

CRDS-FY2014-CR-03

ATTAATC A AAGA C CTAAC TCTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC TCTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA C CTAAC TCTCAGACC

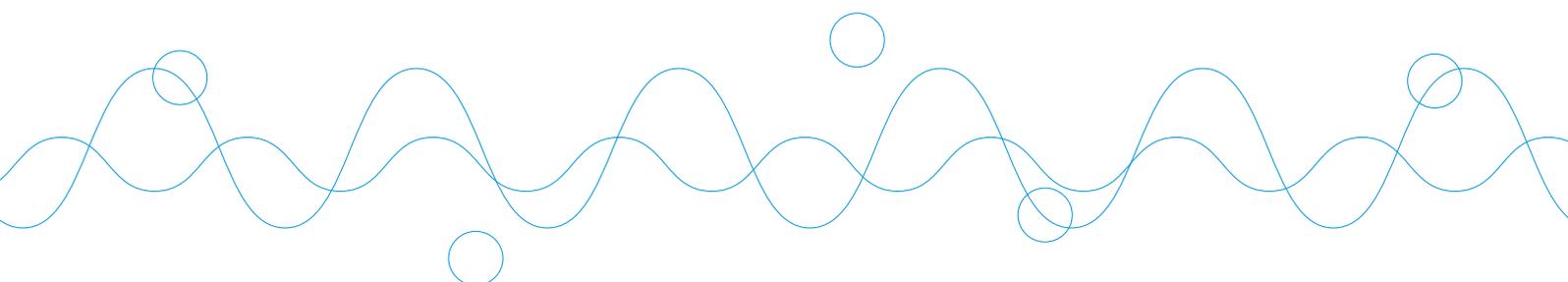
G-TeC報告書

エネルギー分野の科学技術イノベーション

G-TeC Report

Energy Innovation derived
by Science & Technology

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



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリー

各国共通の課題として、科学技術イノベーションの強化が求められている。「科学技術により新たな価値を生み出し、現状の閉塞感を打破する」ことへの社会的期待が背景にある。とりわけ、エネルギーについて科学技術が果たすべき役割は多く、したがって、エネルギー分野は、科学技術イノベーションが求められる代表となっている。

我が国では、2011年8月の第4期科学技術基本計画で科学技術イノベーション政策が打ち出され、2013年6月に「科学技術イノベーション総合戦略」が決定されている。さらに、その後1年間の取り組みを踏まえ、2014年6月には、新たな視点を加えた「科学技術イノベーション総合戦略2014」が発表された。本戦略の中で、科学技術イノベーションの重点対象として、エネルギー（他に、健康長寿、次世代インフラ、地域資源、復興再生）が位置付けられている。

エネルギー分野では、どのような科学技術イノベーションが展開されているのか。実際の動きを追うと、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」という共通課題に取り組んでいることが分かる。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、再生可能エネルギー全体で36万人の雇用がもたらされた。非化石への転換をもたらす科学技術、そこから生まれてくる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。

しかしながら、全体として捉えると、エネルギー分野において科学技術とイノベーションを結びつけることは容易ではない。資源コストや市場動向などに基づく経済性が、科学技術の優劣を超えて、エネルギーシステム全体に影響を及ぼすことが大きな理由である。したがって、こうした経済性の障壁を克服し、個々の研究成果をイノベーションにつなげていくには、従来とは異なる研究開発のアプローチが必要になってくる。

上記に答え、各国では、エネルギー分野の科学技術をイノベーションにつなげるための先駆的取り組みが展開されている。

第一が、市場導入を主眼としたアプローチ。技術的には優れるが、実用性が未知、あるいは経済性に劣る先端科学を対象に「ハイリスク・ハイペイオフ型の研究枠」を提供する。その上で、本枠組みを用い研究開発を行うことで、当該技術の実用性を見極め、経済性を高め、エネルギー市場への導入を促していく。米国エネルギー省が所掌する「エネルギー高等研究計画局（ARPA-E; Advanced Research Projects Agency-Energy）」の取り組みなどが該当する。

第二が、社会導入を主眼としたアプローチ。技術的には優れるが、社会受容性に劣る先端科学を対象に「エネルギーの需要サイドの研究枠」を提供する。その上で、本枠組みを用い研究開発を行うことで、当該技術の社会受容を高め、エネルギーシステムへの導入を促していく。英国研究会議が所掌する「エネルギー需要センター（End

Use Energy Demand Centres) 」の取り組みなどが該当する。

したがって、各国におけるこれらの取り組みを詳細に分析できれば、我が国がエネルギー分野の科学技術イノベーションを強化していく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、「エネルギー分野の科学技術イノベーション」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四ヶ国を選定した。第二に、これらの国で展開されているエネルギー分野の研究開発動向を把握した。第三に、その中から、科学技術とイノベーションを結びつけるための取り組みを抽出した。その上で、第四に、これらの取り組みを詳細に分析することで、科学技術イノベーションを強化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) 各国共通の課題として、エネルギー分野の科学技術イノベーションが強く求められている。「科学技術により新たな価値を生み出し、社会が直面するエネルギー問題を打破する」ことへの大きな期待が背景にある。
- 2) 実際に各国は、持続可能なエネルギーの未来を目指し、「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んでいる。先行するドイツでは、2010年時点で発電に占める再生可能エネルギーの割合が17%に達し、36万人の雇用が創出された。非化石への転換をもたらす科学技術、そこから生まれてくる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。
- 3) しかしながら、全体として捉えると、エネルギー分野において科学技術をイノベーションにつなげることは容易ではない。資源コストや市場動向に基づく経済性が、科学技術の優劣を超えて、エネルギーシステム全体に影響を及ぼすことが大きな理由となっている。
- 4) したがって、こうした経済性の障壁を克服し、個々の研究成果をイノベーションにつなげていくには、従来とは異なる研究開発のアプローチが必要になってくる。上記に応え、各国では、エネルギー分野の科学技術とイノベーションを結びつけるための先駆的取り組みが展開されている。
- 5) 第一が、市場導入を主眼としたアプローチ。技術的には優れるが、実用性が未知、あるいは経済性に劣る先端科学をイノベーションにつなげるための取り組み

になる。代表的事例として、米国エネルギー省が所掌する「エネルギー高等研究計画局」が挙げられる。

- 6) エネルギー高等研究計画局は、米国アカデミー報告書「強まる嵐を超えて (2006年, Rising Above The Gathering Storm)」の提言を受け、「米国競争力法 (2007年, The Americas COMPETES Act)」に基づき 2009年に設置された。米国の競争力強化を目標に、イノベーションにつながるハイリスク研究を支援する枠組みとなっている。
- 7) エネルギー分野の「ハイリスク・ハイペイオフ型のファンディング」を展開しており、国防高等研究計画局 (DARPA; Defence Advanced Projects Research Agency) をモデルに、産業界では取り組むことが困難な「リスクは高いが、大きな成果が期待できる研究」への資金助成を行う。原則として、助成期間は最長 3年、1件当たりの投資総額は 200~500 万ドル、最大 2,000 万ドルに設定されている。
- 8) エネルギー高等研究計画局を「科学技術とイノベーションを結びつける枠組み」として評価した場合、次のような特徴が浮かび上がる。
 - 主として、「基礎研究 (科学原理の探索など)」を「試作」や「実証」につなぐことを目指している。
 - そのために、「技術概念の創出」「技術概念の検証」及び「研究環境下の技術開発・試作」を目的としたプロジェクトを重点的に支援している。
 - プログラムディレクターの“目利き力”をもとに、イノベーションにつながる「ハイリスク・ハイペイオフ型の基礎研究」を選び出している。
 - そのために、プログラムディレクターとして、起業実績や産業界での業務経験を有する人材を数多く登用している。
- 9) すなわち、産業動向を踏まえた目利き力を用い、イノベーションをもたらす基礎研究を特定し、これに重点的支援を加えることで、試作や実証へとつなげる取り組みが、エネルギー高等研究計画局になる。
- 10) 科学技術とイノベーションを結びつける第二の取り組みとして、社会導入を主眼としたアプローチが展開されている。技術的には優れるが、社会受容性に劣る先端科学をイノベーションにつなげる枠組みになる。代表的事例として、英国研

究会議が所掌する「エネルギー需要センター」が挙げられる。

11) エネルギー需要センターは、「英国研究会議のエネルギープログラム（英国におけるエネルギー研究の公的ファンディング、2002年にスタート）」に対する国際評価パネルの報告、及びワークショップの提言に基づき 2011年以降に設置されている。

12) 具体的には、最初に「エネルギープログラムに関する国際評価パネル報告書（2010年, Report of the International Panel for the RCUK Review of Energy 2010）」において、「英国の低炭素化目標達成にはエネルギー需要の削減が必須であり、そのために、英国はエネルギー需要の研究を強化すべきである」旨の勧告が出された。

13) 次いで「英国研究会議エネルギープログラム：エネルギー需要ワークショップ（2011年, RCUK Energy Programme: End-use Energy Demand Workshop）」の中で、エネルギー需要について強化すべき4つの研究対象が、具体的に提示されている。

- ・セクター間の複雑な相互作用に基づく全体システム
- ・個人、グループ、経済レベルでの社会的振る舞い
- ・操作性 (operability)、制御性 (control)、視認性 (visibility) を向上する ICT
- ・貯蔵、伝送、熱改質のための材料科学及び化学

14) 上記を受けて導入された枠組みがエネルギー需要センターであり、6つのセンターが設立されている。当面5年間の活動資金として、英国研究会議が3,000万ポンドを超える資金を用意し、産業界が1,300万ポンドを提供する。

15) エネルギー需要センターを「科学技術とイノベーションを結びつける枠組み」として評価した場合、次のような特徴が浮かび上がる。

- 個々のセクターではなく、「事業・サービス」や「エンドユース」の視点でエネルギー需要を捉えることで、セクターの枠を超えた「システム全体としてのエネルギー効率」を研究している。
- エネルギー技術の価値や有効性を「セクター間の複雑な相互作用に基づく全体

システム」、そして「個人、グループ、経済レベルでの社会的振る舞い」の中で捉えることで、当該技術の社会受容を高めることを目指している。

- そのための体制として、物理学などの自然科学と、経済学や心理学などの人文社会科学の融合が図られている。
- さらに、基盤となる技術として、「エネルギーの操作性、制御性、視認性を革新する ICT」と「エネルギーの伝送、貯蔵、変換を革新する材料科学」が重視されている。

16) すなわち、人文社会科学との連携をもとに、エネルギーの価値を“全体システム”や“社会的振る舞い”の中で捉え、ICTや材料科学を活用しながら、その社会受容を高めていく取り組みが、エネルギー需要センターになる。

17) 以上にまとめたように、エネルギー分野における科学技術イノベーションを目指し、各国独自の戦略として「米国のエネルギー高等研究計画局」や「英国のエネルギー需要センター」などの先駆的取り組みが展開されている。

18) 上記試みが成功した場合、「科学技術イノベーションを強化するための“分野を超えた共通の枠組み”」として機能する可能性があり、したがって、これらの動きを継続して追跡することが極めて重要である。

Executive Summary

G-TeC (Global Technology Comparison) was done on the theme of “Energy Innovation derived by Science & Technology”.

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 innovation, globally. And second, based on these investigations, we considered scenarios and their key factors in order to derive energy innovation by science & technology.

Main results are as follows.

- 1) “Energy innovation derived by science & technology” is strongly desired in many countries. It is because we have common needs to solve energy problems, and create new values through energy innovation.
- 2) Actually, each country has been challenging “energy transition from fossil to non-fossil” toward sustainable future. Germany, as the front runner in this challenge, has already increased ratio of renewables up to 17% at total electricity, and created new jobs of renewables for 360,000 persons.
- 3) Now, global competition has begun where national competitiveness highly

depends on “science & technology for energy”, that enables “energy transition from fossil to non-fossil”, and promotes “industry creation through energy transition”.

- 4) However, in most cases, it is difficult to derive energy innovation by science & technology solely. This is because energy systems are governed by various economic conditions, such as market trends and/or resource costs. Then, it is often occurred that superior technology is not be applied to systems for lack of cost effectiveness.
- 5) Therefore, for applying innovative technology to energy market, it is essential to conquer barrier of cost effectiveness. This means we need different approaches, where science & technology can be combined with innovation. In response to these, each country has been introducing new research methodologies.
- 6) The first methodology is an approach to accelerate implementation of science & technology to market. It is the approach to combine technology with innovation, in case technology is superior as science, but its practicability is unknown and/or cost effectiveness is inferior. “ARPA-E; Advanced Research Projects Agency-Energy”, introduced by U.S. Department of Energy, is a representative in this approach.
- 7) ARPA-E is a funding scheme to support high-risk researches, aiming to increase U.S. competitiveness. It was introduced based on “The National Academies Report; Rising Above The Gathering Storm (in 2006)”, and the following law “The Americas COMPETES Act (in 2007)”.
- 8) ARPA-E funds for “high risk & high pay-off researches”. It supports researches those are too risky for industry-sides, but at the same time, high rewards are expected at their success. In principle, ARPA-E supports each research project with period of 3 years at the longest, and with standard budget of 2~5 million dollars and 20 million at maximum.
- 9) ARPA-E has the following characteristics, as an advanced methodology that combines science & technology with innovation.
 - ARPA-E mainly aims to support basic researches, in order to accelerate their development to “prototype” and/or “demonstration”.

- For these purposes, ARPA-E prioritizes to support researches at “technology concept and/or application formulated”, “analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept” and “component and/or breadboard validation in laboratory environment”, as technology readiness levels.
 - By utilizing “evaluation ability of program directors”, ARPA-E selects promising researches to combine with innovation, among high risk and high pay-off researches.
 - Therefore, as program directors, ARPA-E has appointed persons who experienced to create start-ups and/or work at industries, in many cases.
- 10) To summarize the above, ARPA-E prioritizes basic researches, those are promising to combine with innovation. For selecting them, ARPA-E utilizes evaluation ability of program directors, who are capable to understand industry trends. Then, ARPA-E supports these researches, and accelerates their development to “prototype” and/or “demonstration”.
- 11) The second methodology, that enables to combine energy technology with innovation, is an approach to accelerate implementation of science & technology to social systems. It is the approach to combine technology with innovation, in case technology is superior as science, but its public acceptance is low. “End Use Energy Demand Centres”, introduced by Research Councils UK, is a representative in this approach.
- 12) End Use Energy Demand Centres were introduced since 2011, based on “Report of The International Panel on The Research Councils UK Energy Programme (The Energy Programme is a main public funding for energy researches in UK, started in 2002)”, and “the following workshop about The Energy Programme”.
- 13) Firstly, at “Report of the International Panel for the RUCK Review of Energy 2010” in 2010, it was recommended that research capacity on energy demand should be increased, in order to meet climate change targets in UK.
- 14) Secondly, at “RUCK Energy Programme: End-use Energy Demand

Workshop” in 2011, 4 research areas were identified, where research capacity should be increased on energy demand. These were;

- Social behavior at individual, group, and economic level
- Whole systems approach because of complex interaction between sectors
- Use of ICT in increasing operability, control, and visibility
- Storage, transmission, and upgrading heat and developemts in basic material sciences and chemistry

15) Based on the above, 6 End Use Energy Demand Centres have been established. In order to run these 6 centres for 5 years initially, over 30 million pounds has been committed by Research Councils UK Energy Programme, and further 13 million pounds has been committed by industrial partners.

16) End Use Energy Demand Centres has the following characteristics, as an advanced methodology that combines science & technology with innovation.

- End Use Energy Demand Centres investigate energy demand not at “sectors, but for “services” and/or “end uses”. In these ways, they aim to improve energy efficiency at whole systems, beyond sectors.
- End Use Energy Demnd Centres evaluate energy technologies at “whole systems based on complex interaction between sectors” and/or “social behavior at individual, group, and economic level”. In these ways, they aim to increase public acceptance of energy technologies at social systems.
- In order to realize effective systems for energy demand researches, End Use Energy Demand Centres aim to combine “natural sciences (such as physics)” with “social sciences and humanities (such as economics and psychology)”.
- As fundamental technologis for their researches, End Use Energy Damand Centres prioritize “ICT”, in order to increase operability, control, and visibility of energy systems. And, they also prioritize “material sciences” for innovating energy transmission, storage, and conversion.

- 17) To summarize the above, End Use Energy Demand Centres evaluate energy technologies at “whole systems based on complex interaction between sectors” and/or “social behavior at individual, group, and economic level”, and increase their public acceptance by utilizing ICT and material sciences.
- 18) Each country has been introducing new research methodologies for combining energy technology with innovation. “Advanced Research Projects Agency-Energy” and “End Use Energy Demand Centres” are two representatives, introduced by U.S. and U.K., respectively.
- 19) In case these representatives become successful enough, it is very possible that they work as common methodology to combine technology with innovation, in various fields not only energy. Therefore, from now on, it is important for us to observe them carefully, about their progress, development, and upcoming results.

目 次

エグゼクティブサマリー	1
1. 目的及び方法	12
2. 調査結果	15
2. 1 主要国が掲げるエネルギービジョン	17
2. 1. 1 ドイツ	19
2. 1. 2 英国	21
2. 1. 3 フランス	23
2. 1. 4 米国	24
2. 2 科学技術をイノベーションにつなげる取り組み	26
2. 3 米国の「エネルギー高等研究計画局」	28
2. 3. 1 導入経緯及び背景	29
2. 3. 2 活動状況及び特徴	30
2. 3. 3 枠組みの基本要件	64
2. 4 英国の「エネルギー需要センター」	66
2. 4. 1 導入経緯及び背景	67
2. 4. 2 活動状況及び特徴	69
2. 4. 3 枠組みの基本要件	78
3. 調査結果の総括	80

1. 目的及び方法

各国共通の課題として、科学技術イノベーションの強化が求められている。「科学技術により新たな価値を生み出し、現状の閉塞感を打破する」ことへの社会的期待が背景にある。とりわけ、エネルギーについて科学技術が果たすべき役割は多く、したがって、エネルギー分野は、科学技術イノベーションが求められる代表となっている。

我が国では、2011年8月の第4期科学技術基本計画で科学技術イノベーション政策が打ち出され、2013年6月に「科学技術イノベーション総合戦略」が決定されている。さらに、その後1年間の取り組みを踏まえ、2014年6月には、新たな視点を加えた「科学技術イノベーション総合戦略2014」が発表された。本戦略の中で、科学技術イノベーションの重点対象として、エネルギー（他に、健康長寿、次世代インフラ、地域資源、復興再生）が位置付けられている。

エネルギー分野では、どのような科学技術イノベーションが展開されているのか。実際の動きを追うと、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」という共通課題に取り組んでいることが分かる。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、再生可能エネルギー全体で36万人の雇用がもたらされた。非化石への転換をもたらす科学技術、そこから生まれてくる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。

しかしながら、全体として捉えると、エネルギー分野において科学技術とイノベーションを結びつけることは容易ではない。資源コストや市場動向などに基づく経済性が、科学技術の優劣を超えて、エネルギーシステム全体に影響を及ぼすことが大きな理由である。したがって、こうした経済性の障壁を克服し、個々の研究成果をイノベーションにつなげていくには、従来とは異なる研究開発のアプローチが必要になってくる。

上記に答え、各国では、エネルギー分野の科学技術をイノベーションにつなげるための先駆的取り組みが展開されている。

第一が、市場導入を主眼としたアプローチ。技術的には優れるが、実用性が未知、あるいは経済性に劣る先端科学を対象に「ハイリスク・ハイペイオフ型の研究枠」を提供する。その上で、本枠組みを用い研究開発を行うことで、当該技術の実用性を見極め、経済性を高め、エネルギー市場への導入を促していく。米国エネルギー省が所掌する「エネルギー高等研究計画局（ARPA-E; Advanced Research Projects Agency-Energy）」の取り組みなどが該当する。

第二が、社会導入を主眼としたアプローチ。技術的には優れるが、社会受容性に劣る先端科学を対象に「エネルギーの需要サイドの研究枠」を提供する。その上で、本枠組みを用い研究開発を行うことで、当該技術の社会受容を高め、エネルギーシステ

ムへの導入を促していく。英国研究会議が所掌する「エネルギー需要センター（End Use Energy Demand Centres）」の取り組みなどが該当する。

したがって、各国におけるこれらの取り組みを詳細に分析できれば、我が国がエネルギー分野の科学技術イノベーションを強化していく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、「エネルギー分野の科学技術イノベーション」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「エネルギー研究戦略」の動向分析
- 各国・地域における「エネルギーイノベーション」の動向分析
- これらに基づく「科学技術イノベーションを強化する要件」の検討

調査方法には、「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四ヶ国を選定した。

第二に、これらの国で展開されているエネルギー分野の研究開発動向を把握した。

第三に、その中から、科学技術とイノベーションを結びつけるための取り組みを抽出した。

その上で、第四に、これらの取り組みを詳細に分析することで、科学技術イノベーションを強化するための基本要件を検討した。

前述のように、エネルギー分野において科学技術とイノベーションを結びつけることは容易ではない。市場動向などの経済性が科学技術の優劣を超えてシステム全体に影響をもたらすためであり、実際に本調査の対象地域でも、中国企業が供出する低価格製品が米国やドイツの太陽電池企業に経営危機をもたらす事態が発生している。さらには、新たな化石資源であるシェールガスやシャールオイルの出現が、世界レベルでエネルギー需給状況を大きく変化させている。

本調査では、こうしたエネルギー分野の複雑な動向を踏まえた上で、科学技術をイノベーションにつなげる先駆的取り組みを抽出し、これらのグッドプラクティスとしての特徴を分析した。得られた結果を、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、これらの地域において、どのような科学技術イノベーションが展開されているのかを具体的に調べた。その結果、科学技術をイノベーションにつなげる枠組みとして、二つの先駆的取り組みが行われていることが分かった。

第一が、市場導入を主眼としたアプローチ。技術的には優れるが、実用性が未知、あるいは経済性に劣る先端科学をイノベーションにつなげる枠組みになる。こうした取り組みの代表として、米国エネルギー省が所掌する「エネルギー高等研究計画局 (ARPA-E; Advanced Research Projects Agency-Energy)」の動きが最も注目された。

エネルギー高等研究計画局は、米国アカデミー報告書「強まる嵐を超えて (2006年, Rising Above The Gathering Storm)」の提言を受け、「米国競争力法 (2007年, The Americas COMPETES Act)」に基づき2009年に設置された。米国の競争力強化を目標に、イノベーションにつながるハイリスク研究を支援する枠組みとなっている。

エネルギー分野の「ハイリスク・ハイペイオフ型のファンディング」を展開しており、国防高等研究計画局 (DARPA; Defence Advanced Projects Research Agency) をモデルに、産業界では取り組むことが困難な「リスクは高いが、大きな成果が期待できる研究」への資金助成を行う。原則として、助成期間は最長3年、1件当たりの投資総額は200~500万ドル、最大2,000万ドルに設定されている。

第二が、社会導入を主眼としたアプローチ。技術的には優れるが、社会受容性に劣る先端科学をイノベーションにつなげる枠組みになる。こうした取り組みの代表として、英国研究会議が所掌する「エネルギー需要センター (End Use Energy Demand Centres)」の動きが最も注目された。

エネルギー需要センターは、「英国研究会議のエネルギープログラム (英国におけるエネルギー研究の公的ファンディング、2002年にスタート)」に対する国際評価パネルの報告、及びワークショップの提言に基づき2011年以降に設置されている。

具体的には、最初に「エネルギープログラムに関する国際評価パネル報告書 (2010年, Report of the International Panel for the RCUK Review of Energy 2010)」において、「英国の低炭素化目標達成にはエネルギー需要の削減が必須であり、そのために、英国はエネルギー需要の研究を強化すべきである」旨の勧告が出された。次いで「英国研究会議エネルギープログラム：エネルギー需要ワークショップ (2011年, RCUK Energy Programme: End-use Energy Demand Workshop)」の中で、エネ

ルギー需要について強化すべき研究対象が提示されている。

6つのセンターが設立されており、当面5年間の活動資金として英国研究会議が3,000万ポンドを超える資金を用意し、産業界が1,300万ポンドを提供する。

そこで、上記に基づき「エネルギー高等研究計画局」と「エネルギー需要センター」を調査対象に選び、その「導入経緯及び背景」や「活動状況及び特徴」などを詳細に分析した。その上で、これらの分析結果を総合することで、科学技術イノベーションを強化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 主要国が掲げるエネルギービジョン

各国共通の課題として、エネルギー分野の科学技術イノベーションが強く求められている。「科学技術により新たな価値を生み出し、社会が直面するエネルギー問題を打破する」ことへの大きな期待が背景にある。

我が国では、2011年8月の第4期科学技術基本計画で科学技術イノベーション政策が打ち出され、2013年6月に「科学技術イノベーション総合戦略」が決定されている。さらに、その後1年間の取り組みを踏まえ、2014年6月には「イノベーション総合戦略2014」が発表された。本戦略の中で、科学技術イノベーションの重点対象として、エネルギー（他に、健康長寿、次世代インフラ、地域資源、復興再生）が位置付けられている。

呼応するように、海外では米英独仏が相次いで、2010年以降に「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。

提言には目指すべき未来のシステムやイノベーションのシナリオが描かれており、これらの提言及び関連の注目動向を詳細に分析することで、各国が掲げるエネルギービジョンの内容を把握することができる。

上記分析に基づき明らかにした各国のエネルギービジョンを一覧表の形で比較し、表1にまとめて示した。米英独仏が掲げるビジョンのポイントを整理すると、以下のようになる。

表 1 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

2. 1. 1 ドイツ

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年との対比で、2020年までに20%、2050年までに50%削減する。
- c) 建物について、2008年との対比で、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年との対比で、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

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。
- 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。
 - 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。

2. 1. 3 フランス

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、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。

2. 1. 4 米国

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。

- 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、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。

2. 2 科学技術をイノベーションにつなげる取り組み

前項のビジョンの下で、米英独仏は、エネルギー分野の科学技術イノベーションに取り組んでいる。具体的には、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挑戦している。

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。

非化石への転換をもたらす科学技術、そこから生まれてくる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おり、そのために、科学技術イノベーションの促進が強く求められている。

しかしながら、エネルギー分野において、実際に科学技術をイノベーションにつなげることは容易ではない。資源コストや市場動向に基づく経済性が、科学技術の優劣を超えて、エネルギーシステム全体に影響を及ぼすことが大きな理由である。このため、経済性の障壁を克服し、個々の研究成果をイノベーションにつなげていくには、従来とは異なる研究開発のアプローチが必要になってくる。

上記に応え、各国では、エネルギー分野の科学技術をイノベーションにつなげるための先駆的取り組みが展開されている。第一が、市場導入を主眼としたアプローチ。技術的には優れるが、実用性が未知、あるいは経済性に劣る先端科学を対象に「ハイリスク・ハイペイオフ型の研究枠」を提供する。その上で、本枠組みを用い研究開発を行うことで、当該技術の実用性を見極め、経済性を高め、エネルギー市場への導入を促していく。代表例として、米国エネルギー省が所掌する「エネルギー高等研究計画局（ARPA-E; Advanced Research Projects Agency-Energy）」が挙げられる。

第二が、社会導入を主眼としたアプローチ。技術的には優れるが、社会受容性に劣る先端科学を対象に「エネルギーの需要サイドの研究枠」を提供する。その上で、本枠組みを用い研究開発を行うことで、当該技術の社会受容を高め、エネルギーシステムへの導入を促していく。代表例として、英国研究会議が所掌する「エネルギー需要

センター（End Use Energy Demand Centres）」が挙げられる。

したがって、これらの枠組みのポイントを把握できれば、我が国がエネルギー分野の科学技術イノベーションを強化していくための有効なエビデンスが得られることになる。そこで、「エネルギー高等研究計画局」と「エネルギー需要センター」を分析対象に選び、その「導入経緯及び背景」や「活動状況及び特徴」などを詳細に調べた。

得られた結果を、以下にまとめる。

2. 3 米国の「エネルギー高等研究計画局」

エネルギー分野の科学技術をイノベーションにつなげる先駆的取り組みとして、米国エネルギー省が所掌する「エネルギー高等研究計画局（ARPA-E ; Advanced Research Projects Agency-Energy）」では、市場導入を主眼としたアプローチが展開されている。

具体的には、技術的には優れるが、実用性が未知、あるいは経済性に劣る先端科学を対象に「ハイリスク・ハイペイオフ型の研究枠」を提供する。その上で、本枠組みを用い研究開発を行うことで、当該技術の実用性を見極め、経済性を高め、エネルギー市場への導入を促していく。

ARPA-Eにおける取り組みの詳細を、以下の項目に分けて、次項以降にまとめて整理する。

- ・ 導入経緯及び背景
- ・ 活動状況及び特徴
 - プロジェクトの構成
 - プロジェクトの特徴
 - 位置付けと役割
 - 研究投資の効果
 - プログラムディレクター
 - プログラムの公募
 - プログラムの管理
- ・ 枠組みの基本要件

2. 3. 1 導入経緯及び背景

ARPA-E は、エネルギー省がプログラム部局の新規部門として立ち上げたもので、国防高等研究計画局（DARPA ; Defense Advanced Research Projects Agency）をモデルに、エネルギー分野でのハイリスク・ハイペイオフ型のファンディングを行っている。

2006年に発表された米国アカデミー報告書「強まる嵐を超えて（Rising Above The Gathering Storm）」の提言を受けて、2007年の「米国競争力法（The America COMPETES Act）」で設置が認められた。その後、「米国再生・再投資法（American Recovery and Reinvestment Act）」から配分された400万ドルの資金をもとに、2009年に設立されている。

「強まる嵐を超えて」は、米国議会からの依頼を受けて米国アカデミーが取りまとめた報告書で、「科学技術について連邦政府が取るべき戦略」が記されている。

この中に、ARPA-Eを導入する理由が、以下の形で明示されている。

- 1) 21世紀の国際社会において、米国が繁栄と安全を確保していく競争力の源泉は、科学技術にある。
- 2) 科学技術は「雇用の創出（creating high-quality jobs for American）」及び「持続可能なエネルギー供給（responding to the nation's needs for clean, affordable and reliable energy）」において、特に重要な役割を果たす。
- 3) そのために、連邦政府は、科学技術について取るべき戦略として「研究開発」「イノベーション環境」「高等教育」及び「初等中等教育」を強化していかなければならない。
- 4) その際、研究開発の強化策として、エネルギー分野のDARPA、すなわち「ハイリスク・ハイペイオフ型のエネルギー研究を支援するARPA-E」の導入が必要になってくる。

以上から、ARPA-Eは、ハイリスク・ハイペイオフ型の研究を支援することでエネルギー分野の科学技術イノベーションを促し、米国の競争力強化に貢献していく新たな枠組みであることが確認できる。

基礎ではなく応用研究を対象としており、革新的エネルギー技術をもたらすために、産業界では取り組むことが困難な「リスクは高いが大きな成果が期待できる研究」への資金助成を行う。助成期間は最長3年、1件当たりの投資総額は200～500万ドル、最大2,000万ドルとすることが原則となっている。

2. 3. 2 活動状況及び特徴

米国が科学技術イノベーションを促す枠組みとして導入した ARPA-E について、その活動状況及び特徴を整理すると、次のようになる。

I. プロジェクトの構成

2009年の設立以降、2014年9月時点で363プロジェクト（SBIRやSTTRによるファンディングは除く）が採択されており、これらのプロジェクトに8億8,614万ドル（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2）。

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

6つの研究プログラムで86プロジェクトを採択し、1億9,816万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) 電気化学システムに基づく電力（Reliable Electricity Based on Electrochemical Systems）；

- 13 プロジェクト、33,300,000 ドル
- 伝送網の安定性やセキュリティを高め、再生可能エネルギーの取り込みを容易にするための伝送網向け燃料電池技術、及び従来の伝送網向け高温型燃料電池や自動車向け低温型燃料電池とは異なる中温型燃料電池

e) 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

f) 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 エネルギーの戦略材料

3つの研究プログラムで38プロジェクトを採択し、7,583万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

- c) 広帯域トランジスタ (Strategies for Wide-Band Gap, Inexpensive Transistors for Controlling High Efficiency Systems) ;
 - 6 プロジェクト、12,547,981 ドル
 - 低価格で高効率な広帯域トランジスタの材料、素子構造及び製造工程

④ 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)

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 太陽エネルギー

2つの研究プログラムで19プロジェクトを採択し、4,544万ドルの資金を投入している。

a) 太陽光の最適な活用方策 (Full-Spectrum Optimized Conversion and Utilization of Sunlight) ;

- 12 プロジェクト、30,723,226 ドル
- 低価格で高効率な太陽エネルギーの変換及び貯蔵システム

b) 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

⑦ 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

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 3）。

- ・エネルギー貯蔵 ; 30.0%
- ・バイオエネルギー ; 17.4%
- ・エネルギー伝送 ; 11.1%
- ・化石エネルギー ; 10.3%

表2 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
	電気化学システムに基づく電力	2014年6月	13	33,300,000
	小計	-	86	198,163,976
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
	広帯域トランジスタ	2013年10月	6	12,547,981
	小計	-	38	75,825,092
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
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
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
	太陽光の最適な利用方策	2014年2月	12	30,723,226
	小計	-	19	45,438,140
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
エネルギー全般	第1回包括型提案公募	2009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		-	363	886,135,741

(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3 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	112	265,695,724	30.0
バイオエネルギー	50	154,557,182	17.4
エネルギー伝送	38	97,972,282	11.1
化石エネルギー	43	90,873,489	10.3
太陽エネルギー	31	77,466,658	8.7
エネルギーの戦略材料	38	75,825,092	8.6
エネルギー効率	23	49,945,770	5.6
自動車技術	7	22,756,028	2.6
風力エネルギー	4	18,728,584	2.1
地熱エネルギー	1	9,151,300	1.0
海洋エネルギー	2	1,093,260	0.1
その他	14	22,070,372	2.5
合計	363	886,135,741	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

II. プロジェクトの特徴

ARPA-E の採択プロジェクトについて、「プロジェクトリーダー（プロジェクトの受託機関）」「参画機関（プロジェクトの受託機関と連携機関）」「研究費用」及び「研究期間」に見られる特徴を分析した。具体的には、ハイリスク・ハイペイオフ型の代表である「伝送網（Grid）」を対象とする研究に着目し、本分野で採択されたプロジェクトの内容を調べた。

最初に、ARPA-E の公開データベースを用い、伝送網をテーマとする採択プロジェクトを抽出した。本分野では、5 つ技術区分に渡り、52 件のプロジェクトが採択されている。

- ・ 変電（Gid Modernization ; Conversion） ; 6 プロジェクト
- ・ 送電（Gid Modernization ; Transmission） ; 8 プロジェクト
- ・ 配電（Gid Modernization ; Distribution） ; 10 プロジェクト
- ・ 蓄電（Stationary Storage ; Grid-Scale Batteries） ; 17 プロジェクト
- ・ 部材（Gid Modernization ; Materials） ; 11 プロジェクト

その上で、区分毎に採択プロジェクトの特徴を把握した。結果の詳細については、次項以降にまとめる。これらを総合すると、次の結果が導き出される（表 4）。

- プロジェクトリーダーの構成は、「企業 ; 50%」「大学 ; 42%」「研究所 ; 8%」となっている。
- 参画機関の構成は、「企業 ; 47%」「大学 ; 43%」「研究所 ; 10%」となっている。
- 研究費用については、500 万ドル以内のプロジェクトが、全体の 94%となっている。
- 研究期間については、3 年以内のプロジェクトが、全体の 77%となっている。

プロジェクトリーダー、参画機関のいずれにおいても企業が半数を占めており、類似のファンディングと比較し、「企業の関与度が高い」という特徴が見て取れる。

費用面では 500 万ドル以内のプロジェクトが全体の 9 割を超え、研究期間については約 8 割が 3 年以内となっている。「中規模の資金を用い、短期集中型の研究を行う」ための枠組みとして機能している。

表 4 エネルギー高等研究計画局の「伝送網をテーマとする探採プロジェクト」

区分	プロジェクトリーダー (該当機関数)			参画機関 (該当機関数)		研究費用 (該当プロジェクト数)		研究期間 (該当プロジェクト数)		
	企業	大学	研究所	企業	大学	研究所	500万ドル 以内	500万ドル 超	3年以内	3年超
変電	4	2	0	7	7	1	6	0	4	2
送電	4	3	1	19	12	5	8	0	7	1
配電	2	6	2	8	13	4	10	0	10	0
蓄電	9	7	1	15	13	3	15	2	13	4
部材	7	4	0	15	14	1	10	1	6	5
合計	26	22	4	64	59	14	49	3	40	12

(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

i. 変電

「変電」については、下記 6 プロジェクトが採択されている。

a) 大電力用光学スイッチ (Optical Switches for High-Power Systems)

配線を通じた伝統的信号の代わりに光信号をトリガーとする大容量高圧電流のスイッチング用半導体素子。

- ・受託機関；シリコンパワー
- ・連携機関；クリー、イリノイ大学シカゴ校
- ・研究費用；4,749,920 ドル
- ・研究期間；2013 年 5 月～2016 年 5 月

b) 大電力用ガスチューブスイッチ (High-Power Gas Tube Switches)

事業規模の電力変換を低コスト、高効率、高信頼性で行うガスチューブスイッチ。

- ・受託機関；ゼネラルエレクトリック
- ・連携機関；ウィスコンシン大学、プリンストンプラズマ物理研究所
- ・研究費用；4,071,008 ドル
- ・研究期間；2013 年 4 月～2015 年 4 月

c) 大電力用トランジスタスイッチ (High-Power Transistor Switch)

高圧大容量の電力変換プロセスを簡素化する双方向トランジスタスイッチ。

- ・受託機関；レンセラー工科大学
- ・連携機関；ゼネラルエレクトリック
- ・研究費用；803,907 ドル
- ・研究期間；2013 年 3 月～2016 年 3 月

d) 拡張性のある圧膜磁性体 (Scalable Thick-Film Magnetics)

電力変換用のより小型な磁性部材。

- ・受託機関；ゼネラルエレクトリック
- ・連携機関；ダートマス大学
- ・研究費用；949,533 ドル
- ・研究期間；2011 年 1 月～2012 年 7 月

e) 各種部材を一体化した電力アダプター (Integrated Power Adapter)

小型で持ち運び可能な電子部品のアダプターとして使用できる高効率電力変換器。

- ・受託機関；バージニア工科大学
- ・連携機関；フロリダ大学、テキサス大学ダラス校
- ・研究費用；1,000,000 ドル
- ・研究期間；2010年9月～2013年11月

f) 事業規模の太陽エネルギー発電用の電力コンバーター (Utility-Scale Solar Power Converter)

太陽エネルギーを用いて事業規模で発電した電力を、大型変圧器を用いずに伝送網に取り込む、小型で軽量の電力変換装置。

- ・受託機関；クリー
- ・連携機関；アドバンストエネルギー
- ・研究費用；3,000,000 ドル
- ・研究期間；2012年1月～2016年9月

これらのプロジェクトの特徴を整理すると、次のようになる。

- プロジェクトリーダー（受託機関）は、「企業；4プロジェクト」「大学；2プロジェクト」となっている。
- 参画機関（6プロジェクトの受託機関と連携機関）の構成は、「企業；7機関」「大学；7機関」「研究所；1機関」となっている。
- 研究費用は、全てが「500万ドル以内」となっている。
- 研究期間は、「3年以内；4プロジェクト」「3年超；2プロジェクト」となっている。

ii. 送電

「送電」については、下記 8 プロジェクトが採択されている。

a) リアルタイムの伝送最適化 (Real-Time Transmission Optimization)

伝送網の負荷をより適正に管理するための、伝送容量の未利用分をリアルタイムで評価する高性能コンピューティング。

- ・受託機関；パシフィックノースウェスト国立研究所
- ・連携機関；ボンネビルパワー、パワーワールド、クウォンタテクノロジー
- ・研究費用；1,600,000 ドル
- ・研究期間；2013 年 4 月～2016 年 4 月

b) 伝送網を制御するソフトウェア (Decision-Support Software for Grid Operators)

従来の電力供給量の管理方式に、伝送網の系統間連結をオン・オフする方式を加えることで、電力全体の流れをより効率的に管理するための制御技術。

- ・受託機関；ボストン大学
- ・連携機関；ニュートンエネルギーグループ、ノースウェスタン大学、パラゴンデシジョンテクノロジー、PJMインターコネクション、ポラリスシステムズ オプティミゼーション、バテルグループ、タフツ大学
- ・研究費用；2,361,591 ドル
- ・研究期間；2013 年 4 月～2015 年 6 月

c) 伝送の中断等への自動対応システム (Automated Grid Disruption Response System)

伝送の操作効率を高め、中断等への対応措置を取るためのトポロジー制御。

- ・受託機関；テキサスエンジニアリング実験ステーション
- ・連携機関；アプライドコミュニケーションサイエンシズ、アリゾナ州立大学、グリッドプロテクションアライアンス、テネシー川流域開発公社、カリフォルニア大学バークレー校、ローレンスバークレー国立研究所、オークリッジ国立研究所
- ・研究費用；4,898,405 ドル
- ・研究期間；2012 年 3 月～2015 年 6 月

d) 電力潮流の動的制御装置 (Dynamic Power Flow Controller)

少数分周方式を用いた、小型で低コストの電力潮流制御装置。

- ・受託機関；ヴァレンテック
- ・連携機関；米国電力中央研究所、ジョージア工科大学、SPXトランスフォーマーソリューションズ
- ・研究費用；4,025,950 ドル
- ・研究期間；2012年1月～2015年1月

e) 再生可能エネルギー向けの電力潮流制御装置 (Power Flow Controller for Renewables)

再生可能エネルギーによる電力のルーティング機能を向上した電力潮流制御装置。

- ・受託機関；ミシガン州立大学
- ・連携機関；－
- ・研究費用；2,400,000 ドル
- ・研究期間；2012年2月～2015年2月

f) コスト効率の高いケーブル絶縁 (Cost-Effective Cable Insulation)

高圧直流伝送ケーブル用の低コスト絶縁体。

- ・受託機関；ゼネラルエレクトリック
- ・連携機関；－
- ・研究費用；821,880 ドル
- ・研究期間；2012年2月～2014年5月

g) 分散型電力潮流制御 (Distributed Power Flow Control)

伝送容量の未利用分を適正管理するための電力潮流の制御方策。

- ・受託機関；スマートワイヤグリッド
- ・連携機関；カーネギーメロン大学、エレクトリカルディストリビューションアンドデザイン、ジョージアテックリサーチ、イノベンター、ニューポテトテクノロジー、パワーワールド
- ・研究費用；3,977,745 ドル
- ・研究期間；2012年4月～2014年4月

h) 再生可能エネルギーの伝送網への直接取り込み (Connecting Renewables Directly to the Grid)

電力変換施設を経ずに分散型の再生可能エネルギーを伝送網に直接取り込むための電力伝送用ハードウェア。

- ・受託機関；ゼネラルエレクトリック
- ・連携機関；ノースカロライナ州立大学、レンセラー工科大学
- ・研究費用；4,487,156 ドル
- ・研究期間；2012年1月～2015年1月

これらのプロジェクトの特徴を整理すると、次のようになる。

- プロジェクトリーダー（受託機関）は、「企業；4プロジェクト」「大学（関連機関を含む）；3プロジェクト」「研究所；1プロジェクト」となっている。
- 参画機関（8プロジェクトの受託機関と連携機関）の構成は、「企業（関連機関を含む）；19機関」「大学（関連機関を含む）；12機関」「研究所（関連機関を含む）；5機関」となっている。
- 研究費用は、全てが「500万ドル以内」となっている。
- 研究期間は、「3年以内；7プロジェクト」「3年超；1プロジェクト」となっている。

iii. 配電

「配電」については、下記 10 プロジェクトが採択されている。

a) 電力伝送網のセキュリティ対策 (Power Grid Security)

システム障害やサイバー攻撃へのレジリエンスを高め、電力伝送の信頼性を著しく向上させる、拡張性のある伝送網のモデリング、モニタリング及び分析手法。

- ・受託機関；イリノイ大学アーバナシャンペーン校
- ・連携機関；パワーワールド、マイアミ大学
- ・研究費用；1,500,000 ドル
- ・研究期間；2013 年 4 月～2016 年 4 月

b) 電力システムの位相角変位計測 (Measuring Phase Angle Change in Power Lines)

配電システムの電力データを監視、測定するためのマイクロ位相角計測装置。

- ・受託機関；カリフォルニア大学バークレー校
- ・連携機関；ローレンスバークレー国立研究所、パワースタンダーズラボ
- ・研究費用；4,000,000 ドル
- ・研究期間；2013 年 3 月～2016 年 4 月

c) 電力網用クラウドコンピューティング (Cloud Computing for the Grid)

クラウドコンピューティングを用いて電力網制御を効率化するためのソフトウェアプラットフォーム。

- ・受託機関；コーネル大学
- ・連携機関；ワシントン州立大学
- ・研究費用；1,300,000 ドル
- ・研究期間；2012 年 2 月～2015 年 2 月

d) 高圧直流遮断器 (Low-Insertion HVDC Circuit Breaker)

電力システムのダウンや変圧器破裂などの障害から電力網を守るための、交流遮断器の 100 倍の速さで千分の一秒以内に電流を止めることができる高圧直流遮断器。

- ・受託機関；ゼネラルアトミックス
- ・連携機関；ミシシッピ州立大学
- ・研究費用；2,507,242 ドル
- ・研究期間；2012 年 1 月～2013 年 7 月

e) 電力需要管理 (Integration of Renewables via Demand Management)
電力需要をリアルタイムで制御、管理するためのソフトウェア。

- ・受託機関；オートグリッドシステムズ
- ・連携機関；コロンビア大学、ローレンスバークレー国立研究所
- ・研究費用；3,465,385 ドル
- ・研究期間；2012年1月～2014年3月

f) 拡張型分散自動システム (Scalable Distributed Automation System)
数百万箇所の分散型電源を自動管理するためのシステム。

- ・受託機関；カリフォルニア工科大学
- ・連携機関；サザンカリフォルニアエジソン
- ・研究費用；1,350,000 ドル
- ・研究期間；2012年3月～2015年3月

g) 確率論に基づく電力網用ソフトウェア (Probability-Based Software for Grid Optimization)

米国全体でのエネルギー需給管理を行うための、確率論を用いた制御用ソフトウェア。

- ・受託機関；サンディア国立研究所
- ・連携機関；アルストムグリッド、カリフォルニア大学デービス校、アイオワ州立大学
- ・研究費用；2,999,151 ドル
- ・研究期間；2012年4月～2014年9月

h) 電流制御用磁気増幅器 (Magnetic Amplifier for Power Flow Control)
電力網での電流制御に用いる低コストの磁気増幅器。

- ・受託機関；オークリッジ国立研究所
- ・連携機関；テネシー大学ノックスビル校、SPXトランスフォーマーソリューションズ
- ・研究費用；2,000,000 ドル
- ・研究期間；2012年2月～2014年6月

i) 自律分散型電力網 (Autonomous, Decentralized Grid Architecture)
自律的で分散的な電力網の制御機構及びそのためのソフトウェア。

- ・受託機関；ジョージアテックリサーチ
- ・連携機関；OSIソフト
- ・研究費用；2,000,000 ドル
- ・研究期間；2012年1月～2015年1月

j) 電力事業向け電力ルータ (Utility-Scale Power Router)
電力事業規模で使用可能な低コストの電力ルータ。

- ・受託機関；ジョージアテックリサーチ
- ・連携機関；－
- ・研究費用；998,619 ドル
- ・研究期間；2010年9月～2013年1月

これらのプロジェクトの特徴を整理すると、次のようになる。

- － プロジェクトリーダー（受託機関）は、「企業；2プロジェクト」「大学（関連機関を含む）；6プロジェクト」「研究所；2プロジェクト」となっている。
- － 参画機関（10プロジェクトの受託機関と連携機関）の構成は、「企業；8機関」「大学（関連機関を含む）；13機関」「研究所；4機関」となっている。
- － 研究費用は、全てが「500万ドル以内」となっている。
- － 研究期間は、全てが「3年超」となっている。

IV. 蓄電

「蓄電」については、下記 17 プロジェクトが採択されている。

a) プルシアンブルー色素電池 (Prussian Blue Dye Batteries)

汎用材料であるプルシアンブルー色素を活物質に用いた、電力網向け低コスト蓄電池。

- ・受託機関；アルベオエネルギー
- ・連携機関；－
- ・研究費用；4,000,000 ドル
- ・研究期間；2013 年 2 月～2016 年 2 月

b) ナトリウムイオン蓄電池 (Sodium-Based Energy Storage)

低コスト、長寿命、大容量の電力網向けナトリウムイオン蓄電池。

- ・受託機関；シャープラボラトリーズオブアメリカ
- ・連携機関；オレゴン州立大学、テキサス大学オースチン校
- ・研究費用；2,904,393 ドル
- ・研究期間；2013 年 3 月～2016 年 3 月

c) 有機フロー蓄電池 (Organic Flow Battery for Energy Storage)

低コストの有機分子を活物質に用いた、電力網向けフロー蓄電池。

- ・受託機関；ハーバード大学
- ・連携機関；サステイナブルイノベーションズ
- ・研究費用；4,340,035 ドル
- ・研究期間；2013 年 2 月～2017 年 3 月

d) 有機フロー蓄電池 (Inexpensive, Metal-free, Organic Flow Battery)

有機材料を用いた、低コスト、長寿命、大容量の電力網向けフロー蓄電池。

- ・受託機関；南カリフォルニア大学
- ・連携機関；－
- ・研究費用；719,018 ドル
- ・研究期間；2013 年 3 月～2015 年 2 月

e) 鉄系フロー蓄電池 (All-Iron Flow Battery)

鉄系材料を用いた、低コストの電力網向けフロー蓄電池。

- ・受託機関；ケースウェスタンリザーブ大学
- ・連携機関；－
- ・研究費用；567,804 ドル
- ・研究期間；2013年1月～2014年5月

f) 大容量低コスト超伝導ケーブル (High-Power, Low-Cost Superconducting Cable)

イットリウム・バリウム・銅系酸化物の被覆層を有する、大容量、低コストの超伝導ケーブル。

- ・受託機関；タイヤンリサーチ
- ・連携機関；ノースカロライナ州立大学、ヒューストン大学
- ・研究費用；2,150,081 ドル
- ・研究期間；2013年2月～2016年2月

g) 高電圧フロー蓄電池 (High-Storage Double-Membrane Flow Battery)

交換膜を二重に用いた、高電圧、大容量のフロー蓄電池。

- ・受託機関；デラウェア大学
- ・連携機関；－
- ・研究費用；793,071 ドル
- ・研究期間；2013年1月～2015年12月

h) 大容量カリウム系フロー蓄電池 (High Energy Density Potassium-Based Flow Battery)

大容量、低コストのカリウムイオンフロー蓄電池。

- ・受託機関；テレダインサイエンティフィック&イメージング
- ・連携機関；－
- ・研究費用；556,732 ドル
- ・研究期間；2013年2月～2014年1月

i) 電力網向けナトリウム系蓄電池 (Sodium-Based Batteries for Grid-Scale Storage)

ナトリウム β -アルミナを用いた、低コストで高信頼性の電力網向け蓄電池。

- ・受託機関；イーグルピッチャーテクノロジーズ
- ・連携機関；パシフィックノースウェスト国立研究所
- ・研究費用；7,200,000 ドル
- ・研究期間；2010年2月～2015年7月

j) 伝送網向け蓄電池 (Grid-Scale Batteries)

液体金属電極と熔融塩電解質を用いた、低コストで大容量の蓄電池。

- ・受託機関；マサチューセッツ工科大学
- ・連携機関；レイセオン
- ・研究費用；6,949,584 ドル
- ・研究期間；2010年1月～2013年9月

k) 水素-臭素系フロー蓄電池 (Hydrogen-Bromine Flow Battery)

高効率、長寿命、低コストの、電力網向け水素-臭素系フロー蓄電池。

- ・受託機関；ローレンスバークレー国立研究所
- ・連携機関；ボッシュUSA
- ・研究費用；2,021,977 ドル
- ・研究期間；2010年10月～2013年9月

l) フロー蓄電池用電極 (Advanced Flow Battery Electrodes)

合金材料を電極に用いた、低コストで大容量の亜鉛系フロー蓄電池。

- ・受託機関；プリマスパワー
- ・連携機関；-
- ・研究費用；2,000,000 ドル
- ・研究期間；2010年9月～2012年12月

m) フロー式アルカリ蓄電池 (Flow-Assisted Alkaline Battery)

フロー方式を用いデンドライト形成を制御した、長寿命の電力網向けマンガン蓄電池。

- ・受託機関；ニューヨーク市立大学
- ・連携機関；－
- ・研究費用；3,497,133 ドル
- ・研究期間；2010年9月～2014年12月

n) 空気鉄蓄電池 (Iron-Air Rechargeable Battery)

化合物添加などの方法を用いた、大容量で低コストの電力網向け空気鉄蓄電池。

- ・受託機関；南カリフォルニア大学
- ・連携機関；ジェット推進研究所
- ・研究費用；1,509,324 ドル
- ・研究期間；2010年10月～2013年9月

o) フロー蓄電池用セルスタック (Breakthrough Flow Battery Cell Stack)

セルスタックの構造を刷新した、大容量、低コストのフロー蓄電池。

- ・受託機関；ユナイテッドテクノロジーズ
- ・連携機関；クリッパーウィンドパワーテクノロジーズ、プラットアンドホイットニーロケットダイン、テキサス大学
- ・研究費用；3,599,894 ドル
- ・研究期間；2010年9月～2013年9月

p) 大容量空気亜鉛蓄電池 (High-Power Zinc-Air Energy Storage)

大容量、低コスト、長寿命の電力網向け空気亜鉛蓄電池。

- ・受託機関；フルイディックエネルギー
- ・連携機関；サトコン
- ・研究費用；2,993,128 ドル
- ・研究期間；2010年10月～2013年3月

q) 鉛フロー蓄電池 (Soluble Lead Flow Battery)

大容量、低コストの鉛フロー蓄電池。

- ・受託機関；ゼネラルアトミックス
- ・連携機関；カリフォルニア大学サンディエゴ校
- ・研究費用；1,986,308 ドル
- ・研究期間；2010年9月～2013年8月

これらのプロジェクトの特徴を整理すると、次のようになる。

- プロジェクトリーダー（受託機関）は、「企業；9プロジェクト」「大学；7プロジェクト」「研究所；1プロジェクト」となっている。
- 参画機関（17プロジェクトの受託機関と連携機関）の構成は、「企業；15機関」「大学；13機関」「研究所；3機関」となっている。
- 研究費用は、「500万ドル以内；15プロジェクト」「500万ドル超；2プロジェクト」となっている。
- 研究期間は、「3年以内；13プロジェクト」「3年超；4プロジェクト」となっている。

v. 部材

「部材」については、下記 11 プロジェクトが採択されている。

a) 高出力向け超伝導体 (High-Power Superconductors)

高出力用途の高性能で低コストの超伝導体。

- ・受託機関；グリッドロジック
- ・連携機関；ノースカロライナ州立大学
- ・研究費用；3,828,075 ドル
- ・研究期間；2013 年 3 月～2016 年 3 月

b) 電流制御用半導体 (Semiconductors that improve Electricity Flow)

高圧電流を効率的に制御するスイッチング用半導体。

- ・受託機関；ヘクサテック
- ・連携機関；ノースカロライナ州立大学
- ・研究費用；2,207,291 ドル
- ・研究期間；2013 年 2 月～2015 年 1 月

c) 高性能トランジスタ (High-Performance Transistors)

事業規模のスイッチングに用いる高効率で低コストの部材。

- ・受託機関；ラムゴス
- ・連携機関；－
- ・研究費用；1,224,998 ドル
- ・研究期間；2013 年 2 月～2014 年 4 月

d) 電動機用トランジスタ (Transistors for Electric Motor Drives)

電動機などの電力変換器に用いる、高性能で低コストの窒化ガリウム半導体トランジスタ。

- ・受託機関；トランスフォーム
- ・連携機関；－
- ・研究費用；2,950,000 ドル
- ・研究期間；2010 年 9 月～2013 年 5 月

e) 小型で薄型の電力変換装置 (Compact, Low-Profile Power Converters)
鉄系磁性合金を用いた小型で薄型のパワーモジュール。

- ・受託機関 ; ジョージアテックリサーチ
- ・連携機関 ; テキサスインスツルメンツ
- ・研究費用 ; 1,016,017 ドル
- ・研究期間 ; 2010年9月～2014年2月

f) LED 用パワーエレクトロニクス (Advanced Power Electronics for LED Drivers)

GaN-on-Si 半導体を用い、磁性材料及び回路設計を刷新することでエネルギー効率を高めた LED 用電力回路。

- ・受託機関 ; マサチューセッツ工科大学
- ・連携機関 ; ダートマス大学、ジョージア工科大学、ペンシルバニア大学
- ・研究費用 ; 4,414,003 ドル
- ・研究期間 ; 2010年9月～2013年12月

g) 電力事業用炭化ケイ素半導体 (Utility-Scale Silicon Carbide Semiconductor)
事業規模で適用可能な、炭化ケイ素半導体を用いた低コストで小型のサイリスタ。

- ・受託機関 ; GeneSiC セミコンダクター
- ・連携機関 ; ダウコーニング
- ・研究費用 ; 2,530,949 ドル
- ・研究期間 ; 2010年9月～2013年2月

h) 電圧調整器 (Voltage Regulator Chip)

GaN-on-Si 半導体と軟磁性材料を用いた、小型で高効率の電圧調整器。

- ・受託機関 ; バージニア工科大学
- ・連携機関 ; エンピリオン、インターナショナルレクティファイアー、デラウェア大学
- ・研究費用 ; 1,650,000 ドル
- ・研究期間 ; 2010年9月～2014年7月

i) LED用電力変換器 (Chip-Scale Power Conversion for LED Lighting)

GaN-on-Si 半導体と鉄系磁性合金を用いた、LED用の小型で高効率の電力駆動装置。

- ・受託機関；テレダインサイエンティフィック&イメージング
- ・連携機関；アンソニーインターナショナル、フレクストロニクスインターナショナル、レンセラー工科大学
- ・研究費用；3,439,494ドル
- ・研究期間；2010年10月～2013年7月

j) LDE用キャパシタ (Metacapacitors for LED Lighting)

低コスト、高効率、小型、長寿命の、キャパシタを用いたLED用電力変換器。

- ・受託機関；ニューヨーク市立大学
- ・連携機関；コロンビア大学、カリフォルニア大学バークレー校
- ・研究費用；1,568,278ドル
- ・研究期間；2010年9月～2014年2月

k) 電力事業用炭化ケイ素系トランジスタ (Utility-Scale Silicon Carbide Power Transistors)

従来のトランジスタと比較し、エネルギー効率を50%以上高めた炭化ケイ素系電力トランジスタ。

- ・受託機関；クリー
- ・連携機関；ABB、海軍研究所、ノースカロライナ州立大学、パワーレックス
- ・研究費用；5,600,003ドル
- ・研究期間；2010年9月～2014年4月

これらのプロジェクトの特徴を整理すると、次のようになる。

- プロジェクトリーダー（受託機関）は、「企業；7プロジェクト」「大学（関係機関を含む）；4プロジェクト」となっている。
- 参画機関（11プロジェクトの受託機関と連携機関）の構成は、「企業；15機関」「大学（関係機関を含む）；14機関」「研究所；1機関」となっている。
- 研究費用は、「500万ドル以内；10プロジェクト」「500万ドル超；1プロジェクト」となっている。
- 研究期間は、「3年以内；6プロジェクト」「3年超；5プロジェクト」となっている。

Ⅲ. 位置付けと役割

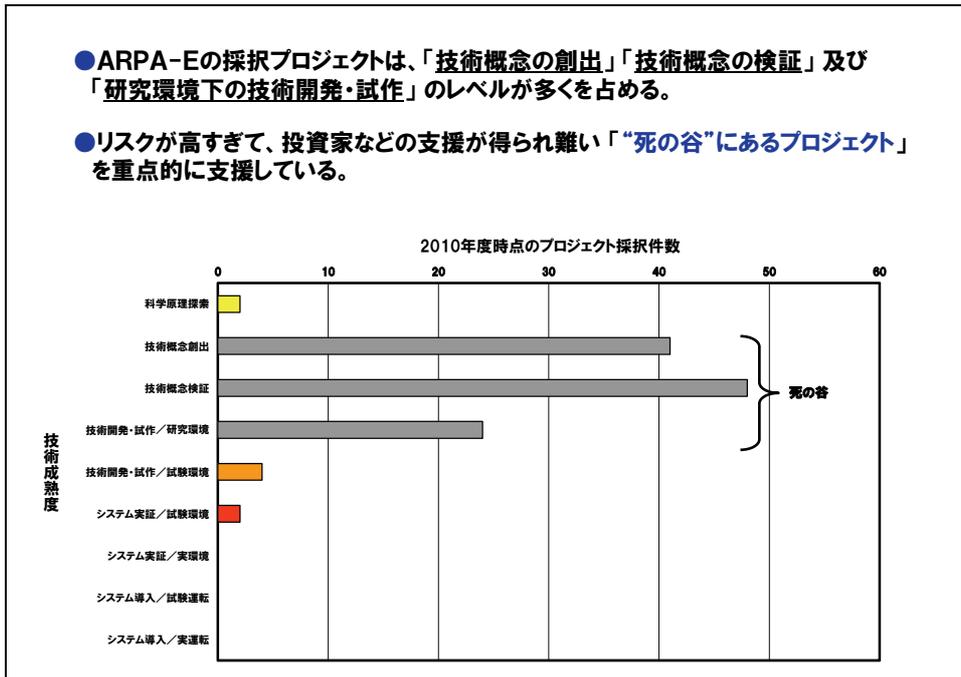
ARPA-E の位置付けについては、米国エネルギー省「ARPA-E FY2010 Annual Report」の中で、次のような説明が示されている（図 1-1）。

- ARPA-E の狙いは、「研究初期段階にある革新的エネルギー技術の開発を促進する」ことにある。
- そのために、技術成熟度 (technology readiness levels) の区分で「技術概念創出 (TRL2 ; technology concept and/or application formulated)」「技術概念検証 (TRL3 ; analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept)」及び「技術開発・試作／研究環境 (TRL4 ; component and/or breadboard validation in laboratory environment)」に相当するプロジェクト、いわゆる「死の谷 (valley of death)」にあるプロジェクトを重点的に支援する。

さらに、米国会計検査院「Report to Congressional Requesters, Department of Energy (January, 2012)」において、次のような説明が示されている（図 1-2）。

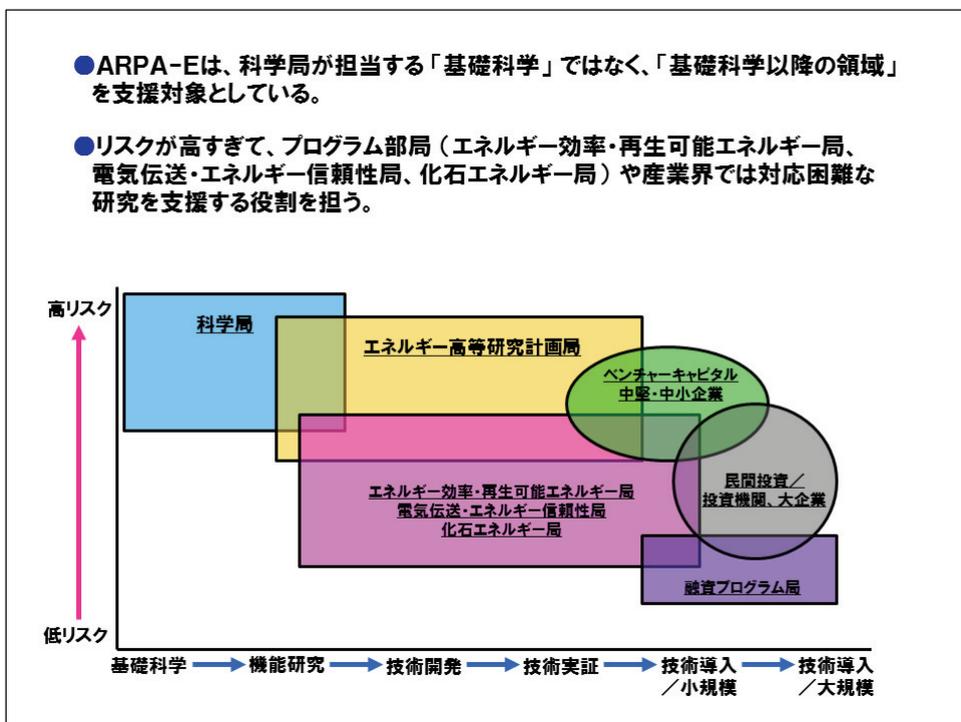
- ARPA-E は、エネルギー省科学局が所掌する「基礎科学 (basic science) の領域」ではなく、「基礎科学以降の領域 (research beyond basic science)」の研究を支援する。
- 加えて、エネルギー効率・再生可能エネルギー局、電気伝送・エネルギー信頼性局、化石エネルギー局などが所掌する「ミドルリスクの領域」ではなく、産業界単独では対応困難な「ハイリスクの領域」の研究を支援する。

すなわち、ARPA-E は「リスクが高すぎて産業界では対応困難な、研究初期段階にある革新的エネルギー技術」の研究を支援する役割を担っている。



(出典)米国エネルギー省「ARPA-E FY2010 Annual Report」に基づき JST・CRDS が作成

図 1-1 エネルギー高等研究計画局の位置付けと役割



(出典)米国会計検査院「Report to Congressional Requesters, Department of Energy (January, 2012)」に基づき JST・CRDS が作成

図 1-2 エネルギー高等研究計画局の位置付けと役割

IV. 研究投資の効果

前項にまとめたように、ARPA-E は「リスクが高すぎて産業界では対応困難な、研究初期段階にある革新的エネルギー技術」を重点的に支援し、いわゆる「研究開発の“死の谷”」を超える力をもたらすことで、科学技術イノベーションに結びつける役割を担っている。

このため ARPA-E は、その研究投資効果を検証する指標として、以下の評価を重視している。

- ・ ARPA-E の採択プロジェクトへの「民間投資」
- ・ ARPA-E の採択プロジェクトからの「起業」
- ・ ARPA-E の採択プロジェクトへの「公的投資」

具体的には、これまで 3 回にわたり、投資効果の分析結果が発表されている。

- 2011 年 2 月と 8 月の発表に拠れば、ARPA-E が 3,910 万ドルを投じた 11 プロジェクトに対し、ベンチャーキャピタルなどを通じ 2 億 1,740 万ドル (ARPA-E による投資額の 5 倍を超える規模) が集まっている。
- 2013 年 2 月に ARPA-E が主催した第 4 回エネルギーイノベーションサミットでは、7,000 万ドルを投じた 17 プロジェクトに 4 億 5,000 万ドルを超える民間投資 (投資額の 6 倍を超える規模) が集まり、12 プロジェクトで起業の動きがあり、10 プロジェクトが実用化に向けた他の政府支援を受けたことが報告されている。
- 2014 年 2 月の第 5 回エネルギーイノベーションサミットでは、9,500 万ドルを投じた 22 プロジェクトに 6 億 2,500 万ドルを超える民間投資 (投資額の 6 倍を超える規模) が集まり、24 プロジェクトでスタートアップ企業が創出され、16 プロジェクトが実用化に向けた他の政府支援を受けたことが報告されている。

ARPA-E の支援により、採択プロジェクトへの投資や起業の動きが徐々に拡大している様子が見て取れる。

V. プログラムディレクター

ARPA-E は、イノベーションをもたらす「ハイリスク・ハイペイオフ型の基礎研究（リスクが高すぎて産業界では対応困難な、研究初期段階にある革新的エネルギー技術）」を選び出すために、「リーダーの“目利き力”」を積極的に活用している。

具体的には、ARPA-E の中核を担うプログラムディレクターに対し、DARPA に類似した「集中したマネジメント権限」を付与している。その結果、ディレクターが主導する形で、独創的プログラムが立ち上がっている。

研究プログラムは、企画段階からディレクターが統括する。したがって、ディレクターには「卓越した研究プログラム構想を有する人材」を優先して登用しており、そのための要件として以下の能力や経験が設定されている。

- ・ エネルギー関連の理学または工学の博士号
- ・ ARPA-E の投資対象となり得る卓越した研究プログラム構想
- ・ 学术界、産業界、技術投資機関等での、少なくとも 6 年～8 年に渡るエネルギー分野の経験
- ・ プログラムマネジメント及び技術移転に対する優れた能力
- ・ 技術及び産業に対する高度の知見
- ・ エネルギーについて少なくとも一つの技術領域に精通し、その領域に関わる広範で学際的な展望を有すること

プログラムディレクターの採用は、3 年間の任期付き契約を基本としている。上記要件に対応し、起業実績や産業界での業務経験を有する人材が数多く登用されている。

2014 年 9 月時点で 16 名のプログラムディレクターが在籍しており、この内、下記 12 名が起業実績や産業界での業務経験を有する人材となっている。

- デーン・ボイセン博士； Superprotonic の創業者
- ジェーソン・ルゴロ博士； earthCell の創業者
- マイケル・ハネイ博士； Applied Photonics の創業者

- ジョナサン・バーバウム博士； Azure Therapeutics 及び Gnosys Consulting の創業者
- ブライアン・ウィルソン博士； Envirofit International 及び Solix BioSystems の創業者
- ラマン・ゴンザレス博士； Glycos Biotechnologies の創業者
- ジョン・レモン博士； ゼネラルエレクトリックでの業務経験
- イーチェン・ザオ博士； ゼネラルエレクトリックでの業務経験
- ソーニャ・グラバスキ博士； ユナイテッド・テクノロジーズ及びハネウエルでの業務経験。
- ピン・リウ博士； HRL Laboratories（ボーイングとGMが共同所有する研究企業）での業務経験
- ジョー・コーネリアス博士； モンサント、ファイザー及びBASFでの業務経験
- エリック・シフ博士； フィッシャーサイエンティフィックでの業務経験

ARPA-E は、「産業動向を踏まえたプログラムディレクターの“目利き力”」を活かすことで、イノベーションにつながる基礎研究を選び出している。

VI. プログラムの公募

ARPA-E の仕組みは、ハイリスク・ハイペイオフ型ファンディングのグッドプラクティスである DARPA を基本に組み立てられている。ただし、研究プログラムの公募については、対象とする研究リスクが異なるため、独自の仕組みを加えている。

- ARPA-E が対象とする研究リスクは、DARPA とは大きく異なる。DARPA は「国防上の研究課題」を克服することが目的であり、そのための研究を完遂すればゴールになる。これに対し、ARPA-E では研究成果が「エネルギー分野の商品創出」に繋がる必要があり、市場性やコスト競争力を加味したテーマ選定が求められる。
- このため、DARPA ではプログラムマネージャー（ARPA-E のプログラムディレクターに相当）が独自にプロジェクト選定を行うのに対し、ARPA-E は「外部専門家によるレビュー方式」を取り入れている。こうして外部専門家の多面的評価を経た上で、提案書の採否をプログラムディレクターが判断している。
- 外部レビューを採用することで、市場性やコスト競争力などの面で実用性に劣る提案書を除外することが可能になる。一方、実用面の評価を重視しすぎると、「斬新で革新性の高い提案書」が選ばれない事態が生ずる。
- そこで、ARPA-E では上記懸念を払拭するため、外部専門家による評価結果がプログラムディレクターに提出された段階で、「評価結果をプロポーザル提案者にも開示し、提案者が希望する場合は、追加説明書（評価内容への異議や研究価値を補強する論拠などを記述）を受け取る」ための仕組みも加えている。

すなわち、ARPA-E のプログラム公募は、DARPA の仕組みを基本とし、これに「外部レビュー」と「追加説明書」を加えた内容となっている。こうした仕組みを付加することで、「ARPA-E のプログラムディレクターが、市場性やコスト競争力を考慮しつつ、研究リスク及びペイオフを適正に評価するための“目利き力”」を高めている。

公募方式は、「提案公募（Funding Opportunity Announcement）」に加え、「包括型提案公募（Open Funding Opportunity Announcement）」の枠組みが用意されている。前者が特定課題を指定したプログラムとなるのに対し、後者はエネルギー全般を対象とした公募として位置づけられる。

ARPA-E は、この包括型公募を一定期間毎に実施することを基本に据えている。包括型は公募対象が広範となるため、必要に応じ、複数のプログラムディレクターが当該プログラムに関与する形を取っている。

Ⅶ. プログラムの管理

プログラム公募を行い、採択プロジェクトを決定した後、ARPA-Eは、原則として二ヶ月以内の迅速さで、プロジェクト受託者と「資金供給契約（Funding Agreements）」を取り交わしている。契約には達成目標やマイルストーンが詳細かつ明確に書き込まれ、達成目標に応じた資金提供条件が設定される。

DARPAと同様に、各種契約について「その他の取引を行う権限（OTA；Other Transaction Authorities）」を活用した柔軟な取り決めが可能になっている。マネジメントの機軸となる資金供給契約を精細かつ迅速に策定することで、ハイリスク型プロジェクトの効率的推進を促している。そのための体制が、DARPAの仕組みを参考に、以下の形で整備されている。

- 資金供給契約の交渉は、プログラムディレクターとプロジェクト受託者が主体となり実施される。プロジェクトの効率的推進を促し、成果の最大化を図るため、ディレクターの全体戦略に合致し、かつ実効性の高い計画となるよう契約が定められる。
- 契約策定の論拠として、技術、財務、プロジェクト管理に関わる多様なエビデンスを揃える必要が生ずる。この精細かつ煩雑な業務を迅速に推進する機能として、外部委託費を用いた支援体制が構築されている。
- 具体的には、各種支援業務を外部の調査機関やコンサルティングファーム等に委託する体制が整備されている。支援業務の範囲に制限は無く、技術、財務、管理などの広範な業務を依頼することができる。

ARPA-Eでは、「四半期報告（Quarterly Report）」と「目標指標（Technical Milestones）」に基づくプロジェクト管理が行われている。目標指標は、「技術開発」と「市場導入（Technology to Market）」の2つの項目から構成されている。これらの指標に基づき3ヶ月毎にプロジェクト進捗度が評価され、評価結果をもとに「プロジェクト継続の可否（Go/No-Go Judgment）」が判断される。

提案書に記載された目標指標は、採択後に「資金供給契約（Funding Agreement）」を交わす段階で、詳細な見直しが行われる。そのために、ARPA-Eの「プログラムディレクター」「技術開発担当スタッフ」及び「市場導入担当スタッフ」の3名がチームとなり、プロジェクト受託者との交渉にあたる。3ヶ月毎のプロジェクト評価段階においても、目標の見直しが必要な場合は、指標の修正が可能な枠組みとなっている。

事務処理を含めた業務全体について、「外部委託機関（ブーズ・アレン・ハミルトン）に5年間、7,310万ドルで委託、支援業務に制限は無く、技術、財務、管理な

どの広範な領域をカバー) 」がサポートする。

以上にまとめたように、ARPA-E では企画、公募、管理のそれぞれの場面で、プログラムディレクターに主要な役割が課される。こうした困難をディレクターが担うのは、ARPA-E において成功を収めると、その後のキャリアパスとして、産業界や政府機関などで活躍する機会が広がる大きなインセンティブとなっている。

2. 3. 3 枠組みの基本要件

前項までにまとめた内容から、ARPA-E の位置付けと役割は、次のようになっていることが分かる。

- ARPA-E の狙いは、「研究初期段階にある革新的エネルギー技術の開発を促進する」ことにある。
- そのために、技術成熟度の区分で「技術概念創出」「技術概念検証」及び「技術開発・試作／研究環境」に相当するプロジェクトを重点的に支援する。
- 基礎科学ではなく「基礎科学以降の領域」を対象とし、産業界単独では対応困難な「ハイリスク研究」への支援を行っている。

すなわち、ARPA-E は「リスクが高すぎて産業界では対応困難な、研究初期段階にある革新的エネルギー技術」の研究を支援する役割を担っている。

その上で、こうした「ハイリスク・ハイペイオフ型の基礎研究」を選び出すために、「リーダーの“目利き力”」を積極的に活用している。

具体的には、ARPA-E の中核を担うプログラムディレクターに対し、DARPA に類似した「集中したマネジメント権限」を付与している。結果として、ディレクターが主導する形で、独創的プログラムが立ち上がっている。ディレクターには「卓越した研究プログラム構想を有する人材」を優先して登用しており、そのための要件として以下の能力や経験が設定されている。

- ・ エネルギー関連の理学または工学の博士号
- ・ ARPA-E の投資対象となり得る卓越した研究プログラム構想
- ・ 学术界、産業界、技術投資機関等での、少なくとも 6 年～8 年に渡るエネルギー分野の経験
- ・ プログラムマネジメント及び技術移転に対する優れた能力
- ・ 技術及び産業に対する高度の知見
- ・ エネルギーについて少なくとも一つの技術領域に精通し、その領域に関わる広範で学際的な展望を有すること

上記要件に対応し、起業実績や産業界での業務経験を有する人材が数多く登用されている。2014年9月時点で16名のプログラムディレクターが在籍しており、この内の12名が起業実績や産業界での業務経験を有する人材となっている。

すなわち、ARPA-Eは「産業動向を踏まえたプログラムディレクターの“目利き力”」を活かすことで、イノベーションにつながる基礎研究を選び出している。

これらの取り組みを「科学技術とイノベーションを結びつける枠組み」として評価した場合、次のような特徴が浮かび上がる。

- 1) 主として、「基礎研究（科学原理の探索など）」を「試作」や「実証」につなぐことを目指している。
- 2) そのために、「技術概念の創出」「技術概念の検証」及び「研究環境下の技術開発・試作」を目的としたプロジェクトを重点的に支援している。
- 3) プログラムディレクターの“目利き力”をもとに、イノベーションにつながる「ハイリスク・ハイペイオフ型の基礎研究」を選び出している。
- 4) そのために、プログラムディレクターとして、起業実績や産業界での業務経験を有する人材を数多く登用している。

すなわち、産業動向を踏まえた目利き力を用い、イノベーションをもたらす基礎研究を特定し、これに重点的支援を加えることで、試作や実証へとつなげる取り組みが、エネルギー高等研究計画局になる。

2. 4 英国の「エネルギー需要センター」

エネルギー分野の科学技術をイノベーションにつなげる先駆的取組みとして、英国エネルギー研究会議が所掌する「エネルギー需要センター (End Use Energy Demand Centres)」では、社会導入を主眼としたアプローチが展開されている。

具体的には、技術的には優れるが、社会受容性に劣る先端科学を対象に「エネルギーの需要サイドの研究枠」を提供する。その上で、本枠組みを用い研究開発を行うことで、当該技術の社会受容を高め、エネルギーシステムへの導入を促していく。

エネルギー需要センターにおける取り組みの詳細を、以下の項目に分けて、次項以降にまとめて整理する。

- ・ 導入経緯及び背景
- ・ 活動状況及び特徴
 - エネルギー需要研究のビジョン
 - エネルギー需要センターの構成
 - エネルギー疫学という新領域
- ・ 枠組みの基本要件

2. 4. 1 導入経緯及び背景

エネルギー需要センターは、英国のエネルギー研究を支える公的ファンディングである「英国研究会議・エネルギー研究プログラム（2002年にスタート）」を基盤に、エネルギー需要に特化した研究に取り組んでいる。

2010年に発表された「エネルギープログラムに関する国際評価パネル報告書（Report of the International Panel for the RCUK Review of Energy 2010）」、及び2011年3月に開催された「英国研究会議・エネルギープログラム：最終エネルギー需要ワークショップ（RCUK Energy Programme: End-use Energy Demand Workshop）」の提言を受けて、以下の経緯にて2011年以降に設立されている。

- 英国は、2008年制定の気候変動法で「地球温暖化ガス排出量を、2050年までに1990対比で、少なくとも80%削減する」ことを定めている。
- エネルギー気候変動省が策定したシナリオ（2010年7月に発表した“2050年までの展望”）に従えば、そのために「エネルギー需要を26～43%削減する」ことが必要になる。
- この「エネルギー需要を26～43%削減する」という極めて高い目標を達成するには、基盤となる科学技術イノベーションを実現しなければならない。
- 上記に応え、2010年に発表された「エネルギープログラムに関する国際評価パネル報告書」の中で、「英国の低炭素化目標達成にはエネルギー需要の削減が必須であり、そのための方策としてエネルギー需要の研究を強化すべきである」旨の勧告が出された。
- さらに、2011年3月に開催された「英国研究会議・エネルギープログラム：最終エネルギー需要ワークショップ」では、エネルギー需要について今後優先して投資すべき研究として、4つの領域が示されている。
 - 個人、グループ、経済レベルでの社会的振る舞い
 - セクター間の複雑な相互作用を踏まえた全体システム
 - ICTを活用した操作性（operability）、制御性（control）、視認性（visibility）
 - 材料科学及び化学；伝送、貯蔵、熱の改質（upgrading heat）など

- これらの提言を受けて、エネルギー需要に関する研究を強化するための枠組みとして、「エネルギー需要研究センター」が導入されている。

以上から、エネルギー需要センターは、エネルギーの需要サイドの研究を支援することで科学技術イノベーションを促し、英国の低炭素化目標達成に貢献していく新たな枠組みであることが確認できる。

2. 4. 2 活動状況及び特徴

英国が科学技術イノベーションを促す枠組みとして導入したエネルギー需要センターについて、その活動状況及び特徴をまとめると、次のようになる。

I. エネルギー需要研究のビジョン

英国研究会議は、低炭素化目標の達成を可能とする科学技術イノベーションをもたらすために、次のような「エネルギー需要研究のビジョン」を掲げている。

- 1) エネルギー需要は、複雑な全体システムの中から生まれてくる。
- 2) したがって、「セクター」に着目し「産業」や「運輸」などの個別部門の動向を分析する従来のアプローチだけでは、その実態を把握することが難しい。
- 3) 「事業・サービス」や「エンドユース」に着目したアプローチが必要であり、「エネルギー供給から最終消費に至る全段階を対象としたトータルのエネルギー効率」、さらには「事業・サービスやエンドユースそれ自体」を改善、革新していく取り組みが求められる。
 - 検討対象となる事業・サービスとして、「材料 (Structural Materials)」「暮らし」「衛生」「コミュニケーション」「照明」「熱利用 (Thermal Comfort)」「乗客及び貨物輸送」などが挙げられる。
 - 検討対象となるエンドユースとして、「食糧」「健康」「教育」「娯楽」「暖房」「冷房及び冷蔵」「旅行」などが挙げられる。
- 4) 上記に応えるため、エネルギー需要センターは、以下の研究課題を優先対象に位置づけ、広範で、課題解決型で、学際的な研究に取り組む。
 - 個人、グループ、経済レベルでの技術変化と社会行動の相互関係
 - 社会実装 (social practices) がエネルギー需要に及ぼすインパクト
 - 全体システムにおけるセクター間の複雑な相互作用
 - エネルギー需要に変化をもたらす製品、装置、建物
 - エネルギー需要の大幅削減を可能にする多様な規模のインフラ

- 操作性 (operability)、制御性 (control)、視認性 (visibiity) を向上する ICT
- 事業・サービスとしての「エネルギー伝送」「エネルギー貯蔵」「エネルギー変換」、及びこれらの改善に用いる「材料科学や技術」

エネルギー需要センターは、「事業・サービス」や「エンドユース」の視点でエネルギー需要を捉え、セクターの枠を超えた「システム全体としてのエネルギー効率」を研究し、これを ICT や材料科学などで革新していくことを目指している。

II. エネルギー需要センターの構成

前項のビジョンの下で、需要サイドの研究を強化する仕組みとして、エネルギー需要センターが導入された。英国研究会議・エネルギー研究プログラムからの3,000万ポンドを超える資金に加え、産業界のパートナーが用意した1,300万ポンドの資金をもとに、6つのセンターが設置されている。

本資金を用い、最初の5年間の研究活動が展開される。

i. イノベーション&エネルギー需要センター (Centre on Innovation and Energy Demand)

「サセックス大学の“エネルギー&環境政策”」「マンチェスター大学の“イノベーション&持続可能性システム”」及び「オックスフォード大学の“地理学”」の研究者が全体を統括している。エネルギー需要削減をもたらすイノベーションの実現を目指し、以下の課題に取り組んでいる。

- a) エネルギー需要の削減をもたらすイノベーションにはどのようなタイプがあり、どのようにして生まれ、どのように広がっていくのか (understand how different types of low energy innovation emerge and diffuse in various end use sectors)。
- b) エネルギーイノベーションをもっと速く広げるには、どうすればいいのか (identify how more rapid diffusion can be achieved)。
- c) 対象とするエネルギーイノベーションは、エネルギー需要及び炭素排出に、どのようなインパクトをもたらすのか (assess the corresponding impacts on energy demand and carbon emissions)。
- d) 英国のエネルギー、輸送、環境政策は、どのように在るべきか (provide practical recommendations for UK energy, transport and climate policy)。

ii. エネルギー&移送&需要動態センター (Dynamics of Energy, Mobility and Demand Centre)

「ランカスター大学の“社会学”と“環境学”」の研究者が全体を統括している。英国の低炭素化目標達成を可能にするエネルギー需要の管理を目指し、以下の課題に取り組んでいる。

- a) 様々な規模において、エネルギー需要をどのように管理するのか (identify and explore new opportunities for demand management at different scales)。

- b) エネルギー需要をどのように把握し、どのように管理するのか (achieve a step change in how energy demand is understood and managed) 。
- c) 何のためにエネルギーが必要になるのか (confront fundamental issues of demand: what is energy for ?) 。
- d) エネルギー需要は、どのようにして生まれ、どのように変化するのか (establish a vibrant, interdisciplinary, internationally significant, intellectually exciting, policy relevant centre capable of tackling fundamental questions: how are patterns of energy demand changing; how do they vary, how is demand built and how it is reproduced ?) 。
- e) 英国の低炭素化目標達成には、どのようなエネルギー需要管理が求められるのか (involve and engage policymakers, businesses, regulators, NGOs and other stakeholders and bring disparate non-academic communities together to explore and develop styles and strategies of intervention and demand management to help meet the UK's greenhouse gas emissions targets) 。
- f) 様々な規模において、産業や運輸などの個別部門ではなくシステム全体を対象とし、エネルギー需要を管理していくにはどうすればよいのか (make a significant contribution to the theory and practice of energy demand management at different scales and across sectorial boundaries) 。
- g) 上記のために必要となる「学際研究の訓練、人材育成、国際連携を展開する場」を構築していくにはどうすればよいのか (provide a platform for interdisciplinary research training, capacity building and strategic international exchange, collaboration, influence and insight) 。

iii. インデマンドセンター (UK Indemand Centre)

「ケンブリッジ大学の“環境工学”」「バース大学の“機械工学”」「リーズ大学の“環境経済学”」及び「ノッティンガムトレント大学の“持続可能性”」の研究者が全体を統括している。産業用途で使用されるエネルギー及びエネルギー多消費型材料 (energy-intensive materials) の削減を目指し、以下の課題に取り組んでいる。

- a) 個別部門ではなくシステム全体として捉えた場合、材料及びエネルギーの需要動向はどうなっているのか (analysis: mapping current and forecast demand for

materials and energy across sectors)。

- b) 製品の製造に用いた材料、その製品の寿命、製品への購買意欲はどうか (understanding: identifying the products which drive material demand and examining attitudes towards product lifetimes and purchasing decisions)。
- c) 建設や製造の材料効率を高めることで、どのような利益がもたらされるのか (innovation: identifying the benefits of materially efficient design in construction and exploring opportunities where manufacturing processes could reduce end-use demand of material)。
- d) 英国産業にどのような革新を起こせば、買い手と売り手が材料効率を重視する状況が生まれるのか (delivering: using the techniques of precedence studies to examine how innovations in UK industry will influence energy demand and predict the conditions under which purchasers and businesses would opt for material efficiency)。

iv. 貯蔵 & 変換 & 熱エネルギー改質センター (Interdisciplinary Centre for Storage, Transformation and Upgrading of Thermal Energy)

「ウォーリック大学の“エネルギー工学”」及び「ローボロー大学の“電気・電子工学”」の研究者が全体を統括している。高効率な熱需給システムの実現を目指し、以下の課題に取り組んでいる。

- a) どうすれば社会的、技術的、及び経済的に導入が可能で、コストレベルも妥当である高効率な熱システムを実現できるのか (develop a portfolio of socially, technically and economically viable systems that deliver heat and cool with high efficiency and enable this target to be met in a cost effective way)。
- b) 当該システムの導入を加速し、短期及び長期双方の展望において顕著なエネルギー需要の削減をもたらすには、事業、インフラ、及び技術についてどのようなシナリオを描く必要があるのか (create a robust roadmap identifying business, infrastructure and technology requirements to accelerate implementation and achieve significant end use energy demand reduction both in the near term and to 2050)。
- c) どうすれば個々の部門を超えて適用可能な解決策を提供できるのか (provide exemplar solutions applicable generically in more than one sector)。

v. 食物連鎖&持続的エネルギー利用センター (Centre for Sustainable Energy Use in Food Chains)

「ブルネル大学の“機械工学”」「マンチェスター大学の“持続可能性”」及び「バーミンガム大学の“化学工学”」の研究者が全体を統括している。高効率な食糧需給システムの実現を目指し、以下の課題に取り組んでいる。

- a) 食物連鎖におけるエネルギー需要を削減する最適な方法とは、どのようなものなのか (identify optimal ways for reducing energy use in food chains, exploring a number of scenarios to consider different configurations of food chains, UK energy prices and policy decisions)。
- b) 原材料の適正化や製造エネルギーの削減により、食物連鎖のエネルギー需要を削減する技術とは、どのようなものなのか (investigate technologies for reducing energy use at all stages of the chain, by optimization of resource use, or by lowering the energy needs of individual food-manufacturing processes from thermal treatment and pasteurization, to mixing, baking, drying, cooling and freezing)。
- c) 人口統計学的変化や持続可能な生活意識に根ざした食行動の変化が食物連鎖やエネルギー需要に与える影響を含め、集団及び個人レベルにおける食糧消費はどうなっていくのか (consider both corporate and individual consumer behavior alongside other factors such as changing demographics and increasing awareness of sustainable living on food consumption trends and how these affect food chain structure and energy use)。

vi. エネルギー疫学センター (RCUK Centre for Energy Epidemiology)

「ユニヴァーシティカレッジ・ロンドンの“エネルギー&環境学”」の研究者が全体を統括している。エネルギー需要を革新するための新たなエビデンスの創出を目指し、以下の課題に取り組んでいる。

- a) 部門、人、システム、インフラに関わるエネルギー需要の膨大なデータに疫学的手法を適用することで、エネルギー需要管理におけるパラダイムシフトは起こるのか (precipitate a paradigm shift in the way we understand energy demand through the development of new research methods and tools – specifically, application of epidemiological methods to large, linked data sets on energy demand across sectors, people, energy systems and infrastructure)。

b) 人、エネルギー消費、技術システム間の複雑な相互作用を、どうすれば理解することができるのか (understand complex interactions between people, energy use and systems of technology)。

c) 低炭素化目標の達成を可能にする、政策、市場、製品、サービス、システムのイノベーションを促すために、どのような新たなエビデンスが必要になるのか (provide a step change in provision of evidence to support innovation in policy, markets, products, services and systems to meet carbon targets over the critical coming half century)。

6つのセンターの内、3センターが「事業・サービス」や「エンドユース」に着目した研究を展開している。

- ・ インデマンドセンター；産業用途で使用されるエネルギー及びエネルギー多消費型材料の削減
- ・ 貯蔵&変換&熱エネルギー改質センター；高効率な熱需給システムの実現
- ・ 食物連鎖&持続的エネルギー利用センター；高効率な食糧需給システムの実現

さらに、下記3センターが「個人、グループ、経済レベルでの技術変化と社会行動の相互関係」や「全体システムにおけるセクター間の複雑な相互作用」に重きを置いた研究を展開している。

- ・ イノベーション&エネルギー需要センター；エネルギー需要削減をもたらすイノベーションの実現
- ・ エネルギー&移送&需要動態センター；英国の低炭素目標達成を可能にするエネルギー需要の管理
- ・ エネルギー疫学センター；エネルギー需要を革新するための新たなエビデンスの創出

中でも、エネルギー疫学センターは「エネルギー疫学」という新たな学術領域の創出に取り組んでおり、今後の動向が注目される。

Ⅲ. エネルギー疫学という新領域

エネルギー疫学センターは、エネルギー分野における英国のこれまでの取り組みを、以下のように捉えている。

- 1) 英国は、2008年制定の気候変動法で「地球温暖化ガス排出量を、2050年までに1990年対比で、少なくとも80%削減する」ことを定めた。
- 2) その結果、上記目標達成のため、「全ての建物からの温暖化ガス排出をほぼゼロ」に近づけ、かつ「輸送による温暖化ガス排出を相当量削減」することが求められるようになった。
- 3) このため、技術及び政策の両面で多大な投資を行ってきたが、英国の建物及び輸送のエネルギー消費は1970年から2000にかけて連続して増加し、以後も減少の兆しを見せていない。

「何故、多大な投資が必要削減につながらなかったのか」、センターはその理由を次のように分析している。

- 1) これまでの取り組みでは、エネルギー需要削減に優れた技術や装置を開発しても、実際のエネルギーシステムに実装すると、多くのケースで性能から期待される効果が得られなかった。
- 2) つまり、エネルギー需要削減のための「理論」と、実践した「結果」が結びついてこなかった。
- 3) その理由は、エネルギー需要の動きを、主として「物理学」の視点、特に「熱力学」の視点で捉えてきたことによる。
- 4) 物理学は「個々のエネルギー変換の事象」は説明できるが、「複雑なエネルギーシステムにおけるエネルギー需要の動き」を捉えることはできない。
- 5) すなわち、「技術」と「人」の間の複雑な相互作用によって決まってくる「エネルギー需要の本当の動きを把握する (real world validation)」ことができない。
- 6) したがって、物理以外の学術、具体的には「エネルギーに対する人の目的や選択を読み解くための科学」、いわゆる「人間科学 (human sciences)」を取り入れることが必要になってくる。

7) こうして物理学と人間科学を融合することで、「エネルギー需要削減につながるイノベーション (energy use in an emergent phenomenon)」を実現することがはじめて可能になる。

これらを受けてセンターは、「エネルギー需要の本当の動きを把握する」ための方策として、下記戦略を掲げた。

- 1) エネルギー需要に対する人の行動を認知し、理解するための新たな方法及びツールを開発する。
- 2) 具体的には、エネルギー分野における人、システム、インフラ、セクターの動きに関わるビッグデータを、疫学的手法で解析する方法を構築する。
- 3) その上で、構築した方法を用い、低炭素化の目標に合致した政策、市場、サービス、システム、製品の具体化に役立つエビデンスを提供していく。
- 4) そのために、エネルギー需要の研究に「疫学」「心理学」及び「生理学」を取り入れる。

エネルギー疫学センターは、従来の「エネルギー需要を予測する (bottom-up modeling)」ための学術に加え、「エネルギー需要の本当の動きを把握する (top-down view)」ことを可能にする新たな学術領域の創出を目指している。

2. 4. 3 枠組みの基本要件

前項までに整理したように、6つのエネルギー需要センターが設立されており、この内の3センターが「事業・サービス」や「エンドユース」に着目した研究を展開している。

- ・ インデマンドセンター；産業用途で使用されるエネルギー及びエネルギー多消費型材料の削減
- ・ 貯蔵&変換&熱エネルギー改質センター；高効率な熱需給システムの実現
- ・ 食物連鎖&持続的エネルギー利用センター；高効率な食糧需給システムの実現

さらに、下記3センターが「個人、グループ、経済レベルでの技術変化と社会行動の相互関係」や「全体システムにおけるセクター間の複雑な相互作用」に重きを置いた研究を展開している。

- ・ イノベーション&エネルギー需要センター；エネルギー需要削減をもたらすイノベーションの実現
- ・ エネルギー&移送&需要動態センター；英国の低炭素目標達成を可能にするエネルギー需要の管理
- ・ エネルギー疫学センター；エネルギー需要を革新するための新たなエビデンスの創出

これらの取り組みを「科学技術とイノベーションを結びつける枠組み」として評価した場合、次のような特徴が浮かび上がる。

- 1) 個々のセクターではなく、「事業・サービス」や「エンドユース」の視点でエネルギー需要を捉えることで、セクターの枠を超えた「システム全体としてのエネルギー効率」を研究している。
- 2) エネルギー技術の価値や有効性を「セクター間の複雑な相互作用に基づく全体システム」、そして「個人、グループ、経済レベルでの社会的振る舞い」の中で捉えることで、当該技術の社会受容を高めることを目指している。
- 3) そのための体制として、物理学などの自然科学と、経済学や心理学などの人文社

会科学の融合が図られている。

- 4) さらに、基盤となる技術として、「エネルギーの操作性、制御性、視認性を革新する ICT」と「エネルギーの伝送、貯蔵、変換を革新する材料科学」が重視されている。

すなわち、人文社会科学との連携をもとに、エネルギーの価値を“全体システム”や“社会的振る舞い”の中で捉え、ICT や材料科学を活用しながら、その社会受容を高めていく取り組みが、エネルギー需要センターになる。

3. 調査結果の総括

各国共通の課題として、科学技術イノベーションの強化が求められている。「科学技術により新たな価値を生み出し、現状の閉塞感を打破する」ことへの社会的期待が背景にある。とりわけ、エネルギーについて科学技術が果たすべき役割は多く、したがって、エネルギー分野は、科学技術イノベーションが求められる代表となっている。

我が国では、2011年8月の第4期科学技術基本計画で科学技術イノベーション政策が打ち出され、2013年6月に「科学技術イノベーション総合戦略」が決定されている。さらに、その後1年間の取り組みを踏まえ、2014年6月には、新たな視点を加えた「科学技術イノベーション総合戦略2014」が発表された。本戦略の中で、科学技術イノベーションの重点対象として、エネルギー（他に、健康長寿、次世代インフラ、地域資源、復興再生）が位置付けられている。

エネルギー分野では、どのような科学技術イノベーションが展開されているのか。実際の動きを追うと、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」という共通課題に取り組んでいることが分かる。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、再生可能エネルギー全体で36万人の雇用がもたらされた。非化石への転換をもたらす科学技術、そこから生まれてくる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。

しかしながら、全体として捉えると、エネルギー分野において科学技術とイノベーションを結びつけることは容易ではない。資源コストや市場動向などに基づく経済性が、科学技術の優劣を超えて、エネルギーシステム全体に影響を及ぼすことが大きな理由である。したがって、こうした経済性の障壁を克服し、個々の研究成果をイノベーションにつなげていくには、従来とは異なる研究開発のアプローチが必要になってくる。

上記に応え、各国では、エネルギー分野の科学技術をイノベーションにつなげるための先駆的取り組みが展開されている。

第一が、市場導入を主眼としたアプローチ。技術的には優れるが、実用性が未知、あるいは経済性に劣る先端科学を対象に「ハイリスク・ハイペイオフ型の研究枠」を提供する。その上で、本枠組みを用い研究開発を行うことで、当該技術の実用性を見極め、経済性を高め、エネルギー市場への導入を促していく。米国エネルギー省が所掌する「エネルギー高等研究計画局（ARPA-E; Advanced Research Projects Agency-Energy）」の取り組みなどが該当する。

第二が、社会導入を主眼としたアプローチ。技術的には優れるが、社会受容性に劣る先端科学を対象に「エネルギーの需要サイドの研究枠」を提供する。その上で、本枠組みを用い研究開発を行うことで、当該技術の社会受容を高め、エネルギーシステムへの導入を促していく。英国研究会議が所掌する「エネルギー需要センター（End

Use Energy Demand Centres) 」の取り組みなどが該当する。

したがって、各国におけるこれらの取り組みを詳細に分析できれば、我が国がエネルギー分野の科学技術イノベーションを強化していく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、「エネルギー分野の科学技術イノベーション」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四ヶ国を選定した。第二に、これらの国で展開されているエネルギー分野の研究開発動向を把握した。第三に、その中から、科学技術とイノベーションを結びつけるための取り組みを抽出した。その上で、第四に、これらの取り組みを詳細に分析することで、科学技術イノベーションを強化するための基本要件を検討した。

a) 米国の「エネルギー高等研究計画局」

最初に、米英独仏での科学技術とイノベーションを結びつける動きの中から、市場導入を主眼としたアプローチとして注目される「エネルギー高等研究計画局 (ARPA-E; Advanced Research Projects Agency-Energy) 」の取り組みを調べた。

ARPA-E は、エネルギー省がプログラム部局の新規部門として立ち上げたもので、国防高等研究計画局 (DARPA ; Defense Advanced Research Projects Agency) をモデルに、エネルギー分野でのハイリスク・ハイペイオフ型のファンディングを行っている。2006年に発表された米国アカデミー報告書「強まる嵐を超えて (Rising Above The Gathering Storm) 」の提言を受けて、2007年の「米国競争力法 (The America COMPETES Act) 」で設置が認められた。その後、「米国再生・再投資法 (American Recovery and Reinvestment Act) 」から配分された400万ドルの資金をもとに、2009年に設立されている。

基礎ではなく応用研究を対象としており、革新的エネルギー技術をもたらすために、産業界では取り組むことが困難な「リスクは高いが大きな成果が期待できる研究」への資金助成を行う。助成期間は最長3年、1件当たりの投資総額は200~500万ドル、最大2,000万ドルとすることが原則となっている。ARPA-Eの位置付けと役割は、次のように整理できる。

- 1) ARPA-Eの狙いは、「研究初期段階にある革新的エネルギー技術の開発を促進する」ことにある。
- 2) そのために、技術成熟度の区分で「技術概念創出」「技術概念検証」及び「技術

開発・試作／研究環境」に相当するプロジェクトを重点的に支援する。

3) 基礎科学ではなく「基礎科学以降の領域」を対象とし、産業界単独では対応困難な「ハイリスク研究」への支援を行っている。

すなわち、ARPA-Eは「リスクが高すぎて産業界では対応困難な、研究初期段階にある革新的エネルギー技術」の研究を支援する役割を担っている。

その上で、こうした「ハイリスク・ハイペイオフ型の基礎研究」を選び出すために、「リーダーの“目利き力”」を積極的に活用している。具体的には、ARPA-Eの中核を担うプログラムディレクターに対し、DARPAに類似した「集中したマネジメント権限」を付与している。結果として、ディレクターが主導する形で、独創的プログラムが立ち上がっている。ディレクターには「卓越した研究プログラム構想を有する人材」を優先して登用しており、そのための要件として以下の能力や経験が設定されている。

- ・ エネルギー関連の理学または工学の博士号
- ・ ARPA-Eの投資対象となり得る卓越した研究プログラム構想
- ・ 学术界、産業界、技術投資機関等での、少なくとも6年～8年に渡るエネルギー分野の経験
- ・ プログラムマネジメント及び技術移転に対する優れた能力
- ・ 技術及び産業に対する高度の知見
- ・ エネルギーについて少なくとも一つの技術領域に精通し、その領域に関わる広範で学際的な展望を有すること

上記要件に対応し、起業実績や産業界での業務経験を有する人材が数多く登用されている。2014年9月時点で在籍する16名のプログラムディレクターの内、12名が起業実績や産業界での業務経験を有する人材となっている。

b) 英国の「エネルギー需要センター」

次に、科学技術とイノベーションを結びつけるもう一つの注目動向として、社会導入を主眼としたアプローチである「エネルギー需要センター（End Use Energy Demand Centres）」の取り組みを調べた。

エネルギー需要センターは、英国のエネルギー研究を支える公的ファンディングである「英国研究会議・エネルギー研究プログラム（2002年にスタート）」を基盤に、エネルギー需要に特化した研究に取り組んでいる。2010年に発表された「エネルギープログラムに関する国際評価パネル報告書（Report of the International Panel for the RCUK Review of Energy 2010）」、及び2011年3月に開催された「英国研究会議・エネルギープログラム：最終エネルギー需要ワークショップ（RCUK Energy Programme: End-use Energy Demand Workshop）」の提言を受けて、2011年以降に導入された。

英国研究会議・エネルギー研究プログラムからの3,000万ポンドを超える資金に加え、産業界のパートナーが用意した1,300万ポンドの資金をもとに、6つのセンターが設置されている。本資金を用い、最初の5年間の研究活動が展開される。

英国研究会議は、低炭素化目標の達成を可能とする科学技術イノベーションをもたらすために、次のような「エネルギー需要研究のビジョン」を掲げている。

- 1) エネルギー需要は、複雑な全体システムの中から生まれてくる。
- 2) したがって、「セクター」に着目し「産業」や「運輸」などの個別部門の動向を分析する従来のアプローチだけでは、その実態を把握することが難しい。
- 3) 「事業・サービス」や「エンドユース」に着目したアプローチが必要であり、「エネルギー供給から最終消費に至る全段階を対象としたトータルのエネルギー効率」、さらには「事業・サービスやエンドユースそれ自体」を改善、革新していく取り組みが求められる。
 - 検討対象となる事業・サービスとして、「材料（Structural Materials）」「暮らし」「衛生」「コミュニケーション」「照明」「熱利用（Thermal Comfort）」「乗客及び貨物輸送」などが挙げられる。
 - 検討対象となるエンドユースとして、「食糧」「健康」「教育」「娯楽」「暖房」「冷房及び冷蔵」「旅行」などが挙げられる。
- 4) 上記に応えるため、エネルギー需要センターは、以下の研究課題を優先対象に位置づけ、広範で、課題解決型で、学際的な研究に取り組む。
 - ・ 個人、グループ、経済レベルでの技術変化と社会行動の相互関係
 - ・ 社会実装（social practices）がエネルギー需要に及ぼすインパクト

- ・ 全体システムにおけるセクター間の複雑な相互作用
- ・ エネルギー需要に変化をもたらす製品、装置、建物
- ・ エネルギー需要の大幅削減を可能にする多様な規模のインフラ
- ・ 操作性（operability）、制御性（control）、視認性（visibiity）を向上する ICT
- ・ 事業・サービスとしての「エネルギー伝送」「エネルギー貯蔵」「エネルギー変換」、及びこれらの改善に用いる「材料科学や技術」

エネルギー需要センターは、「事業・サービス」や「エンドユース」の視点でエネルギー需要を捉え、セクターの枠を超えた「システム全体としてのエネルギー効率」を研究し、これを ICT や材料科学などで革新していくことを目指している。

c) 科学技術イノベーションを強化する要件

その上で、これらの調査結果に加え、米英独仏の関連動向を総合することで、科学技術イノベーションを強化するための基本要件について検討した。得られた結果を、以下にまとめる。

- 1) 各国共通の課題として、エネルギー分野の科学技術イノベーションが強く求められている。「科学技術により新たな価値を生み出し、社会が直面するエネルギー問題を打破する」ことへの大きな期待が背景にある。
- 2) 実際に各国は、持続可能なエネルギーの未来を目指し、「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んでいる。先行するドイツでは、2010年時点で発電に占める再生可能エネルギーの割合が17%に達し、36万人の雇用が創出された。非化石への転換をもたらす科学技術、そこから生まれてくる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次代が始まっている。
- 3) しかしながら、全体として捉えると、エネルギー分野において科学技術をイノベーションにつなげることは容易ではない。資源コストや市場動向に基づく経済性が、科学技術の優劣を超えて、エネルギーシステム全体に影響を及ぼすことが大きな理由となっている。
- 4) したがって、こうした経済性の障壁を克服し、個々の研究成果をイノベーションにつなげていくには、従来とは異なる研究開発のアプローチが必要になってくる。

上記に答え、各国では、エネルギー分野の科学技術とイノベーションを結びつけるための先駆的取り組みが展開されている。

- 5) 第一が、市場導入を主眼としたアプローチ。技術的には優れるが、実用性が未知、あるいは経済性に劣る先端科学をイノベーションにつなげるための取り組みになる。代表的事例として、米国エネルギー省が所掌する「エネルギー高等研究計画局 (ARPA-E; Advanced Research Projects Agency-Energy)」が挙げられる。
- 6) エネルギー高等研究計画局は、米国アカデミー報告書「強まる嵐を超えて (2006年, Rising Above The Gathering Storm)」の提言を受け、「米国競争力法 (2007年, The Americas COMPETES Act)」に基づき 2009年に設置された。米国の競争力強化を目標に、イノベーションにつながるハイリスク研究を支援する枠組みとなっている。
- 7) エネルギー分野の「ハイリスク・ハイペイオフ型のファンディング」を展開しており、国防高等研究計画局 (DARPA; Defence Advanced Projects Research Agency) をモデルに、産業界では取り組むことが困難な「リスクは高いが、大きな成果が期待できる研究」への資金助成を行う。原則として、助成期間は最長 3年、1件当たりの投資総額は 200~500 万ドル、最大 2,000 万ドルに設定されている。
- 8) エネルギー高等研究計画局を「科学技術とイノベーションを結びつける枠組み」として評価した場合、次のような特徴が浮かび上がる。
 - 主として、「基礎研究 (科学原理の探索など)」を「試作」や「実証」につなぐことを目指している。
 - そのために、「技術概念の創出」「技術概念の検証」及び「研究環境下の技術開発・試作」を目的としたプロジェクトを重点的に支援している。
 - プログラムディレクターの“目利き力”をもとに、イノベーションにつながる「ハイリスク・ハイペイオフ型の基礎研究」を選び出している。
 - そのために、プログラムディレクターとして、起業実績や産業界での業務経験を有する人材を数多く登用している。
- 9) すなわち、産業動向を踏まえた目利き力を用い、イノベーションをもたらす基礎研究を特定し、これに重点的支援を加えることで、試作や実証へとつなげる取り

組みが、エネルギー高等研究計画局になる。

- 10) 科学技術とイノベーションを結びつける第二の取り組みとして、社会導入を主眼としたアプローチが展開されている。技術的には優れるが、社会受容性に劣る先端科学をイノベーションにつなげる枠組みになる。代表的事例として、英国研究会議が所掌する「エネルギー需要センター (End Use Energy Demand Centres)」が挙げられる。
- 11) エネルギー需要センターは、「英国研究会議のエネルギープログラム (英国におけるエネルギー研究の公的ファンディング、2002年にスタート)」に対する国際評価パネルの報告、及びワークショップの提言に基づき 2011年以降に設置されている。
- 12) 具体的には、最初に「エネルギープログラムに関する国際評価パネル報告書 (2010年, Report of the International Panel for the RCUK Review of Energy 2010)」において、「英国の低炭素化目標達成にはエネルギー需要の削減が必須であり、そのために、英国はエネルギー需要の研究を強化すべきである」旨の勧告が出された。
- 13) 次いで「英国研究会議エネルギープログラム：エネルギー需要ワークショップ (2011年, RCUK Energy Programme: End-use Energy Demand Workshop)」の中で、エネルギー需要について強化すべき4つの研究対象が、具体的に提示されている。
 - ・セクター間の複雑な相互作用に基づく全体システム
 - ・個人、グループ、経済レベルでの社会的振る舞い
 - ・操作性 (operability)、制御性 (control)、視認性 (visibility) を向上する ICT
 - ・貯蔵、伝送、熱改質のための材料科学及び化学
- 14) 上記を受けて導入された枠組みがエネルギー需要センターであり、6つのセンターが設立されている。当面5年間の活動資金として、英国研究会議が3,000万ポンドを超える資金を用意し、産業界が1,300万ポンドを提供する。
- 15) エネルギー需要センターを「科学技術とイノベーションを結びつける枠組み」として評価した場合、次のような特徴が浮かび上がる。

- 個々のセクターではなく、「事業・サービス」や「エンドユース」の視点でエネルギー需要を捉えることで、セクターの枠を超えた「システム全体としてのエネルギー効率」を研究している。
 - エネルギー技術の価値や有効性を「セクター間の複雑な相互作用に基づく全体システム」、そして「個人、グループ、経済レベルでの社会的振る舞い」の中で捉えることで、当該技術の社会受容を高めることを目指している。
 - そのための体制として、物理学などの自然科学と、経済学や心理学などの人文社会科学の融合が図られている。
 - さらに、基盤となる技術として、「エネルギーの操作性、制御性、視認性を革新する ICT」と「エネルギーの伝送、貯蔵、変換を革新する材料科学」が重視されている。
- 16) すなわち、人文社会科学との連携をもとに、エネルギーの価値を“全体システム”や“社会的振る舞い”の中で捉え、ICT や材料科学を活用しながら、その社会受容を高めていく取り組みが、エネルギー需要センターになる。
- 17) 以上にまとめたように、エネルギー分野における科学技術イノベーションを目指し、各国独自の戦略として「米国のエネルギー高等研究計画局」や「英国のエネルギー需要センター」などの先駆的取り組みが展開されている。
- 18) 上記試みが成功した場合、「科学技術イノベーションを強化するための“分野を超えた共通の枠組み”」として機能する可能性があり、したがって、これらの動きを継続して追跡することが極めて重要である。

CRDS-FY2014-CR-03

G-T e C 報告書

エネルギー分野の科学技術イノベーション

Energy Innovation derived by Science & Technology

平成 27 年 3 月 March 2015

ISBN978-4-88890-439-1

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

(※2015 年 4 月から法人名称が国立研究開発法人 科学技術振興機構に変更となります。)

Overseas Research 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/>

©2015 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 CCTAACT CTCAGACC

CT CTCGCC AATTAATA

TAA TAATC

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTAACT CTCGCC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT

CTCGCC AATTAATA

ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

ATTAATC A AAGA CCT

GA CCTAACT CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

ISBN978-4-88890-439-1

