

ATTAATL A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA C CTAAC T CTCAGACC

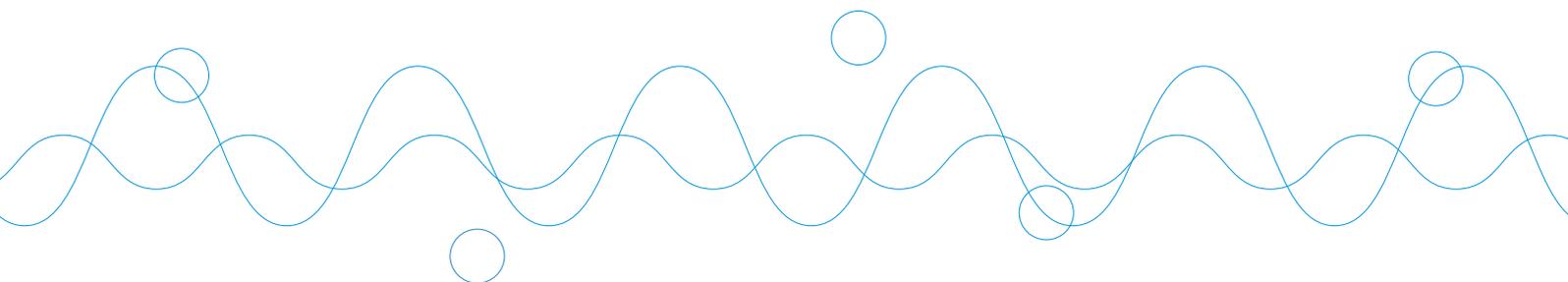
G-TeC報告書

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

G-Tec Report

Visions and Research Strategies toward Sustainable Energy Future

0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011



エグゼクティブサマリー

資源コストや市場動向などに基づく経済性がエネルギーシステム全体に大きな影響をもたらす現状の中で、持続可能なエネルギーの未来を目指し、各国が「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通の課題に取り組んでいる。

3つの社会ニーズが背景にある。第一が、「地球温暖化ガスの削減」。2007年に発表されたIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第4次評価報告書に基づき、地球温暖化が科学的根拠に基づく国際課題として明確に位置付けられた。その後、2009年にコペンハーゲンで開催されたCOP15（第15回気候変動枠組条約締結国会議）を経て、各国が具体的解決策を示す段階に入っている。

第二が、「化石資源への依存軽減」。現代社会は化石資源に強く依存しており、化石資源が不足すると社会生活が直接影響を受ける。直近では2008年の石油価格高騰により、世界経済に大きな混乱が生じた。エネルギー安全保障を確立し、持続可能性を高めるには、化石から非化石へのエネルギー転換が必要である。

第三が、「新たなエネルギー産業の創出」。先行するドイツでは、2010年時点で発電量に占める再生可能エネルギーの割合が17%に達し、風力エネルギーで10万人、太陽エネルギーとバイオで各12万人、再生可能エネルギー全体で36万人の雇用が生まれている。非化石への転換がもたらす新たなエネルギー産業の優劣が、各国の競争力を左右する時代が始まっている。

こうした中で、2011年3月に福島原発事故が発生し、原子力の位置付けがあらためて問われることになった。結果として、ドイツは原発停止時期を従来の2036年から2022年まで前倒しする方針を打ち出し、一方、米国や英国などは、引き続き原子力を活用する方向となっている。

上記情勢を受けて、日本としてのエネルギービジョンの再構築が強く求められている。原子力の役割を含め、日本が持続可能なエネルギーの未来を実現するためのシステムを設定する必要があり、基盤となる科学技術を明らかにしていく必要がある。

呼応するように、海外では米英独仏が相次いで「エネルギーの未来に関する提言」をまとめている。ドイツの「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」、米国の「未来の安定したエネルギーを確保するための構想」などが該当する。提言には各国が想定する未来のエネルギーシステムが描かれており、これらの提言及び関連の注目動向を詳細に分析すれば、目指すべきシステム、さらにはシステム構築のシナリオを具体化するための有効なエビデンスが得られることになる。

そこで上記想定に基づき、「持続可能なエネルギーの未来」をテーマとする「G-T e C (Global Technology Comparison)」を行った。G-T e Cは、重要な科学技術動向に焦点を当て、各国・地域の状況を分析することで日本のポジションを確認し、今後取るべき戦略の立案に貢献することをミッションとする。

調査には、公開情報に基づく基礎調査、米欧での現地会合などの手法を用いた。第一に、各国動向を概観することで、特徴的動きが見られる地域として米英独仏の4ヶ国を選定した。第二に、これらの国が想定するエネルギービジョンやシステムを把握した。第三に、

エネルギーの中核機関を特定し、システム構築に向けた注目動向を抽出した。その上で、第四に、これらの動きを詳細に分析することで、持続可能なエネルギーの未来を実現するための基本要件を検討した。

得られた結果をまとめると、次のようになる。

- 1) 持続可能なエネルギーの未来を目指し、各国が「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通の課題に取り組んでいる。「地球温暖化ガスの削減」、「化石資源への依存軽減」及び「新たなエネルギー産業の創出」という3つの社会ニーズが背景にある。
- 2) 2011年3月に福島原発事故が発生し、原子力の位置付けがあらためて問われることになった。このため各国では、エネルギービジョンの再構築が必要となっており、原子力の役割を含め、持続可能なシステムを設定し、基盤となる科学技術を明らかにすることが求められている。
- 3) 各国の動きを整理すると、ドイツは2010年9月に「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」をまとめている。その後、福島原発事故を受けて構想を一部見直し、2011年10月に「エネルギー供給構想の迅速な実現」を発表した。2050年までに地球温暖化ガス排出量を80～95%削減することを目標に、電力消費に占める再生可能エネルギーの割合を80%、最終エネルギー消費に占める割合を60%まで高めることを目指している。
- 4) 英国は2010年7月に「2050年までの展望」をまとめている。2050年までに地球温暖化ガス排出量を少なくとも80%削減することを目標に定め、目標達成のシナリオとして、エネルギー源の構成やエネルギー利用効率などの技術要件を変えた6つのケースを検討している。
- 5) フランスは2012年2月に「2050年のエネルギー構想」をまとめている。原子力の位置付けが異なる4つのケースを検討し、「現時点では、エネルギーに占める原子力の割合について特定目標は定めない」ことを方針として示した。その後、オランダ政権が誕生し、現在は「電力に占める原子力の割合を50%に削減する」ためのシナリオが検討されている。
- 6) 一方、米国は2011年3月に「未来の安定したエネルギーを確保するための構想」をまとめ、二つの目標を定めている。第一が、エネルギー安全保障の確保。シェールガスなどの国内の資源開発を促進することで、化石資源の自給率を高める。第二が、新たなエネルギー産業の創出。具体的には、2035年までに電力の80%をクリーンエネルギーで賄えるようにする。その際、クリーンエネルギーには再生可能エネルギーのほか、原子力、高効率ガス火力、クリーン石炭火力を用いるとしている。
- 7) これらのビジョン及び関連動向を分析すると、米英独仏の取り組みは、以下のように比較整理される。

- 英独が「地球温暖化ガス排出量の削減」を目標としているのに対し、米国は「化石資源への依存軽減」と「新たなエネルギー産業の創出」に重きを置いている。
 - ドイツが2022年までに原子力を廃止する計画であるのに対し、米英仏は使用を継続する方針となっている。
 - 新たな化石資源であるシェールガスの自国生産については、米国は生産拡大、英国は開発推進であるのに対し、独仏は環境影響の懸念から開発抑制の方向となっている。
 - 以上から、「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通の課題解決に向け、「最も厳しいエネルギー源の制約下で、再生可能エネルギーの導入拡大を図るのがドイツ」であり、「最も多様なエネルギー源を用い、新産業創出を目指すのが米国」ということになる。
- 8) 上記位置付けを踏まえ、米英独仏の動向分析を総合すると、持続可能なエネルギーの未来を実現するための基本要件として、以下の事項が導き出される。
- 9) 第一の要件として、化石から非化石への転換を図るには、その間のエネルギー源に用いる「橋渡しエネルギー (Bridging Energy)」を設定する必要がある。この橋渡しエネルギーの選択や優先順位付けには、ドイツの取り組みが参考になる。
- 10) ドイツは当初、現在と未来のシステムをつなぐ橋渡しエネルギーとして原子力を用いる計画を立てていた。しかし、福島原発事故を受けて停止時期を前倒したため、代替のエネルギーが必要になった。結果として、ドイツは化石エネルギーを代替に選び、2020年までに火力の発電能力を10GW拡充する方策を定めている。その上で、再生可能エネルギーの導入を一層加速する方針を打ち出した。2030年までに洋上風力を25GW増加する計画を、さらに前倒しする方向となっている。
- 11) 原子力を削減または停止する場合、原子力以外の橋渡しエネルギーが必要になる。ドイツの選択に従えば、短期の代替は化石エネルギーとなり、中長期には再生可能エネルギーの導入を加速する必要が生じる。再生可能エネルギーの導入を加速する場合、最も有望な対象は風力となり、ドイツ、英国、米国は、風力を第一の選択肢に位置付けている。
- 12) 第二の要件として、風力などの分散型電源の増強に伴い、「長距離伝送システム」を整備する必要が生ずる。ドイツでは「北海沿岸の洋上風力をミュンヘン等の南西部で消費するケース」、米国では「テキサスの陸上風力をニューヨーク等の東部で消費するケース」などが想定されている。
- 13) このためエネルギー伝送の研究が活発化しており、ドイツは1億5000万ユーロの予算規模で研究イニシアチブを設定した。米国は2014年度予算の中で、新たなイニシ

アチブの立ち上げを検討している。

- 14) 第三の要件として、系統制御への再生可能エネルギーの取り込みが増加すると、ガス火力等を用いた出力調整に加え、「エネルギー貯蔵」を拡充する必要が生ずる。
- 15) 上記に対応し、ドイツは自国の揚水発電を最大化し、ノルウェーやアルプスの揚水発電を組み入れることで貯蔵能力を高めていく方針を打ち出し、その上で、エネルギー貯蔵を革新する研究を強化している。2億ユーロの予算で研究イニシアチブを立ち上げ、熱的貯蔵を短中期、化学的貯蔵と電気化学的貯蔵を長期に位置付けた研究を展開している。
- 16) 米国も2012年11月に、エネルギー貯蔵の研究イニシアチブを立ち上げた。5年間に1億2200万ドルを投じ、電気化学的貯蔵の性能を五倍に高め、コストを五分の一に削減することを狙っている。
- 17) 第四の要件として、どのような未来のシナリオを描いても「エネルギー効率」の向上が必須の課題となる。建物、運輸、産業などが検討対象となるが、削減余力が高いことから、建物のエネルギー効率が重視されている。
- 18) 米国では2010年8月に、研究イニシアチブがスタートした。2020年までに商業用建物のエネルギー効率を20%向上する方法を開発することをターゲットに掲げる。ドイツでも都市を対象とした研究イニシアチブが計画されており、太陽エネルギーを活用した建物のエネルギー効率向上が主要課題となっている。
- 19) これらに加え、第五の要件として「太陽エネルギー」の動向に注目していく必要がある。太陽エネルギーは、ドイツなどの特定国を除き、現時点では導入があまり進んでいない。橋渡しエネルギーとしての活用も、風力が優先されている。
- 20) 一方、非化石への転換に伴う新事業創出という面では、太陽エネルギーへの期待が高い。ドイツでは2010年時点で、太陽エネルギーにより12万人を超える雇用が創出されている。米国は長期戦略として太陽エネルギーの研究を継続して支援しており、基礎研究のイニシアチブとして全米46ヶ所に設置されたエネルギーフロンティア研究センターにおいても、約6割のセンターが太陽エネルギーの研究に従事している。
- 21) 化石から非化石への転換を図る今後の展開の中で、太陽エネルギーが「盤面を換える技術 (Game Changing Technology)」としての役割を果たす可能性があり、したがって、そのための研究戦略が大きな影響を持つ。

Executive Summary

G-TeC (Global Technology Comparison) was done on the theme of “Sustainable Energy Future” .

G-TeC has the mission to contribute for creating R&D Strategies and/or Science & Technology Policies, by gathering various evidences through surveys. In principle, for gathering evidences, we use three-stepped approaches consisting of basic surveys and site visits.

- At the first step, through basic surveys, we investigate trends and movements of “policies & funding” and “institutes & human resources” , both at academia-sides and industry-sides.
- At the second step, through site visits, we have meetings with top-class research institutes, funding agencies, and other related organizations in the world, and extract important issues for selected research themes.
- Then, at the third step, we evaluate our findings gathered through basic surveys and site visits, and to identify priorities as evidences for creating R&D Strategies and/or Science & Technology Policies.

In this G-TeC, we set two objectives. First, we investigated trends & movements surrounding energy visions and research strategies, globally. And second, based on these investigations, we considered scenarios and key factors in order to realize sustainable energy future.

Main results are as follows.

- 1) Toward sustainable energy future, hot discussions are done on “energy transition from fossil to non-fossil” . It is because we have common social needs, “reduction of greenhouse gas emissions” , “reduction of fossil energy dependance” and “industry creation by non-fossil energy” .
- 2) After Fukushima Crisis, in March of 2011, new energy vision has been requested, where role of nuclear is defined, sustainable systems are designed and scientific bases are prioritized.
- 3) Corresponding to these, Germany announced their vision in September of 2010, “Energy Concept for an Environmentally Sound, Reliabile and Affrodable Energy Supply” . And, after Fukushima Crisis, Germany modified the visin to “The Energy Concept and Its Acceletrated Implementation” . In these, Germany has set the target to reduce greenhouse gas emissions by 80~95% before 2050. In

order to achieve this goal, Germany plans to increase ratio of renewable to 80% at electricity consumption, and 60% at final energy consumption before 2050.

- 4) U.K. announced “2050 Pathways Analysis” in July of 2010. In the vision, U.K. has set the target to reduce greenhouse gas emissions by at least 80 % before 2050. To achieve this goal, 6 scenarios were evaluated, varying technological conditions such as energy sources and energy efficiency.
- 5) France announced “Energy 2050” in February of 2012, where 4 options were evaluated, varying role of nuclear. And, in the vision, they concluded to refrain from setting nuclear ratio in energy mix. After that, under Hollande administration, another approach has been done to investigate different scenarios where nuclear ratio is decreased to 50%.
- 6) U.S. announced “Blueprint for a Secure Energy Future” in March of 2011. In the vision, they set two goals. First, in order to secure energy future, self sufficiency of fossil is increased, enhancing domestic production such as shale gas. Second, in order to create new energy industries, ratio of clean energies at electricity consumption is increased to 80% before 2035. In their scenario, clean energies include renewables, nuclear, efficient natural gas and clean coal.
- 7) By analysing these visions, the following characteristics are extracted.
 - In their visions, Germany and U.K. set target for “reduction of greenhouse gas emissions” , and U.S. sets target for “energy security” and “new energy industries” .
 - Germany shuts down nuclear before 2022. U.K., France and U.S. continue to utilize.
 - U.S. expands domestic production of shale gas, and U.K. develops domestic production. Germany and France restrain shale gas development, because of uncertainty of environmental effects.
 - Based on above considerations, it is clear that Germany tries to increase renewables under most limited energy conditions. On the other hand, U.S. challenges to create new industries under most diversified conditions.
- 8) To summarize these characteristics among Germany, U.K., France and U.S, “key factors toward sustainable energy future” are identified as follows.

- 9) Firstly, it is necessary to select “bridging energy” , that enables energy transition from current to future systems. For bridging energy, Germany suggests important points.
- 10) In the former energy vision, Germany planned to utilize nuclear as bridging energy. However, after Fukushima crisis, they adopted earlier time-frame for nuclear shut-down. Accordingly, alternative scenarios were planned. Those are;
 - First, instead of nuclear, Germany utilizes fossil as bridging energy, and increases capacity of gas and coal power plant by 10GW before 2020.
 - Second, Germany accelerates expansion of renewables, by accelerating the former scenario where offshore wind is increased by 25GW before 2030.
- 11) In case nuclear is not used as bridging energy, it is indispensable to define alternatives. Based on Germany’s experiences, in the short term, fossil should be alternative. And in the long term, faster expansion of renewables is requested. In case to accelerate renewable expansion, wind is the first candidate in Germany, U.K and U.S..
- 12) Secondly, long-distance transmission becomes another key factor for expanding renewables. In Germany, it is a case that “offshore-wind electricity in North Sea is delivered to “energy consumption areas in South like Munich” . And in U.S., it is a case that “onshore wind electricity in Texas is delivered to “energy consumption areas at east coasts like New York” .
- 13) Therefore, research and development on energy transmission has been prioritized. In Germany, the research initiative for electricity grid was introduced with budget of 150 million Euros. In U.S., a new research initiative is planned at the budget request of 2014.
- 14) Thirdly, corresponding to renewable expansion at electricity grid, energy storage becomes another key factor.
- 15) Germany plans to increase energy storage. First, pumped storage of hydro is increased to the maximum at domestic areas. Second, foreign pumped storage in Norway and Alps regions is also utilized. Besides, research and development on energy storage is strengthened. Germany started the research initiative with the budget of 200 million Euros, where thermal, chemical and electrochemical storage are advanced.

- 16) U.S. also started the research initiative for energy storage in November of 2012. 122 million dollars are invested for the duration of 5 years, where storage ability is increased five times higher, and cost is decreased to one-fifth.
- 17) Forthly, at any scenario, energy efficiency is an indispensable factor toward sustainable energy future. Improvement of energy efficiency is requested for buildings, transportation and manufacturing. And especially, buildings have great potential.
- 18) In U.S., the research initiative for buildings were started in August of 2010. It is planned to reduce energy consumption of commercial buildings by 20% before 2020. Germany also plans to establish a research initiative, where building energy efficiency is improved by utilizing solar.
- 19) Fifthly, solar should be prioritized at research strategy. Until now, ratio of solar remains low in most areas, except some limited countries like Germany. And, as bridging energy, wind is much prioritized than solar.
- 20) However, for creating new industries, solar looks to have great potential. In Germany, job opportunities by solar has reached over 120,000 persons in 2010. In U.S., solar energy researches have been supported continuously, at long-range strategy. Among 46 Energy Frontier Research Centers, that is the initiative for basic researches, about 60% centers have engaged in solar.
- 21) In order to achieve energy transition from fossil to non-fossil, solar can work as “Game Changing Technology” . Therefore, renewable expansion scenarios are highly influenced by solar research strategy.

目 次

エグゼクティブサマリー

1. 目的及び方法	1
2. 調査結果	3
2.1 エネルギービジョンを巡る動向.....	5
2.1.1 ドイツの動向	15
2.1.2 英国の動向	23
2.1.3 フランスの動向	33
2.1.4 米国の動向	41
2.2 非化石化に向けた現状.....	50
2.3 エネルギーの選択条件.....	70
2.4 エネルギーシナリオと研究戦略.....	76
2.4.1 ドイツの取り組み	80
2.4.2 米国の取り組み	95
2.5 持続可能な未来を実現する要件.....	128
3. 調査結果の総括	134

1. 目的及び方法

資源コストや市場動向などに基づく経済性がエネルギーシステム全体に大きな影響をもたらす現状の中で、持続可能なエネルギーの未来を目指し、各国が「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通の課題に取り組んでいる。

3つの社会ニーズが背景にある。第一が、「地球温暖化ガスの削減」。2007年に発表されたIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第4次評価報告書に基づき、地球温暖化が科学的根拠に基づく国際課題として明確に位置付けられた。その後、2009年にコペンハーゲンで開催されたCOP15（第15回気候変動枠組条約締結国会議）を経て、各国が具体的解決策を示す段階に入っている。

第二が、「化石資源への依存軽減」。現代社会は化石資源に強く依存しており、化石資源が不足すると社会生活が直接影響を受ける。直近では2008年の石油価格高騰により、世界経済に大きな混乱が生じた。エネルギー安全保障を確立し、持続可能性を高めるには、化石から非化石へのエネルギー転換が必要である。

第三が、「新たなエネルギー産業の創出」。先行するドイツでは、2010年時点で発電量に占める再生可能エネルギーの割合が17%に達し、風力エネルギーで10万人、太陽エネルギーとバイオで各12万人、再生可能エネルギー全体で36万人を超える雇用が生まれている。非化石への転換がもたらす新たなエネルギー産業の優劣が、各国の競争力を左右する時代が始まっている。

こうした中で、2011年3月に福島原発事故が発生し、原子力の位置付けがあらためて問われることになった。結果として、ドイツは原発停止時期を従来の2036年から2022年まで前倒しする方針を打ち出し、一方、米国や英国などは、引き続き原子力を活用する方向となっている。

上記情勢を受けて、日本としてのエネルギービジョンの再構築が強く求められている。原子力の役割を含め、日本が持続可能なエネルギーの未来を実現するためのシステムを設定する必要があり、基盤となる科学技術を明らかにしていく必要がある。

呼応するように、海外では米英独仏が相次いで「エネルギーの未来に関する提言」をまとめている。ドイツの「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」、米国の「未来の安定したエネルギーを確保するための構想」などが該当する。提言には各国が想定する未来のエネルギーシステムが描かれており、これらの提言及び関連の注目動向を詳細に分析すれば、目指すべきシステム、さらにはシステム構築のシナリオを具体化するための有効なエビデンスが得られることになる。

そこで上記想定に基づき、「持続可能なエネルギーの未来」をテーマとする「G-T e C (Global Technology Comparison)」を行った。G-T e Cは、重要な科学技術動向に焦点を当て、各国・地域の状況を分析することで日本のポジションを確認し、今後取るべき戦略の立案に貢献することをミッションとする。

本調査では、G-T e Cの目的を次のように定めた。

- 各国・地域における「エネルギービジョン」の動向分析
- 各国・地域における「エネルギーシナリオ」の動向分析
- 各国・地域における「エネルギー研究戦略」の動向分析
- これらに基づく「持続可能な未来を実現する要件」の検討

調査方法には、公開情報に基づく「基礎調査（各種公開情報に基づく各国・地域における政策、資金、機関、人材等の動向分析）」及び「海外現地会合（米欧における注目機関のリーダー等との討議）」などの手法を用いた。

具体的には、第一に、各国動向を概観することで、特徴的動きが見られる地域として米英独仏の4ヶ国を選定した。

第二に、これらの国が想定するエネルギービジョンやシステムを把握した。

第三に、エネルギーの中核機関を特定し、システム構築に向けた注目動向を抽出した。

その上で、第四に、これらの動きを詳細に分析することで、持続可能なエネルギーの未来を実現するための基本要件を検討した。

得られた調査結果を、以下にまとめる。

2. 調査結果

最初に各国動向を概観し、エネルギービジョンや研究戦略において特徴的な動きが見られる地域として、米英独仏の4ヶ国を選定した。

次に、これらの地域の状況を調査し、持続可能なエネルギーの未来を目指し、各国が「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通の課題に取り組んでいることを明らかにした。「地球温暖化ガスの削減」「化石資源への依存軽減」及び「新たなエネルギー産業の創出」という3つの社会ニーズが背景にある。

各国の動きを整理すると、ドイツは2010年9月に「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」をまとめている。その後、福島原発事故を受けて構想を一部見直し、2011年10月に「エネルギー供給構想の迅速な実現」を発表した。2050年までに地球温暖化ガス排出量を80～95%削減することを目標に、電力消費に占める再生可能エネルギーの割合を80%、最終エネルギー消費に占める割合を60%まで高めることを目指している。

英国は2010年7月に「2050年までの展望」をまとめている。2050年までに地球温暖化ガス排出量を少なくとも80%削減することを目標に定め、目標達成のシナリオとして、エネルギー源の構成やエネルギー利用効率などの技術要件を変えた6つのケースを検討している。

フランスは2012年2月に「2050年のエネルギー構想」をまとめている。原子力の位置付けが異なる4つのケースを検討し、「現時点では、エネルギーに占める原子力の割合について特定目標は定めない」ことを方針として示した。その後、オランダ政権が誕生し、現在は「電力に占める原子力の割合を50%に削減する」ためのシナリオが検討されている。

一方、米国は2011年3月に「未来の安定したエネルギーを確保するための構想」をまとめ、二つの目標を定めている。第一が、エネルギー安全保障の確保。シェールガスなどの国内の資源開発を促進することで、化石資源の自給率を高める。第二が、新たなエネルギー産業の創出。具体的には、2035年までに電力の80%をクリーンエネルギーで賄えるようにする。その際、クリーンエネルギーには再生可能エネルギーのほか、原子力、高効率ガス火力、クリーン石炭火力を用いている。

これらのビジョン及び関連動向を分析すると、米英独仏の取り組みは、以下のように比較整理される。

- 英独が「地球温暖化ガス排出量の削減」を目標としているのに対し、米国は「化石資源への依存軽減」と「新たなエネルギー産業の創出」に重きを置いている。
- ドイツが2022年までに原子力を廃止する計画であるのに対し、米英仏は使用を継続する方針となっている。
- 新たな化石資源であるシェールガスの自国生産については、米国は生産拡大、英国は開発推進であるのに対し、独仏は環境影響の懸念から開発抑制の方向となっている。

- 以上から、「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通の課題解決に向け、「最も厳しいエネルギー源の制約下で、再生可能エネルギーの導入拡大を図るのがドイツ」であり、「最も多様なエネルギー源を用い、新産業創出を目指すのが米国」ということになる。

そこで、上記特徴を踏まえ、ドイツ及び米国を分析の重点に定め、エネルギーシナリオと研究戦略を巡る動きを詳細に調べた。その上で、これらの分析に加え、現地会合を通じ把握した各国注目機関の動きを総合して考察することで、「持続可能なエネルギーの未来を実現するための基本要件」を検討した。

以下に、実施した調査内容及び得られた成果を、項目毎にまとめて示す。

2.1 エネルギービジョンを巡る動向

最初に、化石から非化石へのエネルギー転換を目指す各国の現状を整理する。

分析対象の米英独仏に日本を加え、2010年の一次エネルギー供給状況を表1及び図1にまとめて示した。主要5ヶ国では、一次エネルギー全体の4～5割を発電&熱供給（電力や熱の製造）に充当し、残りを発電&熱供給以外の用途に充てている。

この内、発電&熱供給には、以下のエネルギーが用いられている（表2-1、図2-1）。

- 米英独日では化石が最大のエネルギー源であり、フランスは原子力が最大となっている。フランスの場合、エネルギー源の8割以上を原子力が占める。
- 化石と原子力を合わせた割合は、米英仏日で全体の9割以上、ドイツで8割以上に達する。
- つまり、発電&熱供給の用途では、化石と原子力が主要エネルギー源になっている。

また、発電&熱供給以外については、以下のエネルギーが用いられている（表2-2、図2-2）。

- 米英独仏日のすべてで、エネルギー源の9割あるいはそれ以上を化石が占めている。
- これにバイオ&廃棄物を加えると、全体のほぼ100%に達する。
- つまり、発電&熱供給以外の用途では、化石が主要エネルギー源となっている。

以上から、いずれの国においても、化石と原子力で一次エネルギーのほとんどが賄われていることが分かる。全体に占める化石の割合を求めると、表3及び図3の結果が得られる。ポイントをまとめると、次のようになる。

- 1980年以降、一次エネルギーに占める化石の割合は漸減傾向にあるが、主要エネルギーである状況は変わっていない。
- 米英独日の場合、2010年時点で、一次エネルギーの8割あるいはそれ以上を化石が占めている。
- フランスは、第二次石油危機以降、発電&熱供給のエネルギー源を原子力にシフトしたため米英独日に比べ値は小さいが、それでも全体の5割を化石で賄っている。

一方、自給状況を見ると、1980年以降、各国における化石の自給率は以下の形で推移している（表4、図4）。

- 米英では、自給率が上下に変動しており、2010年時点で7割程度となっている。米国の場合、シェールガス等の増産により、今後の自給率上昇が見込まれている。
- 独仏日では、自給率が継続して低下している。2010年時点の値は、ドイツが23%、フランスが1%、日本が1%未満となっている。
- 米英と比較し、独仏日の自給率は低く、日本が最も低い値となっている。

以上の分析から、国により事情は異なるが、いずれも限定された自給状況の下で、エネルギー源を化石に大きく依存している現状が見て取れる。持続可能なエネルギーの未来実現に向け、化石から非化石へのエネルギー転換が強く求められていることが確認できる。

この非化石への転換を図る場合、化石使用量削減に加え、発電&熱供給のエネルギー効率向上が、もう一つの課題として浮かび上がってくる。表5に、各国における発電&熱供給のエネルギー効率を示した。2010年時点の効率は4割程度に止まっており、発電&熱供給に伴い、約6割の損失が生じている。したがって、これらの損失を低減できれば、結果として化石使用量は減少し、非化石への転換が促進される。

しかしながら現状では、各国のエネルギー供給と消費は、次のような状況となっている(表6、図5)。

- 一次エネルギー全体の4~5割が発電&熱供給に充てられているが、損失により、電力&熱として得られる量は二分の一以下まで下がる。
- このため、最終エネルギー消費における電力&熱の割合は2~3割に止まり、残りの7~8割を化石で賄う形になる。
- 最終消費に占める再生可能エネルギーの割合は、米英独仏で、それぞれ5%、2%、6%、8%に止まっている。
- したがって、最終エネルギー消費でも、化石が主要エネルギーとなっている。

これらの分析結果を総合し、化石から非化石への転換を図るための方策を列举すると、以下の方向が導き出される。

- 2) 第一に、発電&熱供給の「エネルギー効率」を高める。特に、火力発電の効率を高め、発電&熱供給に用いる化石を削減する(例えば、ガス化複合発電やコンバインドサイクル発電などを拡充するケース)。
- 1) 第二に、発電&熱供給に用いる化石を、「再生可能エネルギー」で置き換える。つまり、化石ではなく、風力、太陽(太陽光、太陽熱)、地熱、バイオ&廃棄物などを用いて電気や熱を製造する。

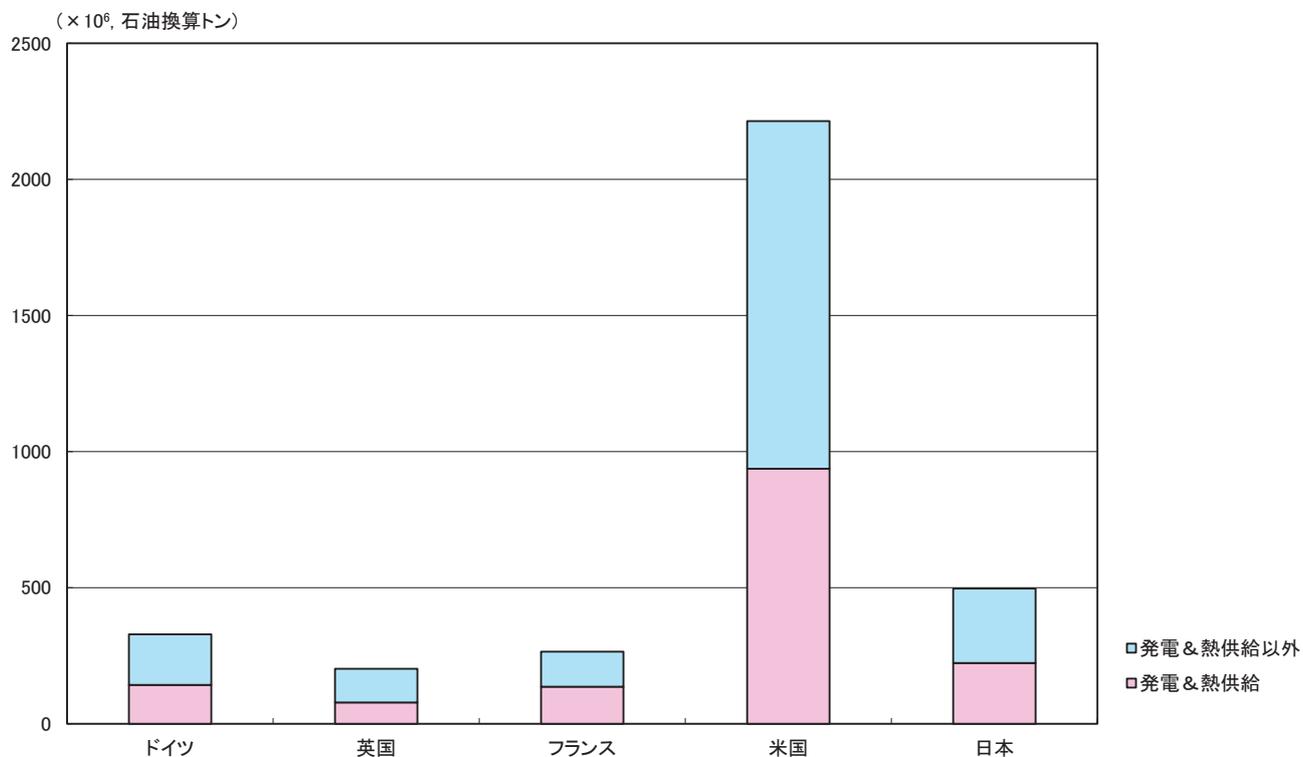
- 3) 第三に、最終エネルギー消費に用いる化石を、「電気」で置き換える。つまり、現状の化石の用途を電化した上で、再生可能エネルギーなどで発電した電気を充てる（例えば、住宅のガス暖房を電化し、太陽光や風力発電を活用するケース）。
- 4) 第四に、最終エネルギー消費に用いる化石を、「非化石の燃料」で置き換える。つまり、化石の代わりに、バイオ燃料や人工光合成で生成した炭化水素などを用いる。

そこで、これらの方策を巡る動向を重点に、米英独仏のエネルギービジョンと研究戦略を詳細に調べた。

表 1 主要国における 2010 年の一次エネルギー供給状況

用途	一次エネルギー供給に占める割合 (%)				
	ドイツ	英国	フランス	米国	日本
発電&熱供給	43.64	38.79	52.00	42.27	44.99
発電&熱供給以外	56.76	61.09	49.01	57.63	55.01

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成



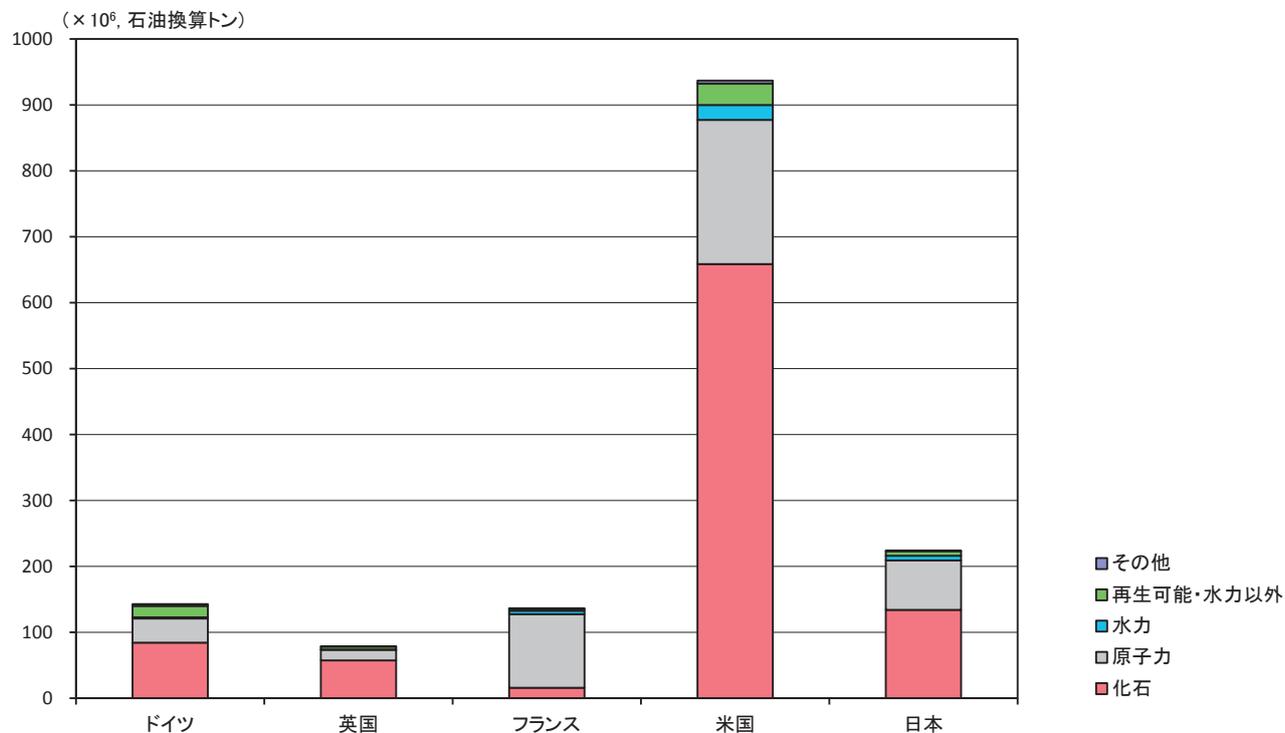
(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

図 1 主要国における 2010 年の一次エネルギー供給状況

表 2-1 主要国における 2010 年の一次エネルギー供給源／発電&熱供給

エネルギー源	供給割合 (%)				
	ドイツ	英国	フランス	米国	日本
化石	59.01	73.08	11.58	70.30	59.96
原子力	25.64	20.61	81.87	23.33	33.60
水力	1.23	0.39	3.91	2.41	3.16
再生可能・水力以外	12.07	5.47	1.97	3.48	2.90
その他	2.04	0.43	0.67	0.47	0.38

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Editionに基づき JST・CRDS が作成



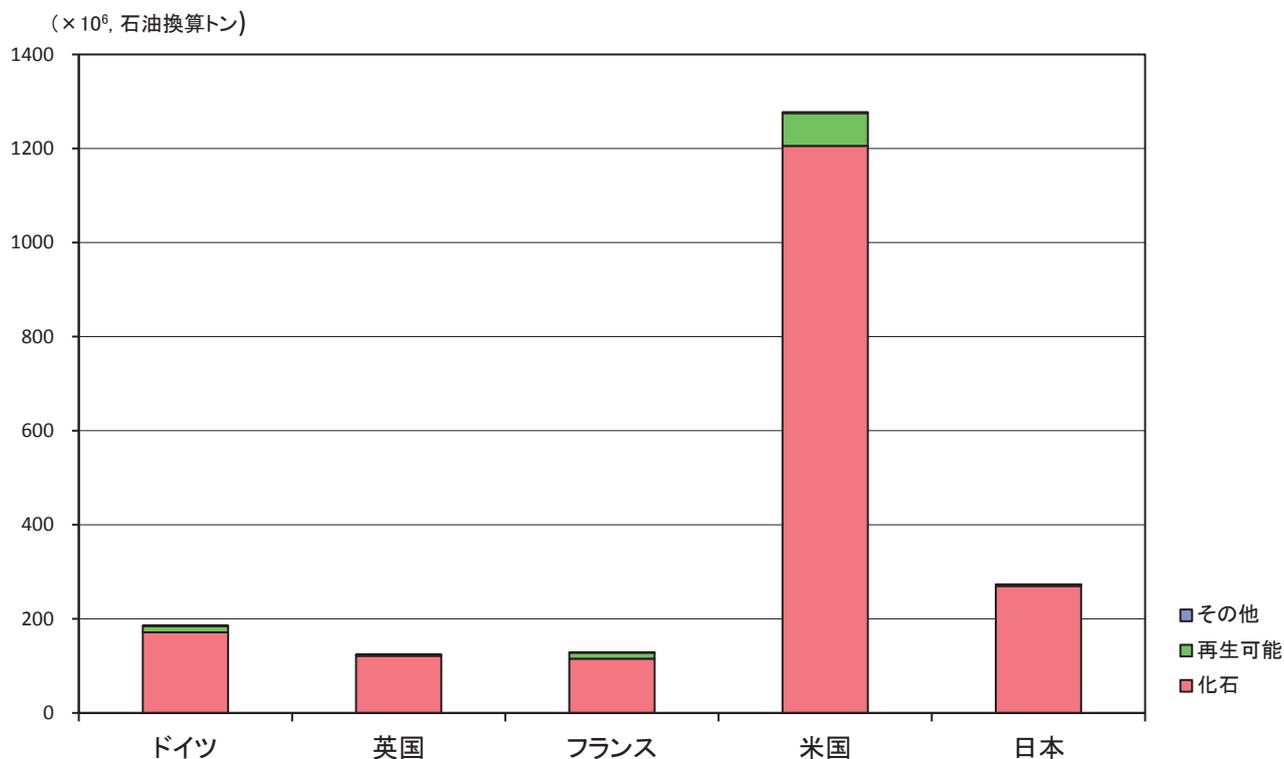
(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Editionに基づき JST・CRDS が作成

図 2-1 主要国における 2010 年の一次エネルギー供給源／発電&熱供給

表 2-2 主要国における 2010 年の一次エネルギー供給源／発電&熱供給以外

エネルギー源		供給割合 (%)				
		ドイツ	英国	フランス	米国	日本
化石		92.21	98.19	89.71	94.38	98.77
再生可能	バイオ&廃棄物	6.80	1.69	9.96	5.34	0.89
	上記以外	0.49	0.07	0.12	0.13	0.22
	合計	7.29	1.76	10.08	5.47	1.11
その他		0.51	0.04	0.23	0.15	0.11

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成



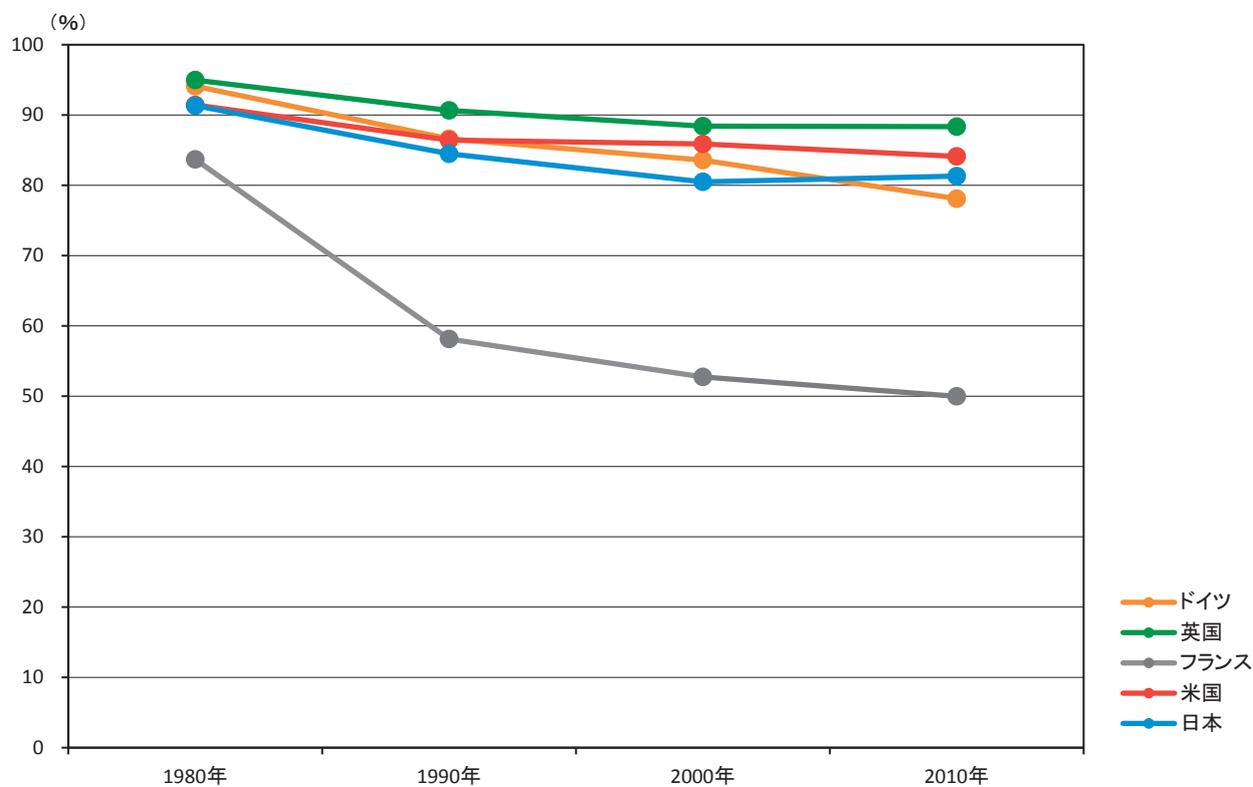
(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

図 2-2 主要国における 2010 年の一次エネルギー供給源／発電&熱供給以外

表 3 主要国の一次エネルギー供給に占める化石エネルギーの割合

国名	化石エネルギーの割合 (%)			
	1980年	1990年	2000年	2010年
ドイツ	94.09	86.82	83.58	78.09
英国	94.97	90.65	88.41	88.34
フランス	83.36	58.13	52.74	49.98
米国	91.43	86.43	85.88	84.11
日本	91.33	84.48	80.49	81.30

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成



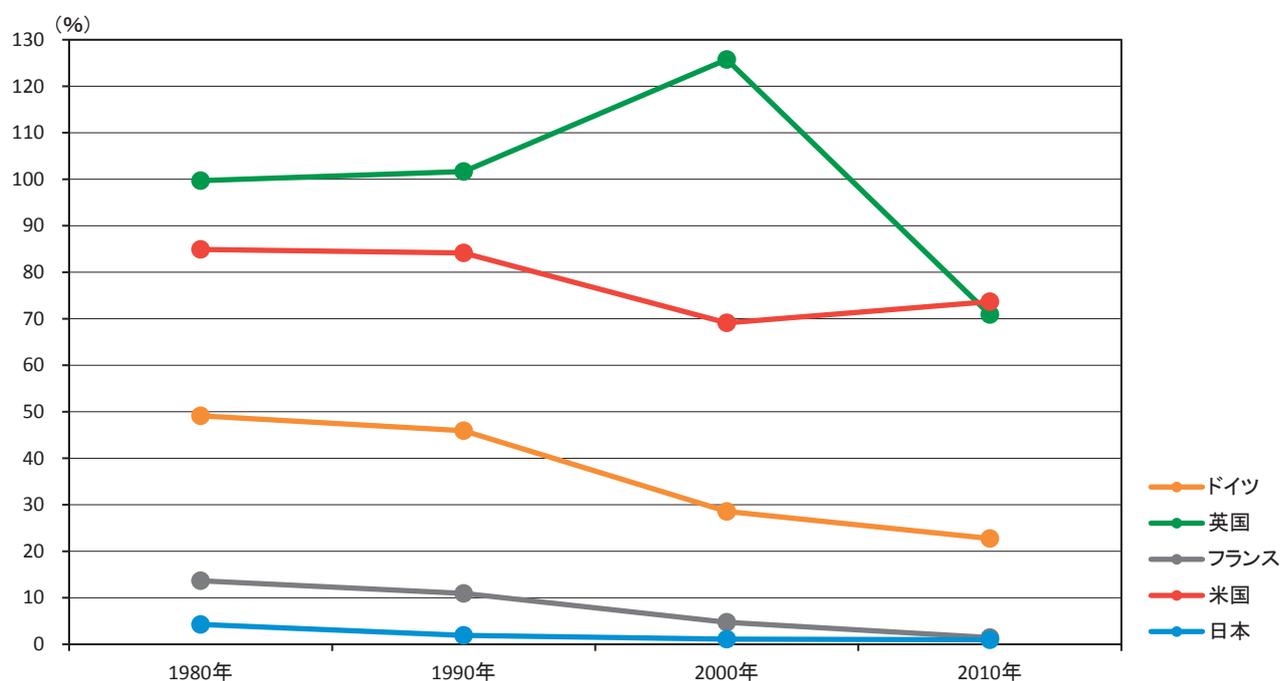
(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

図 3 主要国の一次エネルギー供給に占める化石エネルギーの割合

表 4 主要国における化石エネルギーの自給率

国名	化石エネルギーの自給率 (%)			
	1980年	1990年	2000年	2010年
ドイツ	49.12	45.92	28.56	22.74
英国	99.69	101.66	125.75	70.90
フランス	13.65	10.93	4.73	1.44
米国	84.90	84.15	69.11	73.67
日本	4.26	1.91	1.10	0.96

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成



(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

図 4 主要国における化石エネルギーの自給率

表5 主要国の2010年の発電&熱供給におけるエネルギー効率

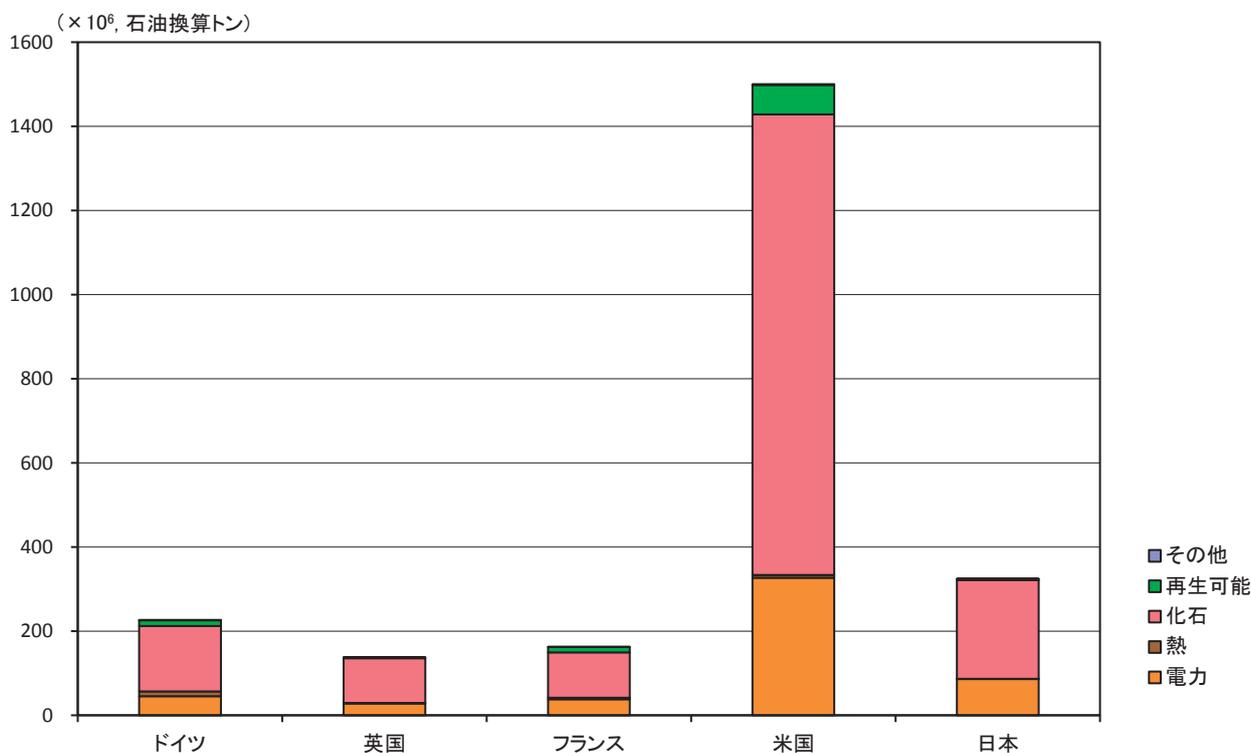
国名	発電&熱供給プラント(×10 ⁶ , 石油換算トン)		エネルギー効率 (%)
	一次エネルギー供給量	電力量&熱量	
ドイツ	142.87	65.82	46.07
英国	78.55	33.89	43.14
フランス	136.40	52.18	38.26
米国	936.90	386.61	41.26
日本	223.52	96.01	42.95

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

表 6 主要国における 2010 年の最終エネルギー消費状況

区分		最終エネルギー消費に占める割合 (%)					
		ドイツ	英国	フランス	米国	日本	
電力 & 熱	電力	20.06	20.48	23.45	21.80	26.54	
	熱	4.98	0.93	2.25	0.44	0.18	
	合計	25.04	21.41	25.70	22.24	26.72	
電力 & 熱以外	化石	68.60	76.97	66.18	72.98	72.24	
	再生可能 バイオ & 廃棄物	木質系バイオ	3.66	0.58	6.11	2.65	0.75
		バイオ燃料	1.86	0.88	1.57	1.87	0.00
		その他	0.04	0.07	0.17	0.02	0.00
		小計	5.56	1.53	7.85	4.54	0.75
	上記以外	0.39	0.07	0.09	0.11	0.19	
	小計	5.95	1.60	7.94	4.65	0.94	
	その他	0.41	0.02	0.18	0.13	0.10	
	合計	74.96	78.59	74.30	77.76	73.28	

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成



(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

図 5 主要国における 2010 年の最終エネルギー消費状況

2.1.1 ドイツの動向

前項で列挙した「化石から非化石への転換を図るための方策」と対比し整理すると、ドイツの現状は次のようになっている。

I. エネルギー需給状況

第一に、一次エネルギー供給のエネルギー源は、下記状況にある（表 7）。

- a) 2010 年時点で、発電&熱供給に 143 メガ石油換算トン、発電&熱供給以外に 186 メガ石油換算トンのエネルギーが投入されている。
- b) 発電&熱供給のエネルギー源では、化石が 59.0%、原子力が 25.6%、再生可能エネルギーが 13.3%を占めている。
- c) この内、再生可能エネルギーの構成は、バイオ&廃棄物が 9.1%、風力が 2.3%、水力が 1.2%、太陽が 0.7%となっている。
- d) 発電&熱供給以外のエネルギー源では、化石が 92.2%、再生可能エネルギーが 7.2%を占めている。
- e) この内、再生可能エネルギーの構成は、バイオ&廃棄物が 6.8%、太陽が 0.2%、地熱が 0.2%となっている。
- f) 一次エネルギー供給全体で見ると、化石が 78.1%、原子力が 11.2%を占める形となっている。

第二に、発電&熱供給のエネルギー効率、下記状況にある（表 8）。

- a) 2010 年時点で、発電設備に 116 メガ石油換算トン、熱電併給設備に 23 メガ石油換算トン、熱供給設備に 5 メガ石油換算トンのエネルギーが投入されている。
- b) エネルギー効率は、発電が 40.0%、熱電併給が 70.6%、熱供給が 75.9%となっている。
- c) 全体を平均すると、発電&熱供給のエネルギー効率は 46.1%となっている。

第三に、最終エネルギー消費での電力の活用は、下記状況にある（表 9）。

- a) 66 メガ石油換算トンの電力及び熱が製造され、製造プラント等で一部使用された後、最終的に、45 メガ石油換算トンの電力と 11 メガ石油換算トンの熱が消費されている。

- b) 最終エネルギー消費に占める割合は、電力が 20.1%、熱が 5.0%となっており、68.6%を化石で賄っている。

第四に、最終エネルギー消費での再生可能エネルギーの活用は、下記状況にある。

- a) 電力への寄与分（再生可能エネルギーで発電した電力）を除くと、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は 6.0%となっている。
- b) 内訳は、バイオ&廃棄物が 5.6%、太陽が 0.2%、地熱が 0.2%の構成となっている。
- c) この内、バイオ&廃棄物については、木質系バイオが 3.7%、バイオ燃料が 1.9%を占めている。

これに対し、化石自給率は、以下の形で推移している（表 10）。

- a) 石油、石炭、ガスのいずれについても、自給率が継続して低下している。
- b) 第二次石油ショック後の 1990 年時点と 2010 年の自給率を比較すると、石油の場合、3.9%から 3.2%に低下している。
- c) 石炭は、94.7%から 58.5%に低下している。
- d) ガスは、24.6%から 13.2%に低下している。
- e) 化石全体の平均では、45.9%から 22.7%に低下している。

以上から、2010 年時点のドイツのエネルギー需給は、次のように概括される。

- 1) 一次エネルギー供給の内、発電&熱供給の 59%、発電&熱供給以外の 92%を化石で賄っている
- 2) 一次エネルギー供給全体としては、78%を化石、11%を原子力で賄っている。
- 3) 発電&熱供給のエネルギー効率は、46%となっている。
- 4) 最終エネルギー消費については、20%を電力、6%を再生可能エネルギー、69%を化石で賄っている。
- 5) これに対し、化石自給率は 23%となっている。

すなわち、ドイツは 2 割程度の化石自給率の下で、一次エネルギー供給の 1 割に原子

力を充てた上で、8割を化石に依存する状況にある。

最終エネルギー消費においても、電力の活用（つまり、電化された用途）は2割、再生可能エネルギーは1割以下に止まっており、全体の7割を化石に依存する形となっている。

こうした現状を打開し、化石から非化石へのエネルギー転換を果たすために、ドイツは2010年9月に、新たなエネルギービジョンを提示している。

表7 ドイツにおける2010年の一次エネルギー供給状況

区分			一次エネルギー供給	
			量 (×10 ⁶ , 石油換算トン)	割合 (%)
発電 & 熱供給	化石	石油	1.82	0.56
		石炭	62.72	19.16
		ガス	19.77	6.04
		小計	84.31	25.75
	原子力		36.63	11.19
	水力		1.76	0.54
	再生可能 水力以外	バイオ&廃棄物	12.93	3.95
		風力	3.25	0.99
		太陽	1.00	0.31
		地熱	0.07	0.02
		潮力、波力、海洋	0.00	0.00
		小計	17.25	5.27
	その他		2.91	0.89
合計		142.86	43.64	
発電 & 熱供給以外	化石	石油	103.32	31.56
		石炭	14.40	4.40
		ガス	53.61	1.64
		小計	171.33	52.34
	再生可能	バイオ&廃棄物	12.63	3.86
		太陽	0.45	0.14
		地熱	0.46	0.14
		小計	13.54	4.14
	その他		0.94	0.29
	合計		185.81	56.76
電力輸出入		-1.29	-0.39	
熱		-0.01	0.00	
総計		327.37	100.00	

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Editionに基づき JST・CRDS が作成

表 8 ドイツにおける 2010 年の発電&熱供給のエネルギー効率

区分	エネルギー量 (×10 ⁶ , 石油換算トン)				エネルギー効率 (%)
	一次エネルギー供給	発電&熱製造			
		電力	熱	合計	
発電設備	115.52	46.25	0.00	46.25	40.04
熱電併給設備	22.54	7.25	8.67	15.92	70.63
熱供給設備	4.81	0.00	3.65	3.65	75.88
発電&熱供給・全体	142.87	53.50	12.32	65.82	46.07

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

表 9 ドイツにおける 2010 年の最終エネルギー消費状況

区分		最終エネルギー消費			
		量 (×10 ⁶ , 石油換算トン)	割合 (%)		
電力 & 熱	電力	45.49	20.06		
	熱	11.29	4.98		
	合計	56.78	25.04		
電力 & 熱以外	化石	石油	94.68	41.76	
		石炭	7.36	3.25	
		ガス	53.49	23.59	
		小計	155.53	68.60	
	再生可能	バイオ & 廃棄物	木質系バイオ	8.30	3.66
			バイオ燃料	4.22	1.86
			その他	0.08	0.04
			小計	12.60	5.56
		太陽	0.44	0.19	
		地熱	0.46	0.20	
		小計	13.50	5.95	
	その他	0.93	0.41		
	合計	169.96	74.96		
	総計	226.74	100.00		

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

表 10 ドイツにおける化石エネルギーの自給率

エネルギー源	自給率 (%)			
	1980年	1990年	2000年	2010年
化石全体	49.12	45.92	28.56	22.74
石油	3.93	3.88	3.16	3.15
石炭	101.51	94.72	71.47	58.51
ガス	31.77	24.61	21.99	13.21

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

II. エネルギービジョン

ドイツでは2010年9月に、連邦経済技術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)」を取りまとめている。

このエネルギービジョンの中で、目指すべき未来のシステムを、次のように設定している。

- ドイツは、世界で最もエネルギー効率がよく、環境にやさしく、競争優位な価格でエネルギーが得られ、高度の繁栄を維持することが可能な経済社会を構築する (Germany is to become one of the most energy-efficient and greenest economies in the world while enjoying competitive energy prices and a high level of prosperity)。

その上で、システム実現に向け、下記目標を定めている。

- a) 地球温暖化ガス排出量を、1990年対比で、2020年までに40%、2030年までに55%、2040年までに70%、2050年までに80～95%削減する。
- b) 一次エネルギー供給量を、2008年対比で、2020年までに20%、2050年までに50%削減する。
- c) 建物について、2008年対比で、2020年までに消費する熱量を20%削減し、2050年までに一次エネルギー供給量を80%削減する。
- d) 最終エネルギー消費を基準としたエネルギー生産性を、年率2.1%で向上する。
- e) 電力消費量を、2008年対比で、2020年までに10%、2050年までに25%削減する。
- f) 電力消費に占める再生可能エネルギー（水力を含む）の割合を、2020年までに35%、2030年までに50%、2040年までに65%、2050年までに80%にする。
- g) 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）の割合を、2020年までに18%、2030年までに30%、2040年までに45%、2050年までに60%にする。

上記以外のポイントも含め、ドイツが掲げるエネルギービジョンの特徴をまとめると、次のようになる。

- 1) 地球温暖化ガスの削減について、下記目標を明示している。

- 1990年対比で、2050年までに排出量を80～95%削減する。

2) 化石資源への依存軽減について、下記目標を明示している。

- 電力消費に占める再生可能エネルギーの割合を、2050年までに80%にする。
- 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、2050年までに60%にする。

3) 化石から非化石に転換するシナリオにおいて、下記方策を選択している。

- 化石から非化石への転換を図るには、その間のエネルギー源に用いる「橋渡しエネルギー (Bridging Energy)」が必要になる。この現在と未来のシステムをつなぐ橋渡しエネルギーとして原子力を活用する。
- 非化石への転換プロセスでは、「一次エネルギー供給量の削減 (2050年までに50%削減)」と「エネルギー生産性の向上 (年率2.1%で向上)」を同時に進めることで、ドイツに高度な繁栄をもたらす経済活力を維持する。

ドイツは、その後、福島原発事故を受けて上記構想を一部見直し、2011年10月に「エネルギー供給構想の迅速な実現 (The Energy Concept and its Accelerated Implementation)」を発表した。この中で、エネルギービジョンに、次の修正を加えている。

- 橋渡しエネルギーとして原子力を活用する期限を、当初予定の2036年から、2022年まで前倒しする。
- このため、原子力を代替する橋渡しエネルギーとして、短期的には化石を増強し、中長期には再生可能エネルギー、特に、風力の導入を一層速める。

地球温暖化ガス排出量を80～95%削減することを目標に、原子力停止というエネルギー源の厳しい制約下で、電力消費に占める再生可能エネルギーの割合を80%、最終エネルギー消費に占める割合を60%まで高めることを目指している。

2.1.2 英国の動向

英国の現状は、次のようになっている。

I. エネルギー需給状況

第一に、一次エネルギー供給のエネルギー源は、下記状況にある（表 11）。

- a) 2010年時点で、発電&熱供給に 79 メガ石油換算トン、発電&熱供給以外に 124 メガ石油換算トンのエネルギーが投入されている。
- b) 発電&熱供給のエネルギー源では、化石が 73.1%、原子力が 20.6%、再生可能エネルギーが 5.9%を占めている。
- c) この内、再生可能エネルギーの構成は、バイオ&廃棄物が 4.4%、風力が 1.1%、水力が 0.4%となっている。
- d) 発電&熱供給以外のエネルギー源では、化石が 98.2%、再生可能エネルギーが 1.8%を占めている。
- e) この内、再生可能エネルギーの構成は、バイオ&廃棄物が 1.7%、太陽が 0.1%となっている。
- f) 一次エネルギー供給全体で見ると、化石が 88.3%、原子力が 8.0%を占める形となっている。

第二に、発電&熱供給のエネルギー効率は、下記状況にある（表 12）。

- a) 2010年時点で、発電設備に 72 メガ石油換算トン、熱電併給設備に 4 メガ石油換算トン、熱供給設備に 2 メガ石油換算トンのエネルギーが投入されている。
- b) エネルギー効率は、発電が 42.2%、熱電併給が 49.2%、熱供給が 61.9%となっている。
- c) 全体を平均すると、発電&熱供給のエネルギー効率は 43.1%となっている。

第三に、最終エネルギー消費での電力の活用は、下記状況にある（表 13）。

- a) 34 メガ石油換算トンの電力及び熱が製造され、製造プラント等で一部使用された後、最終的に、28 メガ石油換算トンの電力と 1 メガ石油換算トンの熱が消費されている。
- b) 最終エネルギー消費に占める割合は、電力が 20.5%、熱が 0.9%となっており、

77.0%を化石で賄っている。

第四に、最終エネルギー消費での再生可能エネルギーの活用は、下記状況にある。

- a) 電力への寄与分（再生可能エネルギーで発電した電力）を除くと、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は 1.6%となっている。
- b) 内訳は、バイオ&廃棄物が 1.5%、太陽が 0.1%の構成となっている。
- c) この内、バイオ&廃棄物については、木質系バイオが 0.6%、バイオ燃料が 0.9%を占めている。

これに対し、化石自給率は、以下の形で推移している（表 14）。

- a) 石油、ガスの自給率は上下に変動しており、石炭は継続して低下している。
- b) 第二次石油ショック後の 1990 年時点と 2010 年の自給率を比較すると、石油の場合、124.7%から 101.6%に低下している。
- c) 石炭は、85.0%から 35.9%に低下している。
- d) ガスは、86.7%から 60.7%に低下している。
- e) 化石全体の平均では、101.7%から 70.9%に低下している。

以上から、2010 年時点の英国のエネルギー需給は、次のように概括される。

- 1) 一次エネルギー供給については、発電&熱供給の 73%、発電&熱供給以外の 98%を化石で賄っている。
- 2) 一次エネルギー供給全体では、88%を化石、8%を原子力で賄っている。
- 3) 発電&熱供給のエネルギー効率は、43%となっている。
- 4) 最終エネルギー消費については、21%を電力、2%を再生可能エネルギー、77%を化石で賄っている。
- 5) これに対し、化石自給率は 71%となっている。

すなわち、英国は 7 割程度の化石自給率の下で、一次エネルギー供給の 1 割に原子力を充てた上で、9 割を化石に依存する状況にある。

最終エネルギー消費においても、電力の活用（つまり、電化された用途）は2割、再生可能エネルギーは1割以下に止まっており、全体の8割を化石に依存する形となっている。こうした現状の中で、化石から非化石への転換を果たす道筋を見つけるために、英国は2010年7月に、新たなエネルギービジョンを提示している。

表 11 英国における 2010 年の一次エネルギー供給状況

区分			一次エネルギー供給	
			量 (× 10 ⁶ , 石油換算トン)	割合 (%)
発電 & 熱供給	化石	石油	1.19	0.59
		石炭	25.61	12.65
		ガス	30.61	15.12
		小計	57.41	28.35
	原子力		16.19	7.99
	水力		0.31	0.15
	再生可能 水力以外	バイオ & 廃棄物	3.42	1.69
		風力	0.88	0.43
		太陽	0.00	0.00
		地熱	0.00	0.00
		潮力、波力、海洋	0.00	0.00
		小計	4.30	2.12
	その他		0.34	0.17
	合計		78.55	38.79
発電 & 熱供給以外	化石	石油	62.17	30.70
		石炭	5.14	2.54
		ガス	54.18	26.75
		小計	121.49	59.99
	再生可能	バイオ & 廃棄物	2.09	1.03
		太陽	0.09	0.04
		地熱	0.00	0.00
		小計	2.18	1.08
	その他		0.05	0.02
	合計		123.72	61.09
電力輸出入		0.23	0.11	
熱		0.00	0.00	
総計		202.51	100.00	

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

表 12 英国における 2010 年の発電&熱供給のエネルギー効率

区分	エネルギー量 (×10 ⁶ , 石油換算トン)				エネルギー効率 (%)
	一次エネルギー供給	発電&熱製造			
		電力	熱	合計	
発電設備	72.01	30.39	0.00	30.39	42.20
熱電併給設備	4.31	2.12	0.00	2.12	49.19
熱供給設備	2.23	0.00	1.38	1.38	61.88
発電&熱供給・全体	78.55	32.51	1.38	33.89	43.14

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

表 13 英国における 2010 年の最終エネルギー消費状況

区分		最終エネルギー消費			
		量 (×10 ⁶ , 石油換算トン)	割合 (%)		
電力&熱	電力	28.24	20.47		
	熱	1.28	0.93		
	合計	29.52	21.40		
電力&熱以外	化石	石油	56.27	40.80	
		石炭	2.80	2.03	
		ガス	47.09	34.14	
		小計	106.16	76.97	
	再生可能	バイオ&廃棄物	木質系バイオ	0.80	0.58
			バイオ燃料	1.21	0.88
			その他	0.10	0.07
			小計	2.11	1.53
		太陽	0.09	0.07	
		地熱	0.00	0.00	
		小計	2.20	1.60	
	その他	0.05	0.03		
	合計	108.41	78.60		
	総計	137.93	100.00		

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

表 14 英国における化石エネルギーの自給率

エネルギー源	自給率 (%)			
	1980年	1990年	2000年	2010年
化石全体	99.69	101.66	125.75	70.90
石油	104.10	124.71	179.82	101.58
石炭	107.50	84.96	51.12	35.88
ガス	77.68	86.70	111.62	60.68

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

II. エネルギービジョン

英国では2010年7月に、エネルギー気候変動省が「2050年までの展望（2050 Pathways Analysis）」を取りまとめている。

このエネルギービジョンの中で、次の目標を定めている。

– 地球温暖化ガス排出量を、1990年対比で、2050年までに少なくとも80%削減する。

その上で、目標達成のシナリオとして、以下の「5つの技術要件」の影響を調べている。

- a) 火力発電所に炭素回収&貯蔵技術を適用する。
- b) 原子力発電所を新設する。
- c) 再生可能エネルギーの発電所を増強する。
- d) バイオ燃料を十分に供給する。
- e) 最終エネルギー消費を大幅に削減する。

具体的には、技術要件の異なる6つのケースを比較している（5つの技術要件の影響を検討したもので、優先するシナリオを抽出したものではない）。

- ・ ケース 1；「5つの技術要件」が全て満たされる場合
- ・ ケース 2；「炭素回収&貯蔵技術」が適用されない場合
- ・ ケース 3；「原子力発電所」が新設されない場合
- ・ ケース 4；「再生可能エネルギーの発電所」が増強されない場合
- ・ ケース 5；「バイオ燃料」が十分に供給されない場合
- ・ ケース 6；「最終エネルギー消費」の削減が進まない場合

これらの分析から、温暖化ガス削減に向け、英国として目指すべき方向を、次のように定めている。

- 1) 第一に、一人当りのエネルギー需要を抑制する。省エネ機器やシステムを拡充し（例えば、照明を全てLEDで置き換える）、最終エネルギー消費を大幅に削減する。
- 2) 第二に、化石燃料の用途を電化し、代わりに電気を用い、化石を削減する。

- 英国の場合、2010年の最終エネルギー消費の内、化石が77%を占めている。運輸部門の石油が29%、家庭部門のガスが22%などとなっている（表15）。
- 3) 第三に、電化した用途に充てる低炭素な発電を増やす。具体的には、炭素回収&貯蔵技術を適用した火力、原子力、再生可能エネルギーで発電した電力を、現状の二倍に増加する。
- 英国の場合、2010年の発電電力の76%を火力、16%を原子力で賄っている（表16）。
 - シナリオ分析では、火力への炭素回収&貯蔵技術の適用が進まない場合、代替として「洋上風力」を大幅に増強する方針を示している。
 - 原子力発電所が新設されない場合については、「洋上風力」「陸上風力」及び「太陽光」の組み合わせで代替する方針を示している。
- 4) 第四に、航空機や長距離貨物輸送などの電化が困難な用途を中心に、化石燃料の代替として、バイオ燃料を供給する。
- 5) 第五に、風力などの再生可能エネルギーによる発電を系統制御に取り込むための伝送網（エネルギー貯蔵を含む）を整備、拡充する。

英国は、温暖化ガス排出量を少なくとも80%削減することを目標に、化石燃料の用途を電化し、低炭素な発電を増加し、バイオ燃料を十分に供給することで、化石から非化石への転換を図る道筋を描いている。

表 15 英国における 2010 年の最終エネルギー消費の用途

区分		最終エネルギー消費に占める割合 (%)								
		用途						合計		
		エネルギー源					原材料			
		産業	運輸	家庭	サービス	その他				
電力 & 熱	電力	6.52	0.25	7.40	6.06	0.25	0.00	20.48		
	熱	0.61	0.00	0.04	0.28	0.00	0.00	0.93		
	合計	7.13	0.25	7.44	6.34	0.25	0.00	21.41		
電力 & 熱以外	化石	石油	3.39	28.85	2.31	0.47	0.38	5.40	40.80	
		石炭	1.53	0.01	0.48	0.01	0.00	0.00	2.03	
		ガス	6.84	0.00	21.85	3.94	1.03	0.48	34.14	
		小計	11.76	28.86	24.64	4.42	1.41	5.88	76.97	
	再生可能	バイオ & 廃棄物	木質系バイオ	0.23	0.00	0.24	0.00	0.11	0.00	0.58
			バイオ燃料	0.01	0.82	0.00	0.05	0.00	0.00	0.88
			その他	0.04	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.07
			小計	0.28	0.82	0.25	0.07	0.11	0.00	1.53
		太陽	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.07	
		地熱	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		小計	0.28	0.82	0.25	0.07	0.18	0.00	1.60	
	その他	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02		
	合計	12.05	29.68	24.90	4.49	1.59	5.88	78.59		
	総計	19.18	29.93	32.34	10.83	1.84	5.88	100.00		

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

表 16 英国における発電電力のエネルギー源

エネルギー源		発電電力の割合 (%)			
		1980年	1990年	2000年	2010年
化石	石油	11.61	10.85	2.23	1.29
	石炭	72.89	64.57	32.43	28.54
	ガス	0.74	1.56	39.27	45.90
	小計	85.24	76.98	73.93	75.73
原子力		12.97	20.55	22.57	16.29
水力		1.79	2.25	2.07	1.78
バイオ&廃棄物		0.00	0.22	1.19	3.52
風力		0.00	0.00	0.24	2.68
太陽		0.00	0.00	0.00	0.00
地熱		0.00	0.00	0.00	0.00
潮力、波力、海洋		0.00	0.00	0.00	0.00
その他		0.00	0.00	0.00	0.00
合計		100.00	100.00	100.00	100.00

(出典) International Energy Agency, 「Electricity Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

2.1.3 フランスの動向

フランスの現状は、次のようになっている。

I. エネルギー需給状況

第一に、一次エネルギー供給のエネルギー源は、下記状況にある（表 17）。

- a) 2010 年時点で、発電&熱供給に 136 メガ石油換算トン、発電&熱供給以外に 129 メガ石油換算トンのエネルギーが投入されている。
- b) 発電&熱供給のエネルギー源では、原子力が 81.9%、化石が 11.6%、再生可能エネルギーが 5.9%を占めている。
- c) この内、再生可能エネルギーの構成は、水力が 3.9%、バイオ&廃棄物が 1.3%、風力が 0.6%となっている。
- d) 発電&熱供給以外のエネルギー源では、化石が 89.7%、再生可能エネルギーが 10.1%を占めている。
- e) この内、再生可能エネルギーの構成は、バイオ&廃棄物が 10.0%、地熱が 0.1%となっている。
- f) 一次エネルギー供給全体では、化石が 50.0%、原子力が 42.6%を占める形となっている。

第二に、発電&熱供給のエネルギー効率は、下記状況にある（表 18）。

- a) 2010 年時点で、発電設備に 129 メガ石油換算トン、熱電併給設備に 7 メガ石油換算トンのエネルギーが投入されている（熱供給設備への投入量は、1 メガ石油換算トン未満）。
- b) エネルギー効率は、発電が 36.3%、熱電併給が 75.7%、熱供給が 50.0%となっている。
- c) 全体を平均すると、発電&熱供給のエネルギー効率は 38.3%となっている。

第三に、最終エネルギー消費での電力の活用は、下記状況にある（表 19）。

- a) 52 メガ石油換算トンの電力及び熱が製造され、製造プラント等で一部使用された後、最終的に、38 メガ石油換算トンの電力と 4 メガ石油換算トンの熱が消費されている。

- b) 最終エネルギー消費に占める割合は、電力が 23.5%、熱が 2.3%となっており、66.2%を化石で賄っている。

第四に、最終エネルギー消費での再生可能エネルギーの活用は、下記状況にある。

- a) 電力への寄与分（再生可能エネルギーで発電した電力）を除くと、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は 7.9%となっている。
- b) 内訳は、バイオ&廃棄物が 7.8%、地熱が 0.1%の構成となっている。
- c) この内、バイオ&廃棄物については、木質系バイオが 6.1%、バイオ燃料が 1.6%を占めている。

これに対し、化石自給率は、以下の形で推移している（表 20）。

- a) 石油の自給率は 5%以下の範囲に止まり、石炭、ガスは継続して低下している。
- b) 第二次石油ショック後の 1990年時点と 2010年の自給率を比較すると、石油の場合、4.1%から 1.4%に低下している。
- c) 石炭は、40.8%から 1.4%に低下している。
- d) ガスは、9.7%から 1.5%に低下している。
- e) 化石全体の平均では、10.9%から 1.4%に低下している。

以上から、2010年時点のフランスのエネルギー需給は、次のように概括される。

- 1) 一次エネルギー供給の内、発電&熱供給の 12%、発電&熱供給以外の 90%を化石で賄っている。
- 2) 一次エネルギー供給全体としては、50%を化石、43%を原子力で賄っている。
- 3) 発電&熱供給のエネルギー効率は、38%となっている。
- 4) 最終エネルギー消費については、24%を電力、8%を再生可能エネルギー（この内、6%は木質系バイオ）、66%を化石で賄っている。
- 5) これに対し、化石自給率は 1%となっている。

すなわち、フランスは化石自給率がほぼゼロの中で、一次エネルギー供給の 4 割に原

子力を充てた上で、5割を化石に依存する状況にある。

最終エネルギー消費においても、電力の活用（つまり、電化された用途）は2割、再生可能エネルギーは1割以下に止まっており、全体の7割を化石に依存する形となっている。上記状況を踏まえ、福島原発事故後のドイツの動きなどを受ける形で、フランスは2012年2月に、原子力の位置付けを考察した新たなエネルギービジョンを提示している。

表 17 フランスにおける 2010 年の一次エネルギー供給状況

区分			一次エネルギー供給	
			量 (× 10 ⁶ , 石油換算トン)	割合 (%)
発電 & 熱供給	化石	石油	2.24	0.85
		石炭	6.04	2.30
		ガス	7.52	2.87
		小計	15.80	6.02
	原子力		111.68	42.58
	水力		5.33	2.03
	再生可能 水力以外	バイオ & 廃棄物	1.72	0.66
		風力	0.86	0.33
		太陽	0.05	0.02
		地熱	0.00	0.00
		潮力、波力、海洋	0.05	0.02
		小計	2.68	1.02
	その他		0.92	0.35
合計		136.41	52.01	
発電 & 熱供給以外	化石	石油	74.29	28.32
		石炭	6.00	2.29
		ガス	35.01	13.35
		小計	115.30	43.96
	再生可能	バイオ & 廃棄物	12.80	4.88
		太陽	0.06	0.02
		地熱	0.09	0.03
		小計	12.95	4.94
	その他		0.29	0.11
	合計		128.54	49.01
電力輸出入		-2.64	-1.01	
熱		0.00	0.00	
総計		262.29	100.00	

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」 及び 「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

表 18 フランスにおける 2010 年の発電&熱供給のエネルギー効率

区分	エネルギー量 (×10 ⁶ , 石油換算トン)				エネルギー効率 (%)
	一次エネルギー供給	発電&熱製造			
		電力	熱	合計	
発電設備	129.39	46.94	0.00	46.94	36.28
熱電併給設備	6.75	1.58	3.53	5.11	75.70
熱供給設備	0.26	0.00	0.13	0.13	50.00
発電&熱供給・全体	136.40	48.52	3.66	52.18	38.26

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

表 19 フランスにおける 2010 年の最終エネルギー消費状況

区分		最終エネルギー消費			
		量 (×10 ⁶ , 石油換算トン)	割合 (%)		
電力 & 熱	電力	38.19	23.45		
	熱	3.67	2.25		
	合計	41.86	25.70		
電力 & 熱 以外	化石	石油	71.28	43.79	
		石炭	3.46	2.12	
		ガス	32.99	20.27	
		小計	107.73	66.18	
	再生可能	バイオ&廃棄物	木質系バイオ	9.96	6.11
			バイオ燃料	2.54	1.57
			その他	0.29	0.17
			小計	12.79	7.85
		太陽	0.06	0.03	
		地熱	0.09	0.06	
		小計	12.94	7.94	
	その他	0.29	0.18		
	合計	120.96	74.30		
	総計	162.82	100.00		

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

表 20 フランスにおける化石エネルギーの自給率

エネルギー源	自給率 (%)			
	1980年	1990年	2000年	2010年
化石全体	13.65	10.93	4.37	1.44
石油	2.12	4.14	2.21	1.41
石炭	40.67	40.77	16.50	1.35
ガス	29.23	9.66	4.21	1.52

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

II. エネルギービジョン

フランスは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）」を取りまとめている。

第二次石油危機以降、発電&熱供給のエネルギー源を原子力にシフトした結果、一次エネルギー供給に占める原子力の割合が4割を超えるという特徴を持つことから（表21）、エネルギービジョンにおいても、原子力の位置付けを重点的に検討している。

具体的には、2050年までのエネルギーシナリオとして、電力コスト、温暖化ガス、経済及び雇用、貿易収支、エネルギー安定供給などを評価指標に、原子力の位置付けが異なる4つのケースを比較している。

- ・ ケース1；既存原子炉の操業寿命を延長する場合
- ・ ケース2；第三世代、第四世代原子炉への移行を加速する場合
- ・ ケース3；原子力発電の割合を低減する場合
- ・ ケース4；原子力発電を完全に停止する場合

これらの分析から、フランスとして目指すべき方向を、次のように定めている。

- 1) 未来のエネルギーシステムは、「基盤となる技術革新」「省エネやエネルギー効率」「化石資源や再生可能エネルギーのコスト」「第三世代原子炉の普及」などの進展に応じ、大きく変化する。
- 2) したがって、現時点では、エネルギーに占める原子力の割合について、特定の目標を設定しない。第四世代原子炉の開発は継続する。
- 3) 省エネ、エネルギー効率の革新は国の主要課題であり、建物及び輸送分野を重点に研究開発を促進する。
- 4) 国際連携や産学連携の下で、再生可能エネルギー、エネルギー貯蔵などのエネルギー研究への公的支援を維持・拡充していく。

すなわち、フランスはこの時点で「原子力については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を強化する」ことを基本方針として示している。

その後、オランダ政権が誕生し、あらたに「電力に占める原子力の割合を50%に削減する（2010年時点の割合は75%）」ためのシナリオが検討されている（表22）。

表 21 主要国の一次エネルギー供給に占める原子力エネルギーの割合

国名	原子力エネルギーの割合 (%)			
	1980年	1990年	2000年	2010年
ドイツ	4.06	11.35	13.13	11.19
英国	4.86	8.32	9.94	8.00
フランス	8.32	36.56	42.96	42.59
米国	3.84	8.32	9.14	9.86
日本	6.25	12.00	16.17	15.12

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

表 22 フランスにおける発電電力のエネルギー源

エネルギー源		発電電力の割合 (%)			
		1980年	1990年	2000年	2010年
化石	石油	18.76	2.07	1.33	1.02
	石炭	27.29	8.41	5.71	4.62
	ガス	2.71	0.71	2.13	4.18
	小計	48.76	11.19	9.17	9.82
原子力		23.76	74.67	76.76	75.29
水力		27.21	13.62	13.27	11.74
バイオ&廃棄物		0.08	0.38	0.67	1.19
風力		0.00	0.00	0.02	1.76
太陽		0.00	0.00	0.00	0.11
地熱		0.00	0.00	0.00	0.00
潮力、波力、海洋		0.19	0.14	0.11	0.09
その他		0.00	0.00	0.00	0.00
合計		100.00	100.00	100.00	100.00

(出典) International Energy Agency, 「Electricity Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

2.1.4 米国の動向

米国の現状は、次のようになっている。

I. エネルギー需給状況

第一に、一次エネルギー供給のエネルギー源は、下記状況にある（表 23）。

- a) 2010 年時点で、発電&熱供給に 937 メガ石油換算トン、発電&熱供給以外に 1277 メガ石油換算トンのエネルギーが投入されている。
- b) 発電&熱供給のエネルギー源では、化石が 70.3%、原子力が 23.3%、再生可能エネルギーが 5.9%を占めている。
- c) この内、再生可能エネルギーの構成は、水力が 2.4%、バイオ&廃棄物が 1.7%、風力が 0.9%、地熱が 0.9%となっている。
- d) 発電&熱供給以外のエネルギー源では、化石が 94.4%、再生可能エネルギーが 5.5%を占めている。
- e) この内、再生可能エネルギーの構成は、バイオ&廃棄物が 5.3%、太陽が 0.1%となっている。
- f) 一次エネルギー供給全体で見ると、化石が 84.1%、原子力が 9.9%を占める形となっている。

第二に、発電&熱供給のエネルギー効率は、下記状況にある（表 24）。

- a) 2010 年時点で、発電設備に 873 メガ石油換算トン、熱電併給設備に 63 メガ石油換算トンのエネルギーが投入されている。
- b) エネルギー効率は、発電が 39.7%、熱電併給が 62.5%となっている。
- c) 全体を平均すると、発電&熱供給のエネルギー効率は 41.3%となっている。

第三に、最終エネルギー消費での電力の活用は、下記状況にある（表 25）。

- a) 387 メガ石油換算トンの電力及び熱が製造され、製造プラント等で一部使用された後、最終的に、327 メガ石油換算トンの電力と 7 メガ石油換算トンの熱が消費されている。
- b) 最終エネルギー消費に占める割合は、電力が 21.8%、熱が 0.4%となっており、73.0%を化石で賄っている。

第四に、最終エネルギー消費での再生可能エネルギーの活用は、下記状況にある。

- a) 電力への寄与分（再生可能エネルギーで発電した電力）を除くと、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は 4.7%となっている。
- b) 内訳は、バイオ&廃棄物が 4.5%、太陽が 0.1%の構成となっている。
- c) この内、バイオ&廃棄物については、木質系バイオが 2.7%、バイオ燃料が 1.9%を占めている。

これに対し、化石自給率は、以下の形で推移している（表 26）。

- a) 石油、石炭、ガスの自給率は上下に変動している。
- b) 第二次石油ショック後の 1990 年時点と 2010 年の自給率を比較すると、石油の場合、57.2%から 43.0%に低下している。
- c) 石炭は、117.8%から 105.8%に低下している。
- d) ガスは、95.4%から 89.0%に低下している。
- e) 化石全体の平均では、84.2%から 73.7%に低下している。

以上から、2010 年時点の米国のエネルギー需給は、次のように概括される。

- 1) 一次エネルギー供給については、発電&熱供給の 70%、発電&熱供給以外の 94%を化石で賄っている。
- 2) 一次エネルギー供給全体では、84%を化石、10%を原子力で賄っている。
- 3) 発電&熱供給のエネルギー効率は、41%となっている。
- 4) 最終エネルギー消費については、22%を電力、5%を再生可能エネルギー、73%を化石で賄っている。
- 5) これに対し、化石自給率は 74%となっている。

すなわち、米国は 7 割程度の化石自給率の下で、一次エネルギー供給の 1 割に原子力を充てた上で、8 割を化石に依存する状況にある。

最終エネルギー消費においても、電力の活用（つまり、電化された用途）は 2 割、再生可能エネルギーは 1 割以下に止まっており、全体の 7 割を化石に依存する形となっている。

こうした現状の中で、化石への依存軽減に加え、化石から非化石への転換をエネルギー産業創出の機会と捉え、米国は2011年3月に、新たなエネルギービジョンを提示している。

表 23 米国における 2010 年の一次エネルギー供給状況

区分			一次エネルギー供給	
			量 (× 10 ⁶ , 石油換算トン)	割合 (%)
発電 & 熱供給	化石	石油	10.85	0.49
		石炭	462.78	20.88
		ガス	185.03	8.35
		小計	658.66	29.72
	原子力		218.63	9.86
	水力		22.55	1.02
	再生可能 ・ 水力以外	バイオ & 廃棄物	15.82	0.71
		風力	8.18	0.37
		太陽	0.46	0.02
		地熱	8.19	0.37
		潮力、波力、海洋	0.00	0.00
		小計	32.65	1.47
	その他		4.43	0.20
	合計		936.92	42.27
発電 & 熱供給以外	化石	石油	794.09	35.83
		石炭	39.86	1.80
		ガス	371.45	16.76
		小計	1205.40	54.39
	再生可能	バイオ & 廃棄物	68.20	3.08
		太陽	1.39	0.06
		地熱	0.22	0.01
		小計	69.81	3.15
	その他		1.97	0.09
	合計		1277.18	57.63
電力輸出入		2.23	0.10	
熱		0.00	0.00	
総計		2216.32	100.00	

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

表 24 米国における 2010 年の発電&熱供給のエネルギー効率

区分	エネルギー量 (×10 ⁶ , 石油換算トン)				エネルギー効率 (%)
	一次エネルギー供給	発電&熱製造			
		電力	熱	合計	
発電設備	873.49	346.98	0.00	346.98	39.72
熱電併給設備	63.41	27.49	12.14	39.63	62.50
熱供給設備	0.00	0.00	0.00	0.00	—
発電&熱供給・全体	936.90	374.47	12.14	386.61	41.26

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

表 25 米国における 2010 年の最終エネルギー消費状況

区分			最終エネルギー消費			
			量 (×10 ⁶ , 石油換算トン)	割合 (%)		
電力 & 熱	電力		326.97	21.80		
	熱		6.63	0.44		
	合計		333.60	22.24		
電力 & 熱以外	化石	石油		748.88	49.92	
		石炭		26.85	1.79	
		ガス		319.07	21.27	
		小計		1094.80	72.98	
	再生可能	バイオ & 廃棄物	木質系バイオ		39.83	2.65
			バイオ燃料		28.06	1.87
			その他		0.31	0.02
			小計		68.20	4.54
		太陽		1.39	0.09	
		地熱		0.22	0.02	
		小計		69.81	4.65	
	その他		1.97	0.13		
	合計		1166.58	77.76		
	総計			1500.18	100.00	

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

表 26 米国における化石エネルギーの自給率

エネルギー源	自給率 (%)			
	1980年	1990年	2000年	2010年
化石全体	84.90	84.15	69.11	73.67
石油	62.53	57.15	41.97	43.04
石炭	119.05	117.84	100.61	105.81
ガス	95.34	95.40	81.60	88.96

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

II. エネルギービジョン

米国では 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)」を取りまとめている。

このエネルギービジョンの中で、目指すべき 3 つの方向を定めている。

1) 国内資源を開発し、エネルギー安全保障を確保する

シェールガスや海底油田に代表される国内の資源開発を促進し、化石資源の自給率を高める。

a) エネルギー情報局の報告 (Annual Energy Outlook 2013, U.S. Energy Information Administration) に拠れば、シェールガス増産により、ガスの自給率は 2020 年までに 100% に達すると予想されている。

b) 一方、石油等の液体化石燃料については、タイトオイル (シェール層などの岩盤で採取される石油) の増産等で自給率が高まるが、2019 年をピークに再び低下し、2040 年時点の自給率は 60% 程度になると想定されている。

2) 低コストで、高効率なエネルギーシステムに転換する

低コストで、高効率なエネルギーシステムを導入・拡大していく。重点課題として、以下が挙げられている。

a) 第一に、運輸部門の石油消費を削減し、エネルギー効率を高める。

– 米国の場合、2010 年の最終エネルギー消費の内、運輸部門の石油が 36% を占めている (表 27)。

– 石油については、全体の 72% が運輸部門で消費されている。

– 石油消費を削減し、エネルギー効率を高める方策として、「2015 年までに、先進技術自動車 (電気自動車など) を 100 万台走行させる」などの目標が掲げられている。

b) 第二に、工業、商業、居住におけるエネルギー効率を高める。

– 一般住居、建物、工場などが検討対象となっている。

3) エネルギー技術を革新し、産業と雇用を生み出す

クリーンエネルギーを用い、新たな産業と雇用を創出していく。そのために、エネルギー技術を革新する研究開発を行う。

a) 具体的には、2035 年までに、電力の 80% をクリーンエネルギーで賄うことを目指している。

- b) エネルギー源には、風力、太陽、バイオ、水力などの再生可能エネルギーに加え、原子力、高効率ガス火力、クリーン石炭火力を用いる。
- c) 研究開発については、オバマ政権によるエネルギー研究の流れを踏まえ、以下の研究イニシアチブを強化する。
- 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「エネルギーイノベーション・ハブ」を拡充する。
 - ハイリスク・ハイペイオフ型の応用研究を支援する「エネルギー高等研究計画局 (ARPA-E; Advanced Research Projects Agency-Energy)」を拡充する。
 - 上記に加え、グリーンイノベーションを促進する3つのイニシアチブとして、基礎研究を対象とした「エネルギーフロンティア研究センター」が活動している。
- d) 提言の論拠として、「クリーンエネルギー産業創出の国際競争が始まっていること」、「かつて風力や太陽光で世界トップにあった米国が、現在はドイツなどの後塵を拝していること」、「技術革新と事業創出こそが、米国の競争力の源泉となること」を強調している。

地球温暖化ガスへの対応として、米国は「他の国・地域が排出削減に取り組むことを前提に、2005年対比で、2020年までに17%削減する」ことを目標に掲げている。ただし、独英とは異なり、ビジョンの中では明示していない。

「化石資源への依存軽減」と「新たなエネルギー産業の創出」に重きを置きながら、クリーンエネルギー技術の革新を目指す内容となっている。

表 27 米国における 2010 年の最終エネルギー消費の用途

区分		最終エネルギー消費に占める割合 (%)						合計		
		用途								
		エネルギー源					原材料			
		産業	運輸	家庭	サービス	その他				
電力 & 熱	電力	5.04	0.04	8.29	7.63	0.80	0.00	21.80		
	熱	0.35	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.44		
	合計	5.39	0.04	8.29	7.72	0.80	0.00	22.24		
電力 & 熱以外	化石	石油	2.01	36.07	1.43	1.02	1.04	8.35	49.92	
		石炭	1.69	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	1.79	
		ガス	7.42	1.08	7.41	4.73	0.00	0.63	21.27	
		小計	11.12	37.15	8.84	5.85	1.04	8.98	72.98	
	再生可能	バイオ & 廃棄物	木質系バイオ	1.85	0.00	0.67	0.11	0.02	0.00	2.65
			バイオ燃料	0.18	1.69	0.00	0.00	0.00	0.00	1.87
			その他	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02
			小計	2.03	1.69	0.67	0.13	0.02	0.00	4.54
		太陽	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.09	
		地熱	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	
		小計	2.04	1.69	0.76	0.14	0.02	0.00	4.65	
	その他	0.12	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.13		
	合計	13.28	38.84	9.60	6.00	1.06	8.98	77.76		
	総計	18.67	38.88	17.89	13.72	1.86	8.98	100.00		

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

2.2 非化石化に向けた現状

前項までにまとめた米英独仏の動向をもとに、化石から非化石に転換するための個々の方策について、各国の現状を整理する。

i) 発電&熱供給を非化石化する

化石から非化石への転換を図るには、第一に、発電&熱供給のエネルギー源を非化石化する必要がある。2010年時点の各国状況は、次のようになっている（表28、図6）。

- a) 米英独日は、発電&熱供給の6～7割を化石に依存している。一方、フランスは8割を原子力で供給しているため、化石への依存は1割に止まる。
- b) 原子力を除いて比較すると、非化石への転換はドイツが最も進んだ状況にある。再生可能エネルギーの導入割合が1割を超えているのはドイツのみであり、発電&熱供給の13%を再生可能エネルギーで賄っている（この内、1%が水力、12%が水力以外の再生可能エネルギー）。
- c) 上記に対応し、ドイツの電力構成（発電電力のエネルギー源別割合、前述の発電&熱供給のエネルギー源とは異なる）は、下記のようにになっている（表29、図7）。バイオ&廃棄物、風力による発電がそれぞれ全体の6%、太陽による発電が2%を占めている。

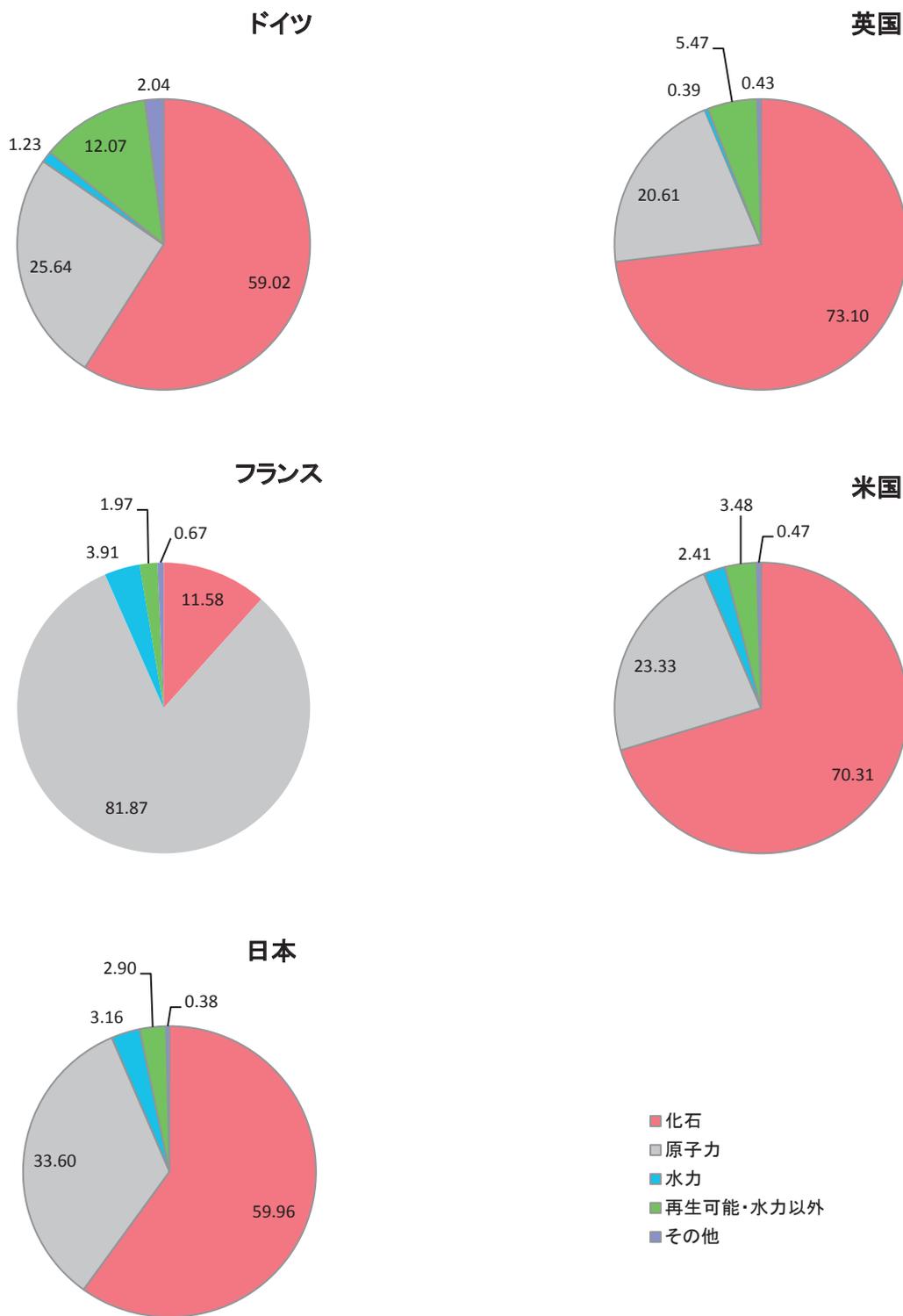
- 化石；58.6%
- 原子力；22.4%
- 水力；4.4%
- バイオ&廃棄物（再生可能エネルギー以外の産業廃棄物等の発電を含む）；6.3%
- 風力；6.0%
- 太陽；1.9%
- その他；0.5%

発電&熱供給の非化石化については、ドイツの動向分析が重要であり、原子力を含めた対応では、フランスの取り組みが参考になる。

表 28 主要国における 2010 年の発電&熱供給のエネルギー源

エネルギー源	発電&熱供給に占める割合 (%)				
	ドイツ	英国	フランス	米国	日本
化石	59.02	73.10	11.58	70.31	59.96
原子力	25.64	20.61	81.87	23.33	33.60
水力	1.23	0.39	3.91	2.41	3.16
再生可能・水力以外	12.07	5.47	1.97	3.48	2.90
その他（産業廃棄物等）	2.04	0.43	0.67	0.47	0.38
合計	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成



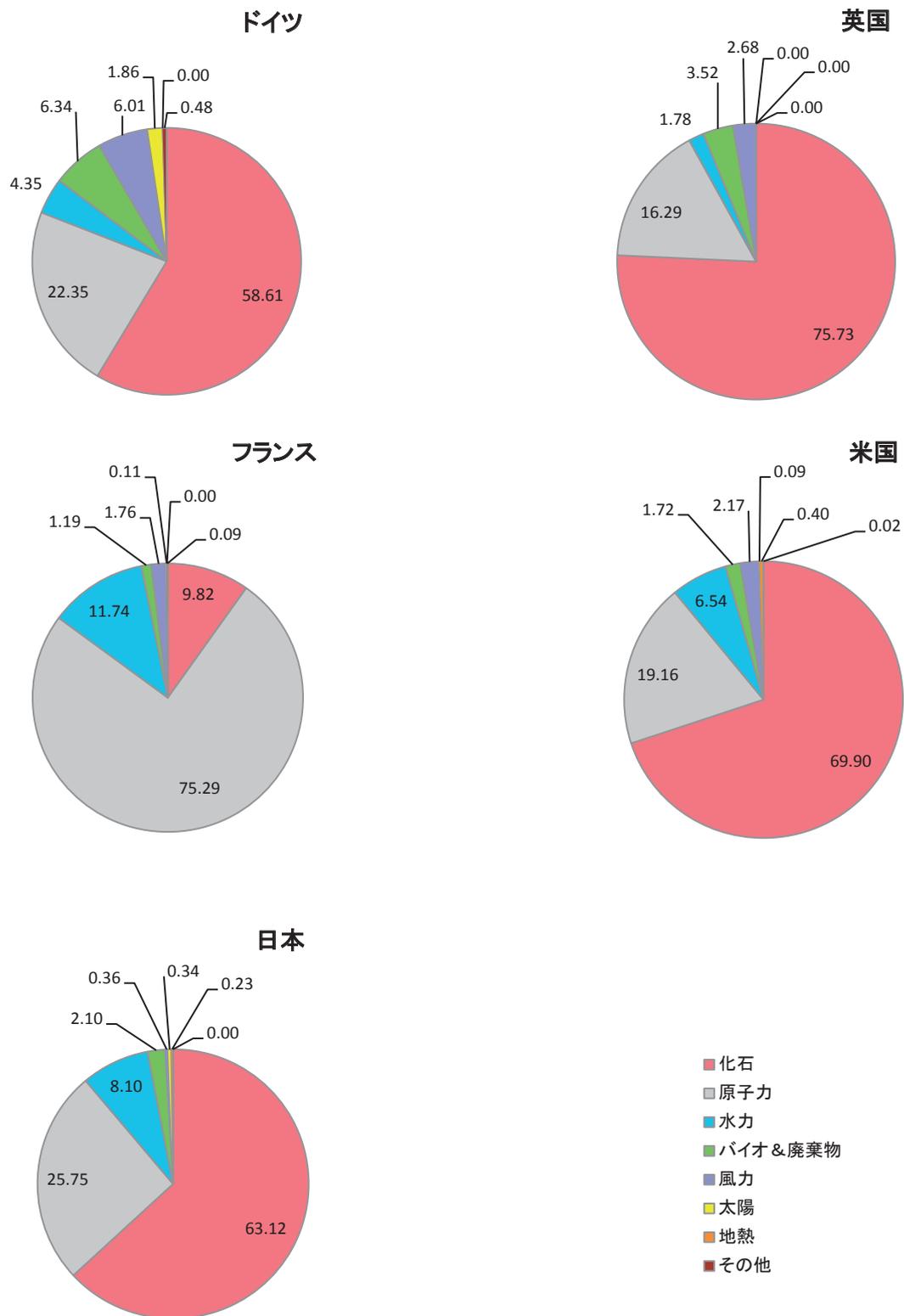
(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

図 6 主要国における 2010 年の発電&熱供給のエネルギー源

表 29 主要国における 2010 年の発電電力のエネルギー源

エネルギー源		発電電力に占める割合 (%)				
		ドイツ	英国	フランス	米国	日本
化石	石油	1.34	1.29	1.02	1.10	8.71
	石炭	43.47	28.54	4.62	45.55	27.20
	ガス	13.80	45.90	4.18	23.25	27.21
	小計	58.61	75.73	9.82	69.90	63.12
原子力		22.35	16.29	75.29	19.16	25.75
水力		4.35	1.78	11.74	6.54	8.10
バイオ & 廃棄物		6.34	3.52	1.19	1.72	2.10
風力		6.01	2.68	1.76	2.17	0.36
太陽		1.86	0.00	0.11	0.09	0.34
地熱		0.00	0.00	0.00	0.40	0.23
潮力、波力、海洋		0.00	0.00	0.09	0.00	0.00
その他		0.48	0.00	0.00	0.02	0.00
合計		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

(出典) International Energy Agency, 「Electricity Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成



(出典) International Energy Agency, 「Electricity Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

図 7 主要国における 2010 年の発電電力のエネルギー源

ii) 発電&熱供給を高効率化する

第二に、発電&熱供給の効率を高める必要がある。効率が上がれば、より少ないエネルギーで電力や熱を製造できるようになり、結果として、化石使用量が削減される。2010年時点の各国状況は、次のようになっている（表 30）。

- a) 各国のエネルギー効率は 4～5 割のレベルに止まっており、発電&熱供給の高効率化を可能にする先端技術の導入が求められる。
- b) 設備面では、ドイツは全体の 7 割、米英仏日は 9 割以上を発電設備で供給している。熱電併給の拡充などによるシステム全体としての効率向上が、もう一つの課題になる。
- c) フランス以外では、エネルギー源の 6～7 割を化石が占めている。したがって、火力発電の効率を高める（例えば、ガス化複合発電やコンバインドサイクル発電を拡充する）ことが大きな効果をもたらす。

火力を中心に、発電&熱供給の効率を高める技術やシステムを拡充することが主要課題となっている。

表 30 主要国における 2010 年の発電&熱供給のエネルギー効率

区分	エネルギー量 (×10 ⁶ , 石油換算トン)					エネルギー効率 (%)
	一次エネルギー供給	発電&熱製造				
		発電設備	熱電併給設備	熱供給設備	合計	
ドイツ	142.87	46.25	15.92	3.65	65.82	46.07
英国	78.55	30.39	2.12	1.38	33.89	43.14
フランス	136.41	46.94	5.11	0.13	52.18	38.26
米国	936.90	346.98	39.63	0.00	386.61	41.26
日本	223.52	95.02	0.00	0.49	96.01	42.95

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成

iii) 最終消費を高効率化する

第三に、最終消費のエネルギー効率を高める必要がある。発電&熱供給と同様に、効率が上がれば、より少ないエネルギーで最終消費を賄えるようになり、結果として、化石使用量が削減される。2010年時点の各国状況は、次のようになっている。

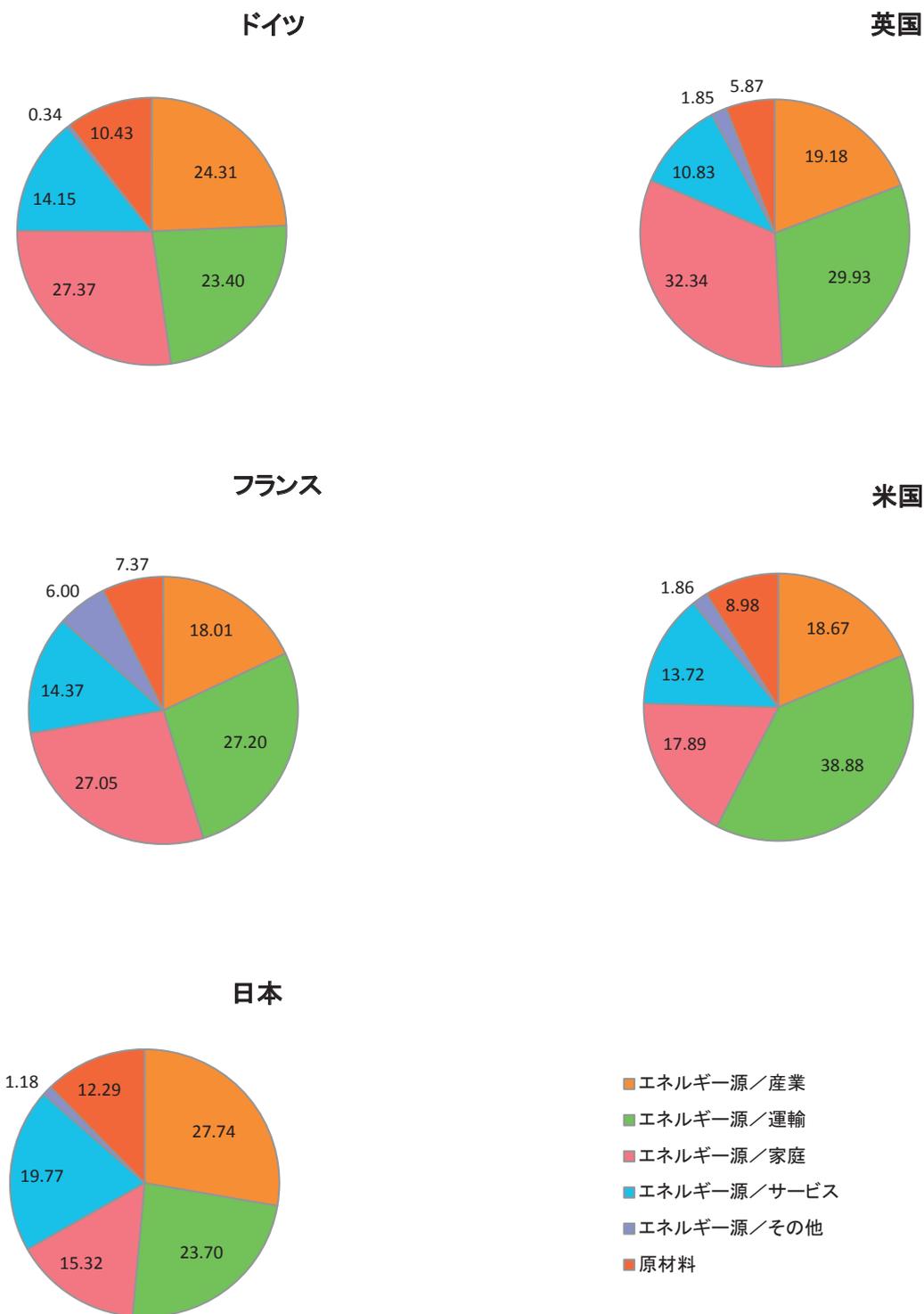
- a) 概ね1割が原材料、9割がエネルギー源（当該分野で消費される電気、熱、及び燃料）として使用されている（表31、図8）。
- b) この内、エネルギー源の消費状況は次のようになっており、これらの高効率化を図る必要がある。
 - 2～3割が、産業部門で消費されている。主として、製造のエネルギー源に使われる。
 - 2～4割が、運輸部門で消費されている。主として、輸送のエネルギー源に使われる。
 - 2～3割が、家庭部門で消費されている。主として、建物のエネルギー源に使われる。
 - 1～2割が、サービス部門で消費されている。主として、建物のエネルギー源に使われる。

削減余力が高いことから、米英独仏では特に、建物のエネルギー消費（家庭やサービス部門の建物で消費されるエネルギー量の削減及びエネルギー効率向上）が重視されている。

表 31 主要国における 2010 年の最終エネルギー消費の用途

区分	最終エネルギー消費に占める割合 (%)						
	用途						合計
	エネルギー源					原材料	
	産業	運輸	家庭	サービス	その他		
ドイツ	24.31	23.40	27.37	14.15	0.34	10.43	100.00
英国	19.18	29.93	32.34	10.83	1.85	5.87	100.00
フランス	18.01	27.20	27.05	14.37	6.00	7.37	100.00
米国	18.67	38.88	17.89	13.72	1.86	8.98	100.00
日本	27.74	23.70	15.32	19.77	1.18	12.29	100.00

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成



(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

図 8 主要国における 2010 年の最終エネルギー消費の用途

iv) 最終消費を非化石化する

第四に、最終消費を非化石化する必要がある。そのために、燃料として消費している化石を電気で置き換える（原料用の化石は電気では代替できない）。つまり、化石燃料の用途を電化した上で、再生可能エネルギーで発電した電気を充てることが求められる。2010年時点の各国状況は、次のようになっている。

- a) 産業部門では、エネルギー源の5～7割（ドイツ；51%、英国；61%、フランス；59%、米国；60%、日本；65%）を化石燃料で賄っている（表 32-1、図 9-1）。
- b) 運輸部門では、9割以上（ドイツ；92%、英国；96%、フランス；92%、米国；96%、日本；98%）を化石で賄っている（表 32-2、図 9-2）。
- c) 家庭部門では、5～8割（ドイツ；62%、英国；76%、フランス；50%、米国；49%、日本；46%）を化石で賄っている（表 32-3、図 9-3）。
- d) サービス部門では、4～5割（ドイツ；53%、英国；41%、フランス；43%、米国；43%、日本；54%）を化石で賄っている（表 32-4、図 9-4）。

化石が9割を超える運輸部門での「輸送機械の電化（例えば、ハイブリッド自動車や電気自動車）」が重要であり、合わせて、家庭やサービス部門での「建物の電化（例えば、太陽光や風力発電による冷暖房）」が主要課題になる。

上記に加え、第五に、「非化石燃料（バイオ燃料、水素、人工光合成で生成した炭化水素など）」の導入が有力な手段となる。特に、電化が難しい用途、具体的には航空機や貨物トラックなどの長距離輸送に使われる石油の代替が期待されている。非化石燃料の拡充が進めば、原料用の石油も代替可能になってくる。2010年時点の各国状況は、次のようになっている。

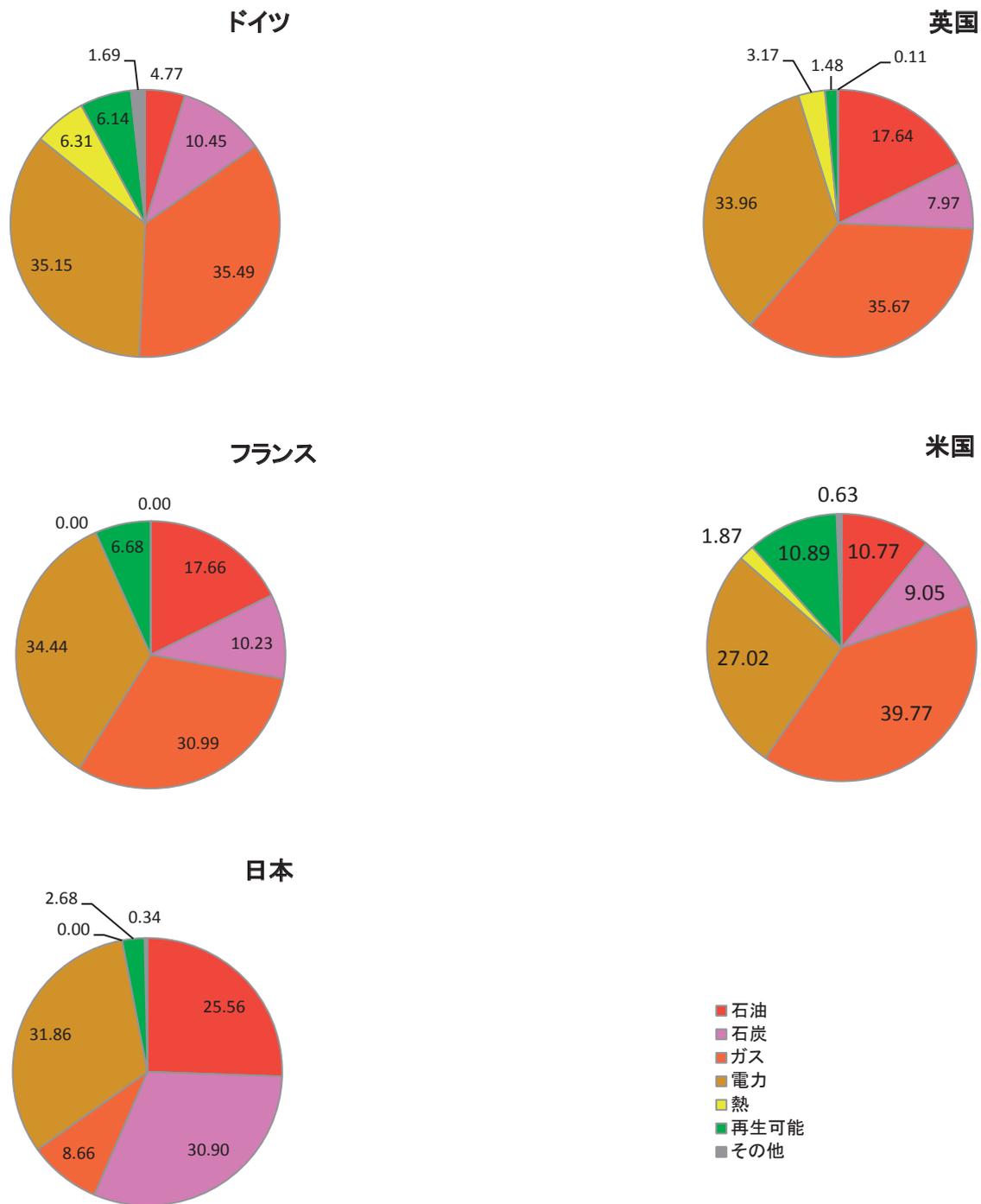
- a) 運輸部門のエネルギー源の9割以上（ドイツ；91%、英国；96%、フランス；91%、米国；93%、日本；98%）を石油が占めている（表 32-2、図 9-2）。
- b) 輸送機械に使われる石油の一部をバイオ燃料で置き換える動きが見られるものの、部門全体に占める再生可能エネルギーの割合は、1割以下（ドイツ；6%、英国；3%、フランス；5%、米国；4%、日本；0%）に止まっている。
- c) 原料用の石油を非化石燃料で置き換える動きは、進んでいない。

バイオ燃料の拡充、人工光合成による水素や炭化水素の生成など、短期から中長期の視野に立った複数の検討課題が存在している。

表 32-1 主要国における 2010 年の最終エネルギー消費／産業部門のエネルギー源

区分		産業部門におけるエネルギー源の割合 (%)					
		ドイツ	英国	フランス	米国	日本	
化石	石油	4.77	17.64	17.66	10.77	25.56	
	石炭	10.45	7.97	10.23	9.05	30.90	
	ガス	35.49	35.67	30.99	39.77	8.66	
	小計	50.71	61.28	58.88	59.59	65.12	
電力		35.15	33.96	34.44	27.02	31.86	
熱		6.31	3.17	0.00	1.87	0.00	
再生可能	バイオ & 廃棄物	木質系バイオ	3.72	1.21	6.58	9.89	2.68
		バイオ燃料	2.27	0.04	0.10	0.94	0.00
		その他	0.15	0.23	0.00	0.02	0.00
		小計	6.14	1.48	6.68	10.85	2.68
	太陽		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	地熱		0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
	小計		6.14	1.48	6.68	10.89	2.68
	その他（産業廃棄物等）		1.69	0.11	0.00	0.63	0.34
合計		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成



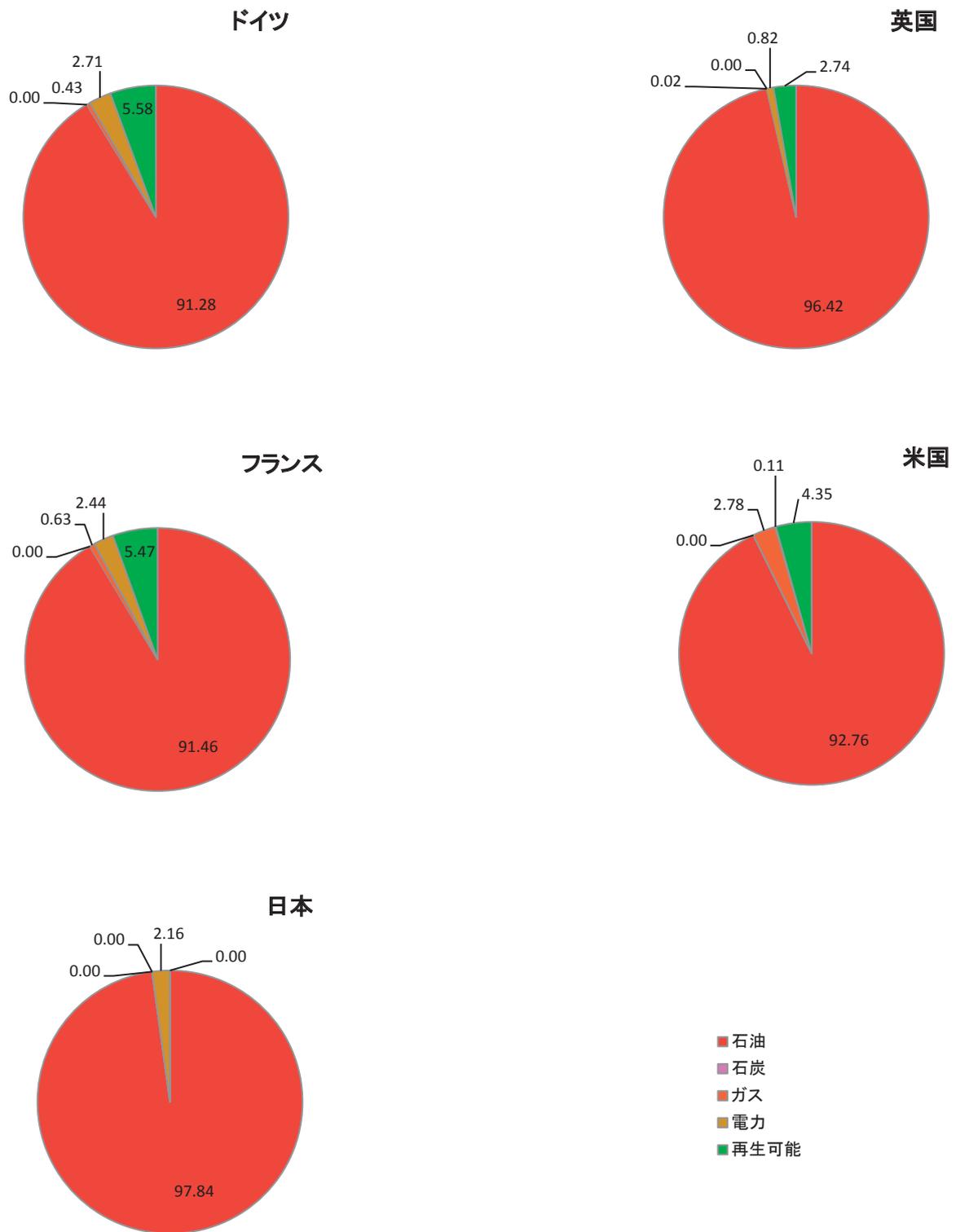
(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

図 9-1 主要国における 2010 年の最終エネルギー消費／産業部門のエネルギー源

表 32-2 主要国における 2010 年の最終エネルギー消費／運輸部門のエネルギー源

区分		運輸部門におけるエネルギー源の割合 (%)					
		ドイツ	英国	フランス	米国	日本	
化石	石油	91.28	96.42	91.46	92.76	97.84	
	石炭	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	
	ガス	0.43	0.00	0.63	2.78	0.00	
	小計	91.71	96.44	92.09	95.54	97.84	
電力		2.71	0.82	2.44	0.11	2.16	
熱		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
再生可能	バイオ & 廃棄物	木質系バイオ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		バイオ燃料	5.58	2.74	5.47	4.35	0.00
		その他	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		小計	5.58	2.74	5.47	4.35	0.00
	太陽		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	地熱		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	小計		5.58	2.74	5.47	4.35	0.00
	その他（産業廃棄物等）		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
合計		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成



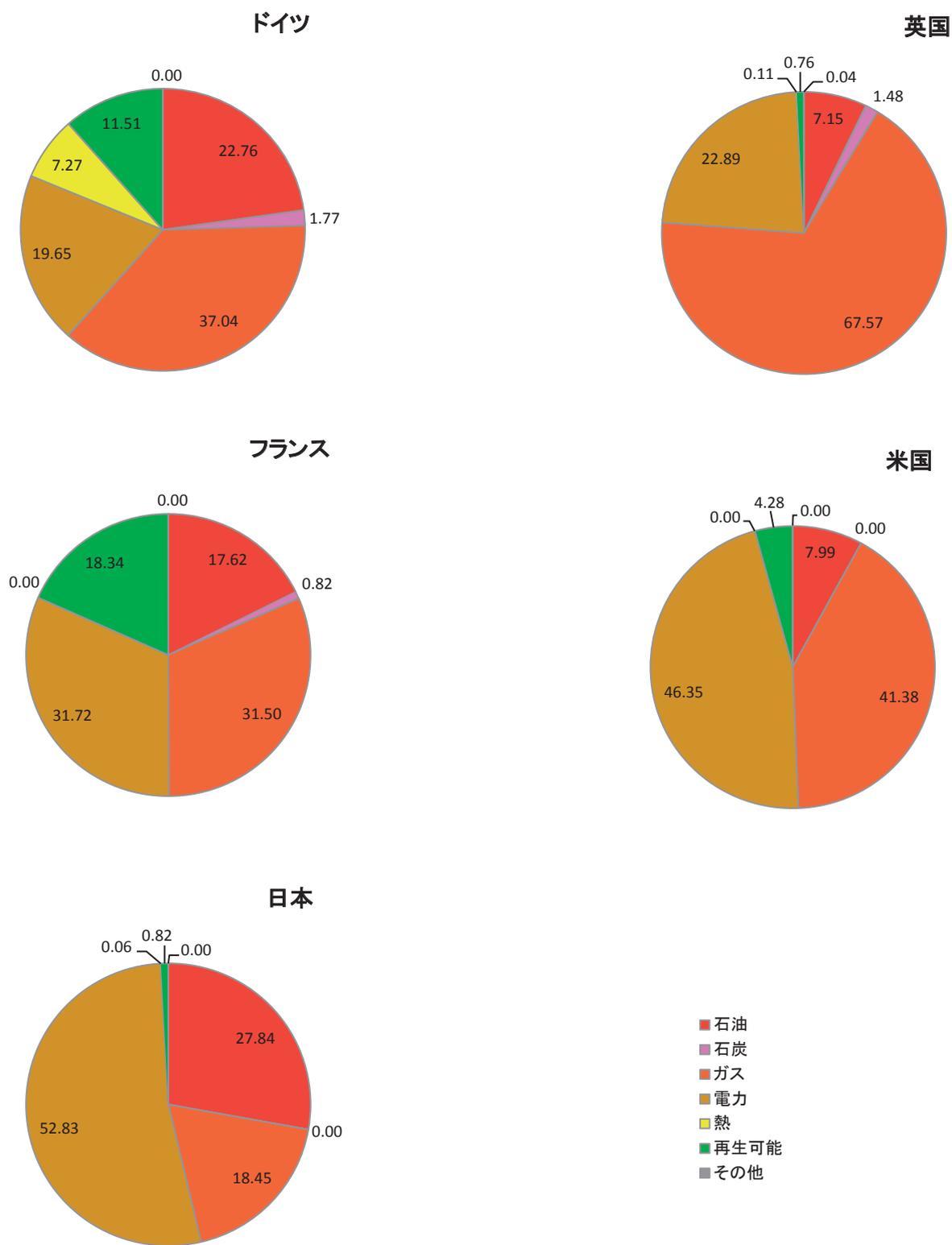
(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

図 9-2 主要国における 2010 年の最終エネルギー消費／運輸部門のエネルギー源

表 32-3 主要国における 2010 年の最終エネルギー消費／家庭部門のエネルギー源

区分		家庭部門におけるエネルギー源の割合 (%)					
		ドイツ	英国	フランス	米国	日本	
化石	石油	22.76	7.15	17.62	7.99	27.84	
	石炭	1.77	1.48	0.82	0.00	0.00	
	ガス	37.04	67.57	31.50	41.38	18.45	
	小計	61.57	76.20	49.94	49.37	46.29	
電力		19.65	22.89	31.72	46.35	52.83	
熱		7.27	0.11	0.00	0.00	0.06	
再生可能	バイオ & 廃棄物	木質系バイオ	10.08	0.74	18.14	3.75	0.04
		バイオ燃料	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		その他	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
		小計	10.08	0.76	18.14	3.75	0.04
	太陽		0.69	0.00	0.09	0.52	0.78
	地熱		0.74	0.00	0.11	0.01	0.00
	小計		11.51	0.76	18.34	4.28	0.82
	その他（産業廃棄物等）		0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
合計		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成



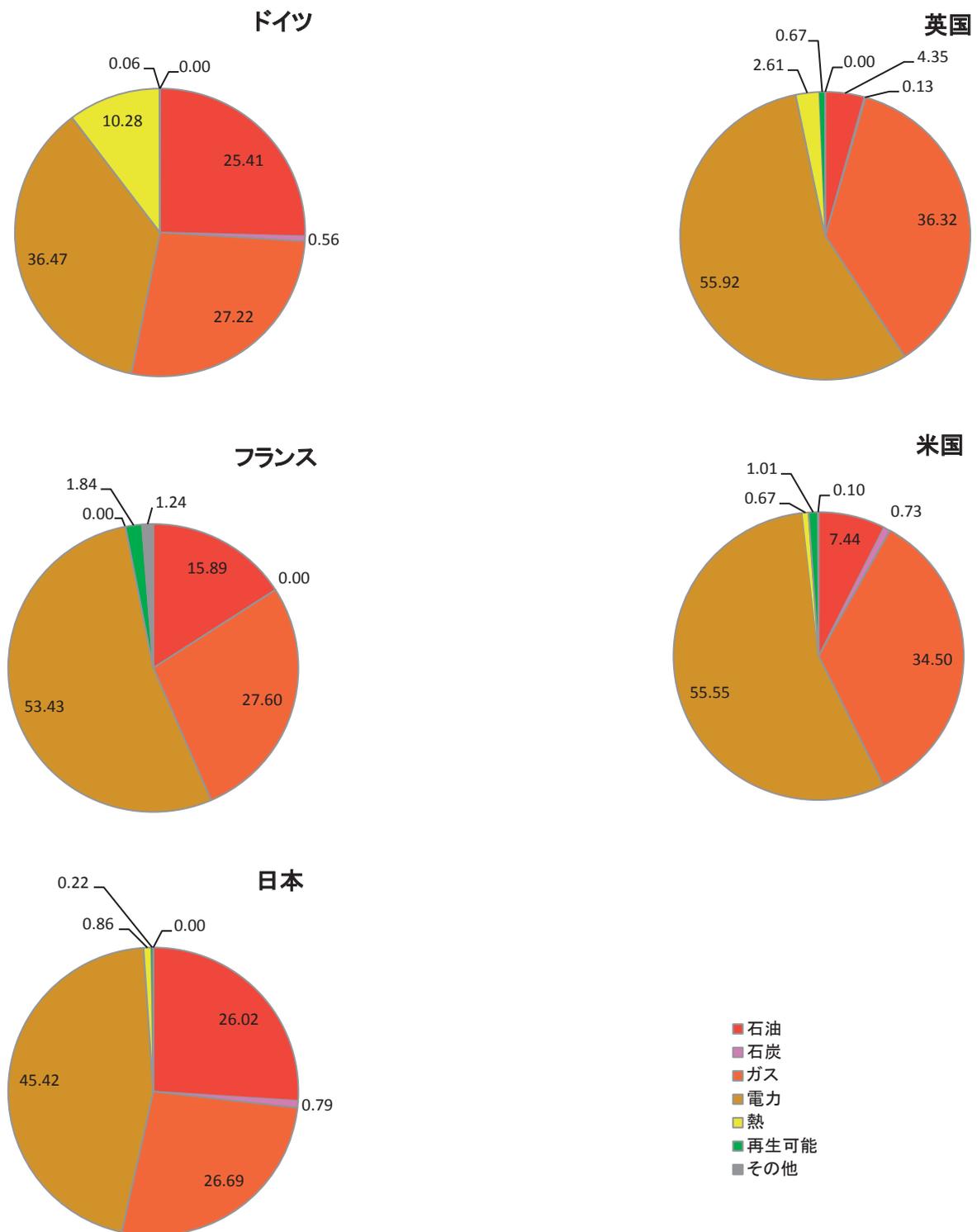
(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

図 9-3 主要国における 2010 年の最終エネルギー消費／家庭部門のエネルギー源

表 32-4 主要国における 2010 年の最終エネルギー消費／サービス部門のエネルギー源

区分		サービス部門におけるエネルギー源の割合 (%)					
		ドイツ	英国	フランス	米国	日本	
化石	石油	25.41	4.35	15.89	7.44	26.02	
	石炭	0.56	0.13	0.00	0.73	0.79	
	ガス	27.22	36.32	27.60	34.50	26.69	
	小計	53.19	40.80	43.49	42.67	53.50	
電力		36.47	55.92	53.43	55.55	45.42	
熱		10.28	2.61	0.00	0.67	0.86	
再生可能	バイオ & 廃棄物	木質系バイオ	0.00	0.00	0.00	0.83	0.00
		バイオ燃料	0.03	0.47	0.38	0.02	0.00
		その他	0.00	0.20	1.24	0.12	0.00
		小計	0.03	0.67	1.62	0.97	0.00
	太陽		0.03	0.00	0.09	0.00	0.03
	地熱		0.00	0.00	0.13	0.04	0.19
	小計		0.06	0.67	1.84	1.01	0.22
	その他（産業廃棄物等）		0.00	0.00	1.24	0.10	0.00
合計		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST・CRDS が作成



(出典) International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」及び「Renewables Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

図 9-4 主要国における 2010 年の最終エネルギー消費／サービス部門のエネルギー源

以上にまとめた状況から、国による実態の違いは見られるが、化石から非化石への転換に向け、各国共に解決すべき複数の主要課題が存在していることが分かる。

2.3 エネルギーの選択条件

前項にまとめたように、非化石への転換を図るために解決すべき主要課題は、各国共通している。一方、用いるエネルギーについては、国毎の制約が存在する。エネルギーの選択条件について状況を比較すると、次の特徴が浮かび上がる。

I. 原子力エネルギー

福島原発事故後の動きを含め、原子力を巡る各国状況は次のようになっている。

- a) ドイツは、「2022年までに全ての原子力発電所を停止する」ことを決定している。
 - 福島原発事故を受けてエネルギービジョンを一部見直し、2011年10月に「エネルギー供給構想の迅速な実現」を発表している。
 - この中で、原子力の使用期限を、当初予定の2036年から、2022年まで前倒しする方針を打ち出している。
- b) 英国は、引き続き、原子力を活用する方針を定めている。
 - 2013年3月に、ビジネスイノベーション技能省とエネルギー気候変動省が「英国の原子力の未来 (The UK's Nuclear Future)」をまとめている。
 - この中で、「英国が、安定で、持続可能で、低炭素なエネルギーの未来を実現するには、原子力が必要となる」ことを示している。
- c) フランスは、引き続き、原子力を活用する方針を定めている。
 - 2012年2月の「2050年のエネルギー構想」で、エネルギーに占める原子力の割合について特定目標は定めず、第四世代原子炉の開発を継続する方針を示している。
 - その後、オランド政権にて「電力に占める原子力の割合を50%に削減するためのシナリオ」が検討されている。
- d) 米国は、引き続き、原子力を活用する方針を定めている。
 - 2011年3月の「未来の安定したエネルギーを確保するための構想」で、福島原発事故を踏まえた安全強化策を国内の原子力発電所に適用する方針を打ち出している。
 - 合わせて、米国が新たな産業と雇用を創出するためのクリーンエネルギーの一つとして、原子力を位置付けている。

ドイツは2022年までに全ての原子炉を停止するのに対し、米英仏は活用を継続する方向となっている。

II. 化石エネルギー

新たな化石資源として注目されるシェールオイルやシェールガスを巡る動きは、次のようになっている。

- a) シェールオイルやシェールガスは、米国及びフランスに多く存在している（表 33）。
 - シェールオイルの潜在埋蔵量（技術的に採掘可能と想定される未確認埋蔵量）は、2010年の石油消費量を基準にした場合、ドイツが0.8年分、英国が1.2年分、フランスが7.0年分、米国が8.3年分となっている。
 - シェールガスの潜在埋蔵量は、2010年のガス消費量を基準にした場合、ドイツが5.3年分、英国が7.8年分、フランスが80.8年分、米国が23.5年分となっている。
- b) シェールガスの自国生産について、米国は生産拡大、英国は開発推進の方針を示している。一方、ドイツ及びフランスは、環境影響への懸念（水圧破砕に用いる化学物質や掘削した油の漏洩による地下水汚染など）から、開発抑制の方向となっている。
- c) 結果として、米国のシェールガス生産が拡大しており、確認埋蔵量も増加している（表 34）。
 - 米国ではシェールガス生産量が継続して増加しており、自国のガス生産に占める割合が、2011年時点で33.3%に達している。
 - 確認埋蔵量も増加しており、天然ガス全体に占めるシェールガスの割合は、2012年時点で37.7%まで上昇している。
- d) 原油及び天然ガス全体で捉えると、2011年時点の各国の確認埋蔵量は、以下の値となっている（表 35）。
 - 原油の確認埋蔵量は、ドイツが0.3年分、英国が4.8年分、フランスが0.1年分、米国が3.3年分となっている（2010年の石油消費量を基準にした場合）。
 - 天然ガスの確認埋蔵量は、ドイツが1.9年分、英国が2.7年分、フランスが0.1年分、米国が12.6年分となっている（2010年のガス消費量を基準にした場合）。
- e) シェールガス拡大を反映し、米国の天然ガス埋蔵量が大きな値を示している。

シェールガスやシェールオイルの出現は、特に米国において、化石資源の自給を高め、エネルギー選択の自由度を広げる効果をもたらしている。

表 33 主要国におけるシェールオイル、シェールガスの潜在埋蔵量

区分	シェールオイル			シェールガス		
	シェールオイルの 潜在埋蔵量 ($\times 10^6$, バレル)	2010年の石油 の最終消費量 ($\times 10^6$, バレル)	使用可能年数	シェールガスの 潜在埋蔵量 ($\times 10^9$, ft ³)	2010年のガス の最終消費量 ($\times 10^9$, ft ³)	使用可能年数
ドイツ	700	901	0.8	17000	3181	5.3
英国	700	595	1.2	26000	3337	7.8
フランス	4700	4700	7.0	137000	1695	80.8
米国	58100	7001	8.3	567000	24087	23.5

(出典) U.S. Energy Information Administration, 「Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States (June, 2013)」 及び各種統計データ、International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

表 34 米国におけるシェールガスの生産状況

区分		2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
生産量	天然ガス($\times 10^9$, ft ³)	20196	21112	21648	22382	24036	25319
	シェールガス($\times 10^9$, ft ³)	1293	2116	3110	5336	7994	—
	シェールガスの占める割合(%)	6.4	10.0	14.4	23.8	33.3	—
確認埋蔵量	天然ガス($\times 10^9$, ft ³)	220416	247789	255035	283879	317647	348809
	シェールガス($\times 10^9$, ft ³)	—	23304	34428	60644	97449	131616
	シェールガスの占める割合(%)	—	9.4	13.5	21.4	30.7	37.7

(出典) U.S. Energy Information Administration, 「Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States (June, 2013)」 及び各種統計データ、International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

表 35 主要国における原油、天然ガスの確認埋蔵量

区分	原油			天然ガス		
	2011年の 確認埋蔵量 ($\times 10^9$, バレル)	2010年の 最終消費量 ($\times 10^6$, バレル)	使用可能年数	2011年の 確認埋蔵量 ($\times 10^9$, ft ³)	2010年の 最終消費量 ($\times 10^9$, ft ³)	使用可能年数
ドイツ	276	901	0.3	6200	3181	1.9
英国	2858	595	4.8	9040	3337	2.7
フランス	92	668	0.1	240	1695	0.1
米国	23267	7001	3.3	304625	24087	12.6

(出典) U.S. Energy Information Administration, 各種統計データ、International Energy Agency, 「Energy Balances of OECD Countries」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

Ⅲ. 地球温暖化ガス

地球温暖化ガスの排出量削減を巡る状況は、次のようになっている。

- a) ドイツは、2010年9月にまとめたエネルギービジョン「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」において、「1990年対比で、2050年までに排出量を80～95%削減する」ことを目標として明示している。
- b) 英国は、2010年7月にまとめたエネルギービジョン「2050年までの展望」において、「1990年対比で、2050年までに少なくとも80%削減する」ことを目標として明示している。
- c) フランスは、2012年2月にまとめたエネルギービジョン「2050年のエネルギー構想」において、削減目標を明示していない。エネルギー政策指針法に定められた削減目標などを参考に、原子力の位置付けを検討している。
 - 2005年7月に制定された「エネルギー政策指針法」において、「1990年対比で、2050年までに75%削減する」ことを目標として示している。
- d) 米国は、2011年3月にまとめたエネルギービジョン「未来の安定したエネルギーを確保するための構想」において、削減目標に言及していない。
 - 2013年6月の大統領府「大統領気候行動計画 (The President's Climate Action Plan)」などで、「他の国・地域が排出削減に取り組むことを前提に、2005年対比で、2020年までに17%削減する」ことを目標として示している。

ドイツ及び英国が温暖化ガス削減目標をエネルギービジョンの基軸として明確に位置付けているのに対し、米国のエネルギービジョンは、目標値には直接言及しない内容となっている。

2.4 エネルギーシナリオと研究戦略

これまでに取り上げた「エネルギービジョンを巡る動向」「非化石化に向けた現状」及び「エネルギーの選択条件」に関する分析から、米英独仏の取り組みは、以下のようにまとめられる。

1. エネルギービジョン

各国のエネルギービジョンを一覧表の形で比較し、表 36 に示した。ポイントを整理すると、次のようになる。

- 1) ドイツは 2010 年 9 月に「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」をまとめている。その後、福島原発事故を受けて構想を一部見直し、2011 年 10 月に「エネルギー供給構想の迅速な実現」を発表した。2050 年までに地球温暖化ガス排出量を 80～95%削減することを目標に、電力消費に占める再生可能エネルギーの割合を 80%、最終エネルギー消費に占める割合を 60%まで高めることを目指している。
- 2) 英国は 2010 年 7 月に「2050 年までの展望」をまとめている。2050 年までに地球温暖化ガス排出量を少なくとも 80%削減することを目標に定め、目標達成のシナリオとして、エネルギー源の構成やエネルギー利用効率などの技術要件を変えた 6 つのケースを検討している。「エネルギー需要を抑制し、化石燃料の用途を電化し、低炭素な発電を増やし、電化が困難な用途にはバイオ燃料を供給し、伝送網を拡充する」ことを、今後の方向として示している。
- 3) フランスは 2012 年 2 月に「2050 年のエネルギー構想」をまとめている。原子力の位置付けについて重点的検討を行い、「現時点では、エネルギーに占める原子力の割合について特定目標は定めない」ことを方針として示した。第四世代原子炉の開発を継続し、省エネやエネルギー効率向上の研究開発を促進する方針も打ち出されている。その後、オランダ政権が誕生し、現在は「電力に占める原子力の割合を 50%にする」ためのシナリオが検討されている。
- 4) 米国は 2011 年 3 月に「未来の安定したエネルギーを確保するための構想」をまとめ、二つの目標を定めている。第一が、エネルギー安全保障の確保。シェールガスなどの国内の資源開発を促進することで、化石資源の自給率を高める。第二が、新たなエネルギー産業の創出。具体的には、2035 年までに電力の 80%をクリーンエネルギーで賄えるようにする。その際、クリーンエネルギーには再生可能エネルギーのほか、原子力、高効率ガス火力、クリーン石炭火力を用いるとしている。

英独が「地球温暖化ガス排出量の削減」を目標として明示しているのに対し、米国は「化石資源への依存軽減」と「新たなエネルギー産業の創出」に重きを置いた内容となっている。

表 36 主要国が掲げるエネルギービジョン

区分	提言時期	提言機関	名称	内容
ドイツ	2010年9月	連邦経済技術省 連邦環境自然保護原子力安全省	環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想	<ul style="list-style-type: none"> ・2050年までに、地球温暖化ガス排出量を1990年対比で80～95%削減する。 ・2050年までに、電力消費に占める再生可能エネルギーの割合を80%にする。 ・2050年までに、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60%にする。
英国	2010年7月	エネルギー気候変動省	2050年までの展望	<ul style="list-style-type: none"> ・2050年までに、地球温暖化ガス排出量を1990年対比で少なくとも80%削減する。 ・エネルギー需要を抑制し、化石燃料の用途を電化し、低炭素な電源を増やし、電化が困難な用途にバイオ燃料を供給し、伝送網を拡充する。
フランス	2012年2月	経済財政産業省	2050年のエネルギー構想	<ul style="list-style-type: none"> ・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、第四世代原子炉の開発は継続する。 ・建物及び輸送分野を重点に、省エネやエネルギー効率向上の研究開発を促進する。
米国	2011年3月	大統領府	未来の安定したエネルギーを確保するための構想	<ul style="list-style-type: none"> ・シェールガスなどの国内の資源開発を促進し、化石資源の自給率を高める。 ・2035年までに、電力の80%をクリーンエネルギーで賄う。 ・クリーンエネルギー源として、風力、太陽、バイオ、水力などの再生可能エネルギーに加え、原子力、高効率ガス火力、クリーン石炭を用いる。

(出典) 米英独仏の当該機関による各種公開情報に基づき JST-CRDS が作成

II. エネルギーの選択条件

ビジョン実現に向けた各国におけるエネルギーの選択肢は、次のようになっている（表37）。

- 1) 原子力については、ドイツが2022年までに全ての原子炉を停止する計画であるのに対し、米英仏は活用を継続する方針となっている。
- 2) 新たな化石資源として注目されるシェールガスやシェールオイルの自国生産については、米国は生産拡大、英国は開発推進の方針を示している。一方、ドイツ及びフランスは、環境影響への懸念から、開発抑制の方向となっている。
 - シェールオイルの潜在埋蔵量の多さは、2010年の石油消費量を基準にした場合、米国；8.3年分、フランス；7.0年分、英国；1.2年分、ドイツ；0.8年分、の順番となる。
 - シェールガスの潜在埋蔵量の多さは、2010年のガス消費量を基準にした場合、フランス；80.8年分、米国；23.5年分、英国；7.8年分、ドイツ；5.3年分、の順番となる。
 - 本分野で先行する米国の状況を見ると、自国のガス生産に占めるシェールガスの割合が、2011年時点で33.3%に達している。確認埋蔵量についても、天然ガス全体に占めるシェールガスの割合が、2012年時点で37.7%まで上昇している。

これらの分析に2.1項で詳述した各国のエネルギー需給状況を加味すると、エネルギーについて米国が最も多様な選択肢を有しており、一方で、ドイツが最も厳しい制約下にあることが確認できる。

こうした制約の中で、ドイツは地球温暖化ガス排出量を80～95%削減することを目標に、再生可能エネルギーの割合を電力の80%、最終エネルギー消費の60%まで高めることを目指している。これに対し、米国は、再生可能エネルギーに加え、原子力、高効率ガス、クリーン石炭をエネルギー源として用い、新たな産業創出を図っている。

上記の考察を総合すると、「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通課題に取り組む4ヶ国の中で、「最も厳しいエネルギー源の制約下で、再生可能エネルギーの導入・拡大を図るのがドイツ」であり、「最も多様なエネルギー源を用い、新産業創出を目指すのが米国」という特徴が浮かび上がってくる。

そこで、以下に取り上げる「エネルギーシナリオと研究戦略」の検討では、これらの特徴を踏まえ、ドイツ及び米国の取り組みを重点的に調べた。

表 37 主要国におけるエネルギーの選択条件

区分	原子力エネルギー	化石エネルギー		地球温暖化ガス		
		シェールオイルの潜在埋蔵量の使用可能年数、2010年の石油消費量を基準にした場合)	シェールガスの潜在埋蔵量の使用可能年数、2010年のガス消費量を基準にした場合)	シェールオイル、シェールガスへの取り組み	排出量削減目標	エネルギービジョンにおける位置付け
ドイツ	2022年までに原子力を廃止	0.8	5.3	開発抑制	2050年までに1990年対比で80～95%削減	・2010年9月のエネルギービジョン「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」の目標として明示
英国	原子力の活用を継続	1.2	7.8	開発推進	2050年までに1990年対比で少なくとも80%削減	・2010年7月のエネルギービジョン「2060年までの展望」の目標として明示
フランス	原子力の活用を継続	7.0	80.8	開発抑制	2050年までに1990年対比で75%削減	・2005年7月制定の「エネルギー政策指針法」において削減目標を設定 ・2012年2月のエネルギービジョン「2050年のエネルギー構想」の目標としては明示せず
米国	原子力の活用を継続	8.3	23.5	生産拡大	2020年までに2005年対比で17%削減	・2013年6月の大統領府「大統領気候行動計画」などにおいて削減目標を設定 ・2011年3月のエネルギービジョン「未来の安定したエネルギーを確保するための構想」の目標としては明示せず

(出典) 米英独仏の当該機関による各種公開情報に基づき JST-CRDS が作成

2.4.1 ドイツの取り組み

「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通課題に取り組む4ヶ国の中で、ドイツは、最も厳しいエネルギー源の制約下で、エネルギービジョンに削減目標を明示した上で、温暖化ガス削減に取り組んでいる。

I. エネルギーシナリオ

ドイツが描くエネルギーシナリオを「未来のエネルギーシステム」と「システム構築の方策」に分けて整理すると、次のようになる。

i) 未来のエネルギーシステム

2010年9月に「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」をまとめ、目指すべき未来のエネルギーシステムを、以下のように定めている。

- ドイツは、世界で最もエネルギー効率がが高く、環境にやさしく、競争優位な価格でエネルギーが得られ、高度な繁栄を維持することが可能な経済社会を構築する。

その上で、システム構築に向け、下記目標を設定している。

- a) 一次エネルギー供給を、2008年対比で、2050年までに50%削減する。
- b) 電力消費を、2008年対比で、2050年までに25%削減する。
- c) 電力消費に占める再生可能エネルギー（水力を含む）の割合を、2050年までに80%に高める。
- d) 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）の割合を、2050年までに60%に高める。
- e) これらの結果として、地球温暖化ガス排出量を、1990年対比で、2020年までに40%、2030年までに55%、2040年までに70%、2050年までに80～95%削減する。

ドイツは、エネルギー効率を向上し（一次エネルギー供給を50%削減する）、再生可能エネルギーを拡大する（最終エネルギー消費に占める割合を60%にする）ことで、温暖化ガスを削減する戦略を取っている。

ii) システム構築の方策

上記目標を達成するため、次のようなシステム構築を目指している。

①エネルギー効率の向上

以下の手順と方法を用い、エネルギー効率を向上する。

- a) 一次エネルギー供給を、1990年対比で、2020年までに20%、2050年までに50%削減する。
- b) そのための主要課題として、建物へのエネルギー供給を削減する。具体的には、2008年対比で、2020年までに熱供給を20%削減し、2050年までに一次エネルギー供給を80%削減する。
 - ドイツでは、最終エネルギー消費の40%を建物が占めると推定されている。古い建物が多く断熱性等に劣るため、技術改善に伴うエネルギー削減余力が大きい。
- c) さらに、電力消費全体として、2008年対比で、2020年までに10%、2050年までに25%の削減を図る。
- d) 加えて、運輸部門のエネルギー消費を、2005年対比で、2020年までに10%、2050年までに40%削減する。
 - 電気自動車や燃料電池自動車（現行のガソリン自動車と比較し、エネルギー効率が数倍高い）の導入を拡大し、モーダルシフト（貨物輸送を自動車から鉄道等の大量輸送機関にシフトし、エネルギー効率を高める）を促進する。
 - 電気自動車については、2020年までに100万台、2030年までに600万台を走行させる目標が掲げられている。
- e) 上記方策などを講ずることで、エネルギー生産性を年率2.1%（最終エネルギー消費を基準とした値）の割合で向上させていく。
- f) これらの結果として「一次エネルギー供給の削減（2050年までに50%削減）」と「エネルギー生産性の向上（年率2.1%で向上）」を同時に実現し、ドイツに高度な繁栄をもたらす経済活力を維持する。

ドイツは、「建物」や「輸送」などのエネルギー効率を高めることで、一次エネルギー供給を50%削減するシナリオを描いている。

②再生可能エネルギーの拡大

以下の手順と方法を用い、再生可能エネルギーを拡大する。

- a) 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）の割合を、2020年までに18%、2030年までに30%、2040年までに45%、2050年までに60%に高める。
- b) 合わせて、電力消費に占める再生可能エネルギー（水力を含む）の割合を、2020年までに35%、2030年までに50%、2040年までに65%、2050年までに80%に高める。

- 2010年時点の発電電力のエネルギー源は、次のようになっている（表38）。
 - ・化石；58.6%
 - ・原子力；22.4%
 - ・バイオ&廃棄物（再生可能エネルギー以外の産業廃棄物等の発電を含む）；6.3%
 - ・風力；6.0%
 - ・水力（揚水発電も含む）；4.4%
 - ・太陽；1.9%
- c) 再生可能エネルギー拡大のための主要課題として、「エネルギー供給」の面では、風力エネルギーの導入を促進する。
 - 洋上風力については、約750億ユーロを投資し、2030年までに発電能力を25GW増加する。
 - 陸上風力については、既存の発電設備を、エネルギー効率の高い新型設備で置き換える。
 - 2010年時点のドイツ全体の発電設備容量は157GWであり、この内、風力が27GWを占めている。
- d) 「エネルギー消費」の面では、再生可能エネルギーの冷暖房への利用を拡大する。
- e) さらに、バイオエネルギーの電力、熱、燃料としての利用を拡大する。
- f) 「エネルギー伝送」の面では、再生可能エネルギーを系統制御に取り込むための伝送網を拡充する。
 - 中核を担う風力については、「北海沿岸の洋上風力で発電した電力」を「ミュンヘン等の南西部の電力消費地」に運ぶための長距離伝送網を構築する。
 - その上で、北海沿岸の欧州各国の洋上風力発電も利用可能とするため、2050年を目処に、自国と欧州を結びつけた広域伝送網を整備する。
- g) 上記と並行し、エネルギー伝送を支えるインフラとして「エネルギー貯蔵」を強化する。
 - 中期的には、自国の揚水発電を用いたエネルギー貯蔵能力を最大化する。
 - 長期的には、ノルウェーやアルプス地域の揚水発電も組み入れたエネルギー貯蔵システムを構築する。

h) 合わせて、エネルギー貯蔵を革新するための研究を強力に推進する。

ドイツは、風力を中心とする再生エネルギーの拡大に加え、再生エネルギーを取り込むための伝送網の整備、エネルギー貯蔵を革新する研究などを一体化した、総合的取り組みを展開している。

③橋渡しエネルギーの選択

上記に基づき、ドイツが 2050 年までに目標とするエネルギーシステムを構築する場合、もう一つの条件として、その間のエネルギー源に用いる「橋渡しエネルギー」を設定する必要がある。つまり、現在から 2050 年までの転換期に用いるエネルギー源を選択しなければならない。

この現在と未来をつなぐ橋渡しエネルギーとして、ドイツは当初のビジョンである「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」において、原子力を活用する方針を立てていた。しかしながら、その後の福島原発事故を受けて、原子炉の停止時期を 2036 年から 2022 年まで前倒ししたため、替わりの橋渡しエネルギーを必要となった。このため、ビジョンを一部見直し、2011 年 10 月に「エネルギー供給構想の迅速な実現」を発表している。

この中で、原子力に替わる橋渡しエネルギーを確保するため、次のシナリオを示した。

a) 第一に、当初計画より化石エネルギーの利用を増やし、2020 年までにガス及び石炭火力の発電能力を 10GW 増加する。さらに、高効率火力発電所やコージェネレーションを拡充する。

－ 2010 年時点のドイツ全体の発電設備容量は 157GW であり、この内、火力が 77GW を占めている。

b) 第二に、再生可能エネルギーの導入・拡大を一層速める。

－ 中核を担う風力エネルギーについては、「約 750 億ユーロを投資し、洋上風力の発電能力を 2030 年までに 25GW 増加する計画」の実現を加速する。

－ 2010 年時点のドイツの風力発電設備容量は、27GW となっている。

ドイツに見られるこれらの動きは、国として原子力の削減または停止を選択した場合、未来のエネルギーシステム構築に向け、「橋渡しエネルギーの再設定」が重要な要件となることを示唆する。

ドイツの選択に従えば、短期の代替は化石エネルギーとなり、中長期には再生可能エネルギーの導入を加速する必要がある。再生可能エネルギーの導入を加速する場合、最も有望な対象は風力となり、ドイツと英国は洋上風力を、米国は陸上及び洋上風力を選択肢に位置付けている（米国の取り組みについては後述）。

表 38 ドイツにおける発電電力のエネルギー源

エネルギー源		発電電力の割合 (%)			
		1980年	1990年	2000年	2010年
化石	石油	5.71	1.89	0.83	1.34
	石炭	62.78	58.46	52.75	43.47
	ガス	14.12	7.36	9.10	13.80
	小計	82.61	67.71	62.68	58.61
原子力		11.89	27.72	29.41	22.35
水力		4.34	3.60	4.51	4.35
バイオ & 廃棄物		1.16	0.95	1.75	6.34
風力		0.00	0.02	1.63	6.01
太陽		0.00	0.00	0.02	1.86
地熱		0.00	0.00	0.00	0.00
潮力、波力、海洋		0.00	0.00	0.00	0.00
その他		0.00	0.00	0.00	0.48
合計		100.00	100.00	100.00	100.00

(出典) International Energy Agency, 「Electricity Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

II. エネルギー研究戦略

ドイツは、化石から非化石への転換を図るにはエネルギーの革新が必要であり、そのための基盤となる研究戦略を「エネルギー研究プログラム」の形で取りまとめる旨をビジョンに明記している。

上記を受けて、2011年8月に「第6次連邦政府エネルギー研究プログラム、環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給のための研究 (Research for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Energy Supply, 6th Energy Research Programme of the Federal Government)」が採択されており、この中に、研究開発投資の主要課題や優先事項が提示されている。

i) プログラム概要

第6次エネルギー研究プログラムは、連邦経済技術省、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ずる計画となっている(表39)。

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、研究開発投資の主要課題や優先事項が設定されている。

各省の所掌区分は次のようになっており、連邦教育研究省がエネルギー分野の基礎研究を支援する役割を担っている。

- 連邦経済技術省；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
- 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
- 連邦食糧農業消費者保護省；バイオエネルギー
- 連邦教育研究省；エネルギー分野の基礎研究

本プログラムの中で、ドイツは今後の重点研究領域として、以下を選択している。

- ①エネルギー効率
- ②再生可能エネルギー
- ③送電網
- ④エネルギー貯蔵

上記選択は、「エネルギー効率を向上し、再生可能エネルギーを拡大することで、温暖化ガスを削減する」、「再生可能エネルギー拡大のために、エネルギー伝送とエネルギー貯蔵」

蔵を拡充する」というドイツのシナリオと合致している。

さらに、優先して取り組むべき課題として、省間連携に基づく3つの研究イニシアチブを計画している。

a) ソーラー建物／高効率エネルギー都市 (Solar-Powered Buildings - Energy Efficient Cities)

ドイツの場合、人口の7割が都市部に集中している。このため、未来のエネルギーシステムの構築は、都市部を中心に実践されることになる。本イニシアチブでは、最終エネルギー消費の4割を占める建物に着目し、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。

連邦経済技術省、連邦環境自然保護原子力安全省、連邦教育研究省、連邦交通建設都市開発省の活動成果を統合した検討を行う。

b) 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。そのために、直流伝送や超伝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含めた広範な領域を研究対象に加える。

連邦経済技術省、連邦環境自然保護原子力安全省、連邦教育研究省の活動成果を統合した検討を行う。

c) 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。伝送網向けの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のエネルギー貯蔵）」と「電気化学的貯蔵」を長期の研究課題として位置付ける。

連邦経済技術省、連邦環境自然保護原子力安全省、連邦教育研究省の活動成果を統合した検討を行う。

上記の内、「エネルギー貯蔵システム」のイニシアチブでは、60以上のプロジェクトが採択されており、これらに対し、2億ユーロの研究資金が充当されている。

ii) 基礎研究戦略

前述の研究開発に加え、第6次エネルギー研究プログラムには、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いる。

エネルギーシナリオの主軸を成す「エネルギー効率の向上」と「再生可能エネルギーの拡大」の二つに分けて、ドイツが掲げる基礎研究戦略のポイントを整理すると、次のようになる。

① エネルギー効率の向上

エネルギー効率向上のための基礎研究として、以下を提示している。

- a) 「建物」については、「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」が求められる。
- b) 「運輸」については、輸送機械のエネルギー効率向上のため、「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」が求められる。
- c) 「産業」については、「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」が求められる（例えば、産業用の電気モータ、軽量化の製品設計など）。さらに、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」などが求められる。
- d) 主要研究課題として、以下が挙げられる。
- 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

再生可能エネルギー拡大のための基礎研究として、以下を提示している。

- a) 「風力エネルギー」については、「材料」「遠隔点検」「遠隔補修」の研究などが求められる。加えて、「空中風力発電」などの将来的な研究テーマも存在する。主要研究課題として、以下が挙げられる。
- 材料；風力発電部品（ナセル、回転子、支持基盤など）に用いる希少物質の代替方策、強化部材（積層体、樹脂、金属複合体など）
 - 動力学；乱流下の風力発電（大規模、中規模、小規模）
 - 電力統合；風力発電の送電網への統合モデル

- b) 「バイオエネルギー」については、「エネルギー転換プロセスのモデリング、及び最適化」の研究が求められる。主要研究課題として、以下が挙げられる。
- 基質開発；基質開発に用いる微生物のスクリーニング
 - 基質評価；代謝や物質生産への基質の影響
 - プロセス最適化；異なる環境下での微生物の相互作用
 - 物質循環；リンや窒素化合物のリサイクル
- c) 「太陽光エネルギー」については、「エネルギー効率」「操作寿命」「コスト低減」の研究が求められる。主要研究課題として、以下が挙げられる。
- 機能向上；光捕集、光吸収、光子操作
 - 操作寿命；失活機構及びその防止策
 - 電池構造；例えば、多接合型太陽電池
 - 機能評価；シミュレーション及び物理解析
- d) 「太陽熱エネルギー」については、「エネルギー効率」「コスト低減」の研究が求められる。主要研究課題として、材料、利用方式（例えば、二次電源との接続による悪天候時の出力低下解消など）が挙げられる。
- e) 「光合成 (Photosynthetic Energy Production)」については、「水分解の基本プロセス」「光合成に関わるタンパク質」の研究などが挙げられる。
- f) 「水力エネルギー」については、「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」の研究などが挙げられる。
- さらに、再生可能エネルギー拡大に向けた「送電網」及び「エネルギー貯蔵」に関する基礎研究として、以下を提示している。
- g) 「送電網」については、「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」の研究などが求められる。主要研究課題として、以下が挙げられる。
- 部品；導電材料、心材、絶縁方法

- 無線伝送
 - 高温超伝導
 - 安全性、安定性；伝送網に用いる希少物質の代替方策、送配電のエネルギー損失削減、伝送機能の向上
 - 設計；伝送網の解析手法、伝送網のモデリング
- h) 「エネルギー貯蔵」については、「熱的貯蔵」「電気化学的貯蔵」「力学的貯蔵」「化学的貯蔵」の研究が求められる。主要研究課題として、以下が挙げられる。
- 材料；例えば、熱的貯蔵用の相変化材料、電解質用の有機材料など
 - 電気化学；エネルギー転換プロセス（エネルギー貯蔵、エネルギー製造）
 - 熱化学；反応機構、熱的安定性
 - シミュレーション；伝送網におけるエネルギー貯蔵の機能

表 39 ドイツのエネルギー研究プログラムの予算

区分	予算額 (10 ³ , ユーロ)					
	2010年度・実績	第6次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

(出典) Germany, Federal Ministry of Economics and Technology, 「Research for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Energy Supply, 6th Energy Research Programme of the Federal Government」に基づき JST・CRDS が作成

Ⅲ. 再生可能エネルギーの導入状況

前項にまとめた研究戦略を基盤に、ドイツは、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、2020年までに18%、2030年までに30%、2040年までに45%、2050年までに60%に高めることを目指している。

実際にドイツにおける最終エネルギー消費の推移を追うと、2000年時点では3.9%となっていた再生可能エネルギーの割合が、2010年には11.3%、2011年には12.1%、2012年には12.6%まで上昇していることが分かる（表40）。

また、発電電力に占める再生可能エネルギーの割合についても、2000年時点の6.8%から、2010年には17.1%、2011年には20.5%、2012年には22.9%へと増加している。結果として、2012年時点の発電電力に占める再生可能エネルギーの構成は、以下のようになっている（表41、図10）。

- ・風力 ; 7.7%
- ・バイオ ; 6.9%
- ・太陽 ; 4.7%
- ・水力 ; 3.6%（揚水発電は含まず）

さらに、こうした再生可能エネルギーの拡大は、ドイツに30万人を超える雇用をもたらしている。再生可能エネルギー分野の雇用者数（公的支援に基づく研究や管理に関わる雇用は除く）は2012年時点で368,400人に達しており、その内訳は次のようになっている（表42）。

- ・バイオ ; 128,900人
- ・風力 ; 117,900人
- ・太陽 ; 100,500人
- ・地熱等 ; 13,900人
- ・水力 ; 7,200人

米英独仏の4ヶ国比較において、ドイツは最も厳しいエネルギー源の制約下で非化石への転換に取り組む国になるが、一方、再生可能エネルギーを用いた産業創出の面では、世界の先頭を走る国となっている。

表 40 ドイツのエネルギー需給に占める再生可能エネルギーの割合

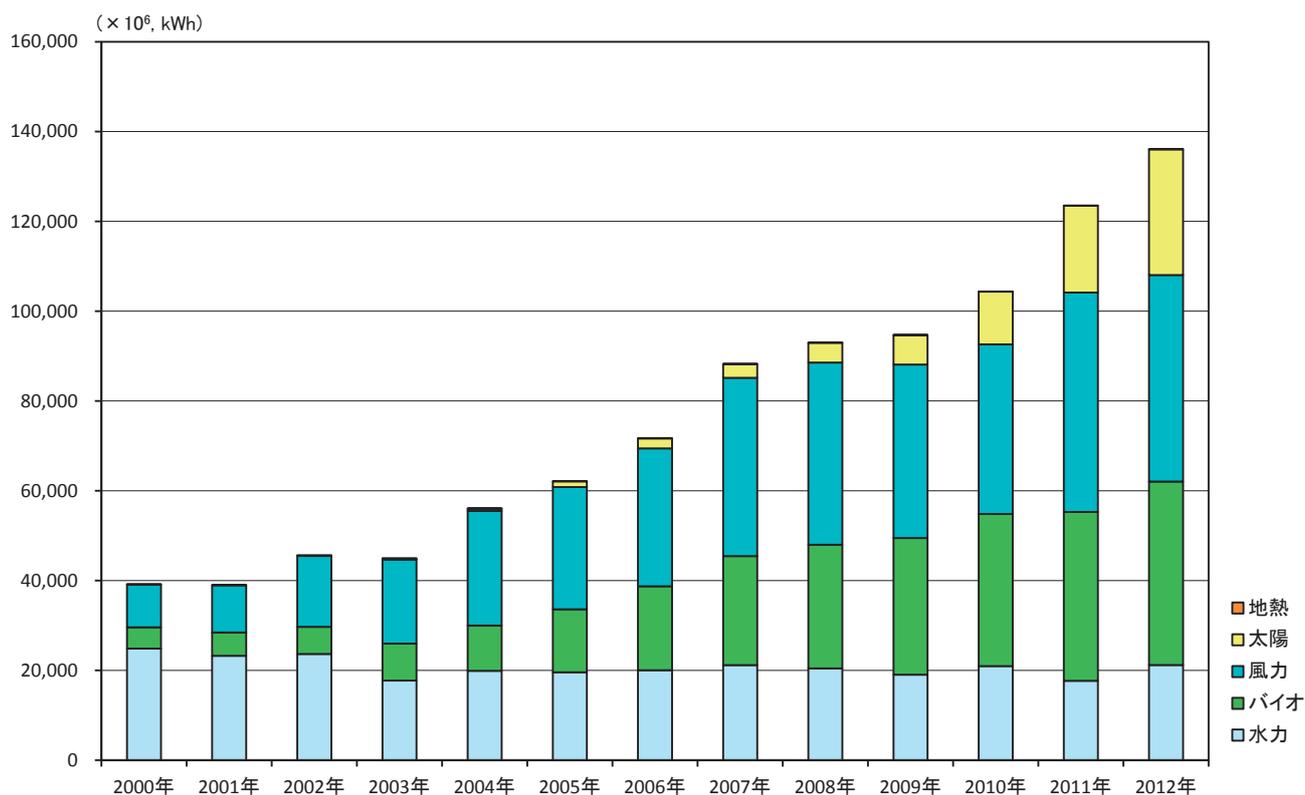
区分	再生可能エネルギーの割合 (%)												
	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
一次エネルギー供給	2.9	2.9	3.2	3.8	4.5	5.3	6.3	7.9	8.0	8.9	9.9	10.9	11.7
発電電力	6.8	6.7	7.8	7.5	9.2	10.1	11.6	14.3	15.1	16.4	17.1	20.5	22.9
熱供給	3.9	4.2	4.3	5.0	5.5	6.0	6.2	7.4	7.6	8.9	10.3	10.4	10.4
燃料消費	0.4	0.6	0.9	1.4	1.8	3.7	6.3	7.4	6.0	5.4	5.8	5.5	5.5
最終エネルギー消費	3.9	4.1	4.5	5.0	5.9	6.9	8.0	9.5	9.3	10.2	11.3	12.1	12.6

(出典) Germany, Federal Ministry of the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 「Development of Renewable Energy Sources in Germany 2012 (February 2013)」及び「Development of Renewable Energy Sources in Germany 2011 (July 2012)」に基づき JST-CRDS が作成

表 41 ドイツの発電電力に占める再生可能エネルギーの割合

エネルギー源	発電電力の割合 (%)												
	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
水力	4.3	4.0	4.1	2.9	3.3	3.2	3.2	3.4	3.3	3.3	3.4	2.9	3.6
バイオ	0.8	0.9	1.0	1.4	1.7	2.3	3.0	3.9	4.5	5.3	5.5	6.2	6.9
風力	1.7	1.8	2.7	3.1	4.1	4.4	5.0	6.5	6.6	6.7	6.3	8.2	7.7
太陽	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	1.1	1.9	3.2	4.7
地熱	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
合計	6.8	6.7	7.8	7.5	9.2	10.1	11.6	14.3	15.1	16.4	17.1	20.5	22.9

(出典) Germany, Federal Ministry of the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 「Development of Renewable Energy Sources in Germany 2012 (February 2013)」及び「Development of Renewable Energy Sources in Germany 2011 (July 2012)」に基づき JST-CRDS が作成



(出典) Germany, Federal Ministry of the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 「Development of Renewable Energy Sources in Germany 2012 (February 2013)」及び「Development of Renewable Energy Sources in Germany 2011 (July 2012)」に基づき JST・CRDS が作成

図 10 デイットにおける再生可能エネルギーの発電電力

表 42 デイットにおける再生可能エネルギー分野の雇用者数

分野	雇用者数 (%)				
	2004年	2007年	2010年	2011年	2012年
水力	9,500	8,100	7,600	7,300	7,200
バイオ	56,800	119,500	122,000	124,400	128,900
風力	63,900	85,700	96,100	101,100	117,900
太陽	25,100	49,200	120,900	125,000	100,500
地熱等	1,800	10,300	13,300	14,200	13,900
合計	157,100	272,800	359,900	372,000	368,400

(出典) Germany, Federal Ministry of the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 「Development of Renewable Energy Sources in Germany 2012 (February 2013)」及び「Development of Renewable Energy Sources in Germany 2011 (July 2012)」に基づき JST・CRDS が作成

2.4.2 米国の取り組み

未来のエネルギーシステム構築に向け、厳しいエネルギー源の制約下にあるドイツは、「エネルギー効率を向上し、再生可能エネルギーを拡大することで、温暖化ガスを削減する」方針を打ち出している。

これに対し米国は、「多様なエネルギー源を用いた新産業創出」を主要な戦略に位置付けている。

I. エネルギーシナリオ

2011年3月に「未来の安定したエネルギーを確保するための構想」をまとめ、未来のエネルギーシステムについて、3つの目標を設定している。

a) エネルギー安全保障

国内資源を開発し、エネルギー安全保障を確保する。

b) エネルギー効率向上

低コストで高効率なエネルギーシステムに転換する。

c) エネルギー産業創出

エネルギー技術を革新し、新たな雇用を生み出す。

その上で、目標達成に向け、次のようなシナリオを定めている。

i) エネルギー安全保障

エネルギー安全保障を確保するため、以下の重点課題に取り組む。

a) 安全で、信頼性の高い方法を用い、国内の資源開発を促進する。

- 石油及びガスの国内生産を拡大することで、海外依存度を下げ、自給率を高める。
- そのために、シェールガス、シェールオイル、海底油田などの国内資源を開発する。
- 目標として、「今後10年程度で、石油輸入量を現状の三分の二まで削減する」ことなどが掲げられている。

b) 国内資源開発の促進に加え、クリーンなエネルギーを安定して供給する体制を、世界規模で構築する。

- 石油需要の削減や非化石化の動きを世界規模で展開することで、結果として、米国のエネルギー安全保障を高める。
- 石油需要の削減策として、「開発途上国における石油火力による発電を、ガス火力

で置き換えていく」ことなどが挙げられている。

- 非化石化については、「バイオエネルギーによる石油代替」や「電気自動車への移行」などが挙げられている。

米国は、石油への依存軽減を重点に、国内及び国外の両面において、エネルギー安全保障を確保する方策を設定している。

ii) エネルギー効率向上

エネルギー効率を高めるため、以下の重点課題に取り組む。

- a) 運輸部門において、自動車や輸送機械のエネルギー効率を高め、石油消費を削減し、コストを低減する。
 - 先進技術自動車（電気自動車など）や先端燃料技術の導入を拡大し、モーダルシフト（陸路、空路、海路での輸送効率を高める、例えば、高速鉄道の活用など）を促進する。
 - 米国の場合、2010年の最終エネルギー消費の内、運輸部門の石油消費が36%を占めている。さらに、石油全体の72%が運輸部門で消費されている。
 - 目標として、「2015年までに、先進技術自動車を100万台走行させる」ことなどが示されている。
- b) 家庭部門、サービス部門、産業部門のエネルギー効率を高め、コストを低減する。
 - 「家庭部門の住宅」、「サービス部門の建物」、「産業部門の工場」を対象に、個々の規模や特性に応じた多様な方策を開発、適用することで、エネルギー効率を向上させる。

米国は、「輸送」や「建物」などのエネルギー効率を高めることで、エネルギーコストを低減するシナリオを描いている。

iii) エネルギー産業創出

エネルギー産業を創出するため、以下の重点課題に取り組む。

- a) 2035年までに、発電電力の80%をクリーンエネルギーで賄うシステムを構築することで、新たな雇用を生み出す。
 - クリーンエネルギーとして、風力、太陽、バイオ、水力などの再生可能エネルギーに加え、原子力、高効率ガス火力、クリーン石炭火力を用いる。

- 産業創出を目指す論拠として、「エネルギー技術開発の国際競争が始まっていること」、「かつて風力や太陽光で世界トップにあった米国が、現在はドイツなどの後塵を拝していること」、「技術革新と事業創出が米国の競争力の源泉であること」を強調している。

b) エネルギーの研究開発に投資することで、エネルギー分野に革新をもたらす。

- オバマ政権が導入した研究支援の枠組みである 2 つの研究イニシアチブを強化する。
- 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・ルーフ”で行う「エネルギーイノベーション・ハブ」を拡充する。
- ハイリスク・ハイペイオフ型の応用研究を支援する「エネルギー高等研究計画局 (ARPA-E; Advanced Research Projects Agency-Energy)」を拡充する。
- 上記に加え、基礎研究を支援するためのイニシアチブとして、「エネルギーフロンティア研究センター (EFRC; Energy Frontier Research Centers)」が導入されている。

米国は、研究開発を強化し、エネルギーの革新をもたらすことで、新たな産業を創出する戦略を取っている。

II. エネルギー研究戦略

米国は、未来のエネルギーシステム構築に向け、「多様なエネルギー源を用いた新産業創出」を主要な戦略として位置付け、研究開発を強化し、エネルギーの革新をもたらすことで、新たな雇用を生み出すシナリオを描いている。

そのための方策として、オバマ政権が導入した研究イニシアチブ（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）を拡充する方針がビジョンに明記されている。体制面では、上記イニシアチブを含め、エネルギー省のプログラム部局が研究支援の中心的役割を果たしている。

i) エネルギー省プログラム部局

米国エネルギー省は、10のプログラム部局、13のスタッフ部局、21の国立研究所・センターに加え、国家核安全保障局、エネルギー情報局などから構成されている。主としてプログラム部局がファンディングを担当し、国立研究所が研究機能を担っている。

エネルギーの研究開発（国防関連は除く）には6つのプログラム部局が関与しており、所掌区分は次のようになっている。

- 科学局 (Office of Science) ; エネルギー分野の基礎研究
- エネルギー効率・再生可能エネルギー局 (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy) ; 再生可能エネルギー、エネルギー効率
- 原子力エネルギー局 (Office of Nuclear Energy) ; 原子力エネルギー
- 化石エネルギー局 (Office of Fossil Energy) ; 化石エネルギー
- 電気伝送・エネルギー信頼性局 (Office of Electricity Delivery and Energy Reliability) ; 送配電
- エネルギー高等研究計画局 (ARPA-E; Advanced Research Projects Agency-Energy) ; 研究イニシアチブの ARPA-E

上記6部局の予算合計（研究開発費以外も含む）は年間80億ドルを超える規模で推移しており、2012年度の部局別予算は以下のようになっている（表43）。

- ・科学局 ; 49億3,498万ドル
- ・エネルギー効率・再生可能エネルギー局 ; 17億8,055万ドル
- ・原子力エネルギー局 ; 8億5,382万ドル
- ・化石エネルギー局 ; 5億5,481万ドル
- ・電気伝送・エネルギー信頼性局 ; 1億3,618万ドル
- ・エネルギー高等研究計画局 ; 2億7,500万ドル

これらに加え、米国再生・再投資法からの投資として、2009年に266億8,800万ドルが配分されている。

米国は、2001年以降の10年をかけて「エネルギー研究のビジョン&戦略」を取りまとめている。具体的には、「未来の安定したエネルギー保障を実現する基礎研究（2003年2月）」から「基礎研究と産業を結びつけるエネルギー科学（2010年8月）」に至る14の報告書が発表されており、この中に、米国として選択した主要課題や優先事項が示されている。

さらに、戦略を推進する仕組みとして3つのイニシアチブ（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、エネルギーフロンティア研究センター）を立ち上げ、これらのイニシアチブを中心に精力的研究を展開している。

表 43 米国エネルギー省の部局別予算

区分	予算額 (10 ³ , ドル)									
	2008年度	2009年度	2009年度/ 再生・再投資法	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度・暫定	2014年度・要求		
科学局	4,082,883	4,807,170	1,632,918	4,963,887	4,897,283	4,934,980	4,903,461	5,152,752		
エネルギー効率・再生可能エネルギー局	1,704,112	2,156,865	16,771,907	2,216,392	1,771,721	1,780,548	1,820,713	2,775,700		
原子力エネルギー局	1,033,161	1,357,263	0	857,936	805,996	853,816	863,996	735,460		
化石エネルギー局	888,545	1,097,003	3,398,607	938,520	572,525	554,806	714,033	637,975		
電気伝送・エネルギー信頼性局	136,170	134,629	4,495,712	168,484	138,170	136,178	139,954	169,015		
エネルギー高等研究計画局	—	15,000	388,856	0	179,640	275,000	276,683	379,000		
合計	7,844,871	9,567,930	26,688,000	9,145,219	8,365,335	8,535,328	8,718,840	10,209,902		

(出典) U.S. Department of Energy, Congressional Budget Requestに基づき JST-CRDS が作成

ii) エネルギーイノベーション・ハブ

3つのイニシアチブの内、エネルギーイノベーション・ハブは、「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」ための枠組みとなっている。一つのハブに対し、5年間で1億2,200万ドルの研究資金を投ずる。

本イニシアチブで優先して取り組むべき研究として、下記8テーマが設定されている。

- ①建物のエネルギー効率 (Energy Efficient Building Systems Design)
- ②太陽光による燃料生成 (Fuels from Sunlight)
- ③太陽光による発電 (Solar Electricity)
- ④エネルギー伝送 (Grid Materials, Devices and Systems)
- ⑤エネルギー貯蔵 (Batteries and Energy Storage)
- ⑥エネルギーのシミュレーション (Modeling and Simulation)
- ⑦炭素回収&貯蔵 (Carbon Capture and Storage)
- ⑧エネルギーの戦略材料 (Extreme Materials)

「エネルギー効率」「再生可能エネルギー」「エネルギー伝送」「エネルギー貯蔵」などが主要課題に位置付けられており、エネルギー効率では「建物」、再生可能エネルギーでは「太陽エネルギー」を対象とした研究が重視されている。

これまでに5つのハブが設立され、下記内容の活動が展開されている (表 44)。

a) 高効率エネルギー建物ハブ (Energy Efficient Buildings Hub)

ペンシルバニア州立大学がリーダー。「建物のエネルギー効率」をテーマに、下記目標を掲げている。

- 2020年までに、商業用建物のエネルギー消費を20%削減するための手段や方法を開発する。

主要研究課題として、以下が挙げられる。

- モデリング&シミュレーション (Modeling and Simulation)
 - エネルギーシステム等の設計手法 (Design Advisor)
 - 新技術等の評価手法 (Energy Audit Tool)
 - 新技術等の導入手法 (Retrofit Manager)
 - エネルギーシステム等の評価手法 (Simulation Tool Platform)
- エネルギー・インフォマティクス (Building Energy Informatics)
 - 標準化 (Process and Information Standards)
 - 情報貯蔵 (Building Information Modeling Datahub)

- 情報管理 (Building Energy Information Management)
- 可視化 (Energy Information Visualization)

- インテリジェント・オペレーション (Intelligent Building Operations)
 - 低コスト感知 (Low Cost Sensing)
 - 最適制御 (Optimal Supervisory Control)
 - 機能診断 (Component and Sub-System Diagnostics)
 - 包括管理 (Integrated, Whole-Building Operations)

- エネルギーマネジメント・システム (Building Energy Systems)

- b) 人工光合成共同センター (Joint Center for Artificial Photosynthesis)
カリフォルニア工科大学がリーダー。「太陽光による燃料生成」をテーマに、下記目標を掲げている。
 - 作物が行う光合成の 10 倍以上の効率で、太陽光を用い、水と炭素から燃料を生成する方法を開発する。

主要研究課題として、以下が挙げられる。

- 光捕集及び光変換 (Light Capture and Conversion)
- 不均一系触媒作用 (Heterogeneous Catalysis)
- 分子触媒作用 (Molecular Catalysis)
- 分子及びナノスケールの界面現象 (Molecular and Nanoscale Interfaces)
- ナノスケールの機能構造 (Membrane and Mesoscale Assembly)
- 先進的材料形成及び機能評価 (High-Throughput Experimentation)
- 電気化学触媒及び光触媒の機能評価 (Catalyst and Photoelectrochemical Benchmarking)
- スケールアップ及びプロトタイプ設計 (Scale-Up and Prototyping)

- c) エネルギー貯蔵研究共同センター (Joint Center for Energy Storage Research)
アルゴンヌ国立研究所がリーダー。「エネルギー貯蔵」をテーマに、下記目標を掲げている。

- 現行のリチウムイオン電池の性能レベルを基準に、5年以内に、エネルギー貯蔵性能を5倍に高め、コストを五分の一に低減することを可能にする。

主要研究課題として、以下が挙げられる。

- 新規の電気化学的貯蔵 (Electrochemical Storage Concepts)
 - 多価イオン (Multivalent Intercalation)
 - 化学変換 (Chemical Transformation)
 - 非水溶液レドックスフロー (Non-Aqueous Redox Flow)
 - 電気化学的貯蔵のための基礎研究 (Crosscutting Science)
 - コンピュータ上の仮想電池設計及び性能評価 (Systems Analysis and Translation)
 - 伝送網及び輸送機械用のプロトタイプ設計 (Cell Design and Prototyping)
- d) 軽水炉先端シミュレーションコンソーシアム (Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors)
オークリッジ国立研究所がリーダー。「エネルギーのシミュレーション」をテーマに、下記目標を掲げている。
- コンピュータ上の仮想原子炉を用い、原子炉の安全性、経済性などを予測評価することが可能なモデリング&シミュレーション技術を開発する。

主要研究課題として、以下が挙げられる。

- 仮想原子炉に関するモデリング&シミュレーション (Virtual Reactor Integration)
 - 材料性能に関するモデリング&シミュレーション (Materials Performance and Optimization)
 - 熱水力学に関するモデリング&シミュレーション (Thermal Hydraulics Methods)
 - 放射線輸送に関するモデリング&シミュレーション (Radiation Transport Methods)
- e) 戦略材料研究所 (Critical Materials Institute)
エイムズ研究所がリーダー。「エネルギーの戦略材料」をテーマに、下記目標を掲げている。

- 希土類元素に代表されるエネルギー分野の戦略材料（エネルギーシステムの構成要素として必須、あるいは今後枯渇の懸念があるなど、供給源の確保が戦略的に重要となる材料）の安定供給を可能にする。

主要研究課題として、以下が挙げられる。

- 戦略材料の代替物質の開発（Developing Substitutes）
- 戦略材料に関する基盤研究（Crosscutting Research）
- 再利用&リサイクル技術の革新（Improving Reuse and Recycling）
- 戦略材料の供給方策の多様化（Diversifying Supply）

上記に加え、2014年度の予算計画として、「エネルギー伝送」をテーマとするハブの設
立が申請されている。

表 44 エネルギーイノベーション・ハブの採択状況

研究領域	拠点名	採択時期	リーダー機関	参画機関数 (リーダー機関含む)	達成目標
エネルギーのシミュレーション	軽水炉先端シミュレーションコンソーシアム (Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors)	2010年5月	オークリッジ国立研究所	10	・コンピュータ上の仮想原子炉を用い、原子炉の安全性、経済性などを予測評価することが可能なモデリング&シミュレーション技術を開発する。
太陽光による燃料生成	人工光合成共同センター (Joint Center for Artificial Photosynthesis)	2010年7月	カリフォルニア工科大学	7	・作物が行う光合成の10倍以上の効率で、太陽光を用い、水と炭素から燃料を生成する方法を開発する。
建物のエネルギー効率	高効率エネルギー建物ハブ (Energy Efficient Buildings Hub)	2010年8月	ペンシルバニア州立大学	27	・2020年までに、商業用建物のエネルギー消費を20%削減するための手段や方法を開発する。
エネルギー貯蔵	エネルギー貯蔵研究共同センター (Joint Center for Energy Storage Research)	2012年11月	アルゴンヌ国立研究所	14	・現行のリチウムイオン電池の性能レベルを基準に、5年以内に、エネルギー貯蔵性能を5倍に高め、コストを五分の一に低減することを可能にする。
エネルギーの戦略材料	戦略材料研究所 (Critical Materials Institute)	2013年1月	エームズ研究所	18	・希土類元素に代表されるエネルギー分野の戦略材料の安定供給を可能にする。
エネルギー伝送	—	2014年度 予算申請	—	—	—
太陽光による発電	—	—	—	—	—
炭素回収&貯蔵	—	—	—	—	—

(出典) 米国内エネルギー省の各種公開情報に基づき JST-CRDS が作成

iii) エネルギー高等研究計画局

エネルギーイノベーション・ハブが基礎研究から開発に至る一連の活動を対象としているのに対し、エネルギー高等研究計画局は、「ハイリスク・ハイペイオフ型の応用研究を支援する」ための枠組みとなっている。

2013年9月時点で332プロジェクトが採択されており、これらのプロジェクトに8億956万ドル（採択段階の金額、契約交渉により変動する場合がある）の資金が充当されている（表45）。

公募方式として、特定課題を対象としたプログラムに基づく「提案公募（Funding Opportunity Announcement）」、エネルギー全般を対象とした「包括型提案公募（Open funding Opportunity Announcement）」の二つが用いられている。採択結果を整理すると、次のようになる。

①エネルギー貯蔵

5つの研究プログラムで73プロジェクトを採択し、1億6,486万ドルの資金を投入している。

- a) 高エネルギーな熱貯蔵（High Energy Advanced Thermal Storage）；
 - 15プロジェクト、37,317,407ドル
 - 太陽熱の高温貯蔵や原子炉の熱貯蔵など、高エネルギーな熱源に適した、効率が高く、経済性に優れた熱貯蔵方式

- b) 輸送機械の蓄電システム（Robust Affordable Next Generation EV-Storage）；
 - 22プロジェクト、36,321,542ドル
 - 電気自動車を対象とした、蓄電システム全体の経済性を高めるための方策

- c) 輸送機械の蓄電池（Batteries for Electrical Energy Storage in Transportation）；
 - 10プロジェクト、34,573,810ドル
 - 電気自動車やハイブリッド車の走行コストを、ガソリン車並みに引き下げる（例えば、10ドル以下の費用で、1回の充電により300～500マイル走行できるようにする）ことを可能にする蓄電池

- d) エネルギー貯蔵の高度管理（Advanced Management and Protection of Energy Storage Devices）；
 - 14プロジェクト、29,000,000ドル
 - エネルギー貯蔵の性能、安全性、寿命を高めるための、貯蔵装置の高度な管理技術

- e) 伝送用エネルギー貯蔵（Grid-Scale Rampable Intermittent Dispatchable Storage）；
 - 12プロジェクト、27,651,217ドル
 - どこでも設置可能で、再生可能エネルギーの取り込みに適した、伝送網のためのエネルギー貯蔵技術

②バイオエネルギー

3つの研究プログラムで38プロジェクトを採択し、1億1,134万ドルの資金を投入している。

- a) 微生物による燃料生成 (Microorganisms for Liquid Transportation Fuel) ;
 - 13プロジェクト、41,202,906ドル
 - 現行のバイオ燃料と比較し、エネルギー効率を10倍以上高めた、微生物（遺伝子操作を含む）を用いて液体燃料を直接生成する方法
- b) 非食用作物による燃料生成 (Plants Engineered to Replace Oil) ;
 - 10プロジェクト、36,000,002ドル
 - 非食用作物（遺伝子操作を含む）を用い、液体燃料を直接生成する方法
- c) 微生物によるガスからの燃料生成 (Reducing Emissions using Methanotrophic Organisms for Transportation Energy) ;
 - 15プロジェクト、34,137,698ドル
 - 微生物を用い、経済的な効率で、ガスを液体燃料に変換する方法

③エネルギー伝送

2つの研究プログラムで29プロジェクトを採択し、7,401万ドルの資金を投入している。

- a) 再生可能エネルギーを統合した伝送網 (Green Electricity Network Integration) ;
 - 15プロジェクト、39,416,316ドル
 - 伝送網のエネルギー効率、信頼性、再生可能エネルギーの統合機能などを高めるためのハードウェア及びソフトウェア
- b) 柔軟で効率的な電力技術 (Agile Delivery of Electrical Power Technology) ;
 - 14プロジェクト、34,598,679ドル
 - 高効率電力変換を可能にする方策、及びそのための部材（回路、トランジスタ、インダクタ、変圧器、キャパシタなど）

④エネルギーの戦略材料

2つの研究プログラムで32プロジェクトを採択し、6,328万ドルの資金を投入している。

- a) 軽金属の先進製造 (Modern Electro/Thermochemical Advancements in Light-Metal Systems) ;
 - 18プロジェクト、31,640,332ドル
 - 自動車を軽量化するための戦略材料となる軽金属（アルミニウム、マグネシウム、チタン）を、経済性に優れたプロセスにて製造及びリサイクルする方策
- b) 希土類元素の代替方策 (Rare Earth Alternatives in Critical Technologies) ;

- 14 プロジェクト、31,636,779 ドル
- 電気自動車や風力発電の部材製造における戦略材料である希土類元素を、経済性に優れたプロセスにて削減または代替する方策

⑤化石エネルギー

2つの研究プログラムで27プロジェクトを採択し、6,088万ドルの資金を投入している。

- a) 炭素回収のための材料&プロセス (Innovative Materials and Processes for Advanced Carbon Capture Technologies) ;
 - 14 プロジェクト、30,684,667 ドル
 - 石炭火力における炭素回収の経済効率を高めるための、新たな材料及びプロセス技術
- b) 天然ガス自動車 (Methane Opportunities for Vehicular Energy) ;
 - 13 プロジェクト、30,200,000 ドル
 - 天然ガスを燃料とする輸送機械のための、経済性に優れた走行システム

⑥エネルギー効率

1つの研究プログラムで17プロジェクトを採択し、3,011万ドルの資金を投入している。

- a) 建物のエネルギー効率を高める熱機器 (Building Energy Efficiency through Innovative Thermodevices) ;
 - 17 プロジェクト、30,106,991 ドル
 - 建物の冷房や空調におけるエネルギー効率を高めるための、新たな技術及び手法

⑦太陽エネルギー

1つの研究プログラムで7プロジェクトを採択し、1,471万ドルの資金を投入している。

- a) 太陽光発電の効率を高めるシステム (Solar Agile Delivery of Electrical Power Technology) ;
 - 7 プロジェクト、14,714,914 ドル
 - 太陽光発電を構成する電気部材 (インバータなど) の適正化により、システム全体としての効率を高める方策

上記に加え、包括型提案公募により、以下のプロジェクトが採択されている。

①第1回包括型提案公募

下記10区分で37プロジェクトを採択し、1億5,108万ドルの資金を投入している。

- ・エネルギー貯蔵；6プロジェクト、30,632,153 ドル
- ・太陽エネルギー；6プロジェクト、21,764,611 ドル

- 燃料生成；5 プロジェクト、17,764,611 ドル
- 燃料生成以外；1 プロジェクト、4,000,000 ドル
- ・ バイオエネルギー；5 プロジェクト、27,659,334 ドル
- ・ 自動車技術；5 プロジェクト、17,152,058 ドル
- ・ 建物のエネルギー効率；3 プロジェクト、14,498,159 ドル
- ・ 化石エネルギー；6 プロジェクト、12,146,303 ドル
 - 炭素回収；5 プロジェクト、11,146,303 ドル
 - 炭素回収以外；1 プロジェクト、1,000,000 ドル
- ・ 風力エネルギー；2 プロジェクト、11,325,400 ドル
- ・ 地熱エネルギー；1 プロジェクト、9,151,300 ドル
- ・ 廃熱回収；2 プロジェクト、4,715,752 ドル
- ・ 水資源；1 プロジェクト、2,031,252 ドル

②第2回包括型提案公募

下記 11 区分で 66 プロジェクトを採択し、1 億 2,968 万ドルの資金を投入している。

- ・ エネルギー貯蔵；20 プロジェクト、36,899,595 ドル
 - 輸送用エネルギー貯蔵；7 プロジェクト、15,290,384 ドル
 - 定置式エネルギー貯蔵；8 プロジェクト、12,131,137 ドル
 - 熱貯蔵；5 プロジェクト、9,478,074 ドル
- ・ エネルギー伝送；9 プロジェクト、23,957,287 ドル
- ・ 化石エネルギー；10 プロジェクト、17,842,519 ドル
 - 炭素回収；4 プロジェクト、10,009,568 ドル
 - 炭素回収以外；6 プロジェクト、7,832,951 ドル
- ・ バイオエネルギー；7 プロジェクト、15,557,242 ドル
- ・ 太陽エネルギー；6 プロジェクト、10,263,907 ドル
- ・ 風力エネルギー；2 プロジェクト、7,403,184 ドル
- ・ 自動車技術；2 プロジェクト、5,603,970 ドル
- ・ 建物のエネルギー効率；3 プロジェクト、5,340,620 ドル
- ・ 発電；3 プロジェクト、1,722,586 ドル
- ・ 海洋エネルギー；2 プロジェクト、1,093,260 ドル
- ・ その他；2 プロジェクト、4,000,000 ドル

以上の採択結果から分野別の資金充当額を求めると、下記分野への配分比率が高くなっていることが分かる（表 46、図 11）。

- ・ エネルギー貯蔵；28.7%
- ・ バイオエネルギー；19.1%
- ・ エネルギー伝送；12.1%

- ・化石エネルギー；11.2%

表 45 エネルギー高等研究計画局のプロジェクト採択状況

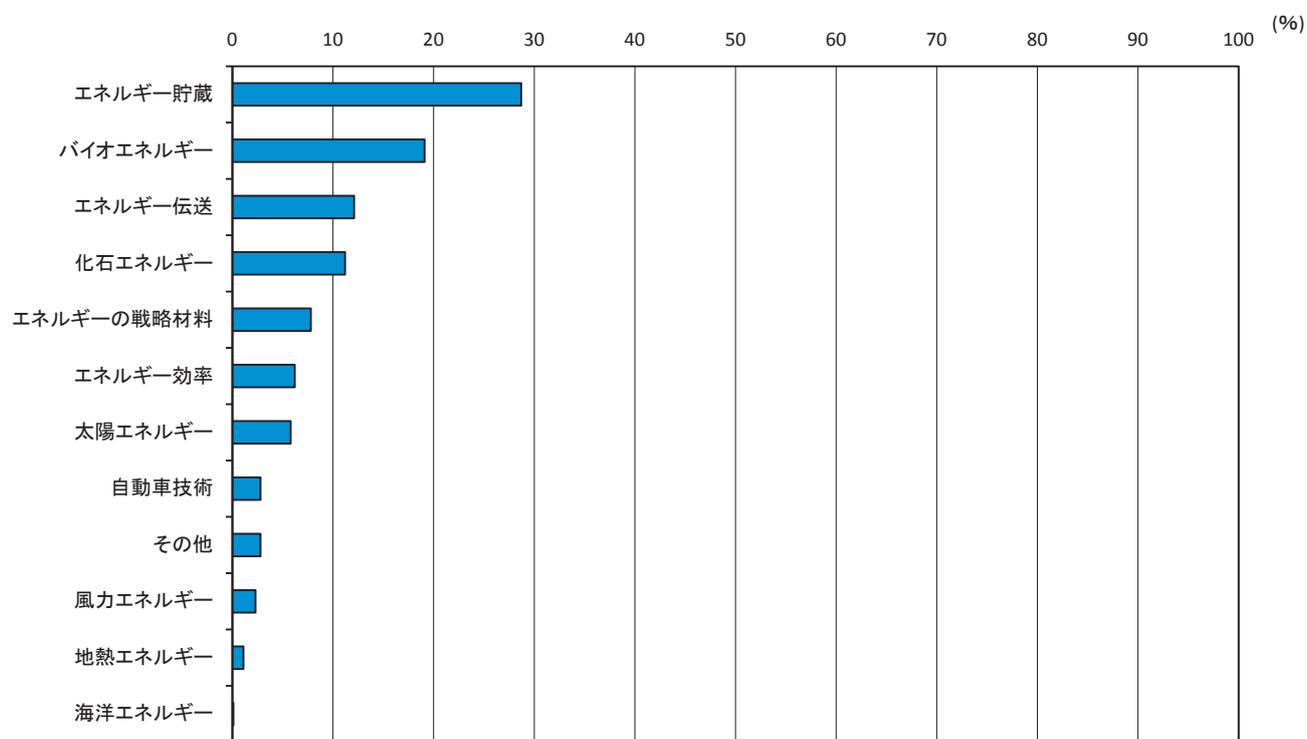
プログラム領域		採択時期	プロジェクト数	充当資金(ドル)
エネルギー貯蔵	輸送機械の蓄電池	2010年4月	10	34,573,810
	伝送用エネルギー貯蔵	2010年7月	12	27,651,217
	高エネルギーな熱貯蔵	2011年9月	15	37,317,407
	エネルギー貯蔵の高度管理	2012年8月	14	29,000,000
	輸送機械の蓄電システム	2013年8月	22	36,321,542
	小計	—	73	164,863,976
バイオエネルギー	微生物による燃料生成	2010年4月	13	41,202,906
	非食用作物による燃料生成	2011年9月	10	36,000,002
	微生物によるガスからの燃料生成	2013年9月	15	34,137,698
	小計	—	38	111,340,606
エネルギー伝送	柔軟で効率的な電力技術	2010年7月	14	34,598,679
	再生可能エネルギーを統合した伝送網	2011年9月	15	39,416,316
	小計	—	29	74,014,995
エネルギーの戦略材料	希土類元素の代替方策	2011年9月	14	31,636,779
	軽金属の先進製造	2013年9月	18	31,640,332
	小計	—	32	63,277,111
化石エネルギー	炭素回収のための材料&プロセス	2010年4月	14	30,684,667
	天然ガス自動車	2012年7月	13	30,200,000
	小計	—	27	60,884,667
エネルギー効率	建物のエネルギー効率を高める熱機器	2010年7月	17	30,106,991
太陽エネルギー	太陽光発電の効率を高めるシステム	2011年9月	7	14,714,914
エネルギー全般	第1回包括型提案公募	2019年10月	37	151,076,322
	第2回包括型提案公募	2012年11月	66	129,684,170
	小計	—	103	280,760,492
その他		2010年9月	6	9,600,782
合計		—	332	809,564,534

(出典) 米国エネルギー省の各種公開情報に基づき JST・CRDS が作成

表 46 エネルギー高等研究開発局の分野別資金配分

分野	プロジェクト数	充当資金	
		金額(ドル)	配分比率(%)
エネルギー貯蔵	99	232,395,724	28.7
バイオエネルギー	50	154,557,182	19.1
エネルギー伝送	38	97,972,282	12.1
化石エネルギー	43	90,873,489	11.2
エネルギーの戦略材料	32	63,277,111	7.8
エネルギー効率	23	49,945,770	6.2
太陽エネルギー	19	46,743,432	5.8
自動車技術	7	22,756,028	2.8
風力エネルギー	4	18,728,584	2.3
地熱エネルギー	1	9,151,300	1.1
海洋エネルギー	2	1,093,260	0.1
その他	14	22,070,372	2.8
合計	332	809,564,534	100.0

(出典) 米国エネルギー省の各種公開情報に基づき JST・CRDS が作成



(出典) 米国エネルギー省の各種公開情報に基づき JST・CRDS が作成

図 11 エネルギー高等研究計画局の分野別資金配分

iv) 基礎研究戦略

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に加え、基礎研究を支援する枠組みとして「エネルギーフロンティア研究センター」が導入されている。

本イニシアチブでは、優先すべき研究課題として「10の重点領域」が設定されている。

- ① 固体素子照明 (Solid-State Lighting)
- ② 太陽エネルギーの利用 (Solar Energy Utilization)
- ③ 超伝導 (Superconductivity)
- ④ 電気エネルギーの貯蔵 (Electrical Energy Storage)
- ⑤ 水素の製造・貯蔵・利用 (Hydrogen Economy)
- ⑥ 先端原子力システム (Advanced Nuclear Energy Systems)
- ⑦ 運輸燃料の無公害・高効率燃焼 (Clean and Efficient Combustion of 21st Century Transportation Fuels)
- ⑧ エネルギーのための地球科学 (Geosciences – Facilitating 21st Century Energy Systems)
- ⑨ エネルギーのための触媒 (Catalysis for Energy)
- ⑩ エネルギーの戦略材料 (Materials under Extreme Environments)

さらに、挑戦すべき研究課題として「5つの科学原理」が設定されている。

- ① 材料プロセスを電子レベルでいかに制御するか (how do we control materials processes at the level of electrons)
- 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 (How do we design and perfect atom- and energy-efficient syntheses of revolutionary new forms of matter with tailored properties)
- 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 (How do remarkable properties of matter emerge from the complex correlations of atomic or electronic constituents and how can we control these properties)
- 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 (How can we master energy and information on the nanoscale to create new technologies with capabilities rivaling those of living things)
- 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 (How do we characterize and control matter away – especially very far away – from equilibrium)

センター設立に際し、「設定した重点領域と科学原理に取り組む（10の重点領域と5つの科学原理について、それぞれ一つまたは複数研究対象に取り上げる）」ことを公募条件として課したため、採択された全てのセンターがこれらの課題に取り組む体制が出来上がっている。

2009年に46センターが設立されており、これらのセンターに5年間で7億7,700万ドルの研究資金を投ずる。各領域の研究に従事するセンター数（一つのセンターが複数の領域を重複して選択）は、次のようになっている。

- ・ 太陽エネルギーの利用；27
- ・ エネルギーのための触媒；15
- ・ 電気エネルギーの貯蔵；14
- ・ エネルギーの戦略材料；12
- ・ 水素の製造・貯蔵・利用；10
- ・ 固体素子照明；9
- ・ 先端原子力システム；6
- ・ 運輸燃料の無公害・高効率燃焼；6
- ・ エネルギーのための地球科学；4
- ・ 超伝導；3

「太陽エネルギー」の研究に従事するセンターが最も多く、全体の6割を占めている。次いで、「触媒」「エネルギー貯蔵」「戦略材料」の順番となっている（図12-1）。

一方、科学原理については、センターの従事数（一つのセンターが複数の原理を重複して選択）は次のようになっている。

- ・ 特性発現構造の設計及び最適方法による形成；38
- ・ 材料プロセスの電子レベルにおける制御；31
- ・ 関係事象の非平衡下などでの評価及び制御；27
- ・ 原子や電子などの複雑な相互作用から生まれる特性の制御；23
- ・ 生物や植物を疑似したナノスケールでのエネルギーや情報の操作；21

5つの原理の内、「特性発現構造の設計及び最適方法による形成」に取り組むセンターが最も多く、全体の8割を占めている（図12-2）。

より詳細な分析として、個々の研究内容に着目し、重視されている研究テーマを抽出する（エネルギー省「Energy Frontier Research Centers, Technical Summaries, revised in February, 2013」の区分に基づく）と、以下の結果が得られる。

①材料

「材料」の研究が最も多く、43センターが課題として取り上げている。9割を超えるセンターが研究に従事しており、内訳は次のようになっている。

- ・ 金属；28
- ・ 酸化物；25
- ・ 半導体；24
- ・ 高分子；20

- ・光電子材料、メタマテリアル；17
- ・多孔質材料；15
- ・広域バンドギャップ半導体；13
- ・有機半導体；11
- ・透明導電体；9
- ・イオン液体；9
- ・希土類元素；5
- ・生物材料；5
- ・セルロース；4
- ・アクチノイド；3

②ナノ構造体

「ナノ構造体」の研究が二番目に多く、42センターが課題として取り上げている。9割のセンターが研究に従事しており、内訳は次のようになっている。

- ・3次元；41
- ・2次元；28
- ・1次元；24
- ・0次元；19

③合成

「合成」の研究が三番目に多く、40センターが課題として取り上げている。8割を超えるセンターが研究に従事しており、内訳は次のようになっている。

- ・新材料；38
- ・自己組織化；24
- ・スケラブルプロセッシング；16

④相界面

「相界面」の研究が四番目に多く、37センターが課題として取り上げている。8割のセンターが研究に従事しており、内訳は次のようになっている。

- ・固体／固体；24
- ・液体／固体；20
- ・有機物／金属；19
- ・金属／半導体；17
- ・有機物／酸化物；16
- ・金属／酸化物；15
- ・半導体／半導体；14
- ・気体／固体；12
- ・有機物／有機物；12

- ・有機物／半導体；12
- ・気体／液体；9

⑤材料及び化学的性質の設計

「材料及び化学的性質の設計」の研究が五番目に多く、35 センターが課題として取り上げている。7 割を超えるセンターが研究に従事している。

⑥電荷輸送

「電荷輸送」の研究が六番目に多く、28 センターが課題として取り上げている。6 割のセンターが研究に従事している。

⑦太陽エネルギー

「太陽エネルギー」の研究が七番目に多く、24 センターが課題として取り上げている。5 割のセンターが研究に従事しており、内訳は次のようになっている。

- ・光電池；17
- ・燃料；11
- ・熱；3

⑧ナノ複合体

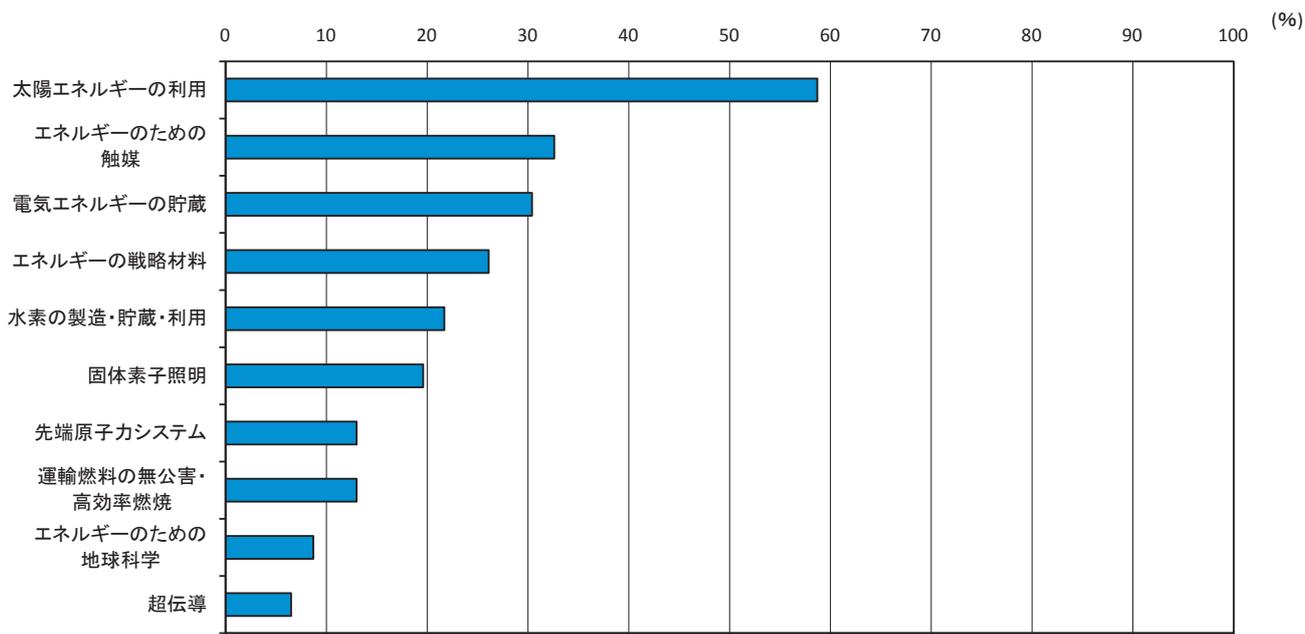
「ナノ複合体」の研究が八番目に多く、23 センターが課題として取り上げている。5 割のセンターが研究に従事している。

上記以外の研究課題についても、センターの従事数に基づく整理を行うと、以下の順番が得られる。

- ・触媒作用；16
 - － 不均一系；16
 - － 均一系；12
- ・欠陥；16
- ・バイオインスパイアード；16
- ・エネルギー貯蔵（蓄電池、キャパシタを含む）；13
- ・水素及び燃料電池；13
- ・太陽エネルギーの電極；13
- ・光学；11
- ・フォノン；10
- ・機械的挙動；9
- ・光合成（天然、人工）；8
- ・固体素子照明；8
- ・熱伝導；8
- ・膜；8

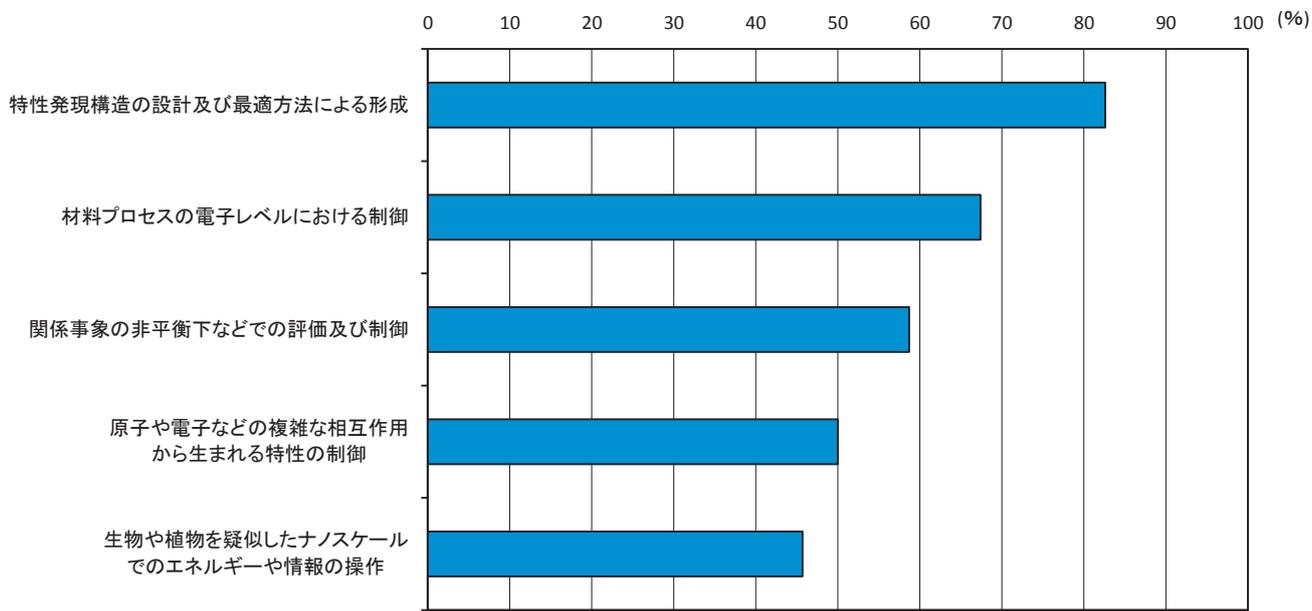
- ・ バイオ燃料；7
- ・ スピンドYNAMIX；6
- ・ 熱電変換；6
- ・ 原子力（放射線影響を含む）；6
- ・ 炭素隔離；6
- ・ 炭素回収；4
- ・ 超伝導；3
- ・ 燃焼；1

基礎研究の領域では、「材料」「合成」及び「材料及び化学的性質の設計」、「ナノ構造体」や「ナノ複合体」、「相界面」、「電荷輸送」、「太陽エネルギー」などが主要課題となっている（図 12-3）。



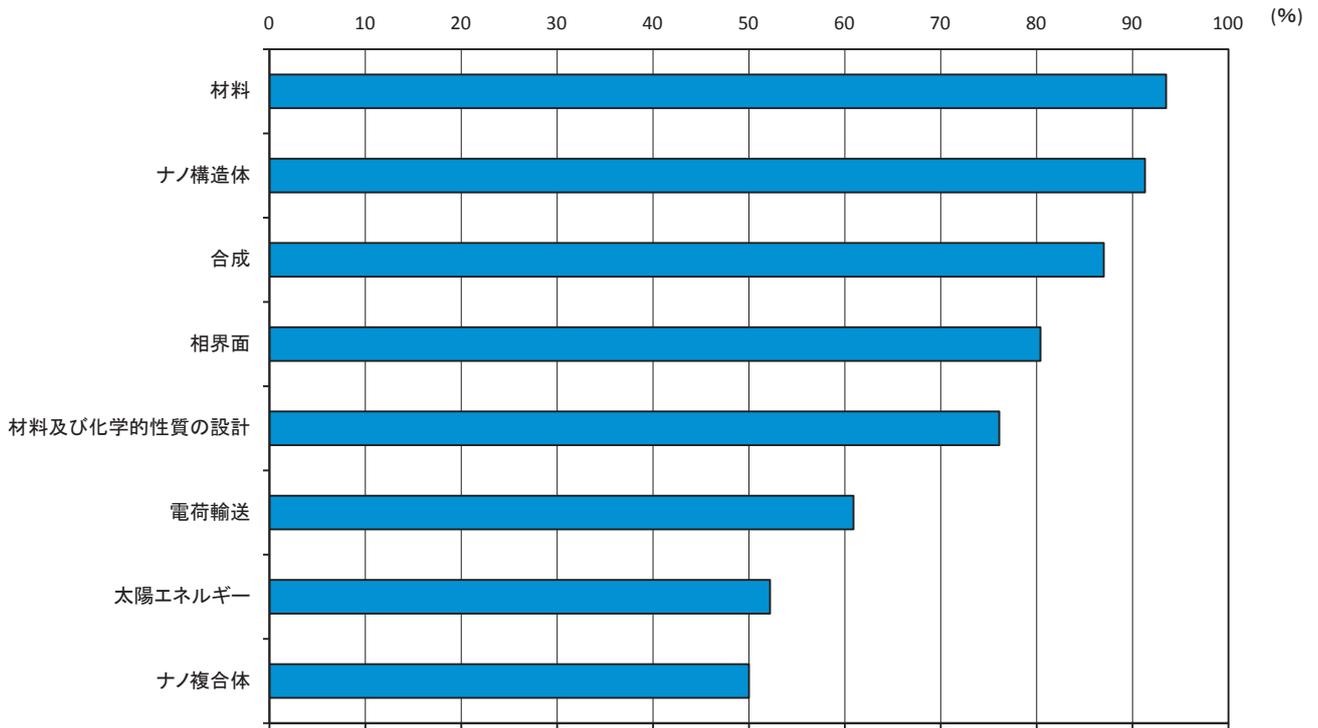
(出典) 米国エネルギー省の各種公開情報に基づき JST-CRDS が作成

図 12-1 10 の重点領域の優先順位



(出典) 米国エネルギー省の各種公開情報に基づき JST-CRDS が作成

図 12-2 5 つの科学原理の優先順位



(出典) 米国エネルギー省の各種公開情報に基づき JST-CRDS が作成

図 12-3 研究テーマの優先順位

Ⅲ. 再生可能エネルギーの導入状況

前項にまとめた研究戦略を基盤に、米国は、2035年までに発電電力の80%をクリーンエネルギーで賄うことを目指している。2010年時点の電力構成は、次のようになっている（表47）。

- ・化石；69.9%
- ・原子力；19.2%
- ・水力；6.5%
- ・風力；2.2%
- ・バイオ&廃棄物（再生可能エネルギー以外の産業廃棄物等の発電を含む）；1.7%
- ・地熱；0.4%
- ・太陽；0.1%

発電電力に占める再生可能エネルギーの割合について、2000年以降の推移をドイツと比較して整理すると、以下の特徴が明らかになる（表48、図13、表49）。

- 水力の割合は、独米いずれの場合も、一定の範囲内（ドイツは3～4%、米国は6～8%）で上下している。
- 一方、水力以外の再生可能エネルギー（風力、バイオ、太陽、地熱）は、ドイツは2000年以降、米国は2005年以降、継続して増加している。2011年時点の値はドイツが17.6%、米国が4.9%となっており、米国の割合はドイツの三分の一以下に止まっている。
- 2011年時点の個々の再生可能エネルギー源の割合は、次のようになっている。
 - ・バイオ；ドイツが6.2%、米国が1.4%
 - ・風力；ドイツが8.2%、米国が2.9%
 - ・太陽；ドイツが3.2%、米国が0.2%

- ドイツでは、バイオ、風力、太陽のいずれについても顕著な伸びが認められる。これに対し、米国の伸びは主として風力に拠るものとなっている（図14）。

以上から、2.4.1項でも言及したように、再生可能エネルギーの導入面で、米国がドイツの後塵を拝している状況が確認できる。

一方、2012年に国立再生可能エネルギー研究所が「再生可能電力の将来展望(Renewable Electricity Futures Study, Entire Report)」を発表しており、この中に「2050年までに、米国の電力に占める再生可能エネルギー（水力を含む）の割合を、80%に高めるためのシナリオ」が示されている。ポイントをまとめると、次のようになる。

- a) 2009～2010年時点の各種データをもとに、今後の技術開発や経済要因（資源価

格や電力需要など) について複数の仮説を設定した場合、想定される将来シナリオの範囲内で、「米国が 2050 年に、発電電力の 80% を再生可能エネルギーで賄う」ことは十分に可能である。

b) 電力の 80% を再生可能エネルギーで賄う場合、個々のエネルギー源の占める割合は、以下の範囲となる (表 50、図 15)。

- ・風力；32～43%
- ・太陽；3～22%
- ・水力；8～16%
- ・バイオ；8～15%
- ・地熱；2～4%

c) 発電への寄与は風力エネルギーが最も大きく、全電力の 32～43% を占める。

d) これに対し、太陽エネルギーは、今後の技術開発に応じ、寄与率が大きく変動する。技術開発が進展する場合、電力に占める割合が 22% まで高まるが、進展しない場合は 3% に止まる。

米国は、電力の 8 割を再生可能エネルギーで賄うための潜在能力を有しており、そのためのシナリオ実現では、風力が最も重要な役割を果たす。さらに、技術開発に基づく太陽エネルギーの拡大が、もう一つの鍵を握る。

前述のように、米国は、研究イニシアチブであるエネルギーイノベーション・ハブやエネルギーフロンティア研究センターを通じ、太陽エネルギーの研究を強化している。これらの研究の進展が、米国の将来シナリオに大きな影響をもたらす。

表 47 米国における発電電力のエネルギー源

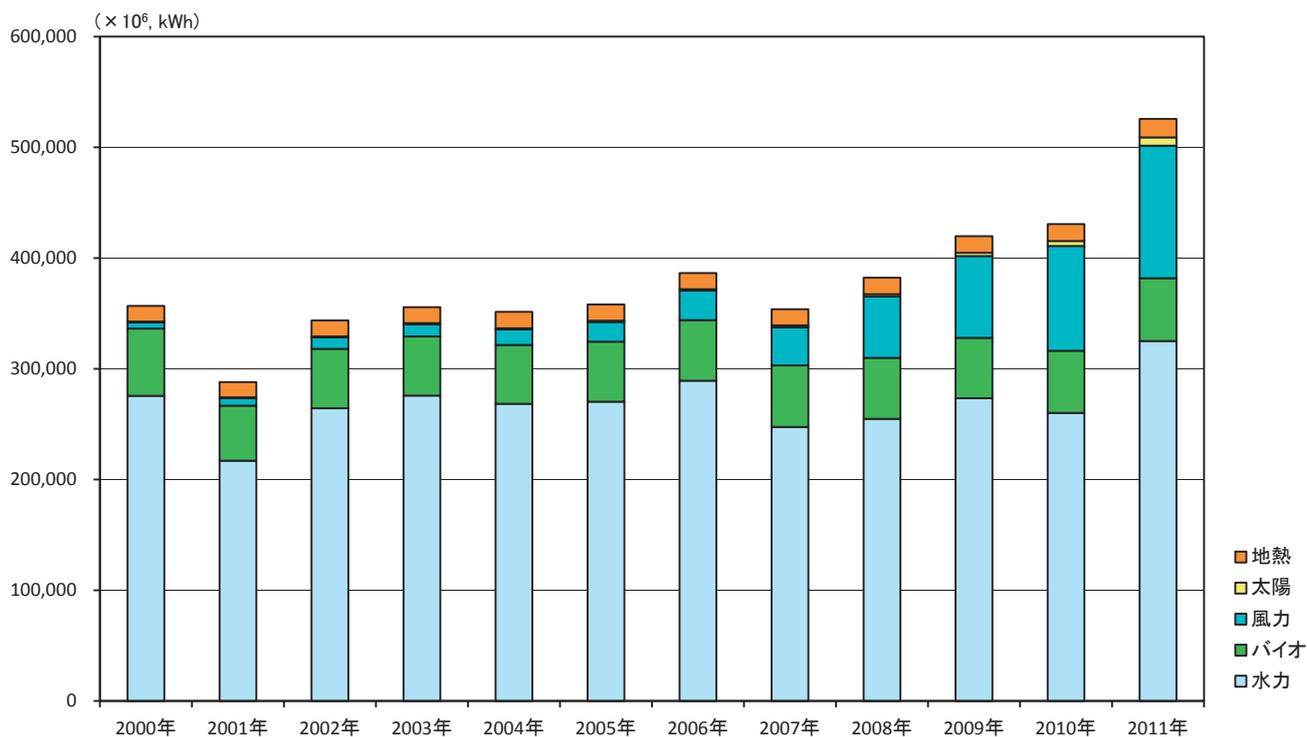
エネルギー源		発電電力に占める割合 (%)			
		1980年	1990年	2000年	2010年
化石	石油	10.84	4.06	2.92	1.10
	石炭	51.20	52.80	52.55	45.55
	ガス	15.26	11.86	15.65	23.25
	小計	77.30	68.72	71.12	69.90
原子力		10.97	19.00	19.68	19.16
水力		11.49	8.98	6.91	6.54
バイオ&廃棄物		0.02	2.68	1.77	1.72
風力		0.00	0.10	0.14	2.17
太陽		0.00	0.02	0.02	0.09
地熱		0.22	0.50	0.36	0.40
潮力、波力、海洋		0.00	0.00	0.00	0.00
その他		0.00	0.00	0.00	0.02
合計		100.00	100.00	100.00	100.00

(出典) International Energy Agency, 「Electricity Information」, 2012 Edition に基づき JST-CRDS が作成

表 48 米国の発電電力に占める再生可能エネルギーの割合

エネルギー源	発電電力に占める割合 (%)											
	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年
水力	7.2	5.8	6.8	7.1	6.7	6.7	7.1	5.9	6.2	6.9	6.3	7.9
バイオ	1.6	1.3	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4
風力	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.7	0.8	1.3	1.9	2.3	2.9
太陽	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2
地熱	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
合計	9.4	7.7	8.9	9.1	8.8	8.8	9.5	8.5	9.3	10.6	10.4	12.8

(出典) U.S. Department of Energy, 「2011 Renewable Energy Data Book」に基づき JST-CRDS が作成



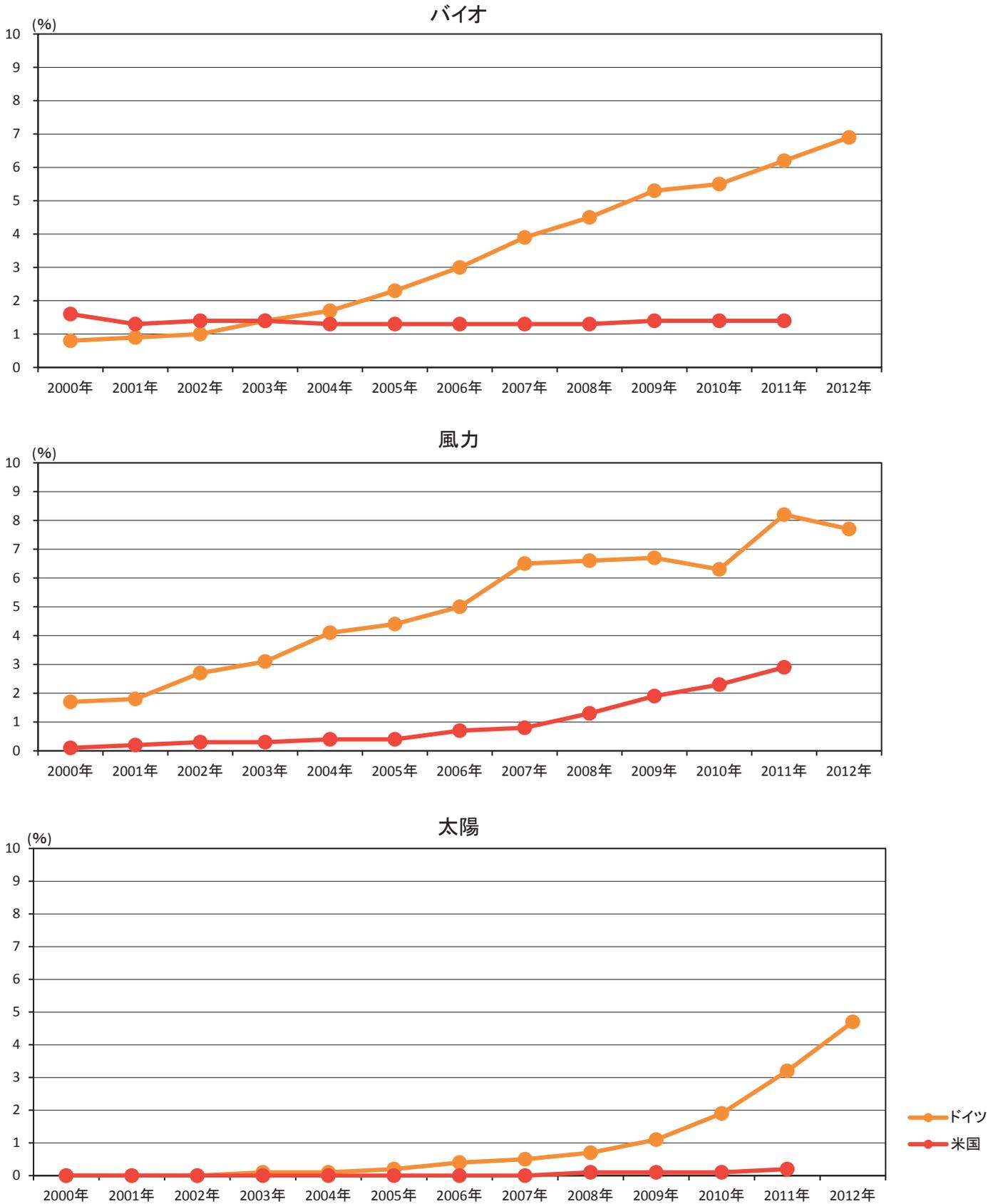
(出典) U.S. Department of Energy, 「2011 Renewable Energy Data Book」に基づき JST-CRDS が作成

図 13 米国における再生可能エネルギーの発電電力

表 49 米独の発電電力に占める再生可能エネルギーの割合

区分	発電電力に占める割合 (%)												
	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
水力	4.3	4.0	4.1	2.9	3.3	3.2	3.2	3.4	3.3	3.3	3.4	2.9	3.6
再生可能	7.2	5.8	6.8	7.1	6.7	7.1	5.9	6.2	6.9	6.3	7.9	—	—
水力以外	2.5	2.7	3.7	4.6	5.9	8.4	10.9	11.8	13.1	13.7	17.6	19.3	19.3
	2.2	1.9	2.1	2.0	2.1	2.4	2.6	3.1	3.7	4.1	4.9	—	—

(出典) 米独の当該機関による各種公開情報に基づき、JST・CRDS が作成



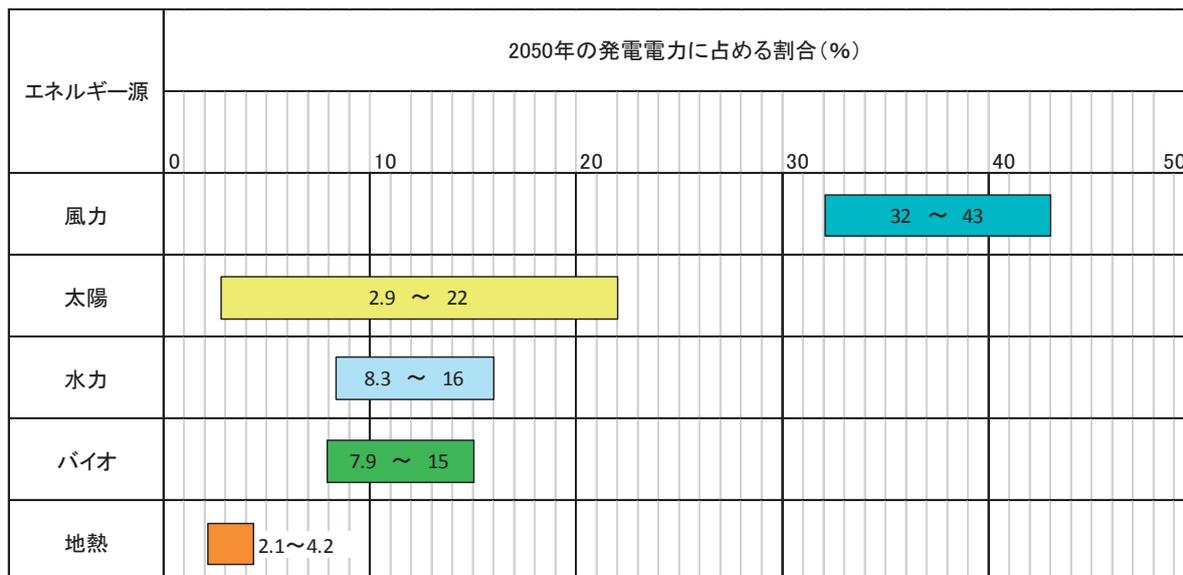
(出典) 米独の当該機関による各種公開情報に基づき JST-CRDS が作成

図 14 米独の発電電力に占める再生可能エネルギーの割合

表 50 米国における再生可能エネルギーの導入シナリオ

区分		2050年の発電設備容量 (10 ⁶ , kW)	2050年の発電電力に 占める割合(%)
風力	陸上	280 ~ 440	20 ~ 33
	洋上	56 ~ 180	5.6 ~ 16
	小計	390 ~ 560	32 ~ 43
太陽	光発電／住宅型	85 ~ 170	2.6 ~ 5.2
	光発電／施設型	5 ~ 120	0.3 ~ 5.2
	熱発電	1 ~ 130	0.1 ~ 14
	小計	91 ~ 330	2.9 ~ 22
水力		81 ~ 170	8.3 ~ 16
バイオ	専焼	40 ~ 84	6.7 ~ 14
	混焼	11 ~ 14	1.1 ~ 1.5
	小計	52 ~ 98	7.9 ~ 15
地熱		12 ~ 25	2.1 ~ 4.2
合計		880 ~ 1,040	81

(出典) U.S., National Renewable Energy Laboratory, 「Renewable Electricity Futures Study (2012)」に基づき JST・CRDS が作成



(出典) U.S., National Renewable Energy Laboratory, 「Renewable Electricity Futures Study (2012)」に基づき JST・CRDS が作成

図 15 米国における再生可能エネルギーの導入シナリオ

2.5 持続可能な未来を実現する要件

持続可能なエネルギーの未来を目指し、各国が「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通の課題に取り組んでいる。「地球温暖化ガスの削減」「化石資源への依存軽減」及び「新たなエネルギー産業の創出」という3つの社会ニーズが背景にある。

前項までにまとめた米英独仏の動向分析から、上記ニーズに応え「最も厳しいエネルギー源の制約下で、再生可能エネルギーの導入拡大を図るのがドイツ」であり、「最も多様なエネルギー源を用い、新産業創出を目指すのが米国」であることが分かった。

これらの取り組みに加え、現地会合を通じ把握した各国注目機関の動向を総合すると、持続可能なエネルギーの未来を実現するための基本要件として、以下の事項が導き出される。

I. 橋渡しエネルギー

第一の要件として、化石から非化石への転換を図るには、その間のエネルギー源に用いる「橋渡しエネルギー」を設定する必要がある。つまり、現在から未来のシステムへの転換期に用いるエネルギー源を選択しなければならない。この橋渡しエネルギーの選択には、ドイツの取り組みが参考になる。

ドイツは当初のビジョンにおいて、原子力を橋渡しエネルギーとして用いる戦略を立てていた。しかしながら、その後の福島原発事故を受けて、原子炉の停止時期を前倒したため、代替りのエネルギー源が必要となった。結果として、ドイツは化石エネルギーを代替に選び、火力の発電能力を拡充する方策を定めている。その上で、再生可能エネルギーの導入を一層加速する方針を打ち出した。

こうしたドイツの取り組みに従えば、橋渡しエネルギー設定のポイントは、次のように整理される。

- 1) 原子力を削減または停止する場合、代替りの橋渡しエネルギーが必要になる。
- 2) その場合、短期の代替は化石エネルギーとなり、中長期には再生可能エネルギーの導入を加速する必要が生ずる。
- 3) 再生可能エネルギーの導入を加速する場合、最も有望な対象は風力となる。独米いずれの場合も、風力を第一の選択肢に位置付けている。

II. エネルギー伝送

第二の要件として、風力などの再生可能エネルギーの導入が進むと、「再生可能エネルギーと電力消費地を結ぶ“長距離伝送網”」が必要になってくる。実際に、ドイツでは「北海沿岸の洋上風力をミュンヘン等の南西部で消費するケース」、米国では「テキサスの陸上風力をニューヨーク等の東部で消費するケース」などが想定されている。

このため、エネルギー伝送の研究が活発化しており、米独では、以下の研究が展開されている。

- 1) ドイツは、「持続可能な伝送網」というイニシアチブの下で、欧州の電力統合にも適応可能な伝送網の構築を目指している。1億5,000万ユーロの予算規模で、直流伝送や超伝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含めた広範な研究を行う。
- 2) 基礎研究では、「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」を重視している。主要課題として、以下が挙げられる。
 - 部品；導電材料、心材、絶縁方法
 - 無線伝送
 - 高温超伝導
 - 安全性、安定性；伝送網に用いる希少物質の代替方策、送配電のエネルギー損失低減、伝送機能の向上
 - 設計；伝送網の解析手法、伝送網のモデリング
- 3) 米国は、研究イニシアチブの内、エネルギー高等研究計画局の枠組みで、38プロジェクトに9,800万ドルの資金を投じている。主なプログラムとして、以下が挙げられる。
 - 再生可能エネルギーを統合した伝送網；伝送網のエネルギー効率、信頼性、再生可能エネルギーの統合機能などを高めるためのハードウェア及びソフトウェア
 - 柔軟で効率的な電力技術；高効率電力変換を可能にする方策、及びそのための部材（回路、トランジスタ、インダクタ、変圧器、キャパシタなど）
- 4) さらに、エネルギーイノベーション・ハブの枠組みで、「エネルギー伝送」をテーマとする拠点設立を計画している（2014年度の予算申請、認可されると5年間に1億2,200万ドルの資金が投入される）。

Ⅲ. エネルギー貯蔵

第三の要件として、系統制御への再生可能エネルギーの取り込みが増加すると、ガス火力等を用いた出力調整に加え、「エネルギー貯蔵」を拡充する必要性が生ずる。

ドイツは、自国の揚水発電を最大化し、ノルウェーやアルプスの揚水発電を組み入れることで貯蔵能力を高める方針を打ち出した。その上で、エネルギー貯蔵を革新する研究を強化している。一方、米国は複数のイニシアチブを用い、エネルギー貯蔵の研究を重点的に推進している。

米独における主な研究動向は、以下のように整理される。

- 1) ドイツは、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、「エネルギー貯蔵システム」のイニシアチブを立ち上げた。伝送網用の定置式貯蔵への適用を重点に、「熱的貯蔵」を短期、「化学的貯蔵」と「電気化学的貯蔵」を長期の研究課題に位置付けている。60以上のプロジェクトが採択され、2億ユーロ規模の資金が充当されている。
- 2) 基礎研究では、「熱的貯蔵」「電気化学的貯蔵」「化学的貯蔵」「力学的貯蔵」を取り上げている。主な課題として、以下が挙げられる。
 - 材料；例えば、熱的貯蔵用の相変化材料、電解質用の有機材料など
 - 電気化学；エネルギー転換プロセス（エネルギー貯蔵、エネルギー製造）
 - 熱化学；反応機構、熱的安定性
 - シミュレーション；伝送網におけるエネルギー貯蔵の性能
- 3) 米国は、エネルギーイノベーション・ハブの枠組みで、「エネルギー貯蔵研究センター」を設置した。本拠点に、5年間で1億2,200万ドルの資金を投ずる。「現行のリチウムイオン電池に比べ、5年以内に、エネルギー貯蔵性能を5倍に高め、コストを五分の一に低減可能とする」ことが目標で、そのために以下の研究に取り組む。
 - 新規の電気化学的貯蔵；多価オン、化学変換、非水溶液レドックスフロー
 - 電気化学的貯蔵のための基礎研究
 - コンピュータ上の仮想電池設計及び性能評価
 - 伝送網及び輸送機械用のプロトタイプ設計
- 4) 合わせて、エネルギー高等研究計画局の枠組みを用い、99プロジェクトに2億3,200万ドルを投じている。主なプログラムとして、以下が挙げられる。
 - 伝送用エネルギー貯蔵；どこでも設置可能で、再生可能エネルギーの取り込みに適した、伝送網のためのエネルギー貯蔵技術
 - エネルギー貯蔵の高度管理；エネルギー貯蔵の性能、安全性、寿命を高めるための、貯蔵装置の高度な管理技術
 - 高エネルギーな熱貯蔵；太陽熱の高温貯蔵や原子炉の熱貯蔵など、高エネルギーな熱源に適した、効率がよく、経済性に優れた熱貯蔵方式

- 輸送機械の蓄電システム；電気自動車を対象とした、蓄電システム全体の経済性を高めるための方策
- 輸送機械の蓄電池；電気自動車やハイブリッド自動車の走行コストを、ガソリン車並みに引き下げることが可能にする蓄電池

IV. エネルギー効率

第四の要件として、どのような未来のシナリオを描いても、「エネルギー効率」の向上が必須の課題となる。建物、運輸、産業などが検討対象となるが、削減余力が高いことから、米独いずれの場合も、建物のエネルギー効率が重視されている。

上記要請に応えるため、米独では、以下の研究が展開されている。

- 1) ドイツの場合、人口の7割が都市部に集中している。このため、「ソーラー建物／高効率エネルギー都市」という研究イニシアチブを設定した。最終エネルギー消費の4割を占める建物に着目し、建物での太陽エネルギーの活用などを図ることで、都市全体のエネルギー効率向上を目指している。
- 2) 基礎研究では、建物では「暖房、換気、空調、給湯、情報通信」、運輸では「電気自動車、蓄電池、燃料電池、駆動系、車両設計」、産業では「製造材料やプロセス」などが検討対象となっている。研究課題として、以下が挙げられる。
 - 建物；遮蔽材料、透光性材料、自己給電型マイクロシステムの統合技術
 - 送電網；スマートグリッドの情報通信技術
 - 化学的貯蔵；貯蔵材料、水分解プロセス
 - 熱的貯蔵；蓄熱材料、蓄熱技術、伝熱媒体
 - 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
- 3) 米国は、エネルギーイノベーション・ハブの枠組みで、「高効率エネルギー建物ハブ」を設置した（5年間で1億2,200万ドルを投入）。「2020年までに、商業用建物のエネルギー消費を20%削減するための手段や方法を開発する」ことを目標とする。研究課題として、以下が挙げられる。
 - モデリング&シミュレーション；エネルギーシステムの評価手法、新技術等の評価手法、新技術等の導入手法、エネルギーシステム等の評価手法

- エネルギーインフォマティクス；標準化、情報貯蔵、情報管理、可視化
 - インテリジェント・オペレーション；低コスト感知、最適制御、機能診断、包括管理
 - エネルギーマネジメント・システム
- 4) さらに、エネルギー高等研究計画局の枠組みで、23 プロジェクトに 5,000 万ドルを投じている。主なプログラムとして、以下が挙げられる。
- 建物のエネルギー効率を高める熱機器；建物の冷房や空調におけるエネルギー効率を高めるための、新たな技術及び手法

V. 太陽エネルギー

第五の要件として、「太陽エネルギー」の動向に注目していく必要がある。太陽エネルギーは、ドイツなどの特定国を除き、現時点では導入があまり進んでいない。橋渡しエネルギーとしての活用も、風力が優先されている。

一方、2012 年に、米国の国立再生可能エネルギー研究所が「再生可能電力の将来展望」を発表し、この中で「2050 年までに、米国の電力に占める再生可能エネルギー（水力を含む）の割合を、80%に高めるためのシナリオ」を示した。ポイントをまとめると、次のようになる。

- 1) 「米国が 2050 年に、発電電力の 80%を再生可能エネルギーで賄う」ことは十分に可能である。電力の 80%を再生可能エネルギーで賄う場合、個々のエネルギー源の占める割合は、以下の範囲となる。
 - ・ 風力；32～43%
 - ・ 太陽；3～22%
 - ・ 水力；8～16%
 - ・ バイオ；8～15%
 - ・ 地熱；2～4%
- 2) 発電への寄与は風力エネルギーが最も大きく、全電力の 32～43%を占める。これに対し、太陽エネルギーは、今後の技術開発に応じ、寄与率が大きく変動する。開発が進展する場合、電力に占める割合は 22%まで高まるが、進展しない場合は 3%に止まる。

米国は、電力の 8 割を再生可能エネルギーで賄う能力を有しており、その際には、風力が最も重要な役割を果たす。これらは、前述の「再生可能エネルギーの導入を加速する場合、米独いずれの場合も、風力を第一の選択肢に位置付けている」とことと良い一致を示す。その上で、技術開発に基づく太陽エネルギーの拡大が、もう一つの大きな鍵を握ることになる。米国は長期戦略として太陽エネルギーの研究を継続して支援しており、基礎研究の

イニシアチブとして設置した 46 のエネルギーフロンティア研究センターにおいても、6 割のセンターが太陽エネルギーの研究に従事している。

加えて、非化石への転換に伴う新事業創出という面でも、太陽エネルギーへの期待は高い。ドイツでは 2010 年時点で、太陽エネルギーにより 12 万人を超える雇用がもたらされている。

化石から非化石への転換を図る今後の展開の中で、太陽エネルギーが「盤面を換える技術」としての役割を果たす可能性があり、したがって、そのための研究戦略が大きな影響を持つ。

3. 調査結果の総括

資源コストや市場動向などに基づく経済性がエネルギーシステム全体に大きな影響をもたらす現状の中で、持続可能なエネルギーの未来を目指し、各国が「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通の課題に取り組んでいる。

3つの社会ニーズが背景にある。第一が、「地球温暖化ガスの削減」。2007年に発表されたIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第4次評価報告書に基づき、地球温暖化が科学的根拠に基づく国際課題として明確に位置付けられた。その後、2009年にコペンハーゲンで開催されたCOP15（第15回気候変動枠組条約締結国会議）を経て、各国が具体的解決策を示す段階に入っている。

第二が、「化石資源への依存軽減」。現代社会は化石資源に強く依存しており、化石資源が不足すると社会生活が直接影響を受ける。直近では2008年の石油価格高騰により、世界経済に大きな混乱が生じた。エネルギー安全保障を確立し、持続可能性を高めるには、化石から非化石へのエネルギー転換が必要である。

第三が、「新たなエネルギー産業の創出」。先行するドイツでは、2010年時点で発電量に占める再生可能エネルギーの割合が17%に達し、風力エネルギーで10万人、太陽エネルギーとバイオで各12万人、再生可能エネルギー全体で36万人の雇用が生まれている。非化石への転換がもたらす新たなエネルギー産業の優劣が、各国の競争力を左右する時代が始まっている。

こうした中で、2011年3月に福島原発事故が発生し、原子力の位置付けがあらためて問われることになった。結果として、ドイツは原発停止時期を従来の2036年から2022年まで前倒しする方針を打ち出し、一方、米国や英国などは、引き続き原子力を活用する方向となっている。

上記情勢を受けて、日本としてのエネルギービジョンの再構築が強く求められている。原子力の役割を含め、日本が持続可能なエネルギーの未来を実現するためのシステムを設定する必要があり、基盤となる科学技術を明らかにしていく必要がある。

呼応するように、海外では米英独仏が相次いで「エネルギーの未来に関する提言」をまとめている。ドイツの「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」、米国の「未来の安定したエネルギーを確保するための構想」などが該当する。提言には各国が想定する未来のエネルギーシステムが描かれており、これらの提言及び関連の注目動向を詳細に分析すれば、目指すべきシステム、さらにはシステム構築のシナリオを具体化するための有効なエビデンスが得られることになる。

そこで上記想定に基づき、「持続可能なエネルギーの未来」をテーマとする「G-T e C (Global Technology Comparison)」を行った。G-T e Cは、重要な科学技術動向に焦点を当て、各国・地域の状況を分析することで日本のポジションを確認し、今後取るべき戦略の立案に貢献することをミッションとする。

調査には、公開情報に基づく基礎調査、米欧での現地会合などの手法を用いた。第一に、各国動向を概観することで、特徴的動きが見られる地域として米英独仏の4ヶ国を選定した。第二に、これらの国が想定するエネルギービジョンやシステムを把握した。第三に、

エネルギーの中核機関を特定し、システム構築に向けた注目動向を抽出した。その上で、第四に、これらの動きを詳細に分析することで、持続可能なエネルギーの未来を実現するための基本要件を検討した。

a) エネルギーの供給状況

最初に、米英独仏に日本を加え、各国のエネルギー供給状況を調べた。2010年の一次エネルギー供給を見ると、全体の4～5割を発電&熱供給（電力や熱の製造）に、残りを発電&熱供給以外の用途に充てていることが分かる。この内、発電&熱供給には、下記エネルギーが用いられている。

- 米英独日では化石が最大のエネルギー源であり、フランスは原子力が最大となっている。フランスの場合、エネルギー源の8割以上を原子力が占める。
- 化石と原子力を合わせた割合は、米英仏日で全体の9割以上、ドイツで8割以上に達する。

また、発電&熱供給以外の用途には、下記エネルギーが用いられている。

- 米英独仏日のすべてで、エネルギー源の9割あるいはそれ以上を化石が占めている。
- これにバイオ&廃棄物を加えると、全体のほぼ100%に達する。

いずれの国においても、化石と原子力で一次エネルギーのほとんどが賄なわれおり、全体に占める化石の割合は、次のようになっている。

- 米英独日では、2010年時点で、一次エネルギーの8割あるいはそれ以上を化石が占めている。
- フランスは、第二次石油危機以降、発電&熱供給のエネルギー源を原子力にシフトしたため米英独日に比べ値は小さいが、それでも全体の5割を化石で賄っている。
- 1980年以降、一次エネルギーに占める化石の割合は漸減傾向にあるが、各国共に主要エネルギーである状況は変わっていない。

一方、自給状況を見ると、1980年以降、各国における化石の自給率は以下の形で推移している。

- 米英では、自給率が上下に変動しており、2010年時点で7割程度となっている。米国の場合、シェールガス等の増産により、今後の自給率上昇が見込まれている。
- 独仏日では、自給率が継続して低下している。2010年時点の値は、ドイツが23%、

フランスが1%、日本が1%未満となっている。

- 米英と比較し、独仏日の自給率は低く、日本が最も低い値となっている。

これらの分析から、国により事情は異なるが、いずれも限定された自給状況の下で、エネルギー源を化石に大きく依存している状況が明らかになった。持続可能なエネルギーの未来実現に向け、化石から非化石へのエネルギー転換が強く求められている。

b) エネルギーの選択条件

その上で、米英独仏におけるエネルギーの選択条件を調べた。各国の状況は、次のようになっている。

- 原子力については、ドイツが2022年までに全ての原子炉を停止する計画であるのに対し、米英仏は活用を継続する方針となっている。
- 新たな化石資源として注目されるシェールガスやシェールオイルの自国生産については、米国は生産拡大、英国は開発推進の方針を示している。一方、ドイツ及びフランスは、環境影響への懸念から、開発抑制の方向となっている。

さらに、地球温暖化ガスの排出量削減を巡る動きは、次のようになっている。

- ドイツは、2010年9月にまとめたエネルギービジョン「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」において、「1990年対比で、2050年までに排出量を80～95%削減する」ことを目標として明示している。
- 英国は、2010年7月にまとめたエネルギービジョン「2050年までの展望」において、「1990年対比で、2050年までに少なくとも80%削減する」ことを目標として明示している。
- フランスは、2012年2月にまとめたエネルギービジョン「2050年のエネルギー構想」において、削減目標を明示していない。
- 米国は、2011年3月にまとめたエネルギービジョン「未来の安定したエネルギーを確保するための構想」において、削減目標に言及していない。

4ヶ国の中で米国が最も多様な選択肢を有しており、一方で、ドイツは最も厳しい制約下にある。こうした制約の中で、ドイツは地球温暖化ガス排出量を80～95%削減することを目標に掲げ、再生可能エネルギーの割合を電力の80%、最終エネルギー消費の60%まで高めることを目指している。これに対し米国は、再生可能エネルギーに加え、原子力、高効率ガス、クリーン石炭をエネルギー源に用い、新たな産業創出を図っている。

c) 持続可能な未来を実現する要件

上記分析を総合すると、「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通課題に取り組む4ヶ国の中で、「最も厳しいエネルギー源の制約下で、再生可能エネルギーの導入・拡大を図るのがドイツ」であり、「最も多様なエネルギー源を用い、新産業創出を目指すのが米国」という特徴が浮かび上がってくる。

そこで、これらの特徴を踏まえ、ドイツ及び米国を重点に、エネルギーシナリオと研究戦略を巡る動きを詳細に調べた。その上で、現地会合を通じ把握した各国注目機関の動向を考察することで、「持続可能な未来を実現するための基本要件」を検討した。得られた結果をまとめると、次のようになる。

- 1) 持続可能なエネルギーの未来を目指し、各国が「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通の課題に取り組んでいる。「地球温暖化ガスの削減」、「化石資源への依存軽減」及び「新たなエネルギー産業の創出」という3つの社会ニーズが背景にある。
- 2) 2011年3月に福島原発事故が発生し、原子力の位置付けがあらためて問われることになった。このため各国では、エネルギービジョンの再構築が必要となっており、原子力の役割を含め、持続可能なシステムを設定し、基盤となる科学技術を明らかにすることが求められている。
- 3) 各国の動きを整理すると、ドイツは2010年9月に「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」をまとめている。その後、福島原発事故を受けて構想を一部見直し、2011年10月に「エネルギー供給構想の迅速な実現」を発表した。2050年までに地球温暖化ガス排出量を80～95%削減することを目標に、電力消費に占める再生可能エネルギーの割合を80%、最終エネルギー消費に占める割合を60%まで高めることを目指している。
- 4) 英国は2010年7月に「2050年までの展望」をまとめている。2050年までに地球温暖化ガス排出量を少なくとも80%削減することを目標に定め、目標達成のシナリオとして、エネルギー源の構成やエネルギー利用効率などの技術要件を変えた6つのケースを検討している。
- 5) フランスは2012年2月に「2050年のエネルギー構想」をまとめている。原子力の位置付けが異なる4つのケースを検討し、「現時点では、エネルギーに占める原子力の割合について特定目標は定めない」ことを方針として示した。その後、オランダ政権が誕生し、現在は「電力に占める原子力の割合を50%に削減する」ためのシナリオが検討されている。
- 6) 一方、米国は2011年3月に「未来の安定したエネルギーを確保するための構想」をまとめ、二つの目標を定めている。第一が、エネルギー安全保障の確保。シェールガスなどの国内の資源開発を促進することで、化石資源の自給率を高める。第二が、新たなエネルギー産業の創出。具体的には、2035年までに電力の80%をクリーンエネ

ルギーで賄えるようにする。その際、クリーンエネルギーには再生可能エネルギーのほか、原子力、高効率ガス火力、クリーン石炭火力を用いている。

- 7) これらのビジョン及び関連動向を分析すると、米英独仏の取り組みは、以下のように比較整理される。
 - 英独が「地球温暖化ガス排出量の削減」を目標としているのに対し、米国は「化石資源への依存軽減」と「新たなエネルギー産業の創出」に重きを置いている。
 - ドイツが 2022 年までに原子力を廃止する計画であるのに対し、米英仏は使用を継続する方針となっている。
 - 新たな化石資源であるシェールガスの自国生産については、米国は生産拡大、英国は開発推進であるのに対し、独仏は環境影響の懸念から開発抑制の方向となっている。
 - 以上から、「化石から非化石へのエネルギー転換」という共通の課題解決に向け、「最も厳しいエネルギー源の制約下で、再生可能エネルギーの導入拡大を図るのがドイツ」であり、「最も多様なエネルギー源を用い、新産業創出を目指すのが米国」ということになる。
- 8) 上記位置付けを踏まえ、米英独仏の動向分析を総合すると、持続可能なエネルギーの未来を実現するための基本要件として、以下の事項が導き出される。
- 9) 第一の要件として、化石から非化石への転換を図るには、その間のエネルギー源に用いる「橋渡しエネルギー (Bridging Energy)」を設定する必要がある。この橋渡しエネルギーの選択や優先順位付けには、ドイツの取り組みが参考になる。
- 10) ドイツは当初、現在と未来のシステムをつなぐ橋渡しエネルギーとして原子力を用いる計画を立てていた。しかし、福島原発事故を受けて停止時期を前倒ししたため、代替のエネルギーが必要になった。結果として、ドイツは化石エネルギーを代替に選び、2020 年までに火力の発電能力を 10GW 拡充する方策を定めている。その上で、再生可能エネルギーの導入を一層加速する方針を打ち出した。2030 年までに洋上風力を 25GW 増加する計画を、さらに前倒しする方向となっている。
- 11) 原子力を削減または停止する場合、原子力以外の橋渡しエネルギーが必要になる。ドイツの選択に従えば、短期の代替は化石エネルギーとなり、中長期には再生可能エネルギーの導入を加速する必要が生じる。再生可能エネルギーの導入を加速する場合、最も有望な対象は風力となり、ドイツ、英国、米国は、風力を第一の選択肢に位置付けている。
- 12) 第二の要件として、風力などの分散型電源の増強に伴い、「長距離伝送システム」を

整備する必要が生ずる。ドイツでは「北海沿岸の洋上風力をミュンヘン等の南西部で消費するケース」、米国では「テキサスの陸上風力をニューヨーク等の東部で消費するケース」などが想定されている。

- 13) このためエネルギー伝送の研究が活発化しており、ドイツは1億5000万ユーロの予算規模で研究イニシアチブを設定した。米国は2014年度予算の中で、新たなイニシアチブの立ち上げを検討している。
- 14) 第三の要件として、系統制御への再生可能エネルギーの取り込みが増加すると、ガス火力等を用いた出力調整に加え、「エネルギー貯蔵」を拡充する必要が生ずる。
- 15) 上記に対応し、ドイツは自国の揚水発電を最大化し、ノルウェーやアルプスの揚水発電を組み入れることで貯蔵能力を高めていく方針を打ち出し、その上で、エネルギー貯蔵を革新する研究を強化している。2億ユーロの予算で研究イニシアチブを立ち上げ、熱的貯蔵を短中期、化学的貯蔵と電気化学的貯蔵を長期に位置付けた研究を展開している。
- 16) 米国も2012年11月に、エネルギー貯蔵の研究イニシアチブを立ち上げた。5年間に1億2200万ドルを投じ、電気化学的貯蔵の性能を五倍に高め、コストを五分の一に削減することを狙っている。
- 17) 第四の要件として、どのような未来のシナリオを描いても「エネルギー効率」の向上が必須の課題となる。建物、運輸、産業などが検討対象となるが、削減余力が高いことから、建物のエネルギー効率が重視されている。
- 18) 米国では2010年8月に、研究イニシアチブがスタートした。2020年までに商業用建物のエネルギー効率を20%向上する方法を開発することをターゲットに掲げる。ドイツでも都市を対象とした研究イニシアチブが計画されており、太陽エネルギーを活用した建物のエネルギー効率向上が主要課題となっている。
- 19) これらに加え、第五の要件として「太陽エネルギー」の動向に注目していく必要がある。太陽エネルギーは、ドイツなどの特定国を除き、現時点では導入があまり進んでいない。橋渡しエネルギーとしての活用も、風力が優先されている。
- 20) 一方、非化石への転換に伴う新事業創出という面では、太陽エネルギーへの期待が高い。ドイツでは2010年時点で、太陽エネルギーにより12万人を超える雇用が創出されている。米国は長期戦略として太陽エネルギーの研究を継続して支援しており、基礎研究のイニシアチブとして全米46ヶ所に設置されたエネルギーフロンティア研究センターにおいても、約6割のセンターが太陽エネルギーの研究に従事している。
- 21) 化石から非化石への転換を図る今後の展開の中で、太陽エネルギーが「盤面を換える

技術 (Game Changing Technology)」としての役割を果たす可能性があり、したがって、そのための研究戦略が大きな影響を持つ。

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

G-Tec Report

Visions and Research Strategies toward Sustainable Energy Future

平成 26 年 3 月 March 2014

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 海外動向ユニット
Overseas Unit, Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地

電 話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://www.jst.go.jp/crds/report/>

©2013 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission. Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC
CT CTCGCC AATTAATA
TAA TAATC
TTGCAATTGGA CCCC
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC
ATAAGA CTCTA ACT CTCGCC
AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTA ACT CTAAT A TCTAT
CTCGCC AATTAATA
ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTA ACT
CTCGCC AATTAATA

TAAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTA ACT
ATTAATC A AAGA C CT
GA C CTA ACT CTCAGACC

0011 1110 000
00 11 001010 1
0011 1110 000
0100 11100 11100 101010000111
001100 110010
0001 0011 11110 000101

