

平成28年度新たに取り組むべき課題・領域の動向(俯瞰)について

平成27年2月26日

JST研究開発戦略センター
ナノテクノロジー・材料ユニット

ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰図（2015年版）

豊かな持続性社会

地球規模の課題解決

国際的な産業競争力

生活の質の向上

システム化 量産化 高機能 コスト 信頼性 環境負荷 安全 省エネ リサイクル

エネルギー

太陽電池
人工光合成
バイオマス
燃料電池
熱電変換
二次電池・キャパシタ
エネルギーキャリア

パワーデバイス
エネルギーハーベスト

環境
環境浄化膜
排ガス浄化触媒
環境モニター（デバイス）

健康・医療

生体適合性材料
再生医療材料
人工組織・人工臓器
診断・治療デバイス
DDS（薬物送達システム）
分子イメージング

社会インフラ （水・電力・交通・通信）

超電導線材
超軽量・高強度材料
断熱材料・耐熱材料
水処理膜
モータ・高保磁力磁石
センサネットワーク

情報通信・エレクトロニクス

極限CMOS
記録媒体
光インターコネクタ
スマート・インターフェース
（センサ、ロボット、ウェアラブル）
固体照明・ディスプレイ
量子コンピュータ・通信

新興・融合領域

スピントロニクス プラズモニクス シリコンフォトニクス トポロジカル絶縁体 有機エレクトロニクス

フォトニック結晶 メタマテリアル 量子ドット MEMS マイクロ・ナノフルイディクス 分子ロボティクス

ナノ粒子・クラスター ナノチューブ/CNT ナノワイヤ・ファイバ グラフェン/ナノシート/二次元薄膜 多孔性配位高分子（PCP）/金属有機構造体（MOF） 超分子

基盤領域

高温超伝導材料 強相関電子材料 金属ガラス 複合材料 イオン液体 機能性ゲル

金属材料 磁性材料 半導体材料 酸化物材料 分子・有機材料 生物材料

設計・制御

分子技術 ナノ界面・ナノ空間制御 マイクロ・ナノトライボロジー ナノ熱制御 バイオ・人工物界面 バイオミメティクス マテリアルズ・インフォマティクス
元素戦略

製造・加工・合成

フォトリソグラフィ ナノインプリント ビーム加工 インクジェット

自己組織化
結晶成長
薄膜、コーティング
付加製造（積層造形）

計測・解析・評価

電子顕微鏡
走査型プローブ顕微鏡
X線・放射光計測
中性子線計測

理論・計算

第一原理計算
分子動力学法
分子軌道法

モンテカルロ法
フェーズ・フィールド法
有限要素法

共通支援策
【システム化促進策】

教育
人材育成
研究インフラ
異分野融合
国際連携
知的財産
標準化
EHS・ELSI
産学連携
府省連携

ナノサイエンス

物質科学、光科学、生命科学、情報科学、数理科学

主要な研究開発領域（2015年版）

俯瞰区分	研究開発領域
環境・エネルギー	太陽電池
	人工光合成
	燃料電池
	熱電変換
	蓄電デバイス
	パワー半導体デバイス
	グリーン触媒
健康・医療	生体材料（バイオマテリアル）
	再生医療材料
	薬物送達システム（DDS）
	計測・診断デバイス
	バイオイメージング
社会インフラ	分子イメージング
	構造材料（金属）
	構造材料（複合材料）
	分離機能材料
	放射性物質除染、減容化
	高温超伝導（線材）
	センシングデバイス・システム

俯瞰区分	研究開発領域
ICT・エレクトロニクス	超低消費電力ナノエレクトロニクスデバイス
	スピントロニクス
	二次元原子薄膜
	フォトニクス
	有機エレクトロニクス
	MEMS
	異種機能三次元集積チップ

俯瞰区分	研究開発領域	
共通基盤／科学技術	設計、制御	界面制御
		空間・空隙構造制御
		バイオミメティクス
		分子技術
		分子ロボティクス
	加工、プロセス	元素戦略・希少元素代替技術
		マテリアルズ・インフォマティクス
		トップダウン型プロセス（半導体超微細加工）
		ボトムアップ型プロセス（自己組織化等）
		計測
理論、計算	走査プローブ顕微鏡	
	電子顕微鏡	
	放射光・X線	
EHS, ELSI	その他の主要な計測技術	
	物質・材料シミュレーション	
		リスク評価・リスク管理・リスクコミュニケーションと社会受容

グローバル、国内の社会的期待や研究開発動向等を踏まえ、3章の研究開発領域として41領域を選定

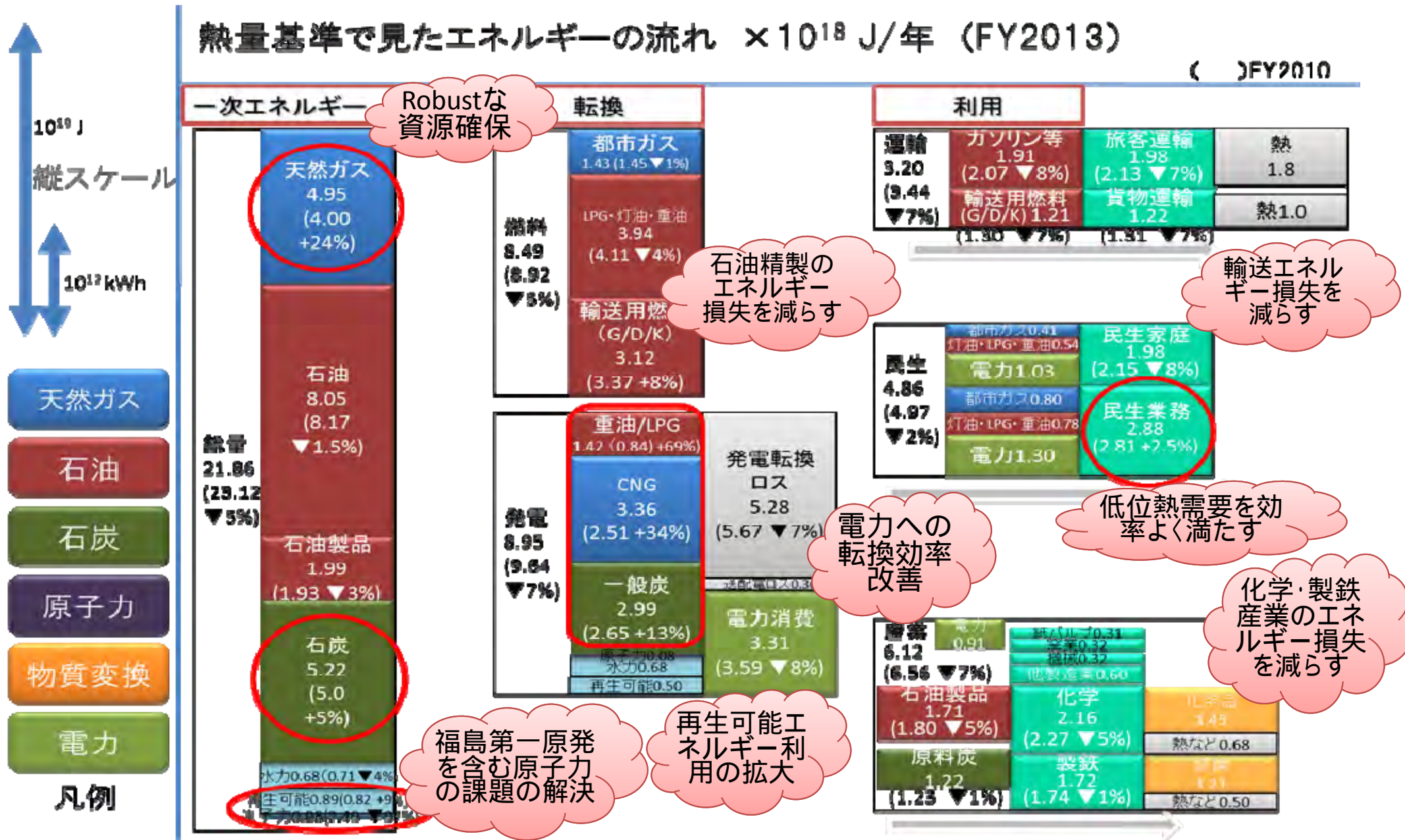
報告書は4月発刊予定

太陽光発電 (太陽電池)

社会動向

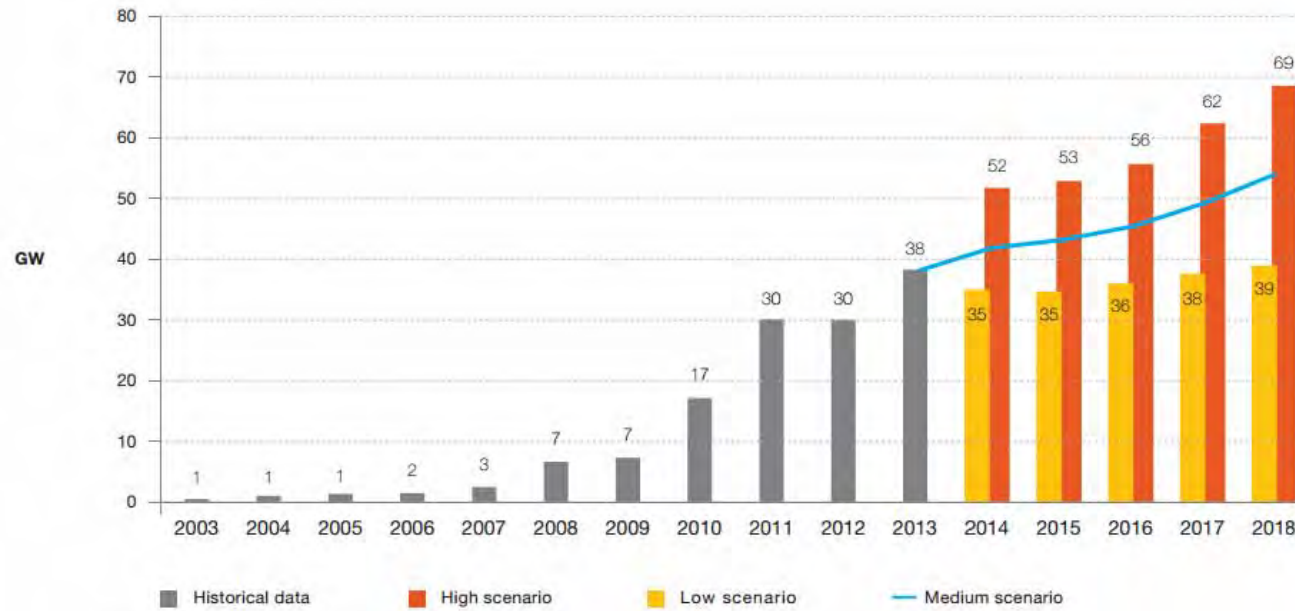
- 世界の太陽光発電の累積導入量は2013年時点で約1億4000万kW(EPIA)。
- 日本では固定価格買取制度(FIT)開始後に新規に認定を受けた太陽光発電設備は、2014年8月末時点で6,943万kW。内、非住宅用が6,636万kWで96%。一方、導入容量は非住宅用は976万kWと、認定容量の14%にすぎない。
- 日本では一次エネルギー源のうち太陽光発電の割合は約1%。2012年からのFIT以降、急拡大傾向。
- 買取発電量および買取金額は、2013年 181億kWh(5,790億円)、2014年度は約290億kWh(約1兆円)に達するとの予想。
- 市場規模は2013年の598.4億USDから、2020年には約2倍増となる1370.2億USDになるとの予測(英Frost & Sullivan社)。日本メーカーのシェアは約5%と見られる。
- 急激な太陽光の設備導入、認定は、買取負担、系統接続容量の不足など、多くの課題が顕在化。FITの見直しの方向性が資源エネルギー庁から示された(2014年12月)。**国民負担増加の抑制、系統連携技術や貯蔵・利用を可能とする技術が求められている。**
- 種々のタイプ・材料による太陽電池が開発されているが、**耐久性や信頼性、変換効率等の優位性から、現状では結晶シリコン系が市場のほとんどを占める**(研究・産業界の動向は次ページ以降)。また、コストでは 2030年に基幹電源並の発電コスト(従来火力発電並の7円/kWh)を目標に掲げる(NEDO)。
- **多様な地域環境への適合**(低照度環境、高温環境、低入射角などでの発電)、建材一体型太陽電池、超軽量太陽電池、**長期信頼性および評価方法の標準化など、広く課題が存在。**
- オフグリッド使用に耐える蓄電・出力平準化機能をもつシステム、太陽熱や風力等の複合発電が可能なシステム、メンテナンスや補修が可能なシステムなど、**システムレベルでの課題も多数。**

[参考資料] エネルギー需給と産業・社会ニーズ

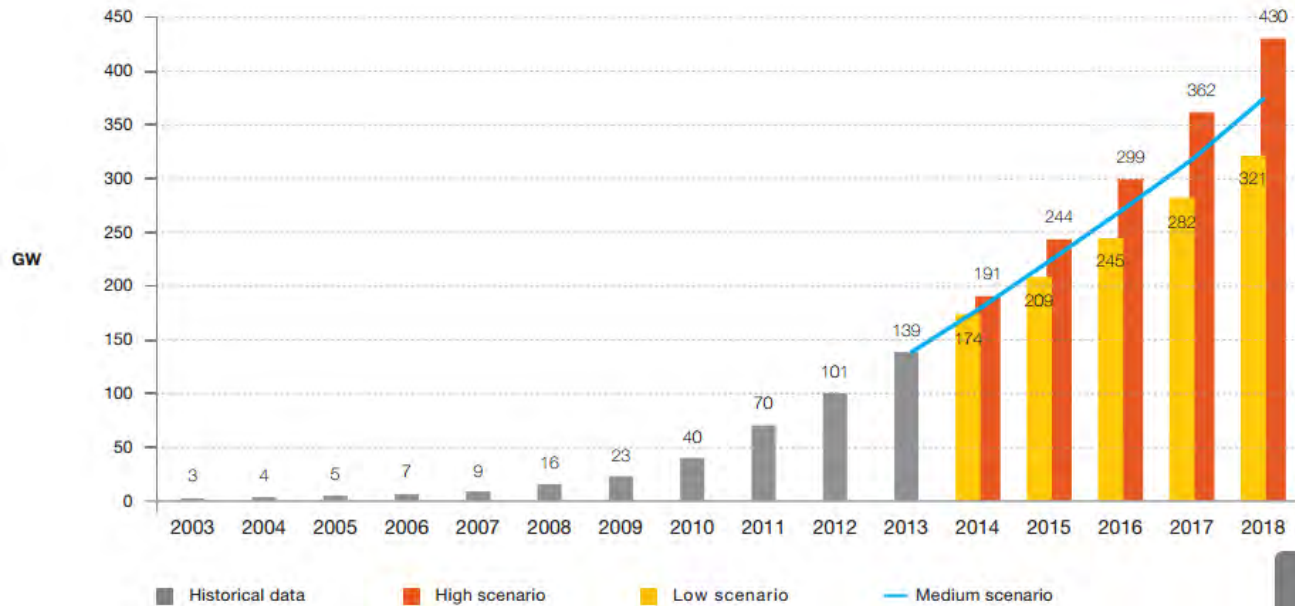


[参考資料] 今後のシナリオ

ソーラー市場



ソーラー 累積導入量

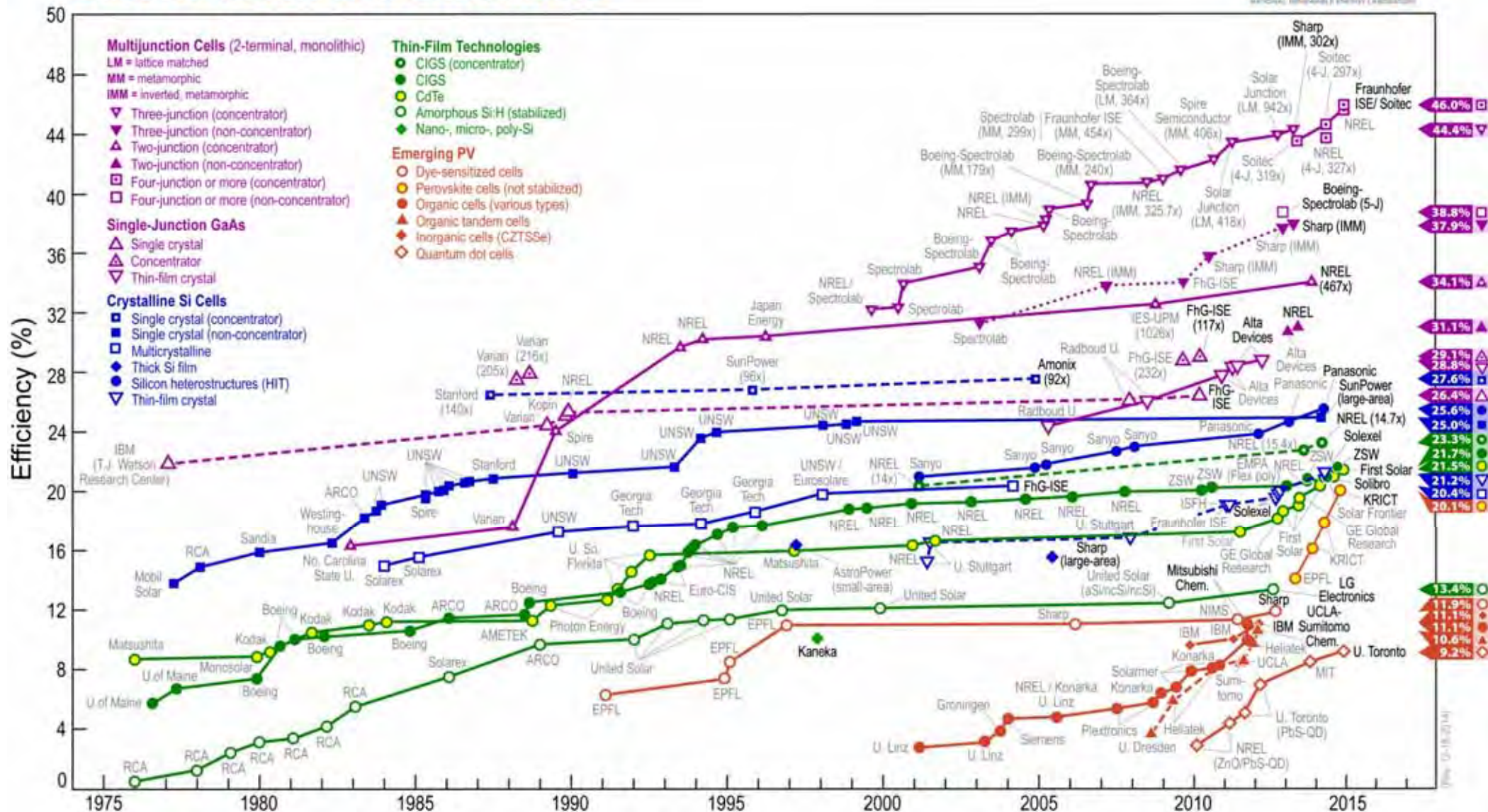


研究開発の現状と注目動向

種別	概要
シリコン系太陽電池(結晶Si、薄膜Si)	単結晶Si太陽電池では、Panasonicが実用サイズ(セル面積143.7cm ²)のセルで変換効率25.6%を達成。また、米国SunPower社も121 cm ² のセルで25.0%を達成。カネカは銅プレーティング技術を利用した6インチのヘテロ接合型太陽電池で23.5%を達成。
化合物半導体系太陽電池(CIGS[Cu(InGa)Se ₂]、CdTe、GaAs集光型、CZTS)	CIGS太陽電池では、ソーラーフロンティア社が年産1GWを有し、小面積セルでも世界最高の20.9%を達成、日本が世界を牽引。CdTe太陽電池では、First Solar社が年産2.7GWと世界を牽引する生産能力を有する。多接合型太陽電池において、シャープは集光時の効率として44.4%の世界最高効率を達成。CIGSの代替を目指してCZTSSeなどのレアメタルフリー材料の開発が活発化。
有機系太陽電池(有機薄膜型、色素増感型)	2012年に三菱化学が11.1%の変換効率を持つ有機薄膜太陽電池を開発し、世界最高を更新。住友化学とカリフォルニア大学により、2種類の光電変換層を組み合わせた「タンデムセル構造」からなる、10.6%の光電変換効率が発表。
ペロブスカイト太陽電池	特に欧州で新たな取組みが進展。Fraunhofer研究所では建材用途に大面積60cmX100cmセルを作製しようとしており、英ベンチャー企業Oxford Photovoltaicsは上市に向けた研究開発をスタート。また米国でもスタンフォード大学はCIGSとのタンデム化で18.6%を達成。現在、既に変換効率20.1%が達成されているが(韓国KRICT、2014年12月時点)。

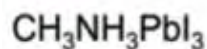
[参考資料] 変換効率の推移

Best Research-Cell Efficiencies



ホットピックス ~ペロブスカイト型太陽電池~

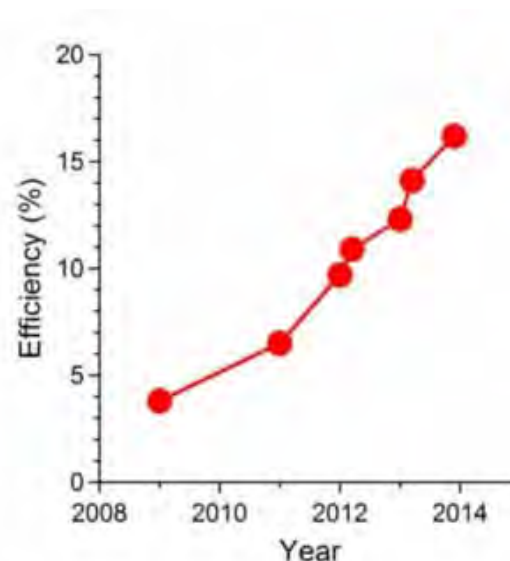
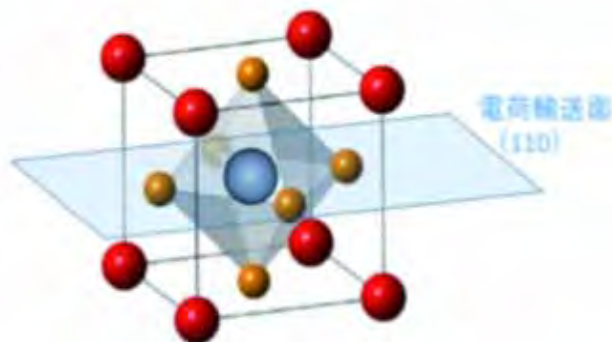
CH₃NH₃PbX₃の組成から成るペロブスカイト型物質は、溶液塗布と乾燥によって容易に薄膜を形成。2009年に宮坂力教授(桐蔭横浜大学教授)が光電変換を報告。その後、世界中で月単位で高効率化の成果が発表された。現在JST-ALCAで支援。2013年Science誌のBreakthrough of the yearに選出。高効率の原資となっているのは強い光吸収(集光)能力と、1Vを超える高い出力電圧。



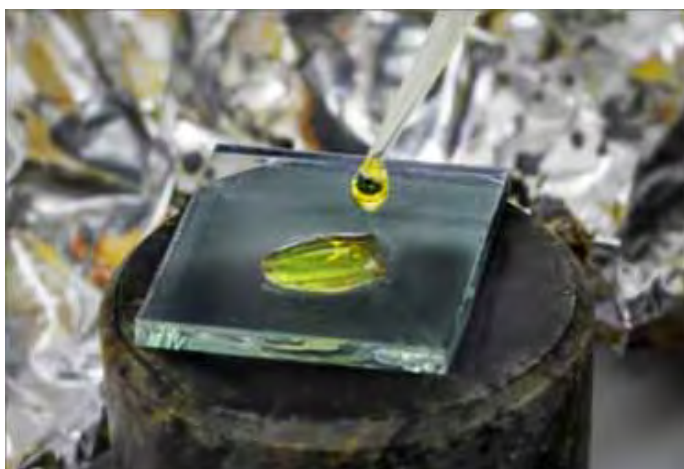
○ X: ハロゲン

● A: CH₃NH₃

● B: Pb



ペロブスカイト型の変換効率収量は、2009年の3.8%からはじまり、4年後に16%、現在20%まで向上



JST戦略的創造研究推進事業における取組み

CREST採択テーマ: ○ さきがけ採択テーマ: ○

固体物理・有機半導体物理 材料科学 接合・界面 デバイス設計 プロセス設計 システム
 半導体物性 結晶学 高分子化学 金属/有機界面 デバイス構造 プロセス技術 デバイス・製品

結晶シリコン

点欠陥・表面欠陥の削減 表面・界面ハッシュション技術 高効率化 基板低コスト化 Si薄膜化 超長寿命化

化合物系 (CIGS等)

光マネジメントの最適化 新規材料開発 格子不整合 多接合 コスト低減 タンデム化 集光型

a-Si薄膜系

光劣化機構解明 高品質光吸収材料 界面制御技術 高品質透明導電膜 セル構造の最適化

新型・構造 (量子ドット等)

量子ドット プラズモニクス 輸送機構解明 中間バンド型材料 デバイス設計 (量子ドット・超格子) セル構造の開発・実証
 量子切断 マルチエキシトン生成 励起子吸収

有機薄膜

伝導メカニズム 励起子 電荷移動 劣化機構解明 接合形成技術 (ヘテロ接合) 耐久性向上 有機無機ハイブリッド化
 結晶/無定形 n型分子 pn活性層・接合

色素増感

劣化機構解明 新色素材料 新電解質材料 界面制御 耐久性向上 モジュール製造技術
 正孔輸送材 電解質の固体化 光捕集系の広帯域化 再結合・逆反応の制御

水素生成 人工光合成

光補集 錯体分子 光触媒/助触媒界面 水素生産システム パイロットプラント試作?
 電荷分離・電荷移動

無機

有機

サイエンス ← デバイス物理 材料科学 → テクノロジー

革新的エネルギー研究開発拠点形成事業における取組み

1. Si太陽電池の変換効率の飛躍的向上を目指す革新技術開発

- ✓ ナノワイヤーSi太陽電池とヘテロ接合Si太陽電池のタンデム化で**変換効率目標 ~ 30%**
- ✓ 超薄型ワイヤー型Si太陽電池で開放電圧の大幅アップ
(**目標: 0.75 0.80 V 従来型Si太陽電池の開放電圧: 0.6 0.7V**)

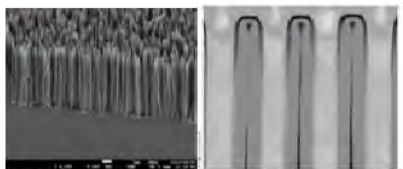
2. 量子効果の現れるナノワイヤー(ウォール)は未踏領域

- ✓ バルク結晶の超高品質化(目標: 既存法(CZ法)同等以上のキャリアライフタイム10ms以上)
- ✓ ナノワイヤー(ウォール)の形成プロセス確立・物性評価(新物性の出現)
- ✓ ナノワイヤーデバイス技術開発と超高効率の実証(従来の概念を覆すブレイクスルー)

文部科学省と経済産業省が連携し、産総研の福島再生可能エネルギー研究所内に、革新的太陽電池の研究開発拠点を整備。

ナノワイヤー型シリコン太陽電池

ワイヤー型シリコンの形成



ナノワイヤー
従来技術では難しいナノワイヤーの試作に成功

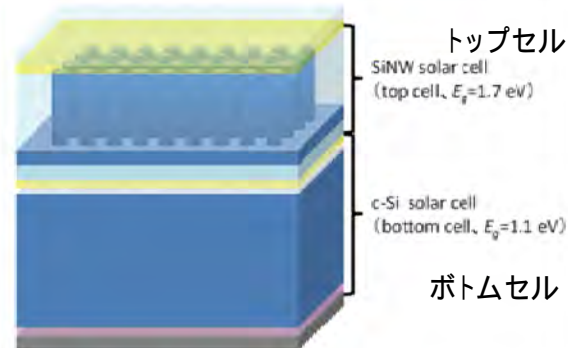
ナノウォール
1.5ナノメートル幅のシリコンナノウォールの作成に成功

角型シリコンインゴットの成長



超高品質角型単結晶Si
高品質かつロスが少ないシリコン単結晶の作成に世界で初めて成功

タンデム太陽電池の製造



変換効率30%を目指すナノワイヤーSi太陽電池と単結晶Si太陽電池のタンデム太陽電池

【トップセルの成果】

太陽電池基板表面上へのナノワイヤー(ウォール)形成技術を開発

ワイヤー(ウォール状)を細くするほど太陽電池の効率が向上する。**幅1.5ナノメートルの構造作成に世界で初めて成功。**



作成に成功した1.5ナノメートル幅のシリコンナノウォール
電子顕微鏡写真

【ボトムセルの成果】

高品質シリコン結晶成長法の開発

革新的な手法により、ボトムセルに活用しやすい形状で、**高品質かつロスが少ないシリコン単結晶の作成に世界で初めて成功。**








作成に成功した
大口径、四角形のシリコン結晶の塊

課題と今後必要となる取組み

種別	概要
シリコン系太陽電池(結晶Si、薄膜Si)	さらなる変換効率の向上とコスト低減のために、集光型太陽光発電関連技術に対する取組みが必要。また、アモルファスシリコン太陽電池では、高品質光吸収材料の開発とともに、界面制御技術開発、光劣化機構の解明が課題。
化合物半導体系太陽電池(CIGS[Cu(InGa)Se ₂]、CdTe、GaAs集光型、CZTS)	さらなる変換効率の向上とコスト低減のために、集光型太陽光発電関連技術に対する取組みが必要。特にIII-V族多接合型太陽電池については、国際的に熾烈な競争。例えば、張り合わせ技術(メカニカルスタック)による多接合化などの新技術の開発促進が重要。
有機系太陽電池(有機薄膜型、色素増感型)	現時点で光電変換効率がシリコン系の半分程度であり、さらなる向上には、新規導電性ポリマーを用いた高効率有機太陽電池の研究や三重項色素を用いた革新的有機太陽電池の研究が必要。
ペロブスカイト太陽電池	より一層の高効率化を目指した新材料開発(新規ペロブスカイト化合物やホール輸送材)と発電機構の解明、高耐久化を目指した劣化機構の解明、低毒性化を目標とした非鉛系ペロブスカイト化合物の開発が重要。
超高効率太陽電池(量子ドット、ナノワイヤ)	量子ドットナノワイヤーを利用したもの、異なるバンドギャップを有する量子ナノ円盤構造を利用したものなどが提案されている。ここでは量子ドット、プラズモニクスの輸送機構解明が期待。

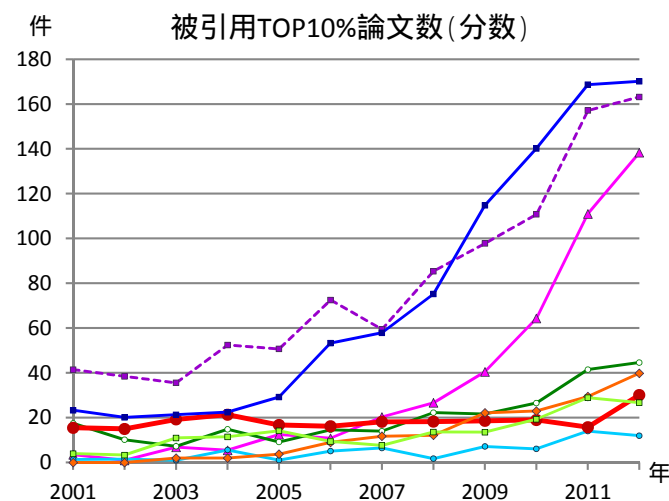
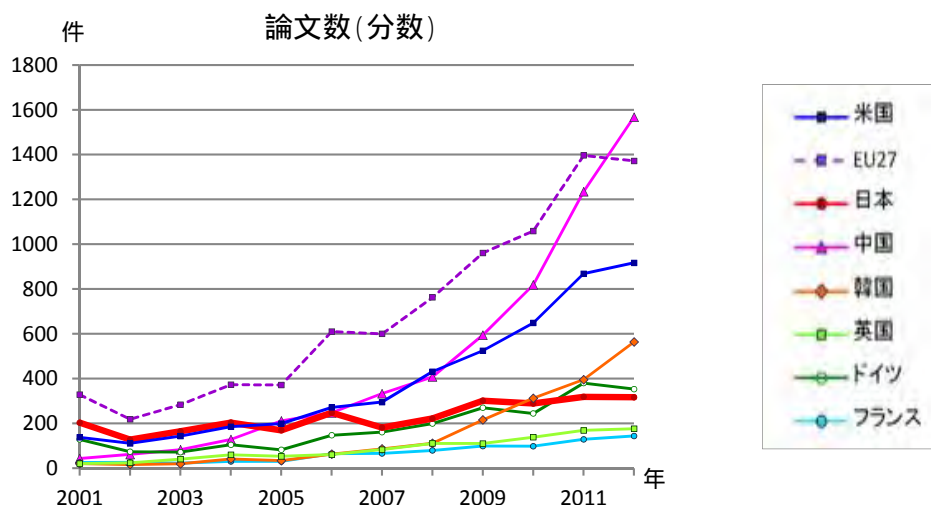
研究開発動向の国際比較

国	概要
	基礎研究においては、無機系、有機系太陽電池ともに、これまで個別の研究機関や企業の努力で高い研究水準を保つが、欧米の急速な追い上げがある。ペロブスカイト太陽電池は、日本発の革新的太陽電池にも関わらず、研究開発においては世界の後塵を拝す。応用研究・開発においては、結晶Si系の技術開発は世界トップレベルにあるが、ペロブスカイト系では欧米では既にベンチャー企業が創設され始めているのに対し、日本ではまだ基礎研究段階。
	結晶Si系の基礎研究は、研究人口は多くはないものの、MITやNRELなどに於いて高い水準の研究を実施。ペロブスカイト系に関しては多くの大学で研究があり、プリンストン大学、UCバークレー校などが先頭。応用研究ではSunPower社が裏面接合型の高効率結晶Si太陽電池で最高効率を達成。化合物系太陽電池では、多数のベンチャー企業が参入。
	結晶Si系の要素技術の基礎研究は非常に高い水準を維持。CIGS、CZTSともに、効率自体は日米に及ばないものの、基礎物性からデバイス評価まで、学術的な研究にしっかり。有機系太陽電池においては、色素増感型、有機薄膜型ともに非常に研究が盛ん。ペロブスカイト系では、オクスフォード大学、EPFL(グレッツェル研)が世界の中心。
	太陽電池の産業化では世界トップを走っているものの、基礎研究、応用研究では日米欧に遅れ。現在、国家計画の下で、公的研究機関や大学が基礎研究に注力、研究水準は上昇傾向。有機系太陽電池においては、多くのベンチャー企業が創立され、企業化まであと一歩。
	政府は半導体と液晶分野に続く産業として、太陽電池産業を育成しようとしており、研究開発を手厚く支援。半導体で実績のあるSamsungグループやLGグループが太陽電池研究開発に参入し、技術水準は確実に上昇傾向。特にペロブスカイト系では、KRICTが世界最高変換効率20.1%を達成するなど(2014年12月時点)、世界最高レベル。

[参考資料] 論文、特許及び市場に関する動向

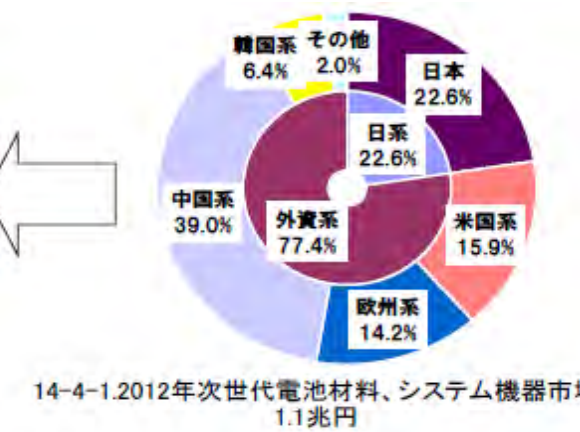
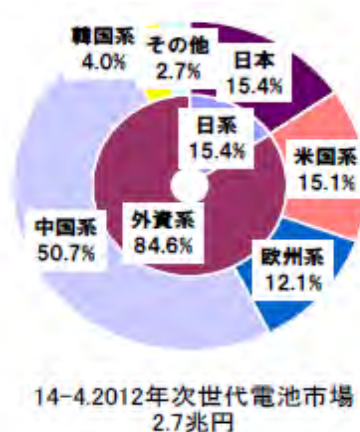
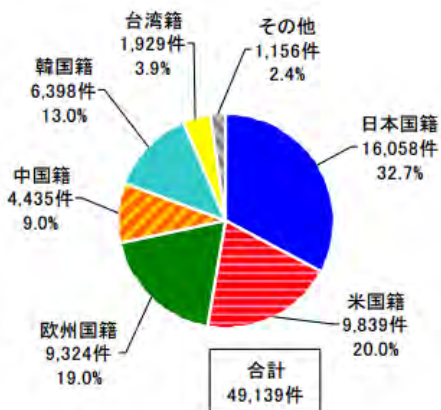
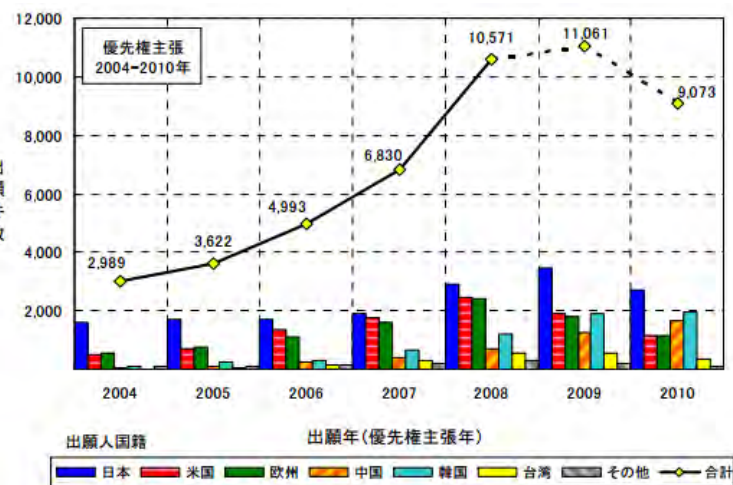
1. [太陽電池] 国別論文数 (分数換算)

エルゼビア社Scopusを基にJST/CRDSが作成



2. [太陽電池] 出願人国籍別出願公開件数推移と比率 (パテントファミリー単位) トレンド↑、欧米↓、中韓↑

3. [次世代電池 (太陽電池、燃料電池)] 市場 約9割が太陽電池関係



【出展】特許庁「特許出願技術動向調査報告」
使用DB: Derwent World Patents Index (WPI)

【出展】経済産業省、富士キメラ総研
「我が国企業の国際競争ポジションの定量的調査」平成26年3月