社会からの強い要請がある。そのため技術開発には、効率向上に加えてCO₂の排出量削減も大きな課題となっている。熱効率の向上はCO₂排出量の削減にも寄与してきたが、さらにCO₂回収技術も検討されている。しかし、CO₂回収による効率低下とコスト上昇が避けられないのが現状である。

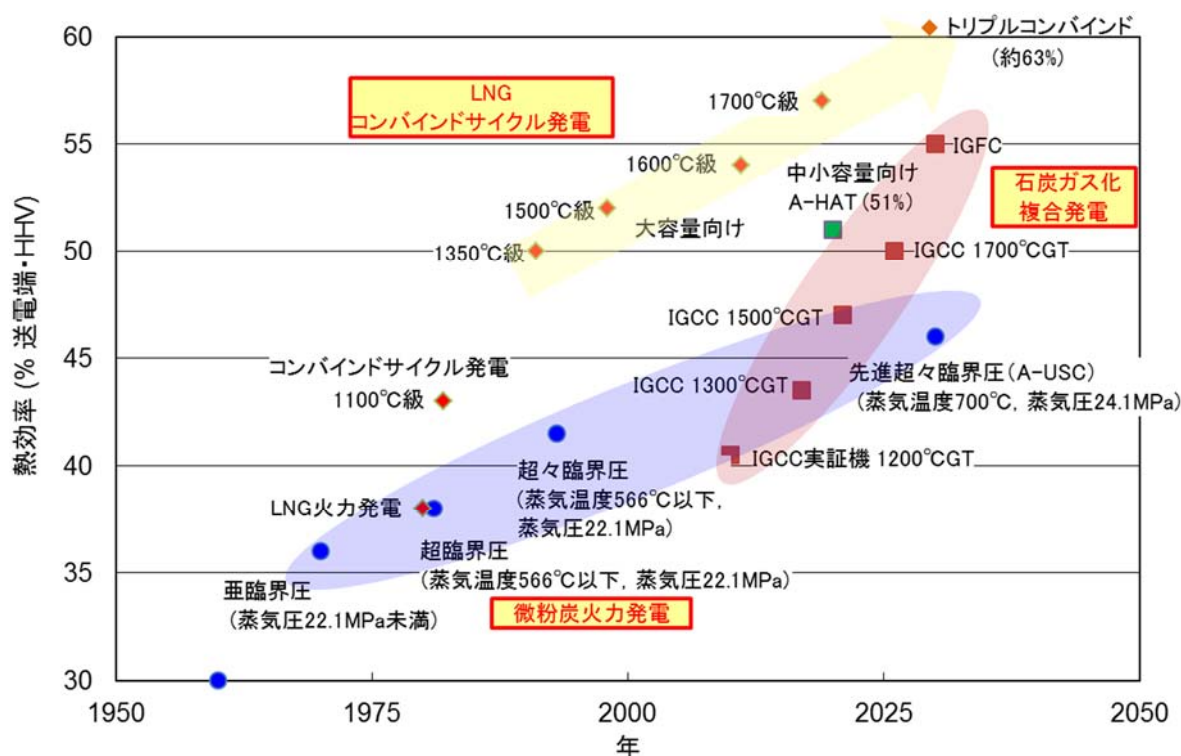


図 2.2.10 発電効率の変遷（経済産業省資源エネルギー庁、2013c 他）

再生可能エネルギーをみると、我が国における導入量は2012年6月末の累積で2,060万kWに達した（資源エネルギー庁、n.d.）。内訳は、太陽光約580万kW（内住宅用470万kW）、風力約260万kW、中小水力約960万kW、バイオマス約230万kW、地熱約50万kWであった。前述の通り、2012年7月のFIT開始以降、新たに1,582万kWの再生可能エネルギーが稼動し、7,401万kWの設備認定がされている。しかしながら、そのほとんどは設備設置に時間を要しない太陽光が中心となっている。風力は環境アセスメントに時間を要すること、地熱は環境アセスメントに加え、地熱資源の採掘リスクや設備設置のリードタイムが長いことから、わずかな導入にとどまっている。また、海洋エネルギーは小規模な実証試験が開始されているが、商用機の導入にはさらに時間を要すると思われる。こうした再生可能エネルギーの日本社会への導入、普及はまだ十分ではない。これまで技術開発は主として性能の観点から進められてきた。例えば太陽電池であれば変換効率とコストの改善が重要であるが、研究開発は効率向上を中心に進められてきた。しかし、社会への導入、普及に際してはコストや系統連携の問題が大きくなっている。

CO₂排出削減技術にもさまざまな技術進展があった。歴代政府は京都議定書の批准に伴い、中期ないし長期のGHG排出削減目標を設定してきた。これらの目標の達成に向け、我が国では多様な取り組みが進められてきた。例えば、エネルギー供給側では一次エネルギー源に占める原子力の割合増加や再生可能エネルギーの導入促進が図られた。バイオマスからの代替燃料製造に関する研究開発なども進められた。また利用側では、産業部門を中心に機器の効率向上などを通じて排出削減が進められ、プラグイン・ハイブリッド自動車や電気自動車の普及に向けた研究開発も進められた。

さらに、より直接的なアプローチとして CO₂回収貯留技術（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）の研究開発も進んだ（経済産業省、2008）。CCS では、CO₂を分離・回収し、液化・輸送した後に地中深くにある石炭層や帯水層などに貯留する。我が国では分離・回収技術は研究が進み実証試験も多数行われるようになったが、貯留に関しては世界に比して遅れている。CO₂排出削減対策としては、水素エネルギー社会の実現に向けた水素製造技術や、有用物質（燃料油、水素など）とエネルギー（電力、蒸気など）を併産するコプロダクション技術などに関する研究開発が進められているが、本格的な普及には至っていない。図 2.2.11 にエネルギー供給区分の現状俯瞰と課題を示す。



図 2.2.11 エネルギー供給区分の現状俯瞰と課題

都市ガスの天然ガス化が進んだ 80 年代以降、液化天然ガス（LNG）のタンカーでの輸入が進められた。その後、全国各地に LNG 基地が設けられ、主要都市の都市ガス天然ガス化（13A 規格あるいはそれに類する規格の熱量、かつ一酸化炭素を含まない）が進んだ。発電向け天然ガス利用は、ガスタービン・蒸気タービン・コンバインドサイクル発電の発展に伴い増加した。一方、石油危機以降、石油に代わる液体資源を模索する中、戦中日本でも実施されていた人造石油合成が再び脚光を浴びることとなった。石炭の直接液化が有望とされ、NEDO による大型プロジェクトが進行したが、商業化には至らなかった。天然ガスあるいは石炭ガス化ガスからの間接液化は、海外（石炭：南アフリカ、天然ガス：マレーシア、カタールなど）で進められたが、我が国では小規模なテストプラント建設にとどまっている。その他、ジメチルエーテル直接合成なども検討されたが、こちらも 100 t/日規模のテストプラントの建設にとどまり、商業化には至っていない。また、非在来型天然ガスとして、電

力、ガス、商社など、米国、カナダからのシェールガスの権益確保、輸入の検討をしており、また、メタンハイドレートを試掘に関する研究、プロジェクトが進んでいる。

石油については、自動車の普及に伴い、ガソリン・軽油消費が増え、これより重い重油は船用や発電用として用いられてきたが、発電用重油焚きの縮小と需要の白油化（＝軽質化）に伴い、接触流動分解が進められ、ガソリン・ナフサ増産、重油減産の方向性がとられてきた。1990年前後に3ナンバー車ブームがおこり、排気量の大きな自動車が増えガソリン需要は増加したが、2000年代に入り低燃費化の流れ、軽自動車普及が進み、ガソリン需要は一転して減少し続けている。このような中で、従来は連産型として知られた石油精製を最上流とする化学産業は、原料調達の場合を海外へとシフトさせ、エタンクラッカーによるエチレンからのポリエチレン製造・輸入が進められると、石油精製のバランスが大きく崩れることとなった。今後ともナフサクラッカーの停止、トッパー（石油蒸留塔）の設備廃棄が計画されており、また石油精製業界全体として設備投資が小さい状況が続いている。

石炭については、戦後利用が拡大し、とりわけ石油危機以降、発電での利用が拡大してきた。戦後、産炭地域振興政策により、北海道および九州の電力では旧式の石炭火力が多用されてきたが、炭層が深いことに起因する70年代の相次ぐ炭鉱大型事故とモータリゼーションが重なり、我が国の石炭採掘はほぼ終焉し、現在は北海道釧路海底での採炭および三笠などでの小規模露天掘のみが残る。一方で、海外からの安価な一般炭輸入が趨勢を占め、微粉炭火力における超超臨界圧蒸気プラントによる高効率発電が拡大してきた。最近では海外一般炭・原料炭の山元寡占化が進み、大手三社が価格支配権を握るにつれ、褐炭など未利用低位石炭資源の利用拡大が進められてきた。我が国が手掛けるインドネシアにおける褐炭アップグレーディングは商業化フェーズに近いところまで来ている。製鉄分野においては、コークス炉齢が上がり、平均して40年程度となってきたため、SCOPE21などのプロジェクト成果を基により高効率なコークス炉化が進められているところである。

バイオマスは、木質系、草本系、農業廃棄物、建築廃棄物、食品廃棄物・厨芥（ちゅうかい）、黒液、下水汚泥などの種類がある。90年代に我が国ではブームとなり、木質系については2000年代に入り急速に利用拡大が叫ばれ、石炭研究者の多くが木質バイオマス転換の研究に邁進した。2002年より農林水産省を中心として進められたバイオマス・ニッポン政策の成果があまり上がらなかった反省や、木質系バイオマス利用の難しさなどから、エネルギー分野で普及するに至っていない。草本系は我が国では賦存量が少ないが、アメリカやブラジルではトウモロコシ、サトウキビから作られるバイオマスエタノールがガソリン添加剤あるいは単独燃料として注目されてきたが、アメリカではローマ食糧サミット以降、食糧との競合が問題視されている。農業廃棄物は量が多くないため我が国では利用があまり進まず、建築廃棄物はCCA（Chromated Copper Arsenate、防蟻剤に含まれる銅、クロム、ヒ素）の問題があり、食品廃棄物・厨芥は含水率の高さから熱量が低いため発酵が主な利用となっている。黒液は古くからボイラー炊きによるエネルギー回収に用いられてきたが、古紙回収率向上に伴い減少している。2010年にバイオマス活用推進基本計画が策定された一方で、2011年2月にはバイオマス・ニッポン総合戦略の失敗がうたわれるなど、厳しい状況にある。現在は海洋国であり世界6位の排他的経済水域（EEZ）を有する点を生かした海洋系のバイオマスならびに淡水系の油産生藻類が注目されるが、実用化には遠い。バイオマ

ス発電については、FIT の開始に伴い、製紙業界や社有林を有する企業が、既存ボイラーでの混焼用燃料、新規ボイラーによる専焼発電による計画が進んでいる。

再生可能エネルギーでは、1974 年に始まった「サンシャイン計画」以来、太陽光に関する数多くの研究プロジェクトが行われてきた。また、90 年代半ばより住宅用太陽光に対する補助金事業が始まり国内の導入量も徐々に増加していったが、2005 年以降に打ち切られたことにより国内市場が縮小した。それまで太陽電池の世界シェアの約半分をもっていた日本のメーカーが弱体化し、ここ数年の間に低価格化で成功した中国や台湾のメーカーが市場を大きく占めるようになった。欧州で政策的に導入された再生可能エネルギーの FIT が我が国でも 2012 年 7 月より始まったが、そのほとんどは太陽光となっている（資源エネルギー庁プレスリリース、2015 年 2 月末：2012 年 7 月以降の再生可能エネルギー導入量 1,493 万 kW のうち、約 96%が太陽光、約 79%が非住宅用）。太陽電池はこれまでシリコン系・化合物系・有機系が開発され、大学・公的研究機関や企業では変換効率の向上や低コスト化を目指して研究開発を続けている。現状では結晶シリコン系が最も変換効率が高く、耐久性や信頼性にも優れる（NEDO、2014）。最近では、有機無機ペロブスカイトの新型太陽電池や集光型太陽電池など、高効率、低コスト太陽電池の開発も盛んに行われている。人工光合成の研究は、まだ基礎研究段階であるが、我が国が世界をリードしている。

太陽熱利用については、我が国では 70 年代後半から 80 年代にかけて家庭用太陽熱温水器の普及が進んだが、販売体制の問題などにより急速に縮小した。一方、中国や欧州では広く普及が進んでいる。集光型についても香川県で実証試験が行われたがすでに終了、解体されている。一方、海外では我が国の技術を生かしたタワー集光型・ダウンビーム集光型・トラフ型などの利用構想が拡大している。

風力は、石油危機を契機として少しずつ導入が進められたが、90 年代まではその設備容量は非常に小さいものであった。一方で、1995 年の風力発電装置への補助事業、1997 年の地域新エネルギー導入促進事業や RPS 法などをきっかけとして我が国の風力設備容量は急速に拡大し、95 年に総容量が 1 万 kW 程度であったものが 97 年には 2 万 kW に、2000 年には 14 万 kW に、そして 2006 年には 149 万 kW まで一気に拡大した。一方、2007 年改正建築基準法、2010 年新規の風力発電への助成制度中止などがきっかけとなり、設備容量は伸び悩み、2014 年 6 月の時点で約 260 万 kW となっている。また、風況の悪い地域に設置した風車が問題を起こすケースや、風力の事業体が身売りしたケースなどが報道されている。風況は地域によって大きく異なり、北海道・青森・静岡・鹿児島といった地域の設備容量が多い。またこれまで陸上風力が主体であったが、今後は洋上風力を中心に導入が図られており、長崎県五島市杵島沖、千葉県銚子沖、福島県沖や茨城県沖で実証試験が行われている。この分野では欧州がリードしているが、福島県沖、茨城県沖では浮体式の実証試験が進んでいる。

海洋エネルギーや地熱は豊富な資源賦存量が我が国にはあるとみられるが（環境省、2011a、2011b）、前述の通り国の新エネルギー政策により約 15 年間停滞していた。したがって、海洋エネルギーは現在の導入量はゼロであり、地熱は 1990 年以降は発電プラントの新設が皆無であった。いずれも近年になって研究開発予算が措置されるようになり、また地熱開発において最大のネックである国立公園などの規制も環境省が一部で緩和を認め

（2012 年 3 月）、洋上風力や海洋エネルギーの導入促進に向けて府省横断で取り組むことが

決定している（総合海洋政策本部、2014）。なお、地熱発電用タービンの世界シェアでは、日本メーカーが約 7 割と圧倒している（Bertani、2012）。

再生可能エネルギーを導入する上で重要となる系統連携技術については、FIT 開始により、特に太陽光の設備申し込み、認定が殺到したことから、電力会社が一時受け入れを中断するなど、全体の規模や需給調整、費用負担の課題が顕在化しており、制度の見直し、技術課題の整理などの検討が行われている。

また、2014 年 4 月のエネルギー基本計画では、「水素社会の実現に向けた取組の加速」として、家庭用燃料電池（エネファーム）を 2020 年に 140 万台、2030 年に 530 万台導入、2015 年から商業販売が始まる燃料電池自動車導入促進のため、水素ステーション 100 箇所整備、水素の大量貯蔵・長距離輸送、燃料電池や水素の需要を促す水素燃焼タービンなどの技術開発、標準化、規制見直しが進められている。また、水素輸送技術開発として、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP：Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program）において、2014 年よりエネルギー・キャリアプロジェクトが開始された。

エネルギー利用区分

日本のエネルギー消費は産業部門、民生部門、運輸部門に分けられる。

産業部門は最終エネルギー消費量全体の約 4 割を消費しているが、製造業を中心とした経済原理に基づいた消費エネルギーの削減や効率改善が継続的に行われてきた。さらには経団連による自主行動計画（日本経済団体連合会、n.d.）の策定など、今後も企業努力による消費エネルギーの削減は継続されていくものと考えられており、以降は民生部門と運輸部門を中心に述べる。

民生部門や運輸部門については、高度経済成長時代からのライフスタイルの変化による快適性・利便性の追求や世帯数の増加など社会構造の変化によってエネルギー消費は増大した。これに対して政府は省エネ法を 1998 年に改正し、家電製品や自動車を対象にした関連基準の設定において、「その時点で上市されている製品のうち最もエネルギー消費効率が優れているものの性能を勘案する」とするトップランナー制度を導入した。トップランナー制度は民生、運輸両部門の省エネを大いに進めた。とりわけ 2000 年代になってその効果が顕著に現れ、これまで増勢傾向にあった両部門のエネルギー消費は横ばいあるいは減少に転じた。いずれの機器でも省エネ性能は向上し、例えばエアコンのエネルギー消費効率は 1997 年度から 2004 冷凍年度¹において 67.8%もの大幅な改善率があった。電気冷蔵庫のエネルギー消費効率も 1998 年度から 2004 年度の間で 55.2%の改善率、さらには 2005 年度から 2010 年度の間でも 43.0%と、着実な性能向上が進んできた（経済産業省資源エネルギー庁、2014e）。またガソリン自動車でも効率改善が進んでおり、1999 年に 13.2 km/L だった平均新車燃費は 2012 年には 21.1km/L にまで向上した（国土交通省、n.d.）。同制度の導入以後、トップランナー対象機器は拡大し、現在対象となる機器は 28 機器となっている

（2015 年 1 月時点）。なお施策面においては、家電機器における省エネ性能ラベリング制度や自動車における燃費達成基準の環境ラベルなどの省エネ性能の「見える化」や、家電エコポイントやエコカー減税などの補助金や税制面における金銭的便益が、省エネ機器の普及を加速させた。2013 年には、住宅や建築物の断熱性能底上げを目指したトップランナー制度

¹ 冷凍年度とは 10 月～翌年 9 月を単位とした区切り方のこと

の建築材料などへの拡大、および電気需要の平準化推進などを追加した省エネ法の改正が行われている（経済産業省資源エネルギー庁、2014d）。

民生部門・運輸部門の現状のエネルギー需給状況について図 2.2.12 に示す。

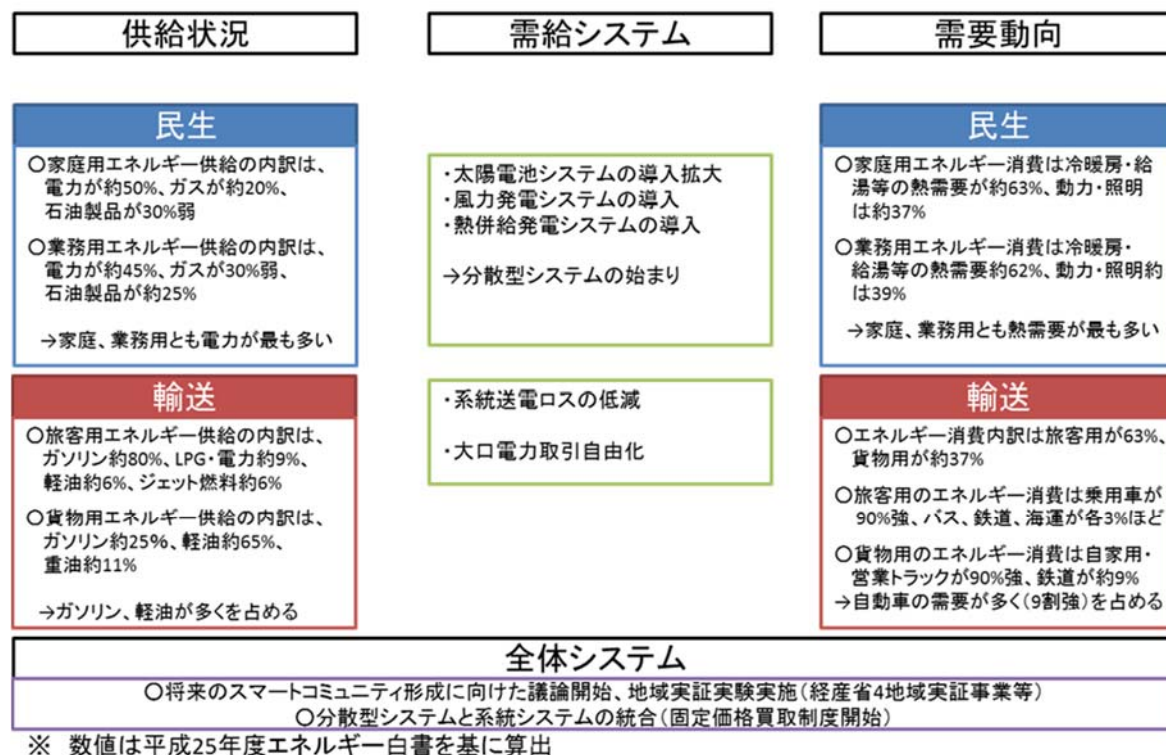


図 2.2.12 エネルギー利用区分（民生・運輸部門）の需給の現状

（経済産業省資源エネルギー庁、2014b を基に CRDS が作成）

民生家庭部門のエネルギー消費量は、機器のエネルギー消費効率向上などの影響などもあり、2000 年以降は横ばいないしは微減傾向にある。家庭部門の用途別のエネルギー消費量の内訳は、動力・照明他 4 割弱、給湯 3 割弱、冷暖房が 3 割弱である。欧米の先進諸国と比べると、日本の世帯当たりの家庭のエネルギー消費量は少ない（環境省、2008）。特に暖房用途の消費量は欧米諸国に較べて極めて少ない。これは、日本では全館空調を前提としなかった建築様式ももちろん大きい、多くの省エネ性能に優れた機器の普及が進んでいることも原因の一つと考えられる。給湯や暖房用途の低品位の熱需要に対しては、分散型で需要端における総合的なエネルギー効率を改善できるコージェネレーション・システムの導入なども始まっている。家庭用燃料電池の導入により電気と同時に生成される熱が貯湯層に蓄えられ、給湯、風呂、床暖房などに有効利用されるようになった。技術面ではかなり確立されているが、普及拡大のためにはコスト面の課題が大きい。また、省エネルギーに大きく貢献する建築物の断熱対策が建築基準の強化とともに推進されているが、家庭における暖房需要が少なく、また工事費用に対する暖房費削減のようなエネルギー面での直接的な費用対便益が少ないため、断熱住宅・建築物の普及にはコストバリエーション面での課題がある。

民生部門へのエネルギー供給の約半分を占める電力について、電力事業としての発電効率の向上と系統送電ロスの低減が図られる一方で、大口の需要家から順に自由化が進められ、

競争原理に基づく経済合理性の追求が始まっている。小口の需要家への供給に対しても競争原理を導入すること、分散型電源の普及促進、再生可能エネルギー由来の電力への変換、などが課題となってきた。エネルギー需給システム全体については、地域における電力、ガス、水道などの総合的な運営を考えていく必要があるが、これまでは行政区分も分かれておりそれぞれが個別に運営されてきた。将来のスマートコミュニティ形成に向けた課題発掘のために、経済産業省による国内4地域による次世代エネルギー・社会システム実証実験（新エネルギー導入促進協議会、n.d.）など、ここ数年の間に国内外で実証実験が多く行われてきた。今後はその実験から得られたデータや知見から、何が本当の課題で、研究開発をすべきかを検証した上で、世の中に広く普及させるための手段を考えていく段階である。

運輸部門については、供給面の内訳としては主に乗用車で使われるガソリンが部門全体の60%弱を占め、主に貨物用で使われる軽油が30%弱を占める。需要面においては、部門のエネルギー消費の40%弱を占める貨物用は1990年後半から減少に転じており、60%強を占める旅客用（うち85%強が乗用車）も2000年以降に徐々に減少している。これは国内における乗用車の保有台数は2000年以降も増え続けている一方で、トッパンナー制度による燃費改善や、小型化、軽自動車への乗り換えなどによるためと考えられる。石油危機以降、乗用車のエンジン改良ならびに軽量化や排気ガス浄化対策を中心とした省エネ・環境対策が大きく進展し、我が国は技術を軸に事業面でも世界のトップに躍り出た。90年代以降に地球温暖化の問題が顕在化してくるに従い、いっそうの省エネ・脱石油化を図るべく、電動化技術を用いる次世代自動車の開発が進展した。ガソリンと電気の2つの動力源をもつハイブリッド車(HV)は、1997年に市販化され、販売台数を伸ばし続けてきた。2013年度の年間販売台数は100万台を超え（次世代自動車振興センター、n.d.）、日本で年間に販売される自動車（軽自動車含む）の約5分の1を占めるようになってきた。一方で電気自動車(EV)は普及があまり進んでおらず、2013年度の年間販売台数は2万台弱にとどまっている。特に車両価格と航続距離の面での課題が大きいと考えられる。さらに、プラグイン・ハイブリッド車(PHV)や、燃料電池自動車(FCV)の市場導入も始まっている。これらの次世代自動車をガソリン自動車並みの性能やコストを実現し普及させるためには、二次電池や水素貯蔵、軽量化、熱マネジメントなどの技術開発とともにインフラの整備が必要とされている。なお、2030年においても内燃機関を用いる自動車（HVやPHV等含む）の販売数が世界で約8割と予測されている（IEA、2012a）。欧州では産学協同プロジェクトが先行しているが、日本でも2014年より内閣府のSIPで産官学協同プロジェクトが始まっている。そのエネルギー効率の向上は引き続き課題であり、小型・軽量化やエンジンの高効率化などによる燃費性能の向上について世界的に競争が激化している。

原子力区分

50年代に商業用原子炉（第1世代）が運転開始されてから、安全性の向上などを目的として、原子炉の開発は進展してきた。我が国初の商業用原子力プラントは東海原子力発電所（16.6万kW）であり、1966年に運転が開始された。その後、「軽水炉改良標準化計画」（1975～85年）のもと、使用済みウラン燃料の国内での再処理・リサイクル（準国産エネルギー資源化）のほか、原子力発電技術や原子力プラントなどの機器・設備を国産化して自主技術化しようとする取り組みを展開した。これを通じて、米国技術に依存していた軽水炉

を、日本独自の技術や技術管理システムで置き換えるようになり、結果として日本型軽水炉とも言われる改良沸騰水型原子炉（ABWR）を営業運転させるなどに至った（（一社）高度情報科学技術研究機構、n.d.）。

2010年3月（2009年度）時点での日本の原子力発電所は、総計54基、認可出力（設備容量）は4884.7万kW、設備利用率は65.7%だった。しかし、2011年3月11日に発生した東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所の事故により、福島第一原子力発電所1号機～6号機が廃止となったため、2014年4月時点では、総計48基、許認可出力は4426.4万kWとなっている（経済産業省資源エネルギー庁、2014f）。なお、2014年12月現在、福島第一原子力発電所事故の影響により2013年9月の関西電力大飯原子力発電所3、4号機の停止以降、商用原子力発電所による発電が行われていない。

世界の原子力発電の技術開発に関する変遷は図2.2.13のとおりである。現在の最新原子炉は第3+世代炉であり、第2、第3世代炉と比較して先進的な安全方策を導入している。さらに、2030年以降の炉概念として、安全性、信頼性や核拡散抵抗性が高い第4世代炉の開発も行われている。この第4世代の炉としては、超高温ガス冷却炉、ナトリウム冷却高速炉、超臨界圧水冷却炉、ガス冷却高速炉、熔融塩炉などの実用化の取り組みが進展してきている。核融合炉に関しては、国際熱核融合実験炉（ITER）が、1985年の米ソ首脳会談が発端となり開始され、2007年にITER協定が発効し、2020年の運転開始を目指している（国際核融合実験炉、n.d.）。



図 2.2.13 原子力発電技術の変遷

（第4世代原子力システム国際フォーラム（GIF：Generation IV International Forum、n.d.）および原子力をめぐる状況について（経済産業省資源エネルギー庁、2012）を基にCRDSが作成）

安全性、信頼性の高い原子炉の研究開発が行われていることと並行して、福島第一原子力発電所の事故後には、特に深層防護の原則が再確認され、シビアアクシデントの防止およびアクシデントマネジメントの高度化が行われている。同時に、運転・保守管理を含めた保全についての定量的リスク評価手法の確立およびその信頼性向上が不可欠となっており、早急な対応、改善が求められている。

一方、我が国において、使用済み燃料の処分に関する問題を解決することは重要である。使用済み燃料の再処理技術については、湿式法と乾式法に分かれるが、大型商業施設では湿式法である PUREX 法が採用されている。濃縮技術については、「ガス拡散法」、「遠心分離法」が採用されている。また、これまで我が国では、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT）プロジェクト」の中で、MA 回収も行う先進湿式法再処理の研究開発が行われてきた（次世代高速炉サイクル研究開発センター、n.d.）。使用済み燃料の貯蔵については、1990 年以降、経済的なコンクリートキャスク貯蔵技術が開発され、各発電所において、貯蔵設備の貯蔵能力変更や乾式貯蔵といった対策により、使用済燃料プールの空容量を計画的に確保してきているものの、六ヶ所再処理工場内の使用済燃料貯蔵量は、余裕がなくなってきており、更なる使用済燃料貯蔵の安全管理対策は、最重要課題となっている。同様に、これまでに発生したウラン廃棄物も保管貯蔵し続けているため、放射能レベルごとの処分・管理方策および資源としてのウラン回収など有効な方法について検討が進められている。プルトニウムについては、環境汚染や核拡散の観点からプルトニウム燃焼技術の研究開発が求められているものの、積極的には推進されていない。

また、高レベル放射性廃棄物については、長期地上管理、核種分離・変換、海洋底下処分、宇宙処分などの多様な処分方法が検討された結果、地層処分が最も有望との結果に至っているが、我が国に最終処分場が建設されていないことに加えて、非常に長い時間スケールの中で安全性の確保をどのように行うか、その基準、規制のあり方も含めこれからの課題となっている。さらに、使用済み燃料には原子炉級のプルトニウムが含まれているため、核不拡散、核セキュリティの観点からも国際関係に注視する必要がある。低レベルの放射性廃棄物については、濃縮処理、減容処理、溶融処理などが行われた後、安定な状態に固化されるが、我が国をはじめ多く採用されているのが、セメント固化である。処分場については、放射能レベルに応じて浅地中処分（トレンチ処分、ピット処分）、余裕深度処分などが採用、調査・検討が進められている。中でも放射能レベルが高く長寿命な核種が比較的多く含まれているものは、処分深度の検討もされている。

福島第一原子力発電所事故後、社会的関心が非常に高まっている放射線の人体への影響については、科学的な機構解明や線量効果関係の詳細検討が求められており、また、低線量領域を対象とした高性能測定器の開発や低線量内部被ばく検出器の整備も進められている。並行して、福島第一原子力発電所事故により環境に放出された放射性物質に起因する放射線量率の低減、土壌中の放射性物質の除去などの環境修復技術について、海外および国内で実績のあるものについて、福島への適用性の観点からの調査・検討もなされている。

2014 年時点において世界全体で 100 基以上の商業炉が廃炉になっている。そのうち 15 基以上の原子力発電所の廃止措置が終了しており、廃止措置工事を進める上で、技術上の大きな障害はないと考えられているが、最適な廃止措置シナリオに基づく具体的な技術の改良および開発は必要不可欠である。福島第一原子力発電所の廃炉については、過酷な事故後の

プラントの廃炉であり、世界にも例はなく極めて難しい技術課題が山積している。燃料デブリ取り出しに向けた研究開発、使用済み燃料プールの燃料取り出し、汚染水処理、地下水流入抑制などの研究開発が進行中である。なお、2013年8月には技術研究組合国際廃炉研究開発機構(IRID)が設立され、燃料デブリを炉心から回収技術開発、放射性廃棄物の処理・処分技術開発などを統合的に進める体制が整えられた。

環境区分

世界的な都市人口の増加に伴い、都市からの環境負荷やエネルギー消費の更なる増大が予想されている。都市における環境に関しては、公害対策から始まった一連の環境対策の中で多くの研究開発が実施されてきた。先進国では過去に公害をもたらしたような高毒性物質の大量暴露やそれによる毒性影響の発現の可能性は減じている一方で、経済発展の著しい開発途上国を中心に都市の大気汚染や水質環境の問題が顕在化し、大気汚染物質の近隣国への越境汚染の問題も指摘されるようになった。また、環境中での残留性や生物蓄積性、人や生物への毒性が高く、長距離移動性が懸念される残留性有機汚染物質（POPs：Persistent Organic Pollutants）による健康影響（特に長期影響や経世代影響）や、低毒性物質の少量暴露、環境汚染物質の複合暴露、ナノマテリアルのような新規素材による健康影響など、未解決の課題も多く存在し研究開発が求められている。なお、今後の都市環境に関する研究開発では、健康維持など正の面の観点や高齢者への対応も求められ、Well-beingのための健康影響研究も連携して進める必要があると考えられる。

都市からの環境負荷やエネルギー消費の低減には都市構造からの観点も必要であり、コンパクトシティ（集約型都市構造）という考え方が注目されている。英国をはじめとする欧州が分野をリードしてきており、その理論が発展した欧州を中心に研究開発が盛んだが、日本においてもさまざまな観点から議論が行われている。近年では、GHG排出削減、QOLの変化や行政の財政負担の効率化、エネルギー分野からの低炭素化との関連など、さまざまな視点から研究開発が実施されてきており、実際の政策に生かすための実務的な視点からの研究開発も進みつつある。

今後も世界的な都市人口の増加が予測されるなかで、都市のスプロールを抑制してコンパクトな構造をもった都市を目指すことは、環境・エネルギーの観点から、先進国、開発途上国に共通する課題といえる。大きな人口減少や超高齢化社会を迎える我が国では、賢い縮退（スマートシュリンク）の観点も必要となるが、土地を効率的に利用しながら自然環境を守り、狭いエリアで生活が充足する集約拠点の形成や、それらをつなぐGHG排出の少ない公共交通の配置は、人口減少と少子高齢化の時代に適合し、公共交通の採算性確保やインフラ整備・維持管理の効率化と費用縮小をももたらす可能性がある。こうした観点からの研究開発は始まったばかりである。

一方、都市を中心とした我々の生活は、食料や水の供給、気候の安定など、生物多様性を基盤とする生態系サービスにより支えられており、今後の世界的な人口増加や都市化などを考慮すると生態系サービスを持続的に利用していく観点も必須である。生態系サービスに関する研究は古くから実施され、例えば、日本では1897年の森林法により定められた保安林制度により、森林のもつさまざまな生態系サービス（土砂流出・崩壊防止、飛砂、防風など）についての基礎的研究が実施され、世界的にも注目される成果が得られている。90年

代からは欧米を中心に生物多様性と生態系機能ないしは生態系サービスとの因果関係に関する定量的な研究が進められてきた。小規模の野外や室内実験で、主に一次生産量を目的変数とした研究が進められ、その後さまざまな機能についても研究が進んできた。さらに、最近では実際の応用の観点から景観スケールで複数の機能やサービスを評価する研究が進んでいる（NERC-BESS, n.d.）。

生物多様性条約（CBD）ではこれまで12回の締約国会議（COP）が開催され、2010年に名古屋で開催されたCOP10では、2011年以降の10年間における新戦略計画（愛知目標）が採択された。現在、その達成のための科学的評価と政策の実現が求められており、日本でも国内政策やIPBES（後述）などの国際事業への貢献を視野に入れた研究プロジェクトである、環境省環境研究総合推進費S-9「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合研究」が実施されている。また、COP10で設立が合意された、生物多様性版IPCCともいわれる「生物多様性と生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム（IPBES：Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services）」では、政策への活用を目的に地球規模での生物多様性の評価を定量的に実施することとなっており、今後その成果が期待されている。

生物多様性と生態系機能、生態系サービスの関係の研究開発動向については、欧米で盛んに実施され成果や知見が集積している。日本は欧米に比べ立ち遅れているが、一部先進的な研究もなされている。既述の環境省環境研究総合推進費S-9「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合研究」やJST CREST「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」研究領域、JST SATREPSなどで成果が出つつあり、これまでの成果を活用・統合した評価・管理技術の研究開発の実施が期待される。国際的な主な取り組みとしては、IPBESのほかフューチャー・アース（FE：Future Earth）や生物多様性の経済学（TEEB：The Economics of Ecosystem and Biodiversity）などがある。FEは国際科学会議（ICSU）が推進する地球環境変動分野の4つの国際研究計画を統合し、学術の専門家だけでなく社会の多様なステークホルダーが協働する枠組みであり、日本の研究者の積極的な参加が期待される。TEEBは生物多様性と生態系サービスの価値を認識し意思決定や行動に反映させるために価値を可視化することを目的に研究が進められ、生物多様性版スターン・レビューといわれる報告書を作成している。こうした国際的な取り組みへの貢献を念頭に置いた研究開発や、さまざまなデータベースなどの情報基盤が整備されており、各地で活発な研究開発が実施されている。

生産と消費活動についても持続可能なものへと変換しなくてはならない。50年代から70年代の高度経済成長期に発生した産業公害では、法による規制をベースに、排出抑制基準制定や排ガス・排水処理技術の開発など、総合的な防止対策の実施によって汚染物質の排出量が抑制され環境リスクが低減されてきた。主要な大気汚染物質であるSO_xやNO_xについては、我が国は欧米諸国に比べて15年以上も早く70年代初頭から産学官が一体となって防除技術の開発に取り組んできた（国立環境研究所、1989）。SO_xの大部分を占めるSO₂濃度は70年代に大きく減少し（環境総覧編集委員会、2013）、近年良好な状態が続いている（環境省、2014）。NO_xについては、重油などの燃料中の硫黄分に起因して発生するSO_xに比べ、サーマルNO_x（大気中の窒素が酸化されてできる）や多岐にわたる発生源に対応しなくてはならない。NO_xの主体物質であるNO₂濃度は70年代に減少した後、横ば

いの状況が続き、自動車排出ガス測定局（自排局）における環境基準達成率（達成局数の割合）は長年 60～70% 台であったが、2000 年以降達成率の継続的改善がみられる（環境総覧編集委員会、2013）。2012 年度の達成率は 99.3%（自排局）と近年は高い水準で推移している（環境省、2014）。これは、1992 年制定（2011 年改正）の自動車 NO_x・PM 法（自動車から排出される窒素酸化物及び粒子状物質の特定地域における総量の削減等に関する特別措置法）でトラック・バス（すべて）およびディーゼル車（乗用）が対象とされたことや、産業界を中心とする継続的な技術開発努力が影響していると考えられる。一方で、光化学オキシダントや微小粒子状物質（PM_{2.5}）のように環境基準達成率が低い物質も存在し、原因の解明、対策が進められている。水環境については、人の健康の保護に関する環境基準（健康項目）はほとんどの地点で環境基準を満たしているものの、全窒素（TN または T-N）および全りん（TP または T-P）の環境基準達成率は、2012 年度は湖沼 51.3%、海域 83.9% と、湖沼では依然として低い水準で推移している（環境省、2014）。N および P はカリウム（K）とともに肥料の三元素と呼ばれるが、水圏、土壌圏に対して富栄養化、酸性化などを引き起こす。N・P とともに肥料利用後にその多くが拡散しており、植物の代謝や土壌圏・水圏における動態解析などによる効率的な N・P 利用技術の開発が求められている。

70 年代は 2 度の石油危機を受け、日本の社会全体で省エネルギー化が大きく推進した。また、80 年代以降の地球規模環境問題の認識、それを受けた国際的取り組みなどの社会情勢を反映して、企業活動においても地球温暖化対策、循環型社会形成、化学物質管理などの取り組みが求められるようになり、それまでの排出物質への対応から、環境負荷の小さな生産プロセス導入などの対応へと変遷してきた。生産者は、ゼロエミッションや環境配慮設計（DfE : Design for Environment）、クリーナープロダクションなどのグリーン技術への転換や、サプライチェーンマネジメント、LCA（Life Cycle Assessment）などの導入、WEEE 指令・RoHS 指令・REACH 規制をはじめとする有害物質規制・管理への対応に迫られている。こうした取り組みは主に欧米や日本で盛んに進められている。リサイクル関連技術は日本の水準が高く、基礎研究も多く実施され最先端にあるといえるが、中国でも多くの基礎研究が実施され日本の技術に競合するほどに活発となっている。

災害時の環境に関する研究開発については、欧米や災害リスクの大きい日本で基礎研究が活発に行われている。自然災害に関してはそのリスクが大きい日本で顕著であり、人為的災害や災害リスクに関しては欧米が進んでいる。甚大な被害をもたらした 2011 年の東日本大震災を受けた主な取り組みとして、（独）国立環境研究所では「災害環境研究」を開始した。ここでは「環境回復研究プログラム（PG1）」「環境創生研究プログラム（PG2）」「災害環境マネジメント研究プログラム（PG3）」の 3 つの研究プログラムを実施している（国立環境研究所、n.d.）。また、国は国土強靱化基本法および国土強靱化基本計画を策定し、回避すべき起きてはならない最悪の事態のうち重点化すべき 15 のプログラムを選定して重点的な取り組みを始めている。そのうち環境分野としては、自然生態系を積極的に活用した防災・減災対策や、災害廃棄物の迅速かつ適正な処理システムや汚水の適正な処理体制の構築、災害発生時における環境汚染および国民の健康被害を防止するための有害物質の貯蔵状況などに関する情報共有や有害物質排出・流出時における監視・拡散防止などがあげられている（内閣官房、2014）。内閣府では「災害対策標準化対策検討会議」が 2014 年 3 月に報告書をまとめている（内閣府、2014）。他国に比べさまざまな自然災害の経験を甚大に有す

る日本において災害時の環境における研究開発を先導し、その技術普及により世界へ貢献することが求められる。

人為的災害については、欧米がモデルやデータベース開発を推進し高い水準を維持しており、特に欧州が分析計測技術の国際標準化や認証制度などにより市場での優位性を保っている。日本では安全ガイドラインの作成、国や自治体などによる法規制などが進められてきたが、人為的災害の発生は依然として続いており、データベースの統合によるアクセスしやすいシステムの構築・運用や人材育成、シミュレーションモデルの基礎研究充実と実用化の推進が重要である。

環境に影響を及ぼす事象を予測し先手を打つという点において情報に基づいた環境の管理は必要不可欠である。環境を把握するための観測・計測技術は古くから多くの研究開発が実施されてきた。人間活動の影響の定量的な把握については多種多様な方法が実用化されており、例えば、水質については有機汚濁の代表的な水質指標である生物化学的酸素要求量

（BOD）や化学的酸素要求量（COD）、栄養塩類、大腸菌による把握などが利用されてきたが、汚染源の特定やそれに基づく発生源対策には不十分な点もある。これらを補完する先端的な指標の例として化学マーカーがあり、汚染源ごとに研究開発が進められている。

地球規模の環境モニタリングについても、地球規模環境問題の認識の高まりとともに実に多くの研究開発が進められてきた。米国や中国では地球観測を科学技術における国家の重点分野に特定しており、今後も大きな予算配分がなされるものと思われる。しかし、これまでの研究開発実施により膨大な種類・量の情報が蓄積しており、要素技術の更なる研究開発課題は残るものの、大量のデータを処理する技術、情報の信頼性や統一性、各種モデルとの統合など、今後はその有効活用に向けた対応がより重要となると考えられる。

（４）分野を取り巻く世界の動向

エネルギー需給

図 2.2.14 に示すとおり、世界のエネルギー消費量（一次エネルギー）は増加を続けている。地域別で見ると、アジア大洋州の増加が顕著である。これは、著しい経済成長を示してきた中国・東南アジアなどの新興経済圏の人口増加およびエネルギー消費量が増加したためと考えられる。それとは対照的に、OECD 諸国のエネルギー消費量の世界全体に占める割合は、年々減少する傾向にある。これは、先進国では顕著な人口増加や経済成長はみられず、またエネルギー消費効率の高い機器の普及が進んだためと考えられる。

2012 年の一次エネルギーの内訳をエネルギー源別に見ると、再生可能エネルギーは拡大しているものの、全体に占める割合は 10%ほどであり、世界は依然として化石燃料に大きく依存していることが分かる（REN21、2014）。その概況は図 2.2.15 および表 2.2.3 のようにまとめられる。

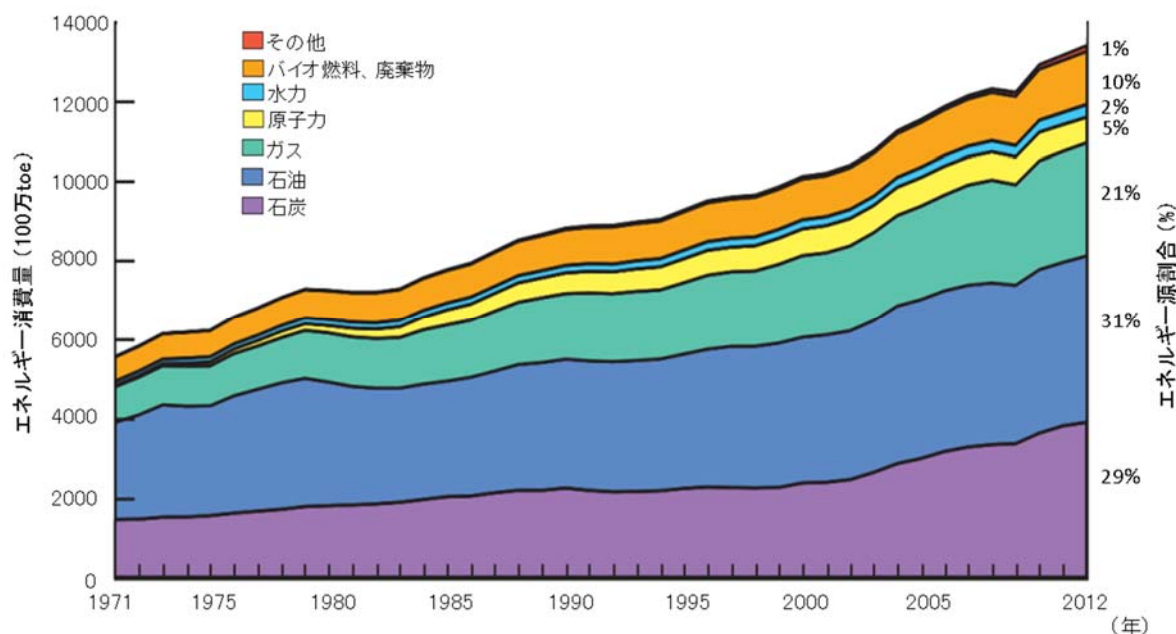
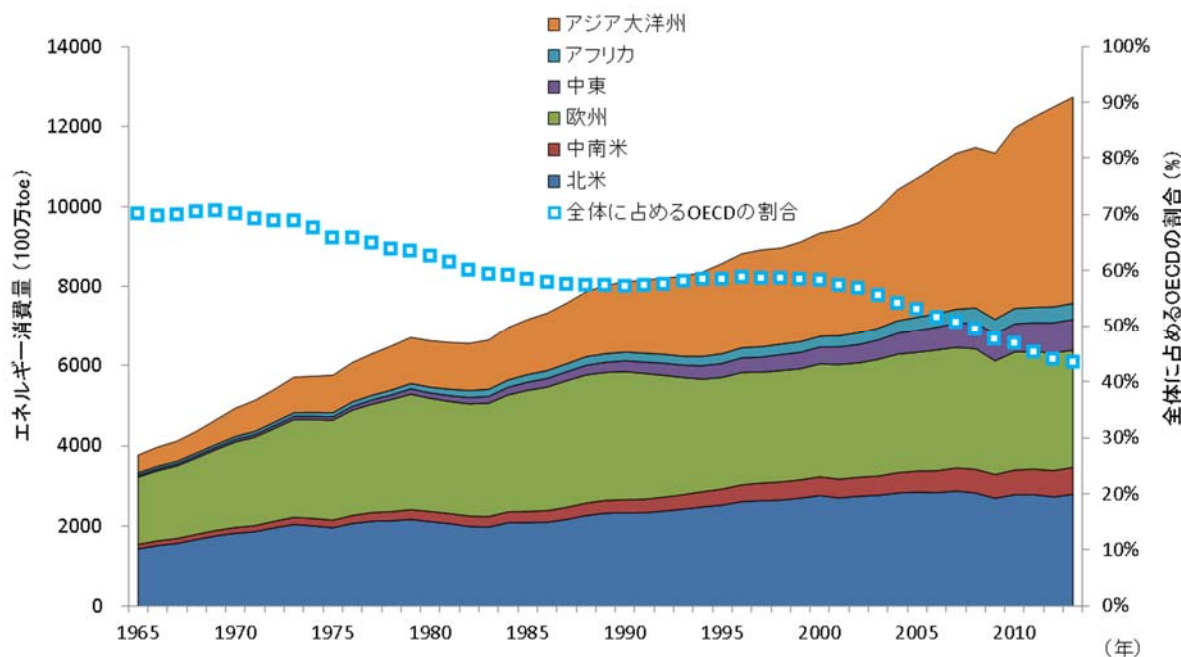


表 2.2.3 エネルギー源別の世界の一次エネルギー内訳とその概況

エネルギー源	供給量（2012 年） 石油換算百万トン Mtoe (%)	概況
石炭	3877.59 (29.0)	世界的に消費量が増加傾向にあり、需要は 2040 年までに 15%増加するといわれる。とりわけ途上国の発電を中心に増加している。日本でも増加している。米国では新設の石炭火力発電所設置の際の規制が強化されている。可採年数は石油よりも長い（109 年）。
石油	4198.49 (31.4)	OECD 諸国の消費は減少傾向にあり、日本でも減少傾向にある。一方、途上国においてはモータリゼーションの進展もあり消費量が増加しており、生産量もそれに合わせて増加（中東、ロシア等）。また、北米を中心にシェールオイル（タイトオイル）の生産も増加する見通しである。地政学的リスクおよび価格の変化が大きい。可採年数は増加傾向。
天然ガス	2848.02 (21.3)	世界的に消費量が増加傾向にある。日本でも増加している。非在来型ガス（シェールガス）の供給量が増加する見込みである。他のエネルギー源に比べ、生産国が消費する割合が高い。可採年数は 56 年。
原子力	641.81 (4.8)	ここ数年、世界的に設備容量に大きな変化はみられない。日本では東日本大震災、福島第一原子力発電所事故以降大幅に減少。ドイツでは 2022 年までに段階的に全原子力発電所を停止する予定。中国、インド、ロシアなどでは原子力推進の政策が取られている。
再生可能エネルギーなど	1805.09 (13.5)	再生可能エネルギーによる供給量は世界的に増加傾向。電力においては、世界の発電容量増の半分以上（56%）を占めている（2013 年）。ドイツ、スペインでは FIT 導入により太陽光発電の導入が急速に増大。日本も FIT 導入以降急激に増大。風力発電も増加傾向にある。最も導入量が多い国は中国（2013 年）。欧州では洋上風力発電が急速に拡大。バイオマスは一次エネルギー供給量の 10%ほどを占める。供給されるエネルギーの大半は熱利用。アメリカ、欧州が政策的に推進している。水力は新設の発電設備容量の 3 分の 1 を占める（2013 年）など、拡大傾向。地熱発電も増加傾向。設備容量は米国、フィリピン、インドネシアの順（2013 年）。日本は資源量で世界 3 位だが、発電容量は 8 位と利用率は低く、追加される設備容量も他国を下回っている。

（供給量の数値は Key World Energy Statistics 2014 (IEA, 2014a) より、概況は Key World Energy Statistics 2014 (IEA, 2014a)、WE02014 (IEA, 2014b)、WE02013 (IEA, 2013a)、エネルギー白書（経済産業省資源エネルギー庁、2014b）、自然エネルギー世界白書 2014 (REN21, 2014)、再生可能エネルギー技術白書 (NEDO, 2014) を基に CRDS が作成。）

気候変動とその対策

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が 2014 年 11 月に発表した第 5 次報告書統合報告書によれば、全地球平均の地上および海上気温は 1880～2012 年の間に 0.85（0.65 ～ 1.06）℃上昇した。そして、人為起源の GHG 濃度の排出が、20 世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な原因であった可能性が極めて高く、現行を上回る追加的な緩和努力がないと、たとえ適応があったとしても、21 世紀末までの温暖化は、深刻で広範にわたる不可逆的な世界規模の影響に至るリスクが、高いレベルから非常に高いレベルに達するだろうと指摘している（IPCC、2014）。

IPCC では、21 世紀末までの気候変化とそれによってもたらされる影響の見通しに関する科学的知見をまとめている。その中では、複数の社会シナリオに基づいた気候のシミュレーションの結果に基づいて、各種の生態系への影響（例えば、温度上昇による生息域の縮小）、農業への影響（例えば、水利用可能量の減少による収量減）、低平な沿岸システムへの影響（例えば、海の体積増加と台風などの強大化による海水侵入）、人の健康への影響（例えば、蚊が媒介する感染症の高緯度側への拡大）などを検討している。対策としては、温暖化に対する緩和策（GHG 排出削減策）と適応策の両方を検討している。

この科学的知見に基づき、2007 年以後の地球環境に関する国際交渉の場では、世界平均気温の上昇を+2℃以内に抑えるべきであるという目標設定が語られるようになった。2010 年の気候変動枠組条約締約国会議（COP16、カンクン）では、この目標を尊重し世界規模で大幅な排出削減をすることについて総論の合意が得られた。しかし各国の負担内容に関する議論はまとまらず、京都議定書の第 1 約束期間（2008-2012 年）の終了がせまった 2012 年の締約国会議（COP18、ドーハ）で、2013-2020 年を第 2 約束期間として京都議定書を延長することになった。ただし第 2 約束期間の約束（commitment）に参加する国の排出量を合計しても世界の約 15%にすぎない。日本は第 2 約束期間に直接には参加せず、二国間クレジットによって途上国の GHG 削減に貢献する方針を示した。2013 年の締約国会議（COP19、ワルシャワ）では、すべての国が参加する 2020 年以降の新たな枠組みについて、すべての国が温暖化ガス削減の自主的な削減目標を導入することで合意した。2014 年の締約国会議（COP20、リマ）では、新たな枠組みを採択する COP21（2015 年 12 月パリ）に向け、準備できた国は 2015 年 3 月末までに目標を提出することで合意し、複数の国・地域が新目標を表明しているが（表 2.2.4）、日本は 3 月末の提出を見送った。

日本は京都議定書第 1 約束期間の削減目標（基準年比 6%削減）を達成したとされている。しかし、かつての 2020 年度における 25%（1990 年比）の GHG 削減目標は、現状を踏まえ原子力発電による削減効果を含めないこととし、今後の見直しを前提に 3.8%（2005 年度比）へと変更した（2013 年 11 月）。現在、2020 年以降の自主目標について、電源構成の議論をふまえ検討を急いでいる。

表 2.2.4. 主要国・地域の温暖化ガス削減目標

国・地域名	2020 年以降の削減目標
日本	できるだけ早期に公表
中国	30 年ごろをピークに減らす
米国	25 年までに 05 年比で 26～28%削減
欧州連合（EU）	30 年までに 90 年比で少なくとも 40%削減

※日本経済新聞（2014/11/13）（日本経済新聞社、2014a）を基に CRDS にて作成

各国のエネルギー政策比較

主な諸外国の一次エネルギー供給構造は図 2.2.16 のとおりである（データは 2013 年）。日本のエネルギー自給率は一部を除く原子力発電所の稼働停止により 6%（2012 年推計値）まで下がっており、先進諸外国の中でも際だって小さい。2014 年時点では原子力ゼロの状態であり、エネルギー自給率はさらに低くなる。

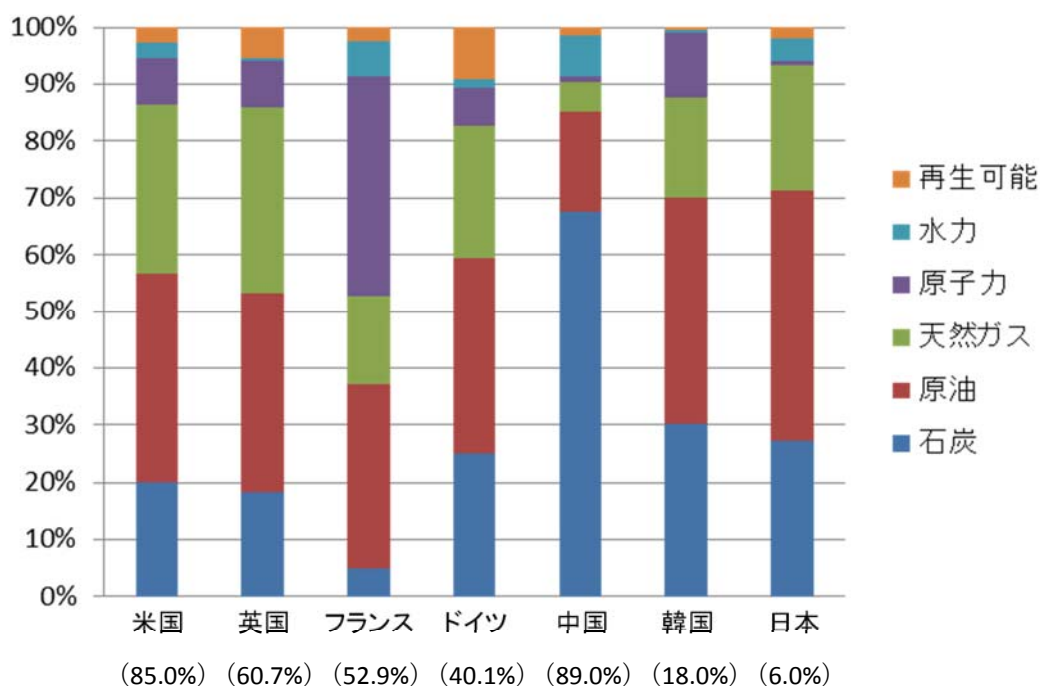


図 2.2.16 一次エネルギー供給構造と自給率（国名下の括弧内数値）の各国比較

（BP Global（2014）を基に CRDS が図を作成、エネルギー自給率は

Energy Balance of OECD Countries 2013（IEA、2013b）より）

また、安全保障上、エネルギー自給率の維持・改善はいずれの国にとっても至上命題の一つであるが、その取り組み内容は各国の諸事情に合わせてさまざまである。米国は、その国土に豊富な化石資源を保有しており、エネルギーミックスの大半が化石資源で占められている。石油輸入依存度の低減が長年の重要政策課題であったが、近年非在来型の天然ガスが市場に本格的に導入されたため、エネルギー安全保障上のリスクが軽減しつつある。のみならず、米国の天然ガスは日本をはじめ多くの国のエネルギー需給構造をも変える可能性があることが指摘されている。フランス、韓国は日本同様に国内資源に乏しく輸入に依存している。ただしエネルギーミックスの構成では両国とも原子力を強く推進しており、特にフランスは関連国内企業（アレバ社）の支援にも力を入れている。ドイツは国土に豊富にある石炭資源の利用を維持する一方で、2002 年には原子力発電所の新設禁止、東日本大震災後間もない 2011 年 6 月には 2022 年までに脱原発を目指す決定を行っている。おのおの特色あるエネルギー政策ではあるが、欧州諸国は域内の電力流通が盛んであり、エネルギー安全保障を考える上では島国の日本とは異なる状況下にあるといえる。

エネルギー政策は安全保障のみならず、気候変動対策としても認識されている。各国・地

域とも GHG 削減目標を定めており、自国の状況も勘案してそれに見合うエネルギーの低炭素化を進めている。そのために、各国とも省エネルギーや再生可能エネルギーを推進するとともに、クリーンコールや天然ガス、原子力も含めたベストミックスを目指している（表 2.2.5）。COP21（2015 年に開催予定）までに、参加各国は 2020 年以降の GHG 削減目標を提出することが決められており、我が国でもそのためにエネルギーミックスの議論が行われているところである。科学技術政策という観点では、米国におけるグリーンイノベーションへの体系的かつ継続的な取り組みが顕著である。米国エネルギー省は、2001 年以降、10 年もの歳月をかけて、1000 名を大きく超える有識者の関与によって、グリーンイノベーションに関するビジョンと戦略を取りまとめた。またこのシナリオを実現する仕組みとして、エネルギー省の下に、「エネルギーフロンティア研究センター」、「エネルギー高等研究計画局」、「エネルギーイノベーション・ハブ」という 3 つの研究イニシアチブを立ち上げている。

表 2.2.5 各国のエネルギーに関する中長期目標

地域・国	温室効果ガス削減目標	エネルギー政策概要
米国	2025年までに2005年比26～28%削減（米中合意、2014年11月）	・石油依存度を下げ、クリーンなエネルギーに注力（原子力、再エネ、クリーンコール、非在来型石油・天然ガス） ・輸送用燃料の中東依存の低下
英国		・エネルギーの低炭素化（原子力、再エネ、CCSなど）
欧州	（欧州全体） 2020年に1990年比20%、2030年に同40%、2050年に同80～95%削減	・脱原子力（2022年末までに段階的に閉鎖） ・再エネの導入拡大（2050年に一次エネルギーの60%、電力の80%） ・最終エネルギー消費量を2050年に2008年比50%削減
ドイツ		・再エネ開発（2020年に最終エネ消費の23%、2030年に30～40%） ・省エネ推進（2030年に2012年比20%、2050年に同50%削減） ・電源多様化の観点から、原子力発電比率の低減（2025年に50%に低減）
フランス		
中国	2020年までに2005年比40～45%の削減、2030年までの早い時期に排出量をピークアウトさせる（米中合意、2014年11月）	・省エネ、再エネ、原子力開発推進 ・2015年までに、一次エネルギー消費に占める非化石エネルギー比率を11.4%に引き上げ、GDP当たりのエネルギー消費量を2010年比16%、CO2排出量を17%引き下げる（第12次エネルギー五か年計画） ・一次エネルギー消費に占める非化石燃料を2030年までに約20%（米中合意、2014年11月）
韓国	2020年に2005年比4%削減（2009年現状の30%削減）	・原子力は増やす（2035年に設備容量で電力の26～29%）が、前回計画の目標（2030年に41%）よりは下げる ・高効率システム化によるエネルギー低消費社会 ・積極的なエネルギー資源の自主開発（メタンハイドレートなど）

* 以下の文献等をもとに CRDS 作成：日本経済新聞社（2014b）、European Commission（2012、2014）、U.S. Energy Information Administration（2014）、Craig Morris, Martin Pehnt（2012）、Department of Energy and Climate Change（2011）、Committee on Climate Change（2011）、Federal Ministry of Economics and Technology（2012）、Centre d'analyse stratégique（2012）、Information Office of the State Council, China（2012）、Ministry of Trade, Industry and Energy（2014）。

各国の環境政策比較

多くの国・地域において、エネルギー政策と同様に環境政策は重視されている。気候変動対策などの環境政策はエネルギー政策と連動する側面があり、産業との関わりも大きい。主な国・地域における環境政策を以下にまとめる。

米国では、毎年の科学技術関連予算における投資の優先順位が、大統領府の行政管理予算局（OMB）・大統領府の科学技術政策局（OSTP）の共同覚書で示され、研究開発予算を計上する各省庁はこの覚書に沿った予算案の作成が求められている。オバマ政権は環境・エネルギー分野における研究開発をイノベーション政策の中心に据え、とりわけクリーン・エネルギー技術の開発については政権発足以来一貫して重点投資分野としている。2015年度予算のOMB・OSTPによる科学技術優先事項覚書では、9つの優先事項のうち、クリーン・エネルギー、気候変動が記載された。2015年度大統領予算教書では、温暖化対策技術に69億ドルが提示され、65億ドルが議会で成立した。気候変動のほか、環境分野の研究開発には多くの省庁が関与し、機関ごとに研究開発戦略が策定・推進されている（CRDS、2014b、2014c）。なお、2016年度予算の科学技術優先事項覚書では、8つの優先分野のうち、クリーン・エネルギー、地球観測、気候変動が記載され（CRDS、2014d）、2016年度大統領予算教書では、温暖化対策技術に前年度を上回る74億ドルが提示された。

欧州連合（EU）では、環境分野の基本的なフレームワークである「第7次環境行動計画」（2014～2020年）が2013年11月に採択された。本計画では、2020年までの目標として以下の9つの優先事項を掲げている（EC、2013）。

- ・自然資本の保護・保全・強化
- ・資源効率的で競争力のある低炭素経済への転換
- ・健康・福祉に対する環境脅威からの保護
- ・履行改善による環境法の利益最大化
- ・環境知識の向上と根拠に基づく政策の拡大
- ・環境・気候政策への投資確保と環境コストの負担
- ・他の政策分野への統合による改善と一貫性の確保
- ・都市の持続可能性の向上
- ・より効果的な環境・気候の国際的取り組みの推進

EUの最も代表的な研究開発支援プログラムであるフレームワークプログラム、Horizon 2020（2014～2020年）では、「卓越した科学」「産業界のリーダーシップ確保」「社会的な課題の取組」の3つの柱に沿って公募型の資金配分がなされるが、上記計画のもと、「産業界のリーダーシップ確保」では、CO₂の排出を抑える製造技術についての研究などが優先事項に、また「社会的な課題の取組」では、スマート・グリーン・統合的な輸送、気候変動対応・環境・資源効率・原材料において研究が推進されることとなっている（CRDS、2014b）。

中国では、国家中長期科学技術発展計画（2006～2020年）を柱とし、その中長期計画の方針を踏襲しつつその時代の趨勢に応じた五カ年計画が策定され、現在は第12次五カ年計画（2011～2015年）の期間に該当する。国家中長期科学技術発展計画では「水汚染」および「地球観測システム」が重大特定プロジェクトに指定されている。第12次五カ年計画では7つの戦略的新興産業があげられ、環境分野に関わるものとして「省エネ・環境保護」、「新エネルギー」、「新エネルギー自動車」が指定され、産業技術との関わりが深い分野が重点的に

推進されている（CRDS、2014b）。

韓国では、2013年2月に発足した朴政権のもと、「第3次科学技術基本計画」（2013～2017年）に沿って研究開発が推進されている。本基本計画では5大推進分野が掲げられ、そのうちの「IT融合新産業の創出」では先端鉄道技術やエコ自動車技術が、「未来成長動力の拡充」では太陽エネルギー技術やスマートグリッド技術が、「クリーンで便利な生活環境の構築」ではCCS技術や汚染物質制御および処理技術、高効率エネルギー建築物技術が重点国家戦略技術としてあげられている（CRDS、2014b）。

表 2.2.6 主要な国・地域の主な科学技術政策における環境分野の位置づけ

国・地域	主な施策等	概要
日本	①第4期科学技術基本計画 ②科学技術イノベーション総合戦略 ③第四次環境基本計画	① グリーンイノベーションの推進 ② クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現 ③ 技術革新等を含むグリーンイノベーションの推進等の9つの優先的重点分野や震災復興、放射性物質による環境汚染対策
米国	①科学技術優先事項（2016年度予算）	① 8つの優先分野のうち、クリーン・エネルギー、地球観測、気候変動を記載
欧州（EU）	①第7次環境行動計画 ②Horizon 2020	① 2020年までの目標として9つの優先事項を指定 ② 「産業界のリーダーシップ確保」：CO ₂ の排出を抑える製造技術についての研究等が優先事項、「社会的な課題の対応」：スマート・グリーン・統合的な輸送、気候変動対応・資源効率・原材料において研究を推進
英国	①成長のためのイノベーション・研究戦略 ②英国の低炭素経済への移行計画 ③2050年までの展望 ④科学・研究資金配分計画	① 優先投資対象とすべき4つの新技術分野のうち、環境発電を記載 ② 2020年までの気候変動とエネルギーに関する国家戦略 ③ 2050年までのGHGとエネルギーに関する分析 ④ 研究会議横断型研究プログラムで6分野のうち、エネルギー、環境変化との共生、世界の食糧保全を実施
ドイツ	①ハイテク戦略 2020	① 5つの重点分野のうち、気候・エネルギーを記載 その気候・エネルギーの課題として、CO ₂ に毒されないエネルギー効率が高い気候に対応した都市、石油を代替する再生可能な資源等を記載
フランス	①France Europe 2020	① 資源マネジメントの改善と変化への対応、クリーン・安全・効率的なエネルギーという社会的課題を定義
中国	①国家中長期科学技術発展計画 ②第12次五カ年計画	① 「水汚染」「地球観測システム」を重大特定プロジェクトに指定 ② 7つの戦略的新興産業のうち「省エネ・環境保護」「新エネルギー」「新エネルギー自動車」を指定
韓国	①第3次科学技術基本計画	① 5大推進分野の「IT融合新産業の創出」では先端鉄道技術やエコ自動車技術、「未来成長動力の拡充」では太陽エネルギー技術やスマートグリッド技術、「クリーンで便利な生活環境の構築」ではCCS技術や汚染物質制御および処理技術、高効率エネルギー建築物技術を重点国家戦略技術として記載

※CRDS「研究開発の俯瞰報告書 主要国の研究開発戦略（2014年）」（CRDS、2014b）を基に作成

2.2.2 今後の方向性

（1）社会の方向

世界経済は緩やかな回復基調を示すが、依然として不透明感が残る。世界的なエネルギー需要は、新興国、特に中国、インド、中東諸国の経済発展に伴い引き続き増加が予想される。こうした需要に対し、今後数十年間、化石燃料は主たる一次エネルギー源として、また原子力もその安全性の向上とともに主要電力源のひとつとして利用されるとみられる。普及拡大が望まれる各種の再生可能エネルギーは、発電コストと供給安定性の改善が課題である。

またこうしたエネルギー需給に対し、地球環境の問題もいっそう深刻化している。GHGの排出削減に関する国際的取り組みは、京都議定書の第1約束期間が終了したが、世界経済の低迷も影響して第2約束期間へ移り各国の足並みが揃わず後退している。国際エネルギー機関(IEA)「世界エネルギー展望(World Energy Outlook、WEO)」2011年版(IEA、2011)では、地球の平均気温の上昇を2℃以内に収めるためにはCO₂の排出にはわずかの余裕もないとの指摘があったが、2012年版WEO(IEA、2012b)ではその状況はさらに厳しいと指摘した。続く2013年版WEO(IEA、2013)では、2020年までに何らかの実効ある措置を取らなければ、今世紀中に目標を大幅に上回る3.6度の気温上昇に至る可能性が高いことを指摘しCO₂排出削減の鈍化に警鐘を鳴らした。最新の2014年版WEO(IEA、2014)では、エネルギー消費に伴うCO₂排出量は2040年に現在より20%増える見通しで、緊急の行動が必要であると指摘している。また、2040年までの世界の原子力政策や発電設備容量などの特集が生まれ、今後の原子力設備容量などの見通し、原子力政策の決定における主要な論点などを記述するほか、アフリカ大陸全体、特にサハラ以南のアフリカのエネルギー見通しに注目し、豊富なエネルギー資源（主に再生可能エネルギー）によるエネルギー供給国となる一方、近代化かつ統合的なエネルギーシステムの整備が貧困地域の経済発展に貢献することなどを包括的に分析している。

一方、日本社会におけるエネルギーの状況にはまだ不透明な部分が多いが、エネルギー安定供給の確保、環境への適合、経済効率性の同時充足を目指すという基本的方針を維持し、これを将来にわたって追求すべきである。これに対して科学技術が果たすべき役割は大きい。

（2）研究開発の方向性

環境・エネルギー分野の公的な研究開発の方向性は国の方針に大きく依存する。エネルギー基本計画（第四次）では、「エネルギー政策の要諦は、安全性を前提とした上で、エネルギーの安定供給、経済効率性の向上による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に、環境への適合を図るため、最大限の取組を行うこと」と指摘している。また、2014年6月24日に閣議決定された「科学技術イノベーション総合戦略2014」では、エネルギー基本計画の観点も踏まえて、科学技術イノベーションが特に取り組むべき政策課題の一つとして「クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現」を掲げ、その実現に向けて特に重点的に取り組むべき課題として以下の3課題が設定されている。

- ・ クリーンなエネルギー供給の安定化と低コスト化
- ・ 新規技術によるエネルギー利用効率の向上と消費の削減
- ・ 高度エネルギーネットワークの統合化

さらに、現在、議論が進められている「第5期科学技術基本計画」の検討においても、今

後の方向性として「エネルギー科学技術の研究開発プロジェクトの推進にあたっては、要素技術がもつシーズ力のほか、「3E+S」の観点を踏まえてプロジェクト設計を行うことが必要である」という視点が重要視されている。以上のような情勢を踏まえ、今後、エネルギーに関する研究開発を推進するにあたっての重要な考え方をまとめると以下のようになる（笠木、2012 を一部修正）。

1. エネルギー消費総量の削減を最重要視する。あらゆるエネルギー利用プロセスの高効率化、省エネルギーの強化、需給の平準化などに研究開発努力を継続する。
2. クリーンな再生可能エネルギーの最大導入を図る。システム化によるエネルギーミックスにより導入を促進する。
3. 安定的かつ経済的な電力供給を維持するために、当面、石炭、天然ガスの高効率クリーン利用を進める。
4. 分散型エネルギーシステムを導入して、総合効率や危機対策上のメリットなどを生み出す。
5. エネルギー・物質資源の多様化により、供給安定性・持続性を確保する。
6. 原子力は安全性の確保を大前提に、エネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源として位置付けるものの、原子力への依存度については可能な限り低減する方向で現実的なシナリオを検討する。並行して、事故で学んだことを活かし、安全性確立のために技術の高度化への努力を続ける。
7. 中長期の温暖化ガス排出削減シナリオを再構築し、国際的枠組み構築へイニシアチブをとる。
8. 優れたエネルギー・環境関連技術の海外普及に取り組み、世界の格差是正、温暖化対策に貢献する。
9. 次世代のために、人の健康を含む生命の持続性の基盤となる環境への負荷を限りなく縮小するとともに、環境の改善・向上を目指す。
10. 将来顕在化する環境問題を事前に捉え先手を打つことにより、環境を設計・創造していく。

エネルギー供給区分

エネルギー供給では、我が国のエネルギー・フローの概観から求められる主要課題（図 2.2.17）から、日本の技術力、競争力を高め、基礎研究から実装まで繋げたシナリオ、技術革新による多様性を機軸とした新たなエネルギーベストミックスを展開し、3E+Sを達成しながら持続可能な社会を実現するためには以下を考慮する必要がある。

- ・多様性を基軸とした新たなベストミックスでは、量的規模・寄与、時間スケール、空間スケールを踏まえた総合的判断が必要
- ・将来の長期的姿と今の姿を繋ぐ、間のシナリオと技術を俯瞰し、必要な科学技術をいつまでに実現しなければならないか、直ぐの実現は困難でも、革新的技術、技術の元になる科学的研究は何か。一次エネルギー、二次エネルギー、エネルギー利用形態では、エネルギーキャリア、蓄電、エネルギー貯蔵・輸送、などの使い方、タイムスケールに合わせたベストミックス、電力改革が進む中、短期的にはスピード感が必要
- ・化石エネルギーと再生可能エネルギーのインテグレーションのフィージブルな姿を、科学

ベースの普遍的な主導原理、考え方に基づき示すことが必要

- ・ 国際的なバーゲニングパワーを持てる資源技術とビジネスモデルとは何か
- ・ 国内バイオマスの大規模利活用の可能性などの既存産業の転換が必要

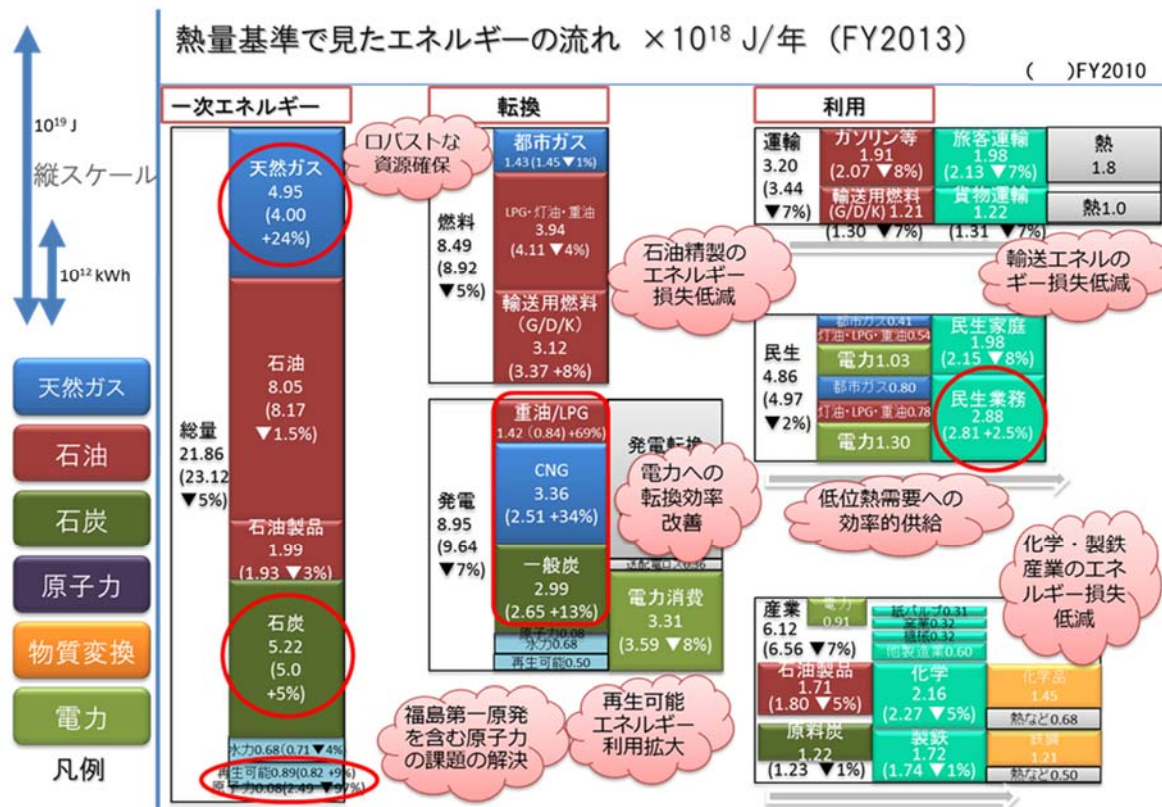


図 2.2.17 我が国のエネルギー供給に求められる主要課題（図 2.2.4 再掲）

これらの視点から、石油、天然ガス、石炭、再生可能エネルギーのエネルギー源とエネルギー供給への要求から、採掘から輸送・利用までの流れの中で、各段階における問題点を整理し、それらから導かれる課題を抽出し、エネルギー供給における研究開発領域を図 2.2.18 に示すように整理した。

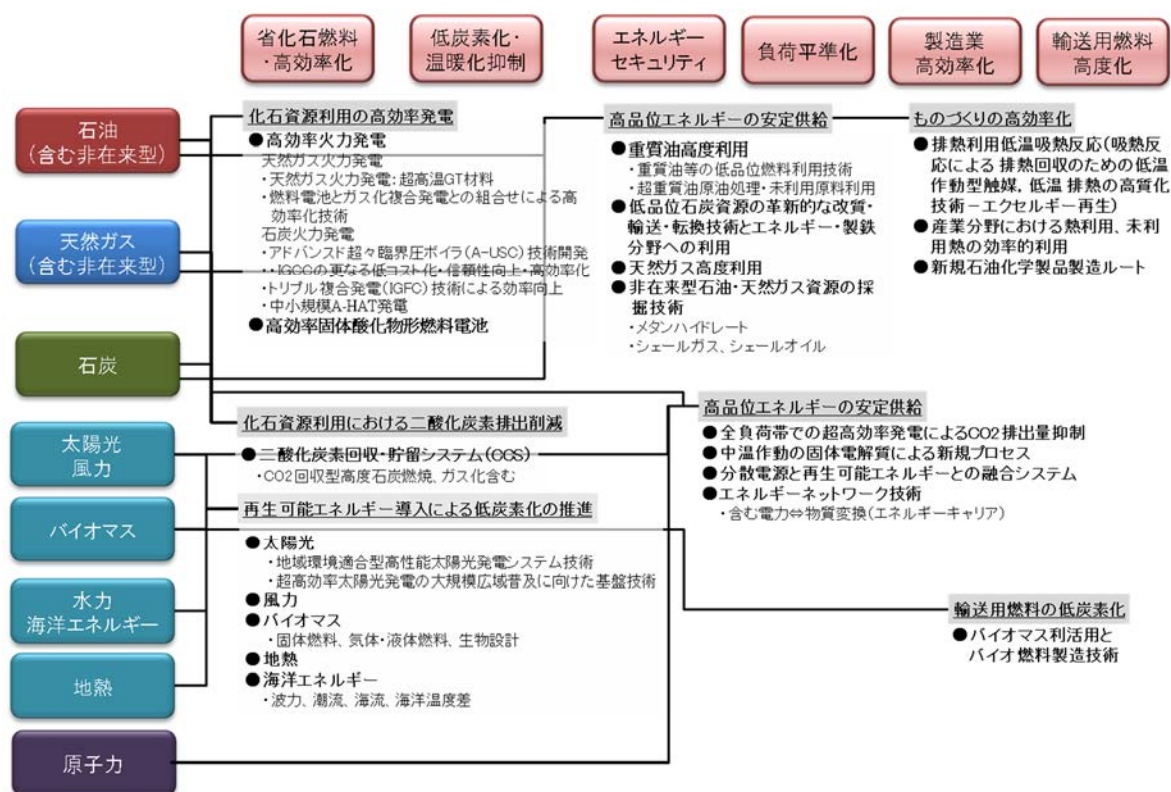


図 2.2.18 エネルギー供給区分の俯瞰図

まず、省化石燃料・高効率化、低炭素化・温暖化抑制として高効率な超高温ガスタービンや石炭ガス化複合発電をはじめとした高効率火力発電、高効率固体酸化物形燃料電池、CO₂回収・貯蔵(CCS)、再生可能エネルギー導入促進(太陽光、風力、バイオマス、地熱など)が必要である。エネルギーセキュリティに関しては、天然ガスの高度利用に加え、非在来型(シェールガス・シェールオイル・メタンハイドレートなど)の台頭を視野に入れる必要がある。米国のシェールガス革命により、天然ガスの調達先の多様化が進んでおり、資源を持たない我が国としては、こうした新たな資源の獲得と利用に寄与する新たな技術開発に注力すべきである。また、現在はコスト面で実用化が難しいとされているメタンハイドレートについても、表層型ハイドレートへの減圧法適用を含めた新規技術展開が望まれる。また、石油に関しては重質油の高度利用、石炭では低品位炭資源は賦存量が多い亜瀝青炭や褐炭高度利用のための、改質・輸送・転換技術の開発が期待される。製造業高効率化、輸送用燃料の高度化としては、排熱利用低温吸熱反応を用いた省エネルギー化、産業分野における熱利用、未利用熱の有効利用やバイオマス利活用と燃料製造技術が期待される。また、今後自動車・航空・化学品原料に集約される中で、非在来型の石油化学製品製造ルートの開拓が期待されている。

このほか、負荷平準化の観点から、全負荷帯での超高効率発電によるCO₂抑制技術、分散電源と再生可能エネルギーとの融合システムならびにエネルギーキャリアへの変換、貯蔵を含むエネルギーネットワーク技術が重要である。化石資源の中では天然ガスが総合的には優れていると考えられるが、化石資源をほぼすべて輸入に頼る日本としては、安定供給面でのリスク回避が極めて重要で、複数の資源国から複数の化石資源を入手することが肝心である。

したがって、特定の化石資源に絞ることなく、ベストミックスの考え方をベースにし、化石資源の種類ごとに必要な技術開発を進めることが戦略として妥当であると考えられる。

再生可能エネルギーは図 2.2.5、図 2.2.6 に示したように、2012 年 7 月に開始された FIT により、太陽光を中心に導入が加速されている。急速な導入においては、先行しているドイツの例を十分参考にして進めていく必要がある。また、再生可能エネルギーは種別ごとに、実用化あるいは導入拡大までのタイムスパンが異なることに留意する必要がある。また、再生可能エネルギーの賦存量の小さい我が国としては、太陽光、風力、バイオマス資源の豊富な諸外国に優れた開発技術を持ち込み、再生可能エネルギーを輸入することも有力な戦略のひとつとして考えておく必要がある。太陽光では、南北に長い日本の地形においては日照条件の地域差が存在するが、既存の太陽光発電技術は各地の日照時間などの条件に適合した機能を有していない。太陽光に不利な地域でも普及率を上げることが、日本全体の太陽光の導入拡大の鍵になると考えられ、そのためには日照時間や高温などのさまざまな環境条件に対しても十分な発電能力を発揮できるような太陽光技術が必要である。一方で、国際的な産業競争力の観点から、次世代の革新的な太陽電池の開発で世界をリードし、日本企業が世界市場を先導することを中長期的に考える必要がある。風力については、洋上風力が陸上風力よりもポテンシャルははるかに大きく、2030 年頃には発電電力量が陸上風力と同等になるまで拡大すると考えられる。また、我が国では浅瀬が少ないことから着床式よりも浮体式が今後の風力では主流になっていくとみられ、そのためのさまざまな技術開発が必要であり実証試験が開始されている。日本特有の厳しい気象や海象への耐久性や軽量化が求められる。特に、浮体の開発では日本が本来得意とする造船技術が活用でき、海外展開も期待される。

海洋エネルギーや地熱は中長期的に導入が進むと考えられる。我が国には豊富な資源賦存量があるとみられている。地熱は量的には高温熱水を利用した発電が拡大するが、一方で温泉熱を利用した発電技術は日本の温泉街における地域分散型エネルギーとしての価値ももっているが、地熱開発に対する規制緩和を含む政策課題や利害関係者の調整など、社会的合意形成の課題も大きい。海洋エネルギー開発においては、将来の実用化に備えた低コスト化を中心とした技術開発を着実に進めるべきと考えられる。

バイオマスは我が国ではポテンシャルが小さく、現状では、さまざまなプロジェクトの下でエネルギー生産のための技術開発が実施されているが、原料を十分確保することが最優先課題である。バイオマス資源そのものを増やす、あるいはそこから得られる有用物質を増やすために、その基礎となる遺伝子やタンパク質、代謝産物の解析を行い、それらのデータの活用が考えられる。

なお、エネルギー供給の視点とは異なるが、太陽熱、地中熱の利用も重要である。中でも太陽熱は、我が国でかつて普及促進施策も取られてきたが、その後停滞している。近年ではコストなどの面で太陽熱が見直されつつあり、また太陽光とのハイブリッドシステムの研究開発も行われている。技術的には集熱機能の向上が課題となるが、一方で太陽熱システムの普及には補助金制度などの政策誘導が必要である。再生可能エネルギーでは太陽光が偏重される傾向があるが、適切なバランスで普及推進策を進めるべきである。

他にも図 2.2.11（エネルギー供給区分の現状俯瞰と課題）に示す通り、エネルギー供給区分においては多くの課題があげられるが、我が国のエネルギー利用におけるベストミックスおよびカントリーリスク回避の視点で重要となる技術課題を精査し、とりわけ重要度の高い

ものとして以下の 20 領域群を選定した。なお、ガス化技術、ガス化ガスの分離技術として研究開発領域として特に取り上げていないが、石炭、バイオマス、重質油の高度利用、CCS の実用化においては横断的な技術であり、研究開発項目の中に重要な研究開発項目として含まれている。

1. 化石資源利用の高効率発電（省化石資源消費・高効率化）
 - ・高効率火力発電
 - ・高効率固体酸化物形燃料電池
2. 化石資源利用における二酸化炭素排出削減（低炭素化・温暖化抑制）
 - ・二酸化炭素回収・貯留システム（CCS）
3. 再生可能エネルギー導入による低炭素化の推進（低炭素化・温暖化抑制）
 - ・太陽光
 - ・風力
 - ・バイオマス（固体燃料、液体・気体燃料、生物設計）
 - ・地熱
 - ・海洋エネルギー（波力、潮流、海流、海洋温度差）
4. 高品位エネルギーの安定供給（エクセルギー、セキュリティ、負荷平準化、環境負荷低減）
 - ・重質油の高度利用
 - ・低品位石炭資源の革新的な改質・輸送・転換技術とエネルギー・製鉄分野への利用
 - ・天然ガスの高度利用（超高効率発電・天然ガスからのコプロダクション（トリジェネレーション）・LNG 冷熱利用技術による高効率化）
 - ・非在来型石油・天然ガス資源の採掘技術
 - ・全負荷帯での超高効率発電による CO₂ 排出量抑制
 - ・中温作動の固体電解質による新規プロセス
 - ・分散電源と再生可能エネルギーとの融合システム
 - ・エネルギーネットワーク技術
5. ものづくりの高効率化（製造業高効率化、低位熱高度利用）
 - ・排熱利用低温吸熱反応（吸熱反応による排熱回収のための低温作動型触媒、低温排熱の高質化技術－エクセルギー再生）
 - ・産業分野における熱利用、未利用熱の効率的利用
 - ・新規石油化学製品製造ルート
6. 輸送用燃料の低炭素化
 - ・バイオマス利活用とバイオ燃料製造技術

エネルギー利用区分

エネルギー利用の目的は、人類の生活を豊かにするさまざまなサービスを提供することである。一方でエネルギー利用は多くの環境負荷を発生させる。したがってエネルギー利用に際しては、より豊かなサービスの提供と環境負荷の削減という 2 つの側面に留意することが必要である。ここでは環境負荷を CO₂ 排出量で代表させる。茅恒等式 (Kaya, 1990) などを参考にし、エネルギー利用全体を以下のように 3 つの社会的な期待として分類することとした。

$$\text{CO}_2 = \text{サービス} \times \frac{\text{エネルギー}}{\text{サービス}} \times \frac{\text{CO}_2}{\text{エネルギー}}$$

右辺の第 1 項「サービス」²は、多様な社会的要請に応えるエネルギーサービスのことである。ここでのエネルギーサービスとは、エネルギーを消費することで我々が得られる生活や仕事などのアクティビティに必要なサービスのことをさす。第 2 項の「エネルギー／サービス」は、エネルギー効率の高いサービスの提供である。第 3 項の「CO₂／エネルギー」は、低炭素化を実現するエネルギー利用である。

社会における課題には、地球環境問題の深刻化や国際協力や国際貢献などのソーシャルな面と、脱物質化や個人の価値観の多様化などのパーソナルな面がある。加えて、ネットワーク・情報化社会や都市化への対応など、そのソーシャルとパーソナル両面を横断的に考えなければならない課題もある。

日本は人口減少と高齢化が進んでいく課題先進国である。2010 年に日本の総人口約 1 億 2,800 万人のうち高齢者（65 歳以上）は 23%（29 万人）だったが、2020 年には人口 1 億 2,400 万人のうち高齢者は 29%（36 万人）、2040 年には 1 億 700 万人の 36%（39 万人）になると推計されている（国立社会保障・人口問題研究所、2012）。一方で、世帯数は 2020 年ごろまで増加を続けると予測され、これはすなわち高齢者のみを含む夫婦のみの世帯や独身世帯が増えていくことを意味する（国立社会保障・人口問題研究所、2013）。人口構成や産業、都市と地方の関係などの社会構造や経済構造は、大きく変化していくことが予測される。このような変化の中で、特に重要な社会的な期待として「安全・安心な生活」「生き生きとした生活・雇用環境」「健康の維持」があげられる。これらの社会的期待を満たすためのエネルギーサービスを創出・強化するために必要な研究開発が重要である。またエネルギーの効率的利用は、CO₂ 排出量削減による地球環境問題の改善だけでなく、例えば健康改善や生産性向上などのさまざまな便益、すなわちコベネフィットをもたらす。コベネフィットの評価や見える化の研究も必要である。

日本はこれまでに、省エネ白物家電や LED 照明、ハイブリッド車などの省エネ技術や高効率なエネルギー利用技術などの優れたハード技術を世の中に送り出してきた。高効率な省エネ家電機器の普及などで世帯あたりのエネルギー消費量の増加は近年は頭打ち傾向であるが（日本エネルギー経済研究所、2014）、世帯数は増え続けている。前述した社会構造変化により今後も世帯数の増加が続けば、家庭部門全体のエネルギー消費量はなかなか減っていかないことを意味する。高効率なエネルギー利用を推進するためには、エネルギー消費実態を

² 茅恒等式では一国全体のサービスを GDP で表している。

把握し、前述の社会・経済構造の変化を踏まえた上で将来の需要構造を予測することが必要である。とりわけ、産業、民生、運輸部門のエネルギー消費において、3部門をそれぞれ分類することでは捉えきれないエネルギーの横断的消費構造があることを認識すべきである。その場合の環境と社会、経済のトリプルボトムラインに着目する必要がある。また、2011年の東日本大震災後、節電などの省エネ行動によって一般家庭の電力消費量が1割弱減った（住環境計画研究所、2011）。このことは、消費者個人の気づきや意識・行動変容による省エネルギーのポテンシャルがあることを示している。エネルギー利用における消費者の行動パターンを把握・予測し、消費者行動の変容を促すシステムやサービスの開発が必要である。また、ネットワーク化やビッグデータを活用したエネルギーの高効率利用のためのサービスや、需要側資源を活用したエネルギーマネジメントシステムの技術基盤の確立が必要である。

民生部門におけるエネルギー利用においては、熱の利用についての研究開発が必要である。日本の熱利用機器の技術はすでに世界トップレベルであるが、利用実態を踏まえた更なる機器効率化が必要である。低炭素化のためには、中低温の未利用熱や太陽熱エネルギーを経済的合理性に沿って利用・普及するための研究開発が必要である。また、住宅・建築部門におけるエネルギー消費量は増え続けており、ネット・ゼロ・エネルギー・ビル（ZEB）やネット・ゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH）の普及拡大に向けて、建物躯体と設備の統合的効率化に向けた研究開発が必要である。

運輸部門におけるエネルギー消費量の8割以上が自動車である。低炭素なエネルギー利用のためには、PHVやEV、FCVなどの次世代車を先進国で普及・拡大していくことは必然であり、そのために必要な次世代自動車本体の研究開発、及び利用方法を考慮した充電インフラの整備などを推進していくことは重要である。一方で、内燃機関を用いる自動車は世界において今後も引き続き主流となる。このため既存技術をベースとした競争領域の開発は産業界が主体で行うが、共通基盤になるような非競争領域の研究を産学協同で継続的に進めていくことが必要である。またエネルギーの高効率利用という点では、自動車の走行・利用環境の改善やそれを実現する社会システム、物流のあり方の研究開発も必要である。

また、日本の中長期的な将来を見据えると、エネルギーセキュリティ向上や低炭素化という点において、水素エネルギーの普及にむけた利用技術の開発も必要である。

最後に、さまざまな新しいエネルギー利用技術は普及しなければ効果は得られない。その技術を社会に普及・定着させるための社会的技術の開発や普及に向けた制度作りなどが必要である。さらにいずれの技術においても、海外展開や普及による国際貢献や国際競争力強化の視点が不可欠である。

以上のことを整理し、社会の期待と課題で分類した俯瞰図を図2.2.19に示す。

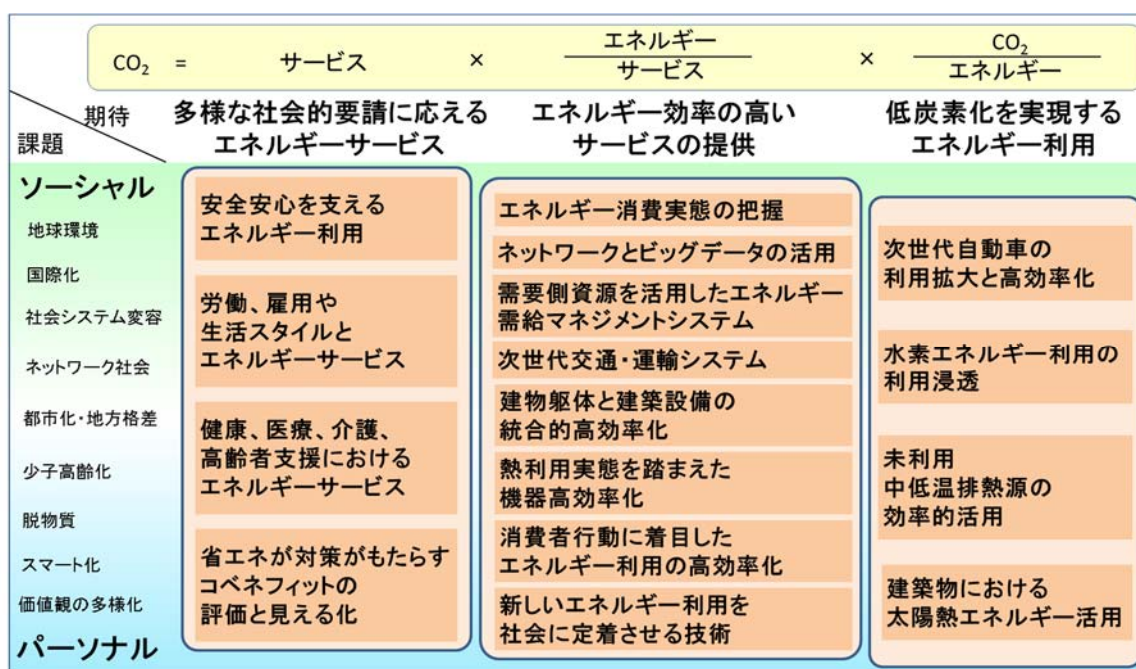


図 2.2.19 エネルギー利用区分の俯瞰図

本区分では、3つの社会の期待のもとに、以下に示す計16の研究開発領域を抽出した。

- 1 多様な社会的要請に応えるエネルギーサービス
 - 1.1 安全安心を支えるエネルギー利用
 - 1.2 労働、雇用や生活スタイルとエネルギーサービス
 - 1.3 健康、医療、介護、高齢者支援におけるエネルギーサービス
 - 1.4 省エネ対策がもたらすコベネフィットの評価と見える化
- 2 エネルギー効率の高いサービスの提供
 - 2.1 エネルギー消費実態の把握
 - 2.2 ネットワークとビッグデータの活用
 - 2.3 需要側資源を活用したエネルギー需給マネジメントシステム
 - 2.4 消費者行動に着目したエネルギー利用の高効率化
 - 2.5 熱利用実態を踏まえた機器高効率化
 - 2.6 建物躯体と建築設備の統合的高効率化
 - 2.7 次世代交通・運輸システム
 - 2.8 新しいエネルギー利用を社会に定着させる技術
- 3 低炭素化を実現するエネルギー利用
 - 3.1 次世代自動車の利用拡大と高効率化
 - 3.2 未利用中低温排熱源の効率的活用
 - 3.3 建築物における太陽エネルギー活用
 - 3.4 水素エネルギーの利用浸透

原子力区分

2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」において、原子力は、①「安全性の確保を大前提に、エネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源」として位置づけられている。一方で、原子力発電への依存度については、②「省エネルギー・再生可能エネルギーの導入や火力発電所の効率化などにより、可能な限り低減させる」とも記載されている。原子力発電所の再稼働を進める際には、原子力規制委員会の判断を尊重し、③「立地自治体等関係者の理解と協力を得るよう、取り組む」ことが言及されているものの、東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故の影響により、長期的エネルギーとしての「原子力」の位置づけについて国民的なコンセンサスが得られているとは言い難く、2014年12月現在、原子力発電所の再稼働にまで至っていない状況である。さらに、使用済燃料問題については、④「現世代の責任として、国際的なネットワークを活用しつつ、その対策を着実に進めることが不可欠である」とし、加えて、核セキュリティについては、⑤「核不拡散や核セキュリティ強化に必要となる措置やそのための研究開発を進める」との方向性が示されている（経済産業省資源エネルギー庁、2014a）。

このような社会状況を鑑み、当区分では、原子力の利用を社会的な観点から俯瞰的に捉え、諸課題を抽出・整理するため、（１）原子力をより安全に維持・活用する場合に取り組むべき研究課題、（２）原子力の将来にかかわらず取り組むべき研究課題、（３）原子力に依存しない場合に取り組むべき研究課題、の３つの観点から本報告書を構成することとした。エネルギーとしての原子力の今後のあり方について国論が二分している現在、原子力発電の将来について、その可能性を限定することなく幅広い選択肢を提示することを念頭に構成を考えた。また、本報告書の作成に当たっては、「原子力発電の社会的位置づけが明確となる目次構成とすること」、「持続可能な社会が実現していくためのグローバルな視点、地球全体の視点を入れること」、「社会がどう受け入れるか考慮すること」を基本的な方針とした。各観点における領域については、研究開発に関する問題点・課題を抽出し、図 2.2.20 のような目次構成とした。

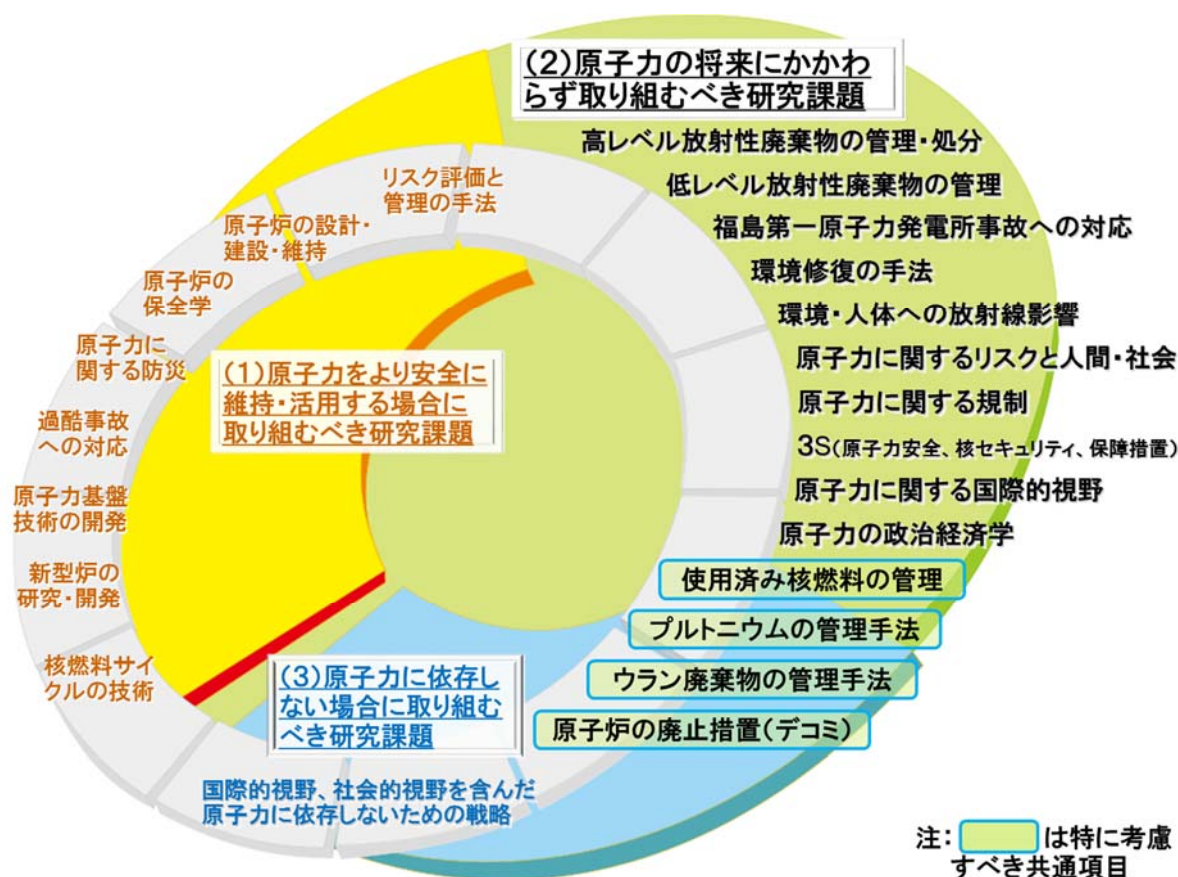


図 2.2.20 原子力区分の俯瞰図

(1)については、上記①の記載はあるものの、原子力の利用を前提とした記載ではなく、我が国のエネルギー政策に関する政治的判断に必要な科学的知見に基づいた情報などを提供することを主眼として、以下の8領域を選定した。

- 1) リスク評価と管理の手法
- 2) 原子炉の設計・建設・維持
- 3) 原子炉の保全学
- 4) 原子力に関する防災
- 5) 過酷事故への対応
- 6) 原子力基盤技術の開発
- 7) 新型炉（核融合含む）の研究・開発
- 8) 核燃料サイクルの技術

1)、4)については、今後、原子力発電所を運営していく上でのリスクガバナンスを考える上で重要となる領域である。また、8)については、我が国のエネルギー安全保障や上記④から軽視できない。

(2)については、原子力発電に依存する、しないに拘わらず必要となる研究開発について以下の14領域を選定した。

- 1) 高レベル放射性廃棄物の管理・処分
- 2) 低レベル放射性廃棄物の管理

- 3) 使用済み核燃料の管理
- 4) プルトニウムの管理手法
- 5) ウラン廃棄物の管理手法
- 6) 原子炉の廃止措置（デコミ）
- 7) 福島第一原子力発電所事故への対応
- 8) 環境修復の手法
- 9) 環境・人体への放射線影響（防護含む）
- 10) 原子力に関するリスクと人間・社会
- 11) 原子力に関する規制
- 12) 3S（原子力安全、核セキュリティ、保障措置）
- 13) 原子力に関する国際的視野
- 14) 原子力の政治経済学

10)、11)、12)については、(1)の1)、4)と同様に、今後、原子力発電所を運営していく上でのリスクガバナンスを考える上で重要となる領域である。特に12)については上記⑤からも欠かすことはできない。2)、5)、6)、8)については、上記②の「可能な限り低減」するために必要な原子炉廃止にかかる領域である。また、1)～5)については、上記④の使用済み燃料問題と関係が深い。特に1)、4)については、福島第一原子力発電所事故により発生したデブリの問題、我が国が保有している余剰プルトニウムの問題と関連している。

7)については、喫緊の課題ではあるが、復興的なものに関しては含めないこととした。現状で浮かび上がっている課題に着目しつつ、今後10年程度を見据えた課題にも言及した。加えて、日本の独自色、固有の事情を勘案しつつグローバルな視点についても考慮したが、現在、行われている対応が広範囲にわたるため、本報告書ではその一部を記述するにとどめた。

(3)については、今後、需要が見込まれるため重要な研究開発になると考えられる。上記②に「可能な限り低減」との表現はあるものの、その極端な例として、原子力に依存しないことを想定した場合に、原子力への依存度をなくしていく行為を滞りなく進めるのは非常に難しく、特に役立つ研究、重要性が増す研究を重点的に行う必要がある。また、本報告書の視野は、原子力への依存度を高める場合に必要な研究開発課題から、依存を可能な限り低減していく場合に必要な研究開発課題を含むものであるが、特に原子力に依存しない場合には、その時期を踏まえて必要な準備が十分に講じなければならない。

そこで、敢えて原子力に依存しない場合に特化した戦略に関する領域として、

- 1) 国際的視野、社会的視野を含んだ原子力に依存しないための戦略

を立てることとした。なお、原子力発電に依存しない場合において(2)の3)～6)の4領域は、特に考慮すべき共通項目であることを明記した。

(2)に関連してリスクコミュニケーションについての課題も残されている。リスクコミュニケーションの方法論が科学的に確立しているものであっても、上記③にも関連して、社会心理学的、社会科学的に課題があれば、その課題に対して国は重点的に支援する必要があると思われる。このような背景の中、当区分では、リスクコミュニケーションについては、「原子力に関するリスクと人間・社会」領域にて一部言及することとした。

環境区分

環境区分の俯瞰では、環境問題をその取り組みの歴史から捉えることから始めた。まず、60年代から70年代にかけて行われた公害への取り組みは事後対応的・対処療法的なものであった。80年代以降、地球規模の環境問題が認識されるようになり、気候変動に対する緩和策・適応策などのように未然防止的な取り組みがなされているが、自然災害には事後対応的であるといえる。そして、今後予測される環境問題は、気候変動のような不確実性が高い事象や災害などの不連続性の高い事象が多く、従来の個別的対策ではなく包括的な取り組みが求められる。そして、環境に影響を及ぼす事象を予測し先手を打つという考え方が必要であり、対策が事後対応的であった異常気象や自然災害をも対象に含め、「環境設計・創造」という考え方が重要であると考え、これを環境区分の俯瞰における基本理念とした。さらに、俯瞰にあたっては、環境は人の健康を含む生命の持続性の基盤であることから「次世代のための環境」を前提とすること、普遍的な課題解決型科学技術の記載を目指すこと、さまざまな社会状況が変化しつつある2015年という時点を強く意識することとした。

これらの考え方は今後の研究開発の方向性を考慮する上で重要な視点であり、この視点から抽出された研究開発の推進が必要と考えられる。

上記の基本的考え方に沿って検討した結果、5つの項目が抽出された。

1. 持続可能な人間居住

地球規模の問題に対処する意味でも、地域の問題の解決を図る意味でも、都市の環境負荷をどのようにして下げるかが重要な課題である。とりわけ、GHG発生量の多くを占める運輸・交通の今後のあり方、環境負荷が小さくても快適な居住環境の形成は優先的に取り組むべきである。今後、人口の急増が予想される開発途上国の都市環境の居住性を向上させると同時に環境負荷を低減する技術を開発できれば、日本が地球環境保全に大いに貢献できる。

2. 生態系サービスの適正管理

人間社会と生態系との関係を踏まえた生物多様性や遺伝資源の研究開発も促進すべきである。そのためには、生物学や生態学など研究者に加えて、農学や林学、薬学、工学、経済学など、生態系や遺伝資源の利用を中心としてきた分野の研究者も加わった総合的な研究体制を整えることも必要となるであろう。

3. 持続可能な生産と消費

製品のライフサイクルを通じて生じる環境負荷を把握し、より小さくするための研究開発はこれまでも日本で先進的に進めてられてきたが、今後も、いっそうの強化が求められる。産業の下流部門ではレアメタル、ベースメタル、リンなど、枯渇が懸念される元素の回収と再利用に係る技術を緊急に開発すべきである。

4. 災害による環境への影響低減と環境の再創造

東日本大震災以降、防災や減災など、災害への取り組みの必要性が再認識されている。自然災害のリスクや災害に伴う工場などの事故による有害物質放出のリスク、住民とのリスクコミュニケーション、被災地の復興・再建の手法に関する研究開発もいっそうの努力が求められる分野である。

5. 観測・計測とその情報に基づく環境管理

情報に基づいた環境の管理は、環境の把握だけでなく、環境に影響を及ぼす事象を予

測し先手を打つという点においても必要不可欠の分野である。本分野ではすでにさまざまな取り組みがなされ多くの実績が蓄積している。これらの実績を生かし活用していくための包括的なしくみの構築が求められている。同時に、既存の手法では不十分な計測技術の進展など、残された課題への対応とそれを広く普及するための取り組みも忘れてはならない。

なお、環境分野における科学技術の研究開発においては、実現可能性や経済性と同時に社会的受容可能性に留意しなければならない。市民参加が不可欠となっている現状を踏まえれば、新たな技術が社会にどのように受け入れられるかまでを踏まえた研究開発でなければならない。そして、市民やマスメディアと専門家の間のリスク認知に大きな乖離があることは古くから知られているが、福島第一原子力発電所事故後、それが以前より大きな問題となってきた。技術の受容可能性をどう評価するか、また、受容できる技術をどう開発していくかもひとつの課題である。

図 2.2.21 は、上記 5 項目をソフト（制度）／ハード（社会インフラ）、人工／自然という 2 つの軸に配置した環境区分の俯瞰図である。なお、項目「4. 災害による環境への影響低減と環境の再創造」については「定常時」「非定常時」の 2 階層で表現した。

環境区分では、この 5 項目の下に以下の 33 の研究開発領域を設定した。

- 1 持続可能な人間居住
 - 1.1 建築と住環境（室内環境、建物の環境性能、建物周辺の環境）
 - 1.2 都市・地域計画（コンパクトシティ、インフラ管理含む）
 - 1.3 モビリティとその管理
 - 1.4 安全な水の供給（水道と安全性確保）
 - 1.5 水環境管理（下水道、浄化槽、湖沼、水辺創造など）
 - 1.6 人間居住による環境負荷（GHG排出、水、大気への排出、緑地の喪失）
 - 1.7 都市環境と健康影響（大気、化学物質、緑地、熱環境等）
 - 1.8 開発途上国の人間居住と適正技術
- 2 生態系サービスの適正管理
 - 2.1 生物多様性の保全と持続的利用
 - 2.2 陸域資源と生態系管理（含む陸水）
 - 2.3 沿岸域および海洋の資源と生態系管理
 - 2.4 流域レベルの生態系管理（森林から海まで）
 - 2.5 生物多様性及び生態系サービスの評価
 - 2.6 生態系サービスの管理システム・制度のための技術管理
- 3 持続可能な生産と消費
 - 3.1 製造業におけるグリーン技術（ゼロエミッション、環境配慮設計、クリーナープロダクション）
 - 3.2 サプライチェーンの環境マネジメント
 - 3.3 LCAに基づく生産と消費管理
 - 3.4 廃棄物の発生抑制
 - 3.5 リサイクル技術（都市鉱山含む）
 - 3.6 水の循環利用技術

- 3.7 有害物質のマネジメント（PRTR、RoHS含む）
- 3.8 元素の循環と利用（リン・窒素）
- 3.9 開発途上国による循環型技術（農村型小規模バイオガス化装置）
- 4 災害による環境への影響低減と環境の再創造
 - 4.1 自然災害（地震、津波、台風、干ばつ、豪雨、豪雪、火山等）が地域環境へ及ぼすリスク
 - 4.2 人為的災害（工場等での事故、危険物質運搬時の事故等）が環境へ及ぼすリスク
 - 4.3 災害のリスク（人間への被害、環境への被害）の予防対策
 - 4.4 災害発生直後の環境情報観測・把握手法とリスク軽減手法
 - 4.5 災害廃棄物処理と利活用
 - 4.6 自然環境の回復過程の促進
 - 4.7 社会環境の再創造手法
- 5 観測・計測とその情報に基づく環境管理
 - 5.1 地球規模の環境モニタリング（リモートセンシングと実測）
 - 5.2 地域の環境と人間活動の把握（地域の環境計測、人間活動とその影響の把握）
 - 5.3 環境情報基盤の整備と活用（ユビキタス情報、環境ビッグデータ、GIS）

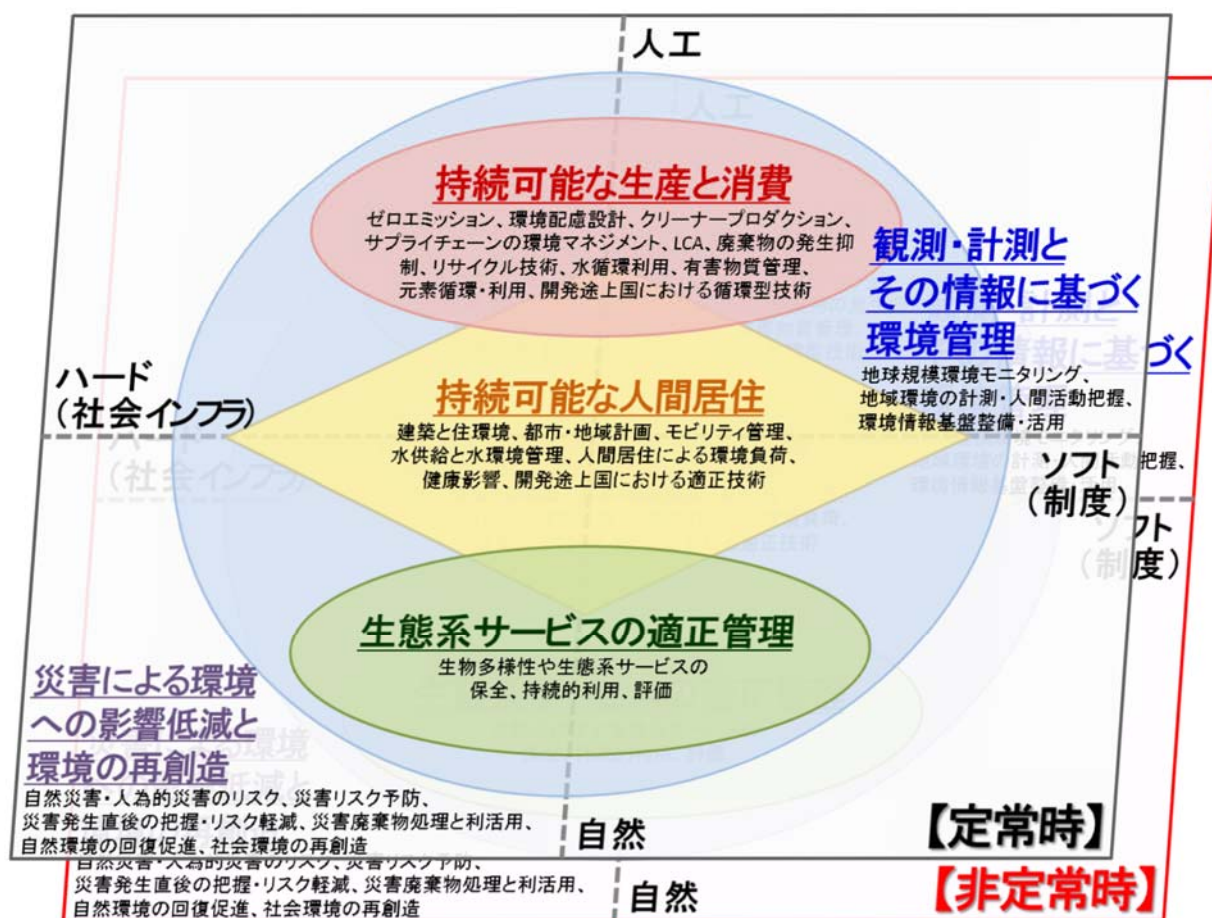


図 2.2.21 環境区分の俯瞰図