

# 第4回太陽光発電研究センター 成果報告会



平成20年7月28・29日



独立行政法人  
産業技術総合研究所

## 第4回太陽光発電研究センター成果報告会

日時 : 平成20年 7月28日(月)、29日(火)

場所 : 日本科学未来館 7階

7月28日(月) 開場 10:30

10:30~12:00

座長 坂田 功

開会の辞

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

太陽光発電研究センターの概要と戦略

近藤 道雄 …… i

化合物薄膜チームの概要

仁木 栄 …… 1

12:00~13:00

昼食

13:00~14:40

座長 松原 浩司

シリコン新材料チームの概要

近藤 道雄 …… 14

結晶シリコンチームの概要

坂田 功 …… 25

有機薄膜チームの概要

原 浩二郎 …… 35

産業化戦略チームの概要

増田 淳 …… 46

評価・システムチームの概要

菱川 善博 …… 56

14:40~15:10 コーヒーブレイク

15:10~15:50

座長 増田 淳

特別講演

「オープンイノベーションの再考」

東北大学大学院工学研究科技術社会システム専攻 教授

原山 優子 …… 179

16:00~16:40

座長 仁木 栄

特別講演

「太陽光発電システム市場の現状と日本の課題」

株式会社資源総合システム 代表取締役 社長

一木 修 …… 185

16:50~18:00 パネルディスカッション

「日本が世界と戦うために今なすべきことは何か」

司会 増田 淳

18:00~

意見交換会 (日本科学未来館7階 レストラン バサラ)

7月29日(火) 開場 10:30

|             |                              |          |     |
|-------------|------------------------------|----------|-----|
| 10:30~11:30 | 座長 坂田 功                      |          |     |
|             | CIGS 集積型モジュールの高効率化インライン化技術開発 | 小牧 弘典 …… | 63  |
|             | 高性能透明導電膜の開発                  | 鯉田 崇 ……  | 69  |
|             | 高分子系有機薄膜太陽電池の開発              | 山成 敏広 …… | 75  |
|             | 薄膜シリコン多接合太陽電池の開発             | 松井 卓矢 …… | 86  |
| 11:30~12:30 | 昼食                           |          |     |
| 12:30~14:00 | ポスターセッション                    |          |     |
| 14:00~15:20 | 座長 菱川 善博                     |          |     |
|             | 薄型結晶シリコン太陽電池の開発              | 高遠 秀尚 …… | 92  |
|             | a-SiO:H/c-Si 超薄型ヘテロ接合太陽電池    | 藤原 裕之 …… | 97  |
|             | 発電量評価技術の研究開発                 | 大谷 謙仁 …… | 102 |
|             | 太陽電池のトレーサビリティ技術開発            | 猪狩 真一 …… | 113 |
|             | 飛躍的低コスト化を可能にする薄膜シリコン太陽電池仮想工場 | 小西 正暉 …… | 120 |
| 15:20~      | 閉会の辞                         | 近藤 道雄    |     |

ポスターセッション

\*会場 29日(火) 会議室3

|            | 発表者                        | 題目  |
|------------|----------------------------|---|
| 結晶シリコンチーム  | 坂田 功<br>Isao Sakata        | MBE成長GaPN膜の窒素組成制御<br>Control of nitrogen content in MBE growth of GaPN  |
|            | 高遠 秀尚<br>Hidetaka Takato   | 薄型結晶シリコン太陽電池の開発<br>Development of thin-crystalline silicon solar cells  |
|            | 劉 正新<br>Zhengxin Liu       | 再熔融による球状シリコン品質の向上<br>Improving the quality of spherical Si by remelting   |
| シリコン新材料チーム | 藤原 裕之<br>Hiroyuki Fujiwara | a-SiO:H/c-Si超薄型ヘテロ接合太陽電池<br>a-SiO:H/c-Si ultra-thin heterojunction solar cells  |
|            | 松井 卓矢<br>Takuya Matsui     | 薄膜シリコン多接合太陽電池の開発<br>Development of thin film silicon multijunction solar cells  |
|            | 鯉田 崇<br>Takashi Koida      | 高性能透明導電膜の開発<br>Development of high-mobility transparent conductive oxide  |
|            | 布村 正太<br>Shota Nunomura    | 薄膜シリコン製膜用プラズマCVD診断システムの開発<br>Development of a plasma CVD diagnostic system for thin film silicon deposition                                   |
|            | 永井 武彦<br>Takehiko Nagai    | シランプラズマ中におけるナノダストの挙動<br>Dynamic behavior of nanoparticles in silane plasmas   |
|            | 賈 海軍<br>Hajun Jia          | Ultrafast Deposition of Crystalline Silicon Films Using A New Microwave Plasma Source   |
|            | 齋 均<br>Hitoshi Sai         | 自己組織化構造を利用した薄膜シリコン太陽電池用光閉じ込め構造の開発<br>Light trapping in thin-film silicon solar cells using self-ordered structures                            |
|            | 張 佳文<br>Chia-Wen Chang     | Electronic properties of microcrystalline Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> thin films  |
|            | 近藤 道雄<br>Michio Kondo      | 高圧枯渇法による高品質微結晶シリコン高速製膜技術の開発<br>Development of high-rate deposition process of microcrystalline silicon using a high-pressure-depletion method |
| 化合物薄膜チーム   | 櫻井啓一郎<br>Keiichiro Sakurai | フィードインタリフの特徴、および日本の現行制度との比較<br>Feed-in Tariffs: their features compared with the current Japanese RPS system                                  |
|            | 反保衆志<br>Hitoshi Tampo      | ZnMgO/ZnOヘテロ構造とHEMTデバイス<br>ZnMgO/ZnO heterostructures and HEMT devices  |
|            | 石塚尚吾<br>Shogo Ishizuka     | フレキシブルCIGS太陽電池の高効率化<br>Development of high-efficiency flexible CIGS solar cells   |
|            | 柴田 肇<br>Hajime Shibata     | ZnMgO/ZnOヘテロ構造の光学的性質<br>Optical properties of ZnMgO/ZnO hetero structures   |
|            | 小牧 弘典<br>Hironori Komaki   | CIGS集積型モジュールの高効率化・インライン化技術開発<br>Manufacturing of high-efficiency CIGS integrated modules using in-line deposition technology                  |
|            | 上川 由紀子<br>Yukiko Kamikawa  | CIGS太陽電池裏面電極材料Moの薄膜化<br>CIGS solar cell with thin Mo back contact   |

※ ポスターは28日もご覧になれます。ポスターセッションは29日のみ行います。

ポスターセッション

\*会場 29日(火) 会議室3

|            | 発表者                          | 題目   |
|------------|------------------------------|--|
| 評価・システムチーム | 菱川 善博<br>Yoshihiro Hishikawa | 新型太陽電池セル・モジュールの性能評価技術<br>New PV devices Performance Characterization Technologies  |
|            | 土井 卓也<br>Takuya Doi          | 結晶シリコンモジュールの信頼性評価技術ー複合加速劣化試験ー<br>Long term reliability test of c-Si PV modules --- combined stresses acceleration test ---   |
|            | 高島 工<br>Takumi Takashima     | PVシステムの故障診断技術<br>Fault Location in PV Array  |
|            | 大谷 謙仁<br>Kenji Otani         | 発電量評価技術の研究開発<br>Energy Rating of Photovoltaic Modules  |
|            | 猪狩 真一<br>Sanekazu Igari      | 太陽電池のトレーサビリティ技術開発<br>Technology & Standards: PV Traceability   |
|            | 大関 崇<br>Takashi Oozeki       | 太陽光発電システムの導入可能性に関する研究<br>Estimating potential for the introduction of PV systems into the energy system  |
| 有機薄膜チーム    | 當摩 哲也<br>Tetsuya Taima       | 低分子系有機薄膜太陽電池の開発<br>Development of organic photovoltaic cells based on small molecular weight semiconductors  |
|            | Ivan Turkevych               | Anodic Oxidation of Titanium Nanorods for Application in Dye-sensitized Solar Cells  |
|            | 山成 敏広<br>Toshihiro Yamanari  | 高分子系有機薄膜太陽電池の開発<br>Development of Polymer-based Organic Solar Cells  |
|            | Zhong-Sheng Wang             | Dye-sensitized Solar Cells based on Hexylthiophene-Functionalized Carbazole Dyes   |
| 産業化戦略チーム   | 小西 正暉<br>Masaki Konishi      | 飛躍的低コスト化を可能にする薄膜シリコン太陽電池仮想工場<br>Virtual factory for thin-film silicon solar cells with remarkable low-cost production  |
|            | 柄澤 稔<br>Minoru Karasawa      | フッ素プラズマを用いた薄膜シリコン太陽電池用チャンバークリーニング<br>Study on in-situ chamber cleaning by F <sub>2</sub> plasma for thin-film Si solar-cell fabrication  |
|            | 武山 洋子<br>Yoko Takeyama       | 産学連携対応薄膜シリコン太陽電池試作ラインの構築<br>Construction of test line to produce thin-film silicon solar cells for industry-academia collaboration case  |
|            | 石島 達夫<br>Tatsuo Ishijima     | 並列導波管方式915MHz表面波プラズマによる大面積μc-Si:H膜の高速堆積技術の開発<br>Development of High-Rate and Large-Area μc-Si:H Deposition Technology by Surface Wave Plasma with Parallel Waveguides at 915 MHz |
|            | 根本 茂幸<br>Shigeyuki Nemoto    | プラズマエッチングを用いた省資源シリコンスライス技術の開発<br>Development of advanced slicing technology for silicon ingot by using plasma etching  |
|            | 野辺 丈司<br>Joji Nobe           | アクリル樹脂テクスチャを用いたフレキシブル薄膜シリコン太陽電池<br>Fabrication of flexible thin film silicon solar cells using acrylic resin with texture  |
|            | 仁木 敏一<br>Toshikazu NiKi      | 非シラン原料ガスを用いたフレキシブル太陽電池基板用バリアフィルムの作製<br>Preparation of barrier films without silane for flexible solar cell substrate   |
|            | 竹中 研介<br>Kensuke Takenaka    | 微結晶シリコンの高速製膜法に関する研究開発<br>Investigation of high speed deposition method of μc-Si:H solar cells by the Multi-Hollow-Cathode VHF-PECVD  |
|            | 彌政 敦洋<br>Atsuhiro Iyomasa    | 4m <sup>2</sup> 基板における大面積高速製膜技術の開発<br>The development of large-area deposition technology on a 4 m <sup>2</sup> substrate  |

※ ポスターは28日のご覧になれます。ポスターセッションは29日のみ行います。

太陽光発電研究センターの  
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

洞爺湖サミットで低炭素社会に向けて一段と拍車がかかった状況の中、(独)産業技術総合研究所、太陽光発電研究センターは本年で5年目を迎えます。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150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包括的に網羅しながら研究開発に取り組んでいます。当センターと比較される組織としてはアメリカ NREL、ドイツ フランホーファー研究所がありますが、NREL はどちらかという基礎寄り、フランホーファは企業寄りで、当センターはその中間に位置付けられ、基礎と応用の両方をバランスとりながら進めています。

当センターの成果報告会は今年で4回目となり、400名を越える方の参加登録をいただきました。今年からはPV-JAPAN、RE2008とも連携しながら、太陽光発電の普及活動に寄与していきたいと考えています。またこのセンターをより国際的に認知される研究開発拠点としてゆきたいと考えています。



## 2. センターの研究戦略

当センターは材料からシステムまで、基礎から産業化までを包括的に網羅する国内で唯一の研究機関であり、その強みを生か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。また、産総研は1970年代半ばのサンシャインプロジェクト発足当時から行政と一体で太陽光発電の技術開発と普及促進に継続的に関与してきた歴史があります。

当センターのミッションはポリシーステ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。

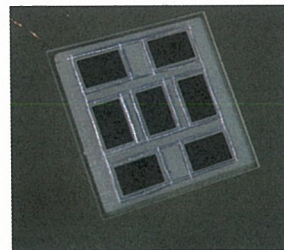
- (1) 新規太陽電池材料およびデバイスの開発、評価
- (2) 太陽電池の標準化と評価技術の開発
- (3) 太陽光発電システム運用、評価技術の開発
- (4) 太陽光発電を通じた国際協力

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優先度が高いと考えます。また、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が、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。現時点ではすべての材料に可能性があり、異なったマーケットで棲み分けられていくことを想定しています。これは総花的という批判を受けるかもしれませんが、言い換えると国の機関としてはリスク分散という意味で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ていくことこそ当センターの強みと考えています。

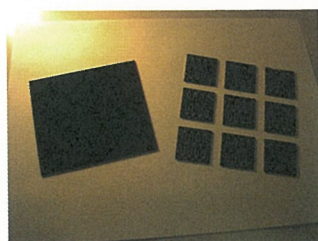
結晶シリコンについては資源制約とコスト低減のために厚さ 100 ミクロン以下の薄型化と 20%を超えるさらなる高効率化のためのデバイス技術の開発が引き続き重要です。薄型ウエーハやシリコンの使用効率を高める新しいスライス技術、様々なシリコン原料やウエーハの評価技術、球状シリコン太陽電池の開発などもあわせて行っています。結晶シリコン太陽電池は技術的にかなり成熟していると考えられていますが、当面は依然マーケットの主役であり、この分野での技術競争に勝ち残ることが今後の産業の足元を固めることになる重要な意味を持っていると考え、センターとして継続的に取り組んでいく予定です。

薄膜シリコンは資源制約を受けず、量産化によるコストメリットが大きいという理由から世界的に生産規模の拡大が始まっています。日本ではシャープが 1GW の薄膜シリコン太陽電池生産を目指すという報道が話題になっていますが、世界でもそれに匹敵する動きが欧州をはじめとして、中国、台湾、最近では中東にまで広まってきています。これらの動きを支えているのは装置メーカーによるフルターンキーの供給ですが、薄膜シリコンにおいてははまだ材料、デバイスともに改良の余地が大いにあり、まだまだ研究レベルでの開発要素はたくさんあります。当センターではこれまでアモルファスシリコン、微結晶シリコンの高品質高速製膜技術、デバイス化技術、透明導電膜などで多くの企業と共同研究を行い、産業化を支えてきました。今年度は三菱重工業(株) 殿との共同研究の成果として 今後次世代の太陽電池の柱の一つとして薄膜シリコンの技術開発に取り組みます。当面はセルレベルで 16%、中期的には 18%を目指した研究を行います。当センターでは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。



微結晶シリコンゲルマニウムで作成された単接合セル。

多接合で重要な長波長領域の電流を増加させる新しい概念に基づいた光閉じ込め技術の開発も併せて行っています。また、薄膜太陽電池ではデバイス、モジュール化に重要な透明導電膜の高性能化では極めて高い  $130\text{cm}^2/\text{Vs}$  の移動度を誇る透明導電膜の開発に成功しています。



蒸着法で作成された CIGS 太陽電池セルとサブモジュール

化合物薄膜は Cu-In-Ga-Se (CIGS) 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。これまで研究レベルで高い効率が得られてきた方法は 3 段階法と呼ばれる蒸着法でしたが、現在実用化されているのはセレン化法と呼ばれる方法です。後者はコスト的には優れるものの、効率的にはやや劣ります。当センターでは効率に優れた蒸着技術の実用化に取り組んでいます。現在ではコスト的に



問題であったセレンの使用量を劇的に減らす技術を駆使して 10cm 角の大きさのモジュールまで作れるようになっており、モジュール効率で 15.9%を得ています。量産に適したインライン製膜技術の開発も行っています。またフレキシブル基板へもこれらの技術を適用し、金属箔、ポリマー基板上で世界最高レベルの効率を得ています。今後は特に太陽光とマッチングの良い 1.3~1.5eV のバンドギャップを有する材料の開発に重きをおいており、単接合セルの高効率化、タンデム化に向けて研究を進めていく予定です。

有機・色素系太陽電池は将来の低コスト太陽電池の候補として注目されています。最近では有機 EL を用いたテレビが商品化されており、この分野の進展は目覚ましいものがあります。太陽電池も思ったより早く市場に登場するかもしれません。現状ではまだ効率も低く、耐久性も劣るので技術的課題は残りますが、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。有機薄膜太陽電池の発生電圧は無機半導体のそれとは異なっていることが最近示唆されており、将来には新しい原理の有機太陽電池の出現も期待されます。



観葉植物型有機薄膜太陽電池モジュール（三菱商事、トッキとの共同開発、環境展に出展）

色素増感太陽電池は 1990 年ごろに現れ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太陽電池として注目されています。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、揮発性の低い電解液を用いた高耐久性太陽電池の開発に注力しています。

太陽電池においては評価技術は大変重要な意味を持っています。それは商品の価値が出力電力で決まるからで、1%の相対変換効率の誤差は数十億円という経済効果を生みます。したがってより精度の高い性能評価が求められます。最近では従来のシリコンに加えて新しい材料、多接合などの新しいデバイスが商品化されており、シリコンと同じ評価方法では精度を確保することが難しくなっています。同時に、商品としてのモジュールはサイズ拡大の一途をたどっており、正確な評価が技術的にますます難しくなっています。当センターでは世界最高記録を認定するのに必要な公認機関としての役割を担っています。また新しい太陽電池、大面積モジュールの性能評価技術の開発を行っており、これからの多様化する太陽電池産業への対応を急いでいるところです。



一次基準セル。太陽電池性能評価の原器となるもの。

性能評価技術の根幹をなすのは一次基準セルと呼ばれる太陽電池の原器です。これは絶対効率を評価するために物理標準に対してトレーサブルでなければなりません。また、中立性や精度の高さを維持するための体制を確立しておく必要があります。

す。当センターでは本年から ISO/IEC17025 に基づく一次基準セル校正の第三者認定を獲得し、基準セル校正の恒久的体制の確立に向けて大きく前進させました。

太陽光発電はシステムとしての動作、効率向上が重要です。また、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も重要です。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。屋外での発電量評価について屋外測定データから様々な気象条件化で発電量を予測する技術を開発しています。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。

太陽電池は屋外で長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



産総研に設置されたモジュール屋外試験サイト

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。

日本では現在フィールドテスト事業によって大型のシステムの導入を図っています。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大型システム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して取り組んでいます。

システムの導入量が増えてくると既存の系統連系への影響が懸念されるようになってきますが、システムを安定化させる手段としては蓄電、燃料転換、他の電力ソースとの複合化などが考えられます。これらの中で、まずは既存の電力設備の運用だけでどこまで太陽光発電が導入可能かについて検討を行い、88GW という推定値を得ました。これは 2030 年の長期需給見通しの中の新エネ進展ケースでの太陽光発電導入量 53GW を超えるものです。

大規模な導入のためには太陽電池の低コスト化と併せて大量生産が求められます。そこで当センターでは仮想的な大規模工場を設計し、そこにどのような技術開発要素があるかを抽出することで今後の技術開発指針を得ようとしています。今年度は薄膜シリコンを取り上げ、10GW 規模の工場を建設し、モジュール製造原価 50 円/W を実現するための技術要素を抽出しました。



30x40cm<sup>2</sup> 基板サイズの薄膜シリコン製膜装置。

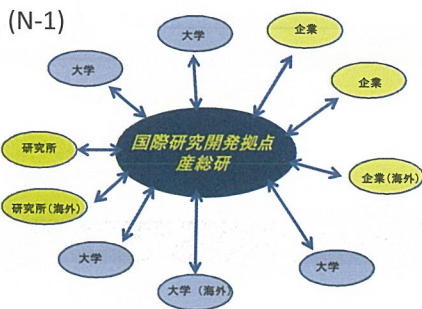
情報化社会の現代では挑戦的な基礎技術の開発と迅速な産業化がこれからの日本に求められる基本的な戦略という認識の下、当センターでは企業ニーズを的確に捉えセンター内の技術シーズを合致させるように先導していく産業化戦略チームを設置しています。これは太陽光発電関連産業の裾野を広げ、新たな企業参入を喚起し、より骨太な太陽光発電産業群を国内に形成することに資するものと考えています。実験室サイズと量産サイズの間中間的なサイズでの製膜装

置を用いて基礎技術を半製品に適用、実証していくことでより迅速な産業化が促進できることを期待しています。また、このような設備は企業から出向される若手技術者の人材育成にも有用であると考えています。

太陽光発電はまだまだエネルギーとしては独り立ちできる大人ではありません。今は思春期といったところでしょう。大人になりきれず、子供でもなく、今の成長の仕方でのどのような大人になるかが決まってくる過渡的な状態といえます。だからこそ、さまざまな側面から日本がここまで育て上げてきた太陽光発電技術、産業を世界レベルで通用する立派な大人に成長させるための支援策が必要と考えます。私どもの役割は技術的側面からの支援であり、日本の企業競争力を高め技術力と製品の質で国際競争力を高めることに資してゆきたいと考えます。

その一方で太陽光発電はグローバルな産業であり、国際協調もまた重要な柱です。産総研としては国の中立的機関として世界の学術的研究機関と学術的技術的交流を深め、太陽光発電技術のボトムアップに努めます。また、優れた技術を有する外国企業とも積極的に連携し、日本企業とのWIN-WINの関係が構築できることを目指す仲介役も果たしたいと考えています。

このように当センターが果たすべき役割は、技術開発だけでなく産業基盤の強化、高度人材育成、国際協力、さらには国民への啓蒙活動、政策支援にいたるまで太陽光発電のすべてを網羅する拠点機能を持つことであると考えております。



その機能により、さまざまな要素技術や知見が拠点を通じて効率的に統合され、要素技術間の互恵的な連携を強化することを目指したいと考えます。当センターでは今般、経産省から革新型太陽電池国際研究拠点に選定していただき、次世代の革新的太陽電池開発

に向かって拠点機能を強化していきたいと考えております。

### 3. 終わりに

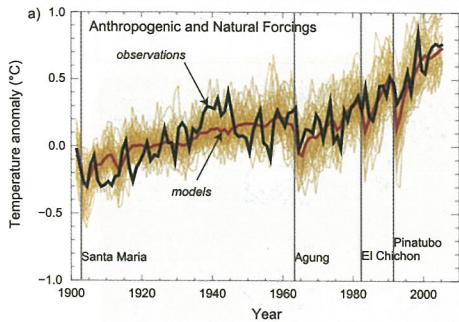
最後に、当センターの活動に対し日頃御支援頂いている経済産業省、NEDO および国内外の大学、研究所、民間企業等関係各位に厚く御礼申し上げると共に、一層の御指導、御鞭撻を賜りますよう心からお願い申し上げます次第です。

第4回太陽光発電研究センター  
成果報告会  
平成20年7月28日

(独)産業技術総合研究所  
太陽光発電研究センターの  
概要と戦略

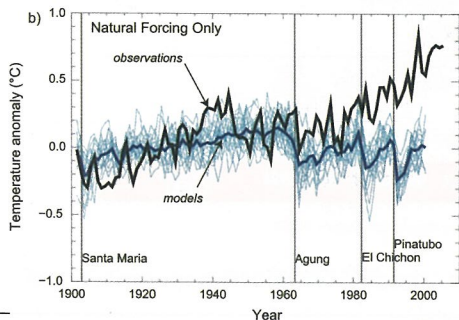
太陽光発電の現状  
Current status of PV

# Global Warming is unequivocal



## 予想される影響 Anticipated impacts

- 異常熱波 heat wave
- 海面上昇 rising sea level
- 水不足 water availability
- 局地的異常気象 local anomaly
- 大型台風 tropical cyclone
- 生態系の変化 (種の絶滅)  
extinction



この10~20年の対応が重要

## 福田ビジョン (Fukuda-vision)

長期目標                      CO2 削減 60~80% ~2050  
Long term target            mitigation  
   -14% by 2020

低炭素社会実現への責任  
Commitment for low carbon society

太陽光発電の普及              X10 ~2020 , x40 ~2030  
Deployment of PV system -> Current status 1.7 GW

世界最大のメガソーラ (電気事業者)  
World largest mega-solar

新築住宅 の70%以上にPV  
>70% newly built house with PV

コスト削減、系統安定の技術開発  
R&D for Cost reduction, stability of grid

料金体系の見直し  
Tariff system : DE 500 yen/month

### Innovative energy technologies for COOL EARTH

— 重点的に取り組むべきエネルギー革新技術 —

エネルギー源毎に、供給側から需要側に至る流れを俯瞰しつつ、効率の向上と低炭素化の両面から、CO2大幅削減を可能とする「21」技術を選定。



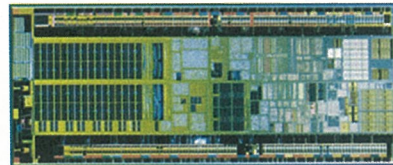
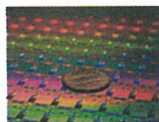
\*HEMS: Energy Management System, HEMS: House Energy Management System, BEMS: Building Energy Management System

<http://www.meti.go.jp/press/20080305001/02cool-earth-p.r.pdf>

独立行政法人 産業技術総合研究所

### 従来のイノベーションの例

技術: 半導体



集積化、小型化 の技術 1チップの中に1000万個のトランジスタ  
高速化、低消費電力



製品: モバイルコンピュータ、携帯電話、インターネット、ICカード



社会的変化: IT社会

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 太陽電池によるイノベーション

技術：太陽電池、材料、デバイス

低コスト化技術（高性能、長寿命、省資源）



製品：低コスト太陽電池、ゼロエミッション住宅、  
低燃費自動車、太陽光発電所



社会的変化：低炭素社会 脱化石燃料依存社会  
消費からリサイクルへ **パラダイムシフト**

## 今年度(2008)のテーマ

日本の国際競争力を強化するための戦略  
Enforcement of competitiveness in the global scale  
→ パネルディスカッション

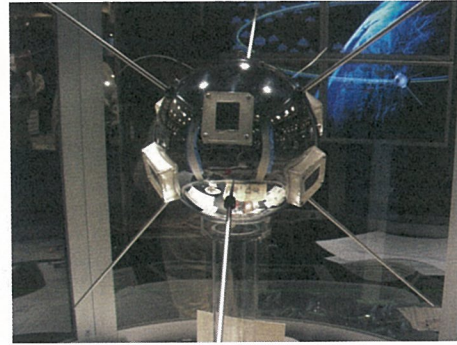
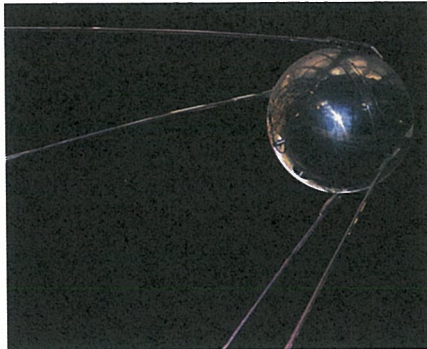
キーワード：オープン イノベーション  
Open Innovation

産学官連携  
コンソーシアム  
国際共同研究

(国際標準化)

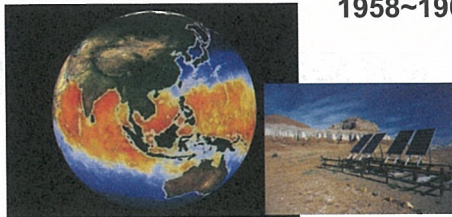
# エネルギー・エコ イノベーション

50 years anniversary !



SPUTNIK 1  
1957 last 21 days

Vanguard 1  
1958~1964 last 6 years



## Cost reduction

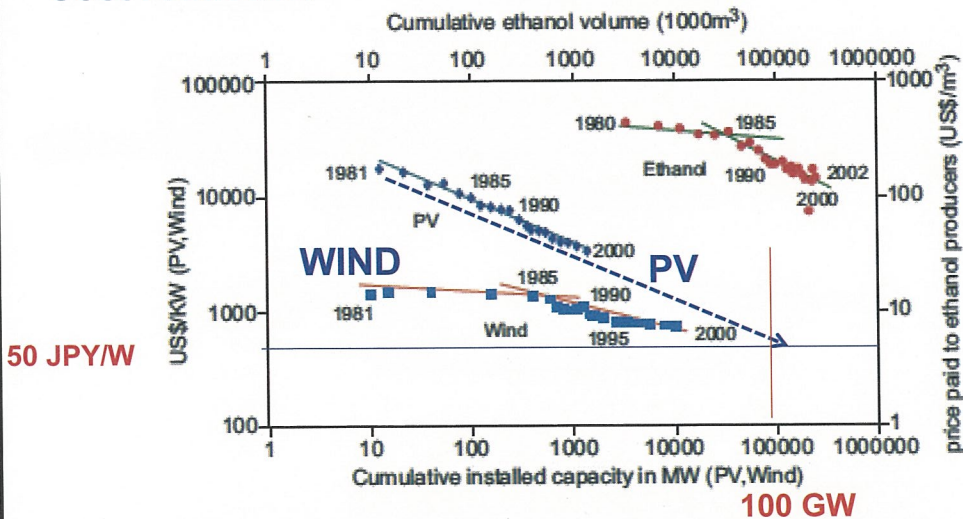


Figure 4.11: Investment costs and penetration rates for PV, wind and bioethanol systems showing cost reductions of 20% due to technological development and learning experience for every doubling of capacity once the technology has matured.

Source: Johansson et al., 2004.

IPCC AR4



Future prospect for energy demand and supply (METI 2008)

Renewable energy

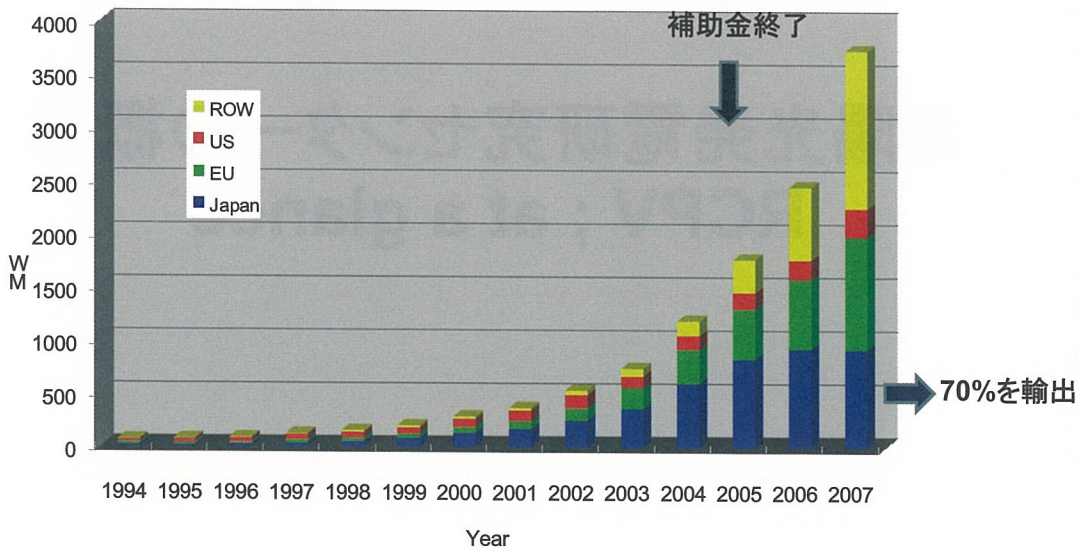
$\times 10^4 \text{ kl}$

Developed case

|         | 2005        | 2020        | 2030         |
|---------|-------------|-------------|--------------|
| PV      | 35 ~ 1.4 GW | 350 ~ 14 GW | 1300 ~ 50 GW |
| Wind    | 44          | 200         | 269          |
| Biomass | 394         | 723         | 917          |
| Other   | 687         | 763         | 716          |
| Hydro   | 1732        | 1931        | 1931         |
| Total   | 2892        | 3967        | 5133         |

太陽電池生産

日本のシェアの低下 → 産業競争力低下を懸念



From PV News, Paul Maycock, editor

1GW PV = 300,000 t CO2 reduction

### 世界の太陽電池生産企業 (2005/2006/2007)

| 2005             | 2006                 | 2007                         |      |
|------------------|----------------------|------------------------------|------|
| Sharp(428)       | Sharp(434)+1.5%      | Q-Cells(389.2)+53.8%         | 結晶Si |
| Q-Cells(166)     | Q-Cells(253)+52%     | Sharp(363) -16.4%            |      |
| Kyocera(142)     | Kyocera(180)+27%     | Suntech(327)+107.6%          |      |
| Sanyo(125)       | Suntech(158)+93%     | Kyocera(207)+15%             | CdTe |
| Mistubishi(100)  | Sanyo(150)+20%       | <b>FirstSolar(207) +245%</b> |      |
| SchottSolar(82)  | Mitsubishi(111)+11%  | MOTECH(196)+78%              |      |
| Suntech(82)      | MOTECH(110)+83%      | Sanyo(165)+6.5%              | 薄膜Si |
| <b>Thin Film</b> | <b>Thin Film</b>     | <b>Thin Film</b>             |      |
| Unisolar(22)     | FirstSolar(60) +200% | Unisolar(48) +71.4%          |      |
| Kaneka(21)       | Unisolar(28) +27%    | Kaneka(40) +33%              |      |
| FirstSolar(20)   | Kaneka(30) +42%      | MHI(16) +33%                 |      |

## 太陽光発電研究センターの概要 RCPV ; at a glance

- (1) 新規太陽電池材料およびデバイスの開発、評価  
R&D for new materials and devices  
→ コスト低減、環境負荷低減  
Cost reduction, lower environmental impacts
- (2) 太陽電池の標準化と評価技術の開発  
Characterization, testing, standardization  
→ 産業基盤の確立 (国際競争力の強化)  
infra structure for industry
- (3) 太陽光発電システム運用、評価技術の開発  
System operation, evaluation  
→ エネルギー源としての基盤強化  
infra technology for energy source
- (4) 太陽光発電を通じた国際協力  
International cooperation  
→ 国際貢献、競争力強化

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  
Technology transfer  
中立的立場での評価、政策策定への貢献  
Impartiality



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19年度 平成18年度

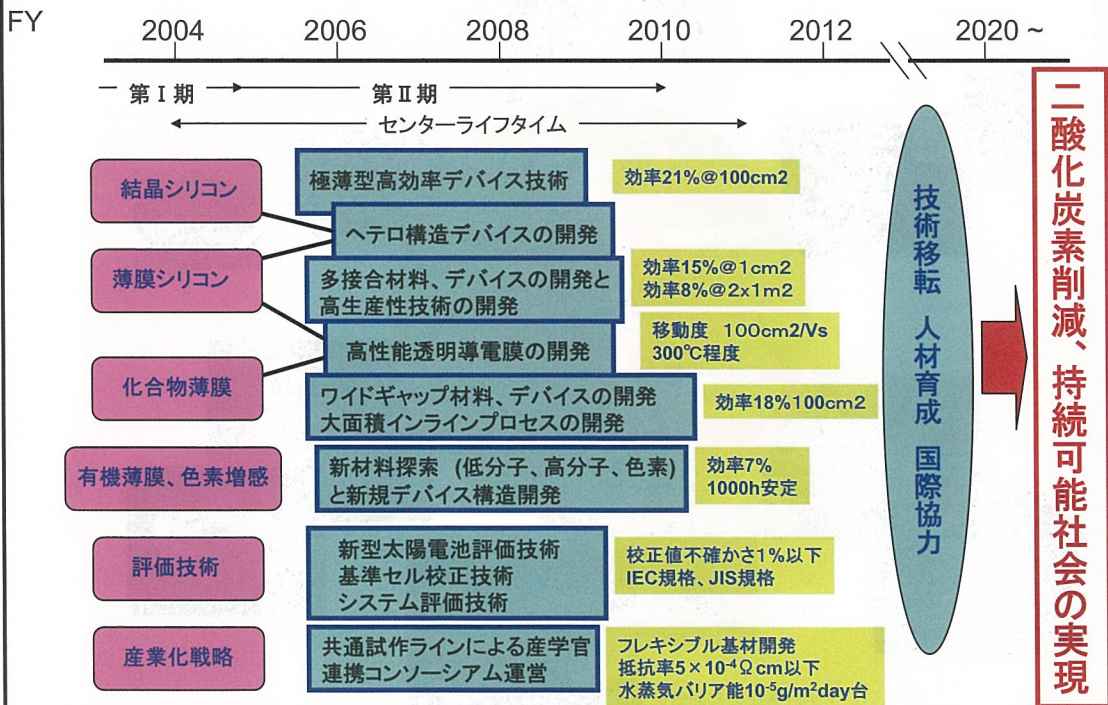
運営費交付金 (インセンティブ) 299 (149) 358 (133)

外部資金 (純粋民間資金) 612 (103) 1352 (111)

総額 911 1710

職員数 30名 総数 150名超

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



# 課題別戦略

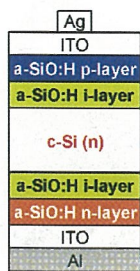
## 結晶シリコンの戦略 → 薄型化 21%@ <100μm

スライス技術  
→ プラズマスライス

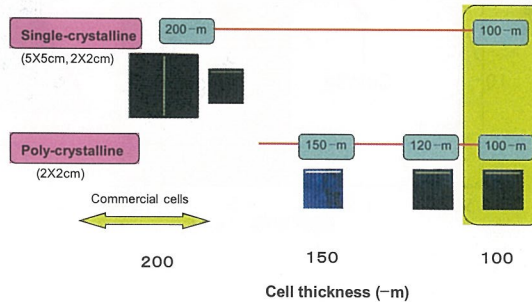
トーヨーエーテックと共同



## 薄型高効率化技術 → ヘテロ接合、光閉じ込め

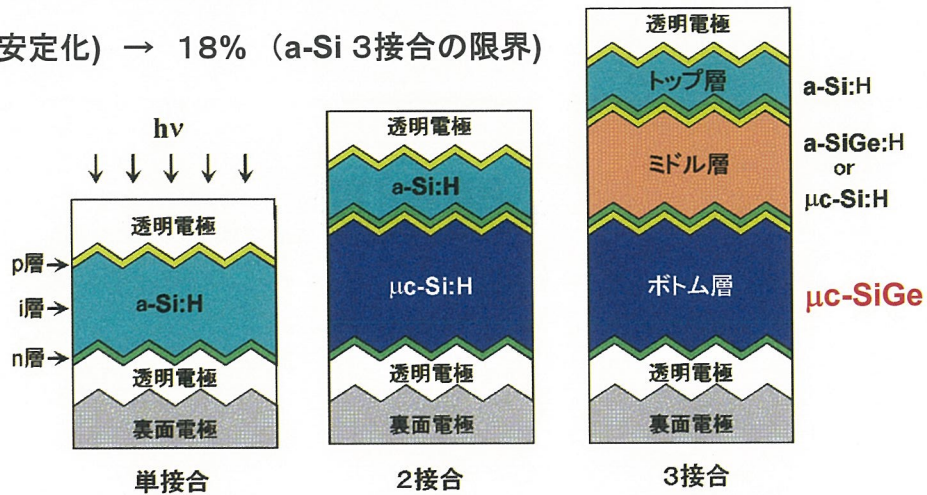


HIT  
50 μm cell



## 薄膜シリコンの戦略→多接合化 $\mu\text{c-SiGe}$

15% (安定化) → 18% (a-Si 3接合の限界)

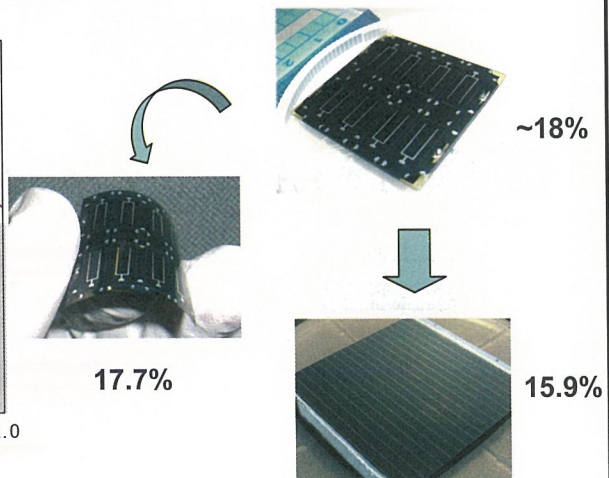
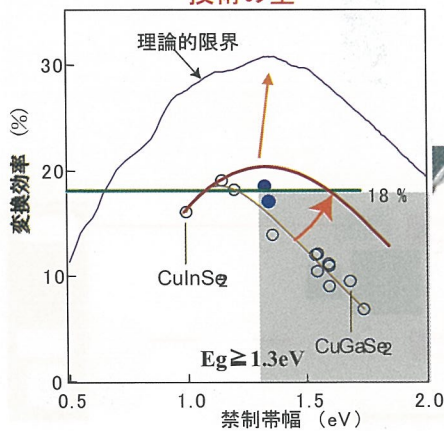


| 研究開始年 | 1976年～        | 1997年～      | 2000年～           |
|-------|---------------|-------------|------------------|
| 変換効率  | 9.5% (ヌシャテル大) | 11.7% (カネカ) | 2010年NEDO目標: 15% |

## 化合物薄膜(CIGS)の戦略

Wider band gap >18% Advantage over Si

現在最高効率: 19.5% → 2020年目標効率: 25%  
技術の壁



# 基盤(板)材料 (透明導電膜)の戦略

高移動度、低抵抗材料 > 100 cm<sup>2</sup>/Vs

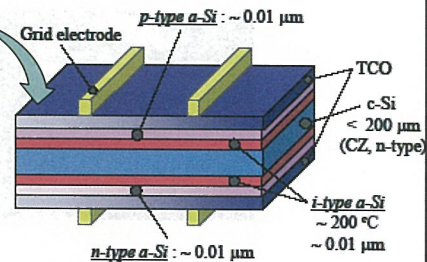
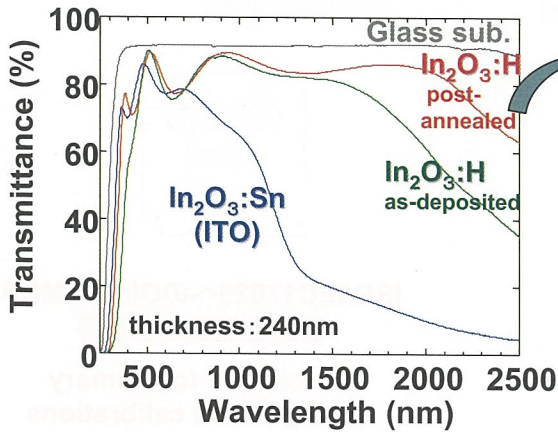


Figure 1: Schematic diagram of a HIT solar cell.

HIT device

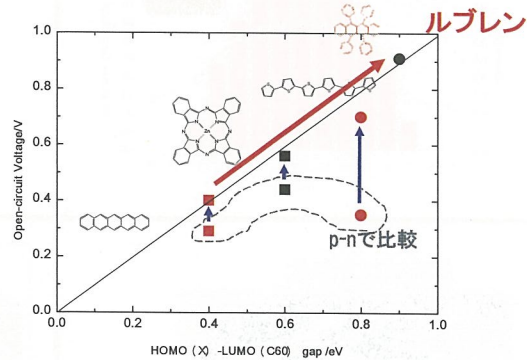
Higher Jsc due to lower absorption loss

# 有機、色素系の戦略

4% → 7% へ

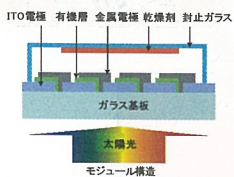
高効率化への革新 → 材料、デバイス基本構造

ルブレんで Voc=0.91V 達成



Voc= 1.0 V, 1.1eV K.Leo et.al. Advanced Materials, 18, 2872(2006)

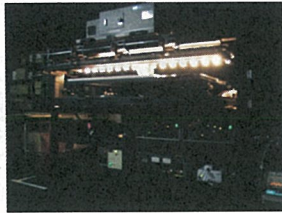
新しい動作原理の可能性



## 評価・システムの戦略 1

産業基盤の強化による国際競争力の維持と  
PVの普及拡大の加速

モジュール内セルの分光感度の測定  
SR measurements of cell (module)



STC,STC外での性能評価(Si,  
多接合, 化合物, DSC)

一次基準太陽電池セル  
校正システム

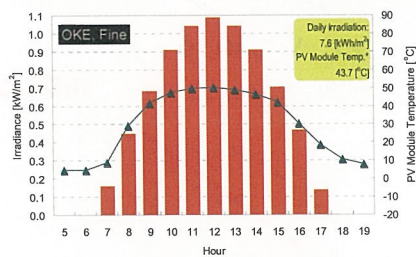


ISO/IEC17025へのGlobal MRA  
な適合性認定を取得

Accredited for primary  
reference cell calibrations

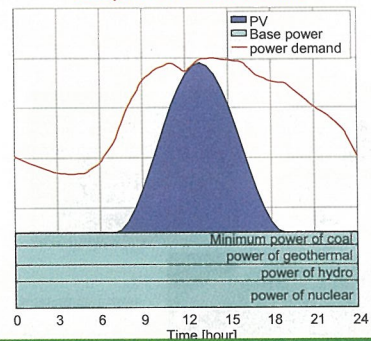
## 評価・システムの戦略 2

発電量評価のためのモードの提案



PV導入可能量の評価

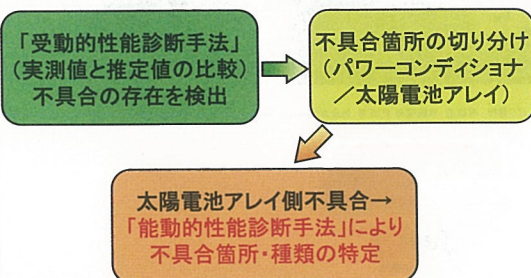
Base power + PV < Power Demand



複合加速劣化



太陽光発電性能診断システム

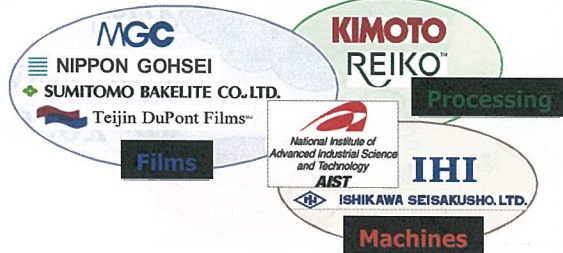




# 産業化戦略

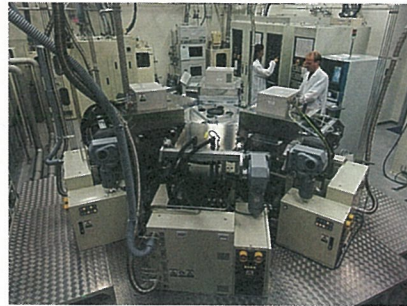
基礎技術の迅速な移転  
オープンイノベーションの実践

フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム  
Flexible solar-cell substrates consortium

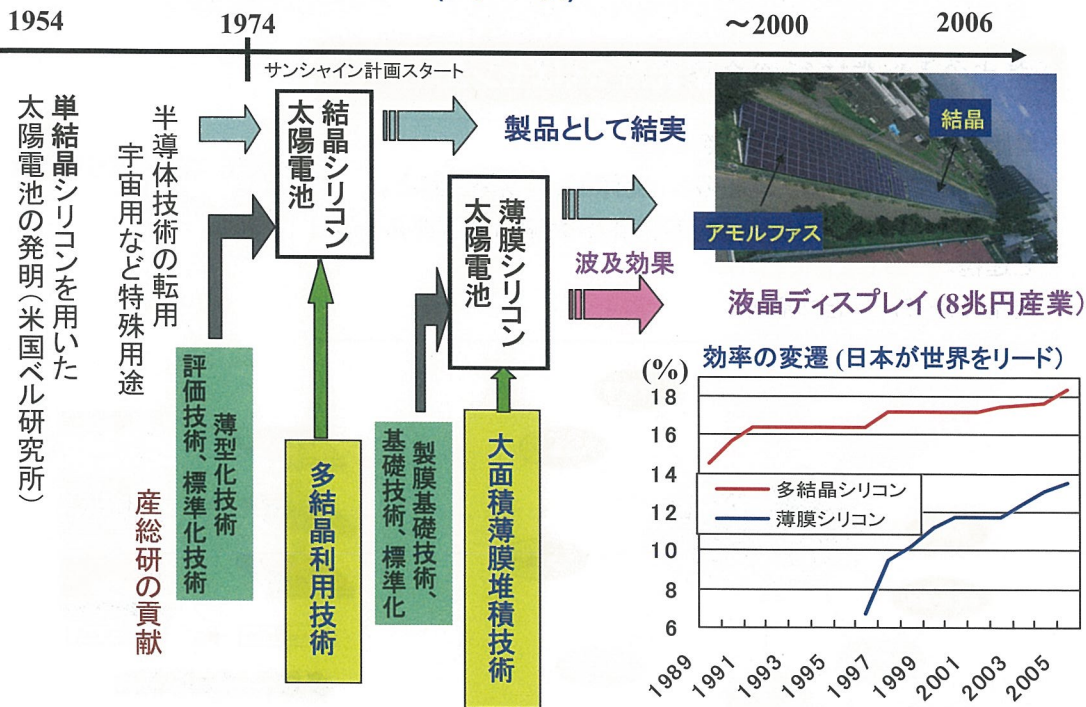


オブザーバー: 石川県工業試験場、太陽電池メーカー  
第1期: 2006.6.1~2008.3.31

30x40cm<sup>2</sup> PECVD装置



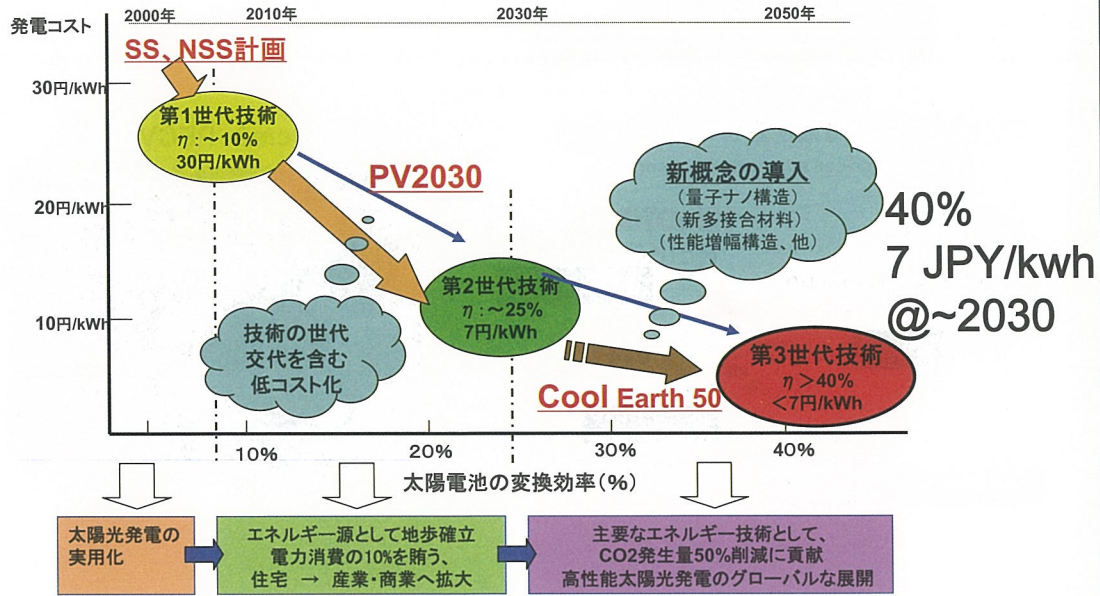
# 太陽光発電のイノベーションの歴史 (シリコン系)



資料提供 産業技術総合研究所

# Cool Earth 50

mitigate CO2 emission by 50% by 2050



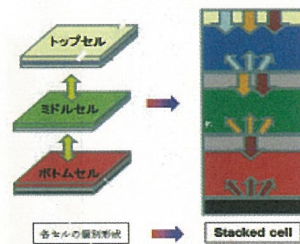
独立行政法人 産業技術総合研究所

## 革新型太陽電池国際研究拠点 40%@2030

### 【拠点②】産業技術総合研究所つくばセンター

- ・薄膜を積層した多接合型等を開発。
- ・各層で異なる波長の光を吸収し、全体として効率を向上。
- ・三菱重工株式会社等が参加。東京工業大学の研究グループと連携。
- ・欧州の研究所等とも連携。

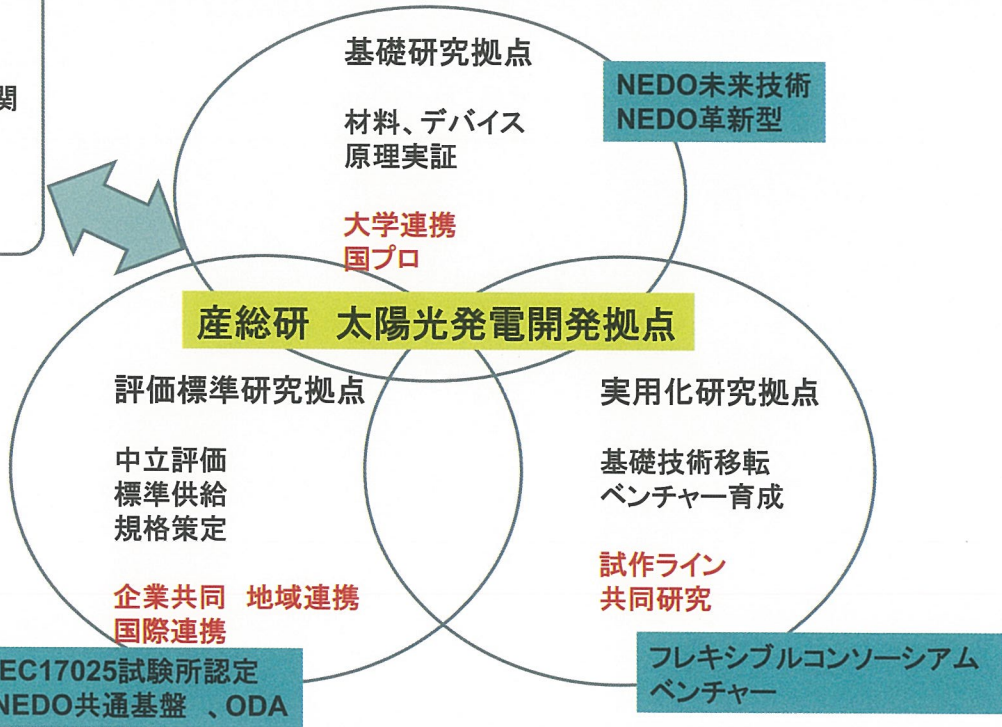
METI ニュースリリース  
2008 Jul. 2



多接合型太陽電池

独立行政法人 産業技術総合研究所

企業  
大学  
国際機関  
地域  
行政



**How does the solar PV solve**

**Human's 10 Problems in the 21<sup>st</sup> century**

**Energy  
Environment**

**Water  
Food  
Poverty  
Disease**

**Education  
Terrorism & War  
Democracy  
Population**



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

## チームの概要

# 化合物薄膜チームの概要 —CIGS太陽電池の研究開発—

Recent Activities of Thin Film Compound  
Semiconductor Team  
— R&D of CIGS Solar Cells and Modules —

発表者: 仁木 栄

Shigeru Niki

## Content

1. 背景 (background)
2. 小面積セルの高効率化 (small-area cells)
3. 大面積化技術の開発 (integrated sub-modules)
4. フレキシブル基板 (flexible substrates)
5. 省資源化・低コスト化技術 (low-cost)
6. 派生技術 (derivatives)
7. まとめと今後の方向性 (summary)

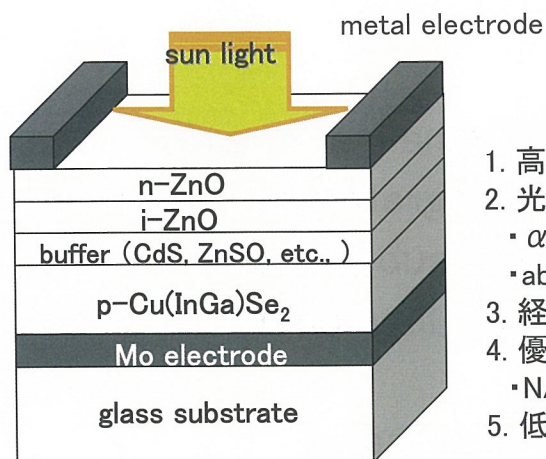
## 研究の目標 (objective)

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を開発を目指す。
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 (structure and advantage)



CIGS solar cells

1. 高効率: high efficiency ( $\eta = 19.9\%$ )
2. 光吸収係数大: Large absorption coefficients
  - ・  $\alpha \sim 10^5 \text{cm}^{-1}$ : 100 times larger than Si
  - ・ absorber  $\sim 2 \mu\text{m}$
3. 経年劣化がない: no degradation
4. 優れた耐放射線性: radiation resistant
  - ・ NASDA人工衛星(つばさ:MDS-1)で実証済
5. 低コスト基板使用可能: low-cost substrate

## 3kW CIGS Module ( $\eta=15\%$ , $20\text{m}^2$ )



Cu: 45g  
In: 49g  
Ga: 20g  
Se: 112g  
total 226g

同じ効率の太陽電池をシリコンで作製する場合: Si 15kg必要

独立行政法人 産業技術総合研究所

## CIGS太陽電池の量産化への移行 (commercialization)

2007年商業生産開始

昭和シェル石油 (20MW) → 80MW(2009) → 1GW (2011)

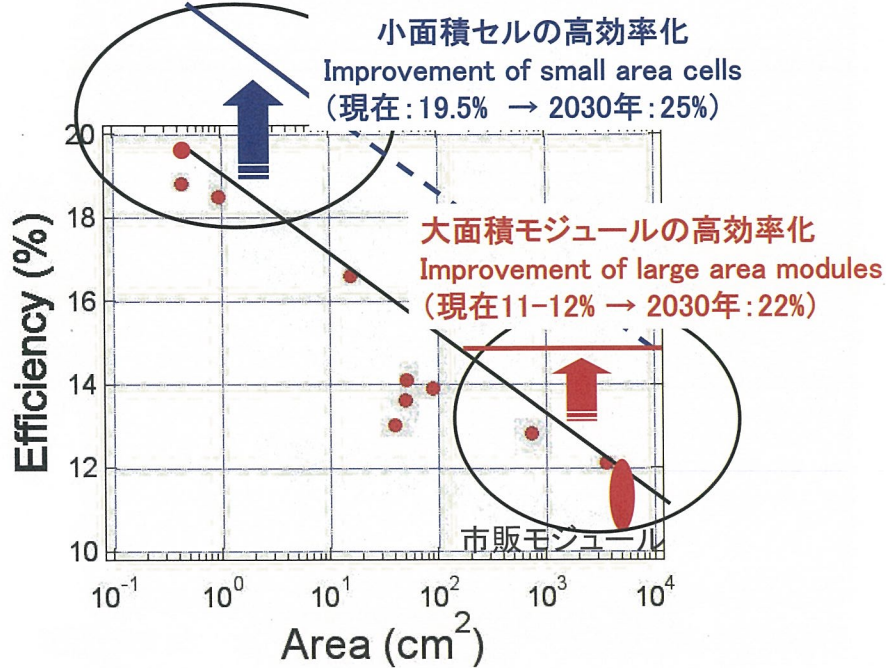
ホンダ (27.5MW)

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

独立行政法人 産業技術総合研究所

### CIGSモジュールの効率と面積 (efficiency vs area)



## 2. 小面積セルの高効率化 (small-area cells)

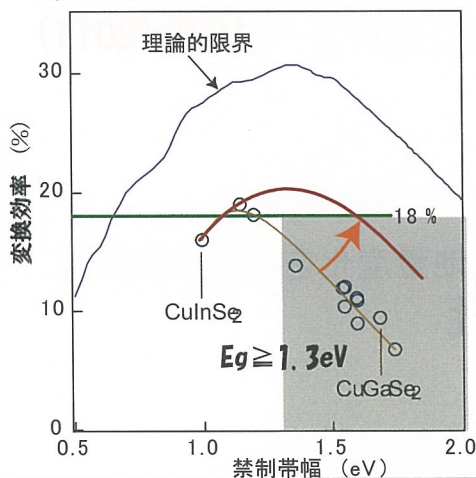
主担当: 石塚

現在最高効率: 19.9%  
current record efficiency

2020年目標効率: 25%  
target efficiency at 2020  
**技術の壁**  
technical barrier

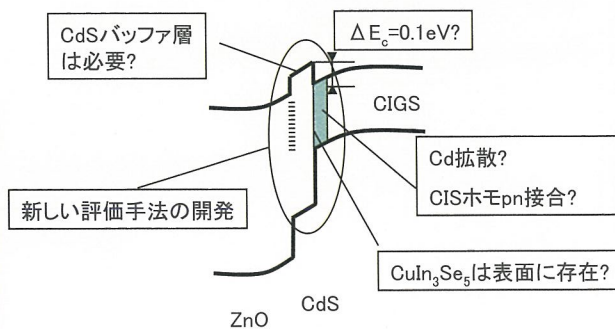
### WG-CIGSの高効率化

improvement of WG-CIGS solar cells



### 界面・表面の制御技術の開発

interface and surface control





## 2. 小面積セルの高効率化: 成果

### (1) ワイドギャップ太陽電池の高効率化

水蒸気照射技術により禁制帯幅1.4eVのCIGS太陽電池で、  
変換効率12.9%→15.3%、開放電圧0.755V→0.766Vに向上

### (2) ワイドギャップ太陽電池の高効率化

- ・鹿児島大学での評価:  
バンドオフセットの点で、CdSバッファ層はWG-CIGS太陽電池には不適合
- ・豊橋科学技術大学との共同研究:  
溶液成長法(CBD法)による新バッファ層の製膜に成功



新バッファ層を用いたWG-CIGS太陽電池の高効率化

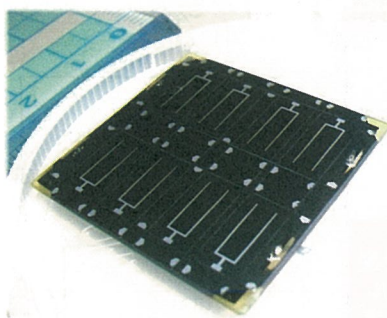
## 3. 大面積化技術の開発

improvement of integrated sub-module

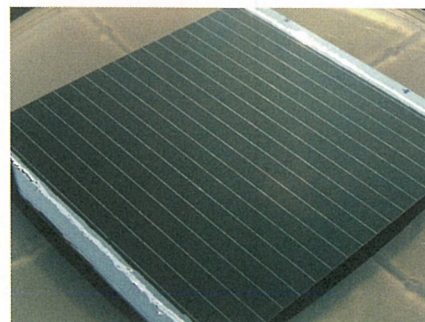
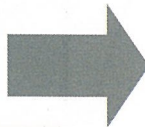
インライン蒸着法と集積化技術の開発

in-line evaporation and integration

主担当: 小牧、櫻井、吉山、水越、橋本、平田

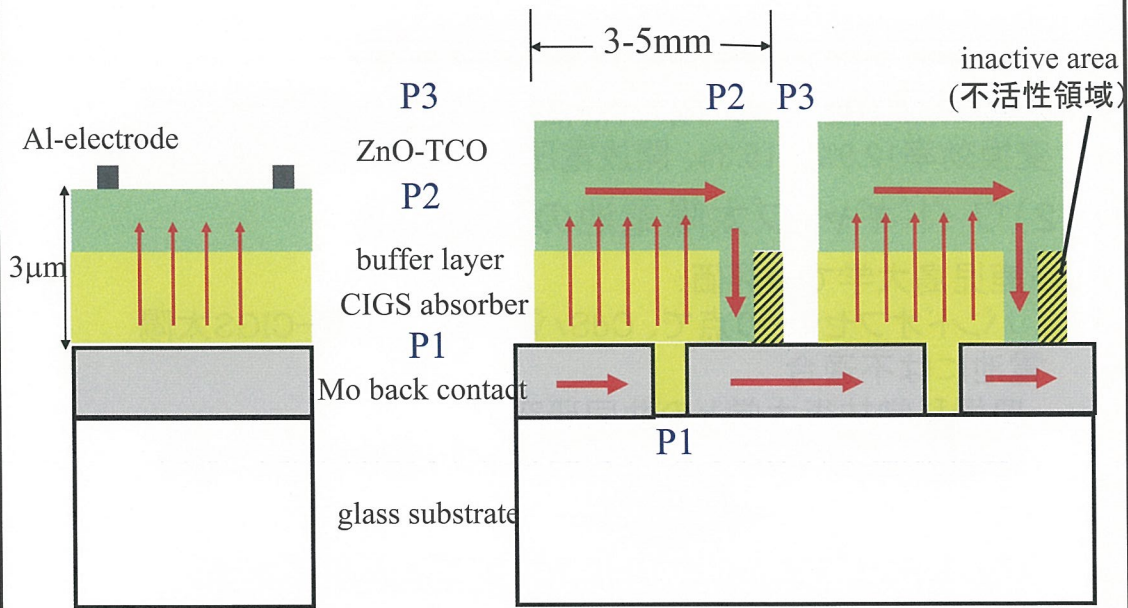


小面積セル (3cm x 3cm)



集積型サブモジュール  
(10cm x 10cm)

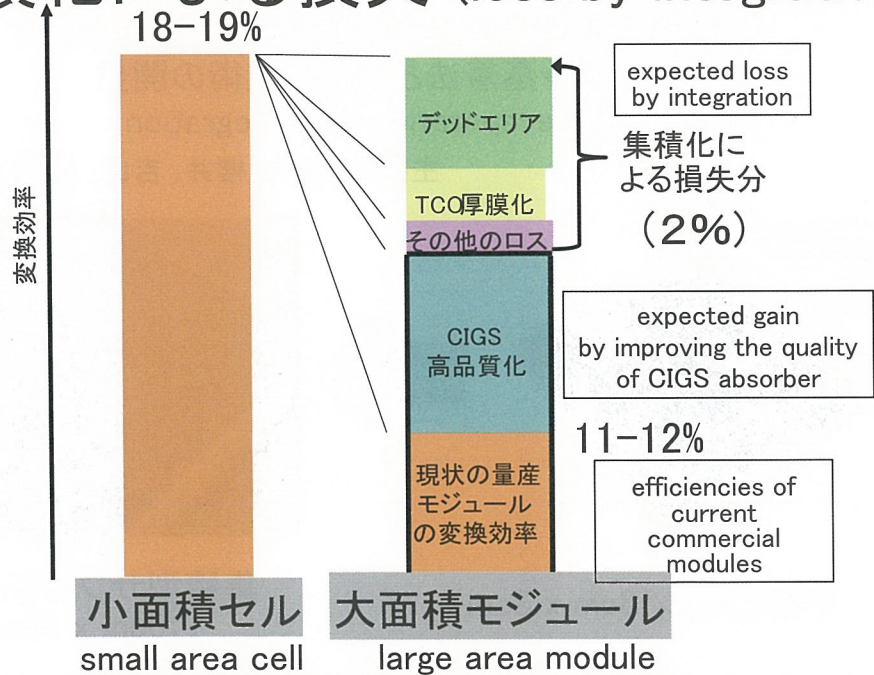
# Cells vs. Integrated Modules



P1 : laser patterning、P2、P3 : mechanical patterning

独立行政法人 産業技術総合研究所

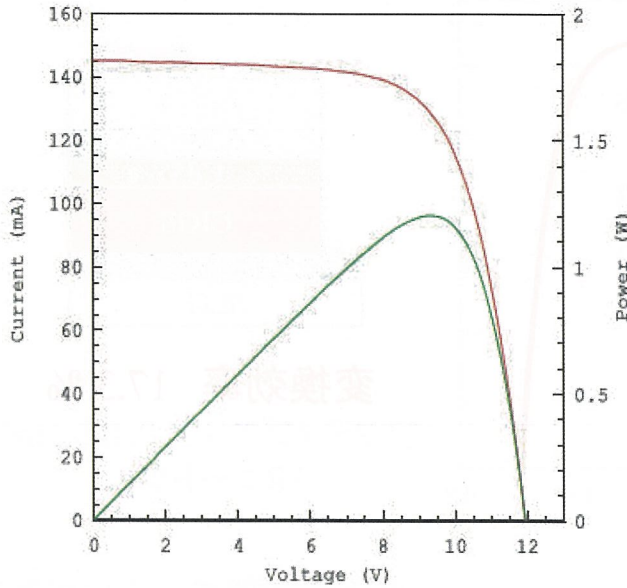
## 集積化による損失 (loss by integration)



独立行政法人 産業技術総合研究所

I-V CURVE

IEC60904-3 75.7 cm<sup>2</sup>(aperture area) WXS-220S-20  
after light soaking 100 mW/cm<sup>2</sup>, 30 min



Date : 31 Mar 2008  
Data No : SQ538AR-01  
Sample No : SQ538AR  
Repeat Times : 9

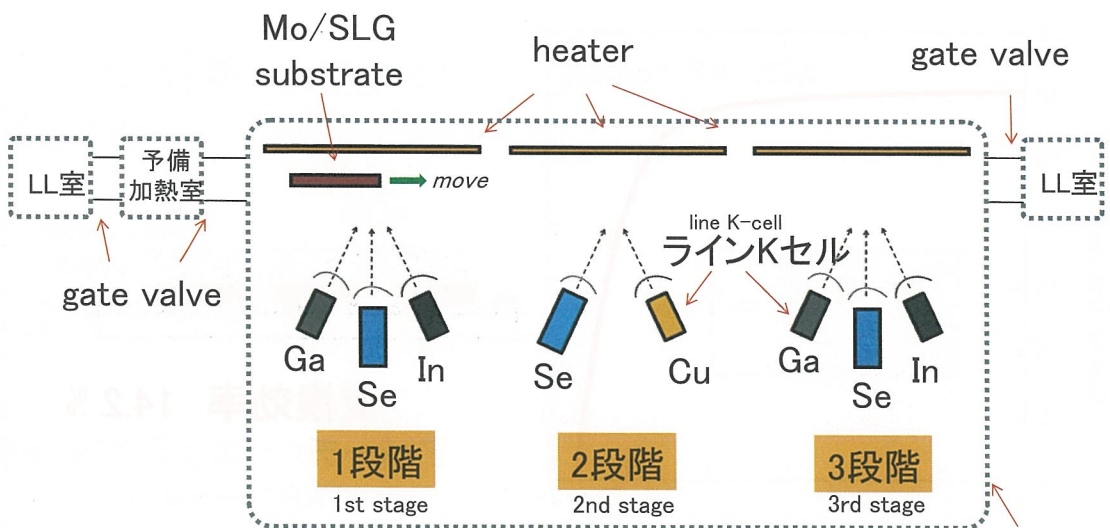
Isc 145.1 mA  
Voc 11.95 V  
Pmax 1.205 W  
Ipmax 129.1 mA  
Vpmax 9.33 V  
FF 69.5 %  
**Eff(ap) 15.9 %**  
Dtemp. 25.0 °C  
MTemp. 25.0 °C  
DIrr. 100.0 mW/cm<sup>2</sup>  
MIrr. 100.6 mW/cm<sup>2</sup>

Ref. Device No  
CSI02  
Cal. Val. of Ref.  
129.5 [mA at100mW/cm<sup>2</sup>]  
Scan Mode  
Isc to Voc



独立行政法人産業技術総合研究所

多元蒸着法のインラインプロセス化  
development of *in-line* evaporation process

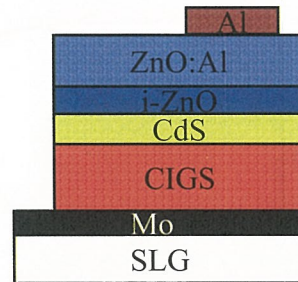
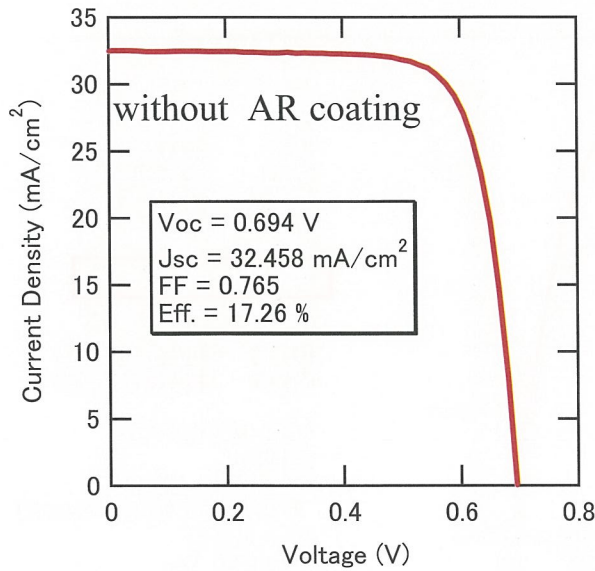


インラインによるCIGS製膜の流れ 製膜室(真空)

独立行政法人産業技術総合研究所

I-V result of small cell

## 小面積セルのI-Vカーブ

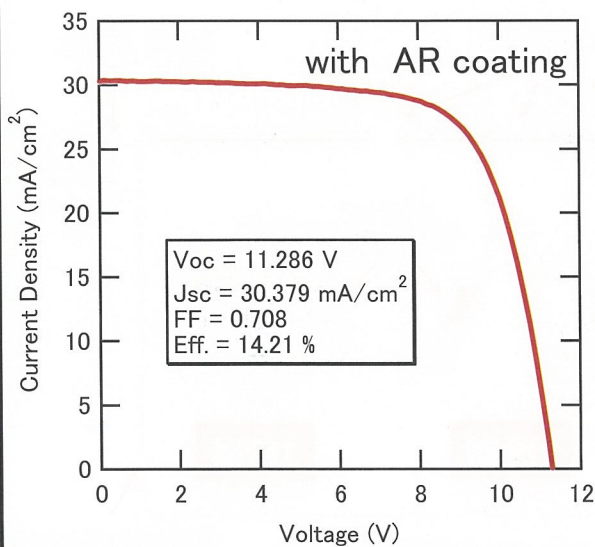


**変換効率 17.3 %**  
 アクティブエリア 0.496 cm<sup>2</sup>  
 ARコートなし

化合物薄膜チームにて測定

## サブモジュールのI-Vカーブ

I-V result of submodule



10 × 10 cm<sup>2</sup> 基板の上に  
 CIGSサブモジュールを作製



**変換効率 14.2 %**  
 アパーチャーエリア 76.9 cm<sup>2</sup>  
 ARコートあり

化合物薄膜チームにて測定

## 4. フレキシブルCIGS太陽電池の高効率化

- development of high-efficiency flexible CIGS solar cells -

主担当：石塚

- ・フレキシブルCIGS太陽電池で最高効率**17.7%**を達成。
- ・CIGS光吸収層への新しいアルカリ添加制御技術(ASTL法)の開発により、様々なフレキシブル基板による太陽電池の飛躍的な高効率化に成功。



図：セラミックス(左)、およびチタン箔(右)を基板としたフレキシブルCIGS太陽電池。(flexible CIGS solar cells using ceramics and Ti-foil substrates.)

独立行政法人 産業技術総合研究所

## フレキシブルCIGS太陽電池の技術課題

- ①基板材料の選択 ②CIGS光吸収層へのアルカリ添加  
③基板のハンドリング ④集積化

### ① 基板の選択

CIGSの線熱膨張係数

$8.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (∥ c)、 $11.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (⊥ c)

主な基板候補材料の線膨張係数。(thermal expansion coefficient.)

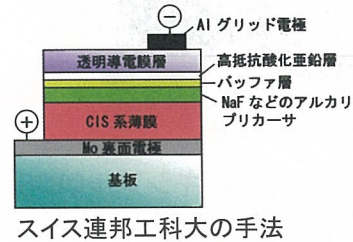
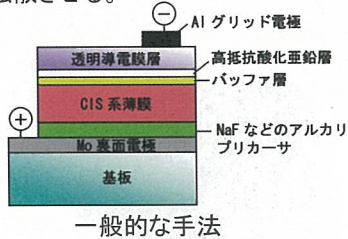
| 基板材料       | 線膨張係数<br>[ $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ] | 基板材料   | 線膨張係数<br>[ $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ] |
|------------|--|--------|--|
| タングステン     | 4.3  | コバルト   | 12.4   |
| モリブデン      | 4.9  | 金      | 14.3   |
| 炭化ケイ素(SiC) | 6.6  | 銅      | 16.8   |
| チタン        | 8.6  | SUS304 | 17.3   |
| ソーダ石灰ガラス   | 8.3-9  | 黄銅     | 19   |
| プラチナ       | 9  | アルミニウム | 23   |
| SUS410     | 10.4   | シリコン   | 24   |

独立行政法人 産業技術総合研究所

## ② CIGS光吸収層へのアルカリ添加技術の開発

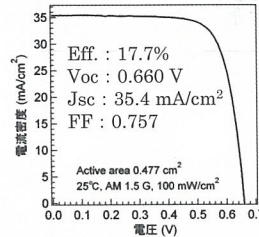
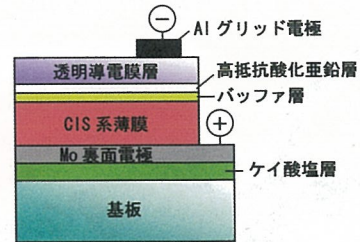
### ★従来のアルカリ添加方法★

NaF、NaSe<sub>2</sub>などのアルカリ化合物(潮解性を有するなど、不安定で取扱困難)をCIGS光吸収層製膜前、製膜中、または製膜後に蒸着し拡散させる。



### ★新開発のアルカリ添加技術★

モリブデン裏面電極形成前に安定なアルカリ化合物のケイ酸塩層を形成し、この層の製膜条件の制御でCIGS光吸収層に取り込まれるアルカリ量を制御する(ASTL法)。



左図: ASTL法を用いてフレキシブルセラミックス基板上に形成したCIGS太陽電池のI-V特性。(A I-V curve from a CIGS solar cell on a flexible ceramics substrate.)

独立行政法人 産業技術総合研究所

## ③ 基板のハンドリング(ポリマー基板)

Flexible CIGS solar cells on a polymer sheet.

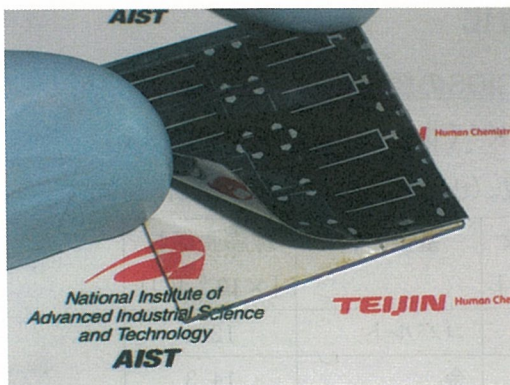


図: 帝人株式会社が開発したスピンコート形成ポリマー基板を用いたフレキシブルCIGS太陽電池。デバイス作製工程は従来のガラス基板と共通化でき、完成後はシールのように剥がして使うことができる。

耐熱温度に制限のあるポリマー基板では高効率を得にくい低温製膜CIGS光吸収層を用いる必要があるが、ASTL法により、現在までに変換効率14.7%を達成している(ポリマー基板を用いたCIGS太陽電池の世界最高効率)。

### ◆今後の展開◆

- ・今回開発したASTL法を、セルサイズからサブモジュールサイズまで拡大した実用デバイスレベルへの応用。
- ・スケールアップに伴う集積化プロセスや歩留りの向上など諸問題の解決に向け取り組んでいく。

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 5. 省資源化・低コスト化技術

### CIGS太陽電池裏面電極材料Moの薄膜化

CIGS solar cell with thin Mo back contact

主担当: 上川

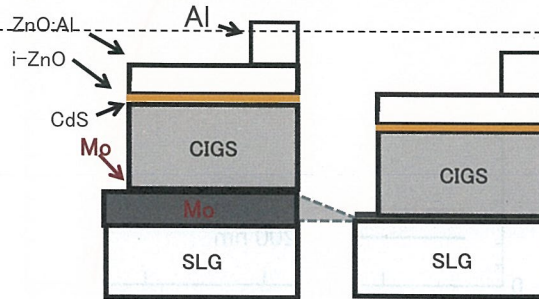
#### 【研究目的】

本研究では、CIGS太陽電池の低コスト化 & 省資源化を目的とし、原料価格の高騰が問題となっているモリブデン(裏面電極材料)の薄膜化を検討した。

近年、裏面電極材料Moの  
価格高騰が問題



本研究の目的: **Moの薄膜化**



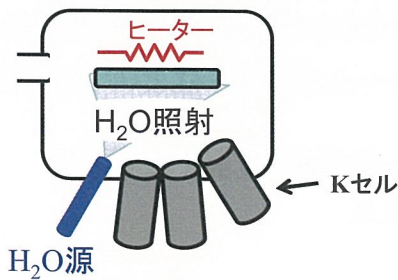
本研究で作製したCIGS太陽電池の構造概略図

## 水蒸気照射の検討

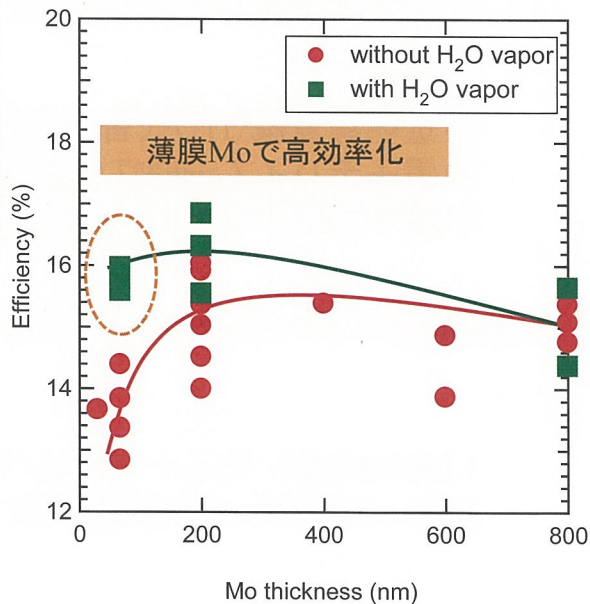
### 水蒸気照射の効果

- Na拡散量の増加
- 伝導率、ホール濃度の増加
- CIGS結晶品質の向上

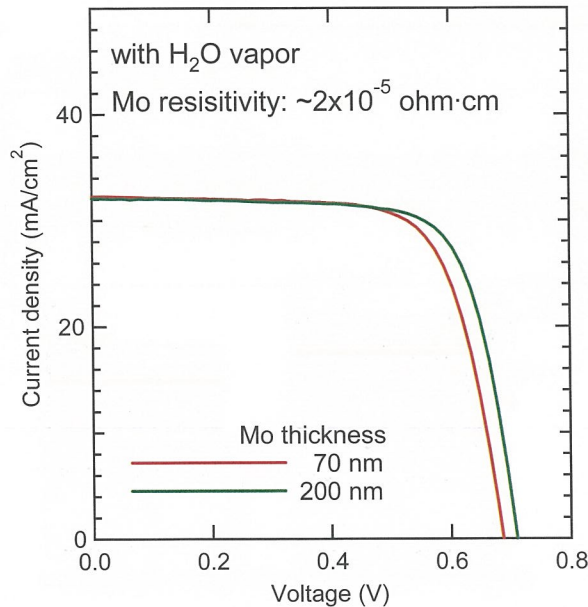
S. Ishizuka et. al.



多元蒸着装置へH<sub>2</sub>O導入



## I-V特性



従来の1/4

Mo thickness: 200 nm

$E_{ff}$  : 16.9 %  
 $J_{SC}$  : 32.05 mA/cm<sup>2</sup>  
 $V_{OC}$  : 0.71 V  
 FF : 0.74

従来の1/10

Mo thickness: 70 nm

$E_{ff}$  : 16.0 %  
 $J_{SC}$  : 32.26 mA/cm<sup>2</sup>  
 $V_{OC}$  : 0.69 V  
 FF : 0.72

他研究機関からの報告例  
 16.8 % (Mo thickness = 250 nm)

T. Morimoto et. al  
 Proc. of PVSEC-17 (2007)

## 6. 派生技術 (derivatives)

## (1) ZnOワイドギャップ半導体 (ZnO semiconductor)

主担当: 柴田、反保、前島

- 1) 透明導電膜 (ITO代替): 耐環境性の向上
- 2) 電子デバイス: HEMT (高移動度トランジスタ) の動作実証
- 3) 光デバイス: UV-LEDの動作実証

## (2) CIGSイメージセンサ (CIGS-based image sensors)

ローム株式会社との共同研究

- 1) CIGSを用いたイメージセンサーの動作実証 (世界初)
- 2) Si-CCDに比べて感度大幅に向上



## まとめ (summary)

1. 小面積セルの高効率化 (small-area cells)
  - ・WG-CIGS太陽電池の性能向上
  - ・新バッファ層の製膜技術開発
2. 大面積化技術の開発 (integrated sub-modules)
  - ・市販モジュールと同構造で世界最高性能(効率15.9%)を実現
  - ・インライン蒸着技術を確立し、ポテンシャルを確認。
3. フレキシブル太陽電池 (flexible substrates)
  - ・新しいNa導入法 (ASTL) の開発
  - ・世界最高効率実現(セラミクス基板:17.7%、ポリマー基板:14.7%)
5. 省資源化・低コスト化技術 (low-cost)
  - ・Mo裏面電極の薄膜化: 16.9%@200nm、16.0%@70nm
6. 派生技術 (derivatives)
  - ・世界初のCIGSを用いたイメージセンサーを開発(ローム株式会社との共同研究)

## 今後の課題と方向性

- (1) 小面積セル (small-area cells)
  - ・開放電圧の向上、新バッファ層の探索
- (2) 大面積モジュール (integrated submodules)
  - ・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
  - ・技術移転 → 事業化
- (3) 省資源・低コスト化技術 (low cost)
  - ・代替材料の開発、希少金属使用量の低減
- (4) 革新的太陽電池技術の開発 (innovations)
  - ・新材料、新構造

# シリコン新材料チームの概要

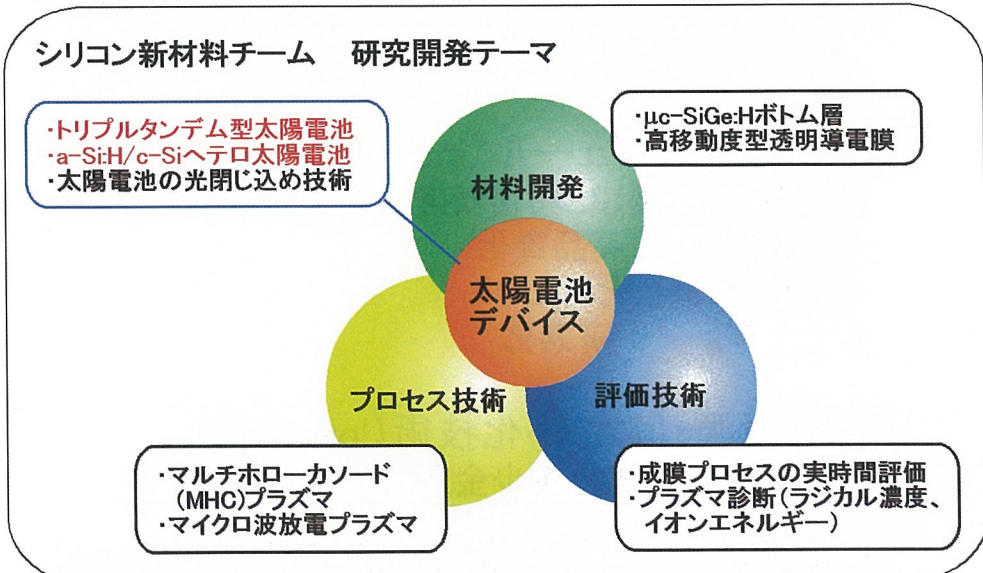
Recent Activities of Novel Silicon Material Team  
 - R&D of Thin Film Silicon Solar Cells and  
 Related Materials -

発表者: 近藤 道雄

Michio Kondo

## 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



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

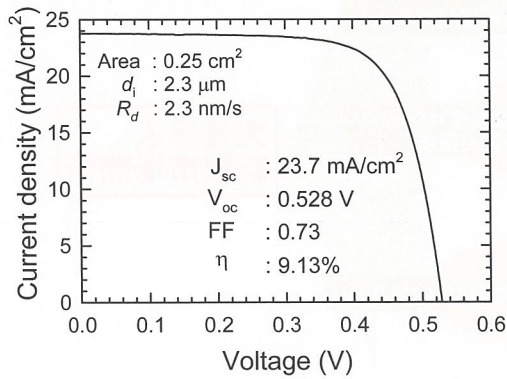
nc-SiGe alloys ;  
 Materials and devices  
 for  
 higher efficiency solar cells

独立行政法人 産業技術総合研究所

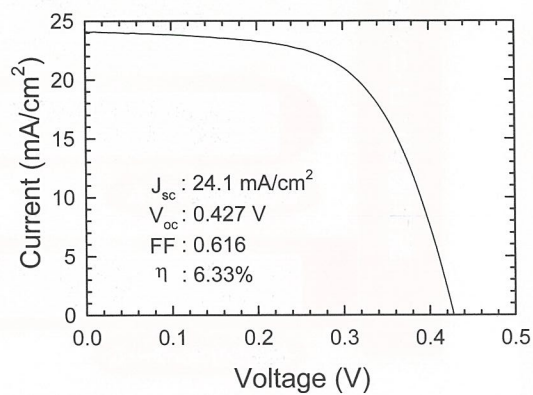
### これまでの研究成果 So far ...

- ・ 高圧枯渴法にて2.3nm/s : 微結晶Si単接合=9.1%達成  
nc-Si solar cell deposited under HPD conditions
- ・ 微結晶シリコンゲルマニウムの開発とデバイスへの応用  
nc-SiGe materials and devices

nc-Si solar cell deposited at 2.3 nm/s



nc-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> (x=0.2) solar cell (d=1 μm)

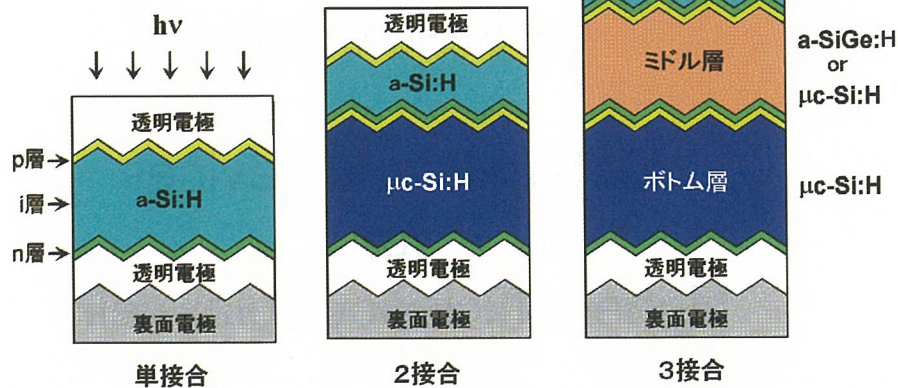


独立行政法人 産業技術総合研究所

### 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

MJ Thin film silicon solar cells



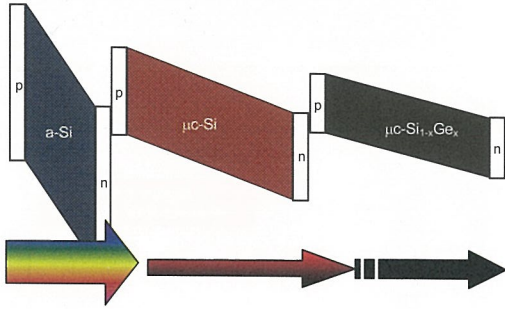
|       |               |             |                  |
|-------|---------------|-------------|------------------|
| 研究開始年 | 1976年～        | 1997年～      | 2000年～           |
| 変換効率  | 9.5% (ヌシャテル大) | 11.7% (カネカ) | 2010年NEDO目標: 15% |

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。

独立行政法人 産業技術総合研究所

### トリプルタンデム型新構造太陽電池 (triple tandem solar cell)

a-Si:H       $\mu\text{c-Si:H}$        $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$

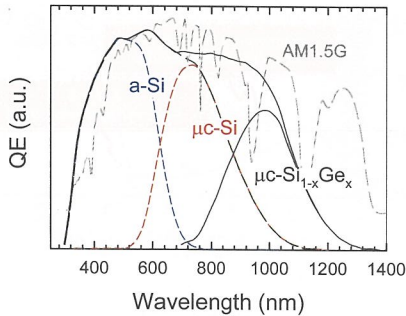


アモルファスSi、微結晶Si  
赤外領域の光吸収が小さく  
赤外光の透過損失が大きい  
Small absorption coeff.

↓  
微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>

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

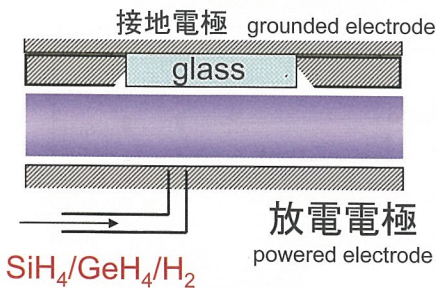
Higher IR response with  
narrower Eg material



**double**      **triple**  
 $\eta=12-13\% \rightarrow \eta=16\%$   
 $J_{sc}(\text{SiGe}) \gg 30 \text{ mA/cm}^2$

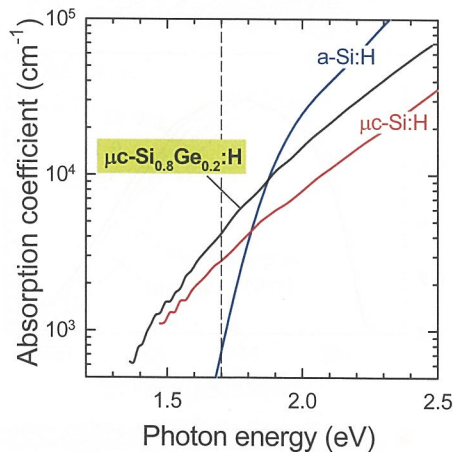
### 2-1. 多接合化に向けた微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>ナローギャップ太陽電池の開発

$\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$  as narrow gap absorber for multijunction solar cells



**製膜条件**

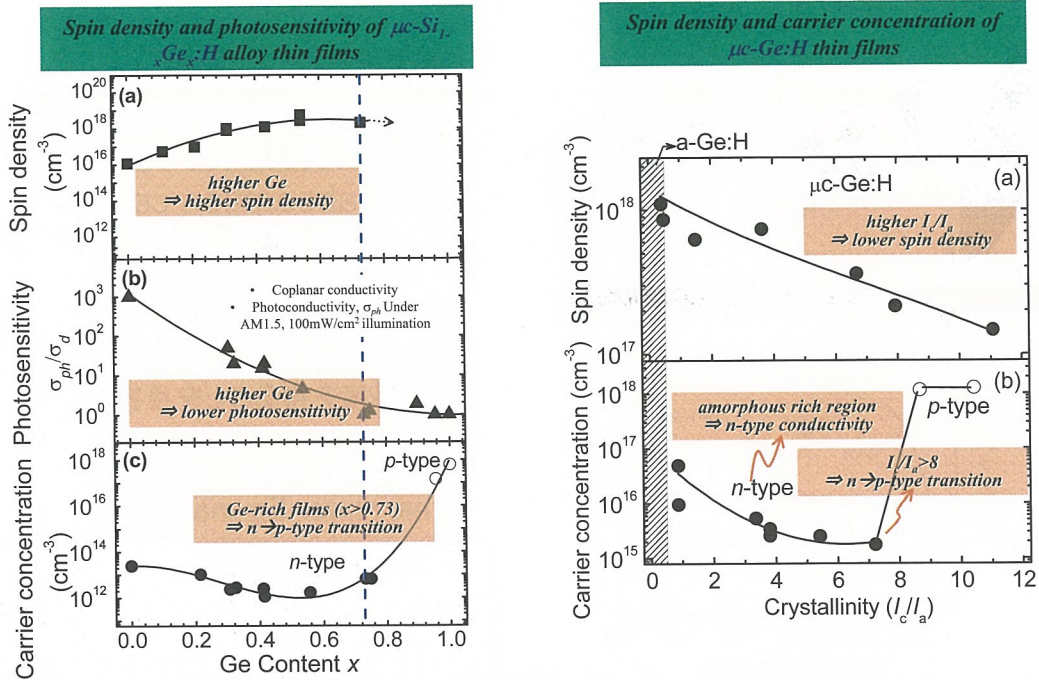
| deposition condition             |                    |
|----------------------------------|--------------------|
| System                           | PECVD (100 MHz)    |
| Substrate temp.                  | 200 °C             |
| Discharge power                  | 30 W               |
| Pressure                         | 1.5 Torr           |
| SiH <sub>4</sub> flow rate       | 5.4 sccm           |
| <b>GeH<sub>4</sub> flow rate</b> | <b>0-0.28 sccm</b> |
| H <sub>2</sub> flow rate         | 300 sccm           |



全波長領域で微結晶Siよりも大きい吸収係数  
Larger absorption coefficients than  
 $\mu\text{c-Si:H}$  over the whole spectral range

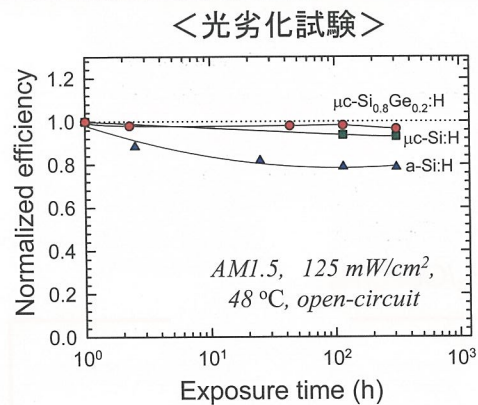
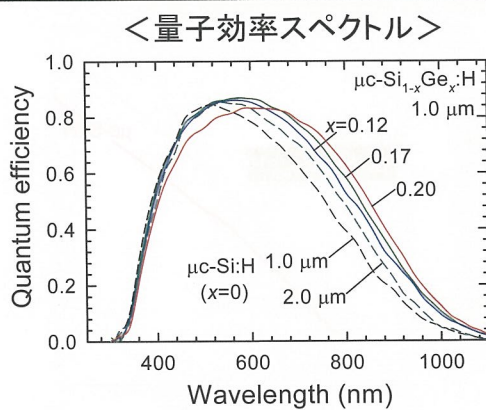
**Ge組成20%で $\alpha \sim 1.5$ 倍  
@1.7eV ( $\lambda=720 \text{ nm}$ )**

### Material properties of $\mu\text{c-SiGe}$



独立行政法人 産業技術総合研究所

### 2-3. 微結晶 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ シングルセル特性 Device performance of $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ single junction solar cells



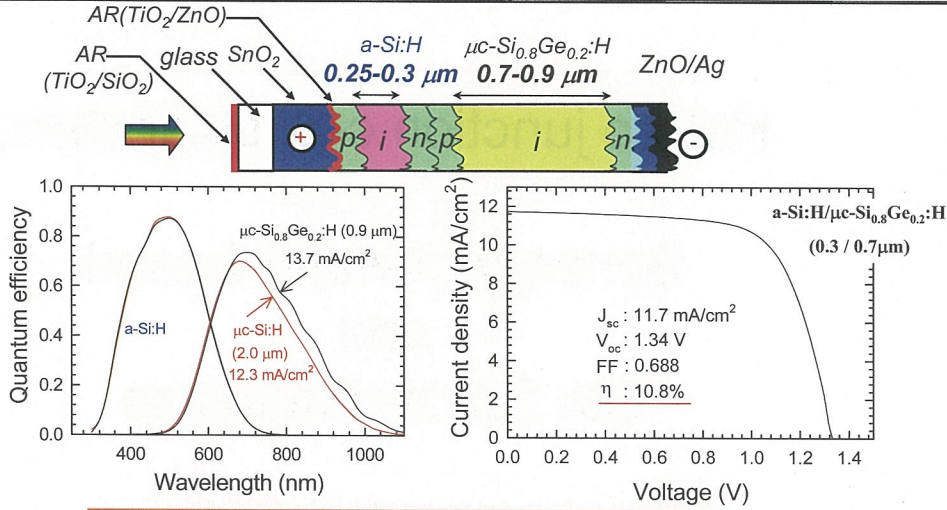
- $x \sim 0.2$ まで赤外感度は単調に増大 ( $\eta = 6.33\%$  at  $x = 0.2$ )  
Monotonic increase of IR response with Ge incorporation up to  $x \sim 0.2$ .
- $x > 0.1$ で膜厚2倍の $\mu\text{c-Si:H}$ を上回る赤外感度  
IR response larger than double-thickness  $\mu\text{c-Si:H}$  when  $x > 0.1$ .
- 優れた光安定性  
Excellent stability upon prolonged light soaking.

Matsui et al., APEX 1, 031501 (2008)

独立行政法人 産業技術総合研究所

### 3. アモルファスSi/微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 2接合太陽電池 (タンデム型)

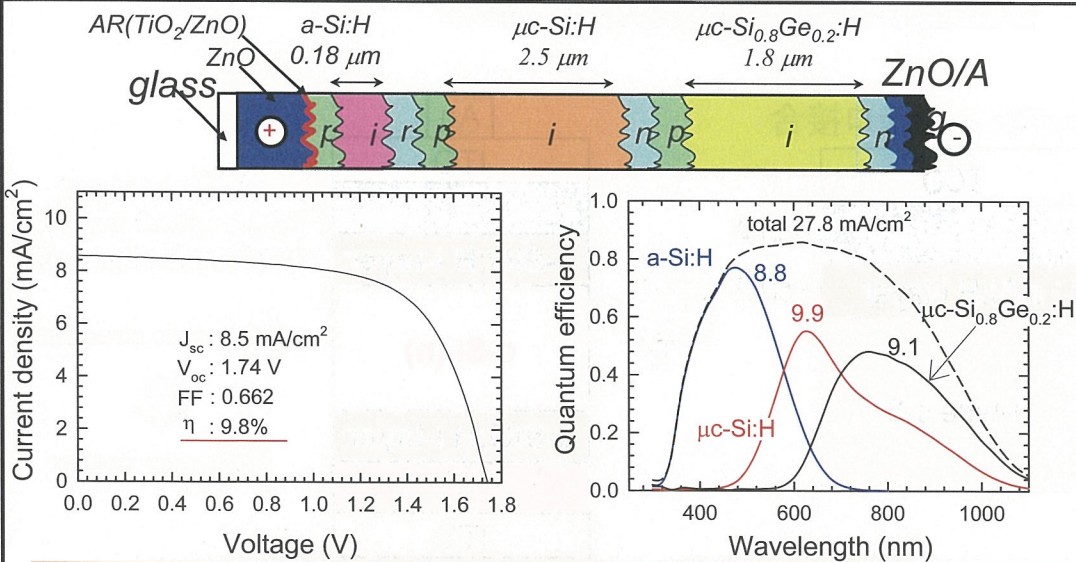
a-Si:H/ $\mu$ c-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H double junction solar cells



・膜厚2倍の微結晶Siより高い赤外感度  
Higher IR response than double-thickness  $\mu$ c-Si:H  
・トータル膜厚約1 $\mu$ mで初期変換効率10.8%を達成  
 $\eta_{ini}$ =10.8% with a total absorber thickness of  $\sim$ 1  $\mu$ m

### 4. a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H/ $\mu$ c-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H 3接合太陽電池 (トリプルタンデム型)

a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H/ $\mu$ c-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H triple junction solar cells

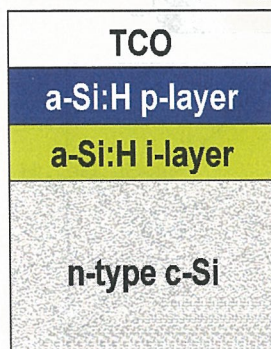


微結晶Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub>ボトムセルによる高赤外感度化 → 要素セル全電流 27.8mA/cm<sup>2</sup>  
IR response is enhanced markedly by incorporating  $\mu$ c-Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub>:H bottom cell →  
total current :27.8mA/cm<sup>2</sup>

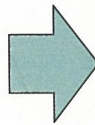
# Hetero junction c-Si solar cells; Synergy of wafer-based and thin film technologies

## a-Si:H/c-Siヘテロ構造デバイスの開発 a-Si:H/c-Si hetero junction device

a-Si:H/c-Siヘテロ接合



~50 Å  
~50 Å



Wider band gap  
Better optical matching  
Better band alignment ?

Symmetric structure

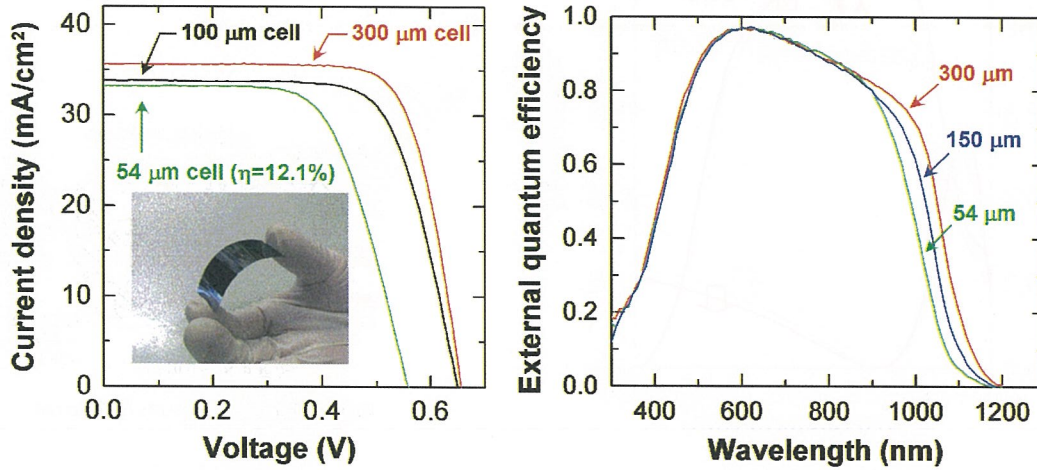


Thinner wafer



### 超薄型 (54 $\mu\text{m}$ ) a-SiO:H/c-Si両面ヘテロ構造型太陽電池

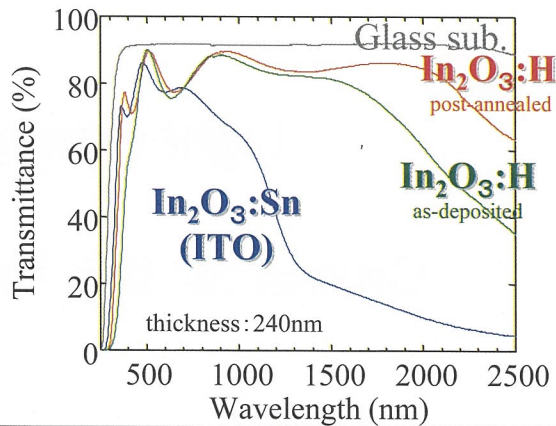
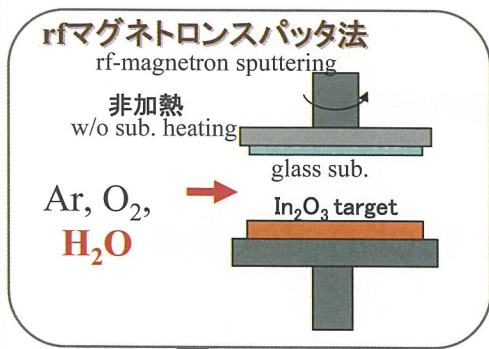
Ultra-thin (54 $\mu\text{m}$ ) a-SiO:H/c-Si double-heterostructured solar cells



a-SiO:H層を用い、両面ヘテロ構造型としては世界で最も薄い54 $\mu\text{m}$ の太陽電池を作製し、変換効率12%を得た。

Using a-SiO:H, the thinnest heterojunction solar cell (54 $\mu\text{m}$ ) was realized with 12 % efficiency

### In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:H high-mobility TCO



真空中ポストアニール  
post-annealing in vac.  
~200 °C  
固相成長  
solid phase crystallization

|                                       | ITO <sup>1)</sup>    | In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :H <sup>2)</sup> | In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :H <sup>2)</sup> |
|---------------------------------------|----------------------|---|---|
| 抵抗率 $\rho$ ( $\Omega\text{cm}$ )      | $2.4 \times 10^{-4}$ | $3.7 \times 10^{-4}$                            | $2.7 \times 10^{-4}$                            |
| 移動度 $\mu$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) | 29                   | 56  | 130   |
| キャリア濃度 $N$ ( $\text{cm}^{-3}$ )       | $9.1 \times 10^{20}$ | $3.0 \times 10^{20}$                            | $1.8 \times 10^{20}$                            |

<sup>1)</sup> SnO<sub>2</sub> 10wt.%含 <sup>2)</sup> H ~ 3at.%含

Jpn. J. Appl. Phys. 46, L685 (2007).

### In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:H high-mobility TCO

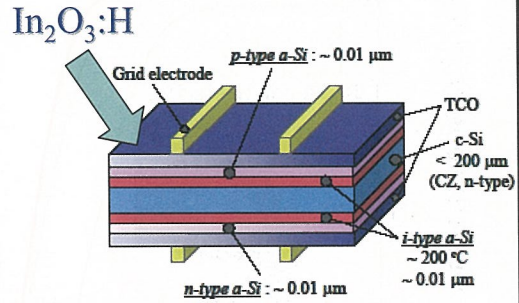
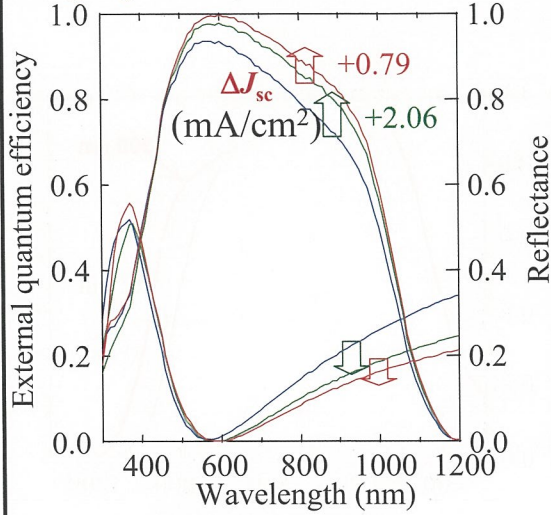


Figure 1: Schematic diagram of a HIT solar cell.

HIT device

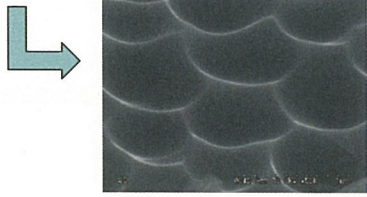
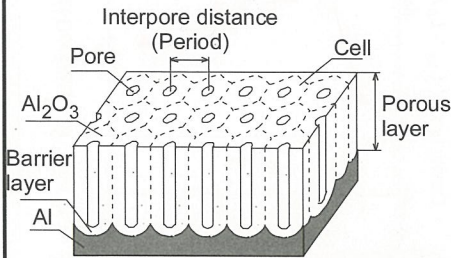
Higher Jsc due to lower absorption loss

|                                   | $N$ (cm <sup>-3</sup> ) | $\mu$ (cm <sup>2</sup> /Vs) |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :H | 1.6x10 <sup>20</sup>    | 140                         |
| In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :H | 3.3x10 <sup>20</sup>    | 55                          |
| ITO                               | 7.7x10 <sup>20</sup>    | 15                          |

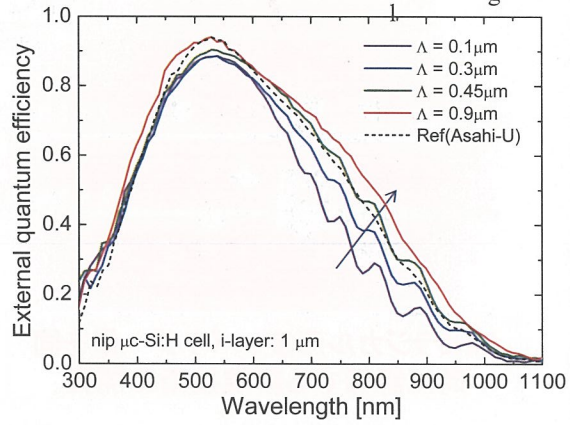
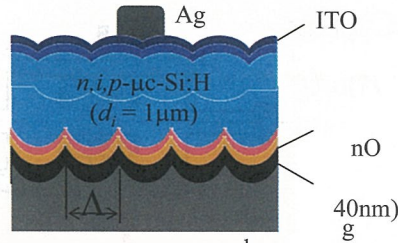
Light management ;  
Crucial for thin film technologies

自己組織化構造を利用した薄膜シリコン太陽電池用光閉じ込め構造の開発  
 - Light trapping in thin-film silicon solar cells using self-ordered structures -

- Self ordered texturing using anodized Al
- *nip* structure



0.9 μm (370V)



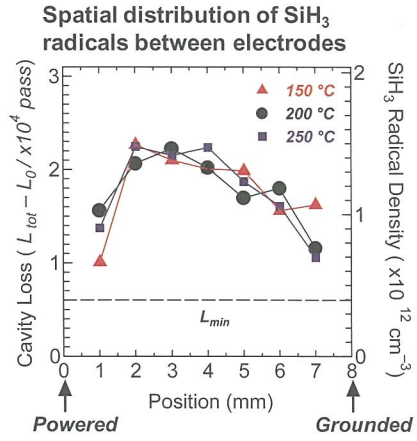
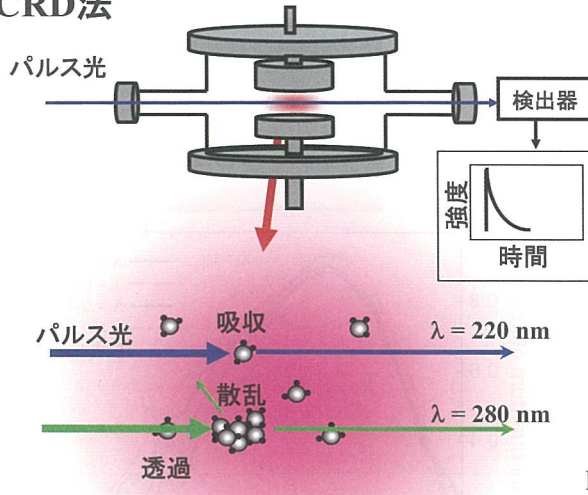
Diagnosis of processes ;

Understanding for further development

キャビティリングダウン(CRD)法を用いたラジカル計測

Radical measurement by means of CRD method

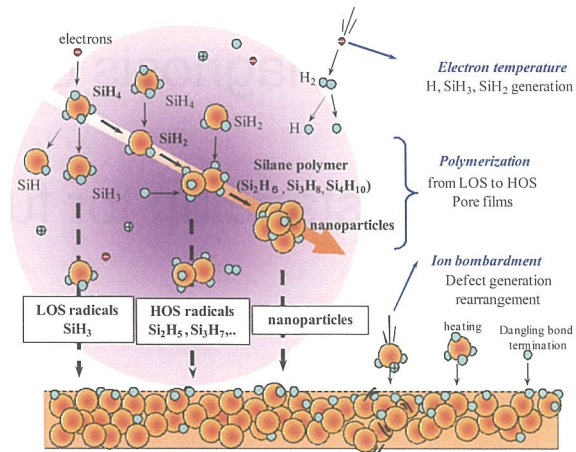
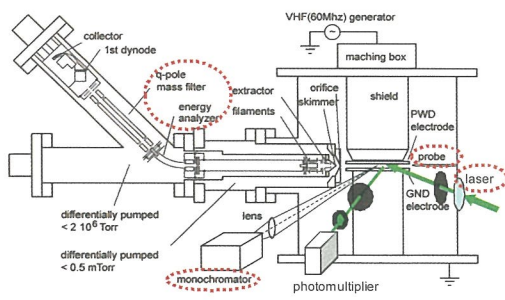
CRD法



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

Radical distribution ⇔ substrate temperature  
Powder formation

シリコン系プラズマCVDの製膜過程



•高品質な膜作製には、製膜の素過程を理解し制御することが必須！

## 結晶シリコンチームの概要 Recent activity of Advanced Crystalline Silicon Team

坂田 功 Isao Sakata

### ・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

Mission of our team:

Achievement of high efficiency, low cost crystalline silicon solar cells

Approaches:

Thin film or thin substrate cells

Combination with dilute nitride semiconductors for tandem cells

### 超薄型・極薄膜結晶シリコン太陽電池 (Thin film or thin substrate c-Si solar cell)

製造価格の低減、原料供給問題 (lower production cost and feed stock issue)



一つの解決策: 太陽電池の厚さを低減: 従来200 $\mu\text{m}$ 以上 $\rightarrow$ 100 $\mu\text{m}$ 以下

超薄型: 厚さ100 $\mu\text{m}$ 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30 $\mu\text{m}$ 以下

solution: thin film (< 30 $\mu\text{m}$ ) or thin substrate (< 100 $\mu\text{m}$ ) c-Si solar cell

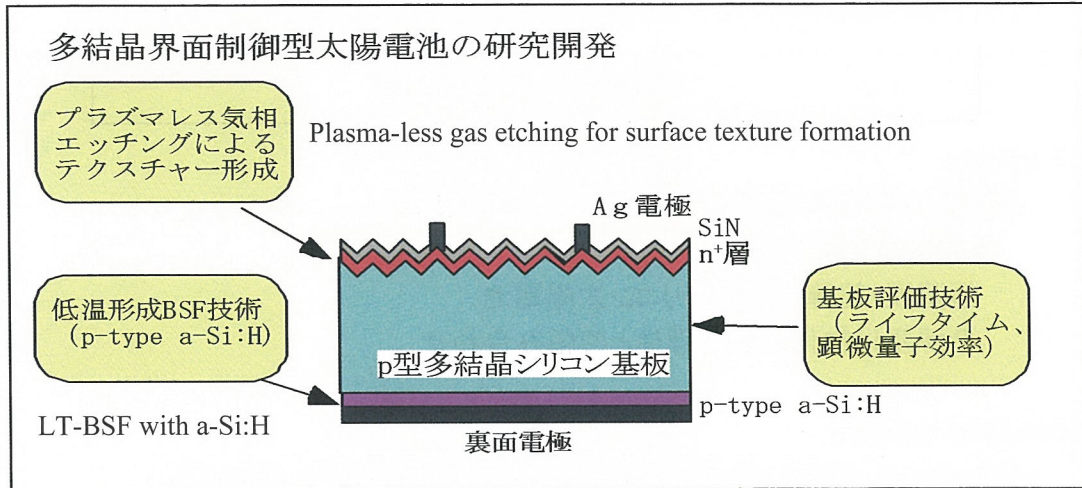
超薄型セル要素技術の開発 technologies for thin substrate cell

1. NEDO受託研究: 超薄型ヘテロ構造シリコン太陽電池
  - ・プラズマレスガスエッチングによる表面テクスチャ形成 surface texture
  - ・低温Back-surface-field(BSF)技術 low temperature (LT)-BSF
2. 自主研究
  - ・厚さ120~150 $\mu\text{m}$ のセル: 従来型技術の延長上でどこまで可能か?
3. 企業との共同研究
  - ・固定砥粒ワイヤソーの有効性 加工変質層厚の低減

Fixed abrasive wire saw : reduction of the damaged layer thickness

## 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



NEDO contract (2006FY to 2008FY): Thin substrate multicrystalline silicon (mc-Si) solar cell

## XeF<sub>2</sub>ガスを用いたシリコン基板の表面テクスチャー化 Surface texture formation by plasma-less gas etching using XeF<sub>2</sub>

### 特徴:

- ・XeF<sub>2</sub>ガスを用いたプラズマレスガスエッチング  

$$\text{Si} + 2\text{XeF}_2 \rightarrow 2\text{Xe} + \text{SiF}_4$$
- ・等方性の面方位に依存しないエッチング → 多結晶基板に適する
- ・プラズマレス → 低ダメージ(反応性イオンエッチングとの違い)
- ・ガス中 → 厚さ100μmレベルの薄型基板に適する(溶液中との違い)

### Merits:

- isotropic, does not depend on the crystalline orientation  
 → suited for mc-Si
- plasma-less: lower damage when compared to reactive ion etching
- gas etching: suited for thin substrate, easier handling when compared to the etching in solution

### XeF<sub>2</sub>ガスエッチングで形成した表面テクスチャー Surface texture formed by XeF<sub>2</sub> gas etching

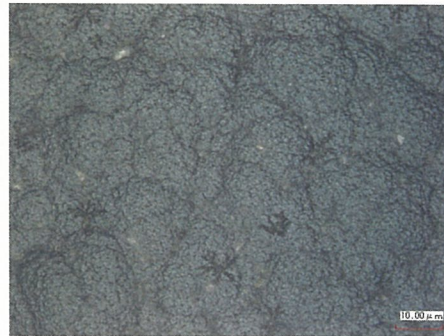
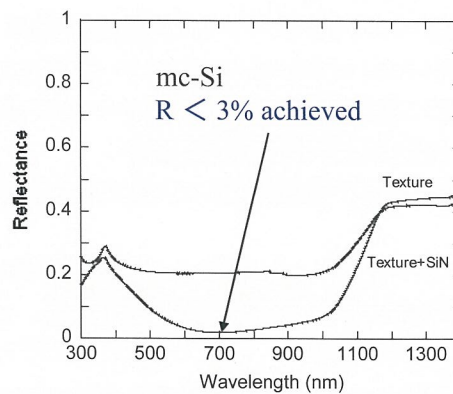
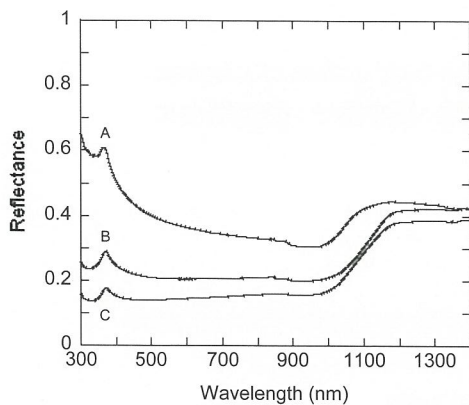


写真1(photo-1): 単結晶シリコン  
ランダムテクスチャー形成  
single c-Si: random texture

写真2(photo-2): 多結晶シリコン  
面方位によらない均一な  
テクスチャーを形成:  
mc-Si: uniform texture

### XeF<sub>2</sub>ガスエッチングで形成したテクスチャー表面の反射率スペクトル Reflectance spectra of texture surfaces formed by XeF<sub>2</sub> gas etching

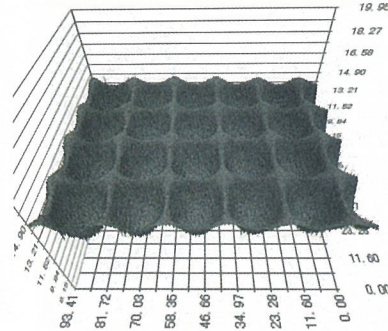
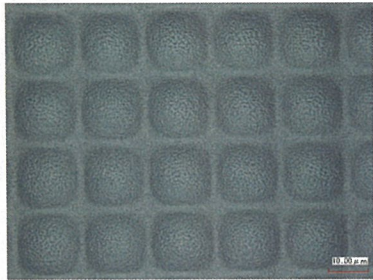


反射率

- A: 単結晶シリコン(鏡面)  
single c-Si (mirror surface)
- B: 多結晶シリコン(写真2) mc-Si (photo-2)
- C: 単結晶シリコン(写真1) single c-Si(photo-1)

反射率(多結晶シリコン)  
テクスチャー(写真2)  
テクスチャー + SiN膜  
低い反射率(3%以下)を実現

## メタルマスクを用いた表面テクスチャ形成 Surface texture formation with metal masks



- ・Niマスク 開口部:  $5\mu\text{m}\phi$ 、ピッチ:  $30\mu\text{m}$
- ・等方性エッチングでテクスチャ形成

Ni mask: aperture  $5\mu\text{m}\phi$ ,  $30\mu\text{m}$  pitch  
XeF<sub>2</sub> gas etching: isotropic etching

## 低温Back-Surface-Field(BSF)技術 LT-BSF

Back-Surface-Field(BSF):

- ・裏面における少数キャリア再結合の低減  
reduction of minority carrier recombination at the back surface of substrate
- ・裏面に基板と同じ伝導型でよりキャリア濃度の高い層を設け、裏面接合における電界分布の制御を行う
- ・少数キャリアの追い返して再結合速度を低減

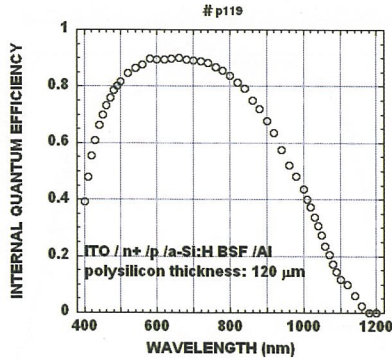
低温:  $200\text{--}250^\circ\text{C}$  substrate temperature:  $200\text{--}250\text{C}$

- ・プロセスにおける熱歪み発生を避ける can avoid thermal generation of strain
- ・薄型ウエファへの適用 ← 反り(AI-BSFの問題)のないBSF形成  
BSF layer formation for thin substrates without warp
- ・RFプラズマCVD法でp型多結晶シリコン基板(厚さ $120\mu\text{m}$ )の背面に $p^+$ 層を形成  
PECVD deposition of boron-doped p-type a-Si:H  
on the back surfaces of p-type mc-Si substrates ( $120\mu\text{m}$  thickness)
- ・原料ガス: シラン、水素、ジボラン
- ・ $p^+$ 層膜厚:  $60\text{nm}$  layer thickness:  $60\text{nm}$

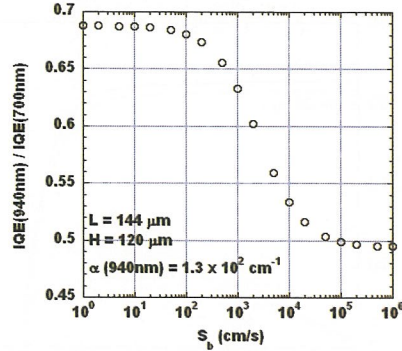


低温BSF構造の内部量子効率(IQE)による解析:裏面再結合速度Sbの算定

多結晶セルの内部量子効率(IQE) データ



波長700nm、940nmでのIQEの比率と裏面再結合速度Sbの関係 (シミュレーション結果)

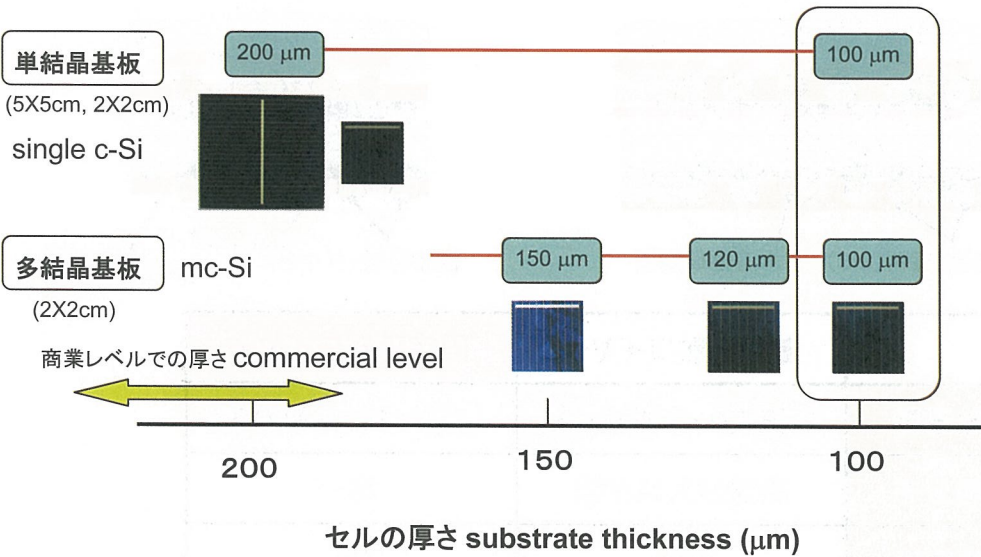


- ・BSF効果の指標として波長700nm、940nmにおけるIQEの比率をとる (波長940nmでは裏面のアルミの反射が支配的でないため)
- ・この試料での比率: 0.643

・測定された比率0.643は、Sb=900cm/sに相当

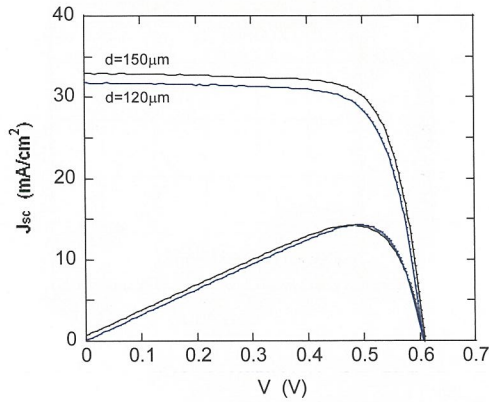
fitting of IQE data with simulation back surface recombination velocity, Sb, of less than 1000 cm/s achieved

結晶シリコンチームで作製しているセル  
Thin substrate c-Si cells developed in our team

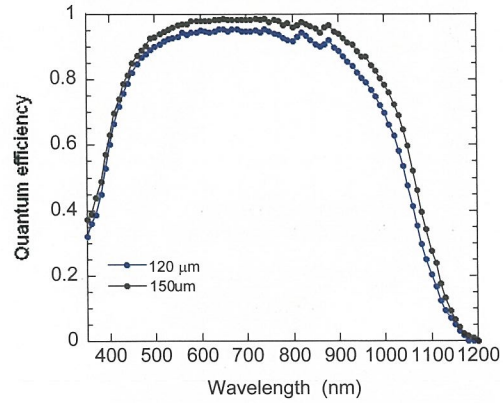


### 厚さ 150 $\mu\text{m}$ セルと 120 $\mu\text{m}$ セルとの比較 Performance of 120 $\mu\text{m}$ and 150 $\mu\text{m}$ -thick mc-Si cells

IV特性 IV characteristics



分光感度 internal quantum efficiency



|                        | Jsc(mA/cm <sup>2</sup> ) | Voc (V) | FF    | Eff (%) |
|------------------------|--------------------------|---------|-------|---------|
| 150 $\mu\text{m}$ cell | 32.9                     | 0.610   | 0.750 | 15.1    |
| 120 $\mu\text{m}$ cell | 31.7                     | 0.606   | 0.738 | 14.2    |

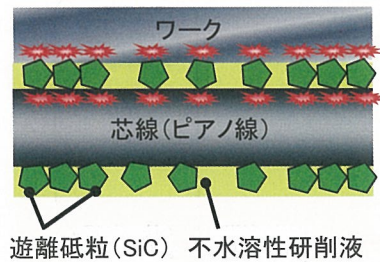
表面テクスチャなし、Al-BSFを使用

Without surface texture  
Improved Al-BSF

### 遊離砥粒ワイヤーと固定砥粒ワイヤーの違い

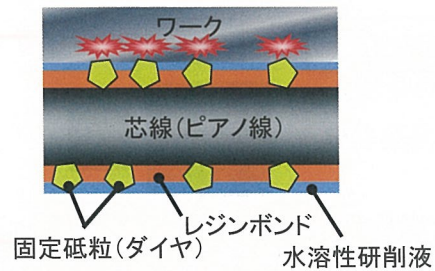
#### 遊離砥粒ワイヤーソー

Loose abrasive wire saw



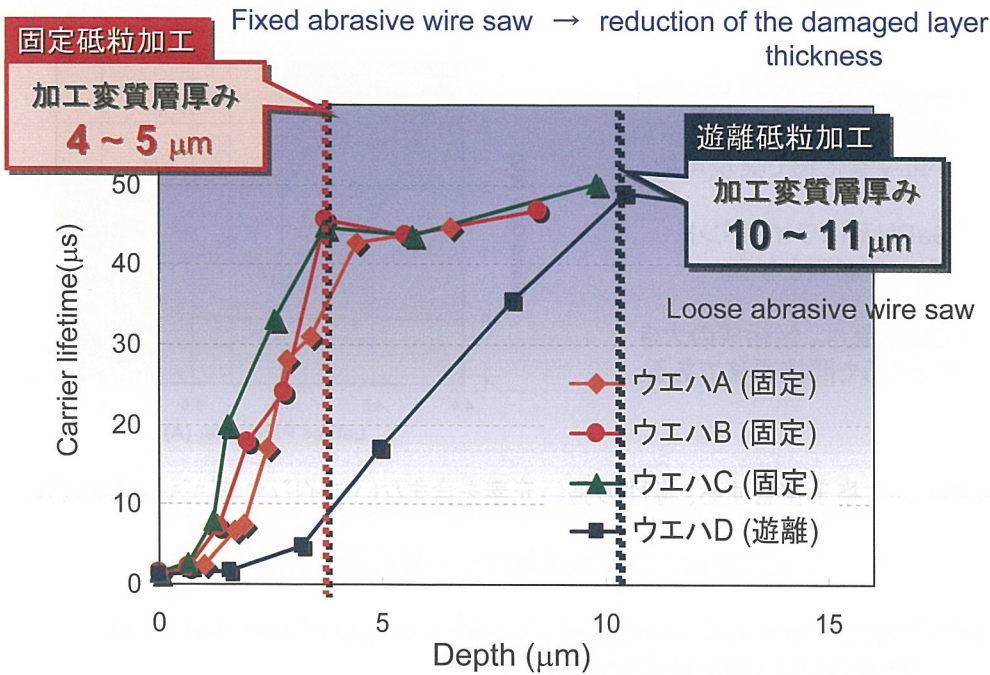
#### 固定砥粒ワイヤーソー

Fixed abrasive wire saw



|      | 遊離砥粒ワイヤー   | 固定砥粒ワイヤー  |
|------|------------|-----------|
| 砥粒運動 | 芯線-ワーク間で回転 | 芯線と共に水平移動 |
| 砥粒分布 | 芯線出入口が密    | 均一        |
| 芯線磨耗 | あり         | なし        |

### 固定砥粒ワイヤーソーによる加工変質層の低減



独立行政法人 産業技術総合研究所

### 多接合太陽電池 multijunction solar cells

#### 結晶Si太陽電池の効率向上

- ・表面、裏面での再結合防止 →BSF、表面不活性化等
- ・吸収波長域拡大 →多接合化: Siに格子整合するワイドバンド半導体が必要

Efficiency improvement of c-Si solar cell → multijunction → combination with widegap material (Eg ~ 1.9 eV)

図1 2接合太陽電池の二つの接合のバンドギャップの組み合わせと理論最高効率。(In)Ga(As)PN (バンドギャップ1.9eV程度)とSi (バンドギャップ1.1eV)の組み合わせでも30%以上の効率が期待できる。

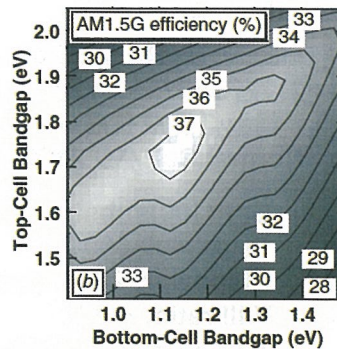


表1 種々の多接合太陽電池構造の提案

| Maximum projected (achieved) efficiencies (%) for multijunction solar cells at 300 K. |                       |                                  |              |                |                  |
|---|-----------------------|----------------------------------|--------------|----------------|------------------|
| Junctions   | Materials             | Band Gap                         | AM0<br>1 sun | AM1.5<br>1 sun | AM1.5<br>500 sun |
| 2   | GaInP/GaAs            | 1.8 eV/1.4 eV                    | 31.4         | 35.1           | 38.1             |
| 2   | GaNPA/Si              | 1.7 eV/1.1 eV                    | 33.8         | 37.4           | 43.8             |
| 3   | GaInP/GaAs/Ge         | 1.8 eV/1.4 eV/0.7 eV             | 34.6 (29.3)  | 38.6 (31.0)    | 44.2 (32.1)      |
| 3   | GaInAsP/GaInNAs/Ge    | 1.70-1.85 eV/1.20-1.25 eV/0.7 eV | 37.3         | 40.5           | 47.3             |
| 3   | GaInP/GaAs/GaInNAs    | 1.8 eV/1.4 eV/1.0 eV             | 39.0         | 43.4           | 48.9             |
| 3   | GaNPA/Si              | 1.8 eV/1.4 eV/1.1 eV             | 36.6         | 40.6           | 47.0             |
| 4   | GaInP/GaAs/GaInNAs/Ge | 1.8 eV/1.4 eV/1.0 eV/0.7 eV      | 39.1         | 40.5           | 51.0             |

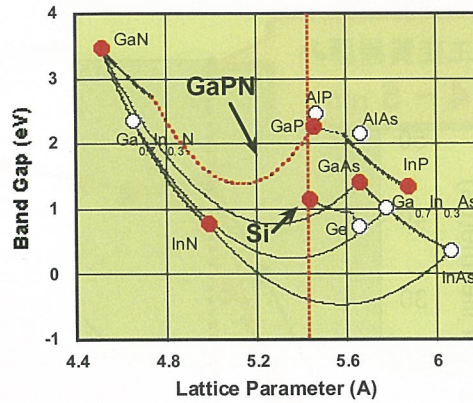
J F Geisz and D J Friedman, Semicond. Sci. Technol. 17, 769 (2002).

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、燐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

GaPN: lattice matches to Si with [N] of 2%, wide band gap of more than 1.9 eV suited for the combination with Si

## 実験 Experiments

### GaPN薄膜成長

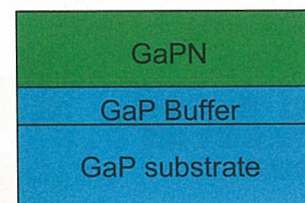
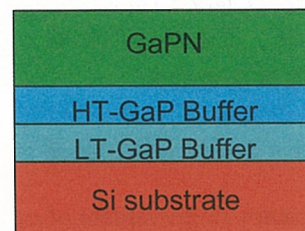
- ・MBE成長 RF-MBE growth of GaPN
- ・2段階GaPバッファ層 for Si基板  
初期低温成長層-300C-100nm
- ・Normal GaPバッファ層 for GaP基板

GaP(100)substrate, Si(100)substrate  
Tsub: 400-600C  
RF power: 200W (typical)  
V/III ratio: ~10  
N2 flow rate: 0.1-0.2 sccm

### 評価 characterization

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

### 試料構造



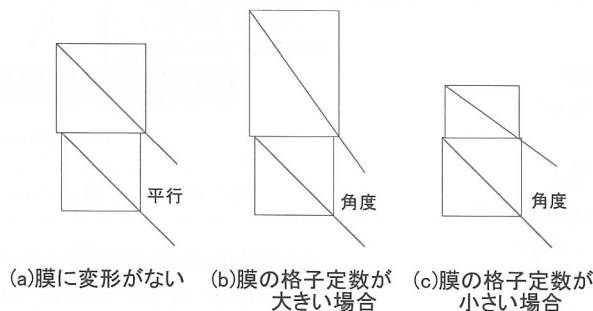
2-step buffer layers for GaPN on Si  
Normal GaP buffer for GaPN on GaP

## GaPNの窒素組成の評価法 Evaluation of nitrogen content by XRD

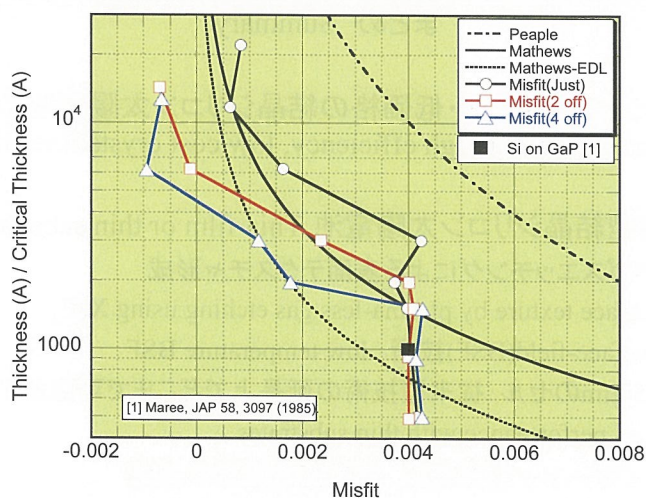
GaPN膜の窒素組成: 歪み系の格子定数

- ・XRDロッキングカーブで膜の格子定数から評価。
- ・膜は歪んで変形していると、基板と膜の回折面が平行にはならない。

→{115}のシングルスキャンでオフセット( $\phi$ )が評価できるか？



膜が歪むと基板と膜の回折面は非平行  
Strained lattice should be taken into account in GaP(N) on Si



GaP膜の面内方向の格子定数の、無歪格子定数からの格子不整合と、膜厚。People 及びMathewsの臨界膜厚と格子不整合の関係と重ねた。

Lattice mismatch in GaP films on Si substrates:

critical thickness has been evaluated to be 0.15 –0.3  $\mu\text{m}$  depending on the offset angle of Si (100) substrates

### GaPNのMBE成長における窒素取込機構

#### Nitrogen incorporation mechanism in the MBE growth of GaPN

N-Tsub: Langmuir型吸着

- ・単層単分子吸着である。
- 複層 and/or 解離吸着ではない。
- ・吸着と脱離が釣り合う定常状態。

Tsub dependence of [N]

Langmuir type, mono-layer adsorption

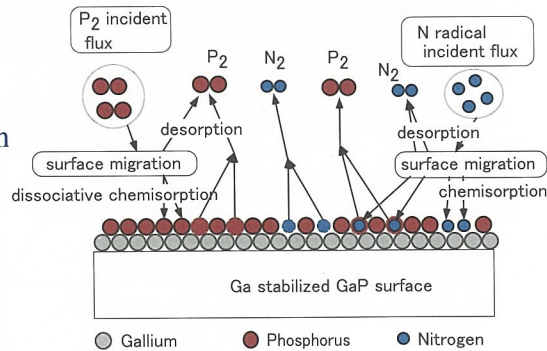
N-N<sub>2</sub>,RF & N-N/P ratio

- ・窒素ラディカル数に比例
- ・N/P比に依存しない。
- Pと競合しない吸着。
- Sticking coefficient が大きく、Ga等に似た取り込み

$[N] \propto [N \text{ radical density}]$

$[N]$  does not depend on N/P ratio

- does not compete with P incorporation
- large sticking coefficient



GaPN/GaPの窒素取り込みの概念図

Schematic of the N incorporation mechanism in the MBE growth of GaPN on GaP

### まとめ Summary

1. チームのミッション: 高効率・低価格の結晶シリコン太陽電池の実現  
Mission : Achievement of high efficiency, low cost crystalline silicon solar cells
2. 極薄膜・超薄型結晶シリコン太陽電池 Thin film or thin substrate c-Si cell
  - ・プラズマレスガスエッチングによる表面テクスチャ形成  
surface texture by plasma-less gas etching using XeF<sub>2</sub>
  - ・低温Back-surface-field(BSF)技術 low temperature BSF
  - ・厚さ120~150μmのセル: 従来型技術の延長上でどこまで可能か?  
cell performance with thin substrates
  - ・固定砥粒ワイヤーソーの有効性 加工変質層厚の低減  
Fixed abrasive wire saw → reduction of the damaged layer thickness
3. 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  
GaPN for the tandem solar cell (combination with Si)
  - ・GaPNの窒素組成の評価法 Evaluation of nitrogen content by XRD
  - ・窒素取り込み機構 Nitrogen incorporation mechanism

平成20年7月28日  
第4回 太陽光発電研究センター成果報告会

## 有機薄膜チームの概要

Recent activity of Organic Thin Film Team

原 浩二郎  
Kohjiro Hara

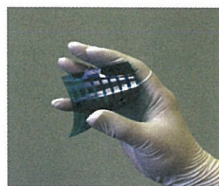
<http://unit.aist.go.jp/rcpv/otf/>

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 太陽光発電研究センターにおける 有機太陽電池の研究開発

- 有機薄膜太陽電池
  - ・ 低分子蒸着型
  - ・ 高分子塗布型 (バルク・ヘテロ接合)
- 有機色素(増感)太陽電池  
有機色素分子と酸化物半導体電極

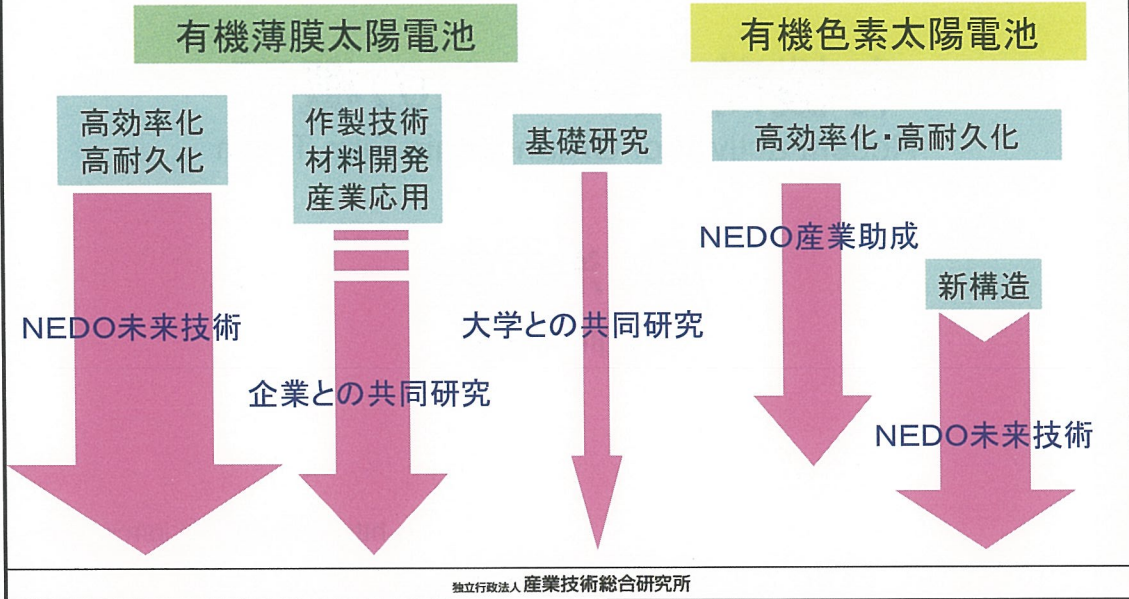
有機分子太陽電池  
Molecular Photovoltaics



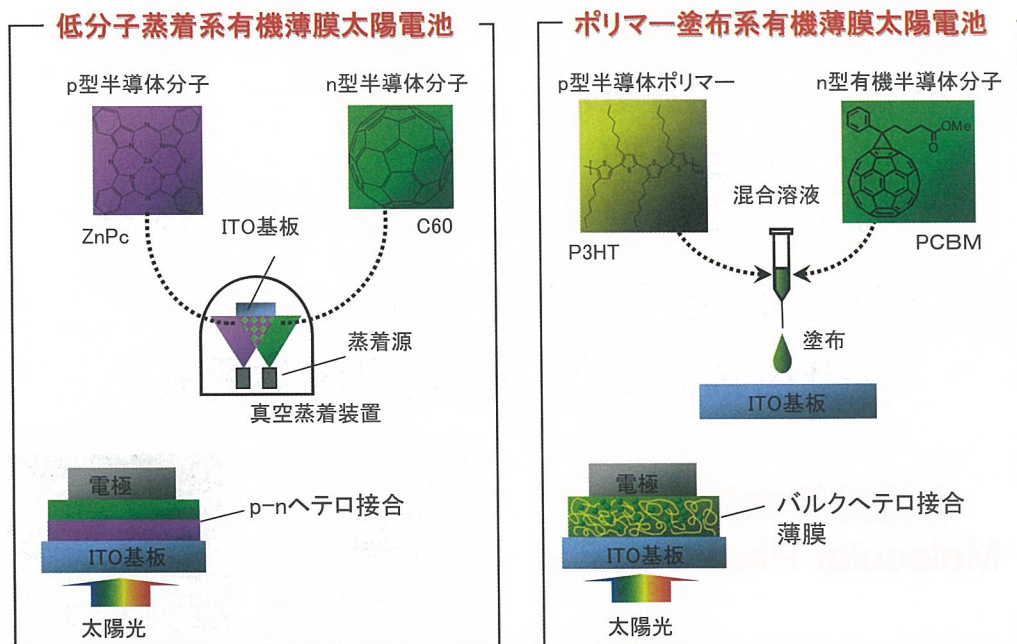
独立行政法人 産業技術総合研究所

# チームの研究体制

近藤, 原, 當摩, Turkevych, 山成, 小江, 鈴木, Wang, Zhang, 崔



# 有機薄膜太陽電池の種類と作製法

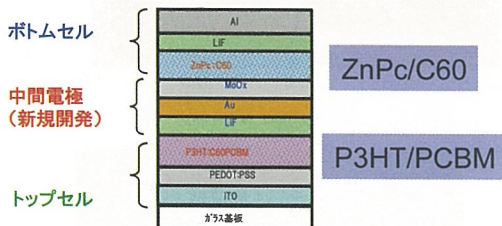
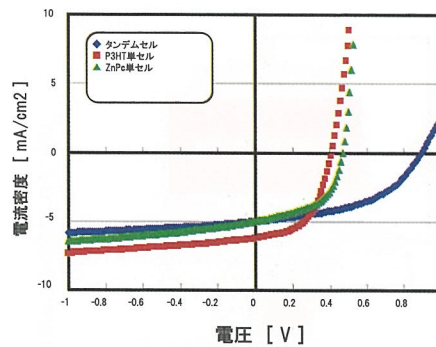
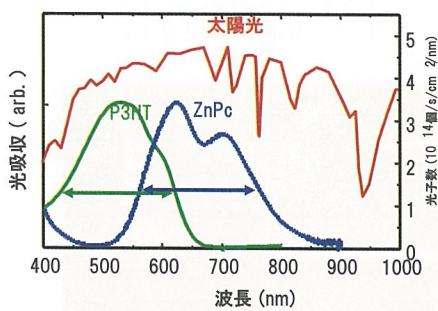




# 有機薄膜太陽電池の取り組み

- タンデム構造による高効率化の検討
- 新規デバイス構造 (超格子構造)の導入  
→ デバイス構造の最適化
- 高分子系の高効率化
- 耐久性の評価 (劣化機構の解明)
- サブモジュールの作製
- 有機材料の基礎的な物性評価

# タンデム型太陽電池の検討



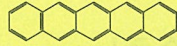
| Cell   | $J_{sc}$ / mA $cm^{-2}$ | $V_{oc}$ / V | FF   | $\eta$ / % |
|--------|-------------------------|--------------|------|------------|
| P3HT   | 6.3                     | 0.41         | 0.54 | 1.6        |
| ZnPc   | 5.0                     | 0.47         | 0.53 | 1.3        |
| Tandem | 5.0                     | 0.89         | 0.48 | 2.2        |

Jscの低下は小、Vocが向上

松下電工との共同研究

C60/rubrene系の3層 → 最大Voc 2.5 V

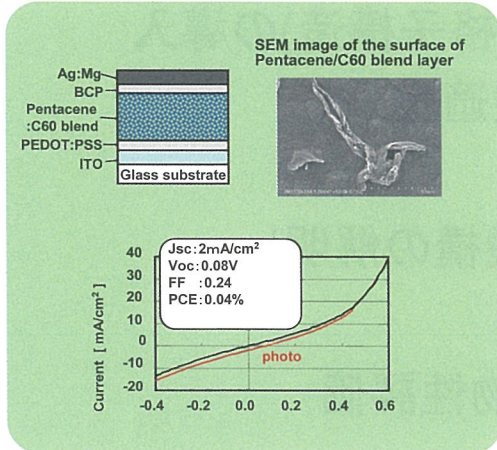
# 有機材料への超格子構造の導入



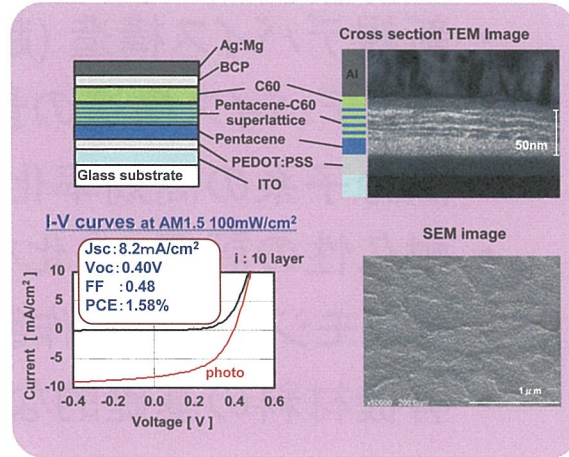
ペンタセン: p型分子



C60: n型分子

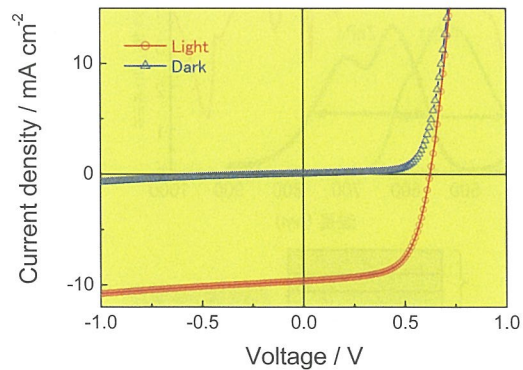
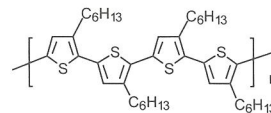
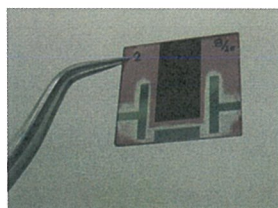
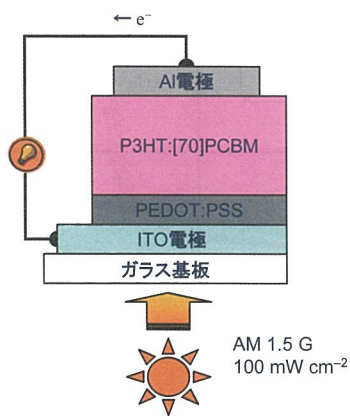


共蒸着では性能向上しない



交互積層による超格子構造で性能向上

# 高分子系太陽電池 (P3HT:PCBM)

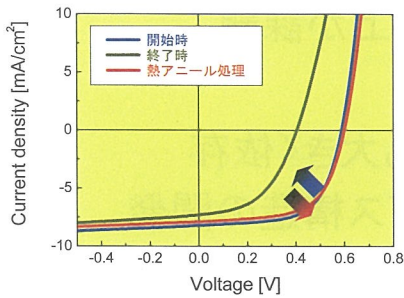


**PCE = 3.8 % @ 1cm<sup>2</sup>**

J<sub>SC</sub> = 9.68 mA cm<sup>-2</sup>

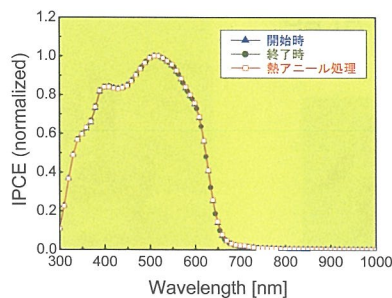
V<sub>OC</sub> = 0.62 V, FF = 0.64

# 高分子系の耐久性試験 (N<sub>2</sub>雰囲気下)



試験時間50時間  
→ 変換効率(PCE)約40%まで低下

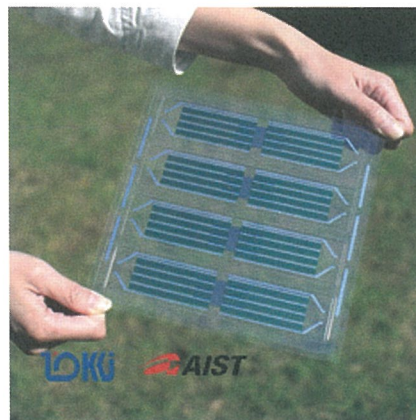
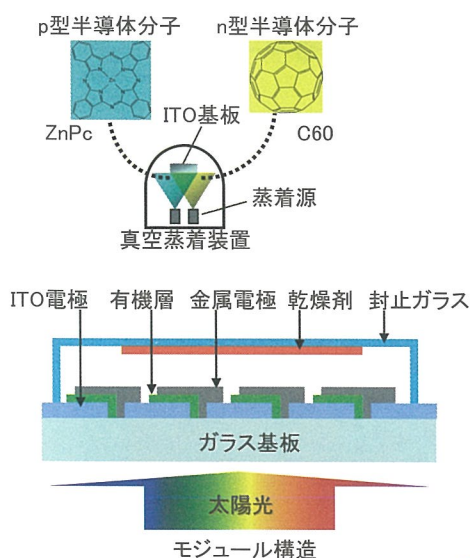
**熱アニール処理**  
→ 試験開始時の値まで**特性が回復**することをはじめて確認



IPCEのスペクトル形状は変化なし  
→ **有機分子自体の劣化はない**

→ 性能低下はデバイス中にトラップされたキャリアの蓄積が主要因であると考えられる

# 有機薄膜太陽電池サブモジュールの試作



200 × 200 mm  
サブモジュール

有機ELの製造技術を転用可能

トッキ株式会社と共同開発

## 有機薄膜太陽電池のまとめ

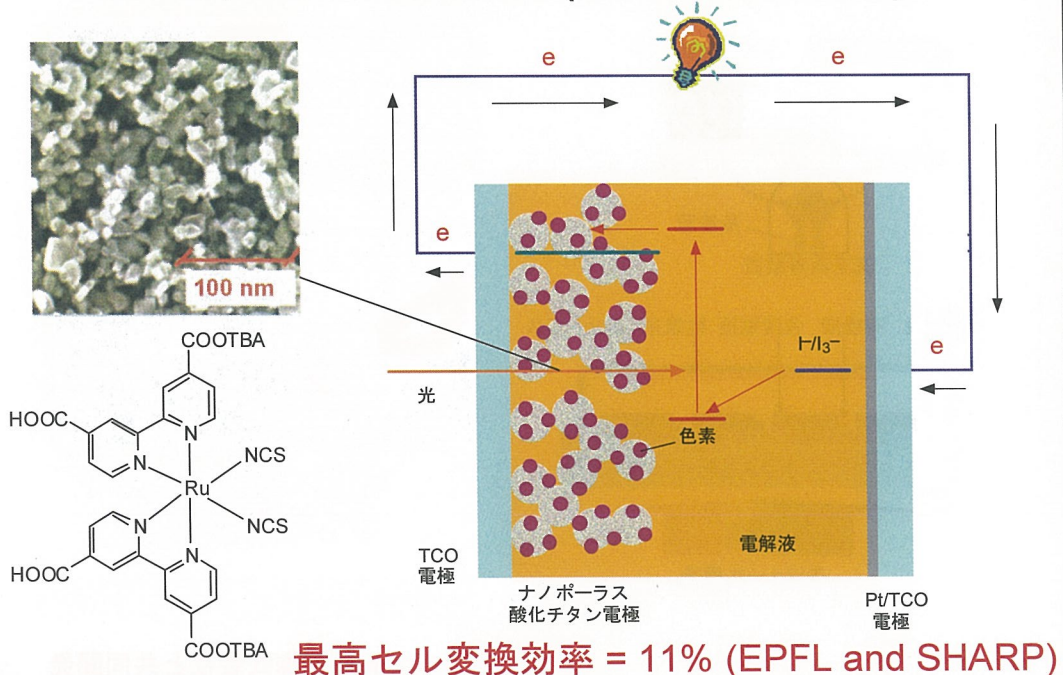
- さらなる高効率化と耐久性の向上が課題  
→ タンデム化は一つの方向性
- セルの特性はデバイス構造にも大きく依存  
→ 各有機分子に最適なデバイス構造の開発
- サブモジュール化に成功  
→ 有機ELの作製技術が利用可能

トッキ株式会社、  
三菱商事株式会社  
と共同開発



独立行政法人 産業技術総合研究所

## 色素増感太陽電池 (Graetzel cell)



独立行政法人 産業技術総合研究所

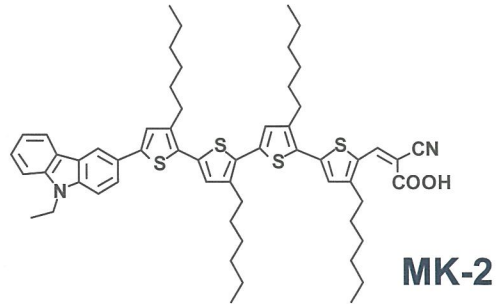
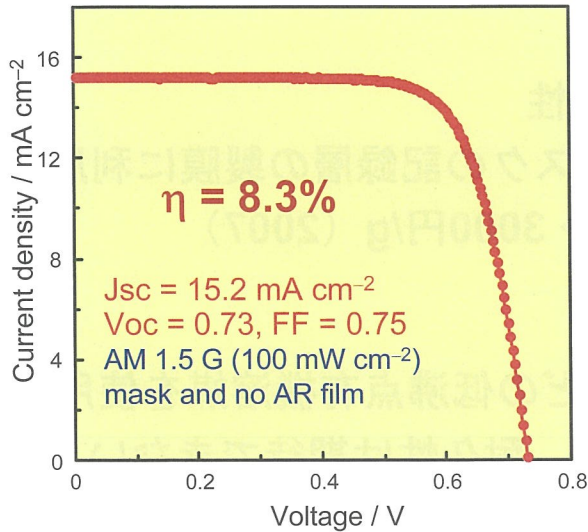
## 色素増感太陽電池・実用化への問題点

- ・ Ruの資源的制約
    - 価格高騰の可能性
    - 例. ハードディスクの記録層の製膜に利用  
300円/g → 3000円/g (2007)
  - ・ 耐久性
    - アセトニトリルなどの低沸点有機溶媒を使用
    - ～11%のセル → 耐久性は期待できない
- 新しい材料を用いたデバイス開発が必要不可欠

## 有機色素太陽電池の開発

- ・ 高性能の有機色素の開発
  - 資源的制約が少ない、高光吸収係数
- ・ イオン液体電解液
  - 難揮発性による耐久性の向上
- ・ 構造制御半導体ナノロッド電極
  - 高キャリア移動度、フォトニック効果
  - などによる高効率化
- ・ 電子移動メカニズムの評価

## 最高変換効率 (有機溶媒系電解液)



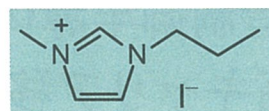
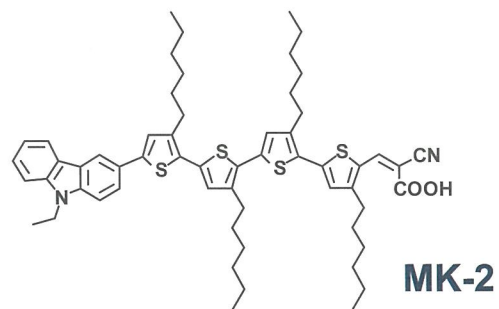
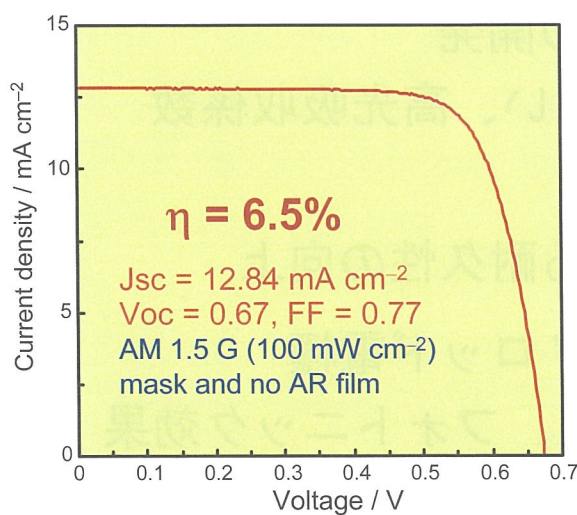
Irradiated light  
 AM 1.5G (100 mW cm<sup>-2</sup>)  
 with mask, without AR film

TiO<sub>2</sub> electrode: 16 μm

Electrolyte  
 0.6 M DMPImI + 0.1 M LiI +  
 0.2 M I<sub>2</sub> + 0.5 M TBP in AN

Wang et al., *Chem. Mater.* **2008**, *20*, 3993

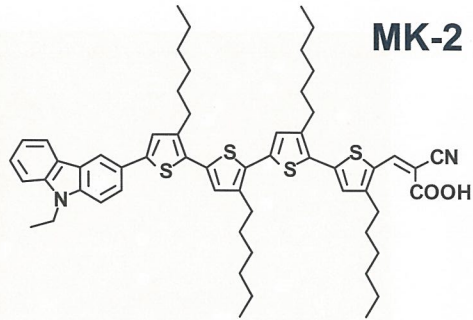
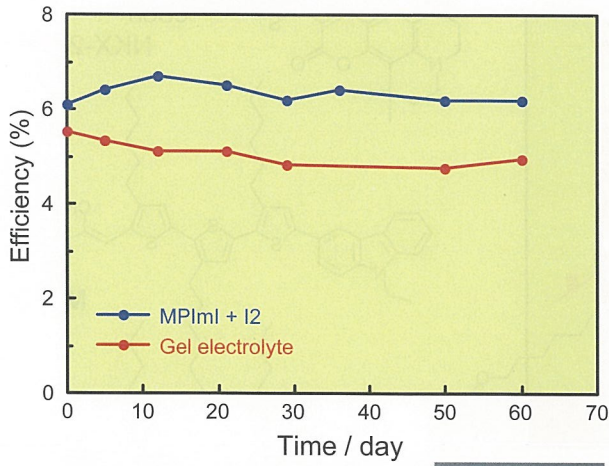
## 光電変換特性 (イオン液体電解液)



$\eta = 5.1\%$  (N719)  
 $J_{sc} = 11.64 \text{ mA cm}^{-2}$   
 $V_{oc} = 0.62, FF = 0.71$

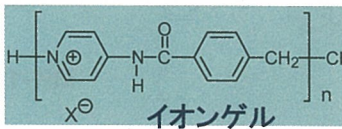
Electrolyte : MPlmI + 0.4 M I<sub>2</sub>

## 光電変換特性の耐久性 (MK-2)



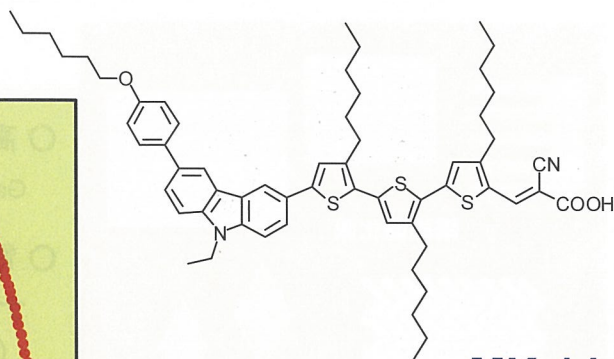
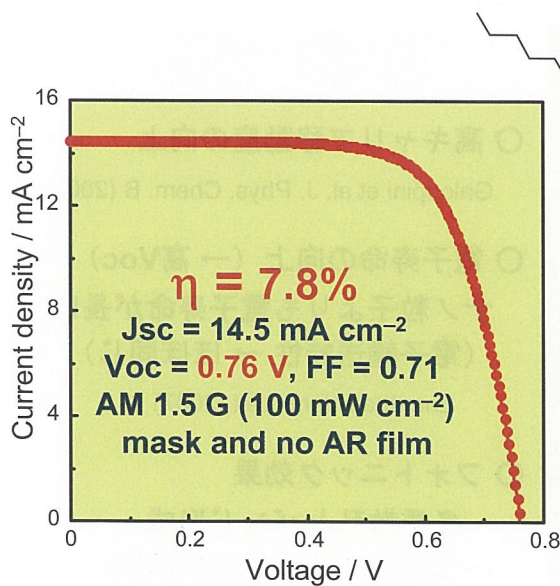
光照射条件  
 100 mW cm<sup>-2</sup> (UV cut off)  
 温度 50 ° C

7%近い高効率  
 で十分な耐久性



独立行政法人 産業技術総合研究所

## 新規有機色素の太陽電池特性

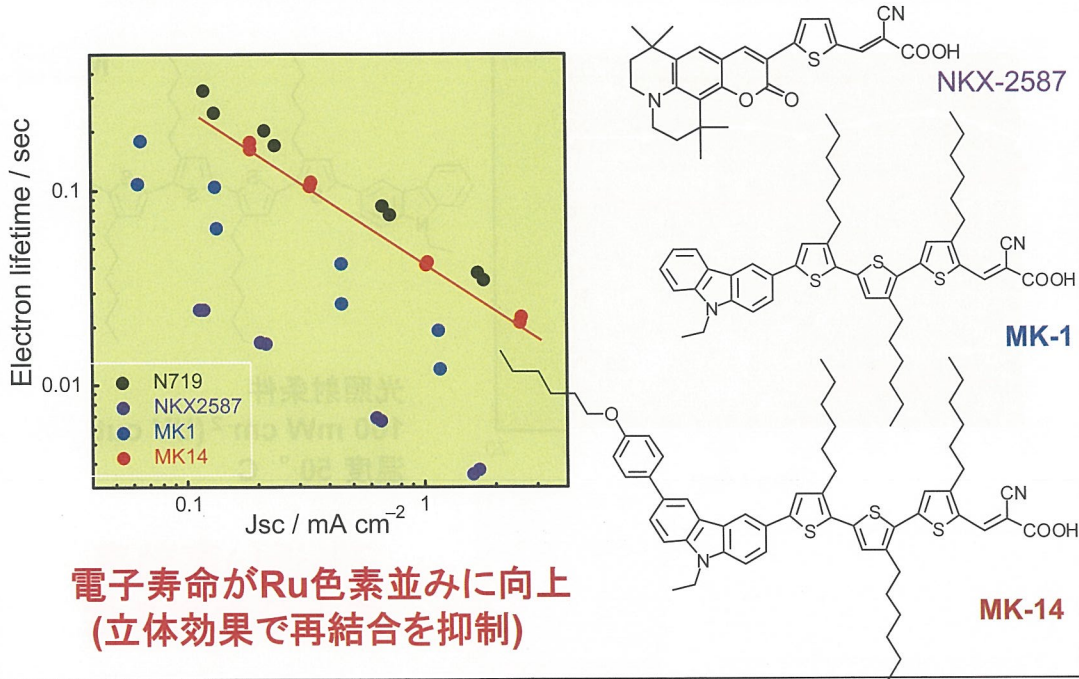


MK-14

有機色素では最高  
 レベルの開放電圧Voc

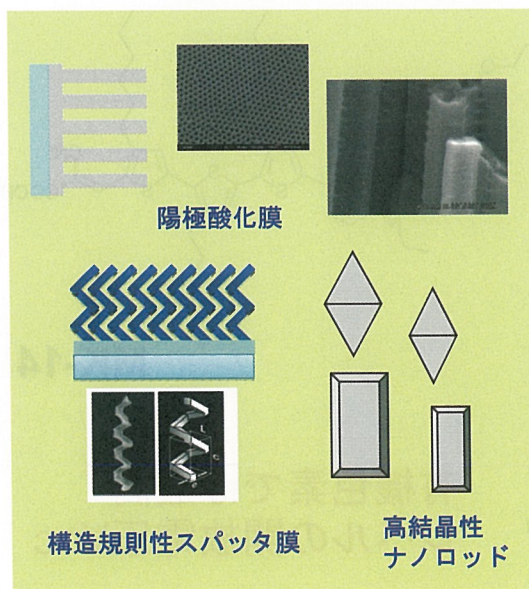
独立行政法人 産業技術総合研究所

## 新規分子構造による電子寿命の改善



独立行政法人 産業技術総合研究所

## 構造制御半導体ナノロッド材料



### 高効率化への効果

- 高キャリア移動度の向上  
Galoppini et al. J. Phys. Chem. B (2006)
- 電子寿命の向上 (→ 高Voc)  
ナノ粒子よりも電子寿命が長い  
(電子輸送特性 → ほぼ同じ)  
Zhu et al. Nano Lett.(2007)
- フォトニック効果  
多重散乱とバンド形成  
→ 光閉じこめ (Jscの増加)

独立行政法人 産業技術総合研究所



## 有機色素太陽電池のまとめ

- 高性能化と高耐久性 (MK-2)
  - 最高効率8.3%(有機溶媒系電解液)
  - 効率6.5%(イオン性液体電解液)
  - Ru色素を上回る
  - 良好な耐久性
- 新規MK色素の開発
  - 電子寿命、Vocの向上
- 構造制御半導体電極

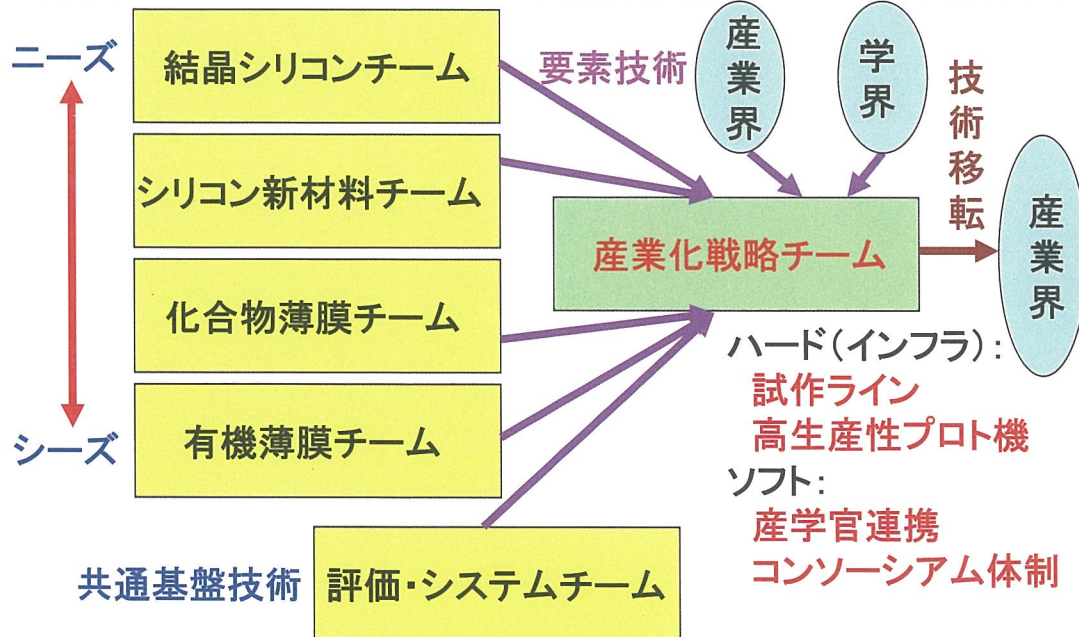


# 産業化戦略チームの概要

## Recent Activity of Strategic Industrialization Team

太陽光発電研究センター  
 産業化戦略チーム長  
 増田 淳  
 Atsushi Masuda

### 太陽光発電研究センター内での産業化戦略チームの位置付け



Mission of Strategic Ind. Team is technical transfer to industry.

## 産業化戦略チームのミッション

Mission of Strategic Ind. Team

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。

Verification of novel techniques, Fostorage of young researchers

産学官連携体制→コンソーシアム型共同研究

Collaboration under consortium

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 Test line of thin-film Si solar cells

薄膜シリコン太陽電池の高生産性技術開発(NEDO委託)

各チームの共通基盤技術となる研究 Flexible substrate consortium

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 Novel tech. of c-Si

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 Others

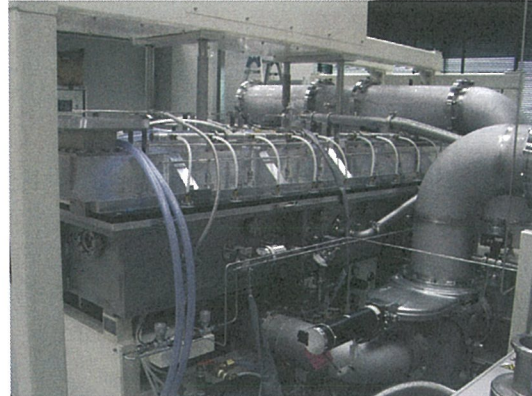
太陽電池大量生産時代のコスト試算

コンソーシアム以外の民間企業ならびに大学との共同研究(14社、8大学)

## インフラの例 Example of apparatuses



310 mm × 410 mm基板対応  
 薄膜シリコン太陽電池用プラズマCVD装置  
 Plasma CVD apparatus for thin-film  
 silicon solar cells with a substrate size of  
 310 mm × 410 mm.



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  
 Microwave plasma CVD apparatus for  
 thin-film silicon with a substrate size of 2 m.

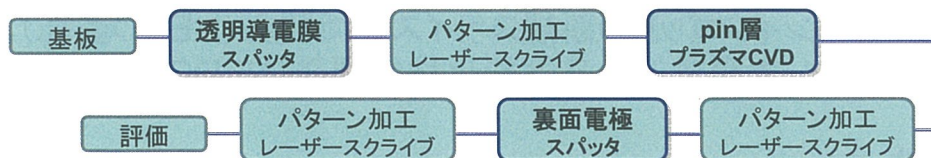
## 産学連携対応薄膜Si太陽電池試作ライン

Test line for thin-film Si solar cells for collaboration



小面積実験用装置での条件検討では、実際の工業ラインとの相違が大きい

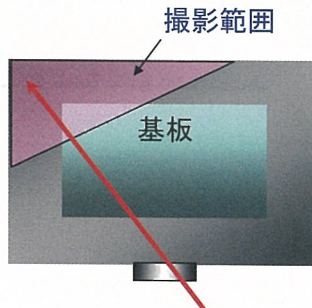
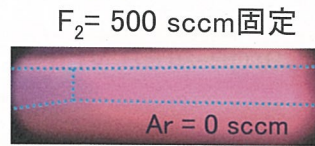
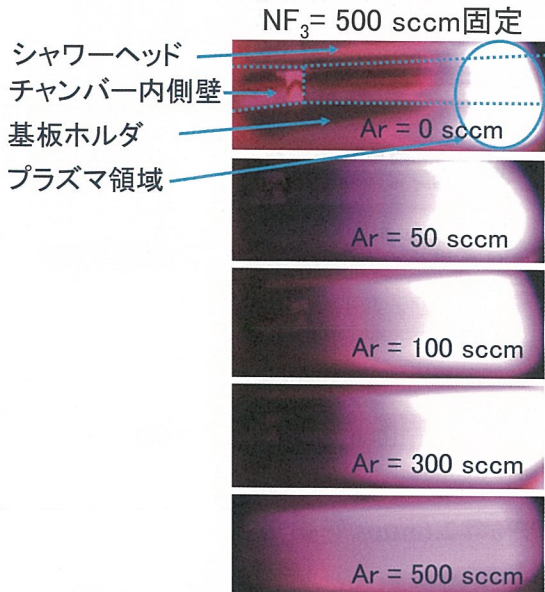
第1世代ガラス相当(310mm × 410mm)の薄膜シリコン太陽電池試作ラインを構築



詳細:ポスターセッション 武山洋子(産業技術総合研究所)

# フッ素プラズマクリーニング

# F<sub>2</sub> plasma cleaning



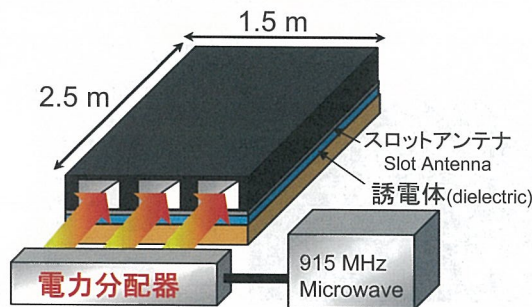
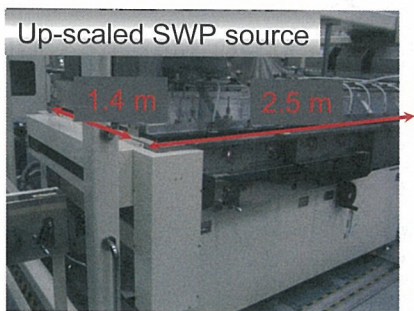
チャンバー上面図.  
 ヴューイングポートから矢印の向きで撮影.  
 No Ar dilution is needed for F<sub>2</sub> plasma.

フッ素プラズマクリーニング前後で太陽電池特性も変化しない  
 No change in solar-cell performances after F<sub>2</sub> plasma cleaning.

詳細:ポスターセッション 柄澤 稔(産業技術総合研究所)

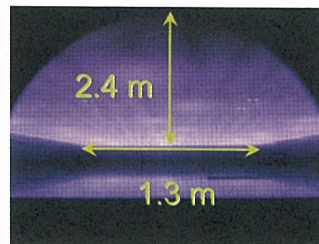
# マイクロ波プラズマCVDによる微結晶Si大面積堆積

## Large-area microwave plasma CVD of $\mu$ c-Si:H films



微結晶シリコン  $\mu$ c-Si:H

- ・製膜速度 dep. rate: **2.4 nm/s  $\pm$  10%**
- ・粒径 grain size: **32 nm  $\pm$  2%**
- ・結晶化率 cryst. fraction: **77%  $\pm$  4%**



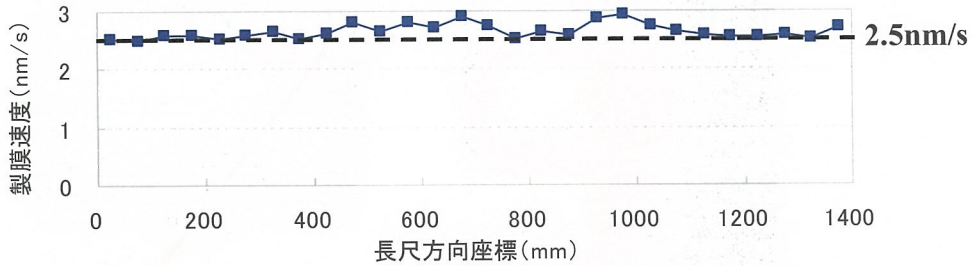
Ar/H<sub>2</sub>プラズマ発光分布

詳細:ポスターセッション 石島達夫(名古屋大学)

# VHFプラズマCVDによる微結晶Si大面積堆積

Large-area VHF plasma CVD of  $\mu$ c-Si:H films

## 長尺プラズマ装置による均一製膜実証



- 微結晶Si薄膜 長尺方向膜厚分布 $\pm 9\%$ @ $2.6\text{nm/s}$ を得た
- 長尺電極を並列化し、 $4\text{m}^2$ 基板に対応した均一製膜に適用する

詳細:ポスターセッション 彌政敦洋(三菱重工業)

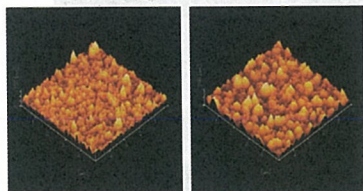
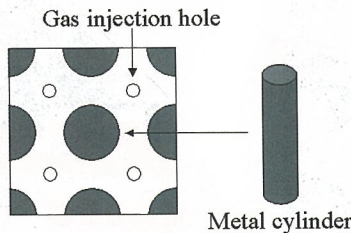
独立行政法人 産業技術総合研究所

# マルチホローカソードプラズマCVDによる 微結晶Si高速堆積

High-rate preparation of  $\mu$ c-Si:H films by MHC plasma CVD



Multi-Hollow-Cathode (Cylinder-type)



MHC-CVD

HPD-CVD

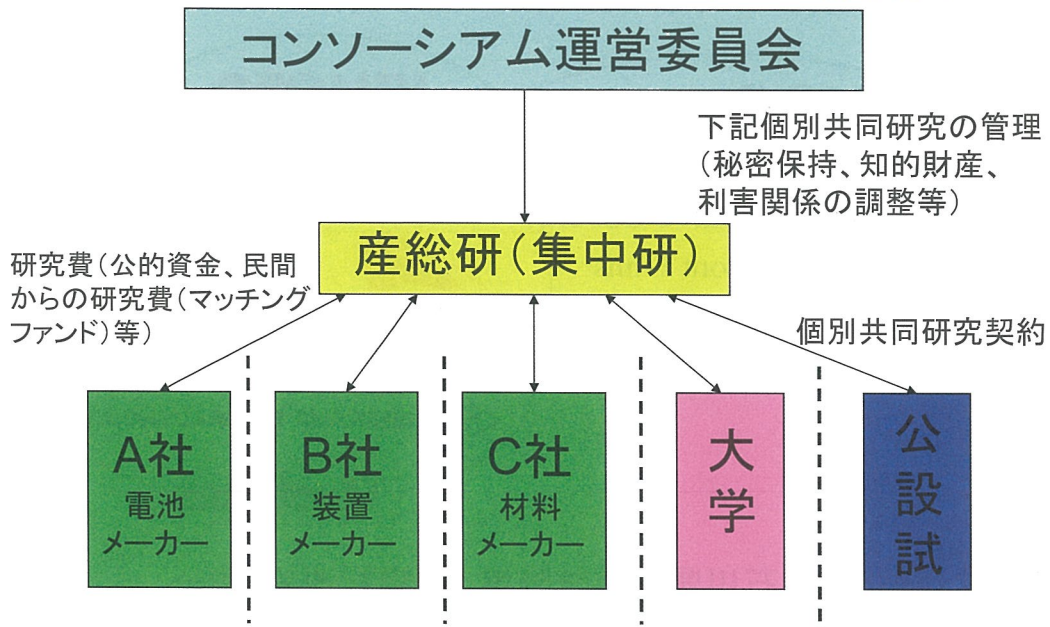
AFM image of  $\mu$ c-Si:H solar cells

詳細:ポスターセッション

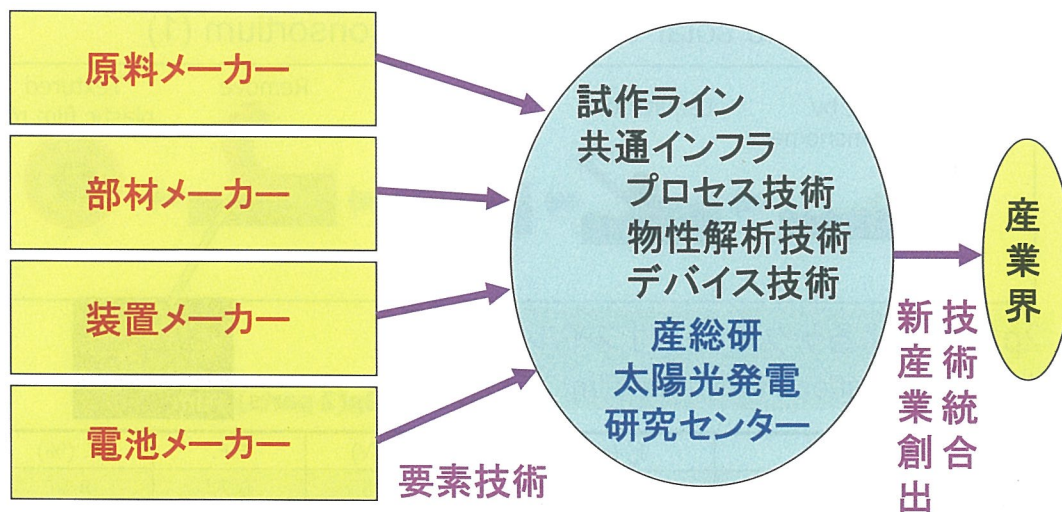
竹中研介(富士電機アドバンステクノロジー)

独立行政法人 産業技術総合研究所

# コンソーシアムの基本的構成



独立行政法人 産業技術総合研究所

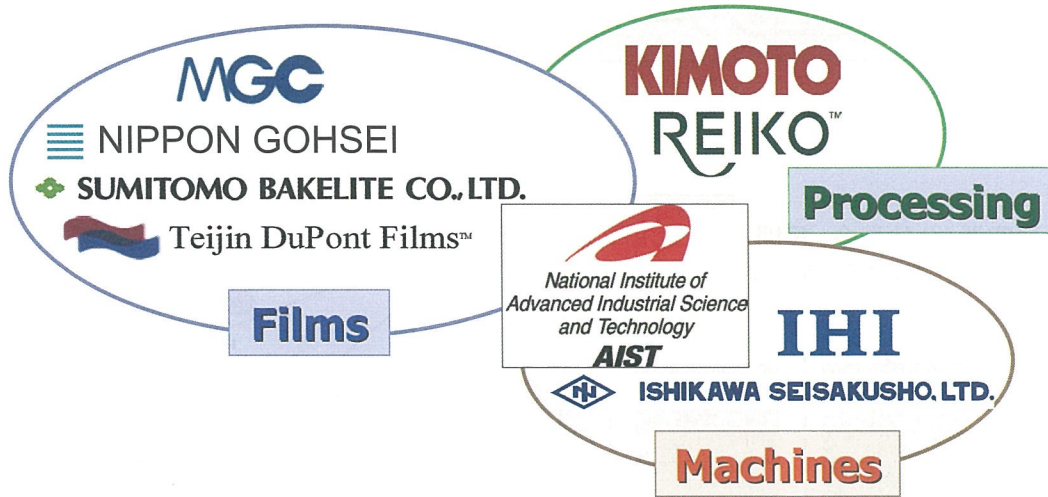


コンソーシアム型共同研究を通じた新産業創出  
Creation of new industry by collaboration under consortium

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

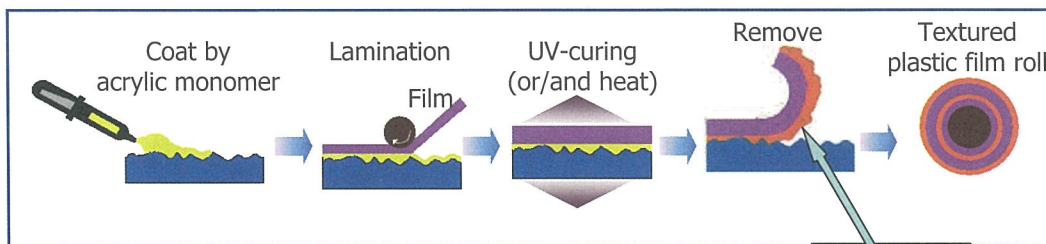
Flexible solar-cell substrates consortium



オブザーバー: 石川県工業試験場、太陽電池メーカー  
 第1期: 2006.6.1~2008.3.31

## フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム(1)

Flexible solar-cell substrates consortium (1)



2p成形によるテクスチャ付フィルム作製  
 Bilayer fabrication of textured film

2p(2 parts) Film

| Substrate                    | $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$ (V) | F.F. | Eff. (%)   |
|------------------------------|--------------------------------|--------------|------|------------|
| Asahi-U                      | 14.7                           | 0.85         | 0.71 | 8.9        |
| Glass <b>with texture</b>    | <b>13.3</b>                    | 0.84         | 0.71 | <b>7.9</b> |
| Glass without texture        | 11.4                           | 0.84         | 0.66 | 6.3        |
| PEN film <b>with texture</b> | <b>11.5</b>                    | 0.86         | 0.60 | <b>5.9</b> |
| PEN film without texture     | 9.8                            | 0.83         | 0.61 | 4.9        |

詳細: ポスターセッション 野辺丈司(きもと)



# フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム(2)

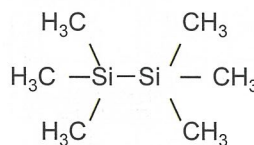
## Flexible solar-cell substrates consortium (2)

### シランを用いないバリア膜形成 Barrier film formation without silane

Si含有ガス:  $(\text{CH}_3)_3\text{SiSi}(\text{CH}_3)_3$  (ヘキサメチルジシラン)

その他の材料ガス:  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$

成膜装置: Cat-CVD装置



Hexamethyldisilane B.P.112°C

表面平滑で透明なバリアフィルムを得た。

膜中炭素を減らし、Si-N、Si-Oの結合を増やすことで、バリア性能は向上した。

バリア性能 WVTR=0.02g/m<sup>2</sup>/dayのバリアフィルム膜が、シランガスを用いずに堆積速度40nm/minで得られた。

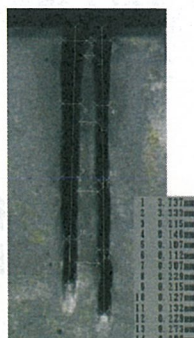
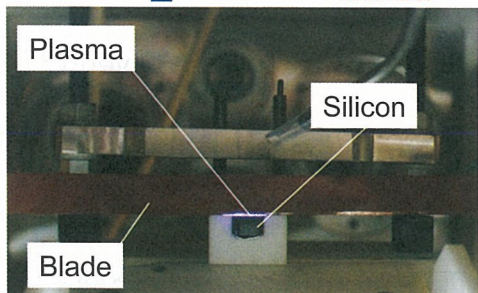
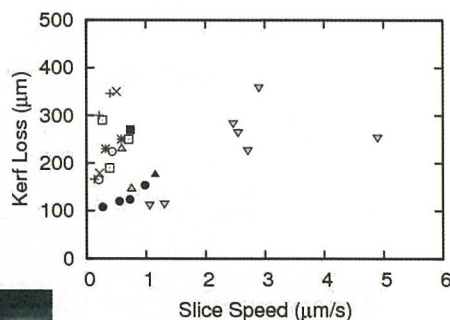
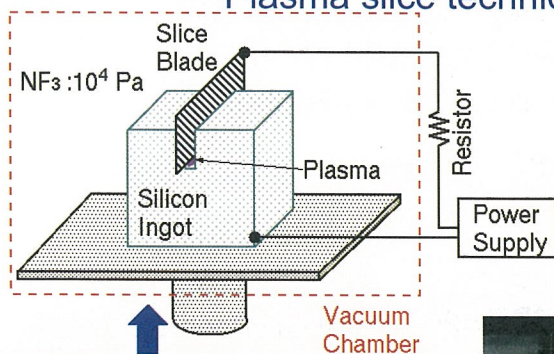
Barrier films with WVTR=0.02g/m<sup>2</sup>/day were obtained at 40 nm/min using no SiH<sub>4</sub>

詳細:ポスターセッション 仁木敏一(石川製作所)

独立行政法人 産業技術総合研究所

# 結晶シリコンインゴットのプラズマスライス技術

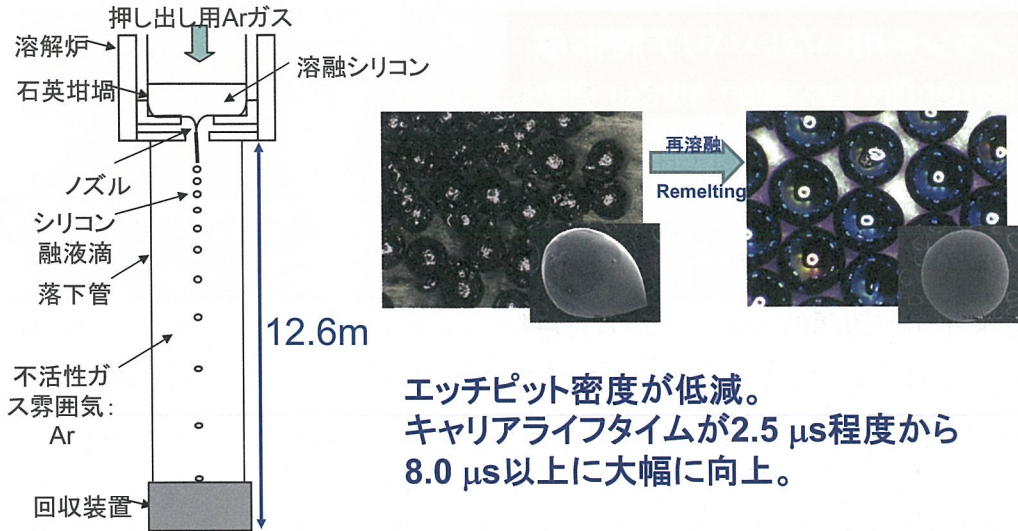
## Plasma slice technique of Si ingot



詳細:ポスターセッション  
根本茂幸  
(トーヨーエイテック)

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 球状シリコンの高品質化技術 High quality spherical Si



エッチピット密度が低減。  
キャリアライフタイムが2.5  $\mu\text{s}$ 程度から  
8.0  $\mu\text{s}$ 以上に大幅に向上。

詳細:ポスターセッション 劉正新(産業技術総合研究所)

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 飛躍的低コスト化を可能にする 薄膜シリコン太陽電池仮想工場 Virtual factory for thin-film silicon solar cells with remarkable low-cost production

想定条件 Condition

開発完了時期:2015年 Completed in 2015

仮想工場の規模:10GW Scale:10 GW

太陽電池の種類:薄膜Si太陽電池 Thin-film silicon solar cells

用途:太陽光発電所を想定 for MW-class PV systems

目標モジュールコスト:50円/W Target module cost: 50 yen/W

必要な要素技術を抽出し  
今後の開発計画に役立てたい

詳細:口頭講演(29日15時) 小西正暉(産業技術総合研究所)

独立行政法人 産業技術総合研究所

## まとめ

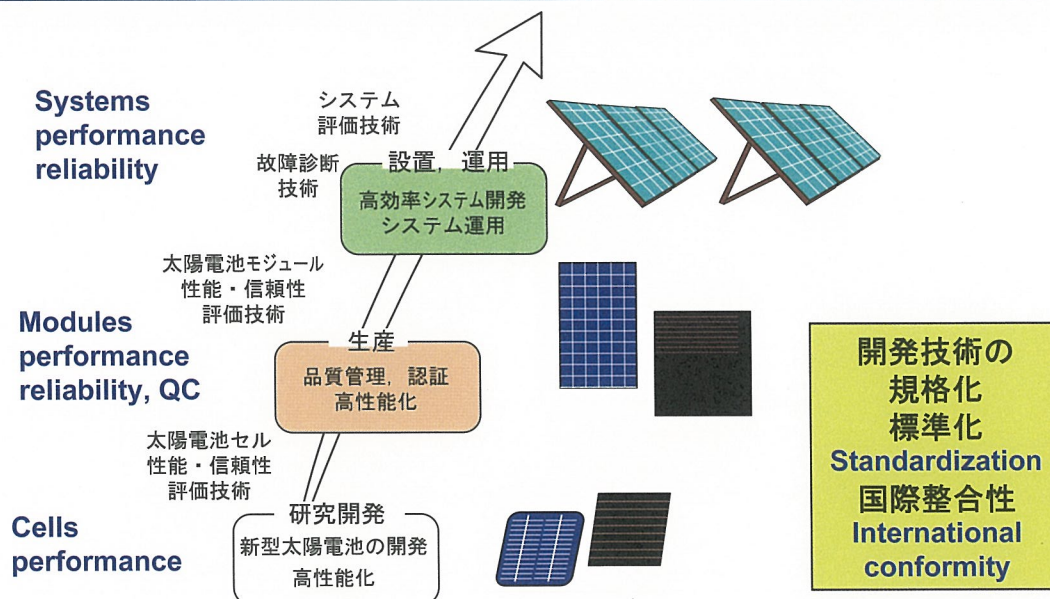
- 産業化戦略チームは、産学官が有する太陽電池に関する要素技術を抽出、整理するとともに、産業界に移転し、実用化の加速を図ることを第一義の目的としている。
- 目的達成のために、実用サイズに準ずる大きさの試料で試験を実施可能な試作ラインを構築した。
- フレキシブル太陽電池基材コンソーシアムをはじめとして、民間企業、大学と数多くの共同研究を実施し、太陽電池業界の将来を担う若手人材の育成にも注力している。

# 評価・システムチームの概要

Recent activity of Characterization, Testing and Systems Team

菱川 善博

Yoshihiro HISHIKAWA



## 太陽電池評価技術・システム技術の役割 PV Characterization and System technologies

# 研究の目的 Target

2030年100GW級のPV導入に不可欠な共通の基盤となる技術を確立する。Basis of mass deployment of PV



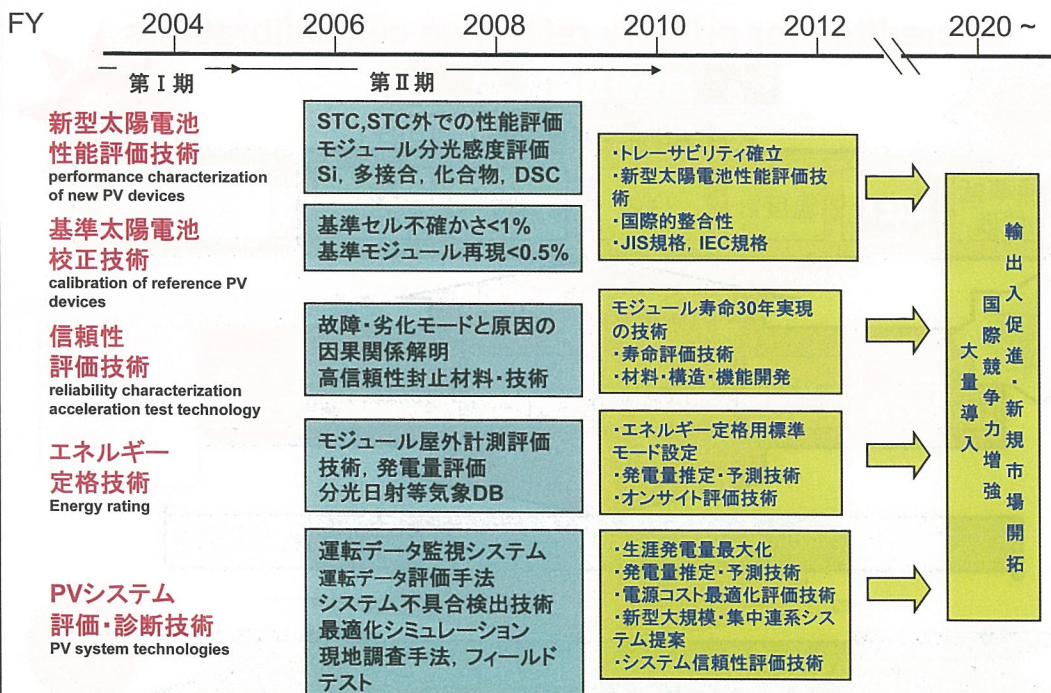
太陽電池性能評価技術・信頼性評価技術開発

PVシステム評価技術・診断技術開発

Characterization of the performance and reliability of PV cells, modules and systems

太陽電池システムの大量導入, 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。

## 評価・システム技術ロードマップ Roadmap



## 新型太陽電池セル・モジュールの性能評価技術 New PV devices Performance Characterization Technologies.

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70サンプル+α/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 (NSTDA, ITRI, etc.)
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

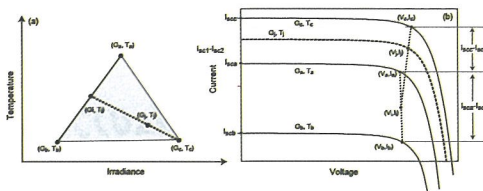
モジュール内各セルの分光感度の分離測定  
SR measurements of each cell in a module



IV特性の温度・照度補正式を開発  
→ 国際規格 (IEC) に提案・審議中  
IV Translation equations for T and G

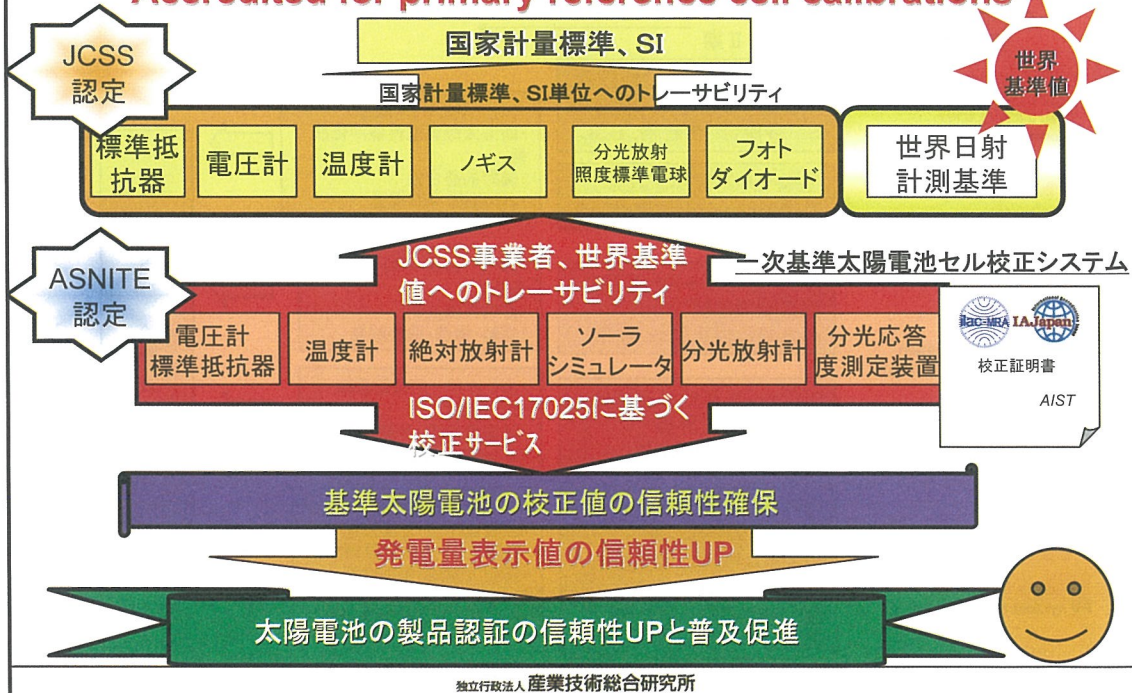
$$V_3 = V_1 + a \cdot (V_2 - V_1)$$

$$I_3 = I_1 + a \cdot (I_2 - I_1)$$

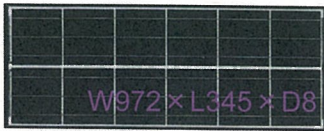


## ISO/IEC17025へのGlobal MRAな適合性認定を取得

Accredited for primary reference cell calibrations

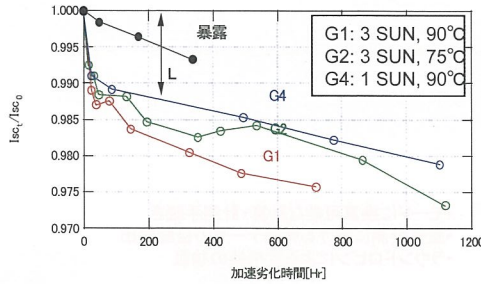


# 信頼性評価技術



複合加速劣化試験装置と試験に用いたモジュール  
Combined stresses acceleration test equipment and test modules.

## Long term reliability test of PV modules



加速試験時間と規格化したIscの変化

温度および照度に関する加速係数を計算

The acceleration factor for temperature and irradiance is calculated.

東京における平均積算日射量で計算:  
3SUN, 90°C加速試験で  
160倍の加速係数に相当

【今後の予定】モジュールA → モジュールB

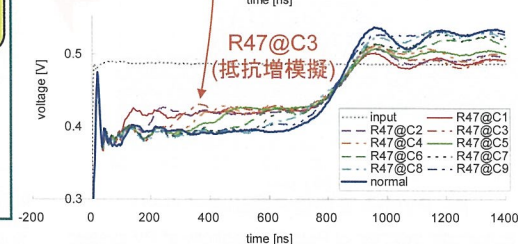
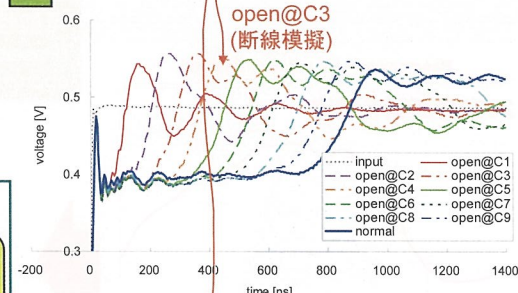
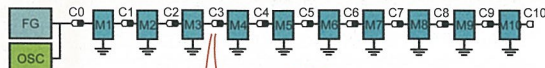
# PVシステムの故障診断技術 PV systems failure detection

計画: システム不具合検出技術開発  
オンサイト不具合箇所検出手法開発

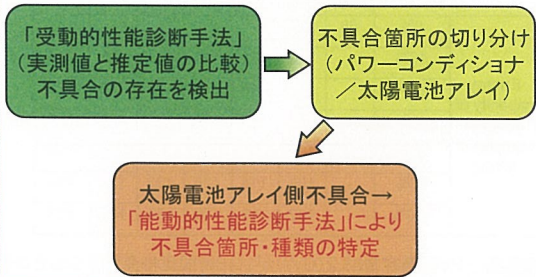
・ 応答波形測定により、ストリング中の断線位置および直列抵抗増が検出可能。

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。



### 太陽光発電性能診断システム



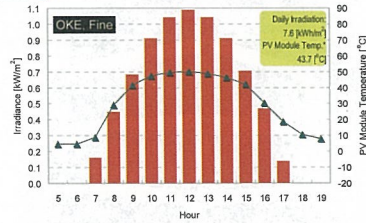
# 発電量評価技術の研究開発 Energy rating technology

## 目的

- 多様化する太陽電池技術に対し、STCを補完する評価体系として、発電量定格方式を推進
- 各種太陽電池の「発電量」による競争を促す物差し
- 「適材適所」による発電量の最大化を可視化

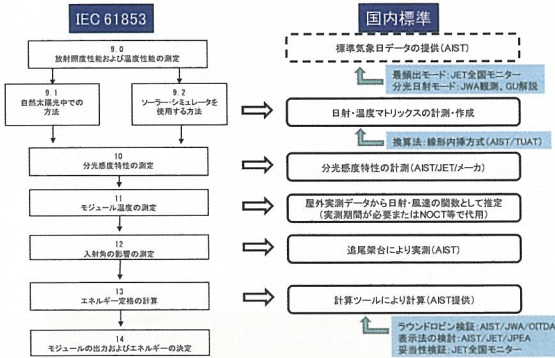
## モード

- 各種太陽電池モジュールを格付けする前提となる気象条件(日射量、気温、分光日射量)



## 計測法

- モードに換算可能な計算・計測手続き
- 屋外計測における有効データの自動抽出
- ラウンドロビンによる定格値の検証



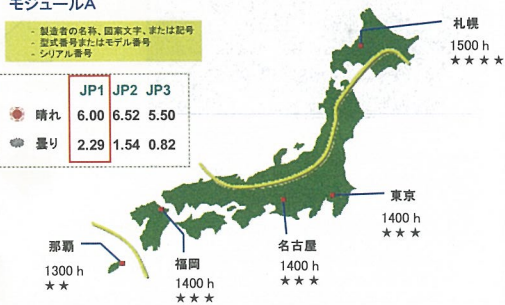
## 表示法

- 銘板表示および試験報告書
- 地域の年間発電量等との対比

### モジュールA

製造者の名称、国名文字、または記号  
型式番号またはモデル番号  
シリアル番号

|       | JP1  | JP2  | JP3  |
|-------|------|------|------|
| ☀️ 晴れ | 6.00 | 6.52 | 5.50 |
| ☁️ 曇り | 2.29 | 1.54 | 0.82 |



独立行政法人 産業技術総合研究所

## 太陽光発電システムの導入可能量に関する研究

Estimating potential for the introduction of PV systems into the energy system

計画：需給バランスの観点におけるPVシステム導入可能量の検討。  
(To estimate possible capacity of PV system by means of power demand supply balance analysis.)

2030年断面を想定して、停止できないベース電源+PVの発電量が1時間でも需要データに割り込む点を抽出し、その場合の導入量を限界量と仮定して分析を行った。蓄電設備無しで約88GW、蓄電設備有りで約130GWの導入可能性を試算した。  
(Possible capacity of PV system was estimated as approximately 88GW without energy storage equipment.)

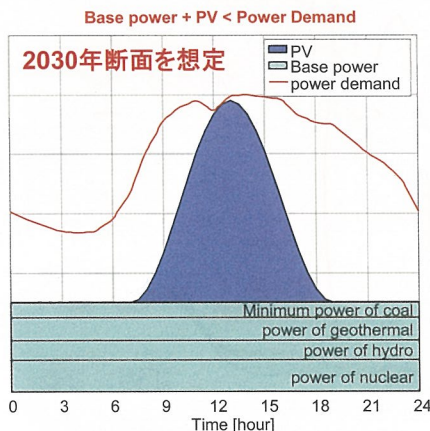


図 PV導入可能量の算出のイメージ

Fig. Schematic diagram of Possible capacity of PV system

表 PV導入可能量

Table. Possible capacity of PV system

| PV system [GW] | Power of storage equipment [kW] |     |     |     |     |     |      |
|----------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|                | 0%                              | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 100% |
| 0%             | 88                              | -   | -   | -   | -   | -   | -    |
| 10%            | -                               | 102 | 111 | 111 | 111 | 111 | 111  |
| 20%            | -                               | 102 | 116 | 123 | 123 | 123 | 123  |
| 30%            | -                               | 102 | 116 | 130 | 130 | 130 | 130  |
| 40%            | -                               | 102 | 116 | 130 | 133 | 133 | 133  |
| 50%            | -                               | 102 | 116 | 130 | 133 | 133 | 133  |
| 100%           | -                               | 102 | 116 | 130 | 133 | 133 | 133  |

貯蔵容量： PV設備容量88.2(GW)が1日6時間定格発電する場合の電力量 529.2(GWh)を表内100%

入出力容量： 蓄電設備無しのPV導入可能量88.2(GW)を表内100%

独立行政法人 産業技術総合研究所



## 今後の予定 Plans

1. 太陽電池性能評価技術 Performance characterization  
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 Reliability characterization  
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 System technologies  
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, 導入可能量。  
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 Standardization  
研究成果を基に国内・国際規格への提案。

# 口頭発表

# CIGS集積型モジュールの 高効率化・インライン化技術開発

Manufacturing of high-efficiency CIGS integrated modules using in-line deposition technology

化合物薄膜チーム

小牧弘典

Hironori Komaki

独立行政法人 産業技術総合研究所

## Research goal 研究目標

### 高性能な集積型CIGSモジュールの量産化技術の確立

Establishment of mass production technology of high performance CIGS solar modules

#### 主な市販太陽電池モジュールの効率

Conversion efficiency of commercial modules

|        |         |
|--------|---------|
| mc-Si* | 14.4 %  |
| HIT**  | 17.0 %  |
| a-Si   | ~ 10 %  |
| CdTe   | ~ 10 %  |
| CIGS   | 11~12 % |

#### CIGS小面積セルの最高効率

Best efficiency of CIGS small cell

$$\eta = 19.9 \% (0.419\text{cm}^2)^{***}$$

多元蒸着法(三段階法)で実現

By co-evaporation (three-stage) method

#### CIGSの優れた特徴

1. 吸収係数が高く薄膜化できる  
 $\alpha \sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$  (Siの約100倍)
2. 経年劣化がない
3. 優れた耐放射線性(宇宙用)
4. 基板を選ばない(フレキシブル可)

低コストで高性能な太陽電池を  
作製できる材料としてCIGSは最適

モジュールでの高性能化技術の開発が必要

Motivation: development of high performance module

\*<http://www.sharp.co.jp/corporate/news/080604-a.html> \*\*<http://www.sanyo.co.jp/clean/solar/system/module/index.html> \*\*\*I. Repins et. al. Prog. Photovolt, Res. Appl. 16, 2008, 235.(NREL)

Research and development approach  
**研究開発の取り組み**

Efforts to realize high-efficiency modules

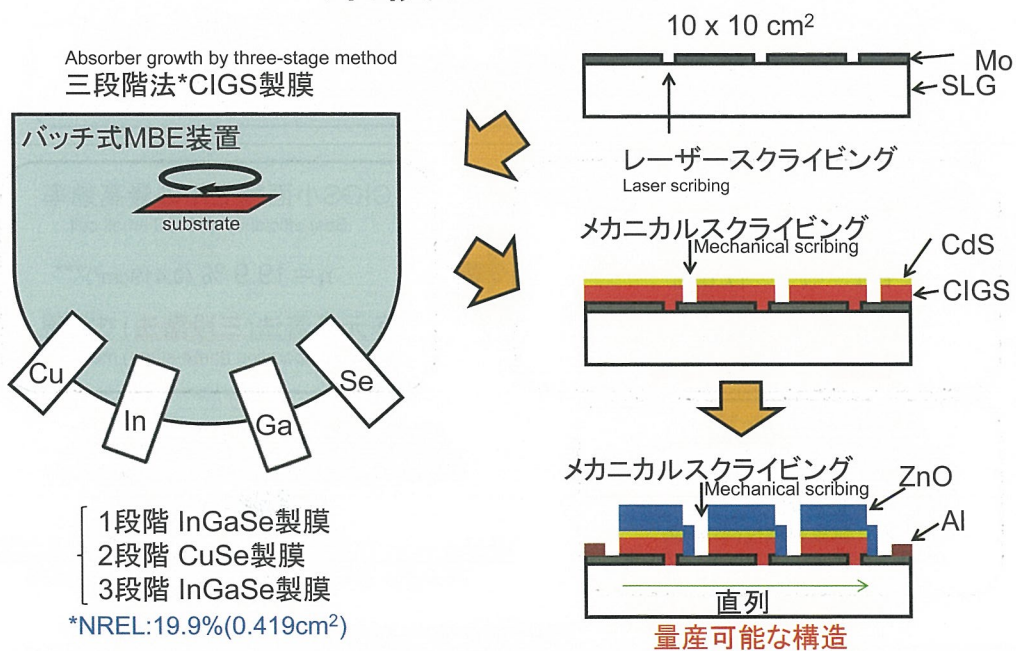
1. **高効率化技術開発**  
**各構成層の最適化**  
**集積化技術開発**

Development of in-line three stage method for mass production

2. **インライン化(量産化)技術開発**  
**大面積化技術開発**

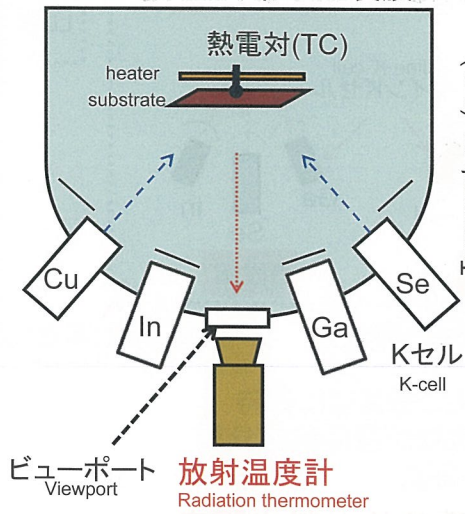
Process flow

**集積化プロセス**

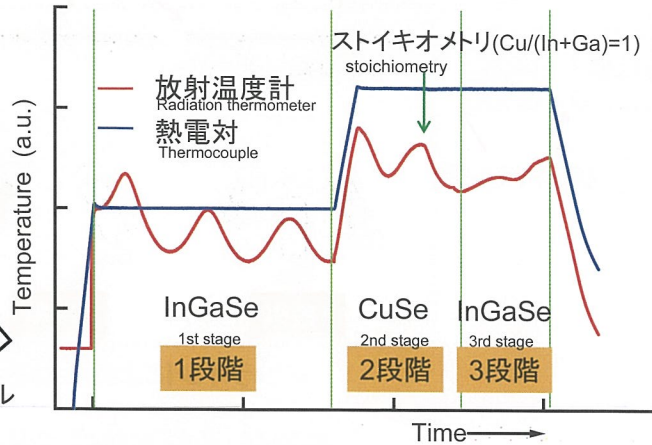


# CIGS製膜法① Co-evaporation(three-stage) method using monitoring system\*

バッチ方式MBE装置で  
10 × 10 cm<sup>2</sup>基板上に製膜



成長時の表示温度の変化例

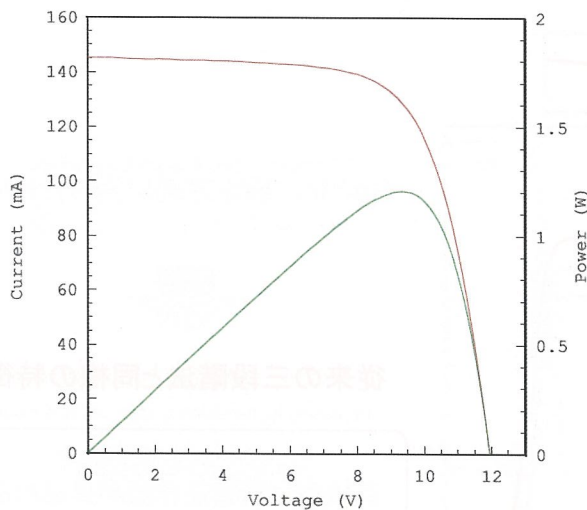


放射温度計によるその場観察により  
歩留まり良く高品質な膜が得られる

\*K. Sakurai et. al. Prog. Photovolt: Res. Appl. 12, 2004, 219.

## I-V CURVE

IEC60904-3 75.7 cm<sup>2</sup>(aperture area) WXS-220S-20  
after light soaking 100 mW/cm<sup>2</sup>, 30 min



Date : 31 Mar 2008

Data No :

SQ538AR-01

Sample No :

SQ538AR

Repeat Times : 9

Isc 145.1 mA

Voc 11.95 V

Pmax 1.205 W

Ipmax 129.1 mA

Vpmax 9.33 V

F.F. 69.5 %

Eff (ap) 15.9 %

DTemp. 25.0 °C

MTemp. 25.0 °C

DIrr. 100.0 mW/cm<sup>2</sup>

MIrr. 100.6 mW/cm<sup>2</sup>

Ref. Device No

CSI02

Cal. Val. of Ref.

129.5 [mA at 100mW/cm<sup>2</sup>]

Scan Mode

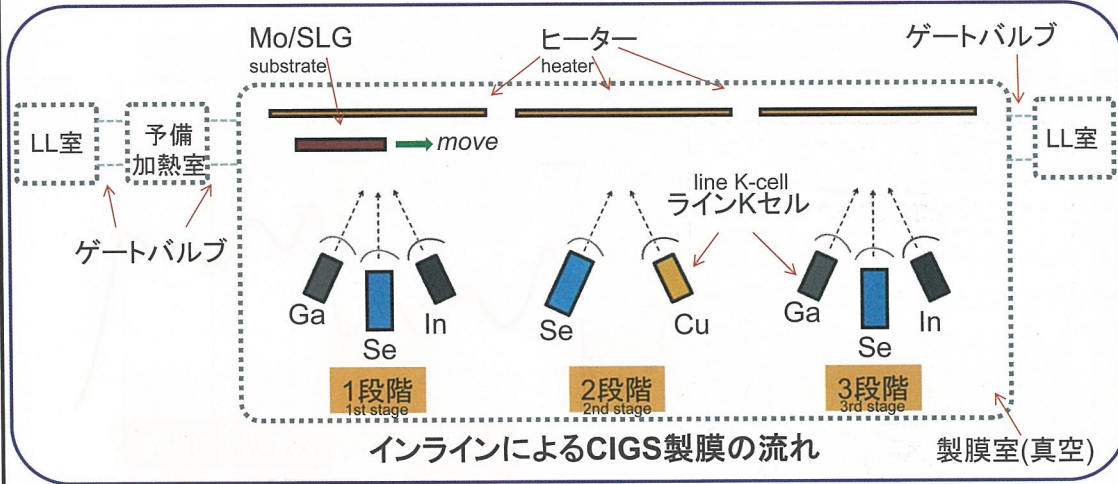
Isc to Voc



量産可能な構造で世界最高のη = 15.9 % (ap) 達成

Efficiency of integrated module with structure that can be mass-produced

# CIGS製膜② In-line three stage method インライン三段階法



本装置の仕様

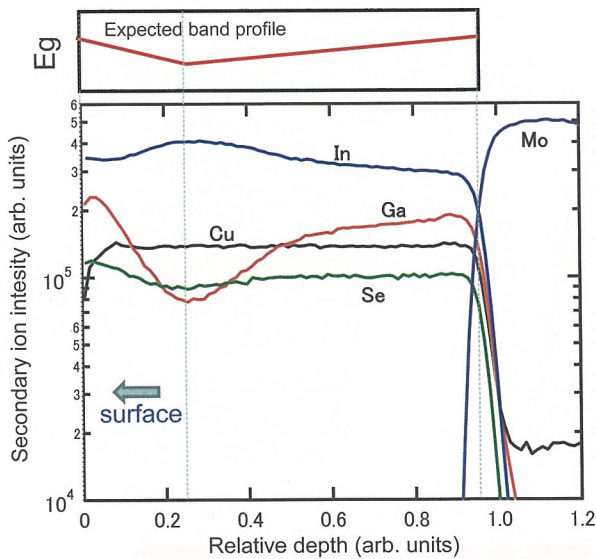
- 製膜室・予備加熱室は常に高真空に保持
- InGaSeとCuSeの製膜領域が空間的に分離
- 30 × 30 cm<sup>2</sup>基板に製膜可能

製膜したCIGS膜(2μm)の構造や均一性を調査

structure uniformity

独立行政法人 産業技術総合研究所

## Depth profiles 深さ方向の濃度分布測定(SIMS)



Formation of double-graded structure  
GaとInに深さ方向に沿った傾斜  
ダブルグレーデッド\*が形成



従来の三段階法と同様の特徴

Promising high-efficiency solar cell and module

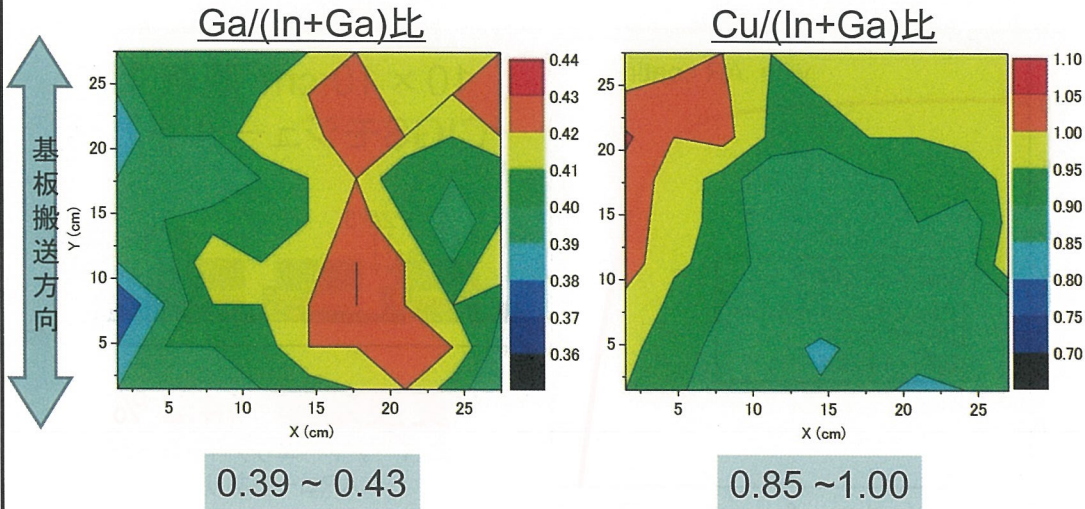
インライン三段階法で  
高効率太陽電池作製が見込める

CIGS/Moのデプスプロファイルと  
予想されるバンドグレーディング

\*T.Dullweber et. al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells 67(2001) 145

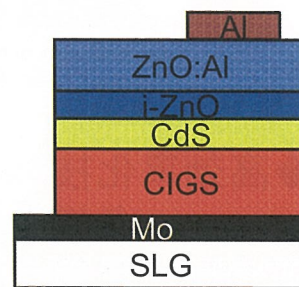
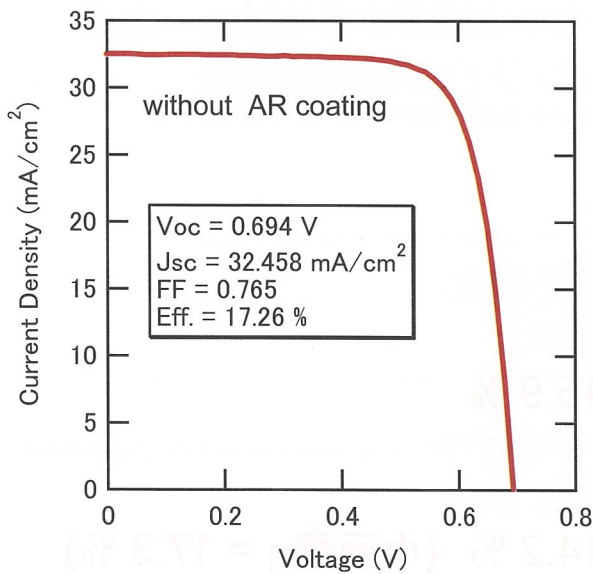
独立行政法人 産業技術総合研究所

Uniformity : Mapping of composition  
**面内組成マッピング (EPMA:  $V_{acc}$  15kV)**



ほぼ全面で太陽電池として必要な組成範囲内  
 Almost uniform

I-V result of small cell  
**小面積セルのI-Vカーブ**

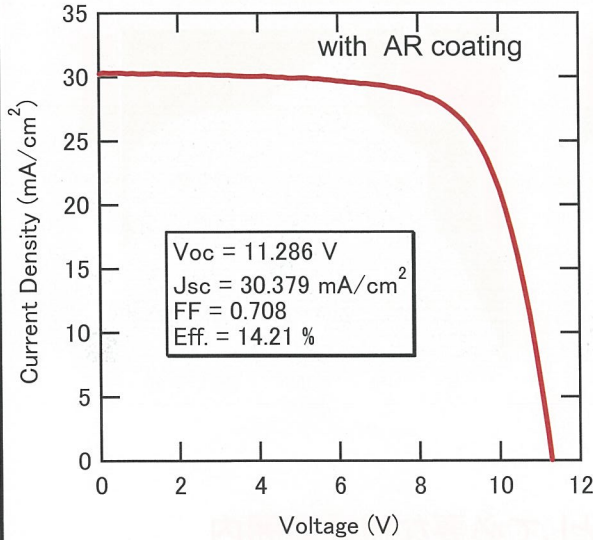


**変換効率 17.3 %**  
 アクティブエリア 0.496 cm<sup>2</sup>  
 ARコートなし

化合物薄膜チームにて測定

I-V result of submodule

# サブモジュールのI-Vカーブ



10×10 cm<sup>2</sup>基板上に  
CIGSモジュールを作製



**変換効率 14.2 %**

アパーチャーエリア 76.9 cm<sup>2</sup>  
ARコートあり

化合物薄膜チームにて測定

Summary

## まとめ

### 量産可能な構造をもつCIGSサブモジュールの 高効率化・インライン化技術開発

Manufacturing of high-efficiency CIGS integrated modules using in-line deposition technology

◆高効率化技術開発 Fabrication of high-efficiency modules

各構成層の最適化

集積化技術開発

⇒  $\eta = 15.9 \%$

◆インライン三段階法の開発 Development of in-line three stage method

大面積化技術開発

⇒  $\eta = 14.2 \%$  (小面積 $\eta = 17.3 \%$ )



# 高性能透明導電膜の開発

Development of high-mobility transparent conductive oxide

シリコン新材料チーム 鯉田 崇

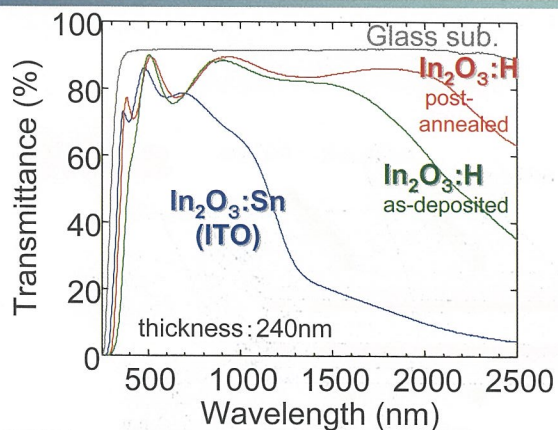
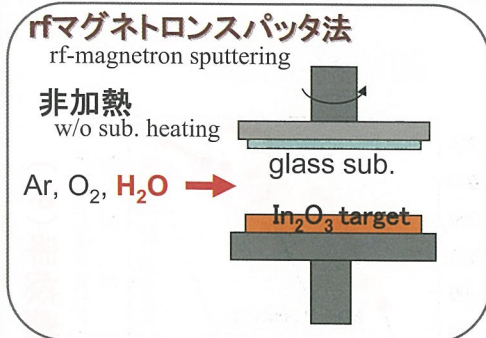
Novel Silicon Material Team Takashi Koida

## 発表内容

- ・水素添加酸化インジウム( $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ )薄膜 (昨年度までの成果)  
 Hydrogen-doped  $\text{In}_2\text{O}_3$  film  
 高移動度 ( $>100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) @ $\geq 170^\circ\text{C}$   
 近赤外域の高い透明性
- ・a-Si:H / c-Si ヘテロ接合型太陽電池のTCOによる光学損失  
 Optical loss caused by TCO layers in a-Si:H/c-Si HJ solar cells
- ・ $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$  / a-Si:H / c-Si ヘテロ接合型太陽電池  
 $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$  / a-Si:H / c-Si HJ solar cells  
 反射損失 吸収損失 } 低減  $\Rightarrow J_{sc}$  増加  $\Rightarrow$  変換効率向上
- ・まとめ  
 summary

# $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 高移動度透明導電膜

$\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$  high-mobility TCO



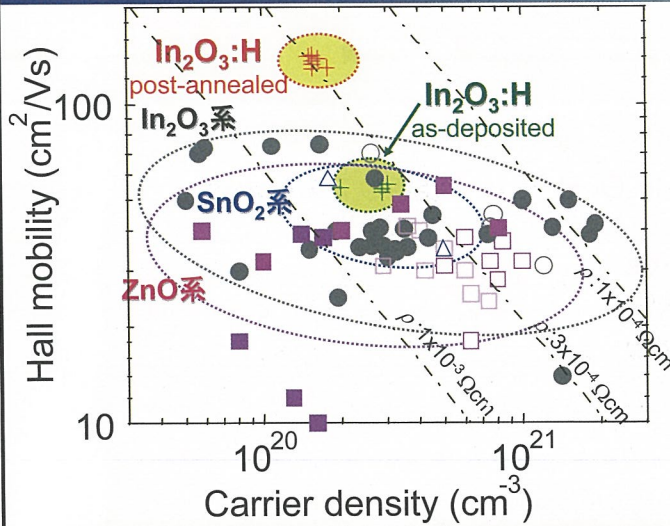
|                                       | ITO <sup>1)</sup>    | $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}^{2)}$ | $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}^{2)}$ |
|---------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 抵抗率 $\rho$ ( $\Omega \text{ cm}$ )    | $2.4 \times 10^{-4}$ | $3.7 \times 10^{-4}$                  | $2.7 \times 10^{-4}$                  |
| 移動度 $\mu$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) | 29                   | 56                                    | 130                                   |
| キャリア濃度 $N$ ( $\text{cm}^{-3}$ )       | $9.1 \times 10^{20}$ | $3.0 \times 10^{20}$                  | $1.8 \times 10^{20}$                  |

Jpn. J. Appl. Phys.46, L685 (2007).

<sup>1)</sup> SnO<sub>2</sub> 10wt.%含 <sup>2)</sup> H ~ 3at.%含

# In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Hと一般的なTCO

In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:H vs conventional TCOs



- ITO/glass  
Shigesato, APL **62**, 1268 (1993). sputtering  
Kamei, APL **64**, 2712 (1994). sputtering  
Taga, JAP **80**, 978 (1996). EB  
Fujiwara, PRB **71**, 075109 (2005). sputtering
- AZO/glass  
müller, Solar Energy **77**, 917 (2004). sputtering  
Agashe, JAP **95**, 1911 (2004). sputtering
- GZO/glass  
Miyazaki, J. Non-cryst. Sol. **218**, 323 (1997). sputtering  
Iwata, TSF **480-481**, 199 (2005). RPD
- △ FTO/glass  
Mizuhashi, JJAP **27**, 2053 (1988). APCVD  
Kambe, JJAP **45**, L291 (2006). APCVD
- ITO epi  
Tarsa, APL **62**, 2332 (1993). PLD  
Kamei, APL **64**, 2712 (1994). sputtering  
Taga, JAP **80**, 978 (1996). EB  
Ohta, APL **76**, 2740 (2000). PLD  
Kamei, TSF **392**, 265 (2001). sputtering  
Ohta, JAP **91**, 3547 (2002). PLD  
Koida, APL **89**, 082104 (2006) PLD
- GZO epi  
Kato, JCG **237-239**, 538 (2002). MBE  
Nakahara, JJAP **43**, L180 (2004). MBE  
Makino, APL **87**, 022101 (2005). PLD  
Sans, Super. Micro. **39**, 282 (2006). PLD

**advantage**

high  $\mu$  · low  $N$   
⇒ low free carrier abs.

**disadvantage**

$\rho$   
⇔ low  $\rho$  ITO

独立行政法人 産業技術総合研究所

# a-Si:H/c-Si ヘテロ接合型 (HIT) 太陽電池とは？

a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells

## HIT太陽電池の構造

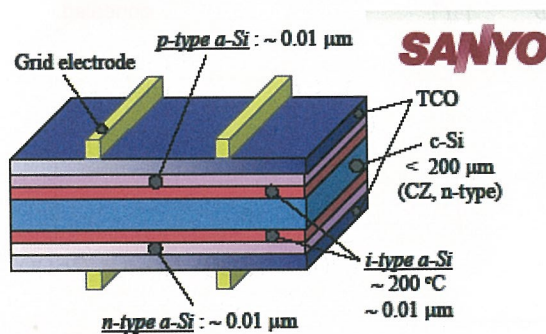


Figure 1: Schematic diagram of a HIT solar cell.

## 高い変換効率

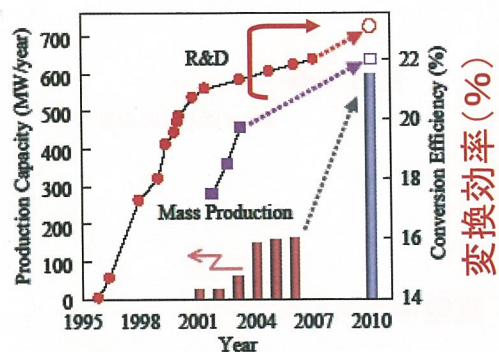


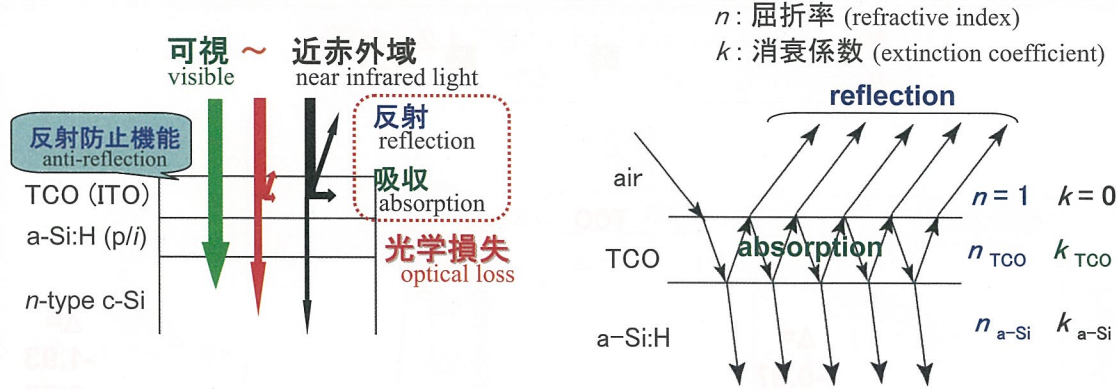
Figure 2: Sanyo's next-generation program for HIT solar cells and progress in conversion efficiency.

出典：S. Taira, Y. Yoshimine, T. Baba, M. Taguchi, H. Kanno, T. Kinoshita, H. Sakata, E. Maruyama and M. Tanaka, Pre-print: 22nd EU-PVSEC 3-7 September, 2007 Milano, Italy

独立行政法人 産業技術総合研究所

# a-Si:H/c-Siヘテロ接合型太陽電池における TCOによる光学損失

optical loss caused by TCO layers in HJ solar cells



| Loss       | Approach               |
|------------|------------------------|
| reflection | texture structure      |
| absorption | high $\mu$ low $N$ TCO |

適切な光学定数  
suitable optical constants  
( $n, k$ )

独立行政法人 産業技術総合研究所

# 電気特性( $N, \mu$ ) vs 光学特性( $n, k$ )

electrical property vs optical property

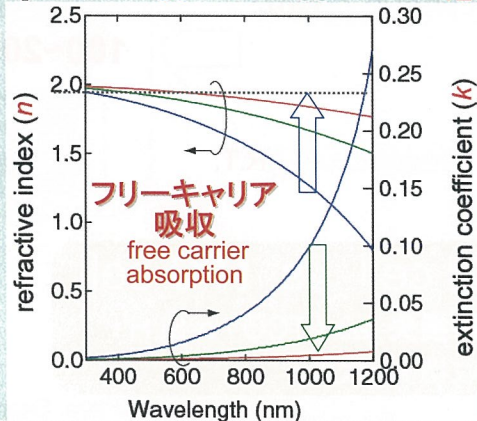
$\sigma = 1 / \rho = N e \mu$

conductivity      resistivity      carrier density      mobility

Metal  $N > 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

TCO  $N \sim 10^{20} \sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$

|                                   |                                 |                    |                    |
|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| $\rho$ [ $\Omega\text{cm}$ ]      | $2.6 \times 10^{-4}$ (constant) |                    |                    |
| $N$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]          | $8 \times 10^{20}$              | $4 \times 10^{20}$ | $2 \times 10^{20}$ |
| $\mu$ [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ] | 30                              | 60                 | 120                |



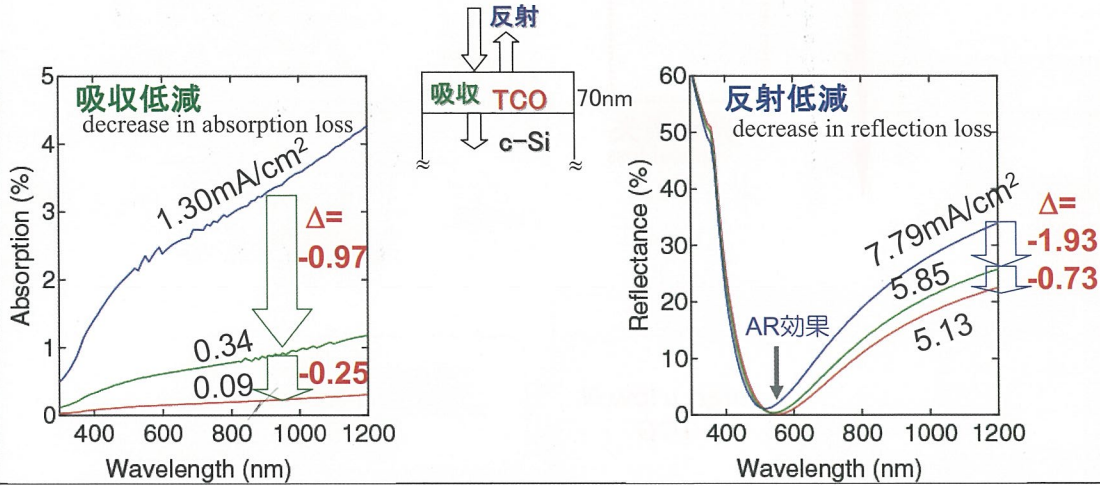
ドレーデモデル  
を用いて計算  
calculated using the Drude model

独立行政法人 産業技術総合研究所

# 高移動度TCOによる 吸収・反射損失の低減 (計算)

abs. and ref. loss caused by TCO layers (calculation)

|                                   |                    |               |                    |               |                    |
|-----------------------------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|
| $N$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]          | $8 \times 10^{20}$ | $\rightarrow$ | $4 \times 10^{20}$ | $\rightarrow$ | $2 \times 10^{20}$ |
| $\mu$ [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ] | 30                 | $\rightarrow$ | 60                 | $\rightarrow$ | 120                |

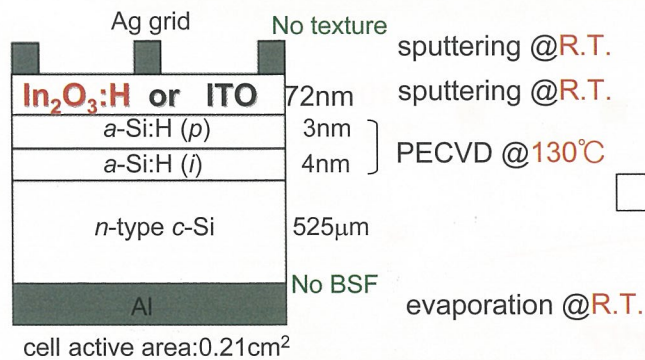


独立行政法人 産業技術総合研究所

# In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Hを窓電極に適用

In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:H as a front electrode of a HJ solar cell

## a-Si:H / c-Si ヘテロ接合型太陽電池



**真空ポストアニール**  
post-annealing in vac.  
**100~200 °C**

In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:H 層の固相成長  
SPC of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:H layer  
電極焼成  
electrode sintering

## In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:H cell vs ITO cell

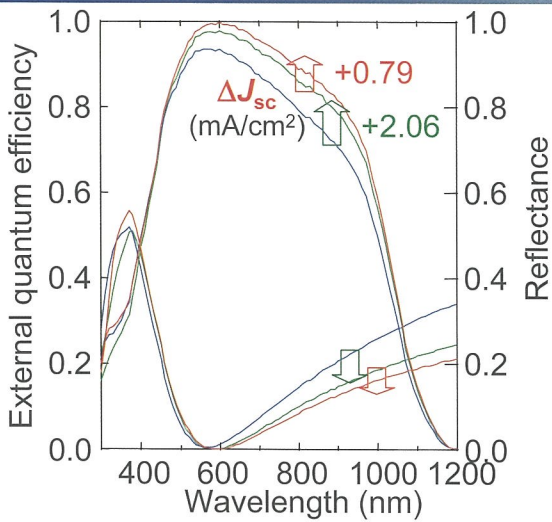
{ 反射損失: air / TCO / a-Si:H  
吸収損失: TCO

Appl. Phys. Express 1, 041501 (2008).

独立行政法人 産業技術総合研究所

# 外部量子効率・反射スペクトル

external quantum efficiency & reflectance spectra



|                                   | $N$ (cm <sup>-3</sup> ) | $\mu$ (cm <sup>2</sup> /Vs) |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :H | 1.6x10 <sup>20</sup>    | 140                         |
| In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :H | 3.3x10 <sup>20</sup>    | 55                          |
| ITO                               | 7.7x10 <sup>20</sup>    | 15                          |

**QE増加 (可視~近赤外)**  
increase in QE (vis.~NIR)

① 反射損失  
reflection loss

② 吸収損失  
absorption loss

低減  
reduction

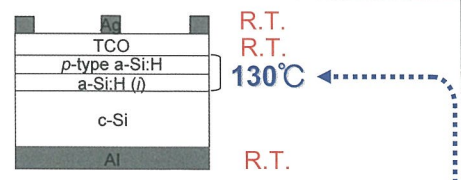
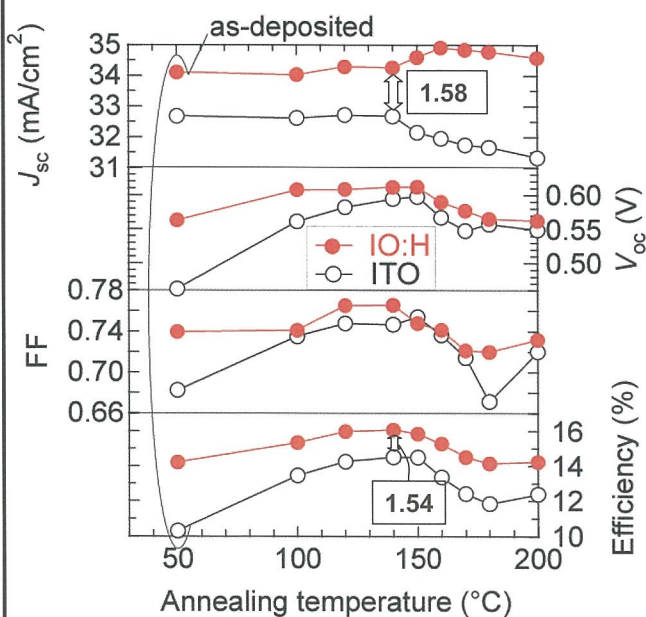
① 屈折率増大  
large  $n$

② 消衰係数減少  
small  $k$

**TCO高移動度・低キャリア濃度**  
TCO with high  $\mu$  and low  $N$

# 太陽電池特性のアニール温度依存性

solar cell characteristics



**$J_{sc}$  IO:H cell >> ITO cell**  
 $T_a \geq 150^\circ\text{C}$ : up

**$V_{oc}$ , FF IO:H cell ~ ITO cell**  
 $T_a = 50 \sim 140^\circ\text{C}$ : up  
 $T_a \geq 150^\circ\text{C}$ : down

thermal damage ?

**$\eta$  IO:H cell >> ITO cell**

Cell active area: 0.21cm<sup>2</sup>

# まとめ summary

## ① $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 薄膜

rf マグネトロンスパッタ  
rf magnetron sputtering

非加熱製膜  
w/o sub. heating



ポストアニール(170~200°C)  
post-annealing

固相成長  
solid phase crystallization

low  $N$   
high  $\mu$



high  $n$   
low  $k$



Jpn. J. Appl. Phys. 46, L685 (2007).  
J. Non-cryst. Solids 354, 2805 (2008).

## ② $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ / a-Si:H / c-Si 太陽電池

$J_{sc}$  &  $\eta$  up



QE up



low optical loss  
reflection  
absorption

Appl. Phys. Express 1, 041501 (2008).

# 高分子系有機薄膜太陽電池の開発 Development of Polymer-based Organic Solar Cells

有機薄膜チーム

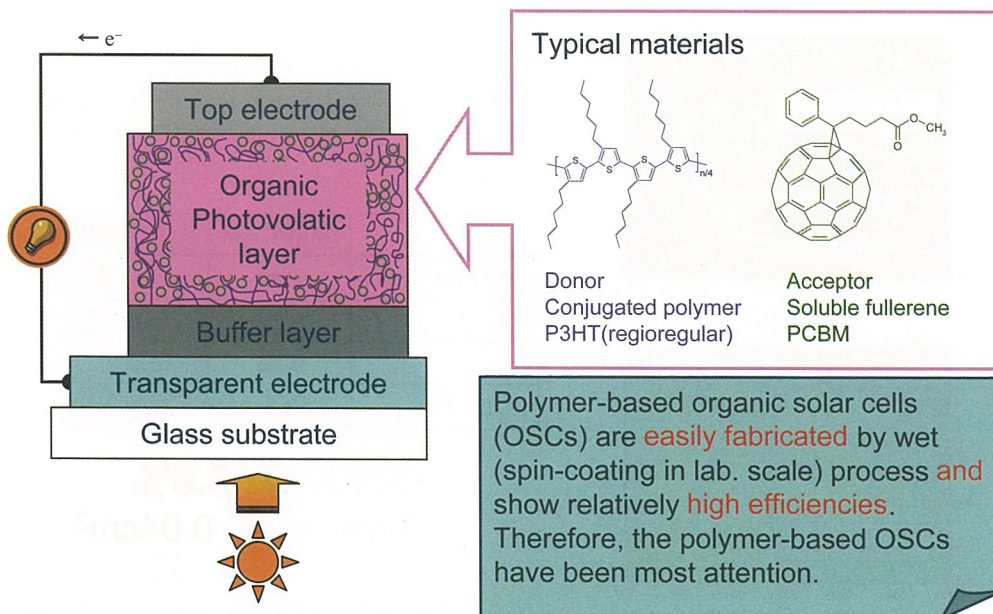
Organic Thin Film Team

山成敏広

Toshihiro Yamanari

独立行政法人 産業技術総合研究所

## Polymer-based organic solar cells

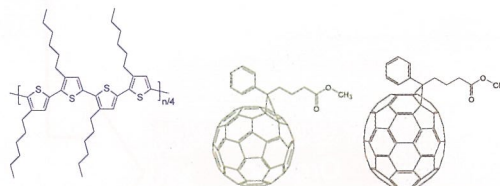
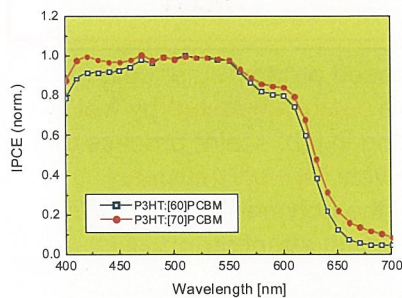
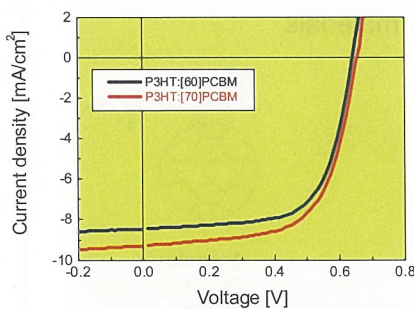


独立行政法人 産業技術総合研究所

## Objectives

- Development of high-efficiency cells
  - ✓ Efficiency **>5%** (Cell area: **1 cm<sup>2</sup>**)
- Development of high-stability cells
  - ✓ **Elucidation of the factor of the deterioration** by analysis of the deterioration characteristic of the high efficiency cells.
  - ✓ Relative efficiency decrease **less than 10% in 50 hours** under successive light irradiation.

## Development of high efficiency polymer cells (last year)



|                                       | [60]PCBM | [70]PCBM |
|---------------------------------------|----------|----------|
| J <sub>sc</sub> / mA cm <sup>-2</sup> | 8.46     | 9.31 ↑   |
| V <sub>oc</sub> / V                   | 0.64     | 0.65     |
| FF                                    | 0.66     | 0.63     |
| PCE / %                               | 3.6      | 3.8 ↑    |

Efficiency : **3.8%**

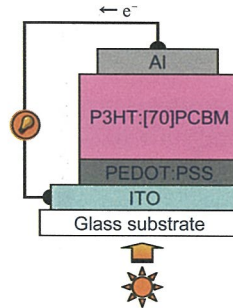
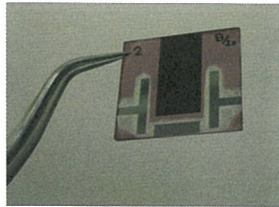
Small area : **0.04cm<sup>2</sup>**



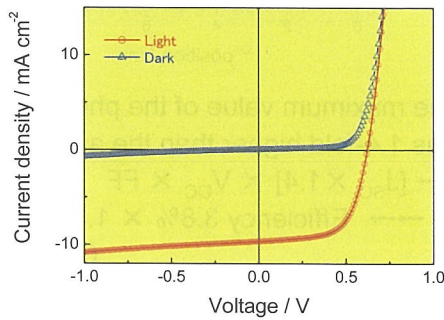
Fabrication of large-area (1cm<sup>2</sup>) cell



# Fabrication of large-area(1cm<sup>2</sup>) polymer OSCs



AM 1.5 G, 100 mW/cm<sup>2</sup>



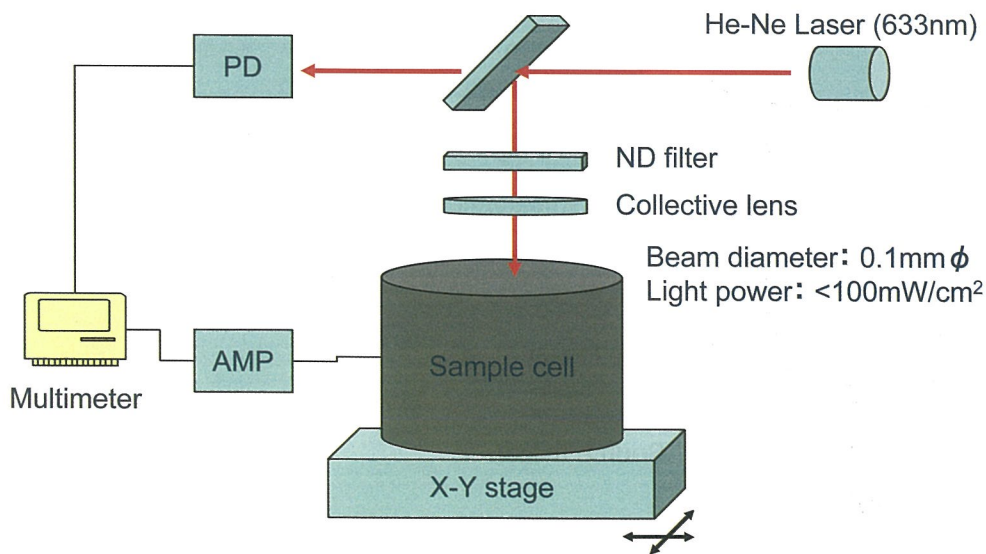
**PCE = 3.8 % @ 1cm<sup>2</sup>**

**J<sub>SC</sub> = 9.68 mA cm<sup>-2</sup>**

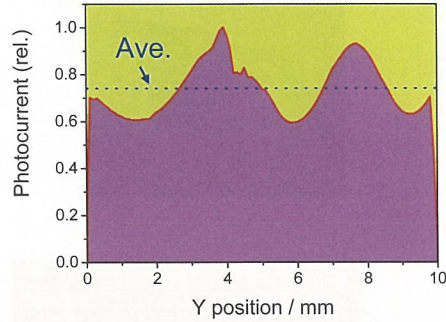
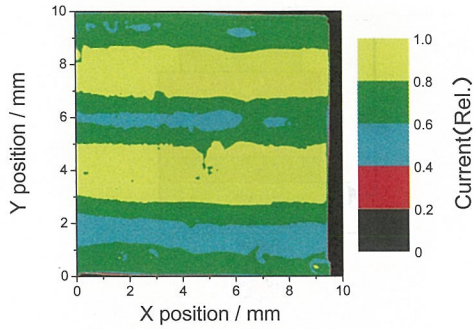
**V<sub>OC</sub> = 0.62 V**

**FF = 0.64**

# Laser-Beam-Induced Current (LBIC) Measurement



## 2D image of photocurrent of P3HT:PCBM cell



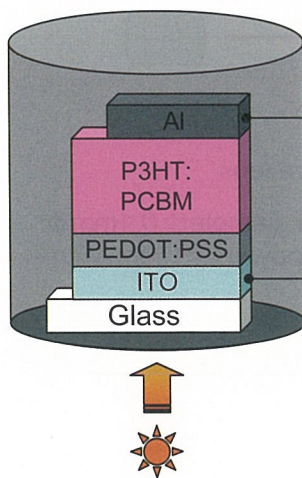
Stripe-form deflection of photocurrent was observed.

→ Ununiformity of organic layer  
(buffer layer or photovoltaic layer)

The maximum value of the photocurrent was 1.4-fold higher than the average.

→  $[J_{SC} \times 1.4] \times V_{OC} \times FF$   
→ Efficiency  $3.8\% \times 1.4 = 5.3\%$   
(small area)

## Lifetime test



AM 1.5 G, 100 mW/cm<sup>2</sup>

Source meter

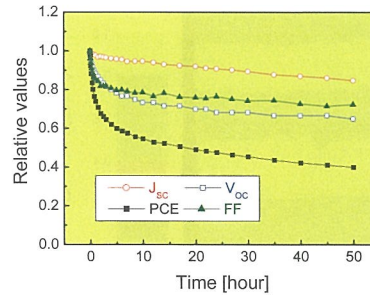
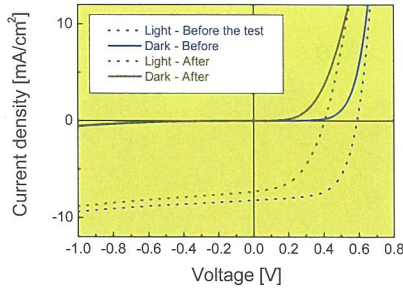
Testing condition

- AM1.5G, 100 mW/cm<sup>2</sup>
- Open circuit (except for measuring J-V curves)
- 50 hours
- In N<sub>2</sub>-fill capsule or In Air
- ~30°C

※ Initial efficiency of sample cells : > 3%

# 1. Lifetime test in N<sub>2</sub> atmosphere

## Variation of photovoltaic parameters



PCE decreased to about 40% in 50 hours.

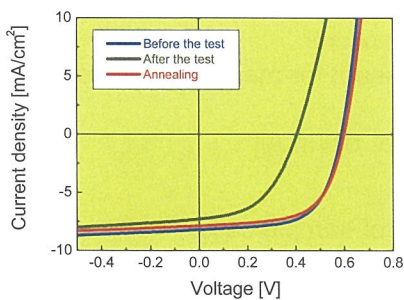
V<sub>oc</sub> and FF were remarkably decreased, and the decrease of J<sub>sc</sub> was slight.

Leakage current at negative bias in dark was not increased.

→ The critical damage of device oneself may not be caused.

# 1. Lifetime test in N<sub>2</sub> atmosphere

## Recovery of performance by thermal annealing

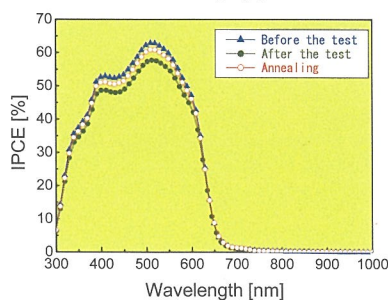


By re-annealing after the lifetime test, the photovoltaic characteristics recovered to their initial values.

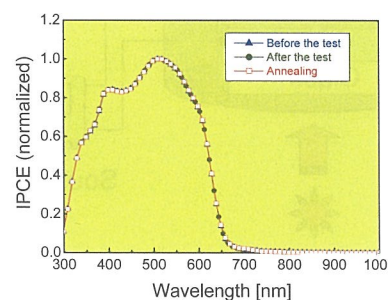
The shape of IPCE spectrum was not changed.

→ Organic molecules was not degraded.

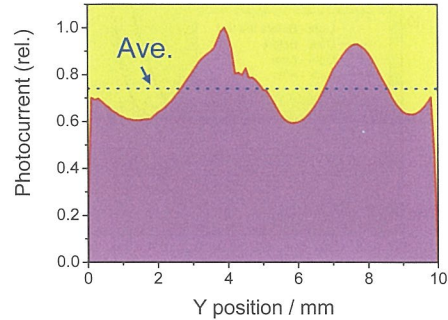
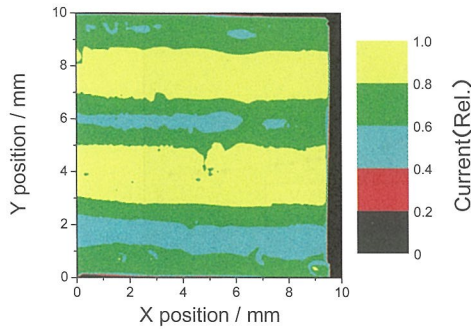
→ The accumulation of the trapped carrier may result in decrease of cell performance.



normalize



## 2D image of photocurrent of P3HT:PCBM cell



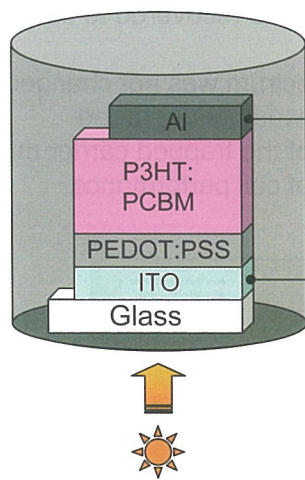
Stripe-form deflection of photocurrent was observed.

→ Ununiformity of organic layer  
(buffer layer or photovoltaic layer)

The maximum value of the photocurrent was 1.4-fold higher than the average.

→  $[J_{SC} \times 1.4] \times V_{OC} \times FF$   
→ Efficiency  $3.8\% \times 1.4 = 5.3\%$   
(small area)

## Lifetime test



AM 1.5 G, 100 mW/cm<sup>2</sup>

Source meter

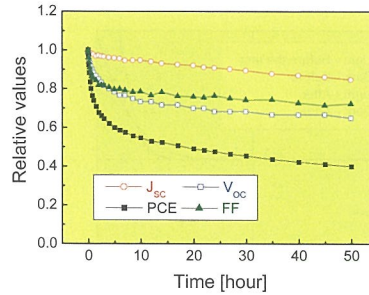
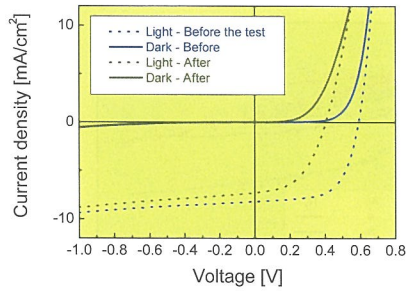
Testing condition

- AM1.5G, 100 mW/cm<sup>2</sup>
- Open circuit (except for measuring J-V curves)
- 50 hours
- In N<sub>2</sub>-fill capsule or In Air
- ~30°C

✳ Initial efficiency of sample cells : > 3%

# 1. Lifetime test in N<sub>2</sub> atmosphere

## Variation of photovoltaic parameters



PCE decreased to about 40% in 50 hours.

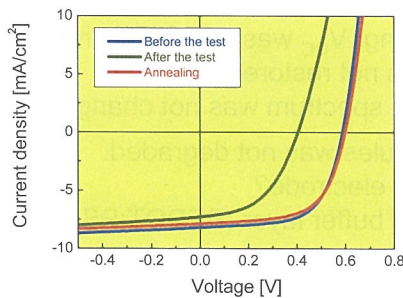
V<sub>oc</sub> and FF were remarkably decreased, and the decrease of J<sub>sc</sub> was slight.

Leakage current at negative bias in dark was not increased.

→ The critical damage of device oneself may not be caused.

# 1. Lifetime test in N<sub>2</sub> atmosphere

## Recovery of performance by thermal annealing

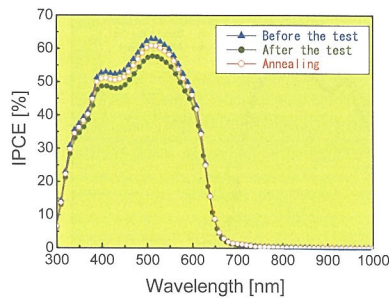


By re-annealing after the lifetime test, the photovoltaic characteristics recovered to their initial values.

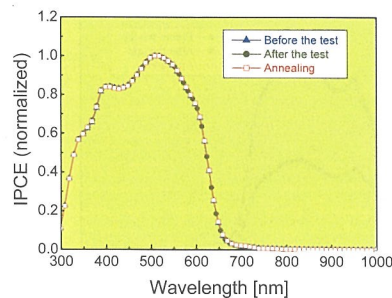
The shape of IPCE spectrum was not changed.

→ Organic molecules was not degraded.

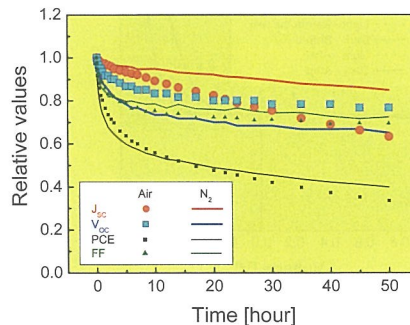
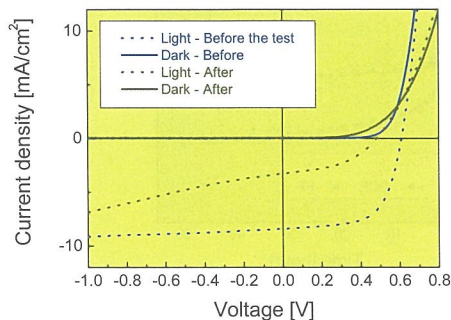
→ The accumulation of the trapped carrier may result in decrease of cell performance.



normalize

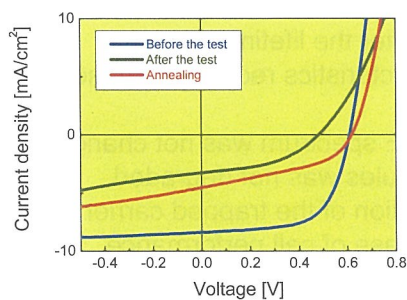


## 2. Lifetime test in ambient air Variation of photovoltaic parameters



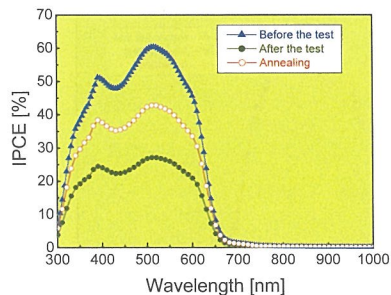
The decrease of J<sub>SC</sub> was accelerated in comparison with the test in N<sub>2</sub> atmosphere.

## 2. Lifetime test in ambient air Recovery of cell performance

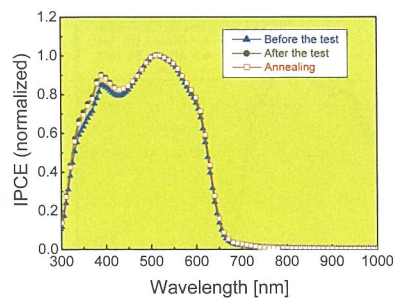


By thermal annealing, V<sub>OC</sub> was completely restored, but J<sub>SC</sub> and FF was not restored so much. The shape of IPCE spectrum was not changed.

- Organic molecules was not degraded.
- Oxidation of Al electrode?
- Degradation of buffer layer (PEDOT:PSS)?

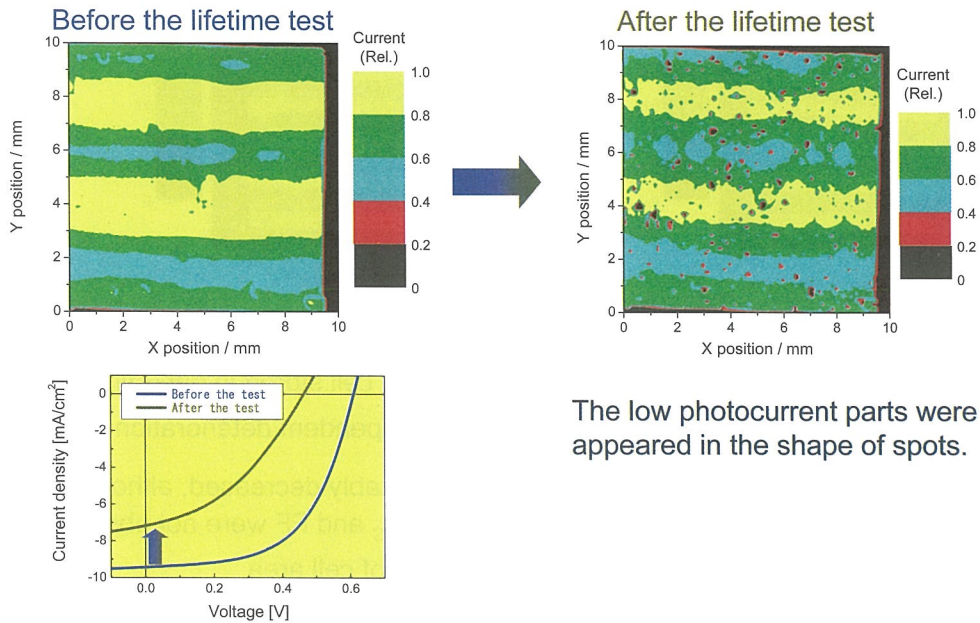


normalized



## 2. Lifetime test in ambient air

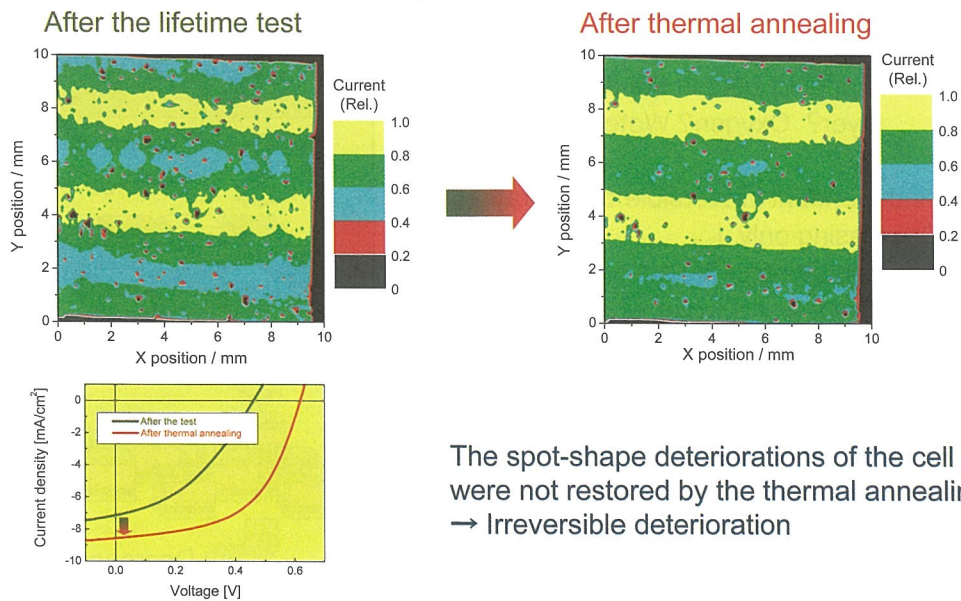
### LBIC images before and after the test



The low photocurrent parts were appeared in the shape of spots.

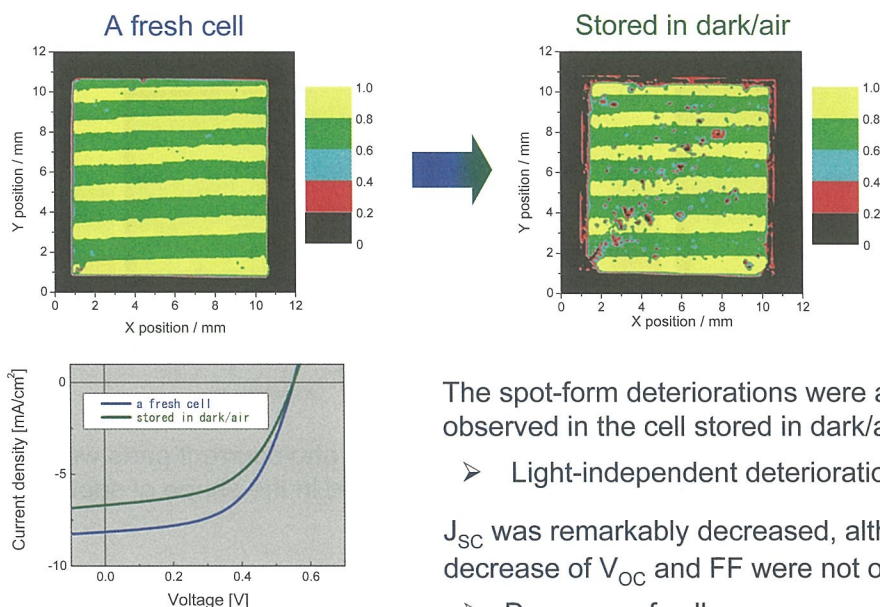
## 2. Lifetime test in ambient air

### LBIC images after the test and after the thermal annealing



The spot-shape deteriorations of the cell were not restored by the thermal annealing.  
→ Irreversible deterioration

## Change of the LBIC image in dark/air condition



The spot-form deteriorations were also observed in the cell stored in dark/air.

- Light-independent deterioration

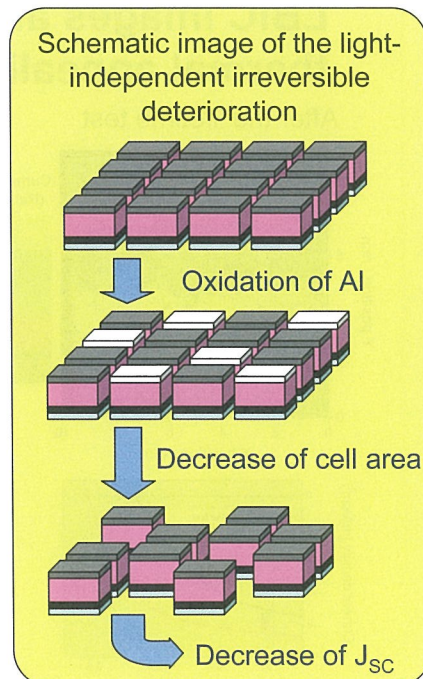
$J_{SC}$  was remarkably decreased, although the decrease of  $V_{OC}$  and FF were not observed.

- Decrease of cell area

## Mechanism of the deterioration of P3HT:PCBM cells

Two independent factors for the deterioration

- Light-dependent reversible deterioration
  - ▣ Decreasing all parameters ( $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ , FF)
    - Trapping sites in the photovoltaic layer? Oxygen? Water?
- Light-independent irreversible deterioration
  - ▣ Decreasing only  $J_{SC}$
  - ▣ And appearing in the shape of spots
    - Oxygen and water which invaded the organic layer may oxidize Al electrode?
  - Sealing may prevent this deterioration.





## Summary

- We achieved a PCE of **3.8%** in the large-area (**1cm<sup>2</sup>**) P3HT:[70]PCBM cell.
- Stripe-form deflection of photocurrent were observed in our large-area cells by LBIC measurement.
- Two independent factors for the deterioration
  - Light-dependent reversible deterioration
    - Decreasing  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ , FF – Carrier trapping
  - Light-independent irreversible deterioration
    - Decreasing  $J_{SC}$  – Oxidation Al electrode

This work was supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) under the Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI).

# 薄膜シリコン多接合太陽電池の開発

Development of thin film silicon multijunction solar cells

シリコン新材料チーム 松井 卓矢  
Novel Silicon Material Team Takuya Matsui

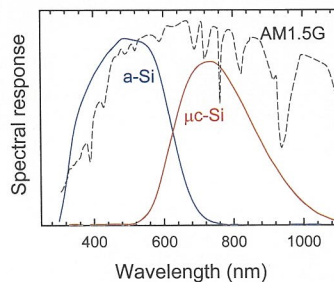
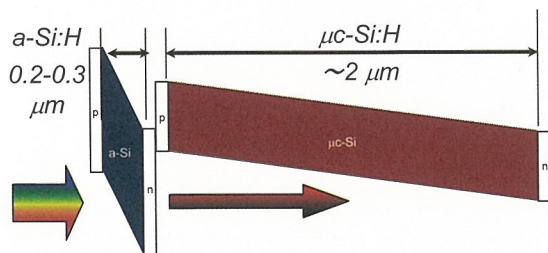
## outline

1. 研究背景  
Research background
2. 多接合化に向けた微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>ナローギャップ太陽電池の開発  
μc-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H as narrow gap absorber for multijunction solar cells
3. アモルファスSi/微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 2接合太陽電池  
a-Si:H/μc-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H double junction solar cells
4. アモルファスSi/微結晶Si/微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 3接合太陽電池  
a-Si:H/μc-Si:H/μc-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H triple junction solar cells
5. まとめ  
Summary

## 1-1. 研究背景

Research background

アモルファスSi/微結晶Si 2接合太陽電池  
a-Si:H/μc-Si:H double junction solar cell



$d_i (\mu\text{c-Si:H}) \gg d_i (\text{a-Si:H})$

約10倍の厚さ!

μc-Si:H is 10 times thicker than a-Si:H

### 高速製膜技術

High-rate deposition technique

VHF-高圧枯渇プラズマCVD

VHF & high-pressure depletion plasma CVD

(2-3 nm/s@~10 Torr)

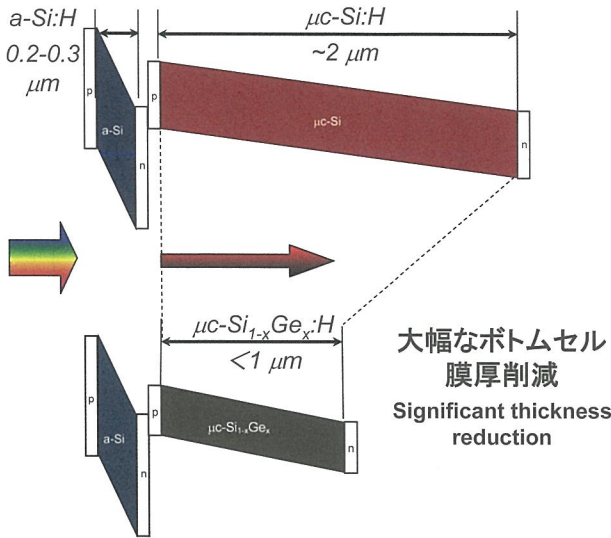
目標: 10 nm/s

- さらなる高圧・狭ギャップ電極  
Extremely high pressure and narrow gap
- 大面積化が容易でない  
Not feasible for large area deposition
- 多量のパワー投入が必要  
Huge power consumption

1-2. アモルファスSi/微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 2接合太陽電池の提案

a-Si:H/ $\mu$ c-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H double junction solar cell

2接合(double junction)



ボトムセルの薄膜化が重要  
Bottom cell should be made as thin as possible

$\mu$ c-Si:H

$\mu$ c-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H

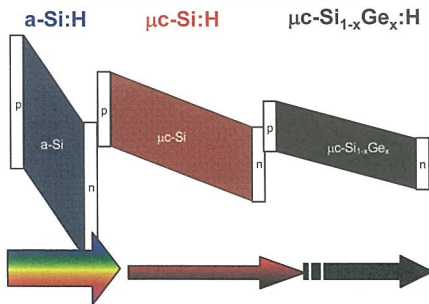
赤外光吸収係数の増大  
Enhancement of IR absorption

- ・製膜時間の短縮  
Short deposition time  
→ 産業的に有利  
Industrially advantageous
- ・少ない膜ストレス  
Less film stress  
→ フレキシブルセルへの応用  
Applicable to flexible solar cells

1-3. アモルファスSi/微結晶Si/微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 3接合太陽電池の提案

a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H/ $\mu$ c-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H triple junction solar cell

3接合(triple junction)



a-Si:H  $\mu$ c-Si:H

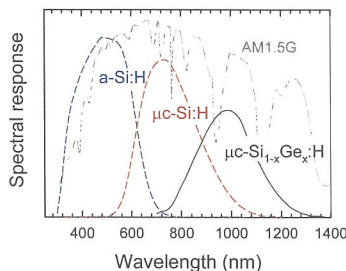
赤外光の透過損失が大きく  
変換効率を律則

Efficiency is limited by the weak infrared-light absorption

$\mu$ c-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H

ナローギャップボトムセルによる  
スペクトル感度の広帯域化

Wider spectral sensitivity by incorporating narrower band-gap bottom cell



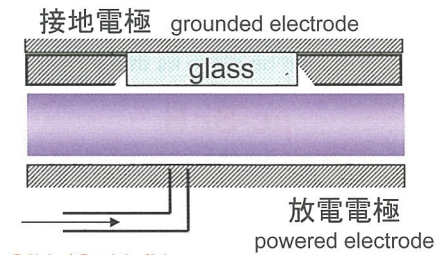
2接合→3接合による高効率化

目標:  $\eta=15\%$

Toward 15% efficiency using the triple junction structure

## 2-1. 多接合化に向けた微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>ナローギャップ太陽電池の開発

$\mu\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$  as narrow gap absorber for multijunction solar cells

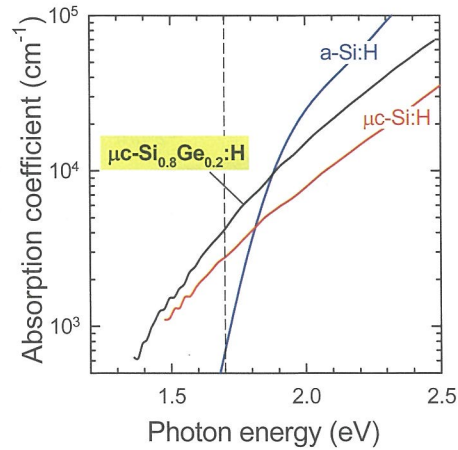


$\text{SiH}_4/\text{GeH}_4/\text{H}_2$

### 製膜条件

deposition condition

|  |                    |
|--|--------------------|
| System                                     | PECVD (100 MHz)    |
| Substrate temp.                            | 200 °C             |
| Discharge power                            | 30 W               |
| Pressure                                   | 1.5 Torr           |
| $\text{SiH}_4$ flow rate                   | 5.4 sccm           |
| <b><math>\text{GeH}_4</math> flow rate</b> | <b>0-0.28 sccm</b> |
| $\text{H}_2$ flow rate                     | 300 sccm           |



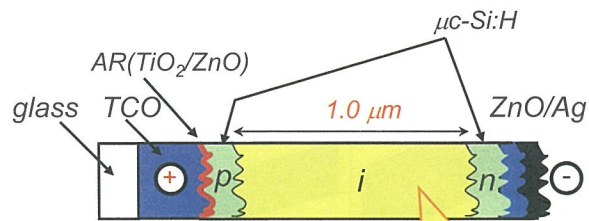
全波長領域で微結晶Siよりも大きい吸収係数  
Larger absorption coefficients than  $\mu\text{-Si:H}$  over the whole spectral range

**Ge組成20%で $\alpha \sim 1.5$ 倍  
@1.7eV ( $\lambda = 720 \text{ nm}$ )**

## 2-2. 微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>単接合太陽電池 (シングル型)

$\mu\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$  single junction solar cells

AM1.5, 100 mW/cm<sup>2</sup>  
Xe-W 2光源ソーラーシミュレーター



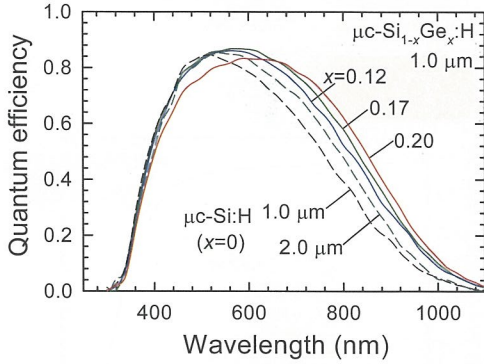
受光面積 (illumination area) 1 cm<sup>2</sup>

**$\mu\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$   
(x: 0-0.2)**

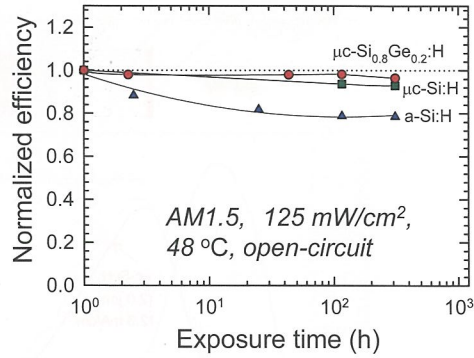
- I-V測定 (I-V measurement under AM1.5 or red-filtered illumination)
- 分光感度測定 (spectral response measurement)
- 光劣化試験 (degradation test)

### 2-3. 微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> シングルセル特性 Device performance of $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ single junction solar cells

<量子効率スペクトル>



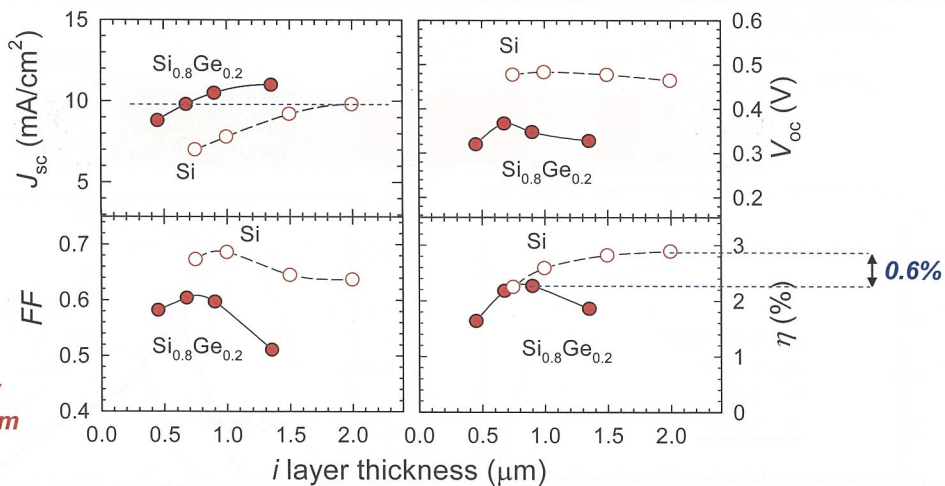
<光劣化試験>



- $x \sim 0.2$ まで赤外感度は単調に増大 ( $\eta = 6.33\%$  at  $x = 0.2$ )  
Monotonic increase of IR response with Ge incorporation up to  $x \sim 0.2$ .
- $x > 0.1$ で膜厚2倍の $\mu\text{c-Si:H}$ を上回る赤外感度  
IR response larger than double-thickness  $\mu\text{c-Si:H}$  when  $x > 0.1$ .
- 優れた光安定性  
Excellent stability upon prolonged light soaking.

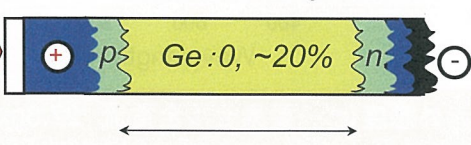
Matsui et al., APEX 1, 031501 (2008)

### 2-4. 微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> シングルセル特性 — 赤外光照射下 — Device performance of $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ single junction solar cells – IR illumination –



red filter  
 $\lambda > 620 \text{ nm}$

AM1.5



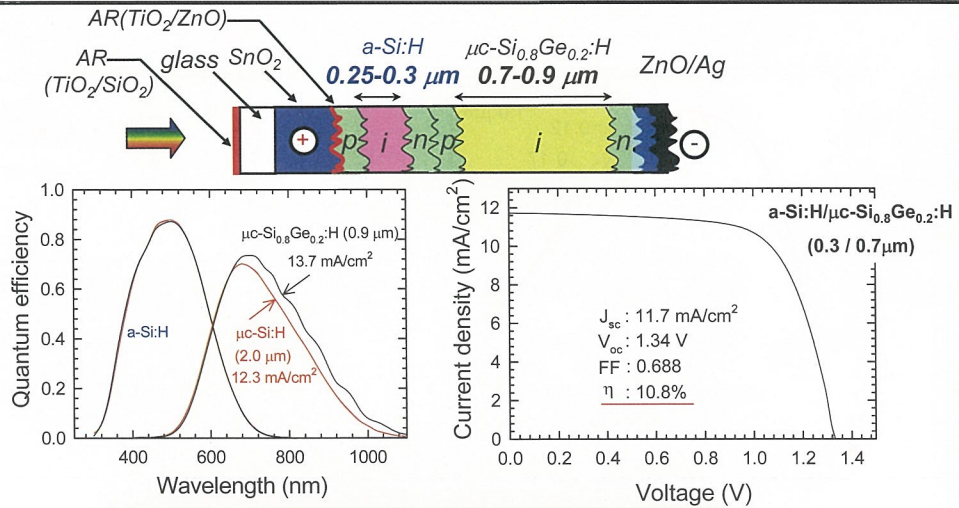
0.5-2.0  $\mu\text{m}$

Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub> ~ 0.7  $\mu\text{m}$ でSi ~ 2  $\mu\text{m}$ 相当の  $J_{sc}$ が得られる。(膜厚1/3)

1/3 thinner is possible by replacing  $\mu\text{c-Si:H}$  with  $\mu\text{c-Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}\text{:H}$

### 3. アモルファスSi/微結晶Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 2接合太陽電池 (タンデム型)

a-Si:H/ $\mu$ c-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H double junction solar cells

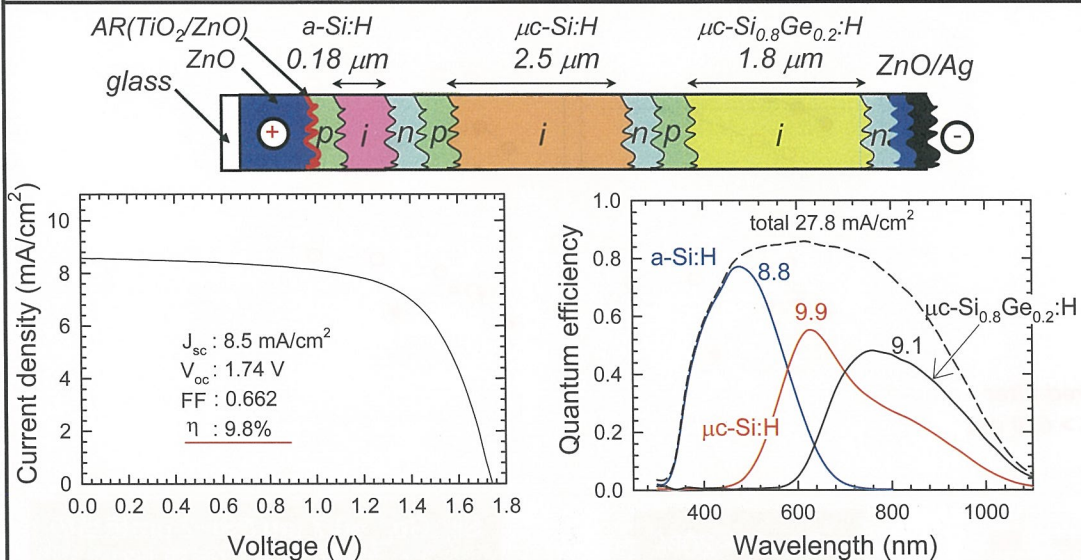


- ・膜厚2倍の微結晶Siより高い赤外感度  
Higher IR response than double-thickness  $\mu$ c-Si:H
- ・トータル膜厚約1 $\mu$ mで初期変換効率10.8%を達成  
 $\eta_{in} = 10.8\%$  with a total absorber thickness of  $\sim 1 \mu\text{m}$

独立行政法人 産業技術総合研究所

### 4. a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H/ $\mu$ c-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H 3接合太陽電池 (トリプルタンデム型)

a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H/ $\mu$ c-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H triple junction solar cells



- 微結晶Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub>ボトムセルによる高赤外感度化 → 要素セル全電流 27.8mA/cm<sup>2</sup>  
IR response is enhanced markedly by incorporating  $\mu$ c-Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub>:H bottom cell → total current : 27.8mA/cm<sup>2</sup>

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 5. まとめ

## Summary

- **Ge濃度20 at.%の微結晶SiGeシングルセルで変換効率6.3%を達成し、光劣化を示さないことを確認した。**

A 6.3% efficient  $\mu\text{c-Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}\text{:H}$  single junction solar cell is obtained, exhibiting excellent stability upon prolonged light soaking.

- **微結晶 $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$  (0.7  $\mu\text{m}$ )で厚さ3倍の微結晶Siに相当する赤外感度が得られる。**

The 0.7- $\mu\text{m}$ -thick  $\mu\text{c-Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}\text{:H}$  solar cell provides infrared sensitivities as high as those for three-times-thicker  $\mu\text{c-Si:H}$  solar cell.

- **トータル膜厚約1ミクロンのアモルファスSi/微結晶 $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ タンデムセルで初期効率10.8%を実証した。**

An initial efficiency of 10.8% is demonstrated using an a-Si:H/ $\mu\text{c-Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}\text{:H}$  double junction structure with a total absorber thickness of  $\sim 1 \mu\text{m}$ .

- **微結晶 $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ をボトムセルとしたトリプルタンデムセルを作製し、要素セル全電流 $\sim 28 \text{ mA/cm}^2$ と初期効率9.8%を得た。**

A triple junction solar cell is fabricated by incorporating  $\mu\text{c-Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}\text{:H}$  bottom cell, yielding  $\sim 28 \text{ mA/cm}^2$  total photocurrent density and 9.8% initial efficiency.

## 薄型結晶シリコン太陽電池の開発 Development of thin-crystalline silicon solar cells

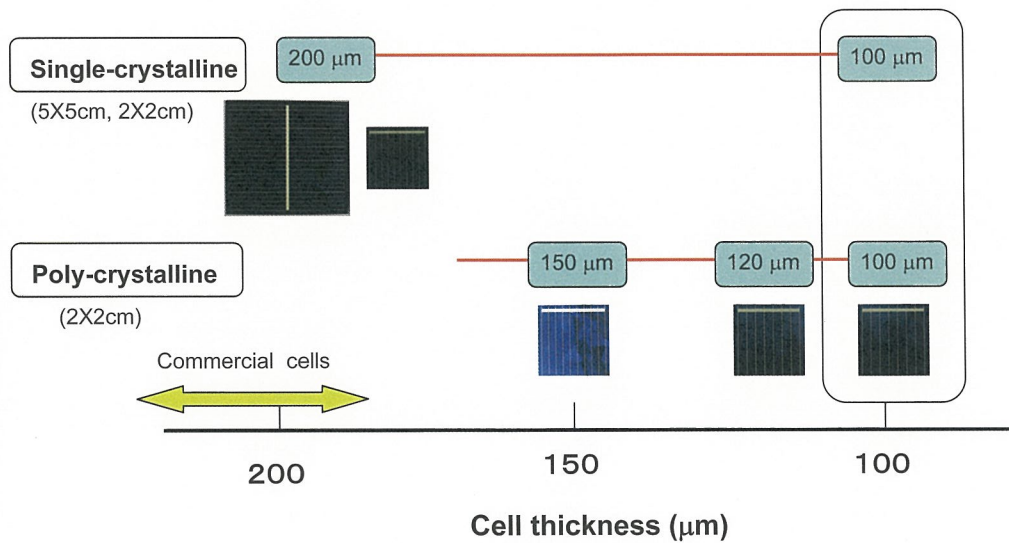
結晶シリコンチーム  
crystalline silicon team

高遠 秀尚  
Hidetaka Takato

### 概要

1. 結晶シリコンチームにおけるセルの薄型化への取り組み
2. 薄型シリコンセルの作製プロセスの検討
3. プラズマレスドライエッチングのプロセスへの適用
4. まとめ

## 結晶シリコンチームで作製された太陽電池 Solar cells fabricated in crystalline silicon team



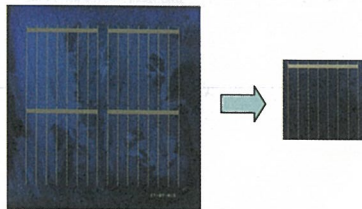


### 標準的なセル作製プロセス

#### Standard cell fabrication process in our team

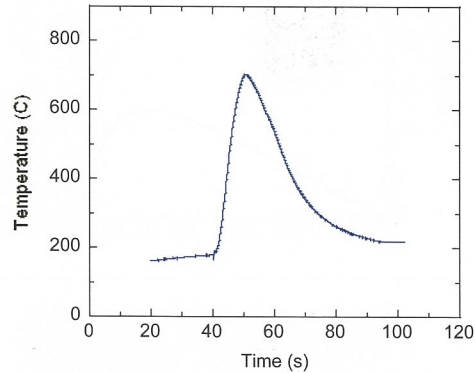
・セル作製プロセス (2cm角の場合)  
cell fabrication process

1. ダメージ層エッチング
2. テクスチャーエッチング
3. リン拡散
4. SiN膜形成
5. 電極形成 (表Ag,裏Al スクリーン印刷)
6. 両面同時焼成
7. 2cm角セルに切り出し (ダイシングソー)



・プロセスの特徴  
feature in our process

- 1) 高速焼成  
high-speed co-firing by RTP

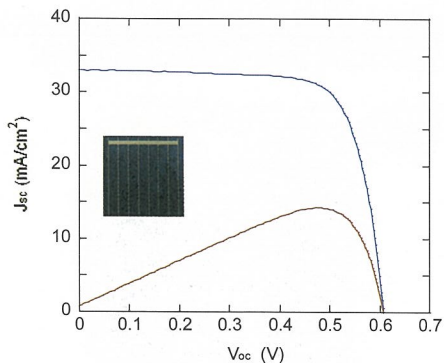


- 2) プラズマレスドライエッチングによる端面処理  
Edge-isolation with plasmaless dry etching

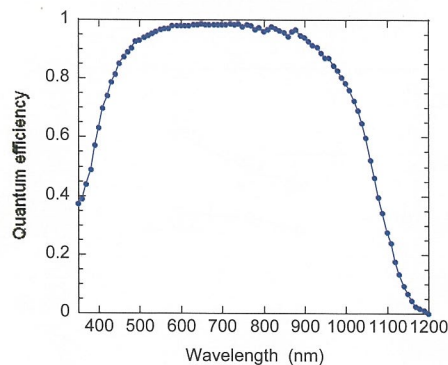
### 厚さ150 μm多結晶シリコンセルの特性

#### Performance of 150 μm-thick poly-crystalline cell

I-V characteristics



Internal quantum efficiency

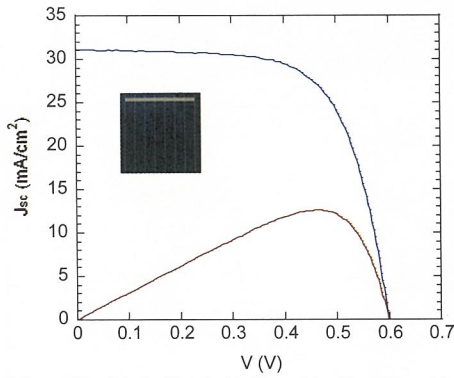


Jsc 32.8mA/cm<sup>2</sup> FF 0.768  
Voc 607mV Eff 15.3 %  
Area 4cm<sup>2</sup>

\* テクスチャーエッチングなし  
(HF/HNO<sub>3</sub>によるダメージ層エッチのみ)

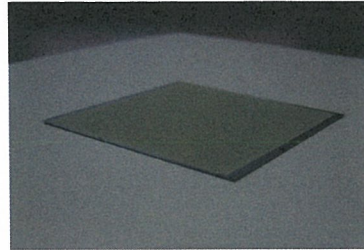
### 厚さ100 μ m多結晶シリコンセルの作製 Fabrication of 150 μ m-thick poly-crystalline cell

I-V characteristics



| Jsc(mA/cm <sup>2</sup> ) | Voc (V) | FF    | Eff (%) |
|--------------------------|---------|-------|---------|
| 31.1                     | 0.599   | 0.674 | 12.5    |

焼成後の基板の状態(5cmX5cm)  
Substrate after firing



基本的な作製プロセスを確立した。  
焼成条件の最適化を進めている。

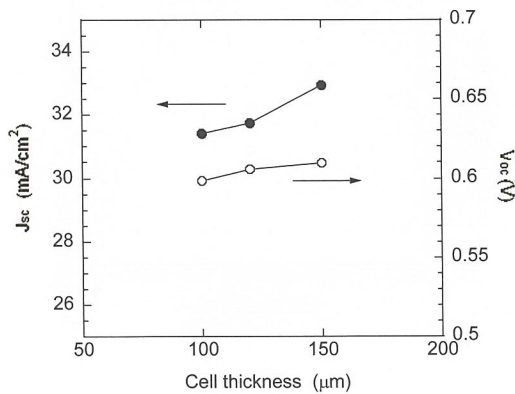
\* テクスチャーエッチングなし  
(HF/HNO<sub>3</sub>によるエッチングのみ)

### 薄型セルの特性の比較

#### Comparison of performance of thin-crystalline cells

薄型セルの特性の比較

Comparison of Voc and Jsc of thin-crystalline silicon cells



・新しい表面テクスチャー方法の検討  
Novel surface texturing method  
プラズマレスドライエッチング+メタルマスク  
Plasmaless dry etching + metal mask

・多結晶シリコン基板の場合  
(使用ガス XeF<sub>2</sub>)



➡ 特に、光閉じ込め技術、表面パッシベーション技術が重要

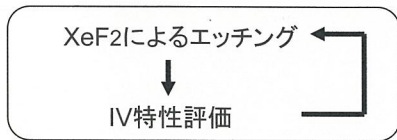
### 新規pn接合分離方法の開発

#### A novel edge-isolation with plasmaless dry etching

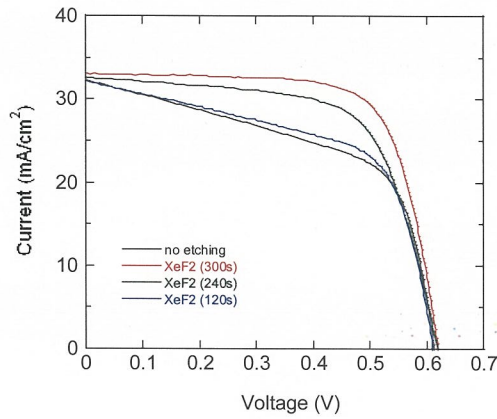
・薄型基板に対応した新規edge-isolation方法の検討

→ プラズマレスドライエッチング法  
使用ガス XeF<sub>2</sub>, (ClF<sub>3</sub>)

edge-isolationを行わないセルを作製



I-V characteristics

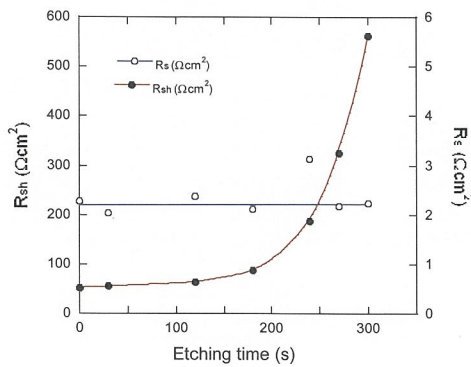


同一セルでのIV特性の変化がわかる。

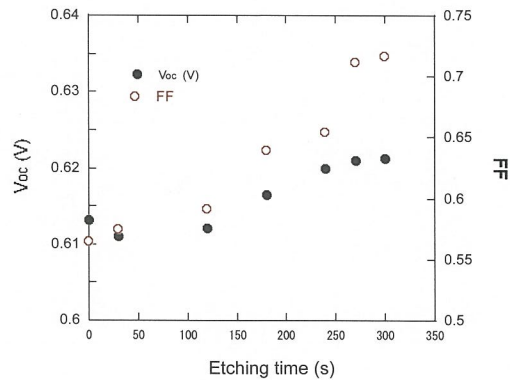
### プラズマレスドライエッチングを用い接合分離の効果

#### The effects of edge-isolation using plasmaless dry etching method

Relationship of R<sub>s</sub> and R<sub>sh</sub> with etching time



Relationship of V<sub>oc</sub> and FF with etching time



➡ プラズマレスドライエッチングによる、edge-isolation方法を確立。

## まとめ Conclusion

---

### ・まとめ

- 1) 結晶シリコンチームにおけるセルの試作プロセスについて述べた。  
Cell fabrication process in our team was described.
- 2) 厚さ100  $\mu$  mのセルを作製し、基本的なセルのプロセスを開発した。  
Fundamental cell fabrication process for 100  $\mu$  m-thick silicon solar cells was developed.
- 3) 新規のテクスチャー方法と、edge-isolation 方法を開発した。  
New surface texturing and edge-isolation method were developed.

### ・今後の予定

- ・厚さ100  $\mu$  mレベルの薄型シリコンセルの高効率化を図る。  
We will develop high-efficient 100  $\mu$  m-thick silicon solar cells.

## a-SiO:H/c-Si超薄型ヘテロ接合太陽電池 a-SiO:H/c-Si ultra-thin heterojunction solar cells

シリコン新材料チーム  
藤原裕之、金子哲也、近藤道雄

### 概略(Outline)

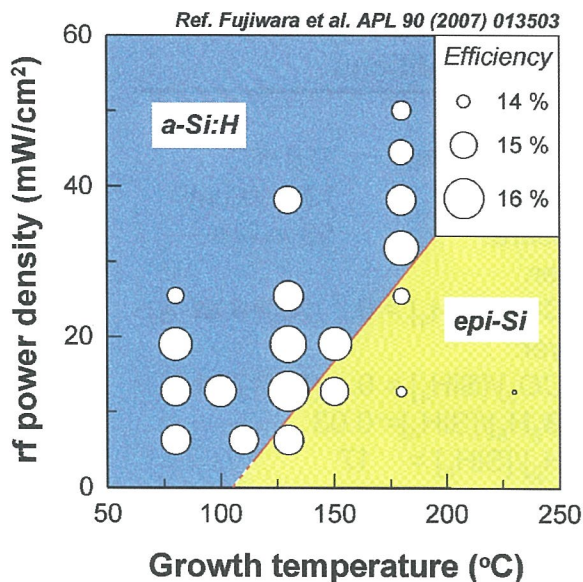
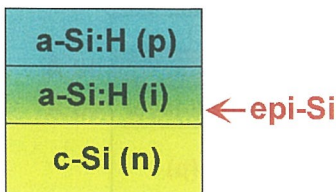
1. Si系ヘテロ接合太陽電池  
Si-based heterojunction solar cell
2. 両面ヘテロ構造型a-SiO:H/c-Si太陽電池  
Double-heterostructured a-SiO:H/c-Si solar cells
3. まとめ  
Summary

### a-Si:H/c-Siヘテロ接合

- 1) 高変換効率  
(三洋電機: 22.3%)
- 2) 低プロセス温度
- 3) 低い温度係数

#### 問題点:

高温および低rf出力でヘテロ界面にエピタキシャル層形成



⇒ ヘテロ界面でのエピタキシャル成長による大幅な効率低下  
Efficiency reduces severely by epitaxial growth at heterointerface

### a-SiO:H系ヘテロ接合太陽電池 a-SiO:H-based heterojunction solar cells

Ref. Fujiwara et al. APL 91 (2007) 133508.

基板上でのエピタキシャル成長抑制  
⇒ワイドギャップ系a-SiO:H p-i層

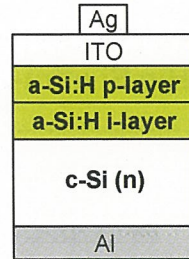
- 1) 高い変換効率
- 2) エピタキシャル成長の抑制
  - ・成長条件の自由度が増加
  - ・高い再現性

⇒高い変換効率の太陽電池を容易に作製可能

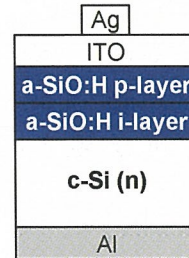
High efficiency solar cell can be fabricated more easily

内容:

- 1) n,p型基板によるa-SiO:H/c-Si
- 2) 両面ヘテロ構造型太陽電池を作製



**Effi.=15.8%**  
 $V_{oc}=626$  mV  
 FF=0.76  
 $J_{sc}=33.4$  mA/cm<sup>2</sup>



**Effi.=16.0%**  
 $V_{oc}=625$  mV  
 FF=0.77  
 $J_{sc}=33.4$  mA/cm<sup>2</sup>

### a-SiO:H/c-Si太陽電池の作製 Fabrication of a-SiO:H/c-Si

#### Growth Conditions

PECVD

Substrate temp.: 180 °C  
 rf power: 13 mW/cm<sup>2</sup>  
 Pressure: 50 mTorr

i-layer:

$[CO_2]/[SiH_4] = 0.2$  (**[O]=4 at.%**)

p-layer:

$[CO_2]/[SiH_4] = 0.4$  (**[O]=7 at.%**)

$[B_2H_6]/[SiH_4] = 0.03$

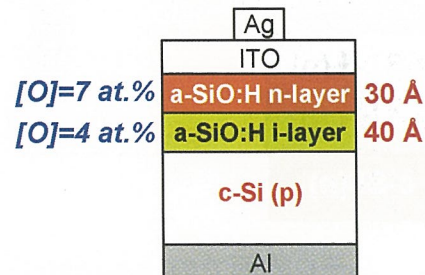
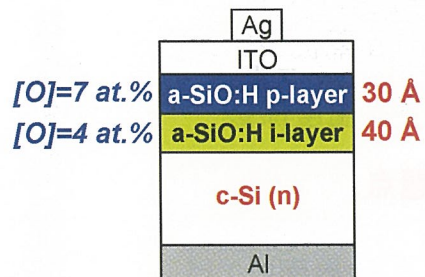
$[H_2]/[SiH_4] = 17$

n-layer:

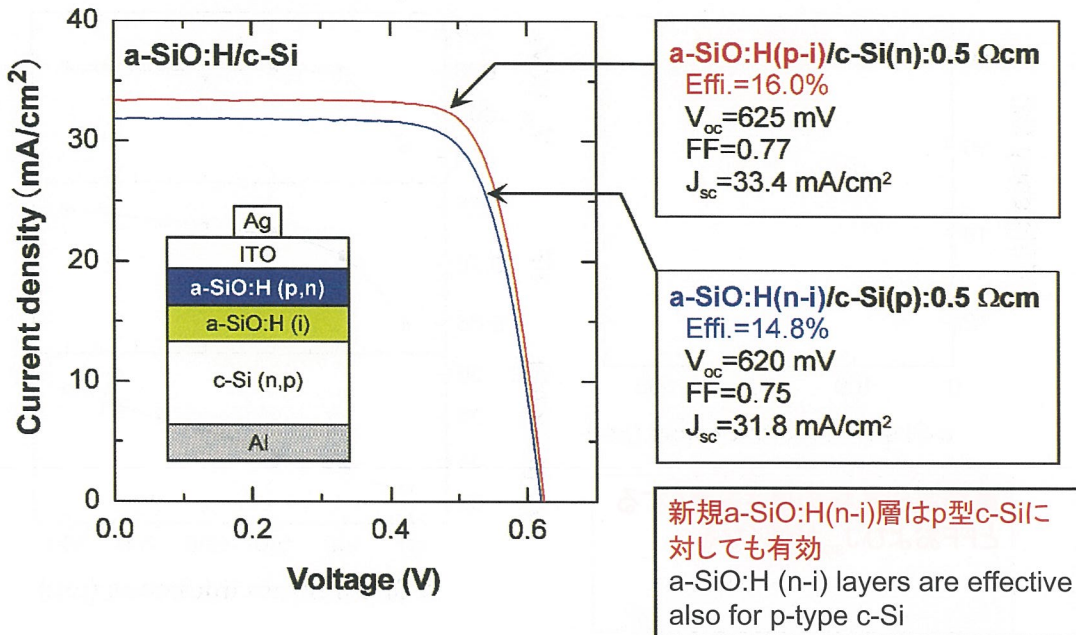
$[CO_2]/[SiH_4] = 0.4$  (**[O]=7 at.%**)

$[PH_3]/[SiH_4] = 0.05$

$[H_2]/[SiH_4] = 12$

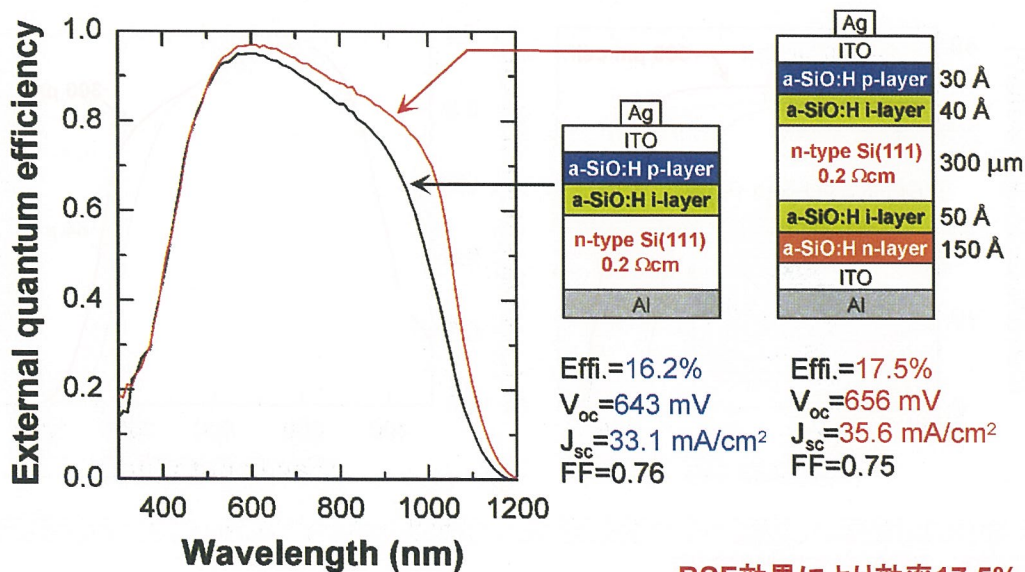


### n型およびp型基板を用いたa-SiO:H/c-Siヘテロ接合太陽電池 a-SiO:H/c-Si heterojunction solar cells on n- and p-type substrates



独立行政法人 産業技術総合研究所

### a-SiO:H両面ヘテロ構造型太陽電池 a-SiO:H double-heterostructured solar cells

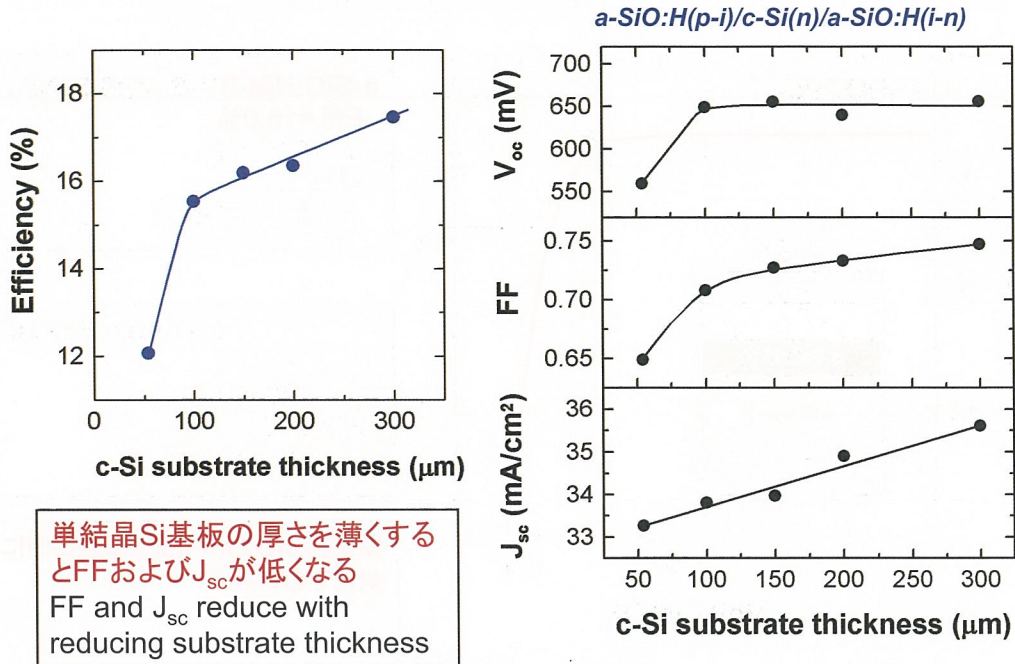


a-SiO:H層の両面ヘテロ構造型太陽電池 ⇒

BSF効果により効率17.5%  
Effi.=17.5% by BSF effect

独立行政法人 産業技術総合研究所

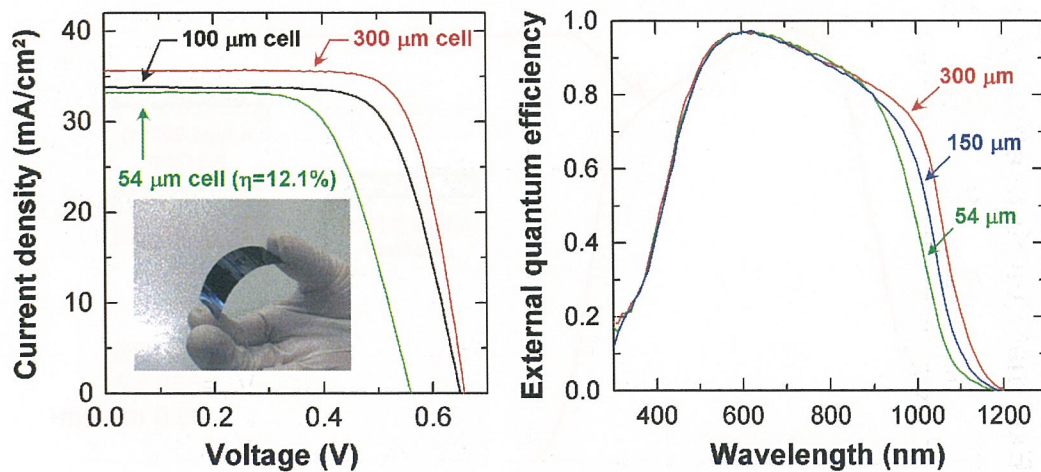
### 両面ヘテロ構造型太陽電池の基板厚依存性



独立行政法人 産業技術総合研究所

### 超薄型 (54μm) a-SiO:H/c-Si両面ヘテロ構造型太陽電池

Ultra-thin (54μm) a-SiO:H/c-Si double-heterostructured solar cells



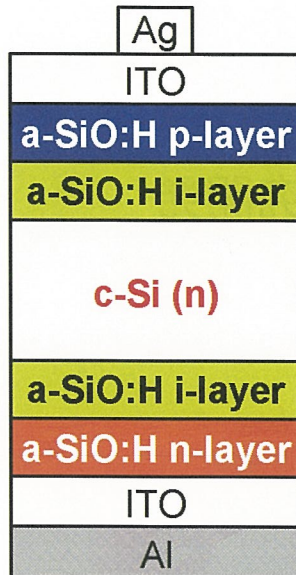
a-SiO:H層を用い、両面ヘテロ構造型としては世界で最も薄い54 μmの太陽電池を作製し、変換効率12%を得た。

Using a-SiO:H, the thinnest heterojunction solar cell (54μm) was realized with 12 % efficiency

独立行政法人 産業技術総合研究所



## まとめ Summary



- 1) a-SiO:H をn型およびp型c-Si基板に適用したヘテロ接合型太陽電池を初めて作製した。  
a-SiO:H layers were applied for n- and p-type c-Si to realize heterojunction.
- 2) a-SiO:H p-iおよびi-n層により構成される両面ヘテロ構造型太陽電池を作製し、BSF効果により変換効率**17.5%**を得た。  
In double-heterostructured solar cells, 17.5% efficiency was obtained.
- 3) c-Si基板の厚さを薄くすると、 $J_{sc}$ およびFFが減少し、変換効率が低下する。  
With reducing substrate thickness,  $J_{sc}$  and FF and resulting efficiency decrease.
- 4) **厚さ54  $\mu\text{m}$** の両面ヘテロ構造型太陽電池を作製し、変換効率**12%**を得た。  
a-SiO:H/c-Si solar cell with 54  $\mu\text{m}$  was made.

第4回 産業技術総合研究所 太陽光研究センター 成果報告会  
平成 20年 7月28、29日 日本科学未来館

## 発電量評価技術の研究開発

Energy Rating of Photovoltaic Modules

評価・システムチーム

大谷 謙仁

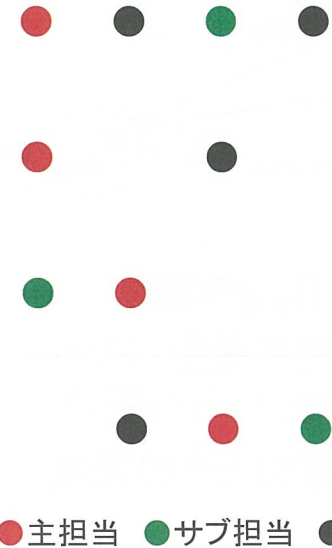
Kenji Otani

## 発電量定格とは “What's Energy Rating?”

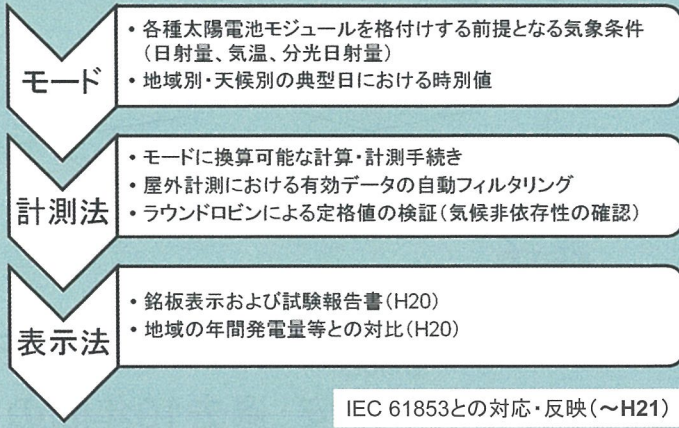
- 定格とは”格付け”のこと
  - 英語ではRating 発電量定格→Energy Rating
  - レストランやホテルの”三つ星”とかのランクも格付けの一種
- 太陽電池モジュールをどのように格付けるか？
- STC(標準試験条件)における最大電力など
  - 日射強度: 1キロワット/m<sup>2</sup>、電池温度: 25°C、基準分光日射: AM1.5
- しかし、太陽電池の購入者が”真に”必要な情報は普段の「発電量」
- STCを補完する太陽電池モジュールの評価体系として、発電量定格方式を推進
- 多様化する太陽電池産業において、
  - 各種太陽電池の「発電量」による競争を促す物差し
  - 「適材適所」による発電量の最大化を可視化

## NEDO 太陽光発電システム共通基盤技術の研究開発 発電量評価技術の研究開発(H19~21) の構成

AIST JET JWA GU



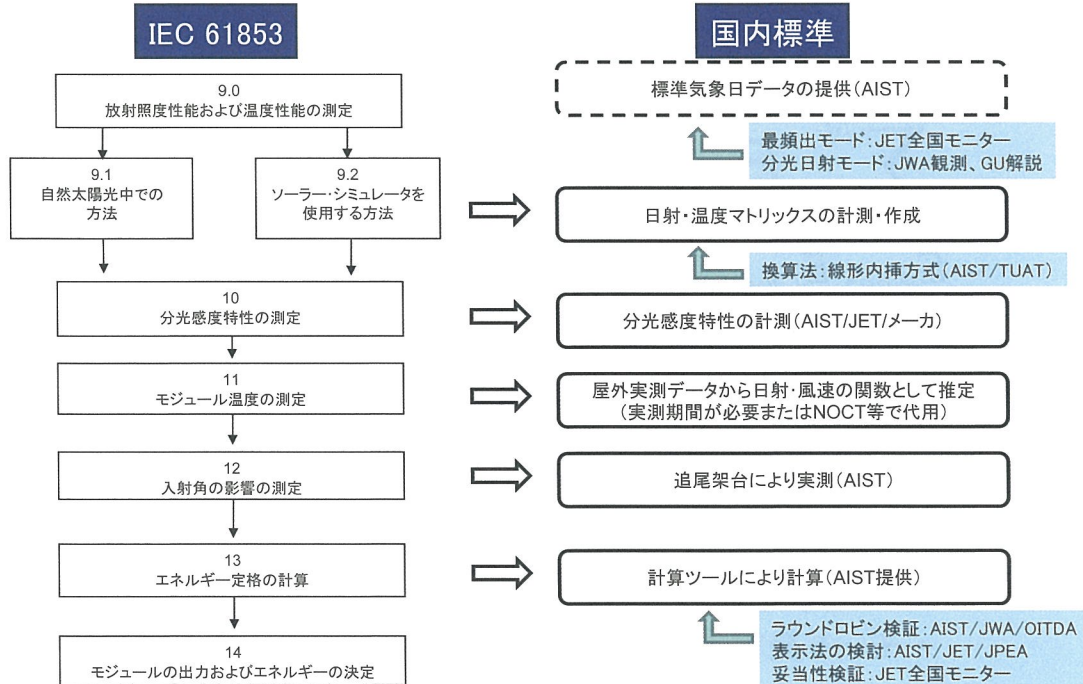
### 発電量定格技術の国内標準(TR) (~H19/20)



### 発電量定格に必要な基礎データベース(~H21)

- ①住宅用太陽光発電システムの実運転性能データベース
- ②アレイ面におけるモジュール温度分布データベース
- ③分光日射量データベース(観測値、物理パラメータ)

## IEC61853および発電量定格の計算手順



## 太陽電池モジュールの年間発電量を推定する

$$\begin{aligned}
 \text{年間発電量 } E_{\text{annual}} &= \sum_{d=1}^{365} \text{日発電量 } E_d \\
 &= E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + \Lambda + E_{364} + E_{365} \\
 &= E_{\text{rain}} \cdot W_{\text{rain}} + E_{\text{haze}} \cdot W_{\text{haze}} + E_{\text{dry,hot}} \cdot W_{\text{dry,hot}} + \Lambda + E_{\text{fine}} \cdot W_{\text{fine}}
 \end{aligned}$$

モード別
重み
発電量

- 年間発電量  $E_{\text{annual}}$  は毎日の発電量  $E_1 \sim E_{365}$  の積算
- $E_{\text{annual}}$  の精度の目安: 過去10年間の年間発電量(シミュレーション値 [www.pvsystem.net](http://www.pvsystem.net)) の標準偏差は2~5%程度
- $E_d$  をモード分け(縮約)し、モード別の発電量とその頻度(重み付け)を設定する → モード数の設定

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 期間(年間)発電量の計算方式

- 最も単純な方法: 2モード

$$\sum_{d=1}^N E_d = E_{\text{Fine}} (N - c) + E_{\text{Cloudy}} \cdot c$$

-  $E_{\text{Fine}}$ 、 $E_{\text{Cloudy}}$ : 晴および曇のモード発電量

-  $N$ : 期間日数(年間の場合は365)

-  $c$ : 曇モードの日数

- モード数が2の理由

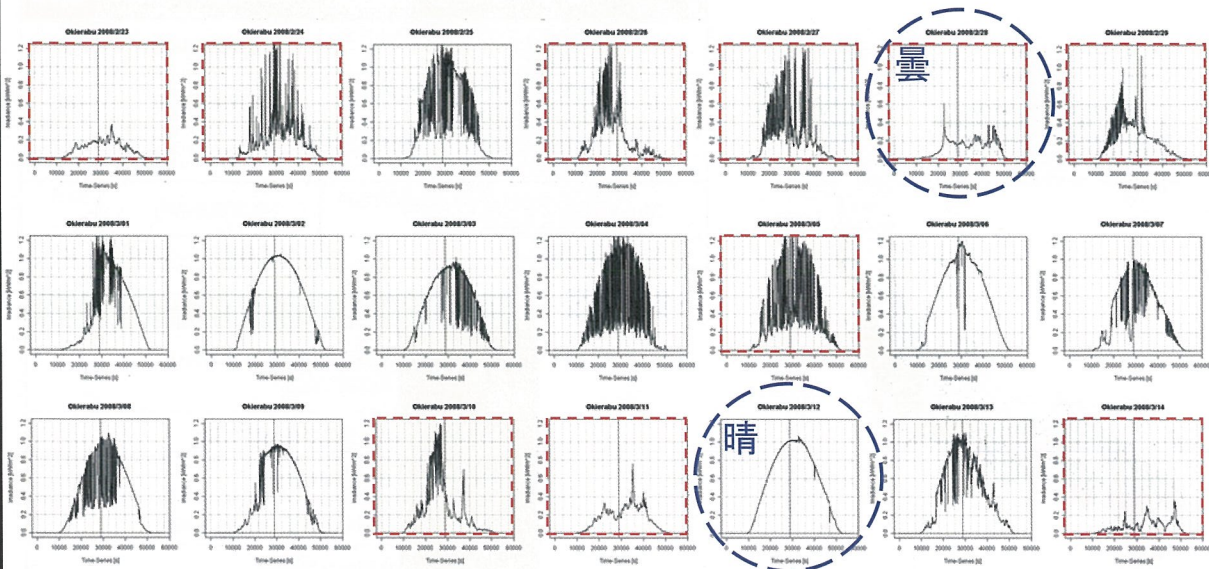
- 日射の2値(オン・オフ)的な性質

- モード発電量の測定の手間の軽減と分かり易さ

- モード発電量は精確な測定が必要

独立行政法人 産業技術総合研究所

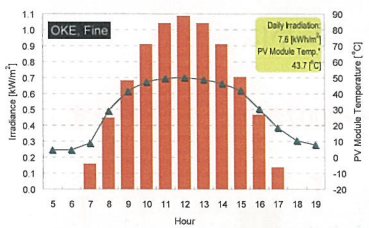
# (検証例) 沖永良部ラウンドロビン実験のデータから



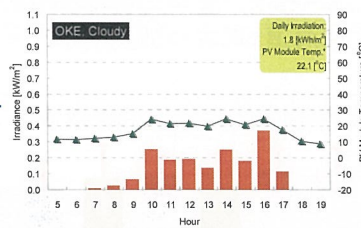
2008/2/23~3/15(22日間) 曇モード日数は10日 2モードを種として抽出

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 2モードによる期間発電量の推定と検証



× 晴日数 +



× 曇日数 =

期間  
積算  
発電量

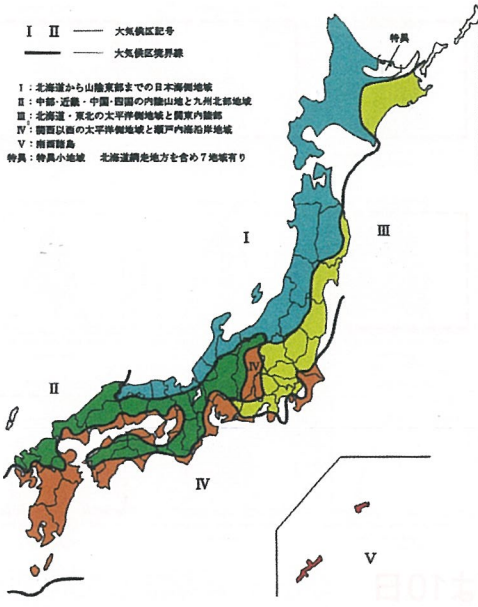
| モジュール<br>番号 | 期間<br>発電量<br>[Wh] | モード発電量 [Wh]           |       | 曇日数<br>推定値<br>[日] | 曇を11日と設定し<br>た時の発電量推定 |        |        |
|-------------|-------------------|-----------------------|-------|-------------------|-----------------------|--------|--------|
|             |                   | モード名<br>測定日           | 晴     |                   | 曇                     | [Wh]   | 誤差 [%] |
| Ch01        | 14,152            |                       | 1,051 | 211               | 10.7                  | 13,881 | 1.9%   |
| Ch02        | 10,049            |                       | 733   | 155               | 10.5                  | 9,768  | 2.8%   |
| Ch03        | 10,067            |                       | 734   | 153               | 10.5                  | 9,760  | 3.0%   |
| Ch04        | 6,780             |                       | 508   | 104               | 10.9                  | 6,728  | 0.8%   |
| Ch05        | 3,955             |                       | 296   | 61                | 10.9                  | 3,930  | 0.7%   |
| Ch06        | 5,795             |                       | 414   | 93                | 10.3                  | 5,577  | 3.8%   |
| 日射量         | 73.80             | [kWh/m <sup>2</sup> ] | 7.52  | 1.63              | 時間帯は9:00~15:00        |        |        |
| 気温※         | 18.4              | [°C]                  | 21.3  | 15.4              | 気温は日射強度の重み付けによる加重平均気温 |        |        |

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 日射気候区 (NEDO/JWA)

I II 大気候区記号  
 大気候区境界線

I: 北海道から山陰東部までの日本海側地域  
 II: 中部・近畿・中国・四国の内陸山地と九州北部地域  
 III: 北海道・東北の太平洋側地域と関東内陸部  
 IV: 関西以西の太平洋側地域と瀬戸内海沿岸地域  
 V: 南西諸島  
 特異: 特異小地域 北海道網走地方を含め7地域有り



| 日射気候区番号 | 地域                      | 観測地点      | 傾斜角 |
|---------|-------------------------|-----------|-----|
| I       | 北海道から山陰東部までの日本海側地域      | 北海道長沼町    | 36° |
| II      | 中部・近畿・中国・四国の内陸山地と九州北部地域 | 佐賀県鳥栖市    | 26° |
| III     | 北海道・東北の太平洋側地域と関東内陸部     | 茨城県つくば市   | 15° |
| IV      | 関東以西の太平洋側地域と瀬戸内海沿岸地域    | 岐阜県岐阜市    | 32° |
| V       | 南西諸島                    | 鹿児島県沖永良部島 | 22° |

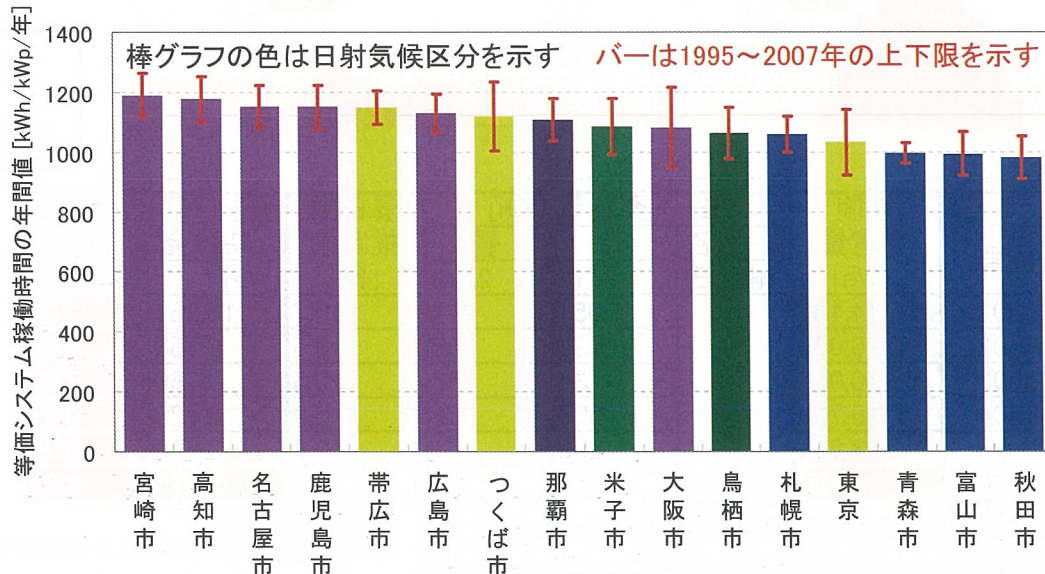
### 5気候区

| 観測項目  | 備考                          |
|-------|-----------------------------|
| 分光日射  | 測定波長域(350~1700nm)<br>傾斜面で測定 |
| 全天日射  | 水平面及び傾斜面で測定                 |
| 直達日射  | 日照時間も算出                     |
| 気温    | 飽和水蒸気量の算出にも利用               |
| 湿度    | 水蒸気量の推定                     |
| 風向・風速 | 分光日射データベースの収録要素             |

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 日本全国のモード数は3つが適当？

- 年間発電量(シミュレーション値)の統計的観点からは、①中部・四国・九州、②関東・関西・山陰・沖縄、③北海道・東北・北陸の3モード(発電量の大・中・小にて)



独立行政法人 産業技術総合研究所

## 分光日射(スペクトル)の変動要因

|       | 赤方偏移                                  | 青方偏移                                  | 変動要因(周期)                             |
|-------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| エアマス  | 大                                     | 小                                     |                                      |
| 事象・要因 | 朝焼け・夕焼け<br>冬季<br>高緯度帯                 | 日中(南中ピーク)<br>夏季<br>低緯度帯               | 天文(日)<br>季節(年)                       |
| 水蒸気   | 小                                     | 大                                     |                                      |
| 事象・要因 | 晴<br>日中(湿度小)<br>冬季<br>低温地域<br>少雨・乾燥気候 | 雨・曇<br>朝・夕(湿度大)<br>夏季<br>高温地域<br>湿潤気候 | 気象<br>温度サイクル(日)<br>季節(年)<br>気候<br>気候 |
| エアロゾル | 大                                     | 小                                     |                                      |
| 事象・要因 | 黄砂                                    |                                       | 地域・季節                                |

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 分光日射を表現する指標(波長重心)の導出

分光日射加重平均波長(Spectra-weighted Average Wavelength)の定義式  
(波長重心)

$$\lambda_{SWA} = \frac{\int_a^b E_i(\lambda) \cdot \lambda \, d\lambda}{\int_a^b E_i(\lambda) \, d\lambda}$$

APE(Average Photon Energy)の定義式

$$APE = \frac{\int_a^b E_i(\lambda) \, d\lambda}{q_e \int_a^b \Phi_i(\lambda) \, d\lambda}$$

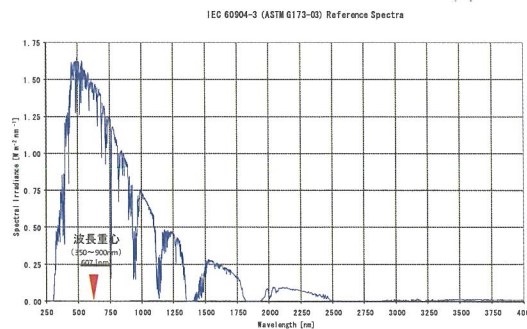
ここで、

$E_i(\lambda)$  : 分光日射強度 [W/m<sup>2</sup>]

$\Phi_i(\lambda)$  : 光子量子密度 [1/m<sup>2</sup>/s]

$\lambda$  : 波長 [m]

a, b : 平均波長と APE を計算する波長範囲、a は始端波長[m]、b は終端波長



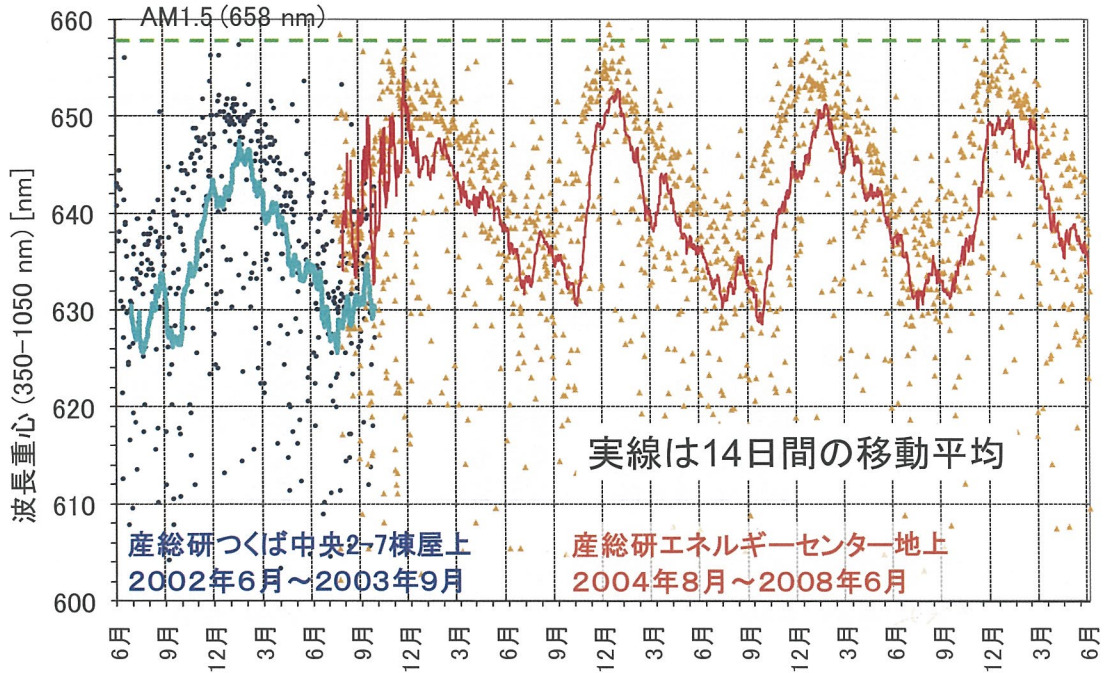
### APEと波長重心の関係

$$APE[eV] = \frac{h \cdot c / q_e}{\lambda_{SWA}} \cong \frac{1240}{\lambda_{SWA}} \quad \text{または} \quad \lambda_{SWA}[nm] = \frac{h \cdot c / q_e}{APE} \cong \frac{1240}{APE}$$

※逆数に1,240を掛け算すれば  
相互に変換可能

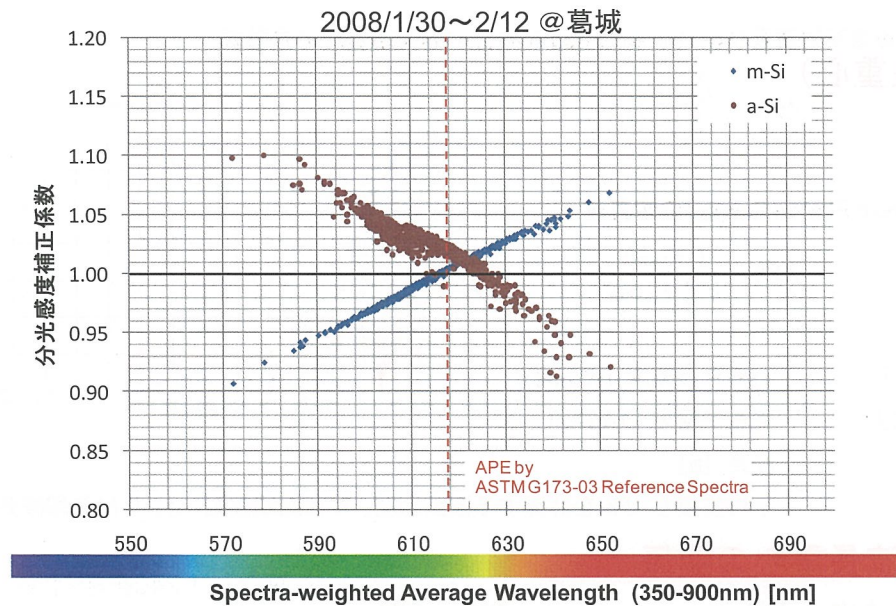
独立行政法人 産業技術総合研究所

### 分光日射変動の観測値(正午)



独立行政法人 産業技術総合研究所

### 分光感度補正係数と波長重心の関係



※計測時間(チャンネル切替時間)中の日射変動が5%未満を抽出

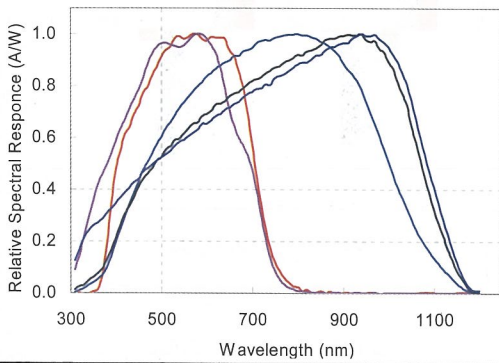
独立行政法人 産業技術総合研究所



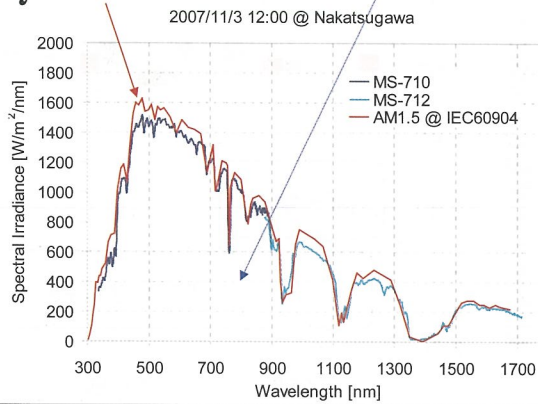
## 分光感度補正係数の定義

$$\frac{\int SR(T_{\text{mod}}, \lambda) E(j, \lambda) d\lambda}{\int E(j, \lambda) d\lambda} \frac{\int AM1.5(\lambda) d\lambda}{\int SR(T_{\text{mod}}, \lambda) AM1.5(\lambda) d\lambda}$$

$SR(T_{\text{mod}}, \lambda)$



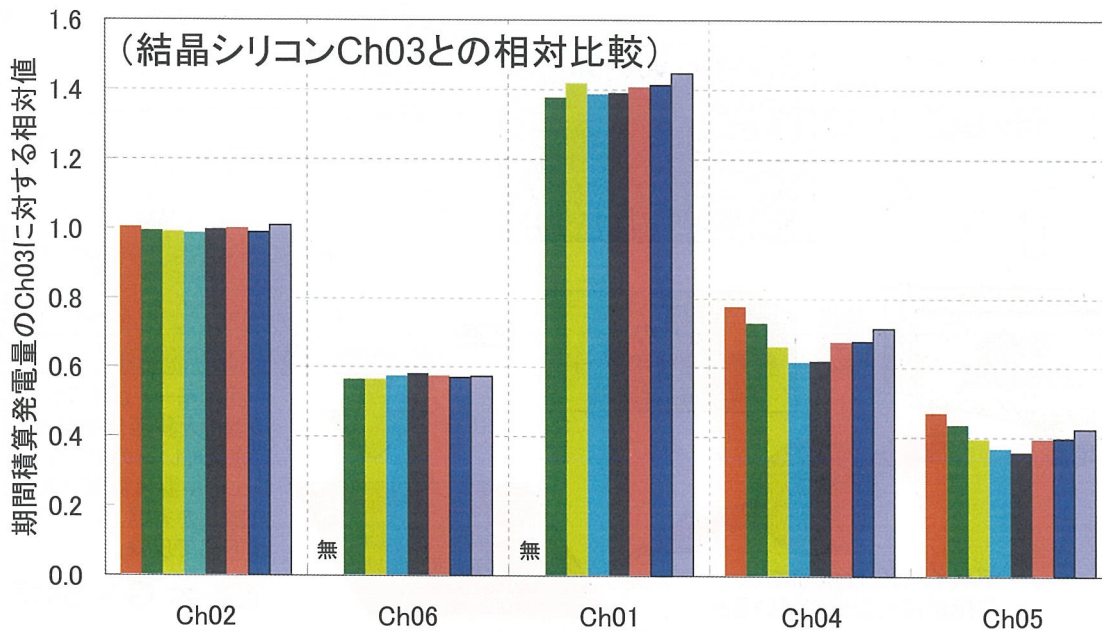
$\int AM1.5(\lambda) d\lambda$        $\int E(j, \lambda) d\lambda$



独立行政法人 産業技術総合研究所

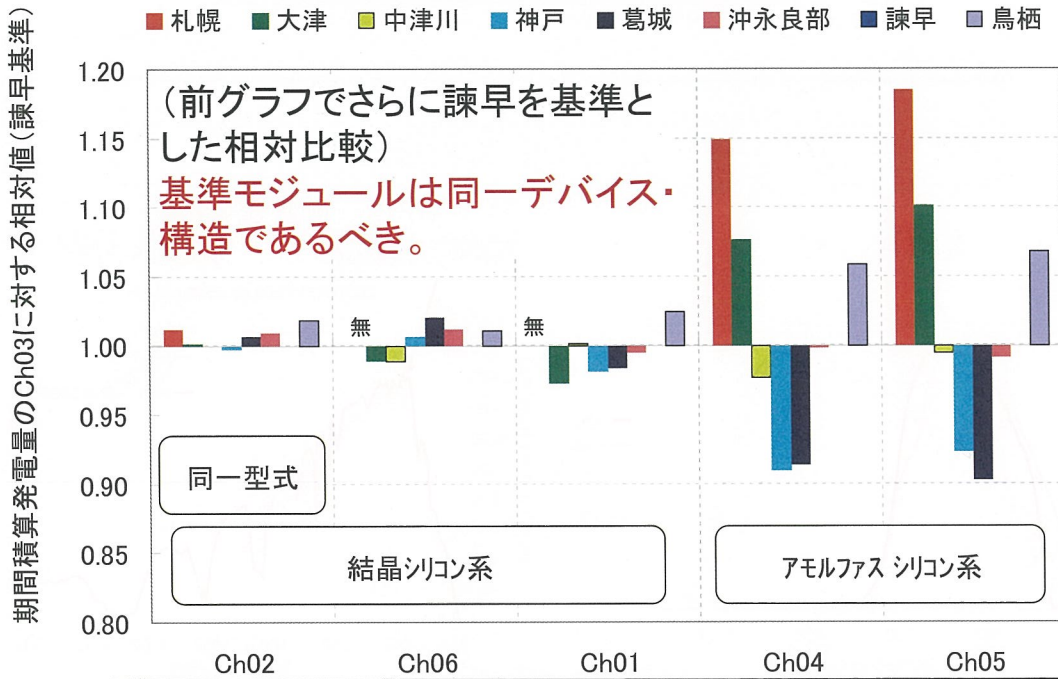
## 各地での発電量の実測結果(1)

札幌   大津   中津川   神戸   葛城   沖永良部   諫早   鳥栖



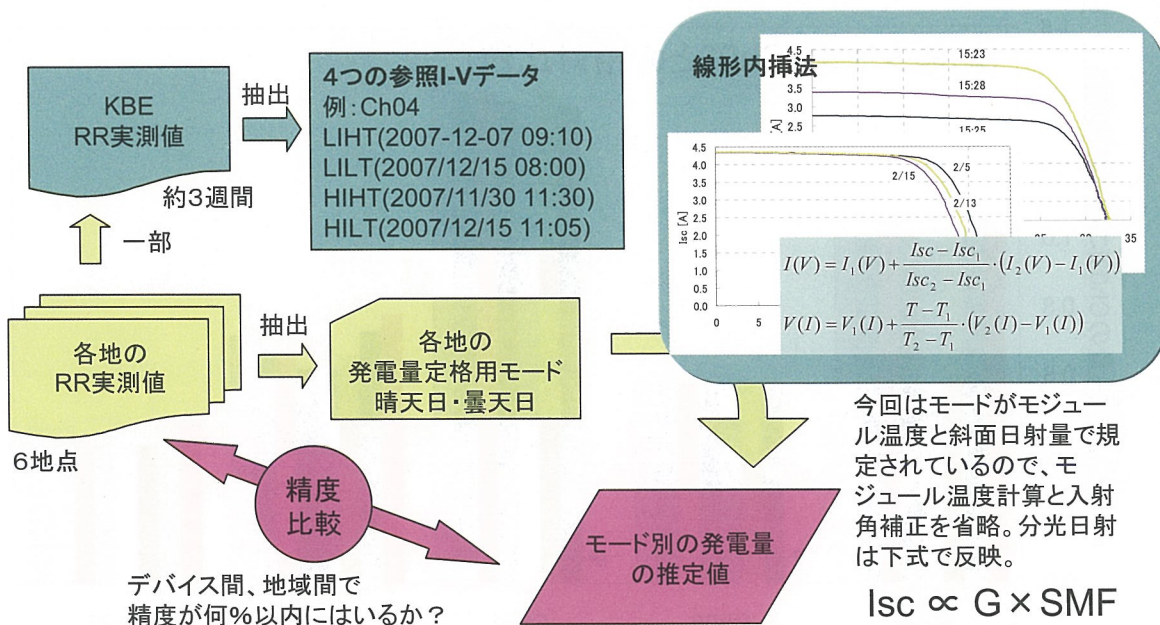
独立行政法人 産業技術総合研究所

## 各地での発電量の実測結果(2)



独立行政法人 産業技術総合研究所

## ラウンドロビン実験データによる発電量計算の方法



独立行政法人 産業技術総合研究所

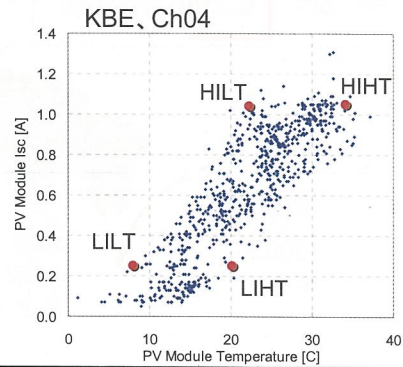
## 4つの参照I-Vデータの選び方

### 原則

- Iscがほぼ等しい(差が2%未満)ペアを2組4点
  - ペア I : Iscが定格値の8割以上
  - ペア II : Iscが定格値の1/4程度
- モジュール温度が同一ペア内で10°C以上の差
- I-V計測中(約1分)の日射変動が1%未満

### 例(KBE、Ch04)

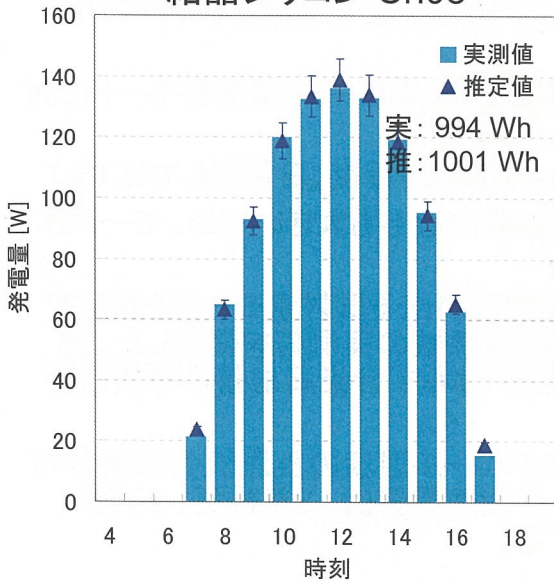
- ペア I (低照度) : Isc ≒ 0.25 (A)
  - LIHT(高温) : Tmod ≒ 20.2 (°C)
  - LILT(低温) : Tmod ≒ 8.1 (°C)
- ペア II (高照度) : Isc ≒ 1.05 (A)
  - HIHT(高温) : Tmod ≒ 34.3 (°C)
  - HILT(低温) : Tmod ≒ 22.3 (°C)



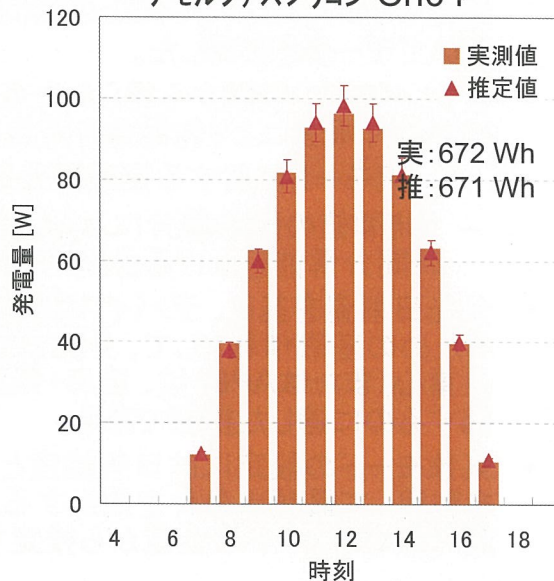
独立行政法人 産業技術総合研究所

## 線形内挿法による日発電量推定結果 (3) KBE参照値よりOKEのPmaxを推定<晴天モード>

結晶シリコン Ch03



アモルファスシリコン Ch04



独立行政法人 産業技術総合研究所

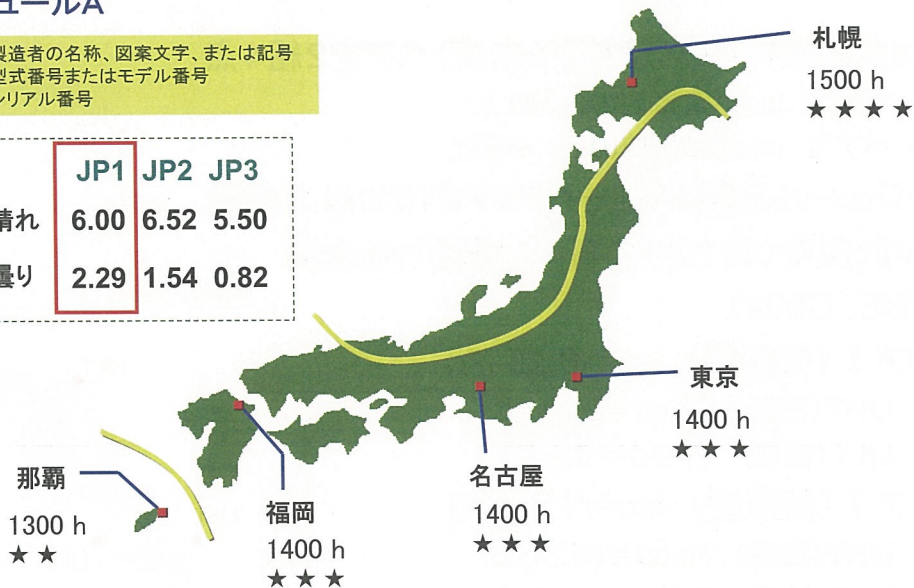
## An Example of Mapping Energy Ratings

### — 日本各地における年間発電量 —

#### モジュールA

- 製造者の名称、図案文字、または記号
- 型式番号またはモデル番号
- シリアル番号

|    | JP1  | JP2  | JP3  |
|----|------|------|------|
| 晴れ | 6.00 | 6.52 | 5.50 |
| 曇り | 2.29 | 1.54 | 0.82 |



独立行政法人 産業技術総合研究所

## まとめ

- 発電量定格方式のための標準報告書(案)をほぼまとめた。
- 太陽電池モジュールの屋外測定ラウンドロビン実験を光産業技術振興協会ラウンドロビン小WGとの協同により実施し、全8地点(5メーカー)においてデータを取得した。
- ラウンドロビン実験から得られた各地の晴天日モード・曇天日モードに対し線形内挿法により発電量を推定したところ、
  - 晴天モードに対する推定誤差は±5%以内程度(日影無しでは1%)
  - 1時間値の離散積分による推定誤差の寄与も大きいため、モードの時間分解能を上げる必要がある
- 分光日射量を基に、デバイス間の性能差が出る日射量モードを設定するための基礎情報として、分光日射補正係数の実測値を整理した。波長重心(またはAPE)は、地点・気候差によらず分光日射量の影響を評価するのに適した指標である。
- 気象モードの設定には日射強度とモジュール温度の実測値の同時分布を利用して最頻出条件を抽出する。年間発電量は、3気候区、2天気(晴・曇)の6モードの合成から推定する。

独立行政法人 産業技術総合研究所

# 太陽電池のトレーサビリティ技術開発 Technology and Standards: PV Traceability

品質保証及び性能データの  
信頼性の根幹技術

研究担当者: 猪狩真一  
Sanekazu IGARI

## 研究実施内容 Theme

- ・ トレーサビリティ技術開発 R & D
  - ・ 給範囲の拡大、校正の不確かさの低減
- ・ 国際整合 Intercomparison
  - ・ 各国校正機関との技能比較
- ・ 標準化 Standardization
  - ・ IEC / JIS 原案の作成・普及促進
- ・ 共同研究 Joint Research
  - ・ 産業用評価装置の開発

# トレーサビリティとは

「起源をたどれる」ことを意味し、

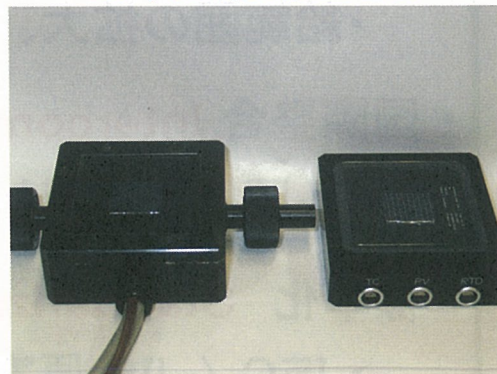
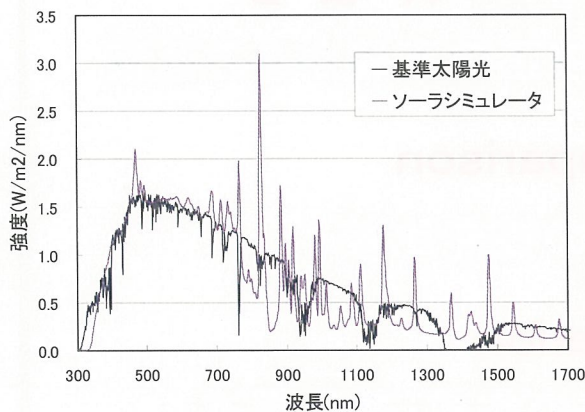
- ① 製品実現履歴の検証手段
- ② データの信頼性を裏付ける有効な手段

として、太陽光発電でも、その確保が重要

米国の宇宙船開発に係る計測の信頼性確保に端を発し、近年はBSE対策など食の安全性確保を目的として導入され、一般にも知られてきた。

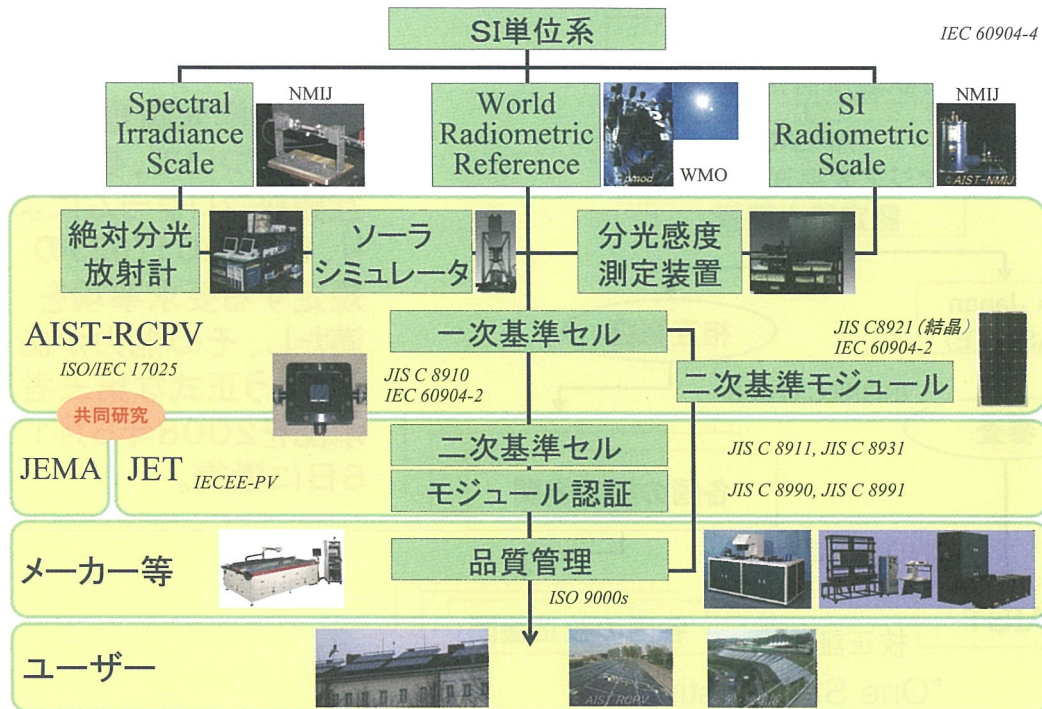
## 基準太陽電池 Reference PV Devices トレーサビリティの仲介標準器 Transfer standard

### 基準太陽電池セル



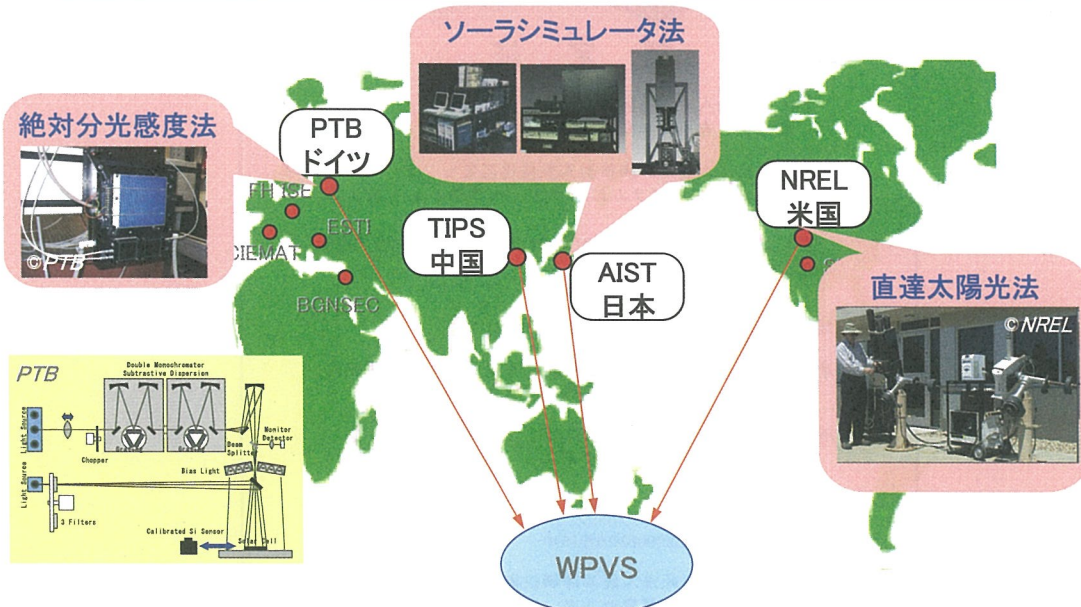
基準光と照射光の分光放射照度分布の不一致を補正

# 日本の太陽電池のトレーサビリティ Traceability in JAPAN



独立行政法人 産業技術総合研究所

## Calibration performance of AIST RCPV: WPVS Qualified Lab

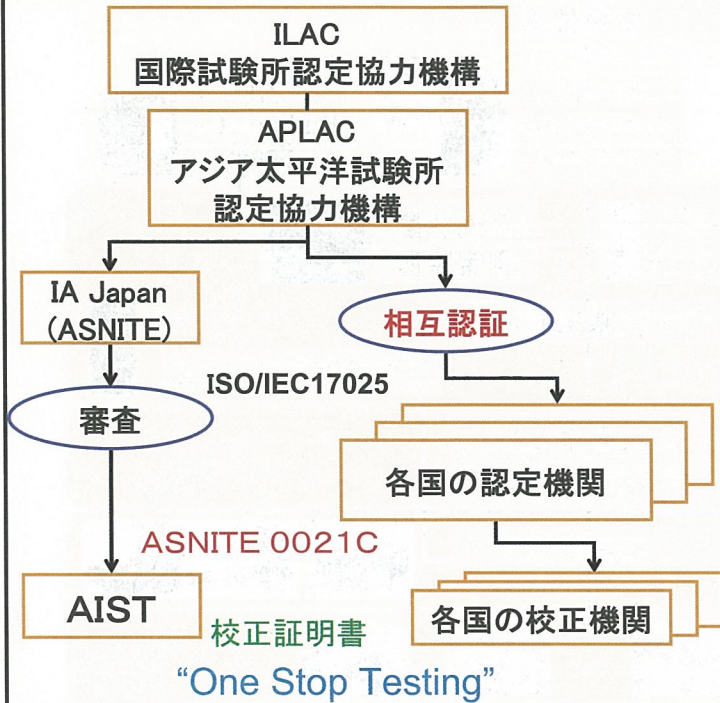


4機関の平均値が“Key Comparison Value”

独立行政法人 産業技術総合研究所

試験・校正機関の国際相互認証プログラム

Laboratory Accreditation



一次基準太陽電池の校正について、国際相互認証プログラムにより、ISO/IEC17025の規定する要求事項を満たし、その能力があるという正式な第三者承認を2008年5月16日に獲得。

独立行政法人 産業技術総合研究所



ラボ認定証 Certificate from NITE

認定証

独立行政法人 産業技術総合研究所  
理事長 吉川 弘之 殿

独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センターは、ASNITE認定プログラムに基づき、以下のとおり校正事業者として認定します。  
認定された事業者は、ISO/IEC17025:2005(JISQ17025:2005)に適合しています。

認定番号及び付加情報：ASNITE 0021 C

事業所の名称：独立行政法人 産業技術総合研究所  
太陽光発電研究センター

所在地：茨城県つくば市梅園1-1-1  
中央第二

認定の区分：別紙のとおり

最新交付日：平成20(2008)年5月16日

独立行政法人製品評価技術基盤機構  
認定センター 所長 瀬田 勝男

この認定証は、ILAC(国際試験所認定協力機構)及びAPLAC(アジア太平洋試験所認定協力機構)のMRA(相互承認協定)規則に則ったASNITE認定プログラムのもとで発行しました。

独立行政法人 産業技術総合研究所



認定範囲



(別紙)

認定の区分：光  
 初回認定年月日：平成20(2008)年5月16日  
 計量器等の区分[認定年月日]：光度標準電球等[平成20(2008)年5月16日]  
 恒久的施設で行う校正/現地校正の別：恒久的施設で行う校正

| 計量器等の区分 | 種類                  | 校正範囲                   | 最高測定能力 (k=2) |
|---------|---------------------|------------------------|--------------|
| 光度標準電球等 | 照度測定器<br>一次基準太陽電池セル | 直流電流<br>10 mA ~ 200 mA | 0.72 %       |

(2008/05/16 ASNITE 0021 C 1/1)

## 二次基準シリコン結晶系太陽電池モジュール Secondary Reference Si PV module

JIS C 8921-2008.6.20発行  
 (原案作成委員会: AIST)

・ IECと骨子は整合  
 IEC 60904-2 :2007  
 (Photovoltaic devices-Part2:  
 Requirements for reference  
 solar devices)

+

- ・ 規定の追加;
  - ・ 屋内校正手順を詳細に規定
  - ・ 小面積を許容
  - ・ 接続方式ごとの不確かさを記述

一次基準太陽電池セル  
 JIS C 8910

二次基準結晶系太陽電池セル  
 JIS C 8911

二次基準アモルファス太陽電池セル  
 JIS C 8931

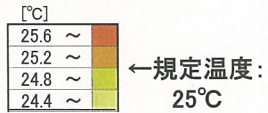
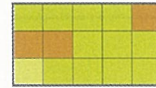
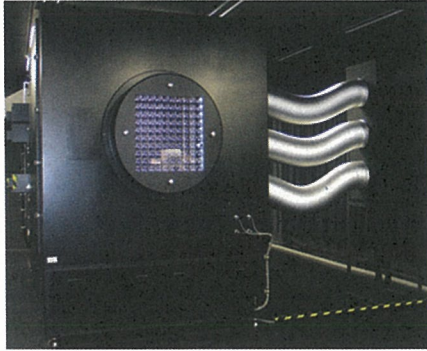
二次基準アモルファス太陽電池  
 サブモジュール  
 JIS C 8932

二次基準シリコン結晶系  
 太陽電池モジュール  
 JIS C 8921

基準太陽電池のJIS規格

# モジュール校正用ソーラシミュレータ

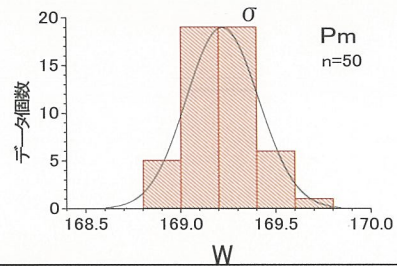
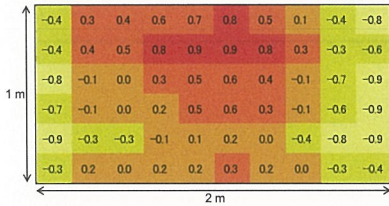
## 二次基準モジュール温度制御装置



面内温度制御範囲: **25 ± 0.5°C**  
 (JIS/IEC規格の許容範 25°C ± 2°C)

高再現性:  $\sigma$ : 0.2% (Pmax)

- Irradiation Area : 1m x 2m
- Pulse duration : Max 1Sec
- Non uniformity : < ± 1%



# 共同研究の実施例: ライン用シミュレータ



## 共同研究の実施例:分光感度測定装置



独立行政法人 産業技術総合研究所

## むすび

1. 太陽電池標準の国際協力(WPVS, IECなど) 継続的な維持管理に努める。
2. 世界の太陽光発電をリードするに相応しい, 国際競争力のあるトレーサビリティ体系の構築・維持・発展を図る。
3. 根幹標準(CIE標準電球, SI単位, WRR)の一元化をリードする。
4. 基準太陽電池の強固な供給体制を確立し, 不確かさを低減する技術開発を促進する。
5. 技能試験等を主催し、参加者技術レベルの向上を目指す。

独立行政法人 産業技術総合研究所

# 飛躍的低コスト化を可能にする 薄膜シリコン太陽電池仮想工場

Virtual factory for thin-film silicon solar cells with remarkable low-cost production

## 想定条件 Condition

開発完了時期: **2015年** Completed in 2015

仮想工場の規模: **10GW** Scale: 10GW

太陽電池の種類: **薄膜Si太陽電池** Thin-film silicon solar cells

用途: **太陽光発電所を想定** for MW-class PV systems

目標モジュールコスト: **50円/W** Target module cost: 50yen/W

検討担当: **小西正暉・増田淳・松井卓矢**

Masaki Konishi, Atsushi Masuda, Takuya Matsui

**必要な要素技術を抽出し  
今後の開発計画に役立てたい**

産業化戦略チーム

## 世界のメインマーケットは大規模太陽光発電所へ

Large scale MW-class PV systems



**世界の発電量の10%を賄うには2000GWの太陽電池が必要  
10年間かけて完成するとしても200GW/年の生産量**

200GW/year production is needed.

### 想定モジュールの 概要

Concept of Modules:  
Roll to roll production  
on iron plate

**基板: 鉄板**

**デバイス構造: サフストレート型**

**生産方式: ロール・ツ・ロール**

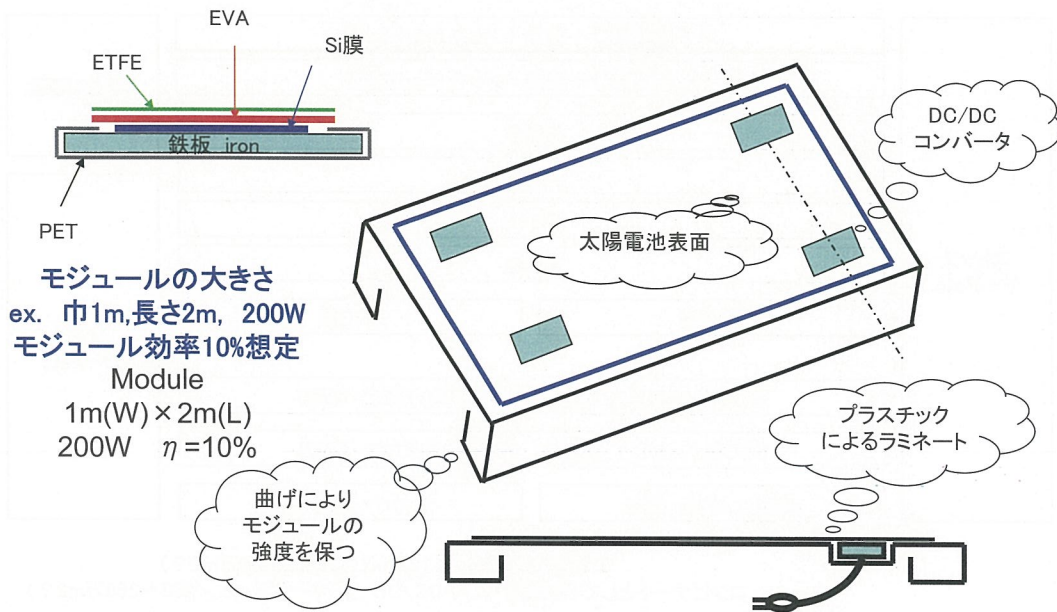
**テクスチャ: メッキ方式**

**集電電極&昇圧: ワイヤ&DC/DCコンバータ**

**ラミネート: ETFE/EVA(プラスチック)**

# 太陽電池モジュールの完成想定図

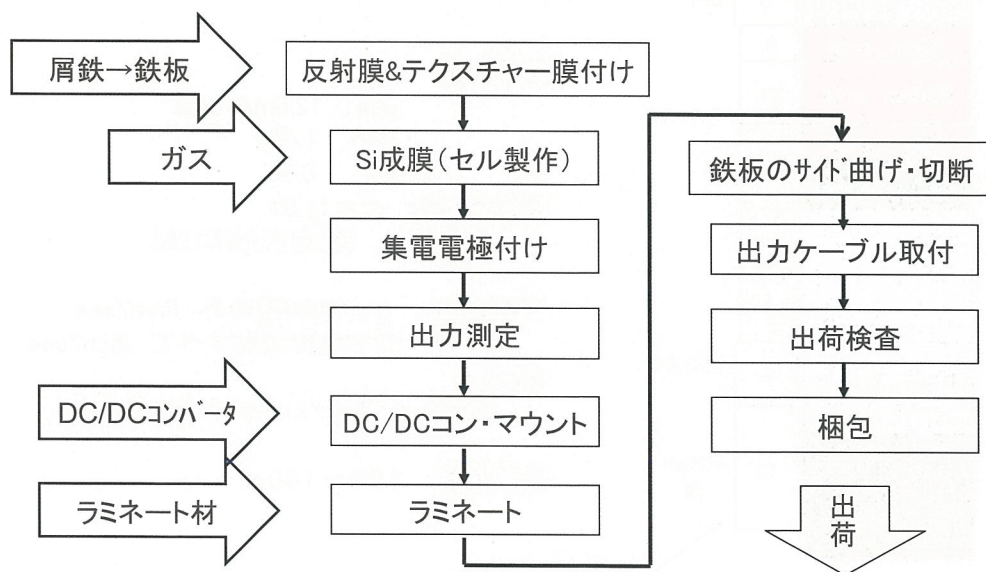
Schematic of solar cell module



独立行政法人 産業技術総合研究所

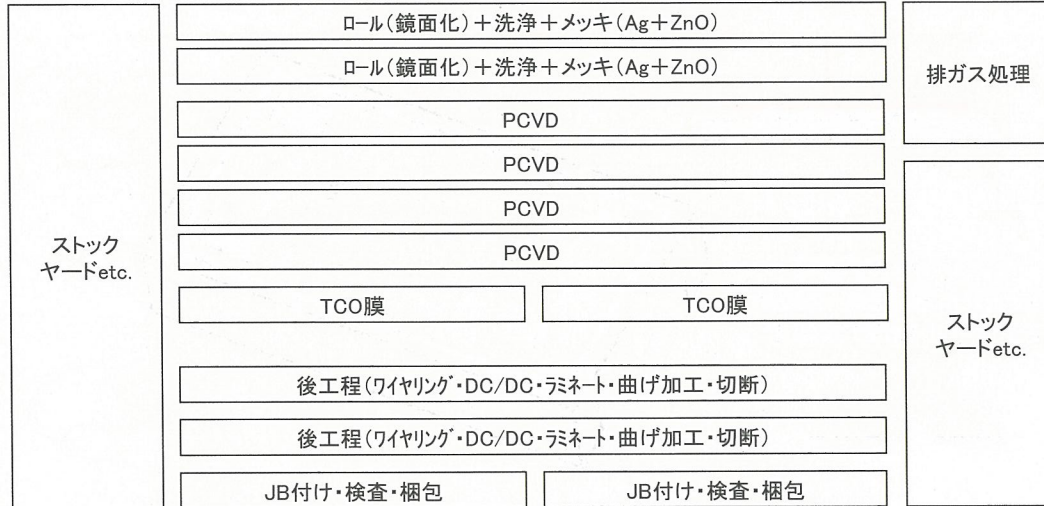
# 想定される製造工程

Process of manufacture



独立行政法人 産業技術総合研究所

## 生産工場のラフレイアウト Rough layout of Factory



工場想定スペース: 12万m<sup>2</sup>(敷地面積50万m<sup>2</sup>?)  
コンビナートとして(製鉄所・ガス・DC/DC・ラミネート材etc./200~250万m<sup>2</sup>?)

## 想定素子構造 a-Si/μc-Si Device structure

|               |    |            |
|---------------|----|------------|
| 80nm TCO(ZnO) | 5  | ロード        |
| 20nm a-Si     | 3  |            |
| 200nm a-Si    | 30 |            |
| 20nm a-Si     | 3  |            |
| 50nm 中間層      | 8  |            |
| 20nm μc-Si    | 3  |            |
| 1000nm μc-Si  | 60 |            |
| 20nm μc-Si    | 3  |            |
| 1000nm ZnO    | 5  | アンロード      |
| 200nm Ag      |    |            |
| Fe            | 13 | テンション<br>他 |

装置長の内訳(m)

### 素子性能

J<sub>sc</sub>: 12.0mA/cm<sup>2</sup>

V<sub>oc</sub>: 1.42V

FF: 0.68

安定化後の η = 11.5%  
(想定劣化率12%)

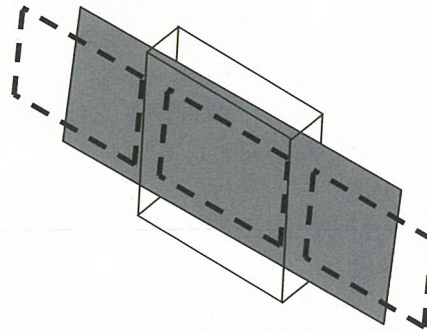
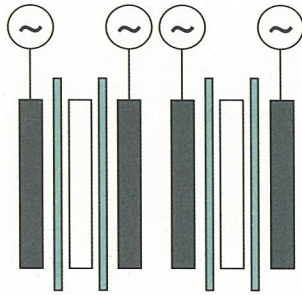
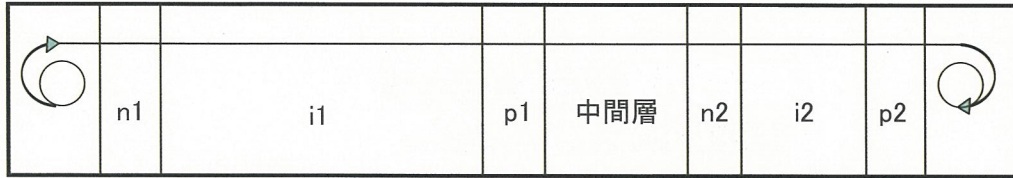
デポレート μc-Siのi層のみ 5nm/sec  
その他の層はすべて 2nm/sec

中間層  
2nm/sec (ZnO/スパッタ or SiO<sub>x</sub>/CVD)

装置長さ 130~140m

## CVD装置のイメージ

Image of CVD apparatus



想定装置能力: 2.5GW/年・台 4ロール/台 (625MW/年・ライン)  
 想定搬送速度: 0.3m/sec 想定有効ロール長4000m

独立行政法人 産業技術総合研究所

## 現状技術の延長線上で完成させ

This scenario is completed using present techniques  
 with some advanced modifications.

## さらなるコストダウンの可能性を残す

Further cost down will be also possible.

基板 : 亜鉛挽き鋼板 0.4mm厚 1250mm幅 ロール長4000m+ $\alpha$

Ag 及び ZnO : メッキ  $\Rightarrow$  論文 (Toyama, WCPEC-3, 2003)

CVDのデポレート : a-Siの2nm/sec

$\Rightarrow$  論文 (Nishimoto, J of Non-Crystalline Solids, 2002)

$\mu$ c-Siの5nm/sec  $\Rightarrow$  3nm/secだが論文 (Saito, WCPEC-3, 2003)

ロール・ツ・ロールだから性能安定  $\Rightarrow$  論文 (Saito, WCPEC-3, 2003)

ロール・ツ・ロールの将来性 (※3層構造13~14%セルへ展開)

集電電極 : ワイヤ方式 (レーザースクライブなし)

DC/DCコンバータ必要 (1V $\rightarrow$ 300V)  $\Rightarrow$  論文 (Fukae, JSES学会誌, 2005)

バイパスダイオード不要

クリーンルーム不要

DC/DCコンバータ採用の将来性 (※ACモジュールへ展開)

ラミネート材の耐久性 : 機械的強度の懸念を除けば問題少ない

$\Rightarrow$  論文 (Tokutake, JSES学会, 2003)

独立行政法人 産業技術総合研究所

## コスト予測 Expected module cost

**65円/W** (目標: 50円/W)

(59円/W) at 5nm/s→10nm/s

### 内訳

材料費 : 28円/W Materials: 28yen/W

(基板、ガス、ラミネート材、JB、ケーブル、DC/DCコン等)

設備償却費 : 30円/W (24円/W) Depreciation: 30yen/W

(7年均等償却として)

その他 : 7円/W Others: 7yen/W

(人件費・治工具・電気代・梱包材・他)

※要員 : 1000人(人件費比率: 1~2%)・・・国内産業として最適

Number of workers: 1000 (Ratio of personnel expenses: 1~2%)

⇒ Suitable for Japanese industry

## 開発項目 Required R&D items

膜の堆積速度向上 Increase in deposition rate

$\mu$ c-Si, a-Si, TCO, 中間層すべてにおいて

特に  $\mu$ c-Siのi層は 5nm/s → 10nm/s → 20nm/s

装置コストの低減 → 特にPCVD装置のコスト低減

Reduction in apparatus cost

全装置 2.1億円/MW → 1.7億円/MW → 1億円/MW

償却費 30円/W 24円/W 14円/W

モジュールコスト 65円/W 59円/W 49円/W

光電変換効率の向上 Increase in efficiency

2層構造 → 3層構造 11.5% → 13~14%

目標

一般的に定率償却のためビジネス的には  
市場価格を睨んだ投資のタイミングが鍵  
Key issue is timing of the investment.