

2. 研究対象分野の全体像

2.1 俯瞰の範囲と構造

2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画（第四次）」では、「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「3E+S」を進めることの重要性が掲げられている。エネルギー分野の俯瞰では、この日本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。

エネルギー分野の俯瞰図を図2-1に示す。エネルギーは、社会の喫緊の課題に由来する研究開発分野である。社会的期待を最上位層に配した階層構造とすると、階層の一つ下に研究開発領域が組み込まれている。エネルギー分野は社会課題解決に向けた総合工学分野であり、関係する科学技術（構成要素）は広範に亘る（機械工学、電気工学、化学工学をはじめ、ナノテク・材料、ICT、バイオすべてを包含）。

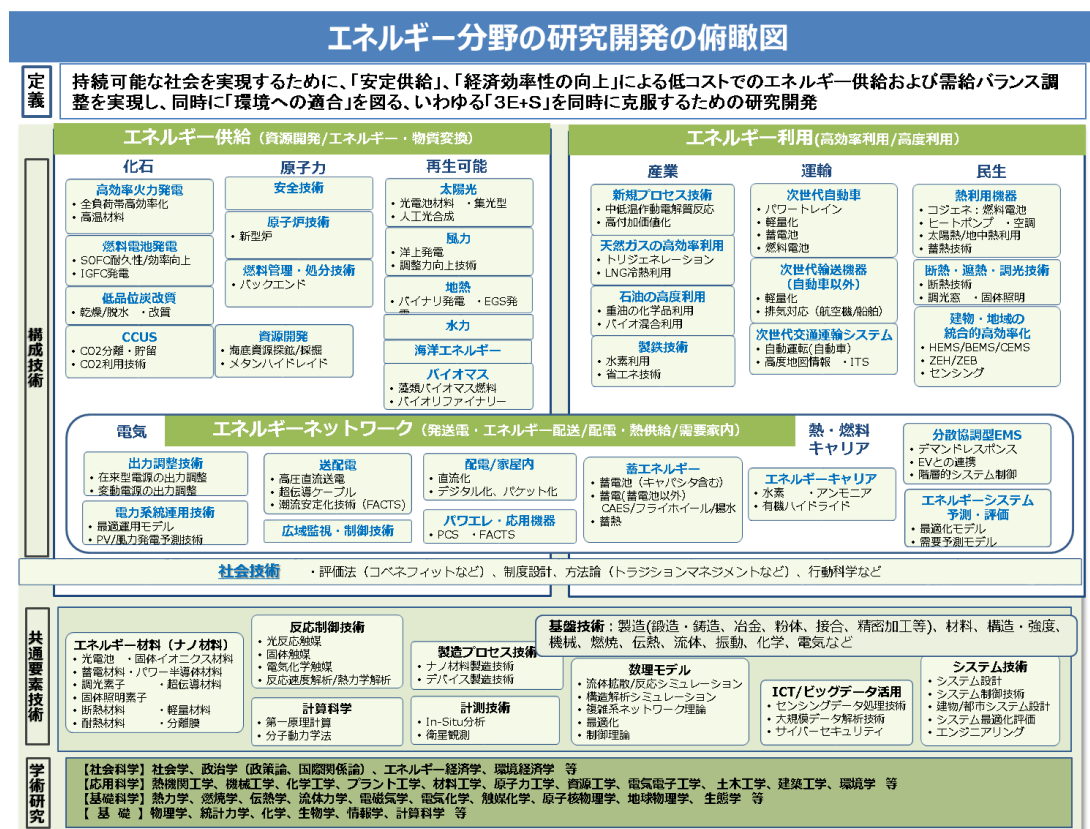


図2-1 エネルギー分野の研究開発の俯瞰図

具体的には、社会的期待である「持続可能な社会の実現」の社会・産業における事業が存在し、その事業を実施するための手段が構成技術領域となる。この構成技術領域を「エネルギー供給」「エネルギー利用」「エネルギーネットワーク」の3区分とし、俯瞰調査を行った。「エネルギー供給」区分では、日本のエネルギー・フローならびに資源輸入量と二酸化炭

今後も定点的に動向を把握すべき主要な 31 の研究開発領域を抽出し、研究開発の動向やトピックス、研究課題、国際ベンチマークを整理した。

6

図 2-2 エネルギー分野の主要な研究開発領域

2.2 分野における研究開発の歴史・変遷

このように人類は、石炭、石油、天然ガス、さらには原子力をエネルギー源として広く利用し、社会経済の急速な発展と豊かな文化の構築を成し遂げた。しかし、エネルギー消費の爆発的な増大は、CO₂排出の増加による地球気候変動を引き起こすことになった。1997年の第3回気候変動枠組条約締約国会議（COP3）は、世界で初めての温室効果ガス（GHG）の削減目標を取り決め（京都議定書）、さらに2015年に開催されたCOP21で、日本は、GHG

排出量削減の新しい目標—2030年までに2013年比で26%削減—を国際公約として発表している。

日本では、1970年代の石油危機を契機に、産業部門を中心に省エネルギーが急速に進展した。太陽電池、リチウム電池、低公害自動車、C1化学などの技術も、この頃始まった研究開発によるところが大きい。2011年3月11日に発生した東日本大震災を契機とし、原子力による発電継続が困難になる中、代替として使用される火力発電由来のCO₂の排出量増加という新たな課題を抱えることになった。

このような時代の要請に応じて国内外の学術・科学技術の動向も変化、発展してきている。

物理学上の定義によれば、エネルギーとは力学的な仕事に換算し得る諸量の総称である。自然科学におけるエネルギーの価値に関する研究は熱力学として発展してきた。エネルギーは、力学的、化学、熱、電磁気（電気）、光、原子力の6つに分類できる。例えば、火力、原子力発電等が熱エネルギーによって生じた蒸気等をタービンによる回転運動に変換し、その運動エネルギーを交流発電機によって電気エネルギーに変換するシステムとして、太陽光発電は光エネルギーを電気エネルギーに変換する電力供給源となる。

また、エネルギーの利用としては、石炭、石油等から、発電所で電気に変えられるもの、製鉄所等あるいは自動車や暖房等で燃料としての直接利用されるもの、石油化学製品や肥料等工業用原料に変えられるもの、と大きく3つに分類することができる。

エネルギー分野は本来的に問題解決型の目的をもった分野であるが、現象の解明や新たな理論の創出等アカデミアが貢献するところも大きい。特にエネルギーと関連の大きい、機械（動力・熱）、原子力、電気、化学工学、応用物理、材料の学問分野から歴史を振り返る。

（1）機械

1890年代以降の蒸気タービン、1930年代以降のガスタービン、1950年代以降の原子炉などのエネルギー関連機器に加え、自動車、航空機、鉄道などの輸送用機器、繊維、鉄鋼などの製造プラント、空調冷凍などの設備機器、ロボットを含む生産機械、種々の家電製品などの開発において、機械工学の貢献は顕著であったと言える。

機械工学は、材料力学、熱力学、流体力学、機械力学の4力学を中心とした分析（アナリシス）に重点が置かれた縦糸としての学術コアと、設計工学、生産工学、制御工学など設計・生産を中心とした統合（シンセシス）に重点が置かれた横糸としての学術コアとが織りなすディシプリンに、エネルギー、輸送、資源、環境、医療福祉などの多彩な応用技術（人工物の科学）に関わる工学知を組み上げた、特異な立体構造を有する知の体系である。そのような知の構造に由来して、機械工学は対象を選ばず、広範な技術の基盤を創造する役割を果たし、さらには社会のための科学・技術の方向性を常に牽引し得る特性を有してきた。

- 蒸気タービンの技術進展を例にとると100年以上にわたり技術改良がなされ、主にタービン入口蒸気の高圧化・高温化により効率向上が行われてきた。第二次世界大戦前は日本の火力発電の効率は20%を超えることはできなかった。戦後、米国から最新技術が導入され、一気に高効率化が進んだ。再生サイクル、再熱サイクルの採用と合わせて、高圧化・高温化が更に進み、1960年代の亜臨界圧で発電効率約36%（送電

端、高位発熱量基準)、1980年代の超臨界圧で発電効率約38%、そして1998年には温度600℃のいわゆる、超々臨界圧(発電効率約40%)が営業運転を開始した。この高圧化・高温化の対応には材料技術が重要な役割を果たしている。1950年代後半にはボイラの過熱機関や再熱機関などの高温部材に、クリープ強度、高温腐食、水蒸気酸化など、耐熱性の観点から18-8系ステンレス鋼が使用されている。超々臨界圧プラントに向けては高耐食・高クリープ破断強度のオーステナイト系ステンレス鋼が開発された。

- 風車発電は1897年に英国と米国で独立して誕生した。1891年に Poulla Cour が、回転数調整装置を持つ風車を実用化したが、機械式制御と剛性の弱いブレードという技術的な制約があり、下火になった。オイルショック後の1980年代にカリフォルニアの風力発電ブームが転機となった。この頃には、風車の自動運転を可能とする電気制御技術と、軽くて丈夫なガラス繊維強化プラスチック製ブレードを安価に量産する石油化学技術が実用化された。1990年後半からは経済性向上のための大型化がトレンドとなっている。
- 燃焼分野には起源を1920年代に遡る国際研究コミュニティとして、The Combustion Institute が、世界中の燃焼研究の礎となってきた。1950年代に熊谷清一郎(東大)が実施した液滴燃焼に関する微小重力実験は、米国による国家規模の宇宙実験活動へつながった。また90年代から始まった加熱工業炉のための新燃焼方式「高温空気燃焼技術」の研究開発では、均一燃焼場形成によって30%と大幅な燃料削減とNO_xの著しい低減を達成しただけでなく、あらゆる角度から検証された基礎研究を武器に同技術が種々の異種燃焼器に応用された。日本発の技術である「高温空気燃焼技術」は海外でも盛んに研究が行われ Mild-combustion, Flameless combustion といった呼び名で基礎および応用研究が継続されている。
- 現在のガソリンエンジンの原形は、1877年にニコラウス・オットーのガス燃料を用いたエンジン開発に始まるとされる。一方、ディーゼルエンジンは、ルドルフ・ディーゼルが発明している。ガソリンエンジンではキャブレター、ディーゼルエンジンではジャーク式ポンプといった機械式制御装置が用いられていたが、1960年代からの排気規制強化や、燃費向上の要求に従い、電子制御が取り込まれるようになった。例えばガソリンエンジンでは、1980年代に電子制御式の燃料噴射装置が使われるようになり、排気管の酸素センサーのフィードバック信号との組み合わせにより燃料噴射量を精度よく制御できるようになった。これにより予混合気の量論当量比付近で燃焼させることで、排気中のNO_x、CO、HCは三元触媒により高い浄化率で同時低減が可能になった。

(2) 原子力

19世紀の終わりにヴィルヘルム・レントゲンがX線を発見してから20世紀中頃までに放射線工学、量子力学、原子核物理学の分野は、驚異的な発展を遂げた。1942年には、マンハッタン・プロジェクトが始動し、エンリコ・フェルミ、レオ・シラード、アーサー・コンプト

ン、ユージン・ウィグナーらが開発した世界初の原子炉 CP-1 が臨界に達した。1945 年、不幸にもこれらの研究業績は核兵器という形で登場することになった。

1951 年に米国にて原子力を用いた発電が実施された。1953 年に米国のアイゼンハワー大統領が国連総会で演説した「平和のための原子力（ATOMS For Peace）」をきっかけに原子力の平和利用に目が向けられることになった。これを受け、日本においても、1956 年に原子力基本法が施行された。

1966 年に日本初の商業用原子力プラントが運転開始された。その後、準国産エネルギー資源化、原子力発電技術の国産化など、自主技術化する取り組みを展開した。これを通じて、1996 年日本型軽水炉とも言われる改良沸騰水型原子炉（ABWR）の営業運転などに至った。

現在の最新原子炉は先進的な安全方策を導入した第 3+ 世代炉であり、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（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）の開発も行われている。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 協定が発効している。

- 核融合におけるプラズマ閉じ込めの研究は、1950 年代から当時の科学技術庁、大学等によって開始された。この年代に原子力委員会には核融合専門部会が、日本学術会議には核融合特別委員会が設置されている。1968 年、ソ連の考案した「トカマク」と呼ばれる磁場閉じ込め方式による実験成功を機に核融合研究の主流はトカマク方式となり、1990 年代には日本の JT-60（量子科学技術研究開発機構、以下量研機構）、米国の TFTR 及び欧州の JET に代表される大型トカマク装置で数億℃に及ぶ核融合臨界プラズマ条件が達成される等、トカマクプラズマの高性能化が進展した。ITER は 1988 年に日米欧ソ（露）により開始され、その後、韓国、中国、インドが加わり、大規模な国際プロジェクトとなった。2025 年の完成後、実燃料を使って 50 万キロワットの核融合出力を 300-500 秒間持続させる計画である。

（３）電気

電力システムは、1882 年にトーマス・エジソンが火力発電機と配電網を設置したことに始まる。エジソンの直流方式に対し、ニコラ・テスラが 1884 年に交流方式の導入により、高電圧による遠距離送電に成功した。その後、サミュエル・インサルが、遠隔地の複数の大規模発電所と需要家を交流送電網によりネットワーク化したパワープールを発明し、現在の大規模集中システムの基盤をつくった。

日本では 1887 年に主に照明用の電力供給が始まり、1923 年には国内初の 154kV 長距離送電線が実用化され、遠方の水力発電所と都市圏の変電所が高压送電線で結ばれた。外国企業との技術提携により、大容量発電機、電動機、高電圧機器などの製品開発が進んだ。

第二次世界大戦後は、今日の発送配電一貫経営の体制となり、1956 年には貯水池式水力と新鋭大型火力を組合せた「火主水従」方針に従い、冷却技術のめざましい進歩を遂げた火力の大容量化が進められた。1966 年には日本初の商用原子力発電が始まった。基幹系統では、長距離大電力送電線と都市圏外輸系統への 275kV 超高压が導入され、広域連系のための超高压社間連系線も大都市間で整備された。この頃から系統監視、系統制御、事故復旧自動操作

などのコンピュータ技術が取り入れられるようになり、周波数精度も電圧精度も世界最高レベルに達した。交流送電網の中で直流送電が改めて見直され、1960年代には水銀整流器、1970年代には半導体サイリスタ素子が開発され、その後パワエレ機器が系統動揺安定化に用いられた。変圧器の大容量化、SF₆ガスや難燃性油利用などの開発による絶縁性能向上と小型化により海外先進国と肩を並べた。

1970年以降では産業公害に対応した硫酸化物の抑止対策、余剰電力の有効活用、変動負荷の追従能力、事故時の瞬時供給力などの面で、大規模な揚水式や、低公害の近郊型火力としての液化天然ガスを用いた火力発電が登場する。基幹系統の面では、原子力や揚水発電所と都市圏とを結ぶ長距離幹線に500kV送電を採用し、1979年には本土の9電力が全て相互連系された。電力ケーブルにおいては、強制冷却技術と大容量化の技術開発が進んだ。

1980年代には地球温暖化重視の下、天然ガス火力発電が定着し、複合サイクル発電により発電効率は一挙に上昇した。架橋ポリエチレンケーブル（CVケーブル）に日本独自の製造方式と絶縁特性の解明により、世界に先駆け超高压ケーブルを実現した。

1990年代に入ると電力自由化問題への対処が本格化する中、天然ガス火力発電は改良型複合サイクル式へのリプレースにより、大幅な出力上昇と効率向上が図られた。また、一段と大型化した単機容量の石炭専焼火力が導入され、バイオマス混焼型も出現した。基幹系統では1970年代からUHV（1000kV）送電技術の研究開発が進められたが、現状ではUHV設計・500kV運用となっている。

- 1954年にABB(スイス)は世界で初めHVDC(高压直流:High voltage direct current)を商用送電線に導入した。これまでにABBは、中国の向家ダムから上海までの1980kmの送電を直流送電で実現した。効率は93%と高い上に、最大7200MWもの電力をDC800kVで実証している。
- 本格的な高温超電導ケーブルの試験は2001年に日本で始まり、ビスマス系超電導線は2004年に工業製品化され、超電導ケーブルについても研究所レベルではあるが100m長さの3芯一括型ビスマス系超電導ケーブルの実用性検証試験が実施された。
- パワーエレクトロニクス研究にはパワー半導体デバイスの材料とデバイス構造の開発とパワーデバイスの電力変換回路・制御機器・電動機駆動などへの応用がある。1957年に米国のGeneral Electric社がサイリスタの開発・実用化に成功した。1980年代には、デバイス構造の研究が盛んになり、電圧駆動型のパワーMOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と、IGBT（Insulated-Gate Bipolar Transistor：絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）が発明された。現在普及しているパワー半導体は材料（半導体）にシリコン（Si）を用いたものであるが、Siに関しては、微細化技術の進展、ウェハ品質の向上、製造プロセスの低温化など新しい作製プロセスの導入やデバイス構造改良（スーパージャンクションMOSFET、IGBTの世代交代など）により、性能を向上させてきた。これまで15年でおよそ一桁のパワー密度の向上を実現させている。

（４）化学工学

石炭利用に端を発し、石炭ガスからのメタノール製造、アンモニア製造、人造軽油製造（フィッシャー・トロプシュ）が初期の応用化学の重要なプロセスであった。1913年、ハーバー・ボッシュ法のアンモニア合成による硫酸がドイツ BASF で製造された。日本では、1872年から、重化学工業の硫酸、ソーダ、セメント、コークス、製紙、精糖などの技術が順次、欧米から輸入され、官営で製造が行われた。1901年、官営八幡製鐵が操業し、多種のコークス炉が導入された。1919年、官立の窒素研究所が設立された。肥料製造にアンモニア合成を取り入れ、自力で触媒開発を進めたことから、日本の総合化学工業が進み始めた。1980年台に入ってから尾崎・秋鹿らが提唱したアルカリ修飾 Ru 触媒がハーバーの鉄触媒よりも高い性能を示すとして BP や Kellogg らによって商業化された。

1940年頃まで、化学工業は石炭化学が主流であったが、1920年、米国スタンダードオイルが石油留分のひとつであるプロピレンからイソプロパノールを合成したことにより、石油が化学製品の材料として認識されるようになった。石油の接触分解は1936年に Houdry や小林らがシリカアルミナ・白土を用いることで進むことを見出し、重質な油を軽質化して利用することが進められた。その後、第二次世界大戦後に本格的な石油利用の時代となり、石油を蒸留して得られる軽質なナフサからの化学品製造が大きな役割を果たした。日本では、ナフサを原料とし、ナフサクラッカーを用いた熱分解によってエチレン、プロピレン、ブチレン、トルエン、キシレンなどを製造する石油化学産業が進展した。

産ガス国では、天然ガスを化学的に合成ガスへと転換するフィッシャー・トロプシュ合成により液体燃料（軽油）を製造する大規模プラントが稼働している。2000年頃から、産ガス国が安価な天然ガスを原料としてエチレン製造を開始した。最近では、石炭利用に再度注目が集まり、2008年には中国でルルギ法によるメタノールからのプロピレン製造が実証された。

この間、1963年にはカール・ツィーグラールとジュリオ・ナッタが新しい触媒を用いたオレフィンの重合法の発見とその基礎的研究でノーベル化学賞を受賞した。2000年にはアラン・ヒーガー、アラン・マクダイアミッドと白川英樹が導電性高分子の発見と開発でノーベル化学賞を受賞した。

酸性雨等への対応から、Ni/Mo 系・Co/Mo 系（ガソリン）や V/Ti 系（排煙脱硫）などの触媒による石油の脱硫が大規模に用いられ、硫黄の問題は大幅に改善した。三元触媒をはじめとして、その後の空燃比の希薄化やディーゼル対応に伴い、2003年には DPF（ディーゼルパディキュレートフィルター）が世界ではじめて日本で実用化され、2004年には尿素を用いた SCR（選択的還元）による NO_x 除去が実用化された。近年は希薄な NO_x をトラップして濃縮後に還元除去する LNT（リーンノックストラップ）触媒も開発され実用化されている。

- 触媒作用の研究は、19世紀前半にキルヒホッフやベルツェリウスがその作用に注目し、1901年に F・W・オストワルトが触媒の定義を与えたときから今日まで、多くの研究者によって続けられてきた。化学分野において人類最大の発明と言われるアンモニア合成反応は1913年にハーバー、ボッシュ、ミタッシュによって実用化され、現在では人工合成されるアンモニアの8割以上は化学肥料として、食料生産の大半を支えている。また、1920年代にはフィッシャー・トロプシュ合成が開発され、第二次大戦中はドイツでは年産数百万トンの液体燃料が石炭から生産されていた。原油の多くを占

める重質油からガソリンや軽油など需要の多い軽質油へ変換する石油のクラッキング技術も 1900 年以前より研究は進められ、第二次世界大戦頃には触媒を流動移動層として用いる流動接触分解法（FCC）により行われている。環境浄化に関わる触媒反応は、発電所、工場など固定発生源からの排気浄化と、船舶、鉄道、自動車など移動発生源からの排気の浄化がある。発電所、工場などからの排気の浄化技術は、日本は 1960~1970 年代に大気汚染、水質汚染など深刻な公害問題を克服してきたことから、高いレベルの技術を有している。工場などから排出される窒素酸化物は、酸化チタン担持酸化バナジウム触媒などを用いてアンモニアと反応させて、無害な窒素と水に変えている。

- 1970 年代の石油危機以降、産業部門においては、熱交換器を用いた熱回収技術が発展してきた。特に、受熱流体と与熱流体を最適に組み合わせ、熱交換器ネットワークを構築することができるピンチテクノロジーの工場への導入・普及が進んだ。2010 年頃に断熱圧縮を用いて熱を再生し、循環再利用することでプロセスを大幅に省エネルギーとする自己熱再生が提案され、2012 年には NEDO プロジェクトでバイオエタノールの濃縮のための蒸留塔に導入し、その省エネルギー効果が実証されている。また、物質の化学変化を用いた例として、ケミカルヒートポンプや吸着式冷凍機などがあり、1990 年代以降実際にプロセスに用いた例が多く報告されている。

（５）応用物理、電気化学、材料、その他

前述以外にエネルギーに関連する重要な技術進歩としては、太陽電池、二次電池、水素製造と利用、燃料電池の実用化、光触媒、高温超電導などが挙げられるが、これらは応用物理、材料技術等の貢献が大きい。

太陽電池は、1954 年、ベル研究所によって結晶 Si 太陽電池が開発され、これが実用化の礎となった。近年、結晶 Si、薄膜 Si、CIGS [Cu (InGa) Se₂]、CdTe、GaAs 系集光型の太陽電池では、実用化が進み、より低コスト、より高効率を目指した開発が産学連携により行われている。現在ではシリコン系では多接合型で変換効率 40%を超えるまでに至っている。

電力の送電に関しては、従来は 50 万~100 万 V の交流による超高圧送電が主流であったが、近年は超電導送電に期待が集まっている。超電導は、1933 年にヴァルター・マイスナーによって発見された、超電導体が外部磁場を退けるマイスナー効果に端を発し、1957 年のジョン・バーディーン、レオン・クーパー、ジョン・ロバート・シュリーファールの BCS 理論、1987 年の 90K 近傍での Y 系超電導体の発見、その後の銅系超伝導体の発見、細野秀雄らによる鉄系材料の発見などが続き、最近は線材の実証などが進められている。

二次電池では、旭化成の吉野彰らは 1981 年に有機溶媒を用いた負極に前述の導電性高分子を用いることでリチウムイオン二次電池の実用化を可能にした。

水素製造に関しては、近年メタンを用いた水蒸気改質が Ni 系触媒を用いて大規模に行われている。化石資源消費削減を狙って、最近は再生可能エネルギーを用いた水電解やバイオマスガス化、光触媒による水分解なども研究が進んでいる。とりわけ光触媒は、1967 年に本多健一と藤嶋昭によって発見され、その後工藤昭彦らによる Z スキーム法や、堂免一成らによるオキシナイトライド法などが世界の研究をリードしている。また、パナソニック四橋ら

による光電極触媒法では高い効率を実現している。

燃料電池は、1839年にグローブ卿により初めて原型が作られると、ジェミニ計画での固体高分子形燃料電池の実用化、1980年台のムーンライト計画によるリン酸形の実証、固体酸化物形燃料電池の開発などが続いた。また、1987年にバラード社によるナフィオンの利用をきっかけとして固体高分子形燃料電池に再度注目が集まり、2009年には家庭用エネファームや燃料電池自動車の市場投入に至っている。

- 松下電池工業、三洋電機がニッケル水素電池を1990年に、ソニー・エナジー・テックが1991年にリチウムイオン電池を、それぞれ世界で初めて量産化した。これは1980年にJ.B.Goodenoughと水島らがリチウムイオンを吸蔵する遷移金属酸リチウムを電池の正極に使用することを提案し、その後1983年、吉野らが、正極にコバルト酸リチウム、負極にポリアセチレンという電池を試作し、「リチウムイオン電池」の原型が誕生したことに端を発する。実用化されたリチウムイオン電池は、負極に炭素系材料、正極にリチウムを含有する複合酸化物、電解質に低分子有機溶媒を使った二次電池で、軽くて高容量の活物質の組み合わせを使うことで、150～200Wh/kgという高い質量エネルギー密度を実現し、定置用や電気自動車用に使用されている。
- 高温超電導の研究は基礎・工学両面とも1986年のIBMチューリッヒ研究所による銅酸化物高温超電導体の発見以降、新規高温超電導体創出、新高温超電導材料の開発に向けた研究が中心となった。その後日本では、1988年のビスマス系銅酸化物、2001年の二ホウ化マグネシウム、2008年の鉄ニクタイトなど世界的に注目される超電導物質が発見された。銅酸化物高温超電導材料の開発において日本は世界をリードし続けており、特に線材を中心に材料特性、量産性の改善がこの数年顕著である。超電導ケーブルに用いられる長尺高温超電導線材として、第一世代（1G）とされているビスマス系線材（臨界温度：～110K）が住友電工社で、第二世代（2G）のイットリウム系線材（臨界温度：～90K）が米国AMSC社、日本のフジクラ社、古河電工社傘下のSuperPower社で製造されており、ケーブル製作に用いられてきた。
- 永久磁石材料開発は1917年の本多光太郎らによるKS鋼（コバルト・タングステン・クロム鋼）より本格化し、合金による磁石が先行し、次にフェライト（酸化物）が登場した。さらに1970年ごろから希土類を含む金属間化合物によって超強力磁石が作られるようになり、サマリウム・コバルト磁石で最高性能を達成する等、1970～1980年代初頭に日本の研究者が先導する分野となった。コバルトの価格が高騰し、新しい高性能磁石の必要性が認識される中、1982年に佐川真人らによるネオジム磁石（Nd₂Fe₁₄B 焼結磁石）により大きなブレイクスルーを迎えた。人工磁石の開発は、日本人の貢献が大きい。国内磁石メーカーは2004年ごろから粒界拡散技術を開発し、ジスプロシウム危機の際に省ジスプロ化の手段として発展、実用化させた。軟磁性材料では、電磁鋼板では1900年にHadfield（英）が珪素鋼板を発明し、1903年に製造方法が確立され、ドイツや米国において工業生産が開始された。1932年、東北大学の増本、山本らが、Fe-Si-Al合金の非常に高い透磁率を持つ材料「センダスト」を開発し、東北金属（現、NECトーキン）が工業化した。1934年にGoss（米）が方向性電磁鋼板の製造方法を発明し、翌年からArmco社（米）が製造を開始した。日本では1950年代に方向性電磁鋼板及び無方向性冷間圧延電磁鋼板が、新日本製鐵、川崎製鉄

により製造され、1968 年からは高磁束密度方向性電磁鋼板も製造された。1960 年代から液体急冷法によるアモルファス金属の研究が始めた。その中で、東北大学の増本のグループは 1975 年に Fe-Si-B 系のアモルファス (Amomet) を開発した。1988 年、日立金属は、Nb と Cu を添加した Fe-Si-B 系アモルファスの熱処理による微細結晶析出（結晶化）に成功し、工業化した。

- 照明技術としては、20 世紀中ごろに紫外線を蛍光体で可視光変換する技術が生まれ、その後、蛍光体の改良により、電気→光変換効率が白熱灯から飛躍的に上昇していくことになった。一方で、1996 年に実用化された青色 LED により、光の三原色が揃い、白色 LED が登場したことで LED 照明が普及し始めている他、有機 EL が注目を浴びている。LED は、1962 年に GE のニック・ホロニアック氏が赤色 LED を発明して以来、1970 年代までに赤、黄、橙、黄緑などの各色 LED が誕生した。青色 LED の開発では、1986 年に赤崎と天野（当時、名古屋大学）が窒化ガリウム (GaN) の高品質な単結晶を実現した。現在の LED につながる高輝度青色 LED は、中村（当時、日亜化学工業）によって 1993 年に開発され実用化された。その後、1996 年、量子井戸構造を用いた青色 LED および青色レーザーが実用化された。白色 LED の発光には多様な方式があり、青色 LED と赤色蛍光体、そして緑色蛍光体による光の 3 原色を利用する方法が開発された。現在、ほとんどの LED におけるこの赤色蛍光体には広崎 (NIMS) らにより開発された、サイアロンが使用されている。
- 耐熱合金である Ti-6242 合金は、1960 年後半に開発された合金で、1970 年代後半には、耐酸化性やクリープ特性を向上させた Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Sn 合金が開発され、耐熱温度は 500°C まで改善され、高圧コンプレッサーディスクやブレードなどに用いられている。Ti-17 合金は、1970 年代に米国で開発された。耐熱温度は 400°C 程度であり、ファンディスクやコンプレッサーディスクに用いられている。Ti-6246 合金は、1966 年頃に開発されたチタン合金であり、耐熱温度は 450°C であり、高圧コンプレッサーディスクやブレードに用いられている。

以上、エネルギーと科学技術の発展に関連する主な歴史を振り返ったが、科学の細分化により全体像が見えにくくなっている。冒頭に述べたように、エネルギー分野は総合工学であるが、「工学」とはあらゆる学術領域の知識体系を最適に組み合わせ、目的の機能を持つシステムを生み出すための技術の知識体系である。しかしながら、この半世紀ほどの間に、科学技術の裾野の拡大と成熟が進む一方、それ故に全体を見通すことが困難になった。学術領域の融合は「工学」の本質であるにもかかわらず、大学においてさえ、工学部自身の各学科への専門細分化が進み、アカデミアのタコツボ化は解消されるどころか深刻さの度合いを増している。また、これまでの研究は特定の材料やデバイスに関するもので、散発的という印象がある。こうした問題の解決のために、関連研究者を専門分野の壁を越えて連携させ、複合的な手法開発を行うことが求められる。

2.3 分野の研究開発を取り巻く現状

2.3.1 社会・経済の動向

2011年3月の福島第一原子力発電所の事故を受け、エネルギー基本計画の見直しや電気や都市ガス供給事業に関するシステム改革、再生可能エネルギーの導入可能性、技術開発の方向性や投資など、エネルギーの将来についてあらためて議論が行われている。2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画（第四次）では、安全性(Safety)を前提とした3E（エネルギーの供給安定性(Energy security)、経済性(Economic efficiency)、環境性(Environmental))を図る、3E+Sを基本的視点とする重要性が掲げられている。

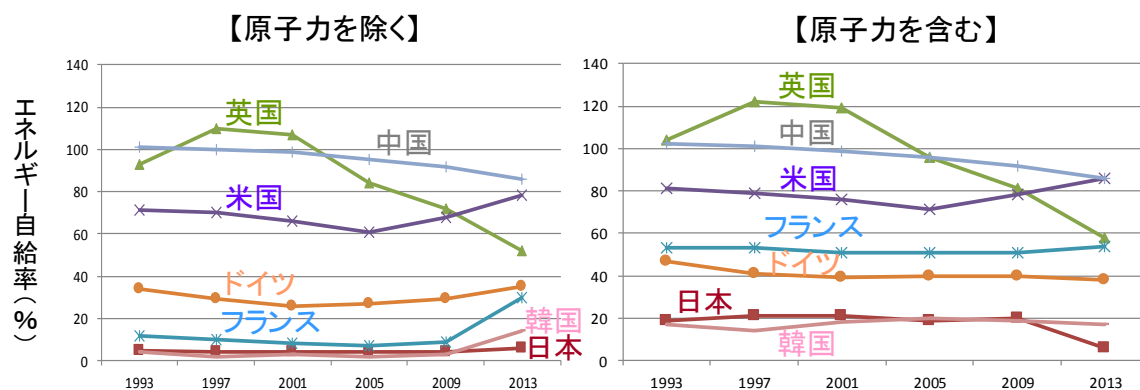
日本は、エネルギー自給率が低く、島国のため他国からの電力融通ができない。経済面では、グローバル産業競争力を維持・強化する上で、電力料金の値上げは産業界、国民共に負の影響が大きい。環境面では、気候温暖化対策として高い目標を内外に約束している。このように3Eは、お互いに相反する要因であり、情勢に応じて最適な政策を模索することになる。原子力については、安全性への対応とともに、リスクも含めオープンな科学的議論が重要である。

(1) 3E+Sについて

1. エネルギーの供給安定性（Energy security）

① エネルギー自給率

2014年は原子力による発電量が0となり、日本のエネルギー自給率は過去最低の6%であった。エネルギーのほぼ全量を輸入に依存している日本ではエネルギー資源の安定確保のために、原子力や天然ガスの導入を進めてきた。（図2-3）



出典： IEA「Energy Balance of OECD Countries 2014」

資源エネルギー庁「エネルギー安全保障についての参考資料」平成24年2月

図2-3 主要国の一次エネルギー自給率

② （安定供給）化石燃料の価格見通し

原油価格の長期見通しの多くは、石油需要は伸び続け、価格の上昇を予測している。天然ガスは冷却・液化した上での輸送に追加的なコストが必要であり、輸入LNGの大部分は長期契約かつ原油価格に連動した契約に基づいて輸入されている。このため、

LNG 輸入価格と欧米ガス価格との差が生じる仕組みとなっている。（図 2-4）

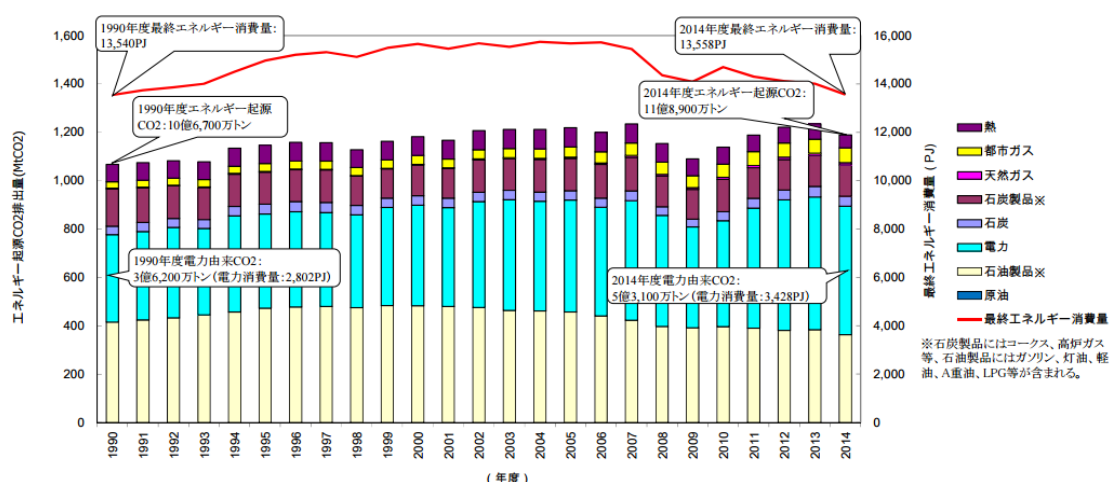


図 2-4 最近の国際的な天然ガス価格の動向

2. 環境性（Environmental）

① エネルギー起源 CO₂ 排出

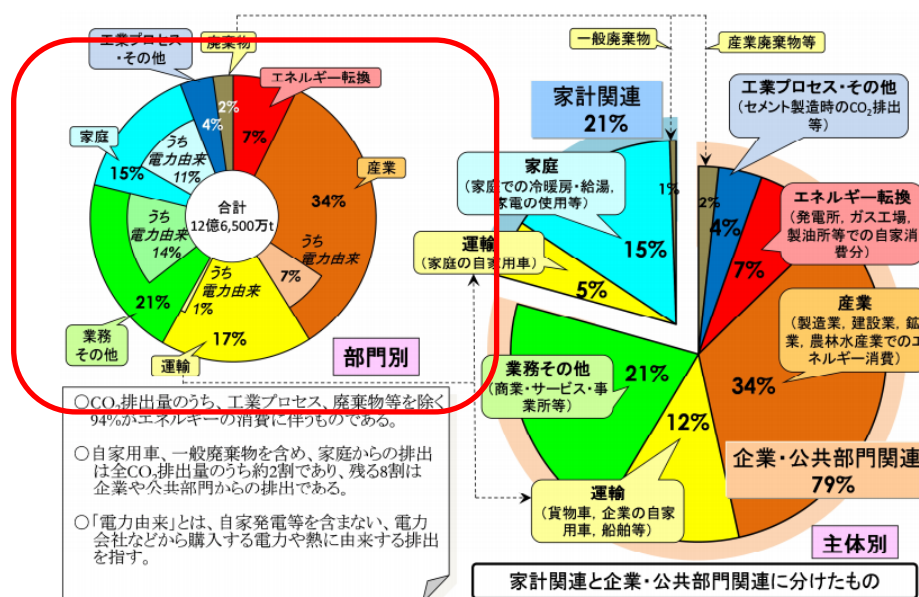
2014 年度のエネルギー起源 CO₂ 排出量は 11 億 8,900 万 tCO₂ で、2005 年度比 2.4% 減、前年度比 3.7% 減となっている。このうち発電に伴う CO₂ 排出量は 5 億 3,100 万トンで約 40% を占める。電力消費量の増加と電力排出原単位の悪化により電力由来の CO₂ 排出量が特に大きく増加している。燃料種別では石炭火力由来の排出量が約半分を占めており、2014 年度は前年度と比べて、石炭火力由来が 0.1% 増加、天然ガス火力由来は 3.6% 増加、石油等火力由来は 23.0% 減少している。1kWh あたりの CO₂ 排出量は、石炭は 0.71~0.87kg、LNG は 0.32~0.42kg となり、燃料による差が大きい、発電プラントの発電効率や稼働率により若干変動する。（図 2-5）



出典：環境省「日本の温室効果ガス排出量の算定結果」

図 2-5 最終エネルギー消費量とエネルギー起源 CO₂ 排出量の推移

2014 年度の産業部門（工場等）の CO₂ 排出量は 34%、運輸部門（自動車等）の CO₂ 排出量は 17%、業務その他部門の CO₂ 排出量は 21%、エネルギー転換部門の CO₂ 排出量は 7%を占める。（図 2-6）

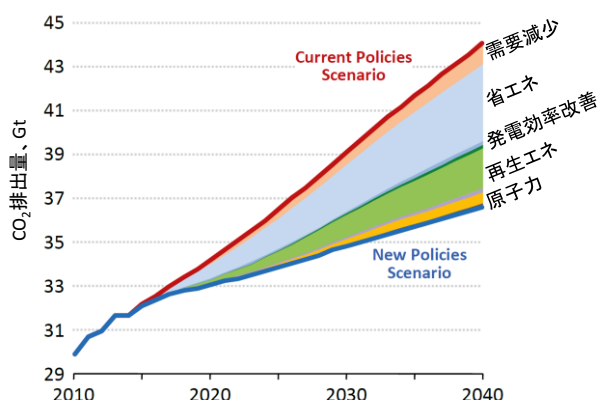


出典：環境省「日本の温室効果ガス排出量の算定結果」

図 2-6 CO₂ の部門別排出量（電気・熱配分後）

② 排出抑制に向けた IEA の提言

World Energy Outlook (WEO) 2015 では、基準となる「現行政策シナリオ」、産業革命以前比 2℃未満に収めるための「450ppm シナリオ」、2015 年半ばに各国が採用する確度の高い政策実施を前提とする「新政策シナリオ」がある。実現可能性が高いとされる新政策シナリオ達成において、CO₂ 削減の寄与は省エネルギーと再生可能エネルギーの技術によるものであり（図 2-7）、2013 年に 32Gt の CO₂ 排出量は 2040 年に現行政策シナリオでは 44Gt、新政策シナリオでは 37Gt を見込んでいる。



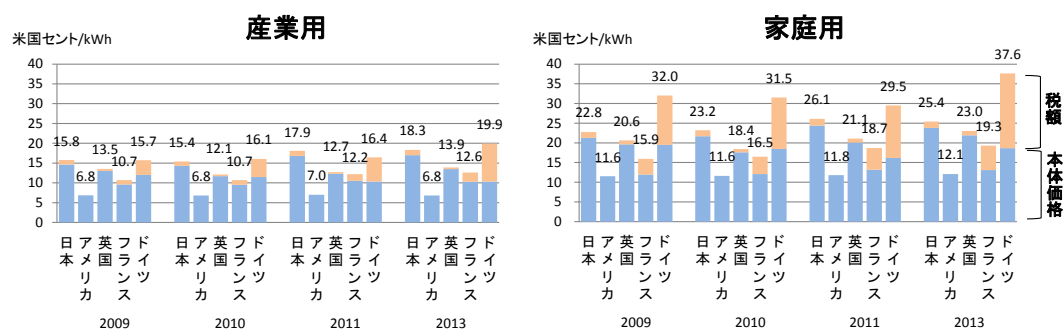
出典：IEA World Energy Outlook 2015

図 2-7 地球温暖化（CO₂ 排出抑制）に向けた IEA 提言

3. 経済性（Economic efficiency）

① 主要国の電力料金

産業向けの電気料金は 2011 年までは日本が最も高かったが、2013 年はドイツが再生可能エネルギー利用推進に種々の調整金を付加したため、日本を上回った。家庭用電気料金においてもドイツが主要国で最も高額となっている。（図 2-8）

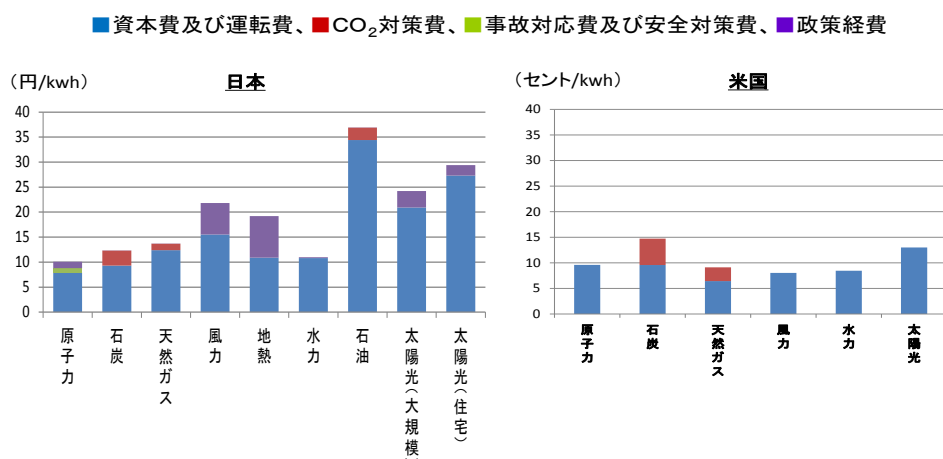


出典：経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書2015、2013、2011
BDEW(ドイツ連邦エネルギー・水道連合会)資料

図 2-8 主要国の電気料金

② 電源別の発電コスト（経済性）

日本の発電コストは 1kWh あたり原子力が 10 円、石炭が 12 円、天然ガスが 14 円、水力が 11 円、石油が 37 円である（図 2-9 左）。この中には、資本費、運転費、燃料費が含まれる。原子力には、燃料再処理費用、事故処理および賠償費負担費用などが、石炭・天然ガス・石油では CO₂ 対策費が含まれる。一方、概ね米国は日本に比べて液化および輸送コストが不要な天然ガスを中心に安価である（図 2-9 右）。



出典：総合資源エネルギー調査会
発電コスト検証ワーキンググループ
(第6回会合)資料1 平成27年4月

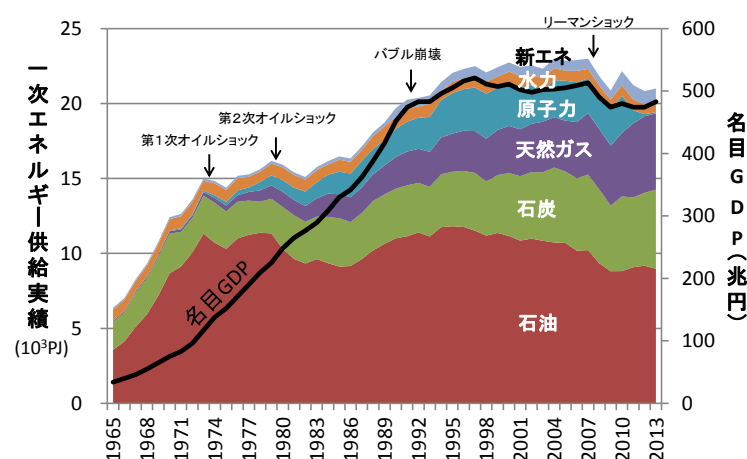
出典：Levelized cost and levelized avoided cost of new generation resources in the annual energy outlook 2014, 米国エネルギー情報局

図 2-9 電源別の発電コスト

（2）国内外のエネルギー動向

1. 日本の一次エネルギー供給

1973 年の第一次石油ショックは、第四次中東戦争が勃発し、ペルシア湾岸の産油 6 ケ国による原油公示価格引き上げと、アラブ石油輸出国機構による原油生産の段階的削減に端を発した。1979 年にはイラン革命によるイラン国内の石油生産の中断により第二次石油ショックが発生した。これに対し、日本は省エネルギー対策を加速する一方、中東以外での石油探索・権益確保や石油の国家備蓄、原子力発電の本格導入、新エネルギーの開発普及などのエネルギー政策の転換を目指した。1990 年代以降は、バブル崩壊以降の経済成長の停滞と、2008 年のリーマンショックを境に、エネルギー供給の大きな伸びは留まりつつある。（図 2-10）

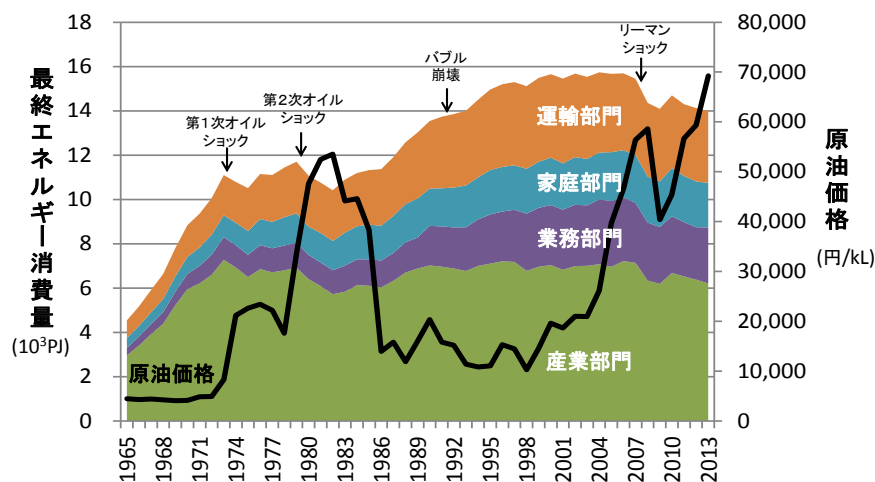


出典：経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書2015
内閣府/国民経済計算（GDP統計）/経済データ/統計表（国民経済計算確報）

図 2-10 日本の経済成長と一次エネルギー供給

図 2-11 に部門別の最終エネルギー消費量の推移を示す。1970 年以前の高度経済成長期にエネルギー消費は高い伸び率で増加したが、石油ショック後の製造業を中心にした省エネルギー努力により、エネルギー消費を抑制しながら経済成長を果たすことができた。1990 年代を通して原油価格が低水準で推移する中、家庭・業務部門を中心にエネルギー消費は増加したが 2004 年をピークにエネルギー消費は減少傾向にある。2010 年は景気回復や気温による影響を受けエネルギー消費は大幅に増加したが、2011 年以降東日本大震災以降の節電意識の高まりや技術導入などにより再び減少傾向となっている。

部門別の動向では、1973 年から 2013 年までの伸びは、産業・業務部門が 1.1 倍（産業部門 0.9 倍、業務部門 2.5 倍）、家庭部門が 2.0 倍、運輸部門が 1.8 倍となった。企業・事業所他部門では石油ショック以降の製造業を中心にした省エネルギー化が進んだが、家庭部門・運輸部門ではエネルギー機器や自動車などの普及により大きく増加した。

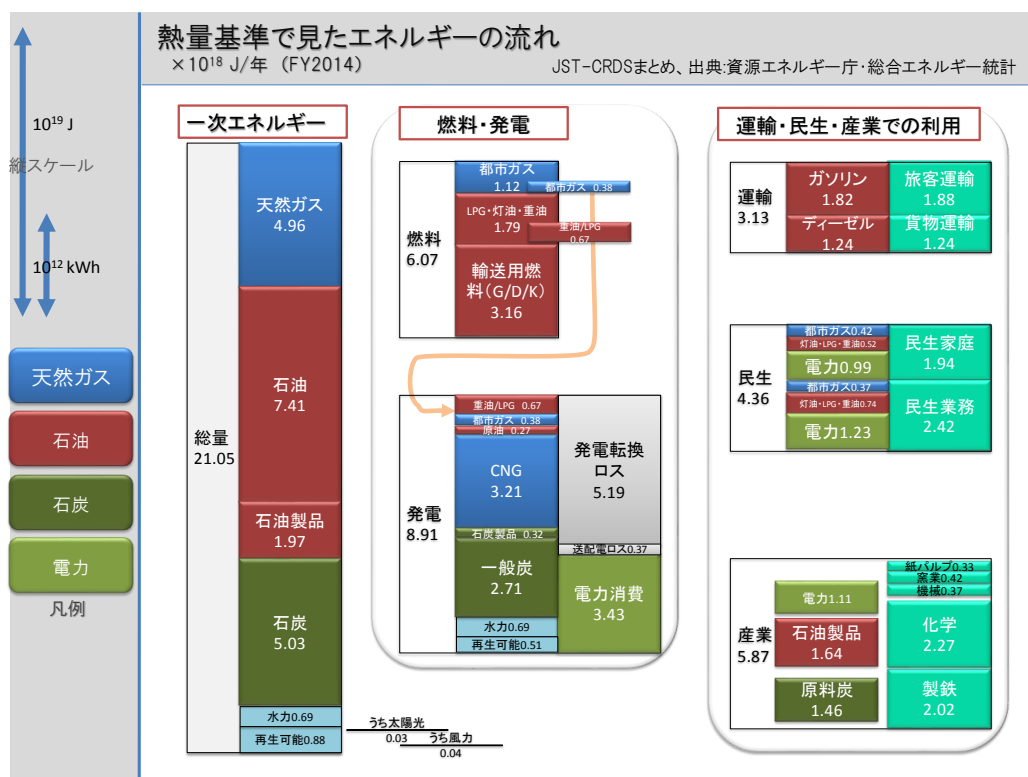


出典：経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書2015

図 2-11 最終エネルギー消費量の推移

2. 日本のエネルギー分野の全体像

日本のエネルギーの需給構造を図 2-12 に示す。日本は化石資源に乏しく、エネルギー供給体制には根本的な脆弱性を抱えており、地政学的リスクを踏まえた資源確保のための対策強化が必要である。2014 年の例では約 25 兆円を費やして輸入したエネルギー資源（約 21EJ/年）がエネルギー損失により最終消費時の有効利用割合は 4 割程度と見積もられる。電力部門では約 9EJ/年の一次エネルギー源から 3.4EJ/年の電力を得るに留まっている。石油の燃料転換過程の損失も大きく、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が必要である。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。運輸部門では自動車の熱としてのエネルギー損失が大きく、高効率化技術が望まれる。

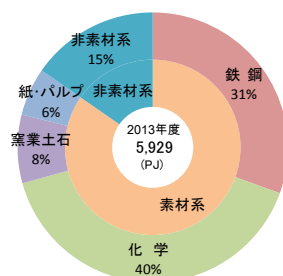


2014 年度貿易統計からみた各資源のエネルギー量（熱量換算）
（経済産業省資源エネルギー庁総合エネルギー統計（2014 年分）を基に CRDS が算出）

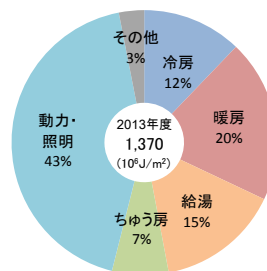
図 2-12 熱量基準で見た日本のエネルギーの流れ

暖房や給湯として使われる低位熱需要に多くの電力が使われている現状も改善の余地がある。再生可能エネルギーは、2012 年 7 月に FIT (固定価格買取制度、Feed in Tariff) 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いるが、FIT 賦課金による国民負担の抑制、系統連系技術やその貯蔵技術が必要である。

日本の部門別、業種別、用途別最終エネルギー消費量を概観すると、産業部門は、1965 年から 2013 年まで最終エネルギー消費で最大のシェアを占め、その主な業種は、製造業、建設業、農林水産業、鉱業である（図 2-11）。2013 年のエネルギー消費割合は、製造業（95.5%）、建設業（3.3%）、農林水産業（0.7%）、鉱業（0.5%）である。製造業のうち素材系産業（鉄鋼、化学、窯業土石（セメント等）及び紙パルプの素材物資生産産業）は、エネルギーを比較的多く消費し、2013 年度のエネルギー消費構成では、これら素材系産業 4 業種が製造業全体のエネルギー消費の約 8 割を占める（図 2-13）。業務部門（事務所・ビル、デパート、卸小売業、飲食店、学校、ホテル・旅館、病院、劇場・娯楽場、その他サービス（福祉施設など））のエネルギー消費量は、「延床面積当たりエネルギー消費原単位×延床面積」で表され、特に OA 化などを反映し、動力・照明用が多く使われ、2013 年度では 43%に達している（図 2-14）。



出典：経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書2015



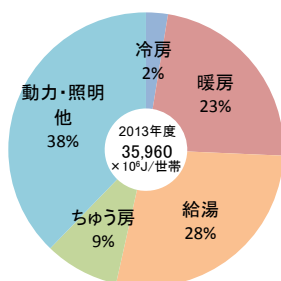
出典：経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書2015

図 2-13 製造業の最終エネルギー消費量

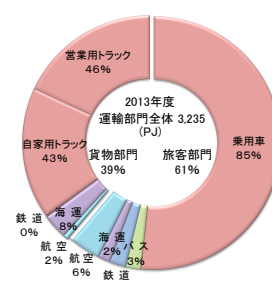
図 2-14 業務部門の最終エネルギー消費量

家庭部門のエネルギー消費は、国民のライフスタイルや世帯数増加などの社会構造変化の影響を受け、個人消費の伸びとともに著しく増加した。家庭部門のエネルギー消費量は「世帯当たり消費量×世帯数」で表すため、世帯当たり消費量の増減（原単位要因）及び世帯数の増減（世帯数要因）が、エネルギー消費の増減に影響を与える。2013年のシェアは動力・照明他が最も多く 38%に達した。（図 2-15）

運輸部門は、乗用車やバスなどの旅客部門と、陸運や海運、航空貨物などの貨物部門に大別される。2013年、運輸部門はエネルギー最終消費全体の 23%（図 2-11）を占め、このうち旅客部門のエネルギー消費量が運輸部門全体の 61%、貨物部門が 39%を占める。2013年度の旅客部門のエネルギー消費量は、乗用車が 85%と圧倒的に多い。公共交通機関はバス、鉄道がそれぞれ 3%であり、航空は 6%を占める。一方、2013年度の貨物部門のエネルギー消費量はほとんどが営業用トラックと自家用トラックであり合計 89%を占める。鉄道はほとんど消費量として現れず、海運は 8%である。（図 2-16）



出典：経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書2015



出典：経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書2015

図 2-15 家庭部門の最終エネルギー消費量

図 2-16 運輸部門の最終エネルギー消費量

3. 日本の発電量推移と予測（電源種別）

日本の電力発電量は約 1,000TWh であり、一次エネルギーの総量の約 18%にあたる。再生可能エネルギーは、水力が 8%であり、太陽光発電、風力発電、地熱発電などを合わせて全体の 2%程度である。IEA の予測では、日本は 2040 年に向け原子力の比率を高め、水力を含む再生可能エネルギーを約 30%とすることにより化石燃料依存度を下げると見込んでいる。（図 2-17）

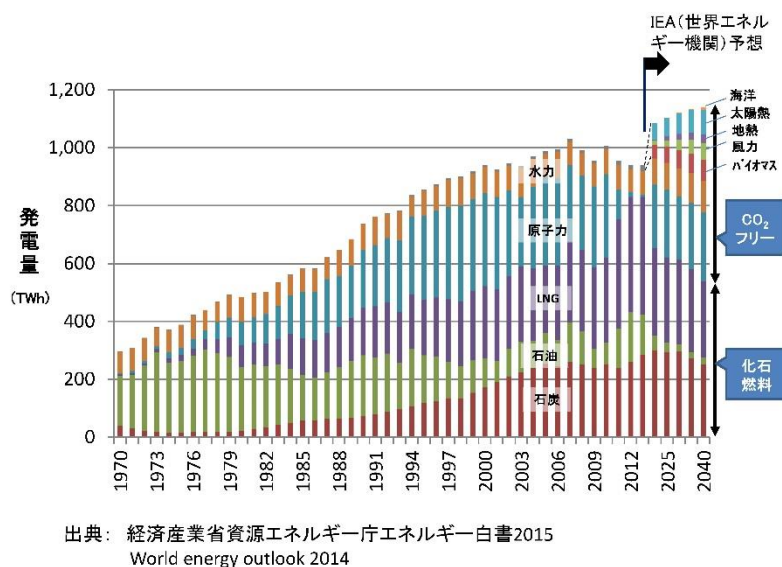


図 2-17 日本の発電量推移（電源種別）

4. 世界の一次エネルギー消費量

世界の一次エネルギー消費量は経済成長とともに増加を続け、石油換算で 1965 年の 38 億トンから年平均 2.6%で増加し、2013 年には 127 億トンに達した（図 2-18）。先進国（OECD 諸国）では経済成長と人口増加が停滞し、エネルギー機器の省エネルギーが進んだため伸び率が低い。一方、開発途上国（非 OECD 諸国）ではエネルギー消費が堅調に増加し、2035 年に向け特にアジア大洋州地域での伸びが高くなると予想されている。

日本ではエネルギーの有効活用や省エネを進めた結果、GDP あたりの一次エネルギー消費量は世界平均の約 40%となっている（図 2-19）。こうした経験や技術を世界に広めることが期待されている。

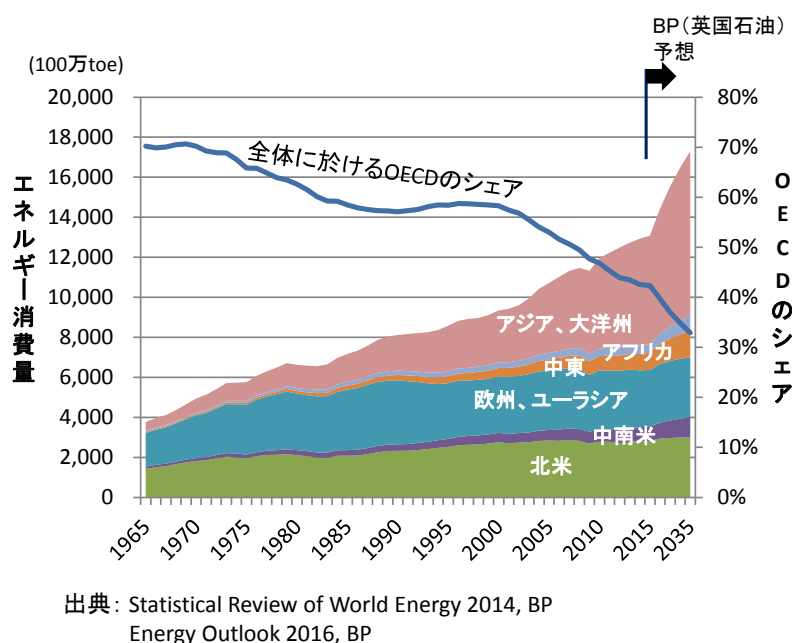
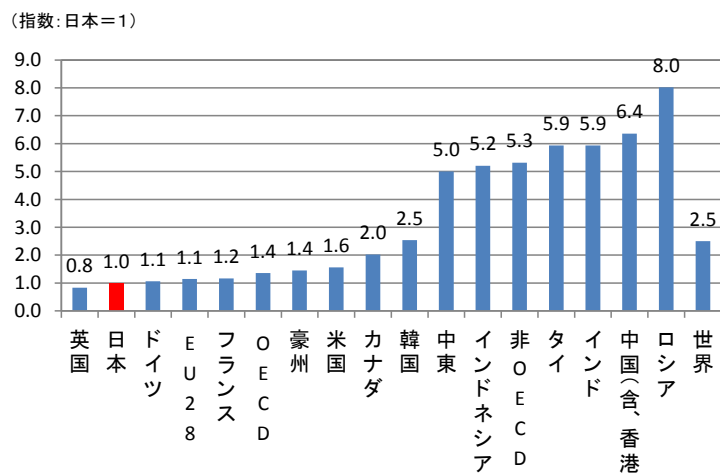


図 2-18 世界のエネルギー消費量の推移（エネルギー源別、一次エネルギー）

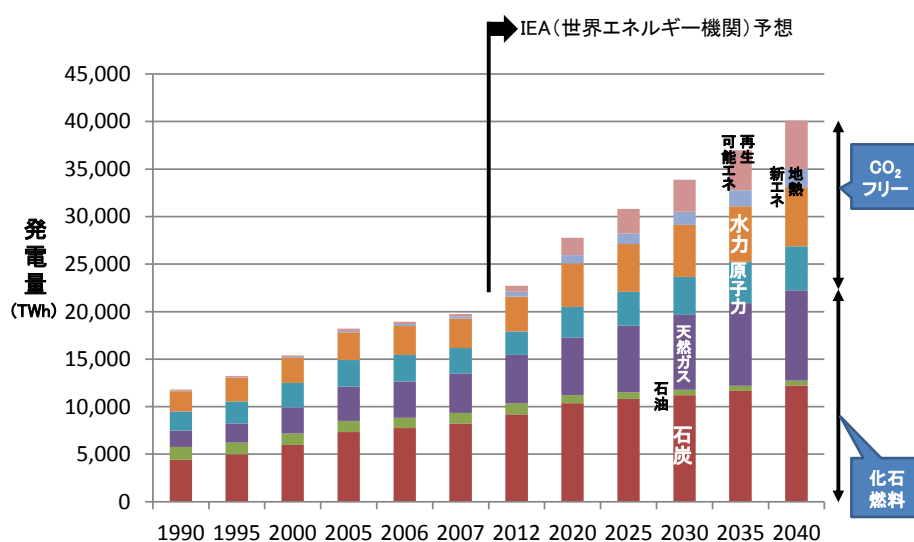


出典：経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書2015

図 2-19 実質 GDP 当たりの一次エネルギー消費の主要国比較（2012 年）

5. 世界の発電量推移（電源種別）

世界の発電量は約 2 万 TWh（日本の 20 倍）となっており、新興国を中心とした経済発展や生活レベルの向上により、今後も堅調な増加が予想される。石炭、天然ガス、原子力、水力への依存が大きく、IEA の予想では、気候温暖化に対する過去 10 年の議論との整合性は難しいとされている。2012 年は、水力を含む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 20%ほどであり、依然として化石燃料に依存している。（図 2-20）

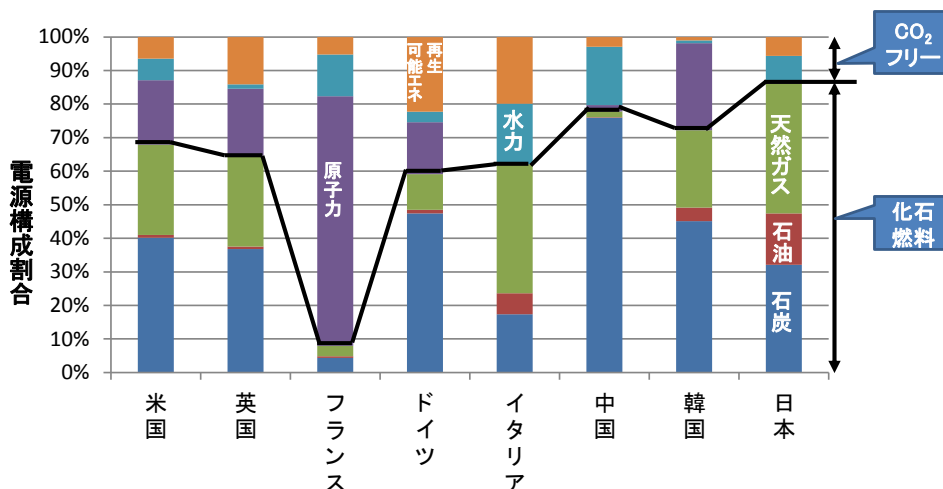


出典：経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書2010
World energy outlook 2014

図 2-20 世界の発電量推移（電源種別）

6. 主要国の電源構成割合

フランスをはじめ、主要国の多くが原子力を基幹電源のひとつに位置づけている。化石燃料への依存度が80%と高い中国も原子力の導入を進めている。（図2-21）



出典：経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書2015

図2-21 主要国の電源構成割合 2012年実績

7. 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る。そのため、電力供給システムは発電部門（発電所）、送配電部門（変電所、送配電線、配電用変電所）、小売部門（需要家）に大別される。

日本では、1964年に制定された電気事業法の下、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により独占的に電力が供給されてきたが、近年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制度改革が進んでいる。2011年3月の東日本大震災と福島第一原子力発電所事故を受け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の拡大、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」が閣議決定された。こうして、①広域系統運用の拡大②小売及び発電の全面自由化③法的分離の方式による送配電部門の中立性の一層の確保、の電力改革が進められ、電力会社に加え、ガス、石油などのエネルギー関連企業、情報系企業が参入し、競争が激化している。

欧米では1990年半ば頃より電力自由化が行なわれた後に再生可能エネルギー導入が進められてきたが、日本では2013年7月に開始されたFIT（Feed in Tariff：固定価格買取制度）により太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーの導入と電力自由化が同時に進められる世界に類のない動きをしている。

8. 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。1995年からの四度のガス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り、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を行い、2015 年 1 月に小売の全面自由化、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などについてまとめた報告書が作成され、2017 年を目途に実施することが適当とされている。

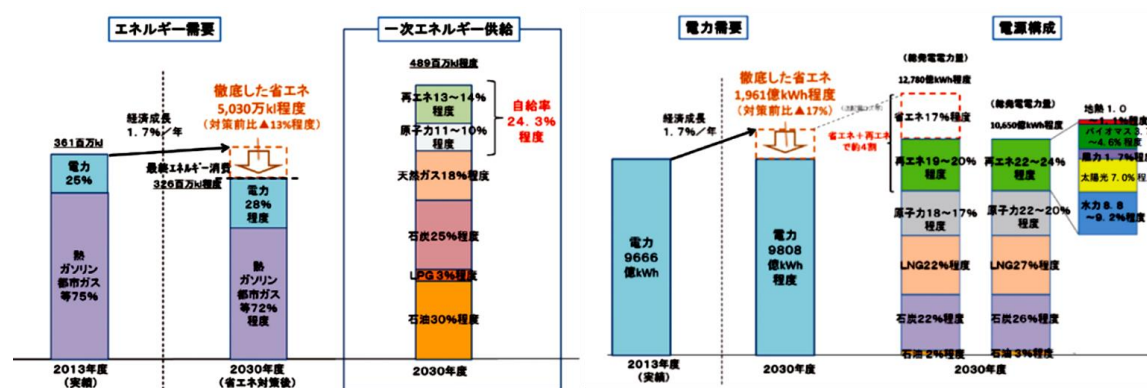
9. シェールガス革命

2009 年以降、水平坑井技術と水圧破碎法による掘削（フラクチャリング）技術が確立されたことにより、水平な層の石油やガスを掘り出すことができるようになった。米国を中心に多量の天然ガス（シェールガス）が産出され、シェールガス採掘による米国での天然ガス生産量は 2010 年時点の 5trillionCF から 2035 年には 13.6trillionCF に伸びると推測され、米国内での生産量が消費量を 5%ほど上回ると予測されている。

米国ではガスの価格が大幅に低下し、ガス消費産業の競争力が増強し、投資・工業の成長、雇用の創出が促進されている。エタンを熱分解して化学基幹原料であるエチレンをつくるエタנקラッカーや、天然ガス主成分のメタンを水蒸気などと反応させた後にメタノール・アンモニアのような化学原料へと転換する製造プラント新設の動きが活発である。またシェールガス増産による北米ガス価格の低下は、多くの石油化学製品・プラスチック・医薬品の低コスト化につながるため、世界的な産業構造の変化を引き起こしている。さらにシェールガスによって精製炭化水素及び石油化学製品の製造部門へのコスト競争力が増すと考えられている。天然ガスの増大により当面の水素製造は水蒸気改質が主流であり続けると考えられる。

10. 日本のエネルギー基本計画

2030 年を対象とした長期エネルギー需給見通しにおいては、経済成長や電化率の向上等による電力需要の増加を見込む中徹底した省エネルギーを行い、2030 年時点の電力需要を 2013 年と同レベルまで抑える。次に、低炭素の国産エネルギー源である再生可能エネルギーを、2013 年から 3 年程度導入を加速し、環境面や立地面等の制約を踏まえつつ実現可能な最大限まで導入することを見込む。自然条件により出力が変動し調整電源としての火力を伴う太陽光・風力は、国民負担抑制とのバランスを踏まえつつ、電力コストを現状よりも引き下げる範囲で最大限導入する。原子力を自然条件によらず安定的な運用が可能な地熱・水力・バイオマスに置き換えることにより、2030 年度の電力の需給構造において、東日本大震災前に約 3 割を占めていた原発依存度は 20~22%程度へと低減する。この結果、エネルギー起源 CO₂ 排出量は 2013 年度総排出量比 21.9%減となる。また、水力・石炭火力・原子力等によるベースロード電源比率は 56%程度となる。エネルギー自給率（原子力を含む）は、20%から 24%程度に改善する。（図 2-22）



出典：長期エネルギー需給見通し 平成 27 年 7 月 経済産業省

図 2-22 日本の 2030 年度のエネルギー需給構造

2.3.2 主要国の研究開発（科学技術）政策の動向

主要国の研究開発（科学技術）政策について国別動向のサマリーを記す。各国別の詳細な政策動向については国別のページを参照されたい。

<日本>

エネルギーに関連する基本政策として、エネルギー基本計画（平成 26 年 4 月閣議決定）と地球温暖化対策計画（平成 28 年 5 月閣議決定）がある。

研究開発政策としては、科学技術基本計画の下、平成 25 年 9 月「環境エネルギー技術革新計画」の改訂が閣議決定されている。そこでは、地球全体の環境・エネルギー制約の解決と、各国の経済成長に必要と考えられる「革新的技術」として、37 の技術を特定している。地球温暖化対策推進本部において、同年 11 月に発表された「攻めの地球温暖化外交戦略（ACE）」に、「環境エネルギー技術革新計画」は「技術」の要として位置づけられ、COP19（同年 11 月 11~23 日、ワルシャワ）において ACE の実施が表明された。

科学技術基本計画の下、毎年策定される「科学技術イノベーション総合戦略」（平成 25 年 6 月 7 日）において、5 つの課題の一つとして、「クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現」が掲げられている。この中では、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等が重点的課題とされている。続く、「科学技術イノベーション総合戦略 2015」（平成 27 年 6 月 19 日）では、「クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現」の下、「エネルギーバリューチェーンの最適化」が柱として掲げられている。平成 28 年度からの第 5 期科学技術基本計画においても、世界に先駆けた「超スマート社会」の実現の中で「エネルギーバリューチェーン」が取り上げられている。また、13 の重要政策課題のうちエネルギーに関連するものとして、「エネルギーの安定的確保とエネルギー利用の効率化」、「資源の安定的な確保と循環的な利用」が掲げられている。

COP21（平成 28 年 11 月 30 日、パリ）において示した GHG の排出削減目標に向け、地球温暖化対策推進本部および総合科学技術イノベーション会議では、エネルギー・環境分野の革新的技術の開発に向け集中すべき有望分野を特定し、研究開発を強化すべく、平成 28 年に「エネルギー・環境イノベーション戦略」をまとめた（平成 28 年 4 月閣議決定）。エネ

ルギーシステム統合技術、パワエレ、センサー、超電導、革新的生産プロセス、超軽量・耐熱構造材料、蓄電池、水素等製造・貯蔵・利用、太陽光発電、地熱発電、CO₂固定化・有効利用が革新技術として指定されている。

<米国>

2016年11月の大統領選でのトランプ氏勝利により、オバマ政権が進めてきた環境・エネルギー政策（石炭火力への政策など）が大きく変わる可能性があり、今後の動向に注視する必要がある。

米国はエネルギー消費大国かつ生産大国であり、シェールガス・オイル革命により石油以外はエネルギー自立がほぼ可能な状況である。また、その石油輸入についても継続的減少が予想されている。オバマ政権におけるエネルギー基本政策は、クリーンエネルギーとして環境・エネルギー分野における研究開発を雇用対策も含めてイノベーション政策の中心にしている。なお当初の再生可能エネルギー拡大による産業創成の政策は、シェール革命により、“all-of-the-above”の包括的エネルギー政策に転換しており、現在は環境に配慮した国内石油・ガス開発の推進にシフトしている。

エネルギー分野の研究開発については、基礎研究を含めてDOE主導で進められている。DOEにおけるロードマップとして、「戦略計画2014～2018年(Strategic Plan 2014-2018)」の中では①科学とエネルギー、②核安全保障、③管理と成果、の3つの大目標が掲げられている。また「4年毎のエネルギー計画見直し(QER)」においては米国のエネルギーインフラに焦点を当て、エネルギーインフラのレジリエンス、配電網の近代化などの提言が示されている。

DOE予算における科学・エネルギー関連の研究開発予算は127.2億ドルで、基礎科学（物理分野）を担当する科学局の予算は56.7億ドル（44%）を占めており、基礎重視の姿勢がわかる。DOEではエネルギー分野におけるイノベーション推進のために3つのイニシアティブとして、エネルギーフロンティア研究センター(EFRC)、エネルギーイノベーション・ハブ、エネルギー高等研究計画局(ARPA-E)を導入している。2009年に設立されたARPA-Eではハイリスク・ハイペイオフの研究群のファンディングを行っており、ポートフォリオ的な考え方を導入している。研究全体としての成功を目指し、個別の研究では失敗を認める特徴がある。またDOEは科学局、ARPA-E以外にプログラム部局においても幅広いファンディングが行われている。DOE以外の商務省(DOC)によるファンディングプログラムとして、National Network for Manufacturing Innovation (NNMI)があり、先進製造業・未来の産業をクリーンエネルギー、地球観測、気候変動などと並んだ優先事項に位置づけ、先進製造パートナーシップ(AMP)を創設している。これは雇用の観点からものづくりへの回帰（製造業の復興）の方向性を示すものである。

<EU（欧州連合）>

EUのエネルギー問題に対する取り組みの基本的な考え方は、欧州をエネルギー効率の高い、低炭素経済社会に変革させることを目指しており、そのため2050年に向かって段階的に温室ガスの排出を削減するという目的を設定し、努力している。2007年3月、EU各国は京都議定書以降の国際的議論を主導する目的で2020年までを見通した中期的目標「エネル

ギー・気候変動政策パッケージ」で合意し、いわゆる 3 つの 20「20-20-20」の目標が掲げられた。

- GHG 排出削減を 2020 年に 1990 年比で 20%削減（条件が揃えば 30%に引き上げ）
- 最終エネルギー消費に占める再生可能エネルギーの割合を 20%に引き上げ
- エネルギー効率を 20%引き上げ

エネルギー問題の基本的なフレームワークは、2007 年策定の「欧州戦略的エネルギー技術計画（SET プラン）」であるが、再生可能エネルギー導入とエネルギー効率向上を更に促進するため、2015 年に新 SET プランが策定された。焦点分野は、再生可能エネルギー、消費者向けスマートエネルギーシステム、エネルギー効率向上、持続可能な輸送技術、そして特に CCS と原子力の安全強化である。

この戦略を具体的に進めるプログラムのひとつに「Horizon2020」がある。これは大規模なプログラムで 3 つの柱を持ち、第 3 の柱「社会的な課題への取り組み」の中の「安全かつクリーンで効率的なエネルギー」がエネルギー分野に該当する。ゼロ・エミッションに近い建物、低価格かつ低環境影響の電力供給、分散された再生可能エネルギー源をつなぐ欧州レベルでの送電網といったテーマが挙げられている。エネルギー分野には 122 億€が、小さいプログラムとしての共同技術イニシアチブ（JTI）のエネルギー分野に 9.4 億€が予算配分される。

<ドイツ>

ドイツは、「10 のエネルギーアジェンダ」を発表し、エネルギー分野の方針を示した。2022 年までに原子力発電から完全撤退することを決め、一極集中型の化石・原子力発電所から分散型の再生可能エネルギーへの転換を目指すエネルギー転換策（Energiewende）を採る。2050 年に向けて電力構成で再生可能エネルギーを約 80%に、エネルギー消費を現状より 50%低減する目標をもつ。大きな戦略方針は、①市場導入促進、②エネルギー効率の向上、③新技術開発の 3 つである。

科学技術イノベーション基本政策では、2014 年に、「新ハイテク戦略第（3 期ハイテク戦略）」で 2015 年以降の基本方針（6 優先課題）を示した。この中の持続可能なエネルギーの生産、消費の優先課題で、連邦経済エネルギー省（BMWi）のエネルギーストレージ、送電ネットワークなどのエネルギー研究を含む「10 のエネルギーアジェンダ」の研究開発方針がそのまま採用されている。

BMWi は、エネルギー政策全般を所管、連邦政府の支出する研究開発関連予算の 20%を管理、連邦教育研究省（BMBF）は、エネルギー分野の基礎研究を所管、連邦政府の研究開発関連予算の約 60%を管理している。

エネルギー分野研究開発投資については、2011 年 8 月開始の第 6 次連邦政府エネルギー研究プログラム（環境適合省庁横断型のプログラム性及び信頼性を備えたエネルギー供給のための研究、2011～2014 年度）の方針を堅持し、今後も、再生可能エネルギーとエネルギー効率向上分野を伸長させ、太陽光発電、風力発電（特に洋上）、バイオエネルギー、地熱、燃料電池・水素の研究開発を推進、継続する見通し。再生可能エネルギー発電の不安定性への対策として以下のような研究開発も進める予定。①需要サイドのマネジメント、②高圧送電、③負荷変動対応での火力発電利用、④エネルギー貯蔵や交通の低炭素化。

ドイツ国内に豊富に存在する褐炭を含む石炭利用火力発電については、国内の石炭関連雇用などへの影響もあり、二酸化炭素回収・貯留（CCS）との組み合わせで、将来的には、ある一定比率を維持したい意向。ガス火力発電、石炭火力発電双方とも、再生可能エネルギーへの負荷応答性を向上させる研究開発を CCS も含めた研究開発とあわせて推進する。原子力については、稼働停止政策の一方、安全性向上や廃炉に関わる研究開発を着実に実施していく。国際熱核融合実験炉（ITER）に関する核融合炉開発への投資も継続する。原子力分野（安全性、廃炉関連）と核融合分野に、全体の約 4 分の 1 を継続投資する。

2016 年 4 月には、BMBF が、4 つの「エネルギー転換に関するコペルニクス・プロジェクト」を発表。プロジェクトは、マックスプランク研究所により発案され、新ネットワーク構造、余剰電力の貯蔵“Power-to-X”、社会的受容も含めた産業化プロセス、エネルギーシステム・インテグレーションの 4 つの領域からなる。本プロジェクトにより、今後 10 年間、アーヘン工科大などのアカデミア、シーメンス社などの産業界、市民社会が連携してエネルギーシステムの転換に必要な技術的、経済的解決策を生み出していく。研究参加者の 1 割は社会学者となる。

<英国>

英国は、2008 年の「2008 気候変動法」により、2050 年までに GHG 排出量を 1990 年比で 80%以上削減を目指している。この目標達成のシナリオとして、「2050 年までの展望」において、5 つの技術用件（火力発電所への CCS 設置、原子力発電所新設、再生可能エネルギー発電所増設、バイオ燃料、最終エネルギー消費削減）の影響を検討した 6 つの pathway を提示している。2011 年 7 月に「再生可能エネルギーロードマップ」が発表され、2020 年のエネルギー消費の 15%を再生可能エネルギーで賄う達成目標のために重要技術として、陸上・洋上風力、海洋エネルギー、バイオマス発電・熱利用、ヒートポンプ、輸送部門の再エネを挙げ、この中で、洋上風力発電の資源ポテンシャルが高いことが示された。また、2011 年の「炭素計画：低炭素未来実現に向けて」では、エネルギー政策のフレームワークの中での低炭素化を実現するための技術シナリオを、建物、輸送、産業、電気、農林・国土管理、廃棄物・資源効率の分野別に挙げている。

エネルギー研究開発戦略としては、「経済成長を後押しする今後投資すべき八大技術」の一つにエネルギー貯蔵を定め、貯蔵技術が社会に及ぼす効果として、電力消費量の削減に加え、風力発電の導入促進とビジネス収入を挙げている。また、2016 年に、政府が優先的にファイナンスし、整備する 600 以上のインフラ案件プロジェクトを定めた「国家インフラ整備計画」が発表され、2016 年度予算のエネルギー関連のインフラ案件として、エネルギー貯蔵、デマンドレスポンス、小型原子炉技術開発、洋上風力、シェール開発にかかる地域貢献基金設立などが挙げられている。

代表的な研究開発プログラムとして、Innovate UK による助成がある。この代表的な成功例に、世界をリードする科学技術・イノベーション構築を目指し、産学協同の研究開発拠点であるカタパルトセンターがある。カタパルトセンターは、主要企業や大学等と分野横断的な産業クラスターを形成し、「カタパルト」ブランドの知名度を確立しつつある。エネルギー関連では、海上再生可能エネルギー、エネルギーシステム、未来都市、輸送システムの 4 つのカタパルトがあり、エネルギーシステムは 2016 年 10 月より本格的に活動を開始した。

＜フランス＞

フランスは、2015年の「緑の成長のためのエネルギー移行法」において、2050年までに最終エネルギー消費を2012年比で50%削減、2030年までにGHG排出量を1990年比で40%削減、再生可能エネルギーを電源構成比率で40%、2025年までに原子力依存度を50%に低減する目標を定めている。この達成手段として、2015年の「気候のための国家低炭素戦略」（SNBC）と2016年の「複数年エネルギー計画（PPE）」が公布され、部門別のGHG排出削減目標量を定めるとともに、環境・エネルギー・海洋省（MEEM）が輸送燃料転換、発電源の多様化、柔軟でレジリエントなエネルギーモデルの実践を進めている。

エネルギー研究開発戦略としては、2015年に国民教育・高等教育・研究省（MENESR）が公表した「国家研究戦略」（France Europe 2020 SNR）の10の社会的課題のうち、①持続可能な資源開発と気候変動への適応、②安全・クリーン・効率的なエネルギー、③交通と持続可能な都市システムのエネルギー関連の3課題について、研究機関との協力関係と資金配分機関との年間計画を設定している。2016年にはSNBCとPPEに沿ってエネルギー分野の方向性を定めた文書である「国家エネルギー研究戦略」（SNRE）が公表された。

研究開発予算は研究・高等教育省際ミッション（MIREs）のもとで配分され、2016年度の予算総額は262億ユーロのうちエネルギー関連では、学際的な科学技術研究に62億ユーロ（24%、大学教育と研究を除くと最大）、エネルギー開発および持続可能な開発の研究に17億ユーロ（6.7%）が配分されている。エネルギー関連の研究開発予算のここ数年の内訳は、原子力関連とエネルギー新技術がそれぞれ4.5割を占め、核融合炉の国際プロジェクトなど原子力に関しては引き続き先導的な役割を果たしている。エネルギー新技術では、半分以上を再生可能エネルギー開発、ついで輸送システムのエネルギー効率向上が占めている。

国の未来の戦略的優先投資として2010年以降に「未来への投資」（PIA）が実施されている。2017年までの第一期と第二期（PIA1とPIA2）では、クリーンエネルギーに約50億ユーロ（総額520億ユーロ）が配分され、第三期（PIA3）では、100億ユーロがエネルギー転換に配分される予定である。未来への投資は、企業と研究機関のリスクを分け合うことで、基礎研究を市場に結びつけ、イノベーションの全チェーンを支える重要な役割を担っている。

＜中国＞

中国は、エネルギー資源の大規模な開発と利用が環境汚染と気候変動の主要な要因の1つであるとの認識を示したうえで、石炭を中心とし、エネルギーのクリーンな利用に最大限の注意を払いながら環境保護に焦点をあてて生態の破壊と環境汚染の防止に取り組んでいく意向を示している。

中国のエネルギー分野に係る行政機関は、国家エネルギー局を擁する国家発展・改革委員会、中国国家原子エネルギー機構を擁する工業・情報化部等がある。これに加え、国務院直属機構として中国最大の研究機関である中国科学院や主としてボトムアップでの資金配分を行う国家自然科学基金委員会（NSFC）、トップダウン式で戦略的な研究資金を配分する科学技術部（MOST）ハイテク研究発展センターも関与している。中国は、国民経済と社会発展の緊急のニーズに立脚し、エネルギー、資源、環境の技術開発を優先している。エネルギー分野では「省エネと供給の多様化・拡大」、資源分野では「戦略的資源の調査・開発・利用」に関する技術水準の向上が柱に据えられている。エネルギー関係では、「国民経済・社会発展

『第13次5カ年』計画綱要」に基づき、2016年12月に国家発展改革委員会と国家エネルギー局が共同で「エネルギー発展『第13次5カ年』計画」を策定した。その後、「エネルギー発展『第13次5カ年』計画」のもとで、政策・計画を制定している。

基本政策としては、国家発展改革委員会と国家エネルギー局が2016年12月に公布したエネルギー分野の専門計画である「エネルギー発展『第13次5カ年』計画」では、エネルギー消費総量を管理し、安全、安定、経済的、クリーンなエネルギー産業システムを構築するとした上で、2020年までに「総エネルギー消費量」、「エネルギー安全保障」、「エネルギー供給能力」、「エネルギー消費構造」、「エネルギー効率」、「低炭素目標」、「エネルギーサービス」の関する7つのミッションを重点的に進める方針を示している。

エネルギー研究開発戦略では、「国家イノベーション駆動発展戦略」（2016－2030年）において、重点課題として「安全・クリーンなエネルギーを開発し、エネルギー生産と消費革命を推進する」をあげている。エネルギー領域に特化した「エネルギー技術『第13次5カ年』計画」では、「国家経済・社会発展『第13次5カ年』計画」、「エネルギー発展『第13次5カ年』計画」に基づき、重点技術分野を指定している。「エネルギー技術『第13次5カ年』計画」では、「石炭のクリーン利用・効率利用」「再生可能なエネルギー技術と水素技術」「安全・先進原子力エネルギー技術」を重点分野に指定し、これは「科学技術イノベーション『第13次5カ年』計画」とも一致している。

なお、エネルギー分野の研究予算は、従来の「国家重点基礎研究発展計画」、「国家ハイテク研究開発発展計画」及び「国家科学技術支援計画」などのトップダウン式競争的研究資金プログラムは、2016年に「国家重点研究開発プログラム」に統合されている。この「国家重点研究開発プログラム」では、エネルギー分野としては、「新エネルギー自動車」「グリーン建築」「石炭高効率利用」「スマート・グリッド技術と設備」が掲げられている。

<韓国>

2013年12月に策定された「第二次国家エネルギー基本計画（2013～2035年）」（20年間を計画期間とした長期エネルギー戦略）では、高効率システム化を通じ、エネルギー低消費社会の実現を目指している。需要管理中心への政策転換、分散型発電システムの構築、環境保護・安全強化、エネルギー安全保障の強化、国民と一緒に政策の推進を重点課題として挙げている。

2014年12月には「第3次エネルギー技術開発計画（'14～'23年）」を発表。エネルギー革新技術プログラムの推進の方向性として、分散化、クリーン化、効率化、安全、知能化が挙げられており、17個のプログラム、75の主要プロジェクトと274個の重点技術を選定した。

17のプログラム（Energy Innovation Architecture2025）では、1.次世代戦略資源開発、2.高効率クリーン火力発電 3.国民安心原子力発電、4.再生可能エネルギーのハイブリッドシステム、5.次世代クリーン燃料、6.次世代送配電、7.スマートホーム・ビル、8.スマート FEMS、9.スマートマイクログリッド、10.エネルギーネガワットシステム、11.需要対応型 ESS（エネルギー貯蔵システム）、12.CCUS（CO₂ 捕集/活用/保存）、13.未来のエネルギー発電、14.ワイヤレス電力送受信、15.未来高効率エネルギー変換/保存、16.3D プリンティングベース最新の製造プロセス技術、17.エネルギーIoT+ビッグデータプラットフォームを指定。エネルギーIoTなど、韓国の強みであるITの活用に重点をおいていることが見て取れる。

韓国エネルギー技術評価・企画院（KETEP）がエネルギー分野のファンディングの中心であるが、韓国研究財団（NRF）でも核エネルギーや基盤技術のファンディングを行っている。その他、エネルギーデバイス系で産学官が一体となって取組むことに特徴がある。

（１）日本

1. エネルギー分野の政策

日本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。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。

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GHGの排出削減を定めた京都議定書の採択（COP3、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。

1995年に「科学技術基本法」が制定され、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。

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、日本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。

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）。

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。

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。

2015年12月には、パリでCOP21が開催され、世界の平均気温の上昇を2℃を十分に下回る水準に抑制し、1.5℃以内に抑えるよう努力するという長期目標を国際社会で合意した。

2. エネルギー分野の研究開発（科学技術）政策

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）、「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の研究開発投資が行われてきた。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。

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は、1993年の国立試験研究所の再編成によりニューサンシャイン計画に統合され、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、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革新的な技術開発などが行われた。

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。

「科学技術基本法」が1995年に制定され、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。これに伴い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。

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。

科学技術基本計画の下、「環境エネルギー技術革新計画」が閣議決定されている。総合

科学技術会議は、2008年5月に、北海道洞爺湖G8サミットに合わせて、低炭素社会実現に向けた「環境エネルギー技術革新計画」を取りまとめた。

その後の改定では、地球全体の環境・エネルギー制約の解決と、各国の経済成長に必要と考えられる「革新的技術」として、37の技術を特定している（2013年9月13日。下記に詳述）。地球温暖化対策推進本部において11月に発表された「攻めの地球温暖化外交戦略（ACE）」に、「環境エネルギー技術革新計画」は「技術」の要として位置づけられ、COP19（11月11～23日、ワルシャワ）においてACEの実施が表明された。

i) 短中期（2030年頃まで）で実用化が見込まれる技術

○生産・供給分野

主要技術：高効率石炭火力発電、高効率天然ガス発電、風力発電、太陽エネルギー利用、海洋エネルギー利用、地熱発電、原子力発電

○消費・需要分野

主要技術：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・需給統合分野

主要技術：燃料電池、高性能電力貯蔵、蓄熱・断熱等技術

○その他温暖化対策技術

主要技術：メタン等GHG削減技術、温暖化適応技術、地球観測・気候変動予測

ii) 中長期（2030年頃以降）で実用化・普及が見込まれる技術

主要技術：二酸化炭素回収・貯留（CCS）技術、人工光合成、バイオマス利活用、環境調和型製鉄プロセス、水素製造・輸送・貯蔵、超電導送電、植生による固定

iii) 超長期的に実現が期待される技術

将来的な課題への対応や長期的な可能性として検討すべき技術として、核融合、宇宙太陽光発電や窒素循環の適正化等についても、長期的観点から取り組む。

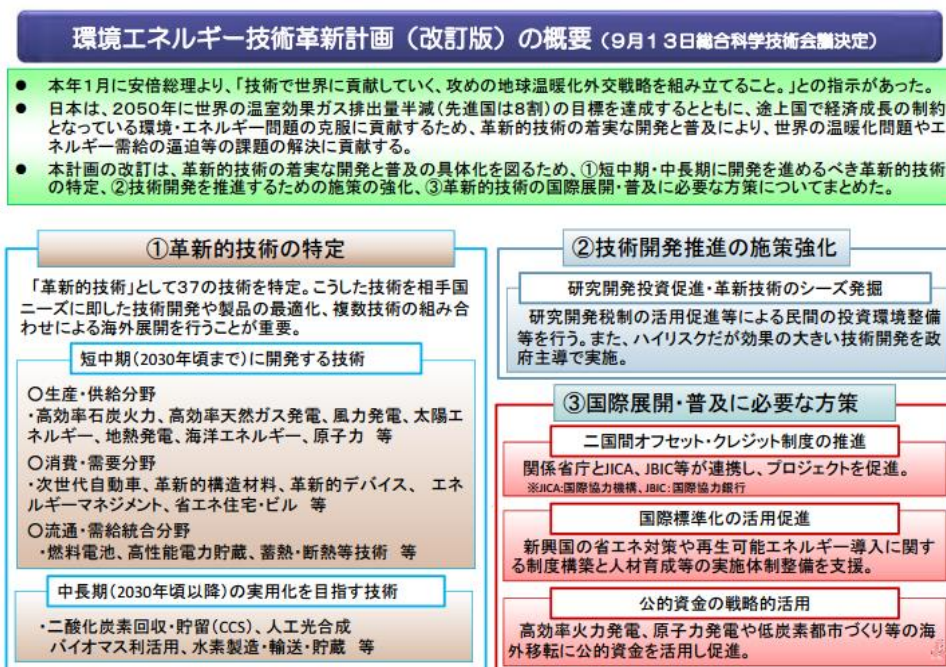


図 2-23

COP21 において示した GHG の排出削減目標に向け、地球温暖化対策推進本部（2015 年 11 月 26 日）および総合科学技術イノベーション会議において、エネルギー・環境分野の革新的技術の開発に向け集中すべき有望分野を特定し、研究開発を強化すべく、平成 28 年 4 月に「エネルギー・環境イノベーション戦略」をまとめた。



図 2-24

（参考 1）2050年までの世界の温室効果ガス削減のイメージ

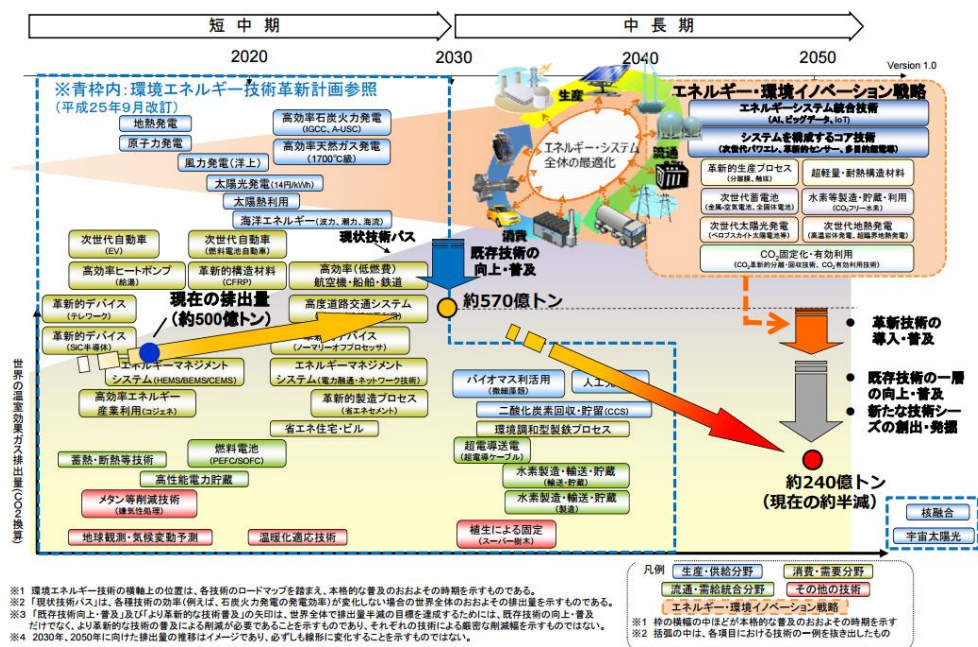


図 2-25

平成 28 年度からの第 5 期科学技術基本計画では、世界に先駆けた「超スマート社会」の実現の中で「エネルギーバリューチェーン」が取り上げられている。また、13 の重要政策課題のうちエネルギーに関連するものとして、「エネルギーの安定的確保とエネルギー利用の効率化」が掲げられている。

3. 代表的な研究開発プログラム

● エネルギー供給

・ 化石資源

- 非在来型石油・天然ガス資源採掘

メタンハイドレート開発促進事業	表層型メタンハイドレートを経済的に掘削・生産回収するための技術開発を推進	JOGMEC、産総研、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21)	経産省・資源エネ庁	平成13～30年度
深海底資源基礎調査事業	レアメタルや レアアース等を多く含むコバルトリッチクラストやレアアース堆積物等の深海底鉱物資源について、存在状況調査や生産関連技術等の基礎調査	JOGMEC	経産省・資源エネ庁	平成23～30年度
SIP「次世代海洋資源調査技術」	海洋鉱物資源の科学的成因論等に基づいた、低コスト・高効率で調査する技術および将来の海洋資源開発に不可欠な環境影響評価手法の開発	海洋研究開発機構 (JAMSTEC) など	内閣府総合科学技術・イノベーション会議	平成26年度～

日本海沿岸の 10 府県が協力する賦存量に関する合同調査プロジェクト（海洋エネルギー資源開発促進日本海連合：平成 24 年設立）が進められている。

- 火力発電

先進超々臨界圧火力発電（A-USC）実用化要素技術開発	従来630℃程度が限界といわれていた蒸気温度を 700℃まで向上し、2020年代に商用プラントでの高位発熱量基準送電端効率46%達成の見通しを得る	I H I、住友金属工業、東芝、パプコック日立、日立製作所、富士電機システムズ、三菱重工業、A B B 日本ベレー	経産省・資源エネ庁	平成20～28年度
高効率ガスタービン（A-HAT）技術実証事業	①大容量機（40万kW程度）の高効率化（52%→57%）のために、1700℃級ガスタービンの実用化に必要な先端要素技術を適用した実証等、②中小容量機（10～20万kW程度）の高効率化（45%→51%）のために、高湿分空気利用ガスタービン（AHAT）の実用化に必要な高湿分圧縮機等の開発とシステムの信頼性等の検証	三菱日立パワーシステムズ、電力中央研究所、住友精密工業	経産省・資源エネ庁	平成24～32年度
石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業（大崎クールジェンプロジェクト）	第1段階ではIGFCの基盤技術である酸素吹石炭ガス化複合発電※実証試験設備を中国電力（株）大崎発電所構内に建設し、平成28年度から実証試験運転を開始。第2段階では、第1段階の酸素吹IGCCにCO ₂ 分離・回収装置を追設したCO ₂ 分離・回収型IGCC実証試験を計画。第3段階として、第2段階の実証試験設備に燃料電池を組み合わせたCO ₂ 分離・回収型IGFCの実証を計画	大崎クールジェン	経産省・資源エネ庁	平成24～30年度

2015 年 6 月 経産省が「次世代火力発電の早期実現に向けた協議会」を発足し次世代火力発電関連技術開発のロードマップを策定予定。

- 低品位炭利用

ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト	石炭火力から発生するCO ₂ を分離・回収・貯留するCCSを含めたゼロエミッション型の石炭ガス化発電技術の実施可能性を検討	電中研、電源開発など	NEDO	平成24年度～
水素社会構築技術開発事業／大規模水素エネルギー利用技術開発	未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業	川崎重工業、岩谷産業、電源開発	NEDO	平成27～29年度
地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム	低品位炭とバイオマスのタイ国におけるクリーンで高効率な利用法を目指した溶剤改質法の開発	京都大学、秋田大学、電中研、神戸製鋼所	JST	平成25年～29年度
国際科学技術共同研究推進事業（戦略的国際共同研究プログラム）	マイルド熱分解とエクセルギー再生に基づく低品位炭有効利用プロセスの開発	東京大学など	JST	平成25年～27年度

その他に、次世代コークス製造技術（SCOPE21）や欧州の ULCOS（Ultra-low Carbon Dioxide Steelmaking）が注目される。

- CO₂回収貯留（CCS）

二酸化炭素削減技術 実証試験事業	製油所のオフガスから分離回収したCO ₂ を年間約10万トン規模で圧入を行い、CCSの実用化レベルでの検証を行う。本実証試験の実施地点として苫小牧沖を決定。	日本 CCS 調査	経産省	平成21～32年度
二酸化炭素回収技術 実用化研究事業	CCSの全コストの6割以上を占めるCO ₂ の分離・回収のコスト低減を目的として、アミンを固体に担持した固体吸収材や分離膜技術の実用化研究を行う。	次世代型膜モジュール技術研究組合	経産省	平成27年度～

国内では革新的製鉄プロセス技術開発（COURSE50）、海外では豪州の Gallide A 発電所の酸素燃焼プロジェクト。また、DOE の Regional Carbon Sequestration Partnerships（RCSP）、Clean Coal Power Initiative（CCPI）、Future Gen 2.0（以上、米国）、CCS 資金供給メカニズム（NER300、欧州）等の動向が注目される。

・原子力

原子力システム研究 開発事業	多様な原子力システム（原子炉、再処理、燃料加工）に関し大学等における革新的な技術開発を推進	大学、JAEAなど	文部科学省・JST	平成17年度～
英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業	「原子力基礎基盤戦略研究プログラム（本事業）」	大学、JAEAなど	文部科学省・JST	平成27年度～
革新的研究開発推進プログラム	「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」プロジェクト	大学、JAEA、RIST、理研、企業など	内閣府総合科学技術・イノベーション会議	平成26年度～

東芝、日立製作所、トヨタ自動車、日本原子力研究開発機構、文部科学省など全 26 社・機関は、2015 年高温ガス炉の実用化に向けた研究開発を進める協議会を設立した。安全性、信頼性、核拡散抵抗性の高い原子炉開発が、第 4 世代炉原子力国際フォーラム等で進められている。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への取り組みが進展している。

・再生可能エネルギー

- 太陽光

高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発	太陽光発電の発電コスト低減に向けた新たなプロジェクト（2030年までに発電コスト7円/kWh）	企業、大学など	NEDO	平成27～31年度
福島再生可能エネルギー研究開発拠点 革新的エネルギー研究開発拠点の形成	産総研は、福島県内に再生可能エネルギー研究開発拠点を整備し、この拠点を、再生可能エネルギーに関するオープンイノベーション・ハブとして位置づけ。革新的な超高効率太陽電池の実現を目指した研究開発を実施。	産総研など	経産省・文科省	平成24年度～
ALCA「太陽電池および太陽エネルギー利用システム」	新たな科学的・技術的知見に基づいて温室効果ガス削減に大きな可能性を有する技術を開発するための研究開発を推進	大学など	JST	平成22年度～

- 風力発電

洋上風力発電等技術研究開発	日本特有の自然条件に適合した洋上における風況観測や風力発電システムに関する技術開発及び環境影響評価手法の情報法収集等に向けた実証研究（千葉県銚子沖及び福岡県北九州市沖の2か所）	東京電力、東京大学、電源開発、三菱重工業など	NEDO	平成20～28年度
風力発電高度実用化研究開発	大型化する風車の主要部品やコンポーネント、設備利用率を向上するメンテナンス技術、風車の故障や部品の寿命等を把握するモニタリング技術等の実用化開発を実施	日立製作所、産総研、東京大学など	NEDO	平成25～28年度
浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業	2MWのダウンウィンド型 浮体式洋上風力発電設備1基と、世界初となる 25MVA浮体式洋上サブステーション及び、海底ケーブルを設置します。第2期として、5MWおよび 7MWの浮体式洋上風力発電設備2基を新設	福島洋上風力コンソーシアム	経済産業省	平成23～27年度

- バイオマス

戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業	2030年頃の実用化を見据えるバイオマスガス化、液体化（BTL）、微細藻類由来バイオ燃料製造技術開発等に加え、バイオマス由来の気体および液体燃料の円滑な導入に資する技術の実用化技術開発も実施	企業、大学など	NEDO	平成22～28年度
バイオ燃料製造の有用要素技術開発事業	セルロース系バイオマスから燃料を製造する技術において、バイオ燃料植物の改良生産技術、糖化・発酵プロセスの新規な有用技術を開発	企業、大学など	NEDO	平成25～28年度
セルロース系エタノール生産システム総合開発実証事業	食糧と競合しないセルロース系エタノール燃料の商用生産の実現を目的とし、要素技術の最適組合せ	企業、大学など	NEDO	平成26～31年度
ALCA「ホワイトバイオテクノロジー」	革新的なCO ₂ 固定や、エネルギー・次世代燃料・物質生産等を実現することを目指す研究	大学など	JST	平成22年度～
CREST「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」・さきがけ	ゲノミクス・プロテオミクス・メタボロミクス・細胞解析技術等を含む先端科学も活用し、藻類・水圏微生物の持つバイオエネルギーの生産等に有効な生理機能や代謝機構の解明を進めるとともに、それらを制御することによりエネルギー生産効率を向上させるための研究	大学など	JST	平成22～28年度
CREST「二酸化炭素資源化を目指した植物の物質生産力強化と生産物活用のための基盤技術の創出」	植物の光合成能力の増強を図るとともに、光合成産物としての各種のバイオマスを活用することによって、二酸化炭素を資源として利活用するための基盤技術の創出を目的	大学など	JST	平成23～29年度

バイオ燃料製造技術として、産学官からなる次世代航空燃料イニシアティブ(平成 26 年設立)において 2020 年に向けたバイオジェット燃料導入道筋検討会などが進められている。IRENA (International

Renewable Energy Agency) の Remap (Renewable Energy Roadmap 2030) や再生可能エネルギー指令 (RED : The Renewable Energy Directive、欧州) などの動向が注目される。

- 地熱

地熱資源開発調査事業	法人が地熱資源調査を行う場合に、調査費の一部（地質調査・物理探査・地化学調査等に関する経費や坑井掘削調査等に関する経費）を助成金として交付	企業など	JOGMEC	平成24年度～
地熱発電技術研究開発事業	環境配慮型高機能地熱発電システムに係る機器開発、現状未利用である低温域でのバイナリー発電システム開発、環境保全対策や環境アセスメント円滑化に資する技術開発等	企業、大学など	NEDO	平成25～29年度

EGS (Enhanced Geothermal System) 技術として International Partnership for Geothermal Technology (IPGT) や Japan Beyond Brittle Project (JBBP) が注目される。

- 海洋エネルギー

海洋エネルギー技術研究開発	革新的な技術シーズの育成、システム開発、実証研究等を多角的に実施	企業、大学など	NEDO	平成23～29年度
潮流発電技術実用化推進事業	漁業や海洋環境への影響を抑えた、日本の海域での導入が期待できる潮流発電システムの要素技術開発・実証や事業性 評価を実施	企業など	環境省	平成26年度～

● エネルギーネットワーク

- 熱利用

再生可能エネルギー熱利用技術開発	地中熱利用は、システムトータルで、導入コスト20%低減、及び運用コスト20%低減、その他再生可能エネルギー熱（太陽熱、雪氷熱等）利用システムは、蓄熱・断熱などの要素も考慮して日本に適したトータルシステムの高効率化に資する革新的技術開発及び規格化を推進し、システムの導入コスト10%低減を目指す		NEDO	平成26～30年度
------------------	--	--	------	-----------

- 水素製造・運搬・利用

SIP「エネルギーキャリア」	アンモニアキャリア、有機ハイドライド、液体水素、水素利用技術の開発、エネルギーキャリアの安全性評価など	企業、大学など	内閣府総合科学技術・イノベーション会議	平成26年度～
水素利用技術研究開発事業	2020年以降の燃料電池自動車 (FCV) 及び水素供給インフラの本格普及に向け、国内規制適正化・国際基準調和・国際標準化に関する研究開発、FCV及び水素ステーション用低コスト機器・部品等の研究開発	九州大学、企業など	NEDO	平成25～29年度
水素利用等先導研究開発事業	再生可能エネルギーからの高効率低コスト水素製造技術ならびに水素の長距離輸送、長時間貯蔵を容易にするためのエネルギー	産総研、企業など	NEDO	平成26～29年度

	キャリア技術の先導的な研究開発			
水素社会構築技術開発事業	発電分野等の水素の利活用を抜本的に拡大し、2030年頃に世界に先駆け本格的な水素サプライチェーンの構築、エネルギー供給システムの柔軟性確立、エネルギーセキュリティの確保貢献を目的に「水素エネルギーシステム技術開発」及び「大規模水素エネルギー利用技術開発」を実施		NEDO	平成26～32年度
CREST「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出」	再生可能エネルギーを化学エネルギーの貯蔵・輸送の担体となるエネルギーキャリアに効率的に変換し、エネルギーキャリアから電気エネルギー、水素、動力等を取り出して利用する基礎的・基盤的技術の創出	大学など	JST	平成25年度～

燃料電池については、NEDOによる「固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発」（平成25年度～）で実施されている。

- 蓄電

革新型電池先端科学基礎研究事業（RISING）	大学・独法・企業の産官学連携による基礎から応用に至るまでの革新電池開発プロジェクト	京都大学など	NEDO	平成25年度～
ALCA-SPRING（次世代蓄電池特別重点技術領域）	国内大学・独法の研究者を集結し4つの重点課題にグループ編成した大規模な組織的研究開発	物質・材料研究機構（NIMS）など	JST	平成25年度～
元素戦略（触媒・電池拠点）「研究拠点形成型」の一部	二次電池の部材について、固体及び気体／液体との間での元素の複雑系反応を基礎科学と実験化学の緊密な連携を通じて解明することにより、二次電池に対する元素の機能を予測し、貴金属や希少元素を用いない代替材料の開発	京都大学、東京大学など	文部科学省	平成24年度～

- パワーエレクトロニクス

SIP「次世代パワーエレクトロニクス」	SiC、GaN、酸化ガリウム（Ga ₂ O ₃ ）、ダイヤモンドについて、基板育成、エピタキシャル成長、デバイス、回路モジュール、パッケージ、熱設計などの広範囲な技術開発に関する産学連携プロジェクト	産総研、京都大学など	内閣府総合科学技術・イノベーション会議	平成26年度～
次世代パワーエレクトロニクス技術開発プロジェクト	ウエハ、デバイスの更なる高品質化等を図ると共に、自動車、民生機器などアプリケーション毎に要求されるスペックを、最適な材料（Si、SiC、GaN等）、設計技術、実装技術等の組み合わせ、最適な応用システムの構築により実現する	東大、東工大など	NEDO	平成21～31年度
スーパークラスタープログラム「先進ナノツールによるエネルギー・イノベーションクラスター」	GaNやSiCを使った「次世代パワー半導体」などの開発	京都大学、名古屋大学ほか	JST	平成25年度～

省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発	GaN等の次世代半導体に関して、材料創製からデバイス化・システム応用までの研究開発を一体的に行う研究開発拠点を構築し、理論・シミュレーションも活用した基礎基盤研究を実施することにより、実用化に向けた研究開発を加速	京都大学など	文部科学省	平成28年度～
---------------------------	--	--------	-------	---------

つくばイノベーションアリーナ（TIA-nano）において、産総研の蓄積してきた SiC の基盤技術や試作ラインを活用した民活型オープンイノベーション共同研究体「つくばパワーエレクトロニクス・コンステレーションズ（TPEC）」による開発が進められている。

- エネルギーマネジメント(系統連系、分散型電源、デマンドレスポンス・需要家行動)

風力発電のための送電網整備実証事業	風力発電の適地であるものの送電網が脆弱なためその導入拡大に課題を有する地域における送電網の整備及び技術的課題の実証	日本送電株式会社、北海道北部風力送電株式会社	経産省・エネルギー庁	平成25年度～
分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業	SiCパワー半導体を用いた次世代電圧調整機器及びその制御システムを開発。再生可能エネルギーの大量導入を図るための共通基盤技術の開発	富士電機電力中央研究所エネルギー総合工学研究所	NEDO	平成26～30年度
電力系統出力変動対応技術研究開発事業	風力発電の急激な出力変動（ランブ）に着目し、ランブ予測技術や出力変動を緩和する出力変動制御技術を高度化	東京電力	NEDO	平成26～30年度
CREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」	再生可能エネルギーをはじめとした多様なエネルギー源と様々な利用者をつなぐエネルギー管理システムにおいて、エネルギー需給を最適制御するための理論、数値モデル及び基盤技術の創出	大学など	JST	平成24年度～

経産省「次世代エネルギー・社会システム実証事業」など、需要地設置の分散型エネルギー資源を広域エネルギーネットワークと連携制御する分散協調型エネルギーマネジメントシステムの実証実験が進む。東大発ベンチャーの Digital Grid（JST START）などもある。文科省・JST の COI プログラム「共進化社会システム創成拠点」（中核機関：九州大学）の一部でエネルギーモビリティや EMS について取組がある。

● エネルギー利用

- 熱利用

未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発	広域に分散した熱を有効利用する技術の基盤となる熱マネジメント技術として、熱を逃さない技術（断熱）、熱を貯める技術（蓄熱）、熱を電気に変換する技術（熱電変換）等の技術開発を一体的に行うことで、未利用熱エネルギーを経済的に回収する技術体系を確立	産総研、未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合、	NEDO	平成27～34年度
戦略的省エネルギー技術革新プログラム	省エネルギー技術の技術革新に向けた取り組みを戦略的に推進	企業、大学など	NEDO	平成24～33年度
ALCA「革新的省・創エネルギーシステム・デバイス」の一部	革新的なエネルギー創出システム・デバイスや、既存のシステムを極低エネルギーで実現する画期的な技術など	大学など	JST	平成22年度～

2013 年「未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（Thermat）」が設立され、多量の未利用熱エネルギーを削減・回収・利用するための要素技術を革新し、システムとして確立することを目的としている。

- 触媒・プロセス技術

二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発	太陽光と水から得られた水素（ソーラー水素）とCO ₂ からプラスチック原料等の基幹化学品を製造する植物の光合成プロセスの一部を模した、化石資源に頼らない革新的な化学品製造プロセスの実用化を目指す	三菱化学、東京大学など	NEDO	平成26～33年度
環境調和型製鉄プロセス技術開発	コークス製造時に発生する高温のコークス炉ガス（COG）に含まれる水素を増幅し、コークスの一部代替として用いて鉄鉱石を還元する技術を開発。また、高炉ガス（BFG）からCO ₂ を分離するため、製鉄所内の未利用排熱を活用した革新的なCO ₂ 分離回収技術を開発。 10m ³ 規模の試験高炉を建設し、上記で得られた要素技術の開発成果と課題を反映させパイロットレベルでの総合実証試験を行う	新日鐵住金、JFEスチール、神戸製鋼所、日新製鋼、新日鐵住金エンジニアリングなど	NEDO	平成25～29年度
元素戦略（触媒・電池拠点）「研究拠点形成型」の一部	理論・計算科学と実験科学のインタープレイにより複雑な複合材料である触媒の微視的過程の解明、複雑・複合系の科学の深化と共に、新しい触媒材料を予測し、希少元素フリーの新規高性能触媒材料を開発	京都大学など	文部科学省	平成24年度～
ALCA「革新的省・創エネルギー化学プロセス」の一部	既存プロセスに比べて大幅な二酸化炭素放出の低減が見込めるなど、低炭素社会構築への道筋を十分に考察された課題について、これまでの考え方とは全く異なった革新的プロセスにつながる研究	大学など	JST	平成22年度～
CREST「多様な天然炭素資源の活用に資する革新的触媒と創出技術」	多様な天然炭素資源をバランスよく活用できる将来の産業基盤の確立に向け、根幹をなすメタンをはじめとするアルカンガス資源を従来にない形で有用な化成品・エネルギーに変換するための革新的な触媒の創出	大学など	JST	平成27年度～

- 自動車・モビリティ、磁石材料

SIP「革新的燃焼技術」	最大熱効率50%及びCO ₂ 30%削減（2011年比）を実現するため(1)高い熱効率を生み出す燃焼技術（ガソリンの場合は超希薄燃焼・高過給・大量EGR条件下の燃焼、ディーゼルの場合は急速静音燃焼・クリーン低温燃焼など）、(2)内燃機関の燃焼を自在に制御する技術、(3)損失を低減する技術の研究開発	大学、自動車用内燃機関技術研究組合(AICE)など	内閣府総合科学技術・イノベーション会議	平成26年度～
次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発	レアアースに依存しない革新的高性能磁石の開発と、モーターを駆動するためのエネルギーの損失を少なくする高性能軟磁性材料の開発を実施。さらに、それらの性能を最大限に生かした更なる高効率モーター設計の開発を	産総研、企業など	NEDO	平成26年度～

	実施し、モーターの省エネ化を目指す			
産学共創「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築」	革新的次世代永久磁石の創製のための基盤技術とそれに繋がる指針確立	大学など	JST	平成23年度～

SIP プログラム「自動走行システム」（平成 26 年度～）では、開発・実証項目の一つとして、交通情報や道路状況などの動的情報を高度複合化した地図情報構築を進める予定。

- 構造材料

SIP「革新的構造技術」	強く、軽く、熱に耐える革新的材料を開発し、航空機を始めとする輸送およびエネルギー産業での実機適用、エネルギー転換・利用効率向上を目指す	大学、企業など	内閣府総合科学技術・イノベーション会議	平成26年度～
革新的新構造材料等研究開発	自動車、航空機、鉄道車両等の抜本的な軽量化に向けて、革新的なアルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、鋼板、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)、これらの材料を適材適所に使うために必要な接合技術の開発等を実施	新構造材料技術研究組合 (ISMA) など	NEDO	平成26年度～
元素戦略（構造材料拠点）	「強さ」と「ねばさ」を具備する究極の特性へのブレークスルーを、希少元素の添加によるのではなく、電子、原子のスケールからマイクロメートルに及ぶ組織制御によって達成すること。そのために構造材料のフロンティアを、電子論と最先端の計測技法という新しいツールを駆使して開拓する	京都大学など	文部科学省	平成24年度～
産学共創「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」	革新的な構造用金属材料の創製のための基盤技術と指導原理の構築のための基礎基盤研究を行う	大学など	JST	平成22年度～

（２）米国

2016 年 11 月の大統領選におけるトランプ氏勝利により、オバマ政権が進めてきた環境・エネルギー政策が大きく変わる可能性があり、今後の動向に注視する必要がある。ここでは 2016 年 12 月時点における現状を前提に記する。

1. エネルギーに関する概況（現状） 1) 2) 3) 4) 5) 6)

米国は、面積が約 980 万 m² で日本の約 25 倍で、ロシア、カナダ、中国に次いで世界第 4 位。人口は 2013 年の推計値で約 3.17 億人であり日本の約 2.5 倍で、中国、インドに次いで世界第 3 位である。2014 年の米国における一次エネルギー消費量は 23.0 億 TOE（石油換算トン）で、国別で見ると中国に次いで 2 番目で、世界の 17.8%を占める。そのエネルギー源の内訳は石油 36.4%、天然ガス 30.2%、石炭 19.7%、核燃料 8.3%、水力 2.6%、その他再生可能エネルギー2.8%である。また発電量（2013 年）は 4 兆 70 億 kWh であり、そのエネルギー源別の電源構成は石炭 39%、天然ガス 27.5%、石油 0.7%、

原子力 19.4%、水力を含む再生可能エネルギー13.0%となっている。米国内のガスおよび石油の生産量は、2004 年時でそれぞれ 5,260 億 m³と 725 万バレル/日であったものが、シェール革命後、2014 年時で 7,280 億 m³と 1,164 万バレル/日と大幅に増加し、ガス、石油とも世界 1 位の産出量となった。これにより石油以外はエネルギー自立がほぼ可能な状況であり、石油についても輸入量の継続的な減少が予想されている。一方で油価の大幅下落により、シェール油井のリグ数は 2014 年末に 2000 近くあったものが、2016 年 5 月には 400 程度まで大幅に減少している。しかし生産量の減少は比較的少なく、生産性の向上によるカバーがうかがえると共に、将来の油価の上昇次第で回復が予想されている。

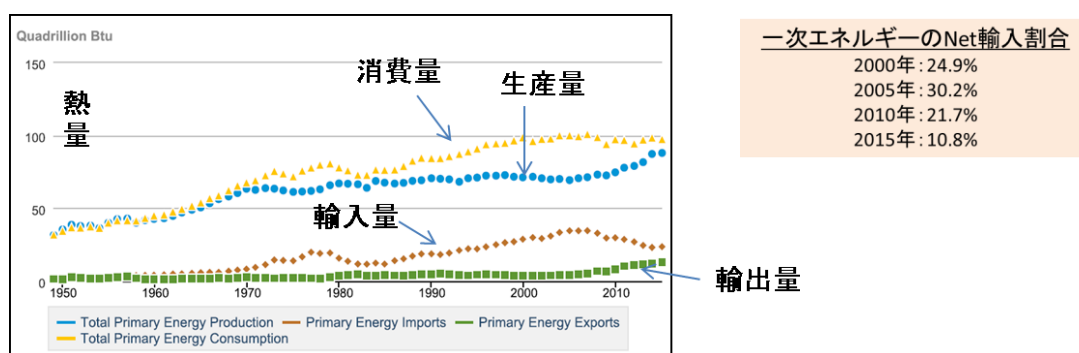


図 2-26 米国における一次エネルギー量概要 出典：EIA ホームページ

なお米国のエネルギーにおける政策動向に関するトピックスは以下の通り。

- 自動車の新燃費基準については、2011 年 7 月の自動車メーカーとオバマ政権との合意を受け、2012 年 8 月に国家道路交通安全局（NHTSA）と EPA が共同で公表。これにより燃費基準と大気浄化法による GHG 基準について、2025 年モデル車までの CAFE（企業平均燃費）を設定。規制対象車種は乗用車、LD トラック等であり、輸送部門の燃料消費および GHG 排出の約 60%に相当する。EV/PHV/FCV/CNG は優遇措置がある。中量・重量車の燃費基準と GHG 基準については 2018 年モデルまで設定されている。2015 年にフェーズ 2 として 2021-2027 年モデルの排出基準の提案があり、検討中の状況である。
- 自動車燃料に混合するバイオ燃料（エタノールなど）については、再生可能燃料基準（RFS2）により 2022 年までの導入義務量を規定している。2022 年で 360 億ガロン（1.36 億 kL）を計画しているが、2014 年にブレンドウオール問題で義務量が見直しになっている。（ブレンドウオール問題：全米のガソリンのほぼすべてが安全上の上限である E10 となり、これ以上のエタノール混合が困難になっている問題。また E15/E85 もあまり普及していない。参考：米国ガソリン消費量（2014 年）は約 5 億 kL）。またセルロース系エタノール義務量についても計画通りに進んでおらず、計画変更により削減されている。

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）⁶⁾

科学技術政策の基本的な方向性を決定するのは科学技術政策局（OSTP）を中心とす

る大統領府であるが、分野ごとの政策立案と研究開発はそれぞれの分野を所管する各省庁とその傘下の公的研究所が担っている。このためエネルギー政策については、大統領令に沿ってエネルギー省（DOE）が中心となり政策の推進を実施している。

3. エネルギーに関する基本政策⁶⁾

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としている。政権第1期（2008～2012）では再生可能エネルギー拡大による産業創生を狙った「グリーン・ニューディール」を進めていたが、その後のシェール革命により現在は、“all-of-the-above”（利用し得るすべての資源を使って）という包括的エネルギー政策に転換しており、環境に配慮した国内石油・ガス開発の推進にシフトしている。

2011年3月に、大統領府が「未来の安定したエネルギーを確保するための構想（Blueprint for a Secure Energy Future）」を取りまとめており、この中で目指すべき3つの方向として、①国内資源を開発し、エネルギー安全保障を確保する、②低コストで、高効率なエネルギーシステムに転換する、③エネルギー技術を革新し、産業と雇用を生み出すことを定めている。

4. エネルギー研究開発戦略^{7) 8) 12) 13) 14) 15)}

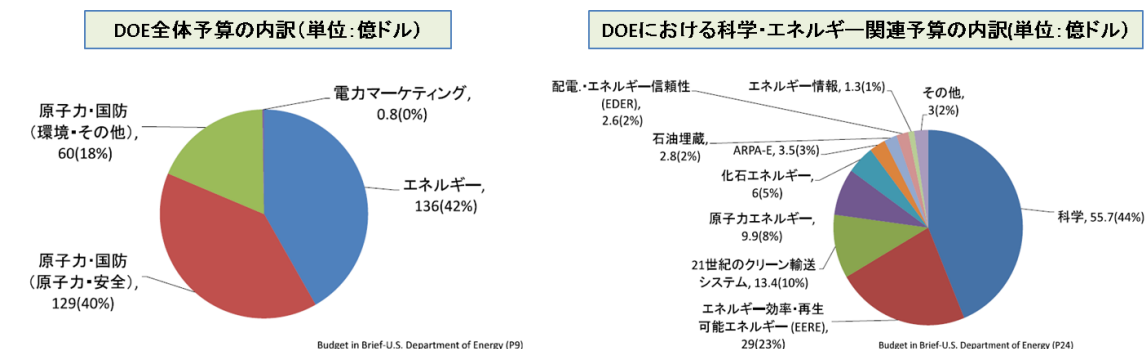
エネルギー分野の研究開発については、基礎研究を含めて DOE 主導で進められている。DOE はエネルギー・環境・核安全保障の課題に取り組むことにより米国の繁栄と国家安全保障を確保することを主要ミッションとしており、そのロードマップとして、2014年4月に「戦略計画 2014～2018年（Strategic Plan 2014-2018）」を公表している。この中には①科学とエネルギー、②核安全保障、③管理と成果、の3つの大目標が掲げられており、この内、①において、エネルギー分野の以下の具体的な戦略目標とその成果目標が示されている。

- ◇ 戦略目標 1：包括的エネルギー資源の開発、導入による気候変動行動計画の目的・目標の前進と新たな雇用や産業の創出
 - 内容：効率向上、再生可能エネルギー発電の拡大と CCS や原子力発電への支援、エネルギー技術展開への融資、輸送システム技術、環境に配慮した国内原油・天然ガス開発支援、地球気候変動への国際的活動
- ◇ 戦略目標 2：エネルギーインフラの経済競争力、環境配慮、安定かつ回復力の強化支援
 - 内容：4年毎のエネルギー計画見直し（QER）、電力グリッドの近代化技術開発、DOE の事故管理能力強化、戦略的石油備蓄（SPR）、サイバーセキュリティ、州政府等との協力による気候変動防止・適応回復力戦略策定
- ◇ 戦略目標 3：変革をもたらす科学的発見や主要な科学ツールの提供
 - 内容：重点分野〔計算科学、材料科学と化学、生物科学・環境科学、プラズマ科学、高エネルギー物理学（ダークエネルギー等）、核物理学〕における科学的発見の追求、科学利用施設の提供、パートナーシップ強化

2015年4月に発表された「4年毎のエネルギー計画見直し（QER）」においては米国

のエネルギーインフラに焦点を当て、どのように近代化していくべきかの問題を検討している。具体的には①エネルギーインフラのレジリエンス、②配電網の近代化、③SPR利用などの非常時対応の検討、④共用のエネルギー輸送インフラの改善、⑤北米エネルギー市場の統合、⑥エネルギーインフラの立地と許可についての提言が示されている。

なお 2017 年度の DOE 予算（政府要求）は 325 億ドルであり、そのうち研究開発予算は 172 億ドル（連邦政府全体の研究開発予算：1,523 億ドル）となっている。また、科学・エネルギー関連予算は 127.2 億ドルで、基礎科学（物理分野）を担当する科学局の予算は 56.7 億ドル（44%）を占める。科学局は 17 の国立研究所と 300 以上の大学、約 31,000 人の研究者を支援している。

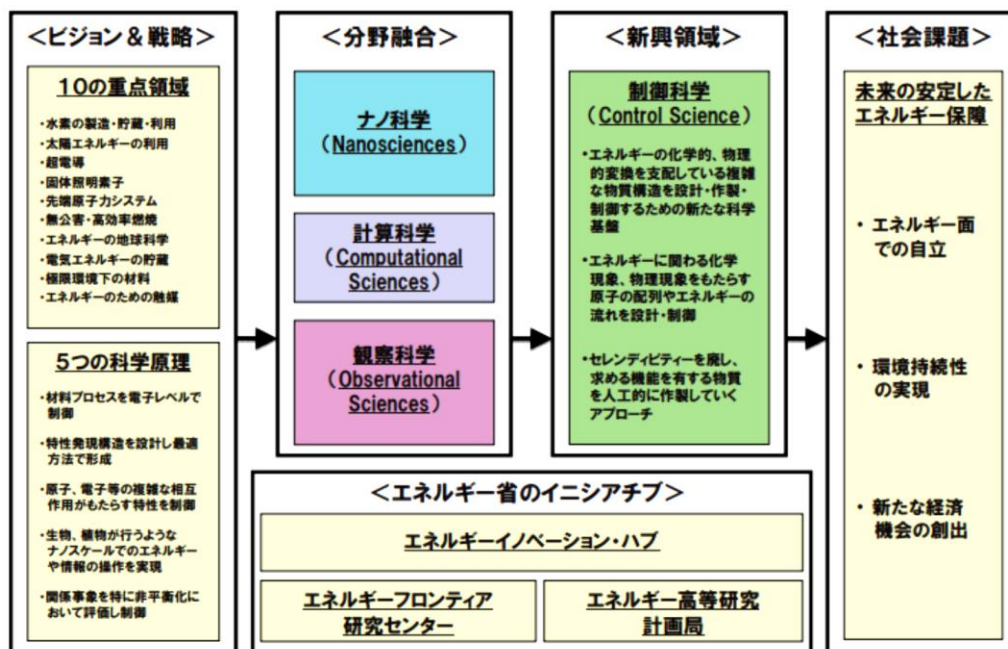


出典：(海外トピック情報) 米国：2017 年度米国大統領予算教書 科学技術予算の概要

図 2-27 DOE 予算（2017 年度）

5. 代表的な研究開発プログラム 7) 10) 11) 12) 13) 14)

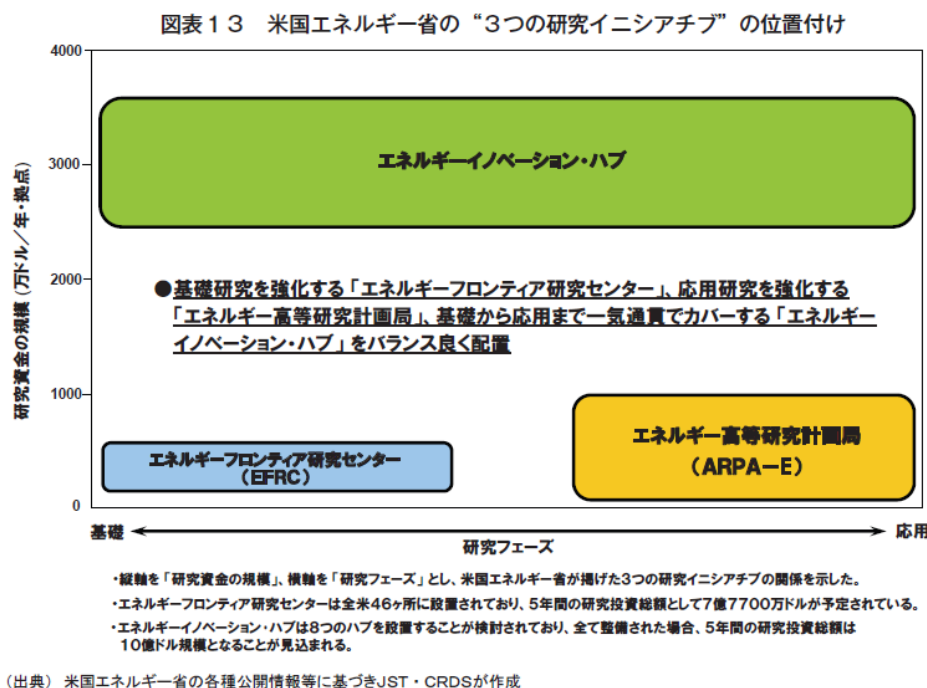
DOE では 2001 年以降の 10 年をかけて基礎研究のビジョン&戦略を取りまとめた。この活動に研究サイドと政策サイドの双方から 1600 名を超える有識者が関与した。



出典：CRDS 研究開発の俯瞰報告書 主要国の研究開発戦略(2015 年) CRDS-FY2014-FR-01

図 2-28 DOE による基礎研究のビジョン&戦略

また、DOE ではエネルギー分野におけるイノベーション推進のために 3 つのイニシアティブとして、「エネルギーフロンティア研究センター（EFRC）」、「エネルギーイノベーション・ハブ」、「エネルギー高等研究計画局（ARPA-E）」を導入。



出典：CRDS 研究開発の俯瞰報告書 主要国の研究開発戦略(2015年) CRDS-FY2014-FR-01

図 2-29 DOE における 3 つの研究イニシアチブの位置付け

● 「エネルギーフロンティア研究センター」 EFRC

EFRC は 2009 年に公募を経て 46 センター（複数の大学、研究所等で構成）設立された。5 年間で総額 7 億 7700 万ドルの助成を実施。基礎研究を支援する枠組みとして、「優先すべき基礎的エネルギー領域（2009 年時 10 領域、2014 年時 13 領域）」「5 つの科学原理」を盛り込むことが公募条件である。2014 年に再編され、現在は 32 センター。（更新は 22 センター、新規が 10 センター）。助成期間は 4 年間。総額は 1 億ドル/年まで（1 センターあたり 200～400 万ドル/年）であることから全体の予算規模は縮小されている。

EFRC が実施する研究領域（10 領域）の変化について、EFRC 設立時（2009 年時）と再編後（2014 年時）における領域の総数（上段）および比率（下段）を比較した表を示す（注：多くのセンターで複数領域を実施していることから合計数はセンター数より多い）。2014 年における研究領域数の多い順は、太陽エネルギー、触媒、水素、蓄電、材料となり、2009 年と比較して太陽エネルギー、蓄電、材料の研究領域は減少し、触媒、水素はほぼ維持となっている。

表 2-1 EFRC で実施の各研究領域の比較

	核エネルギー	触媒	燃焼	蓄電	水素	材料	太陽エネルギー	固体照明	ジオサイエンス	超伝導	合計
2009	6 6%	15 14%	6 6%	14 13%	10 9%	12 11%	27 25%	9 8%	4 4%	3 3%	106 100%
2014	2 3%	13 21%	3 5%	7 11%	9 15%	4 6%	14 23%	3 5%	5 8%	2 3%	62 100%

優先すべき基礎的エネルギー領域の設定に当たっては、2003 年より DOE 科学局内に設置された基礎エネルギー科学プログラムにおいてワークショップを開催し、エネルギー生産・変換・貯蔵・伝達・廃棄物削減に関する重要テーマを検討。現在までに 13 の優先領域が抽出されている。また、研究アプローチの方法として二つのレポートが示されており、2014 年の応募に際しては、これも考慮することが求められた。

- ① 計算材料科学と化学：シミュレーションを基盤とする技術と科学による発見とイノベーションの加速；Computational Materials Science and Chemistry: Accelerating Discovery and Innovation through Simulation-Based Engineering and Science (2010.7)
- ② 量子から連続体：メソスケール科学への機会；From Quanta to the Continuum: Opportunities for Mesoscale Science (2012.9)

なお優先すべき基礎的エネルギー領域、5 つの科学原理、研究アプローチの内容については参考参照

● 「エネルギーイノベーション・ハブ」

基礎研究や応用研究に加え、商業化に必要な工学開発までカバーした一連の活動を「アンダー・ワン・ループ」で行うための仕組み。優先して取り組むべき 8 テーマの内、5 テーマについて立ち上がっている。

- 軽水炉先端シミュレーションコンソーシアム（CASL）
 - ・ オークリッジ国立研究所がリーダー。2010 年開始。2015 年に更新され、5 年間に 1 億 2150 万ドルの助成
 - 人工光合成共同センター（JCAP）
 - ・ カリフォルニア工科大学がリーダー。2010 年開始。2015 年に更新され、5 年間で 7500 万ドルの助成
 - エネルギー高効率ビルディング（CBEI）
 - ・ ペンシルバニア州立大学がリーダー。2011 年開始。更新されず。
 - エネルギー貯蔵研究共同センター（JCESR）
 - ・ アルゴンヌ国立研究所がリーダー。2013 年開始。5 年間に 1 億 2000 万ドルの助成
 - 戦略材料研究所（CMI）
 - ・ エイムズ研究所がリーダー。2013 年開始
- 残りの 3 つはエネルギー伝送（スマートグリッド）、太陽光発電、CCS に関するもの。

- 「エネルギー高等研究計画局」 ARPA-E

2009年に国防高等研究局（DARPA）を手本として設立。ハイリスク・ハイペイオフ型のエネルギー研究を支援し、変革的な技術の研究開発を狙いとしている。応用研究のみであり、基礎研究は含まない。研究開発における「死の谷」を克服するためにポートフォリオ的な考え方によるプログラムとなっており、目標設定を明確にした上でリスクのある革新的なプロジェクトを複数選択し、助成することで、個別プロジェクトの失敗は許容しつつ、プログラム全体として成功を狙う仕組みとなっている。2015年度予算は2億8000万ドル。助成期間：最長3年、200～500万ドル/プロジェクト（最大2000万ドル）。投資効果についてのレビューあり（会社設立、民間資金導入実績など）。また2017年度予算として継続的ファンディング資金（2021年まで1兆ドル超）を申請中。

これまで（2014.10時点）の資金配分比率は、エネルギー貯蔵30%、バイオ17.4%、エネルギー伝送11.1%、化石10.3%（個別プログラムについては付録1参照）。

- その他

DOEは科学局、ARPA-E以外にもプログラム部局としてエネルギー効率・再生可能エネルギー局（EERE）、化石エネルギー局（FER&D）、電気伝送・エネルギー信頼性局（OE）、原子力エネルギー局（NE）などがあり、それぞれファンディングを行っている。主なものとしては、持続可能な輸送技術（車両技術（Co-Optima、SuperTruckIIなど）、バイオエネルギー技術、水素・燃料電池技術）、再生可能発電技術（太陽光（Sunshotイニシアチブ）、風力、水力（HydroNEXTイニシアチブ）、地熱発電（FOGGE））、家庭・ビル・産業での効率向上（先進製造（NNMI関連）、ビルディング技術）、CCS技術（FEEDなど）、電力グリッド近代化、燃料サイクルなど幅広い分野にまたがる。

また商務省（DOC）のファンディングプログラムの例として、National Network for Manufacturing Innovation（NNMI）がある。これは米国において、先進製造業・未来の産業は、クリーンエネルギー、地球観測、気候変動などと並んだ優先事項であり、先進製造パートナーシップ（AMP）が創設されている。ものづくりへの回帰（製造業の復興）が雇用拡大の観点から強い方向性として打ち出されており、エネルギー関連では構造物材料やパワーデバイスなどが取り上げられている。

DOE以外ではNational Science Funding（NSF）におけるERC（Engineering Research Center）などの工学に関するファンディングもある。

6. 参考文献

- 1) BP Statistical Review of World Energy (June 2015)

<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>

- 2) EIA Annual Energy Outlook 2015 (April 2015)

<http://www.eia.doe.gov/sites/default/files/resources/annualenergyoutlook.pdf>

- 3) JPEC レポート(2014年12回)「米国における固定排出源への温室効果ガスの規制動向」

http://www.pecj.or.jp/japanese/minireport/pdf/H26_2014/2014-012.pdf

- 4) JPEC レポート（2012 年 21 回）「オバマ政権が新燃費基準を最終決定」
http://www.pecj.or.jp/japanese/minireport/pdf/H24_2012/2012-021.pdf
- 5) JPEC レポート（2013 年 36 回）「2014 年再生可能燃料基準義務量案に関する議論」
http://www.pecj.or.jp/japanese/minireport/pdf/H25_2013/2013-036.pdf
- 6) ABC ニュースサイト
<http://www.abc.net.au/news/2016-08-26/is-the-slide-in-us-shale-oil-and-gas-production-about-to-bottom/7789196>
- 7) CRDS 研究開発の俯瞰報告書 主要国の研究開発戦略(2015 年)
CRDS-FY2014-FR-01
- 8) NEDO 海外レポート NO.1107 2014.5.27 米国エネルギー省戦略計画
2014～2018 年(抜粋)
<http://www.nedo.go.jp/content/100559932.pdf>
- 9) 平成 23 年度作業技術調査事業 海外主要国における研究開発活動の動向に関する調査
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2012fy/E002537.pdf
- 10) G・TeC 報告書 先端研究基盤とグリーンイノベーション
CRDS-FY2011-CR-03
- 11) G・TeC 報告書 エネルギー分野の科学技術イノベーション
CRDS-FY2014-CR-03
- 12) (海外トピック情報) 米国：2017 年度米国大統領予算教書 科学技術予算の概要
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FU/US20160315.pdf>
- 13) G・TeC 報告書 持続可能なエネルギーの未来；米英独仏のエネルギービジョンと研究戦略
CRDS-FY2013-CR-01
- 14) JSPS ワシントン事務所、「2016 年度米大統領予算教書における研究開発関連予算案の概要」
http://jspsusa.org/wp/wp-content/uploads/2014/08/150310_The-Presidents-Budget-for-Fiscal-Year-2016.pdf
- 15) EPA Strategic Plan FY2014-2018
http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-09/documents/epa_strategic_plan_fy14-18.pdf

付録1：ARPA-E プログラム（プログラム期間を公表年から3年と想定）2016.7.19 時点

プログラム名	プログラム名(日本語)	件数	エネルギーに 対する目的	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
OPEN 2009	包括型提案公募	41	—											
OPEN 2012	包括型提案公募	67	—											
OPEN 2015	包括型提案公募	41	—											
ELECTROFUELS	微生物による燃料生成	13	バイオ											
PETRO	非食用作物による燃料生成	10	バイオ											
REMOTE	微生物によるガスからの燃料生成	15	バイオ											
TERRA	再生可能農業からの輸送用燃料資源	6	バイオ											
ROOT	炭素固定(排出低減)、生産性向上のための根と土壌の機能の計測技術、モデル		バイオ								未			
IMPACCT	炭素回収のための材料とプロセス	14	化石											
MOVE	天然ガス自動車	13	化石											
MONITOR	メタン検出検出用	8	化石											
ARID	ドライ冷却における先進的研究	14	(化石)											
ADEPT	最速で効率的な電力技術	14	伝送											
GENI	再生可能エネルギーを統合した伝送網	15	伝送											
NODES	分散型を含むグリッドの最適制御技術	12	伝送											
GRID DATA	送配電アルゴリズムの開発	7	伝送											
BEEST	輸送機械の蓄電池	10	貯蔵(車)											
GRIDS	伝送用エネルギー貯蔵	12	貯蔵											
HEATS	高エネルギーな熱貯蔵	15	貯蔵(熱)											
AMPED	エネルギー貯蔵の高度管理	14	貯蔵											
RANGE	輸送機械の蓄電システム	22	貯蔵(車)											
REBELS	電気化学システムに基づく電力	13	変換・貯蔵											
IONICS	次世代蓄電池、燃料電池、他電気化学デバイス		変換・貯蔵								未			
Solar ADEPT	太陽光発電の効率を高めるシステム	7	太陽											
FOCUS	太陽光の最適な活用方法	13	太陽											
MOSAIC	マイクロ集光型太陽光発電	11	太陽											
BREETIT	建物のエネルギー効率を高める熱機器	17	効率											
DELTA	局所制熱システム	11	効率											
TRANSNET	運転者への車内の制御アーキテクチャー	5	効率(車)											
GENSETS	家庭用CHP開発	12	効率											
SHIELD	窓ガラス	14	効率											
NEXTCAR	コネクテッド&自動化車両		効率								未			
REFUEL	カーボンニュートラルな液体燃料										未			
ENLITENED	データセンターのエネルギー効率(2倍に向上)		効率											
REACT	希土類元素の代替方法	14	戦略材料											
METALS	軽金属の先進製造	18	戦略材料											
SWITCHES	広帯域トランジスタ	14	戦略材料											
ALPHA	低コストのプラズマ加熱と部品	9												
IDEAS	エネルギー関連技術における革新的 アイデア(アイデア出し)													

■ 現在募集中の新しいプログラムとしては以下の5つ。

- ・ ROOT：炭素固定（排出低減）、生産性向上のための根と土壌の機能の計測技術、モデル
- ・ IONICS：次世代蓄電池、燃料電池、他電気化学デバイス
- ・ NEXTCAR：コネクテッド&自動化車両
- ・ REFUEL：カーボンニュートラルな液体燃料
- ・ ENLITENED：データセンターのエネルギー効率（2倍に向上）

付録2：優先すべき基礎的エネルギー研究領域（2009年のEFRC選定時は⑩まで）

- ① 水素社会：Hydrogen Economy 2003.5
- ② 太陽エネルギー利用：Solar Energy Utilization 2005.4
- ③ 超電導体：Superconductivity 2006.5
- ④ 固体発光素子：Solid-State Lighting 2006.5
- ⑤ 先進核エネルギーシステム：Advanced Nuclear Energy Systems 2006.7
- ⑥ 21世紀の輸送燃料におけるクリーン高効率燃焼：Clean and Efficient Combustion of 21st Century Transportation Fuels 2006.10
- ⑦ ジオサイエンス（21世紀エネルギーシステムの促進）：Geosciences Facilitating 21st Century Energy Systems 2007.2

- ⑧ 電気エネルギー貯蔵：Electrical Energy Storage 2007.4
- ⑨ 極限下における材料：Materials under Extreme Environments 2007.6
- ⑩ エネルギーのための触媒：CatalysisforEnergy 2007.8
- ⑪ 安全で持続可能なエネルギーの将来のための新しい科学 2008.12
- ⑫ 2020 年超の炭素回収 2010.3
- ⑬ エネルギー技術のための科学-基礎科学と産業とのリンクの強化- 2010.8

付録 3：「5 つの科学原理」

- ① 材料プロセスを電子レベルでいかに制御するか
- ② 必要な特性を発現する新規構造をいかに設計し、原子やエネルギー効率の面で最適な方法でいかに形成するか
- ③ 原子や電子などの構成因子の複雑な相互作用から生まれる優れた特性を見出し、これをいかに制御するか
- ④ 生物や植物が行っているようなナノスケールでのエネルギーや情報の操作を可能にする新技術をいかに創出するか
- ⑤ 関係する事象を、特に非平衡下において、いかに評価し、そして制御するか

（3）EU（欧州連合）¹⁾

1. エネルギーに関する概況（現状）

EU は、エネルギー効率の高い、低炭素経済社会への変革を目指し、2050 年に向かって段階的な温室ガス排出削減目的を設定している。2014 年 10 月 23 日、欧州理事会は、4 つの目標値を含む「気候およびエネルギー政策枠組み²⁾」を採択し、2030 年までの、1990 年比の排出削減目標を 40%に設定した。この新政策枠組みでは、2030 年までに、エネルギーミックスにおける再生可能エネルギーの割合を 27%、またエネルギー削減を 27%増加することを目標としている。加えて、域内エネルギー市場を改善するため、加盟国間のエネルギーの相互接続の割合の 15%増大も目指している。

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）

EU には、加盟国自身が行える事業については EU では行わず、加盟国が実施する施策を補助するために様々な事業を行うという原則がある。科学技術・イノベーションの分野でもこの原則が貫かれ、欧州研究圏（European Research Area：ERA）の構築（2000 年～）やハイリスクな研究開発への投資といった部分に取り組みの焦点が当てられている。

EU の行政機関である欧州委員会の中で省庁と同格の役割を果たす総局のうち、研究・イノベーション総局（DGRTD）が科学技術・イノベーションを所管している。また企業・産業総局、環境総局、エネルギー総局など他の総局もそれぞれの担当分野における科学技術・イノベーションに関連した政策の形成を行っている。これらの各総局が作成した案を DGRTD が調整し、政策案としてまとめる。

3. エネルギーに関する基本政策

2010年3月に欧州委員会が発表した戦略「EUROPE2020³⁾」（欧州2020）は、今後の10年間のEUの経済・社会に関する目標を定めている。この戦略を具体的に進めるプログラムのひとつに「Horizon2020⁴⁾」がある。図2-30に、戦略・プログラムの階層構造を示す。まず、リスボン戦略（Lisbon Strategy）やEUROPE2020のような、経済・社会全体の戦略・目標が最上位の概念としてある。その中には科学技術・研究開発に関する戦略が含まれており、それらが第二階層の欧州研究圏（ERA）やイノベーション・ユニオン（Innovation Union）である。更にその下の階層に、Horizon2020などの、戦略を進めるための具体的なプログラム・機関が存在する。なお、競争力・イノベーションフレームワークプログラム（CIP）、欧州イノベーション技術機構（EIT）、起業・イノベーションプログラム（EIP）等は2014年以降Horizon2020に含まれている。

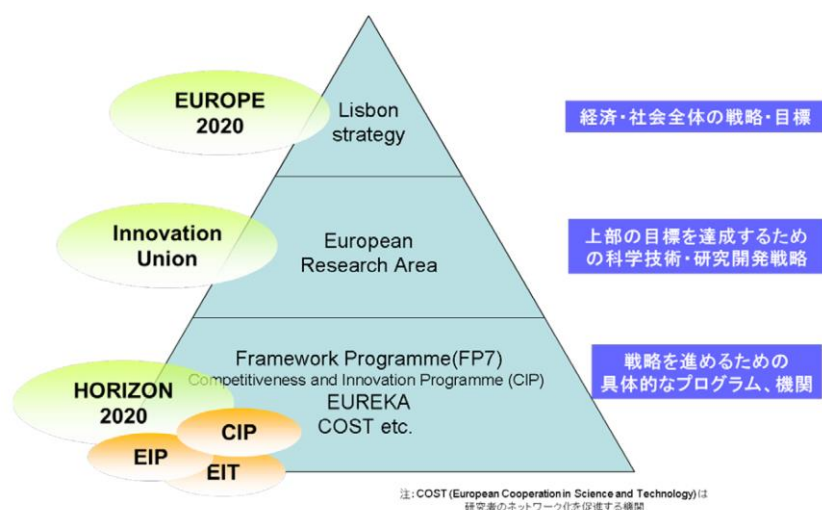


図 2-30 戦略・プログラムの階層構造

2007年3月、EU各国は京都議定書以降の国際的議論を主導する目的で2020年までを見通した中期的目標「エネルギー・気候変動政策パッケージ⁵⁾」で合意し、いわゆる3つの20「20-20-20」の目標が掲げられた。

- GHG 排出削減を2020年に1990年比で 20%削減（条件が揃えば30%に引き上げ）。
- 最終エネルギー消費に占める再生可能エネルギーの割合を 20%に引き上げ。
- エネルギー効率を 20%引き上げ。

欧州委員会は2010年11月、2020年に向けた新たなエネルギー戦略「Energy 2020⁶⁾」を発表した。これは、その先の10年間のEUのエネルギー計画の端緒とし、2020年のエネルギー・気候変動の目標達成を軸に策定された。上記目標「20-20-20」がエネルギー分野の大目標に据えられているが、従来の政策だけでは目標の達成は不可能と考え、目標を確実に達成するため、「Energy 2020」においては政策実施の現状を確認した上で、2020年までのエネルギー政策の5つの優先課題①エネルギー効率化の促進、②欧州のエネルギー統合市場の形成、③ユーザー重視のエネルギー供給、④エネルギー技術革新、⑤EU近隣地域とのエネルギー連携強化、を掲げた。

欧州委員会は 2011 年 3 月、EU が 2050 年までに低炭素経済に移行する道筋を描いた「Roadmap 2050⁷⁾」を発表した。50 年までに温室効果ガス（GHG）を 1990 年の水準から 80～95%削減するという目標に沿って、50 年に 80%削減するためのシナリオを提示した。公共部門、民生・業務部門、電力分野、産業部門毎の削減シナリオを提示した。

欧州委員会は 2011 年 11 月、エネルギー部門全体をカバーする「Energy Roadmap 2050⁸⁾」を発表した。これは福島原発の事故を受けて、エネルギー供給と競争力に支障を与えずに、いかに上記 Roadmap2050 の目標達成を加速するか of 課題への次のシナリオを提示している。①高エネルギー効率化、②供給技術の多様化、③再生可能エネルギー割合のさらなる促進、④炭素回収・貯留の遅延、⑤原子力発電の新規建設困難。

欧州理事会は 2012 年 10 月、事業者、公的機関、消費者に向けてエネルギー効率向上（省エネ推進）の対策として「エネルギー効率に関する指令」を採択した。これは、事業者や公的機関、消費者など各主体に向けての対策である。

欧州理事会は 2014 年 10 月、「2030 気候およびエネルギー政策枠組み²⁾」を採択した。これは、2030 年までに、エネルギーミックスにおける再生可能エネルギーの割合を 27%、またエネルギー削減を 27%増加すること、域内エネルギー市場を改善するために、加盟国間のエネルギーの相互接続の割合を 15%増大させることを目指している。

4. エネルギー研究開発戦略

エネルギー分野における基本的なフレームワークは、欧州委員会が 2007 年 11 月に発表した欧州戦略的エネルギー技術計画（Strategic Energy Technologies [SET] plan）⁹⁾ である。この計画は、今後 10 年間の EU のエネルギーおよび気候政策を推進するために必要な技術戦略の柱を規定している。また同時に、エネルギー研究、実証、イノベーションに関する長期的なアジェンダも設定している。研究面では、再生可能エネルギー（バイオ、太陽光、風力、水力地熱）、化石エネルギー（二酸化炭素の回収・貯留、精炭）、送電網、エネルギー効率、燃料電池・水素電池等にフォーカスが当てられている。

欧州理事会は、2015 年 9 月、新 SET プラン（Integrated Strategic Energy Technology [SET] plan）¹⁰⁾を採択した。従来の SET プランの下で、再生可能エネルギー導入やエネルギー効率向上が進んだが、新 SET プランでは更にこれを加速することを目指している。焦点分野は、再生可能エネルギー、消費者向けスマートエネルギーシステム、エネルギー効率向上、持続可能な輸送技術、そして特に CCS と原子力の安全強化である。焦点分野から更に細かく次の 10 の優先アクションを規定しており、実証プロジェクト向け技術開発を支援する InnovFin Energy Demonstration Projects（EDP）が 2015 年 6 月から開始された。

- ① 高効率再生可能エネルギー技術を開発し EU のエネルギーシステムに導入
- ② 再生可能エネルギー技術（風力、海洋エネルギー、太陽光、太陽熱、藻類などのバイオマス燃料）のコスト削減
- ③ 消費者向けスマートハウス技術とサービス
- ④ エネルギーシステムの回復力、安全性、スマートさの向上
- ⑤ ゼロエネルギービルディング技術
- ⑥ エネルギー集約的な産業を低減し、競争力を高める

- ⑦ 電気自動車向けのバッテリーの競争力強化
- ⑧ 持続可能な交通手段（燃料電池自動車）に必要なバイオ燃料や再生可能エネルギー由来の水素の商業化強化
- ⑨ CCSの研究強化
- ⑩ 原子力反応炉の高安全性維持

5. 代表的な研究開発プログラム

EUのファンディング・システムとしては、上述の「Horizon 2020」が代表的である。これは、複数年（現在は7年）の研究開発・イノベーションプログラムの方向性を示し、それに基づいて資金配分を行うものである。このサブセットとして複数のプログラムが存在し、プログラムごとにファンディングが行われる。予算総額は770億€で、3本柱（卓越した科学、産業界のリーダーシップ確保、社会的課題への取り組み）で構成される。¹¹⁾ エネルギー分野の取組みは、主に「社会的課題への取り組み」に属し、予算額は59億€（7年間分）である。①安全かつクリーンで、効率的なエネルギー、②スマート、環境配慮型かつ統合された輸送、という社会的課題において、研究が進められる。①では、ゼロ・エミッションに近い建物、低価格かつ低環境影響の電力供給、分散された再生可能エネルギー源をつなぐ欧州レベルでの送電網といったテーマが②では、都市部での輸送・交通手段の改善する研究等が挙げられている。7年間で、①項には59億ユーロ、②項には63億ユーロが配分される。

Horizon2020のエネルギーの細目に関する2014年から2017年の各年予算^{12),13)}を次に示す。

単位：100万ユーロ	2014年	2015年	2016年	2017年
エネルギー効率向上	92.50	100.71	93.00	101.00
低炭素エネルギー	359.31	383.57	349.86	367.62
スマートシティ	73.82	85.68	--	--
中小企業の省エネ	33.95	34.76	--	--

エネルギー効率向上 *1：ビル、消費者自身、加熱・冷却、産業の原単位、省エネサービス

低炭素エネルギー *2：再生可能エネルギー、電力網の近代化、電力貯蔵、運輸向けバイオ燃料、CCS、欧州研究拠点支援、社会・環境・経済面からのエネルギーシステム

スマートシティ *3：市場需要強化によるスマートシティ／コミュニティの展開強化

中小企業の省エネ *4：中小企業向け革新的エネルギー利用

Horizon2020のエネルギー部門で2015年以降に採択された研究プロジェクトは426件（2016年3月14日現在）あり、その内、5年間の研究プロジェクトは18件ある。その内訳とプロジェクト額及びEU支援額を示す。（金額は5年間分）

単位：100万ユーロ	プロジェクト額	EU支援額
スマートシティ×7件	206.5	174.1
風力発電×3件	86.4	39.8
スマートグリッド×2件	60.0	26.0
太陽光発電	19.7	5.9
バイオエネルギー	22.9	7.5

再エネの水素変換	15.2	8.0
燃料電池	5.9	4.5
CCS	42.8	12.8
セメント産業の廃棄物低減	20.8	11.9
合計	480.2	290.6

5 年間研究プロジェクトは、概して大規模であり、構成メンバーも多数となる。一例として、プロジェクト額が最大の案件であるスマートシティ領域の「GrowSmarter」プロジェクトは、コーディネータがスウェーデン、参加は 12 カ国 36 団体で構成される。（ドイツ 8 団体、スウェーデン 8 団体、スペイン 11 団体、以降各国 1 団体～オーストリア、ルーマニア、マルタ、ポルトガル、アイルランド、ハンガリー、デンマーク、フランス、ベルギー）。

「産業リーダーシップ」においては、先進製造というキー技術区分において、エネルギー低減型の製造技術、エネルギー効率の高い建物、二酸化炭素の排出を抑える製造技術についての研究が優先事項に挙げられ、2016 年 12 月段階で 135 件のプロジェクトが採択されている。プロジェクト額がトップ 10 件は、再生可能資源からの高効率な製品分離プロセス、中小企業の研究支援、余剰電力による CO₂ からメタノール合成、バイオマス利用、固体処理プロセス、テキスタイルのビジネスモデル、希少金属の分離、低 CO₂ 発生型製鉄プロセス、ロボットと機械の調和再構成、モバイルの製造・廃棄・循環再利用を考えた設計手法、である。

なお、Horizon2020 は、原子力は研究対象としていない。原子力の研究開発は、Euratom プログラム¹⁴⁾があり、核分裂と核融合を研究する。その予算は 2016 年 0.59 億€、2017 年 0.67 億€の予定である。

その他、欧州イノベーション技術機構（EIT）、共同研究センター（JRC）、エクセレンスの普及と参加の拡大、社会とともにある・社会のための科学など、相対的に規模の小さい複数の取り組みがあり、その取り組みごとに公募が行われる。

以上のような取り組みに対する資金配分の形態は、以下の 3 つの類型に分けることができる。①欧州委員会による配分（欧州委員会による配分は、欧州委員会内の総局（DG）が公募を行うケースである）、②欧州委員会の執行機関による配分、③イニシアティブによる配分。

「イニシアティブ」とは、目的に応じてつくられた連携組織のことを指す。たとえば、技術ロードマップの作成を目的とした欧州技術プラットフォーム（European Technology Platform : ETP）¹⁵⁾や、技術開発を目的とした共同技術イニシアティブ（Joint Technology Initiative : JTI）¹⁶⁾、研究の推進を目的とした共同プログラミングイニシアティブ（Joint Programming Initiative : JPI）¹⁷⁾といったイニシアティブがある。そのすべてがファンディング機能を持つわけではないが、複数のイニシアティブがファンディング機能を持ち、研究プロジェクトに対して資金配分を行っている。JTI について以下に記述する。

JTI は、FP7¹⁸⁾ “Cooperation” の事業の一つで、大規模多国間参加型研究活動である。2007 年 12 月に開始され、現在までに 6 テーマが選定されている。JTI では選定さ

れた後にそれぞれ Joint Undertaking（共同事業体）を設置し、事業を実施している。JTI は、欧州技術プラットフォーム（ETP）の戦略研究アジェンダ（Strategic Research Agenda：SRA）を実行するための効果的な手段である。そして、小規模なファンディングの機能を有するため、Horizon 2020 より「小さなフレームワークプログラム」とも呼ばれる。

JTI では欧州委員会（加盟国政府が参加の場合その国も）は毎年、研究開発費と事務局経費を拠出し、産業界は研究プロジェクトの資金の 50%以上を拠出、スタッフ・施設・機材提供等を行う。総額は 30 億€超。JTI の 6 テーマの内、エネルギー関連は、次の 1 件である。

「Fuel Cells and Hydrogen (FCH)」：水素供給と燃料電池技術の研究開発。2008-2017 間で予算総額 9.4 億€で、これを EC と産業界が 50%ずつ資金負担。

注 1) FP7 は、第 7 次研究開発フレームワークの略称で、2007 年から 2013 年かけて実施された。研究対象の柱は、Capacities（研究インフラの能力向上）、Cooperation（共同研究：健康、食糧・農業・バイオ、ICT、ナノテク、エネルギー（注 2）、環境・気候変動、運輸、安全、宇宙）、Idea（基礎研究）、People（人材育成）である。これらの研究レベルは基盤研究フェーズであるので、欧州委員会からの支援が厚い。この 4 つの柱の他に、Coordination（研究活動調整）があり、JTI はここに含まれる。JTI は当初、FP7 の枠内でスタートしたが、研究レベルが商業化を目指す段階であるので、FP7 から独立して活動を行うようになり、Horizon 2020 の活動から JTI は独立している。JPI は、医療、農業、都市環境、気候変動、文化遺産保護を対象としており、エネルギー分野は対象外である。

注 2) FP7 の「エネルギー」のテーマ数は、次の 9 項目。全 373 プロジェクトが登録されており、その合計予算は、23.5 億€。①Fuel cells and Hydrogen、②再生可能エネルギーによる発電、③バイオマス燃料製造、④再生可能エネルギーによる加熱冷却、⑤CCS、⑥クリーンコール技術、⑦スマートエネルギーネットワーク、⑧省エネ、⑨エネルギー政策策定の知識。なお、上記項目①は、JTI の方式で進められている。例として、下記のようなプロジェクトが推進されている。①CoMETHy 低温水蒸気改質（550 度以下）水素膜併用、②NEMESIS2+ ディーゼル燃料の水蒸気改質、③Hy2seps2 PSA と水素膜を用いた低圧水素精製、④HYTIME 廃棄バイオマスからの水素製造、⑤HYTEC 市域における水素輸送

6. 参考文献

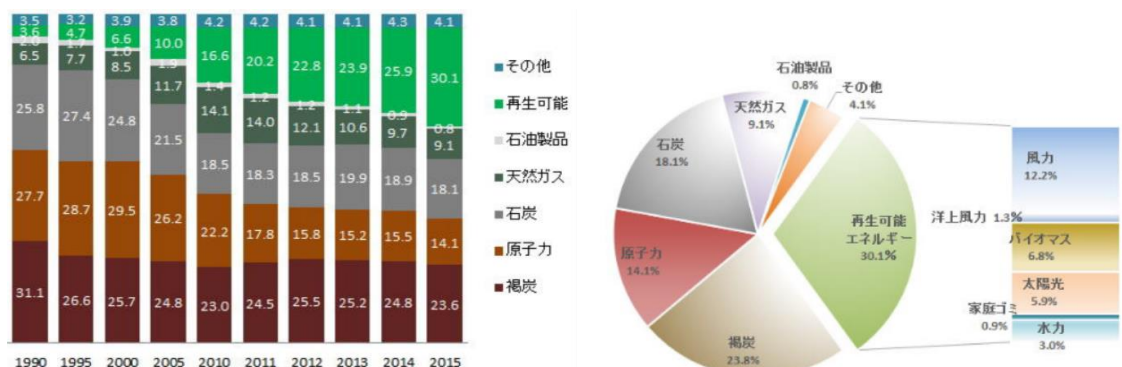
- 1) 駐日欧州連合代表部ホームページ：<http://www.euinjapan.jp/world/environment/>
- 2) https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- 3) https://web.archive.org/web/20100401082914/http://ec.europa.eu/commission_2010-2014/president/news/documents/pdf/20100303_1_en.pdf
- 4) <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/FU/EU20140221.pdf>（Horizon 2020 の概要）
- 5) https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en

- 6) https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2011_energy2020_en_0.pdf
- 7) https://www.env.go.jp/council/06earth/y0613-15/mat03_1.pdf
- 8) https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf
- 9) https://www.wto.org/english/tratop_e/envir_e/wksp_envir_nov12_e/2martinhuemer_eu_e.pdf
- 10) <https://ec.europa.eu/energy/en/news/integrated-set-plan-fit-new-challenges>
- 11) http://ec.europa.eu/research/horizon2020/pdf/press/fact_sheet_on_horizon2020_budget.pdf
- 12) http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/main/h2020-wp1415-energy_en.pdf（Horizon2020 work programme 2014-2015 予算）
- 13) http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2016_2017/main/h2020-wp1617-energy_en.pdf（Horizon2020 work programme 2016-2017 予算）
- 14) http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2016_2017/euretom/h2020-wp1617-euretom_en.pdf（Euratom 資料）
- 15) http://ec.europa.eu/research/innovation-union/index_en.cfm?pg=etp（ETP 資料）
- 16) <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/97811091EN6.pdf>（JTI 資料）
- 17) <https://ec.europa.eu/research/bioeconomy/index.cfm?pg=policy&lib=jpi>（JPI 資料）
- 18) <https://cordis.europa.eu/fp7/>（Framework Programme 7 資料）

（４）ドイツ

1. エネルギーに関する概況（現状）

ドイツの 2014 年 1 次エネルギー消費は、合計 13,077 ペタジュール（石炭 22.6%，石油 35.0%，天然ガス 20.5%，原子力 8.1%，再生可能エネルギー他 12.8%）、エネルギー自給率は約 43%となっている。2015 年発電量は 6,518 億 kWh（褐炭含む石炭 41.7%，石油 0.8%，天然ガス 9.1%，原子力 14.1%，再生可能エネルギー他 34.2%）となっている。再生可能エネルギーの電力は、風力 13.5%，バイオマス 6.8%，水力 3.0%，太陽光 5.9%である¹⁾。



総発電量のエネルギー源別割合推移（単位：％） 2015 年発電量のエネルギー源別割合（単位：％）
（出所：ドレスデン情報ファイル¹⁾）

図 2-31 デイツの総発電量のエネルギー源別割合推移

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）

ドイツの基本政策の主要所管省は連邦教育研究省（BMBF、連邦政府の研究開発関連投資の約 60%を管理）であり、宇宙とエネルギーについては連邦経済エネルギー省（BMWi）が所掌し、外部機関からの助言・強力を得ながら各種戦略を作成している（参考、図 2-32）。科学・イノベーション政策は、2013 年末発足した第三期メルケル内閣の省庁再編により、連邦経済エネルギー省（BMWi）がエネルギー政策全般を所管し、連邦政府の支出する研究開発投資の 20%を管理している。

ドイツの政府支出による研究開発投資は、2008 年などリーマンショックの時期を通じて着実に増加している。特に連邦政府の支出は 2006 年ごろから大幅な伸びを示している。ドイツは、個別具体的な政策を増強、もしくは新たに開始し、経済的な困難の中でも科学技術・イノベーションに力を注いでいる。

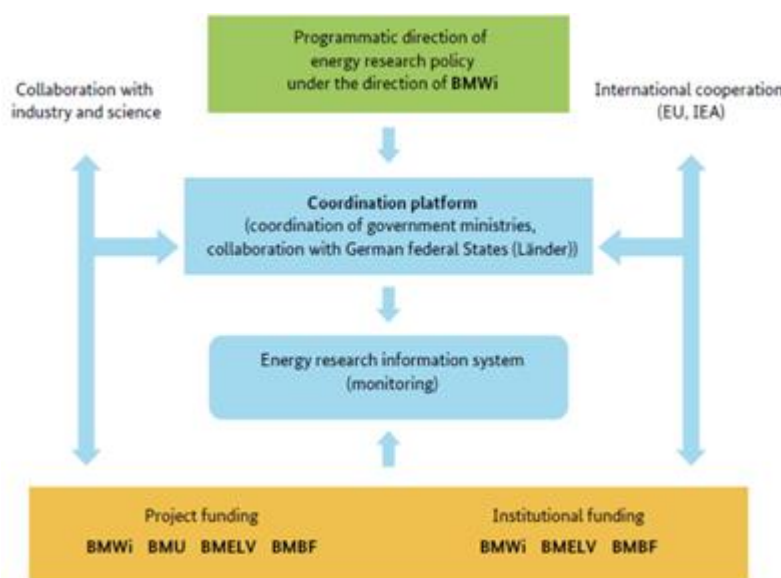


図 2-32 連邦政府のファンディング³⁾

エネルギーに関する各省の所掌区分は次のようになっている。

連邦経済エネルギー省：エネルギー効率、エネルギー貯蔵、送配電、炭素回収&貯蔵、燃料電池など

- 省エネ及び高効率化
- 原子力安全と貯蔵
- 連邦環境自然保護原子力安全省：風力、太陽（光、熱）、地熱、水力、海洋などの再生可能エネルギー
- 深部地熱：システム構成と探索技術、地下データ、地震挙動と処理の課題
- 低温太陽熱発電：集熱技術、ビルにおけるシステム技術、ソーラ冷房およびソーラプロセス熱、熱貯蔵
- 太陽熱発電プラント：トラフ型、フレネル型、タワー型システム、貯蔵モジュール
- 水力および海洋エネルギー

- 再生可能エネルギーと新規エネルギーシステムの融合：再生可能エネルギーCHPプラント、スマートグリッドー負荷管理、グリッド技術、貯蔵技術、システムサービス、電力需給予測
- 横断的研究：再生可能エネルギー普及拡大条件

連邦食糧農業消費者保護省：バイオエネルギー

- バイオエネルギー：適切なバイオマス生産、固体バイオマス資源、気体バイオマス資源（バイオガス）
- 連邦教育研究省：エネルギー分野の基礎研究
- 新規研究計画および行動要求
- エネルギー効率向上の基礎研究：気候条件を改善に向けたカーボンニュートラル、高効率都市、気候保全（カーボンマネージメントへのスマートアプローチ）、横断領域
- 再生可能エネルギーに関する基礎研究：グリッド開発の新技术と対策、再生可能エネルギーの貯蔵システム、太陽エネルギーからの PV 電気、電力生産のための生物資源利用、風力の未開発ポテンシャル利用、太陽熱技術、光合成、水力発電
- システム解析による知見
- エネルギー研究と社会
- 原子力安全性、廃棄物処理、放射線研究
- 核融合研究

3. エネルギーに関する基本政策

2010年9月に、連邦経済エネルギー省と連邦環境自然保護原子力安全省が共同で「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想（Energy Concept for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Energy Supply）」^{4) 5)}を取りまとめている。再生可能エネルギーの導入促進と共に省エネルギーによる GHG 排出量の低減を目指している。

表 2-2 環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想^{4) 5)}

	2020年	2030年	2040年	2050年
GHG排出量	1990年比▲40%	同▲55%	同▲70%	同▲80～95%
一次エネルギー供給量	2008年比▲20%	—	—	同▲50%
建築物消費熱量	2008年比▲20%	—	—	同▲80%
電力消費量	2008年比▲10%	—	—	同▲25%
再生可能エネルギー※1	18%（35%※2）	30%（50%※2）	45%（65%※2）	60%（80%※2）
輸送部門エネルギー消費	2005年比▲20%			同▲40%

※1 最終エネルギー消費に占める再生可能エネルギー（水力を含む）の割合

※2 電力消費に占める再生可能エネルギーの割合（括弧内数値）

2011年の福島原発事故を受けて、新しいエネルギー政策の実施課題のパッケージを2011年6月、7月に決定し、2022年までに徐々に原子力廃止、エネルギー効率向上、

再生可能エネルギーへのシフトを加速するエネルギー政策を打ち出している。

4. エネルギー分野の研究開発戦略

○ ハイテク戦略、ハイテク戦略 2020、新ハイテク戦略^{2),6),7)}

2006年8月に科学技術イノベーション基本政策である「ハイテク戦略」を連邦政府が発表。ファンディングから研究開発システムに至るまで、省庁の枠組みを超えた施策やイニシアティブが実施されている。2006～2013年で合計120億ユーロの追加的な資金も配分されている（分野横断研究領域への投資：119.4、研究機関と産業連携の強化：6.0、中小企業の環境改善：18.4、技術ベンチャーの起業支援：2.2億ユーロ）。2010年にハイテク戦略の改定版「ハイテク戦略 2020」を発表。2010年～2015年の期間で5つの重点分野として10の未来プロジェクトが政策として示されている（参考、表 2-3）。

2014年9月に第三期ハイテク戦略となる「新ハイテク戦略」で2015年以降の基本方針を示した。「ハイテク戦略 2020」の未来プロジェクトは「新ハイテク戦略」でも実施継続が決まっている（参考、表 2-3）。BMWは2014年に「10のエネルギーアジェンダ」を発表（新ハイテク戦略に含む、参考、表 2-4）。2022年までに原子力発電から完全撤退することを決めたドイツは、一極集中型の化石・原子力発電所から分散型の再生可能エネルギーへの転換を目指して、再生可能エネルギー転換策（Energiewende）を採る。エネルギーアジェンダは、同転換策を実現するための第一歩として位置付けられている。

表 2-3 「ハイテク戦略 2020」5つの重点分野と10未来プロジェクトと「新ハイテク戦略」

重点分野 ^{※1}	未来プロジェクト
気候・エネルギー （持続可能なエネルギーの生産、消費）	カーボンニュートラル、エネルギー高効率、気候に適応した都市（5.6億ユーロ）
	エネルギー供給のスマートな構造改革（37.0億ユーロ）
	石油に替わる再生可能な資源（5.7億ユーロ）
健康・栄養 （健康に生きるために）	個別医療による治療手段（3.7億ユーロ）
	適切な予防と食生活による健康増進（9.0億ユーロ）
	自立した高齢者の生活（3.1億ユーロ）
輸送（スマートな交通、輸送）	持続性のある輸送・移動（22.0億ユーロ）
安全（安全の確保）	通信ネットワークの安全な運用（6.0億ユーロ）
通信（デジタル化への対応）	インターネットベースのサービス（3.0億ユーロ）
	製造業デジタル化「インダストリー4.0」（2.0億ユーロ）
（イノベーションを生み出す労働）	新ハイテク戦略で追加

※1：（ ）は、「新ハイテク戦略」6つのイノベーションの高い優先課題を示す。

表 2-4 新ハイテク戦略のプログラム（2014 年 9 月時点）

優先課題	プログラム
I. デジタル化への対応 「デジタルアジェンダ2010～2017」	・ Industrie4.0 スマートファクトリ研究 ・ ITインフラ整備によるスマートサービス ・ 中小企業のビックデータ利用推進 ・ 安全性の高いクラウドコンピューティング ・ デジタルネットワーク ・ デジタル化で変わるサイエンス ・ デジタル化で変わる教育 ・ デジタル化で変わる生活
II. 持続可能なエネルギーの生産、消費 「10のエネルギーアジェンダ」	・ エネルギー研究（「第6次エネルギー研究プログラム」） - エネルギーストレージ（「助成イニシアティブ エネルギーストレージ」） - 送電ネットワーク（「助成イニシアティブ 未来の電力網」） - 高効率エネルギーを利用したスマートシティ（新プログラム採択予定） ・ グリーンエコノミー ・ バイオエコノミー（「バイオエコノミー2030」） ・ 持続可能な農業生産 ・ 資源の確保 ・ 都市のエネルギー消費効率化 ・ エネルギー高効率な建築 ・ 持続可能な消費（「持続可能な開発研究FONA」）
III. イノベーションを生み出す労働 「未来の生産、サービス、労働のイノベーション」	・ デジタル社会における労働 ・ 未来の市場における革新的なサービス産業 ・ デジタル化社会を踏まえた人材育成
IV. 健康に生きるために 「健康研究」、「高齢化社会の未来」	・ がん、成人病など主要な疾病研究－6つの研究センター強化 ・ 個別化医療 ・ 予防と栄養 ・ 介護分野のイノベーション ・ 材料、創薬研究 ・ 医療技術分野のイノベーション
V. スマートな交通、輸送 「エレクトロモビリティ」	・ 運転自動化、ITSなどスマートな交通インフラ ・ カーシェア、e-Ticketなど革新的な輸送コンセプトとネットワーク構築 ・ 電気、燃料自動車研究、ビジネスモデル構築 ・ 車両、鉄道、地上輸送に係る新技術 ・ 航空 ・ 船舶
VI. 安全の確保: 新政策 「デジタル社会の自己決定（仮題）」	・ 自然災害、大規模事故などから市民を守る ・ サイバーセキュリティ（「ドイツのサイバーセキュリティ」） ・ ITセキュリティ ・ 個人情報の保護

また、連邦教育研究省が所掌するエネルギー分野の基礎研究が計画されており、「エネルギー効率の向上」と「再生可能エネルギーの拡大」の基礎戦略のポイントは以下の通りとなる。

① エネルギー効率向上

- 建物：「暖房、換気、空調、給湯、情報通信システムのエネルギー効率向上につながる材料、部品、技術の研究」
- 運輸：「電気自動車、蓄電池、燃料電池、駆動系、車両設計、モーダルシフト（輸送システム全体のエネルギー効率最適化）の研究」
- 産業：「製造のエネルギー効率向上につながる材料やプロセスの研究」（例えば、産業用の電気モータ、軽量化の製品設計など）。製造用資源の削減も含め、「生産効率を最適化するための製造技術、プロセス工学、機械工学、システム技術、化学プロセス用触媒の研究」など。

主要研究課題

- 建物：遮蔽材料（熱、光など）、透光性材料（建物の壁、窓などで使用する太陽電池基材の薄層化及び強靱化）、自己給電型マイクロシステムの統合技術
 - 風力：タービン材料、洋上風力を制御する情報通信技術
 - 太陽電池：相界面での光捕集効率を高めるナノテクノロジー
 - 送電網：スマートグリッドの情報通信技術
 - 熱的貯蔵：蓄熱材料、蓄熱技術、伝熱媒体
 - 化学的貯蔵：貯蔵材料、水分解プロセス
- ② 再生可能エネルギーの拡大
- 風力エネルギー：材料、遠隔点検、遠隔補修や空中風力発電、等
 - バイオマス：エネルギー転換プロセスのモデリング及び最適化
 - 太陽光エネルギー：エネルギー効率、操作寿命、コスト低減及び最適化
 - 太陽熱：エネルギー効率、コスト低減
 - 光合成：水分解の基本プロセス、光合成に関わるタンパク質等
 - 水力エネルギー：低回転ローターを用いた水流のエネルギー転換、鉱山跡地などを利用した地中での揚水発電等
 - 送電網：伝送損失の低減、電力変動や伝送障害への迅速対応、情報通信技術を活用した電力需要管理の最適化等
 - エネルギー貯蔵：熱的貯蔵、電気化学的貯蔵、力学的貯蔵、化学的貯蔵等

5. 代表的な研究開発プログラム

（1）第6次連邦政府エネルギー研究プログラム、環境適合省庁横断型のプログラム性及び信頼性を備えたエネルギー供給のための研究^{5),8)}

ドイツが掲げたビジョン「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」に基づき、2011年8月に Research for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Energy Supply、6th Energy Research Programme of the Federal Government を採択し、研究開発投資の主要課題や優先事項を提示した。連邦経済エネルギー省、連邦環境自然保護原子力安全省、連邦食糧農業消費者保護省、及び連邦教育研究省による4省共同の支援枠で、2011～2014年度の4年間で約35億ユーロの研究資金を投じた（参考、表2-5）。

重点研究開発領域として、エネルギー効率、再生可能エネルギー、送電網、エネルギー貯蔵を選定した。

今後、エネルギー分野研究開発投資は、再生可能エネルギーとエネルギー効率向上分野を伸長させ、太陽光発電、風力発電（特に洋上）、バイオエネルギー、地熱、燃料電池・水素の研究開発を推進、継続する見込み。再生可能エネルギー発電の不安定性への対策として以下のような研究開発も進める予定。①需要サイドのマネジメント、②高圧送電、③負荷変動対応での火力発電利用、④エネルギー貯蔵や交通の低炭素化。

ドイツ国内に豊富に存在する褐炭を含む石炭利用火力発電については、国内の石炭関連雇用などへの影響もあり、二酸化炭素回収・貯留（CCS）との組み合わせで、将来的には、ある一定比率を維持したい意向。ガス火力発電、石炭火力発電双方とも、再生可

能エネルギーへの負荷応答性を向上させる研究開発を CCS も含めた研究開発とあわせて推進する。原子力については、稼働停止政策の一方、安全性向上や廃炉に関わる研究開発を着実に実施していく。国際熱核融合実験炉（ITER）に関する核融合炉開発への投資も継続する。原子力分野（安全性、廃炉関連）と核融合分野に、約 4 分の 1 を継続投資する。

表 2-5 第 6 次連邦政府エネルギー研究プログラム、環境適合性省庁横断型のプログラム及び信頼性を備えたエネルギー供給のための研究開発投資

区分	予算額（10 ³ 、ユーロ）					
	2010年度・実績	第6 次連邦政府エネルギー研究プログラム				
		2011年度	2012年度	2013年度	2014年度	合計
エネルギー効率	210,256	246,135	242,933	332,987	346,099	1,168,154
再生可能エネルギー	205,142	265,668	284,873	401,493	431,373	1,383,407
原子力安全・最終処分	71,543	73,021	73,916	74,930	75,558	297,425
核融合	131,031	148,148	152,655	154,611	153,599	609,013
合計	617,972	732,972	754,377	964,021	1,006,629	3,457,999

（2）省庁横断型のプログラム^{5),3)}

連邦経済エネルギー省、連邦環境・自然保護・建設・原子炉安全省及び連邦教育研究省の 3 省により、以下 3 つの研究イニシアティブが計画され、エネルギー貯蔵助成では、60 の研究プログラムに対し、約 2 億ユーロが助成された。

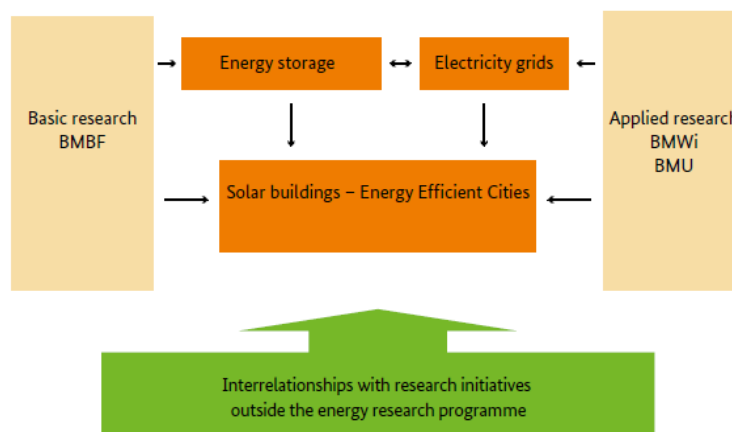


図 2-33 省庁間イニシアティブの関係³⁾

ーソーラー建物/高効率エネルギー都市（Solar-Powered Buildings- Energy Efficient Cities）：最終エネルギー消費の 4 割を占める建物に着目、太陽エネルギーの建物での活用などをもとに、エネルギー効率の高い都市への転換を図る。

ー持続可能な送電網（Sustainable Power Grids）：再生可能エネルギーの拡大、欧州の電力網統合などの今後の変化に適応可能な、新たな電力網を構築する。直流伝送や超電導などの要素技術のほか、伝送網のモデル化やシステム実証まで研究対象に加える。

ーエネルギー貯蔵システム（Energy Storage System）：2050 年までに電力に占める

再生可能エネルギーの割合を 80%に高めるため、必要なインフラとして、エネルギー貯蔵の拡充を図る。定置式貯蔵への適用を中心に、「熱的貯蔵」を短期、「化学的貯蔵（炭化水素や水素などの化学物質の形でエネルギー貯蔵）」と「電気化学的貯蔵」を長期の研究課題として位置付け。

（3）FONA、FORNE²⁾

BMBF は 2004 年に「持続的発展のための研究フレームワークプログラム（FONA）」を発表し温暖化対策のための様々な研究を実施。その後同省は 2010 年、FONA を更新する形で「持続的発展のための研究（FORNE）」と名づけた基本計画を立ち上げ、20 億ユーロを大幅に超える資金を 2015 年までに投入する方針を明らかにした。FORNE はエネルギー効率の改善、原料の生産性向上が中心となっており、新興国や途上国まで含めた国際連携の重要性もうたっている。

（4）エネルギー基礎研究 2020+²⁾

2008 年に BMBF が発表。基盤的な技術の研究開発を支援。エネルギー分野での研究助成は、エネルギー研究と他分野（材料科学、ナノ技術、レーザー、マイクロシステム、気候研究等）とのネットワーク化・融合研究に重点を置いている。

（5）2011 年に BMBF は研究基盤政策のパイロットフェーズと位置づけた、「ロードマップ」を発表。現在 27 のプロジェクトが進行中で、以下注目すべきものは次の通り。

- ① 先端クラスター・コンペティション：特定の地域の企業、研究機関、大学を束ね、世界的な競争力を持つ先端分野の製品実用化のための連邦政府による総額 6 億ユーロ規模のファンディング。ハイテク戦略の主要助成プログラムの一つ。エネルギー関連クラスターは以下の通り。
 - BioEconomy Cluster：非食物バイオマス研究
 - EffizienzCluster LogistikRuhr：環境にやさしい輸送技術
 - MicroTEC Südwest：高エネルギー効率マイクロシステム
 - Solarvalley Mitteldeutschland：太陽光発電
- ② イノベーション・アライアンス：ハイテク戦略の枠組の中で 2007 年から新しく実施された研究・イノベーションプログラム。産学の戦略的な連携モデルで、将来的に国家経済に大きな貢献しうる特定分野に助成を行った。
 - Lithium Ionen Batterie LIB 2015（2007）
 - Molekulare Bildgebung（2007）
 - Automobilelektronik（2007）
 - Carbon Nanotubes：Inno.CNT（2009）
 - Green Carbody Technologies（2009）
 - Photovoltaik（2010）

（6）リサーチキャンパス（2012/9 公募助成プログラムで 90 以上から 10 プロジェクト選定）

- シュトゥットガルト大学：ARENA2036（形質転換可能な自動車研究）
- ベルリン工科大学：Connected Technologies（スマート・ホーム）
- アーヘン工科大学：Digital Photonic Production（デジタル光学）、Elektrische Netzeder Zukunft（環境にやさしいエネルギー）
- ベルリン工科大学：EUREF-Forschungscampus"Mobility2Grid"（エレクトロモビリティ）
- ブラウンシュバイク工科大学：Open Hybrid LabFactory（車両素材の軽量化研究）

（7）Power-to-Gas プロジェクト

再生可能エネルギー政策で先行するドイツでは、2013 年の発電電力量における再生可能エネルギー比率が 25.4%まで上昇する一方、2009 年に 73.6GWh、2010 年に 126.8GWh、2011 年に 420.6GWh、2012 年 384.8GWh の「捨電」が報告されている。ドイツ北部エリアは再生可能エネルギー資源に恵まれているのに対して、需要は工業地帯のある南部エリアに集中しており、送電網が不足していることが大きな原因。

解決策の一つとして水素の蓄電能力に着目し、再生可能エネルギーによる余剰電力で水を電気分解して水素ガスを製造し利活用する“Power-to-Gas”プロジェクト（図 2-34）を推進しており、その概念は欧州全域に広がりつつある。

（8）コペルニクスプロジェクト

2016 年 4 月に、連邦教育研究省が、4 つの「エネルギー転換に関するコペルニクス・プロジェクト」を発表。プロジェクトは、マックスプランク研究所により発案され、①新ネットワーク構造、②余剰電力の貯蔵“Power-to-X”、③社会的受容も含めた産業化プロセス、④エネルギーシステム・インテグレーションの 4 つの領域からなる。①では、集中発電及び分散発電の電力コンビネーションにより電力変換にかかるコストを削減する研究などを、②では、余剰な再生可能エネルギーの 90%以上を化学的原料、ガス燃料、または燃料の形で貯蔵するプロセスの研究などを実施する。本プロジェクトにより、今後 10 年でアーヘン工科大などのアカデミア、シーメンス社などの産業界、市民が連携してエネルギーシステムの転換に必要な技術的、経済的解決策を生み出す。研究参加者の 1 割は社会学者となる。

再エネ導入拡大のための水素グリッド:ドイツの例

ドイツではいわゆるPower-to-Gasプロジェクトが多数進められている。

- 北部は風力発電の適所で、電力需要地は南部。しかし中部の電力網の容量が低く、北部の風力発電で発電した電力を南部に流せない。
- 解決策: 北部の風力由来電力で水素を製造し、**水素・メタン（メタネーション）**として貯蔵（Power-to-Gas）し、水素発電で再電力化、あるいは天然ガス網に混入している。

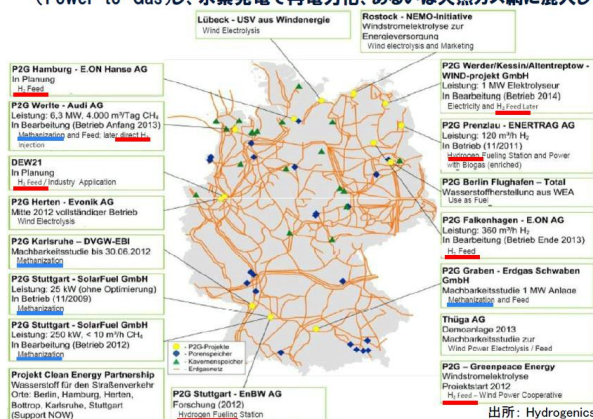


図 2-34 Power - to - Gas プロジェクトの概要

6. 参考文献

- 1) IEA HP. <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/>, ドレスデン情報ファイル. <http://www.de-info.net/kiso/atomdata01.html>
- 2) CRDS-FY2014-FR-01 研究開発の俯瞰報告書「主要国の研究開発戦略（2015 年）」、CRDS、2015 年 3 月
- 3) Research for an environmentally sound, Reliable and affordable energy supply, 6th Energy Research Programme of the Federal Government, Nov. 2011, Federal Ministry of Economics (BMWi)
- 4) Energy Concept for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Supply, 28.Sep.2010, Federal Ministry of Economics (BMWi) and Technology and Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMu)
- 5) CRDS-FY2013-CR-01 G-TeC 報告書「持続可能なエネルギーの未来；米英独仏のエネルギービジョンと研究戦略」、CRDS
- 6) CRDS-FY2014-OR-01 科学技術・イノベーション動向報告～ドイツ～、CRDS、2015 年 3 月
- 7) DE20140916 ドイツの科学技術ノベーション政策 新ハイテク戦略、CRDS、2014 年 9 月
- 8) 産業構造審議会 産業技術環境分科会 研究開発・評価小委員会（第 2 回）「資料 2 ドイツ等欧州の公的研究機関の特徴」、経産省、（2014 年 2 月）
- 9) エネルギー転換関連主要拠点 38 カ所、ドイツ連邦共和国大使館・総領事館 HP

（５）英国

1. エネルギーに関する概況（現状）¹⁾

英国は元々、化石資源に恵まれた国である。国内において石炭、および北海において石油や天然ガスが産出し、20世紀まではエネルギー自給を達成していた。しかし2000年代に入ると北海の油田・ガス田の産出量が年々減少し、2004年以降はエネルギーの純輸入国となっており、エネルギー自給率は56%（2014年）である。

一次エネルギーの供給においては、2004年を境に減少傾向である。一次エネルギー消費量は2014年において201Mtoe、供給構造の内訳は、ガス33%、石油36%、石炭16%、電力他15%である。また2014年の総発電電力の構成は、石炭30%、ガス30%、原子力19%、再エネ19%、石油、揚水等2.6%となっている。なお原子力発電所は15基が現在稼働中である。

電力価格については、国産ガス田の生産量減少などから高騰しており、欧州諸国の中でも電気料金はトップレベルで高い。

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）²⁾

エネルギー・気候変動省（DECC : Department of Energy and Climate Change）が、エネルギー供給や気候変動対策に関する業務を、また研究開発については、英国における科学・イノベーションの主要所管庁であるビジネス・イノベーション・技能省（BIS : Department for Business, Innovation and Skills）と連携し、推進政策を策定してきた。

2016年7月14日に、英国のEU離脱に伴う省庁再編として、BISがエネルギー気候変動省（DECC）と合併して、ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS : Department for Business, Energy and Industrial Strategy）になるとともに、高等教育が教育省（DfE : Department for Education）に移管されることが発表された。また、2008気候変動法に基づき設置された独立委員会である、気候変動委員会（Committee on Climate Change）が設置されており、2050年への最適な移行に向けて、政府に対し予算配分やセクター間の貢献レベルなどに関する専門家としての助言を行う。

英国の総研究開発費は、米国の1/10程度、日本の1/4程度であり、民間セクターの科学技術活動が比較的弱い。一方で、大学や政府出資による公的研究機関による基礎研究は強い。

3. エネルギーに関する基本政策^{3), 4), 5), 6)}

2006年10月に発表されたスターン・レビュー気候変動の経済学（The Economics of Climate Change）は、英国のみならず、日本を含んだ世界各国の環境・エネルギー政策へ大きく影響を与えた。スターン・レビューは、気候変動による経済的影響や温暖化対策の費用対便益に関する知見などを経済学的側面から評価を行った世界初の報告書である。

その後、地球温暖化ガス（GHGs）排出量の中長期的な目標として2008年に、GHGs排出量を2050年までに1990年比で80%以上削減することを気候変動法2008（2008 Climate Change Act）により定めた。達成のための行動目標として、2009年7月にDECCより低炭素移行計画（LCTP : The UK Low Carbon Transition Plan）が発表さ

れた。本計画は、2020年までに GHGs を 1990 年レベルから 34%削減する目標を掲げ、達成するための方法を示した包括的な文書である。

2010 年 7 月に DECC より、長期展望結果である 2050 年までの展望 (2050 Pathways Analysis) が公表された。2050 年までに GHG 排出量を 1990 年比で 80%以上削減する目標達成のシナリオとして、5 つの技術用件（火力発電所への CCS 設置、原子力発電所新設、再生可能エネルギー発電所増設、バイオ燃料、最終エネルギー消費削減）の影響を検討した 6 つの道筋 (pathway) を提示している。

2011 年 7 月に DECC より再生可能エネルギーロードマップ (UK Renewable Energy Roadmap) が発表された。本ロードマップにおいて、2020 年のエネルギー消費の 15% を再生可能エネルギーで賄う達成目標のために重要技術として、陸上・洋上風力、海洋エネルギー、バイオマス発電・熱利用、ヒートポンプ、輸送部門の再エネを挙げ、この中で、洋上風力発電の資源ポテンシャルが高いことが示された。

2011 年 12 月に DECC より発表された炭素計画：低炭素未来実現に向けて (The Carbon Plan: Delivering our low carbon future) では、エネルギー政策のフレームワークの中での低炭素化を実現するための技術シナリオを記載している。建物、輸送、産業、電気、農林・国土管理、廃棄物・資源効率の分野が挙げられている。

4. エネルギー研究開発戦略^{2), 7), 8), 9), 10)}

イギリスのエネルギー関連の研究開発はイノベーション戦略の一部として定められており、基本戦略として 2011 年 12 月に BIS より成長のためのイノベーション・研究戦略 (Innovation and Research Strategy for Growth) が発表されている。その中で、英国が強みを持つ分野への産業界の研究開発支援や、研究成果の商業化、産学連携の強化、国際協力重視、中小企業の研究開発支援などに重点が置かれている。

2013 年に BIS より発表された経済成長を後押しする今後投資すべき八大技術 (Eight Great Technologies) のうち、環境およびエネルギーに関連する項目として、エネルギー貯蔵が挙げられる（他の 7 つは、ビッグデータ、衛星、ロボティクス・自律システム、合成生物学、再生医療、農業科学、先端材料）。革新的なエネルギー貯蔵技術による社会全体へのインパクトとして、電力消費量の削減（5 分の 1）や風力発電の導入促進（電力の 10%）、さらには 120 億ポンドのビジネス収入に繋がることに期待されている。

その後、2014 年 12 月に英国の強みを持つ分野の産業界の研究開発支援に重点を置いた成長計画：科学とイノベーション (Our plan for growth: science and innovation) が BIS より発表された。この成長計画が現在の英国政府による科学イノベーション戦略の中核となっている。英国が科学とビジネスにおいて世界で最も適した国になるために、優先分野の設定や優れた人材育成、科学インフラへの大型投資など、6 つの柱を設定している。

主要な経済インフラ（交通、エネルギー、通信、洪水対策、水および廃棄物、科学）のうち、政府が計画し、優先分野としてファイナンスし、整備する重要なプロジェクトを定めた計画として 2016 年 3 月に発表した国家インフラ整備計画 (National Infrastructure Delivery Plan 2016-2021) がある。2021 年度それ以降に向け、総額 4830 億ポンド、600 以上のインフラ案件を網羅している。2016 年度予算発表のエネルギー関連

のインフラ案件では、エネルギー貯蔵、デマンドレスポンス、小型原子炉技術開発、洋上風力、シェール開発にかかる地域貢献基金設立などが挙げられている。

5. 代表的な研究開発プログラム 2), 7)-16)

◆ Innovate UK によるもの

主に産業界に対して助成を行う。イノベーションを通じて英国で成長が期待される分野として 15 優先分野が決定された。そのうち環境エネルギーに関連する分野（括弧内は 14 年度予算）としては、エネルギー（8,200 万ポンド）、輸送（7,000 万ポンド）、建物環境（1,300 万ポンド）、資源効率（1,300 万ポンド）などがある。

2016 年度の実行計画としては、最先端の英国企業支援に 5 億 6,100 万ポンドの投資を行い、4 つの分野別グループ（新興技術・実現技術、保健・ライフサイエンス、インフラシステム、製造技術・材料）を置くこととなった。

Innovate UK が助成するエネルギー関連の主な研究プログラムに以下がある。

➤ カタパルト・プログラム（The Catapult centres）

産学協同の研究開発センターであり、各セクターの主要企業や大学等の研究施設と近接した産業クラスターを形成し、世界をリードする科学技術・イノベーションの拠点構築を目指す。産学連携で最終製品に近い研究開発を行い、技術の商業化が期待されている。中小企業支援も念頭とした、最新鋭設備の提供、情報提供、人材育成の役割も果たす。英国が学術的かつ産業的に強みをもつ技術分野が選択される。管理・運営は Innovate UK。現在 11 分野のセンターが稼働している。産業界を中心に「カタパルト」ブランドが研究成果とイノベーションをつなぐ架け橋として知名度を確立しつつある。セクターの垣根を越えた挑戦がカタパルトの枠組みで行われている点の特徴である。政府と産業界双方により、最初の 5 年間で 10 億ポンド以上が投資される予定。

環境エネルギーに関連するカタパルトとプロジェクトは以下の通り。

- ・海上再生可能エネルギーカタパルト（Offshore Renewable Energy Catapult）
- ・エネルギーシステムカタパルト（Energy Systems Catapult）
- ・未来都市カタパルト（Future Cities Catapult）
- ・輸送システムカタパルト（Transport Systems Catapult）

➤ イノベーションプラットフォーム（Innovation Platform）

主要な社会的課題に対し、イノベティブな製品のリードマーケット構築のために、産学官共同で特定課題に取り組むプログラム。Innovate UK が推進。環境エネルギーに関連するテーマは以下。

- ・低炭素自動車（The Low Carbon Vehicles Innovation Platform）2007 年に設置。
- ・環境に優しい建築物（The Low Impact Building Innovation Platform）2008 年に設置。

➤ 先端推進システム技術センター（Advanced Propulsion Centre）における低炭素自動車技術開発プロジェクト

2015 年 5 月、先端推進システム技術センター（APC: Advanced Propulsion Centre）における低炭素自動車を推進する企業主導の技術開発プロジェクトの提案募集が

Innovate UK より発表された。総額 6,000 万ポンドのファンディングを予定している。応募において中心する推進技術として、内燃機関、軽量のパワートレイン構造、電気機械及びパワーエレクトロニクス、エネルギー貯蔵及びエネルギー管理、代替推進システムなど。今回のファンディングは 4 回目で、過去 3 回において約 9,000 万ポンドが 50 機関以上に配賦されてきた。APC は政府と自動車業界により 2013 年設立された低炭素イノベーションに関する研究拠点である。InnovateUK は、低排出ガス車両庁（Office for Low Emission Vehicles）および産業界と連携し、先進軽量車両やパワエレ、蓄電技術、内燃機関などを対象に、低排出ガス車の共同研究開発に 3,800 万ポンドの助成を発表している。

◆ 工学・物理科学研究会議（EPSRC : Engineering and Physical Sciences Research Council）によるもの

BIS 傘下の研究資金助成を行う 7 つの研究会議のうちの一つ。エネルギー関連の資金助成領域として、エネルギー（680.26 万ポンド、従来型および新型発電所、エネルギー効率、核融合、原子力、グリッドと貯蔵、再生エネルギー、社会経済政策、代替燃料、燃料電池など 427 テーマ）および環境変化への適応（30.82 万ポンド、水、インフラなど 29 テーマ）。

2014 年 4 月、英国の大学・産業界がエネルギーセクターにおける優れたコンセプト及び革新的技術を推進するべく、エネルギーカタリストから 2,500 万ポンドにのぼる資金が新規に投資されることが、EPSRC より発表された。今回支援対象のプロジェクトは、アイデア段階の技術ポテンシャル評価から、技術開発や商業化前のプロトタイプ作成の後期段階に至るまで、あらゆる段階のものを含む。

◆ エネルギー技術機構（ETI : Energy Technologies Institute）によるもの

ETI は、エネルギー効率の向上や GHG 排出量の削減等に資するエネルギー技術の開発・実証・商業化を加速することを目的として、BIS や DECC、工学・物理科学研究会議（EPSRC）など政府関係組織と民間企業の官民連携で 2007 年に設立。ETI が助成するエネルギー関連の主な現在推進中のプログラム（括弧内は予算総額）は以下。

洋上風力（58.5 万ポンド）、海洋エネルギー（34.3 万ポンド）、エネルギー分配（2.2 万ポンド）、家庭用エネルギー供給（3 万ポンド）、エネルギー貯蔵と分配（7.1 万ポンド）、需要家スマートエネルギーシステム（8.0 万ポンド）、CCS（19.5 万ポンド）、産業用、公共用自動車（12.9 万ポンド）、自家用自動車（18.5 万ポンド）

◆ 原子力廃止措置機関（NDA : Nuclear Decommissioning Authority）によるもの

2016 年 1 月、NDA はエネルギー産業の技術的課題の一部の解決策を探る中小企業への助成に 50 万～150 万ポンドを負担する。NDA は現場の課題対処に利用できる革新的なアイデアを振興・奨励する目的で、過去数年間にわたって Innovate UK と協働してきた。昨年発表された Innovate UK の”Energy Game Changer”ファンドは、現在 NDA の分担を含めて 200 万ポンドに達し、エネルギー・セクター以外の革新的な中小企業に配賦される。

◆ エネルギー研究促進機構（ERA : Energy Research Accelerator）によるもの

2015 年秋のスポンディング・レビュー（2016～2020 年度を対象とした政府全体の予算計画）で、ミッドランド地域の交通、エネルギー、文化に対する大型の政府投資とし

て、当該地域のハイテク、ハイスکیل経済の成長を支援するエネルギー研究促進機構（ERA）の新設に 6,000 万ポンドの公的資金支出が決定している。ERA はミッドランド地域の主要 6 大学の協力組織であり、「ミッドランド・イノベーション」イニシアチブが実行する最初のプロジェクトである。ERA は英国地質調査所、現地産業界等と協同して、英国が直面するエネルギー課題に取り組み、利用可能な資源を最大限活用する方策を研究するとともに、エネルギー研究・イノベーションの世界的な中核拠点の創出を目指す。

6. 参考文献

- 1) 海外電力調査会 各国の電気事業（英国）
<https://www.jepic.or.jp/data/global03.html>
- 2) JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 主要国の研究開発戦略」（2015 年）
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/FR/CRDS-FY2014-FR-01.pdf>
- 3) The UK Low Carbon Transition Plan（2009 年）
- 4) 2050 Pathways Analysis（2010 年）
- 5) UK Renewable Energy Roadmap（2011 年）
- 6) The Carbon Plan: Delivering our low carbon future
- 7) JST-CRDS「科学技術・イノベーション動向報告 ～英国編～」（2014 年）
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/OR/CRDS-FY2014-OR-03.pdf>
- 8) Eight Great Technologies（2013 年）
- 9) Our plan for growth: science and innovation（2014 年）
- 10) National Infrastructure Delivery Plan 2016–2021
- 11) EPSRC <https://www.epsrc.ac.uk/>
- 12) Energy Technologies Institute <http://www.eti.co.uk/>
- 13) HM Treasury “BUDGET 2016”（2016 年）
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/508193/HMT_Budget_2016_Web_Accessible.pdf
- 14) BIS “THE ALLOCATION OF SCIENCE AND RESEARCH FUNDING 2016/17 TO 2019/20”（2016 年）
- 15) GOV. UK. News Story “John Kingman to lead creation of new £6 billion research and innovation body”（2016 年）
<https://www.gov.uk/government/news/johnkingmantoleadcreationofnew6billionresearchandinnovationbody>
- 16) UKERC <http://www.ukerc.ac.uk/>

【参考】

◆低炭素エネルギー普及関連施策

2002 年より RPS に類似した RO (Renewable Obligation) 制度が導入されてきたが、2010 年より小規模電源を対象として FIT が開始された。2014 年には、再生可能エネルギーに加え CCS 付き火力発電や原子力発電などについても固定価格買取りの対象とした FIT-CFD を開始している。

◆原子力関連施策

2008 年の原子力白書によって原子力発電所の新規建設推進を政府が決定し、2011 年には原子力開発に関する国家政策声明が議会で承認されている。また「2013 年エネルギー法」では原子力を含む低炭素電源への投資促進による電力市場改革を目的としている。世論調査では、2000 年代以降、温暖化問題や燃料価格の高騰を背景に原子力発電への支持率が増加しており、賛成が反対を上回っている。

◆電気事業の関連施策

英国は 1990 年に世界に先んじて発送電分離と電力自由化を実施し、先立って実施されたガス市場自由化も加わって、新規事業者の参入や M&A が進んだ。その結果、英国の電力・ガス市場は大手 6 グループと、多くの独立系事業者が誕生し、国営化時代の非効率性の排除や市場活性化が促進された。全ての需要家が電力・ガスの購入先やサービスメニューを選択できる一方で、サービスメニューの複雑化、安定供給や供給義務、価格の面でのリスクが露呈している。

◆電力市場改革における関連施策

気候変動委員会は 2016 年 6 月、配電系統の分散型電源増加により、需給管理が困難となっているため、ナショナルグリッド社の系統運用の機能を、独立送電系統運用者 (ISO) と配電系統運用者 (DSO) に移管し、DSO がスマートグリッドの技術を利用して需給調整をするべきであるとした。ナショナルグリッド社はこれに対し、ISO モデルが需要家の便益に資する証拠はなく、安定供給に支障をきたすおそれがあると反発している。

◆英国グリーンディール施策

建物の省エネ推進を目的とし、2013 年より開始。建築物への低炭素設備導入に対して初期投資負担をゼロとし、その節約分を月々の電気代に上乗せして返済することで、設備導入の加速を促す。英国では建物の寿命が長く、断熱性の低い古い建物の暖房に消費するエネルギーが多いことが問題である。

◆EU 離脱の影響

離脱後の英国は、欧州自由貿易連合 (EFTA) 国になる可能性があるが、EFTA 国となった場合、一定要件を満たせば Horizon 2020 の Associated Country としての関係を維持することができ、資金配分を受けることができる。Horizon 2020 は英国の研究者にとって大きな財源と研究機会を提供する枠組みであり、そうした有益な枠組みをどのような形で継続させていくかが焦点の一つである。離脱通告後、中長期的エネルギー・電力政策については大枠が既に法制化されており、科学技術に関しても急激な影響はないと予想されるが、財源および人材流動に関する不確実さが増大し、研究協力が縮小傾向に向かう懸念がある。

（6）フランス

1. エネルギーに関する概況（現状）¹⁾

フランスは国内の化石燃料資源が乏しく、石油危機を契機に大規模な原子力発電の開発を行ってきたが、近年では再エネルギー開発にも積極的に取り組んでいる。一次エネルギーの供給は微減傾向にあり、2013 年において 253Mtoe、供給構造の内訳は、ガス 15%、石油 28%、石炭 4.9%、電力他 52%である。また 2014 年の総発電電力の構成は、石炭 4.4%、ガス 3.0%、原子力 75%、水力 12%、再生エネルギー等 5.1%となっている。原子力発電所は 58 基が 2014 年現在稼働中である。原子力発電比率が高いことから燃料費高騰の影響を受けず、電力価格は、EU で最も安い部類に入る。

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）^{2), 3), 4)}

フランスの研究戦略は首相直属の合議体である研究戦略会議が策定する。研究戦略会議の直下に位置する運営委員会が研究戦略会議に諮る議題を決定する。また、国立研究機関を横断的につなぐテーマ別研究連合等が、関連する情報を運営委員会に提示する。テーマ別研究連合には 5 つの研究連合があり、エネルギー分野としてはエネルギー分野の研究連合（ANCRE : Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie）が該当し、研究戦略を含む研究開発・イノベーション政策は、国民教育・高等教育・研究省（MENESR : Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche）の研究・イノベーション総局が担当し、本総局内に上記の運営委員会が置かれている。その他のエネルギー政策を担当する省庁には、環境・エネルギー・海洋省（MEEM : Ministre de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer）、経済・財務省（DGE : Direction Générale des Entreprises）がある。

研究開発に関する予算は研究・高等教育省際ミッション（MIRE : Mission inter-ministérielle Recherche et Enseignement Supérieur）という枠のもとで配分されている（省ごとに予算を配分するという体裁はとっていない）。2016 年度の予算総額は 262 億ユーロで、うちエネルギー関連では、学際的な科学技術研究に 62 億ユーロ（24%、大学教育と研究を除くと最大）、エネルギー開発および持続可能な開発の研究に 17 億ユーロ（6.7%）が配分されている。フランスのエネルギー関連の代表的な研究開発・イノベーションの資金配分機関には(1)国立研究機構（ANR : Agence Nationale de la Recherche）(2)環境・省エネルギー機構（ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie）(3)フランス公共投資銀行（Bpifrance）の 3 機関がある。ANR は主に大学・国立研究機関を対象に競争的資金を配分しており、基礎研究段階（TRL1-3）、ADEME は研究および実証段階（TRL4-6）、Bpifrance はほぼ商業化到達段階の（TRL8-9）におけるプログラムを担当している。

3. エネルギーに関する基本政策^{1), 5)}

フランスは、戦前から原子力の研究・開発の歴史を有し、大戦後は自前の核を保有するという国防の観点から米国、旧ソ連に次いで原子力開発を行ってきた。しかし、1990年代以降は温室効果ガス削減が大きなテーマとなり、2005年の「エネルギー政策指針法」では、2050年までにGHGを75%削減するため、①最終エネルギー消費の原単位を2015年まで毎年2%削減、2030年まで毎年2.5%削減、②エネルギー、発電での再生エネルギー比率を2010年までにそれぞれ10%、21%にまで引き上げ、③2020年に向けた原子力発電オプションを維持、が規定され、再生可能エネルギーと省エネルギーの開発も推進されるようになった。

東京電力福島第一原子力発電所事故後の2012年2月に、経済財政産業省が「2050年のエネルギー構想（Energies 2050）」をとりまとめ、エネルギーに占める原子力の割合について特定の目標は設定せず、原子力について多様な選択肢を保持しながらエネルギー分野の研究開発強化を基本方針として示した。

しかし、その後就任したオランド大統領により、電源多様化の観点から2025年までに原子力依存度を現状（2010年時点）の75%から50%に低減することが示された。そして、2015年7月に、今後2050年までのエネルギー政策の方針を示した「緑の成長のためのエネルギー移行法」が成立した。この法律は、政府の担当部局と、一般市民、各種団体、企業などフランス国内の様々な利害当事者との協議プロセスを経て作成された。2025年までに発電量における原子力発電の割合を50%に下げ、発電設備の容量を63.2GWまでとすること、再生可能エネルギー導入を2030年までに電源構成の中で32%に増やすこと、最終エネルギー消費を2050年までに2012年比で50%削減すること等が定められた。また、GHG排出量を2030年までに90年比で40%削減する目標が設定されている。

また、2016年11月には、MEEMが、エネルギー移行法の目標達成に向けて具体的な中期目標と施策を定めた複数年エネルギー計画（PPE : La programmation pluri-annuelle de l'énergie）を決定し、2023年までに、最終エネルギー消費量を12%削減、再生可能エネルギーによる発電容量を70%増と熱供給を35%増、化石エネルギー消費量を22%削減とした。加えて、クリーンな輸送（電気・天然ガスへの燃料転換）、発電エネルギーの多様化・原子力の縮小、柔軟でレジリエントなエネルギーシステムなど新たなエネルギーモデルの実践や、地域・企業・市民に対するエネルギー移行支援策も示した。

4. エネルギー研究開発戦略^{2), 3), 4), 6)}

フランスの研究戦略の方針はMENESRが2015年に公表した国家研究戦略（SNR : France Europe 2020 Stratégie Nationale de recherche）に定められている。SNRは、10の社会的課題を優先的に設定し、EUの研究戦略であるHorizon 2020との整合性を重視しながら、研究機関との協力関係と資金配分機関との年間計画を設定している。エネルギー関連の項目には、持続可能な資源開発と気候変動への適応（社会的課題1）、安全、クリーン、効率的なエネルギー（社会的課題2）、交通と持続可能な都市システム（社会的課題6）の項目が関連する。社会の観点からの課題設定は研究戦略文書としては初

めての試みである。SNR には 10 の社会的課題の定義と、それぞれの社会的課題には属さない競争的資金の配分を前提としたプロジェクトにより研究を進めるべき 5 つのテーマが記載されている。

緑の成長のためのエネルギー移行法を踏まえ、SNR のエネルギー分野に関して特化した文書である国家エネルギー研究戦略（SNRE : Stratégie Nationale de recherche électricité）が 2016 年 12 月に公表された。

その他、経済・産業・デジタル省に関連する産業競争力強化に向けた戦略として、2013 年 9 月に公表されたフランスの産業再生（La Nouvelle France Industrielle）報告書がある。フランスの産業を再生するために重要な 34 の優先領域を示し、5～10 年で革新的な製品を開発し、市場化を行う計画を規定している。エネルギー分野に関連する優先領域には、再生可能エネルギー、環境に優しい船、2 リットルで 100km 走る車、建物の熱効率を高めるリノベーション、電気自動車の充電ステーション、スマートグリッド、自律的かつ高性能なバッテリー、グリーンケミストリー、バイオ燃料の 8 領域がある。

2013 年 10 月にはイノベーションのための原則と 7 の大志（Un principe et sept ambitions pour l'innovation）報告書が公表された。フランスの長期にわたる繁栄と雇用を確保するために、重要かつ野心的な戦略分野を選択するために大統領が設置したイノベーション 2030 委員会での検討を踏まえ、7 つの戦略分野を提示した。エネルギー分野に関連する戦略分野として、「エネルギーの貯蔵」が記載されている。

同年 11 月の「イノベーションのための新方策」報告書では、上記の「フランスの産業再生」報告書の 34 の優先領域、「イノベーションのための原則と 7 の大志」報告書の戦略分野を補完する目的で、政策や体制に関する 4 つの軸に沿った 40 の方策が提示された。

5. 代表的な研究開発プログラム 2), 3), 4)

1) 将来への投資計画（PIA : Programme d'investissements d'Avenir）

2010 年、サルコジ大統領により未来の重要課題への大規模投資である「将来への投資」が実施され、オランド大統領も同名の施策を受け継いでいる。2017 年までの第一次および第二次公募（PIA1 と PIA2）では、クリーンエネルギーに約 50 億ユーロ（総額 520 億ユーロ）が配分され、第三次公募（PIA3）では、100 億ユーロがエネルギー転換に配分される予定である。未来への投資は、企業と研究機関のリスクを分け合うことで、基礎研究を市場に結びつけ、イノベーションの全チェーンを支える重要な役割を担っている。

PIA の主な公募機関である ANR により運営されている官民連携の研究機関に、新エネルギーへの移行のための研究所（ITE : Institut pour la Transition Energétique）がある。ITE は、クリーン経済移行にむけた国際競争に対処するため 10 プロジェクトを進めている（括弧内は予算総額と実施開始日）。PIA から ITE への支出割合は大きくはないが、エネルギーに特化した組織の設置に、国家としてのエネルギー転換重視の姿勢を感じ取ることができる。

- ・ PIVERT バイオ関連（63.9 百万€、2013/6/6）
- ・ IDEEL グリーン化学、エネ効率関連（40.2 百万€、2013/6/13）
- ・ EFFICACITY 都市エネルギー効率化（15 百万€、2013/10/29）
- ・ INEF4 持続可能な住宅建築（7 百万€、2013/10/29）
- ・ IPVF 太陽光発電（18.6 百万€、2013/10/29）
- ・ PS2E 都市共存産業設備のエネ効率向上（19 百万€、2013/10/29）
- ・ IFMAS グリーン化学（30.7 百万€、2013/12/18）
- ・ INES2 太陽エネルギー（39 百万€、2013/12/18）
- ・ VeDeCoM 持続可能な交通システム（54.4 百万€、2014/2/11）
- ・ SUPERGRID 将来の電力グリッド（72.7 百万€、2015/12）

ADEME は、資金規模軸と市場投入への時間軸がバラエティに富む 22 の基幹的な分野のイノベーションプログラムを、エネルギー・環境関連のプログラムと交通システムのプログラムにおいて実施している。2011 年から 2016 年の間に 30 億ユーロが配分され、成功事例として、潮汐発電のパイロットファームが市場化目前の段階となっている。ADEME による PIA の投資には、競争的資金と投資型資金があり、中小企業の技術育成も目的としている。

- ・ エネルギーとエコロジカルシステムへの移行実証プログラム：ビル、生物多様性、CCUS、生化学、廃棄物処理と産業エコロジー、土壌浄化、風力エネルギー、海洋エネルギー、太陽エネルギー、水、地熱、産業プロセス、スマートグリッド、エネルギー貯蔵、水素システムと燃料電池
- ・ 未来の交通システムプログラム：電気自動車と充電インフラ、ハイブリッドと熱モータリゼーション、軽量自動車、トラック、移動と物流、鉄道、未来型船舶

以下に PIA が関係するその他の環境・エネルギー分野に関する一例を記載する。

- ・ IDEX
「優れた拠点」のプログラムの 1 つ。11 の大学拠点に 70 億€を配分。エクス・マルセイユ拠点（Aix-Marseille Universite）は環境・エネルギーを主なテーマとする拠点の 1 つ。
- ・ 競争力拠点（Poles de Competitivite）
産業クラスターを対象としたプログラム。エコテク、環境、エネルギーを活動領域とする拠点「EAU」（地域圏：ミディ＝ピレネー）は準国際レベルとして認定。
- ・ 高度な研究施設（EQUIPEX）
国際レベルの研究設備整備を支援するもの。93 プロジェクトに対し 8.1 億€を配分。研究領域「エネルギー・環境」として、プロジェクト「CLIEX」には 2000 万€を配分。高出力レーザー設備（パリ・サクレキャンパス）の支援。
- ・ 明日の原子力
次世代原子炉、廃棄物処理研究の産業分野に根ざしたプログラム。9 億€を配分。

2) カルノー機関⁷⁾

公的研究機関と民間企業の連携を進め、技術移転の促進およびイノベーションを展開することにより、基礎研究の成果の産業への活用を目的とした「カルノー機関」指定制度が 2006 年に創設された。ここでは、共同研究を研究戦略の中心に位置づけ社会・経済界のニーズを十分考慮に入れた取り組みをしている研究室を認定し、その認知度を向上させるとともに、そのような研究組織に補助金を与えることにより、科学的技術的能力の継続的維持および提携関係の展開・実業化を支援する。現在、カルノー指定研究機関は公的研究要員の 15%(研究者・技術員が 20000 名、博士課程院生が 7500 名)を占めており、予算が 22 億ユーロ、研究契約の 50%以上が企業から公的研究室に委託されたものである。2000 社以上の企業（内 900 社が中小企業）と年間 7500 件の契約がある。ANR は創設以来その管理をしている。

Énergies du Futur は、2007 年からカルノー機関として活動を開始したグルノーブルの 4 機関（Grenoble INP（グルノーブル地域のグランゼコールのコンソーシアム）、CEA-Liten、ジョゼフ・フーリエ大学、CNRS で構成）からなるコンソーシアムである。エネルギー供給（太陽、バイオマス、風力、マイクロ燃料電池・電池）、エネルギー変換（水素システム、送配電、蓄電、CO₂貯蔵）エネルギー利用（家庭、交通、産業用ビル）、モデリング、環境影響評価、材料開発等のエネルギー分野の新技术開発に取り組んでいる。

6. 参考文献

- 1) 海外電力調査会 各国の電気事業（フランス）<https://www.jepic.or.jp/data/global04.html>
- 2) JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 主要国の研究開発戦略」（2015 年）
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/FR/CRDS-FY2014-FR-01.pdf>
- 3) 科学技術・イノベーション動向報告 フランス編 ～2014 年度版～
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/OR/CRDS-FY2014-OR-04.pdf>
- 4) MENESR より入手資料
- 5) MEEM 複数年エネルギー計画（PPE）
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/L-entree-en-vigueur-de-l-Accord-de.html>
- 6) La nouvelle france industrielle
<http://www.economie.gouv.fr/files/files/PDF/nouvelle-france-industrielle-sept-2014.pdf>
- 7) Institut Carnot Energies du future <http://www.energiesdufutur.eu/>

(7) 中国¹⁻⁴⁾

1. エネルギーに関する概況（現状）

中国は、エネルギー資源の大規模な開発と利用が環境汚染と気候変動の主要な要因の 1 つであるとの認識を示したうえで、石炭を中心とし、エネルギーのクリーンな利用に最大限の注意を払いながら環境保護に焦点をあてて生態の破壊と環境汚染の防止に取り組んでいく意向を示している。

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）

中国のエネルギー分野に係る行政機関は、国家エネルギー局を擁する国家発展・改革委員会、中国国家原子エネルギー機構を擁する工業・情報化部等がある。これに加え、国務院直属機構として中国最大の研究機関である中国科学院や主としてボトムアップでの資金配分を行う国家自然科学基金委員会（NSFC）、トップダウン式で戦略的な研究資金を配分する科学技術部（MOST）ハイテク研究開発センターも関与している。

中国は、国民経済と社会発展の緊急のニーズに立脚し、エネルギー、資源、環境の技術開発を優先している。エネルギー分野では「省エネと供給の多様化・拡大」、資源分野では「戦略的資源の調査・開発・利用に関する技術水準の向上」が柱に据えられている。エネルギー関係では、「国民経済・社会発展『第13次5カ年』計画綱要」に基づき、2016年12月に国家発展改革委員会と国家エネルギー局が共同で「エネルギー発展『第13次5カ年』計画」を策定した。その後、「エネルギー発展『第13次5カ年』計画」のもとで、政府の関連部門は以下のような政策・計画を制定している。

- －「エネルギー技術イノベーション『第13次5カ年』計画」（2016年12月）
- －「再生可能エネルギー発展『第13次5カ年』計画」（2016年12月）
 - ・「電力発展『第13次5カ年』計画」（2016年11月）
 - ・「風力発電発展『第13次5カ年』計画」（2016年11月）
 - ・「水力発電発展『第13次5カ年』計画」（2016年11月）
 - ・「太陽エネルギー発展『第13次5カ年』計画」（2016年12月）
 - ・「全国『第13次5カ年』地熱資源開発利用計画」（審議中）
 - ・「海洋再生可能エネルギー発展『第13次5カ年』計画」（2016年12月）
- －「石炭産業発展『第13次5カ年』計画」（2016年12月）

これらの中で、エネルギー関連では、「エネルギーの高効率、グリーン化」、「超高压送電技術・設備」、「分散型エネルギー技術」、「先進核燃料技術」、「高温材料・電池材料技術」が重点的に推進されている。

3. エネルギーに関する基本政策

国家発展改革委員会と国家エネルギー局が2016年12月に公布したエネルギー分野の専門計画である「エネルギー発展『第13次5カ年』計画」では、エネルギー消費総量を管理し、安全、安定、経済的、クリーンなエネルギー産業システムを構築するとした上で、2020年までに以下の7つのミッションを重点的に進める方針を示している。

【総エネルギー消費量】

標準炭換算でエネルギー消費量を50億トン以内とし、石炭消費量を41億トン以内とする。電力消費量を6.8～7.2兆kWhとする。

【エネルギー安全保障】

エネルギーの自給率を80%とし、エネルギー安全供給能力、エネルギーの利用効率を向上させ、グリーンエネルギーの割合を高める。

【エネルギー供給能力】

供給能力を徐々に高め、国内の一次エネルギー生産量（標準炭換算で）を40億トンにし、そのうち、石炭は39億トン、原油は2億トン、天然ガスは2200億m³、非化石エ

エネルギーは 7.5 億トン（標準炭換算）を目標とする。発電容量は 20 億 kW とする。

【エネルギー消費構造】

非化石エネルギーの割合を 15%以上、天然ガスの割合を 10%、石炭の割合を 58%以下にする。発電用の石炭消費量は石炭消費量全体の 55%以上とする。

【エネルギー効率】

GDP 当たりのエネルギー消費量は、2015 年と比べて 15%減少させ、1kWh の電力を生産するための石炭消費を 310 グラム以下とする。電気供給の損失を 6.5%以内とする。

【低炭素目標】

GDP 当たり二酸化炭素排出量は、2015 年と比べて 18%減少させ、エネルギー産業における環境保護能力を著しく向上させる。石炭を燃料とする火力発電所の汚染物排出量を大幅に減少させる。

【エネルギーサービス】

エネルギーサービス水準を向上させ、エネルギー利用の便利化を図り、都市部と農村部の電気消費の差を縮小させる。

4. エネルギー研究開発戦略

科学技術イノベーションの基本政策としては、「国家イノベーション駆動発展戦略綱要」（2016－2030 年）及び「科学技術イノベーション『第 13 次 5 カ年』発展計画」に重要な方針が示されている。「国家イノベーション駆動発展戦略」（2016－2030 年）では、重点課題として「安全・クリーンなエネルギーを開発し、エネルギー生産と消費革命を推進する」をあげている。

また、「科学技術イノベーション『第 13 次 5 カ年』発展計画」では、エネルギー分野において、クリーンな高効率エネルギー技術の戦略目標を掲げている。

- － 石炭のクリーン利用・高効率利用技術を開発する。
- － 再生可能なエネルギー技術及び水素技術を開発する。
- － 安全・先進原子力エネルギー技術を開発する。
- － スマート・グリッドを構築する。
- － 省エネ建築技術を開発する。

更に、エネルギー領域に特化した「エネルギー技術『第 13 次 5 カ年』計画」では、「国家経済・社会発展『第 13 次 5 カ年』計画」、「エネルギー発展『第 13 次 5 カ年』計画」に基づき、重点技術分野を指定している。「エネルギー技術『第 13 次 5 カ年』計画」では、「石炭のクリーン利用・効率利用」「再生可能なエネルギー技術と水素技術」「安全・先進原子力エネルギー技術」を重点分野に指定し、「科学技術イノベーション『第 13 次 5 カ年』計画」と一致している。これに加えて、以下の重点分野も指定している。

－戦略的エネルギー技術分野

- ・高効率ガスタービン技術
- ・クリーン・高エネルギー密度の特殊オイル
- ・船舶用原子力エンジン技術
- ・水素技術と燃料電池技術

- ・超電導送電技術
- ・包接水和物技術
- ・制御可能な核融合技術
- エネルギー関連の材料技術
- ・高温材料技術
- ・電池材料技術
- ・触媒材料技術
- ・先進電力デバイス技術

5. 代表的な研究開発プログラム

エネルギー分野の研究予算は、従来の「国家重点基礎研究発展計画」、「国家ハイテク研究開発発展計画」及び「国家科学技術支援計画」などのトップダウン式競争的研究資金プログラムは、2016年に「国家重点研究開発プログラム」に統合された。

「国家重点研究開発プログラム」では、エネルギー分野として、「新エネルギー自動車」「グリーン建築」「石炭高効率利用」「スマート・グリッド技術と設備」が掲げられている。「新エネルギー自動車」テーマでは、19の研究プロジェクトで総額10.14億元、「グリーン建築」テーマでは、21のプロジェクトで総額5.97億元、「石炭高効率利用と新型省エネ技術」テーマでは、17のプロジェクトで総額4.56億元、「スマート・グリッド技術と設備」テーマでは、19のプロジェクトで総額5.81億元である。これら4つの研究テーマの支援額上位三位のプロジェクトは以下のとおりである。

○新エネルギー自動車

- ・高性能低コスト燃料電池のコア技術の研究開発
新源動力社 邢丹敏 (SUNRISE POWER) 12,558 万元（5年間）
- ・軽量電気自動車のシステム集成技術の研究開発
重慶長安自動社 季方勝 12,000 万元（5年間）
- ・高い比エネルギーリチウム電池の研究開発及び応用技術
合肥国軒高科動力能源公司 徐小明 10,000 万元（5年間）
- ・次世代リチウム電池の産業化技術
寧徳時代新能源科技公司 吳凱 10,000 万元（5年間）

○グリーン建築

- ・長江流域建築向けの暖房空調ソリューション及び暖房システムの開発
重慶大学 姚潤明 4,500 万元（4年間）
- ・既存公共建築の総合的な性能向上と改造におけるコア技術の研究開発
中国建築科学研究院 王俊 3,963 万元（3.5年間）
- ・プレハブコンクリート構造物の産業化技術向けの基本理論研究
東南大学 吳剛 3,848 万元（3年間）

○石炭高効率利用と新型省エネ技術

- ・石炭の熱分解反応による天然ガスへの転換技術
陝西石炭化工集团有限公司 鄭化安 4,955 万元（3年間）
- ・ダストが同伴する排ガスの廃熱回収技術
重慶大学 廖強 4,500 万元（3年間）

- ・超超臨界超臨界循環流動層ボイラー技術

神華国能集团公司 凌文 4,290 万元（5 年間）

○スマート・グリッド技術と設備

- ・柔軟な高電圧大容量直流グリッド技術

Global Energy Interconnection Research Institute 湯広福 5,000 万元（3 年間）

- ・柔軟な高電圧大容量直流グリッド技術

南方電網科学研究院 饶宏 4,000 万元（3 年間）

- ・±1100kV 直流送電コア技術の研究開発

中国電力科学研究院 張福軒 4,000 万元（4 年間）

上述の通り、エネルギー領域の研究開発において、2016 年以降の競争的研究資金の再編の後、実力のある国有企業や民間企業に大型研究資金を拠出するのは大きな特徴である。

また、「エネルギー技術革命イノベーション行動計画（2016-2030 年）」及び「エネルギー技術革命重点イノベーション行動ロードマップ」を発表し、水素エネルギー及び燃料電池技術イノベーション、先端エネルギー貯蔵技術イノベーションなどの重点イノベーション任務を提示している⁵⁾。

6. 参考文献

- 1) JST-CRCC 平成 27 年度版 中国の科学技術の現状と動向（2015 年）
- 2) JST-CRCC 平成 26 年度版 中国の科学技術の現状と動向（2014 年）
- 3) JST-CRDS 中国の研究開発戦略に関する調査（2004 年）
- 4) 国家科技计划申报中心 <http://program.most.gov.cn/>
- 5) 新華網 http://jp.xinhuanet.com/2016-06/06/c_135416196_2.htm

（8）韓国

1. エネルギーに関する概況（現状）

韓国の主要なエネルギー源は無煙炭、石油、天然ガスで、そのほとんどを輸入に頼っているが、国内資源が乏しいため年々輸入依存度が増加する傾向にある（1973 年の 66.8%から 2011 年の 85.7%に上昇）。しかし電気料金は、為替レート換算では日本の 1/3 倍程度と割安になっている。この理由は、寒冷な気候等により、負荷率が 70%台後半と高く、効率的な電源運用が可能となっていること（日本は 60%台）、および韓国電力公社（KEPCO）は政府出資比率 51%の半国営会社であり、韓国の電気料金水準は政策的に抑制されていることも要因。また韓国ガス公社（KOGAS）も国と KEPCO が株を持ち合っている。近年、ガス料金を安価にすることで、電気からガスへの燃料転換を促している。

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）

韓国のエネルギー政策はエネルギー法に従い、産業通商資源部（MOTIE）が担当している。エネルギー管理公社（KEMCO）は省エネ政策および気候変動緩和のための指標（数値目標）作りを担っている。韓国エネルギー経済研究院（KEEI）はエネルギー需要予測などを実施。

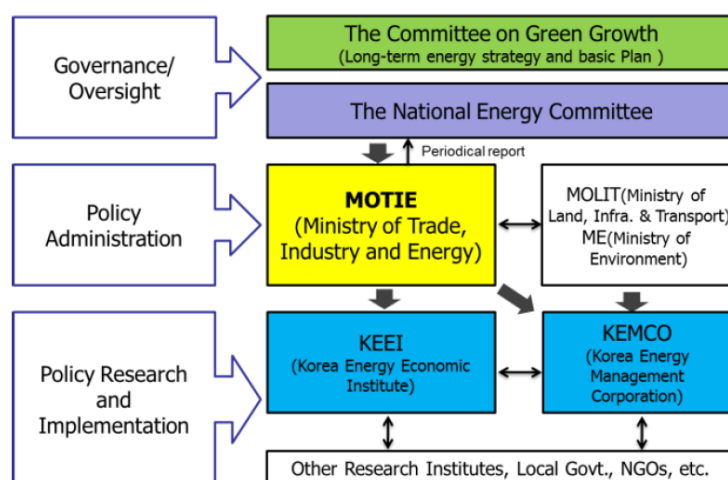


図 2-35

出典：Growth Analysis “Energy Research and Innovation in South Korea”

3. エネルギーに関する基本政策

2010 年には「エネルギー基本法」は組織構成等を変更し、「エネルギー法」として纏められ、これとともに気候変動対応とエネルギーの目標管理に対応するため、グリーン成長国家戦略、国務総理と民間委員を共同委員長にする大統領所属のグリーン成長委員会を設置し、「低炭素グリーン成長基本法」を 2010 年 1 月に制定した。

「グリーン成長」について李大統領は、「GHG と環境汚染を減らす持続可能な成長」であるとし、グリーン技術とクリーン・エネルギーにより、新たな成長力と雇用を創出する新しい国家発展のパラダイムである、と位置づけている。

2013 年 12 月に策定された「第二次国家エネルギー基本計画（2013～2035 年）」（20 年間を計画期間とした長期エネルギー戦略）では、高効率システム化により、エネルギー低消費社会の実現を目指している。原子力に関しては、福島第一原子力発電所事故等を考慮したことで、第二次計画では 2035 年までに 29%とするにとどめている。2035 年の一次エネルギー供給量は第一次計画より 15%少ない石油換算 7020 万トン（toe）としている。

5 大重点課題

- 需要管理中心への政策転換 電力需要の 15%以上削減
- 分散型発電システムの構築 発電量の 15%以上
- 環境保護・安全強化 発電部門の GHG20%削減
- エネルギー安全保障の強化 資源開発率 40%、再生可能 11%
- 国民と一緒に政策の推進 2015 年からバウチャー制度の導入

● 再生可能エネルギー

第2次エネルギー基本計画で2035年までに新再生エネルギー比重を11%（現在3%）まで引き上げる決定をしたことに伴い、韓国電力（韓電）と発電6社（南東・中部・西部・南部・東西・韓国水力原子力）は、今後6年間で、原子力発電所（1基平均1ギガワット）11基に代わる新再生エネルギー発電施設を作るため公共機関と民間資本が計42兆5000億ウォン（約4兆300億円）を投資する「中長期新再生エネルギー事業推進計画」を発表した。現在0.8ギガワットである国内の新再生エネルギー発電容量を、2020年までに15倍（12.3ギガワット）まで高める（新再生エネルギーを通じて11.5ギガワットの発電容量を増やす）。分野別では風力（6.7ギガワット）の発電容量を最も多く増やす。さらに新技術（2.0ギガワット）、太陽光（1.3ギガワット）、エネルギー保存装置（ESS 0.8ギガワット）の順だ。今は新再生エネルギー発電原料の60%が廃棄物に偏重している。

4. エネルギー分野の研究開発戦略

韓国の科学・イノベーション政策は、2013年7月にNSTCにおいて承認された「第3次科学技術基本計画（2013-2017）」を主軸に推進されている。具体的な研究開発投資分野としては、IT融合新産業の創出をはじめとする「5大推進分野」を掲げ、120の国家戦略技術及び30の重点技術の研究開発を推進する方針を掲げている。

1. IT融合新産業の創出 10 技術

スマート物流・交通システムの構築・先端鉄道技術
主力輸出産業の高度化・エコ自動車技術

2. 未来成長動力の拡充 12 技術

未来エネルギー・資源の確保・活用・太陽エネルギー技術、スマートグリッド技術など

3. クリーンで便利な生活環境の構築 4 技術

気候変動対応力の強化・CCS 技術
環境保全・復元システムの高度化・汚染物質制御および処理技術（水質・大気など）
生活空間の便利さの向上・高効率エネルギー建築物技術、未来先端都市建設技術

4. 健康長寿時代の実現 6 技術

5. 安全安心な社会の構築 6 技術

自然災害予防と被害の最小化・自然災害モニタリング・予測・対応技術
社会的災害対応システムの確保・原子力安全確保技術、社会的複合災害予測・対応技術

また、第3次科学技術基本計画と連動して、「未来成長動力計画」（2014年6月決定）や「社会問題解決総合実践計画（2014-2018年）」（2013年12月決定）等においても環境エネルギー分野に係る方針が打ち出されている。国をあげて推進する次世代産業として挙げられた9つの戦略産業のうち「スマートカー」、「再生可能エネルギーハイ

ブリッドシステム」等が環境・エネルギー分野と関連する。

2014年12月にMOTIEは「第3次エネルギー技術開発計画（'14～'23年）」を発表した。エネルギー技術開発計画は、国のエネルギー基本計画と関連したエネルギーの効率的な使用とGHGの削減などのために推進する最上位の技術開発計画で、5年ごとに10年の計画期間を策定。今後10年で、約2.2兆円（政府支出 KRW 12 trillion、民間支出 KRW 8 trillion）の投資を計画。

エネルギー革新技術プログラムの推進の方向性として、分散化、クリーン化、効率化、安全、知能化が挙げられており、17個のプログラム、75の主要プロジェクトと274個の重点技術を選定した。

Energy Innovation Architecture 2025（17の技術プログラム）

次世代戦略資源開発、高効率クリーン火力発電、国民安心原子力発電、再生可能エネルギーのハイブリッドシステム、次世代クリーン燃料、次世代送配電、スマートホーム・ビル、スマート FEMS、スマートマイクログリッド、エネルギーネガワットシステム、需要対応型 ESS（エネルギー貯蔵システム）、CCUS（CO₂ 捕集/活用/保存）、未来のエネルギー発電、ワイヤレス電力送受信、未来高効率エネルギー変換/保存、3Dプリンティングベース最新の製造プロセス技術、エネルギーIoT+ビッグデータプラットフォーム

供給では、高効率クリーン火力、次世代クリーン燃料、ハイブリッド再生可能エネルギーなどを介してエネルギー源のクリーン化を加速し、国民の目線に合わせて安全な原発、次世代送配電技術開発などを推進。需要管理では、効率向上技術の間の接続を最大化し、個々の主体から地域、市場まで最適化した環境にやさしいエネルギーネットワークを構築することに重点。融合イノベーションとして、ICT技術をエネルギー製品の技術全方位に拡散して優秀な製造能力を活用して、将来社会に対応する計画である。

● 国の研究開発

韓国エネルギー技術評価・企画院(KETEP)は、政府が策定した国家ビジョンを支援するための技術開発戦略の開発および革新的なエネルギー技術開発の推進（ファンディング）を目的としており、広領域のエネルギー技術開発プログラムを企画、実施、管理し、研究者や大学、民間企業等を支援している。年間予算は800億円強となっている。

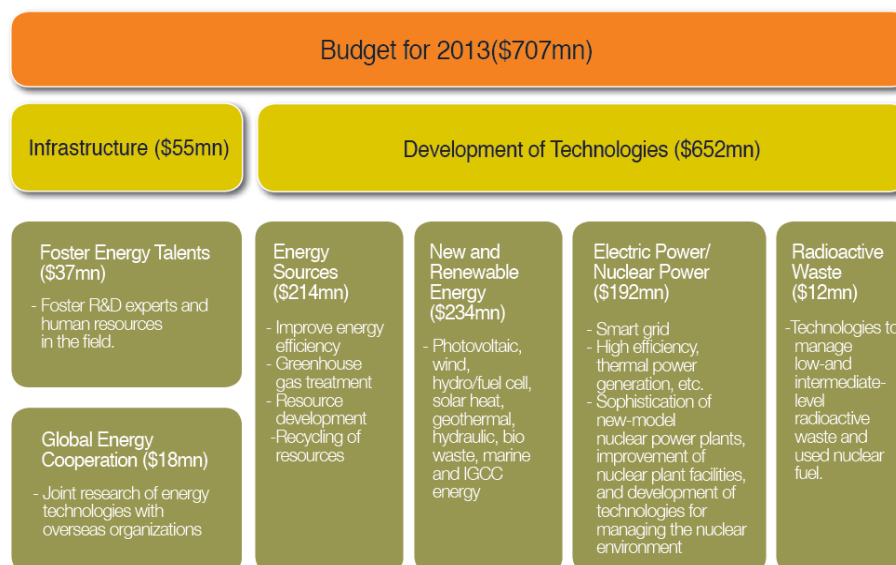


図 2-36

出典：KETEP “Green Energy World、Global R&D Innovator”

5. 代表的な研究開発プログラム

Jeju Smart Grid Test-Bed

世界最大級かつ最も先進的なテストベッドの構築を通じて、スマートグリッド技術の商業化、輸出を狙う。5つの領域からなり、政府が 70 million USD、民間が 170 million USD を出資。

1. Smart Consumer

- Advanced Metering Infra Structure(AMI)、 Energy Management System(EMS)

2. Smart Transportation

- EV Charging Infrastructure、 Vehicle to Grid(V2G)

3. Smart Renewable

- Microgrid、 Energy Storage、 Power Quality

4. Smart Power Grid

- Smart Transmission and Distribution、 Smart Power Communication Network

5. Smart Power Market

- Power Trade、 Smart Grid Power Market Operation

6. 参考文献

- 1) JST-CRDS 主要国の研究開発戦略（2015 年）
- 2) MOTIE「第3次エネルギー技術開発計画（'14～'23 年）」
- 3) 国家科学技術委員会「第3次環境技術と環境産業の育成（'13～'17）」
- 4) KETEP Green Energy World、Global R&D Innovator
- 5) Growth analysis Energy Research and Innovation in South Korea

2.3.3 研究開発（科学技術）の動向

3章には31の研究開発領域について、国際ベンチマークと世界のトレンド、注目動向（トピックス）、今後の科学技術課題などをまとめている。本節では、これらについて、国別、領域別にハイライトしたもの、およびCRDSで有識者（研究者）の参加を得て開催した、現在の研究開発動向から今後の展望を検討するワークショップの結果を掲載する。

エネルギー供給（製造・転換）

			資源開発		火力発電		CCUS		新型原子炉		核融合炉		原子力安全		燃料等の処分・廃止措置		風力発電		地熱発電		太陽光発電										バイオマス		
			現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向			
日本	基礎	○	→	◎	↗	○	→	△	→	○	→	○	↗	○	→	○	→	◎	↗	○	→	◎	↗	○	↘	◎	↗	○	↗	○	↗	◎	↗
	応用	◎	→	◎	↗	◎	→	△	↘	◎	→	◎	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	△	→	○	↗	○	→
米国	基礎	◎	→	◎	→	○	→	△	→	○	↘	◎	→	○	→	◎	↗	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	○	→	○	→	◎	↗
	応用	◎	→	◎	→	◎	→	○	→	◎	→	◎	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	○	↘	△	→	○	→	○	→
欧州	基礎	◎	→	◎	→	○	→	○	→	○	→	◎	→	○	→	◎	→	○	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗
	応用	◎	→	◎	→	△	↘	○	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	→	△	→	○	↗	◎	↗	◎	↗
中国	基礎	○	→	○	→	○	→	△	→	○	↗	○	↗	○	↗	△	→	△	→	△	↗	△	→	○	↗	×	→	○	↗	—	→	○	↗
	応用	○	→	◎	↗	○	→	○	↗	◎	↗	○	↗	△	→	△	→	△	→	○	↗	△	→	△	→	△	→	—	→	△	→	○	↗
韓国	基礎	△	→	○	→	△	→	△	→	○	→	○	→	○	→	△	↘	△	→	△	↘	△	→	○	→	×	→	◎	↗	—	→	○	→
	応用	△	→	○	→	△	→	△	→	○	→	○	↗	○	↗	△	↘	△	→	○	↘	×	→	△	→	×	→	△	→	△	→	△	→

エネルギーネットワーク（貯蔵・輸送）

		エネルギーシステム	分散協調型EMS		直流・超電送配電		パワエレ		蓄電			蓄熱	エネキャリ	燃料電池	モータ・トランス磁石	スマートビル・ハウス	断熱・遮熱・調光		照明・ディスプレイ										
			現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状						動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向				
												リチウムイオン	フロー電池	キャパシタ	有機EL	量子ドット													
日本	基礎	○	→	◎	→	○	→	◎	→	◎	↗	○	→	○	↗	◎	→	○	→	△	→	◎	↗	◎	↗	◎	↘		
	応用	○	→	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	→	◎	→	○	→	◎	↗	◎	→	△	↘	◎	↗	×	→	△	↘	△	→
米国	基礎	◎	↗	◎	↗	○	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	○	↗	○	→	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	→
	応用	◎	↗	◎	↗	○	→	◎	→	△	↗	◎	↗	○	→	○	→	○	↘	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→
欧州	基礎	◎	↗	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	○	↗	○	→	○	→	◎	↗	◎	↗	○	↗	○	→	○	↘
	応用	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	△	↗	○	↗	○	↗	◎	↗	◎	→	△	↘	◎	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗
中国	基礎	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	△	↗	◎	↗	○	↗	△	→	△	↗	○	↗	○	→	△	↗	○	→	△	↗
	応用	○	↗	○	→	○	↗	△	↗	○	↗	○	↗	◎	↗	○	→	△	→	△	↗	○	↗	◎	↗	○	↗	△	↗
韓国	基礎	○	→	△	→	○	↗	△	→	○	↗	△	→	△	↘	○	→	△	→	△	→	△	→	○	→	○	↗	◎	↗
	応用	○	→	△	→	◎	↗	△	→	◎	↗	△	→	△	↘	○	↗	△	→	△	↗	○	→	×	→	◎	↗	○	→

エネルギー利用（省エネ）

		熱再生利用				触媒	分離						燃焼	エンジン	トライボロジー	耐熱材料				高強度軽量材料									
		理論		ヒートポンプ			CO ₂		随伴水		希少金属					新材料開発技術	材料損傷・劣化評価技術		炭素繊維複合材料（CFRP）等	アルミニウム合金		セルロースナノファイバー							
現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向				
日本	基礎	◎	→	◎	→	◎	↗	○	→	○	↘	○	→	◎	→	○	↗	◎	→	◎	↗	○	→	○	↘	◎	↗		
	応用	△	↘	◎	→	○	↗	◎	→	○	↗	○	→	◎	→	○	→	◎	→	○	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗		
米国	基礎	○	↗	◎	→	○	→	○	→	◎	→	△	↘	◎	→	○	↗	◎	→	○	→	◎	↗	◎	↗	△	↘	◎	↗
	応用	△	→	○	→	○	→	◎	→	◎	↗	○	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	○	→	○	→	◎	↗	◎	↗
欧州	基礎	○	→	◎	↗	◎	→	○	→	○	→	○	→	◎	→	◎	→	◎	→	○	→	◎	↗	◎	↗	△	→	◎	↗
	応用	○	↗	◎	↗	◎	→	△	↘	◎	↗	◎	↗	◎	→	○	→	◎	↗	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗
中国	基礎	○	→	△	→	○	↗	○	→	○	→	○	↗	○	↗	△	↗	○	↗	△	↗	○	↗	○	→	○	↘	◎	↗
	応用	◎	↗	△	↗	○	↗	○	→	○	→	◎	↗	△	↗	△	→	△	↗	△	↗	—	—	○	→	○	↗	○	↗
韓国	基礎	△	→	×	→	△	→	△	→	△	↘	△	→	○	→	△	→	△	→	△	↘	○	→	△	→	○	↘	△	↗
	応用	△	→	○	→	△	→	△	→	○	→	△	↘	△	→	△	→	△	→	△	→	—	—	○	→	○	↗	△	↗

（１）国別ハイライト（強み・特長）

<日本>

基礎研究、応用開発を総合的に考えた際に、世界をリードしている研究領域としては、火力発電、蓄電池、燃料電池、磁石、耐熱材料といった技術が挙げられる。また、次世代リチウムイオン電池、ポストリチウムイオン電池ともに基礎研究ではトップレベルを維持している。PEFC および SOFC を中心に燃料電池本体・発電システム・補機類などの技術が進展している。PEFC 用触媒の研究開発に関しては、大学でも幅広い基礎および応用研究が進められている。永久磁石および軟磁性材料でも世界を先導している。主要な耐熱材料である Ni 基超合金、Mo-Si-B 基超高温材料、ボーイング 787 機のエンジン材料に採用されている Ti-Al 合金等の開発では、NIMS、東北大学、東工大学等による基礎研究、また IHI 社の開発研究の貢献が大きい。

世界トップクラスのものとしては、CCUS、太陽光発電、地熱発電、パワエレ、蓄熱、ヒートポンプ、触媒、燃焼などがある。CCS では、燃焼後回収システムの化学吸収法において、日本企業が独自のプロセスを開発し、基礎研究、応用研究・開発でトップレベルを維持している。結晶シリコン太陽電池は企業主体で研究開発し高い技術水準を維持している。CIGS 太陽電池では企業が高い製造技術を有し、これを支える形で大学・国立研究所が学術的知見の蓄積・提供と新たな高効率化要素技術を開発しており、世界最高水準の技術を有している。地熱蒸気タービンや小型バイナリー発電設備技術などの優れた要素技術を持つ。Si パワーデバイスでは、特に高耐压系において、欧米と伍して優位な立場を維持しており、家電、産業機器、自動車・鉄道・電力へのパワーエレクトロニクス応用が強い。SIP で次世代パワーエレクトロニクスが 2014 年度から立ち上がり、SiC、GaN の基礎研究が進められるとともに、

応用研究の成果が出始めてきている。蓄熱では、低温領域（120℃以下）に関して、潜熱蓄熱や化学蓄熱の基礎研究が精力的に進められている。触媒では、バイオマス変換触媒、光触媒・人工光合成、水素製造・貯蔵・輸送技術に関して世界レベルにある。ヒートポンプでは、日本は基礎、応用研究ともに世界トップクラスである。応用面では世界的な圧縮機メーカ（神戸製鋼、三菱重工、ダイキンなど）の存在が大きい。石炭による発電技術、加熱工業炉での「高温空気燃焼技術」などの基礎・実用技術の研究開発を通じて、実用燃焼機器の熱効率・エミッションは世界トップレベルにあり、省エネ技術を牽引している。また、SIP エネルギーキャリアでは、ガスタービン燃焼にアンモニア燃料を用いる研究開発が行われている。

逆に欧米に比して、日本が弱い領域としては、新型原子炉、エネルギーシステム（モデル）、スマートビル・ハウス（ZEB/ZEH）などがある。

現在強い領域も、例えば、蓄電池は韓国が、磁石や火力発電は中国が猛烈な追い上げを見せていることや、技術・研究としては強くても、市場では必ずしもシェアの大きくない領域があることに留意が必要である。

<米国>

取り上げたすべての領域において、穴のない研究開発レベルを維持している。これらの研究開発において、米国エネルギー省（DOE）および傘下の DOE 研究所の果たしている役割が、基礎・応用両面における資金、体制のいずれの意味からも大きい。

エネルギー供給区分では、資源開発でのシェール開発に代表される採掘技術がある。火力発電において、DOE の支援による大学・研究機関の基礎研究、応用研究では GE が幅広い分野で高いレベルにあり、ガスタービン分野の市場シェアでも 3 強の一角を占めている。CCUS では、DOE による燃焼前 CO₂ 回収技術の支援、商用化に向けた実証試験も高いレベルにある。核融合炉や原子力安全についても強みを持つ。原子力安全では、スリーマイルアイランド原発事故を契機に、ヒューマンエラーの防止などの取り組みを促進するとともに、シビアアクシデント対策が充実されている。太陽光発電でも化合物薄膜などに高い技術力を持っている。風力発電では、DOE の支援により大学・研究機関が組織的に研究している。また洋上風力発電設備機器市場でも GE が強みを持つ。地熱発電では従来型とバイナリー型の両方で基礎・応用研究とも官学共同研究を進めている。またバイオマスでは微細藻類などの生化学ベースの燃料・化学品製造で先導的であり、研究層も厚い。供給区分ではこのように先進国かつ資源国である米国の特徴が現れている。

エネルギーネットワーク区分では、エネルギーシステム評価で先行しており、DOE 支援のもとでスタンフォード大学の Energy Modeling Forum(EMF)のプロジェクトが継続されており、モデル比較等の研究科可能な場が設立されている。分散型 EMS では、実用化が進行しており、ビックデータ、機械学習などのスマート化の要素技術開発として DOE 研究所、Engineering Research Center (ERC)プログラム CURENT、FREEDM の元で大学や IEEE が進めている。またテキサス州のデマンドレスポンスプログラムの開発、ハワイ・マウイ島のスマートコミュニティ・EV 利用型バーチャルパワープラント（VPP）実証、カリフォルニア州の EMS サービス拡充や蓄電池の多目的運転実証、ニューヨーク州の住宅設置の太陽光発電と定置型蓄電池を活用バーチャルパワープラント事業など多数実施されている。パワーエレクトロニクスでは、多数の大学に研究センターが次々と設立されており、Si、ワイ

ドギャップ半導体パワーデバイスを利用したさまざまなパワエレ技術の研究開発を企業も巻き込んで活発に展開している。特に新構造、新発想のデバイスは他国よりも多い。蓄電デバイスでは、レドックスフロー電池を始め定置用(電力用)に強みを持つ。エネルギーネットワーク区分では ICT 活用という、米国における情報通信技術の反映に加え、先端的製造技術としてパワエレ技術も進展しており、今後の動向に着目する必要がある。

エネルギー利用区分では、スマートビル・ハウスにおいて、建築外皮などのハード面で先駆的な動きがあり、昼光の導入技術、高性能ガラスの技術であるサーモクロミック技術やエレクトロクロミック技術を DOE と傘下のローレンスバークレー国立研究所が共同で長期の研究開発が継続されている。また、ソフト面から、それを利用する人間や環境、ICT の研究も行われている。断熱・遮熱・調光では、米国企業が遮熱フィルムの開発を始めている。屈折率の異なる高分子系材料を数百層重ねた多層膜タイプへと開発が移行し、米中の共同プロジェクトも進行している。また、調光では有機エレクトロクロミック材料の研究開発を進め世界のトップを走っている。照明・ディスプレイでは、有機 EL、量子ドットの基礎、応用ともに強みを持つ。特に有機 EL 技術では、材料、デバイスの基礎技術の研究が進み、有機 EL 照明パネルの製造販売会社である OLEDWorks 社、材料では Universal Display Corporation (UDC) が燐光発光材料の開発に強みを有する。熱再生利用技術では、デュポンやハネウェルなど、冷媒の世界的メーカーがあり、フッ素系冷媒の研究開発では世界のトップクラスである。分離では、石炭火力発電所に厳しい CO₂ 排出基準が設定されたため、具体的な応用研究プロジェクトが進む。燃焼、エンジン燃焼では自動車用途として新エンジンとバイオ由来新燃料の組み合わせたプロジェクト Co-Optima が DOE 研究所を中心に進められている。トライボロジーでは、ジョージア工科大学とノースウェスタン大学が NSF の支援を受けて CSET(Centre for Surface Engineering and Technology)として基礎から応用までの広い範囲をカバーしている。耐熱材料では、1700℃級ガスタービン開発として DOE の High Efficiency Engines and Turbines のプログラムにより耐熱材料の開発を進めている。高強度軽量材料では、軽金属メジャー企業を有し、航空・宇宙・防衛産業において研究開発から産業化まで優位性を保っている。また、セルロースナノファイバーの研究開発も中心的存在である。

<欧州>

エネルギー供給、エネルギーネットワーク、エネルギー利用の 3 区分(31 研究領域)のほとんどにおいて、基礎・応用研究は、他国に比較して優位にある。

世界トップクラスに位置する技術として、エネルギー供給区分では、資源開発、核融合炉、原子力安全と使用済燃料の処理技術、結晶 Si 系の太陽光発電、洋上風力発電、地熱発電、バイオマスの燃焼とガス化がある。

エネルギーネットワーク区分では、エネルギーシステム評価技術、分散協調型エネルギーマネジメントシステム (EMS)、直流送配電・超電導送配電技術、パワーエレクトロニクス、蓄電デバイス技術、蓄熱技術、エネルギーキャリア技術がある。

エネルギー利用区分では、ZEB (ゼロエネルギービル)、断熱・遮熱技術、高温ヒートポンプ、触媒技術、随伴水・汚染水の分離技術、希少金属の分離技術、エンジン燃焼、燃焼技術、トライボロジー技術、耐熱材料技術、繊維強化プラスチック (FRP)、炭素繊維複合材料 (CFRP)、セルロースナノファイバーなどの高強度軽量材料がある。

これらの技術優位性に貢献する国は、主に英仏独であるが、それ以外の国では、アイスランド、イタリアなどでの地熱発電、再生可能エネルギーに関心が高いオランダ、ベルギー、ノルウェーが太陽光発電技術で研究を進めており、ヒートポンプ技術では、デンマークが貢献している。高強度軽量材料のセルロースナノファイバーでは森林国のフィンランド、スウェーデンが積極的に研究を進めている。

<ドイツ>

エネルギー供給区分では、太陽光発電、風力発電、バイオマスなどの領域で、日米中との比較で高い研究開発レベルを維持している。太陽光発電領域では、フラウンホーファー研究所を中核に、結晶 Si 系の要素技術や CIS 太陽電池、ペロブスカイト太陽電池等の基礎研究や集光型太陽電池モジュール開発など、非常に高い研究水準を維持している。風力発電では、将来的な風車設計技術確立に向けた風車後流や乱流に関する研究などフレームワーク計画（FP）の多様な研究開発プロジェクトを分担実施しつつ、積極的に洋上風力の研究開発も進めており、シーメンスなどの有力なプレーヤーが実用化につなげている。バイオマス領域では、中・小型バイオマスガス化・発電（熱電併給）プロセスの開発で優位となっており、Burkhardt 社が開発した小型のガス化発電システムはその好例である。バイオリファイナリーでは BASF が酵素やバイオ化学品の実用化研究を拡大している。

エネルギーネットワーク区分では、エネルギーシステム評価、分散協調型エネルギーマネジメントシステム、直流・超電導送配電、パワエレ、蓄電デバイス、蓄熱などの領域において強みがある。エネルギーシステム評価では、PIK（Potsdam Institute for Climate Impact Research）が事務局となり、世界の主要な気候変動の統合評価を目的としたエネルギーモデル EU プロジェクトを牽引している。分散協調型エネルギーマネジメントシステムでは、再生可能エネルギー導入規模が大きいドイツが太陽電池や蓄電池のインバータに有効・無効電力出力の自立制御機能を持たせるスマートインバーター化を進行させている。直流・超電導送配電では、エッセンで運転が始まった 1km 交流超電導送電ケーブルシステムの運転状況・実績に、大都市域低圧交流送電の超電導化の有効性の観点から注目が集まっている。パワエレでは、インフィニオンテクノロジーズが中心となって産学コンソーシアム EPPL（Enhanced Power Pilot Line）を構築し、300mm ウェハに基づく次世代パワー半導体開発パイロットライン製造プロジェクトなどを推進している。蓄電デバイスでは、ドイツが EV および車載用蓄電池の分野で国内企業を世界トップ水準に引き上げることを目指しており、教育研究省(BMBF)の資金により「イノベーション連合リチウムイオン電池 2015」などの研究プロジェクトを次々と立ち上げ、基礎研究、実用化研究に力を入れている。蓄熱では、ドイツ航空宇宙研究所を筆頭に、硝酸塩系潜熱蓄熱材を使用した集光型太陽熱発電向けの中温潜熱蓄熱システムの開発を進めている。

エネルギー利用区分では、照明・ディスプレイ、熱再生利用、触媒、エンジン燃焼、高強度軽量材料利用などの領域で、優位性がある。照明・ディスプレイでは、フレキシブル有機 EL パネルについて BMBF が後押しして、フラウンホーファー研究所を中核にフレキシブル化の開発検討を加速している。熱再生利用では、太陽熱利用、コジェネレーションシステムの導入が推進されており、熱輸送に関する応用研究・開発も進んでいる。ドイツには日本と同様、トップクラスの圧縮機メーカーがあり、ヒートポンプ機器の研究開発は基礎から応用ま

で世界トップレベルである。触媒では、基礎表面科学から実用触媒まで幅広い基礎研究の基盤を有していることが特長である。余剰電力と二酸化炭素からメタンを作り都市ガスへ導入する技術を開発する SolarFuel プロジェクトや再生可能エネルギーからメタンへの転換触媒技術実用化の Power to Gas プロジェクトなど進めている。エンジン燃焼では、ドイツにおける全ての自動車関連企業とアーヘン工科大など有力大学が一体となった研究を実施している。高強度軽量材料利用では、BMW 社が、世界で初めて CFRP（三菱レーヨン製）を車体の主要骨格に採用した電気自動車「i3」を一般向けに発売している。

<英国>

エネルギー供給区分では、火力発電において、IGCC および CCS の技術実証に向けた研究開発に注力している。太陽光発電では、オックスフォード大学のペロブスカイト太陽電池の固体化セルの研究開発が先陣を切っている。風力発電では、風車・タービン設計や風洞試験などの基礎研究、ケーブル敷設、発電量予測評価、浮体式洋上風力発電の実証プロジェクトなど、各成熟段階において先駆的な位置づけにある。

エネルギーネットワーク区分では、エネルギーキャリアとして、再生可能エネルギーからの水素製造に関する実証実験 The PURE Project が推進中である。

エネルギー利用区分では、ケンブリッジ大学やリーズ大学など複数の大学がリードしているグリーン・トライボロジーについては、今後の研究開発動向に注意すべきである。また、分離技術として、BP の水処理技術や海底油田開発が注目される。

<フランス>

エネルギー供給区分においては、電源の 7 割を占める原子力関連において世界の研究開発をリードしている。特に新型原子炉では、ナトリウム冷却高速炉 ASTRID プロジェクトや欧州を中心に進められているガス冷却高速炉 ALLEGRO の研究開発を推進している。また、原子力安全分野では、確率論的リスク評価に基づくシステム設計においても先駆的な役割を果たしている。また核融合炉では国際プロジェクトの ITER 計画を主導している他、最先端レベルのレーザ核融合研究施設 LMJ が建設中である。太陽光発電では、太陽エネルギー国立研究所（INES）の結晶 Si 系太陽電池の要素技術研究が強みを見せる。

エネルギーネットワーク区分では、蓄電デバイス領域のスーパーキャパシタにおいてフランスが中心となり欧州のデバイス開発を進めている。エネルギーキャリアとして再生可能エネルギーから水素を製造する実証実験 Vignola が推進中である。分散型エネルギーマネジメントシステムにおいては、スマートグリッド推進の先進的な動きとして、再生可能エネルギーの系統連係や出力予測、電力貯蔵、デマンドレスポンスなどの技術実証を行う ENRpool プロジェクトや EDF スマートグリッドリヨンプロジェクトなどに注目しておく必要がある。

エネルギー利用区分では、燃料電池の PtCo 合金およびカーボンアロイ触媒など、大学や原子力・代替エネルギー庁（CEA）による材料開発に注目が集まっている。磁石研究分野において、欧州で中心的役割を果たしてきている。

<中国>

エネルギー供給区分では、火力発電では、高効率化・低炭素化を目指し、A-USC、IGCC、国産ガス化炉の技術開発を積極的に進めている。新型原子炉では、高温ガス炉の実証炉を建設中であり、2017年に建設完了予定である。核融合炉では、国際熱核融合実験炉 ITER の次段階に相当する核融合工学試験炉の建設を中国政府に提案中であり、その設計及び開発が進行中である。さらに、原子力安全では、リスクやシビアアクシデントマネジメントなどに関する研究に、国家として積極的に投資している。

エネルギーネットワーク区分では、キャパシタ技術において、車載用蓄電池の研究が盛んである。マーケットの拡大にあわせ、電気二重層キャパシタの製造会社が増えている。

エネルギー利用区分においては、スマートビル・ハウスの普及を政策的精力的に進めており、スマートシティプロジェクトは大連など多数行われている。断熱・遮熱・調光では、長寿命・低コスト化な真空断熱材の研究が行われている。また、高性能低放射ガラス等の開発素材の安定生産と大規模化への移行を進めており、低製造コスト・高性能オンラインコーティングを目的とした産業化への支援が行われている。熱再生利用では、熱交換技術において民間企業での研究開発は大きく進んでいる。新規建築への太陽熱温水器設置が義務付けられており、関連して熱輸送に関する応用研究・開発も進んでいる。触媒では、石炭由来の合成ガス経由での燃料油製造（フィッシャートロプシュ合成）について優位性をもち、バイオマス変換触媒の研究開発が盛んである。分離では、希少金属の分離技術に関して、自国のみならず、東南アジアやアフリカを中心に、数多くの新規選鉱プロセスを開発しているほか、2次資源利用の分野においても新規炉等を開発している。

<韓国>

エネルギー供給区分では、基礎研究、応用研究の全般に渡って他国と比較して強みは見られないが、ペロブスカイト太陽電池の研究開発では世界のトップレベルを走っており、韓国化学研究所(KRICT)が世界最高変換効率を達成している。また、核融合原型炉 K-DEMO の概念設計が開始されている点が特徴である。

エネルギーネットワーク区分では、リチウムイオン電池についてもサムソン、LG を中心に応用開発に関する実力は非常に高い。低コスト化技術も高く、シェアが拡大している。近年、政府として電池材料の国産化にも力を入れている。また、超電導ケーブルにおいても2016年に入り Y 系線材の価格が、Bi 系と同等かそれ以下を実現したとの報道もある。済州島では交流 1km 及び直流 500m ケーブルを完成させ、より長いケーブルプロジェクトの検討が進んでいる他、韓国電力は重要な技術開発項目の一つとして超電導送電を取り上げている。

エネルギー利用区分では、有機 EL 材料や有機 EL ディスプレイ、量子ドットディスプレイについてもサムソンや LG が国内外の大学に資金を出し、政府も相当量の資金を拠出し、精力的に研究開発に取り組んでおり、世界でトップを走っている。

（2）研究開発の動向（3章の領域別ハイライト）

1. エネルギー資源開発技術

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	◎	→	◎	→	○	→	△	→
応用	○	→	◎	→	◎	→	○	→	△	→

埋蔵量へのアクセスが縮小する環境下に置かれた国際石油資本は、石油開発の対象を地下から採り出しやすい「在来型」から採り出し難い「非在来型」の油や天然ガスにシフトしている。このような近年の石油開発の環境の変化が、シェールガスを含む「非在来型の石油や天然ガス」の世界的な開発を後押ししている。将来の油価が予想できないことが資源開発の判断を難しくしているが、採掘技術自体はメタンハイドレートを除けば、確立済みといえる。

採掘技術は、その国の資源量の多寡、石油採掘の歴史に大きく依存し、欧米が強みを有する。

メタンハイドレートの商業的開発には、メタンガスの産出に伴うメタンハイドレート賦存層内の砂の動きを、岩石力学の見地から如何に制御するかが課題となる。日本周辺海域における賦存量の正確な把握とともに、海底下に賦存するメタンハイドレートの経済的な生産技術の確立が急務となっている。

2. 火力発電

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	↑	◎	→	◎	→	○	→	○	→
応用	◎	↑	◎	→	◎	→	◎	↑	○	→

石炭火力発電（ボイラー－蒸気タービンによる発電）の重要な機器である蒸気タービン技術は100年以上にわたって営々と技術の改良がなされ、ガスタービン技術は、1980年代より実用化されてきた。石炭火力発電は、更なる発電効率向上を目指し、蒸気温度を700℃とする先進超々臨界圧(A-USC)プロジェクト [蒸気圧約35MPa、発電効率46～48%(送電端、高位発熱量基準)、CO₂排出原単位約700g/kWh]や、石炭ガスを利用するガスタービン－蒸気タービンダブル複合発電 [IGCC、46～50%、約650g/kWh]、燃料電池を組み合わせたトリプル複合発電 [IGFC、2025年度頃までの目標、発電効率55%、CO₂排出原単位約590g/kWh、量産後従来機並の発電単価を実現] などの研究開発が、天然ガス火力発電についても、一層の発電効率向上を目指し、ガスタービン入口温度を1700℃級とするダブル複合発電 [GTCC、約57%、約310g/kWh] や燃料電池を組み合わせたトリプル複合発電 [GTFC、2025年度頃までの目標、発電効率63%、CO₂排出原単位約280g/kWh (40万kW級相当)、量産後従来機並の発電単価] などの研究開発が、世界で進められている。

日本は、石炭火力発電、天然ガス火力発電とも、基礎研究、応用研究・開発で、トップレベルを維持し、欧米中に比して一日の長を有している。米国では、エネルギー省

(DOE)のサポートにより、大学・研究機関における基礎研究や GE による応用研究は、幅広い分野で高いレベルにある。欧州では、大学・研究機関において幅広い基礎研究が行われ、例えば再生可能エネルギーの変動に対応する予備力機能向上の研究などが進められている。中国は日本からの技術導入により超々臨界圧プラントの国産化を計り、技術輸出も加速させている。韓国は産官学連携による石炭燃焼・ガス化研究拠点整備を進め基礎研究を継続的に行っている。

火力発電機器市場動向をみると、特にアジア地域における蒸気タービン、ボイラ市場では中国発電システムメーカーのシェアが、2000 年代後半以降大きくなっている。上海電気、東方電気、ハルビン電気の中国重電メーカ 3 社は、中国国内の高シェアはもとより、東南アジアやインドにおいても、2001 年以降の累計で 4 割前後のシェアを占めるまでになっている。一方、ガスタービンでは、GE、Siemens、MHPS(三菱日立パワーシステムズ株式会社)の 3 つのグループが世界市場を独占しているが、MHPS のシェアは漸減の傾向である。

今後、高温化に向けた耐熱材料技術や燃料電池との組み合わせによる高効率化技術、再生可能エネルギーとの協調制御型火力発電技術などの研究開発が注目される。協調制御型火力発電技術の科学技術的課題は、①急激な過渡現象に対応するガスタービン空力制御、燃焼制御技術、②中・低負荷帯におけるガス、微粉炭着火・安定燃焼維持技術、③過渡応答特性予測評価に用いる非定常熱流動・燃焼シミュレーション技術などである。

3. CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage)

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	○	→	○	→	○	→	△	→
応用	◎	→	◎	→	△	↘	○	→	△	→

1991 年、化石燃料使用で排出される GHG の削減に関し、CCS に焦点を置いた国際共同研究プログラム「IEAGHG R&D プログラム (IEAGHG)」が、技術が果たし得る役割に関する情報提供を目的に創設された。メンバー国は日本を含む 15 か国と EU、OPEC であり、14 の多国籍企業がスポンサーとなっている。CCUS は火力発電からの CO₂ 排出量をゼロに近づける切り札となり得るとの位置付けで、長期的な視点で戦略的に技術開発が進められている。米国、カナダ、中国、韓国、ペルシャ湾岸諸国、欧州（英国、スペイン、オランダ）、ノルウェーで大規模な R&D および導入・展開活動が進められ、オーストラリア、ドイツは大規模 R&D を行ってきたが、導入・展開は停滞している。ブラジル、メキシコでは大規模な R&D、インド、南アフリカでも R&D プログラムが進められている。

CCUS を構成する技術は、分離・回収、輸送、貯留、モニタリング、利用技術で、近年、世界では、分離・回収については従来の燃焼後回収技術だけでなく燃焼前回収や酸素燃焼回収技術などの研究開発が、CO₂ 利用については回収した CO₂ を利用し石油代替燃料や化学原料などの有価物を生産する研究開発が進められている。

日本は、燃焼後回収システムの化学吸収法で世界的リーダーであり、日本企業が独自

のプロセスを開発し、基礎研究、応用研究・開発でトップレベルを維持している。産総研は、CO₂ 分離膜の基礎研究として、安価な材料(ポリフェニレンオキシド)から優れた分離性能と柔軟性を持つ新規中空糸炭素膜を開発し、低コストで破損しにくい膜モジュールの開発に世界で初めて成功している。米国では、基礎研究でエネルギー省が燃焼前回収技術開発を支援、応用研究で商用化にむけての実証試験を行っており高いレベルにある。欧州では、かつて多くの CCS プロジェクトが計画され世界をリードしていたものの、経済危機や CO₂ 取引価格低下により停滞傾向にある。中国は原油増進回収(EOR)を想定した CCS の基礎研究と、化学品生産などの応用研究・開発の両方を進めている。

今後の研究開発については、CO₂ 回収プロセスでは膜法などの分離回収手法研究が、CO₂ 地中隔離プロセスでは CO₂ 注入後のモニタリングや CO₂ 漏洩検知に関する研究が、CO₂ 有効利用については豊田中央研究所らの CO₂ から化学原料を製造する人工光合成などの研究が注目される。科学技術的課題としては、高効率な GHG 分離膜技術や、従来方法とは大きく原理が異なる、回収エネルギー低減が期待できる革新的な CO₂ 分離技術などが挙げられる。

CCS は地球温暖化対策の重要な一方策として認知され、かつ CO₂ 回収・貯留の要素技術としては確立しているものの、外部不経済性から、市場原理だけでの導入を見込むことができない。現在、事業者へのコスト・リスク負担が重く、普及に至っていない状況にあり、研究開発意欲を減退させない施策が必要である。回収 CO₂ の有効利用に関しても、研究開発の促進に加えて、回収 CO₂ の有効利用のインセンティブを与える施策を行っていく必要がある。

4. 新型原子炉

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	△	→	△	→	○	→	○	↗	△	→
応用	△	↘	○	→	○	↗	△	↗	△	→
	ロシア		インド							
	現状	動向	現状	動向						
基礎	△	→	△	→						
応用	◎	↗	○	↗						

原子炉の歴史は、1950 年代から 1960 年代前半に運転を開始した初期の原型炉である第 1 世代炉、1960 年代後半から 1990 年代前半に建設された商業用原子炉である第 2 世代炉を経て、現在、先進的な安全方策等を取り入れた次世代軽水炉（第 3 世代+）の技術が確立されつつある。米国エネルギー省より 2030 年頃からの実用化を目指して、安全性や経済性に優れた第 4 世代原子炉の研究開発が提唱され、第 4 世代原子力システムフォーラム（GIF：Generation-IV International Forum）の枠組みが作られた。第 4 世代炉には、ナトリウム冷却高速炉、ガス冷却高速炉、鉛冷却高速炉、超高温ガス冷却炉、超臨界圧水冷却炉、熔融塩炉の 6 炉型が選定されている。日本は熔融塩炉以外の研究開

発に携わっている。

高度の安全性、持続可能性、良好な経済性等を開発目標とした第4世代炉の中でもナトリウム冷却高速炉と高温ガス炉は、もっとも実用化に近いと考えられている。ナトリウム冷却高速炉は、フランス、ロシア、インド、中国、韓国およびEUは積極的に研究開発を進めている。フランスは、実証炉まで開発を進めた。ロシアでは、商業炉まで進んでいる。中国およびインドも実験炉の建設・運転に達している。高温ガス炉は、米国において原子力2010プログラムやNGNPプログラムなどを発表され、水素利用の検討に着手している。中国では実験炉を建設し、2003年に定格運転を達成している。清華大学による実験炉HTR-10での知見を踏まえた実証炉を建設中であり、2017年に建設完了予定である。英国の民間企業は中国と高温ガス炉協力に関する覚書を2016年に締結した。また、インドネシアでも高温ガス炉導入が検討されており、実験炉の基本設計はロシアが2015年に落札している。

日本には、ナトリウム冷却高速炉の実験炉「常陽」と原型炉「もんじゅ」がある。2016年9月、「もんじゅ」については、高速炉開発の方針を抜本的に見直し、廃炉を含めて検討することとなった。高温ガス炉については、縮小しているものの開発は継続している。

今後の課題としては、ナトリウム冷却高速炉についての安全性と信頼性を向上させる技術開発、コスト低減のための革新技術のデータ取得が挙げられる。

5. 核融合炉

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	○	↘	○	→	○	↑	○	→
応用	◎	→	◎	→	◎	↑	◎	↑	○	→

核融合を起こすための方式は、磁場閉じ込め方式と慣性閉じ込め方式がある。1968年、ソ連の考案した「トカマク」と呼ばれる磁場閉じ込め方式による実験成功を機に核融合研究の主流はトカマク方式となっている。フランスに建設中の国際熱核融合実験炉（ITER）は、このトカマク方式である。ITERには日欧露米中韓印の7カ国が参加している。ITERは2025年の完成後、実燃料を使って50万キロワットの核融合出力を300-500秒間持続させる計画である。ITERでは物納方式で構成機器が参加各極で分担製作・納入を行い、ITER国際核エネルギー機構がシステムとして統合し、組み上げることになっている。日本の調達分担は、超電導コイル、中性粒子ビーム加熱装置、電子サイクロトロン加熱装置、ダイバータ、遠隔保守ロボット等の先端機器であり、量子科学技術研究開発機構の管理の下、製作している。

一方、日本国内では、トカマク方式に無い特徴を持つ核融合炉の選択肢を拡げる観点から、磁場閉じ込め方式の一種であるヘリカル方式の研究及び慣性閉じ込め方式の一種であるレーザー方式の研究が学術研究に重点を置いて進められている。ヘリカル方式では、核融合科学研究所において大型ヘリカル装置LHDでの実験が1998年から行われている。また、閉じ込め原理の全く異なるレーザー方式では、大阪大学が独自に開発した高出力レーザーによる「高速点火方式」の実験が進められている。

原型炉等の設計は、ITER と並行して世界各国で進められている。欧州は、欧州内の協力体制 EUROfusion の下、日本とほぼ同じスケジュールで原型炉開発を進めており、原型炉の概念設計と要素技術の研究開発が行われている。中国は、ITER と同様に核燃焼を行う工学試験炉 CFETR(Chinese Fusion Engineering Test Reactor)を計画中で、既に詳細設計を進めている段階であり、2020 年には建設判断、2030 年に建設完了のスケジュールとなっている。韓国では、原型炉に向けた技術開発に先んじて原型炉 K-DEMO の設計が開始されている。

今後の課題として、ITER の次段階となる原型炉での厳しい中性子照射に耐える材料及び炉内機器の規格基準の確立が求められる。

6. 原子力安全

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	↑	◎	→	◎	→	○	↑	○	→
応用	◎	↑	◎	↑	◎	↑	○	↑	○	↑

1979 年に発生した米国のスリーマイルアイランド原発事故、1986 年に発生したソ連のチェルノブイリ原発事故、2011 年に発生した福島原発事故を経て、原子力における過酷事故対策の取り組みが積極的に行われてきたため、米国、欧州では、この分野の研究開発が進んでいる。スリーマイルアイランド原発事故は、軽水炉でもシビアアクシデントが起こり得るとの認識のもと、シビアアクシデント対策の充実のきっかけになった。シビアアクシデントに関しては、Perdue 大学、Wisconsin 大学などで基礎的な研究を実施している。また、チェルノブイリ原発事故は、軽水炉における過酷事故対策の取り組みをさらに加速させる要因となった。特に、欧州においては、過酷事故時に格納容器内の圧力を下げるために使用されるフィルタードベントの導入が進んだ。AREVA 社（フランス）などで格納容器フィルターベント、水素再結合器などが実用化されている。

日本では、国内で発生した福島原発事故を受けて、原子力規制委員会が新たに発足するとともに、新たに規制基準が策定された。この基準では、決定論的な手法のみならず、確率論的リスク評価により、過酷事故対策を行うことを求めている。また、過酷事故発生時の対応策に関する検討や、設備面では過酷事故時のプラント監視のための計装系についての開発が進んでいる。さらに、過酷事故進展解析の研究も進められている。

国際研究協力プロジェクトでは、OECD/NEA（Nuclear Energy Agency）の主催により、福島原発事故の燃料デブリの取り出しの準備として、シビアアクシデント解析コードの改良、および事故進展と現在の炉心状況の解析のための共同研究計画（BSAF 計画、参加国：フランス、ドイツ、日本、韓国、ロシア、スペイン、スイス、米国。Phase2 よりカナダ、中国、フィンランドが加わった）が進められている。Phase1 では各国で利用可能な総合解析コードを用いた解析が実施され、Phase 2 では格納容器外での核分裂生成物の挙動評価、事故後最大 3 週間程度までのプラントの状態評価を目的とした解析がエネルギー総合工学研究所（IAE）をホスト機関として実施されつつある。

日本では、実施すべき原子力安全研究の網羅性や緊急度・重要度を明確化し、重畳を

排して効率的な開発を進めていく観点から、総合資源エネルギー調査会・原子力小委員会のもと「自主的安全性向上・技術・人材ワーキンググループ」が設置され、日本原子力学会「安全対策高度化技術検討」特別専門委員会との連携のもとで「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」が報告されている。このロードマップでは、今後重点的に開発を進めていくべき分野が検討されており、定期的に更新が実施される予定である。

7. 使用済燃料等の処理処分・廃止措置

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	○	→	○	→	○	↑	○	→
応用	○	↑	○	↑	◎	↑	△	→	○	↑

放射性廃棄物の問題は、1950年代の原子力利用の黎明期から、その重要性が認識されていた。当初は、地上や海洋での処分が検討されたが、地上施設における高レベル廃液の漏洩事故や海洋投棄を禁止する国際条約（ロンドン条約）の制定を受けて、米国や欧州において、地層処分が技術的に実現性の高いオプションとして推奨されるようになり、その処分概念の具体化が進められた。

フィンランドでは、2015年11月、処分実施主体のポシヴァ社に処分場の建設許可を発給され、高レベル放射性廃棄物の地層処分場サイトが世界で初めて最終決定された。2020年代初めには、処分を開始する計画である。米国では、ユッカマウンテン計画を中止し、特別委員会（ブルーリボン委員会）で放射性廃棄物管理を含むバックエンド対策の代替案が検討された。ここで、大深度ボーリング孔の活用可能性を研究することが勧告され、これを受け、DOEが超深孔処分のフィールド試験の計画を進めているが、フィールド試験候補地の立地に苦戦している。

日本では高レベル放射性廃棄物処分の実施主体である原子力発電環境整備機構が、高レベル廃棄物を地層処分することを想定し、処分施設建設候補地の公募を続けているが、現時点で候補地の応募はなく、社会的受容性の面において課題が残っている。一方で、放射性廃棄物の処分に係る環境負荷の低減や、処分の効率化を目指すために、分離・変換技術の研究開発が、欧米を中心に各国で進められてきた。長寿命放射性核種の核変換は発電用原子炉サイクルを用いて核変換を行う方法と、加速器駆動システムのような核変換に最適化された専用システムを用いる階層型サイクルに基づく方法の2種類に大別され、それぞれに適する分離技術及び核変換技術の研究開発が並行して進められている。日本では、高レベル放射性廃棄物の低減を目指した分離変換技術の研究開発として、革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）において「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」のプロジェクトが進められている。

今後、日本では、福島第一原発における燃料デブリの管理・処分方法の検討、処分候補地に対する具体的な安全評価に関する研究開発を行う必要がある。また、分離変換技術に関しては、分離技術・核変換技術の開発に加え、有効性を判断するために利用を想定し、既存の概念と異なる処分概念の構築やそれに基づく基礎的な安全評価が、必要である。

8. 太陽光発電

		日本		米国		欧州		中国		韓国	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
結晶Si太陽電池	基礎	○	↗	○	→	◎	→	△	↗	△	↘
	応用	◎	→	○	↗	◎	→	○	↗	○	↘
化合物薄膜太陽電池	基礎	◎	↗	◎	↗	◎	↗	△	→	△	→
	応用	◎	↗	◎	↗	△	→	△	→	×	→
有機薄膜型太陽電池	基礎	○	↘	◎	→	○	→	○	↗	○	→
	応用	◎	→	○	→	◎	→	△	→	△	→
超高効率集光型太陽電池	基礎	◎	↗	◎	↗	◎	↗	×	→	×	→
	応用	◎	↗	○	↘	◎	↗	△	→	×	→
ペロブスカイト型太陽電池	基礎	○	↗	○	→	◎	↗	○	↗	◎	↗
	応用	△	→	△	→	○	↗	—	—	△	→
太陽光発電システム	基礎	○	↗	◎	→	◎	↗	△	→	△	→
	応用	◎	↗	○	→	○	↗	△	→	△	→

シリコン太陽電池は1954年に、アメリカのベル電話研究所で発明され、1958年に世界で初めて実用化されたが、高価であったため、当初は太陽電池でなければ電力を供給できない場所で使われた。近年、結晶シリコン（セルで25%程度）、薄膜シリコン、CIGS [Cu(InGa)Se₂]（セルで22%程度）、CdTe（単結晶セルで効率約20%）、集光型太陽電池（超高効率セルで約46%、モジュールで約35%、システムで約30%）の実用化が進み、より低コスト、高効率を目指した開発が産学連携により行われてきた。太陽電池モジュールの価格は順調に低下し、大規模なメガソーラから中規模なシステムでは、システム価格に占めるモジュール価格の割合は3～4割程度になった。

日本はシリコン、CIGS、GaAs系全てに高い技術を持っているが、欧州、米国も高い技術開発力を維持しており、実用技術分野では研究機関に試作生産ラインを整備し、新材料や設備開発などの周辺産業を含む技術革新に貢献している。日本では、結晶シリコン太陽電池は企業主体で研究開発し高い技術水準を維持している。CIGS太陽電池では企業が高度な製造技術を有し、これを支える形で大学・国立研究所が学術的知見の蓄積・提供と新たな高効率化要素技術の開発を行っており、世界最高水準の技術を有している。多接合や量子ドットといった超高効率太陽電池などの次世代技術への研究開発も米国、日本、欧州で進められている。日本における集光型太陽光発電システムなどの超高効率太陽電池・材料、集光モジュール、およびシステムに関する研究開発は活発であり、ヨーロッパ諸国との連携を強化している。2015年7月より、超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発がNEDOプロジェクトとして開始され、超高効率太陽電池モジュールが開発されている。

世界市場動向をみると、2015年の太陽電池セル（発電素子）の世界出荷量は前年比29%増の50.8GWで、上位10メーカーの総出荷量が全体の53%を占め、中国系メーカーが多くなっている。2015年の太陽電池セル出荷量の第1位は、2年連続中国トリナ・ソーラー（Trina Solar）で、出荷量は3.63GW、世界シェアは7%であった。第2位は、中国JAソーラー（JA Solar）で、出荷量は3.62GW、トリナ・ソーラーとの差はわずか14MW

であった。日本メーカは、2014年に京セラがトップ10入りしたが、2015年では日本メーカはトップ10入りできなかった。上記のように、先進諸国の太陽電池企業の多くは中国、韓国など新興国やCdTe太陽電池との低コスト競争により停滞傾向にあり、産業の基幹である結晶シリコン系太陽電池の生産はすでに新興国に追い越された。性能と信頼性、ブランド面での日本製品の優位性の維持に不安が残る。

新たな注目動向として、日本発の革新的太陽電池であるペロブスカイト太陽電池については、京都大学が、20%を超える光電変換特性が再現よく得られるペロブスカイト薄膜結晶成膜技術を確立し、韓国化学技術研究所(KRICT)は、小面積(4mm角)で22.1%の変換効率を達成している。また、スイスのローザンヌ工科大学では、透明導電膜の表面を緻密な酸化スズでピンホール無く覆うことで20%を超える認証値を得ている。

今後のさらなる太陽光発電普及拡大と低価格化には、最もシェアの大きい結晶シリコン系においてセルの高効率化を含めたモジュールの高効率化により、整地・架台・配線・施工等のBOS(Balance Of System)コストあたりの設置量を増やすことが求められる。これは、国際的に普及が進む低価格結晶シリコン系モジュールとの差別化においても重要な方向性となる。また太陽光発電システムとしての利用技術・標準化・規格化技術なども普及拡大につれ重要度を増している。ペロブスカイト太陽電池については、鉛を使用している為、製造や廃棄に特別な管理が必要となり製造コスト等の上昇につながると共に、環境上のリスクも大きく、安全面においても実用化への大きな障害となっている。鉛フリー化が課題となっている。

9. 風力発電

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	◎	↗	◎	→	△	→	△	↘
応用	◎	↗	○	↗	◎	→	△	→	△	↘

風車による発電は1897年に英国と米国で独立して誕生した。1941～1945年には米国のGrandpa's Knob風車(1250kW)が、世界で初めて交流発電機を用いて送電網に連系した。日本では1938年に木製2～3枚翼、出力200～300W、簡便・剛健で自家発電に適する国産風車が北海道稚内に設置され農村電化に役立ったが、商用電力網の整備につれ、水力発電や火力発電との競争に敗れて、一旦、風力発電は下火になった。1970年代の2度のオイルショックと、その後の1980年代の米国カリフォルニアの風力発電ブームが転機になり、風車の自動運転を可能とする電気制御技術と、軽くて丈夫な複合材料(GFRP：ガラス繊維強化プラスチック)製ブレードを安価に量産する石油化学技術が実用化された。

世界の風力発電の導入量は2015年末で、累計433GW(1GW=百万kW)・約30万台、に達するが、日本の2015年までの累計導入量は3038MWで世界の0.70%、19位に低迷している。風力発電の普及拡大に向け、さらなる高効率化、低コスト化、特に、大型化、洋上化などに向けた技術開発や研究開発が世界で進められている。

日本は、乱流、浮体等分野基礎研究で成果を上げ、浮体式洋上風力発電実証の応用研

究・開発でトップレベルを維持している。米国は、2030年に米国の電力需要の30%を風力発電で賄う長期計画を発表し、エネルギー省のサポートにより、大学・研究機関が組織的に基礎研究を行い、幅広い分野で高いレベルにある。欧州では、大学・研究機関の連携が進み、10～20MW級の洋上風力発電開発を推進するなど、基礎研究や応用研究・開発においてトップレベルを維持している。中国は2020年までに風力発電250GW導入を目指す、現状新しい技術革新を伴ったプロジェクトなどは見当たらず自主開発力は弱い。

洋上風力発電設備機器市場では企業間のM&Aが急激に進みつつあり、SIEMENS、MHI-Vestas、GEの3極に統合される可能性が高い。それに伴い風車に関する応用技術開発はこれらの動向の影響を受けることが予想される。風車メーカーの2015年の世界市場シェアと日本市場の新規シェアをみると、従来はデンマークの風車メーカーVestasが1位を維持し、米国のGEがそれを追う展開だったが、2015年は中国市場好況を受けて中国Goldwindが初めて世界シェア1位を獲得した。なお、2016年にドイツSiemensがスペインGamesaを合併したため、次の世界シェア1位は合併後のSiemensになると予測されている。

最近の風力発電技術の研究開発のターゲットは洋上風力に向いており、大型の風力発電システムの開発がキーポイントとなる。洋上風力用等の大型風力発電で主力となる大出力ダイレクトドライブ同期発電機は、低速・大トルク・大型となるため、特に出力10MW以上で超電導発電機の導入可能性が、米国American Superconductor社等やNEDO事業で検討されている。また、電力系統との連系対応技術の開発も注目される。新規概念の風車としては、将来を目指すベンチャー企業により空中風車が研究開発されている。空中風車は、上空の高速風で効率良く発電可能で、建設工事とタワーが不要な利点がある。Googleが買収したMakani Power社はグライダー式の600kW機を米国で試験中、日本のSoftbankなどが出資したAltaeros社は気球式の30kW風車をアラスカで試験中である。

科学技術的課題としては、風車機器単体では発電コスト低減に向けた、翼等の性能向上、機器の長期信頼性・耐久性確保など、洋上風車ではこれらに加え、高圧送電を含む送電系統最適化や、洋上での設置コスト低減、メンテナンス性の向上、稼働率向上のための予防保全技術、長期保守に必要な運転情報・機器診断技術など、リスク評価では陸上、洋上といった設置環境の多様性と厳しい気象環境に対する資源環境リスク評価技術、運用・故障リスク評価技術開発などである。

大型風車を世界に販売するには、認証機関による型式認証取得（実際に風車を建てて発電量・電力品質・騒音・荷重等を計測する）が必須になっているが、日本には欧米のような公的な風力発電の試験サイトが無い、国産風車メーカーにとっては大きなハンディキャップになっている。風力発電事業を支えるオペレーション&メンテナンス要員の人材育成も、まだ組織だった仕組みが無く、大学・研究所などの高等教育機関における専門家の育成など、早急な整備が望まれている。

10. 地熱発電

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	↑	◎	↑	○	→	△	→	△	→
応用	◎	↑	◎	↑	◎	↑	△	→	△	→

地熱発電は、20世紀初頭に実用化された発電技術であるが、地球温暖化対策と天候や季節時間に左右されない供給安定性の観点から、地熱資源保有国を中心に、探査、掘削、次世代型の地熱発電システム開発が進められている。国際的な会議として、国際地熱協会（IGA）が組織化した世界地熱会議（WGC）が1995年から開催され、50ヶ国以上の地熱関係者による、地熱探査技術や掘削、発電技術などの議論がなされている。

日本は、フラッシュ発電タービンや、配管技術等で貢献しており、現在の世界の地熱用タービン製造の70%を日本の富士電機、三菱日立パワーシステムズ、東芝の3社が占め、坑口装置も世界の50%ほどのシェアがある。地熱蒸気タービンや小型バイナリー発電設備技術、スケール対策技術に加え、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）を中心に、各種センサや地震学の応用による革新的地下探査技術、高温掘削技術などの優れた要素技術を持つ。その一方で、バイナリー発電技術や坑内探査技術などは海外が強く、米国では、従来型と低温域で発電可能なバイナリー型の両方で基礎、応用研究ともに官学共同の研究を進めている。欧州は、アイスランド、トルコ、イタリアなどで設備容量を急激に増加させており、トルコでは地熱資源の特性に応じ、フラッシュサイクル方式とバイナリーサイクル方式を組み合わせた地熱複合サイクル発電システムを東芝と共同開発しており、今後の発電方式の主力となっていく可能性がある。また、アネスト岩田のオイルフリー熱媒循環小型バイナリーシステムやスケール対策プロジェクトにも注目が集まる。

世界的に有望地域の開発促進のためには、空中物理探査手法、地熱貯留層評価・管理技術、PDCビット開発、環境保全対策技術（硫化水素拡散予測など）、高傾斜掘削をふくむ掘削技術の開発が重要になる。発電側のシステム設計としては、熱電変換効率の高い熱機関システム開発、スケール付着対策、断熱材を含む安価な材料開発を進めるとともに、豪雪地帯の地熱カスケード利用技術や地熱増産システム（EGS発電）を恒久性の高い地熱利用システム技術に発展させる必要があり、地熱複合サイクル発電システムが今後の発電方式の主力となっていく可能性がある。また、無給油型スクロール膨張機を用いた高効率小型バイナリー発電システム、スケール対策などが今後のキーテクノロジーとなる。

今後の技術上の課題としては、掘削コストの低減や周囲への影響低減に関連する技術開発が必要になる。あわせて、日本においては、地熱発電の開発リードタイムを短縮するための許認可制度の導入、社会的合意獲得のための保険制度、固定買取価格制度の継続的な運用などの社会設計も望まれる。

11. バイオマス

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	→	◎	↑	◎	→	○	↑	○	→
応用	○	→	○	→	◎	→	○	↑	△	→

バイオマス燃焼発電技術は、石炭火力発電の技術として開発、実用化され、石炭－バイオマス混焼という形で 2000 年代くらいに普及した。木質バイオマス専焼発電は、2000 年代から実用化され、現在普及が進んでいる。バイオエタノール製造技術に関しては、技術自体はきわめて古く、オイルショックの時期に実用化した。とうもろこし残渣等を原料とするプロセス開発が 2000 年代以降米国において精力的に行われてきたが、同国政策目標（200 億ガロン、2022 年）を達成するのは困難な状況である。バイオマスの燃料転換技術については、微細藻類を利用した燃料油製造技術に関する研究、技術開発が世界的に活発である。バイオマスから化成品を製造するバイオリファイナリーは、2000 年くらいから研究開発が始まり、米国、EU、日本、中国等で展開されている。

日本は、熱化学変換に関する基礎研究活動は顕著ではないが、生化学ベースの転換利用に関する研究は活発である。ガス化＋FT 合成による液体燃料製造に関する研究や微細藻類利用による燃料製造の技術開発(NEDO 事業等)及びバイオリファイナリー研究などが産主体あるいは産学連携のもとに進められており、これらに関する要素技術は世界トップレベルにある。米国は、微細藻類を含む生化学ベースの燃料、化成品製造に関する基礎研究については先導的であり、研究者層も厚い。欧州は、国際機関 IEA Bioenergy における EU の研究者のプレゼンスは依然大きく、バイオマスの燃焼、ガス化に関しては最も経験を蓄積しており、この強みをベースとしたバイオリファイナリーのシステム化研究、システム設計ツール開発、反応設計への数値流体力学(CFD)シミュレーション導入と継続的技術の進展は、他よりも一歩進んでいる。中国は、従来から多い石炭転換利用の研究からのスムーズなシフトが見られ、研究人材は豊富である。微細藻類を始めとする生化学ベースのバイオマス研究は後発だが、活発化が顕著である。

注目動向として、日本のバイオリファイナリー関連プロジェクトでは、神戸大学が、細胞内の数百種類の化合物を網羅的に測定する技術を活用して、セルロース系バイオマスから多様な物質を高効率に作り出すための基盤技術を確立している。名古屋大学等は、バイオリファイナリー利用を目指した次世代型ソルガムの育種開発の研究を進めている。デンマーク工科大学では、太陽光由来電力の水電解による水素・酸素製造とバイオマスの酸素・水蒸気ガス化を組み合わせ、合成ガスあるいはこれに由来するメタン（合成ガス＋水素）、液体燃料の製造システムを提案している。オリジナルの提案は 2008 年だが、酸素を適用するガス化起点のバイオリファイナリーのオプションを太陽光との組み合わせによって提示した。

今後、バイオマス燃料、バイオリファイナリーについては、バイオマス由来の糖や低級有機酸等を起点（platform；C3～C6 化合物）とする化成品製造に関する基礎、プロセス研究なども着目される。技術課題としては、バイオマス燃焼（専焼、混焼）に関しては、技術のグローバル対応・先導の観点から、安定した高効率運転などの技術高度化

のための灰微粒子の生成、ファウリングの抑制・防止が、ガス化による合成ガス製造については、より低温での高性能ガス化技術開発などが挙げられる。

バイオマス利用は化石燃料と比較してコストが高いため、CO₂対策としての国の普及促進施策が必要である。すなわち、サプライチェーン全体への公平なインセンティブ付与や、逆に公平な費用負担の仕組み等の構築が必要である。国内では、森林資源の維持のため間伐材のバイオマス資源化、農業廃棄物の有効利用など国として推進していく必要がある。微細藻類利用によるバイオ燃料製造に関しては、まず、第三者の経済性評価を実施し、将来の技術実装可能性、燃料供給技術としての意義とインパクトを評価することが望ましい。

12. エネルギーシステム評価

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	◎	↑	◎	↑	○	↑	○	→
応用	○	→	◎	↑	◎	↑	○	↑	○	→

エネルギーに関する技術選択や政策立案は、世界的にも主要な政治的関心事となっており、環境適合性も含め科学的根拠に基づく透明性の高い定量的な議論の必要性が益々高まっている。エネルギーシステム評価は、このような世界や日本のエネルギーシステムが直面する新たな課題対応のために、最新の情報処理技術に基づく数理モデルならびにデータベースの構築であり、加えて、それらを活用したエネルギー環境政策立案に資する具体的な指針や一般的な論理の導出である。

この分野は欧米が進んでおり、注目されるプロジェクトとしては、米国 DOE の支援のもとでスタンフォード大の Energy Modeling Forum(EMF)、欧州では欧州委員会の資金援助による ADVANCE プロジェクトなどがある。日本では 2008 年の地球温暖化問題における中期目標計画として 2020 年までの GHG 排出削減目標値の検討がされている。最近では 2014 年の IPCC 第五次評価報告書に日欧米の研究チームによるモデルを用いたシナリオ評価や比較の成果が反映されている。中国では IEA が開発したモデルを活用して COP21 や国内の低炭素化に向けた計画の評価・分析が盛んになっている。

新しい技術動向としてはスマートグリッドに関連する研究開発から、エネルギーの需要の詳細なデータが得られつつあり、エネルギーにおける消費者行動の新たなモデル化の可能性がでてきている。

研究の課題としては検証作業が難しいことが挙げられる。また日本における人材面での課題としては、研究成果を社会へ還元する場がまだ少なく、博士学位を有する研究者数も多くなく、キャリアパスも政府関係の研究機関や大学などの少数ポストに限られるということが挙げられる。

13. 分散型EMS

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	→	◎	↑	◎	↑	○	↑	△	→
応用	◎	↑	◎	↑	◎	↑	○	→	△	→

再生エネルギーの大量導入時の系統での変動制御や、スマートメータ導入による消費電力の可視化、省エネルギー行動の誘発などに関する研究が、従来のインフラ老朽化対策、電力の供給信頼度の向上などに加えて盛んになっている。2000年代以降、欧米ならびにアジアの各国が、国をあげての研究開発戦略を構築し、スマートグリッドを中心とする成長戦略に基づき、実装段階に達してきている。供給信頼度を向上させる送電系統広域監視制御から需要家機器制御まで、電力系統のすべてのバリューチェーン（発電、送配電から電気利用まで）上に関わる研究プロジェクトが国内外で進行中である。

日本では、再生エネルギー大量導入に伴う広域での周波数調整や系統用蓄電池の導入など、最適な需給変動対策のポートフォリオの構築が求められる中、横浜市、豊田市、けいはんな、北九州市において2011年からNEDOにおいて、スマートコミュニティ実証事業が進められた。またJST CRESTの社会実装を見据えた分散協調型エネルギーマネジメントシステムの理論構築研究が推進され、欧米とのEMS研究連携が進められている他、電力消費データ分析に行動科学的知見を反映した実証試験も実施されている。

米国では社会での実用化が進行中の背景から、より実証なビッグデータ、機械学習などのスマート化の要素技術開発が、DOE、NSF ERCプログラムCURENT、FREEDMのもと、大学やIEEEにより活発に進められている。またテキサス州のデマンドレスポンスプログラムの開発、ハワイ・マウイ島のスマートコミュニティ・EV利用型バーチャルパワープラント（VPP）実証、カリフォルニア州のEMSサービス拡充や蓄電池の多目的運転実証、ニューヨーク州の住宅設置の太陽光発電と定置型蓄電池を活用VPP事業が多数実施されている。欧州では、欧州政策目標の実現を視野に、風力発電の大量連系のための系統安定化技術（パワエレ、HVDC、制御、予測技術など）、デマンドレスポンスモデル構築、蓄電池システムのビジネスモデル検証、VPPなどの研究が大学や産業界との連携により推進され、世界をリードしている。またアジア諸国ではスマートシティの実証プロジェクトが行われ、地域や都市スケールのエネルギーの有効活用の動きが見られる。中国では国家の支援を受けた基礎研究が推進されている。

今後の技術的課題としては、不確実性の伴う予測技術、ビッグデータ整備と利活用技術開発が挙げられる。また、日本は技術開発に加え、需要側の分散型エネルギーリソース活用を高めるため、エネルギービジネスのプレイヤーが参加可能な環境（リアルタイム市場、アンシラリーサービス市場など）の国際規格等を踏まえた整備が不可欠である。また、学が牽引・調整役となり、官による制度設計、規制改革のもと多様な企業が連携した産学官連携プラットフォーム型のEMS研究開発、エネルギー・ビッグデータ整備支援の推進が期待される。

14. 直流送配電・超電導送配電

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	○	→	○	↑	○	↑	○	↑
応用	○	→	○	→	◎	↑	○	↑	◎	↑

高温超電導の研究は基礎・工学両面とも 1986 年の IBM チューリッヒ研究所による銅酸化物高温超電導体の発見以降、一気に新しいフェーズに入った。超電導ケーブルに用いられる長尺高温超電導線材として、第一世代(1G)となるビスマス系線材（臨界温度：-110K）が住友電工社で、第二世代(2G)のイットリウム系線材（臨界温度：-90K）が米国 AMSC 社、日本のフジクラ社、古河電工社傘下の SuperPower 社で製造されており、これらがケーブル製作に用いられてきた。本格的な高温超電導ケーブルの試験は 2001 年に日本で始まり、ビスマス系超電導線は 2004 年に工業製品化され、超電導ケーブルについても研究所レベルではあるが 100m 長さの 3 芯一括型ビスマス系超電導ケーブルの実用性検証試験が実施された。2014 年の 4 月からドイツ、エッセン市では現在では世界最長の 1km 長超電導ケーブルの運転が始められた。さらに、これまでは交流ケーブル応用であったが、直流ケーブル応用開発がここ数年世界で開始されている。

日本は大学や国立研究開発法人を中心に新規超電導物質の探索、超電導現象の理解、高温超電導線の応用基礎物性の評価など継続して研究が進んでいるが、いくつかの大きなファンディングが終了し、ISTEC が解散するなど、国際的に優位といえる状況ではない。応用研究も鉄道軌電線を除くと、今までの実験装置で研究開発を続ける状況であり、より長いケーブルを作る計画はない。欧州では、上述のプロジェクトの他、ドイツとオランダの送電会社）である TenneT 社がオランダの大学の協力を得て、2-4km の地下超電導高電圧ケーブルプロジェクトを 2013 年から始めるなど、伝統的に強い。また、韓国では、韓国電力の最重要技術開発項目の一つとして超電導送電を取り上げている。そして、済州島では交流 1km 及び直流 500m ケーブルを完成させ、より長いケーブルプロジェクトの検討が進んでいる。2016 年に入り韓国ではイットリウム系線材の価格が安価になり、ビスマス系と同等かそれ以下になったとの報道もある。

超電導ケーブル損失の大部分が断熱 2 重管の熱侵入量であり、超電導ケーブルの実用化は、液体窒素温度領域における冷凍システムの効率向上がボトルネックとなっている。

今後再生可能エネルギーの普及と相まって直流送電への投資が急速に増大すると考えられる。

15. パワーエレクトロニクス

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	→	◎	→	◎	↑	○	→	△	→
応用	◎	↑	◎	→	◎	↑	△	↑	△	→

1980 年代には、デバイス構造の研究が盛んになり、現在も主役である電圧駆動型のパワー MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と、続いて、

IGBT（Insulated-Gate Bipolar Transistor：絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）が発明された。現在普及しているパワー半導体は材料（半導体）にシリコンを用いたものであるが、微細化技術の進展、ウェハ品質の向上、製造プロセスの低温化など新しい作製プロセスの導入やデバイス構造改良により、これまで 15 年でおよそ一桁のパワー密度の向上を実現させている。Si の材料定数の限界によるデバイス性能の限界が広く指摘されていることから、原理的に高耐圧化とスイッチのオン時の抵抗が小さい（低損失）の両立が可能な炭化シリコン（SiC）や窒化ガリウム（GaN）など禁止帯幅（バンドギャップ）の広い半導体を用いたパワー半導体の早期実用化が望まれている。SiC デバイスはモータ駆動などの高圧・大電流用途で有利であり、GaN デバイスはスイッチング電源などの低圧小型・高周波用途で有利である。

日本は現在の産業競争の中心である Si パワーデバイスは、特に高耐圧系は欧米と伍して優位な立場を維持している。伝統的に家電、産業機器、自動車・鉄道・電力へのパワーエレクトロニクス応用が強い。SIP で「次世代パワーエレクトロニクス」が 2014 年度から立ち上がり、SiC、GaN の基礎研究が進められるとともに、応用研究の成果が出始めてきている。米国では多数の大学にパワーエレクトロニクス研究センターが次々と設立されており、Si、ワイドギャップ半導体パワーデバイスを利用したさまざまなパワーエレクトロニクス技術の研究開発を企業も巻き込んで活発に展開している。特に新構造、新発想のデバイスは他国よりも多い。欧州では、材料からデバイスプロセス、実装、応用など垂直統合的に研究が進められている。国の研究機関が活発な研究を行っていることが特色と言える。Infineon、STMicro などが SiC パワーデバイスを活発に研究開発している。Infineon は Cree の SiC パワーデバイス部門を買収し、GaN-on-Si と合わせて全方位的な展開を図っている。ABB やジーメンスなどの欧州企業は直流送電や大規模風力発電に関連したパワーエレクトロニクス応用が伝統的に強い。

基礎物性の面では、いずれのワイドギャップ半導体も結晶の転位と欠陥の制御、表面・界面における課題が多く、過去の Si や GaAs 等で培われた結晶成長技術、表面・界面制御の知見や施策に学び、研究を進める必要がある。ダイヤモンドや Ga₂O₃ などの新規パワー半導体材料は、材料作製技術と合わせて、材料・電子物性評価、およびその応用を見据えた基礎基盤研究を進めていくことが重要である。日本においては、材料のみならず、インバータ実装技術、回路・制御技術、システム技術においても強化する必要がある。特にパワーエレクトロニクス回路・制御の大学研究者と電気電子工学の他分野の大学研究者あるいは企業の研究者・技術者との共同研究を積極的に推進することが求められる。

16. 蓄電デバイス

		日本		米国		欧州		中国		韓国	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
次世代・ポストリチウムイオン電池	基礎	◎	↑	◎	↑	◎	↑	○	↑	○	→
	応用	◎	→	△	↑	△	↑	○	↑	◎	↑
レドックスフロー電池	基礎	○	→	◎	↑	○	↑	△	↑	△	→
	応用	◎	→	◎	↑	○	↑	○	↑	△	→

スーパ ーキャ パシタ	基礎	○	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗	△	↘
	応用	○	→	○	→	○	↗	◎	↗	△	↘

ニッケル水素電池を越えるエネルギー密度を持つリチウムイオン電池は、1991年にソニー・エナジー・テックが世界で初めて量産化した。当時は、携帯電話、ノートパソコンなどに代表される小型電子機器への用途が主であったが、2000年頃から、自動車への応用に向けた開発が進められてきた。トヨタ自動車の「プリウス」が採用したニッケル水素蓄電池は 80Wh/kg 程度であるが、実用化されたリチウムイオン電池は、150～200Wh/kg という高い質量エネルギー密度を実現している。一方で、市販のリチウムイオン電池は現状の活物質の組み合わせで得られるエネルギー密度の限界に達しており、新しい材料の採用により高エネルギー密度化を図る必要がある。また、リチウムイオン電池は高温環境では冷却機構が必要となる他、可燃性の電解液を使用しているので、過充電時や短絡時に発火や破裂などの異常を起こす危険がある。

車載用蓄電池では、リチウムイオン電池の理論的限界を目指す次世代リチウムイオン電池（エネルギー密度 250～300Wh/kg に向けて、負極を Si、SiO、Si-炭素複合体、Li などに置き換える研究や新しい材料を用いた正極による高容量化が進められている。全固体電池、リチウム・空気電池、リチウム・硫黄電池、多価イオン電池などのポストリチウムイオン電池（エネルギー密度>500Wh/kg、革新型蓄電池とも呼ばれる）の開発が進められ、いずれも可能性試験の段階である。

日本は次世代リチウムイオン電池、ポストリチウムイオン電池ともに基礎研究ではトップレベルを維持し、応用研究・開発も大きな電池メーカーがない欧米に比して、一日の長を有している。中国は近年特に材料開発の分野での基礎研究が急速に進み、外国の企業と連携した応用開発研究も推進している。韓国は財閥系メーカー（サムソン SDI、LG 化学）を中心に応用開発に関する実力は低コスト化技術も含み高く、シェア拡大に貢献している。電池材料の大部分を日本からの輸入に頼っている現状を打破するために、研究者の育成、素材メーカーの育成に注力している。

リチウムイオン電池の価格は 2014 年前期に kWh 当たり 540 ドルになり、2 年前と比べて 20%低下、2010 年と比べるとほぼ半額になっている。今後、車載用、電力用が急激に市場を拡大すると見込まれている。日本では、パナソニック、オートモーティブエナジーサプライ（日産、NEC）などが主要なメーカーである。

日本では、学界で応用研究がほとんどなされておらず、電池メーカーの体力も失われてきていることから、企業と大学との共同研究の連携により、学界で見いだされた新材料、新技術を産業に結びつける仕組みが必要である。また欧米では、レドックスフロー電池を始め定置用（電力用）蓄電池に注力しており、日本は研究者層が薄いことが懸念される。

レドックスフロー電池は、民間企業（住友電工）の着実な研究開発が大規模実証実験（北海道南早来や米国カリフォルニア州）に繋がっているが、材料メーカーなど関連部門への浸透が緩やかであることに加え学界に研究者が少なく、将来にわたり競争力とプレゼンスを発揮できるかは不透明な状況である。米国では新規な反応系や電解質膜などの材料レベルから新方式などのシステムレベルに至るまで幅広く展開されており、大規模

電力貯蔵への社会的要請から関連したベンチャー企業が複数立ち上がっている。欧州においても新規な反応系から電池性能の評価・解析など成果報告は増加傾向にある。

スーパーキャパシタでは、自動車・電車用途の他、太陽光発電や風力発電にスーパーキャパシタを組み合わせた蓄電システムが開発されており、今後も大容量スーパーキャパシタ市場の急速な拡大が期待されている。日本では、東京農工大、関西大学、山口大学、信州大学などが研究を進めている。欧州ではフランスを中心に研究者人口が大幅に増加、研究力が急速にレベルアップしている。中国ではグラフェンを中心に活発な材料開発が進んでいる。

17. 蓄熱

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	↑	○	↑	◎	↑	○	↑	○	→
応用	◎	↑	○	→	◎	↑	○	→	○	↑

建物の空調用として、現在までに水蓄熱槽が家庭用の小規模から産業用スケールまで普及し、太陽熱温水器としても利用されている。最近では蓄熱槽の小型化を目的とした潜熱蓄熱利用型蓄熱槽も盛んに検討されている。1984年以降、日本では氷蓄熱の導入が促進され、産業用の氷蓄熱システム「エコアイス」のみならず、家庭用の「エコアイス・mini」も販売され、現在までに広く普及している。JFE エンジニアリング株式会社が水和物スラリー蓄熱空調システム（潜熱蓄熱温度約 6-12℃）を開発し、業務用建築物の空調システムの省エネ化に効果を上げ、2013 年からはタイでの実用運転（3510kWh 級）も開始された。近年、潜熱蓄熱材をマイクロカプセル化したパッシブ蓄熱システムが開発され、欧州を中心に普及している。

欧米中は、化学反応を利用して太陽熱エネルギーを熱として放出できる化学蓄熱技術を開発している。欧州は EU の研究ファンドの成果が続々と実施され、建築・空調分野の低温領域から太陽熱や産業排熱回収用の高温蓄熱システムまで基礎研究・応用研究ともに多岐に渡る。米国では、化学蓄熱の大型基礎研究支援が行われ、また太陽熱発電プラントに併設する蓄熱実証研究が進められ、今後は世界の研究をリードする可能性がある。中国は、低温領域から高温領域まで、多数の論文が報告されており、その研究水準は徐々に向上している。韓国では、韓国エネルギー技術研究院（KIER）により、2000 m²のソーラーコレクターを持つ 5000 m³の大規模季節性蓄熱システムが設置され、韓国初のエコエネルギータウンの実証実験が進められている。日本では、最近の 2～3 年で、蓄熱技術の重要性が再認識され、未利用エネルギー革新的活用技術研究組合（TherMAT）が中心となって、低温領域（120℃以下）に関して、潜熱蓄熱や化学蓄熱の基礎研究が精力的に進められている。

注目動向として、低温領域の熱源回収またはパッシブ蓄熱を目的とした蓄熱材開発として、SiO₂等の無機材料を主成分とする硬質シェルからなる潜熱蓄熱材マイクロカプセルの報告例が増加してきた。産総研は分子動力学計算から糖アルコール類が高い潜熱量を持つ要因を突き止め、より高蓄熱密度の糖アルコール系潜熱蓄熱材の設計コンセプト

を抽出した。理化学研究所は二酸化バナジウムの一部を他の金属で置換した物質に、大きな蓄熱特性を持つことを発見し、固相相転移利用型潜熱蓄熱材を開発した。ドイツは硝酸塩系潜熱蓄熱材（融点 306°C）を使用した太陽光発電プラント向けの中温潜熱蓄熱システムの開発を進める。

顕熱蓄熱材は蓄熱密度が低いこと、潜熱蓄熱材は蓄熱温度選択制が狭いこと、化学蓄熱材は繰り返し使用における耐久性が課題である。

18. エネルギーキャリア

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	↑	○	↑	○	↑	△	→	△	→
応用	◎	↑	○	↑	◎	↑	△	→	△	→

エネルギーキャリアに関する研究開発は水素社会の実現を目的に、再生可能エネルギーなどからの CO₂ フリー水素製造、キャリア媒体への変換、貯蔵・輸送、利用と広い範囲で構成されている。水素利用の動向としては、水素インフラ整備を含めて燃料電池自動車（FCV）への適用が日欧米を中心に検討されている。

日本では SIP エネルギーキャリア、NEDO、JST 等のプロジェクトにより、エネルギーキャリアとして液体水素、アンモニア、有機ヒドライドを中心としたキャリアを検討しており、出口を強く意識した幅広い研究開発が行われている。再エネ電源を想定した電気化学的触媒反応による水素製造およびキャリアへの直接転換技術、発電を想定した水素ガスタービン、アンモニア直接燃焼、さらには水素サプライチェーン全体を考えたシステムの実証試験、安全性や社会受容性、規制緩和なども考慮している。また、量産型燃料電池自動車の普及拡大に対応し、水素ステーション（2016 年 6 月時点 77 箇所）のインフラ整備も進めている。米国では DOE による水素製造コスト低減のために、水電解を始め太陽熱利用やバイオ技術等による水素製造等に関する研究開発を実施している。カリフォルニア州ではゼロエミッション車（ZEV）として FCV の拡大を図っているものの、水素供給インフラ拡大が課題とされる。欧州でも再エネ水素の FCV への利用として、H2ME-1 に引き続きプロジェクトがスタートしている。H2ME-1 では FCV : 300 台、水素ステーション : 29 カ所であり、H2ME-2 では FCV : 1230 台、水素ステーション : 20 カ所追加の予定である。また余剰の再生可能エネルギーを用いて、水素と CO₂ からメタンに変換し、都市ガスパイプラインに流す Power to Gas と呼ばれるメタンをキャリアした研究開発も行われている。

FCV、家庭用燃料電池など実用化された技術もあるものの、経済性も含めるとその確立にはほど遠いことが課題であり、中長期にわたる総合的な戦略のもとに効率や耐久性、関連材料の製造技術も含めた研究開発、および法制度改革を進めるとともに、水素社会の実現に向けた国の支援が必要な状況である。

19. 燃料電池

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	○	→	○	→	△	↑	△	→
応用	◎	↑	○	→	○	→	△	↑	○	↑

燃料電池は化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換することで高効率化が可能であり、宇宙船など特殊な用途として用いられてきたが、現在はクリーンエネルギー時代のキーテクノロジーとして研究開発が進められている。電解質の種類によって固体高分子形（PEFC）、リン酸形（PAFC）、熔融炭酸塩形（MCFC）、固体酸化物形（SOFC）の4種類に大別できる。また最近、アニオン膜を用いた全固体アルカリ形（SAFC）も多様な金属触媒が利用できることから注目されている。世界的には 100℃以下で作動する PEFC の実用化に伴い、コスト削減のための触媒の低白金化（1/10 レベル）、非白金化の研究開発が進められている。

日本では PEFC および SOFC を中心に燃料電池本体・発電システム・補機類などの技術が進展し、世界トップの水準を維持している。PEFC 用触媒の研究水準は世界をリードしており、低白金化としてコアシェル触媒（同志社大など）、合金触媒（山梨大、東工大など）、非白金化としてカーボン系触媒（群馬大、東工大など）、金属酸窒化物（横国大など）について幅広い基礎および応用研究が進められている。米国では、バックアップ電源、フォークリフト用電源、バッテリー充電用電源、小型移動体向け電源など幅広い分野への商用化が進められている。政府予算において一時、水素・燃料電池関連の予算が大幅削減されたが、2014 年からは増額に転じている。DOE は、白金担持量の低減（アルゴンヌ国立研究所など）と非白金触媒の開発（ロスアラモス国立研究所など）、さらに低コストの膜・電極複合体（MEA）の開発に集中的に取り組んでいる。また 2015 年度から触媒・MEA 等の解析を行うため、DOE の研究所のコンソーシアムにより、FC-Performance and Durability（FC-PAD）が開始されている。欧州においては、2014 年に FCH 2 JU が 2024 年までの予定で開始され、自動車用燃料電池の低コスト化や発電用燃料電池の効率向上等の研究（7 年間、予算合計 13.3 億ユーロ）が進められている。最近の状況として、再生可能エネルギーの導入拡大等により SOEC（Solid Oxide Electrolyzer Cell）の電解セルについて、Sunfire 社や Topsoe 社等が研究開発を進めているほか、プロジェクト（HELMETH、GRINHY 等）が進行中である。中国では燃料電池技術は 15 件の重点革新任務の 1 つとして推進している。

燃料電池の課題は、定置用でも FCV でも、自立普及に至るまでのコスト低減である。このため大量生産によるコスト低減のシナリオに頼らず、新規技術開発により、抜本的にコスト低減を図る技術開発の道筋が必要である。

20. モーター・トランス磁石材料

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	→	○	→	○	→	○	↑	△	→
応用	○	→	○	↓	△	↓	○	↑	△	↑

1982年にネオジム磁石の発表から33年が経過した。現在においてもネオジム磁石は最強の永久磁石である。日本の磁石メーカは2004年ごろから粒界拡散技術を開発し、ジスプロシウム危機の際に省ジスプロ化の手段として発展、実用化させてきた。変圧トランスやモータの鉄心などに使用される電磁鋼板に代表される軟磁性材料では、コイルが誘導する磁束の時間変化への応答が遅れがあると使用中に損失（鉄損）が生じ、変圧器やモータの電力効率が低下する。1900年代初頭の珪素鋼板の誕生以来、数十年に亘り、その地道な材料特性の改善が続けられ、60年代以降には、アモルファス合金やナノ結晶合金が開発され、損失低減が図られてきたが、近年その改善は飽和に達している。

日本は永久磁石および軟磁性材料ともにこれまで材料開発で大きく貢献をし、現在でもNIMSでは2014年にジスプロシウムフリー磁石の高保磁力化に成功し、東北大学ではナノ結晶軟磁性材料の開発に成功するなど、新たな解析手法や材料開発において世界でもトップクラスの存在感を発揮している。2016年7月には、大同特殊鋼株式会社と本田技研工業株式会社は、重希土類元素を全く使用せずに、ハイブリッド車用駆動モータに適用可能な高耐熱性、高磁力を実現したネオジム磁石を世界で初めて実用化している。ポストネオジム磁石として有望視されているものに、1-12系と呼ばれる希土類磁石（希土類元素1に対し、鉄を12混ぜる）と鉄ニッケル系の磁石があるが、前者はNIMSによって発見され、後者は東北大学によって製造方法が開発されている。日本はNd系・Pr系及びL10規則格子系の論文発表は盛んであるが、SmCo系やMnAl系等のレアアースフリー研究は低調である。特に中国からの論文発表が増加していることから、今後は中国の研究開発状況を注視すべきである。磁石の生産量では、既に一位の座を中国に譲っている。

永久磁石が実際に使用される高温での十分な保磁力の発現のためには、電子の磁気的振舞いを勘案し、主相を微細な結晶粒に分断し、適切な粒界相を配置した微細組織を構成することが必須である。しかし、保磁力の微視的メカニズムを記述し、制御する方法論がボトルネックとなっている。今後の研究展開としてマテリアルインフォマティクスの利用が期待されており、研究環境の整備が進みつつある。またパワー用途（パワーデバイス）の高周波化や自動車用における可変磁気回路の新たな構造などへの応用研究が求められている。

21. スマートビル・スマートハウス

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	◎	↑	◎	↑	○	→	○	→
応用	△	↓	◎	↑	◎	↑	◎	↑	○	↑

スマートビル、スマートハウスの概念は1980年の住宅のオートメーション化に始まった。2000年代後半からは、建築物の環境配慮性能の向上のため、省エネ、またこれを一層進めたゼロエミッションを取り入れた住宅や業務用建築物に対して用いられるようになった。このために、パッシブ技術の活用、断熱性能の向上、高効率な設備機器の導入、再生可能エネルギー導入と最適制御のためのエネルギー管理システムに関する研究開発

が各国の大学および業界において進められている。スマートメータと HEMS 間の双方向通信環境の拡大、室内環境の測定、制御に関する分野の研究およびビッグデータの活用、材料開発や人間の快適性や健康性に関する研究などが注目される研究分野である。

建築外皮などのハード面では米国で先駆的な動きがあり、昼光の導入技術、高性能ガラスの技術であるサーモクロミック技術やエレクトロクロミック技術が米国エネルギー省とローレンスバークレー国立研究所が共同で研究開発を長く続けるなど、建築的な工夫に資する研究が盛んに行われている。制御などのソフト面では、HEMS ネットワークやスマートメータで需要家から収集されるデマンドレスポンスやリアルタイムプライシングなどの大量のデータを用いたエネルギー消費分析など、消費者心理に踏み込んだ研究やサービス開発が盛んになりつつある。特に欧米の研究はそれを利用する人間や環境、ICT のソフト的な研究に移行している。中国は政策的なスマートシティプロジェクトの一環として実践的なプロジェクトを産官学の協力により積極的に推進している。日本は個別の電気分野に関する研究は進んでいるが、特に建築外皮に関する基礎的研究や人間行動に関する分野は遅れている。

欧米では市場メカニズムを用いて建築ストックの質の向上を図っている。このように社会制度を通じたエネルギー消費データを活用して市場メカニズムを働かせることにより、エネルギー効率の高い製品、建築が選好され、エネルギー効率の改善が自律的に進む社会制度構築に関する研究が積極的に行われている。日本では、こうした国民全体の利便性向上などを考え、エネルギー消費者の視点からのエネルギー消費に関するデータ分析、エネルギーと情報とが融合した新たなサービスの創出の取り組みが必要になる。

22. 断熱・遮熱・調光

		日本		米国		欧州		中国		韓国	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
断熱・遮熱	基礎	△	→	◎	↑	◎	↑	△	↑	○	↑
	応用	◎	↑	◎	↑	◎	↑	◎	↑	○	→
調光	基礎	◎	↑	◎	↑	○	↑	○	↑	○	→
	応用	×	→	◎	↑	○	↑	○	↑	×	→

断熱・遮熱では、家屋の断熱材として、これまでグラスウールや硬質ウレタンフォームなどが普及してきているが、さらに高性能な真空断熱パネル（VIP）も欧米を中心に利用され始めている。グラスウールの繊維を熱流束と直角方向に制御することによって、熱伝導率を制御する方法が提案されている。また、外付けブラインドや複層ガラス内ブラインド、さらに遮熱や遮断熱タイプの low-E（低放射）ガラスの普及が進み、日本国内で 2006 年までは普及が僅かだったが、2015 年には、複層ガラスの内、約 2 割を low-E 複層ガラスが占めるという状況にまでなった。

日本では断熱、遮熱技術の分野では、学界の基礎・応用研究がほとんどなされておらず、基礎研究は停滞しているが、応用研究はメーカ主導によりコストダウン研究が進められている。欧米で、冷蔵庫などの高性能断熱材として使用されてきた真空断熱パネル（VIP）の住宅利用が検討されて、従来の断熱材に比べて約 1/10 の厚さで断熱が可能である。遮熱では、米国は多くの企業が遮熱フィルム、開発への取り組みを開始している。

屈折率の異なる高分子系材料を数百層重ねた多層膜タイプへと開発が移行し、これが遮熱フィルムの主流になりつつある。米中の共同プロジェクトが進行し、中国は、政府が low-E ガラスの産業化研究を支援している。しかし、性能向上、耐用年数向上が課題である。

調光技術は、エネルギーロスの大きい窓への応用が検討されているもので、1996 年に透明状態または鏡状態に自在に変更できる材料が発見され、ガラスに塗膜した金属膜の光学特性を自由に制御できる機能を有する“調光ガラス”の研究が行われ始めた。この調光ミラー薄膜を反射調光型の調光ガラスとして実用化するための研究は、主に日本で行われている。

米国が有機エレクトロクロミック材料の研究開発を進め世界のトップを走っている。日本は、産総研や千葉大学などで材料開発の基礎研究が進む。

注目動向に、有機薄膜エレクトロクロミック材料の開発がある。これは、着色の効率が無機系の材料に比べて高く、鮮やかに発色する物が多いことから、表示素子等には適している。

調光技術も普及のためにはコストダウンが最大の課題としている。

23. 照明・ディスプレイ

		日本		米国		欧州		中国		韓国	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
有機EL	基礎	◎	↗	◎	→	○	→	×	→	○	↗
	応用	△	↘	◎	↗	○	↗	△	↗	◎	↗
量子ドット	基礎	◎	↘	◎	→	○	↘	○	↗	◎	↗
	応用	△	→	◎	→	◎	↗	×	→	○	→

1996 年日亜化学が発明した青色発光 LED により、光の三原色が揃い、白色 LED が登場したことで LED 照明が広く普及し始めている。有機 EL 分野は、1987 年米国コダック社の研究から活発になった。照明に応用できる白色に発光する有機 EL（蛍光灯の効率（約 100lm/W）を凌駕するポテンシャルを有する）は、1993 年に山形大学の城戸らによって実現された。この発明がきっかけで有機 EL の次世代照明光源としての活用が議論されるようになった。ディスプレイ分野では、2012 年になり、Samsung や LG が 55 インチの大型有機 EL テレビの発売を発表するなど、韓国勢の有機 EL ディスプレイに対する投資が非常に活発化した。コロイダル QD(QuantumDot)における蛍光発光は、1993 年に MIT のグループにより作製された CdSe, CdTe によるものが最初の報告となっている。2013 年ソニー、Amazon、ASUS 社の PC 等への搭載されている。いずれも比較的新しい研究領域といえる。

有機 EL では、日本は、山形大学、九州大学に研究拠点ができており、前者はデバイス製造技術に、後者は材料技術に強みを持ち、基礎研究で世界をリードしている。ただし、応用研究については韓国に遅れをとっている。米国は、1990 年代から 2004 年にかけて世界に先駆けて有機 EL 技術を構築し、材料、デバイスの基礎技術もその時にアグレッシブに研究が進んだ。有機 EL 照明パネルの製造販売会社である OLEDWorks 社、材料では Universal Display Corporation (UDC)が燐光発光材料の開発に強みを有する。

欧州では、ドレスデンにあるフラウンホーファー研究所や、オランダの IMEC や TNO が出資して設立したホルストセンターが、精力的に有機 EL 照明用途として、塗布型有機 EL デバイス、材料の研究開発を、メルクなどの民間企業を巻き込んで推進している。韓国では、成均館大学、慶熙大学にサムソンや LG が資金を出し、政府も相当量の資金を拠出し、産官学一丸となって、有機 EL 材料や有機 EL ディスプレイ技術の研究開発拠点として精力的に活動している。製品化で先行する Samsung や LG において、投資が拡大している。

有機 EL は、照明では高輝度・長寿命化技術、高演色性化技術、大面積素子の均一発光化技術および低コスト製造技術など、さらなる実用化を加速するための技術開発への注力が、ディスプレイについても、有機 EL 材料（発光素子）の寿命・コスト、および製造プロセス（量産技術）の面で今なお多くの課題が残されている。

量子ドットでは、日本はこれまで基礎研究で一定の成果を挙げたものの、欧米韓に後れを取りそうな展開となっている。カドミウムフリーのコロイダル QD 蛍光体の開発が求められている。QLED などの自発光素子においては発光の輝度、量子効率では OLED と同程度であるが、素子全体の寿命が実用化に向けた最大のボトルネックとなっている。

24. 熱再生利用技術

		日本		米国		欧州		中国		韓国	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
理論・熱交換・熱輸送	基礎	◎	→	○	↑	○	→	○	→	△	→
	応用	△	↓	△	→	○	↑	◎	↑	△	→
ヒートポンプ	基礎	◎	→	◎	→	◎	↑	△	→	×	→
	応用	◎	→	○	→	◎	↑	△	↑	○	→

熱再生利用技術では、熱再生（熱が持つエクセルギー率を高める）技術理論（要素技術である熱交換と熱輸送を含む）及び、それを可能とするヒートポンプ技術が主となる。

理論では、1970 年代に、産業界の熱エネルギーを循環再利用するための熱交換器を用いた熱回収技術が発展し、1970 年代後半から、種々のエネルギーの質を定量的に評価する指標として、エクセルギーが定義され、1990 年代頃からプロセスを評価するエクセルギー解析が注目され始めた。2010 年頃、プロセス内の熱の質を等エントロピー変化の一つである断熱圧縮を用い、再生した熱を全て循環再利用することでプロセスを省エネルギーとする自己熱再生が提案された。熱交換技術は、伝熱促進を図ることで伝熱面積を削減し、コンパクト・省資源・低コスト化を目指した研究開発が続けられてきた。トラックや船などで熱供給をするオフライン熱供給は、工場やごみ処理施設などから発生する 200℃未満の低温廃熱を潜熱蓄熱材に回収・貯蔵して、コンテナ車で離れた施設に熱エネルギーとして供給するのが一般的である。2009 年、電力を用いない受動型熱輸送では、マイクロ多孔体で生じる毛細管力を熱輸送駆動力としたループヒートパイプ熱輸送技術により 4m の受動型熱輸送が実証された。

日本発の論文数が多く日本は、基礎研究では世界をリードしているが、実証プラントがなく応用研究は弱い。欧州は、常温以下の冷熱領域での基礎研究が多い。米国の研究例は少ない。中国は、基礎研究例は多くないがその経済性を評価して既にプラント建設

に着手しており、今後は応用研究が進むと予想される。注目動向としては、EU が圧力変化を含むネットワーク（圧縮機と膨張機の最適配置）検討を進めている。課題は、熱再生理論を実現する技術が現在は圧縮機に限定されていることであり、電気、磁気などに伴う機械的仕事を熱再生に導入する技術を開発する必要がある。

ヒートポンプの技術は、1900 年代初め、20～50℃程度の冷温熱を利用する空調分野で発展してきた。ヒートポンプとしての暖房機は、1930 年代に登場している。1980 年には、インバータ機が開発され負荷変動に対しても効率よく空調が行えるようになった。2001 年には、CO₂ を冷媒とする家庭用ヒートポンプ給湯機が開発された。熱源温度 200℃～400℃の熱再生利用においては、1990 年代より酸化マグネシウムと水蒸気との反応を用いた化学蓄熱／ケミカルヒートポンプに関する研究が行われ、2014 年からマグネシウム系化学蓄熱材を用いた排熱輸送の実証試験がスタートした。

日本は基礎、応用研究ともに世界トップクラスである。応用面では世界的な圧縮機メーカ（神戸製鋼、三菱重工、ダイキンなど）の存在が大きい。米国は冷媒の基礎研究が強い。欧州は、基礎、応用研究が盛ん。ドイツは日本と同様に世界的な圧縮機メーカ（ジーマス社）があり、応用研究で世界トップクラス。注目動向は、冷媒の流動経路サイズが極めて小さく冷媒の充填量を低下できる扁平微細多穴管を用いた熱交換器を三菱電機が実用化した。高温製造ヒートポンプは、圧縮過程で冷媒温度を高めるために、高压に圧縮する必要があり、その分、膨張過程での減圧（圧力落差）も大きくなるので、その圧力落差から動力（エネルギー）回収を可能とする膨張機の開発が課題である。

25. 触媒

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	↗	○	→	◎	→	○	↗	△	→
応用	○	↗	○	→	◎	→	○	↗	△	→

主に環境・エネルギー分野に密接する資源転換と排ガス触媒について触れる。日本の自動車業界は 70 年代に三元触媒を世界に先駆けていち早く開発、商品化まで進め、その後の自動車王国の礎を築いた。ディーゼルエンジン、ガソリンリーンバーンエンジンなどエネルギー効率の高いエンジンが注目を浴びているが、これらのエンジンに適合する排気浄化触媒の研究開発は急務である。触媒技術における材料戦略も重要になっている。例えば自動車排ガス触媒（Pt, Rh, Pd など）、燃料電池用電極触媒（Pt など）、有機ハイドライド変換技術にも Pt 触媒は多用されており、これらの希少材料を使わない技術を開発しなければ、世界に広く普及する科学技術にはなり得ない。天然ガスの利用技術は石炭、石油に比べれば歴史も浅く、その有効利用技術の発展は今後重要になってくる。豊富な天然ガスから合成ガスを作り、その合成ガスからメタノールを作成し、基幹物質とする化学が注目されている。

この領域は、いわば日本のお家芸ともいえる研究分野であり、ファインケミカル、バルクケミカル合成の基礎研究を牽引してきた。バイオマス変換触媒、光触媒・人工光合成、水素製造・貯蔵・輸送技術に関して世界レベルにある。民間企業はこれまで省エネ

化につながる運転条件の変更、プロセスの改良によって着実にグリーンプロセスを実践してきた。しかし、アジアや中東、北米のエネルギー事情などに押され、新規プロセスの実用化は国の補助頼みであり、企業独自での新規プロセス開拓意欲が乏しい。米国は昨今のシェールガス革命、エネルギー価格の低迷で、研究開発支援も低調になっている。欧州はドイツを始め、基礎表面科学から実用触媒まで幅広い基礎研究の基盤を有していることが特長である。メタンからメタノールへの直接酸化について現在、最も優れた系の報告がある。また、ドイツでは再生可能エネルギー導入の情勢にあわせ、Power to Gasによる再生可能エネルギーからメタンへの転換触媒の技術が実用を視野に開発が進められている（SolarFuel プロジェクトなど）。ディーゼルエンジン車の自動車排ガス触媒なども BASF, Johnson Matthey, Umicore など欧州系企業が主導している。中国はエネルギーや環境に関わる触媒化学に関しては優秀な科学者を多く抱え、精力的に研究をしている。石炭ガス化による合成ガス製造、これを原料とするメタノール合成、アンモニア合成の大型プラントの稼働が進み、関連技術が発展している。これに付随して MTP（メタノール・トゥ・プロピレン）についても世界でも最大規模の検討が進められている。

エネルギーの主体が石炭、石油から天然ガス、バイオ資源、再生可能電力と変遷していく中で、新たなエネルギー源を基とした新たな変換プロセスを開発することが求められている。均一系触媒研究者と不均一系触媒研究者のより密な連携のみならず、電極触媒を扱う電気化学、マイクロフローリアクターなどのプロセス工学、理論計算、ナノ構造制御の間での連携が強く求められる。

26. 分離

		日本		米国		欧州		中国		韓国	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
CO ₂ 分離	基礎	○	→	○	→	○	→	○	→	△	→
	応用	◎	→	◎	→	△	↘	○	→	△	→
随伴水分離	基礎	○	↘	◎	→	○	→	○	→	△	↘
	応用	○	↗	◎	↗	◎	↗	○	→	○	→
希少金属分離	基礎	○	→	△	↘	○	→	○	↗	△	→
	応用	○	→	○	→	◎	↗	◎	↗	△	↘

CO₂の分離では、ほぼ大気圧で運転される石炭や天然ガスの火力発電所や、セメント・鉄鋼プラントでは化学吸収法が適用されている。三菱重工業は 2008 年頃まで 10ton・CO₂/日規模の技術開発を国内で試験を行った後、米国のサザンカンパニーと共同で、サザンカンパニーのバリー（Barry）火力発電所において CO₂ 500ton・CO₂/日の実証試験を 2012 年～2014 年実施した。J-Power と日立製作所が若松発電所において 24ton・CO₂/日規模の MDEA（Methyldiethanolamine）を吸収剤として用いる化学吸収法と、Selexol 吸収液（ポリエチレングリコール・ジメチルエーテル）による物理吸収法による試験を 2014 年 3 月に完了した。産総研は、CO₂分離膜の基礎研究として、安価な材料（ポリフェニレンオキシド）から優れた分離性能と柔軟性を持つ新規中空糸炭素膜を開発し、低コストで破損しにくい膜モジュールの開発に世界で初めて成功した。吸収液法や膜分離の研究が進み、日米は実証設備で応用研究を進めている。米国では石炭火

力発電所向けに設定した厳しいCO₂排出基準に沿った具体的な応用研究プロジェクトが進む。日本は複数メーカーが発電設備への付帯設備としてのパイロット研究を進めている。CO₂吸収液や分離膜技術のコストダウン、負荷変動対応の向上が課題である。

随伴水の分離では、油田だけでなくガス田からも随伴水排出量が増加し、近年は重質油の開発でそれが更に増加している。分離技術は、高圧・常圧タンクでの重力による分離、窒素ガスを吹き込んでコロイド状の油を界面分離、ハイドロサイクロンでの分離、砂、炭、クルミ殻による吸着技術などがある。オイルサンド層へ水蒸気を注入し流動性を得た重質油を分離する技術もある。産油国、産ガス国に採掘プロジェクトを有する欧米が応用研究で強い。海水中のSulfateをNF（ナノ濾過）膜で、油分をセラミック膜で除去する技術が開発されている。適用技術の耐熱性、オイル耐性、耐久性、一層の分離性能向上が課題である。

希少金属分離では、第2次世界大戦後米国から、水へのぬれ性の違いを利用して分離する浮選技術が導入され、日本で独特の選鉱技術の発展につながった。しかし、1990年代にほとんどの国内鉱山が閉山し、選鉱技術研究は減速した。一方、国内では、極度なコストダウンを求められる状況下での確実な重金属処理を達成する環境浄化技術が、分離技術の1つとして大きく発展した。1960年代にアメリカで低品位の酸化銅鉱石の溶媒抽出法が開発され、現在も技術開発が継続されている。微粒鉱石の分離技術に関して技術開発が進められ、より小さな気泡を利用して分離するマイクロバブル浮選や、高勾配型磁選機、流動層の原理を利用するネルソン型比重選別、あるいは薄流選別の応用であるファルコン型比重選別技術が開発された。1984年にフランスで開発された渦電流選別の導入によって、アルミニウムや銅の選別が可能となった。近年ではプラスチック類の相互分離においては、10年ほど前より近赤外線（NIR）吸収を利用したソーティング技術、アルミ合金類では透過X線および蛍光X線ソーティングを組み合わせる分離技術が積極的に開発されている。

環境規制の厳しい欧州で応用研究が多い。中国では、先進技術開発はないが、新規応用研究の件数が多く、スピードが早い。日本は基礎研究では長期プロジェクトがなく、応用研究では画期的な新規技術開発がなく、いずれも停滞気味である。新規粉碎技術（電気パルス法、マイクロ波法）やイオン液体による分離剤が研究されている。破碎・粉碎による単体分離過程で省エネを目指す技術の選定は「破壊の科学」が確立していないことが課題で、現状は経験則に基づいている。

27. 燃焼(全般)

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	→	◎	→	◎	→	○	↑	○	→
応用	◎	→	◎	→	◎	→	△	↑	△	→

燃焼は動力、発電、熱需要を担う基盤技術であり、エンジン燃焼、ガスタービン燃焼、燃焼式工業炉、微粉炭燃焼が主な領域となる。燃焼分野の国際研究コミュニティとして、The Combustion Instituteがあり、世界中の燃焼研究の礎となっている。

日本は石炭による発電技術である「クリーンコールプロジェクト」、加熱工業炉での「高温空気燃焼技術」などの基礎・実用技術の研究開発を通じて、実用燃焼機器の熱効率・エミッションは世界トップレベルにあり、省エネ技術を牽引している。また SIP エネルギーキャリアでは、ガスタービン燃焼にアンモニアを燃料として用いる研究開発が行われている。米国では石炭の基礎研究は下火になりつつある。一方、自動車用途として新エンジンとバイオ由来新燃料の組み合わせたプロジェクト Co-Optima が DOE 研究所を中心に進められている。欧州では Horizon2020 により研究者間のネットワークが形成されている。燃焼の研究領域における課題は産学官連携研究において大学の研究を活性化する仕組みづくりである。

新たな技術動向として、ケミカルループ燃焼（CLC）と呼ばれる酸化反応と還元反応に金属酸化物を媒体として利用することで CO₂ があらかじめ分離できる新たな燃焼方式がある。これを火力発電所などの CO₂ 回収に適用する研究開発が行われており、最近になって NEDO プロジェクトが開始されたが、日本における研究者が少ない状況にある。

燃焼における現象の解明にはまだ十分でないことから、様々な燃料・酸化剤・温度・圧力条件における燃焼基礎特性などのデータ、さらには完全な化学反応モデルの構築を目指した反応速度定数などの基礎的なデータ構築が重要である。

28. エンジン燃焼(自動車用)

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	↑	○	↑	◎	→	△	↑	△	→
応用	○	→	◎	↑	○	→	△	→	△	→

エンジン燃焼の特徴は間欠的燃焼で、圧縮時の自己着火現象の制御が重要なことが挙げられる。自動車ではガソリンエンジン(火花点火+予混合燃焼)およびディーゼルエンジン(自己着火+拡散燃焼)の 2 種類の方式がある。それらのエンジン燃焼制御方式は排気性能向上と高効率化を両立させるために排気規制の段階的強化に対応して、機械制御方式制御から電子制御方式への変化などの新たなデバイスの開発・適用により大きく進歩してきた。また新たな燃焼方式として自己着火+予混合燃焼による HCCI(Homogeneous-Charge Compression Ignition)や PCCI(Premixed Charge Compression Ignition)と呼ばれる燃焼を用いた研究開発も世界的に進められている。

エンジン燃焼の基礎・応用研究については、米国の ECN(Engine Combustion Network)や欧州の Horizon2020 により欧米が先行している状況にある。研究体制に目を向けるとドイツではコンソーシアム型の産官学連携による研究体制 FVV が過去より確立し、機能している。米国では DOE による大型トラックの燃費向上を主眼としたプロジェクト (SuperTruckII) が実施されている。一方、日本ではこれまで自動車各社の単独で推進してきた研究開発体制から、2014 年に自動車用内燃機関技術研究組合 AICE が設立され、それとともに産官学の連携による乗用車を主眼とした SIP 革新的燃焼技術が始まった段階である。

エンジン燃焼における技術課題としては、燃焼の現象解明のための計測技術(噴霧解析

など)および数値シミュレーションなどの基礎的な研究が挙げられる。

29. トライボロジー

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	↑	◎	→	◎	→	○	↑	△	→
応用	○	→	◎	→	◎	↑	△	↑	△	→

潤滑、摩擦、摩耗などを取り扱う分野であるトライボロジーは、モータリゼーションによる自動車関連、IT 分野では、ハードディスク装置の開発に最先端のトライボロジー技術が導入されている。今日では、高度な表面分析技術と計算科学を融合した“ナノトライボロジー”へと発展し、最先端研究の一翼を担っている。このほか、流体力学理論、各種機械要素や潤滑剤の発明や普及、そして新しいコーティング材料など、トライボロジーはそれぞれの時代の産業技術の隆盛と深く関わりながら発展してきた。トライボロジー研究においては摩擦・摩耗・潤滑の基礎メカニズムを理解することが重要であり、今後表面におけるその場観察技術が要求されている。

トライボロジーの研究体制としては、欧米ではいくつかの拠点(英国ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所、米国では、NSF 支援によるジョージア工科大学とノースウェスタン大学による公的拠点 CSET)を設けて基礎から応用までの広い研究領域をカバーしている。一方日本では大学の小規模研究室で実施されており、基礎と技術課題の融合研究を推進できる十分な体制がない。中国では清華大学等に国家重点研究室に指定され、追従型テーマではあるが研究活動を展開している。

低燃費化が強く要望される自動車分野への最近の実用化例としては、水素フリーDLC（ダイヤモンドライクカーボン）の適用がある。これはエステル系添加剤との組み合わせによる低摩擦現象発現の発見により、エンジン部品の摺動面材料として急速に普及した。

30. 耐熱材料

		日本		米国		欧州		中国		韓国	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
新材料開発技術	基礎	◎	→	△	↓	○	→	△	↑	△	↓
	応用	◎	→	◎	↑	◎	↑	△	↑	△	→
材料損傷・劣化評価技術	基礎	◎	↑	◎	↑	◎	↑	○	↑	○	→
	応用	○	↑	○	→	○	→	—	—	—	—

火力発電では、1950 年代後半にボイラの過熱機関や再熱機関などの高温部材に、クリープ強度、高温腐食、水蒸気酸化など、耐熱性の観点から 18-8 システンレス鋼が初めて使用された。1980 年代以降、蒸気条件を高温高压化した超々臨界圧(USC; Ultra Super Critical Pressure) プラントに向けて様々な高耐食・高クリープ破断強度のオーステナイト系ステンレス鋼が開発され、2008 年からは蒸気条件をさらに高温高压化した先進超々臨界圧発電技術(Advanced-USC)の開発が進められてきたが、本蒸気条件下では、

オーステナイト系ステンレス鋼ではもはや耐えられないため、Ni 基超合金の適用が考えられてきた。Ni 基超合金は、鍛造合金から普通鋳造合金、一方向凝固合金、単結晶合金へと進化してきた。東日本大震災後、発電用高効率ガスタービンの重要性は増し、ガスタービンの高効率化では、この Ni 基超合金と遮熱コーティング (TBC: Thermal Barrier Coating) の開発がキー技術となっている。チタン合金開発については、航空機のジェットエンジンの軽量化という点で、最近研究が再燃している。高温機器における材料損傷・劣化評価技術は、破壊評価法、非破壊評価法、解析評価法の 3 つに大別できる。

日本は材料関連の国際会議において、各耐熱材料分野においてアクティビティが非常に高い。主要な耐熱材料である Ni 基超合金、Mo-Si-B 基超高温材料、ボーイング 787 機のエンジン材料に採用されている Ti-Al 合金等の開発では、物質材料研究機構 (NIMS)、東北大学、東工大学等による基礎研究、また IHI 社の開発研究の貢献が大きい。欧米では航空宇宙産業においてエンジン開発が盛んであったため、政府が民間企業を支援し、官民一体となって耐熱合金の開発が加速された。米国では、1700℃級ガスタービンの開発で、エネルギー省 (DOE) の High Efficiency Engines and Turbines プログラム(2003～2015、約 1000 億円)により国家的な支援の下で耐熱材料の技術開発を進めてきている。

新たな注目動向として、近年、加工性を高めた Ti-Al 合金、Mo-Si-B 基合金、SiC/SiC 複合材料 (通称 CMC)、高エントロピー合金 (High Entropy Alloys; HEAs、5 元系あるいはそれよりも多成分系からなり、かつそれぞれの構成元素の組成が 5～35atomic% となる合金の一つ) が要注目である。

耐熱材料の開発をリードする画期的要素研究が文科省・NIMS や大学を中心に継続的に行われてきているが、実用化に関しては発電システムとの統合や膨大で長時間にわたる材料特性データの継続取得や周辺技術開発が必要となり、開発した材料を用いたパイロット発電設備の実証試験など政策的な支援が望まれる。また、耐熱材料開発では、材料特性に起因するリスクの低減を狙い、母材成分・組織の改善とともに、溶接部クリープ強度、クリープ延性などの更なる改善に関する研究開発も期待される。

31. 高強度軽量材料

		日本		米国		欧州		中国		韓国	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
CFRP等	基礎	○	→	◎	↑	◎	↑	○	→	△	→
	応用	◎	↑	○	→	◎	↑	○	→	○	→
アルミニウム合金	基礎	○	↓	△	↓	△	→	○	↓	○	↓
	応用	○	↑	◎	↑	◎	↑	○	↑	○	↑
セルロースナノファイバー	基礎	◎	↑	◎	↑	◎	↑	◎	↑	△	↑
	応用	◎	↑	◎	↑	◎	↑	○	↑	△	↑

住宅機材、建設資材、輸送機器、浄化槽などに主に利用される繊維強化プラスチック (FRP) の出荷量(日本)は、1960 年代後半から徐々に増加し、1996 年にはピークの 0.48 百万トンに達したが、その後は減少を続け、2009 年以後 0.2 百万トン台に低迷している。一方、航空機や自動車の構造材として利用が拡大しつつある炭素繊維複合材料 (CFRP) は、1961 年に大阪工業試験所がアクリル繊維系炭素繊維製造の基本原則を発表し、1971

年から東レが本格生産を開始した。熱硬化性樹脂もしくは熱可塑性樹脂をマトリクスとし、その中に直径 6~10 μ m の炭素繊維を強化剤として配置させた複合材料で、ハンドレイアップ法やホットプレス法などで成形される。高い機械的性能が要求される航空宇宙分野では、ホットメルトタイプの熱硬化樹脂を用いたプリプレグという中間成形体を出発原料とし、オートクレーブ（圧力釜）を用いた加圧成形法が用いられることが多い。近年、CFRP を主要構造材として用いた大型構造物の代表例であるボーイング 787 の場合、機体構造重要の 50%が CFRP で製造されており、その 70%、全機体重量の 35%が国産のプリプレグにより製造されている。炭素繊維における高い製造能力を背景として CFRP 製造においても日本は高い国際競争力を有してきたが、欧州がロボットを利用したプリプレグの積層技術など、次世代航空機の製造技術の研究開発を着々と進めており、日本はやや遅れをとっている状況である。また、2013 年 11 月にドイツ BMW 社は、世界で初めて CFRP(三菱レーヨン製)を車体の主要骨格に採用した電気自動車「i3」を一般向けに発売している。

新たな注目動向として、CFRP については、先進真空樹脂含浸成形法(Advanced VaRTM)という CFRP 成形法が開発され、三菱航空機リージョナルジェットの後翼の成形に適用された。課題としては、CFRP の破壊および損傷特性や、耐久性、耐衝撃性などに関して未だ十分な知見が得られておらず、材料の健全性の評価・検査技術の開発と併せて、そのデータを蓄積、解析する必要性などが挙げられる。将来的には、金属材料が全て CFRP に置き換わる状況は考えにくく、BMW の 7 シリーズにみられるように、金属部材と CFRP を接合した形でのハイブリッド材が多く、多くの構造に採用されるものと予想され、鉄鋼、アルミニウム、チタンなどの金属材料と CFRP との接合技術、接着技術も重要な課題となる。

アルミニウム、チタンなどの軽金属材料に関しては、軽さに加えて、リサイクル性がカーボン繊維や CFRP 複合材料に比較して、インフラを含めて圧倒的に優れていることから、特に自動車用部材としては実装も含めた適用がなされている。日本は、鉄鋼ともにナノスケールでの微細組織化、ナノ材料の添加などで世界最高性能を誇る。例えば、ナノスケールの析出物を鋼中に分散させることにより強度を大幅に増加させたナノハイテンが市販されている。一方、欧米は軽金属メジャー企業を有し、航空・宇宙・防衛産業において依然として研究開発から産業化まで優位性を保っている。ロシアは航空・宇宙産業に強みがあり、アルミニウム、チタンに関する技術も保有していることから、今後の動向が注目される。中国、韓国は製品化のコスト競争で優位に立ち、さらに、自前の素材開発に注力しつつある。

新たな動向としては、更なる軽量化という視点でアルミニウム-リチウム(Al-Li)系合金が注目されている。課題としては、接合技術において、熱伝導性の良好なアルミニウム合金で必要な大きな入熱が接合前の材料中のマイクロ組織を破壊して、機械的性質を著しく低下させることがある。このため、摩擦攪拌接合技術などの新展開による信頼性の高い接合技術が望まれる。また、大型ダイカスト技術で精密に一体成型できる接合を要しない技術の新規展開も課題である。

セルロースナノファイバーは、1980 年前後に米国の Turbak らが製紙用パルプを解繊して調製したのが始まりと言われ、セルロースナノファイバーの研究開発が材料として

特に発展したのは 2000 年頃からであり、2004 年頃から論文や特許数が急激に増加している。セルロースナノファイバーの研究開発の中心は北欧、北米、日本であり、最近では中国でも活発化している。セルロースナノファイバーの高強度軽量材料への応用は日本が世界をリードしており、京都大学や東京大学を中心として研究開発が行われている。

セルロースナノファイバーについては、京都大学が企業と共同で、京都プロセスと呼ばれる低コストのセルロースナノファイバー新製造技術を開発、経済産業省のプロジェクトを中心に、セルロースナノファイバーの製造方法、修飾方法、樹脂への分散方法等を検討し、高強度軽量材料として大きな研究成果を上げてきた。東京大学は、触媒を用いてセルロース解繊(分離)を大きく促進させ、効率よくセルロースナノファイバーを製造する技術を確認してきており、2015 年スウェーデンの財団から「マルクス・バーレンベリ賞」を授与された。セルロースナノファイバーの課題としては、ナノセルロースを基材中で完全にナノ分散化する制御技術と、それを定量化・視覚化－計測する手法の構築が求められている。

高強度軽量複合材料の研究開発においては、構造物設計と材料設計が一体となって行われることが多く、それに携わる研究者は、比較的機械工学系の研究者が多い傾向にあるが更なる高性能化のためには繊維/樹脂界面の解析・制御や、複合材マトリクスの分子構造の制御、さらなる高強度と耐熱性を発揮する新規樹脂マトリクスの開発など、応用化学的視点からの、ナノ・ミクロスケールでのアプローチが重要であり、材料科学系および材料工学系との協働促進が望まれる。

（３）研究開発（科学技術）トピックスと日本の大学等の強み

以上を踏まえた大きなトレンドとしては、下記に挙げたように、大規模な CO₂ 排出源である火力発電や CCS 周りの研究開発や再生可能エネルギーの導入による環境の変化に対応した研究開発が多く見受けられる。

【火力】

高温化に向けた耐熱材料技術や低コスト化技術、燃料電池との組み合わせによる高効率化技術、再生可能エネルギーとの協調制御型火力発電技術等の研究開発(日本、ドイツ)。

【CCSU】

CO₂回収プロセスでは膜法などの分離回収手法研究が、CO₂地中隔離プロセスでは CO₂注入後のモニタリングや CO₂漏洩検知に関する研究が、CO₂有効利用については人工光合成などの研究。

【バイオマス】

バイオマス由来の糖や低級有機酸等を起点とする化成品製造に関する基礎、プロセスなどバイオマス燃料、バイオリファイナリー研究。

【エネモデル】

エネルギー需要のビックデータからの消費者行動のモデル化の可能性。

【パワエレ】

自動車・鉄道の他、直流送電や大規模太陽光・風力発電への需要。

[蓄電]

日本は自動車用途がメインだが、欧米は再生可能電力の大量導入を見据えレドックスフロー電池をはじめ電力用途のエネルギー貯蔵技術に注力。

[トライボロジ]

複合領域であるトライボロジーについては、拠点型の研究開発（欧米）。

個別の科学技術トピックスとしては、下記が見出された。システムレベルでは、空中風車技術、バーチャルパワープラントが、材料・デバイスレベルでは、ペロブスカイト太陽電池、全固体電池、調光材料、ケミカルループ燃焼、高エントロピー合金、セルロースナノファイバーなどがホットトピックスといえる。

[風力]

出力 10MW 以上の大型洋上風力発電システム開発で低速・大トルク・大型のダイレクトドライブ同期型の超電導発電機の導入可能性が検討。電力系統との連系対応技術の開発も要注目。新規概念風車としての空中風車技術(米国)。[Google が買収した Makani Power 社はグライダー式の 600kW 機を米国で、日本の Soft bank などが出資した Altaeros 社は気球式の 30kW 風車をアラスカで試験中。]

[太陽]

ペロブスカイト太陽電池について、20%を超える光電変換特性が再現よく得られるペロブスカイト薄膜結晶成膜技術を京都大学が確立。韓国化学技術研究所やスイスローザンヌ工科大学でも 20%超変換効率を達成(韓国、スイス、日本)

[分散 EMS]

産官学の連携によるバーチャルパワープラント実証を各地で多数実施。欧州は政策目標実現を視野にした系統安定化技術で世界をリード（米国）。

[送配電]

2016 年にイットリウム系線材の価格が安価になり、ビスマス系と同等かそれ以下になったとの報道（韓国）。今後再生可能エネルギーの普及と相まって、直流送電への投資が急速に増大する可能性有り。

[蓄電]

全固体電池の電解質材料やポスト LIB が盛ん。

[蓄熱]

欧米中は、太陽熱発電プラントに併設する化学蓄熱技術を開発。

- 硝酸塩系潜熱蓄熱材（融点 306°C）を使用した CSP 向けの中温潜熱蓄熱システムの開発（ドイツ）
- 化学反応を利用して太陽エネルギーを熱として放出できる蓄熱材を用いて太陽熱の長期間の保存を確保し貯蔵安定性を実現（米国）

[FC]

発電のみならず、化学品合成に電解セル（特に中温域）を用いる動き。

[遮熱]

高分子系の波長選択型の遮熱塗装技術の開発（米国）

【断熱】

Ag/SiO₂ コアシェル型ナノ微粒子を用いたプラズモン吸収による波長選択型の遮熱膜の作製（欧州）

【断熱】

フュームドシリカを利用した長寿命断熱材に関する研究（欧州）

【調光】

日本は調光ミラー薄膜、米国はプラズモン調光材料の開発や有機エレクトロクロミック材料の開発

【熱再生】

自然系冷媒のイソブタンを用いた単段・高温ヒートポンプもしくはイソブタンを高温側に R134a を低温側に用いたカスケードヒートポンプの開発（ドイツ）

【熱再生】

日本のメーカーが冷媒充填量を低下できる技術を開発

【燃焼】

新しい燃焼方式のケミカルループ燃焼(金属酸化物を酸化剤として媒介利用) を用いて、CO₂ 分離回収の研究開発が活発化（欧米。アイデアは日本発）

【燃焼】

超高効率化を目的とした研究がトレンドであり、新しい燃焼方式を含めて研究が進んでいる。

【耐熱材】

Mo-Si-B 基合金、SiC/SiC 複合材料（通称 CMC）、高エントロピー合金（High Entropy Alloys; HEAs）などが要注目。

【軽量材】

航空機向けの先進真空樹脂含浸成形法(Advanced VaRTM)という CFRP 成形法

日本の大学等の成果、強みとして下記のようなものが抽出された。いくつかの分野・技術は拠点が形成されており、また世界的に注目される研究も多い。

【核融合】

レーザー核融合については、大阪大学の提案する高速点火方式が最終段階。この高速点火方式は流体力学的不安定性の影響が少なく、注目すべき方法。

【CCU】

NEDO プロで、世界最高水準となる 3 %の太陽光エネルギー変換効率を達成。堂免（東大）ら等、光触媒コミュニティの論文が世界的に引用。

【太陽電池】

JST-CREST で京都大学が 20%を超える光電変換特性を再現よく得られるペロブスカイト薄膜結晶成膜技術を確立

【バイオリファイナリー】

神戸大学が、細胞内の数百種類の化合物を網羅的に測定する技術を活用して、セルロース系バイオマスから多様な物質を高効率に作り出すための基盤技術を確立。

[パワエレ]

JST のスーパークラスター、FIRST の革新パワーエレクトロニクスにより、京大と名大に拠点が形成。京大は SIC、名大は GaN に強み。SIP 次世代パワエレにより、大学研究者の裾野や交流も広がっている。

[蓄電池]

NEDO-RISING、ALCA「次世代蓄電池」、「元素戦略（触媒・電池拠点）」により、世界から注目が集まっている。

[蓄熱]

近年、いくつかのトピックスが出ている。

- 蓄熱した熱を、圧力を加えることで自在に取り出すことができる新セラミックス蓄熱材を東京大学と筑波大学が共同で開発。
- 産総研らの研究グループは、分子動力学計算から糖アルコール類が高い潜熱量を持つ要因を突き止め、より高蓄熱密度の糖アルコール系潜熱蓄熱材の設計コンセプトを抽出。計算科学からの材料設計は、潜熱蓄熱材の分野では例がなかった。
- 理研は二酸化バナジウムの一部を他の金属で置換した物質に、大きな蓄熱特性を持つことを発見し、固固相転移利用型潜熱蓄熱材を開発。

[エネキャリ]

産総研では、二酸化炭素と水素、ギ酸を行ったり来たりさせる技術（エネキャリとしてギ酸を用いる技術）を開発。SIP により、いくつかのシーズが生まれている。

[燃料電池]

PEFC の触媒については低白金化、非白金化の研究開発が進められており、日本がリード。コアシェル触媒で同志社大、合金触媒で山梨大、東工大、カーボン系触媒で群馬大、東工大、金属酸窒化物で横浜国大が検討。また研究拠点として、九州大（水素含む）、山梨大がある。

[磁石]

「元素戦略（磁性材料拠点）」や「東北発素材技術先導プロジェクト」により、NIMS および東北大に拠点が形成。NIMS は評価技術、東北大は材料技術に強み。JST 産学共創プログラムにより、研究者の裾野を維持。

[熱再生]

未利用エネルギー革新的活用技術研究組合 (TherMAT) は 1300℃ の耐高温性能を有し、産業／工業炉からの排熱を従来比 3 倍の性能で回収する高温用高効率熱交換器を開発。

[調光]

産総研がガスクロミック方式を用いた調光ミラーシートやプルシアンブルーを用いた調光材料の開発、千葉大学が銀の電解析出を用いた調光材料の開発、NIMS が金属錯体を用いた調光材料の開発。

[照明・ディスプレイ]

有機 EL について、JST「地域卓越結集プログラム」や COI により、山形大に、FIRST や ERATO により、九大に拠点が形成。山形大はデバイス技術に、九大は材料技術に強み。

〔ヒートポンプ〕

冷媒の熱力学的物性や輸送物性の測定評価は世界のトップクラスを保持しており、測定結果は世界標準である冷媒物性計算ソフト“refprop（米国 NIST）”にも採用。

〔CO₂分離膜〕

産総研は、安価な材料(ポリフェニレンオキシド)から優れた分離性能と柔軟性を持つ新規中空糸炭素膜を開発し、低コストで破損しにくい膜モジュールの開発に世界で初めて成功。

〔耐熱材料〕

Ni 基超合金、Ti-Al 合金、Mo-Si-B 基合金に関しては、国際的にも見ても優位な研究拠点が、各々、NIMS、東工大、東北大学に形成。

〔セルロースナノファイバー〕

京大は企業と共同で、京都プロセスと呼ばれる低コストのセルロースナノファイバー新製造方法を開発。東大は、触媒を用いてセルロース解繊(分離)を促進させ、効率よく製造する技術を確立し、自動車部品への実用化研究を推進。

（４）俯瞰ワークショップのまとめ

中長期的な視点から今後国として推進すべき研究テーマを抽出する取組みの一環として、学協会推薦の若手・中堅の方々の参加を得て、3 つの俯瞰ワークショップを開催した。その結果を以下にまとめる。

1. 未来のエネルギー社会のビジョン：10 学会 21 名
2. エネルギー・低炭素未来科学技術：12 学会 30 名
3. エネルギー基盤技術（工学）：19 学会（部門）39 名

1. 未来のエネルギー社会のビジョン

各グループの議論における共通認識として、将来のエネルギーシステムを検討する場合には、現状のエネルギー技術を始点にするのではなく、未来時点での社会の変化（人間の価値観や行動の変化）にあわせた技術開発を論ずるべきとする意見があった。また、技術のみではなく、社会の構造変革やエネルギーを利用する人間の意識の変化により解決の道筋を探る姿勢も共通していた。さらに、人類の存続においてエネルギーは必須であり、将来は現状のまま大量に化石燃料を使い続ける社会ではなくなるが、未来社会は強制的にエネルギー消費を制限する社会でもないという点についても一致していた。

一方で、未来の社会像の想定方法（将来の姿と現在をつなぐ方法）や課題解決としての研究開発の方向性とキードライバーとなる技術については、各グループそれぞれの議論がなされた。A グループでは、エネルギー供給制約から解放された 2100 年の社会を設定し、現状の延長線上にない技術開発や、地域に焦点をあてた社会のあり方を支える技術について検討した。B グループは、2050 年の人間の価値観や社会像の変化の予測に基づき、今後 1000 年を支えるミレニアルエネルギー利用、脱エネに向けた技術開発、変換・貯蔵に頼らないシステム化・高密度化技術を提示した。C グループは、2050 年の社会が人間にとって格差なく不自由や強制を強くない「富満足社会」となり、そこでのエネルギー利用は、炭素を循環させる「高炭素社会」が構築されていると想定し、この

達成のために開発すべき技術を提案した。

その他、今後の課題や進め方について、議論における定量性の視点の欠如が挙げられた。一方で、満足感対消費量の議論が現段階で不十分であるため定量的な議論は時期尚早である、あるいは定量性が概念ベースの議論の妨げになるとの意見もあった。一方で、定量的な議論が客観性の視点から論点の明確化に資する場合もあるので、臨機応変に検討すべきとの指摘もあった。また、今回のワークショップでは、工学系の参加者が主ではあったものの、専門領域を超えた社会の価値などに関する様々な視点からの議論が開かれた。今後は、エネルギーに関心の深い人文・社会系などの多様な学術的背景を有する参加者との議論による相乗効果に期待する意見が寄せられた。

各グループの議論の概要を以下に示す。具体的な内容は別途発刊予定のワークショップ報告書を参照されたい。

- グループ A

2100 年を将来と設定し、規範的考えに基づく議論を行った。2100 年の日本はエネルギー自給を達成し、省エネの必要がなくなり、エネルギーを制約なく利用できる社会になっている。一方、国民は「エネルギーリテラシー」を持ち社会受容性の課題から脱却している。冗長性も含め、社会における価値を最大化する仕組み作りが必要になる。

特に地域社会にフォーカスすると、地域社会の計画経済化が進む。計画経済に基づく農業の企業化が進み、林業ではロボットとデータ管理による計画伐採を行い、里山保全と水資源、国土保全、災害時の土砂崩れ防止システムを構築する。水産業については洋上に再生エネルギーステーションを作り、燃料基地と養殖がミックスする仕組みを作る。太陽光、バイオマス資源、地熱、水力などを最大限活用したでエネルギーを生産し、都市部に輸出することにより外貨を獲得し、地域の社会保障や教育も無料となり、人口が増える、など現在の延長線上にない姿を描いた。

地域における研究開発の方向性は、「電化」で多くの解決を目指す都市部と異なる姿を支える技術開発が重要である点も強調された。

キードライバーとして、CCU や水素、情報データセキュリティに係る技術など現在すでに重要性が認識されている技術は当然重要。その他、システムを成長させながら最適化していく技術が望まれる。空間的にも、海洋や超大深度、成層圏の活用の視点から、現状とは何桁も違う技術が生まれることが期待される。単独技術でパラダイムを変えられるものがあるとすれば、蓄光技術があるのではないか。

グループA

②研究開発の方向性

ー高いエネルギーリテラシー（社会、技術、教育）

・ネクサス(連環)の視点の人材育成

・文理の壁をなくす

・エネルギー省をつくる

ー脱省エネ・冗長社会（制約なく自由にエネルギーを利用できる社会）

・冗長性マーケットなどの新しい価値の可視化

・社会における効用を最大化させる技術の最適配置

ー地域社会の計画経済化

農業：工場化、企業社員農家

林業：木の樹齢のビッグデータ、計画伐採（里山保全、水資源、国土保全）、ロジスティクス

水産業：洋上エネルギー基地と養殖の共生

畜産業：農業・畜産業のミックス化

・バイオマス系資源でエネルギー生産、都市部に輸出、社会保障費無料

2

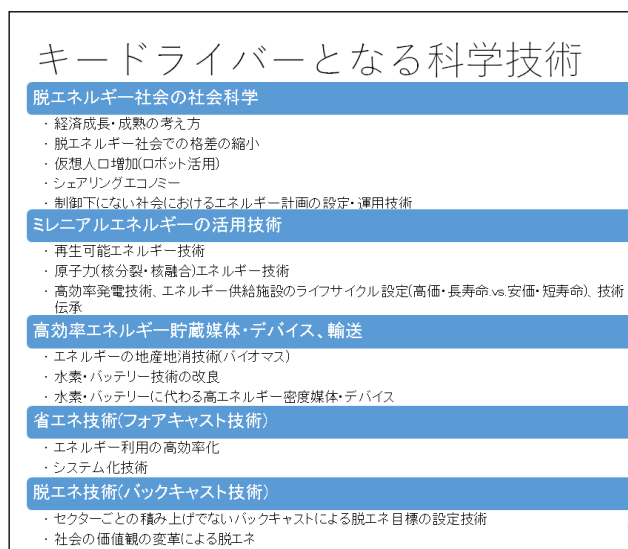
● グループ B

2050 年と現在との社会像の違いについて、2050 年には QOL（生活の質）、品質、成熟、サービス、仮想へと社会が目指すものが変化すると予想する。

研究開発の方向性として、こうした社会像を達成するための GDP 代替指標、脱エネ時の成長のあり方、格差是正のための方策の検討、消費について、仮想化による脱エネ化、脱エネのための産業構造の変革、気候変動に対応できる食料生産、リードタイムを十分考えた技術予測、貯蔵・変換・輸送については、システム化、高エネルギー化、高エネルギー密度化が、供給については「ミレニアルエネルギー」への移行が必要となる。

今後のキードライバーとして開発すべき技術は、社会科学的な視点からの、社会の課題への対処、シェアリングエコノミー、制御不能な社会におけるエネルギー計画の策定や運営技術、ミレニアルエネルギーの活用技術、エネルギーの地産地消、バイオマスを含めた、水素、バッテリー技術の改良などの高密度化、エネルギー利用の効率化、社会の価値観の変更による脱エネが重要になると考えた。

こうした議論に対し、社会科学がエネルギー消費量に与えるインパクトが期待される。科学技術の範囲を理工系に限定するというのは得策ではなくて、もう少し広げて問題解決に当たるのがひとつのブレイクスルーになると考える。



● グループ C

2050 年は、少子高齢化と産業競争力維持と再生可能エネルギーの変動を達成するために、晴耕雨読と外貨獲得のための輸出産業の優遇とを両立する社会になる。そこでは、機能的で安定な電源として、高効率でクリーンな石炭や天然ガスを優遇して使える。また、新たな指標により満足度が定められ、この満足度を最小のエネルギーで最大化できる「富満足社会」になる。カーボン構造部材や有機 EL、ダイヤモンド半導体等の炭素素材の普及に加えて、変動電力が大量に余ると電解水素も一層安くなり、CCU などと組み合わせ、メタンやメタノール等を使うなどして高度に炭素を循環利用する「高炭素社会」になる。

富満足を社会的に満たすために開発すべき技術として、多変数、最適化、市場規制などのモデル、設計技術が挙げられる。一方、富満足を個人的に満たすための技術として、人間工学、省エネ技術、エネルギーマネジメントシステムを拡大した SMS がある。超貨幣価値をまずは個人行動に結びつけ、いかに全体に繋げるかが大事になってくる。

高炭素社会に向けた研究開発の方向性として、炭素を大気中に CO_2 として放出しない方針で、エネルギーのハンドリング技術や構造材料に使う技術の開発、すなわち、高価格を軽量化などのその他の機能で置き換え、その製造過程で炭素を使う。通信、センサー類が出てくると、輸送距離や大容量の観点から省エネは考えなければいけない。あとはハーベスティングの技術、蓄エネ、なるべく燃やさないといった観点が入ってくる。基本的には循環をなるべく進め、炭素以外の鉱物、水を用い、再生可能エネルギー由来の電力か水素によりアップグレードする。変動動向にあわせるために、バッチプロセスがカギを握る。

高炭素社会と富満足社会をキーワードとした。炭素以外の鉱物や水を循環させ、そのエネルギーは再生可能エネルギーという社会になると予想する。



2. エネルギー・低炭素未来科学技術

COP21 では大気温度上昇を 1.5℃未満にすることが示され、目標到達には一段の科学技術のブレイクスルーが期待されている。また国の科学技術イノベーション政策においては、超スマート社会に向けてエネルギー分野にも変革が期待されている。

今後国として注目すべき研究の方向性・コンセプト（エネルギー・低炭素との関連において）について、ご自身の所属コミュニティによる議論のみでは出てこない、異分野連携（新結合）によってはじめて解決する研究の方向性や異なる技術シーズの結合により生み出される新しい研究の方向性について議論する。

30名の研究者を4つのグループにわけ、議論を行った。初回（一日目）は、分野の近い研究者で班を構成し、議論を行い、二回目（二日目）は、メンバーをシャッフルして、分野の違う方々で集まり、どういう研究開発の方向性が考えられるかを議論した。その結果のみを下記に記す。具体的な内容は別途発刊予定のワークショップ報告書を参照されたい。

1 回目

【A 班】

「エネルギー・資源の自給率 100%達成：太陽光・再生可能エネルギーの有効利用、廃棄物・バイオマス完全リサイクル」

- リグノセルロースの利用技術
- 食料の副産物⇒化成品原料（農業との連携）
 - 成分化、選択性の向上
 - 生産と資源化 システムの構築（規模・エネルギー効率も含めた視点を議論）
- 分離プロセス（熱エネルギー利用⇒分離膜・吸着剤）
- CO₂還元
 - 生成物選択性（CO、水素だけ利用）

- 分離膜
- 化学濃縮

【B 班】

「革新蓄電池の 2050 年での実装に向けた研究開発」

- 固体—固体あるいは固体—液体界面電気化学の展開
→計測技術の確立と計測結果から材料開発へのフィードバック
- 材料開発
→理論や計測技術から概念設計と材料開発への展開
- 従来の計測法では対応できない材料へ新規計測手法
- 局所構造計測からバルク構造計測へ
- 大型化に向けた課題解決方法の確立
- 評価の標準化

【C 班】

「8/10 システム 例：エラーを許容するネットワーク・システム、アモルファス半導体のような良い加減な材料セルフアセンブリ、スカラー → 数値 $\pm\alpha$ 」、「距離が小さくなる、あるいは見えなくなる 例：人が移動しなくてもよくなる世界、ローカライズ、輸送速度が問題にならない、輸送は考えない、軽量化も不要?」、「農林水産業×理工学一石二鳥（Mutual adaptive）」

- 熱ワイヤーネットワーク（超熱伝導、蓄熱）
- 家が1ユニット、ゼロエミッション
- PV、EVなどを電源、エネルギーをご近所で分け合い
- 直流送電（究極のパワエレ）
- 電気は電気のまま、熱は熱のまま
- スピントロニクスを用いたデバイス駆動、イメージングセンサ
- インフォマティクス×自己組織化プロセス

【D 班】

「炭素フリー社会・人口減少社会」

- 電力供給の安定性・高速負荷変動（多様なエネルギーとの共生）
- ピーク効率の追求から全体システムの向上へ
- 高温高压化、タービン翼間燃焼、高効率機器（2000℃級）
- ゼロエミッション発電
水素、アンモニア、CO₂ 吸収型発電
- 小形の分散型電源（低コスト化が必須条件）
自動車や道路（電力供給と一体化する）を電力網に？
- 炭素フリーの製造技術
鉄鋼（水素還元、2040 年ごろ）、ダストフリー燃焼技術
- メンテナンスフリー材料（自己修復性、知的センサー）

- 材料特性を活かした設計（軽量化と耐熱性）。セルロース材などポスト CFRP への期待。
- プロセスのエネルギーの流れの最適化（排熱をどこまで使い込めるか。低品質エネルギーの活用）

2 回目

【A 班】

「低炭素社会実現を目指した未利用資源の有用物質変換技術開発」

- 反応選択性の触媒技術（非金属触媒等）
- 電極表面反応利用のための材料
- 生体触媒の探索
- 持続的育種とバイオマス前処理技術
- 強誘電体材料開発
- 革新的溶媒材料開発
- 分離膜技術開発
- 溶融塩等をベースとした蓄熱材料開発
- 触媒材料等のミクロ・マクロレベルでの解析技術

【B 班】

「電力、熱、光などをもっと効率的に蓄積し、必要な時に自由に取り出せる蓄エネルギーシステム技術」

- 中長距離の熱輸送（町一つ（離島）レベル）
- 蓄電池（劣化、容量が一桁増大、安全性の課題）
- 水素（有機ハイドライド等）
- 太陽光発電の効率化
- 化学蓄熱、高温蓄熱（ $550^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ ）、低温廃熱利用

「CO₂の固定化と資源化」

- 温和な条件でほしいものだけを作る究極の触媒（分離プロセスの単純化、コストダウン、省エネルギー）
- 人工光合成
- 藻類で固定（屋外の大量培養と回収に必要なエネルギーが課題）。林業の立て直し。

【C 班】

「エネルギー消費を減らさずに CO₂ 生成を減らす方法」、「化石資源由来のエネルギーや物質を他のものに置き換える方法」、「得られたエネルギーを貯めておく方法」

- エネルギー変換材料として廃熱・太陽熱をつかって熱電気化学
 - 電気プラス廃熱、電気プラス太陽熱、電気プラス太陽光で少ない電力で大きなギブス自由エネルギー獲得
 - 50 の電気エネルギー投入と 50 の光・熱エネルギー（廃熱、太陽熱あるいは太陽光）で 100 強の水素エネルギーが得られる

- CO₂を分離する方法（分離工学の高度化）
- 速度的に見合う CO₂利用技術（カーボネート作っているだけだと消費量が少ない）
- 熱を安全に効率よく運ぶ熱媒体
- エネルギーを創る＋ものを創る、は同時に進める
- ゼーベック効果を用いた効率良いエネルギー変換
- バイオマスの有効利用のオプションとしてリグニン有効利用
- 勝手に動いているもの（車や人）からどうやって熱にするか
- 高温に耐える材料・高い断熱係数を有する材料・良い熱輸送材料

【D 班】

「Energy flow の統合制御・高度利用」

創エネルギー

- 再生可能エネルギーからの発電
- エネルギーハーベスティング
- CO₂フリー水素関連技術
- 海水の分解による水素（および酸素または塩素資源）の効率的製造
- 地球エネルギー（地震・火山・海洋）の利用

省エネルギー（変換技術を含む）

- 火力発電所のリアルタイム数値シミュレーション技術による自動最適運転
- 火力発電の超高効率化（目標効率 80%）
- 小型の分散型電源（低コスト化が必須条件）
- 熱回収（デバイス、アスファルト、工場、発電所など）
- 無駄な熱を発生させないデバイス・材料の開発

蓄エネルギー

- 高性能の蓄電池の開発
- 電力以外のエネルギー源による充電の充電
- 化学エネルギーとしての貯蔵
- 熱輸送（短距離）

省資源 CO₂フリー化・循環化

- 燃料電池における水素燃焼による真水の生産による水資源の確保（砂漠地帯の緑化を含め）
- 化成品原料としての石油代替資源の導入（農業分野との協働）
- CO₂吸収型発電

情報の高度利用

- グリッド内のエネルギー状況（出し入れ）のモニタ
- グリッド内のエネルギー利用形態の最適化
- グリッド間のエネルギーのやりとりの最適化
- 各デバイスにおけるエネルギー利用の制御・最適
- 大規模シミュレーション 予測・フィードバック
- 基礎理論研究（数値モデリング）

- 高度分析技術のバルク材料開発・界面設計（デバイス開発）へフィードバック

3. エネルギー基盤技術(工学)

日本は、ものづくり国家として、他国には真似のできない信頼性の高い製品を作ることと強みを有しており、今後もこれを継続していくためには「基盤技術の深耕と伝承」が欠かせない。しかしながら、大学などでは、人事採用や業績評価における先端科学、論文重視の風潮の中で、ものづくりを支える基盤技術への取り組みが失われつつあることが指摘されている。

近年、このような基盤技術においても、時代の変化に対応した新しい視点での設計・製造・加工技術などのイノベーションが要求されている。世界を見ると米国の製造パートナシップや英国の高付加価値製造カタパルトなどの研究開発プログラムが先行している。

日本のイノベーション競争力を中長期的に維持強化していくためには、世界を凌駕する基盤技術の確立に加え、低炭素エネルギー未来社会（2030～2040 年）に対応する新しい視点での基盤技術の研究や開発、それらを支える施策が必要である。

そこで、CRDS では、エネルギー分野の製品・サービスのものづくりを支える基盤技術※における世界的な研究開発の流れを俯瞰し、わが国のポジションを把握するとともに、中長期の基盤技術のあるべき姿に向けた研究開発テーマや施策などについて議論し、提言をまとめることを目的とした。

※基盤技術とは、製造、材料、構造・強度、機械、燃焼、伝熱、流体、振動、化学、電気、計測制御などの基盤となる科学技術群を指す。

この結果、以下のような基盤技術の現状と課題、今後の研究開発テーマの方向性や、基盤技術強化のための施策が得られ、今後、具体的な提言にまとめていく。

【基盤技術の現状と課題】

- 日本の基盤技術は世界トップレベルの分野がある一方、システム化や統合化は国際的に立ち後れている。例えば、個別要素解析は世界レベルでも、全体解析技術（ソフトウェア、モデル構成式、検証データ）は他国が独占している。
- 大学では、基盤技術を知る人の減少が危惧され、教員の専門領域と講義内容のミスマッチが発生している。工学教育が学問のための学問を志向し、産業競争力を高める人材育成という視点が弱くなり、産業界において即戦力となる人材を育てていない。
- 産業界では、製品、要素技術の性能品質は総じて世界有数だが、ビジネスモデルが弱く、プラットフォーム戦略による優位性の確保などができていない。製品設計の際、材料、流体、熱など各分野の連携が不十分で、製品設計・製造を支える解析設計ソフトを海外製に頼っている。
- 施策面では、基盤技術研究のような地道な研究に科研費等資金がつきにくい傾向にあり、はやりの目立つ研究領域へ過度な資金・人員が集中、日本の多くの研究開発投資が製品志向で、それを支える基盤技術が疎かになっている。

【今後の基盤技術研究テーマ内容】（研究開発例）

● 材料技術の耐熱性・耐衝撃性向上、高強度軽量化、マルチマテリアル化

例えば、

- ・ 材料の衝撃・破壊現象解明、耐熱衝撃・耐繰り返し応力技術
- ・ 寿命予測、損傷予測技術
- ・ 更なる高温耐熱材料技術、超高強度・高靱性材料技術
- ・ 接着現象解明による複合材料(CFRP 等)/金属等の異材の接合・接着技術
(マルチマテリアルへの対応)、耐食性・低温靱性確保のための材料接合技術
- ・ 材料の耐久性を考慮した水素などの貯蔵・輸送技術、パイプライン、タンク等の耐水素脆化技術 等

● 加工技術、トライボロジー技術、振動抑制技術の高機能化、高精度化

例えば、

- ・ 高信頼性、高耐久性センシングによる生産加工情報（温度、振動、動力）のビッグデータベース化（高知能化）
- ・ 工作機械や高速回転機械の摺動面における低摩擦化等による高機能化技術
- ・ 複雑形状面の高精度化、平滑化技術（高強度歯車、高精度伝動装置等）
- ・ 摩擦面材料における新しい損傷形態解析技術（潤滑面材料最適化、低燃費タイヤ、高圧水素密封装置等）
- ・ 流体、構造、音響等複合解析、自励振動も含む複雑な流体関連振動現象解析技術（回転機械、輸送機器、配管タンク） 等

● 大規模構造体連成技術

（熱流体、燃焼、構造強度、振動、潤滑、材料、電磁気、化学等要素技術の統合化）

例えば、

- ・ 低炭素社会に資するエネルギー機器、輸送機器において、異分野間の連成を機軸とした機械最適設計や機械寿命予測などを目指した、構造体の運動、変形、潤滑、流体、伝熱、燃焼など多数の支配方程式の高速連成解析技術
- ・ 大型、実大性能試験技術 等

【施策例】

- ・ 基盤技術の維持と伝承と、学学連携、産学連携、産産連携のオープンイノベーション推進のため、学術・戦略拠点を設置
基盤技術研究の適切な評価軸設定と効果確認
- ・ 基盤技術研究と先端研究の両立を図る適切な投資配分構築
あるいは、基盤技術への非競争的資金活用の仕組みづくり
- ・ 産業界の基盤技術研究への研究開発投資を誘発する仕組みづくりとその実行 等

2.3.4 研究人材・コミュニティの動向

エネルギーの学会員数・学会参加者数や論文の著者数から、研究開発人材の規模について把握を試みた結果を示し、考察する。総務省が実施している科学技術研究調査（平成 26 年度（2014 年）実績（括弧内は平成 16 年度実績））によると、「大学等」および「公的機関等」

の自然科学の研究者数は約 23.4 万人（20.6 万人）、「企業」は約 52.5 万人（45.6 万人）であり、「大学等」および「公的機関等」の自然科学の研究者数は 10 年間で 14%、「企業」は約 15%増加している。本調査はこれら調査結果を分野の視点から分析した。

1. 学会の動向からみた各分野の研究者規模の把握

CRDS では、技術分野別のユニットが、分野ごとに分野の構造（視座）や包含する領域を定義するために俯瞰図というものを作成した上で、各ユニット（分野）が主要と考える研究開発領域についても選択している。これらの考え方を踏まえ、規模や基礎研究の有無を考慮して各分野の主要な学会を抽出し、各学会に対し、アンケート調査を行った。

ここで、例えば、エネルギー分野に関連する主要学会について考えたとき、機械学会、電気学会、化学工学会が中心となる。ただし、例えば機械学会の中でも機械加工などの直接的にはエネルギーに関連しない部門も大きな割合を占めるため、主には流体力学部門、熱工学部門、エンジンシステム部門、動力エネルギーシステム部門などがエネルギーをメインに扱うセクションといえ、対象となる学会のすべてが、一概にエネルギー分野の研究者とはいえないことには留意が必要である（今回は学会単位での動向のみを調査）。同様に電気学会の電力・エネルギー部門や、化学工学会の粒子・流体プロセス部会、熱工学部会、分離プロセス部会、反応工学部会などに属している科学者・研究者はエネルギー分野の研究者と捉えて良いと考える。一方、石油学会、原子力学会のほとんどはエネルギーに関連していると考えられるし、触媒学会、電気化学会なども多くはエネルギーへの意識が高い研究者といえよう。同様に日本冷凍空調学会や日本伝熱学会、日本エネルギー学会などもエネルギー分野の研究といえるが、会員の多くは機械学会や化学工学会等と重複した会員でもあることが予想される。エネルギー・資源学会も電気学会と両者に参加している研究者が多いと推測される。もちろん、応用物理学会や化学会などに太陽電池等のエネルギー分野に関心の高い研究者がいることも事実であるが、割合としては少ないと考えられるので、今回は関連学会に留めた。他の分野についても同様の考えの下、学会を選択し、分析を行った。

このような諸条件を踏まえた上で、以下に分野ごとに学会の会員数、法人会員数および年会参加者数の動向について述べた後、分野間の比較を行った。表は近年の会員数等の増減について示したものであり、原則として 2004 年と 2014 年のデータを用いて 10 年間の変遷について分析した。

エネルギー分野

1. エネルギー分野ではない研究者も含まれていること、および学会間で相当数の重複があることを前提に、個人会員数を単純に加算すると約 10.4 万となる。年会参加者をアクティブな研究者と捉え、単純に加算すると約 1.5 万人となる。
2. 電気化学会、触媒学会は微増となっており、近年の電池研究や水素関連研究への関心の高さが伺える。対して、化学工学会、金属学会、冷凍空調学会、石油学会、エネルギー・資源学会は 15%以上会員数を減らしている。
3. エネルギー分野に大きく関連する協会として自動車技術会があるが、唯一会員数を

大きく伸ばしている学会である。

4. 企業会員数は、規模、分野に依らず、全体的に減少している。
5. 年会参加率は、最大規模の機械学会で少なく、伝熱学会で大きい。機械学会等の大きな学会は部門別に年会あるいはそれに近いイベントが開催されるため、全体の会に参加する研究者が少ないことが推察される。

表 2-6 エネルギー分野の主な学会

学協会名	個人会員数			法人会員数			年会参加者数※		
	2004	2014	増減(%)	2004	2014	増減	2004	2014	参加率
日本機械学会	37837	34696	▼8	798	711	▼11	2511	2570	7.4
電気学会	24328	21814	▼10	481	401	▼27	2949	2912	13
化学工学会	9291	7699	▼17	514	425	▼17	1500	1447	19
日本原子力学会	7457	7393	▼1	269	231	▼14	1520	1460	20
日本金属学会	7647	5340	▼30	306	280 (2009)	▼8	1913	1496	28
日本冷凍空調学会	5150	4045	▼21	307	228	▼26	479	458	11
電気化学会	2945	3193	8	224	223	▼1	1956	1800	35
石油学会	3830	3069	▼20	329	279	▼15	450	495	16
触媒学会	2539	2623	3	122	112	▼18	—	861	33
日本伝熱学会	1379	1285	▼7	49	39	▼20	—	818	64
エネルギー・資源学会	1769	1219	▼31	155	103	▼34	298 (2009)	228	18

(参考) エネルギー分野に大きく関連する学会

学協会名	個人会員数			法人会員数			年会参加者数※		
	2004	2014	増減(%)	2004	2014	増減	2004	2014	参加率
自動車技術会	37872	47000	24	511	563	10	4247	5278	11
日本鉄鋼協会	8721	8927	2	179	161	▼10	1333	1415	16
日本セラミックス協会	4985	4516	▼9	297	216	▼27	920	1210	27
有機合成化学協会	4798	4260	▼11	243	207	▼15	-	-	-
日本化学会	33340	28394	▼15	1174	883	▼25	8403 (2009)	8779	31
応用物理学会	23132	21603	▼7	549	410	▼25	9462	6841	32
高分子学会	11555	10248	▼11	374	302	▼19	3396	3112	30

環境分野

1. 単純に加算すると約 2.1 万となる。年会参加者をアクティブな研究者と捉え、単純に加算すると約 0.9 万人となる。
2. 生態学会、水文・水資源学会は現状維持となっている。対して、気候変動を扱う日本気象学会、森林学会も減少はしているが、その他の学会は軒並み 30%以上会員数を減らしている。
3. 企業会員数は、全体的に大きく減少している。50%以上減らしている学会が 4 つもあることが特徴的である。
4. 会員数が少ないコンパクトな学会が多い分、生態学会、森林学会、水環境学会、環境化学会など年会参加率が 60%を超える学会が多いことが特徴といえる。

表 2-7 環境分野の主な学会

学協会名	個人会員数			法人会員数			年会参加者数		
	2004	2014	増減(%)	2004	2014	増減(%)	2004	2014	参加率
日本生態学会	3711	3891	1	165	100	▼39	1352	2464	63
日本気象学会	3812	3311	▼13	415	201	▼52	秋季729	秋季880	27
廃棄物資源循環学会	3656 (2005年)	2580 (2015年)	▼29	280 (2005年)	113 (2015年)	▼60	1179 (2005年)	813 (2015年)	32
日本森林学会	2542 (2005年)	2444	▼4	255 (2005年)	124	▼51	-	1690	69
日本水環境学会	2614	1982	▼24	186	131	▼30	1497	1381	70
水文・水資源学会	1272	1279	0	62 (賛助会員) 23 (普通会員)	26 (賛助会員) 44 (普通会員)	▼18	-	293	23
日本環境化学会	1489	885	▼41	91 (賛助会員) 48 (普通会員)	99	-	890	558	63
大気環境学会	1582 (会、法人等別)	1043	▼34	85 (賛助会員)	221	-	812	473	45
日本陸水学会	1200	725 (2015年度)	▼40	64	44 (2015年度)	▼31	380	264	36
日本環境エンジニア学会	-	1063	-	-	61	-	-	春季250	24
環境科学会	1510	1020	▼32	30	11	▼63	164	288	28
環境経済・政策学会	-	1185	-	-	14	-	-	-	-

（参考）環境分野に大きく関連する学会

学協会名	個人会員数			法人会員数			年会参加者数		
	2004	2014	増減(%)	2004	2014	増減(%)	2004	2014	参加率
土木学会	36406	37284	2	1393	957	▼31	5700	5374	15
日本分析化学会	6884	5346	▼22	1471	1202	▼18	1381	1182	22

2. 分野間の比較と考察

- 総務省統計では、研究者は増加しているにも関わらず、個人会員数は、分野を問わずほとんどの学会において数を減らしている。リーマンショックなどの影響を受けて、企業の個人会員が大きく減っていることが推察される。自動車技術会は会員数を 20%も伸ばしている。この 10 年の自動車産業の好景気、安定を反映していると推察される。また、電気化学会や触媒学会の増加は今後社会的に重要とされている蓄電池や燃料電池、エネルギーキャリアの流行を反映するなど数字としてわかりやすい形で示されている。
- 法人会員数は、分野を問わず、全体的に大きく減少している。リーマンショックなどの影響を受けて、企業が脱退したことが原因と推察される。特に企業活動に直接結びつきにくい環境分野は 50%を超えて減らしている学会が 4 つもあることが特徴的である。
- 年会参加率は、機械学会、電気学会、自動車技術協会などの大きな学会で 20%以下と低い。大きな学会は部門別に年会相当の企画をもつため大半はそちらにのみ参加していることが考えられる。

【参考文献】

1. 総務省「科学技術研究調査」
2. 文部科学省 科学技術・学術政策研究所「科学研究のベンチマーキング 2015-論文分析でみる世界の研究活動の変化と日本の状況-」

2.3.5 社会受容、科学技術コミュニケーション

環境分野も含めたエネルギー分野の問題解決は、国主導の政策において行われることが多く、これに関する研究開発もこれら政策の影響下にある。このため、研究開発に携わる科学者の独立性確保と国民・市民とのコミュニケーションによる社会受容の観点が欠かせない。日本学術会議幹事会声明「東日本大震災からの復興と日本学術会議の責務」においても、①科学者コミュニティから政府への助言・提言を行うこと、②政府が科学者コミュニティの自立的な活動を保障すること、③市民との双方向のコミュニケーション、の重要性が強調されている¹⁾。

これら社会受容に関して、CRDS 環境・エネルギーユニットでは原子力の問題をテーマとした報告書「原子力の専門家に向けて～社会とともに原子力と向き合うために～」を平成 27 年 11 月に発刊し²⁾、科学者の役割、科学的助言の在り方、リスクコミュニケーションの重要性を論じている。一方、リスクコミュニケーションは、画一的なゴールが存在し政策決定の障害となる諸問題を解決する処方箋になるものとして過度に期待されていることもあるが、「より少なく、より良い、議論の対立状況」を目指すものとするのが妥当と思われる³⁾。

また、CRDS では、科学技術が社会に益するためのあり方や方向性を導き出すことを一つの重要な使命としており、その一環として ユニット毎に「領域俯瞰図」を作成してきた。これは、各ユニットの全体像を把握するための図面であり、研究者が自分の研究の位置を知るのに有効である。また、社会的な意味を創り出すには異なる領域の結合が必要であるが、これにも俯瞰は必要である。これらの知識と社会的期待を実現するのに必要な知識をマッチングする研究を CRDS では「邂逅型研究」と定義し、その重要性を説いてきた⁴⁾。

ただ、そこに目標としての社会的期待が科学的に明示されておらず、観念的あるいは情緒的にしか述べられていないことが新たな問題になる。一般の生活者個々人は様々な欲求や期待を持っているが、その中から社会的合意の得られるものを抽出し、それらを統合して社会の顕在的な期待として明示することは本来社会が基本的機能として持つべきなのであるが、現在それは極めて不十分である。社会的期待の発見できたりすれば、研究開発のアプローチも大きく変わっていくと思われる。そのためには、科学技術コミュニケーションにおいて、科学と社会とについて専門的に深い知識を持つ新しい翻訳者の育成が必要になってくると考えられる⁴⁾。

【参考文献】

- 1) 日本学術会議幹事会声明「東日本大震災からの復興と日本学術会議の責務」
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-kanji-3.pdf>
- 2) 原子力の専門家に向けて～社会とともに原子力と向き合うために～
CRDS 環境エネルギーユニット 原子力サブユニット、平成 27 年 11 月

- 3) 「リスクコミュニケーションの推進方策」（仮称）作業部会の検討状況報告
科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 安全・安心科学技術及び社会連携委員会(第 3 回)、平成 25 年 7 月 19 日
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/064/shiryo/__icsFiles/afieldfile/2013/11/14/1338117_2.pdf
- 4) 「社会と科学技術を結び付けるために」、吉川弘之、2014 年 6 月
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/about/FR201405.pdf>

2.4 総括及び分野の今後の方向性

世界の研究開発（科学技術）政策、および研究開発動向から総合的に判断するとエネルギー分野における世界の研究開発の主な潮流は下記の4点に集約される。

1. 低炭素化（エネルギー高効率利用・省エネルギー）への対応
2. 再生可能エネルギーの大量導入時への対応
3. エネルギー資源（石炭、石油から天然ガス、バイオ資源、再生可能エネルギー由来電力）変遷への対応
4. 原子力の安全性や廃炉などへの対応

1.は、火力、CCS、原子力、核融合、太陽光、風力、地熱、熱再生利用、蓄熱、燃焼、トライボロジー、耐熱材料、高度軽量材料、BEMS/HEMSといった研究開発領域が、2.は、調整力付火力、分散協調型EMS、直流送電（超電導含む）、エネルギー貯蔵、パワーエレクトロニクス、磁石（モータ・トランス）が、3.は、エネキャリ、燃料電池、CCU、バイオマス、各種触媒といった領域が該当する。4 は福島事故を受けて、世界的に取組みが実施されている。

特に、世界的な地球温暖化問題への意識から、再生可能エネルギーの大量導入時の調整力の問題、それに付随してエネルギー貯蔵といった研究開発が目の中の課題となっている他、将来を見据えて、再生可能エネルギー由来電力と二酸化炭素からの化成品合成などがホットな話題といえる。1 についても各国で粛々と研究開発が進められている。米国、英国では、これに関連してものづくり（製造業）の再興に注力されている。

上記及び、社会・経済の動向や現在の国のエネルギー分野の研究開発ファンディングの状況、CRDS で開催したワークショップの結果も踏まえ、日本がこの2～3年の間に国として重点的に大学・国研等を中心とした取組みを検討すべきエネルギー分野の研究開発テーマは下記の通りとした。

1. 再生可能エネルギー大量導入時代に向けた
 - 新しいエネルギーネットワーク（システム）
 - 高度炭素・水素循環利用（電力・基幹物資コプロダクション）のための革新的反応・分離
 2. エネルギーの高効率利用（低炭素化）に資する先進製造基盤技術
- 2.の例としては、「材料技術の耐熱性・耐衝撃性向上、高強度軽量化、マルチマテリアル化」、「加工技術、トライボロジー技術、振動抑制技術の高機能化、高精度化」、および「大規模構造体連成解析技術」等が挙げられる。

なお、今後の再生可能エネルギー大量導入を見据え、エネルギー貯蔵、パワーエレクトロニクスなどが、また省エネルギーに向け、構造材料をはじめその他の領域も重要であり、現在内閣府、経済産業省、文部科学省で取組まれているプログラムやその発展・深化が必要である。

一つ目の「再生可能エネルギー大量導入時代の新しいエネルギーネットワーク」では、2030年以降の大規模な低炭素化の方策として、一般家庭においても太陽光発電(PV)の大量の導入が想定される。これは、電力システムの安定性など、系統運用上の課題対策の必要性を意味するとともに、長期的にはエネルギー消費者と生産者という二つの側面を持つ一般需要家(プロシューマ)が分散的かつ多数存在するというエネルギー需給構造に変革が生まれることも意味している。この構造変化は、一般家庭群におけるエネルギー需給構造の複雑化をもたらすとともに、計画的・集中的需給管理を行ってきた電力システムとの親和性の課題が一層顕在化することも考えられる。一方で、ロバスト性が高く、柔軟で自律的な低圧配電系ネットワークとして、さらには個々の需要家間の電力融通や、一般家庭からの系統運用上の調整力確保が容易になることが考えられる。加えてこのような一般家庭につながるネットワークは科学技術基本計画にあるICT活用によるスマート社会に向けたプラットフォーム作りの一環としても有用と考えられ、他のネットワークとの重層的な連携により、新たな付加価値創造につながることも期待できる。研究テーマ例として下記のようなものが挙げられる。

- ICTを利用した分散管理型の電力潮流制御方法
- 電力の市場取引メカニズム
- 将来のエネルギー需給構造変化に呼応したモデル開発と評価
- エネルギーと熱の総合利用
- エネルギー利用に関わる人間の行動科学

二つ目の「高度炭素・水素循環利用（電力・基幹物質コプロダクション）のための革新的反応・分離」については、エネルギー資源の中心が今後天然ガス、バイオマス、再生可能エネルギー由来電力に移行することを見据え、電力由来で水素を高効率に作成する技術、CO₂を高効率に回収し有効活用する技術の開発が求められている。また、電気を用いて高選択的に化学反応を促進する技術や革新的なバイオリファイナリの研究も必要となる。

- CO₂分離・回収技術
- CO₂変換技術
- 水素製造（水分解）・貯蔵技術
- 燃料電池（中温作動電解質、水素以外の燃料等）
- メタン等変換技術
- バイオリファイナリ

上記技術のボトルネックとして、炭素源としてのCO₂の回収・濃縮技術、バイオマスではリグノセルロースの分解・利用技術、人工光合成等の炭素の化成品転換技術、水素源として水の電解技術、水素等利用としては中温域の電解質に関する技術などが挙げられ、いずれも反応・分離技術が課題となっている。これらは個別の要素技術として研究開発が進められているが、原料はすべて炭素、水素、酸素で構成されており、C_xH_yO_zとしてX、Y、Zの違いで表記することができる。将来を見据えたエネルギー利用や物質生産においては、太陽光、再生可能エネルギー由来電力などを用いて原料であるC_xH_yO_zを分子レベルで制御し、反応・分離することで、高度な炭素・水素循環が可能となる革新的な反応・分離基盤技術が重要となる。X、Y、Zの違いにより反応、分離特性の違いが生じるが、これらは分子レベルの本質的特性である「親電子性」「親水性」「酸化還元電位」に依存する。このことから、これらの

本質的特性に着目し、反応・分離において分子レベルで制御するための学理の探求、さらには反応場分離や平衡を打ち破る不可逆性などの革新的な反応・分離技術を創出により、エネルギー利用や化学品生産等において、炭素・水素の高度循環利用を可能とし、将来の低炭素社会の実現に資することができる。なお、未来におけるエネルギーはXとZは低減、Yは増加の方向にあることから、分離においてはCO₂およびH₂分離が特に重要と考えられる。

三つ目の「エネルギーの高効率利用(低炭素化)に資する先進製造基盤（要素技術）」については、文部科学省で実施されている先端研究と経済産業省で実施されている応用研究の間をつなぐ、低炭素化（エネルギーの高効率利用、省エネルギー）に資する工学の重要性を指摘したい。日本のイノベーション競争力を中長期的に維持強化していくためには、世界を凌駕する先端技術の確立に加え、低炭素エネルギー未来社会（2030～2040年）に対応する新しい視点での基盤研究や開発が必要である。欧米はこういった技術を軍関係の研究所、あるいは大学で拠点化している事例が多い。日本ではこういった分野に科研費をはじめとした競争的資金がつきにくい傾向にあり、将来が懸念される。例えば、下記のような科学技術に産学で取組むことが求められる。

- 材料技術の耐熱性・耐衝撃性向上、高強度軽量化、マルチマテリアル化
 - ・ 材料の衝撃・破壊現象解明、耐熱衝撃・耐繰り返し応力技術
 - ・ 寿命予測、損傷予測技術
 - ・ 更なる高温耐熱材料技術、超高強度・高靱性材料技術
 - ・ 接着現象解明による複合材料(CFRP等)/金属等の異材の接合・接着技術（マルチマテリアルへの対応）、耐食性・低温靱性確保のための材料接合技術
 - ・ 材料の耐久性を考慮した水素などの貯蔵・輸送技術、パイプライン、タンク等の耐水素脆化技術
- 加工技術、トライボロジー技術、振動抑制技術の高機能化、高精度化
 - ・ 高信頼性、高耐久性センシングによる生産加工情報（温度、振動、動力）のビッグデータベース化（高知能化）
 - ・ 工作機械や高速回転機械の摺動面における低摩擦化等による高機能化技術
 - ・ 複雑形状面の高精度化、平滑化技術（高強度歯車、高精度伝動装置等）
 - ・ 摩擦面材料における新しい損傷形態解析技術（潤滑面材料最適化、低燃費タイヤ、高圧水素密封装置等）
 - ・ 流体、構造、音響等複合解析、自励振動も含む複雑な流体関連振動現象
 - ・ 解析技術（回転機械、輸送機器、配管タンク）等
- 大規模構造体連成解析技術（熱流体、燃焼、構造強度、振動、潤滑、材料、電磁気、化学等要素技術の統合化）
 - ・ 低炭素社会に資するエネルギー機器、輸送機器において、異分野間の連成を機軸とした機械最適設計や機械寿命予測などを目指した、構造体の運動、変形、潤滑、流体、伝熱、燃焼など多数の支配方程式の高速連成解析技術
 - ・ 大型、実大性能試験技術 等