

[話題提供] エネルギー分野の研究開発の俯瞰2017

米国・ドイツにおける研究開発（科学技術）政策動向

平成29年3月9日
JST研究開発戦略センター (CRDS)
環境・エネルギーユニット
島津 博基



国立研究開発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

米国のエネルギー分野に関する基本方針

- オバマ政権は、政権当初は再生可能エネルギー拡大による産業創生を狙った「グリーン・ニューディール」を進めていたが、その後のシェール革命により現在は、"all-of-the-above"(利用し得るすべての資源を使って)という包括的エネルギー政策に転換しており、環境に配慮した国内石油・ガス開発の推進にシフト。
- 2011年3月に、大統領府が「未来の安定したエネルギーを確保するための構想 (Blueprint for a Secure Energy Future)」を取りまとめており、この中で目指すべき3つの方向として、①国内資源を開発し、エネルギー安全保障を確保する、②低コストで、高効率なエネルギー・システムに転換する、③エネルギー技術を革新し、産業と雇用を生み出す、ことを定めている。
- 米国では科学技術に関する総合的な計画ではなく、大統領府が方向性と優先付を行い、各省庁等が個別に策定する。このためエネルギー政策については、大統領令に沿ってエネルギー省 (DOE) が中心となり、政策を推進している。
- なお、各省庁を横断する科学技術分野については、科学技術政策局 (OSTP) を中心とする大統領府が調整を行っている。2016年度においてはエネルギー分野として「クリーン・エネルギー」が挙げられている。

DOE Strategic Plan 2014-2018

DOEは、同省のロードマップとして、2014年4月に「Strategic Plan 2014-2018」を公表。この中には①科学とエネルギー、②核安全保障、③管理と成果、の3つの大目標が掲げられており、この内、①において、エネルギー分野の以下の具体的な戦略目標とその成果目標が示されている。

- 戦略目標1：包括的エネルギー資源の開発、導入による気候変動行動計画の目的・目標の前進と新たな雇用や産業の創出
効率向上、再生可能エネルギー発電の拡大とCCSや原子力発電への支援、エネルギー技術展開への融資、輸送システム技術、環境に配慮した国内原油・天然ガス開発支援、地球気候変動への国際的活動

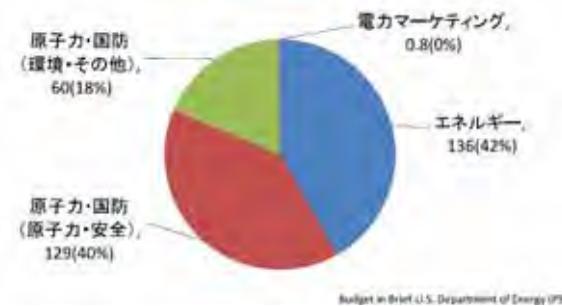
- 戦略目標2：エネルギーインフラの経済競争力、環境配慮、安定かつ回復力の強化支援
4年毎のエネルギー計画見直し (QER)、電力グリッドの近代化技術開発、DOEの事故管理能力強化、戦略的石油備蓄 (SPR)、サイバーセキュリティ、州政府等との協力による気候変動防止・適応回復力戦略策定

- 戦略目標3：変革をもたらす科学的発見や主要な科学ツールの提供
重点分野 [計算科学、材料科学と化学、生物科学・環境科学、プラズマ科学、高エネルギー物理学 (ダークエネルギー等)、核物理学] における科学的発見の追求、科学利用施設の提供、パートナーシップ強化

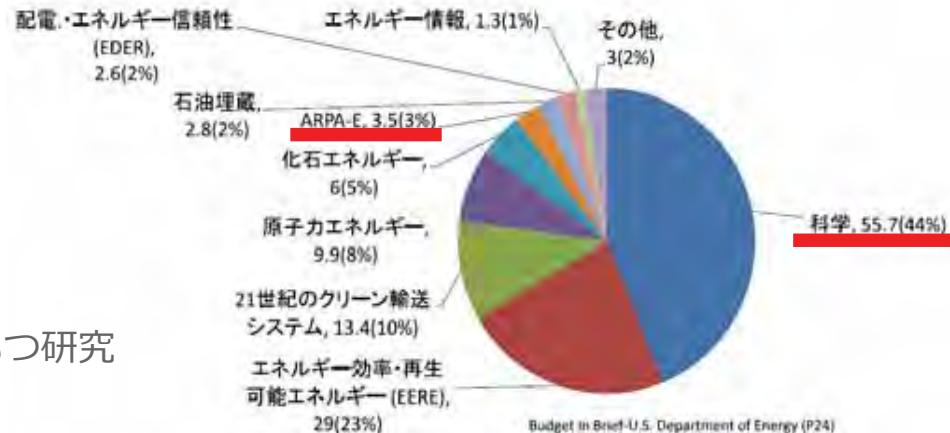
DOEの研究開発政策ポートフォリオと予算

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

DOE全体予算の内訳(単位:億ドル)

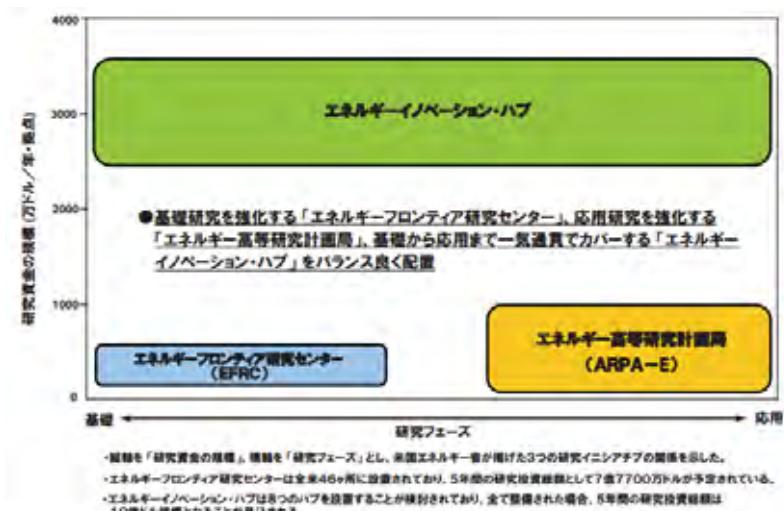


DOEにおける科学・エネルギー関連予算の内訳(単位:億ドル)



- 17の国立研究所と3つの異なる目的・特徴をもつ研究開発ファンディングシステム

- エネルギーフロンティア研究センター
- エネルギーイノベーション・ハブ
- エネルギー高度研究計画局 (ARPA-E)



[参考] エネルギーフロンティア研究センター（EFRC）

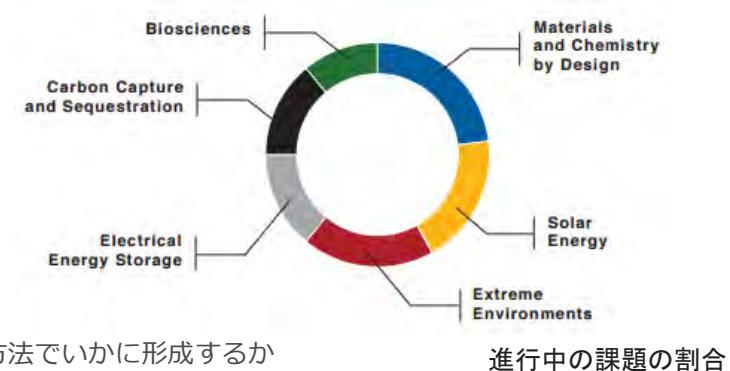
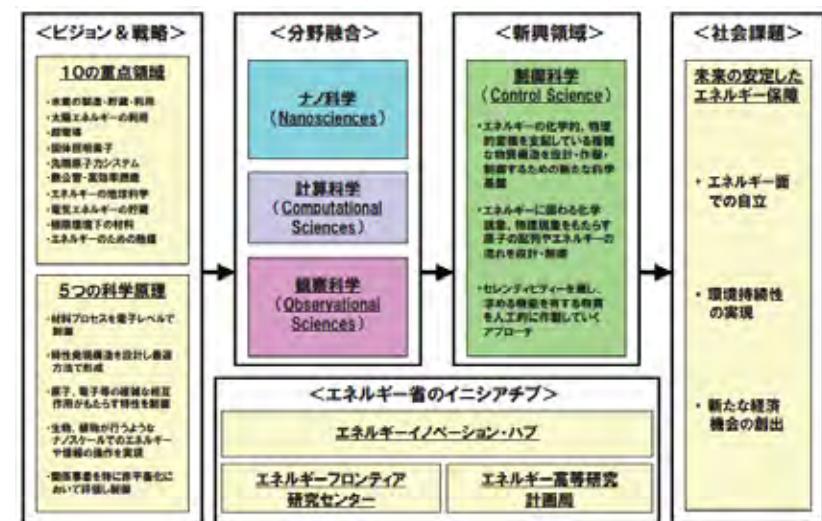
- EFRCは基礎研究を支援する枠組みとして、2001年以降の10年をかけて基礎研究のビジョン&戦略を取りまとめた。研究サイドと政策サイドの双方から2000名を超える有識者が関与
- 2009年に公募を経て46センター（複数の大学、研究所等で構成）設立された。2014年に再編され、現在は32センター（更新は22センター、新規が10センター）。
- 助成期間は4年間。総額は1億ドル/年まで（1センターあたり200～400万ドル/年）
- 「優先すべき基礎的エネルギー領域（2009年時10領域、2014年時13領域）」「5つの科学原理」を盛り込むことが公募条件である。

優先すべき基礎的エネルギー研究領域（2009年のEFRC選定時は⑩まで）

1. 水素社会 : Hydrogen Economy 2003
2. 太陽エネルギー利用 : Solar Energy Utilization 2005
3. 超伝導体 : Superconductivity 2006
4. 固体発光素子 : Solid-State Lighting 2006
5. 先進核エネルギーシステム : Advanced Nuclear Energy Systems 2006
6. 21世紀の輸送燃料におけるクリーン高効率燃焼 : Clean and Efficient Combustion of 21st Century Transportation Fuels 2006
7. ジオサイエンス(21世紀エネルギーシステムの促進) : Geosciences: Facilitating 21st Century Energy Systems 2007
8. 電気エネルギー貯蔵 : Electrical Energy Storage 2007
9. 極限下における材料 : Materials under Extreme Environments 2007
10. エネルギーのための触媒 : Catalysis for Energy 2007
11. 安全で持続可能なエネルギーの将来のための新しい科学 2008
12. 2020年超の炭素回収 2010
13. エネルギー技術のための科学-基礎科学と産業とのリンクの強化- 2010

「5つの科学原理」

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



進行中の課題の割合

チーム型。基礎科学重視。ワークショップによって公募課題を特定。5年毎に見直し。CREST(JST)に近い。

[参考] エネルギーイノベーション・ハブ

基礎研究や応用研究に加え、商業化に必要な工学開発までカバーした一連の活動を“アンダー・ワンルーフ”で行うための仕組み(マンハッタン計画やAT&Tベル研究所などをモデル)

5年毎に見直しを実施し、最大15年。初年度には基盤整備のため1,000万ドルを別途配分。

現在は以下の4つのハブがある。

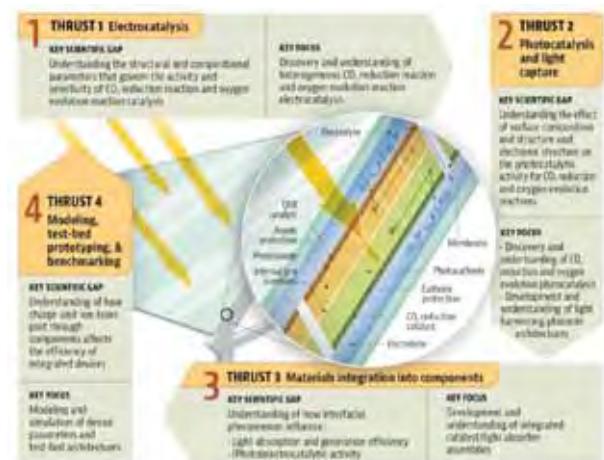
- 軽水炉先端シミュレーションコンソーシアム (CASL)
オークリッジ国立研究所がリーダー。2010年開始。2015年に更新され、5年間に1億2150万ドルの助成
- 人工光合成共同センター (JCAP)
カリフォルニア工科大学がリーダー。2010年開始（5年間/ 1億2200万ドル）。2015年に更新され、5年間で7500万ドルの助成
- エネルギー貯蔵研究共同センター (JCESR)
輸送用とグリッド用の次世代バッテリーの研究開発。アルゴンヌ国立研究所がリーダー。2012年開始。5年間に1億2000万ドルの助成
- 戦略材料研究所 (CMI)
エイムズ研究所がリーダー。2013年開始。5年間に1億2000万ドルの助成

※2010年に開始したハブ「エネルギー高効率ビルディング (CBEI/ペンシルバニア州立大学がリーダー)」は、現在除外されている。また、当初、太陽光発電とCCSの拠点設置も予定されていたが、保留となっている。

- ハブ内のマネジメント体制
 - 各ハブの研究責任者が迅速に意思決定ができる体制
 - ハブごとにマネジメント計画を策定し、計画には他部門との調整も含まれる
 - 各ハブに産業関係者が参加したアドバイザリーボードを設定することを義務付け
 - 科学・工学に加え、経済や政策まで広範な分野の連携機関が参画



エネルギー貯蔵研究共同センター



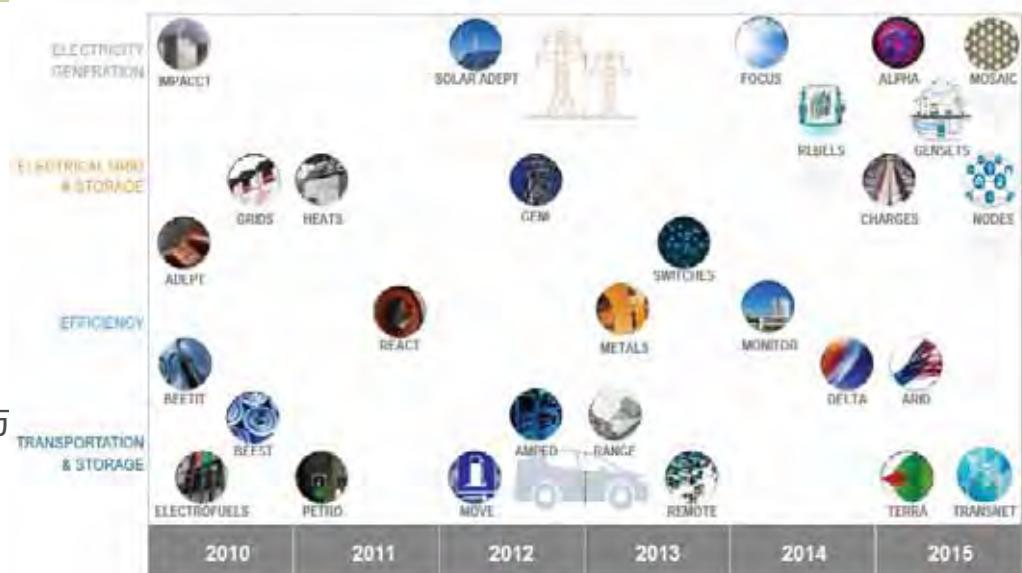
人工光合成共同センター

拠点型。資金は中核拠点に投下。RISING(NEDO)に近い。

[参考] ARPA-E

- 応用研究。研究開発における「死の谷」を克服するためにポートフォリオ的な考え方によるプログラム。
- 目標設定を明確にした上でリスクのある革新的なプロジェクトを複数選択し、助成することで、個別プロジェクトの失敗は許容しつつ、プログラム全体として成功を狙う仕組み。（国防総省のDRAPAを参考）
- 研究対象は、PDが中心となり、トップダウン方式で設定。一方で、プログラム内容を具体化するため研究者を交えてワークショップを開催。
- 2015年度予算は2億8000万ドル。
- 助成期間：最長3年、200～500万ドル/プロジェクト(最大2000万ドル)
- 現在募集中の新しいプログラムとしては以下の5つ。
 - ROOT : 炭素固定(排出低減)、生産性向上のための根と土壤の機能の計測技術、モデル
 - IONICS : 次世代蓄電池、燃料電池、他電気化学デバイス
 - NEXTCAR : コネクテッド&自動化車両
 - REFUEL : カーボンニュートラルな液体燃料
 - ENLITENED : データセンターのエネルギー効率(2倍に向上)
- 2017年度予算として継続的ファンディング資金（2021年まで1兆ドル超）を申請中（2017年2月時点）

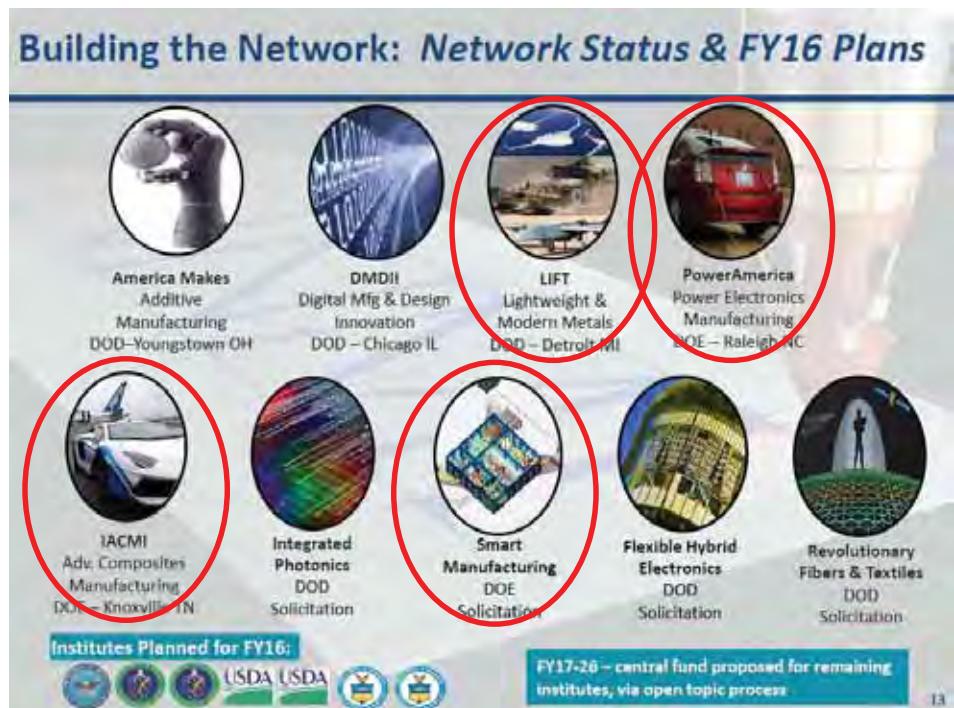
ハイリスク・ハイリターン型の応用研究。PDの権限強。単独申請・産業界多い。個別課題については失敗許容。



進行中の課題			
プログラム名	プログラム名(日本語)	件数	エネルギーに対する目的
OPEN 2009	包括型提案公募	41	
OPEN 2012	包括型提案公募	67	—
OPEN 2015	包括型提案公募	41	
ELECTROFUELS	微生物による燃料生成	13	
PETRO	非食用作物による燃料生成	10	
REMOTE	微生物によるガスからの燃料生成	15	バイオ
TERRA	再生可能農業からの輸送用燃料資源	6	
ROOT	炭素固定(排出低減)、生産性向上のための根と土壤の機能の計測技術、モデル		
IMPACCT	炭素回収のための材料&プロセス	14	
MOVE	天然ガス自動車	13	化石
MONITOR	メタン排出検出用ドライ冷却における先進的研究	8	
ARID		14	
ADEPT	柔軟で効率的な電力技術	14	
GENI	再生可能エネルギーを統合した伝送網	15	伝送
NODES	分散型を含むグリッドの最適制御技術	12	
GRID DATA	送配電アルゴリズムの開発	7	
SOLAR ADEPT			
FOCUS			
ALPHA			
MOSAIC			
REBILLS			
CHARGES			
MONITOR			
DELTA			
ARID			
TERRA			
TRANSNET			
GENSETS			
SHIELD			
NEXTCAR			
REFUEL			
ENLITENED			
REACT			
METALS			
SWITCHES			
ALPHA			
IDEAS			

[参考] National Network for Manufacturing Innovation (NNMI)

- 先進製造業・未来の産業は、国の優先事項であり、先進製造パートナーシップ (AMP) の下、2014年から官民による共同研究を促進するためにNNMIの設立
- イノベーションと製造にリンクしたプログラムに焦点を絞る。
 - ✓ 競争前段階にある製造技術の産業化におけるコスト、時間、リスクを削減するための研究開発
 - ✓ 教育・訓練プログラムの開発
 - ✓ イノベーション方法論の開発と新技術へのサプライチェーンへの導入
 - ✓ 中小企業と大型製造企業との協働
- manufacturing readiness levels (MRLs) が4から7のレベルの技術を対象
- 現在、9つの製造イノベーション機構 (IMI) が活動中。エネルギーに大きく関係するものとして下記の4つ。
 - ✓ パワーエレクトロニクス（ワイドバンドギャップ半導体）
 - ✓ 高強度軽量材料
 - ✓ コンポジット材料（複合材料）
 - ✓ スマート製造
- 一例として、2014年1月に立ち上げられたPower America はノースカロライナ州立大学を拠点としており、対象領域はワイドバンドギャップ半導体である。
- DOEが所管。立ち上げ段階でのファンドは、連邦ファンドが7000万ドル、マッチングファンドも7000万ドルである。
- 連携先としては、著名企業を含む180のパートナーを構築している。クリー、ABB、東芝、シスコ、トヨタ、3M、サムソン、ジョンソンアンドジョンソン、P&G、ダウなどが含まれている。



大規模な产学官連携プロジェクト。フランホーファーを模倣（マッチングファンド、TRLの採用）。過去の産業クラスター（経済産業省）、知的クラスター（文部科学省）などに類似。

米国と日本との違い（日本への示唆）

1. DOEが基礎研究から出口まで所管
2. 国防の視点
3. 基礎科学を重視
4. エネルギーに特化した17の国研の存在
5. ワークショップなどを通じた政策立案へのアカデミアコミュニティの協力
6. 雇用創出のため製造業の復権を重視

[参考] エネルギーを取り巻く環境の違い

- エネルギー自給率
 - ✓ 米国：約75%、独：約40%
- 電力網・ガスパイplineの形態
- 地政学的背景（カナダ、資源、太陽光、風力、CCS・・・）

[参考] イノベーション・エコシステムの特徴

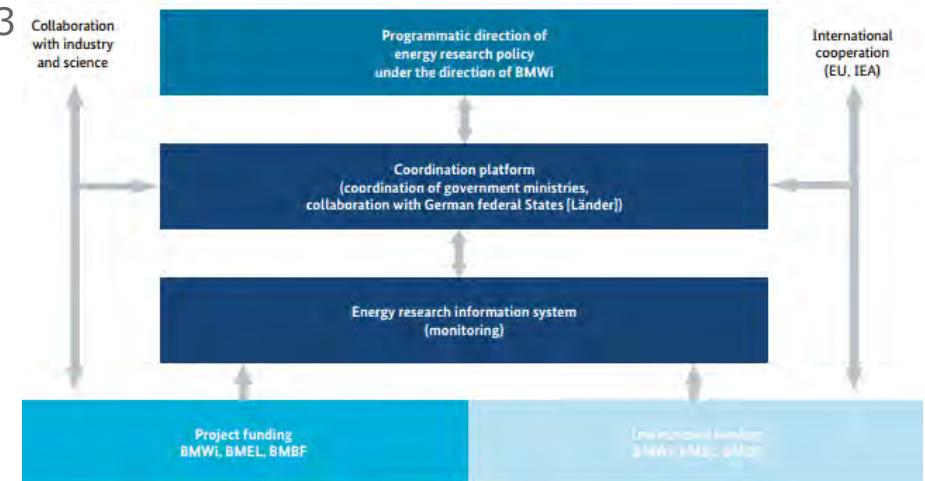
- 大学においては、研究資金の約8割を外部（産業界や国など）から調達
- SRIインターナショナルやバテル記念研究所などの独立系研究所の存在
- エンジニア投資家の投資（日本の100倍強の約2.3兆円）が大学発ベンチャー等の創業期の資金調達に寄与

ドイツのエネルギー分野に関する基本方針

- エネルギー分野の科学・イノベーション政策は、2013年末発足した第三期メルケル内閣の省庁再編により、連邦経済エネルギー省（BMWi）が主管、外部機関からの助言・協力を得ながら各種戦略を作成。連邦政府の支出する研究開発予算の20%を管理している。
- ドイツの科学技術基本政策の主要所管省は連邦教育研究省（BMBF、連邦政府の研究開発関連予算の約60%を管理）。
- 2015年のエネルギー分野の研究予算は8.6億ユーロ（連邦政府分のみ）

[参考] 各省の所管

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

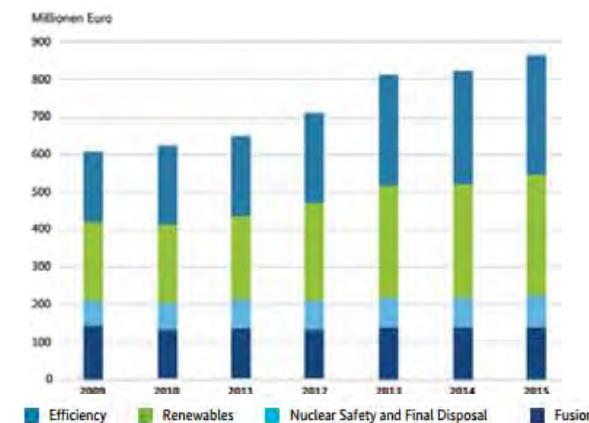


10のエネルギー・アジェンダ

- BMWiは2014年に「10のエネルギー・アジェンダ」を発表（新ハイテク戦略に含む）。2022年までに原子力発電から完全撤退することを決めたドイツは、一極集中型の化石・原子力発電所から分散型の再生可能エネルギーへの転換を目指して、エネルギー・シフト（Energiewende）を採る。エネルギー・アジェンダは、同転換策を実現するための第一歩として位置付けられている。

重点課題「10のエネルギー・アジェンダ」

- エネルギー研究（「第6次エネルギー研究プログラム」）
 - エネルギーストレージ（「助成イニシアティブ エネルギーストレージ」）
 - 発送電ネットワーク（「助成イニシアティブ 未来の電力網」）
 - 高効率エネルギーを利用したスマートシティ（新プログラム採択予定）
- グリーンエコノミー
- バイオエコノミー（「バイオエコノミー2030」）
- 持続可能な農業生産
- 資源の確保
- 都市のエネルギー消費効率化
- エネルギー高効率な建築
- 持続可能な消費（「持続可能な開発研究FONA」）



代表的なファンディングプログラム 省庁横断研究開発プログラム

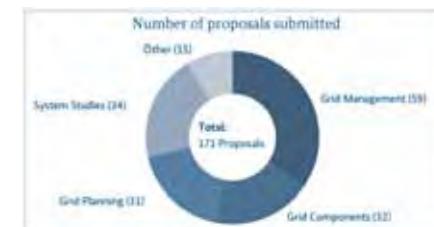
BMWi、連邦環境・自然保護・建設・原子炉安全省(BMUB)及びBMBFの三省による3つの研究イニシアティブが推進されている。

- ソーラー建物/高効率エネルギー都市 (Solar-Powered Buildings - Energy Efficient Cities)
- 持続可能な送電網 (Sustainable Power Grids)
- エネルギー貯蔵システム (Energy Storage System)



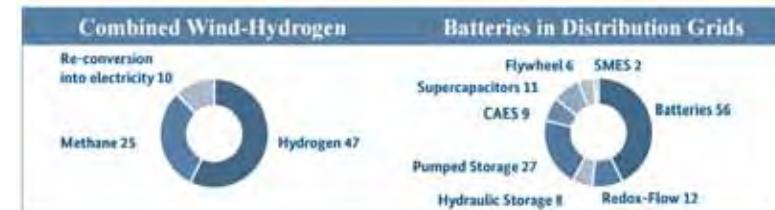
Sustainable Power Grid

- 116プロジェクト(54コラボ)、36大企業、24中小企業、34大学、21国研)、48百万ユーロ
- 2012年: 17.4百万ユーロ、2013年: 30.95百万ユーロ



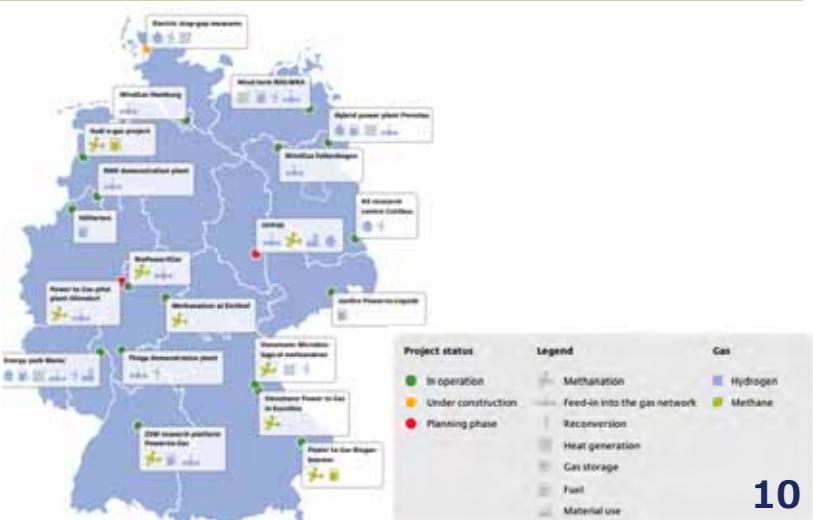
Energy Storage System

- 73プロジェクト、196百万€
- 2012年: 31.02百万€、2013年: 59.3百万€



大きなトレンド Power to Gas Project

- dena(独エネルギー機構)が主導。産業界中心の取組み。
- 北部は風力発電の適所で電力需要地は南部。しかし中部の電力網の容量が低く、北部の風力発電で発電した電力を南部に流せない。
- 再エネ導入拡大のための水素グリッドとして、Power-to-Gasプロジェクトが多数進行中。
⇒ 北部の風力由来の電力で水素を製造し、水素・メタン(メタネーション)として貯蔵(Power-to-Gas)し、水素発電で再電力化、あるいは天然ガス網に混入。
- 再エネの余剰電力で水を電気分解して水素製造・利活用。概念は欧州全域に広がりつつある。



コペルニクス・プロジェクト

- エネルギーシフトを受けた、BMBF（ドイツ連邦教育研究省）のプログラム。
- 2016年4月発表、今後10年間、アカデミア、産業界、市民社会が共同でエネルギーシステムの転換に必要な技術的、経済的解決策を生み出す。
- 2016年中にプロジェクトを開始。全体で3フェーズに分けられており、2018年までの第1フェーズについてBMBFは最高1億2,000万ユーロを用意。更に2フェーズが予定されるが、期間は合計で10年まで。2025年までに更に2億8,000万ユーロが投入。
- 研究参加者の1割は社会・経済学者となる。



プロジェクト	内容	プレーヤ
新ネットワーク構造	集中発電及び分散発電による電力のコンビネーションにより、電力変換にかかるコストを削減する。	21機関（アーヘン工科大学、カールスルーエ工技術研究所、シーメンス社等）
余剰電力の貯蔵 “Power-to-X”	将来における余剰な再生可能エネルギーの90%以上を化学的原料、ガス燃料、または燃料の形で貯蔵するための産業上の条件を整備する課題を取り組む。	62機関（アーヘン工科大学、ユーリッヒ研究センター、ドイツ化学技術バイオテクノロジー協会DECHEMA等）
産業プロセス	ドイツで初めて産業分野横断的に、エネルギー集約的な生産プロセスを不安定なエネルギー供給に対応させることができるのかを実証する。これら措置により2020年までに産業のエネルギー供給コストを推定で100億ユーロ以上削減する。	83機関（ダルムシュタット工科大学SynErgieプロジェクト、シュトゥットガルト大学等）
システム・インテグレーション	将来において可能な限り受け入れられるようにエネルギー転換を前進させるために貢献する。様々な知見が見込まれ、これによって様々な技術の市場ポテンシャルが期待される。	IASS (Institute for Advanced Sustainability Studies) の下、システム・インテグレーションのための「ENaviプロジェクト」と64機関

Energy System 2050 (ヘルムホルツセンター)

エネルギー転換を受け、8つのヘルムホルツセンターを結ぶイニシアチブを決定、推進

- ストレージとネットワーク
 - ✓ SCI(Storage and Cross-linked Infrastructures)
- バイオエネルギー
- 水素に基づくエネルギーと資源の経路
- システムレベルでのライフサイクル指向のサステナビリティ分析
- ツールボックスとデータベース

[参考] エネルギーシフト研究プラットフォーム

エネルギー・シフト (Energiewende) を受けて、産学官民で今後のエネルギー・システムのあり方や研究開発について対話する仕組みを構築

1. 将来のエネルギー・システム (Energy Systems of the Future)

- エネルギーに関する知見を評価し、エネルギー計画を作成したうえで、新たな研究テーマを定める
- 科学アカデミー、ドイツ工学アカデミー (acatech) 、ドイツ国立学術アカデミー レオポルディーナ、ドイツ学術アカデミー連合

2. エネルギーシフト研究フォーラム (Energiewende Research Forum)

- 「将来のエネルギー・システム」から出てきた科学的選択肢を議論・評価し、政策立案者のための勧告を作成
- BMBFが、BMWiや環境省と共に調整・進行役を務め、州政府や学術団体、大学、産業界、市民団体などエネルギー・シフトに携わるあらゆる領域の代表者を集めて対話をを行う。

3. 研究コーディネーション・サークル (Research Coordination Circle)

- 他のプロジェクトの結果から、エネルギー研究の優先課題についての結論を導き出す
- ドイツの大規模な研究機関と大学の代表機関 (ドイツ大学学長会議、ドイツ研究振興協会)

⇒ 地球温暖化、安全の問題（メリット）と安定性、電気料金の問題（デメリット）など含め、国民の理解を醸成

⇒ 本成果がエネルギー・シフトに関するコペルニクス・プロジェクト（前頁）につながる。

[参考] フラウンホーファー研究所

ミッション（技術移転）

- 産業界（特に中小企業）からの委託研究開発
- 研究から生まれた特許のライセンシング
 - ✓ 委託研究から生じる特許権はFraunhoferに帰属
- 研究から生まれた技術による起業
- 若い優秀な学生を産業界に供給
 - ✓ 職員約24,000千人のうち、約6,500人が学生
- 中小企業向け設備共用、職業訓練サービス

特長

- 大学教授と研究所長のクロスアポインツ
 - (参考) ほとんどの大学の工学部は、産業界での5年間の経験が、教授採用条件
- 絶大な権限を持つ所長と自律的な研究所運営
 - 研究テーマ選定、研究員人事、委託契約は所長裁量
- 研究者に対する評価は顧客満足度
 - 新規委託獲得、委託継続のための営業マンは研究者
 - 平均任期5-7年で産業界へ転出し、顧客に
- 研究分野ごとにアライアンス（ネットワーク）を構築。エネルギー・アライアンスやバッテリー・アライアンスなどがある。

フラウンホーファー・モデル

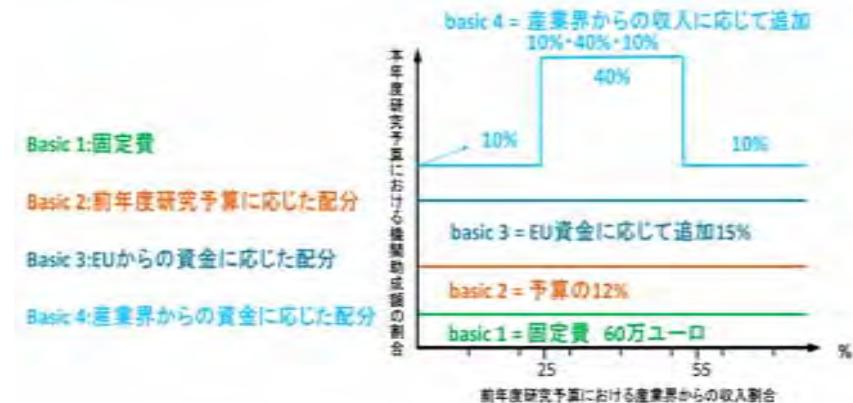
- 運営費交付金（1/3）は最先端研究のための資金
- 委託研究費に連動して次年度の交付金増加

TRL (Technology Readiness Level) の設定

フラウンホーファー研究所をモデル（参考）に、各国がプログラムを創設。国研のような恒久的なシステムを作るのは難しいため各国で工夫が見られる。

- フランスはカルノー機関
- 英国ではCatapultプログラム
- 米国ではNational Network for Manufacturing Innovation (NNMI)

全国に67の研究所
職員数: 23,786名 (2014年)
年間予算: 20.6億ユーロ (2014年)
うち研究予算は17.2億ユーロ



TRL指標	研究の段階	レベル
TRL1	基礎研究	基本原理・現象の発見
TRL2		原理・現象の定式化
TRL3	応用研究・開発	技術コンセプトの実験的な証明
TRL4		研究室レベルでの技術実証
TRL5		想定使用環境下での技術実証
TRL6	実証	実証・デモンストレーション
TRL7		トップユーザーテスト
TRL8	事業化	システムの完成および検証
TRL9		大量生産

ドイツと日本との違い（日本への示唆）

1. BMWi（連邦経済エネルギー省）が戦略・重点領域を選定
2. 重点領域に対し、各省が役割分担してファンディング
3. 再生可能エネルギーへのシフト
4. 産学官民の対話による合意形成
5. フラウンホーファーやヘルムホルツを核とした産官学の人材流動

[参考] エネルギーを取り巻く環境の違い

- エネルギー自給率
 - ✓ 米国：約75%、独：約40%
- 電力網・ガスパイプラインの形態
- 地政学的背景（アフリカ、ロシア、資源、太陽光、風力、CCS・・・）

[参考] イノベーション・エコシステムの特徴

- EUの存在による広域な視点
- フラウンホーファーのような技術移転をミッションとした公的機関の存在
- 標準化戦略
- 企業によるアカデミアや他社と連携したオープンイノベーション
 - 鉄鋼業では、R&D の枠組みが国家レベルで整備され、インキュベーション・センターとしての（仏）IRSID、（独）鉄鋼協会などが存在。独では、基礎研究をマックスプランク鉄鋼研究所、応用研究をアーヘン工科大学鉄冶金研究所やフラウンホーファー研究機構に委託。
 - Siemens は、フラウンホーファーとの共同研究を通してコア技術以外の応用研究を効率化。研究開発の現地化として、海外研究機関との共同研究を活用。基礎研究は大学・研究機関に委託（CKI（Centre of Knowledge Interchange）、世界8大学と提携、専属コーディネートオフィス設置）。地元の大学機関との密な連携により優秀な現地人材の確保に繋げる。
 - Rolls-Royce社は、自社内に大きな研究センターを持たない代わりに、将来の技術開発を世界各国の大学内に網羅された University Technology Centresを活用
 - ABB も同様にコーポレートリサーチセンターを世界7箇所に設置し、マーケティングと人材の囲い込みを同時に進める。

出所：一部、みずほ産業調査「欧州の競争力の源泉を探る」、「米国の競争力の源泉を探る」から引用

俯瞰の結果を踏まえた
今後の展望・方向性
(別紙参照)

世界の技術革新の潮流

世界の研究開発（科学技術）政策、および研究開発動向から判断

1. 低炭素化（エネルギー高効率化・省エネルギー化）への対応

- 火力、CCS（二酸化炭素の回収・貯蔵）
- 原子力、核融合
- 太陽光、風力、地熱
- 熱再生利用、蓄熱、断熱・遮熱
- 燃焼、トライボロジー
- 耐熱材料、高強度軽量材料
- BEMS/HEMS, ZEB/ZEH

2. 再生可能エネルギーの大量導入時（負荷変動、分散、直流など）への対応

- 調整力付火力
- 分散型EMS
- 直流送電（超電導含む）
- エネルギー貯蔵、パワーエレクトロニクス、磁石（モータ、トランス）

3. エネルギー資源（石炭、石油から天然ガス、バイオマス資源、再生可能エネルギー由来電力）変遷への対応

- エネルギーキャリア、燃料電池
- CCU（二酸化炭素の有効活用）、バイオマス、触媒

4. 原子力の安全性や廃炉などへの対応

世界のエネルギー分野の研究開発の特徴は、“all of the above”である。
日本も2030年までを見越した研究開発は一通り取組まれている。

未来に向けた日本の大学等による挑戦課題（グランドチャレンジ）

俯瞰の結果を踏まえ、重点的に大学・国研に核（拠点あるいはネットワーク）を構築しておくべき領域として右図の領域をリストアップ

■ 再生可能エネルギー大量導入時代（2040～2050年）を見据えた研究

□ 新しいエネルギーネットワーク（システム）

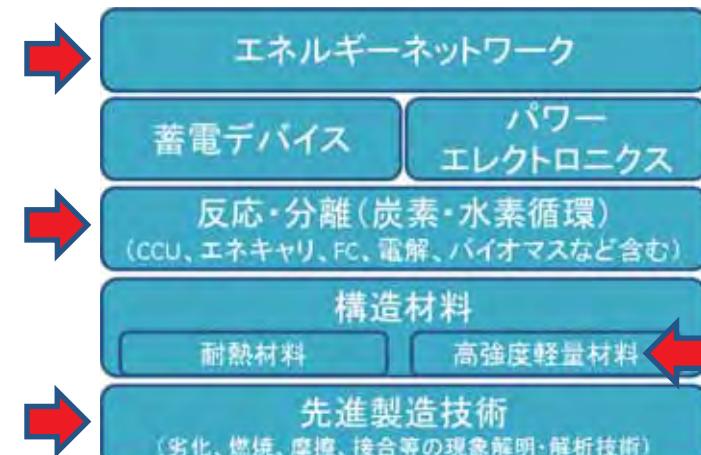
1. ICTを利用した分散管理型の電力潮流制御方法
2. 電力の市場取引メカニズム
3. 将来のエネルギー需給構造変化に呼応したモデル開発と評価
4. エネルギーと熱の総合利用
5. エネルギー利用に関わる人間の行動科学

□ 高度炭素・水素循環利用

（電力・基幹物質コプロダクションシステム）

のための革新的反応・分離

1. CO₂分離・回収技術
2. CO₂変換技術
3. 水素製造（水分解）・貯蔵技術（エネルギーキャリア）
4. 燃料電池（中温作動電解質、水素以外の燃料等）
5. メタン等変換技術
6. バイオリファイナリ（ホワイトバイオ）



なお、今後の再生可能エネルギー大量導入を見据え、エネルギー貯蔵、パワエレをはじめその他の領域も重要。現在内閣府、経済産業省、文部科学省で取組まれているプログラムやその発展・深化が必要。

■ エネルギーの高効率利用（低炭素化）に資する先進製造基盤研究

大学等に基礎学理構築から技術移転フェーズまでの持続可能なプラットフォーム（拠点＆ネットワーク）を構築

1. 材料技術の耐熱性・耐衝撃性向上、高強度軽量化、マルチマテリアル化
2. 加工技術、トライボロジー技術、振動抑制技術の高機能化、高精度化
3. 大規模構造体連成解析技術（熱流体、燃焼、構造強度、振動、潤滑、材料、電磁気、化学等要素技術の統合化）

■ ナノスケール界面の動力学制御に基づくスーパー複合（ハイブリッド）材料の研究

1. ポストCFRP、ポストCNF、ポストCMC材料
2. 接着現象やソフトマテリアルの応力集中現象、レオロジー、機能性分子の熱・力学・光学・電気挙動

CRDSとしては、今後少なくとも上記4点については、優先的に調査・提言をしていきたい
※蓄電デバイスなどについては既に提言を発行済（19頁参照）

挑戦課題（グランドチャレンジ）にむけた体制（仕組み）

- エネルギー分野は社会課題解決に向けた総合工学分野である。現在の縦割り、細分化された教育、研究体系ではイノベーションは創出されにくい。要素技術だけでなくシステム研究の必要性。
 - ⇒ (対策例) 異分野融合を促すファンディングや政策
 - ⇒ (対策例) 学会間の連携。例えば、蓄電池や燃料電池において、電気化学会、触媒学会、日本表面科学会、伝熱学会、セラミックス協会、化学工学会などが連携して、技術課題の洗い出し、プロジェクト立案、政策立案者への提言を行う等
 - ⇒ (対策例) 大学における学部・カリキュラムの見直し
- 総合工学は、機械工学、電気工学、化学工学をはじめ、ナノテク・材料、ICT、バイオすべてを包含するが、大学において工学が弱体化している。大学における工学のあり方を検討する必要がある。
 - ⇒ (対策例) 八大学工学系連合会と産業界、行政との対話
 - ⇒ (対策例) 大学における学部・カリキュラムの見直し
 - ⇒ (対策例) 政策による先進製造技術（基礎工学）のプラットフォーム（ネットワーク）化
- 国のイノベーション政策の高まりから、ファンディングが先端応用研究に偏重している傾向がある。
 - ⇒ (対策例) 2050年CO₂排出80%減の実現のためには、既存技術の延長にない一層のブレークスルーが必要であり、基礎・基盤研究に立ち返る必要がある領域が多い
 - ⇒ (対策例) 府省におけるファンディングプログラムや大学等における研究プロジェクトの設計において、先端応用研究と同時に横軸としての基礎・基盤研究にも取組めるような仕組み（体制）づくり
- 教育と研究の連携、基礎研究と応用研究・開発の一層の連携（府省の連携）が求められる。
 - ⇒ (対策例) 同一テーマに関して、経済産業省と文部科学省で協働（役割分担）で予算要求するなど
 - ⇒ (対策例) 同一テーマに関して、NEDO TSCとJST CRDSで協働（役割分担）で調査・分析するなど

参考・引用文献

俯瞰・海外動向・政策調査

1. JST-CRDS 「研究開発の俯瞰報告書 エネルギー分野」 (2017)
2. JST-CRDS 「先端研究基盤とグリーンイノベーション」 (2011)
3. JST-CRDS 「エネルギー分野の科学技術イノベーション」 (2014)
4. JST-CRDS 「米国のEngineering Research Centers (ERC) — 融合型研究センターのFederal Flagship Scheme —」 (2014)
5. JST-CRDS 「主要国における次世代製造技術の研究開発に係る政策動向」 (2014)
6. JST-CRDS 「主要国における橋渡し基盤整備の支援」 (2015)
7. JST-CRDS 「第5期科学技術基本計画期間において求められる研究費制度改革～関連する方策の現状と研究力強化に向けた今後の方向性～」 (2015)
8. JST-CRDS (海外トピック情報) 米国 : 2017年度米国大統領予算教書 科学技術予算の概要

戦略プロポーザル（特定テーマに関する提言）

1. JST-CRDS 「未来型バイオマスエネルギー・システム基盤技術」 (2005)
2. JST-CRDS 「太陽光エネルギーの利用拡大基盤技術」 (2008)
3. JST-CRDS 「エネルギー政策のための科学・技術・経済モデルの研究開発」 (2011)
4. JST-CRDS 「エネルギー分野研究開発の戦略性強化」 (2011)
5. JST-CRDS 「次々世代二次電池・蓄電デバイス基盤技術」 (2011)
6. JST-CRDS 「再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギー・キャリアの基盤技術」 (2012)

參考資料

エネルギーイノベーション・ハブ

エネルギー貯蔵研究共同センター

JCESR : Joint Center for Energy Storage Research

概要

- 2012年開始。5年間で1億2000万ドルの助成。アルゴンヌ国立研究所 (ANL)がリーダ。連携先として、他の4つの国立研究所、10の大学、5つの民間会社が参加
- 輸送用および次世代バッテリーの研究開発。多価インターカレーシヨン、化学変換(リチウム硫黄)、有機レドックスフロー型(グリッド用)など。

達成目標

- 材料およびエネルギー貯蔵における分子原子レベルでの基礎科学
- エネルギー密度5倍・コスト1/5の輸送用およびグリッド用のプロトタイプ
- 1つの組織による発見科学、バッテリー設計、プロトタイプ化、製造の研究開発へのためのパラダイム



人工光合成共同センター

JCAP : Joint Center for Artificial Photosynthesis

概要

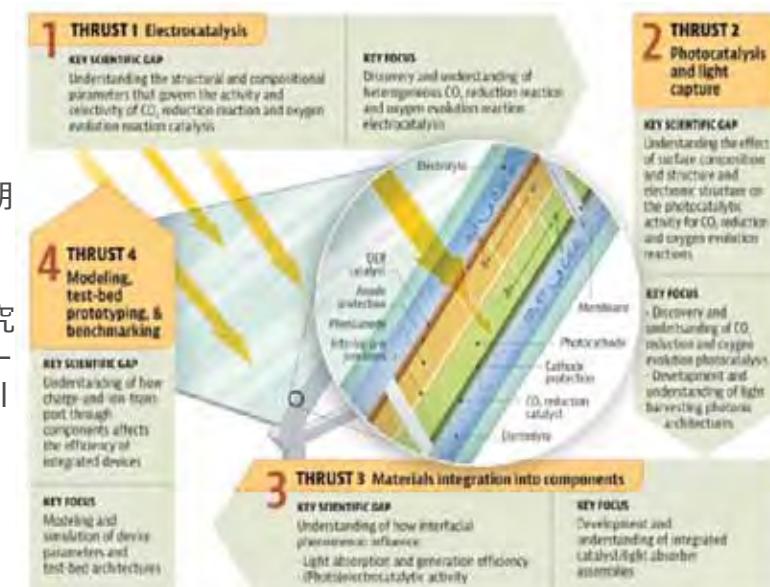
- 2010年開始。2015年に更新され、5年間で7500万ドルの助成。
- 第一期は太陽光による水素生産のプロトタイプシステムを作成。第二期(2016～)は、太陽光によるCO₂と水からの輸送用燃料変換における規模拡大可能な技術のための科学的基礎の創出を目指す。
- 拠点は2箇所(カリフォルニア工科大学とローレンスバークレー国立研究所に設置) カリフォルニア工科大学がリーダで主要提携先として、ローレンスバークレー国立研究所 (LBNL)。その他提携先 : SLAC National Accelerator Laboratory、カリフォルニア大学アーバイン校、カリフォルニア大学サンディエゴ校など (現在企業は参加していない)

目的

- 高効率CO₂還元触媒のメカニズム解明
- 電解触媒・光触媒用材料、光電極の発見
- 人工光合成プロトタイプのデモ

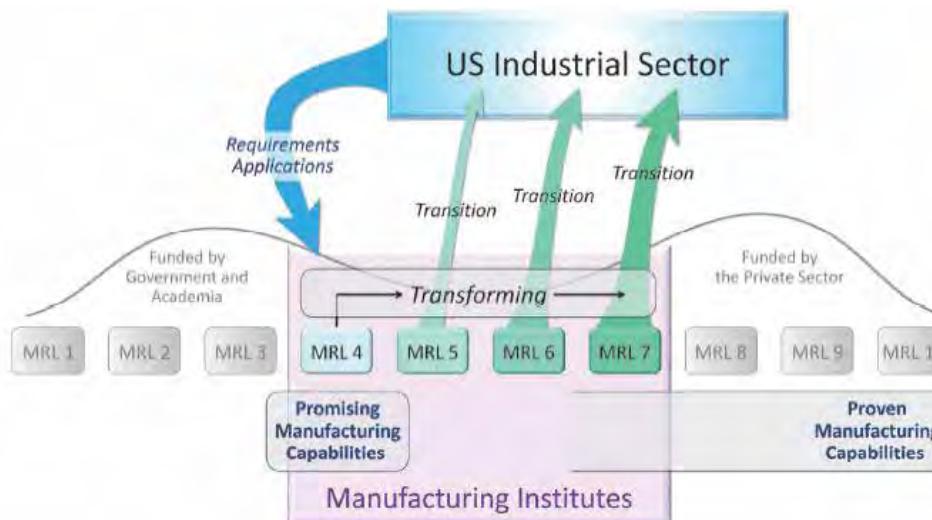
研究開発の推進領域 (図)

1. 電極触媒
2. 光触媒と光吸収性光電極
3. コンポーネントへの材料統合
4. モデリング、プロトタイプの試験装置、ベンチマークリング



National Network for Manufacturing Innovation (NNMI)

- 米国において、先進製造業・未来の産業は、クリーンエネルギー、地球観測、気候変動などと並んだ優先事項であり、先進製造パートナーシップ（AMP）が創設されている。
- 2014年から官民による共同研究を促進するためにNNMIの設立と商務省DOCと関係各省の協力の下、製造イノベーション機構（IMIs）の設置を進めている。
- NNMIのプログラムはイノベーションと製造にリンクしたプログラムに焦点を絞る。
 - ✓ 競争前段階にある製造技術の産業化におけるコスト、時間、リスクを削減するための研究開発
 - ✓ 教育・訓練プログラムの開発
 - ✓ イノベーション方法論の開発と新技術へのサプライチェーンへの導入
 - ✓ 中小企業と大型製造企業との協働



TRL 1:	Basic principles observed and reported	MRL 1:	Basic manufacturing implications identified
TRL 2:	Technology concept or application formulated	MRL 2:	Manufacturing concepts Identified
TRL 3:	Experimental and analytical critical function and characteristic proof of concept	MRL 3:	Manufacturing proof of concept developed
TRL 4:	Component or breadboard validation in a laboratory environment	MRL 4:	Capability to produce the technology in a laboratory environment
TRL 5:	Component or breadboard validation in a relevant environment	MRL 5:	Capability to produce prototype components in a production relevant environment
TRL 6:	System or subsystem model or prototype demonstrated in a relevant environment	MRL 6:	Capability to produce a prototype system or subsystem in a production relevant environment
TRL 7:	System prototype demonstration in an operational environment	MRL 7:	Capability to produce systems, subsystems, or components in a production representative environment
TRL 8:	Actual system completed and qualified through test and demonstration	MRL 8:	Pilot line capability demonstrated; ready to begin low rate initial production
TRL 9:	Actual system proven through successful mission operations	MRL 9:	Low rate production demonstrated; capability in place to begin full rate production
		MRL 10:	Full rate production demonstrated and lean production practices in place

- manufacturing readiness levels (MRLs) が4から7のレベルの技術を対象

米国：National Network for Manufacturing Innovation (NNMI)

LIFT(Lightweight Innovations for Tomorrow)

- ミッション：先進軽量材料製造技術の開発スピードアップ。当該技術を有する労働力準備のための教育や訓練プログラムの実施。
- 所在地：ミシガン州デトロイト（2014年2月設立）
- 運営体：American Lightweight Materials Manufacturing Innovation Institute (ALMMII)。設立組織はEWI、DoDが協力。ファンディングパートナーはEWI、オハイオ州立大学、ミシガン大学など。OEM、サプライヤ、中小企業、大学、研究機構、教育、労働力開発組織など82団体から構成（2015年9月）
- 資金：連邦ファンド7000万\$、マッチングファンド7800万\$（5年間）
- 実施内容：全製造産業分野における移動体の軽量化による低燃費、低コスト化を目指す。技術開発の6つの柱として、①溶融加工、②粉末加工、③熱機械加工、④新規/敏捷加工、⑤コーティング、⑥合成と組立。横断テーマとして、①統合化計算材料工学 (ICME)、②デザイン、③ライフサイクル分析、④コストモデリング、⑤サプライチェーンなど、31プロジェクトを実施中。
 - 市場化や標準化を考慮した、Integrated Computational Materials Engineering (ICME) ツールを開発し、軽量金属製造技術のコスト、時間、リスク低減に貢献。
 - オハイオ、ミシガン、インディアナなど5州において、先進的製造技術に関する教育を支援

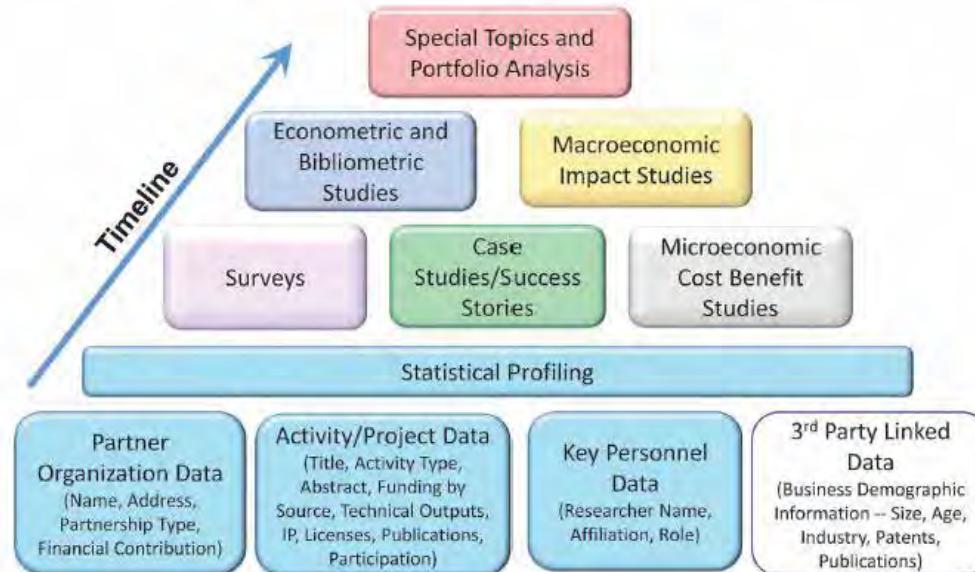
IACMI(Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation)

- ミッション：先進ファイバー強化ポリマー合成物などの先進複合材料の先端研究。コスト、製造エネルギー消費の削減とリサイクル率向上を目的に、より軽く応用範囲を拡大する材料開発を目指す。
- 所在地：テネシー州ノックスビル（2015年1月設立）
- 運営体：テネシー大学、DOEが協力。ノックスビルのテネシー大学が主導する122の企業、非営利団体、大学のコンソーシアムが機構の立ちあげに関与、推進。
- 資金：連邦ファンド7000万\$、マッチングファンド1億8000万\$（5年間）
- 実施内容：先進複合材料のための低成本、高速、効率的な製造、プロセスのリサイクルの開発、先進複合材料の全体の製造コストの削減、複合材料を作るためのエネルギー使用量の削減、複合材料のリサイクル率の増加などがテーマ。
 - コロラド大とNRELによる風力発電材料開発、パーテュー大とのモデル開発、LIFとの自動車軽量化材料開発など
 - Workforce Intelligence Networkとの契約により、キーとなる技術を分析。
 - American Composites Manufacturers Association (ACMA) 等との協力により、オンラインの製造技術認証システムを開発。
 - LIFTやAmerican Society for Engineering Educationとの協力により、軽量技術の訓練に関するポータルサイトを構築

米国：National Network for Manufacturing Innovation (NNMI)

評価の仕組み

- 評価においては、長期、中期、短期ごとの方法論が用いられる。
 - 短期：メンバーシップ属性、パートナーシップ度、研究開発活動、特許、プロトタイプ、プロセス開発などの成果物
 - 中期：新製品、ライセンス活動、追加資本、戦略的提携開発、企業成長
 - 長期：投資回収率、業界間への展開、製造業へのより広い影響発信



- NNMI のプログラムゴールに定める 4 つの共通的なメトリック分類により評価される。この他、各々の拠点別にメトリックが指定されることもある。

Goal	Competitiveness	Transitioning Technology	Workforce	Sustainability
Common Institute Metric Category	Impact to U.S. Innovation Ecosystem	Technology Advancement (development, transfer, commercialization, etc.)	Development of an Advanced Manufacturing Workforce	Financial Sustainability

スマートシティ・イニシアティブ

2015年9月、オバマ大統領は「スマートシティ・イニシアティブ」を発表。要素技術の研究開発に対し、2016年度の連邦予算において1億6000万ドル（192億円）の政府助成を行う。米国60以上の都市で、IoT（Internet of Things）を駆使した街づくり。

- カンザス州立大学による、分散電源と既存の電力網との接続や自動運転自動車などフィジカルな対象とネットワークとを結ぶ新しい「サイバー・フィジカル・システム」の研究：NSFから1000万ドル
- 自動運転、都市科学、マルチモーダル交通、統合型給油給電インフラなどの次世代交通技術の研究開発に向けた「SMART (Systems and Modeling for Accelerated Research in Transportation) モビリティ・コンソーシアム」の設立：DOEから500万ドル
- 低価格な可搬型空気汚染センサーの開発：環境保護庁（EPA）から450万ドル

次の主要戦略に重点が置かれる。

- IoTアプリケーション向けのテストベッドの作成、及び新たな複数セクター協力モデルの開発
- 市民の科学技術活動との協力、及び都市間協力の構築
- 既存の連邦レベル活動の活用
- 国際協力の推進

NSF エンジニアリングリサーチセンター (ERC) プログラム

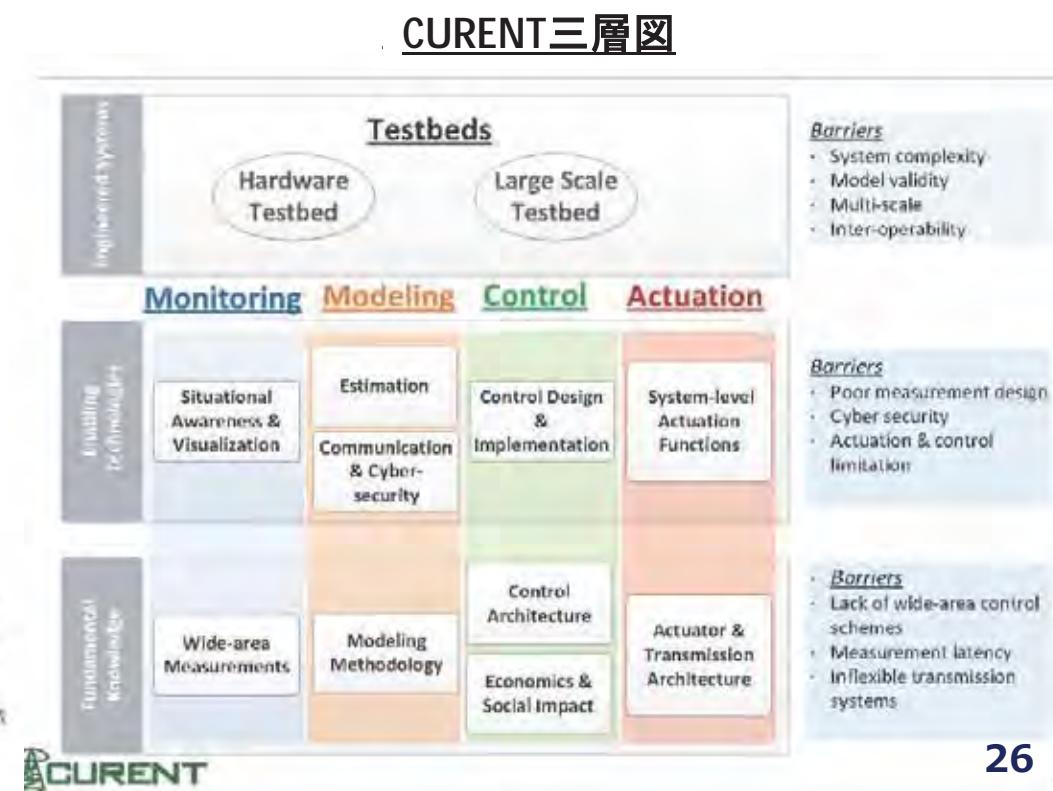
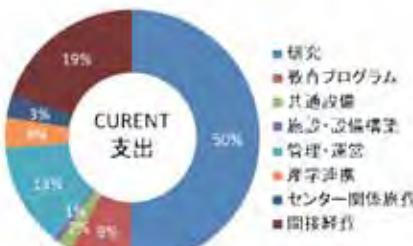
- ERC は大学において、研究、社会実装、人材育成の同時達成を謳った拠点プログラム
- 以下の4つの領域にクラスター化されている。1) Advanced Manufacturing、2) Biotechnology and Health Care、3) Energy, Sustainability and Infrastructure、4) Microelectronics, Sensing and Information Technology
- 支援期間は通常は10年であるが、3年目と6年目に更新審査が行われる。
- 支援額は年間最大400万ドルで、9年目、10年目は前年の約1/3に減額される。
- 資金源はNSFからの支援だけでなく、他の政府機関、産業界及び大学等、多岐にわたっている

参考:JST-CRDS「米国のEngineering Research Centers(ERC)－融合型研究センターのFederal Flagship Scheme－」

- 一例として、2011年創設の
CURENT：超広域でレジリエントな電力ネットワークは、Tennessee 大学
が拠点

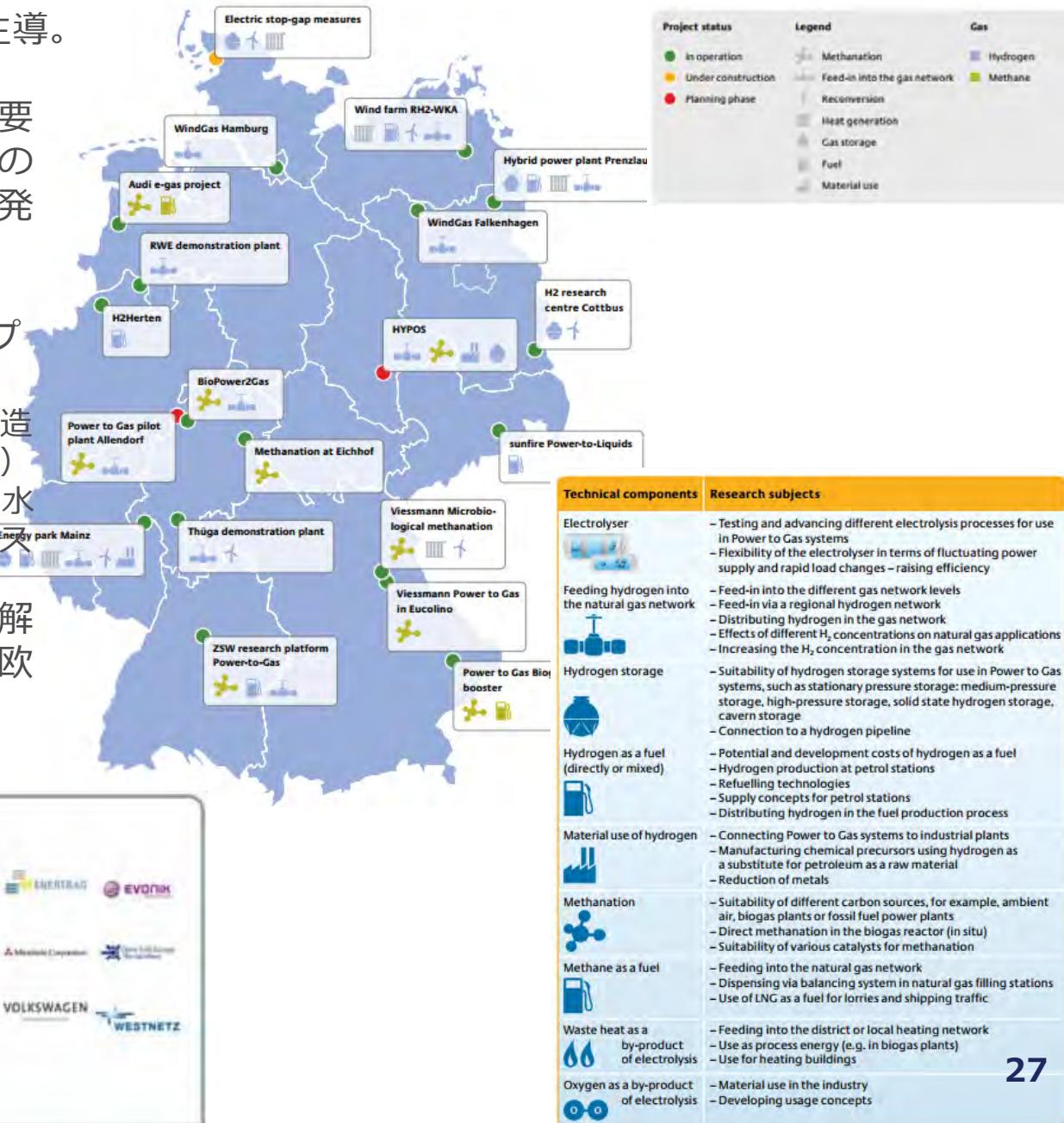
- 国レベルの広域グリッド電圧位相モニターシステムを確立し、高速広域高信頼の分散制御システムを構築する

- 一部DOEの資金も活用
 - ARPA-E (2015年包括型提案募集プログラム) のプロジェクトを獲得
➢ 「低コストで規模可変のオープンソース制御によるスマートでフレキシブルなマイクログリッド」(\$2.4M)



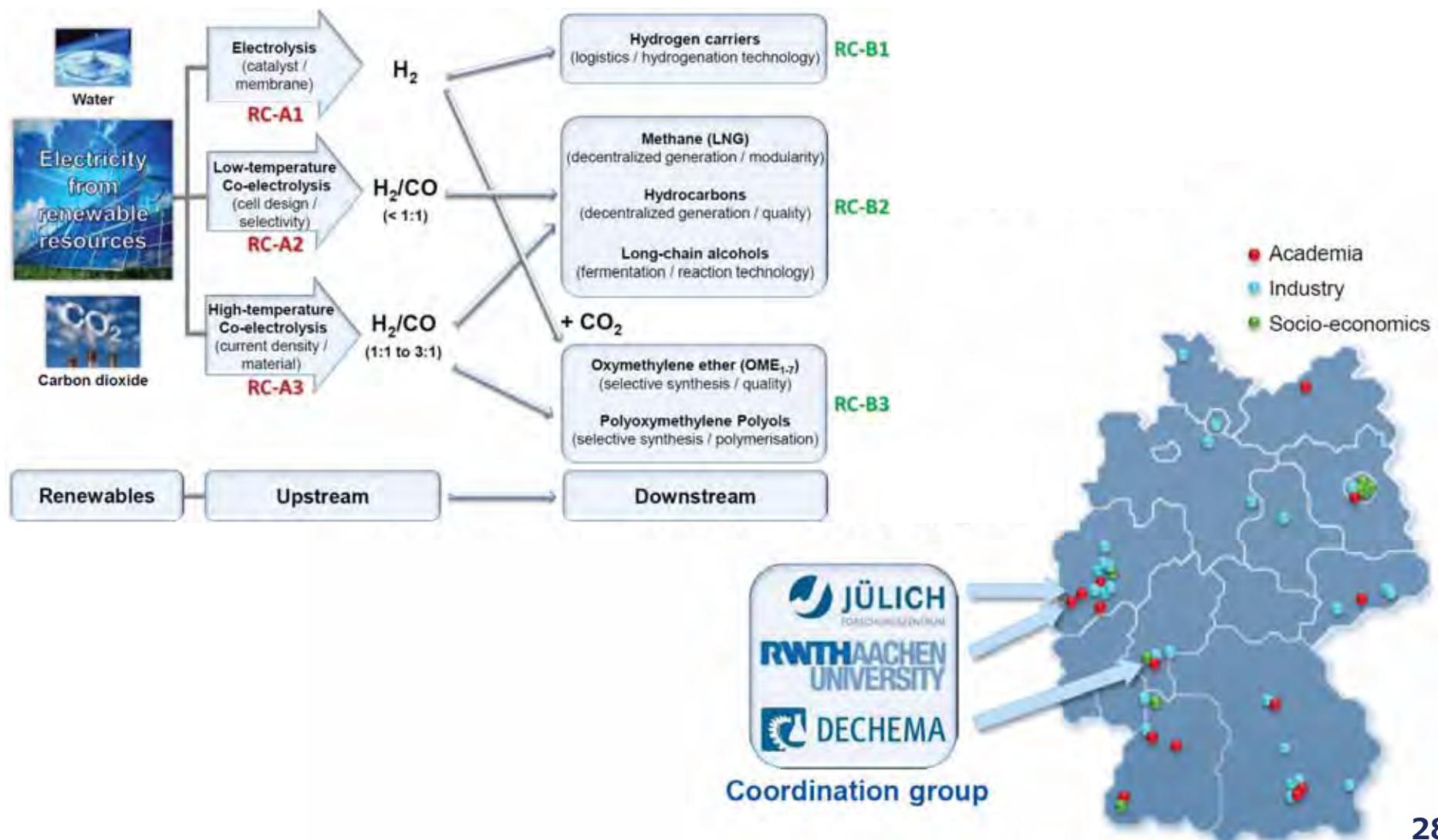
大きなトレンド Power to Gas Project

- dena (独エネルギー機構) が主導。
産業界中心の取組み。
- 北部は風力発電の適所で電力需要地は南部。しかし中部の電力網の容量が低く、北部の風力発電で発電した電力を南部に流せない。
- 再エネ導入拡大のための水素グリッドとして、Power-to-Gasプロジェクトが多数進行中。
⇒ 北部の風力由来の電力で水素を製造し、水素・メタン(メタネーション)として貯蔵(Power-to-Gas)し、水素発電で再電力化、あるいは天然ガス網に混入。
- 再エネの余剰電力で水を電気分解して水素製造・利活用。概念は欧洲全域に広がりつつある。



Power-to-X 研究プログラム

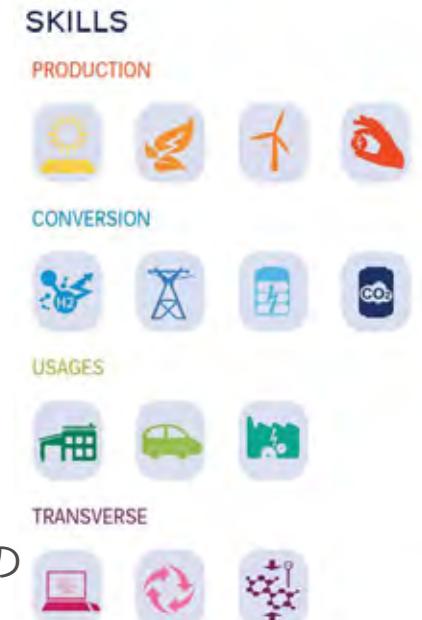
- 再生可能余剰電力利用による水の電気分解水素とCO₂から多様なガス燃料や化学的燃料を合成する手法を研究
- 全10年間。第1期間(3年)全予算3,830万€[産業界から830万€拠出]
- 拠点は、大学13、産業界26、社会経済学7



フランス：カルノー機関

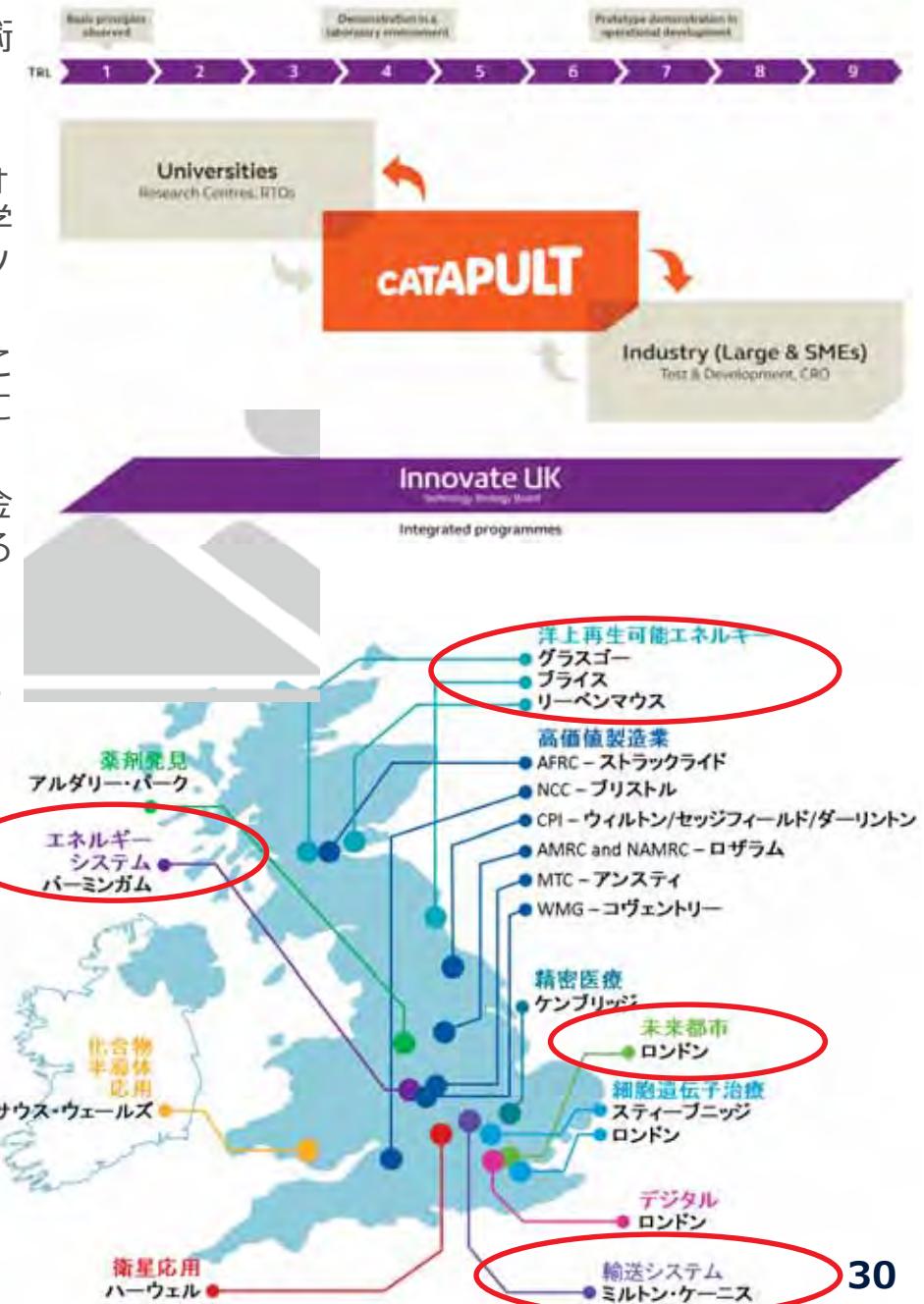


- 企業との共同研究を積極的に推進する国の研究機関（既存の研究機関・大学等）に認証を与え、その認証に基づき資金を配分する（追加的なファンディング）プログラム
- 公的機関のカルチャーを変え、企業との共同研究を促進することを目的
- 企業との共同研究（TRL3（POC）～TRL7（トップユーザテスト）中心）を促進するプログラム
- 企業との共同研究の規模に応じ次年度の資金配分が変化する仕組み
- 2006年開始。34の機関が認定。複数の相互補完的な機関からなるコンソーシアムがカルノー機関として認定されているケースが多い
- エネルギーに関連する主なものは以下の通り
 - Carnot Energies du Futur
 - 再生可能エネルギーの製造、変換、利用、輸送
 - コアメンバー：
CEA Liten (原子力・代替エネルギー庁新エネルギー部門)
INP (グルノーブル国立工科大学)
Université Joseph Fourier (ジョセフ・フーリエ大学)
CNRS (国立科学研究中心)
 - ISIFoR
 - 化石資源のエネルギー・環境問題
- 年間公的予算は6,000万ユーロ+a（母体機関への配分額と企業からの直接投資額を加えた全体の規模は、約22億ユーロ）
- 企業からの年間直接投資額は4億5,800万ユーロ（仏全体の55%）
- 企業との共同研究の規模を10年間で2倍以上に増加させており、フランスでは成功しつつあるモデルであるといわれる。29

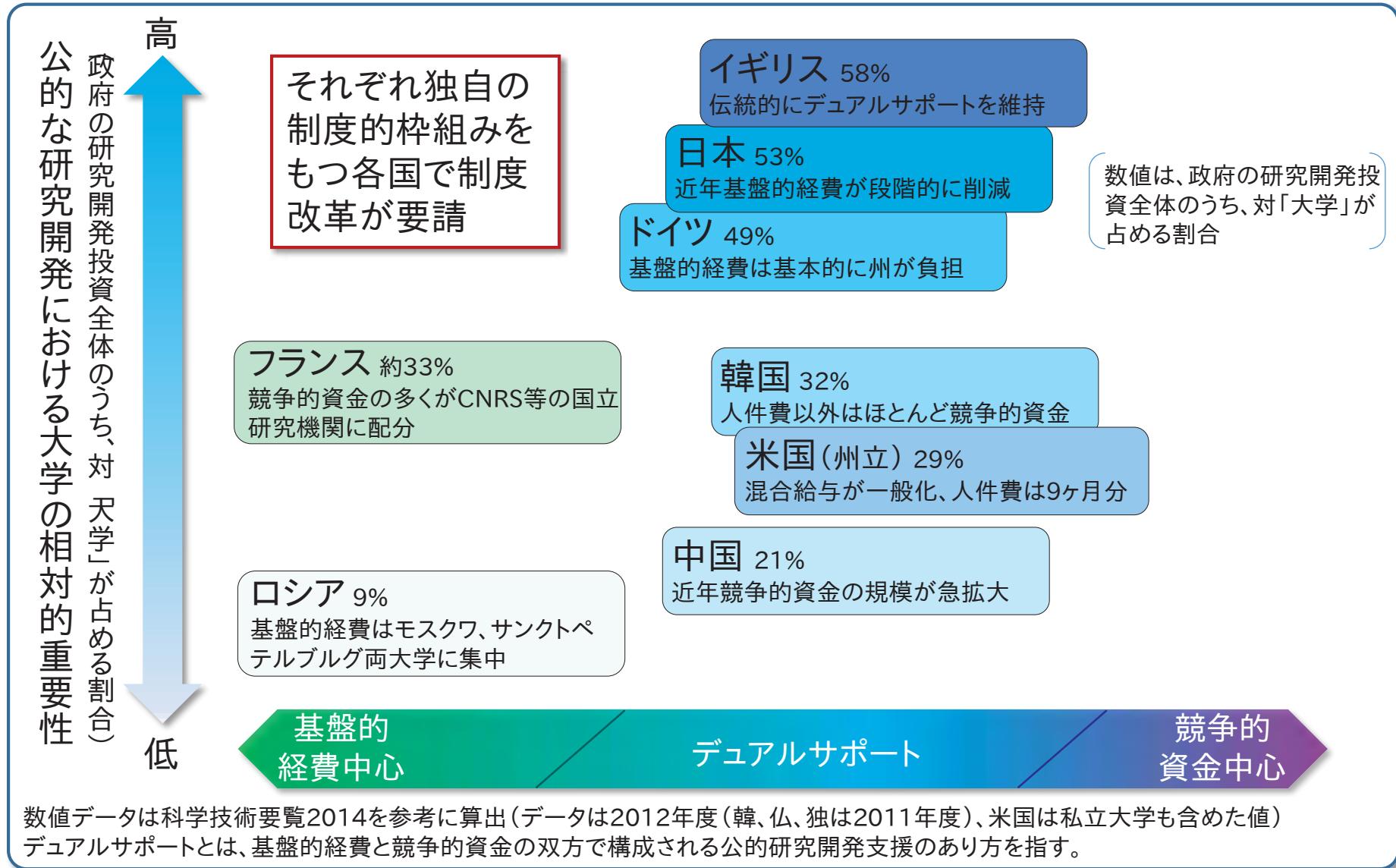


英国 : the Catapult Programme

- 特定の技術分野において英国が世界をリードする技術
 - ・イノベーションの拠点構築を目指すプログラム（2011-）。
- これらの拠点を产学連携の場（研究開発プラットフォーム）として、産業界主導で企業やエンジニア、科学者が協力して最終段階に向けた研究開発を行い、イノベーション創出および研究成果の実用化を実現
- バーチャルではなく物理的に存在する場を整備することにより、優れた科学研究の成果を実用化・商業化につなげるための橋渡しインフラの形成を目指す。
- 4年間で5億2,800億ポンド（約972億円）の公的資金が投入された。産業界も合わせた投資総額を見てみると、2014年の発表によれば、最初の5年間で14億ポンド（約2,576億円）に上る。
- カタパルトの予算内訳は、公的ファンディングが1/3、プロジェクトによる収益（産業界との契約も含む）が1/3、競争的資金の獲得が1/3とするモデルが想定されている。
- 一例として、未来都市カタパルトでは、イノベーターと都市のニーズの架け橋となるため、都市の設計に基づいて新しいアイデアを推進するための有益で中枢となるアプローチを採用している。
- 現在、エンジニアや研究者を含め約80名のスタッフが勤務し、4つのチーム（①アイデアのタイピング、テスティング、②プロジェクトのコーディネイト、③フォーサイト、④データ・サイエンス）に分かれて活動を行っている。



各国の研究費制度の特徴





エネルギー・環境イノベーション戦略：有望分野の特定

戦略の対象となる排出削減技術の特定（評価軸）

- ①これまでの延長線の技術ではなく、非連続的でインパクトの大きい革新的な技術
- ②大規模に導入することが可能で、大きな排出削減ポテンシャルが期待できる技術
- ③実用化まで中長期を要し、且つ産学官の総力を結集すべき技術
- ④日本が先導し得る技術、日本が優位性を発揮し得る技術

エネルギー・システム統合技術

○革新技術を個別に開発・導入するだけでなく、ICTによりエネルギーの生産・流通・消費を互いにネットワーク化し、デマンドレスポンス（DR）を含めてシステム全体を最適化。AI、ビッグデータ、IoT等を活用。

システムを構成するコア技術

- 次世代パワエレ：電力損失の大幅削減と、新たなシステムの創造
- 革新的センサー：高耐環境性、超低電力、高寿命でメンテナンスフリー
- 多目的超電導：モーターや送電等への適用で、電力損失を大幅減

分野別革新技術

省エネルギー



1 革新的生産プロセス

○高温高圧プロセスの無い、革新的な素材技術
➢ 分離膜や触媒を使い、20~50%の省エネ

2 超軽量・耐熱構造材料

○材料の軽量化・耐熱化によるエネルギー効率向上
➢ 自動車重量を半減、1800°C以上に安定適用

蓄エネルギー



3 次世代蓄電池

○リチウム電池の限界を超える革新的蓄電池
➢ 電気自動車が、1回の充電で700km以上走行

4 水素等製造・貯蔵・利用

○水素等の効率的なエネルギーキャリアを開発
➢ CO₂を出さずに水素等製造、水素で発電

創エネルギー



5 次世代太陽光発電

○新材料・新構造の、全く新しい太陽光発電
➢ 発電効率2倍、基幹電源並みの価格

6 次世代地熱発電

○現在は利用困難な新しい地熱資源を利用
➢ 地熱発電の導入可能性を数倍以上拡大

7 CO₂固定化・有効利用

○排ガス等からCO₂を分離回収し、化学品や炭化水素燃料の原料へ転換・利用
➢ 分離回収エネルギー半減、CO₂削減量や効率の格段の向上