

## 「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域



運営統括

橋本 和仁

(国立研究開発法人物質・材料研究機構 理事長)

### I. 「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域の目指すところ

地球温暖化問題の原因である温室効果ガス、特に二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の排出を抑制する「低炭素社会」を構築することが世界的課題となっています。平成 27 年 12 月に開催された、国連気候変動枠組み条約第 21 回締約国会議（COP21）において採択された「パリ協定」では、産業革命前からの気温上昇を 2℃未満にし、1.5℃以内に抑制する努力が求められました。

それを受けて我が国でも、平成 27 年 12 月、「温室効果ガスを 2030 年度に、2013 年度比 26%削減する」という目標を掲げ、この達成に向けて着実に取り組む旨、地球温暖化対策推進本部にて決定されています。

また、平成 28 年 4 月に総合科学技術・イノベーション会議が取りまとめた「エネルギー・環境イノベーション戦略」（NESTI2050）では、2050 年を見据え、削減ポテンシャル・インパクトが大きい有望技術の提示や、長期的な研究開発の推進体制などが取りまとめられています。

この目標を達成するためには、全く新しい概念や科学に基づいた革新的な技術、すなわち「ゲームチェンジングテクノロジー」の創出が必要です。

ゲームチェンジングテクノロジーの創出に向けて、当該分野の研究者による先端的研究手法を融合・駆使・発展させた挑戦的な提案に加え、異分野の研究者による全く新しい提案も重要です。

本領域に対しては 344 件のご提案をいただきました。これらの提案や関連する専門分野、異分野の有識者からの意見聴取を踏まえてゲームチェンジングテクノロジーの創出を促すため、平成 29 年度重点公募テーマを研究開発運営会議にて検討しました。

その結果、テーマを「ゲームチェンジングテクノロジー」による低炭素社会の実現とし、低炭素社会を実現するための具体的な提案を募るために成果の社会実装をする際の技術的課題である「ボトルネック課題」を提示し、これを解決する研究開発課題を募集することとしました。

## II. 重点公募テーマ

### 1. 「ゲームチェンジングテクノロジー」による低炭素社会の実現

#### (1) テーマの説明

従来技術の延長上にはないゲームチェンジングテクノロジーを創出し、JST の他事業や、他府省の取り組みなどと連携して成果を社会に実装することで、2050 年に想定されるサービス需要を満足しつつ CO<sub>2</sub> を抜本的に削減する低炭素社会の実現に貢献することを目指します。

本領域で公募する、重点公募テーマの全体図は図 1 の通りです。

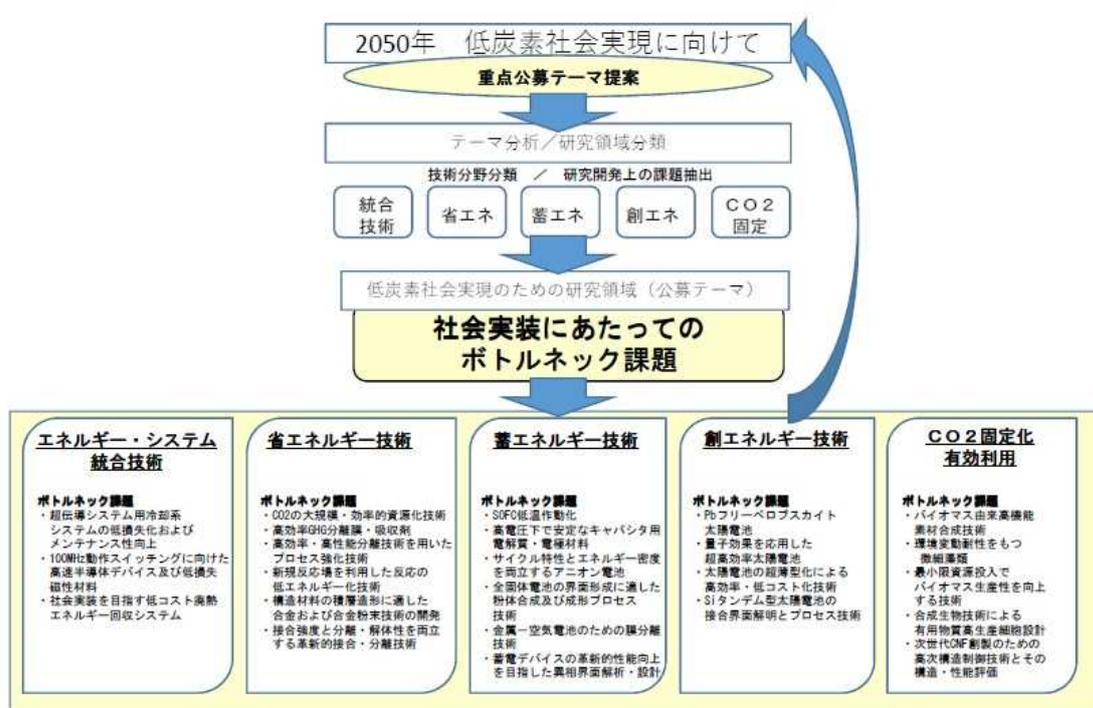


図 1：重点公募テーマの全体図

上述のとおり、平成 27 年の COP21 で採択されたパリ協定では、世界共通の長期目標として平均気温上昇を産業革命以前に比べ 2℃より十分低く保つという目標が設定されています。これを実現するには、『これまでの削減技術とは非連続的な技術も含めて、世界全体での排出量の抜本的な削減を実現するイノベーションを創出することが不可欠』であり、『CO<sub>2</sub> 排出削減のイノベーションを実現するための中長期的なエネルギー・環境分野の研究開発を、産学官の英知を結集して強力に推進し、その成果を世界に展開していくこと』が我が国の果たすべき役割となります。これは NESTI2050 に盛り込まれた考え方です。この研究開発戦略は本領域にて取り組むゲームチェンジングテクノロジー創出の考え方と合致しており、公益性の高い研究開発を推進します。

また、国際社会への貢献という観点では、例えば意欲ある途上国などに対し、優れた技術を用いて協働による取組みを進める等により、世界の CO<sub>2</sub> 排出量の削減に対して、我が国が技術力で中核的役割を果たすことも想定されます。

産業界では、日本経済団体連合会（経団連）がまとめる「2030 年に向けた経団連低炭素社会実行計画」（平成 27 年 4 月作成、平成 29 年 4 月改訂）を策定し、「革新的技術の開発」を計画の柱のひとつに据えて、『産学官による連携も活用しながら、2030 年以降も見据えた中長期で、革新的技術の開発・実用化に積極的に取り組む』とされています。本領域が狙う、低炭素化を阻害するボトルネック課題の解決に資する革新技術が創出され、その技術が企業に橋渡しされれば、企業自身の CO<sub>2</sub> 削減目標の達成に資するのは勿論、日本の産業競争力の向上にも直結することが期待されます。

## **(2) 募集・選考・研究開発推進にあたっての運営統括の方針**

### **● 募集・選考の方針**

事業のコンセプト（革新的研究開発による概念実証）に添った課題を採択するため、以下の要件で選定します。

- (1) CO<sub>2</sub> 排出削減に大きく貢献し得るか（サイエンスとしての観点のみではない）
- (2) 社会実装を担う企業が必要としている技術か
- (3) 大学等アカデミアが実施すべき革新的研究か

また、社会実装に向けては必要に応じて他府省のプログラムと連携し、成果の橋渡しを実施します。以上の取組みを通じて、2050 年に想定されるサービス需要を満足しつつ CO<sub>2</sub> を抜本的に削減する「ゲームチェンジングテクノロジー」を創出し、社会実装につなげることで、低炭素社会の実現に貢献することを目指します。

### **● 研究開発内容**

地球温暖化の解決には大別して「適合策」と「緩和策」の二つのアプローチがあります。前者は、自然や社会の在り方を調整して温暖化による影響を軽減しようというものであり、後者は温室効果ガスの排出自体を抑制しようというものです。緩和策には、科学技術の貢献が大いに期待されており、本領域でも、緩和策による低炭素社会の実現に資するゲームチェンジングテクノロジーの創出を目指します。

CO<sub>2</sub>削減に資する技術開発は、これまで様々なトライアルがなされていますが、未だに実現されていないものも数多く存在します。この原因である「ボトルネック課題」を本領域関係者でまとめ、研究者に具体的に提示することとします。なお、この方法は、JSTで実施中の「先端的低炭素化技術開発」(ALCA)で行っている取り組みを踏襲するものです。

本領域では、一般より公募した重点公募テーマ案のうち、低炭素社会領域に関連の強い169件について、ALCAの各POによる内容分析を行うと共に、ALCAでこれまで提示していたボトルネック課題も踏まえ、本事業としてのボトルネック課題を改めて設定しました。それらをNESTI2050において特定された以下①～⑤の技術分野に分類・整理して、公募を行います。具体的には、以下の通りです。

## ① エネルギー・システム統合技術

### 1) 超伝導応用機器のための冷却システムの低損失性及びメンテナンス性の向上

超伝導システムは社会実装の段階を迎えつつあるが、現行の非超伝導機器システムとの競争を制し、社会実装を進めていくためには、超伝導機器本体だけでなく、冷却系を含めたシステム全体の性能向上を目指す必要があります。具体的には、冷却系を構成する冷凍機などの各種機器を、低損失、運転コスト低減、省メンテナンスなども考慮して技術開発することが求められています。超伝導システムの開発においては、このように冷却系の研究開発が重要であると同時に、それが実用性も含めたシステム側の条件を満足するものである必要があり、システム側条件によっては冷却方法の選択も異なります。一方、応用機器にはあまり依存せず、共通基盤的な冷却技術で、冷却システムのブレークスルーにつながるような革新技术も大いに期待されているところです。そこで、MgB<sub>2</sub>線材、REBCO線材あるいはBi系線材を使った超伝導機器のための冷却システムの研究開発を実施するために、冷凍機、圧縮機、精製機、流量計、液面計などの低温機器、He、H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>などの冷媒の伝熱流動特性、断熱配管系などの高性能化について、コスト、大きさ、メンテナンスも十分に考慮し、実装を目指す提案を公募します。

### 2) 100MHz 動作スイッチング電源の実現に向けた高速半導体デバイスおよび低損失磁性材料の開発

今日、発電所から送られる電気エネルギーは電力変換の度に失われ、その損失量は全発電量の5%程度に達するとされています。このため、電力変換機器には①自動車・電車などの輸送エネルギー低減のための小型・軽量化、②発熱量抑制のための電力変換効率の向上、などが求められています。前者に対しては、高速スイッチングによってリアクトル（インダクタ、トランスを含む）やキャパシタの小型化・軽量化などが効果的です。さらに後者の変換効率の向上により、発熱量が低減すると機器冷却用電力の

削減に加え、時には冷却装置が不要となり、一石二鳥の効果が期待できます。今日、スイッチング電源の動作周波数の上限がMHz程度に留まっている主な理由はスイッチングデバイスの応答速度と磁性材料のヒステリシス損・渦電流損にあります。これらはスイッチング周波数が高くなるほど顕著になります。克服すべき課題は、100MHzの周波数でも動作可能な低損失磁性材料および高速パワーデバイスの開発です。現行の高周波用磁性体材料であるNi-Zn系フェライトは飽和磁束密度や透磁率が低く、スイッチング電源にとって十分な性能とは言えません。また、パワー用半導体素子であるSi-IGBT、パワーMOSFET、SiC-MOSFETはスイッチング速度や電流駆動力の面で難点があります。これらに代わる新しい素子の中では、最も有望視されているワイドバンドギャップ系のパワースwitching素子と電力変換装置の超小型化と高変換効率化につながる高周波領域における新しい低損失磁性材料の提案を募集します。

### 3) 社会実装を目指す低コスト廃熱エネルギー回収システムの開発

中低温(300℃以下)廃熱に含まれるエネルギーは国内で消費されるエネルギーの2/3を占めており、この廃熱エネルギーの回収が地球温暖化ガス排出量削減の鍵となっています。

既に中低温発熱エネルギーの回収技術として、バイナリイ発電、磁気ヒートポンプ、熱電変換材料、音響エンジンなどが考案されていますが、いずれも現状ではシステム製造・保守コストに見合う発電量は得られていません。今後、廃熱回収システムの社会実装に向けて、システムの製造・運用コストに無合うエネルギー回収をすべく、①熱電変換効率の向上、②システムの製造・運用・保守コストの低減が強く求められています。

例えば、上記のバイナリイ発電では、作動液体の蒸発に伴う体積膨張を力学的なエネルギーに変換する際の液体漏れが実用化の壁(運用・保守コストの壁)となっています。この課題を克服する鍵は、ピストンやタービンを密閉空間内で動かす際、液体の漏れを抑えつつ密閉空間内部の機械的な運動を外部に取り出す機構の開発です。①船舶のスクリュウ軸の海水漏れを防ぐ磁性流体軸受けを用い、②密閉空間中のピストンの往復運動を外部の磁石に伝えて運動エネルギーを取り出すなど、バイナリイ発電のエネルギー取り出す機構の工夫により、作動液体漏れなく、廃熱エネルギーを効率的に回収する革新的なシステムの提案を期待します。

また、材料物性が変換効率に大きく影響する熱電材料や磁気ヒートポンプでは、熱電変換性能指数(ZT)や磁気熱量指数に拘らず、使用する元素の原価や製造に要するコスト以上の電力回収が見込める材料開発の提案を期待します。

## ② 省エネルギー技術

### 4) CO<sub>2</sub>の大規模かつ効率的な資源化技術

現在、化学品は化石資源を炭素源ならびにエネルギー源として生産され、最終的に CO<sub>2</sub> として大気中に放出されています。低炭素社会における化学品生産の究極の形は、エネルギーセクター等から排出される CO<sub>2</sub> を、CO<sub>2</sub> フリーの水素で還元した化学原料から化成品を合成する炭素循環の実現です。CO<sub>2</sub> の分離回収技術は CCS 技術開発の一環として、各国で盛んに研究開発されており、実証試験段階のものもあります。しかし、ポリカーボネートの製造などを除いては、回収した CO<sub>2</sub> を資源化する技術開発ほとんど進んでいません。

この種の CO<sub>2</sub> の大規模資源化のためには、還元剤としての水素を、CO<sub>2</sub> 発生を伴うことなく、再生可能エネルギーを用いて大量に製造する技術開発が必要ですが、この技術開発は長期的な課題であるため、本領域では、CO<sub>2</sub> 発生が比較的少ないメタンの利用など既存技術との組み合わせを前提とすることを可とし、要素技術として重要な CO<sub>2</sub> の大規模かつ効率的な資源化技術を先行して構築する提案を公募します。

具体的には、炭酸ガスからのメタノール合成、炭酸ガスからの FT 合成反応、炭酸ガス改質、メタンの部分酸化反応の高効率化などが課題となります。

### 5) 高効率な温室効果ガス (GHG) 分離膜・吸収剤の開発

温室効果ガス (Green House Gas: GHG)、特に化石資源の利用により発生する CO<sub>2</sub> は排出量が莫大であり、その排出削減に向けて、省エネルギー技術の開発や、CO<sub>2</sub> フリーの再生可能エネルギーへのシフトが進められています。しかし、化石エネルギーへの依存は当面避けられない状況で、将来の CO<sub>2</sub> 削減の約 14% を CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) が担うとする試算もあります。現状の CCS コストは 6,000 円/t-CO<sub>2</sub> 以上と試算されており、実用化には大幅なコスト低減が必須とされています。

CCS コストのうち、CO<sub>2</sub> の分離・回収が全体コストの 50~60% を占めており、革新的な分離・回収技術の開発が CCS 普及のボトルネックの一つとなっています。現在、化学吸収法、物理吸収法、膜分離法、深冷分離法、吸着分離法など様々な手法がありますが、いずれの手法においても革新的な技術開発が必要とされています。

CO<sub>2</sub> の分離・回収技術は、使用される燃料の種類やアプリケーションによって動作条件や要求特性が異なることから、多岐にわたるアプローチが考えられます。提案に当たっては、出口アプリケーションによって動作条件や規模を明確にし、分離エネルギーが理論エネルギーにどの程度近づけるかも考慮しつつ、運転や設備の低コスト化も視野に入れた革新的な吸収液・吸着材料・分離膜の開発を期待します。

併せて、これらの材料を効率的に活用できる新規モジュールの開発に関する提案も対象とします。CO<sub>2</sub>に限らず、温暖化係数の大きいガスを対象とした分離回収技術も対象とします。

## 6) 高効率・高性能分離技術を用いたプロセス強化技術

化学産業における生産プロセスの生産性、省エネ性は、未反応原料・製品・溶媒の分離・回収・リサイクルに要するエネルギーとコストによって制約されており、これにかかるコストの問題から未反応原料・溶媒のリサイクルが行われず、大きなCO<sub>2</sub>発生源ともなっています。省エネ型プロセスの開発、低コスト化に当たっては、高効率・高性能な革新的分離プロセスを開発し、プロセス強化を行う必要があります。分離技術そのものならびにさまざまな分離手法をハイブリッド化した革新的分離精製プロセスの開発が、プロセス強化のボトルネックとなっています。対象とする技術としては、高性能分離膜の開発ならびに、膜分離、相分離、吸着、抽出、晶析など、様々な分離方法とそれらを適切にハイブリッド化した分離プロセスに加え、さらにメンブレンリアクター、反応吸収、反応晶析、反応蒸留といった反応分離技術を対象とします。

特に膜分離法は蒸留法に代わる高効率省エネルギー型の分離技術として期待されています。分離膜としては、有機高分子材料、無機材料、また有機・無機複合材料など様々な材料の選択肢があるが、いずれの材料も分離膜として実用化するに当たっては、透過能、選択性、耐久性において革新的な技術の開発が必要であり、これら新規分離膜の開発研究、および、分離膜のサポート層となる支持体、省エネ化・低コスト化を可能とする新規な膜モジュール構造とモジュール材料の開発も対象とします。提案に当たっては、開発される分離技術、反応分離技術が実現したときの省エネ率についての、従来プロセスに対する優位性（見通し）まで視野に入れることが求められます。

## 7) 新規反応場を利用した反応の低エネルギー化技術

C1 化学は各種炭素源のCO、H<sub>2</sub>への変換を経由するか、またはメタンを直接原料とする化学品製造の反応体系ですが、問題点も多くあります。例えば現在のメタノール合成プロセスは750℃以上での高温下での吸熱反応としてのメタンの水蒸気改質と、続いての発熱反応としてのメタノール合成反応からなる不合理なプロセスであり、大量の二酸化炭素を排出するエネルギー多消費プロセスとなっています。またメタンの酸化による直接法メタノール合成の研究もされていますが、反応性の低いメタンを酸化して反応性の高いメタノールで止めるのは容易ではなく、高難度反応の一つとなっています。

エネルギー多消費プロセスの低エネルギー化や高難度反応の選択性の改善が求められており、この種

の化学反応のための触媒開発が盛んですが、触媒性能の飛躍的な向上のためのブレークスルーが切望されています。

一般に触媒は熱的平衡反応場での使用が前提ですが、本領域では、熱的非平衡反応場や、その反応場で高活性を示す触媒開発などに着目し、従来型反応場では実現できない新規な反応、反応プロセスの提案を公募します。新規反応場へのエネルギー供給手段として電磁波、超音波、磁場、電場および、それらの複合が考えられます。また反応としては、生産量が多い汎用化学品の生産のためにエネルギーを多量に消費しながら現在実施されている反応、並びに高難度反応の高収率化と低エネルギー化の両立を対象とします。提案に当たっては生産システムに投入するエネルギー（見通し）を提案の生産技術と比較することを要件とします。

### **8) 構造材料の積層造形に適した合金および合金粉末技術の開発**

複雑な形状も造形する 3D プリンター技術は今後耐熱材料製造の分野でも発展する有望な技術と考えられますが、高品質で清浄な粉末供給体制と汚染されない積層造形技術は確立していない状況です。例えば、Al や Ti を含有する Ni 基合金に既存の粉末製造技術を適用すると、酸化や窒化が起こり、クリープ強度や靱性が著しく低下するなどの問題があります。プラスチックやバイオ系などのポーラスセラミクスと異なり、構造材料や耐熱材料の難加工性の問題を回避するために 3D プリント技術を用いるには、抜本的な合金組成の再検討、熱履歴シミュレーションと結合した組織の作りこみの技術が必要で、ボトルネックとなります。これらを受け、清浄粉末の製造技術開発と粉末製造工程および積層造形工程で汚染を受けにくい、更には粉末表面由来の酸化物、窒化物に対しても有効なロバストな合金開発に資する挑戦的な提案を公募します。

### **9) 接合強度と分離・解体性を両立する革新的接合・分離技術**

産業部門が我が国の CO<sub>2</sub> 発生の最大部門(2014 年で 34%)であり、その 6 割を素材産業が占めており、素材の製造にかかわる CO<sub>2</sub> の発生は大きくなっています。この新たな素材の製造に伴う CO<sub>2</sub> 発生の抑制のためにリユースやリマニュファクチャリングを促進する循環技術の開発は有効ですが、その大きなネックとなっているのが「接合・分離」技術です。

接合強度と分離・解体性を両立する「革新的接合・分離」技術が成り立つと解体に要するエネルギーも減らすことができるため多くの製品を対象にした循環型社会、低炭素社会が実現できます。特に、社会インフラ素材に対する既存資源の有効利用や短期間の解体・組立ておよびインフラシステムの長寿命

化を可能とする技術、および製造エネルギーの高い軽量化素材のリサイクル性をも考慮したマルチ素材の「接合・分離」への革新的な展開に資する提案を募集します。

### ③ 蓄エネルギー技術

#### 10) 固体電解質型燃料電池(SOFC)の低温作動化

SOFCは高効率で、白金触媒が不要という大きな資源的メリットがありますが、その反面、700～900℃と作動温度が高いという本質的な技術課題が存在します。そこで効率や白金触媒を用いない等のメリットを担保しつつ、500～600℃付近までの低温作動化、高寿命化が求められています。低温作動化には、律速過程となる電解質や電極材料における、中・低温域でのキャリアーイオンの拡散過程とそれを容易にする欠陥構造に対する最適構造の探索と材料設計手法が重要であると考えられます。加えて、システムの起動・停止を容易にする材料・構造の研究開発も重要です。

ボトルネック課題を解決するアプローチ、例えば最適構造設計と燃料電池性能の相関を明らかにするなど基礎科学を基盤とする技術開発の提案を公募します。

#### 11) 高電圧下においても安定な電気化学キャパシタ用電解質・電極材料あるいは高容量電極-電解質系

電気化学キャパシタは、急速充放電特性に優れていることから、再生可能エネルギーで得た電力の平準化利用など様々な用途が期待されています。しかしながら、蓄電池に比べエネルギー密度が劣っていることから、高電圧で作動する高容量の電気化学キャパシタの開発によるエネルギー密度向上が求められています。具体的には以下のような提案が期待されます。

- ・高電圧下（例：4V以上）においても安定な電解質や電極材料
- ・炭素材料を用いた既存キャパシタの容量を上回る（例：2倍以上）電極-電解質系の開発
- ・性能向上に向けたLiイオンキャパシタ新規プレドープ技術の研究開発

#### 12) サイクル特性とエネルギー密度を両立するアニオン電池

リチウムイオン電池（LIB）に代表されるインサージョン型蓄電池は、繰り返し充放電特性に優れていますが、ホスト材料の重量や体積が高いため、エネルギー密度に制限があります。一方、金属そのものを電極として利用するリザーバ型蓄電池の中で、アニオンを移動イオンとする新規な電池（アニオン電池）は、ホスト材料を必要としないので、エネルギー密度を大幅に向上させられる可能性があります、サイクル特性が不十分であり、ボトルネックとなっています。そこで、新たな材料設計に基づいた、ア

ニオン電池の研究開発を募集します。

### 13) 全固体電池の界面形成に適した粉体合成および成形プロセス技術

低炭素社会構築に向けた次世代キーデバイスとして期待されている全固体電池は、正極活物質や電解質などの粉体を圧縮成形することにより、電極や電解質層を作製します。この粉体には所望の組成、粒径、結晶状態が、更に成形プロセスでは粒子の境界（粒界）の最適な界面状態が要求されますが、その実現が難しくボトルネック課題となっています。そこで、製造における、最適な物性を持つ粉体の合成や界面・複合膜形成のプロセス技術の研究開発を募集します。

例えば複合膜界面近傍の活物質-電解質の副反応を抑えるため、常温付近で複合膜を形成する技術開発などが挙げられます。また、得られた複合膜のイオン伝導性と形成プロセス条件の相関など、基礎的な科学をもとに解明する提案となることが求められます。

### 14) 金属-空気電池のための膜分離技術

次世代蓄電池の中で最も大容量な電池と期待されている金属-空気電池は空気中の酸素を正極活物質として動作しますが、水蒸気  $H_2O$  や二酸化炭素  $CO_2$  などが金属-空気電池の劣化につながっており、ボトルネックとなっています。この課題解決のため、膜分離技術の研究開発が重要です。

金属-空気電池を自動車に設置する場合や据置型の蓄電池として利用する場合を想定し、上述の気体を効率的に除去でき、コンパクトで軽量の膜分離技術の提案を募集します。

### 15) 蓄電デバイスの革新的な性能向上を目指した異相界面解析・設計技術開発

全固体電池の開発ではリチウムイオンの分布や伝導度、積層した場合は電位分布などの情報を可視化し、電池設計に反映することが重要です。充放電下のリチウムイオンの分布や伝導度について放射光実験で一部明らかになってきていますが、リチウムは3番目に軽い元素であり、実験室レベルでの分析手段が限定されています。さらに充放電下で膜の深さ方向での測定は難しく、電池開発における律速につながっています。

また、燃料電池では、燃料-電極触媒（集電体）、電極-イオン交換膜など、電池作動に不可欠な三相界面において、反応抵抗や物質移動抵抗を下げ、かつ、高耐久性を維持することが社会実装の際のボトルネックとなっています。

これらの課題を解決するアプローチとして、例えば全固体電池では、放射光実験で用いる大型装置ではなく、実験室的レベルの汎用装置で、膜の深さ方向における in-situ 測定技術を開発することが求めら

れています。燃料電池においては、複雑に相互作用する異相界面の制御・機能解明を行うため、2次あるいは擬3次界面の実験的および計算科学解析、界面設計など異相界面に特化した技術の開発が求められています。これらの課題解決により、エネルギー変換デバイス全般へ大きな波及効果と性能向上、社会実装の加速が期待できます。

なお、解析・分析手法だけの提案ではなく、その結果何を解明してそれがどのように電池特性を向上させるのかのシナリオを必須とします。

#### ④ 創エネルギー技術

##### 16) Pbフリー及び高耐久性ペロブスカイト太陽電池（※「(3) その他」を必ずご参照ください）

鉛を含む太陽電池は、製造や廃棄において特別な管理を必要とし、コストを増加させます。メガソーラーだけでなく家庭用への適用が拡大する中、環境負荷を増大させないためには鉛フリー化が不可欠です。ペロブスカイト太陽電池の鉛フリー化は既に各所で検討されていますが、十分な特性が得られていないのが現状です。

また、耐久性のない太陽電池は、短期間で交換する必要があるため、長期間使用できる高耐久性の太陽電池が求められています。実用化されている太陽電池では20年～25年の使用が保証されています。ペロブスカイト太陽電池は材料、プロセスの最適化によって、耐久性が向上していますがまだ十分ではありません。

以上から、鉛フリーかつ高耐久性のペロブスカイト太陽電池を実現する挑戦的な提案を募集します。

##### 17) 量子効果太陽電池（量子ドットのサイズ・配列の制御など）（※「(3) その他」を必ずご参照ください）

Si太陽電池では、セルでの変換効率が25%前後に達していますが、単接合の太陽電池では理論的な最大効率が29%程度とされています。通常の太陽電池では、バンドギャップよりもエネルギーの低い光は吸収できず、エネルギーの高い光では余剰のエネルギーが熱となって失われるためです。これに対して、量子ドット太陽電池ではバンドギャップの中に中間バンドを形成することができ、光のエネルギーの大半を電気に変換することが可能になります。量子ドット太陽電池では、集光型で75%以上の効率が得られるとされています。一方、実際に得られている変換効率はまだ低く、基礎的な検討に加えて量子ドットの材料、形成方法などの最適化が必要です。

このため、量子効果などの新しいコンセプトを利用して、従来のSi太陽電池の2倍以上の変換効率を実現する太陽電池を募集します。量子ドット、ナノワイヤ（ウォール）、近接場光（ドレスト光子）、フ

オトン・アップコンバージョンなどを利用した各種の太陽電池を対象とします。材料や機構は制限しないが、従来の太陽電池に対する優位性や具体的な作製方法まで踏み込んだ提案を期待します。

**18) 超薄型技結晶系 Si 太陽電池作製技術（光閉じ込め技術、パッシベーション技術、40 $\mu$ m 以下シリコン基板作製など）（※「(3) その他」を必ずご参照ください。）**

Si ウェハの厚さは現在、180 $\mu$ m 前後まで薄くなっていますが、40 $\mu$ m 以下まで薄くすることができれば、多結晶 Si 材料のコストを大幅に下げることができます。さらに、薄型太陽電池では、既存の薄膜太陽電池とおなじようにフレキシブルになるため、従来の Si 結晶系太陽電池では不可能であった場所にも設置することができます。これによって、高変換効率で高耐久性の Si 太陽電池の設置可能場所を大幅に拡大することができ、Si 太陽電池の導入を増加させることができます。

Si ウェハの厚さを 40 $\mu$ m 以下まで薄くする方法として、結晶成長、スライス、剥離、スマートカットなどさまざまな技術が考えられますが、加工時に無駄になる Si を出来る限り少なくすること、薄くした Si ウェハにおいて太陽電池が動作可能な品質を有していることが必要です。

以上から、Si 太陽電池のコスト低減と設置場所の拡大を目的として、太陽電池動作能力を有しつつ、可能 Si ウェハを 40 $\mu$ m 以下まで薄くする技術ならびに高効率化技術の提案を募集します。

**19) Si 系タンデム型太陽電池の接合界面の解明とプロセス技術（※「(3) その他」を必ずご参照ください。）**

太陽電池の変換効率の大幅な向上を実現するためには、バンドギャップが異なる半導体材料を積層することにより、吸収波長域を拡大したタンデム型太陽電池が有効です。ボトム層の太陽電池としては、変換効率が高く、耐久性に優れた Si 太陽電池（バンドギャップ $\sim$ 1.1eV）が最適です。トップ層の太陽電池にはバンドギャップが 1.5 $\sim$ 1.7eV 程度の半導体層の太陽電池が検討されています。具体的にはペロブスカイト太陽電池（バンドギャップ $\sim$ 1.5eV）がトップ層として用いられていますが、十分な効率向上が得られていません。

異なる太陽電池を組み合わせたときの最適な接合界面や出力電流・電圧特性を把握し、タンデム型太陽電池を開発することが必要です。

課題を解決するアプローチとして、例えば最適な界面を形成可能とする製造プロセス、形成した膜の構造、電子状態、太陽電池としての光学的／電気的性能における相関を明らかにし、タンデム型太陽電池としての最適な接合界面の設計が求められます。また、実用化への期待から特に、Si 太陽電池をボトム層に用いたタンデム型太陽電池の開発研究を募集します。

## ⑤ 二酸化炭素固定化・有効利用

### 20) バイオマス原料から高性能・高機能素材を高効率で生産する新しい合成技術

バイオマス（木質・草本材料）の成分分離で得られる糖類やリグニンを原料として、日常生活や産業に有用な化成品や高分子素材を省エネルギープロセスにおいて高効率で生産する新しい技術を開発してその産業体系を確立することは、低炭素社会を実現するための重要課題の一つです。最近の数年間において、木質あるいは草本材料からセルロース、ヘミセルロース、リグニンの3成分を合目的的に分離する多様なプロセスが提案され、それぞれ特色ある分離技術の開発が急速に進展し、用途に応じたセルロースナノファイバー、多糖類、糖類、リグニンを比較的到低コストで生産できるようになってきました。

バイオリファイナリーシステムにおけるボトルネックは、バイオマスから生産できる糖類やリグニンを社会が求める高性能素材や高機能素材へと効率的に変換する新しい化学的・生物学的合成方法を開発することにあります。糖類やリグニン等を原料として、高性能あるいは高機能な化成品や高分子素材を省エネルギープロセスで効率良く生産する新しい合成技術を開発する挑戦的な提案を公募します。

例えば、以下のような提案を期待します。

糖類やリグニン等をエタノール、メタンのような安価な汎用化成品やエネルギー原料に変換するのではなく、

- ・糖鎖やリグニン等が保有する生物由来六員環等の骨格構造を活かした機能化成品や高機能性高分子に変換する化学的・生物学的な合成技術
- ・今後増産が予想される天然ガス、シェールガスからは生産が困難で将来的に品薄が予想される化学品原料、例えば、C4化合物や芳香族化合物を、糖類やリグニン等を用いて、低コストで効率良く生産する合成技術の開発

### 21) 大規模生産に向けて環境変動にロバストな微細藻類の開発

微細藻類による化学品、燃料の生産は、光合成によってCO<sub>2</sub>から物質生産できるため大変期待されています。これまで培養条件の検討や遺伝子制御技術によって、目的物質を効率よく生産するための研究がなされてきました。これらの成果は、付加価値化成品の生産も併せたものなど、実用化に向けて期待を持たせるものであり、実用化に向け、大規模化を伴う実証実験が様々に試みられています。そこで明らかになってきたことは、大規模培養においては、実験室とは異なる克服すべき高いハードルがいくつかあるということです。一番の問題は、大規模培養系では実験室の分析系と比べて著しく生産性が低いことです。微細藻類は、種類により適切な光の強さが異なっていますが、実験室では、目的の微細藻類

に合わせ理想的な光・温度環境を利用できます。しかし、例えば野外においては光の強さは天候によって著しく変動し、人為的にコントロールするのは困難です。強弱の変動により、野外環境では高密度での培養を維持できないことが、目的物の生産性低下、コンタミネーション、回収コストの問題につながります。また、野外に限らず、室内での閉鎖系の大規模培養でも、培養槽の表層と深層における細胞環境の違い、攪拌の問題、深部を照らす照明が必要になる問題等、実験室の分析系とは全く異なる問題が生じます。

大規模生産のためのボトルネック克服のために、環境変動にロバストな微細藻類の開発を公募します。例えば、上記のように光の強弱あるいは培養槽の深度に関わらず生産性が維持できる微細藻類や、室内の弱い照明でも高密度の細胞濃度の得られる微細藻類が開発できれば、大きな波及効果が得られます。また、回収した微細藻類からの化合物抽出に有効な破碎技術とリンクしていると、なお実用化の可能性が高まると考えられます。

## 22) 最小限の資源投入量でバイオマス生産性を向上できるための技術

CO<sub>2</sub> 削減に大きく寄与する植物のバイオマス増産の方法には、生育地の拡大、生産性の増加向上があります。いずれにおいても、少ない水分や栄養分で生育できること、環境変動に対する強い耐性、病虫害抵抗性などによって、様々な劣悪な環境や変動する環境においても生産量/成長を維持できる植物を開発することが有効と考えられますが、まだ抜本的な解決技術はありません。また、水分や栄養分などの資源投入は、とりもなおさずエネルギー投入であり、その削減は収量当たりのエネルギー投入量を抑える観点からも重要です。

そこで、飛躍的に少ない資源投入量でも生育の優れた植物や環境に対してロバストな植物を育成するための画期的な植物育種法の開発を公募します。例えば、物質の植物内への取り込みや植物内での移動を促進する、あるいは新しい代謝経路を加えることで今まで利用できなかった窒素源等を利用できるようにするなどの様々な方策が考えられます。また、光合成、代謝、ホルモンなどとのリンクを通し、植物全体のバランスを高いレベルで維持できるように最適に設計・育種する技術開発なども期待します。

さらに、植物自身の能力のみならず、植物に共生する微生物との相互作用を理解し、共生微生物の中から植物の生育促進や病虫害抵抗性に貢献する微生物を単離・同定して微生物剤として利用する技術や、環境微生物群を制御できる化合物の技術開発なども公募します。植物の生育状況は土壌の違いによって大きく異なり、微生物叢の相違が重要な一因と考えられますが、その実態の解明と効率的な制御は今後の課題です。例えば、優良圃場中の微生物叢の組成を明らかにするとともに、微生物の機能を最大化す

る植物栽培技術を開発することで、微生物利用を実用的な植物バイオマス増産技術として確立する研究も期待します。あるいは、メタゲノム情報を用いて植物改変を行う研究も歓迎します。

### 23) 有用物質高生産細胞をデザインするための合成生物技術

物質生産へのバイオプロセス導入による生産エネルギーの低減により、CO<sub>2</sub>排出削減が期待できます。バイオプロセスの汎用化、スケールアップを目指し、オミックス解析、システムバイオロジー、フラックス解析、ゲノム編集やゲノム合成技術の進展により、微生物の中に人工的な代謝経路を導入し、新たな物質生産能を付与することができるようになってきています。こうした研究により、多様な糖質原料や、CO<sub>2</sub> やメタンなど低分子ガスから化成品を合成することが試みられています。しかし、ある経路を導入したとしても、一過的なもの、冗長性の中への埋没、予想した程度の効果が得られない、経路改変・導入により細胞内の代謝バランスやエネルギー・酸化還元バランスが崩れて生育速度が悪くなる、などの理由で十分な生産性が得られないことが多く見られます。また、物質生産におけるエネルギー投入量を減少させる必要がありますが、それには独立栄養微生物の機能に学び新しい手法を開発する必要があります。さらに、標的生産物が毒性を示し、生産できないといった問題も生じています。これらの問題点を解消するために、人工代謝経路とエネルギー・還元力供給系を併せて最適に構築するなど、物質生産に最適に細胞全体をデザインする合成生物技術に資する開発を公募します。例えば、以下のような提案を期待します。

- ・ 多種の微生物に共通で導入が可能な高効率 ATP・還元力再生系の開発
- ・ 電子供給能、化学エネルギー供給能、炭酸固定能など、独立栄養微生物の機能を活用する技術
- ・ 人工的な代謝経路に必要となる人工酵素を効率よく創製できる手法の確立
- ・ 収率やエネルギー利用効率を上げながら毒性の高い物質でも生産できる、遺伝子回路の合理的な設計手法の確立
- ・ 上記を利用して、合成生物学的な設計を行う設計ツールの開発
- ・ 合成生物学的な開発に適したプラットフォーム宿主細胞の開発

### 24) 次世代セルロースナノファイバー材料を創製するための高次構造制御技術

木質材料から太さ 20nm 程度のセルロースナノファイバー (CNF) を効率よく分離・精製する技術の開発が進み、わが国において CNF の工業生産も試験的に始まっています。CNF の引張強度 (3GPa) と弾性率 (140GPa) はアラミド繊維などの超高強度繊維と同程度であり、CNF は高性能素材として大きな可

性能を持っています。また、CNF 表面を化学修飾して各種官能基を導入させることや、CNF 表面に金属イオンや金属ナノ粒子を高密度で付着させることができ、CNF は高機能素材としても大きな可能性を有している。しかしながら、親水性の CNF を用いて単独あるいは樹脂との複合化によって高性能・高機能材料を作製するためには、CNF を基盤とする材料の高次な階層構造を、各階層において精密に構造制御する技術の開発が必要です。CNF を用いて次世代材料を設計し創製する技術開発に関する挑戦的な提案を公募します。

以上のボトルネック課題を提示したうえで公募することにより、研究者がそれぞれの視点や手段を用いつつ、適切な課題設定を行い、領域全体で低炭素社会の実現に資するという目的を共有した研究体制を構築します。

なお、これらのボトルネック課題を解決し、成果を社会実装するに当たっては、当該技術のコストメリットを十分に勘案する必要があります。そのため、これまで ALCA において採択された課題、本年度、未来社会創造事業（低炭素社会領域）で採択する課題について社会に導入・普及される際の技術の合理的予測、二酸化炭素排出の削減効果を評価する必要があります。このような評価を行うため、上述のボトルネック課題とは別に以下の提案を公募します。

#### ⑥ 低炭素技術のコストエンジニアリング

限られた資源の重点投入・社会へのインパクトの視点から、当領域の事業推進に研究開発課題「低炭素技術のコストエンジニアリング」の機能を導入することが重要です。コストエンジニアリングは、当領域で研究開発対象となる低炭素技術・システムが将来社会に導入・普及される際の技術開発の合理的予測及び CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果の評価をするものであり、当領域の成果の 2040 年代の社会普及の取り組み、ひいては、「2050 年の温室効果ガス 80%削減」の目標達成に向けた必要不可欠な取り組みです。

そこで、コストエンジニアリングを実施する課題を公募します。コストエンジニアリングの評価対象は、ALCA の既存採択課題など、低炭素化社会を目指す研究開発分野とします。対象となる低炭素技術・システムを選定し、そのコスト展望、技術が確立する時期・産業化時期・市場規模の見通し等の推計を行ってください。具体的には、低炭素技術・システムの開発段階に応じた技術水準の推定や、システム原価の計算等です。また、想定される製品の市場規模を考慮し、社会実装にかかるコストを算出してください。

推進中の技術分野・研究開発課題を優先的にコストエンジニアリングの対象とするべきかの分析・決定方針の妥当性も評価の対象とします。また、用いる方法論は、広範囲な技術分野に応用可能であることが望まれます。

コストエンジニアリングの結果は、当領域の推進において、関係課題の達成目標の再調整や、ステージゲート評価に活用することを予定しています。

## ⑦ 低炭素社会実現に向けた新発想

上記①～⑥の他に、「低炭素社会の実現」に向けて、研究者が自律的に課題を設定する提案も公募します。ただし、本領域は技術開発による緩和策による低炭素社会を目指していることから、気候変動や生態系影響の観測など、適合策に関する提案は対象としません。

### <成果の適用先の想定>

本領域では、上記ボトルネック課題の解決に向けたチャレンジングな研究開発を進めるため、実用化までに長い年月を要する技術も含まれています。そこで、JST の他事業や他府省のプログラムと早期に連携を行い、産業界への成果の橋渡しに加え、更に長期的な取り組みが必要な課題においては、より実用化に近い他の研究開発プログラムへ成果を引き継ぐことも検討します。具体的には、現在 JST で実施中の「先端的低炭素化技術開発 (ALCA)」と一体的に事業を推進することで、相乗効果を狙います。

また、NEDO のエネルギー・環境先導プログラムのうち、平成 29 年度に新規発足した「未踏チャレンジ 2050」との連携を進めます。2050 年の「低炭素社会」実現に向けた革新的な研究開発の創出のため、JST 側では主としてアカデミアを中心としたボトルネック課題の解決を推進し、NEDO 側では主として産学連携による産業界のニーズを踏まえた課題の解決を目指すことで現在調整中です。

## ● 実施体制

探索研究においては、出口をしっかりと意識しつつも挑戦的な研究テーマを採択します。ステージゲートは、研究が将来の低炭素社会実現に向かっているか、つまり本領域の目標に資するかどうかを評価します。ステージゲート評価は単に「ふるい落とす」手段ではなく「優れた研究の方向を正しく意識付けると共に、効果的に引き上げ、伸ばす」評価であり、将来的に CO<sub>2</sub> 排出削減に大きく貢献し得る技術を育成する方法であることにご留意ください。

本格研究においては、「低炭素社会への貢献可能性」を意識した運営を行い、社会実装に向けた研究開発の加速を行います。

## ● 研究開発の推進方針

JSTでは、平成22年より「先端的低炭素化技術開発」(ALCA)を実施しています。ALCAは温室効果ガスの低減を目指した低炭素技術開発に特化した研究プログラムとして、“出口”を強く意識しているため、従来の基礎研究事業にはない様々な取り組みを行っていますが、中でも運営における特徴のひとつに「スモールスタート・ステージゲート方式」が挙げられます。

この方式は、採択時には比較的少額の課題を多数採択し(スモールスタート)、ステージゲート評価を経て通過した課題は、重点化によって研究規模を拡大する取り組みです。

その他にもALCAでは、①上記のボトムアップ型(スモールスタート&ステージゲート)の研究開発にくわえて、明確な出口を目指したトップダウン型の研究開発も推進する、②経産省をはじめとする他府省との関連プログラムおよびプロジェクトとの連携を行う、など、成果の社会実装に向けた研究開発の加速施策、および実用化に向けて成果を橋渡しする取り組みを行っています。以上を含めた、ALCAの事業の枠組みを図2に示します。

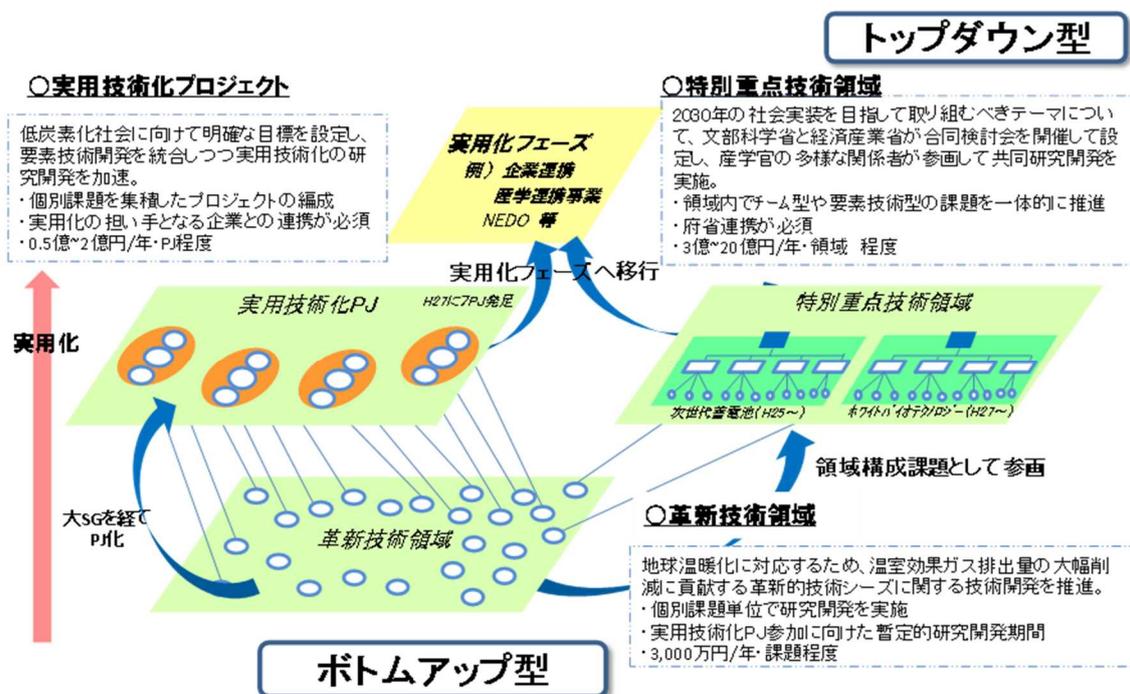


図2：ALCAの事業の枠組み

本領域では、ボトルネックの解消等による社会・産業界への大きなインパクトが見込まれた段階で、社会や産業への適用・応用が急速に進むことが見込まれることから、探索研究期間の途中であっても積極的に本格研究への移行を検討することとします。また、社会・経済的インパクトの最大化において必要と運営統括が判断した場合は、複数の研究開発課題の融合によるチームの再構成等を行うことも想定しています。

● 期間・研究開発費

平成 29 年度に開始する研究開発課題においては、期間を平成 33 年度末までの 4.5 年間を標準とし、研究費は研究期間全体で総額 1.4 億円（直接経費）を上限として計画してください。なお、各年度の研究費上限は以下の通りとして提案してください。

研究開発予算計画（直接経費・最大値）				
H29 年度	H30 年度	H31 年度	H32 年度	H33 年度
1,000 万円	2,000 万円	3,000 万円	4,000 万円	4,000 万円

### (3) その他

次のボトルネック課題への提案に際しては、必ず本項をお読みください。

#### ボトルネック課題

##### ④ 創エネルギー技術

16) Pb フリー及び高耐久性ペロブスカイト太陽電

17) 量子効果太陽電池（量子ドットのサイズ・配列の制御など）

18) 超薄型技結晶系 Si 太陽電池作製技術（光閉じ込め技術、パッシベーション技術、40 $\mu$ m 以下シリコン基板作製など）

19) Si 系タンデム型太陽電池の接合界面の解明とプロセス技術

これらについては、文部科学省の「革新的エネルギー研究開発拠点形成事業」<sup>※1</sup>において、産総研福島再生可能エネルギー研究所（福島県郡山市）内に整備された研究環境（以下「拠点」という。）<sup>※2</sup>の活用による研究加速を意図し、以下の2通りの募集を行います。

(a) 【プラットフォーム型】研究及び拠点の運営・維持管理<sup>※3</sup>を一体的に行う提案。

(b) 【研究型】研究のみの提案。

#### (a) 【プラットフォーム型】について

ボトルネック課題を解決するための研究を、拠点を活用して推進することを前提とし、そのための拠点の運営や維持管理とともに一体的に行って頂く提案です。また、(b)の提案から採択となった実施者が拠点にある設備を利用することも可能とすることで、当該分野のプラットフォームとして機能して頂きます。本事業の太陽電池関連の研究全体の加速が図られることを期待します。なお、運営・維持管理のために必要な経費は研究費に加えて措置します。

#### (b) 【研究型】について

ボトルネック課題を解決するための研究の提案です。プラットフォーム実施者による拠点運営の下で、拠点にある設備を必要に応じて来訪等により利用することも可能です。

選考は、(a) (b) を一律に、後述の評価項目及び基準の内容に従い、研究面からの評価のみで行います。研究面からの評価を通過後、(a) への提案については、安全面を中心とした維持管理面の妥当性を JST が別途審査します。最終的に、プラットフォーム型として採択されるのは一者のみとし、(a) への提案であっても研究型として採択となることがあります。

- ※1 革新的エネルギー研究開発拠点形成事業は、平成 24 年度～平成 28 年度に JST が文部科学省から委託を受けて実施した事業です。JST は、産総研福島再生可能エネルギー研究所（福島県郡山市）内にシリコン系を中心とした超高効率太陽電池に関わる研究環境を整備し、研究開発を実施しました。
  
- ※2 当該拠点には、特殊高圧ガスを用いた成膜装置やスパッタ装置、インプリント装置等の加工関連装置をはじめ、クリーンルームやドラフトチャンバー等の基礎設備や、太陽光シミュレーターや SEM 等の評価装置まで、一連の研究を一体的に実施可能な装置群が集約・整備されています。当該ボトルネック課題に対し重要な装置群が整っていることから、これの活用により本事業における当該分野の研究開発の効果的・効率的な推進が見込まれます。なお、拠点のスペース及び設備類は、それぞれ産業技術総合研究所及び文部科学省の資産であり、契約等により借り受けることで利用可能となります。
  
- ※3 拠点の運営・維持管理には、設備類等の維持管理業務、安全・法令対応業務、契約関連業務、その他拠点活動に必要な業務を含みます。また、拠点運営にあたっては産業技術総合研究所のルールを遵守頂くとともに、産業技術総合研究所による安全審査や安全勧告等に従って頂きます。なお、事業終了時にはスペースを原状回復（詳細は JST が指定）のうえ、産業技術総合研究所に返還頂きます。最終的に設備類は、文部科学省の承認を得ることで自機関に移設または処分を行うことが可能です。以上を含む拠点の運営・維持管理に関わる必要な経費は査定のうえ研究費に加えて措置します。