

第3回太陽光発電研究センター 成果報告会

平成19年7月17・18日



独立行政法人
産業技術総合研究所

第3回太陽光発電研究センター成果報告会

日時 : 平成19年 7月17日(火)、18日(水)

場所 : 日本科学未来館 7階

7月17日(火) 開場 11:00

13:00~15:00 座長 作田 宏一、齊藤 和裕

開会の辞 副研究センター長 仁木 栄

来賓挨拶 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

新エネルギー技術開発部 部長 福田 秀樹

センター全体の概要と戦略について センター長 近藤 道雄

評価・システムチームの概要 チーム長 菱川 善博 1

シリコン新材料チームの概要 チーム長 藤原 裕之 7

15:00~15:20 コーヒーブレイク

15:20~16:00 座長 仁木 栄、菱川善博

結晶シリコンチームの概要 チーム長 坂田 功 17

産業化戦略チームの概要 チーム長 増田 淳 29

16:00~17:00 座長 近藤 道雄、増田 淳

特別講演

「科学的発見・発明とイノベーション 半導体基礎研究・開発の現場から」

産業技術総合研究所 次世代半導体研究センター

センター長 廣瀬 全孝125

17:30~ 意見交換会 (日本科学未来館7階 レストラン バサラ)

7月18日(水) 開場 9:00

10:00~11:00 座長 坂田 功、増田 淳

化合物薄膜チームの概要 チーム長 仁木 栄 41

有機薄膜チームの概要 チーム長 齊藤 和裕 53

11:00~12:00 座長 近藤 道雄、藤原 裕之

特別講演

「国創りに結実する科学技術イノベーション創出能力強化に向けて」

～環境と経済の両立に貢献する再生可能エネルギーへの期待～

前 総合科学技術会議議員 柘植 綾夫135

12:00~14:30 ポスターセッション (詳細は次ページを参照)

14:30~15:00 コーヒーブレイク

15:00~16:40 座長 近藤 道雄、藤原 裕之

招待講演

色素増感太陽電池の現状と将来展望

産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門

太陽光エネルギー変換グループ 研究グループ長 杉原 秀樹119

特別講演

「日本が太陽光発電で世界一を維持するにはどうすべきか」

株式会社資源総合システム 代表取締役社長 一木 修147

ポスターセッション

*会場 18日(水) 会議室1

	発表者	題目
結晶シリコンチーム	坂田 功	内部光電子放出法による太陽電池用ヘテロ接合評価
	川浪仁志	GaPNの窒素組成制御
	高遠秀尚	結晶シリコン太陽電池試作プロセスの現状
シリコン新材料チーム	藤原裕之	a-Si:H/c-Siヘテロ接合型太陽電池の界面構造と太陽電池特性
	松井卓矢	微結晶Si _{1-x} Ge _x 太陽電池の開発
	鯉田 崇	低赤外吸収・高移動度透明導電膜の開発
	布村正太	製膜用プラズマプロセスの診断
	永井武彦	キャビティリングダウン分光法を用いたラジカル計測
	Arno Smets	High rate deposition of μ c-Si:H using the MHC-VHF deposition technique
	産業化戦略チーム	豊田 浩孝(名大)
劉 正新		シーディング技術の最適化による球状シリコン生産性の向上及び球状シリコン太陽電池の高性能化
山口充孝		プラズマエッチングによる シリコンスライス技術の開発
勝間勝彦(日本合成化学)		基板・テクスチャー一体プラスチック基板薄膜シリコン太陽電池

*会場 18日(水) 会議室3

	発表者	題目
化合物薄膜チーム	櫻井啓一郎	裏面電極に透明伝導膜を用いたCIGS太陽電池 ～両面受光型や多接合型の要素技術として～
	石塚尚吾	CIGS系太陽電池の省資源化製法技術
	反保衆志	ZnMgOの電気特性及び光学特性
有機薄膜チーム	齊藤和裕	有機薄膜太陽電池の製造技術に関する研究
	當摩哲也	低分子系有機薄膜太陽電池の高光開放電圧の発現
	山成敏広	新規フラーレン誘導体の導入による高分子系有機薄膜太陽電池の高性能化
	阪井 淳(松下電工)	ペンタセン-C60超格子バルクヘテロ接合有機薄膜太陽電池
	Zhong-Sheng Wang	クマリン色素を用いた高性能有機色素太陽電池
	原 浩二郎	ナノ・ヘテロ界面構造の制御による有機色素太陽電池の高効率化
評価・システムチーム	高島 工	PVシステムの故障診断技術
	大谷謙仁	発電量評価技術
	猪狩真一	基準太陽電池セル・モジュール校正技術
	大関 崇	太陽光発電フィールドテスト事業を用いた太陽光発電システム特性分析評価
太陽光発電 研究センター	作田宏一	国際共同研究と国際協力
化学物質リスク 管理研究センター	荒川 千夏子	火力発電の代替としての太陽光発電導入の費用便益分析

※ チームによってポスター会場が異なります。
ポスターは17日もご覧になれます(全ポスター 会議室3)。
ポスターセッションは18日のみ行います。

センターの概要と戦略

太陽光発電研究センターの概要と戦略

センター長 近藤 道雄

1. はじめに

(独)産業技術総合研究所、太陽光発電研究センターは本年度で早くも発足来4年目となりました。昨年より当センターでは結晶シリコン、シリコン新材料、化合物薄膜、有機薄膜、評価・システム、産業化戦略という6チーム体制で、常勤研究職員30名に加え、非常勤職員等併せて総勢100名を超えるスタッフが太陽光発電に対して材料からシステムにいたるまでのトータルソリューションを目指して取り組んできています。規模の点ではまだまだ及びませんが、アメリカ NREL、ドイツ フランホーファー研究所などと比肩しうる組織を目指しています。

当センターの成果報告会は昨年度に続いて今年で3回目となります。昨年同様今年も300名を超える方の参加登録をいただきました。これは昨今の太陽光発電への関心の高さの表れを反映していると思えますが、その関心を一時のブームで終わらせないよう、私共が世界の太陽光発電の技術開発あるいは普及に貢献できるよう努力してまいりたいと考えます。



2. センターの研究戦略

当センターのミッションはポリシースタートメントという形で公表しております。そのなかで当センターの研究は以下の4つを柱として進めてまいります。

- (1) 新規太陽電池材料およびデバイスの開発、評価
- (2) 太陽電池の標準化と評価技術の開発
- (3) 太陽光発電システム運用、評価技術の開発
- (4) 太陽光発電を通じた国際協力

最初に述べたように当センターはトータルソリューションを特徴としており、その強みを生かしながら国の研究機関として太陽光発電全体のグランドデザイン構築に貢献して行こうと考えています。産総研は1970年代半ばのサンシャインプロジェクト発足時から行政と一体で太陽光発電の技術開発と普及促進を進めてきた伝統を有しており、いわば歴史の生き証人として今後も太陽光発電の発展を見守っていききたいと考えています。

上で述べた4つの柱のうち、太陽光発電の最大の課題である発電コストを低減するための材料、デバイス、プロセスを開発することが第一であり、もちろんその他のテーマも同時に平行して進めていかなくてはなりません。これなくして太陽光発電のエネルギーとしての将来はありません。そのためには可能性のあるすべての材料を満遍なくカバーしておく必要があります。現

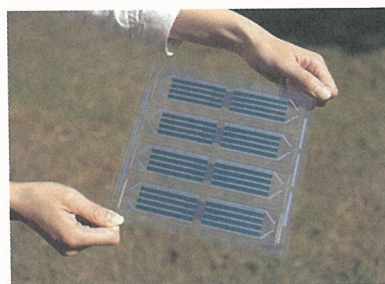
在は 4 つの材料、結晶シリコン、薄膜シリコン、化合物薄膜、有機・色素について研究を行っています。次世代に向けた新しい概念に基づいた太陽電池の開発についても着手しています。今はまだどの材料にも実用化までの距離感の差こそあれ、可能性はあると考えており、どれかに特化できる状況にはありませんが、夫々の材料についての課題は明確化しています。良く総花的という批判のされ方をしますが、可能性のあるものをすべて網羅しておくことは国の機関としてはリスク分散という意味でも必要な戦略であると考えており、むしろ積極的に全体を網羅しようと考えています。

結晶シリコンについては資源制約とコスト低減のために厚さ 100 ミクロン以下の薄型化と 20%を超えるさらなる高効率化のためのデバイス技術の開発が重要です。また薄型ウエーハを製作するスライス技術、様々なシリコン原料やウエーハの評価技術、スライスレスな球状シリコン太陽電池の開発などもあわせて行っています。どこまでワット当たりの原料使用量を節約できるかが鍵と考えます。現在は多結晶シリコンが主流ですが、今後薄型化と共に高効率単結晶の重要性が増してくる可能性もあると考えています。

薄膜シリコンは資源制約を受けず材料コストが占める割合が低いという理由から化合物薄膜と共に最近注目が高まってきています。特に薄膜シリコンは液晶ディスプレイの薄膜トランジスタの技術と共通点が多いので、液晶パネルメーカーなどが参入しやすいという利点があり、今多くのアジア企業が生産に着手しようとしています。課題は性能が結晶シリコンと比べて低いという問題と、高生産性と高効率を両立させる技術開発です。日本としてはこれらの技術的優位性を堅持し続けることが必要だと考えます。数値目標としてはセルレベルで当面 16%、中期的には 18%を考えています。当センターでは微結晶シリコンの高速高品質化技術で世界をリードしてきましたが、さらなる高効率を目指して微結晶シリコンゲルマニウムを用いたトリプルタンデム構造を先駆けて開発しています。また、薄膜太陽電池では透明導電膜が電流収集に用いられますが、そこでの光吸収損失や抵抗によるジュール損失などを低減するための高移動度透明導電膜の開発も行っています。

化合物薄膜は Cu-In-Ga-Se を主成分とするカルコパイライト型半導体から成っており、非シリコンということで注目されていますが、多結晶でも 20%を超える効率が期待されている材料です。当センターでは、特に太陽光とマッチングの良い $1.3\sim 1.5\text{eV}$ のバンドギャップを有する材料の開発に重きをおいています。高効率が期待できる蒸着法において水蒸気導入、ラジカルセレンによる原料利用効率の向上などの新しい技術を開発しています。これらのオリジナルな技術は実用化を目指して大面積化、モジュール化にも取り組んでいます。

有機・色素系太陽電池はポストシリコンの候補として注目されています。材料が自然にあるもので無く人工的に任意に合成できるという点が無限の可能性を期待させますが、現状では効率も低く、耐久性も劣るので実用化にはまだ時

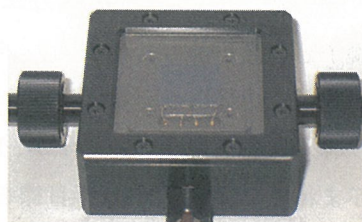


有機薄膜太陽電池サブモジュール (トッキとの共同開発)

間がかかる長期的テーマです。しかし、最近では発電メカニズムが少しずつ明らかになると共に、有機半導体ではアモルファスシリコンを超える移動度を有する材料も出現するようになったので、今後が大変楽しみな分野であると考えています。当センターではその動作原理にまでさかのぼった基礎研究からモジュール試作まで幅広いは煮で取り組んでいます。将来、従来の半導体接合という概念を覆す新しい原理の有機太陽電池の出現も期待されます。

色素増感太陽電池は 1990 年ごろから急に注目を浴びだした新しいタイプの太陽電池で、非真空で太陽電池が作製できるので低コストでかつ色素を用いるので意匠性に優れた太陽電池として注目されています。産総研では現在エネルギー技術部門と当センターで分担して開発を行っていますが、当センターでは Ru を使わない有機色素を用いた太陽電池の開発に特徴があります。

ここまで材料開発を中心に紹介させていただきましたが、材料・デバイス技術だけでは太陽光発電は完成しません。それらはシステムの中に組み込まれて初めて有用なエネルギー源となります。そのためにはシステムとしての効率や寿命、信頼性の評価とそれらを高めるための技術開発、太陽光発電のコスト価値の評価などが重要です。太陽電池は屋外で発電した電力量が重要ですのでその正確な評価は技術的にも経済的にも大変重要な意味を持っています。しかし、屋外では刻々と変わる天候の下で動作するのでその正確な評価はとても難しい技術です。日本ではそのため非常に忠実度の高い人工太陽光を開発し屋内で様々な測定が出来る技術を開発してきました。同時に屋外測定データから標準条件での性能を求める補正技術についても研究しています。これらの成果は国内外の工業規格に反映させるよう活動しています。また、太陽電池を出荷するに当たり、その性能を規定するための基準セルの開発、維持、供給についても産業界からの要請に応え、世界で 4 つの **Qualified Lab.**として一次基準セルを維持する責務を負っています。産総研ではこのように技術開発だけでなく、中立的立場からの評価、標準についても力を入れています。



一次基準セル。太陽電池の原器。

太陽電池は屋外で 20 年にわたって動作し続けなければなりません。しかもその動作環境は多様で且つ過酷なものです。

その間に様々なところが故障したり劣化したりすることは当然予想されます。太陽光発電の発電コストやエネルギー価値は寿命と共に改善されます。屋外で 30 年以上の寿命を持つ太陽電池の開発、その評価法、故障を簡便にかつ迅速に見つけ出す診断技術の重要性は普及拡大と共にこれからますます重要になると考えています。

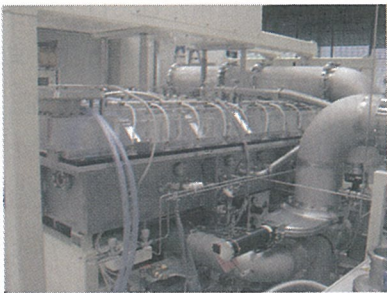


産総研に設置されたモジュール屋外試験サイト

現在在日本では設置形態の大半が住宅の屋根に搭載されたものです。今後ドイツのように 1 MW を超える大規模なメガソーラが増加すると予想されます。産総研でも 1 MW のシステムを導入し、その有用性を実証すると共に、様々な故障事例の解析、屋外出力の異なるモジュール間での比較を行っています。また産総研外にあるメガソーラについても運転デー

タを解析し今後の普及に役立てようと取り組んでいます。大型化するシステムは生き物のようにとらえどころが無くなってきます。ヒトの健康のように定期的な健康診断と病気の早期発見、そのための手段の開発にも取り組んでいます。

最近では企業の社会的責任が強く求められるようになってきました。太陽電池そのものはクリーンで環境汚染をもたらしません。このエネルギーをたとえば火力発電と組み合わせることで、火力発電からの二酸化炭素排出を抑制することが出来ます。また、電力需要の増大に伴う新たな発電所の建設を抑制することが出来ます。これは太陽光発電の電力価値を計る上で大変重要な因子です。このような太陽光発電による環境リスク低減価値を経済的に試算するという試みにも産総研内で化学リスク管理センターと共同で取り組んでいます。



2x1m² 薄膜シリコン大面積プラズマ CVD 装置 (名古屋大学との共同研究)

当センターでは基礎的な技術開発が主たるテーマですが、それをいち早く企業に移転することが国際競争力を維持するという観点からも重要です。挑戦的な基礎技術の開発と迅速な産業化がこれからの日本に求められる基本的な戦略という認識の下、当センターでは企業ニーズを的確に捉えセンター内の技術シーズを合致させるように先導していく産業化戦略チームを設置しています。これは太陽光発電関連産業の裾野を広げ、新たな企業参入を喚起し、より骨太な太陽光発電産業群を国内に形成することに資するものと考えています。

太陽光発電はまだ脆弱なエネルギーであります。その膨大な潜在量に比すると現在は眠れる獅子といえるかもしれません。今太陽光発電にとって最も重要なことはその導入量をエネルギー源の中で認知される量にまで一日も早く高めることだと考えます。国は 2010 年に 4.82GW という導入目標を掲げていますが、その達成はシリコンの原料不足と製品の海外市場への流出から危ぶまれています。2010 年目標を達成し、さらに導入量を全電力の 1% に相当する 10GW を超え、2030 年目標である 100GW に近づくために、当センターが果たすべき役割は、技術開発はもちろんのこと、政策提言、産業基盤の強化、国民への啓蒙活動、高度人材育成、国際協力にいたるまで太陽光発電のすべてを網羅することで、太陽光発電発展のハブ機能を持つことであると考えております。有能な国際人材の活用により、国際的な互惠関係を強化していくことが地球規模での太陽光発電の発展を支えるための要件でありましょう。

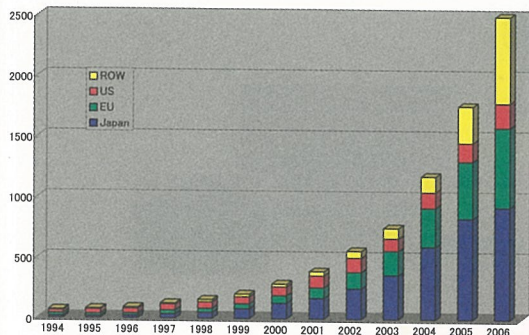
3. 終わりに

最後に、当センターの活動に対し日頃御支援頂いている経済産業省、NEDO および国内外の大学、研究所、民間企業等関係各位に厚く御礼申し上げますと共に、一層の御指導、御鞭撻を賜りますよう心からお願い申し上げます次第です。

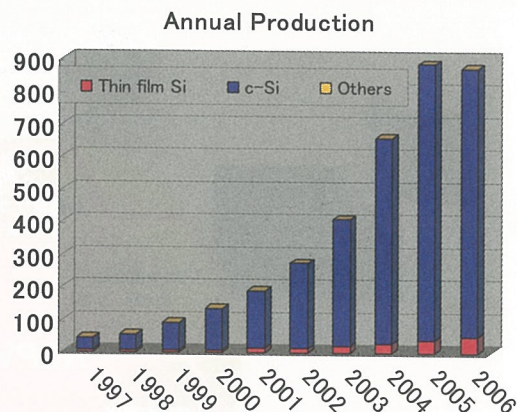
センターの概要と戦略

平成19年7月17日
センター長

近藤 道雄



(資源総合システム社資料より)

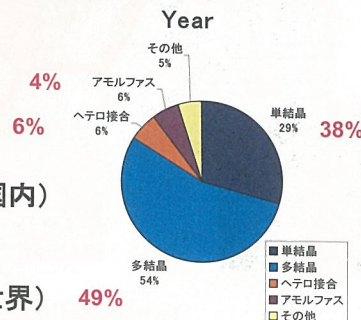


国内生産 2006 減少
国内導入

4.82 GW ?

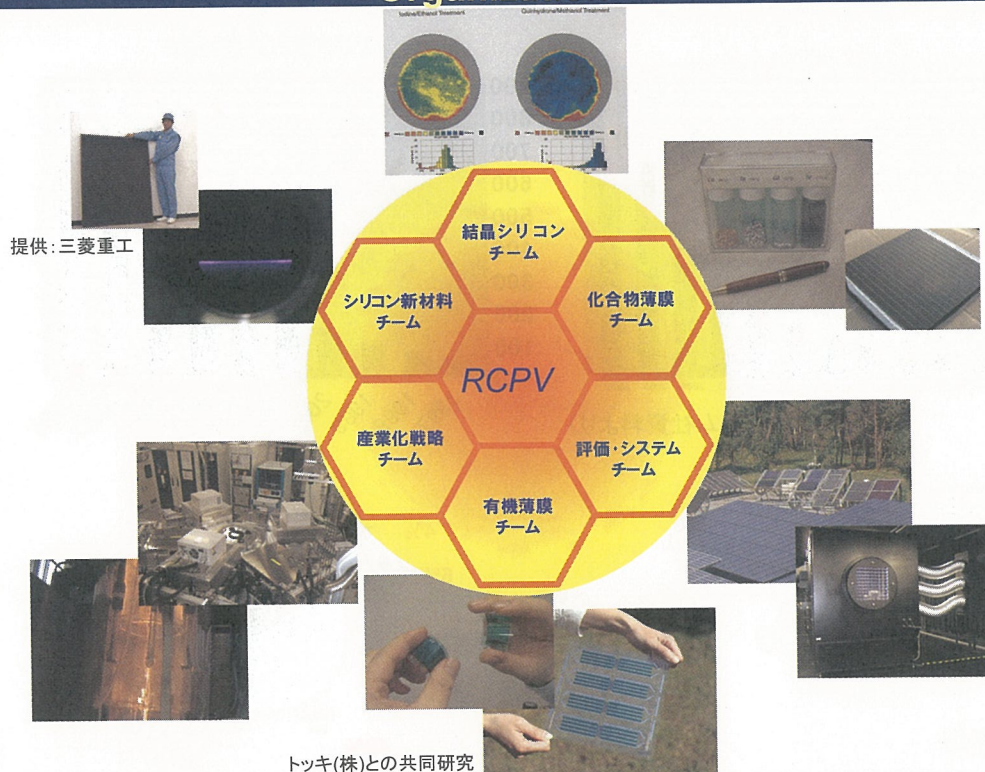
薄膜シリコン '05→'06 4.5% → 6.1% (国内)

単結晶Si 34% → 44% (世界) 49%



- (1) 新規太陽電池材料およびデバイスの開発、評価
 - コスト低減、環境負荷低減
- (2) 太陽電池の標準化と評価技術の開発
 - 産業基盤の確立 (国際競争力の強化)
- (3) 太陽光発電システム運用、評価技術の開発
 - エネルギー源としての基盤強化
- (4) 太陽光発電を通じた国際協力
 - 国際貢献とマーケット戦略

技術統合のためのプラットフォームを利用した迅速な産業化移転
 中立的立場での評価、政策策定への貢献



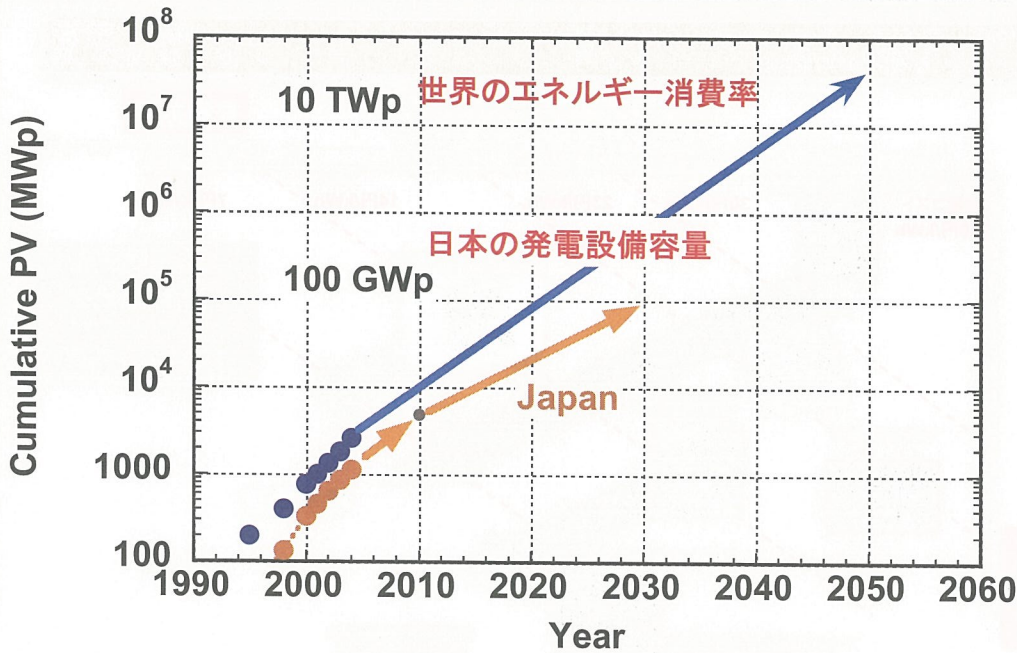
予算ソース 運営費交付金、産総研委託費、競争的外部資金、民間受託 など

(単位 百万円)	平成17年度	平成18年度
運営費交付金 (インセンティブ)	309 (136)	358 (133)
外部資金 (純粋民間資金)	1279 (14)	1352 (111)
総額	1588	1710

運営費交付金
依存率 < 15%

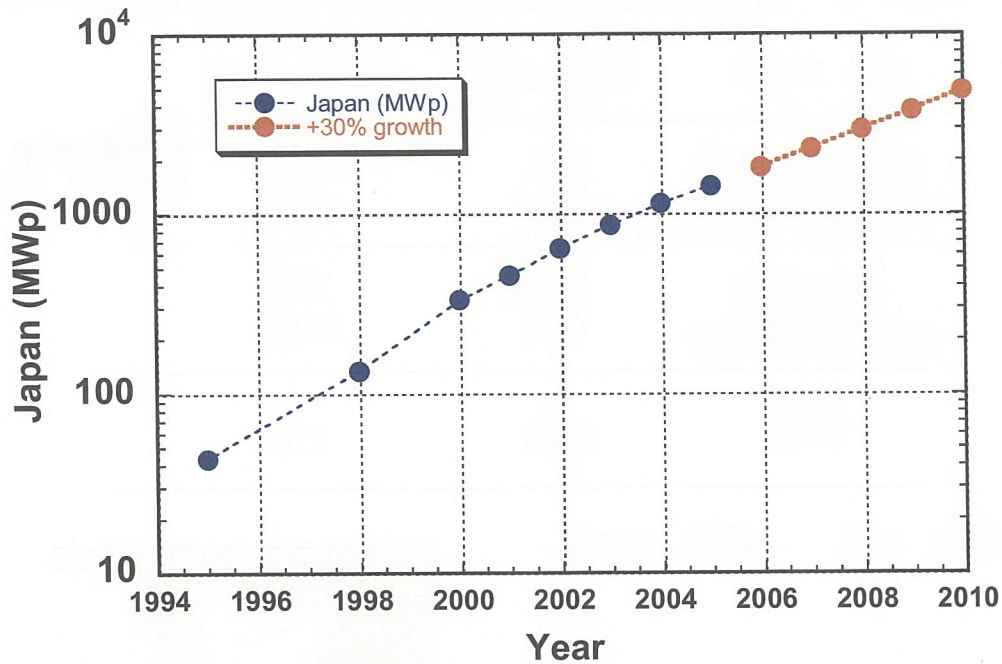
職員数 30名 総数 121名

参考:Fh ISE 52 億円 500名
Basic Funding 16%
Project 38 %
Industry 37%



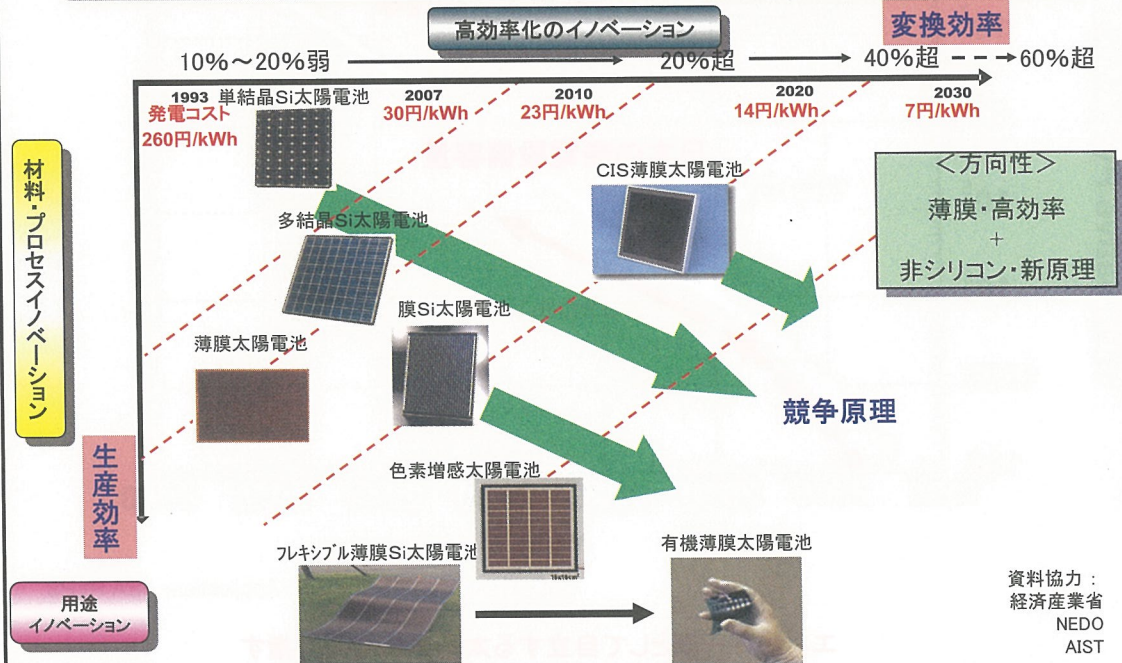
出典: Trends in Photovoltaic Applications, IEA PVPS

エネルギー源として自立する太陽光発電を目指す

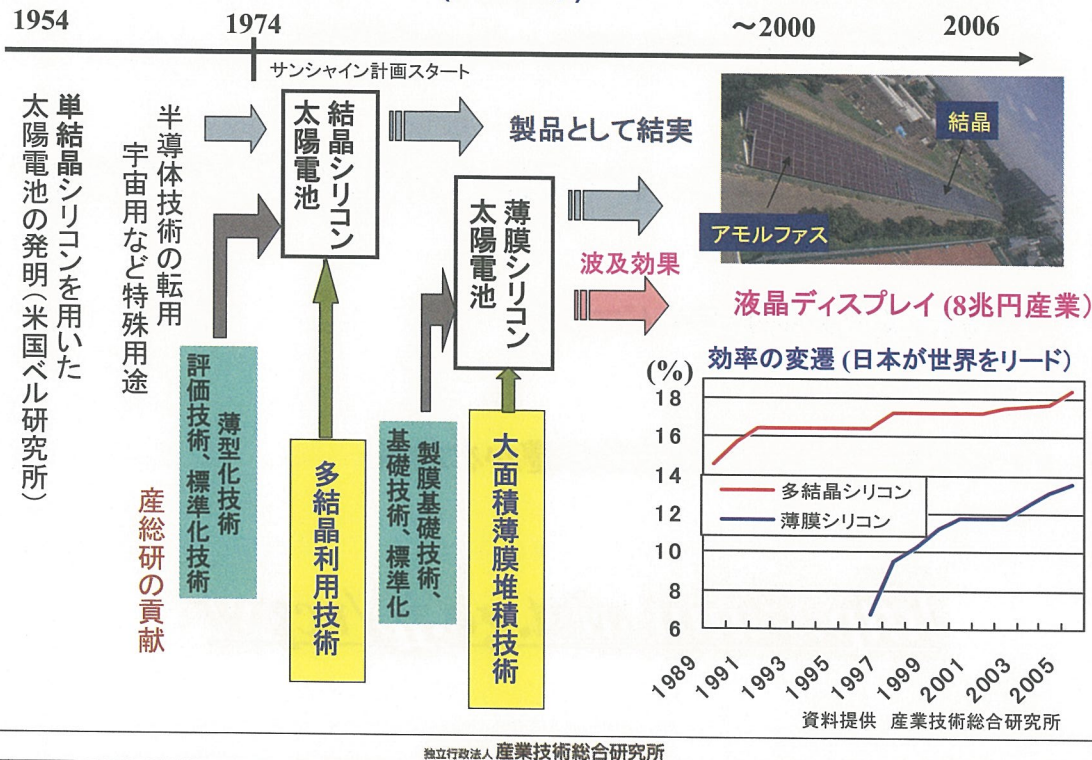
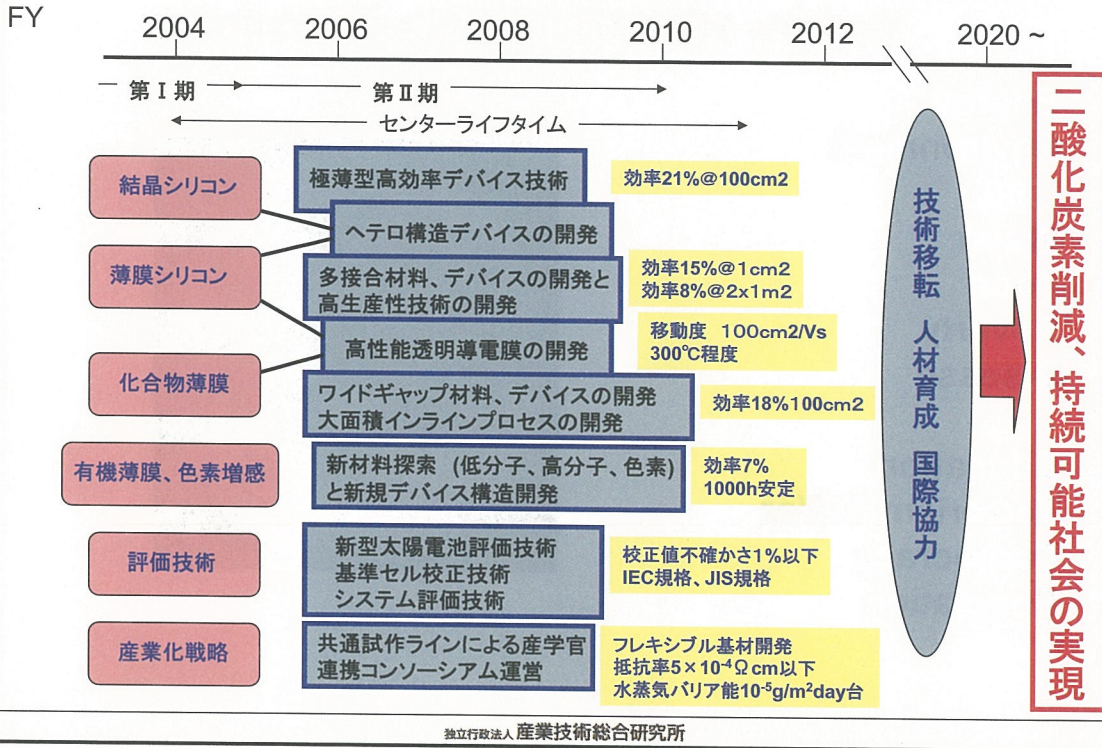


年+30%の伸びで目標達成、生産量 OK

継続的なイノベーションによって日本が太陽光発電技術をリードする



資料協力：
経済産業省
NEDO
AIST



How does the solar PV solve**Human's 10 Problems in the 21st century**

Energy
Environment

Water
Food
Poverty
Disease

Education
Terrorism & War
Democracy
Population



1. 太陽光発電のトータルソリューションを提供
2. 太陽光発電のエネルギー源としての自立に資する研究開発
3. 個別課題の開発ロードマップ
4. イノベーションで拓く未来の豊かな地球

<http://unit.aist.go.jp/rcpv/>

チームの概要

評価・システムチーム概要

菱川 善博

研究の目的

2030年PV導入102GWの目標達成に不可欠な性能・信頼性評価技術を確立する。

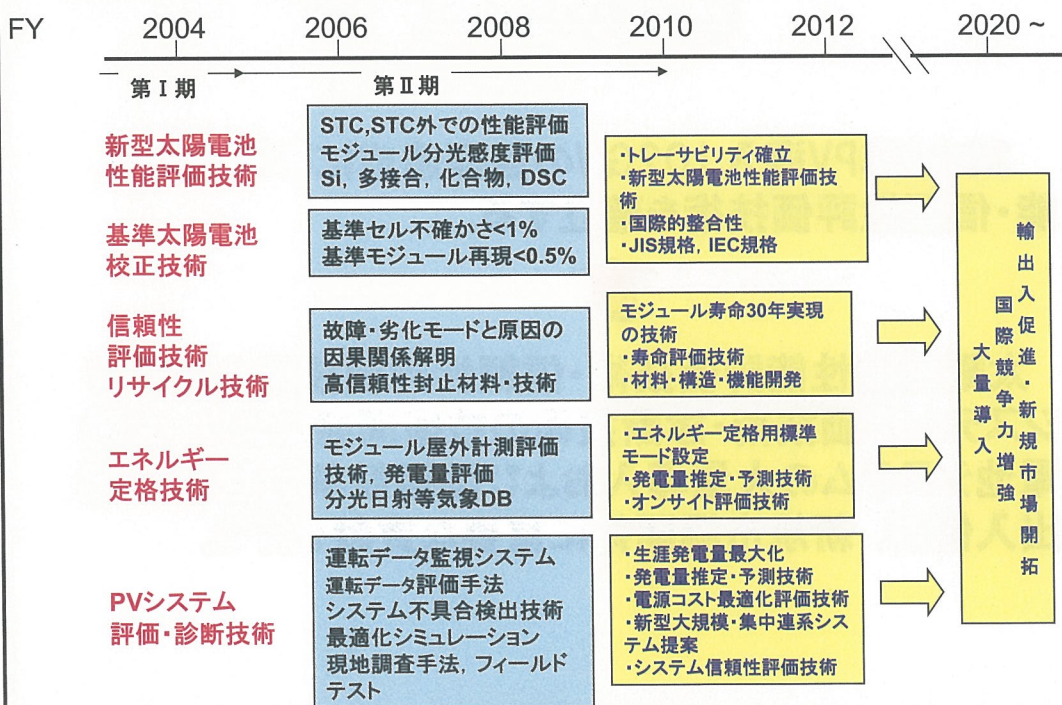


太陽電池性能評価技術・信頼性評価技術およびPVシステム評価技術・診断技術の技術開発により、太陽電池システムの大量導入および国際競争力強化・、輸出入促進、新規市場開拓に重要な貢献を行う。

目標

- ・**太陽電池評価技術**のトレーサビリティ確立, 新型太陽電池評価技術開発, 国際的整合の確保
- ・**長寿命モジュール開発のための寿命評価技術, 材料・構造・機能開発**
- ・**エネルギー定格用標準モード設定**
- ・**発電量推定・予測技術, モジュール屋外計測評価技術開発**
- ・**PVシステム評価診断解析・最適化設計技術**
- ・**標準化, 規格化の推進**

評価・システム技術ロードマップ

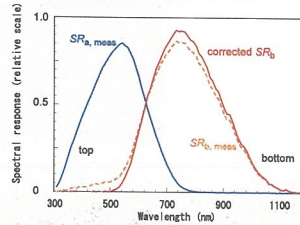


新型太陽電池 性能評価技術

計画: STC, STC外での性能評価 (Si, 多接合, 化合物, DSC)

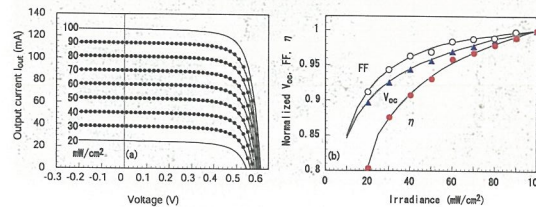
1. 各種新型太陽電池に最適な性能評価法の開発
 - ・新型太陽電池評価(多接合, CIGS等)
 - ・モジュール分光感度評価技術開発
2. 外部サンプル評価, 国際比較測定
 - ・約25件50サンプル/年
 - ・モジュール国際比較測定: 良好な国際的整合性を実証
 - ・測定技術指導 (KIER, NSTDA)
3. 規格化, 標準化への貢献
 - ・IV特性温度照度補正技術
 - ・多接合分光感度測定技術
 - JIS, IECへの採用予定

タンデム太陽電池評価技術
→ JIS規格に採用予定



タンデム太陽電池の分光感度特性高精度測定技術

温度・照度特性補正技術
→ JIS規格に採用予定, IEC規格採用審議中



結晶Si太陽電池の温度依存性の実測値と計算結果

基準太陽電池校正技術

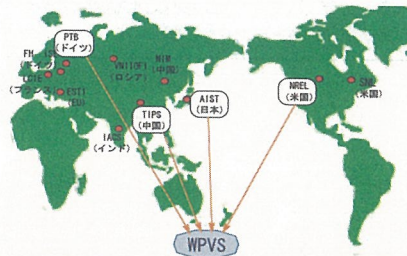
計画: 基準セル不確かさ < 1%
基準モジュール再現 < 0.5%

高平行度ソーラシミュレータ

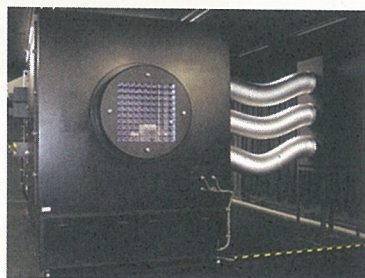
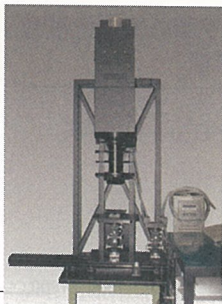
- ・光線平行度: 2° 以内
- ・視野角: 全角 5°

世界初
特許出願済

- ・国際整合性の確保
米国屋外法と直接比較可能
- ・屋内で世界日射標準
トレーサブル校正を実現



WPVS国際比較
一次基準太陽電池校正の国際的整合性を確認



基準モジュール校正用
ソーラシミュレータ開発
(面内均一性 < ±1%)

世界初
特許出願済

信頼性評価技術

計画：
故障・劣化モードと原因の因果関係解明
高信頼性封止材料・技術



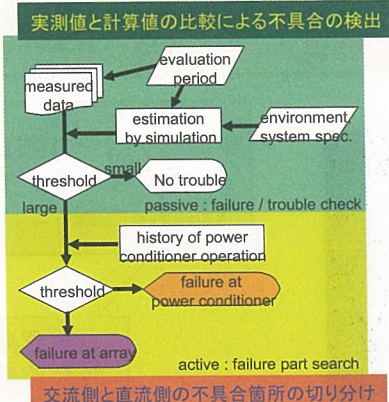
複合加速劣化試験装置

1. 複合劣化試験装置の試作を行い、加速試験法の研究に利用可能な装置として完成した。
2. 放射照度依存性(2値)と温度条件依存性(2値)の加速試験を行い、その解析結果から放射照度3SUN,温度90°Cの加速試験条件で190倍の加速係数を割り出した。

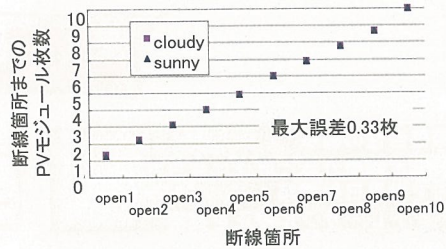
太陽電池アレイ故障診断技術の開発

計画：システム不具合検出技術開発
現地調査手法開発

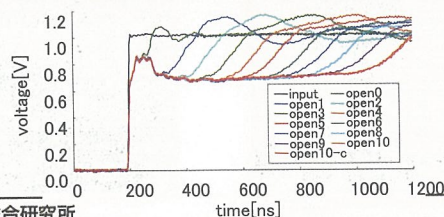
- 太陽電池アレイの不具合箇所の特定技術が確立していないため、施工・メンテナンス現場では多大な点検作業が必要。
- 本件では太陽電池アレイの不具合箇所の特定技術を開発し、実際の施工・メンテナンス現場で使える技術を提供することを目的とする。



対地静電容量測定により、日射条件によらずコネクタ接続不良等によるモジュール間の断線箇所の特定が可能な技術を開発した。



TDR測定により、ストリング中の断線位置および直列抵抗増が検出可能。



今後の課題

1. 太陽電池性能評価技術
STC, STC以外における新型太陽電池評価技術(モジュール)
基準太陽電池セル・モジュールのトレーサビリティ確立
2. 太陽電池信頼性評価技術
モジュール寿命30年実現のための技術開発。
3. PVシステム技術
エネルギー定格用標準モード設定。
発電量推定, 予測技術 オンサイト評価技術。
運転データ監視・システム不具合検出技術。信頼性評価技術。
4. 規格化, 標準化
研究成果を基に国内・国際規格への提案。

シリコン新材料チーム概要

藤原 裕之

概略

1. 研究開発テーマおよびロードマップ
2. これまでの研究成果
3. 個別研究テーマ詳細

チーム目標: 薄膜シリコン太陽電池の大規模普及に向けた太陽電池の高効率化

シリコン新材料チーム 研究開発テーマ

・トリプルタンデム型太陽電池
 ・a-Si:H/c-Siヘテロ太陽電池
 ・太陽電池の光閉じ込め技術

・ $\mu\text{c-SiGe:H}$ ボトム層
 ・高移動度型透明導電膜

材料開発

太陽電池
デバイス

プロセス技術

評価技術

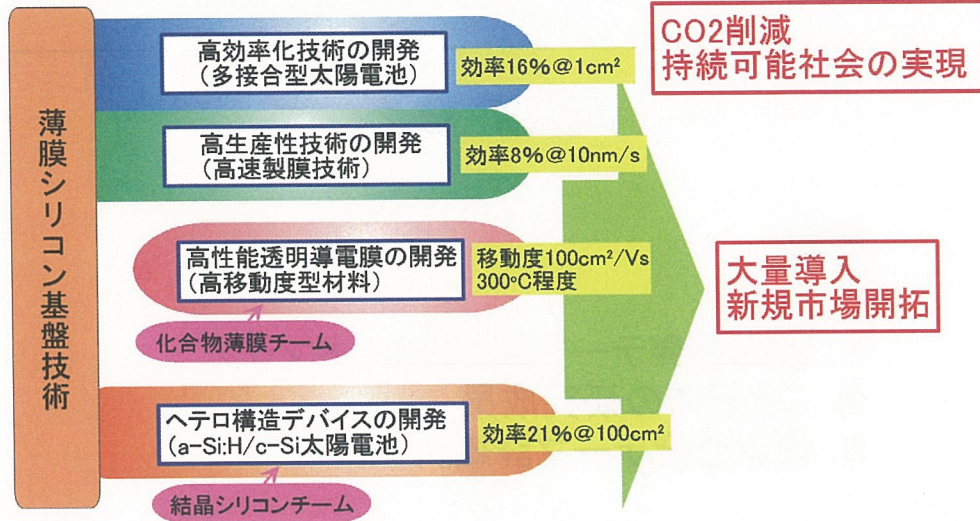
・マルチホローカソード
 (MHC)プラズマ
 ・マイクロ波放電プラズマ

・成膜プロセスの実時間評価
 ・プラズマ診断(ラジカル濃度、
 イオンエネルギー)

新規材料・プロセス技術・評価技術による総合的な太陽電池の研究開発

薄膜シリコン太陽電池の開発ロードマップ

FY 2004 2006 2008 2010 2012

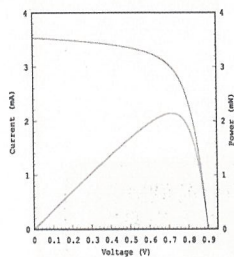


独立行政法人 産業技術総合研究所

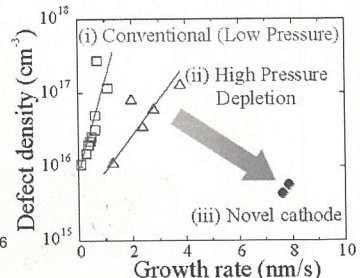
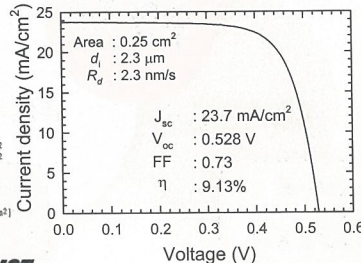
これまでの研究成果

- ・ 光劣化の原因であるSi-H₂結合水素量低減とデバイス構造適正化 → アモルファスSiセル安定化後変換効率=9.3%達成。
- ・ 高圧枯渇法にて2.3nm/s : 微結晶Si単接合=9.1%達成
- ・ MHCプラズマにて8nm/s : デバイス級の低欠陥密度製膜を確認

I-V CURVE
IEC60904-3 0.2296 cm² (designated area) WHSS



Date : 17 Mar 2005
Data No : A180-1
Sample No : A180
Repeat Times : 9
Isc : 3.535 mA
Voc : 0.899 V
Pmax : 2.140 mW
Ijmax : 2.982 mA
Vjmax : 0.718 V
R_s : 67.3 Ω
R_{sh} : 9.3 kΩ
DTemp : 25.0 °C
NTemp : 25.0 °C
DIR : 100.0 mW/cm²
MIRR : 100.0 mW/cm²
Ref. Device No : JG001-90512
Cal. Val. of Ref. : 56.2 (mk at 100mW/cm²)
Scan Mode : Isc to Voc



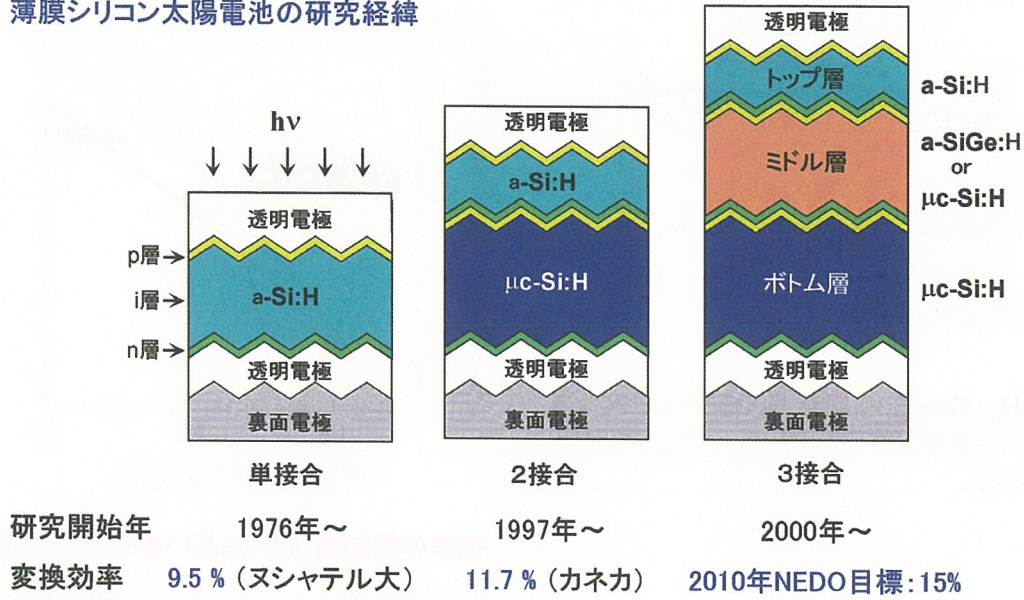
シングルトップセル(アモルファスSiセル)の安定化後最高変換効率(9.3%)

高圧枯渇法適用による微結晶Siシングルセルの高速高効率化(左) 微結晶Siにおける欠陥密度の製膜速度依存性(右)

独立行政法人 産業技術総合研究所

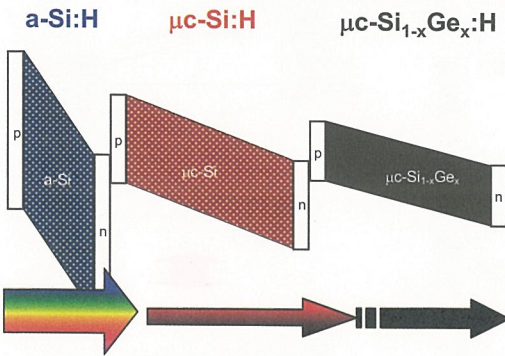
薄膜シリコン多接合太陽電池

薄膜シリコン太陽電池の研究経緯



既存技術だけでは、3接合太陽電池の高効率化は将来的に困難になると予想される。

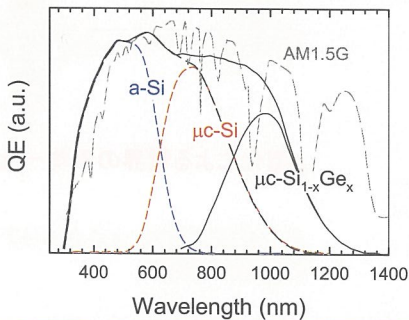
トリプルタンデム型新構造太陽電池



アモルファスSi、微結晶Si
赤外領域の光吸収が小さく
赤外光の透過損失が大きい。

↓
微結晶Si_{1-x}Ge_x

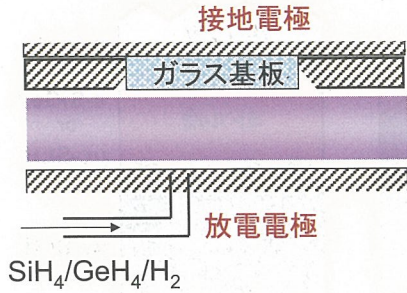
ナローギャップ化により、高い
赤外感度を得ることを目指す。



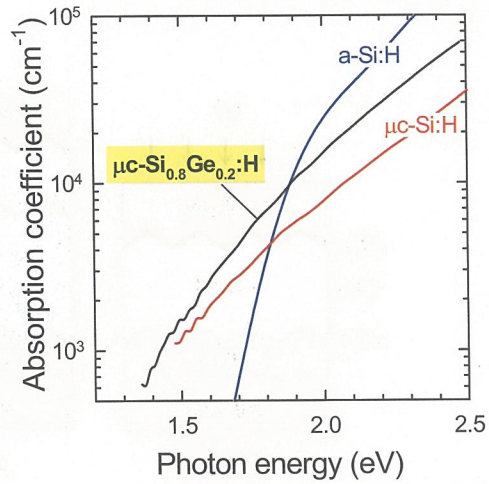
タンデム $\eta=12-13\%$ → トリプル $\eta=16\%$

$J_{sc}(SiGe) >> 30 \text{ mA/cm}^2$

$\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 薄膜の光学特性



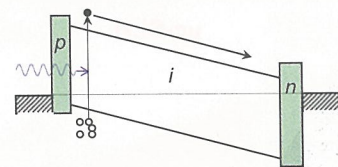
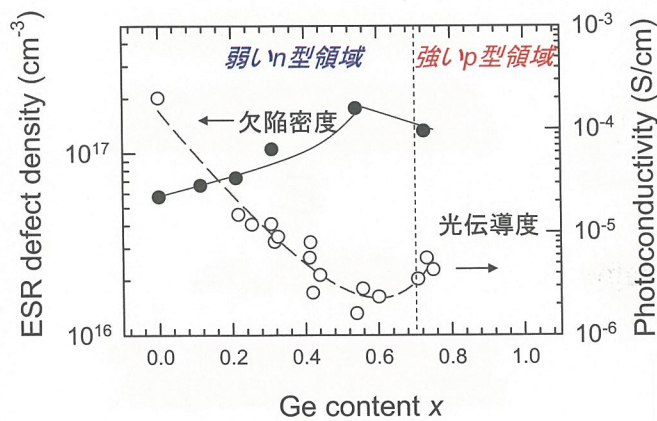
SiH_4 、 GeH_4 、 H_2 混合ガスのプラズマCVDにより低温(約200 °C)で $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ が得られる。



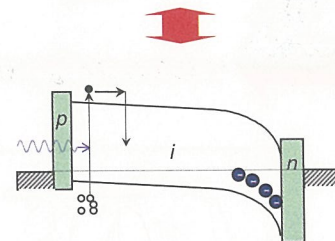
従来の微結晶Siよりも高い赤外吸収感度

Ge組成20%で $\alpha \sim 1.5$ 倍 (@1.7eV:720nm)

$\mu\text{c-SiGe:H}$ の欠陥密度と光伝導度



理想的バンドダイアグラム

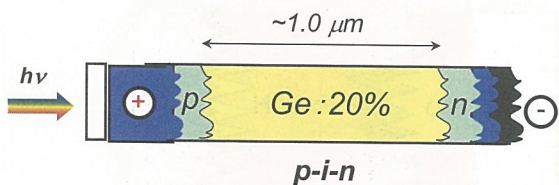


p型化による電界の不均一化

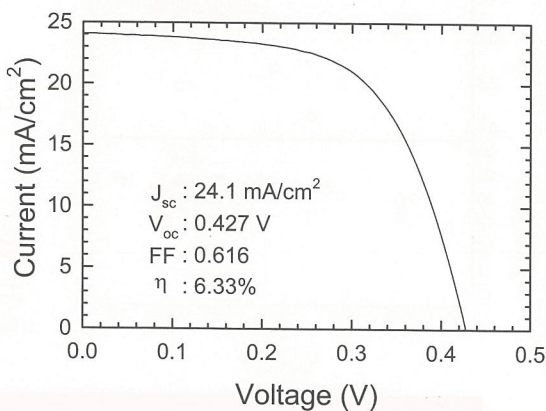
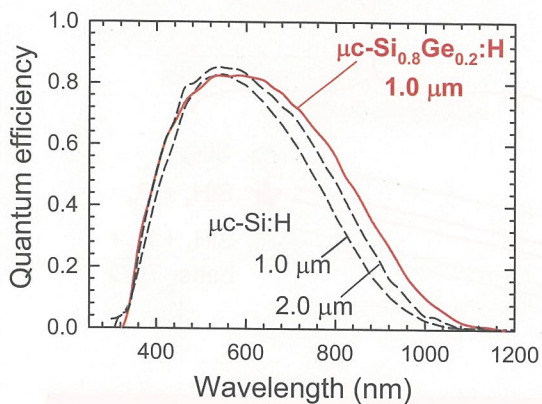
欠陥密度増加によるキャリア再結合の増加

高Ge組成領域で $\mu\text{c-SiGe:H}$ はp型伝導
→p型化の抑制が重要

μc-SiGe:H単接合型太陽電池

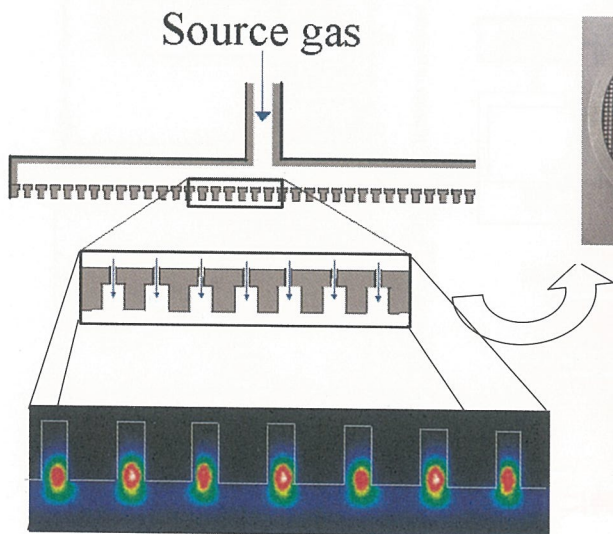


- ・ 20 at.%のGe添加で膜厚2倍の微結晶Siセルを越える赤外感度が得られた。
- ・ 単接合型太陽電池で変換効率6.3%を達成した。



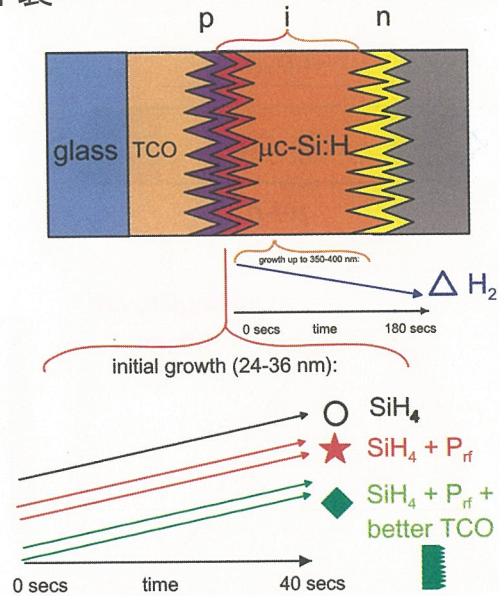
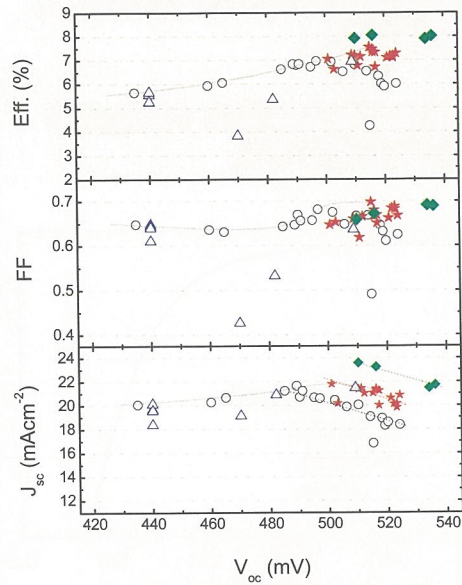
高速製膜技術の開発

マルチホローカソード(MHC)プラズマ



- MHC電極構造
- 局所プラズマによる効率的なSiH₃前駆体の生成
 - 高い成膜速度
 - 成膜速度: 8 nm/sにおいて欠陥密度 ~ 10¹⁵ cm⁻³
 - 太陽電池作製へ応用

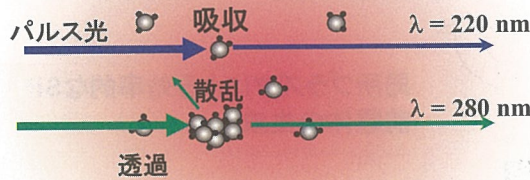
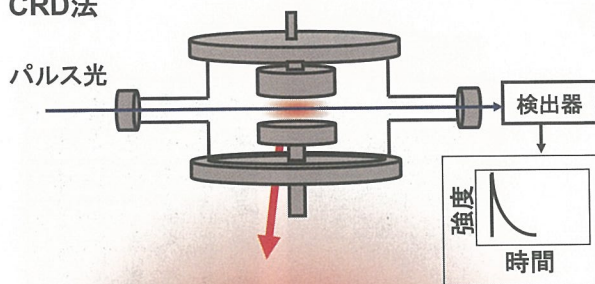
MHCプラズマによる太陽電池作製



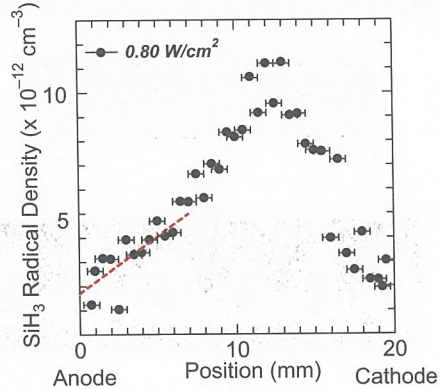
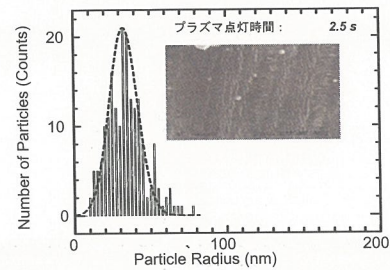
$R_d = 1.8 \text{ nm/s}$; $V_{oc} = 516 \text{ mV}$ $J_{sc} = 23.2 \text{ mAcm}^{-1}$ $FF = 0.671$ $\eta = 8.04 \%$

キャビティリングダウン(CRD)法を用いたラジカル計測

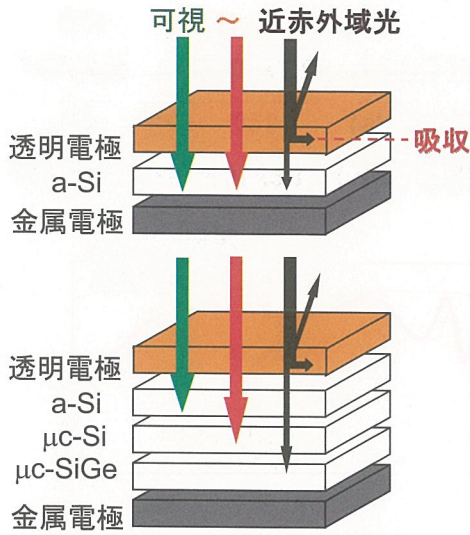
CRD法



SiH₃ラジカル濃度、パウダー量を同時に評価する新規技術の開発

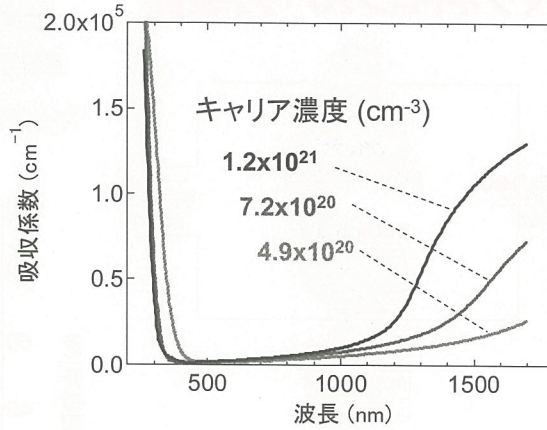


高移動度型透明導電膜



透明電極の自由キャリアによる光学損失

ITO薄膜における自由キャリア吸収

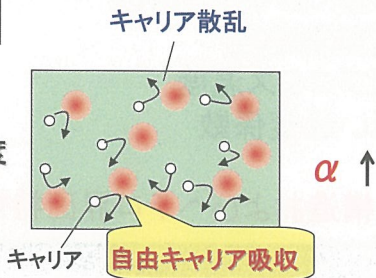


透明電極の自由キャリア吸収

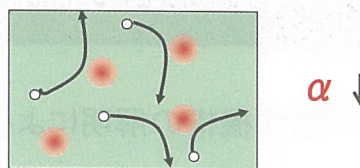
*導電率 = 素電荷(e)・移動度(μ)・キャリア濃度(N)

導電率一定*

低移動度
高キャリア濃度



高移動度
低キャリア濃度



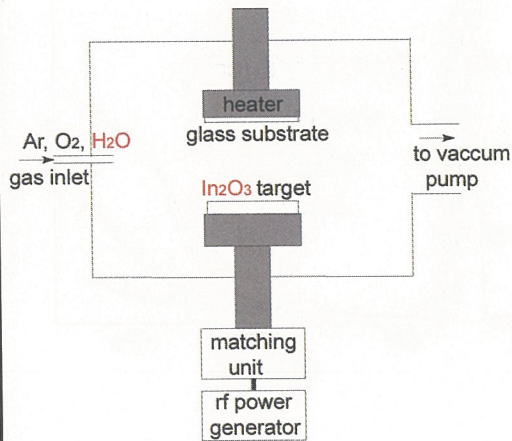
研究開発の流れ

ガラス上スパッタ膜
 $\text{In}_2\text{O}_3\text{:Zr}$ $\mu=82\text{cm}^2/\text{Vs}$ ○
 プロセス温度400°C以上 △

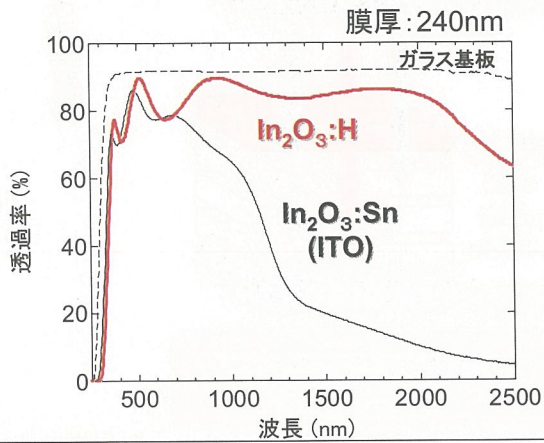
室温成長&固相成長膜
 $\text{In}_2\text{O}_3\text{:H}$ $\mu=130\text{cm}^2/\text{Vs}$ ◎
 プロセス温度200°C! ◎

水素ドーピング酸化インジウム ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$) 薄膜

rfマグネトロンスパッタ装置

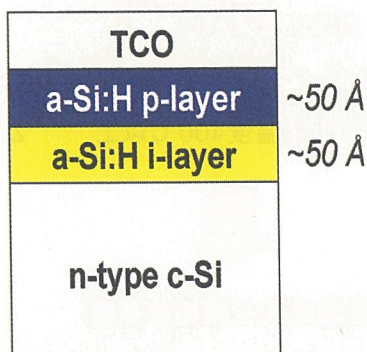


	$\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$	ITO
抵抗率 (Ωcm)	2.7×10^{-4}	$\sim 2.4 \times 10^{-4}$
移動度 (cm^2/Vs)	130	$\gg 29$
キャリア濃度 (cm^{-3})	1.8×10^{20}	$\ll 9.1 \times 10^{20}$



a-Si:H/c-Siヘテロ構造デバイスの開発

a-Si:H/c-Siヘテロ接合



a-Si:H層によりp-i-n構造

- 1) 高変換効率
- 2) 低プロセス温度
- 3) 低い温度係数

ヘテロ構造およびヘテロ界面特性は不明

a-Si:Hヘテロ構造 → 実時間プロセス観察
デバイス特性 → デバイス特性の物理評価

デバイス動作機構の解明による高効率化

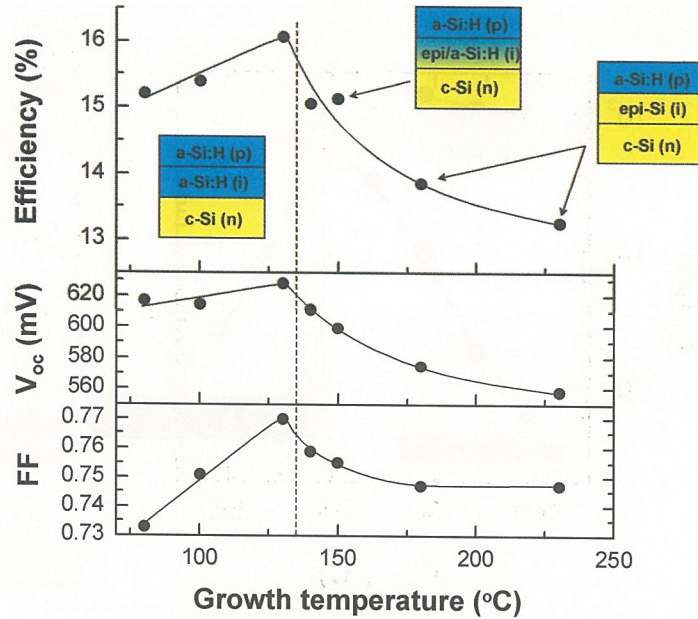
実時間観測によるプロセス評価

分光エリプソメトリーにより界面構造を評価

高プロセス温度でエピタキシャル成長が起こることを発見

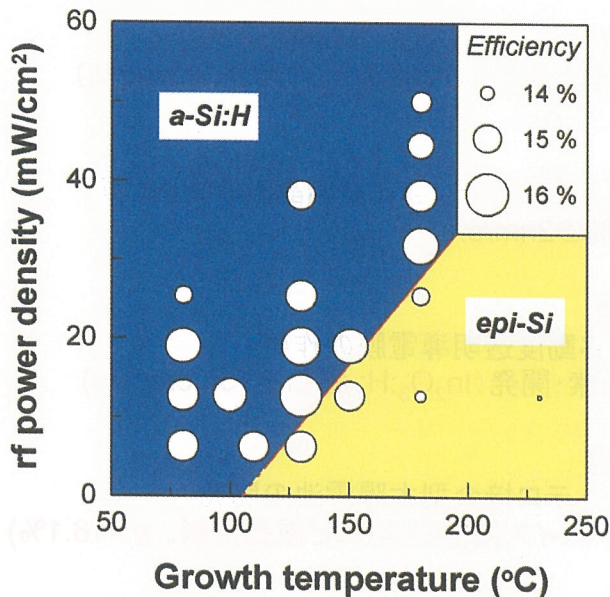
変換効率は、界面構造に極めて敏感

温度130°Cにおいて、変換効率16.1%を達成 (裏面BSF, テクスチャーなし)



結晶Si基板上的でのエピタキシャル層形成条件

太陽電池構造: Ag/ITO/a-Si:H(p-i)/c-Si(n)/Al



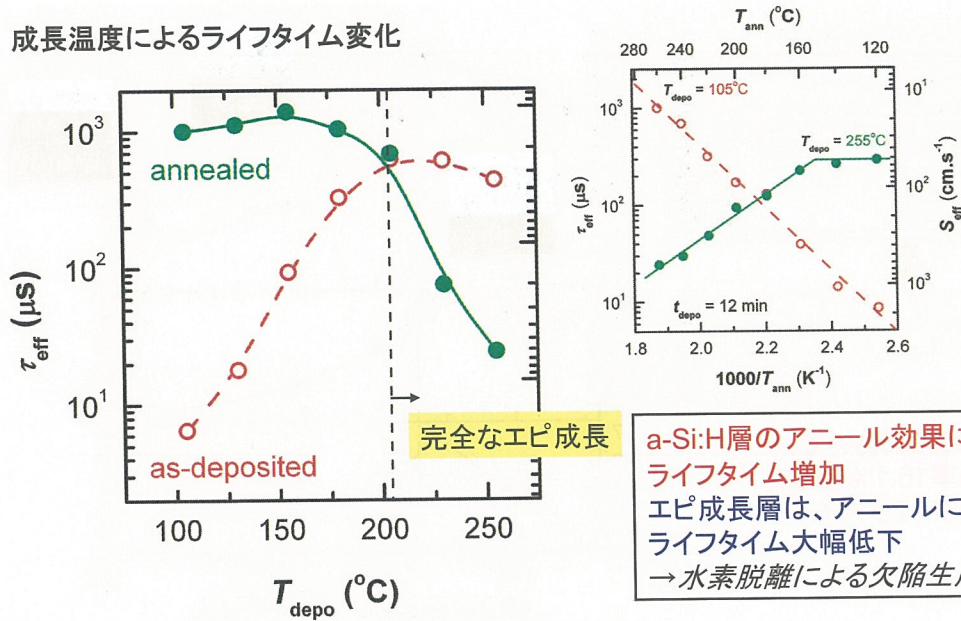
高温および低rf出力においてエピタキシャル成長が起こることを初めて確認。

エピタキシャル層 (epi-Si) の形成により太陽電池変換効率は大幅に低下

最適成長条件は、a-Si:H/epi-Si相の境界領域に存在

a-Si:H/c-Siヘテロ構造のパッシベーション効果

成長温度によるライフタイム変化



独立行政法人 産業技術総合研究所

シリコン新材料チーム まとめ

1. 高効率化技術の開発
 赤外域に高い吸収感度を持つ微結晶SiGeの開発
 →微結晶SiGe基礎評価、単接合型の太陽電池の開発 ($\eta = 6.3\%$)
2. 高生産性技術の開発
 マルチホローカソード(MHC)プラズマによる微結晶Siの高速製膜
 →太陽電池作製 ($\eta = 8.0\% @ 2\text{nm/s}$)
3. 高性能透明導電膜の開発
 スパッタリング法による高移動度透明導電膜の作製
 →新規高移動度材料の探索・開発 ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$: 移動度 $130 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)
4. ヘテロ構造デバイスの開発
 アモルファス/結晶シリコンヘテロ接合型太陽電池の開発
 →実時間プロセス観察、デバイス基礎評価 (エピ成長抑制、 $\eta = 16.1\%$)

独立行政法人 産業技術総合研究所

結晶シリコンチームの概要

坂田 功

・ミッション:

高効率・低価格の結晶シリコン太陽電池の実現

アプローチとしては:

極薄膜・超薄型結晶シリコン太陽電池

希薄窒化物化合物半導体との組み合わせ

結晶シリコン太陽電池

・特長と利点: 高効率、高信頼性、環境負荷が小さい → 現在のシェア約90%

・課題と解決のためのアプローチ:

1. 製造価格の低減、原料供給問題



一つの解決策: 太陽電池の厚さを低減: 従来200 μ m以上→100 μ m以下

アプローチ: 超薄型・極薄膜結晶シリコン太陽電池

超薄型: 厚さ100 μ m以下のシリコン基板を使用

極薄膜: 異種材料基板(例えばセラミックス)上、厚さ10 μ m以下

2. 一層の高効率化: 高効率化による低価格化

アプローチ: 再結合の一層の低減(粒界、表面、裏面)

タンデム化

第3世代光発電(量子構造、新しい発電メカニズムの利用)

結晶シリコンチームにおける研究開発の考え方

- ・結晶シリコン太陽電池
長い研究開発の歴史がある。産業化も進展。
- ・限られた研究リソース(予算、マンパワー)
すべてのテーマを包括的に進めるのは現実的ではない
- ・研究開発の考え方
 - ・これまでの蓄積と特長を生かす
 - ・先導的・先駆的なテーマを中心に進める
 - ・経験の少ない分野・手法→共同研究で補う
- ・中立機関としての役割
 - ・公共性の高いテーマに取り組む→新エネルギー創出の観点
 - ・データの公開と掘り下げ
 - ・評価解析を合わせて行う→学術的で汎用性のあるデータ
 - ・原理的な特許の取得を目指す
- ・継続的な取り組み→テーマの中長期の展開

結晶シリコンチームの最近の主な成果:

- ・光閉じ込め型薄膜シリコン太陽電池
- ・低温エピタキシャル接合(エミッタ)形成技術
- ・低温Back-Surface-Field(BSF)技術
- ・キャリア寿命測定技術(表面不活性化処理)
- ・化合物半導体薄膜ヘテロエピタキシャル成長技術



チームの特徴:

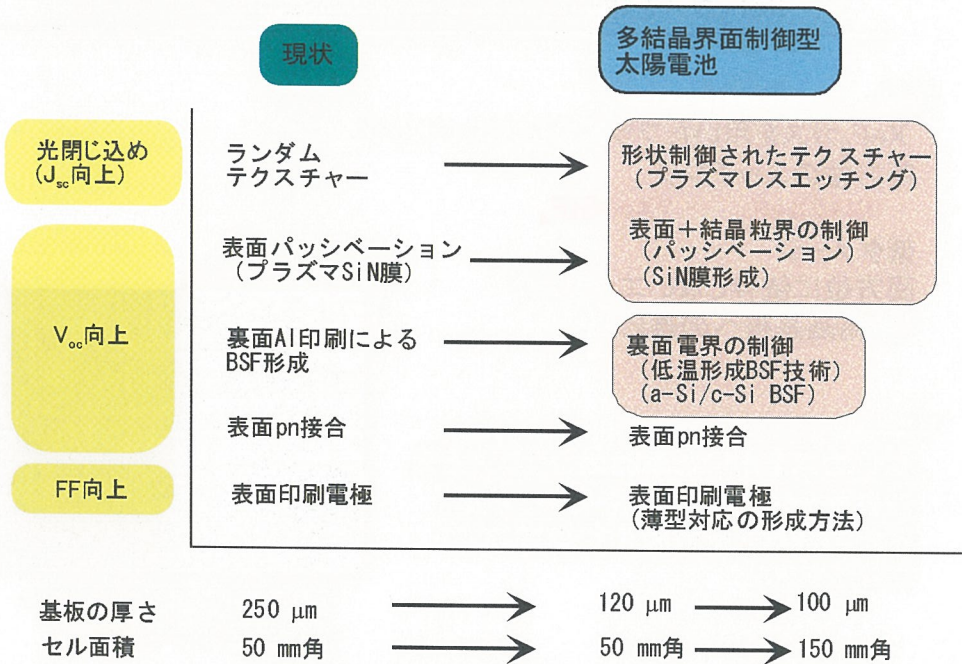
- ・超薄型、極薄膜結晶シリコン太陽電池
- ・optical management
- ・低温薄膜形成技術
- ・異種材料(アモルファス、化合物半導体)との組み合わせ
- ・評価技術
- ・デバイス物理

現在のテーマ

1. 多結晶界面制御型太陽電池
 - ・超薄型結晶シリコン太陽電池
 - ↑
 - ・optical management
 - ・低温薄膜形成技術
 - ・異種材料(アモルファスとの組み合わせ)

2. 希薄窒化物化合物半導体(GaPN)
 - ・タンデム化によるシリコン太陽電池の一層の高効率化
 - ・低環境負荷、シリコンとの格子整合
 - ↑
 - ・異種材料(化合物半導体)との組み合わせ:ヘテロエピタキシャル成長
 - ・評価技術

多結晶界面制御型太陽電池の研究開発要素

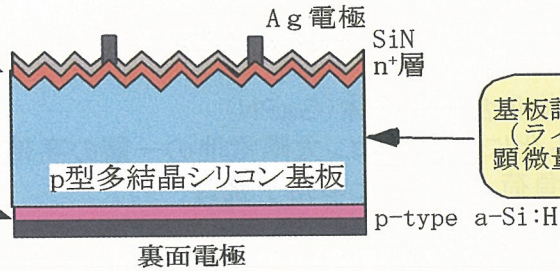


超薄型結晶シリコン太陽電池 2006年度～2008年度

多結晶界面制御型太陽電池の研究開発

プラズマレス気相エッチングによるテクスチャー形成

低温形成BSF技術 (p-type a-Si:H)



基板評価技術 (ライフタイム、顕微量子効率)

XeF₂ガスを用いたシリコン基板の表面テクスチャー化

特徴:

XeF₂ガスを用いたプラズマレスエッチング

等方性のエッチング



低ダメージ

面方位に依存しないエッチング

(多結晶基板への適応)

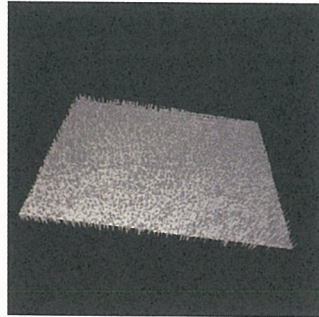
内容:

XeF₂ガスを用いた単結晶シリコン基板の表面テクスチャー化を行い、表面形状の制御と反射率の初期検討を行った。



テクスチャー化したシリコン基板の表面形状

XeF₂ガスを用いたシリコン基板の表面テクスチャー化



テクスチャー化したシリコン
基板の表面形状

表示サイズ: 10 μm X 10 μm
凹凸は、約0.2 μm



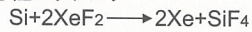
形状最適化が課題

新しいプロセスへの取り組み

プラズマレスドライエッチングの検討

エッチングガス: XeF₂、ClF₃、Cl₂

・等方性エッチング



・低ダメージ

・面方位に依存しないエッチング(多結晶シリコン基板に適用)

1) 表面テクスチャー形成

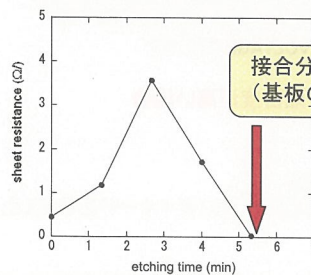
ランダムテクスチャー
(単結晶)



XeF₂+mask による
形状制御された表面
テクスチャ構造の形成
(単結晶)



2) PN接合分離



接合分離に適用可能
(基板の比抵抗)

基板裏面側のシート抵抗の変化

BSF 層がダイオード・セル特性に与える影響

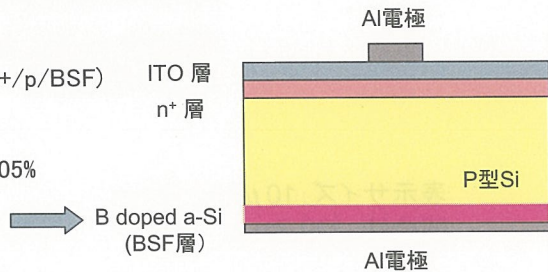
BSFプロセスが、セル特性に与える影響を調べるため、欠陥密度を変えたn⁺層エピタキシャルシリコン層を作製し、その後、BSF層の形成を行った。

1)BSF(back-surface-field) プロセス条件

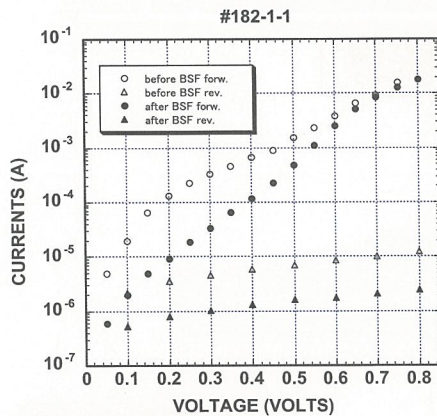
ポロドーパ型 a-Si:Hをp型 結晶シリコン基板の裏面に形成
 rf-PECVD @13.56 MHz
 平行平板、容量結合型チャンバー
 H₂/SiH₄ = 60, B₂H₆ / SiH₄ = 0.2%, 基板温度 : 200 °C
 rf パワー : 5.5 W, 反応圧力:0.3 Torr
 形成時間:80 分(厚さ: 70nm)

2)セル構造

n⁺ p ホモ接合 結晶シリコン太陽電池 (ITO/n⁺/p/BSF)
 n⁺ 層: 低温形成エピタキシャルシリコン
 rf-PECVD @13.56 MHz で形成
 基板温度 : 200 °C, 2段階成長, PH₃/SiH₄ =0.05%
 厚さ: 30-40 nm

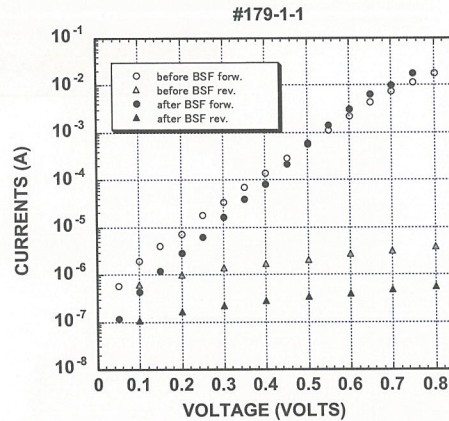


BSF層がダイオード・セル特性に与える影響



(1) 欠陥密度が高い場合

開放電圧 向上
 0.551 V → 0.590V
 低バイアス領域での再結合電流(ダイオード因子2以上)が顕著に減少
 ↓
 低温成長 n⁺ エピタキシャル層中存在する欠陥の不活性化 (本来の裏面再結合速度低減以外の効果)

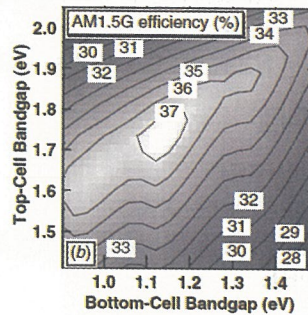
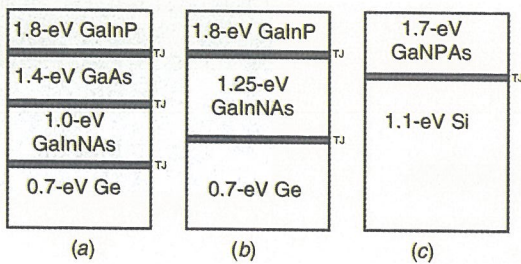


(2) 欠陥密度が低い場合

低バイアス領域での再結合電流(ダイオード因子2以上)は若干減少
 ↓
 欠陥の不活性化は顕著ではない
 開放電圧:若干低下(0.598 V → 0.582V)
 再結合中心の発生を示唆

多接合太陽電池の提案例と効率予測

Maximum projected (achieved) efficiencies (%) for multijunction solar cells at 300 K.					
Junctions	Materials	Band Gap	AM0	AM1.5	AM1.5
			1 sun	1 sun	500 suns
2	GaInP/GaAs	1.8 eV/1.4 eV	31.4	35.1	40.2
2	GaNPs/Si	1.7 eV/1.1 eV	33.8	37.4	44.2
3	GaInP/GaAs/Ge	1.8 eV/1.4 eV/0.7 eV	34.6	38.6	46.2
3	GaInAsP/GaInNAs/Ge	1.70-1.85 eV/1.20-1.25 eV/0.7	37.3	40.5	49.2
3	GaInP/GaAs/GaInNAs	1.8 eV/1.4 eV/1.0 eV	39	43.4	50.9
3	GaNPs/GaNPs/Si	1.8 eV/1.4 eV/1.1 eV	36.6	40.6	47.4
4	GaInP/GaAs/GaInNAs/Ge	1.8 eV/1.4 eV/1.0 eV/0.7 eV	39.1	40.5	49.4



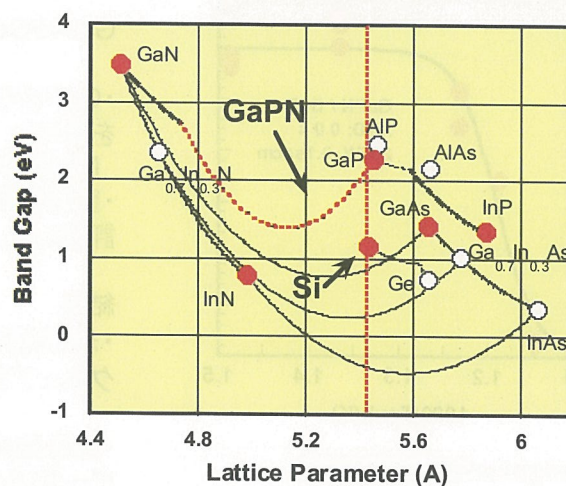
J F Geisz and D J Friedman, Semicond. Sci. Technol. 17, 769 (2002).

独立行政法人 産業技術総合研究所

III-V-N系半導体

- ・Siに格子整合する、種々のバンドギャップを有する材料がIII-V窒化物で実現可能。
- ・GaPN系はワイドバンドギャップ材料となる。
- ・GaPN系は、隣組成の大きいところで間接遷移である。

III-V-N系半導体の格子定数とバンドギャップ



GaPN: Siに格子整合する、毒性の強い元素を含まないワイドバンドギャップ半導体

↓
タンデム化によるシリコン太陽電池の一層の高効率化

独立行政法人 産業技術総合研究所

実験

GaPN薄膜試料試作

- ・MBE成長
- ・2段階GaPバッファ層 for Si基板
初期低温成長層-300C-100nm
- ・Normal GaPバッファ層 for GaP基板

GaP(100)基板、Si(100)基板

Tsub: 400-600C

RF電力: 200W (typical)

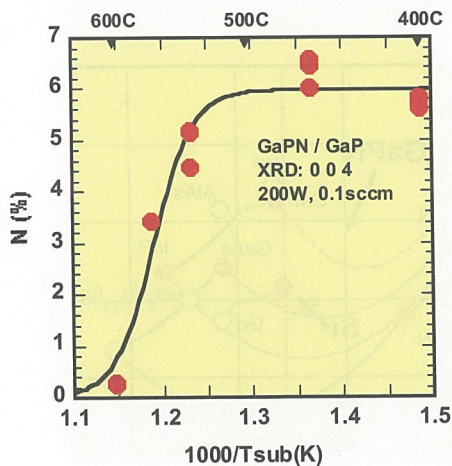
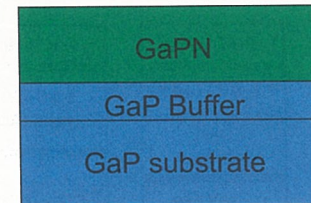
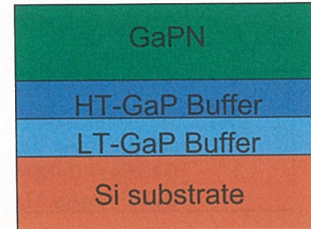
V/III比: ~10

N2流量: 0.1-0.2 sccm

評価

- ・RHEED
- ・窒素組成: XRD
- ・光吸収係数: 光透過・反射スペクトルから
- ・IPE

試料構造



Langmuir型吸着等圧線

$$v = ns \cdot P \cdot K \cdot \exp(Q/RT) / (1 + P \cdot K \cdot \exp(Q/RT))$$

$$ns = 5.99$$

$$P \cdot K = 3.1E-24$$

$$Q = 3.92 \text{ (eV)}$$

GaPN/GaPの窒素組成の基板温度依存性

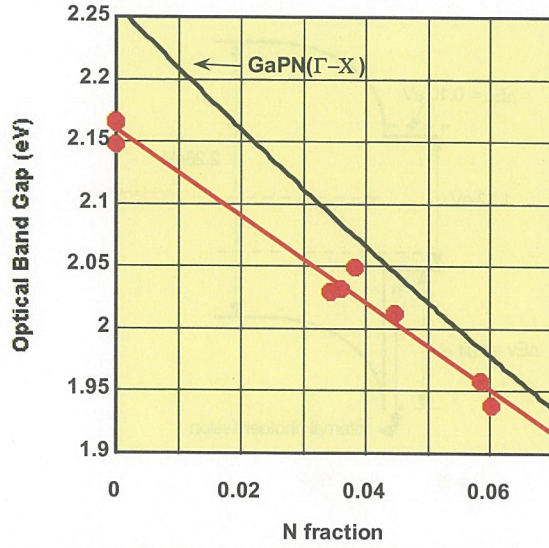
- ・GaPN/GaPの窒素組成の基板温度依存性を調べた
MBE; RF-200W, N2-0.1sccm
- ・窒素組成は {115}回折面の $\omega-2\theta/\omega$ マップで評価した。

結果

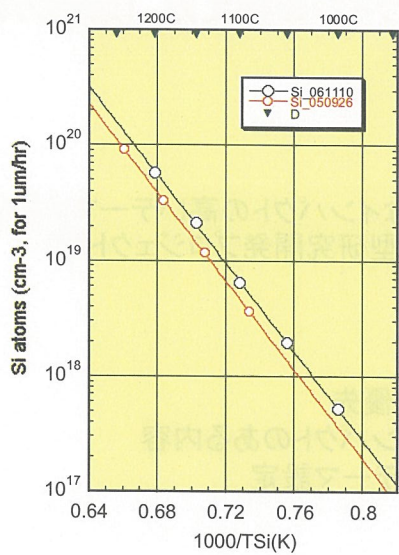
- ・組成値はほぼ基板温度で決まり、ラングミュア型 吸着等圧線に良くフィットする。

- ・吸着熱の92 (kcal・mol⁻¹)はGaPのエンタルピー-33.04

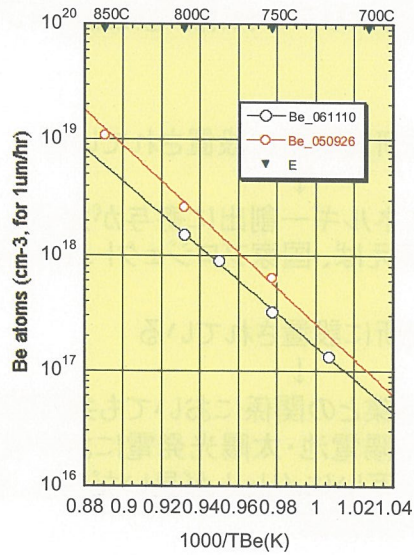
(kcal・mol⁻¹)に比較してかなり大きく、検討が必要。



吸収係数から求めたGaPN膜の光学的バンドギャップ
微量の窒素導入でバンドギャップが減少



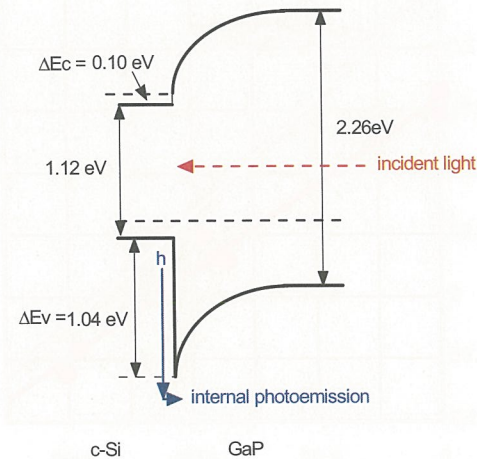
Si Doping (n型)



Be Doping (p型)

n型、p型とも、広い範囲でドーパントの導入を実現

Internal photoemission applied to GaP / Si heterojunction



GaP/Si接合の価電子帯側のバンド不連続 $\Delta E_v = 1.04\text{eV}$

結晶シリコン太陽電池試作プロセスラインの考え方 (運営方針)

- ・公的研究機関に設置されている



新エネルギー創出に寄与が大きく、社会的なインパクトの高いテーマを優先
(例えば、国家プロジェクト、NEDOの公募型研究開発プロジェクト等)

- ・研究所に設置されている



- ・企業との関係においても共同研究開発を優先
- ・太陽電池・太陽光発電における技術的インパクトのある内容
- ・お互いにメリットが見いだせる、相補的なテーマ設定
- ・人的交流

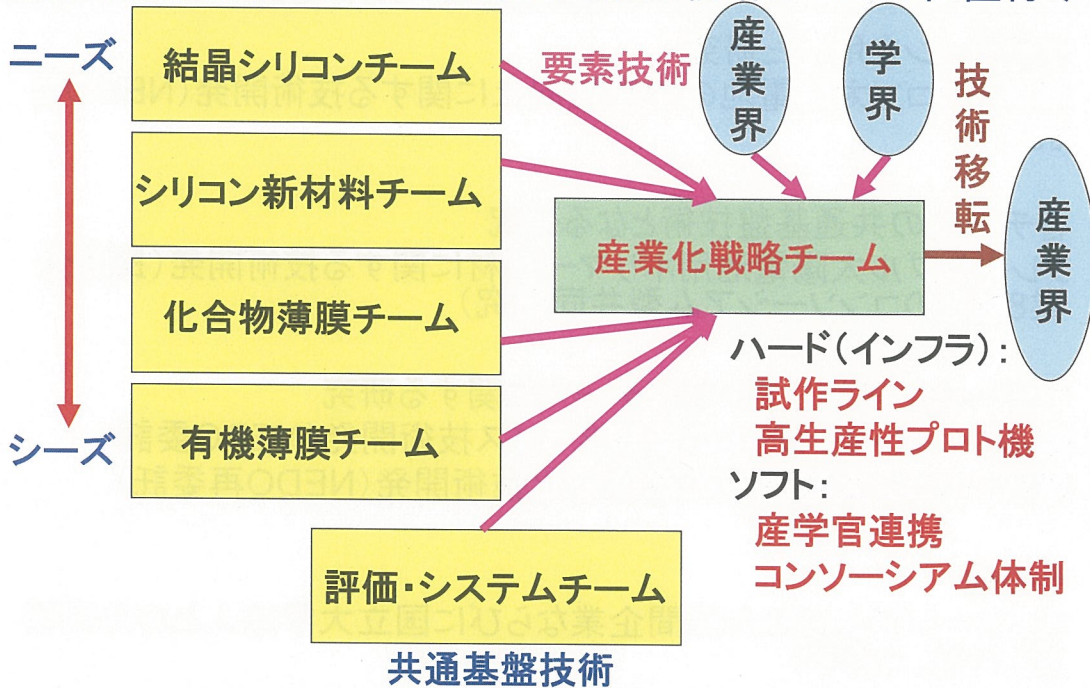
結晶シリコンチームの概要 まとめ

1. 結晶シリコン太陽電池の課題と解決のためのアプローチ
 - 製造価格の低減、原料供給問題→超薄型・極薄膜結晶シリコン太陽電池
 - 一層の高効率化→再結合の一層の低減、タンデム化等
2. 結晶シリコンチームにおける研究開発の考え方(限られたリソースの中で)
 - これまでの蓄積と特長を生かす
optical management、低温薄膜形成技術、異種材料
(アモルファス、化合物半導体)との組み合わせ、評価技術、デバイス物理
 - 先導的・先駆的なテーマを中心に進める
3. 現在の重点テーマ
 - 多結晶界面制御型太陽電池(多結晶、ヘテロ接合)
 - シリコンとのタンデム化に向けた希薄窒化物化合物半導体材料の探索
4. 結晶シリコン太陽電池試作プロセスラインの考え方 (運営方針)

産業化戦略チームの概要

増田 淳

太陽光発電研究センター内の産業化戦略チームの位置付け



産業化戦略チームのミッション

産学官連携体制で、新規要素技術の実用化可能性を検証するとともに、太陽電池業界の将来を担う若手人材の育成を図る。

産学官連携体制→コンソーシアム共同研究

ハード(インフラ): 試作ライン、高生産性プロト機
ソフト: コンソーシアム体制

産業化戦略チームで実施しているテーマの例

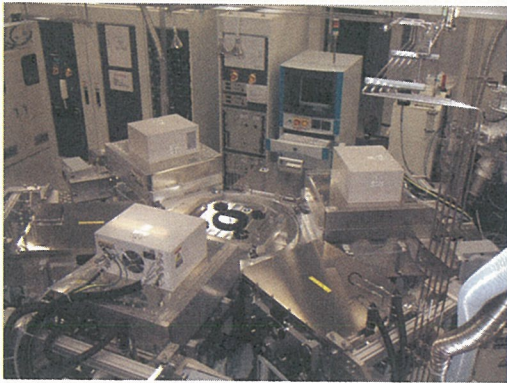
試作ラインを用いた研究
薄膜シリコン太陽電池の生産性向上に関する技術開発(NEDO委託)

各チームの共通基盤技術となる研究
フレキシブル太陽電池用ポリマー基材に関する技術開発(民間企業8社とのコンソーシアム型共同研究)

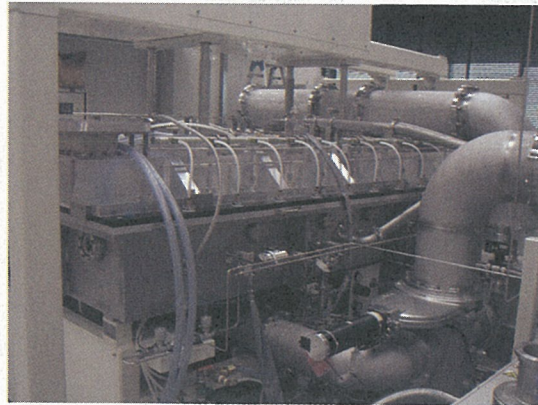
他チームで実施していないテーマに関する研究
結晶シリコンインゴットの新規スライス技術開発(NEDO委託)
球状シリコン太陽電池の高性能化技術開発(NEDO再委託)

その他
コンソーシアム以外の民間企業ならびに国立大学法人との共同研究(11社、4大学)

インフラの例



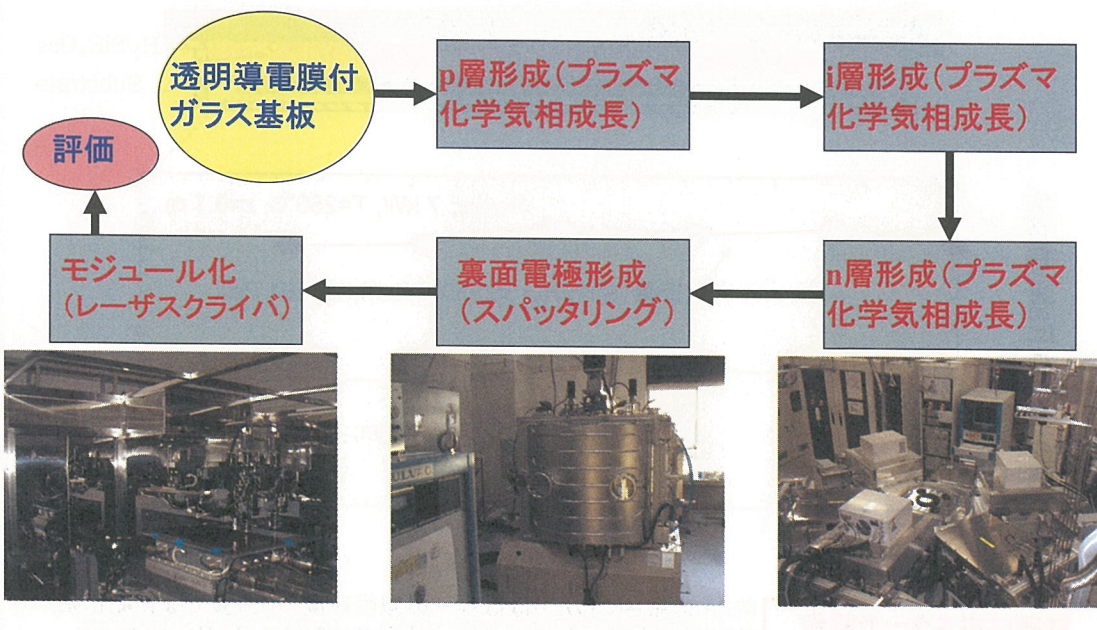
300 mm × 400 mm基板対応
薄膜シリコン太陽電池用プラズマCVD装置



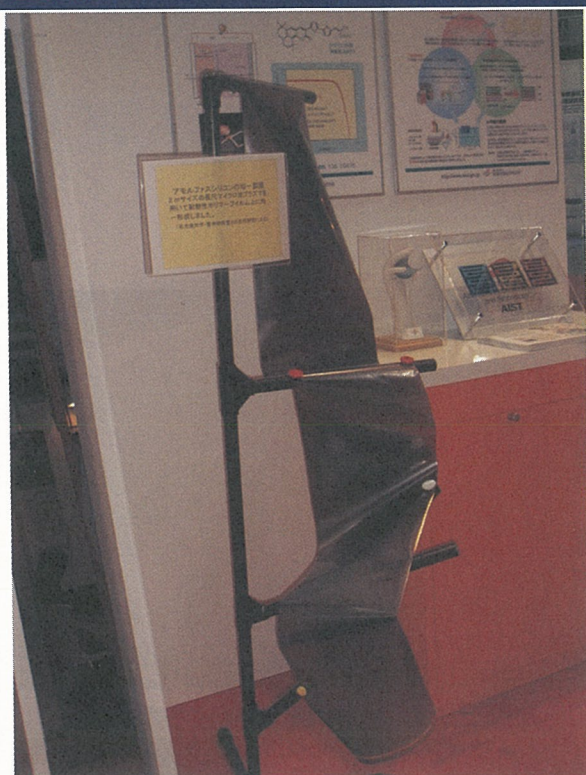
薄膜シリコン高速大面積製膜技術
2 mサイズ長尺マイクロ波プラズマCVD装置

独立行政法人 産業技術総合研究所

薄膜シリコン太陽電池試作ライン



独立行政法人 産業技術総合研究所

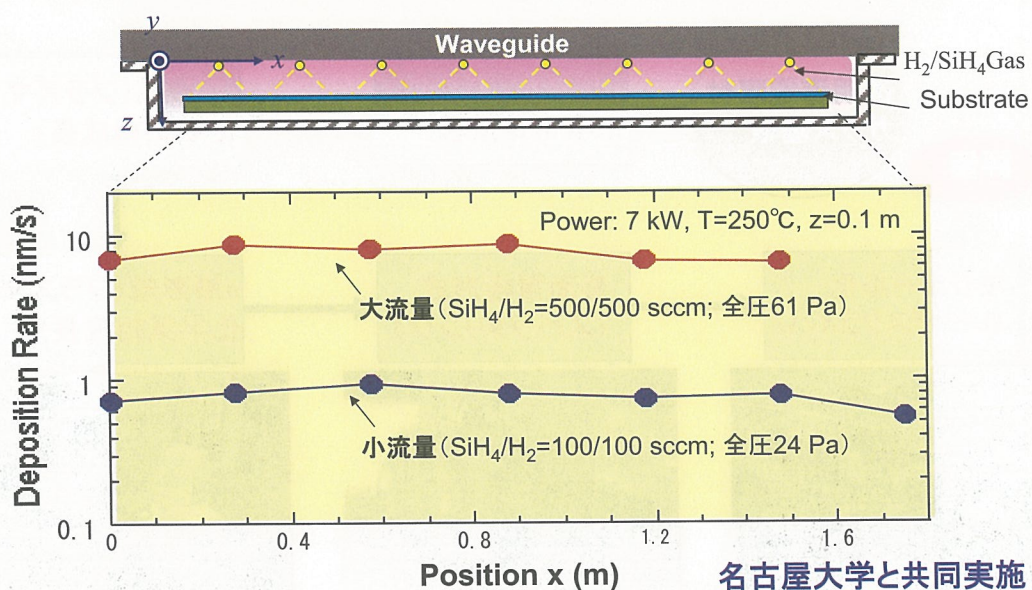


耐熱性ポリマー フィルム上に 形成したa-Si:H膜

国立大学法人名古屋大学・
菅井研究室との共同研究による

独立行政法人 産業技術総合研究所

2 mサイズ長尺マイクロ波プラズマCVD装置製膜速度の分布



名古屋大学と共同実施

詳細はポスターで報告

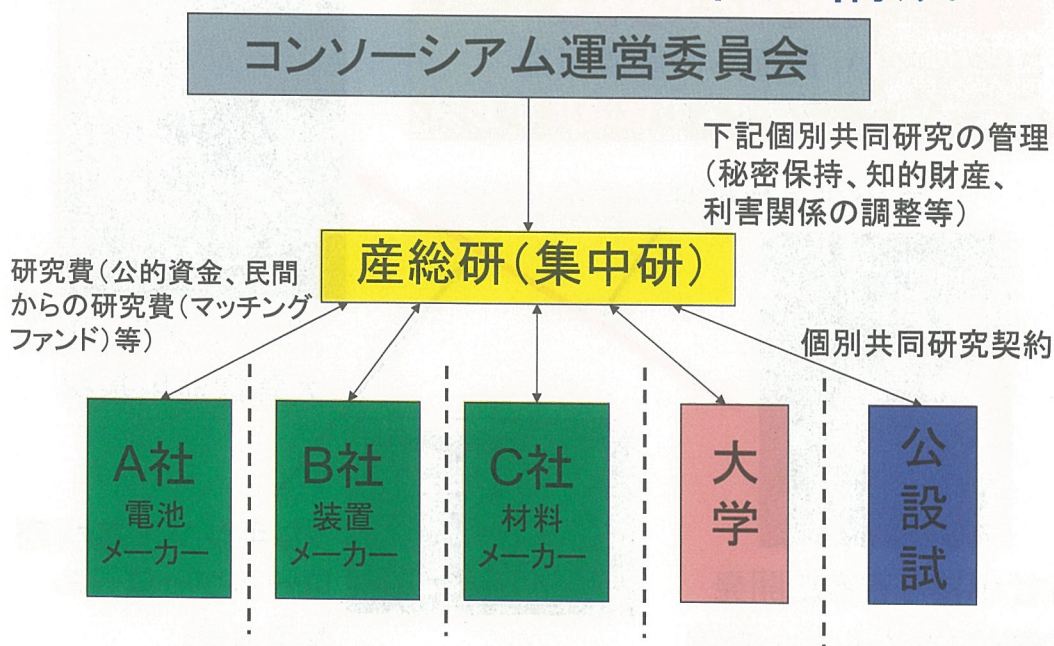
約2mの長さにとりほぼ均一の製膜速度。小流量では結晶化率約70%の微結晶シリコン膜、大流量ではアモルファスシリコン膜。

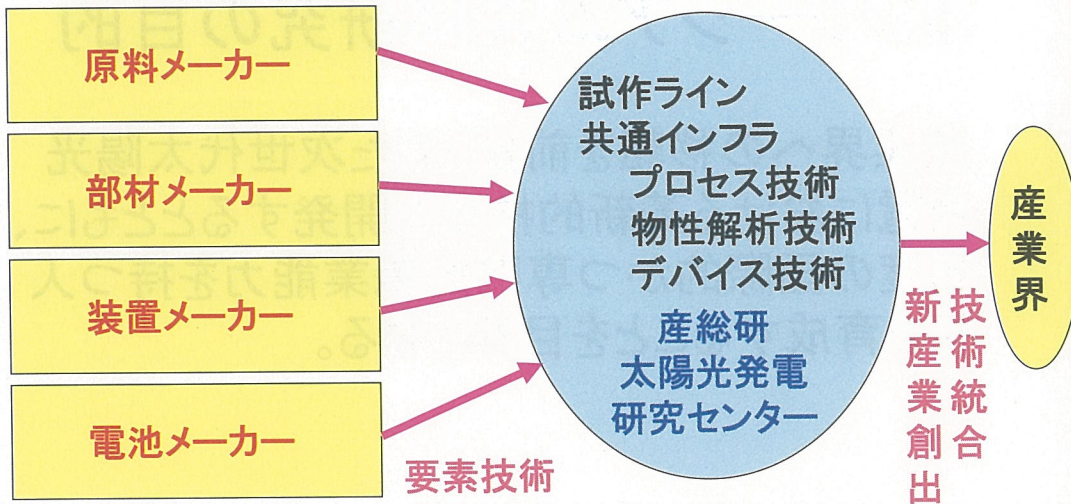
独立行政法人 産業技術総合研究所

コンソーシアム共同研究の目的

産業界への移転を前提とした次世代太陽光発電における革新的技術を開発するとともに、高度の国際的かつ専門的職業能力を持つ人材を育成することを目的とする。

コンソーシアムの基本的構成





試作ラインを用いた新産業創出の概念

フレキシブル太陽電池基材コンソーシアムの研究内容

軽量化→太陽電池の大量普及
こわれにくい、曲面への設置可能
量産性向上、プロセスの低温化が必須

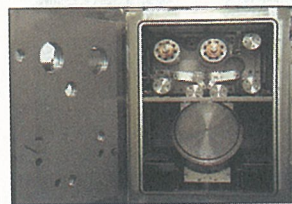
産総研の無機機能膜形成技術



各社が持ち寄る新開発
高機能フレキシブル基材



フレキシブル・軽量
太陽電池用基材



フレキシブル基材用
ロールツーロール
装置技術

オブザーバー

フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム

太陽電池メーカー

石川県工業試験場

コンソーシアム運営委員会

高機能酸化物透明導電膜・バリア膜付フレキシブル基材の開発
8社から10名の共同研究員、産総研での集中研方式

バリア膜
装置

新開発高機能フレキシブル基材

太陽電池
作製技術

石川
製作所

きもと

筒中
プラスチック工業

帝人
デュポンフィルム

日本
合成化学工業

三菱
瓦斯化学

麗
光

I
H
I

独立行政法人 産業技術総合研究所

フレキシブル太陽電池基材 コンソーシアムの基本的運営方針

- 特許については発明者の寄与度に応じた持分比率とする。
- コンソーシアム内で生じた発明は、コンソーシアム内他社へ実施許諾する。
- コンソーシアム内で生じた発明に関して、コンソーシアム外から実施許諾を求められた場合は、出願人間で協議する。
- 研究成果は知的財産出願後に速やかに公表する。

独立行政法人 産業技術総合研究所

フレキシブル太陽電池基材 コンソーシアムの目的と研究内容

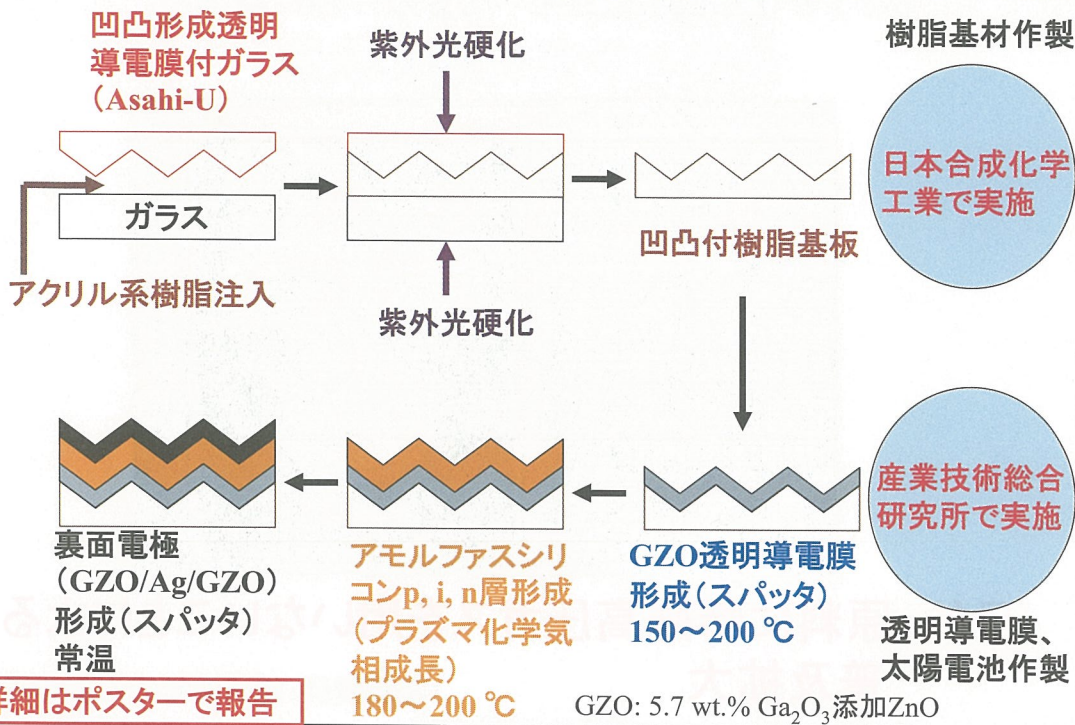
フレキシブル太陽電池用基材を開発することを目的に、ポリマーフィルム上に、高品質の酸化物透明導電膜、水蒸気バリア膜を低温形成するための研究開発を実施。

研究成果の一例

フレキシブルポリマー基材

- 製膜温度の低温化が必須
- 光閉じ込めのための透明導電膜の表面凹凸構造形成が困難
- 基材に凹凸構造を形成(民間企業の技術)と透明導電膜形成技術、太陽電池形成技術(産総研の技術)の融合

光硬化を用いた基材形成プロセスと無機太陽電池形成プロセスの融合



独立行政法人 産業技術総合研究所

アモルファスシリコン太陽電池の評価結果

基板	開放電圧 (V)	短絡電流密度 (mA/cm ²)	曲線因子	効率 (%)
Glass/SnO ₂ (Asahi-U)/GZO	0.92	14.2	0.72	9.4
Glass/GZO	0.94	11.6	0.66	7.1
Plastic with texture/GZO	0.84	14.2	0.67	8.0
Plastic without texture/GZO	0.91	11.7	0.58	6.2

凹凸形成により短絡電流密度が向上し、変換効率が6.2%から8.0%へ増加した。

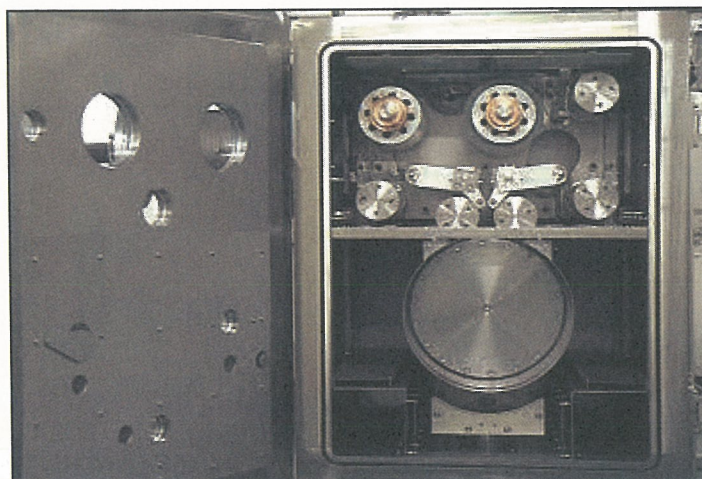
樹脂基材を用いても、樹脂自体に凹凸を形成することにより、アモルファスシリコン単接合太陽電池で8.0%の効率を達成した。

詳細はポスターで報告

日本合成化学工業と共同で実施

独立行政法人 産業技術総合研究所

バリア膜製膜用ロールツーロール型 触媒化学気相成長装置

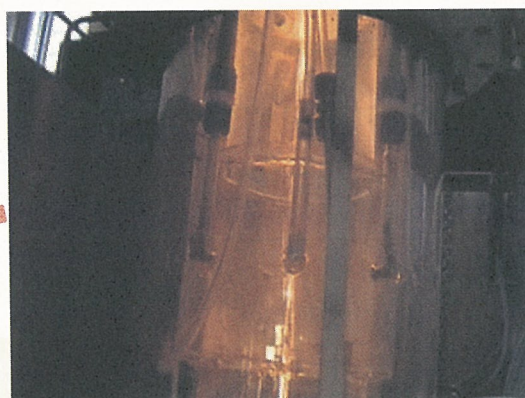
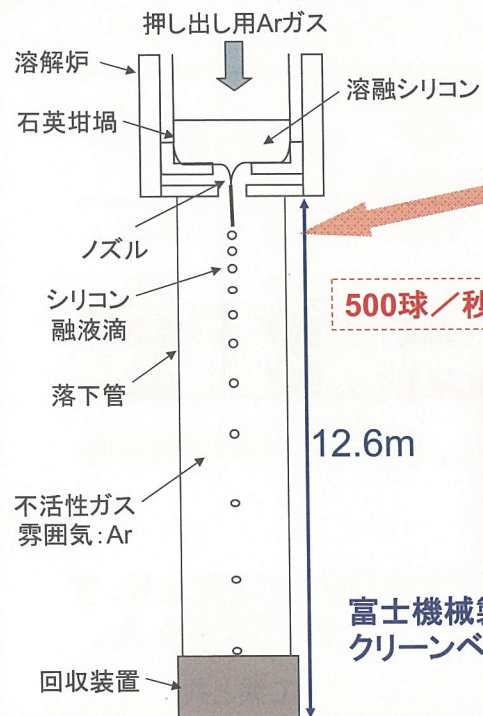


目的:原料に特殊高压ガスを用いないことによる
普及拡大

写真提供:株式会社石川製作所

独立行政法人 産業技術総合研究所

球状シリコン太陽電池



500球/秒

12.6m

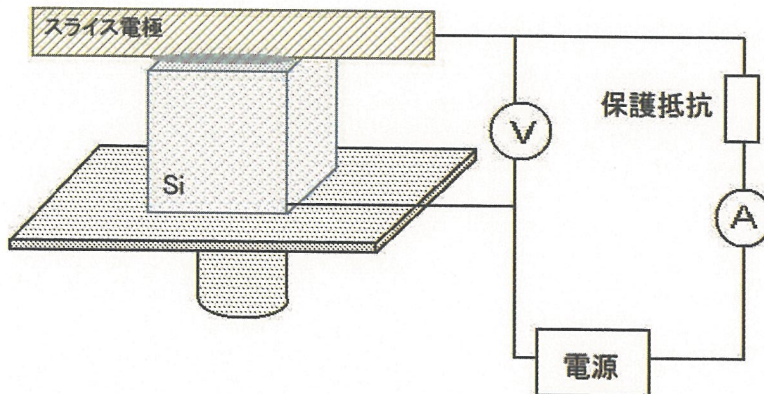


富士機械製造、ジャパングアテックス、
クリーンベンチャー21と共同で実施

詳細はポスターで報告

独立行政法人 産業技術総合研究所

シリコンインゴットのプラズマスライス技術



- 非接触プラズマ → ソーダダメージの回避
- スライス電極の薄型化 → カーフロスの低減

トーヨーエイテックと共同で実施、
一部を名古屋大学に再委託

詳細はポスターで報告

独立行政法人 産業技術総合研究所

まとめ

- 産業化戦略チームは、太陽光発電研究センターで開発した要素技術のみならず、場合によっては産学官が有する太陽電池に関する要素技術をも融合して産業界に移転し、実用化の加速を図ることを第一義の目的としている。
- 目的達成のために、実用サイズに準ずる大きさの試料で試験可能な試作ラインを構築した。
- フレキシブル太陽電池基材コンソーシアムを設立し、民間企業8社と共同研究を実施している。その他、民間企業、大学と数多くの共同研究を実施し、太陽電池業界の将来を担う若手人材の育成にも注力している。

独立行政法人 産業技術総合研究所

化合物薄膜チーム概要 —CIGS太陽電池の研究開発—

仁木 栄

内容

1. 背景
2. 小面積セルの高効率化
3. 界面の評価・制御技術
4. 大面積化技術の開発
5. 窓層材料の開発(デリバティブ)
6. まとめと今後の課題

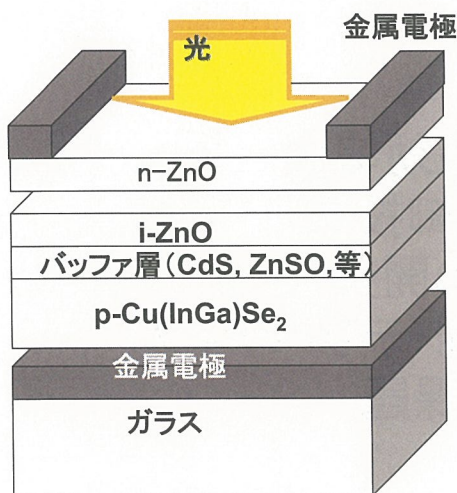
研究の目標

2030年セル効率25%、モジュール効率22%というCIGS太陽電池の効率目標の実現に向けた技術開発を行う。

「高性能なCIGSモジュールを世に出す。」

1. 小面積セルでは、高効率化のための技術的な指針を明確化する。さらに、CIGS光吸収層の高品質化、新バッファ層の探索、透明導電膜の高性能化を図ることで20%を超える革新的な高効率化技術の開発を目指す。
2. 大面積モジュールの高効率化を目指して10cm角で変換効率15%以上のモジュールの作製技術の開発を目指す。
3. 太陽電池研究から派生する新しいデバイスや応用分野の開拓を行う。

CIGS太陽電池の構造と特徴



特徴

1. 変換効率が高い ($\eta = 19.5\%$)
2. 吸収係数が大きく薄膜化可能
 - ・ $\alpha \sim 10^5 \text{cm}^{-1}$: Siの約100倍
 - ・ 吸収層約 $2 \mu\text{m}$ 、全体で約 $3 \mu\text{m}$
 (必要な原料の重量比、Si: CIGS=15kg: 226g)
3. 経年劣化がない
4. 優れた耐放射線性
 - ・ NASDA人工衛星(つばさ:MDS-1)で実証済
5. 低コスト基板を使用可能

CIGS系太陽電池

CIGS太陽電池の量産化への移行

2007年商業生産開始

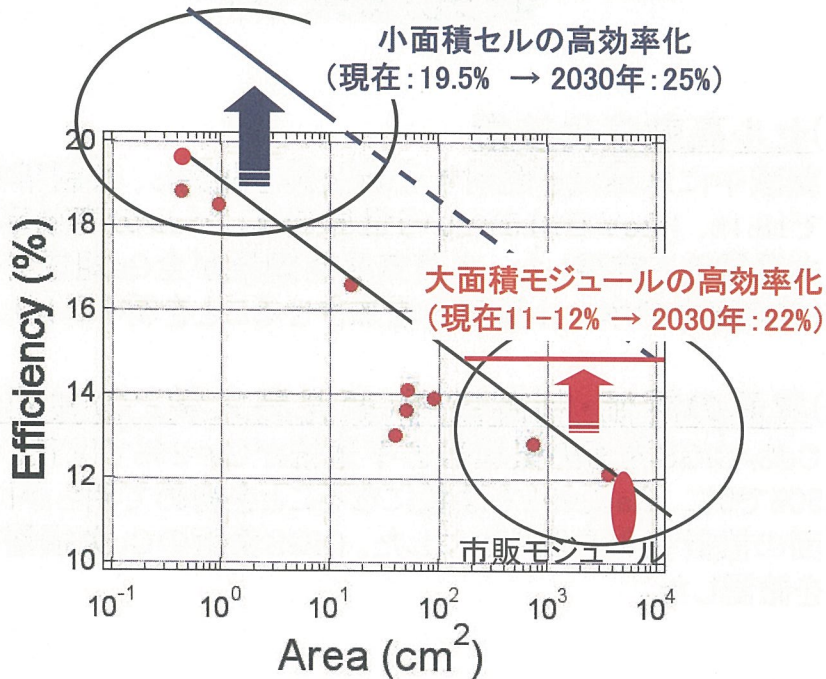
昭和シェル石油(20MW)

ホンダ(27.5MW)

Wuerth Solar(ドイツ:15MW)

ベンチャーも含めたCIGS太陽電池量産化を計画する会社
計21社

CIGSモジュールの効率と面積



研究目標(H18年度)

1)セル高効率化技術

産総研独自のセルプロセスを開発し、CIGS太陽電池の高効率化を図る。

2) 界面の評価・制御技術(鹿児島大学との共同研究)

バッファ層/CIGSの伝導帯のバンド不連続についてGa組成依存性を精密に測定する。界面の設計指針を明確にする。

3)大面積化技術の開発

3-1) Se原料を有効利用する新手法を用いたCIGSセルプロセスを開発する。

3-2) インライン蒸着技術を導入し集積型セルの作製に着手する。

4)窓層材料の開発

4-1) ZnO透明導電膜の特性向上を図る。また、ZnMgO透明導電膜を開発する。

4-2) ZnMgOの物性を評価するとともに、ZnMgO/ZnOヘテロ接合の特性を改善し、ヘテロ接合デバイスの可能性を探る。

研究成果(I)

✓1)セル高効率化技術

製膜中に水蒸気を照射する新技術を開発し、禁制帯幅1.3eVで18.1%、1.2eVで18.5%という世界最高レベルの高効率CIGS太陽電池を実現した。水蒸気照射効果が全Ga組成で有効で、CIGS膜中のホール濃度を増加させることを明らかにした。

✓2)界面の評価・制御技術(鹿児島大学との共同研究)

CdS/CIGS界面の伝導帯の不連続がGa=24%では正、Ga=40-50%で0に、Ga \geq 60%では負になることを初めて明らかにし、界面の設計指針を明らかにした。CIGS表面のCu欠損層の存在を確認した。

研究成果(II)

3) 大面積化技術の開発

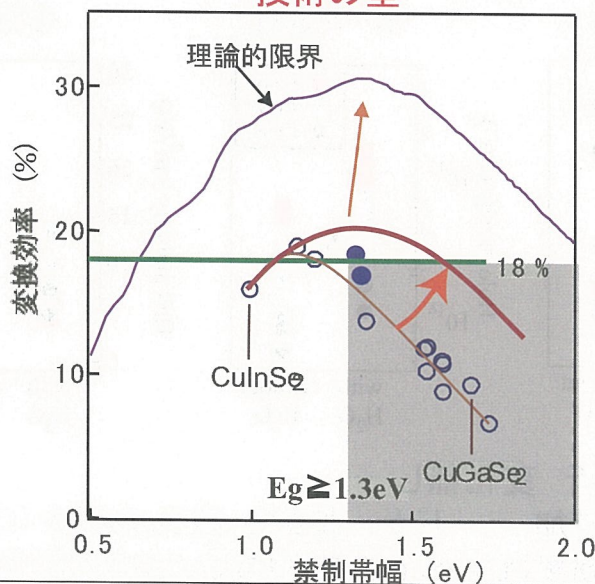
- ✓ 3-1) Se用のラジカルソースを開発し、Se原料の利用効率を約10倍向上、セル効率17.0%(反射防止膜無)を達成した。
- 3-2) インライン蒸着でCIGS膜の均一性を確認した。集積型モジュールの試作を開始した。

4) 窓層材料の開発

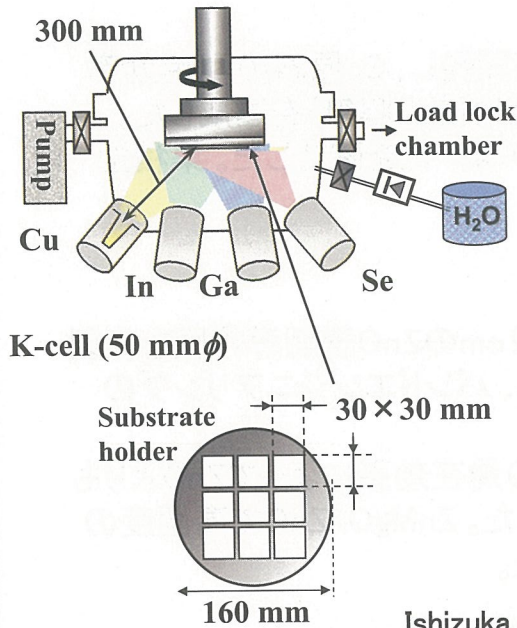
- 4-1) 10cm角で抵抗率 $2.1 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ のZnO透明導電膜を作製した。ZnMgO透明導電膜を実現し、バンドエンジニアリングの可能性を示した。
- ✓ 4-2) ZnMgO薄膜では、励起子の局在効果によってZnOよりも発光効率が向上することを発見した。ZnMgO/ZnOで高濃度の2次元電子ガスの形成に成功した。

2. 小面積セルの高効率化

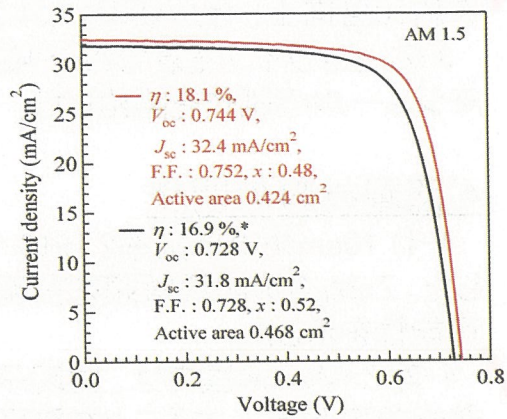
現在最高効率: 19.5% $\xrightarrow{\text{技術の壁}}$ 2020年目標効率: 25%



水蒸気を用いた新しい吸収層製膜法の開発 産総研オリジナルな製膜技術



V_{OC} 、 J_{SC} 同時に向上



Ishizuka et al., JJAP Express Lett. 44, L679 (2005)

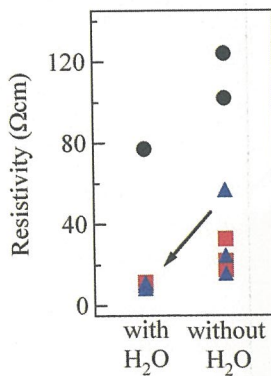
独立行政法人 産業技術総合研究所

水蒸気照射効果のメカニズムの考察

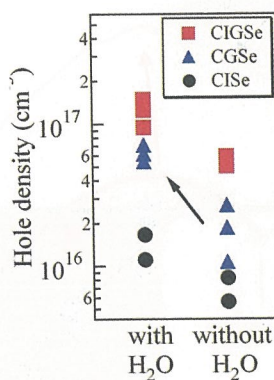
CuIn_{1-x}Ga_xSe₂光吸収層の電気特性(室温ホール効果)

CISe (x=0, ●), CIGSe (x~0.5, ■), CGSe (x=1, ▲)

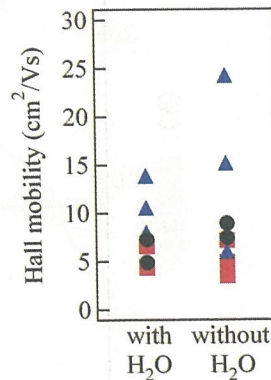
抵抗率



ホール濃度



移動度



- 1) SEM、X線回折 変化無し
- 2) 正孔濃度の増加 ← ドナー型のSe空孔の減少(O_{Se})
- 3) 水蒸気照射効果はすべてのGa組成のCIGS太陽電池に有効

独立行政法人 産業技術総合研究所

小面積CIGSセルの変換効率

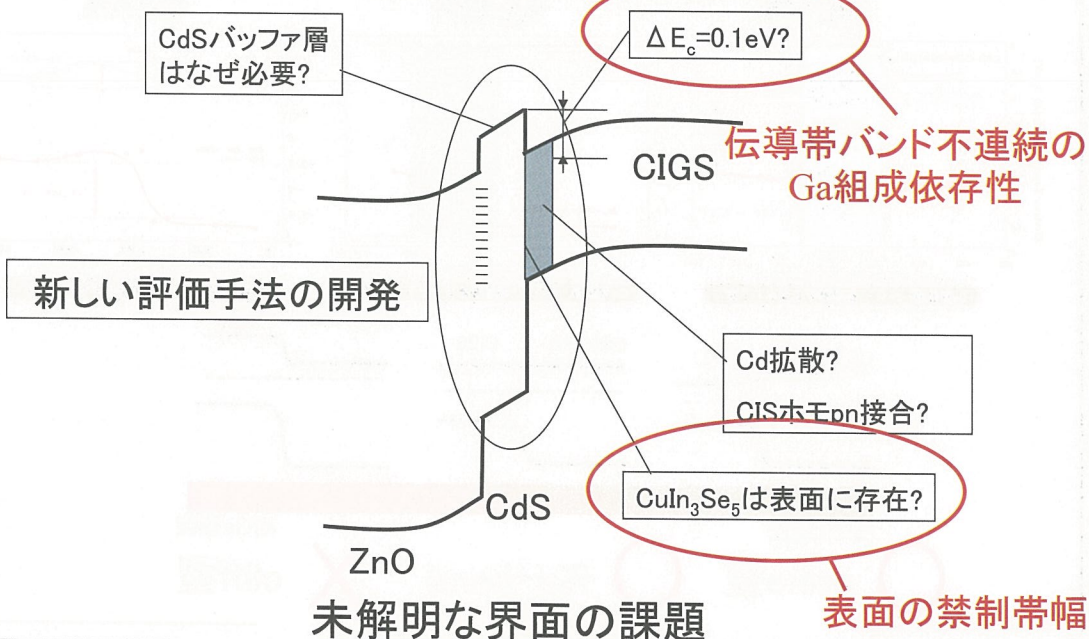
*: 真性効率

セル構造	開放電圧 (V)	短絡電流 (mA/cm ²)	曲線因子	変換効率 (%)	面積 (cm ²)	研究機関
ZnO/CdS/CIGS	0.694	35.2	0.797	19.5	0.412	NREL
ZnO/ZnS/CIGS	0.661	36.1	0.782	18.6	-	NREL, 青学大
ZnO/CdS/CIGS	0.674	35.4	0.774	18.5*	0.96	松下電器
ZnO/CdS/CIGS	0.645	36.8	0.760	18.0*	0.20	青学大
ZnO/CdS/CIGS	0.703	33.2	0.762	17.8*	0.5	シュツットガルト大
ZnO/CdS/CIGS	0.671	33.2	0.790	17.6*	0.19	東工大
ZnO/CdS/CIGS	0.688	35.5	0.755	18.5*	0.491	産総研
ZnO/CdS/CIGS	0.744	32.4	0.752	18.1*	0.424	産総研

独立行政法人 産業技術総合研究所

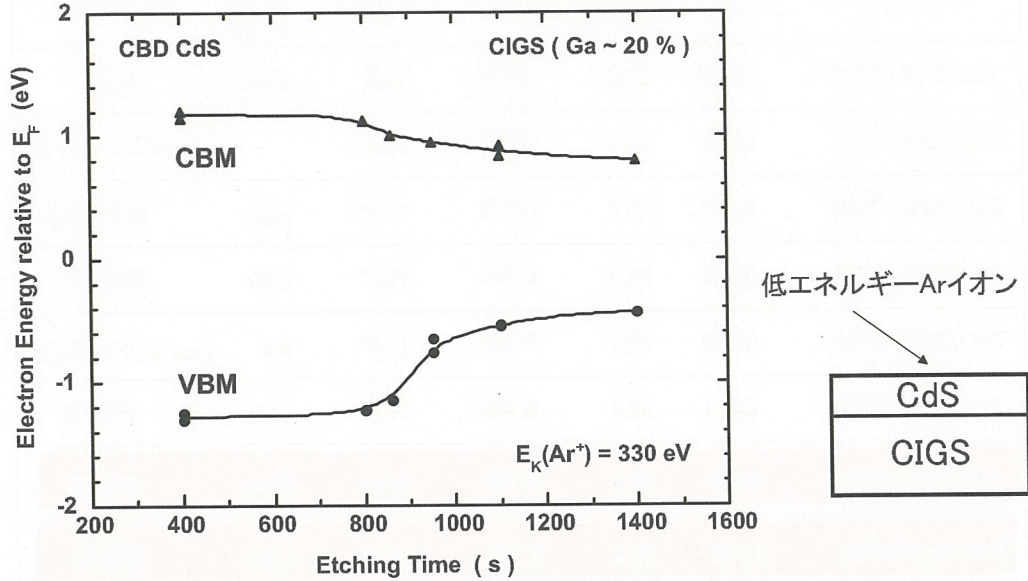
3. 界面の評価・制御技術

(鹿児島大学との共同研究)



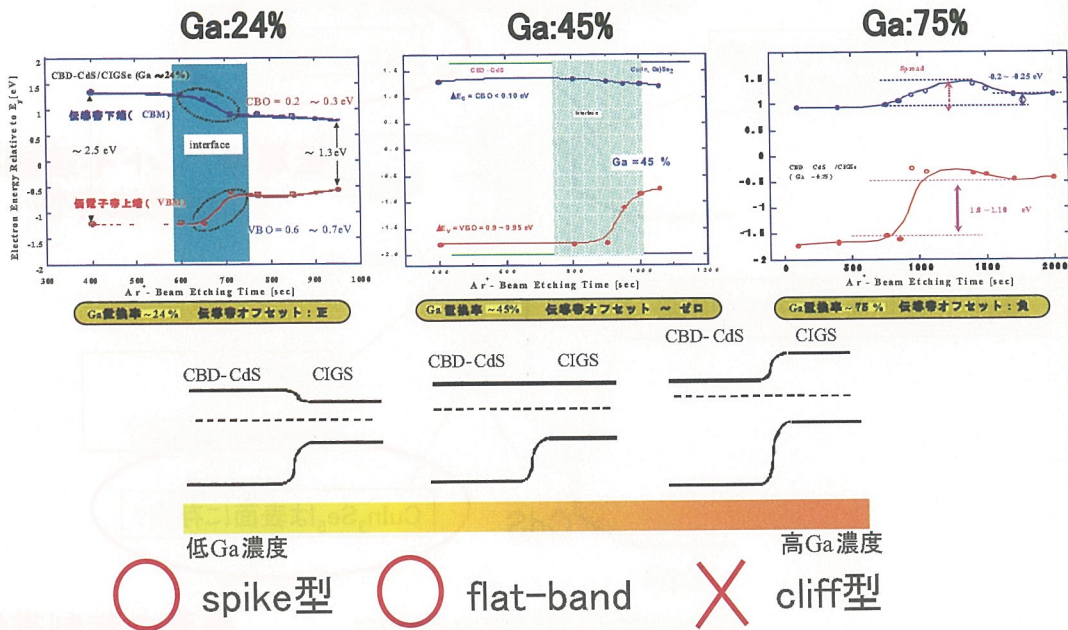
独立行政法人 産業技術総合研究所

正・逆光電子分光法による評価 CBD-CdS/CIGS(Ga~20%)のバンド不連続

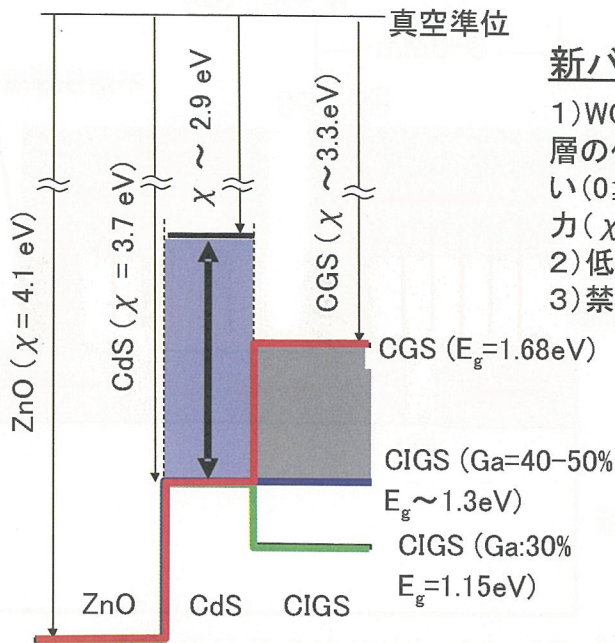


独立行政法人 産業技術総合研究所

CdS/CIGS界面のバンド不連続の Ga組成依存性



界面の設計指針の明確化



新バッファ層材料の選択指針

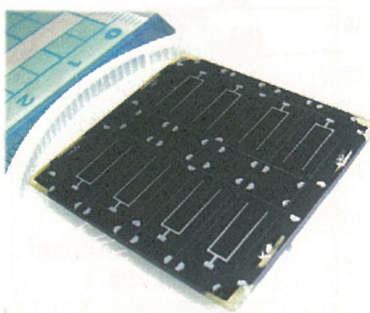
- 1) WG-CIGS ($E_g > 1.3\text{eV}$) よりバッファ層の伝導帯のエネルギーが少し大きい ($0 \leq \Delta E_c \leq 0.4\text{eV}$) 適度な電子親和力 (χ) を持つ材料を選択。
- 2) 低温で製膜可能 (500°C 以下)
- 3) 禁制帯幅が大きい ($E_g > 2\text{eV}$)

系統的な実験をもとに
設計指針を明確化

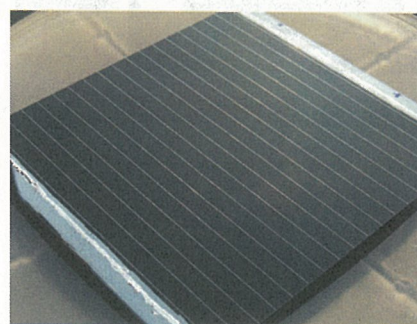
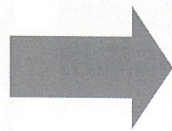
4. 大面積化技術の開発

(産総研マッチングファンドによる企業との共同研究)

インライン蒸着法と集積化技術の開発

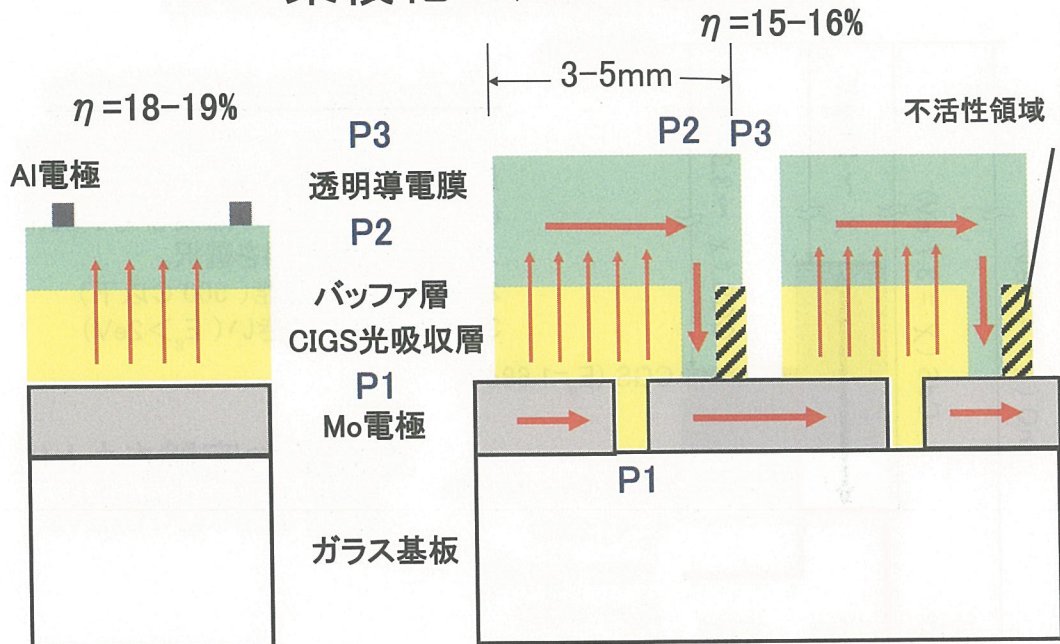


小面積セル



集積型モジュール

集積化モジュール



P1:レーザスクライブ、P2、P3:メカニカルスクライブ

独立行政法人 産業技術総合研究所

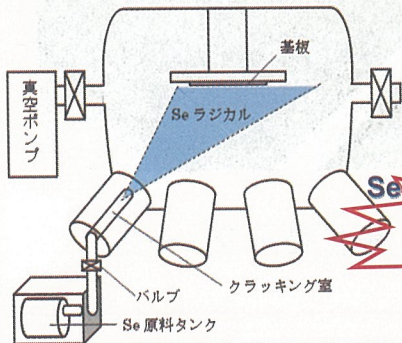
産業化に向けた新製膜技術の開発

●従来技術: るつぼ加熱蒸発 Se_{2-8}

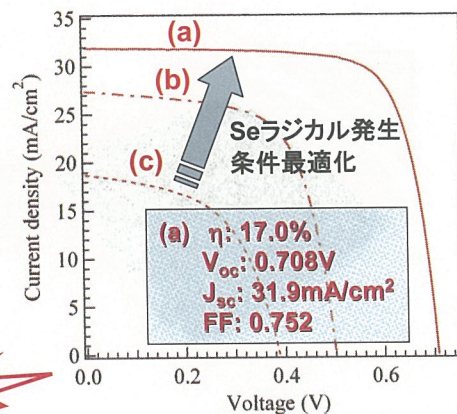


←製膜室内壁に付着した非利用Se(産業廃棄物)

●新技術: Seラジカル源をCIGS製膜に応用



Se原料利用率 10倍以上

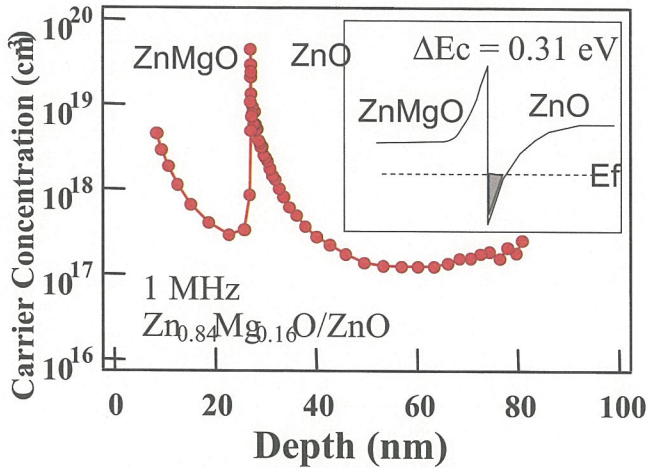


・SeラジカルCIGS薄膜を用いた太陽電池で高変換効率達成

独立行政法人 産業技術総合研究所

5. デリバティブ (ZnO半導体)

- 1) 透明導電膜 (ITO代替)
- 2) 半導体材料 (電子デバイス、光デバイス)



確立した技術

- ・高品質ZnO薄膜製膜技術
- ・電気伝導性制御技術
- ・極性制御技術
- ・非破壊極性判定技術
- ・発光ピークの同定
- ・XANESによる評価技術
- 他

Zn極性ZnMgO/ZnOヘテロ接合で
高濃度の2次元電子ガスの形成に初めて成功
HEMT (高移動度トランジスタ) の開発

独立行政法人 産業技術総合研究所

まとめ

1. 小面積セルの高効率化
独自のプロセスを確立し世界最高レベルの高効率を実現した。
2. 界面・表面・粒界の制御技術の開発
CdS/CIGS界面において伝導帯不連続のGa組成依存性を示し、界面の設計指針を明らかにした。(鹿児島大学との共同研究)
3. 大面積化技術の開発
インライン蒸着装置を開発し、集積化技術の開発に着手した。
4. 窓層材料の開発
ZnO系透明導電膜の性能向上を図り、ZnOを用いた新デバイスの可能性を示した。

今後の課題

- ・小面積セル: 開放電圧の向上、新バッファ層の探索
- ・大面積モジュール: 高品質高速製膜、集積精度の向上
透明導電膜の高品質化、信頼性の評価と向上、
- ・代替材料の開発、希少金属使用量の低減

独立行政法人 産業技術総合研究所

有機薄膜チームの概要

齊藤 和裕

<http://unit.aist.go.jp/rcpv/otf/>

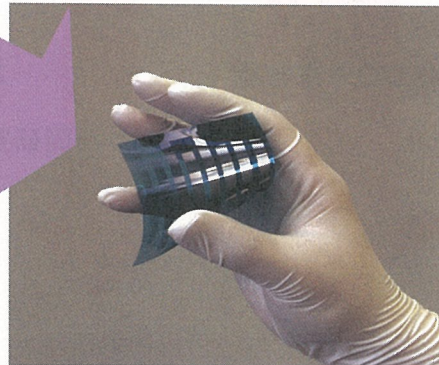
省資源・低環境負荷な太陽電池を目指して



素材・製造コスト両面からの
大幅な低コスト化の可能性

塗布技術を基盤とした低
コスト製造プロセスなど

プラスチックフィルム太陽電池



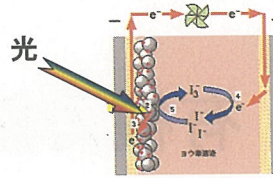
現在主流のシリコン太陽電池

- ・発電コストの課題
- ・資源的な供給の課題

有機系太陽電池の概要

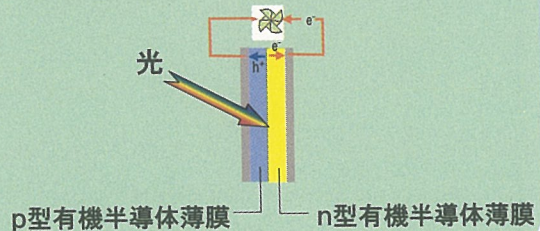
- 光化学反応により発電
- 溶液中のイオンがエネルギーを輸送
- バッテリー同様に液漏れ対策必要
- 厚さ $> 10 \mu\text{m}$

光触媒TiO₂を色素で増感した湿式太陽電池

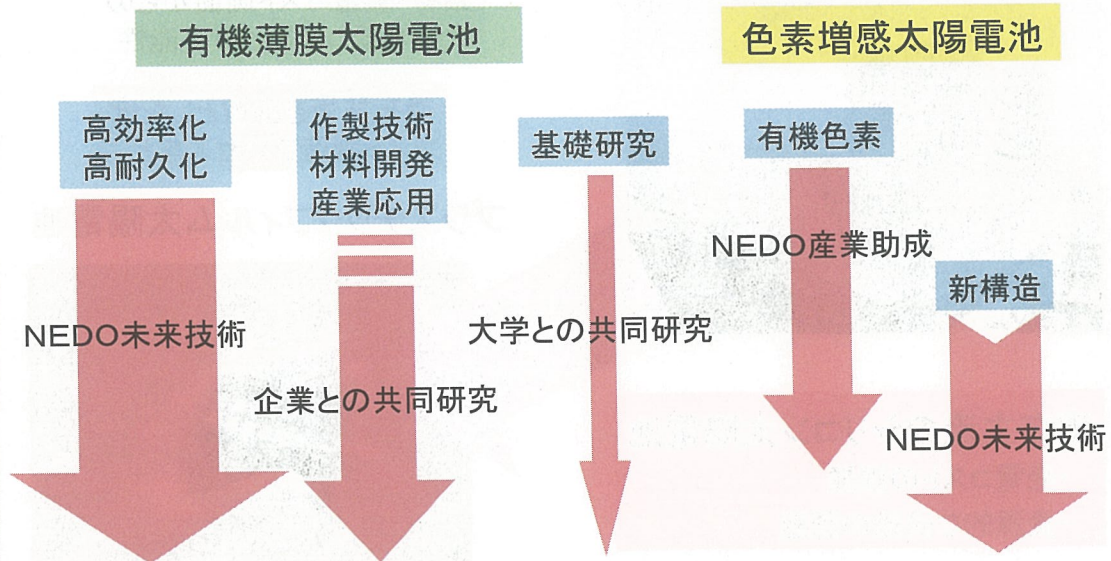


有機分子の半導体性に基づく太陽電池

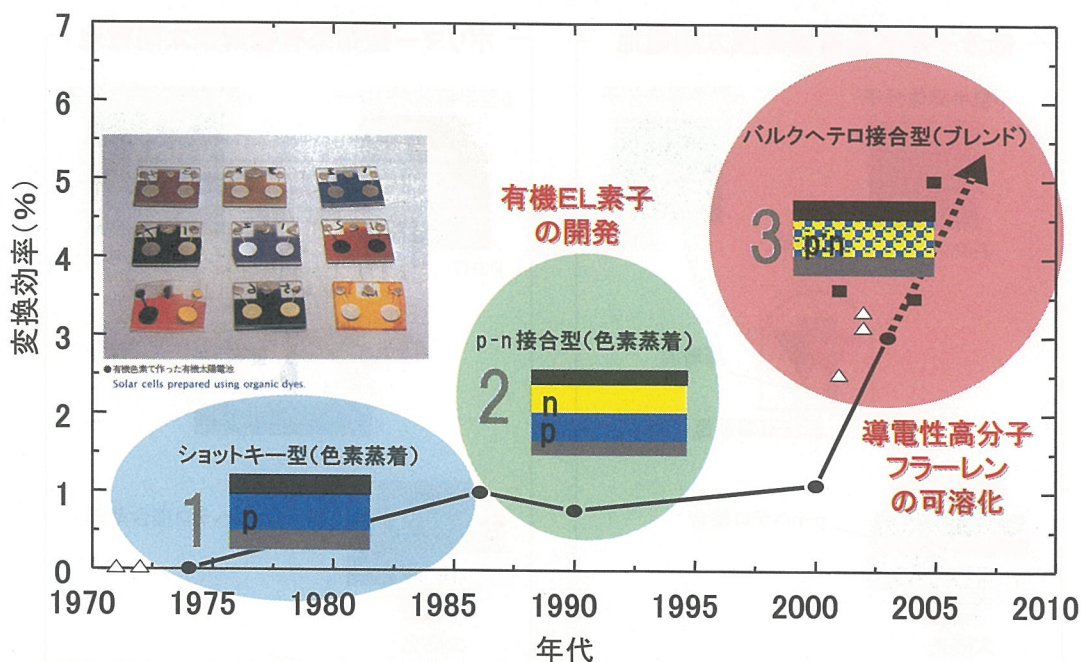
- シリコンと同様に半導体p-n接合が発電
- 固体中の電子がエネルギーを輸送
- 有機EL素子と類似した有機半導体デバイスの一種
- 厚さ $\approx 100\text{nm}$ の固体薄膜太陽電池



チームの研究体制

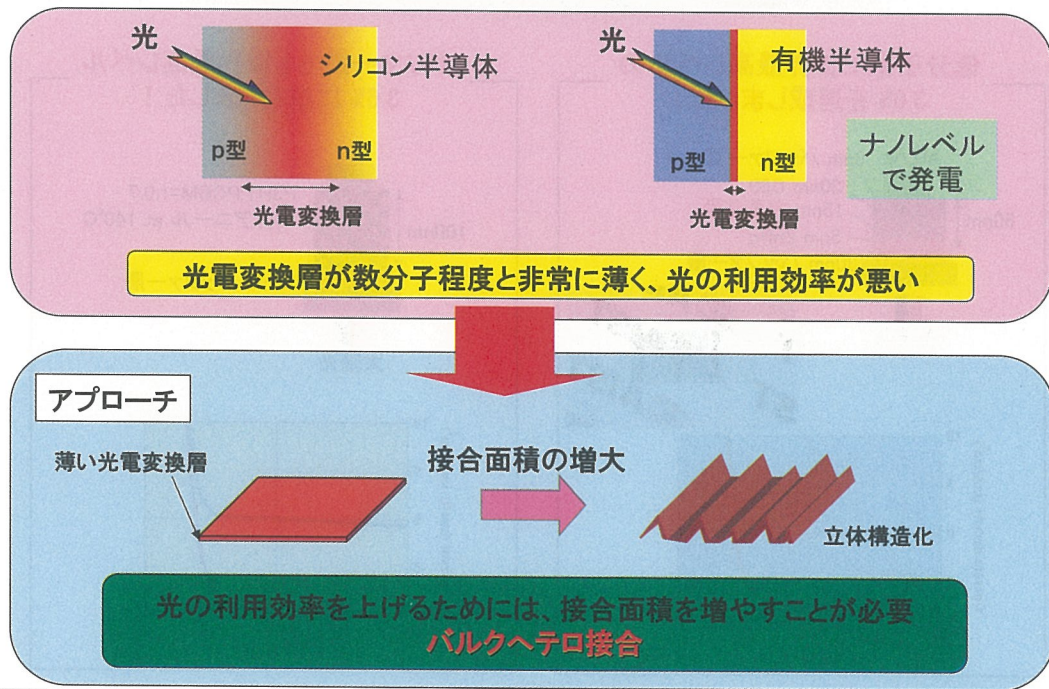


有機薄膜太陽電池の歴史



独立行政法人 産業技術総合研究所

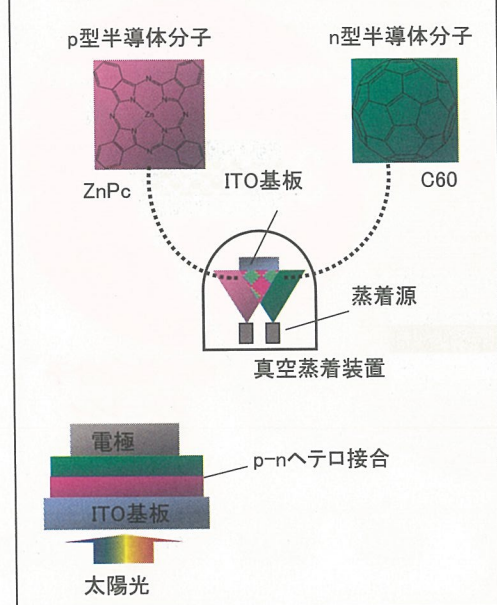
有機薄膜太陽電池の特徴



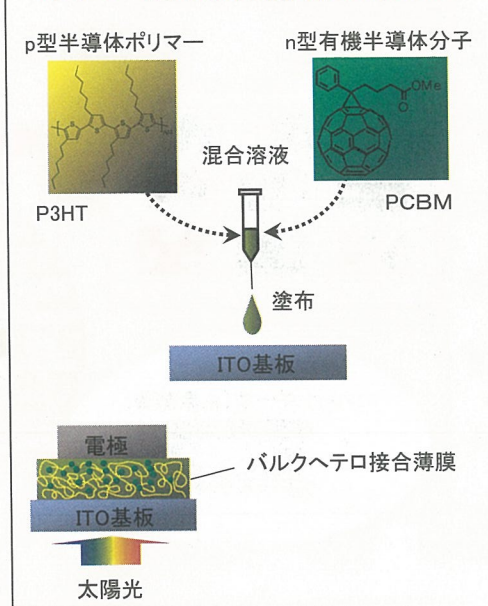
独立行政法人 産業技術総合研究所

有機薄膜太陽電池の作製法

低分子蒸着系有機薄膜太陽電池



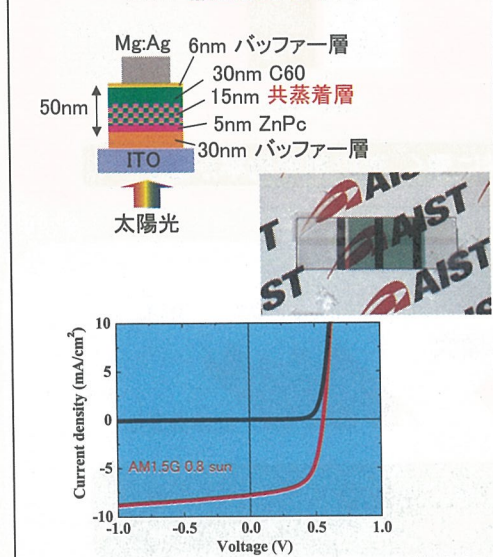
ポリマー塗布系有機薄膜太陽電池



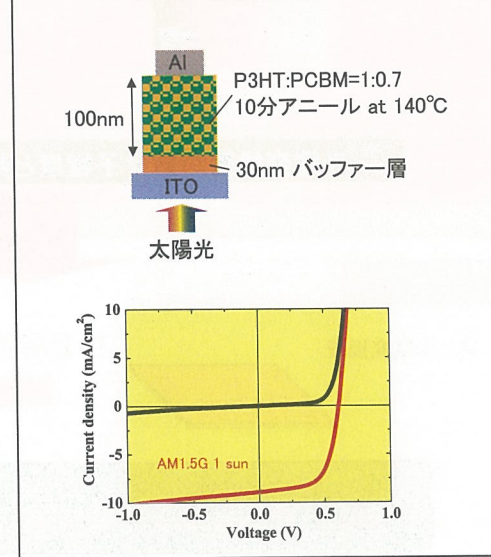
独立行政法人 産業技術総合研究所

昨年度までの成果

低分子系で世界最高レベルの 3.6% を達成しました！



ポリマー系でも世界最高レベル 3.6% に成功しました！



独立行政法人 産業技術総合研究所

更なる性能向上のための取り組み

- 多様な分子構造の活用 → 材料探索
- Vocの向上には → 動作機構の解明
- Jscの向上には → 高光吸収化
- FFの向上には → ナノ構造制御
- 新材料の導入 → デバイス構造最適化
- 耐久性の向上には → 劣化機構の解明
- 有機材料特有の基礎的な物性評価

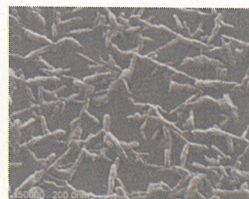
新材料の導入における課題

既報の材料では効率の限界が見えつつある

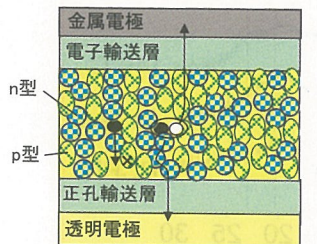
新材料導入
の必要性

共蒸着による
バルクヘテロ接合形成

従来法で良質な
薄膜が必ずしも
形成できるわけ
ではない！

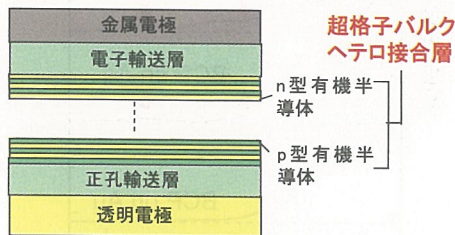


共蒸着による分子の凝集



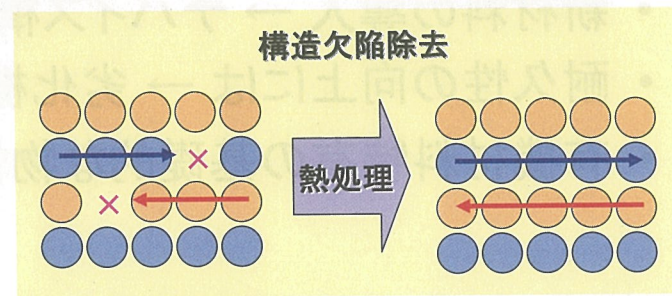
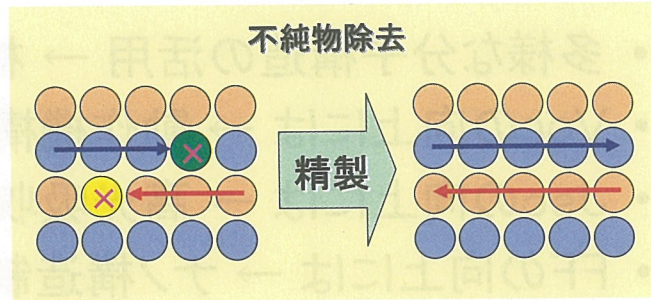
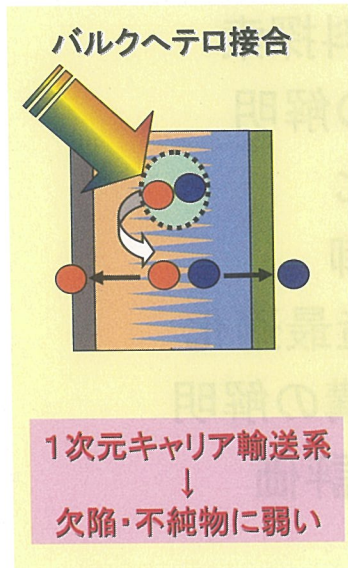
従来のバルクヘテロ接合層構造
(ランダムブレンド)

新構造の導入



超格子バルクヘテロ接合層構造

ナノ構造を制御したバルクヘテロ接合

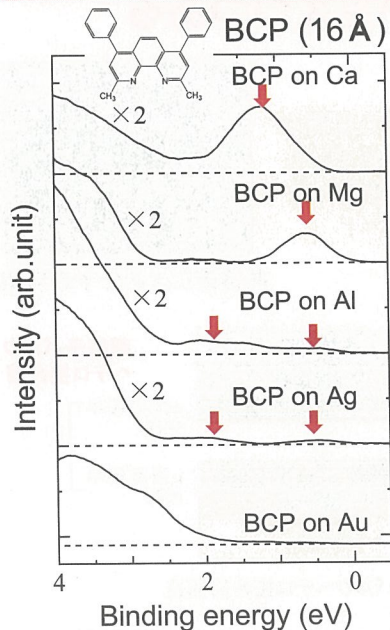


独立行政法人 産業技術総合研究所

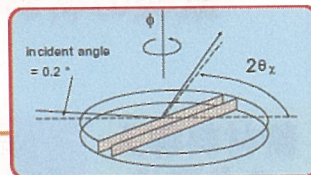
基礎物性の評価 (筑波大との共同研究)

光電子分光による電極界面の評価

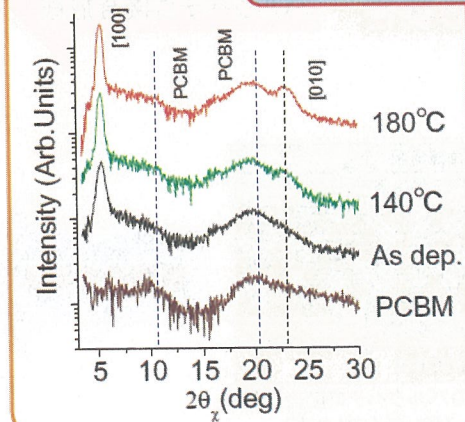
X線回折による有機薄膜の構造評価



膜面内の構造評価



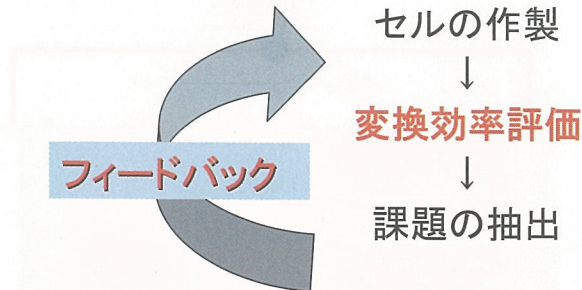
P3HT:PCBM



独立行政法人 産業技術総合研究所

有機系太陽電池評価技術の重要性

- 高効率化のためには



- 同一研究機関での比較→相対評価でもOK
- 他機関との比較→絶対評価が不可欠
- 有機薄膜太陽電池の公式認定記録:

Solar Cell Efficiency Tables

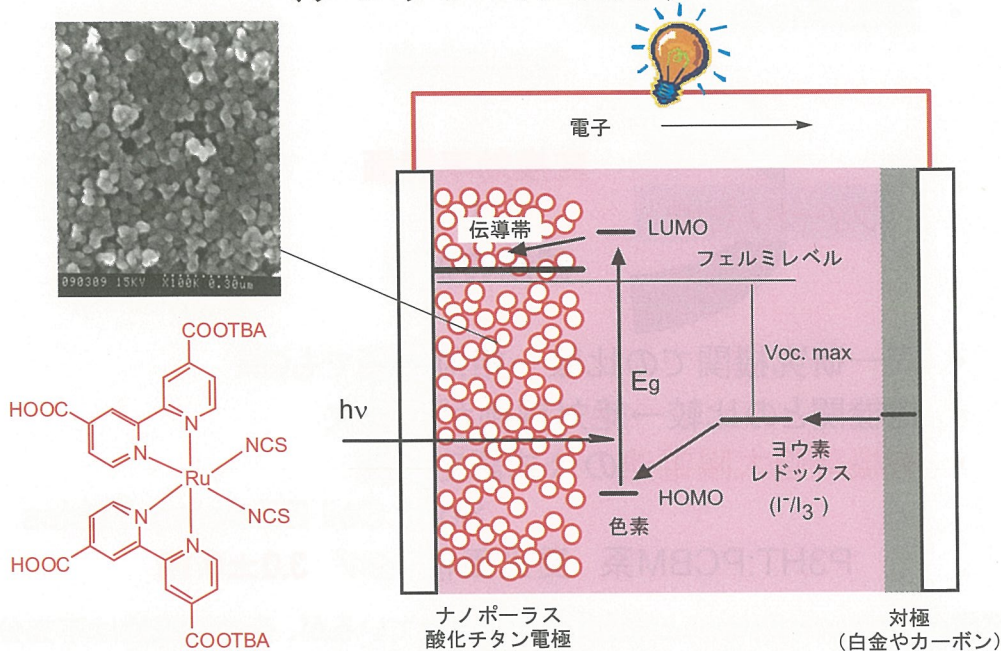
P3HT:PCBM系 受光面積1cm² **3.0±0.1%**

※学会レベルでは5%以上の効率も報告されているが、その信頼性は不十分。

有機薄膜太陽電池のまとめ

- 更なる高効率化と耐久性の向上が当面の研究開発における課題
- セルの特性は、分子構造だけでなく、デバイス構造にも大きく依存
- 高効率をもたらす普遍的なデバイス構造は存在しない
 - 各有機分子の特徴に応じた
最適なデバイス構造の開発

従来型の色素増感太陽電池 (グレッツェルセル)



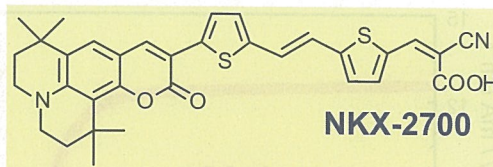
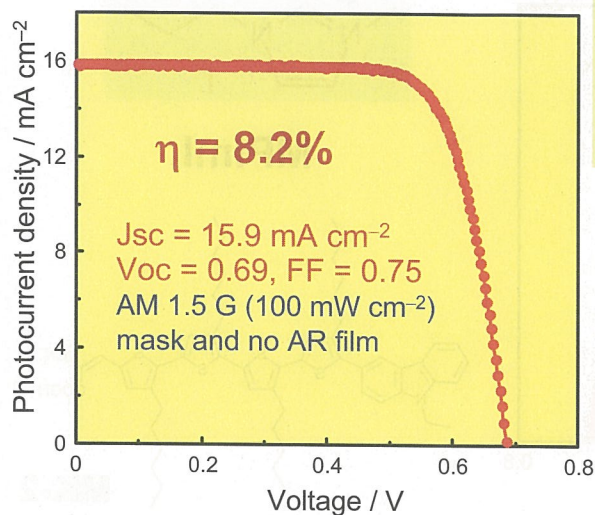
独立行政法人 産業技術総合研究所

有機色素太陽電池の開発

- 高性能の有機色素の開発
Ruの資源的制約がない、高い吸収係数
- 擬固体型電解質
新規イオンゲル電解質
→ セルの安定性の向上
- 電子移動メカニズムの評価
光電気化学的評価(電子寿命、拡散係数)

独立行政法人 産業技術総合研究所

クマリン色素を用いたセル



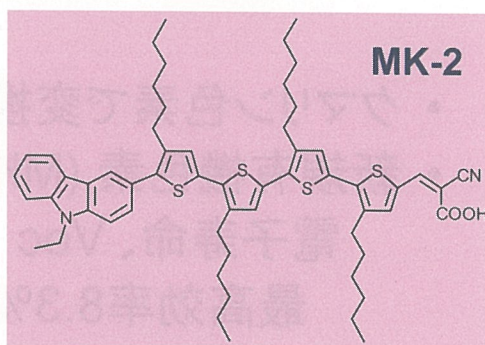
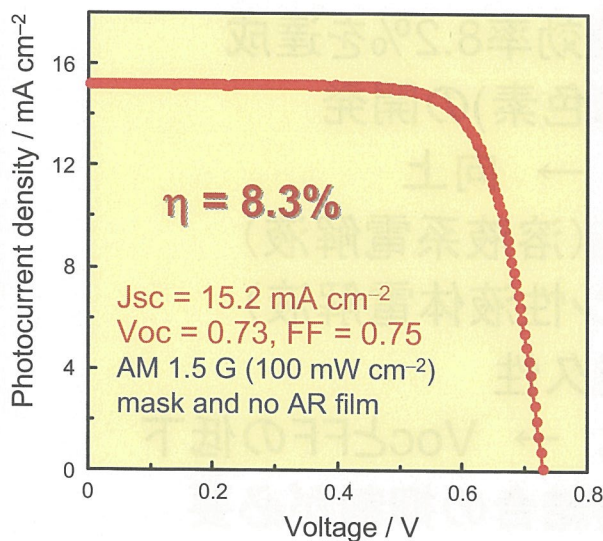
Irradiated light
 AM 1.5G (100 mW cm⁻²)
 with mask, without AR film

Co-adsorbate
 DCA (120 mM)

Electrolyte
 0.6 M DMPImI + 0.1 M LiI +
 0.05 M I₂ + 0.7 M TBP in AN

会合体形成を防ぐ吸着状態が重要

新有機色素の設計・合成

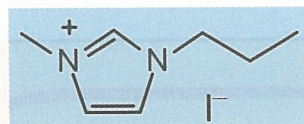
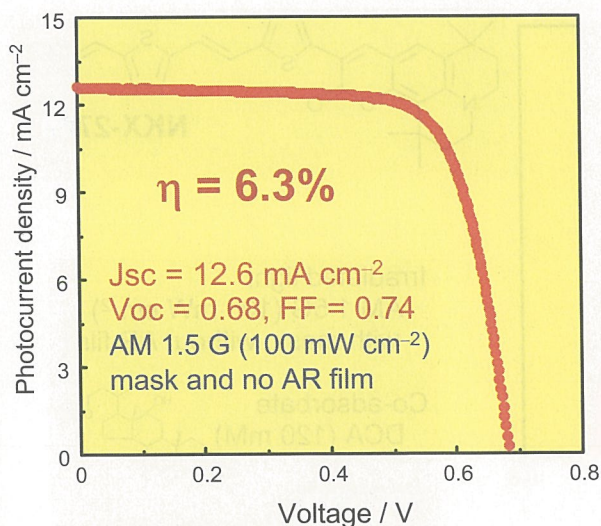


TiO₂ electrode: 16 μm

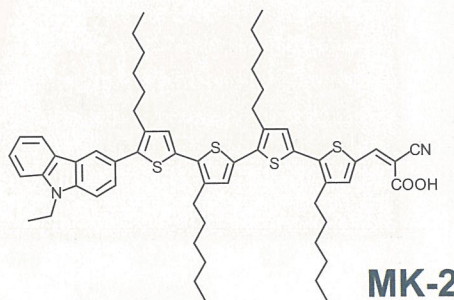
Electrolyte
 0.6 M DMPImI + 0.1 M LiI +
 0.2 M I₂ + 0.5 M TBP in AN

ナノ界面構造制御によりVocが向上

イオン性液体電解液の導入



MPlm1



MK-2

Electrolyte : MPlm1 + 0.04 M Lil + 0.4 M I₂ (H₂O)

有機色素太陽電池のまとめ

- クマリン色素で変換効率8.2%を達成
- 新規有機色素 (MK色素)の開発
 - 電子寿命、V_{oc} → 向上
 - 最高効率8.3% (溶液系電解液)
 - 6.3% (イオン性液体電解液)
 - 比較的良好な耐久性
- 光吸収の長波長化 → V_{oc}とFFの低下
 - 高効率化には再結合の抑制が必要