

「量子ドット太陽電池研究開発」 基本計画

2012 年 3 月

技術研究組合 超先端電子技術開発機構
(ASET)

量子ドット型太陽電池研究会

目 次

1. 研究開発概要	
1.1 目的 及び 必要性	2
1.2 これまでの経緯	2
1.3 我が国における量子ドット太陽電池関連研究開発の現況	4
1.4 2050年に向けた展望	5
1.5 基本方針 及び 目標	8
2. 基本計画概要	
2.1 基本計画概要	10
2.2 実施体制(案)	13
2.3 予算(案)	14
2.4 運営管理(案)	14
3. 研究開発成果の取扱い等	15

1. 研究開発概要

1.1 目的 及び 必要性

東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所事故を契機に、原子力発電を根幹に据えて推進して来た我が国のエネルギー基本計画が抜本的に見直されることとなった。

電力エネルギー供給構成比率で約 30%を占める現在の原子力発電に代わり、同比率で 10%に満たない再生可能エネルギーを従来にも増して利活用することへの期待が高まり、依存度を大幅に引き上げるため様々な新たな技術・研究開発の加速、進展が予想される。

政府は 2009 年 6 月に太陽光発電ロードマップを見直し、発電コストについては 2020 年に 14 円/KWh、2030 年に 7 円/KWh、モジュール変換効率については 2017 年に 20%、2025 年に 25%という目標値を設定したところであるが、今回の事故を受けてこの目標達成を前倒し、加速する、或いは強力に推進する方向に見直されると予想される。

太陽光発電については、1959 年シリコン系太陽電池の基礎研究が始まって以来、過去 50 数年間で各種方式・材料が実用化され、グローバル産業に成長しつつあるが、熱力学におけるカルノーの定理から導かれるエネルギー変換効率の理論的上限值 85%に対して、いずれの方式もほど遠い状況にあり、単位面積あたりの発電量、発電コストに大きな課題を残している。即ち、現状の第 1～2 世代太陽電池は、セルコストと性能とがトレードオフの関係にあることに加えて、2020 年、2030 年以降の各発電コスト目標である 14 円/KWh、7 円/KWh 以下を実現するには、KW あたり設備単価の低減及び発電量の増大によって、夫々現状発電コストの 1/3、1/6 以下に抑制する必要がある。2030 年以降の太陽電池モジュールの単位面積あたり単価が現行と同じであるとすれば、発電コスト低減に見合うセルエネルギー変換効率は、現状 10 数%～20 数%として、2030 年以降では 3 倍～6 倍以上、即ち 60%超～70%が必要である。〔別添 1〕、註 1〕

そこで今後 2030 年に向けて、エネルギー変換効率を飛躍的に向上させる研究開発の早期取組みが望まれる。公的資金により推進中の NEDO プロジェクト 或いは JST のプログラムの今後の展開、展望をも視野に入れ、現在取り組まれている研究開発の延長線上にはない、夢のある「未来開拓技術」の研究開発に着手することが急務である。

1.2 これまでの経緯

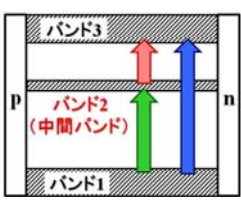
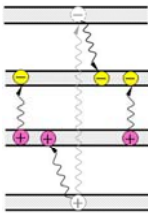
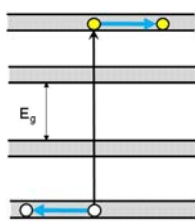
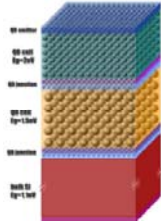
1961 年に W. Shockley と J. Quisser により、シリコン(Si)系太陽電池を含めた単接合太陽電池におけるエネルギー変換効率の理論的上限値が約 30%と示された(以下、SQ モデルと略記)結果、第 1 世代太陽電池は、見方によれば、SQ モデルによるエネルギー変換効率の理論的上限値の呪縛により学界の関心が薄れ、大学・公的研究機関における研究開発対象としてはあまり取り上げられず、実用化開発及び事業化が、サンシャイン計画など専ら我が国政府の手厚い支援の下、企業努力に負う形で推移して来たと言える。

2000 年代に入り、太陽電池事業に対する企業の事業マインドが旺盛になるにつれ、早くから手掛けてきた日本のみならず、関心を寄せる主要各国が、第 1 世代太陽電池(結晶 Si 系等)のコスト・パフォーマンスを最大の事業課題と捉えるようになった。又、その克服に向け、第 1.5～2 世代太陽電池(薄膜 Si 系、バルク化合物半導体系、化合物多接合系等)の研究開発が学界の関心を惹き、企業主導ではあるものの学界の英知を取り入れようとする動きに変わって来た。

しかし、太陽電池開発の現状を鑑みると、化合物多接合系においてエネルギー変換効率40%超が期待できるもののコスト面で課題が残る等、コスト・パフォーマンスの顕著な改善に繋がる解となり得るかどうか依然不透明であり、とりわけ、従来型研究開発の延長線上では、2020年以降をも見据えた発電コストを実現できるかどうか、明確な見通しを持つことが難しい状況である。

こうした背景から、第3世代と位置付けられる量子ドット太陽電池は、SQモデルの呪縛を解き、エネルギー変換効率の飛躍的向上が期待される方式として、1982年の研究初期段階から、理論的上限値が60%を上回るポテンシャルを秘めていると指摘されており、学界ではおよそ30年間研究開発が進められてきた。とりわけ、2000年代に入り、我が国が得意とするナノテクノロジーを駆使して、半導体ナノ粒子等、ナノ量子構造の物理的特性(物性)に関する理論的及び実験的研究が活況を呈している。そうした状況においても、量子ドット太陽電池は、依然として大学・研究機関における基礎研究段階のものとして見られていた。しかし、2011年4月 東京大学 荒川泰彦教授とシャープ(株)が、量子ドット太陽電池のエネルギー変換効率の理論的上限値が75%に達することを明らかにし、80%程度まで上限値を伸ばし得ることを示唆した。更に、2012年3月 両者は、量子ドット太陽電池として業界最高の非集光時18.7%、2倍集光下で19.4%のセル変換効率を達成するとともに、樹脂基板に貼り付けたフレキシブル太陽電池として、従来のリジッド基板太陽電池と比較して性能低下が見られないことを報告している。将来の飛躍的性能向上に加えて幅広い用途展開の可能性を大いに期待させるこうした基礎研究成果を着実に生かし、速やかに実用化に結び付ける為、量子ドット太陽電池の本格的な研究開発に早急に取り組む必要がある。

リソース面では未だ小規模ながらグローバルに研究開発が進む量子ドット太陽電池は、【表1】のように4種類に大別される。

種類	①中間バンド(IB)型 (Intermediate Band)	②多励起子生成(MEG)型 (Multiple-Exciton-Generation)	③ホットキャリア型 (Hot Carrier)	④タンデム接合型 (Multi-Junction)
コンセプト				
現時点での技術課題	(1)出力電圧の低下 (2)非発光再結合速度との競合 (3)光吸収率向上	(1)マルチエキシトンの生成効率が低い (2)量子ドットから電極へのキャリア注入速度が遅い	・量子ドットから電極へのキャリア注入速度が遅い	(1)多種類の量子ドット層を形成する必要あり (2)タンデム接合の設計
今後の解決策	(1)歪みが小さく、転位の少ない量子ドット作製手法の探索 (2)最適材料・構造の探索、量子ドット層の厚膜化	(1)マルチエキシトン生成効率の高い材料、構造の探索 (2)キャリアを効率的に取り出せる量子ドット-電極間構造の探索	熱緩和する前にキャリアを効率的に取り出す量子ドット-電極間構造の探索	(1)多種類の量子ドット作製手法の探索 (2)母体材料の探索 (3)高効率タンデム接合の実現

【表1】量子ドット太陽電池の種類

母材半導体のエネルギーバンドギャップの違い、量子ドット材料の違い、ドット形状・サイズ・密度等の違いにより、①中間バンド(IB)型、②多重励起子生成(MEG)型、③ホットキャリア型、更に、①から③のいずれかの拡張として、複数の量子ドット層を積層し多接合したいわゆるタンDEM接合型④がある。どの方式も基礎物性の解明とともに、動作原理の検証、実証が進みつつあるものの、太陽電池としてのエネルギー変換効率等のパフォーマンスやコストを詳細に議論できる状況にはない。

1.3 我が国における量子ドット太陽電池関連研究開発の現況

我が国では、環境負荷低減に資するグリーンイノベーションの一環として始まった省・創・畜エネルギーに関連するエネルギーイノベーションプログラムにおいて、「太陽エネルギー技術研究開発」が経済産業省/NEDO プロジェクトとして進行中である。具体的には、2008年度から7年度間に亘る「革新的太陽光発電技術研究開発」、又2010年度から5年度間に亘る「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」に取り組んでいる。

「革新的太陽光発電技術研究開発」におけるサブテーマの一つに、量子ドットを含む量子ドットデバイス等の新しい概念、量子閉じ込め効果等の新しい動作原理を導入する太陽電池として、量子ドット太陽電池が取り上げられているが、残念ながらスタートしたのが2008年であり、プロジェクトの目的がCO₂等の排出量削減としていたことから、夫々の機関が比較的独立した小規模な基礎研究に止まっているのが現状である。

プロジェクトでは、「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」(プロジェクトリーダー 中野義昭 東京大学教授)において、①「効率量子タンDEM太陽電池製造プロセス技術開発」及び②「量子ドット超格子を基盤とした超高効率太陽電池」を含む4つの研究項目に取り組んでいる。又、「低倍率集光型フルスペクトル太陽電池の研究開発」(プロジェクトリーダー 小長井誠 東京工業大学教授)において、ナノドット/量子ドットを用いた③「バンドエンジニアリング」を含む3つの研究項目に取り組んでいる。夫々の研究項目は更に多くのサブテーマに細分されている。サブテーマ①～③は、いずれも実験室レベルにおける量子ドットなどの量子化エネルギー準位を効率的に活用することを目指す太陽電池の研究であるが、母材としてエネルギーバンドギャップ(E_g)が比較的狭い InAs、GaAs、Si 等を用いており、いずれもエネルギー変換効率は高々15%前後に止まっている。

一方、太陽電池、レーザー等への応用を視野に入れた革新的材料・デバイス・システムの創製が、2009年度から6年度間に亘り、文部科学省/JST CREST プログラムで進行中である。量子ドット、3次元ナノディスク等の新構造ナノデバイスについて、太陽電池向き材料探索を含め試作、評価、検証するアプローチは革新的技術開発として重要であるが、現状、リソースの観点からは、NEDO プロジェクトと同様、比較的小規模な基礎研究に止まっている。

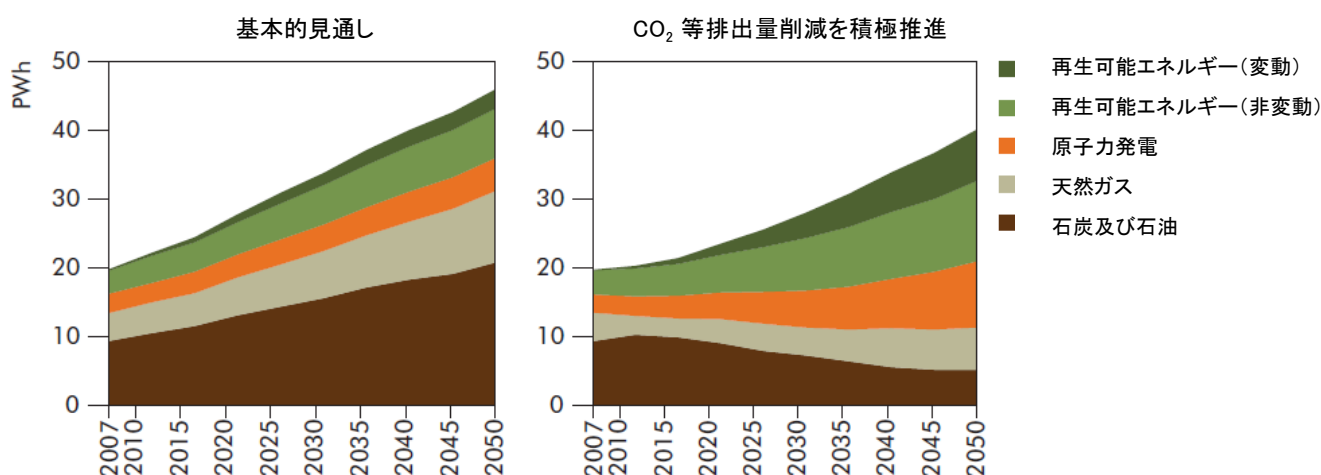
こうした現状に鑑み、実用化には30年以上かかると言われている第3世代太陽電池、とりわけ量子ドット太陽電池開発を10年以上前倒して2020年代後半に事業化を図る為、中長期アプローチとして、アカデミアによる新しい材料を用いた量子ドットデバイスに関する基礎物性の確立、中長期視点に立ち新たな事業パラダイムの展開に強い意欲をもつ企業を加えてのエンジニアリングの確立、又新しい発電システムの構築等を目指して、正攻法で取り組むことが必須である。高いハードルに立ち向かうチャレンジ精神を共有し、挑戦的課題に取り組む際の極めて大きなリスクを最小化する為、長期的観点に立ち産学官の英知を結集したオールジャパンでの取組みが肝要である。

具体的には、量子ドット太陽電池の研究開発において、量子ドット結晶自己組織化成長、多層積層化等の材料、プロセス面からのこれまでのアプローチに加えて、量子効果発現の検証、量子効率向上策の検証、動作原理の実証等 定量的評価に基づく基礎物性の解明、理解が不可欠である。こうした科学的アプローチに立脚して挑戦的取組みでもある量子ドットデバイスの新たな創製技術の確立等、技術の革新化が必要である。

政府の中長期科学技術政策ビジョンに沿った経済産業省、文部科学省等関連府省庁の横断的政策連携に基づいて、量子ドット太陽電池による創エネルギー研究開発、小型、軽量で廉価なりチウム空気蓄電池等蓄エネルギー研究開発に加えて、素材として軽量、強度に優れたナノカーボン技術による革新的材料開発等を並行して進めることにより、新たな用途開拓が進むと期待される。

1.4 2050年に向けた展望

世界の電力需要は、【図1】に示すように、2050年には約42PWh/年(PetaWh=10¹⁵Wh)超に達すると見積もられ、CO₂等の排出量削減を積極的に推進した場合でも、現状に比べ約2倍近い37PWh/年に達し、エネルギー最終需要に占める電力需要の割合は、2007年の17%から23%に増加するとの予測である。

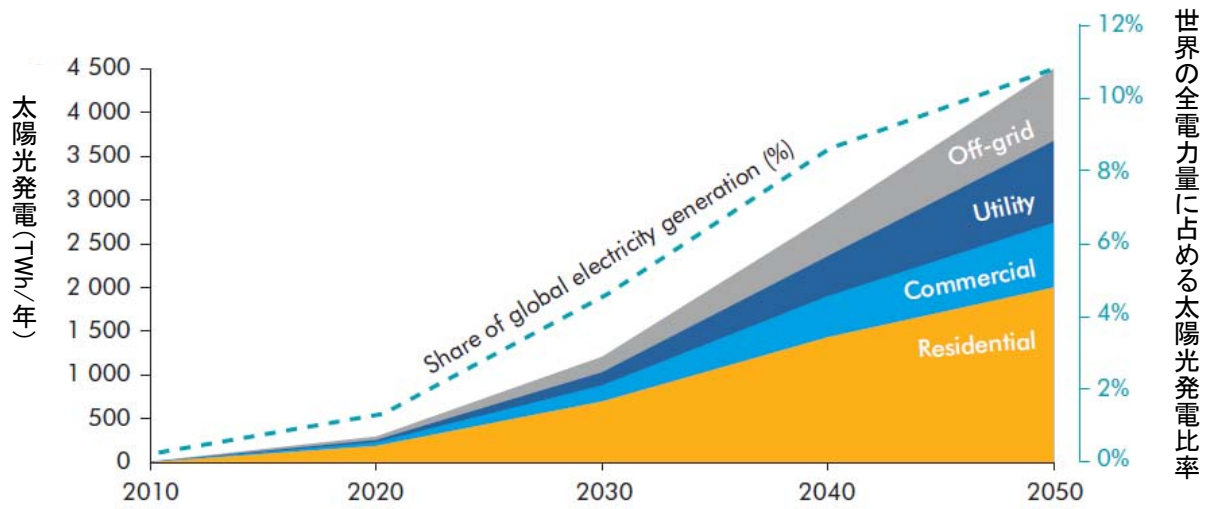


【図1】世界の電力需要 (出典)IEA Energy Technology Perspectives 2010

CO₂等の排出量削減を推進するうえで、水力発電、バイオマス発電、地熱発電等時間変動しない再生可能エネルギーと共に、太陽光発電、風力発電等の時間変動する再生可能エネルギーは重要な役割を担い、2025年頃から数PWh以上の電力量を供給すると期待される。

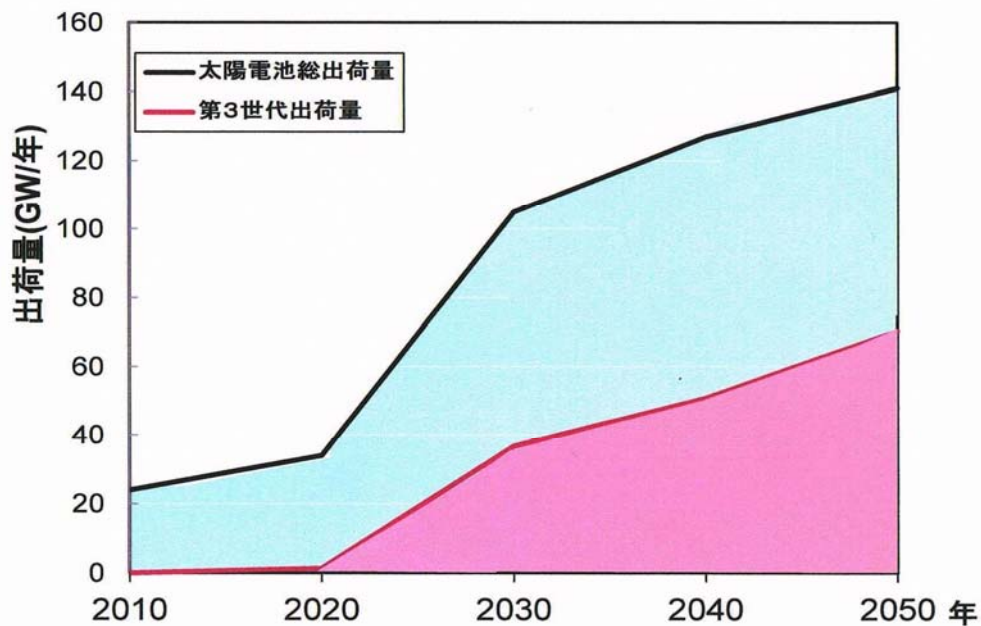
世界の主要国で原子力発電に関する議論が活発な現況を鑑みると、CO₂削減シナリオとは異なる視点から再生可能エネルギーの依存度増大が議論されると予想される。

太陽光発電の世界の全電力量に占める比率を【図2】に示す。現状1%未満の太陽光発電は、2020年に1%超となり、2030年には4.5%、2050年には11%超の4.5PWh/年に達する見込みである。用途別には、現状殆どが住宅用であるが、2020年以降住宅用の伸び以上に産業用が普及拡大し、2040年以降は自律分散型の太陽光発電システムが本格的に普及すると見込まれる。



【図2】全発電量に占める太陽光発電の比率 (出典)IEA Energy Technology Perspectives 2010

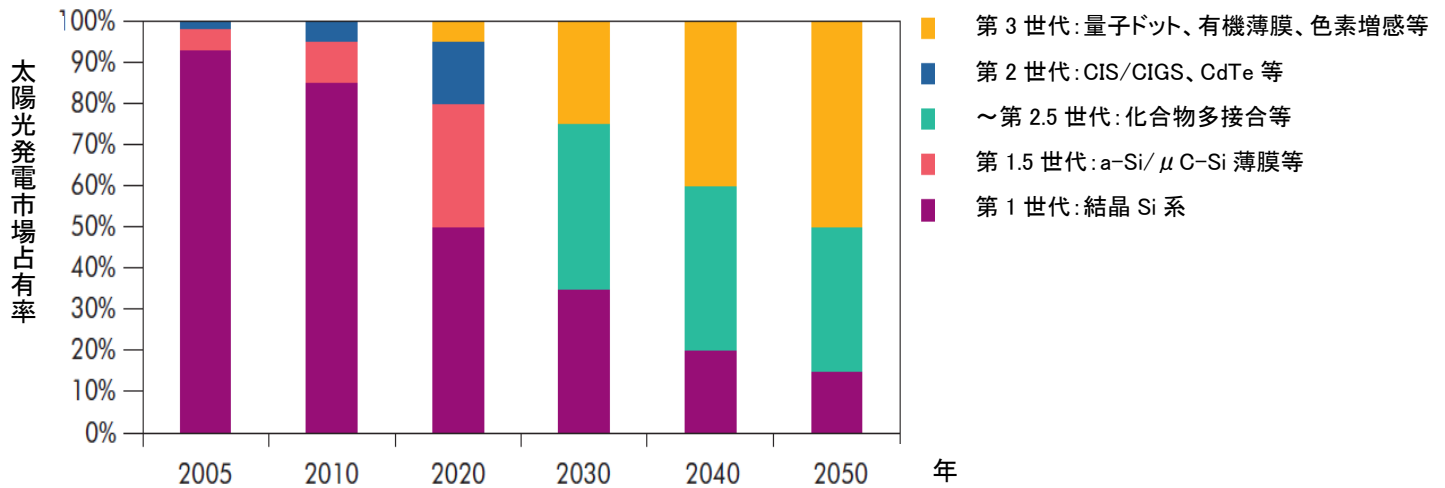
2050年までの太陽光発電全出荷量及び第3世代太陽電池出荷量の推移予測を【図3】に示す。太陽電池総出荷量は2020年には2010年の1.4倍強に増え、その後2030年にかけて第3世代太陽電池の立ち上がりもあり、2020年比約3倍強まで増加すると見込まれる。2040年までの10年間は出荷量増加率が鈍るものの、【図4】に示すように、第3世代が市場シェアの40%、2050年には市場シェアの半分を占めるまでに伸びると見込まれることから、全出荷量の伸びとほぼ同程度の伸びになり、太陽電池市場を牽引すると予想される。



【図3】太陽光発電全出荷量及び第3世代太陽電池出荷量の推移予測

(出典)総出荷量は IEA Energy Technology Perspectives 2010

第3世代太陽電池出荷量は IEA Energy Technology Perspectives 2008 の技術別シェア【図4】に基づき算出



【図4】太陽光発電技術別市場占有率の推移 (出典)IEA Energy Technology Perspectives 2008

2050年に向けた太陽光発電技術別市場占有率の推移を【図4】に示す。

現在市場占有率84%の第1世代結晶Si系は、2020年に約50%にまで大幅減少し、2040年に20%、2050年には15%にまで後退する。代わって第1.5世代薄膜Si系と第2世代CIS/CIGS系、CdTe等の薄膜系が第2.5世代に進化して、2030年以降市場占有率を35%~40%に大きく押し上げる見込みである。更に、2020年頃から市場拡大が本格化すると見込まれる色素増感型、有機薄膜系等の第3世代は、2020年代半ばから後半にかけて市場開拓が進む量子ドット太陽電池等を加えて、2040年代後半以降、第2.5世代薄膜系とクロスオーバーしてその後世代交代が進むと見込まれる。

2030年以降の太陽光発電市場に大きな変化をもたらす技術の一つに量子ドット太陽電池が挙げられる。即ち、量子ドット太陽電池の高いエネルギー変換効率に加えて、設置面形状、サイズ等の制約を回避しフレキシブルに対応できる特長を生かして、住宅、車載、オフィス・家庭・携帯用機器分野における新たな用途展開が始まり、太陽電池市場のパラダイムシフトが起こると期待される。

(1)住宅用では、電気エネルギーの自給自足に向けて以下のような形態が考えられる。

〔別添1〕、註1〕、

- ① 家庭用蓄電池の併用により2日間強の電力が自給自足できるソーラー住宅
- ② ソーラー住宅地域/コミュニティにおける電力需給を最適に調整する地域/コミュニティレベルの大規模ソーラー発電を含む自律分散型(Off-grid)電力システム

(2)車載用では、新エコ社会に不可欠なインフラストラクチャー構築に資するものとして、以下のような形態が考えられる。〔別添1〕、註2〕

- ① 晴天日にはソーラー発電のみで60Km/日走行し、ソーラー発電の併用により蓄電池一充電で500Km走行できる電気自動車(ソーラーEV)
- ② 非常用/補助電源としてのソーラーEV

(3)オフィス・家庭・携帯用では、各製品の省電力化とLED照明等室内照明の高品位化が進むと見込まれ、現在有効活用されていない製品上面、前面、側面へフレキシブル量子ドット太陽電池を貼り付け、2次電池を併用した電源不要のソーラー製品が期待できる。

〔別添1〕、註3〕

- ① 充電器不要のソーラー携帯電話、ソーラーモバイル PC 等
- ② 筐体上面でのソーラー発電により、電源不要のカラープリンター(ソーラープリンタ)
- ③ 液晶パネル額縁部でのソーラー発電により、電源不要の液晶テレビ(ソーラーテレビ)
- ④ フロントドア一部でのソーラー発電により、電源不要の冷蔵庫(ソーラー冷蔵庫)

量子ドット太陽電池の特長である高性能とフレキシビリティは、市場規模が限定的と見られがちな住宅用等発電分野から、車載分野、オフィス・家庭・携帯製品分野等へ用途を一気に拡大する大きな要因であり、太陽電池市場のパラダイムシフトを加速すると期待される。

量子ドット太陽電池による市場のパラダイムシフトが進むことにより、日本の独自性や強みを生かして 2030 年頃には、日本ブランド量子ドット太陽電池モジュールの出荷量が、現状の日本ブランド Si 系太陽電池モジュールと同規模の 14 百万台/年にまで達すると見積もられる[別添1]、註4]。

こうした新たな市場創出を伴うモジュール出荷量増加は、量子ドット太陽電池のシステム価格見通しとして、2030 年代後半の市場本格拡大期には、標準的な Si 結晶系太陽電池の現状システム価格と同程度に落ち着くと見込まれる[別添1]、註5]。

1.5 基本方針 及び 目標

基本目標設定の前提となる量子ドット太陽電池研究開発の基本的考え方、基本方針は以下の通りである。

- 量子ドット太陽電池用ナノ技術は、新材料の探索、新原理の実証等 科学的アプローチを踏まえた上で実用化に向けたエンジニアリングを確立する必要があり、既に実用化されている量子ドットレーザー用ナノ技術に比べて遥かに困難さが増す為、非連続な技術の発展を生み出す技術の革新(革新的技術の創生)に取り組む。
- 量子ドット太陽電池実用化のキーである良質な量子ドット創製技術を確立する為、研究開発中期までは、材料選択とその基礎物性理解に立脚した物性制御技術の確立及びデバイス要素技術の確立に重点的に取り組む。
- 経験豊かな上級研究者と若い研究者の熱意と英知を結集し、量子ドットデバイス技術の革新化を図る為、長期的課題として集中的に取り組む。

10 年間に亘る研究開発の基本目標は、第 I 期～第 III 期までの 3 期間に分け、以下のように進める。

■ 第 I 期: 初年度～第 3 年度 3 年間

- ・太陽電池用量子ドットデバイス技術の革新化に向けた立ち上げ
 - * 物性評価に基づく材料探索及び最適材料の選定
 - * 量子ドットの可制御性確認
 - * 物性評価に基づく太陽電池用量子ドットの最適化確認、デバイスの動作原理検証

■ 第Ⅱ期:第4年度～第7年度 4年間

- ・太陽電池用量子ドットデバイス技術の革新化実証
- ・量子ドット太陽電池セルの試作・評価によるエネルギー変換効率(以下、 η と略記)30%超が見通せることの実証(以下、見通し可能実証と略記)
- ・光吸収波長の異なる量子ドットを組合せたタンデム多接合型太陽電池セルの試作・評価による η :50%超の見通し可能実証

■ 第Ⅲ期:第8年度～最終第10年度 3年間

- ・生産技術を見据えた太陽電池用量子ドットデバイス技術の確立
- ・量子ドット太陽電池セルの試作・評価による η :30%超の実証、及び η :50%超の見通し可能実証
- ・光吸収波長の異なる量子ドットを組合せたタンデム多接合型太陽電池セル試作・評価による η :50%超の実証、及び η :60%超(挑戦目標70%)の見通し可能実証
- ・見通し可能実証等を踏まえた実用化の基盤となるエンジニアリングの確立

10年間に及ぶ長期研究開発に伴うリスク低減の為、第Ⅱ期中間時点で、 η :30%超の見通し可能実証に係る進捗状況を次ステップへの見極め、以降の取組見直しの材料とする。

量子ドット太陽電池研究開発は新材料、デバイス構造の探索、開発に加え、その基礎物性に立ち返った理論的考察及び実験的検証を必要とする為、現状で目標値及びその達成時期を見定めるには不確定要素が極めて多い。

見通し可能実証における目標値 η はかなり挑戦的な数値を掲げているため、第Ⅱ期中間時点の見極めにおいて、数値上課題を残す場合でも以降の目標達成に繋がる量子ドットに適した新たな材料選択、量子ドットデバイスの設計、材料加工のプロセス等研究開発の根幹に関わる確実な指針が得られると期待できる。

第Ⅰ期では、現状想定し難い技術課題、不確定要素を解明、明確化することを基本に据え、速やかに技術的解決策を検討し、対応を図ることが望まれる。

第Ⅱ期以降でも同様の基本的考え方に立ち、足元の目標達成に邁進するとともに、それを阻害する問題点に内在する物理的・本質的課題を明確化しつつ、実用化を視野に入れて、次のステップに繋がる研究開発、量子ドット太陽電池の実用化開発を促す指針を提示することが望まれる。

第Ⅲ期を含め、最終目標とする量子ドット太陽電池の実用化に向け一定の目途をつけることに加え、中間成果として、量子ドット光センサー、発光素子(緑色LED)等別用途への技術展開も期待される。

太陽電池市場のパラダイムシフトに伴う2030年以降の量子ドット太陽電池の本格的市場拡大期に見合うセル基板数量を賄う為、量子ドット太陽電池セルの母材候補であるGa₂N等化合物半導体について、高効率で廉価な基板量産化技術の確立が重要である。

更に、現状においてナノテクノロジー、量子ドット関連国際学会は既に幾つか存在するが、本分野におけるリソース(人材、資金等)は限られている。このため本研究開発の基本的考え方、目標に沿う学会を設立すべく、【表1】に示した量子ドット太陽電池の4つの方式に関連した幅広い分野におけるグローバルな研究開発者の活発な議論の展開、及び新たな知見の蓄積を図る為、本研究開発初期段階から量子ドット太陽電池に特化したワークショップ、国際会議等を立上げ、定期的を開催することが期待される。

2. 基本計画概要

2.1 基本計画概要

第 I 期 初年度～第3年度

量子ドット太陽電池の4つの方式は【表1】に示したように現時点で基礎物性の解明に強く依存する多くの技術課題が存在し、又現時点ではその解決策/対応策を見出すまでの時間が明確に読み切れる状況にない。第 I 期では、中間バンド型を中心に多様な量子ドット太陽電池について、可能な限り並行して基礎物性の解明、動作原理の検証、量子ドットデバイス創製技術基盤の確立に取り組み、それに必要な装置、機器等を順次導入する。

(1) 量子ドットデバイスの基礎物性解明及び動作原理検証

～主に既存材料をベースとする量子ドットデバイスにおける基礎物性の解明と動作原理の検証～

①量子効果発現の評価、検証

- a)量子閉じ込め効果による量子化エネルギー準位:基底状態、励起状態の評価、検証
- b)量子ドット間距離/結合度に応じた中間バンド(Intermediate Band: IB)発現の評価、検証、及び量子トンネル効果の評価、検証
- c)3次元化/多層積層化による量子効率向上の評価、検証
- d)不純物濃度に応じた中間準位発現、及び量子トンネル効果の評価、検証:
・母材に適したドーパントの選定、及び最適ドーピング量等ドーピング制御方法の確立

②エネルギーバンドギャップ(E_g)、量子化エネルギー準位の可制御性、及び最適化の評価、検証

③IB位置、IB幅、IB数、擬似フェルミ準位等の可制御性、及び最適化の評価、検証

④高精度光学測定等の実験的評価と理論的考察・検証に基づくキャリアダイナミクス/キャリア緩和過程等 量子ドットデバイスに固有な物理現象の解明、基礎物性の評価、検証

- a)IB状態、中間準位状態におけるキャリアダイナミクスの解明
- b)IB状態、中間準位状態におけるキャリアのエネルギー緩和過程の解明:
オージェ的緩和過程、フォノンボトルネック、キャリア分離、多重励起子生成(MEG)等の効果の検証

⑤量子化エネルギー準位を用いた2段階光吸収の評価、検証

⑥量子ドットデバイスにおけるサブバンドギャップ光吸収における光吸収効率向上策及び光電流増大の評価、検証

⑦キャリア輸送・伝導特性等の解明、向上策の評価、検証

⑧高速キャリア取り出し技術の基盤確立

(2) 良質な量子ドットデバイスの創製技術基盤の構築

～材料科学を生かした量子ドットデバイスの要素技術基盤の構築～

①最適母材及び添加物の探索及び選別

- ・IB型等に必要母材として、Ⅲ-V族窒化物半導体、Ⅱ-VI族亜鉛化合物半導体等多様な材料について検討

- ②量子ドット寸法、形状、層内歪分布等の均一性制御技術の基盤確立
 - a)自己組織化成長等における量子ドット結晶成長の最適化に向けた条件出し、検証等
 - b)量子ドット密度、配置、配列等の最適化制御の検証、評価、及び支配的パラメータの特定等
 - c)結晶成長過程のモニタリング・解析・評価技術、統合システム制御技術等の基盤確立
- ③量子ドット間距離/結合度等制御技術の基盤確立
- ④IB 位置、IB 幅、IB 数、擬似フェルミ準位等の可制御性、及び最適化の評価、検証
- ⑤3次元化/多層積層化技術の基盤確立
- ⑥高精度光学測定等の実験的評価と理論的考察・検証に基づくキャリアダイナミクス/キャリア緩和過程等 量子ドットデバイスに固有な物理現象の解明、基礎物性の評価、検証
 - a)IB 状態におけるキャリアダイナミクスの解明
 - b)IB 状態におけるキャリアのエネルギー緩和過程の解明:
オージェ的緩和過程、フォノンボトルネック、キャリア分離、MEG 等の効果の検証
- ⑦サブバンドギャップ 2 段階光吸収の評価、検証
- ⑧キャリア輸送・伝導特性等の解明、向上策の評価、検証
- ⑨高速キャリア取り出し技術の基盤確立

第Ⅱ期 第4年度～第7年度

(1)量子ドットデバイスの基礎物性確立及び動作原理実証

～主に既存材料をベースとする量子ドットデバイスにおける基礎物性の確立と動作原理の実証～

- ①量子効果発現の実証
 - a)量子ドット間距離/結合度に応じた IB 発現の実証、及び量子トンネル効果の実証
 - b)3次元化/多層積層化による量子効率向上の実証等
 - c)母材に添加する不純物濃度に応じた中間準位発現の実証及び量子トンネル効果の実証
- ②量子化エネルギー準位の可制御性及び最適化の実証等
- ③IB 位置、幅、IB 数、擬似フェルミ準位等の可制御性及び最適化の実証等
- ④高精度光学測定等の実験的評価と理論的考察・検証に基づくキャリアダイナミクス/キャリア緩和過程等 量子ドットデバイスに固有な基礎物性の確立
 - a)IB状態、中間準位状態のキャリアダイナミクスの確立
 - b)量子ドットデバイスにおけるキャリアエネルギー緩和過程の実証:
オージェ的緩和過程、フォノンボトルネック効果、キャリア分離効果、MEG 効果等
- ⑤量子化エネルギー準位を用いた 2 段階光吸収の高効率化実証
- ⑥量子ドットデバイスにおけるサブバンドギャップ光吸収の高効率化及び取出し電流増大の実証
- ⑦キャリア輸送・伝導特性等の高効率化実証
- ⑧高速キャリア取出し技術の確立

(2) 良質な量子ドットデバイスの創製技術基盤の確立

～材料科学を生かした量子ドットデバイスの要素技術基盤の確立～

- ① 最適母材及び添加物の選定
 - ・Ⅲ-V族窒化物半導体、Ⅱ-VI族亜鉛化合物半導体等多様な材料からIB型等に最適な母材を選定
- ②量子ドット寸法、形状、層内歪分布等の均一性制御技術の確立
 - a)自己組織化成長等における量子ドット結晶成長の最適化制御技術の確立
 - b)量子ドット密度、配置、配列等の最適化制御技術の確立
 - c)結晶成長過程のモニタリング・解析・評価技術、システム制御技術の確立
- ③量子ドット間距離/結合度等制御技術の確立
- ④ IB位置、幅、数、擬似フェルミ準位等の可制御性の実証及び最適化制御技術の確立
- ⑤3次元化/多層積層化技術の確立
- ⑥高精度光学測定等の実験的評価と理論的考察・検証に基づくキャリアダイナミクス/キャリア緩和過程等 量子ドットデバイスに固有な基礎物性の実証
 - a)IB状態におけるキャリアダイナミクスの実証
 - b)IB状態におけるキャリアのエネルギー緩和過程の実証:
 - オージェ的緩和過程、フォノンボトルネック効果、キャリア分離効果、MEG効果等
- ⑦サブバンドギャップ2段階光吸収の高効率化実証
- ⑧キャリア輸送・伝導特性等の高効率化実証
- ⑨高速キャリア取り出し技術の確立

(3) 太陽電池としてのセル技術基盤の構築

～均質で良質な量子ドット太陽電池セルのデバイス設計、材料・加工プロセス等要素技術のインテグレーション基盤の構築、及びデバイス特性解析・評価技術等統合化基盤の構築～

- ① 短絡電流(I_{sc})増大と解放電圧(V_{oc})維持が両立する量子ドット太陽電池セルの設計、試作、評価、動作検証
- ② 取り出し電流及び取り出し電圧を最大化するセル及びモジュール構造の評価、検証
- ③ 量子ドット太陽電池セルの設計、試作、評価による η :30%超の見通し可能実証
- ④ 光吸収波長の異なる量子ドットを組合せたタンデム多接合型太陽電池セルの設計、試作、評価による η :50%超の見通し可能実証

尚、第Ⅱ期中間時点(全期間の中間年度末にあたる第5年度末)を目途に、(1)、(2)に基づき(3)で試作する量子ドット太陽電池セル及び光吸収波長の異なる量子ドットを組合せたタンデム多接合型太陽電池セルの評価、検証結果に基づき、夫々目標とする η :30%超の実証及び η :50%超の見通し可能実証における進捗状況、達成度合いを鑑みて、次ステップへの移行に関する見極めを行う。

技術課題を残しつつも解決方法・対応策等が適正、明確に示されており、次ステップへの移行が妥当であると見極められた場合は、以下の第Ⅲ期へ進むが、見極めが難しい場合は、第Ⅱ期中間時点までの5年度間に亘る成果を活かし、別用途における実用化/応用開発の取組みも視野に入れ、研究開発計画の見直しを行う。

第Ⅲ期 第8年度～最終第10年度

◆ 太陽電池としてのセル及びモジュール技術基盤の確立

～均質で良質な量子ドット太陽電池セルのデバイス設計、材料・加工プロセス等要素技術のインテグレーション基盤、及びモジュール高効率化技術基盤の確立、並びにデバイス特性解析・評価技術等統合化基盤の確立～

- ① I_{sc} 増大と V_{oc} 維持が両立する量子ドット太陽電池セルの設計、試作、評価による、 η :30%超の実証、及び η :50%超の見通し可能実証
- ② 取出し電流及び取出し電圧を最大化するモジュールの設計、試作、評価による検証
- ③ 光吸収波長の異なる量子ドットを組合せたタンデム多接合型太陽電池セルの設計、試作、評価による、 η :50%超の実証、及び η :60%超(挑戦目標70%)の見通し可能実証
- ④ 量子ドット太陽電池セル及びモジュールの特性解析・評価技術基盤の確立

2.2 実施体制(案)

本研究開発を遂行するための機関として、新たに技術研究組合「量子ドット太陽電池研究開発機構(仮称)」を設立し、産学官連携の下でオールジャパンとしての研究開発を実施する。

尚、研究・技術開発分野の専門性から、以下の3グループで実施することが望ましい。

● 物性研究グループ(Gr)

～母材から、単一量子ドット、単一量子ドット層、量子ドット積層デバイスまでの一貫した物性に関する理論的検討・考察に基づく実験的検証～

- ・量子効果発現の実験的及び理論的検証
- ・キャリアダイナミクス/キャリア緩和過程の実験的及び理論的検証等

● 材料/プロセス開発 Gr

～均質で良質な量子ドットデバイスの創製に必要な要素技術の確立、及びそれらのインテグレーション技術の確立～

- ・最適母材の選定、ドーピング制御技術の確立
- ・均質で良質な量子ドット成長条件の最適化制御技術の確立
- ・量子ドット密度、配置、配列の最適化制御技術の確立
- ・量子ドットの多層積層化技術の確立等

● デバイス/システム開発 Gr

～量子ドット太陽電池の設計、試作、評価、検証、及び発光デバイス、光センサー等への応用検討～

- ・量子ドット太陽電池セル技術の確立
 - ・電極構造最適化等 電力取出し技術の確立
- ・量子ドット太陽電池モジュール技術の確立
- ・研究開発進捗度、中間成果に応じた応用デバイスの検討、試作、評価、検証等

2.3 予算(案)

10年間の研究開発予算の規模としては、概ね以下のように見積られる。

年度	初年度	2年度	3年度	4年度	5年度	6年度	7年度	8年度	9年度	10年度	合計
国(億円)	20	20	20	30	30	30	30	30	30	30	270
民間(億円)	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10	30
合計(億円)	20	20	20	30	30	30	30	40	40	40	300

2.4 運営管理(案)

本研究開発プロジェクトは、新たに設立する技術研究組合の支援、協力により、研究企画、経理、総務、管理等の業務を運営する。

量子ドット太陽電池の本格的実用化には、10年間に亘る研究開発のマイルストーン毎に当初目標を達成した場合であっても、更に数年程度を要すると見込まれる。従って、研究開発に係る情報管理、研究開発成果の取扱い等について、新設する技術研究組合に情報、知的財産権(以下、知財権と略記)等の管理部門を設置し、情報管理規程、知財権取扱規程等を制定することにより、研究開発成果に基づく我が国の太陽電池関連技術及び事業における国際競争力の維持、向上に加えて、知財権の戦略的且つ有効な活用が、プロジェクト終了後速やかに図れるよう取り組むことが期待される。

3. 研究開発成果の取扱い等

グローバルな産業構造やビジネスルールが大転換し、圧倒的な特許数を誇る多くの産業領域において、昨今、我が国の企業が何度も市場撤退を繰り返している。約30年前までのキャッチアップ型研究開発であれば局所最適が全体最適に繋がり易かったが、本プロジェクトのように世界最先端で且つ未来開拓型研究分野にあつては、局所最適が全体最適とは成り難い。この為、本プロジェクトにおいてはグローバルな視点でどのような知財戦略を持ち、それをどう実践して行くかを明確にしつつ、新たな太陽電池産業を想定したバリューチェーンの川下から川上までの研究・技術開発における適正な情報管理、知財権の取扱いが不可避である。

例えば、知財権については、プロジェクト終了後、基本・有用特許等を戦略的に有効活用出来るよう、パテントプール[別添1]、註6]等の設置について、プロジェクト第I期の早い段階から検討に着手することが必要である。この為、新たに設立する技術研究組合において、早い段階から情報管理、知財権等の管理・取扱部門を設け、実用化時真に競争力が発揮できるようグローバル知財戦略等の策定を図ることとする。

以上