

ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTC GCC AATTAATA
TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA C CTAACCT CTCAGAC

戦略プログラム
太陽光エネルギーの利用拡大基盤技術

0101 000111 0101 0000
001101 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011



研究開発戦略センターでは、国として重点的に推進すべき研究領域や課題を選び、以下3種類いずれかの戦略プロポーザルとして発行している。

戦略イニシアティブ

国として大々的に推進すべき研究で、社会ビジョンの実現に貢献し、科学技術の促進に寄与する

戦略プログラム

研究分野を設定し、各チームが協調、競争的に研究することによって、その分野を発展させる

戦略プロジェクト

共通目的を設定し、各チームがこれに向かって研究することによって、その分野を発展させると同時に共通の目的を達成する

エグゼクティブサマリー

本戦略プログラムでは、新材料の開発や光合成機能の活用等により、太陽光エネルギーの利用拡大の基盤を確立するための研究開発戦略を提案する。

21 世紀に入り地球規模の諸問題が顕在化している。その中でも、増大するエネルギー需要の充足と気候変動の主因である CO₂ 削減をどう両立させるかは緊急かつ長期的な重要課題である。基本的なエネルギー構成の変革シナリオは、以下の通りである。

- (1) 省エネルギーの実施
- (2) 自然エネルギーを含む再生可能エネルギーの最大利用
- (3) 化石燃料の有効利用と CO₂ の回収・隔離
- (4) 原子力の最大利用

本提案は、自然エネルギーのなかでも、無尽蔵のクリーンエネルギー源であるという点で、特に有望な太陽光エネルギーの変換によるエネルギー発生技術に関するものである。

太陽光エネルギーの利用は既にシリコン系太陽電池等を中心に実用化が進んでおり、その効率化のために政府による投資も行われている。しかし、低コスト化には壁があり、現在の技術では大幅な利用拡大は困難である。

一方、大幅なコスト低減が期待できる有機系の太陽電池や将来性のある太陽光による水素発生技術については、その基礎的な部分について民間では系統的に取り組まれておらず、多くの研究課題が残されている。また大学等においては技術シーズがあるものの、政府によるまとまった投資は行われていない。

我が国の大学等は、材料科学、化学、バイオテクノロジー等の分野で高いポテンシャルを有しており、それらを結集して基礎的な研究課題に取り組めば、大きな成果が期待でき、太陽光エネルギーの利用拡大のための基盤が形成されることが考えられる。

具体的に国として投資すべき研究開発課題は以下の通りであり、技術パッケージ^[注]として中長期的に融合・連携させながら推進していく必要がある。

- (1) 有機系材料を用いた太陽光発電の基盤技術
- (2) 太陽光を利用した水素生成の基盤技術
- (3) エネルギー変換システムとしての設計理論構築（上記の共通課題）

これらの課題はいずれも材料科学、バイオテクノロジーの最先端の技術を駆使し、また、物理学、電子工学、化学、生物学の融合研究により推進していくことが極めて重要であり、研究開発プロジェクトの実施にあたっては、融合・連携が促進されるような研究推進システムを整備する必要がある。また、並行して実施される NEDO 等の関連プロジェクトと補完し合う府省連携体制の導入が成功の必要条件と考えられる。

本提案は、日本の強みを生かしたイノベーション効果の高い基盤研究課題への投資戦略であり、技術基盤が確立して実用化が進めば、将来的に得られるリターンとしては、

- (1) グローバルには地球環境保全への貢献
- (2) 国内的にはエネルギー自給率の向上への直接貢献
- (3) 競争力の高い新エネルギー産業の創出

が期待される。

以上が、緊急にスタートし、かつ、中長期的なスコープで実施されるべき戦略プログラムである。

[注] 技術パッケージ

社会ニーズを満たすために設定された特定の課題を解く際には、単独の技術だけが有効であるケースよりも、むしろ技術的解決に有効な複数のアプローチがある場合が多い。この複数のアプローチがそれぞれ異なる研究分野に属するものであっても同時に合わせて研究開発を行うことによって、結果としてその課題が、単独の技術の研究開発を行うよりも、より良く解決されると考えられる場合、その研究開発の対象全体を「技術パッケージ」と呼ぶ。

目 次

エグゼクティブサマリー

1. 提案の内容	1
2. 研究投資する意義	3
3. 具体的な研究開発課題	5
4. 研究開発の推進方法	8
5. 科学技術上の効果	10
6. 社会・経済的効果	11
7. 時間軸に関する考察	13
8. 検討の経緯	14
9. 研究開発課題の詳細	17
 専門用語説明（本文中でアンダーラインした用語の説明）	23
 参考文献	26
 添付資料：太陽光エネルギー変換（太陽光発電、水素生成）の俯瞰表	別添

1. 提案の内容

本提案の「太陽光エネルギーの利用拡大基盤技術」とは、有機、無機、生物系の広義の材料関連の先端技術を駆使して、太陽光エネルギーを人間が利用可能な他の形態のエネルギーに変換する効率の向上と、低コスト化を可能とする一群の技術であり、本提案では、具体的な研究開発課題と研究開発を円滑に推進するための方策を合わせて提示している。

地球温暖化防止に向けては、温暖化ガスである CO₂ を全く排出しないエネルギーの発生技術が強く望まれている。そのような技術の一つは、CO₂ を排出しない自然エネルギーの有効利用であり、特に太陽光エネルギーの利用は、無尽蔵にあるクリーンエネルギー源という点で非常に有望である。

太陽光エネルギーの利用は、シリコン系太陽電池を中心に実用化が進んでおり、民間の十分な投資あるいは NEDO を中心としたファンドが既に存在する。しかしながら、現在の太陽電池の発電コストは、既存の電力源の数倍であり、低コスト化が必要である。技術の成熟したシリコン系太陽電池にとってさらに現状の数分の一という低コスト化は生易しいハードルではなく、現在の技術では太陽光エネルギーの利用の大幅な拡大は困難である。

一方、低コスト化が期待されている色素増感型を初めとする有機系太陽電池の開発においては、電池の技術以前に材料に関する多くの基礎研究課題が解決されずに残されている。このため、民間での取り組みには限界があり、大学等においても技術シーズはあるものの、まとまった政府による投資は行われていない。

以上の背景から、国として投資すべき研究開発課題として以下を提案する。

1. 「有機系太陽光発電基盤技術」

- 1－①高効率・長寿命色素増感太陽電池の研究開発（有機色素分子の探索、固体化プロセスなど）
- 1－②高効率・長寿命有機薄膜太陽電池の研究開発（p 型、n 型分子の最適化、活性層構造の基本的検討、多層構造界面など）

また、太陽光エネルギーを利用して水から水素を生成する技術（無機光触媒、有機系光合成）は、現状では実用化されていないが、CO₂ を全く排出しないため、将来的には極めて有望である。しかし、この技術に関してもまとまった政府の投資は行われていない。なお、ここで取り出された水素は、例えば燃料電池を使って電気エネルギーに変換される。

将来におけるエネルギー技術としての位置付けを確立するために中長期を見据えた研究開発が肝要であり、具体的な研究開発課題として以下を提案する。

2. 「太陽光利用水素生成基盤技術」

- 2－①光触媒による水の直接光分解と水素生成（光触媒設計と人工光合成）
- 2－②葉緑体光化学電池を活用した水素生成システムの構築

2－③水素生成プロセスの人工制御に基づく高効率水素生成微生物の創製。

上記、「有機系太陽光発電基盤技術」、「太陽光利用水素生成基盤技術」の共通基盤技術として、並行して推進されるべき重要な研究課題として、以下を提案する。

3. 「エネルギー変換システムとしての設計理論構築」

3－①有機光起電デバイス物理および設計理論の構築

3－②有機色素分子の設計理論および合成技術の確立

これらの研究開発課題を中長期視野で実用化レベルに進展させるためには、大学の多くの人材を誘導し、産官との協力の上、材料の探索・合成技術、デバイス物理・設計技術等、基本問題の解決に当たることが本質的に重要である。

研究開発プロジェクトの実施に当たっては、物理学、電子工学、化学、バイオテクノロジーの融合研究により推進していくことが極めて重要であり、異分野の融合・連携が促進されるような研究推進システムを整備する必要がある。

また、NEDOの「革新的太陽電池国際研究拠点整備事業」等の関係府省の関連プロジェクトと連携・補完し合う運営、産官学を横断した体制整備が促進されるように研究推進システムの工夫が必須である。

太陽電池に関しては、既にNEDOで幅広くファンディングされているものの、有機系などの太陽電池については、基盤的研究への投資が十分とは言えず、また、欧米と互していけるだけの大学人材を吸引するためにはより基礎的な研究プログラムが必要である。従って本提案では、NEDOでの投資に先行するような領域を重点的に取り上げる。

水素のエネルギーとしての利用

水素は、燃焼してエネルギーを取り出す際に水しか発生しないという特徴を有する、環境に優しいクリーンエネルギー源である。このため、将来は化石燃料を置き換える水素エネルギー社会の到来が期待されている。一方、液化しにくく爆発の危険もあるなど輸送・貯蔵における課題もあるが、既に、自動車用等の燃料電池や、コークスに代わる製鉄還元などでの利用を照準に、(わが国ではNEDOにおいて)多くの技術開発プロジェクトが進められている。

水素は、地球上では水素分子単体としてはほとんど存在しないので、何らかのエネルギーを使って炭化水素や水などの化合物から生成する必要がある。比較的低コストで実用化が進んでいる化石燃料からの水素の生成法にはCO₂の発生が伴う。低コストでクリーンな水素生成法の開発が必要であり、そのような要求を満たす研究課題数例が本提案に含まれている。この分野の基盤技術の研究開発はほとんど未着手である。

2. 研究投資する意義

本提案は、材料科学やバイオテクノロジーに関する日本の高い学術的ポテンシャルと優れた技術をベースにしたイノベーション効果の高いと判断される戦略プログラムであり、本提案の研究開発課題に政府が投資を行うことにより、太陽光エネルギーの利用拡大の技術的基盤が確立すると同時に、融合的科学技術分野の発展、科学技術のフロンティアの拡大が期待される。また、本提案には、「技術パッケージ」の概念を取り入れており、フェーズの違う課題が含まれている。従って、実用化に近い技術シーズが、時間的な差を伴って登場することが期待される。

現在、シリコンバルク系や薄膜系太陽電池は、地球温暖化対応として EU や米国でも盛んに設置され、いまや設置容量ベースではドイツが日本を抜き世界一となっている。太陽電池を製造する技術は比較的容易であり、アジア諸国でも輸出目的に多くの企業が設立され、現在日本企業は徐々にそのシェアを落としている。しかし洞爺湖サミット直前の 2008 年 6 月 9 日の福田前内閣総理大臣のスピーチでは、「太陽光発電世界一の座を奪還するため、導入量を 2020 年度までに現状の 10 倍、2030 年度には 40 倍に引き上げることを目標として掲げる」旨、野心的な目標を掲げている。

一方、技術レベルから見ると、日本の技術レベルは高く、現在実用化が進む単結晶・多結晶系あるいは化合物系でも日本の高度化技術が先を行くかあるいは日米欧が拮抗する状況にあるし、本戦略プログラムで取りあげるいずれの課題ともやはり日米欧で競争状態にある。

我が国の大学等においては本分野の研究水準は高く、研究開発戦略センターの実施した国際俯瞰ベンチマークでも、太陽電池、太陽光水素発生、光触媒等の項目では欧米より優れた評価を得ており、我が国が研究投資を行うことの意義と効果は明らかである。技術的基盤が確立されれば、民間企業等による投資が誘発され、太陽光エネルギーの利用の拡大が期待される。

それにより、実現されうる科学技術上の効果として、

- (1) エネルギー変換効率の向上と生産コストの低減
- (2) 新分野の基礎研究や学問領域の拡大

が可能になる。

〈エネルギー変換効率の向上と生産コストの低減〉

有機、無機、生物などの材料開発を行い、「有機系太陽光発電基盤技術」、「太陽光利用水素生成基盤技術」、「エネルギー変換システムとしての設計理論構築」の 3 つの課題の開発を実施することにより、太陽光エネルギーを利用した発電及び水素の生成においてエネルギー変換効率の向上や生産コストの低減が可能になる。

〈新分野の基礎研究や学問領域の拡大〉

例えば、色素増感太陽電池では「色素化学の新領域の構築や新規色素材料を

利用する光化学分野の創出」、水素生成技術では「人工光合成研究の飛躍的進歩や材料科学との連携による超分子工学の基礎研究推進への寄与」、光化学電池による水素生成では「物理学、光化学、電子工学が融合したエネルギー変換システムの設計理論につながる新学問領域の構築」、そのほかに「有機薄膜太陽電池のデバイス物理の構築」や、「微生物を用いた高効率水素生成技術というオミクス技術を駆使した新バイオテクノロジー領域の開拓」等の新たな基礎研究や学問領域の誕生・発展が期待される。

また、社会経済上の効果として

- (1) グローバルには、地球環境保全への貢献
- (2) 国内的には、エネルギー自給率の向上
- (3) 競争力の高い新エネルギー産業の創出が可能となる。

〈地球環境保全への貢献〉

日本の 2050 年目標である CO₂ 70%削減のためには、一次エネルギーの 46%を再生可能エネルギーにする必要がある。特に、太陽・風力は 14%、バイオマスは 26%の貢献が期待されている（2006 年、環境大臣発表）。この実現に貢献する。

〈エネルギー自給率の向上〉

日本の太陽光発電の累積導入量は、2020 年には 2005 年の 10 倍、2030 年には 40 倍にすると計画されており、それが実現すれば自給率が向上する。

また水素エネルギーの実利用が進むと、燃料電池への水素の供給（それを通しての都市ガス依存度の軽減が期待される）や、製鉄等での金属の還元での使用の可能性もあり、エネルギー自給率の向上に貢献できる。

〈競争力の高い新エネルギー産業の創出〉

世界的に競争力の高い、新エネルギー産業の創出が可能となる。先進国のみならず、アジアを中心とする途上国へのエネルギー技術を含めた輸出も今後のエネルギー戦略上の強力なバグニングパワーとして期待される。

3. 具体的な研究開発課題

太陽光エネルギーを電気あるいは水素エネルギーに変換して利用していくためには、種々の障壁が存在する。

それらのうち科学技術的な課題として最も重要と考えられるのが各種材料開発による変換効率の向上と生産コストの低減である。本戦略プログラムでは、これらの課題解決に資する技術として、有機、無機、生物などの材料関連の技術を用いる以下の3つの課題を取り上げる。

1. 有機系太陽光発電基盤技術
2. 太陽光利用水素生成基盤技術
3. エネルギー変換システムとしての設計理論構築

既存の技術も含めた太陽光エネルギー変換技術の俯瞰表を巻末に添付資料として示す。

太陽電池に関しては、シリコンバルク系（単結晶、多結晶）、シリコン薄膜系（微結晶、アモルファス）、Ⅲ－Ⅴ族系、Ⅱ－Ⅵ族系（CdTe）、CIGS系、有機系、新型超高効率系（量子ドットなど）など多岐にわたる種類があり、その性能や開発レベルにも大きな差がある。無機半導体系の太陽電池については、シリコン系を中心に実用化が進んでおり、上記の超高効率を狙った新型（量子ドット他）を除いては、民間の十分な投資あるいはNEDOを中心としたファンドが既に存在する。

しかしながら、現在の太陽電池の発電コストは、既存の電力源の数倍であり、政策誘導の太陽電池市場が長期的に続くことは考えられず、いずれは既存の電力源に比肩し得る低コスト化が必要である。技術の成熟したシリコン系太陽電池にとってさらに現状の数分の一という低コスト化は生易しいハードルではない。

一方、安価な材料を用い、生産工程でクリーンルーム等も不要であるため低コスト化の旗手として期待されている色素増感型を初めとする有機系太陽電池の開発においては、変換効率や耐久性に直接関わる多くの基礎研究課題が解決されずに残されている。

以上の背景から、国として投資すべき研究開発課題として以下を提案する。

1. 「有機系太陽光発電基盤技術」

- 1－①高効率・長寿命色素増感太陽電池の研究開発（有機色素分子の探索、固体化プロセスなど）
- 1－②高効率・長寿命有機薄膜太陽電池の研究開発（p-n接合活性層構造の最適化、多層および混合界面形成制御技術など）

色素増感太陽電池（セル変換効率～10%、寿命数年）、有機薄膜太陽電池（セル変換効率～5%、寿命数百時間）の現状性能を、1－①、1－②により、中長

期的目標として効率 20%、寿命 20 年を目指し、逐次改善に向かうものとする。

一方、水素をエネルギーとして実社会で利用するには、「水素生成」と「水素輸送・貯蔵」という車の両輪が必要である。しかし、現行の国家プロジェクトは「輸送・貯蔵」に偏っており、特に太陽光を利用する水素生成プロジェクトは皆無に近い。従って、環境負荷の最も少ない太陽光による水素生成技術〔巻末の添付資料参照〕について、将来におけるエネルギー技術としての位置付けを確立するために、触媒等の材料開発と光合成機能の活用などのバイオテクノロジー利用の両面から、中長期を見据えた研究開発が肝要である。

国として投資すべき具体的な研究開発課題として以下を提案する。

2. 「太陽光利用水素生成基盤技術」

- 2－①光触媒による水の直接光分解と水素生成（光触媒設計と人工光合成）
- 2－②葉緑体光化学電池を活用した水素生成システムの構築
- 2－③水素生成プロセスの人工制御に基づく高効率水素生成微生物の創製

2－①では、高効率の光触媒の開発、水分解に伴い発生する水素・酸素混在状態からの効率的で安全な水素分離方法の開発、それらを通して理想効率（30%）を目指し現状の10%から大幅に効率改善する研究開発が課題に含まれる。

2－②は、光合成タンパク質とヒドロゲナーゼなどの水素生成関連酵素を組み合わせた光化学電池により高効率で水素を生成しようとするもので、例えば、高度好熱菌の光合成系の利用による安定システムの構築や反応の効率向上により理論限界（30%）を目指す。分子ナノワイヤーなどの高度ナノテク技術の適用も有効であると考えられる。

2－③では、藍藻や緑藻等の微生物の光合成機能を活用し、高効率の水素生産システムを確立する。現状の変換効率（0.1%程度）を大幅に改善するために、合成生物学・メタボロミクスなどの先端バイオテクノロジーを導入して、改変あるいは新に合成することを狙う研究開発課題である（利用する微生物により変換効率は異なるが、理論限界は13%未満）。

上記、「有機系太陽光発電基盤技術」、「太陽光利用水素生成基盤技術」の共通基盤技術として、並行して推進されるべき重要な研究課題があり、以下を提案する。

3. 「エネルギー変換システムとしての設計理論構築」

- 3－①有機光起電デバイス物理および設計理論の構築
- 3－②有機色素分子の設計理論および合成技術の確立

3－①は、色素増感太陽電池（1－①）と無機系光触媒水素生成（2－①）に

共通の電気化学的な動作原理と半導体界面現象（固液界面）を統合したデバイス物理およびそれをベースとする設計理論の構築を目指す。

3－②は、色素増感太陽電池（1－①）や有機薄膜太陽電池（1－②）および光化学電池（2－②）等に共通の有機分子設計理論と合成法の研究であり、大学の人材を誘導して克服すべき太陽光エネルギー変換効率向上における重要な研究課題である。

これらは、いずれも物理学、電子工学、化学、材料科学、バイオテクノロジーの融合研究によってのみ構築が可能な学術領域である。

提案の内容

研究投資する意義

具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

科学技術上の効果

社会・経済的效果

時間軸に関する考察

検討の経緯

研究開発課題の詳細

専門用語説明

参考文献

4. 研究開発の推進方法

本提案は、各研究課題が強く連携し合った技術パッケージとしての戦略プログラムであり、関係する経済産業省・NEDO、文部科学省・JST、農林水産省、環境省などを含んだオールジャパン体制による一体的な取り組みが望まれる。内閣府による府省間を横断する施策の推進が必須である。

「1. 有機系太陽光発電基盤技術」に係る研究は、常に出口を見据えた基礎研究として推進し、得られる成果を機敏に実用化研究へ反映させる仕組みが必要である。そのために、化学メーカーやシステムメーカーなどの企業サイドの参画が肝要である。

「2 - ①光触媒による水の直接光分解と水素生成」及び「2 - ②葉緑体光化学電池を活用した水素生成システムの構築」に係る研究においては、基礎的要素が強いため開発初期は大学等の公的機関を中心として推進する。また有機太陽電池と光触媒の分野では、色素材料などの共通の研究開発要素が多数あるので、融合を加速するため両分野の研究者が自由に技術交流できる場（研究フォーラムや共同シンポジウムなど）を設定することが重要である。

「2 - ③水素生成プロセスの人工制御に基づく高効率水素生成微生物の創製」の研究では、微生物で見出された水素生成に関する知見と微生物工学等の研究で培われたメタボロミクス等の技術を最終的な実用化過程に展開するために、関連する分野の研究者間の緊密な連携が必要となる。この過程で発生する膨大なデータを保存し有効活用するため、データベースセンターを構築することは特に重要である。また研究開発の後半では、実証プラントによるパイロットスケール試験も想定されるため、企業の参画が必要である。環境対応施策、知的財産戦略等も、並行して考慮されることが重要である。

一方「3. エネルギー変換システムとしての設計理論構築」の研究については、太陽電池及び水素生成の両分野に共通する設計技術を開発することになり、両分野との密接な連携が必要となる。両分野の研究者が自由に行き来できる研究環境の整備が必須である。

本分野の研究開発の成果を実社会で活用するには、研究開発プロジェクトと並行して、国内的にはフィード・イン・タリフ（系統連携における優遇固定価格買取制度）や補助金制度による自然エネルギー振興策の実施、国際的には欧米だけでなくアジア諸国との技術協力や共同プロジェクトを議論できる場の創出、が必要である。

日独の研究成果実用化に向けた政策誘導

太陽光発電実用化に関する日本の政策的支援は、国、地方自治体など各レベルで行われてきた。例えば、サンシャイン計画（1974 年開始）による技術開発や、住宅向け太陽光発電システムに対する補助制度（1994 年度～ 2005 年度）による導入支援などによって、累積導入量で世界をリードするに至ったが、現在ではドイツにトップの座を譲っている。

ドイツの太陽光発電導入を加速させた要因の一つが、2000 年に導入された「優遇固定価格買取制度」（FIT：フィード・イン・タリフ）である。太陽光発電による電力を、電力会社が優遇的固定価格（2004 年開始の場合は電力使用料金の 3 倍。以後、毎年ステップダウン式に低減）で 20 年間買取る制度であり、設備導入者の利益が保証されているため、太陽光発電の導入促進政策として有効に機能した。日本でも 2003 年に施行された「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法（RPS 法）」により、太陽光発電による電力の電力会社による買取りが実施されるようになったが、電力使用料金と同価格のため設備導入者にとってのメリットが少なく、補助制度が打ち切られた 2006 年以降はドイツの FIT ほどの効果が得られていない。FIT はドイツ以外の各国にも広がりつつある。

なお、日本では 2030 年に向けた技術開発の方向を示すロードマップ「PV2030」が 2004 年に策定され、さらに最近では、「太陽光発電量を 2020 年までに現状の 10 倍、30 年までに 40 倍に引き上げる」という福田ビジョン（2008 年 6 月）を追い風に、住宅向け補助制度の復活が 2008 年度の補正予算案にも盛り込まれている。

提案の内容

研究投資する意義

具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

科学技術上の効果

社会・経済的效果

時間軸に関する考察

検討の経緯

研究開発課題の詳細

専門用語説明

参考文献

5. 科学技術上の効果

「3. 具体的な研究開発課題」において提示した、「有機系太陽光発電基盤技術」、「太陽光利用水素生成基盤技術」、及び「エネルギー変換システムとしての設計理論構築」の各研究課題を実施することにより、以下の効果が期待される。

①色素増感太陽電池での目的色素の設計・合成の推進により太陽電池の一層の高効率化が実現し、色素化学の新領域を構築すると同時に新規色素材料を利用する光化学分野の創出が期待される。

②水素生成技術では、光合成機構の詳細が解明される過程において、成果のフィードバックにより人工光合成研究が飛躍的に進歩する。また、材料科学との連携により、超分子工学の基礎研究推進にも寄与できる。

③光化学電池による水素生成では、光合成反応に伴う電極界面での電子授受の詳細解析が進むため、物理学、光化学、電子工学が融合した新しいエネルギー変換システムの設計理論につながる学問領域が立ち上がる。学術的な成果のみならず、有力基本特許の創出が見込まれる。

④有機薄膜太陽電池のデバイス物理が構築され、高効率の設計が可能となる（使用する分子材料に対する目標機能のデザインなど）。

⑤微生物を用いた高効率な水素生成技術という新しいバイオテクノロジーの領域が拓かれる。技術的には陸生バイオマスの機能設計にも適用可能であることから、陸生バイオマスの研究者が水生バイオマス研究に参入することが期待され、両分野の研究者の融合が促進されて新しい技術領域の創出が期待される。

⑥本提言の実施には、莫大な量のオミクス（ゲノミクス、プロテオミクス、メタボロミクスなど）のデータベースの構築が必須となる。微生物に特化したデータベースセンターの構築により分類整理された世界共通の学術的財産が生まれ、データベースの国際的なハブになる。

本提案の実施では、異分野の研究者が相互に協力し合うことが必須であり、その結果として、「自然（再生）エネルギー工学」という新しい学問領域の誕生が期待できる。

6. 社会・経済的效果

本戦略プログラムへの投資の結果得られる科学技術イノベーションの効果は、グローバルには「地球環境保全への貢献」であり、国内的には「エネルギーの自給率の向上」そして「技術革新による新産業の創出」である。従って、本提案の実施は、我が国のエネルギー安全保障に貢献し、社会制度や社会インフラの整備と歩調をあわせて自然エネルギーの導入や普及が進み、更には、我が国をエネルギー技術の輸出国に押し上げる。

社会的効果

2050 年に向けて、60 ～ 80%の温暖化ガス排出削減を目標とする地球環境保全対応に、当然、貯存量の多い太陽光やバイオマス利用による自然エネルギー利用が前提として含まれ、それにより化石資源の代替が進む。従って、本提案の実施は CO₂ 削減に直接貢献し、また我が国のエネルギー自給率を向上させ、エネルギー供給や消費の質的・量的変化を支える新技術の創生を誘起する。

本プロポーザルで提案する技術課題はいずれも後掲「科学技術イノベーション Step & Loop モデル」において「①発見科学的知識～④製品開発・マーケット投入・フィールドテスト」の領域にあり、2015 ～ 2030 年頃の実現、2050 年頃の広域普及、を目指して推進する。実現の効果として、電力供給や交通機関等における化石燃料消費量の大幅削減、太陽光利用水素生成技術による燃料電池への水素供給、それを通しての都市ガス依存度の軽減が期待される。また、コストや量的な課題を克服できれば燃料電池への水素供給や製鉄等金属の還元を使用する可能性も出てくる。

一方、微生物の利活用による水素生成技術が実現すると、陸上に比べれば他の空間利用との競合が比較的少ない海洋での大規模な水素生成バイオマスシステムの構築が可能になり、海洋国家日本の利点を生かしたエネルギーシステムの普及や、海外への技術援助への道が開ける。

経済的效果

本提案の課題が解決されると、有機薄膜太陽電池は変換効率で 15 ～ 20%、寿命 10 年、色素増感型太陽光発電では変換効率 20%、寿命 10 年以上で、いずれも火力発電並みのコストが可能となる。現在のシリコン系結晶太陽電池のグローバル市場はドイツを中心とした価格優遇政策に依存するところが大きく、真の意味で火力発電等の既存施設による電力コストと競争できる状況ではない。中長期的に見ればワット当たりの単価を 1/4 ～ 1/5 に引き下げる必要があり、技術的に成熟し切っているシリコン系太陽電池にとっては極めて高いハードルである。そのような背景の中で圧倒的な低コストプロセスが約束されている有機系太陽電池の相対価値は非常に高くなり、電力用、民生用へと市場を伸ばすことになる。また、輸出産業として大きく育つことも予想される。

また、本提案の成果はエネルギー関連ナノ材料分野への波及効果を創出し、

太陽光エネルギーの利用技術のみならず関連する新産業の創出や雇用の拡大を刺激し、長期的に見れば、継続的に経済成長に寄与するものと考えられる。

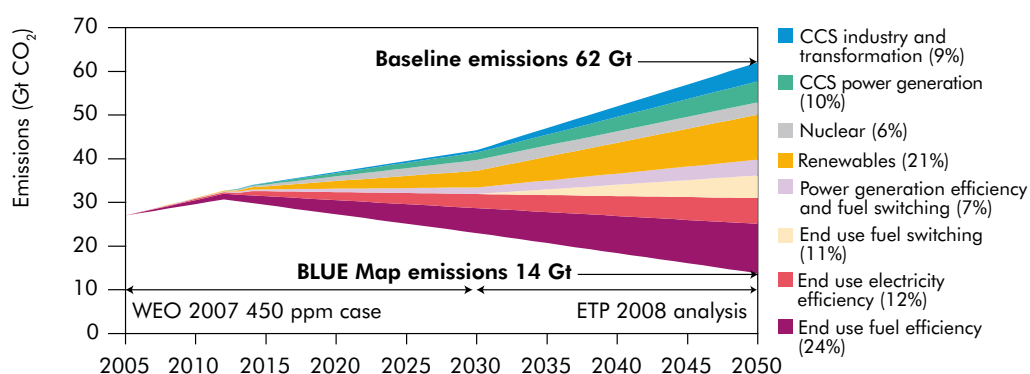
新産業の創出に加え、海外への技術輸出や関連技術の創出により、先進国のみならず、アジアを中心とする途上国との技術協力や共同プロジェクトにおいて強力なバーゲニングパワーとして有効に働くものと期待される。

IEA の地球温暖化対策シナリオ

IEA（国際エネルギー機関）は 2005 年のグレンイーグルズサミット（英国で開催された主要国首脳会議）で示された G8 首脳の要請を受けて、「エネルギー技術展望 2008」を発表し、2050 年に向けた地球温暖化対策のシナリオを提示した（2008 年 6 月）。

それによれば、2005 年の世界の CO₂ 排出量は 280 億トン（大気中 CO₂ 濃度 379.1ppm）であり、このままいけば 2050 年には 2.2 倍以上まで増加すると予測（ベースラインシナリオ）されている。しかしながら、2050 年時点で CO₂ 濃度を 450ppm に安定化させるためには、CO₂ 排出量を 2005 年比の 50%（140 億トン）に減少させる必要がある、と分析している（ブルーマップシナリオ）。このブルーマップシナリオによれば、図に示されているように、CO₂ 削減効果の最も大きいものは「省エネルギー」で全体の 36%、「炭素回収貯留（CCS）」が 19%、「燃費転換」が 18%、「原子力」が 6%、そして「自然エネルギー」が 21%である。このように、太陽光やバイオマス利用など自然エネルギー利用が本格的に実現すればインパクトが極めて大きいことが指摘されている。

Comparison of the World Energy Outlook 2007 450 ppm case and the BLUE Map scenario, 2005-2050



出典：Energy Technology Perspectives 2008 - Scenarios & Strategies to 2050
(International Energy Agency, 2008)

7. 時間軸に関する考察

地球規模の諸問題等をめぐる社会の動きは急であってイノベーションへの期待は大きく、また我が国の国際競争力増強の観点からも、本戦略プログラムは直ちに実施される必要がある。また、本戦略プログラムは、産業界あるいは既に何らかの公的セクターで着手されている研究対象領域に比較すると、中長期の言わば次々世代の技術領域の基礎基盤の開発を目標にしている。実際的な応用製品として最終的に社会に貢献する時期は、民生用としては2015年頃、電力用としては概ね2020～30年頃を目指し、広域普及は2050年頃を目処とする。

具体的には、「具体的な研究開発課題」のうち、「1. 有機系太陽光発電基盤技術」については、すでに関連製品（シリコン系太陽電池）の市場が形成されているものの政策によって創出されている現状に鑑み、早急に着手する必要がある。一方、基礎的な研究の必要度が高いため、ある程度の成果の有無や実用化の可能性を照準に研究の継続可否を検討できるまで10年程度の期間が必要と考えられる。

「2. 太陽光利用水素生成基盤技術」についても早期の着手が望ましい。その実用化可能性の可否等を判断できるまでには開発の途中での研究項目の再構成の検討も含め、「1. 有機系太陽光発電基盤技術」と同様、少なくとも10年程度の研究期間が必要である。

「3. エネルギー変換システムとしての設計理論構築」の研究は、これらの共通的な基盤となるため直ちに着手する必要がある。

本プロポーザルの研究開発課題を製品開発までの各段階に当てはめた(図1)。各矢印の始点が研究開発着手、終点が10年間の投資により到達が予想されるフェーズである。

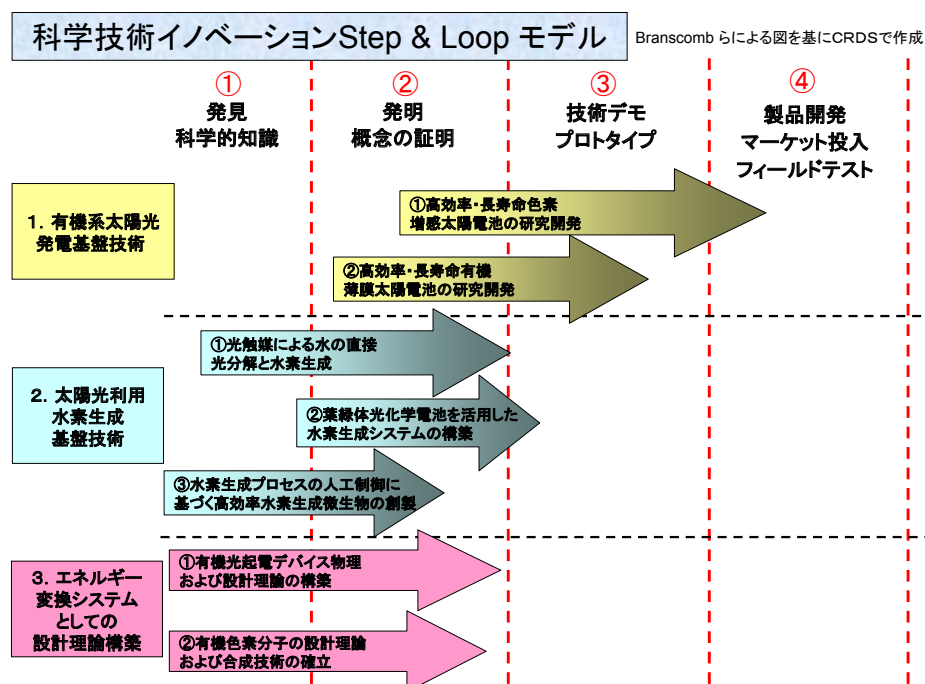


図1 提案した課題の研究開発投資後の位置付け

8. 検討の経緯

「6. 社会・経済的効果」でも触れたように、CO₂ が全く発生しない自然エネルギーの割合を今後画期的に増加させることが国際的に要請されている。このようなエネルギーの急激な増加を可能にするためには、技術パッケージとして基盤技術課題が整理され、優先順位付けされた戦略として提案されることが肝要である。

このため、研究開発戦略センターでは、自然エネルギー技術〔具体的には、太陽光発電（シリコン系、非シリコン系）、太陽光水素発生、太陽熱発電、太陽熱温水、風力発電、水力発電、海洋発電、地熱発電、およびバイオマス（陸生、水・海生）〕について、

- ・ 先端技術が必要な分野か？
- ・ 日本が確実にリードできる分野か？
- ・ 将来、輸出技術になりうる分野か？
- ・ 人的資源が確保できる分野か？
- ・ 公的資金の導入が必要な分野か？

といった視点での分析と評価を試み、延べ 47 件の有識者インタビュー、100 件を超える内外の文献調査を実施し、優先的に取り組む課題について検討してきた。

その分析結果のまとめが表 1 である。

表 1 「日本の自然エネルギー諸技術の環境」～分析結果と公的資金投入の優先度～

技術分野 (9種類11分野)	社会ニーズ	先端材料技術 開発の 必要性	技術シーズ	人的 資源	対応セク ター	既存RD ファン ディング	備 考	新規の 公的資 源投入 の優先 度
太陽光発電(非シリコン)	政府の重要・ 緊急課題 中長期の抜 本的技術開 発が必要	大	有機系に研究シーズあり	有	学・産	*	・長期的基礎研究が必要 ・太陽光発電(非シリコン)と太陽光水素生成 とは合併してファンディングすることが肝要 ・CRDSにて関連WS開催済[2007.12.22]	高
太陽光水素生成		大	サイエンスで世界トップレベル	有	学	**		高
バイオマス(水生・海生)		大	萌芽的な研究あり。日本は沿岸 多し	有	学	*/***	・水生・海生対象は非常に少ない ・藻類利用バイオ燃料生産の基盤技術開発 が必要(陸生関連技術の開発も必要) ・CRDSにて関連WS開催済[2008.7.5]	高
バイオマス(陸生)		中	セルロースに重点化	有	学・産			中
風力		小	実用レベルの技術		(学・)産	*	・日本特有の風況、系統連系対応が必要	中
太陽光発電(シリコン)		中	世界トップレベルの生産技術	有	産	*	・補助金のみでは不足。優遇買上げ制など 制度によるインセンティブが必要 ・CRDSにて関連WS開催済[2007.12.22]	低
太陽熱発電		中	日本では立地不適合のため撤退	無	(学・)産		太陽熱水素生成技術の提案あり	低
太陽熱温水		小			産		当面、規模小さい	低
水力		小	大規模は成熟段階		産	*	小規模に関しては、NEDOでファンディング	低
海洋発電		小	アイディアはあるが未熟	有	学・産	*/**	当面、規模は小さい	低
地熱		小	実用レベルの技術	有	学	*	既に成熟段階、立地制限あり	低

既存RDファンディング *:NEDO **:JST ***:農水省

表 1 に示されているように、

- (1) 太陽光発電（非シリコン系）
- (2) 太陽光水素生成
- (3) バイオマス（水生・海生）
- (4) バイオマス（陸生）

の 4 分野に、今後、新規の公的資金の優先的な投入が必要な基盤技術課題が存在すると判断された。このうち、バイオマス（陸生）については、他の 3 つに

比べると優先度は低いものの、先端バイオ技術を適用した新世代技術誕生の可能性を考慮して検討対象とされた。なお、風力発電は重要課題の1つではあるが、先端技術の枠組みからやや外れていることや強い企業の開発力に委ねるのが妥当との判断で今回の提案からは除外、また、水力発電、太陽熱温水、地熱発電については技術の成熟度が高く、公的資金もすでに投入されて実用化段階にあること、太陽熱発電は日本では緯度が高く立地不適なこと、等により、現段階では新たな公的資金投入の優先度は低いものと判断された。また、海洋発電（波力、潮流、温度差等）については未知の要素が多く、しばらくはアイデア実証段階の技術として監視を続けるべきと判断された。

研究開発戦略センターではかねてより、例えば水素エネルギーに関する提言〔参考文献 戦略プロポーザル〕のように、広く環境・エネルギー分野に関する調査提言をおこなってきたが、上記4分野については、さらに平成19年12月22日及び平成20年7月5日に、有識者（学界、産業界）による科学技術未来戦略ワークショップ「太陽光を利用したクリーンエネルギー生成－ナノ材料科学で技術の限界を突破する－」及び「微小生物を利用したバイオ燃料生産基盤技術」を開催し、詳細な技術の現状分析、海外の国家プロジェクト調査、仮説とアンケートによる戦略課題の抽出など、精査をおこなった。また、平成20年3月には、我々が直面する地球規模の問題について2050年に向けて「グローバル・イノベーション・エコシステム（GIES）」の構築によって解決する方策を提言する中で、「自然エネルギーの有効利用」について上記4分野に関連する研究開発課題と必要な政策課題を提示している〔参考文献 提言〕。

これらの成果を踏まえた研究開発戦略センター内での検討の結果、「1. 提案の内容」及び「3. 具体的な研究開発課題」に記した研究開発課題を本戦略プログラムとして提案するに至ったものである。図2、図3に、上記の各々の戦略ワークショップの成果に基き、公的投資をなすべき対象として抽出された技術領域の候補を示す。これらの検討・抽出の詳細については、研究開発戦略センター発行のワークショップ報告書〔参考文献 WS1, WS2〕を参照されたい。なお、両ワークショップにおいては、さまざまな関連技術分野の間の協調・融合や、省庁の枠を越えたオールジャパン的な連携の重要性が共通的に強調された。

提案の内容

研究投資する意義

具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

科学技術上の効果

社会・経済的效果

時間軸に関する考察

検討の経緯

研究開発課題の詳細

専門用語説明

参考文献

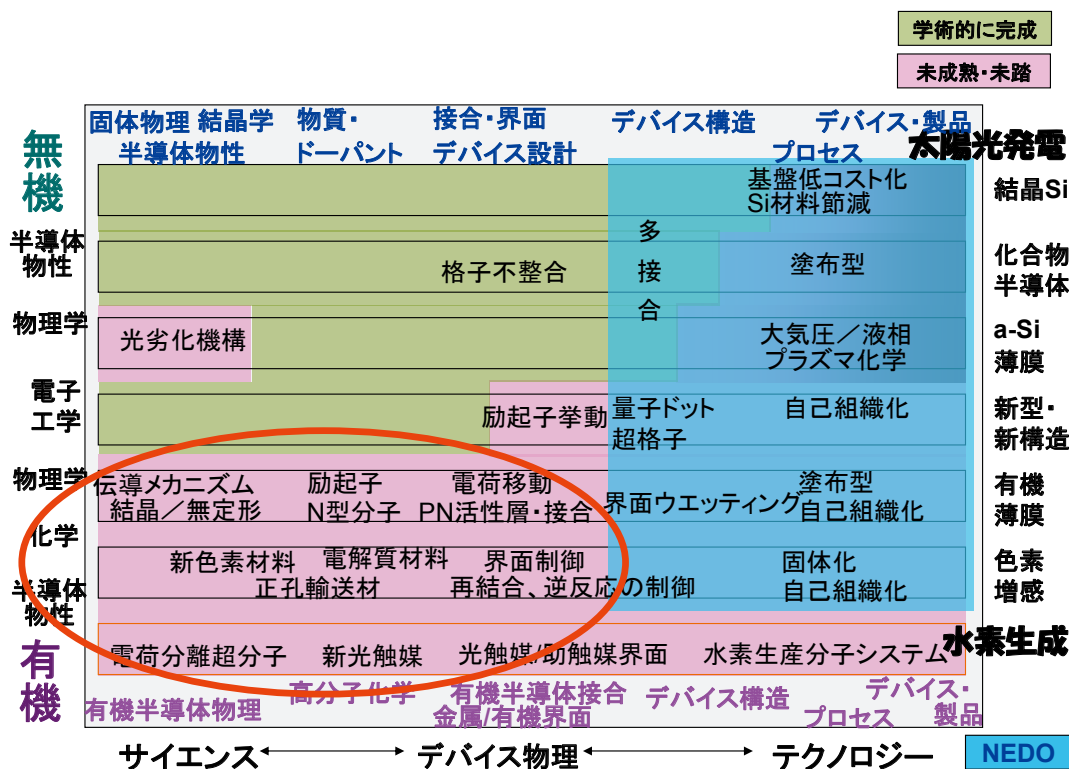


図2 WS「太陽光を利用したクリーンエネルギー生成」の結果と公的投資対象技術領域の候補 [参考文献 WS1 より]

	陸生微小生物					水生・海生微小生物		
	前処理	糖化	糖化後処理	エタノール発酵	濃縮・脱水	育種・培養	分離技術	残渣処理・利用
システム	・前処理システム	・酵素反応リアクター		・固体発酵リアクター	・省エネルギー濃縮・脱水システム	・大型培養システムの設計(開放形、閉鎖系)	・連続処理システムの設計	・糖有効利用、およびN・Pミネラル再利用システムの設計
プロセス技術	・リグニンの分解・溶出 ・ヘミセルロースの低分子化 ・セルロース結晶型の変換	・セルラーゼ成分量の最適化 ・糖化酵素生産性向上技術 ・併行複発酵処理条件の最適化	・酵素の回収・再利用 ・発酵阻害物の除去 ・糖化液の濃縮	・連続発酵 ・高密度充填プロセス ・残渣・副産物の処理・利用	・膜による選択的分離、脱水技術	・太陽光を有効利用する閉鎖型フォトバイオリアクター	・連続処理(乾燥・抽出・分離)	・ヘミセルロースの低分子化(酸触媒) ・セルロース結晶型の変換 ・省エネ型破砕法
基礎	・植物細胞壁構造状態の解析 ・発酵阻害物生成機構の解明 ・リグニン等利用技術	・高活性酵素の探索 ・セルラーゼ成分量の最適化による糖化効率向上 ・酵素生産性の向上		・資化性の拡大 ・高温発酵微生物の開発 ・阻害物耐性微生物の開発 ・対糖収率向上	・脱水用膜素材の探索	・増殖及び生産性に優れた培養株の育種 ・アルカリ耐性藻類の開発 ・燃料代謝経路の解析	・環境調和型抽出剤の開発 ・含有N化合物除去技術の開発 ・リン脂質の改質(バイオディーゼル化等)	・残渣成分の分析と構造状態の解析
共通基盤技術	新規遺伝子源探索(メタゲノム、メタトランスクリプトーム) ゲノム情報活用(バイオインフォマティクス) 酵素の改変・強化(タンパク質工学、進化分子工学的手法) 微生物の改変・強化(ゲノム工学、ミニマムゲノム手法)							

既に投資が行われている

今後の投資が必要

図3 WS「微小生物を利用したバイオ燃料生産基盤技術」の結果と公的投資対象技術領域の候補 [参考文献 WS2 より]

9. 研究開発課題の詳細

本章では、第3章で述べた以下の具体的研究開発課題について、その詳細を記す。

1. 有機系太陽光発電基盤技術
2. 太陽光利用水素生成基盤技術
3. エネルギー変換システムとしての設計理論構築

1. 有機系太陽光発電基盤技術

既存のシリコン系太陽光発電に比べ、有機系太陽電池の最大のメリットは製造コストの大幅な低減が期待できることである。その理由としては、有機系の主材料は安価で、資源的にも豊富であること、生産設備としてクリーンルームや真空下での製造プロセスを必ずしも必要としないことなどが挙げられ、材料と生産設備の両方でメリットが大きい。このメリットを生かしつつ高効率化・長寿命化を図るのが本研究開発課題の目的であり、本質的に動作原理が異なる色素増感型と有機薄膜型とに項目が分けられる。

1-①高効率・長寿命色素増感太陽電池の研究開発

色素増感太陽電池（グレッツェルセル）では、光に反応した色素が電子を放出することから動作がはじまる。色素増感太陽電池の変換効率は、光マネジメントを行わない限り、吸収で決まる効率の理論限界は30%であるが、デバイス試作ではセル効率10%程度のデータが多い。更なる効率向上と併せ、セルの大面积化におけるセル内部の内部抵抗の増加を回避できる材料技術の開発が求められる。また、耐久性については、数年程度まで保証できる見込みが立っているが、既存の太陽電池（10年～20年）に比べるとかなり低く、更なる改善が求められる。

〈高効率化〉

二酸化チタンと色素を使う一般的なセルを例にすれば、色素が光を吸収し、電子を放出する。その電子が二酸化チタン、電極に移動して、対極に移り、電解質をイオン化し（還元）、イオンは色素に電子を奪われる（酸化）。このような動作原理に基づいて、半導体（酸化物）、色素、電解質に関係した種々の材料物性の改善が求められている。

具体的には、次のような課題が考えられる。

- ・ 広い波長範囲の光を効率的に吸収できる色素分子の探索
- ・ 有機色素分子の合成技術の確立
- ・ 色素 / 電解質の界面に関する理解と理想界面形成法の確立

〈耐久性向上〉

耐久性を低下させる最大の原因は、液体電解質を用いた際の液漏れである。

電解液の封止技術は向上しているものの、技術の完成域にはまだ達していない。

よって、次のような課題が考えられる。

- ・電解質の固体化プロセスの確立

1－②高効率・長寿命有機薄膜太陽電池の研究開発

有機薄膜太陽電池の変換効率が最近になって5～6%程度まで向上したのは、主に2つの技術的進歩による。一つは、キャリア輸送効率の大きな共役系高分子材料が使えるようになったこと、もう一つは、ナノレベルの光電荷分離界面を利用したことである。また、近年、ウェットプロセスによるバルクヘテロ接合型の登場により、変換効率と耐久性が向上し、安価で高効率な太陽電池実用化が視野に入りつつある。

しかし、現在のシリコン系と比肩しうる20%の効率を目指し、かつ、現在数100時間の寿命を大幅に延長するためには、解決すべき課題が山積している。

〈高効率化〉

有機薄膜太陽電池の動作機構の解明は、まだ十分とは言えない。分子間相互作用が小さいために、エネルギーバンドを形成しないか、あるいは非常に幅の狭いものしか形成されないため、シリコン系のようなp-n接合の考え方が導入できないことが、理由の一つである。よって、高効率化のためには徹底的な実験的研究およびそれをベースとした発電機構の詳細な理解が基礎となる。

技術的には、光電変換界面、即ち、ドナー・アクセプター相互作用点の増大とバランスのとれた効率の良い電子と正孔の輸送経路の確保が、高効率化のために必要である。

具体的に、次のような課題が考えられる。

- ・ナノ構造の制御によるドナー・アクセプター相互作用点の増大(p-i-n接合など)
- ・p-n接合活性層の構造的最適化
- ・p-n接合界面での空乏層厚さの最適化(キャリアの発生量と輸送量のトレードオフ)
- ・タンデム(多層積層)化および混合界面形成技術による高効率化

〈耐久性向上〉

- ・セル全体の短寿命原因の解明
- ・劣化の主原因となる水・酸素に対する保護膜封止技術の確立
- ・光劣化機構(可逆性劣化)の解明

〈低コスト化〉

有機薄膜太陽電池の特長は、シリコン太陽電池や色素増感太陽電池よりも軽量で、優れた加工性、いかなる形状や用途にも対応可能なことに加えて、低コストである点にある。

具体的に次のような課題が考えられる。

- ・より低コストな印刷、塗布技術の開発
- ・大面積均一化プロセスの開発
- ・印刷技術の一つであるロール・ツー・ロールによる生産技術の確立

2. 太陽光利用水素生成基盤技術

本項では、太陽光と水を利用して水素を生成させる以下の3つの課題を取り挙げる。それぞれの課題は、有機、無機、生物の3つの異なる材料開発に主眼を置き、現在の水素生成効率を格段に向上させる研究開発戦略である。

2-①光触媒による水の直接光分解と水素生成

半導体に光が吸収されると、電子・正孔ペアの生成、分離、各々の反応サイトへの移動を経て、近傍の水分子が分解され、水素と酸素の生成反応が起きる。光触媒ではこのような一連の反応過程がすべて、半導体微粒子内で起きる。そのため、半導体表面のバンドエネルギーと溶液の酸化還元電位とのマッチングが重要な因子である。したがって、新しい光触媒材料の設計を目指した、バンドエンジニアリングをベースにした新触媒材料（有機、無機）の探索が実用化への大きな鍵となる。

高い光触媒反応活性を有する各種のクラスターや分子サイズの触媒をシリカなどの担体上に固定化担持した光触媒を用いて、光触媒の活性度探索、光触媒の局所構造と活性度の関連性、光触媒反応の分子レベルでの機構解明など多くの試みがなされているが、更なる研究開発が望まれる。

本研究課題は、1-①の色素増感太陽電池と原理的に共通する部分が多い。共通部分の基礎的な課題が3-①、②に含まれている。

具体的な研究課題を以下に示す。

- ・超高効率（～30%）人工光合成の新原理の探索
- ・人工光合成反応の効率化のための光触媒の開発
- ・p型半導体触媒の開発
- ・カルコパイライト系材料の光触媒への応用
- ・金属錯体光触媒と半導体光触媒の融合
- ・水分解時に発生する水素・酸素混在状態から水素を効率良く分離する方法の開発
- ・水素貯蔵技術（水素とCO₂を反応させ、HCOOHにして貯蔵）

2-②葉緑体光化学電池を活用した水素生成システムの構築

本課題は、葉緑体において光合成を担う分子等を抽出し、細胞外で人工的に光電池を構築することにより水素を得る研究開発である。葉緑体の明反応における電子伝達は、一般的にクロロフィルを中核に持つPSII複合体（光合成IIタンパク質）が光エネルギーを吸収し、酸素発生複合体を活性化させることで開始される（図4）。そして水の分解で生じた電子がPSI複合体などを經由し、

最終的にはヒドロゲナーゼによって水素へ変換される。このため、本課題では、このような水素変換プロセスにおいて重要な役割を担う分子（クロロフィル、ヒドロゲナーゼ等）を抽出し、これらを電極と組み合わせることにより光化学電池を構築する。本電池からは電力が生成され、その利用も考えられるが、本課題では水素の生産効率向上に主眼を置き、研究開発を行う。

具体的な研究課題を以下に示す。

- ・ クロロフィル分子空間配置とエネルギー移動の相関解析
- ・ 葉緑体および構成素子（クロロフィル、タンパク質等）の細胞外安定化技術の開発
- ・ 光合成素子等と電極を連結する分子の設計／合成

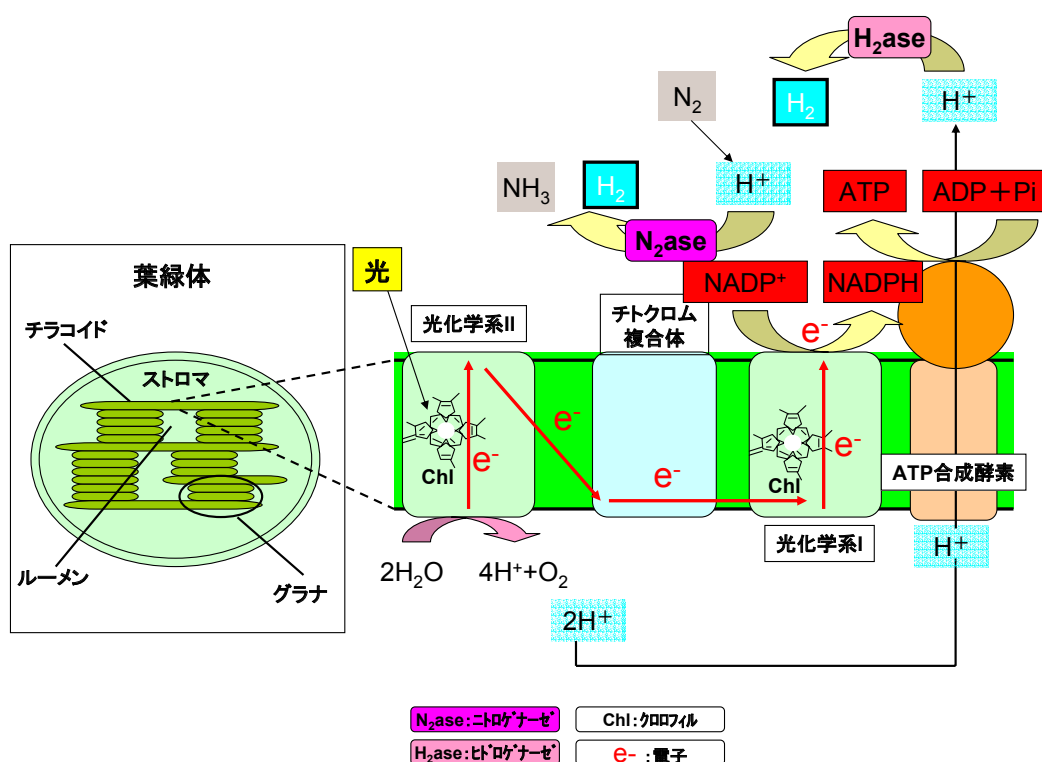


図4 光合成の基本原則（電子伝達機構）

2-③水素生成プロセスの人工制御に基づく高効率水素生成微生物の創製

光合成微生物による水素生成は、主に細胞内小器官である葉緑体で行われている。そのプロセスは電子伝達系と呼ばれる複数のタンパク質が関与する複雑な反応系によって展開され、NADPH₂とATPを生産するプロセスの副産物として水素が生成される（図4）。従ってこのプロセスを人為的に制御し、副産物として生成されている水素をいかに主産物に転換させるかが実用化への鍵を握る。ここでは目標達成のために以下の2つのアプローチを例示する。

（メタボローム解析に基づく代謝制御技術）

オミクス情報を高度に活用し、最適な水素生産系を遺伝子組換え等の技術

を活用して構築する研究開発である。以下に具体的な研究課題例を示す。

- ・ 水素生成関連遺伝子、タンパク質の発現プロファイルの解析
- ・ 発現タンパク質と水素生成の相関解析による制御タンパク質の同定
- ・ 制御タンパク質の遺伝子発現制御による高効率水素生成微生物の創製
(代謝経路の設計に基づく人工微生物創製技術)

代謝経路や発現細胞を細胞外で合成し、水素生産微生物を人工的に構築する研究開発である。具体的な研究課題例を以下に示す。

- ・ 光合成経路の *in silico* 合成技術の開発
- ・ 不要ゲノムの除去による低エネルギー高成長ホスト微生物の構築
- ・ 人工代謝経路のホスト微生物への導入による高効率水素生成微生物の創製

3. エネルギー変換システムとしての設計理論構築

植物は太陽光を吸収して電気エネルギーに変え、空気中の二酸化炭素と水から炭水化物を合成する仕組みをもっている。色素増感太陽電池は植物の光合成の原理と類似の電気化学的な機構で発電する太陽電池である。太陽光エネルギーを変換して取り出す最終エネルギー形態が電気エネルギーか化学エネルギーかの違いはあるものの、実は、「有機系太陽光発電基盤技術」と「太陽光利用水素生成基盤技術」（水素生成微生物を除く）の間には、明らかに基本的な動作原理に多くの共通点が見られる。しかしながら、エネルギー変換系全体の輸送現象に分子やイオンの化学が介在するため未だに系の詳細な設計理論が完成していない。また、有機薄膜太陽電池についてはキャリア輸送機構やバンド理論を包括するデバイス物理が未完である。

このため、以下のような共通的な研究課題を設定して研究を推進することにより、上記 1. 及び 2. の研究開発課題の一層の進展が期待できる。

3-①有機光起電デバイス物理および設計理論の構築

色素増感太陽電池と無機系光触媒水素生成に共通の電気化学的な動作原理と半導体と液体の界面現象を統合したエネルギー変換系としてのデバイス物理と、それを基盤とするデバイス設計理論の構築が必要である。そのためには、次のような課題についての詳細な基礎研究が特に求められる。

- ・ ドーパント分子を含む有機薄膜活性層の材料設計理論構築
- ・ 正、負キャリアの励起、電荷分離・再結合機構解明と制御
- ・ 色素 / 電解質の界面に関する理解と制御技術の確立
- ・ 光合成機能の詳細メカニズムの解明

3-②有機色素分子の設計理論および合成技術の確立

色素増感電池や有機薄膜太陽電池および光化学電池などに共通の有機色素分子の設計理論と合成法の研究が必要である。

以下のような研究開発が必要である。

- ・ 有機色素分子でのフォトキャリアの分離・輸送機構の解明と制御技術の確立
- ・ 正孔を輸送する性質の高分子および電子を輸送する性質の高分子の設計・合成
- ・ 分子配列構造の精密な解析に必要な計測と理論の構築

専門用語説明 (本文中でアンダーラインした用語の説明)

[p.1]

- 色素増感太陽電池：二酸化チタンを焼き付けた有機色素分子（ルテニウム錯体など）を電極に吸着させて電解質溶液の酸化還元反応を使う太陽電池。発明者の名前を取ってグレッツェルセルとも称される。
- 有機薄膜太陽電池：系に電子を供給するドナー分子（フラレン誘導体など）と電子を受容するアクセプター分子（ペンタセンなど）とを含む有機薄膜による太陽電池。
- 光触媒による水の直接光分解：チタニア系などの無機光触媒、ポルフィリン系などの有機触媒を用いて太陽光を水に照射することで直接分解し、水素を生成すること。
- 人工光合成：各種の光触媒を利用することで人工的に植物の光合成に類似の反応を起こさせ、水から水素を生成させること。
- 葉緑体光化学電池：葉緑体を構成する分子を抽出し、これを電極に連結させることにより太陽光から電力や水素を生成させる人工電池の総称。

[p.2]

- 高効率水素生成微生物：遺伝子組換えの技術により従来の水素生成効率を向上させた微生物。
- 有機光起電デバイス物理：有機系太陽電池における電子や正孔の微視的振る舞いを理解しその知識をベースに光起電力デバイスの特性を解析する物理。

[p.5]

- シリコンバルク系（単結晶、多結晶）、シリコン薄膜系（微結晶、アモルファス）、Ⅲ－Ⅴ族系、Ⅱ－Ⅵ族系（CdTe）、CIGS系、有機系、新型超高効率系（量子ドットなど）：太陽電池の種類である。[巻末の添付資料を参照]
 シリコンバルク系：シリコン単結晶ウエハから製造されるものと、シリコン半導体製造時に生成する多結晶の端材などから製造されるものがある。
 シリコン薄膜系：微細なシリコン結晶から CVD（化学気相成長）法で薄膜を作る微結晶型、シランガスから同じく CVD 法で薄膜を作るアモルファス型がある。
 Ⅲ－Ⅴ族系：周期律表上、第Ⅲ族元素（Al、Ga、In など）と第Ⅴ族元素（N、P、As など）を主成分とする結晶太陽電池。光電変換効率が高く、集光型に使われる（GaAs、InGaP など）。
 Ⅱ－Ⅵ族系（CdTe）：CdTe が低価格太陽電池として復活している。
 CIGS系：Cu（In_{1-x}、Ga_x）Se₂（銅・インジウム・ガリウム・セレン）系の略。
 有機系：色素増感と有機薄膜の2種類の太陽電池がある。[p.1 別項参照]

新型超高効率系：量子ドットによる量子効果を利用する太陽電池などが検討されており、40%以上の高い光電変換効率が期待されている。原理検証の段階。

[p.6]

- 光合成タンパク質：葉緑体において光を集めたり、光を電子に変換する機能を担うタンパク質。
- ヒドロゲナーゼ：水素生成酵素。分子型水素の可逆的な酸化還元反応を触媒するタンパク質。
- 分子ナノワイヤー：有機分子によるデバイス配線。
- メタボロミクス：生物の活動によって生じる分子の変動を網羅的かつ定量的に解析する研究開発。

[p.10]

- オミクス（ゲノミクス、プロテオミクス、メタボロミクスなど）：ゲノム、プロテイン（タンパク質）、代謝分子など生命機能の維持に必要な分子を網羅的に解析する研究の総称。

[p.11]

- 水素生成バイオマスシステム：水素生成微生物を利用した大規模水素生成システム。海上に設置することにより、土地や日照の制約から逃れられる。

[p.17]

- グレッツェルセル：→ 色素増感太陽電池。[p.1 別項参照]
- 光マネジメント：太陽光スペクトル（波長スペクトル）を集光したり波長変換（材料の性質を使って）したりして、効率良く太陽電池等に吸収されるようにする制御技術。

[p.18]

- 共役系高分子材料：共役二重結合からなる高分子材料。フラーレンやポリチオフェンなど。高いキャリア輸送能を持つ。
- 電荷分離：光によって励起された電子・正孔対（励起子：エキシトンとも言う）を完全な電子と正孔に分離して太陽電池として動作可能とすること。
- バルクヘテロ接合型：p-n 接合の光電変換層の厚みを実効的に拡大することを目的に、従来の平面ヘテロ接合型とは異なり、ドナー性の有機高分子とアクセプター性の高分子を溶媒に融かした状態でブレンドさせた有機薄膜太陽電池のひとつの構造。
- ドナー：固体中で系に電子を供給する不純物分子。
- アクセプター：固体中で系に正孔を供給（系から電子を受容）する分子。
- p-i-n 接合：半導体において、p 型半導体層と n 型半導体層の間に真性半導体（i）層を挟んだ接合構造。欠陥の少ない真性半導体を活性層として使う。

アモルファス薄膜太陽電池でよく使われる。

[p.19]

- ロール・ツー・ロール：薄膜状太陽電池の量産用作製法の一つで、片方のロールから引き出した薄膜シートを他方のロールで巻き取る間に電池作製を完了する方法。
- バンドエンジニアリング：半導体における荷電子帯の最上部と伝導帯の最下部とのエネルギー差である「バンドギャップ」を、ある目的のために（例えば、光の吸収波長帯を変えるために）人為的に制御すること。
- カルコパイライト系材料：黄銅鉱（カルコパイライト）に似た結晶構造を持つ材料全般。太陽電池では、CIGS 系がカルコパイライト系材料である。
- 金属錯体光触媒：コバルトポルフィリン錯体のような金属錯体を利用した光触媒。
- 半導体光触媒：CdS や ZnS などの半導体性能を持つ化合物を用いた光触媒。
- PSII 複合体：Photo System II 複合体の略称。光合成における光化学系 II の反応を担うタンパク質複合体。水と光から酸素、プロトンおよび電子を生成する反応系。
- PSI 複合体：Photo System I 複合体の略称。光合成における光化学系 I の反応を担うタンパク質複合体。PSII 複合体で生成された電子を最終的に NADP⁺（ニコチンアミドジヌクレオチドリン酸）に伝達し、NADPH の産生を促すタンパク質複合体。NADPH は電子供与体としてカルビンサイクルで利用され、生体内の普遍的なエネルギーである ATP の生産に寄与する。

[p.20]

- NADPH₂：光合成の電子供与を担う分子。ATP やグルコースなど生命維持に必須分子の合成に寄与している。
- ATP：アデノシン三リン酸。生体内の普遍的なエネルギー。各種反応の素過程に必須の分子。

[p.21]

- in silico 合成技術：生物に必要な機能（DNA 等）を計算機上で理論的に設計する技術。
- 低エネルギー高成長ホスト微生物：水素生成 DNA を発現させるための人工細胞。水素生成効率を向上させるためには、細胞に高成長能を付与する必要がある。
- ドーパント分子：半導体の性能を変化させるために半導体中に添加する分子。

参考文献

〔戦略プロポーザル〕 戦略プログラム「水素エネルギーシステムの分子・イオンテクノロジー」

(CRDS-FY2006-SP-15) 平成 19 年 3 月

〔提言〕 戦略提言「地球規模の問題解決に向けたグローバル・イノベーション・エコシステムの構築 ―環境・エネルギー・食料・水問題―」

(CRDS-FY2007-SP-11) 平成 20 年 3 月

〔WS1〕 科学技術未来戦略ワークショップ「太陽光を利用したクリーンエネルギー生成 ―ナノ材料科学で技術の限界を突破する―」 報告書

(CRDS-FY2007-WR-16) 平成 20 年 3 月

〔WS2〕 科学技術未来戦略ワークショップ「自然エネルギーの有効活用 ～材料からのアプローチ～微小生物を活用したバイオ燃料生産基盤技術」 報告書

(CRDS-FY2008-WR-03) 平成 20 年 11 月

技術群	種 類	細 目	現状の性能(2008年10月)	国際技術ベンチマーキング					総合コメント（関連プロジェクトを含む）	
				日	米	欧	韓	中		
太陽光発電	シリコンバルク系	単結晶シリコン	電力エネルギー変換効率* η ＝24%(セル) 18%(モジュール) 寿命>20年	◎	○	◎	△	△	・20%以上のセル効率、最も安定 ・政策誘導市場でグローバルビジネス化 ・韓、中もビジネスとしては活気 ・低コスト化に難点(～300円/W) ・Si基板需給の変動	関連国家プロジェクト ・「太陽光発生システム共通基盤技術開発」(NEDO、2006-2009) ・「革新的太陽電池国際研究拠点整備事業」(NEDO、2008-) ・米DOE「Helios」プロジェクト(2007-) ・EU「FP-7」プログラム [結晶Si製造新プロセス、薄膜・材料代替、新コンセプト(ホットキャリア)、中間バンド、2光子](2007-) ○世界各国で数多くのプロジェクトが走っているが、有機系の上に絞った中長期基盤プロジェクトは殆ど計画されていない。「Helios」プロジェクトでは本提案と競合する部分多し
		多結晶シリコン	η ＝19%(セル) 15%(モジュール) 寿命～20年							
	シリコン薄膜系	アモルファスシリコン 微結晶シリコン 多層タンデム構造	η ＝15%(セル) 11%(モジュール) 寿命>20年	◎	◎	◎	×	△	・Si消費量 1/100に ・既に市場に出ているが、2009年以降に本格普及 ・変換効率は結晶シリコンより低く、光による初期劣化 ・結晶シリコンより低コスト化(1/2)	
	化合物系	Ⅲ－Ⅴ族(集光型)	集光追尾方式で η ＝30～40%	◎	◎	○	×	×	・宇宙(人工衛星)用、軍事用 ・低緯度地域(スペイン、メキシコ)用	
		Ⅱ－Ⅵ族(CdTe) CIGS(Cu-In-Ga-Se)	η ＝13～19%(セル) 11～12%(モジュール) 寿命>20年	◎	◎	◎	×	△	・低コストで市場に出ている ・CdTeの安全性管理 ・結晶シリコンより低コスト(1/3)	
	有機系	色素増感	η ＝11%(セル) 6%(モジュール) 寿命 ～数年	○	△	△	×	×	・液体セルからゲル化・固体化が必要 ・市場に出始める ・デバイス物理(電気化学)不在 ・結晶シリコンより低コスト(～1/5)	
		有機薄膜	η ＝5%(セル) 寿命～数100時間	△	○	△	×	×	・圧倒的低コスト化を狙う ・学術的研究不足、デバイス物理不在 ・有機EL、有機トランジスタの人材を誘導すべき	
	新型超高効率系	Ⅲ－Ⅴ族 量子ドット型 多接合型	η <数%	△	○	△	×	×	・量子ドットや1光子多キャリア励起、多層構造を駆使して40-50%の変換効率を目指す次世代型 ・原理検証の段階を脱していない	
太陽光利用水素生成	無機系光触媒	オキシナイトライド系粉体材料 タンタル／ニオブ系複合酸化物 チタニア系粉体材料	η <10% 理論的には約30%	○	△	△	×	×	・日本の光触媒技術は非常に高い ・欧米では得意とする材料が異なる ・太陽電池と組み合わせる系も検討されている	関連国家プロジェクト ・「バイオマス・ニッポン」(2006-) ・「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」(CREST、2008-) ・米・DOE「Helios」プロジェクト(2007-) ・EU「バイオ燃料テクノロジープラットフォーム」(2006-) ○水素以外のバイオマスプロジェクト、水素貯蔵プロジェクトは数多く走っているが、太陽光による水素生成プロジェクトは少ない。本提案と類似のものは「Helios」のみ
	有機系光触媒 (光合成模倣)	ポルフィリン系 バイオ系	水素生成エネルギー変換効率** η <数% 理論的には約30%	○	△	△	×	×	・基礎研究段階 ・寿命、安定性に課題	
	葉緑体光化学電池	葉緑体／ヒドロゲナーゼ系	η <5% 理論的には約30%	△	△	△	×	×	・日本の技術力は欧米と同等 ・高度高熱菌の酵素を組み合わせることにより安定性が向上 ・電池構成に高度ナノテクが生かせる可能性大	
	微生物利用	シアノバクテリア	η <0.1% 理論的には約13%	△	△	×	×	×	・全体的な研究戦略がなかった ・効率向上にむけた複合オミクス技術の適用がなされていなかった ・日本にとって海域利用は魅力的	

* 最大出力／(モジュール面積×放射照度)
** 葉緑体での光収集率×化学エネルギー変換効率×水素生成変換効率

■戦略プロポーザル作成メンバー■

田中	一宜	上席フェロー	(物質・材料ユニット／ナノテクノロジーユニット)
石原	聡	フェロー	(物質・材料ユニット)
石森	義雄	フェロー	(ナノテクノロジーユニット)
大川	令	フェロー	(環境技術ユニット)
川口	哲	フェロー	(ライフサイエンスユニット)
豊蔵	信夫	フェロー	(ナノテクノロジーユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

戦略プログラム

太陽光エネルギーの利用拡大基盤技術

CRDS-FY2008-SP-03

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター
平成 21 年 1 月

物質・材料ユニット

〒102-0084 東京都千代田区二番町 3 番地
電話 03-5214-7481
ファックス 03-5214-7385
<http://crds.jst.go.jp/>

©2009 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。

ATTAATC A AAGA C CTAAC TCTAGACC
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 C CTAAC TCTAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC TCTAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
ATTAATC A AAGA CCT
GA C CTAAC TCTAGACC
0011 1110 000
00 11 001010 1
0011 1110 000
0100 11100 11100 101010000111
001100 110010
0001 0011 11110 000101

