

太陽光発電研究センター 成果報告会 資料

平成17年7月14日

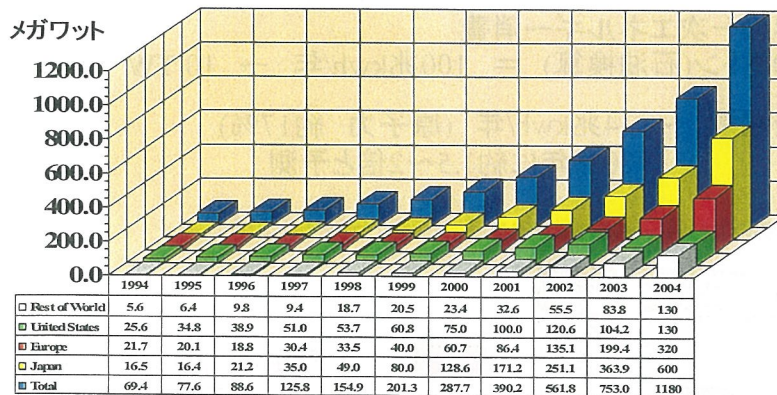
独立行政法人産業技術総合研究所

(独)産業技術総合研究所 太陽光発電研究センターの概要

研究センター長

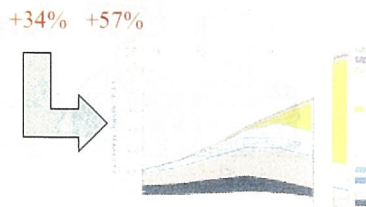
近藤 道雄

太陽光発電の進展

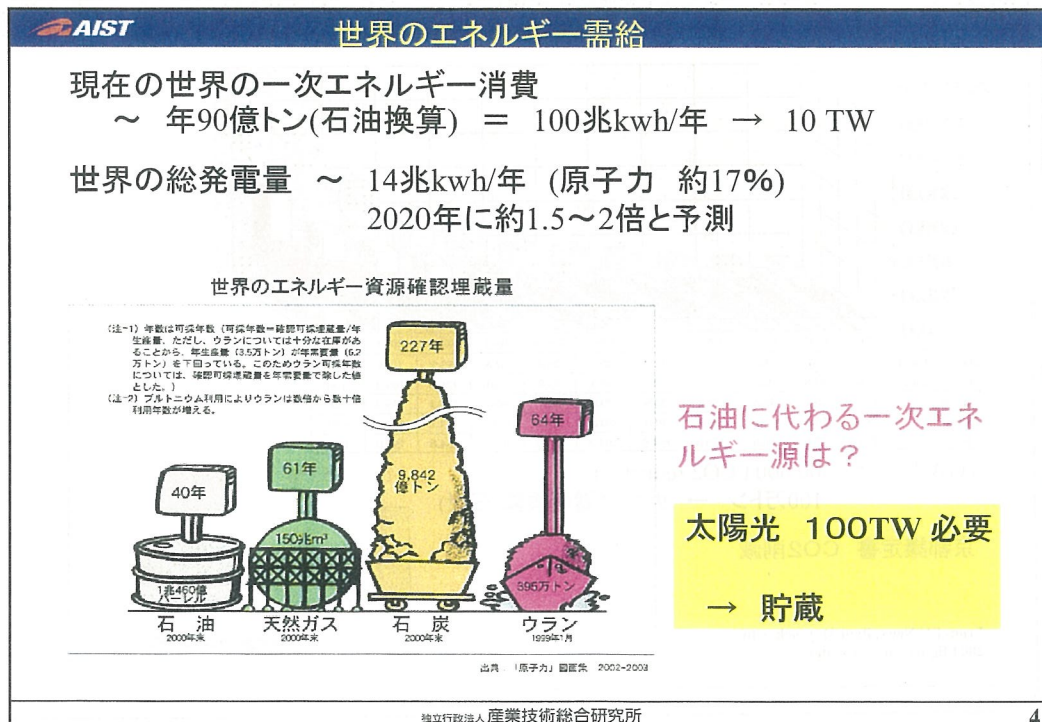
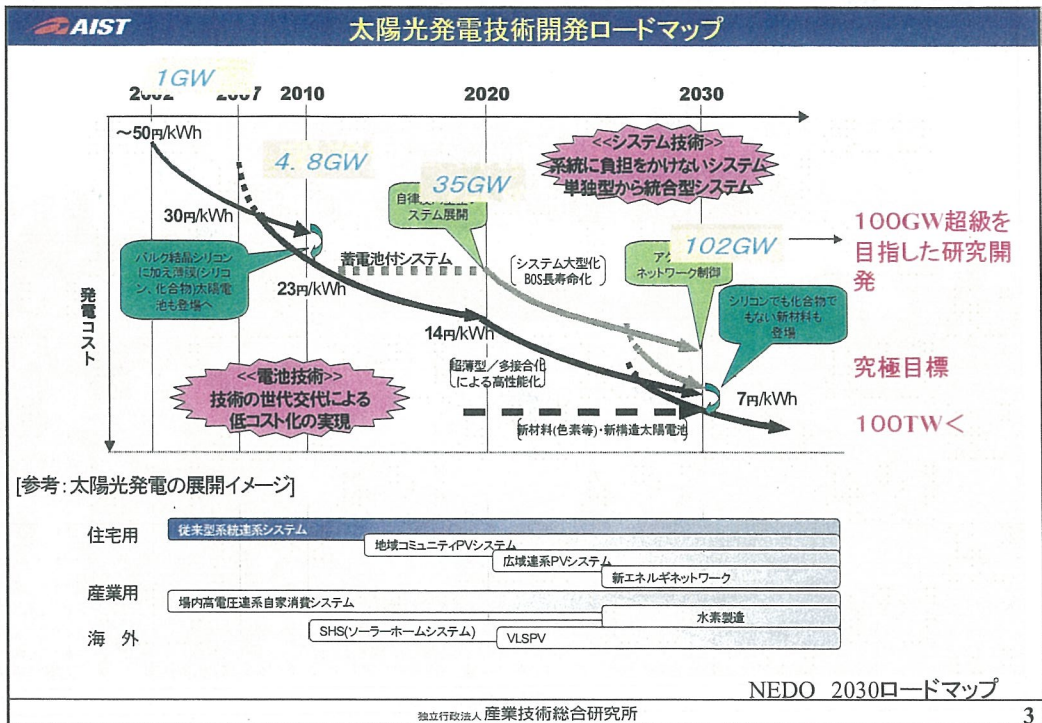


1GW PV = 300,000 t CO2 reduction
100万トン → 火力発電所換算(石炭)

京都議定書 CO2削減



From PV News, Paul Maycock, editor
2004 figures are estimates

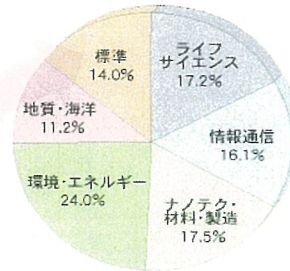


2001年4月1日 発足
理事長 吉川弘之

研究センター 26 ユニット
研究部門 22 ユニット
研究ラボ 5 ユニット 等

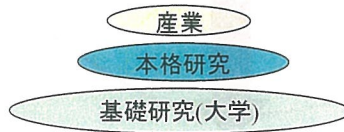
15研究所が一つに
日本最大の国立研究機関

研究職員 2395名
総予算 1200億 (直接研究費 420億)



本格研究 (Full Research)

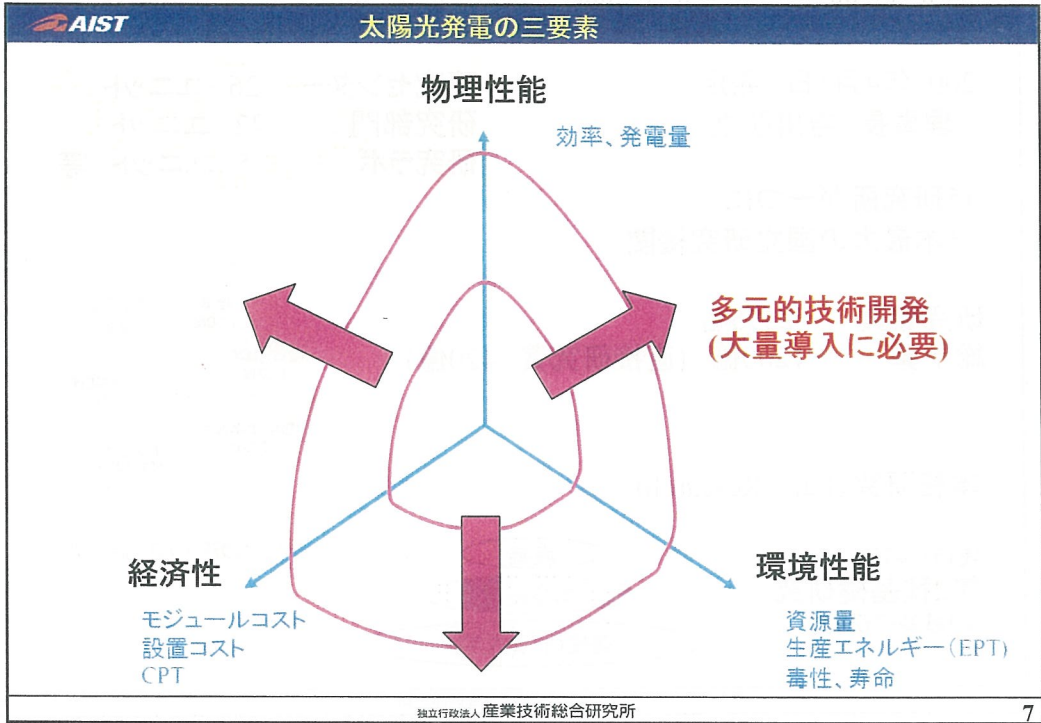
実用化開発
第2種基礎研究
第1種基礎研究



ミッション : 太陽光発電の産業化と普及を加速する研究開発
二酸化炭素排出削減で豊かで安心な社会の実現を

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

2010年政府導入目標 482万kW (発電量 ~ 0.5%)
メガソーラー 1000 kW (発電量 0.8%) 実証研究



7

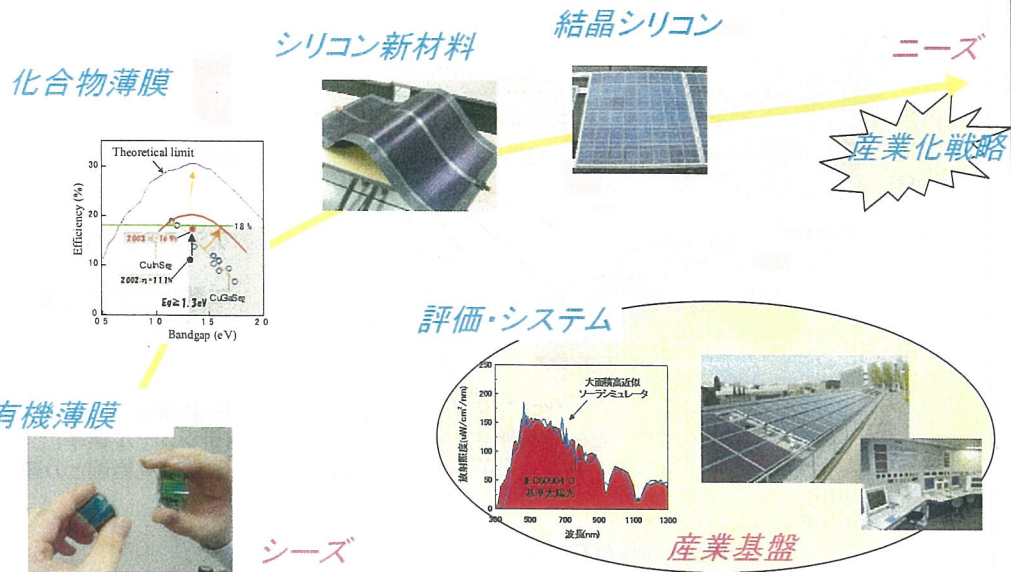
AIST 太陽光発電研究センター新組織図

センター長 近藤道雄 副センター長 仁木栄 総括研究員 作田浩一 センター付研究員 加藤和彦	シリコン新材料チーム (4) 近藤道雄
	結晶シリコンチーム (3) 坂田功
	化合物薄膜チーム (4) 仁木栄
	評価・システムチーム (7) 仁木栄
	有機薄膜チーム (2) 齊藤和裕
	産業化戦略チーム 増田淳

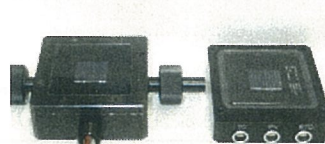
常勤職員 27名 非常勤 24名 派遣 学生 等 総数83名 (うち外国人 3名)

独立行政法人 産業技術総合研究所

8



一次基準セル：太陽電池の原器

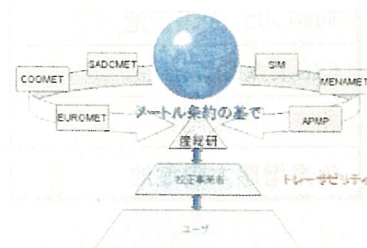


世界で4箇所の一級基準セル供給

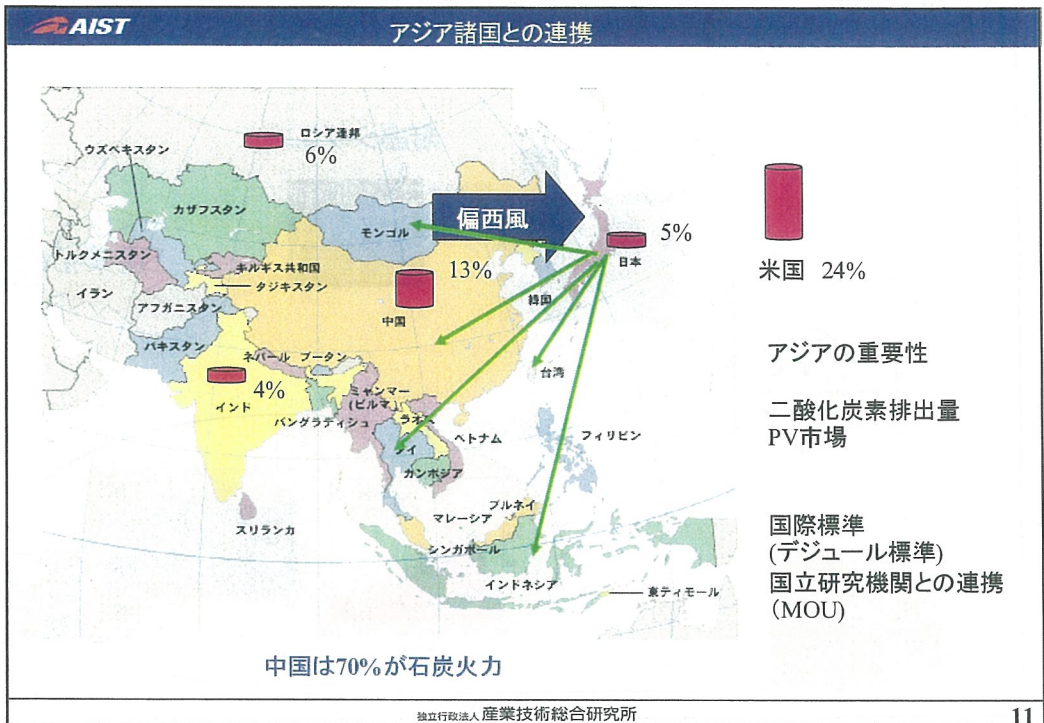


7つの基本単位

長さ (m)	電流 (A)	物質 (mol)
ミウ素安定化He-Neレーザ	量子ホール抵抗標準 (R)	ジョセフソン効果電圧標準 (V)
光度 (cd)	質量 (kg)	時間 (s)
特異電力管線放射計受光器分	キログラム原器	原子束方式セシウム原子振動標準
温度 (K)	水の三重点セル	



計量標準は世界共通
計量標準部門HPより



AIST 太陽電池技術開発

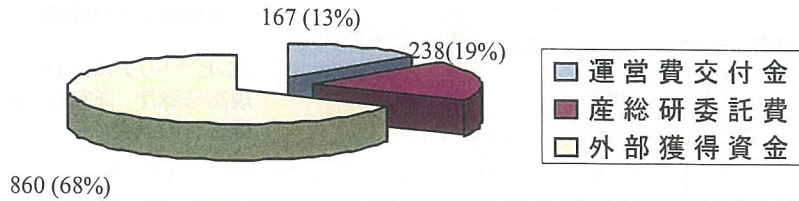
太陽電池の種類	現状	目標変換効率(%)		
		2010年	2020年	2030年
多結晶シリコン太陽電池	13~14.8 (18.4)	16(20)	19(25)	22(25)
薄膜シリコン太陽電池	10 (14.7)	12(15)	14(18)	18(20)
CIS系太陽電池	10~12 (18.9)	13(19)	18(25)	22(25)
超高効率太陽電池	集光 (38.9)	28(40)	35(45)	40(50)
色素増感太陽電池	(10.5)	6(10)	10(15)	15(18)

環境性能を考慮した技術開発の必要性

独立行政法人 産業技術総合研究所 12

センターの運営(予算)

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、特許収入など

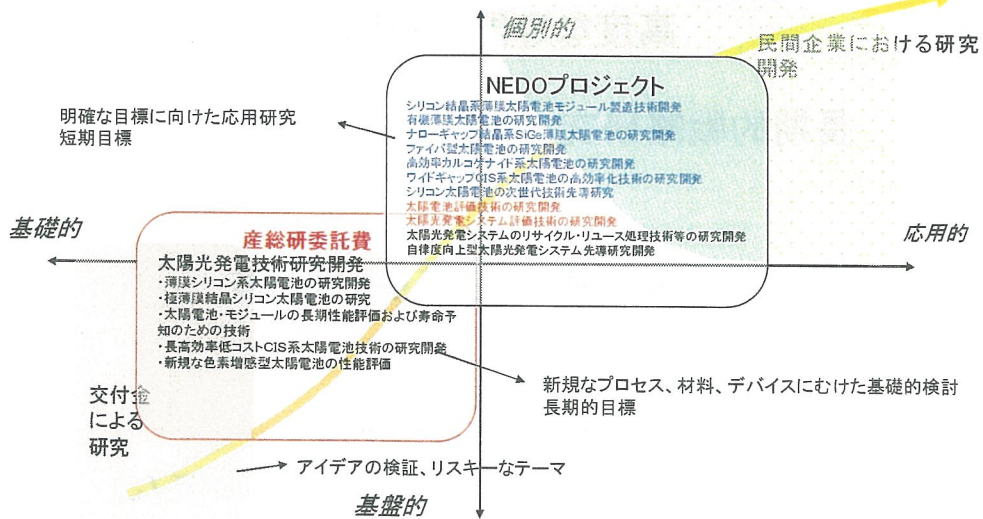


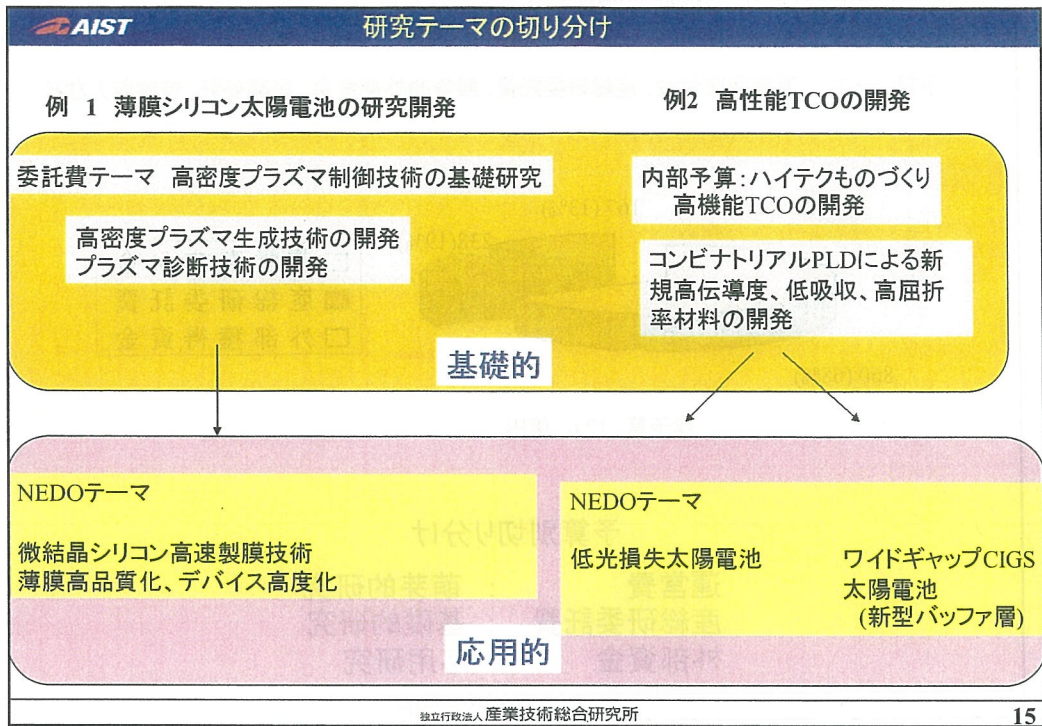
総予算 12.6 億円

予算別切り分け

- 運営費 : 萌芽的研究
- 産総研委託費 : 基礎的研究
- 外部資金 : 応用研究

太陽光発電研究における交付金、産総研委託費、NEDOプロジェクトの関係





AIST 産総研太陽光センターの特質

産業技術を基礎的基盤的に支える
高度な専門家集団

長期的戦略研究 (流行に左右されない)

専門家育成 (企業並み設備)

コンピタンスセンター
(高度なノウハウを共有するコンソーシアム)

独立行政法人 産業技術総合研究所

16

発表論文	56	報
口頭発表	77	件
招待講演	27	件
特許出願	10	件
見学対応	37	件
取材	23	件
プレス発表	4	件
TV報道	2	件
受賞	4	件
基準電池校正	18	件
依頼測定	14	件

各テーマごとの成果は別紙参照

(注) 本データは昨年度ユニット評価資料に基づく。有機薄膜チーム分、産業化戦略チーム分は含まれていない

職員の評価	<p>短期評価 年度ごと 業績手当てに反映 50% ~ 500% まで (年間50万円~100万円程度) ユニット長の裁量で決定</p> <p>長期評価 (1~5級) 昇級 分野別、ユニット推薦、専門委員が評価</p>
	<p>評価軸 :</p> <ul style="list-style-type: none"> 論文、国際会議抄録、著書、報告書 学会発表、招待講演、依頼講演 規格策定 校正業務、評価業務 調査活動、国際貢献、政策提言

薄膜太陽電池試作ライン(30cm角)

結晶シリコン太陽電池試作ライン(15cm角)

薄膜太陽電池で効率20%超を目標

フレキシブル基板開発(横断的基盤技術)

高性能TCO開発

高精度評価技術開発



2005年7月14日

産総研・太陽光発電研究センター 成果報告会

結晶シリコンチーム成果報告

結晶シリコンチーム

・構成メンバー 9名

職員4名、テクニカルスタッフ2名、JSPS外国人特別研究員1名、
学生1名、秘書

・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、極薄膜結晶シリコン太陽電池
積層デバイスの研究開発

・予算

経済産業省 委託費
NEDO先導研究
運営交付金

極薄膜結晶シリコン太陽電池

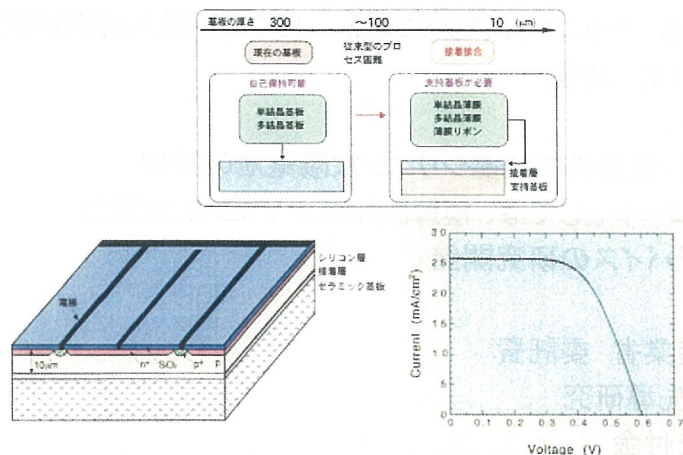
早い時期から着目、系統的な研究開発を展開

主な成果

- ・光閉じ込め型薄膜シリコン太陽電池
- ・接着接合による薄膜結晶シリコン太陽電池の開発
- ・低温エピタキシャル接合(エミッタ)形成技術
- ・低温Back-Surface-Field(BSF)技術
- ・結晶品質評価手法(単色光ビーム誘起電流法、
顕微量子効率測定法 等)の開発
- ・キャリア寿命測定技術(表面不活性化処理)
- ・化合物半導体薄膜ヘテロエピタキシャル成長技術

接着接合技術

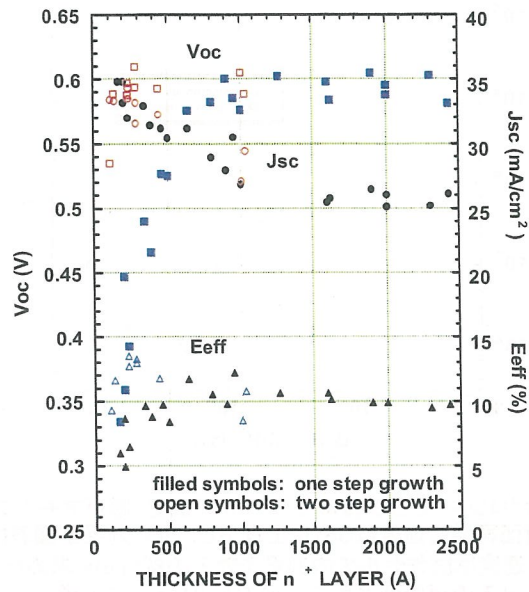
- ・厚さ $10\mu\text{m}$ の単結晶シリコン太陽電池を作製。
- ・単結晶シリコン薄膜はSOIウエハから転写。
- ・電流－電圧特性(開放電圧 602mV 、短絡電流 $25.8\text{mA}/\text{cm}^2$ 、変換効率 9.6%)
- ・開放電圧は結晶の品質や表面の影響を受けやすいが、厚さ $10\mu\text{m}$ という薄膜結晶シリコン太陽電池においても高い開放電圧を得ることができた。



低温エピタキシャル接合による結晶Si太陽電池

- ・熱歪みを最小にするため低温薄膜堆積法で接合形成
- ・p型結晶シリコン基板上へのプラズマCVD法によるリンドープ n^+ エミッター層の形成
- ・2段階成長法が高品質膜実現に有効
 - 低温堆積初期の結晶核形成過程制御
- ・低温(200°C)エピタキシャル接合セル試作
 - 効率 13.54% 作成条件や太陽電池構造の最適化を行っていない初期的な結果
- ・室温接合形成の可能性も見いだした
 - 単結晶Si基板上に室温でシリコン薄膜をエピタキシャル成長
 - セル製造時間の大幅な短縮
 - 太陽電池試作に着手

2段階成長法と1段階成長法の比較



低温Back-Surface-Field(BSF)技術

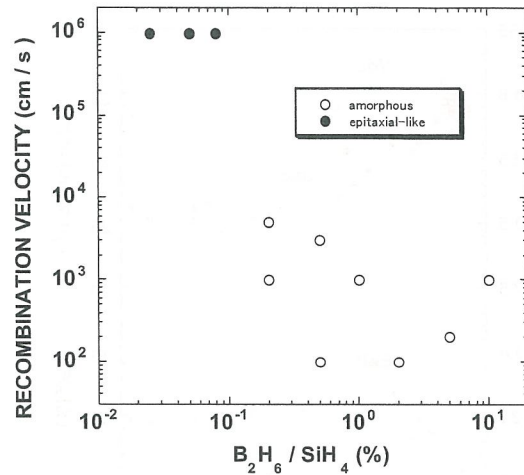
Back-Surface-Field(BSF) :

- ・裏面における少数キャリア再結合の低減
- ・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で再結合速度を低減
- ・p型シリコン基板に適用できる手法

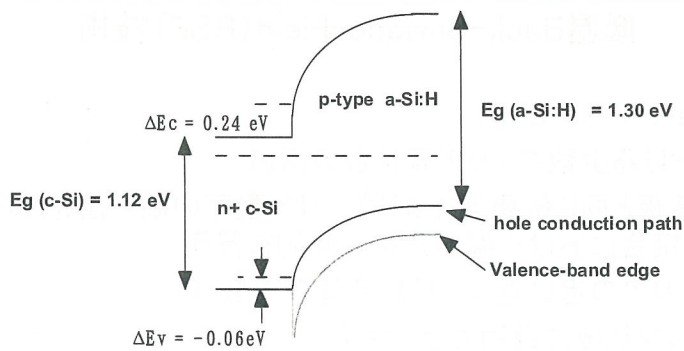
低温: 200°C以下

- ・プロセスにおける熱歪み発生を避ける
- ・薄型ウエファへの適用
- ・RFプラズマCVD法でp型シリコン基板の背面にp⁺層を形成
- ・原料ガス: シラン、水素、ジボラン
- ・ガス比: $H_2 / SiH_4 = 60$, $B_2H_6 / SiH_4 = 0.025 - 10 \%$
- ・p⁺層膜厚: 40nm

裏面 (p/p⁺界面) の再結合速度とガスドーピング濃度



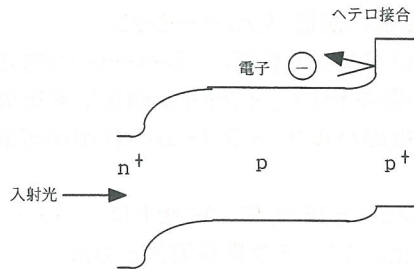
- ・ガス中でのボロドーピング濃度が0.1%以上で、膜がアモルファス構造になると背面再結合速度は3桁以上低下し、BSF効果が顕著になる
- ・背面再結合速度は試作セルの内部量子効率の解析から求めた
- ・100cm/s以下の再結合速度を200℃のプロセスで実現



内部光電子放出法で決定したB-doped a-Si:H/結晶シリコン接合のバンド図

- ・ ΔE_v が小さい理由:
 ボロドーピングに伴う結合水素量の低下
 B-doped a-Si:HのValence-band tailに存在する hopping conduction pathをIPEで観測していると解釈
- ・ $\Delta E_c = 0.24 \text{ eV}$
 従来の理論はB-doped a-Si:H / c-Si界面を想定していないので、理論との比較は難しい
 太陽電池特性とは矛盾しない

n⁺ (c-Si) / p (c-Si) / p⁺ (a-Si:H) 太陽電池



n⁺ 結晶シリコン / p型結晶シリコン/ボロンドープp型シリコン太陽電池で確認されている、裏面p型層をa-Si:Hにしたときの裏面再結合速度の低減の1つの理由は、**ヘテロ接合での電子のブロッキング**

低温BSF技術まとめ

1. n⁺ 結晶シリコン / p型結晶シリコン/ボロンドープp型シリコン薄膜太陽電池

ボロンドープ量を増やすと(境界はB₂H₆ / SiH₄比 = 0.1% 付近)

- ・裏面側のp型シリコン薄膜がエピタキシャル成長からアモルファスになる (TEM観察・分光エリプソメトリーの結果)
- ・裏面の界面再結合速度が10⁶ cm/sから10³ cm/s 以下に低下する (BSF効果が有効となる)

2. 裏面p型層をa-Si:Hにしたときの裏面再結合速度が低減する理由1

ボロンドープp型a-Si:H/ c-Siヘテロ接合界面での電子のブロッキング:

価電子帯側のバンド不連続はきわめて小さく、バンド不連続は主に伝導帯側に現れる。

内部光電子放出 (internal photoemission: IPE) 法で確認

3. 裏面p型層をa-Si:Hにしたときの裏面再結合速度が低減する理由2

エピタキシャル層に高密度に存在する欠陥が、アモルファス層は構造が柔軟で、また水素で不活性化されるため、密度が低減される(ATR-FTIRで確認)。

キャリア寿命測定技術(表面不活性化処理)

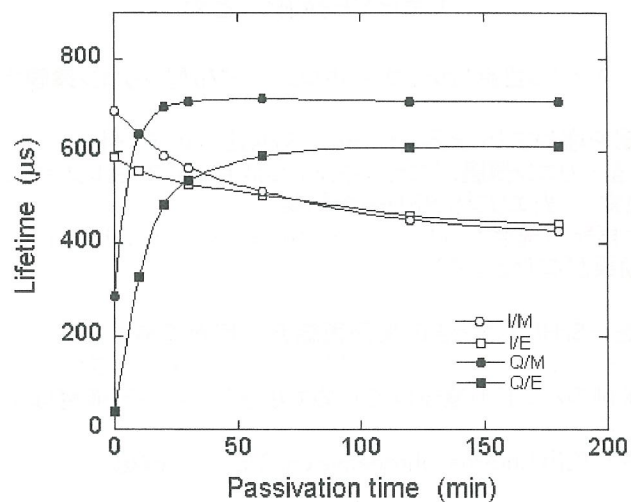
溶液を用いたシリコン基板の表面パッシベーション

- ・熱処理工程がない室温での表面パッシベーション方法
- ・シリコン基板の少数キャリアライフタイム測定に不可欠
- ・特に、シリコン基板のバルクライフタイムの評価が可能

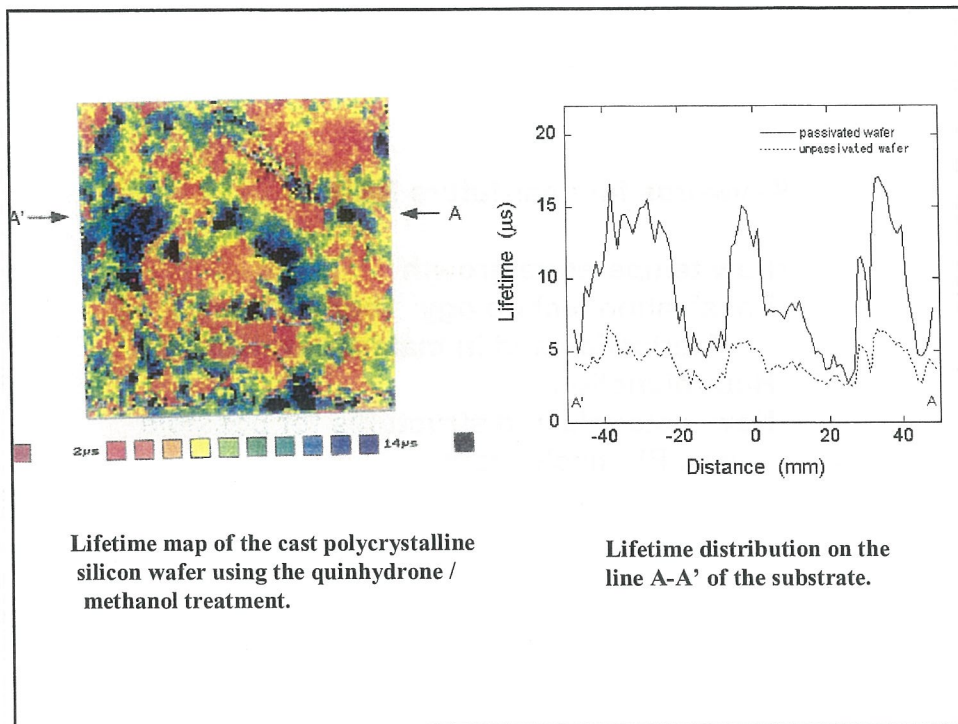
新しい表面パッシベーション方法として、キンヒドロン/メタノール溶液法を提案

- ・測定中の経時変化がない ヨウ素系溶液との違い
測定誤差の大幅な低減 マッピングに有利
- ・ヨウ素系溶液より有効な表面不活性化を実現
- ・光照射効果 安定化時間の短縮 表面再結合速度の一層の低減

表面不活性化のメカニズム



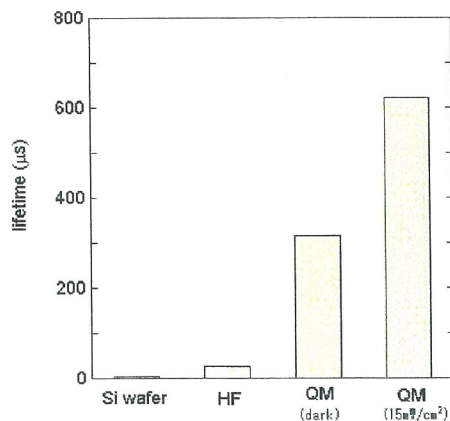
Surface passivation effect due to the quinihydrone/alcohol treatment or the iodine/alcohol treatment. 0.01 mol/dm^3 quinihydrone / alcohol solution and 0.09 mol/dm^3 iodine / alcohol solution were used. I, Q, M and E represent iodine, quinihydrone, methanol and ethanol, respectively.



光照射による表面パッシベーション効果

各種基板処理によるライフタイムの変化

1. Si 基板(無処理、(Si wafer))
2. 5% HF処理 (HF)
3. 0.01Mキンヒドロン溶液処理 (QM dark)
4. 3の基板に**光照射**
ハロゲンランプ、5分 (QM 15mw/cm²)



従来提案したキンヒドロン溶液処理に光照射を行うことで、シリコン表面のパッシベーション効果を短時間で、さらに大きくすることができた。

ライフタイム測定のための前処理方法として有効である。

Keywords for near-future R&D:

- **Low temperature growth**
- **Passivation technology (both in device fabrication and in material evaluation)**
- **Heterojunction**
- **New materials and structures for possible new PV mechanism**

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター シリコン新材料チーム 成果報告

概略

- 1) a-Si:H太陽電池の光劣化抑制
- 2) $\mu\text{c-Si:H}$ 太陽電池の高速製膜技術
- 3) タンデム型太陽電池の作製技術
- 4) 透明導電膜の開発
- 5) 実時間測定技術によるプロセス制御

シリコン新材料チーム 研究テーマ

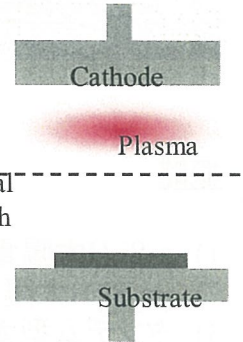
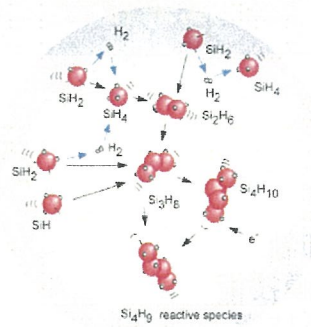
- 1) a-Si:H太陽電池の光劣化抑制
 - ・トライオード成膜法による低光劣化a-Si:H太陽電池の作製
- 2) $\mu\text{c-Si:H}$ 太陽電池の高速製膜技術
 - ・高圧枯渇法による $\mu\text{c-Si:H}$ 太陽電池の高速形成
 - ・マルチホローカソードによる $\mu\text{c-Si:H}$ の高速形成
- 3) タンデム型太陽電池の作製技術
 - ・ $\mu\text{c-SiGe}$ 太陽電池の開発
- 4) 透明導電膜の開発
 - ・ TiO_2 反射防止膜を用いた太陽電池構造
 - ・新規材料の光学データベースの構築
- 5) 実時間測定技術によるプロセス制御
 - ・分光エリプソメトリーによる実時間プロセス制御
 - ・キャビティーリングダウン法によるシランラジカルの定量評価

a-Si:H太陽電池の光劣化抑制

光照射によりa-Si:H i層内に欠陥が生成し、太陽電池のFFが大きく低下

・高次シラン生成

トライオード法

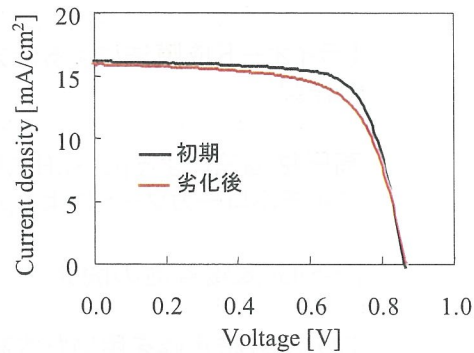
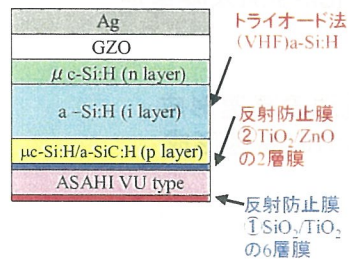


シランプラズマ中で形成した高次シランがa-Si:Hに取り込まれ光劣化を引き起こす

アノードとカソード間に金属メッシュ電極を挿入し、プラズマを空間的に閉じ込める。

トライオード法による低劣化a-Si:H太陽電池の作製

p-i-n型a-Si:H太陽電池



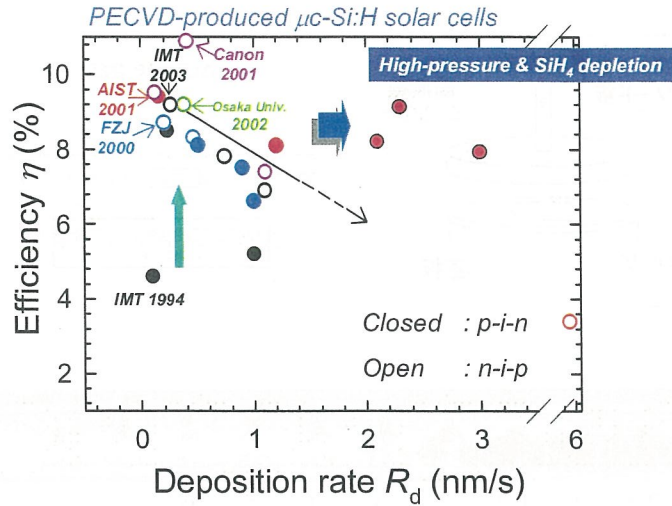
シングルセル特性(劣化後)

$J_{sc}=15.4 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=0.90 \text{ V}$, $FF=0.673$, $Efficiency=9.32 \%$ (劣化率 13%)

タンデムセル特性(劣化後)

$J_{sc}=12.0 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=1.31 \text{ V}$, $FF=0.691$, $Efficiency=10.9 \%$ (劣化率 6.8%)

μc-Si:H太陽電池の高速製膜技術



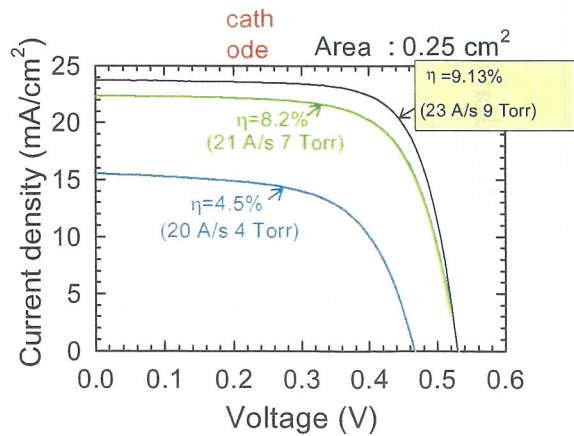
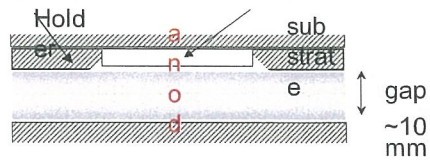
高圧枯渴法を提案し、2-3 nm/sの製膜速度で変換効率8-9%の太陽電池を作製できることを実証した。

高圧枯渴法によるμc-Si:H太陽電池の高速形成

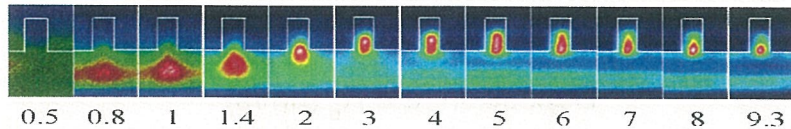
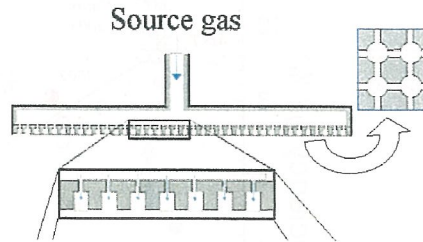
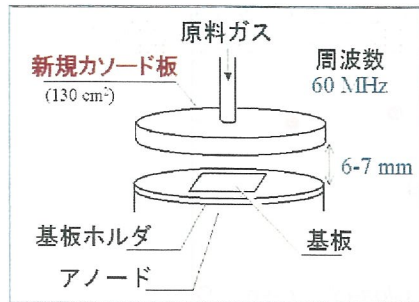
高圧枯渴法:
高圧力および高プラズマ出力により成膜を行う

イオン衝撃の抑制による
欠陥生成の低減

高圧枯渴法を用いることにより高圧条件(9 Torr)で成膜速度23 Å/sにおいて変換効率9.13%が得られることを実証

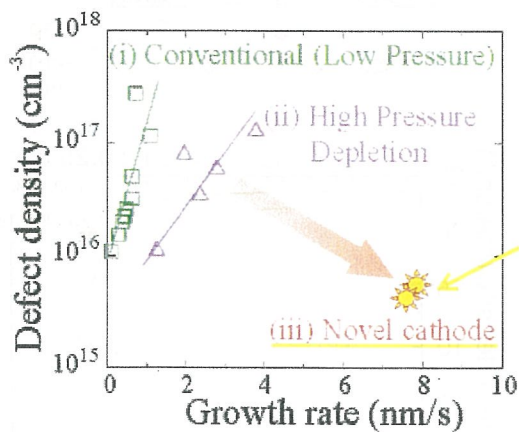


マルチホローカソードによる $\mu\text{c-Si:H}$ の高速形成



Spatial distribution of H_{α} optical emission for different gas pressures (Torr)

マルチホローカソードにより作製した $\mu\text{c-Si:H}$ の特性



- ・ SiH_4 枯渇の最適化
- ・高圧高密度プラズマからの熱的ダメージの軽減

高品質 $\mu\text{c-Si:H}$ 膜

$$N_s = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$R_d = 8 \text{ nm/s}$$

$$I_c/I_a = 3$$

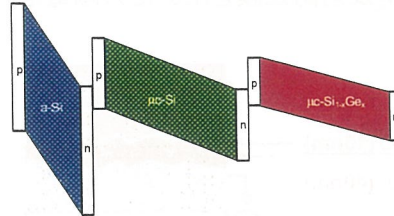
$$\sigma_{\text{photo}} / \sigma_{\text{dark}} = 10^1 - 10^2$$

高速作製に成功

タンデム型太陽電池の作製技術

太陽電池の高効率化

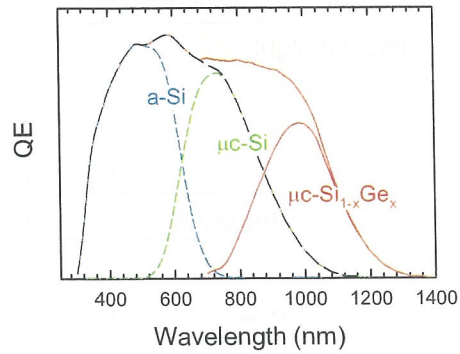
a-Si:H/ μ c-Si:H/ μ c-SiGe:H
トリプルタンデム型太陽電池



μ c-SiGe:H

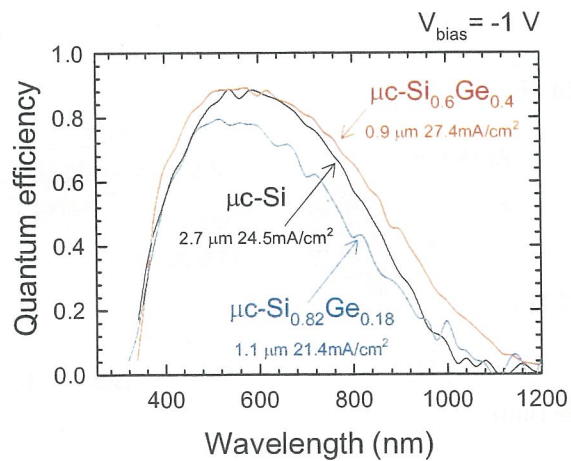
トリプルタンデム太陽電池の
ボトム層に適用

バンドギャップ制御により光
吸収波長領域の拡大



μ c-SiGe太陽電池の開発

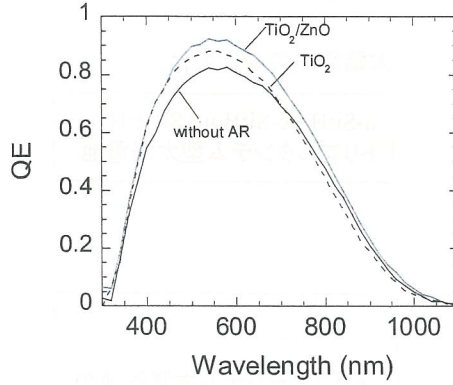
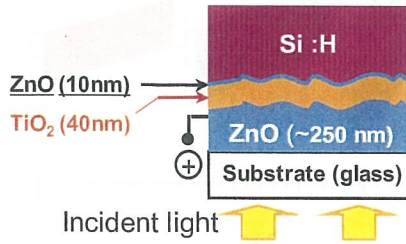
glass/TCO/AR(TiO₂/ZnO)/p μ c-Si / μ c-Si_{1-x}Ge_x / n μ c-Si / ZnO/Ag



40%Ge組成比、膜厚0.9 μ mの発電層をもつ微結晶SiGe太陽電池において
2.7 μ mの微結晶Si太陽電池の長波長感度を超えることが出来た。

透明導電膜の開発

TiO₂反射防止膜を用いた太陽電池

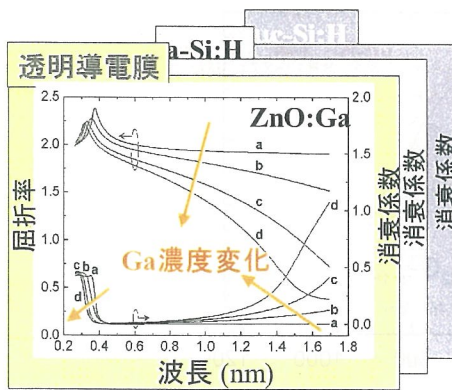


	J_{sc}	V_{oc}	FF	η
without AR	22.2	0.530	0.70	8.2
TiO ₂ /ZnO	23.7	0.528	0.73	9.1

短絡電流が6%以上向上

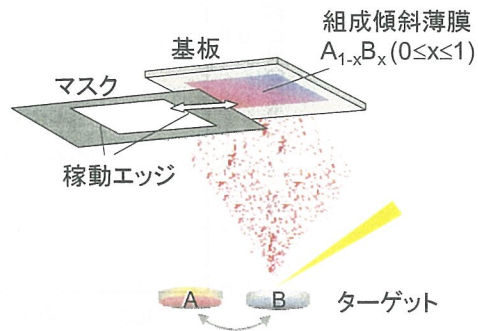
新規材料の光学データベースの構築

分光エリプソメトリー



光学損失の少ない太陽電池の設計

コンビナトリアル
パルスレーザー堆積法

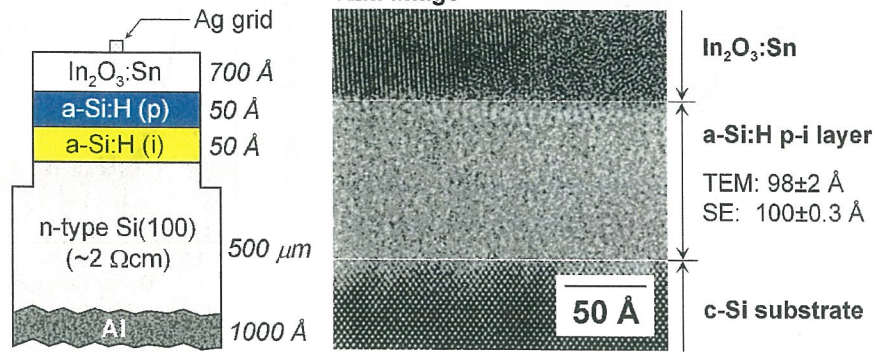


太陽電池に適した透明導電材料の高速探索

実時間測定技術によるプロセス制御

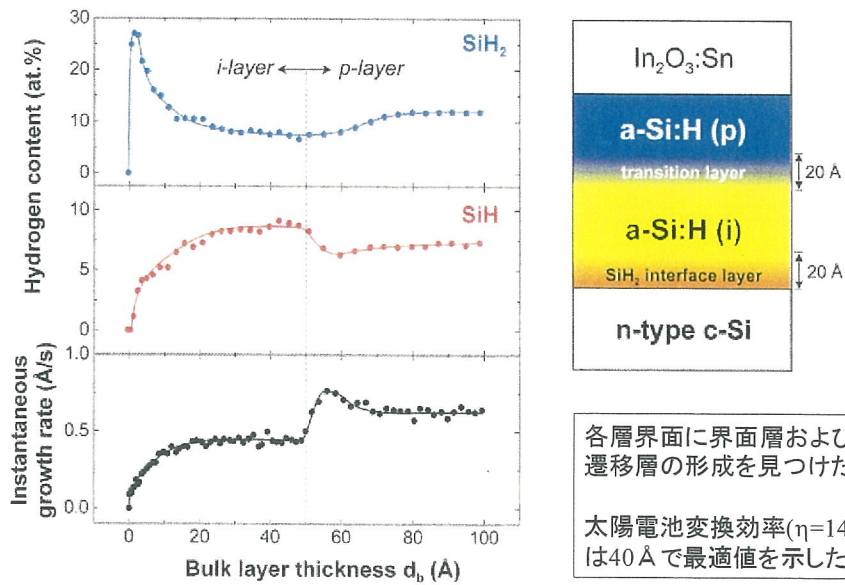
分光エリプソメトリーによる実時間プロセス制御

HIT型ヘテロ太陽電池



ヘテロ接合型太陽電池の実時間構造制御を分光エリプソメトリーから行い膜厚制御を非常に高い精度で行えることを実証した。

a-Si:H/c-Si太陽電池の界面構造評価

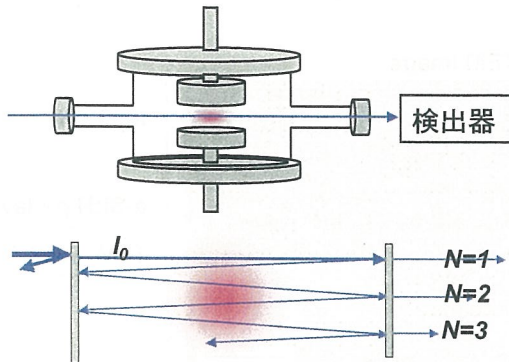


各層界面に界面層および遷移層の形成を見つけた。

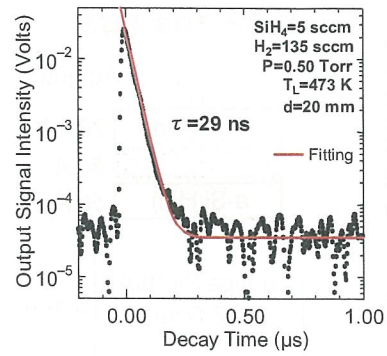
太陽電池変換効率($\eta=14.6\%$)は40Åで最適値を示した。

キャビティーリングダウン法によるシランラジカルの定量評価

キャビティーリングダウン法



パルス光をプラズマ中に照射し、シランラジカルの光吸収からラジカル濃度を評価



$$\rho = \sim 3 \times 10^{13} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$



化合物薄膜チーム - CIGS系太陽電池の開発 -

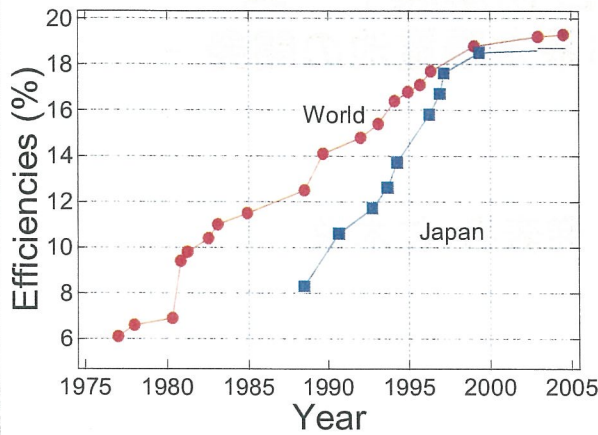
発表者: 仁木 栄



CIGS太陽電池の特徴

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

CIGS系太陽電池の効率の向上



2030年PVロードマップ目標

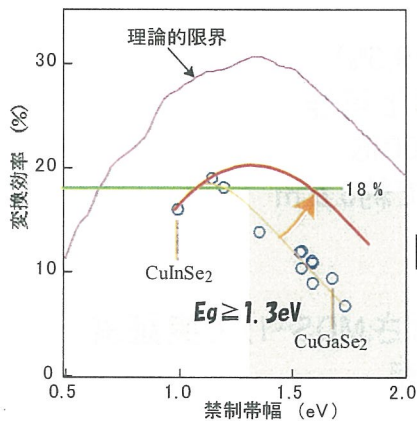
- cell 25%
- module 22%

技術の壁

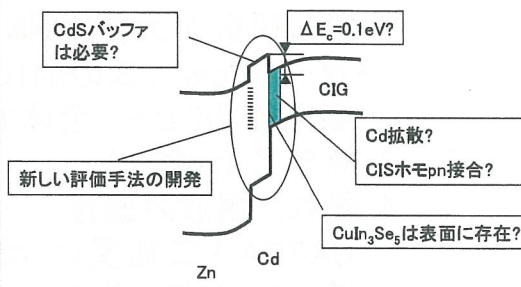
現在の変換効率

- cell 19.5%
- module 14.3%

CIGS太陽電池高効率化の課題



効率と禁制帯幅の関係

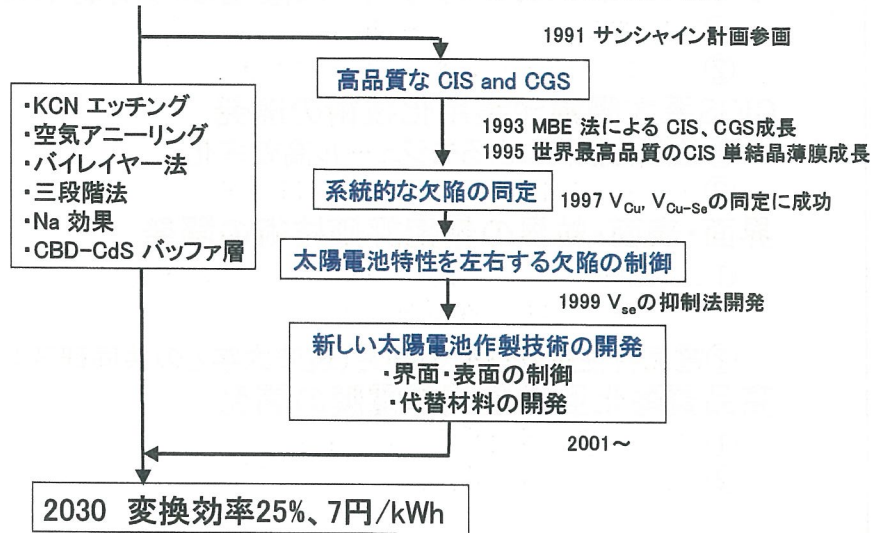


界面・表面の課題

産総研CIGS研究チームの経緯



従来技術ではなく、材料科学に基づく独自の太陽電池作製技術の開発



研究開発のスタンス



- ・ 2030年PVロードマップ開発目標の実現に資する
高効率・低コスト化技術の研究開発
- ・ 中長期的視野に立った研究開発の推進
- ・ オリジナリティーの高い独自技術の開発
- ・ 材料科学的アプローチによる技術指針の明確化
- ・ リスクの高い研究への取り組み

具体的な研究課題



ワイドギャップカルコゲナイド太陽電池の高効率化

- ①高開放電圧、高FFの実現
- ②新材料の開発(吸収層、バッファ層)

CIGS系太陽電池実用化技術の開発

- ①量産化技術によるモジュール高効率化
- ②フレキシブル基板上への太陽電池開発

界面・表面・粒界の精密評価技術の開発

- ①正・逆光電子分光法による評価技術の開発
(鹿児島大学との共同研究)
- ②電気特性評価技術の開発(筑波大学との共同研究)

高品質酸化亜鉛透明導電膜の開発

- ①酸化亜鉛透明導電膜の高機能化
- ②新規応用分野の開発

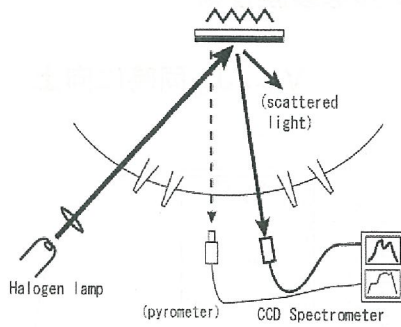
ワイドギャップカルコゲナイド太陽電池の 高効率化(石塚、櫻井)



1. 吸収層製膜の再現性の向上(H14)
 - ・放射温度計、光散乱分光法による成長その場観察技術
2. ワイドギャップCIGS太陽電池に最適なセルプロセスの開発(H15)
 - ・i-ZnO層の膜厚の最適化(変換効率16.9%)
3. 新しい吸収層の製膜技術の開発(H16)
 - ・水蒸気の同時照射による欠陥制御成長法
(変換効率18.1%)

NEDO革新的次世代太陽光発電システム技術研究開発「高効率カルコゲナイド系太陽電池の研究開発」

H14: CIGS製膜時の再現性・信頼性の向上 光散乱分光法と放射温度計による成長その場観察の開発

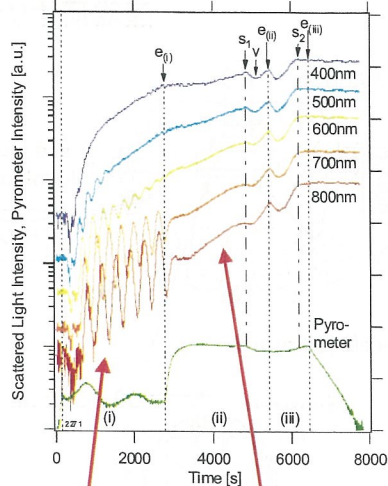


放射温度計を用いた手法

- ・膜厚
- ・組成

光散乱分光法放射温度計による新手法

- ・表面の平坦性や表面構造
- ・膜厚
- ・組成



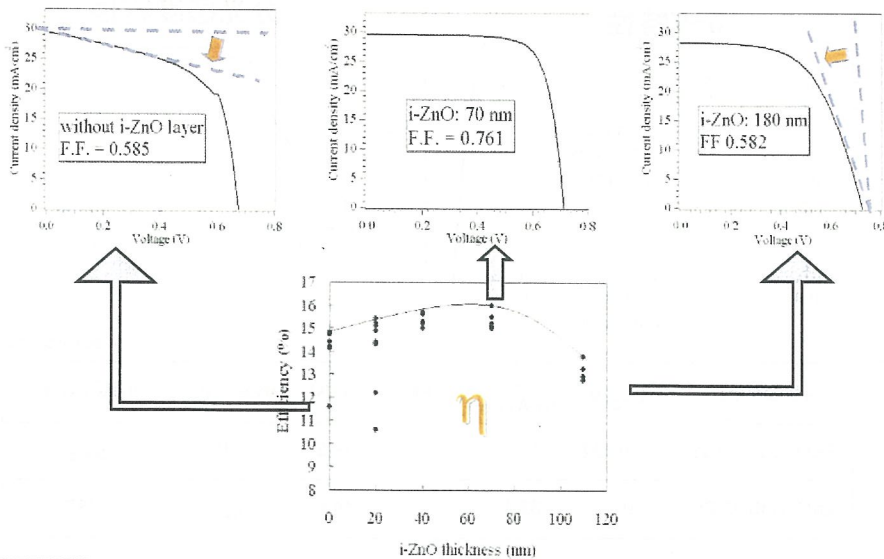
膜厚干渉

平坦性や表面構造の
大小を反映して強度が増減

H15: セルプロセスの見直しと高効率化の ための技術指針の検討 (変換効率16.9%)



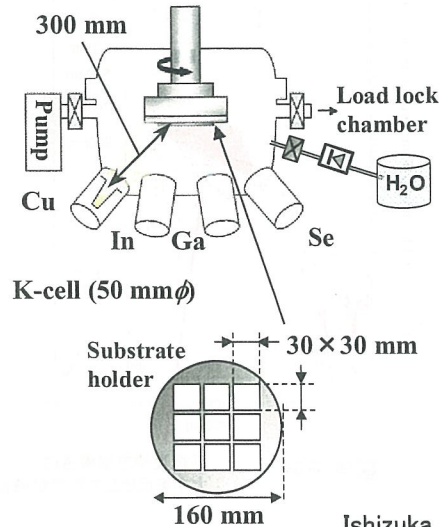
i-ZnOの膜厚の最適化



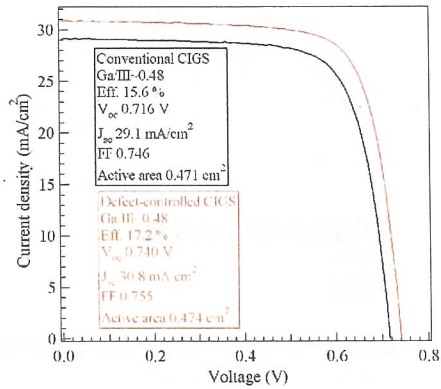
H16(1): 水蒸気を用いた新しい吸収層製膜法の開発



産総研オリジナルな製膜技術

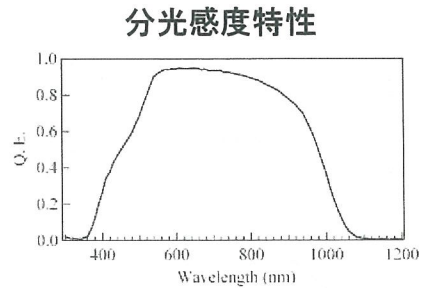
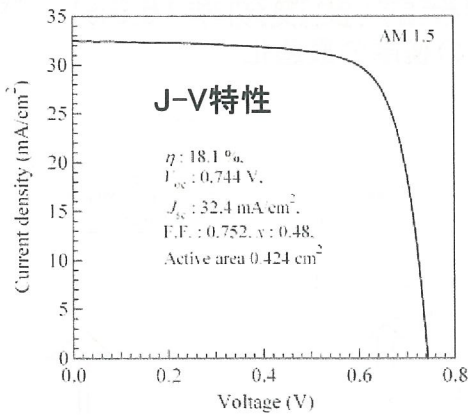


V_{OC} 、 J_{SC} 同時に向上



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

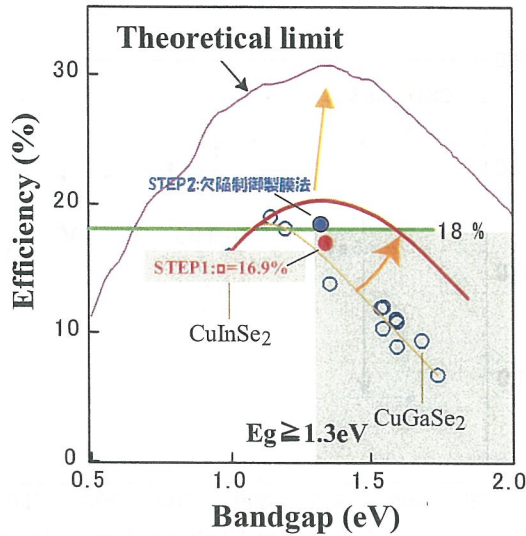
H16(2): 変換効率18.1%の太陽電池実現



*: active area

structure	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	area (cm ²)	institution
ZnO/CdS/CIGS	0.694	35.2	0.797	19.5	0.412	NREL
ZnO/CdS/CIGS	0.744	32.4	0.752	18.1*	0.424	AIST

AISTでの変換効率の向上



界面・表面・粒界の評価技術の開発



なぜ逆光電子分光法か？
伝導帯のエネルギーを独立に決定可能。

$$\Delta E_c = E_c(\text{CdS}) - E_c(\text{CIGS})$$

通常的手法

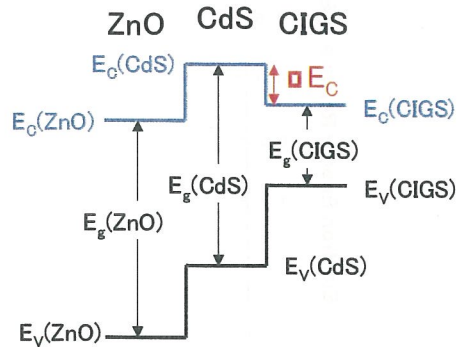
$$E_c(\text{CdS}) = E_v(\text{CdS}) + E_g(\text{CdS})$$

$$E_c(\text{CIGS}) = E_v(\text{CIGS}) + E_g(\text{CIGS})$$

CIGS、CdS、ZnOの禁制帯幅は文献値(バルク値)を仮定

逆光電子分光法

$E_c(\text{CdS}), E_c(\text{CIGS})$ は
実験的に決定可能



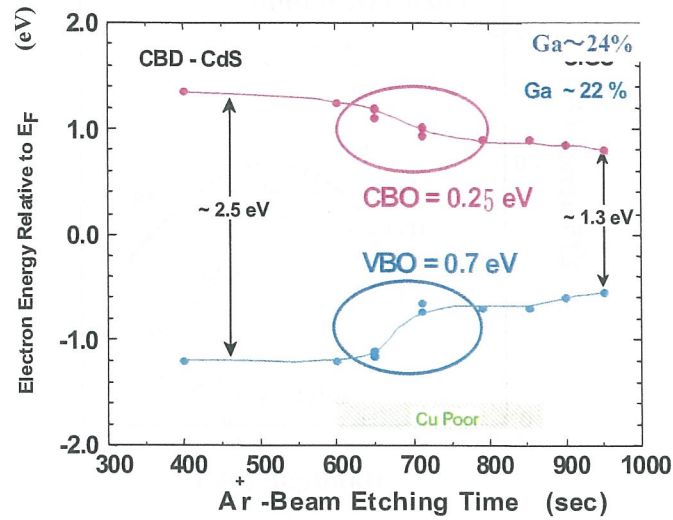
鹿児島大学との共同研究

Terada, et al., 招待講演 MRS Spring Meeting, March 29-April 1 (2005)

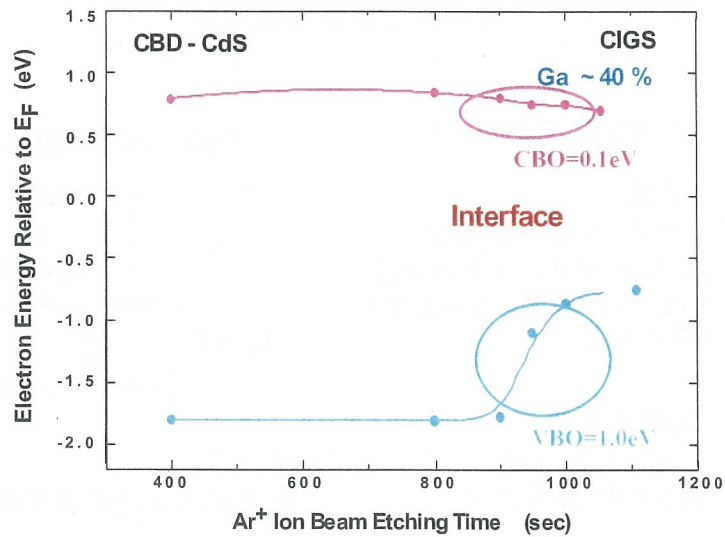
NEDO革新的次世代太陽光発電システム技術研究開発「高効率カルコゲナイド系太陽電池の研究開発」

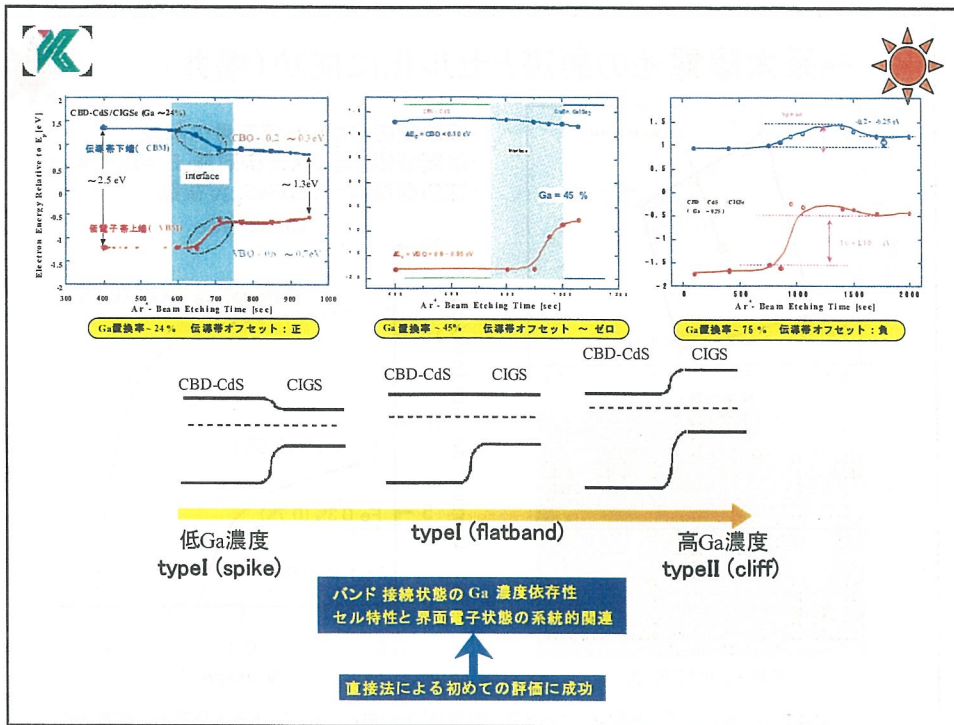


CBD-CdS/CIGS(Ga~24%)のバンド不連続



CdS/CIGS (Ga~40%) のバンド不連続





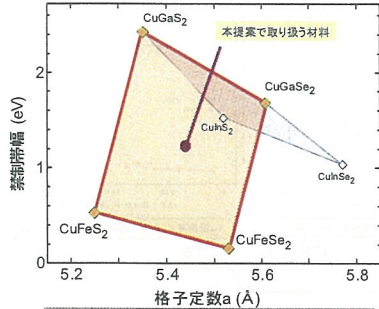
代替材料の開発

・Inの供給は？ 大丈夫！
(1GW生産時でIn10-30トン必要)

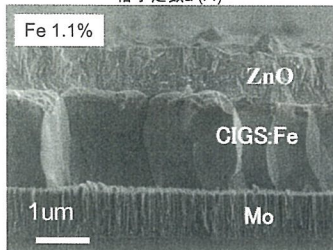
1998年 需要量270 ton
うち221 ton(82%)はTCO

- ・In使用量の低減 → 吸収層の薄膜化
高Ga濃度化
- ・Inフリー代替材料の開発

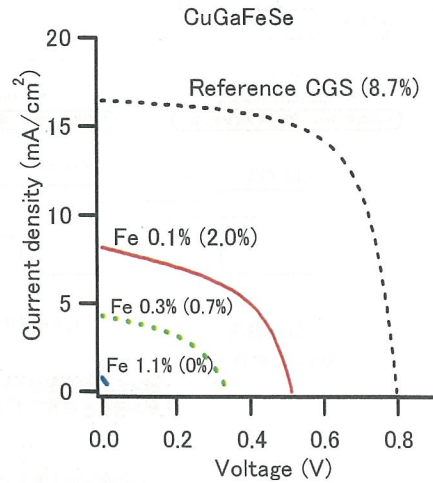
Fe系太陽電池の製膜とセル化に成功 (櫻井)



- ・資源量の少ないIn使用量の削減
- ・禁制帯幅を幅広く制御可能: $E_g = 0.2\text{--}2.4\text{eV}$
- ・結晶構造同一 (CuFeS₂:黄銅鉱)



大粒径化に成功



NEDO革新的次世代太陽光発電システム技術研究開発「高効率カルコゲナイド系太陽電池の研究開発」

酸化亜鉛透明導電膜の高性能化と高機能化



- ・ ZnMgO透明導電膜の製膜とCIGS太陽電池への応用 (松原)
- ・ ZnO半導体の電気伝導性の制御 (反保)
- ・ ZnO透明電極を用いたInGaN-LEDの発光効率2倍に向上 (ローム株式会社との共同研究)
- ・ RPD法による大面積化技術の開発 (高知工科大学、住友重機械工業との共同研究)

まとめ



1. 高効率化技術の開発

独自のプロセスを確立し、禁制帯幅1.3eV以上の太陽電池で変換効率18.1%を実現。

2. 界面・表面・粒界の制御技術の開発

Ga濃度 $x=24\%$ では伝導体の不連続は正であるが x の上昇に伴ってその値は減少し、 $x=40-50\%$ で0に、さらに x が増加すると負になることを実験的に初めて明らかにした。(鹿児島大学との共同研究)

3. ZnO透明導電膜の高機能化

・Al:Zn_{1-y}Mg_yO薄膜において、 $y \leq 0.17$ の範囲(禁制帯幅: $3.6\text{eV} \leq E_g \leq 4.0\text{eV}$ で抵抗率 $\rho \leq 1 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ 以下の透明導電膜を実現した。

将来の方向性



・2030年102GWの導入普及に向けて、核となる高効率化技術の開発に取り組む。

・産総研発の新しい高効率プロセス技術を世界に発信する。

・小面積だけではなく、大面積量産化技術における高効率化にも取り組む。

・InやGa等の希少金属の使用量の低減を目指して代替材料の開発を行う。

・産学官連携体制による効率の良い技術移転を図る。



評価・システムチーム(評価)

発表者:仁木栄

研究の目的、内容



目的:

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

研究内容:

- ・日本における太陽電池標準のトレーサビリティの確立と維持、さらにその高度化を図る。(猪狩、永井)
- ・国際比較を通してその測定技術に関する高い技術レベルを海外に示すことで太陽電池システムの輸出入の促進にも重要な貢献を行う。(菱川、猪狩)
- ・新型太陽電池の測定技術の確立や規格化においても中心的な役割を果たす。(菱川)
- ・長期寿命を保証するための加速劣化試験手法の開発やリサイクル手法に関する研究など、太陽電池のより広範な普及に欠かせない研究を遂行する。(土井、柳澤、小島)

トレーサビリティとは



「起源をたどれる」ことを意味し、

- ①製品実現の履歴を検証する手段
- ②科学技術データの信頼性を裏付ける有効な手段

として、その確保が重要視されている

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

計測・校正のトレーサビリティの定義と要求事項



計測のトレーサビリティ

JIS Z 8103「計測用語」、VIM(国際計量基本用語集)の定義

不確かさが全て表記された、切れ目のない比較の連鎖によって、決められた基準に結びつけられ得る測定結果又は標準の値の性質。基準は通常、国家標準又は国際標準

校正のトレーサビリティ:

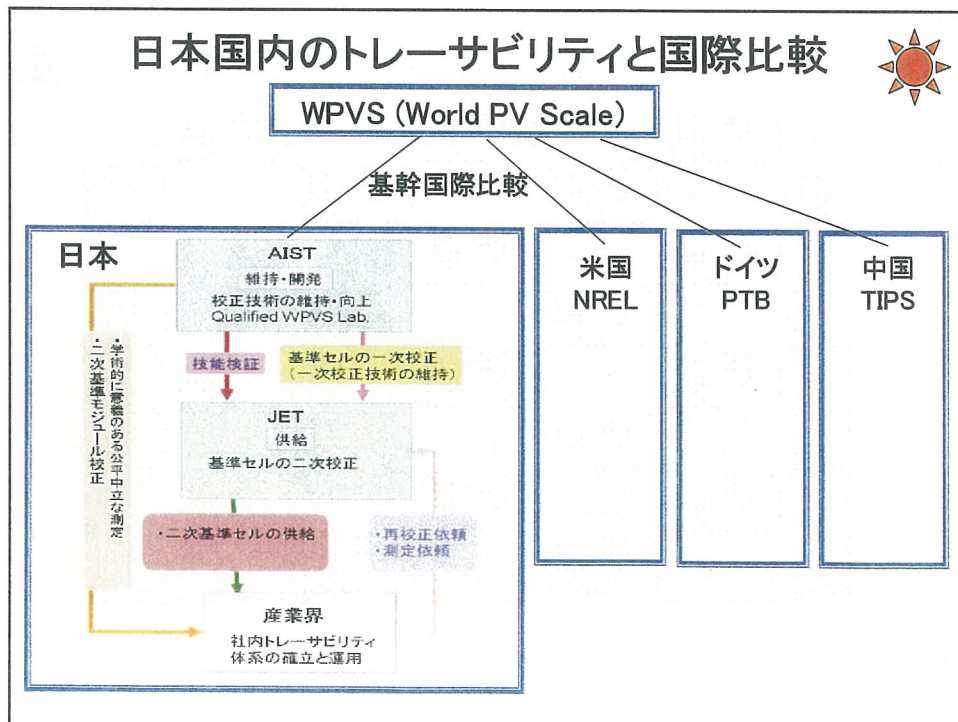
校正に使用した基準器が国家標準又は国際標準に至るまでの繋がりがトレースできること



校正及び国際比較の成果

- 1) Qualified Labとして基準電池の国際比較に参画し、性能評価に関する日本の高い技術レベルを示した。国際比較のホスト研究機関であるPTBと良い一致を得た。
- 2) 一次基準太陽電池の校正技術をJQAより移管し立ち上げ、校正を着実に実施した。(一次基準電池校正: 18件)

日本国内のトレーサビリティと国際比較



新型太陽電池モジュール評価技術



多接合、化合物系モジュール標準測定技術の開発

STCの評価は、屋内・外を問わず、世界的に困難

⇒日本における屋内評価法の技術蓄積を活用

繰り返し性・再現性・再生産性で世界的競争力

大面積高近似ソーラシミュレータの開発

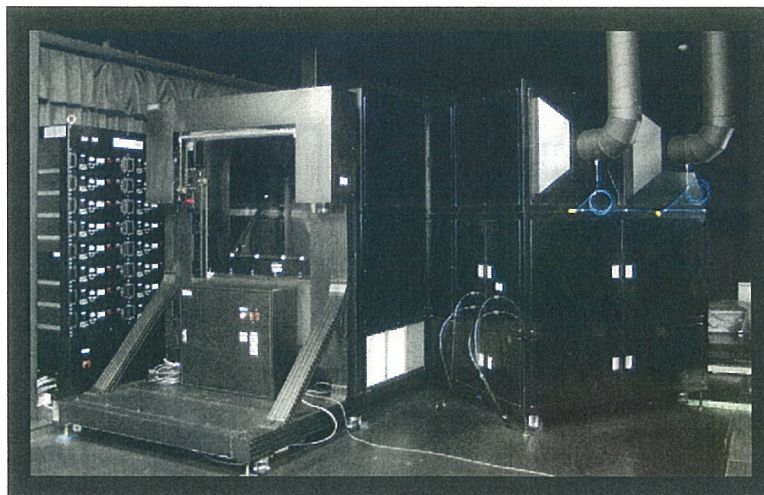
・近似波長範囲の拡大(1100nm⇒1300nm)

・AM1.5G基準太陽光への合致度向上

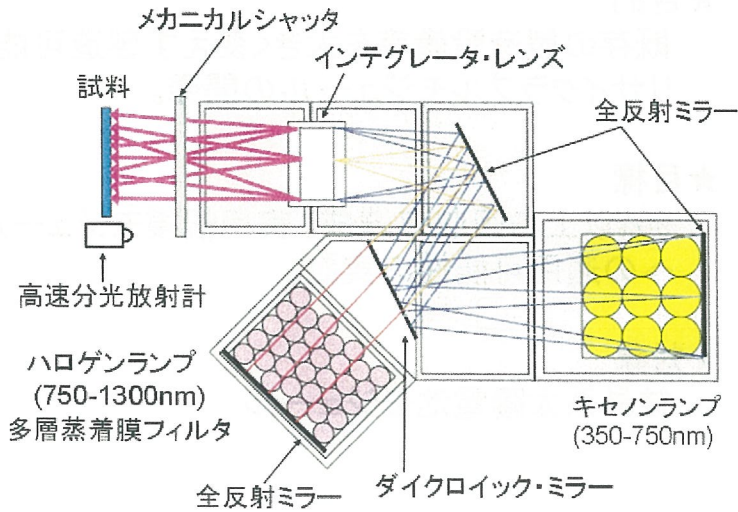
・モジュールレベル照射面積の実現(1.2m×1.0m)

STC: standard test condition 分光分布・温度・放射照度が規定
A.M.1.5G ・25°C ・1,000W/m²

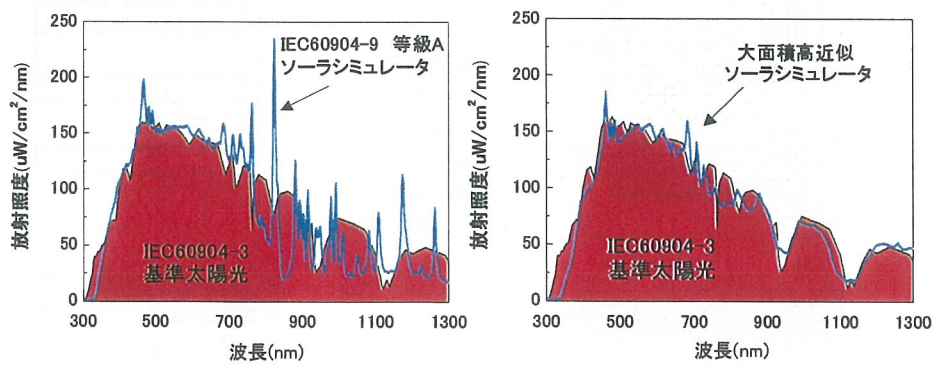
大面積高近似ソーラシミュレータ



大面積高近似ソーラシミュレータの模式図



大面積高近似ソーラシミュレータの特性



350-1300nmの広範囲で合致度向上(各種フィルタ開発)
1.2x1.0m²の有効面積で放射照度の場所ムラ±2%以内

リサイクル技術の開発



★目的

既存の製造設備等を大きく変えず製造可能な
リサイクラブルモジュールの開発。

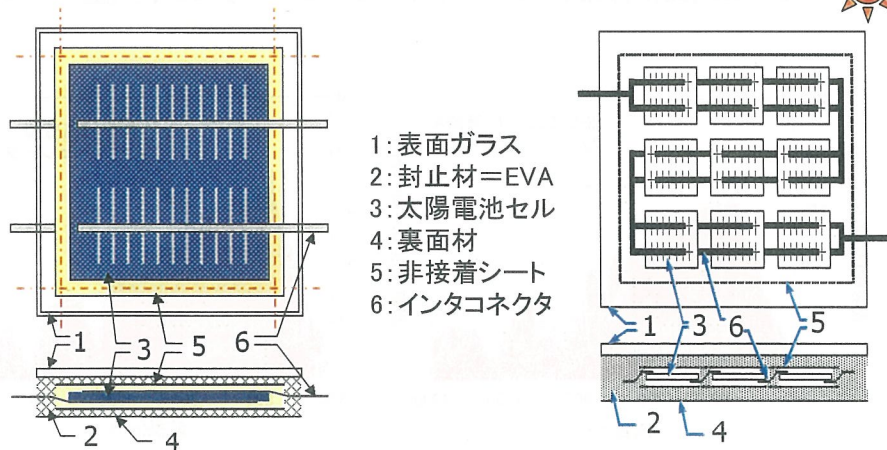
★目標

90%以上の回収率達成、実用規模モジュール
への適用可能性の実証。

★対象

結晶系太陽電池モジュール

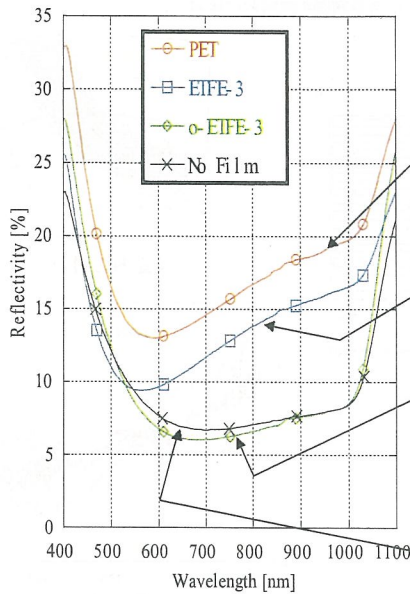
二重封止型モジュールの構成



太陽電池セルの両側に非接着シート製造時の工程増はわずか

回収時は裏面側から切り代を切削
→非接着シート間のセルを回収可

反射ロス低減効果



(1) 最初に原理確認したときのフィルム (2001)

対従来型比効率 -20%

(2) スクリーニングにより最適なフィルム (2002)

対従来型比効率 -10%

(3) オイル塗布による界面条件の改善 (2003)

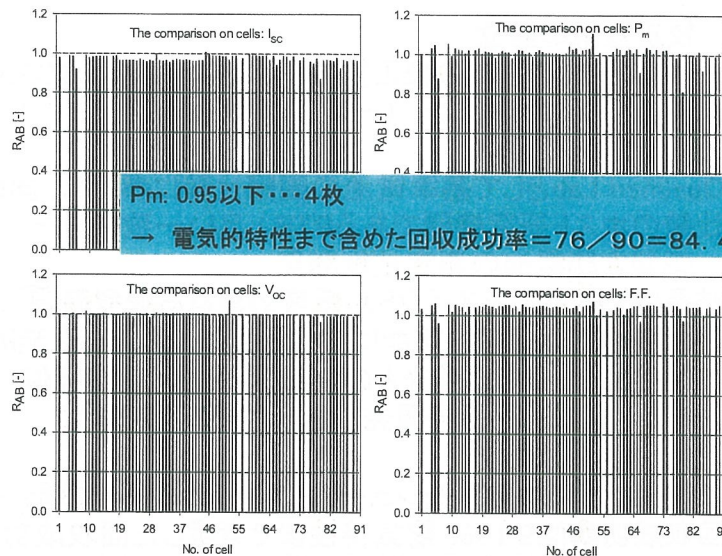
対従来型比効率 -7%

(4) スプレー塗布による界面条件の改善 (2004)

対従来型比効率 -2%

(0) 従来型 (フィルム無)

回収したセルの電気特性評価 (9直)

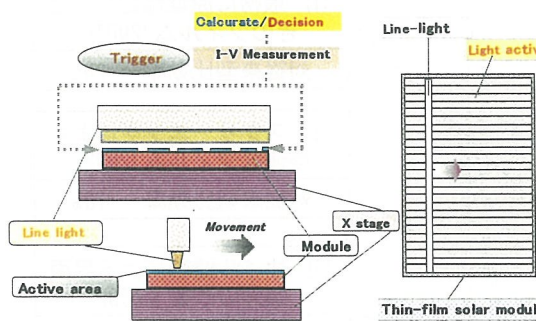


9直モジュール25枚からの物理的回収率は91%を確認

ライン光を用いた評価診断法と装置開発



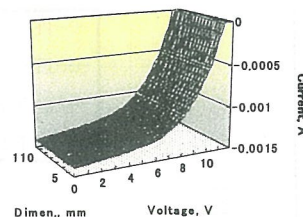
ライン光励起I-V測定から薄膜系集積モジュール性能の面内均一性や局部異常の検出手法を開発
自動化装置を試作 CIGSモジュールを対象とした適用事例を実験的に検証



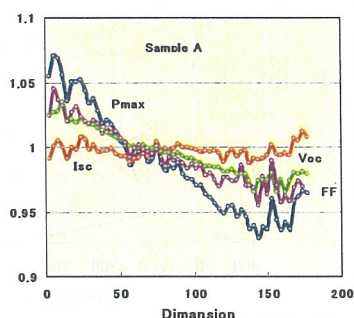
産総研特許を基に企業と共同開発

データベースの構築

- ・形状 — 欠陥の種類
- ・均一性 — 経年劣化



モジュール面内の性能均一性診断



まとめ



1. 校正技術の確立
一次基準太陽電池の校正技術をJQAより移管し立ち上げ、校正を着実に実施した。(一次基準電池校正:18件)
2. 国際比較
Qualified Labとして基準電池の国際比較に参画し、国際比較のホスト研究機関であるPTBと良い一致を得た。
3. 新型太陽電池の測定技術開発
結晶Si太陽電池とスペクトル感度の異なる新型薄膜太陽電池の高精度な評価を可能にするために、広い波長範囲(350-1300nm)で太陽光との合致度が高い超高近似ソーラーシュミレータを開発した。(依頼測定:14件)
4. リサイクル技術
二重封止型の9セルモジュールからのセル回収試験を行い回収成功率は91%、電気特性まで考慮した回収成功率は84%と高い回収率を実現した。

将来の方向性



1. 国内トレーサビリティの確立と国際比較
一次基準電池校正技術の維持と高度化を行う。また国際比較においても高い技術レベルを示す。(計量標準部門光標準グループと連携)
2. 新型太陽電池の測定技術開発
ソーラシミュレータの性能向上を図り、新型太陽電池の測定への要求に応える。
3. 国内・国際規格
研究成果を基に国内・国際規格への提案を積極的に行う。
4. リサイクル技術
成果を基に企業への技術移転を積極的に行う。

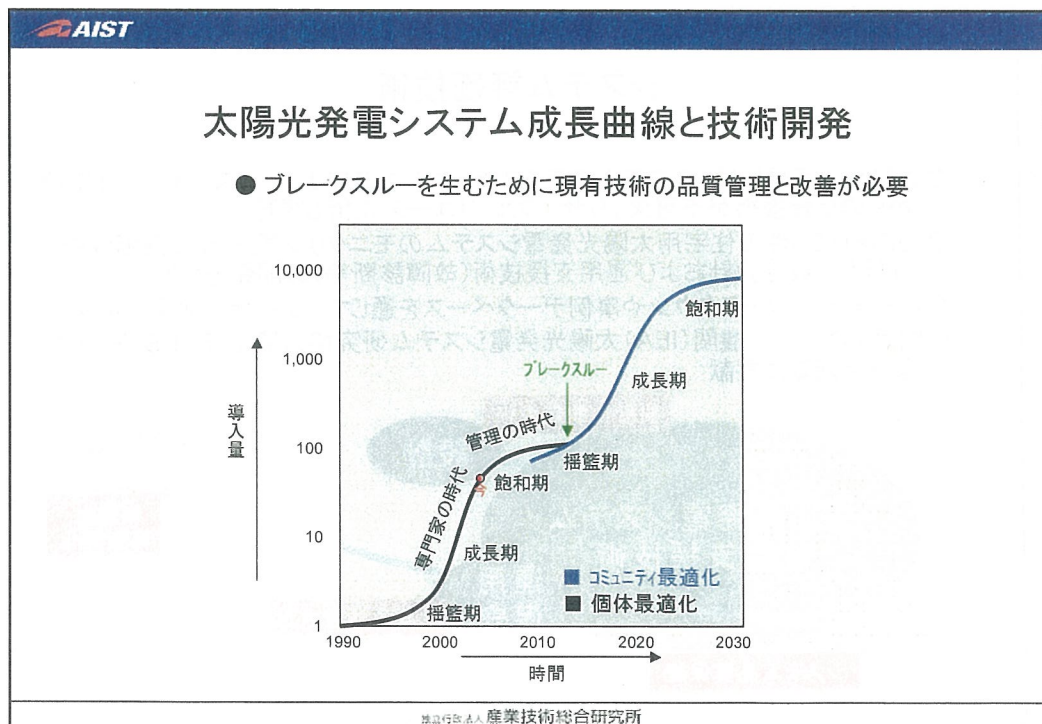
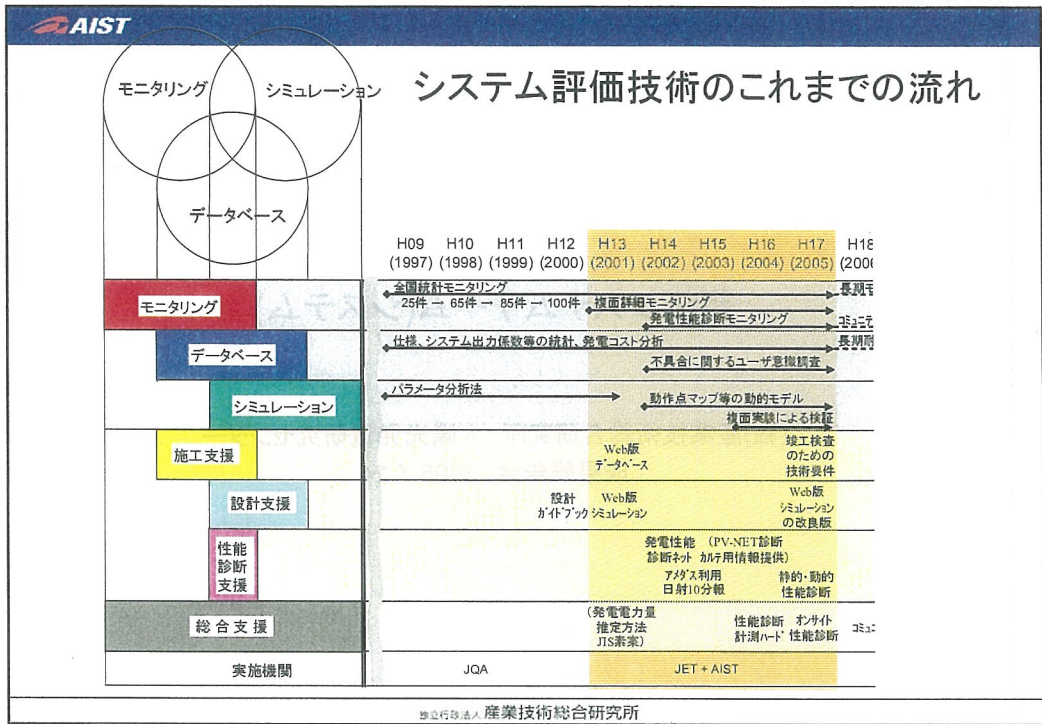
評価システムチーム(システム)

(独)産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター
 成果報告会 2005.7.14

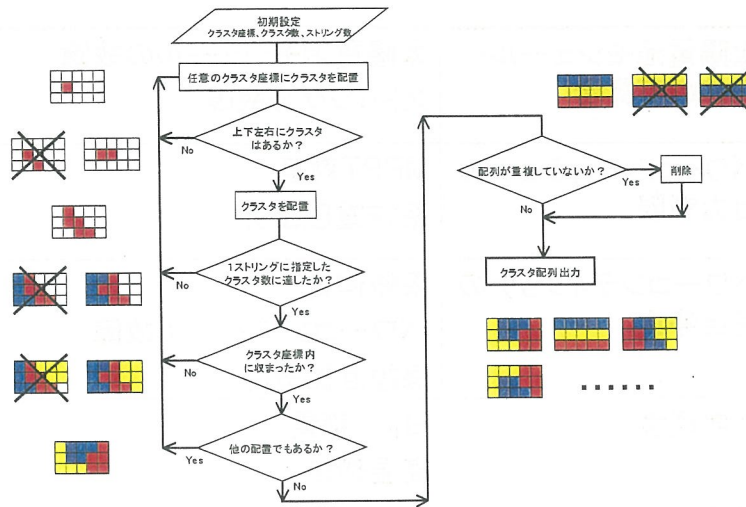
システム評価技術

- ◇大量導入実現には、システムのライフサイクル性能向上(=コスト低減)、利用者からの信頼獲得が不可欠。リサイクル・リユース技術も視野
- ◇国内約150件の住宅用太陽光発電システムのモニタリングを行い、運転性能の分析から最適設計および運用支援技術(故障診断等)の開発を実施
- ◇バーチャル・ソーラタウンや事例データベースを通じて、ユーザへ成果の情報発信
- ◇国際エネルギー機関(IEA)太陽光発電システム研究協力協定(PVPS)等の様々な国際活動に貢献



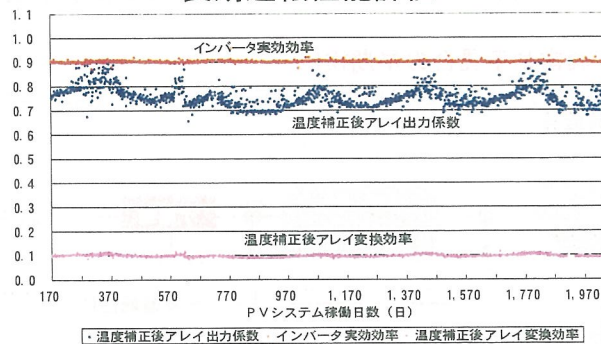


最適設計問題のモデル化(クラスタ法)



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性能低下要因(劣化) 長期運転性能評価



温度補正後アレイ出力係数、インバータ実効効率、
及び温度補正後アレイ変換効率の時系列分析の一例(ST003)

計測期間内(5年程度)での有意な出力低下は見られず。
気象変動や年変動要因の除去、異常値の補正等に課題。

独立行政法人 産業技術総合研究所

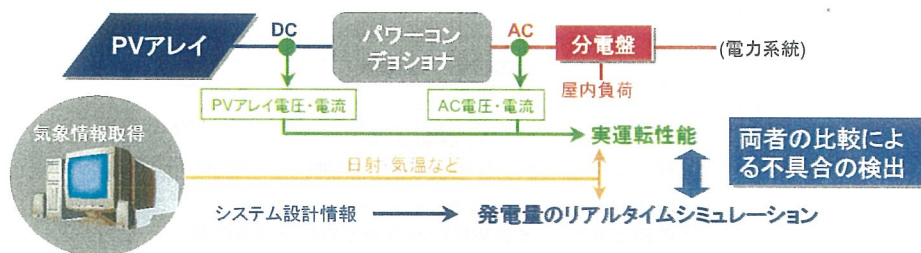
太陽光発電システムの性能低下要因(故障)

太陽電池モジュール・配線の不具合	太陽電池モジュールの故障 ストリングの故障
パワーコンディショナの出力制限	MPPT効率 系統電圧上昇
パワーコンディショナの完全停止	系統停電 パワーコンディショナ故障 保護回路故障
外部環境	日陰・積雪 高温環境

施工・運用期間中の不具合検出

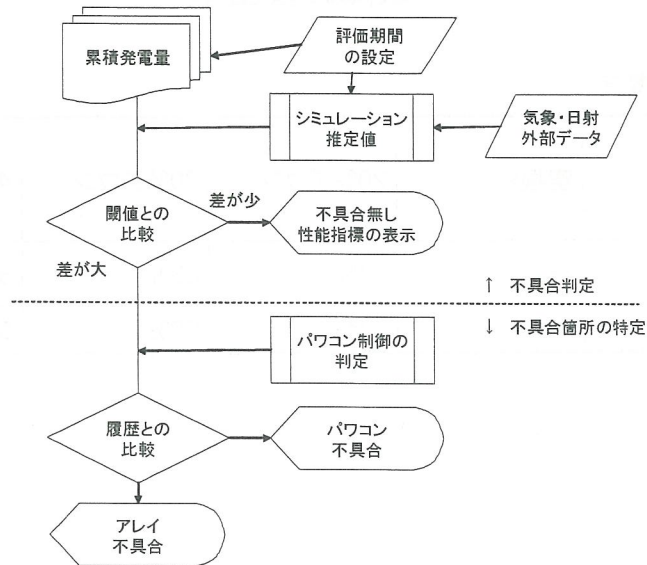
-静的・動的手法の組み合わせによる性能診断技術の開発-

- 静的診断: **異常や不具合の早期検出**
 - 最小限の運転データ計測とリアルタイムシミュレーションの組み合わせによるシステム運転状態の常時監視

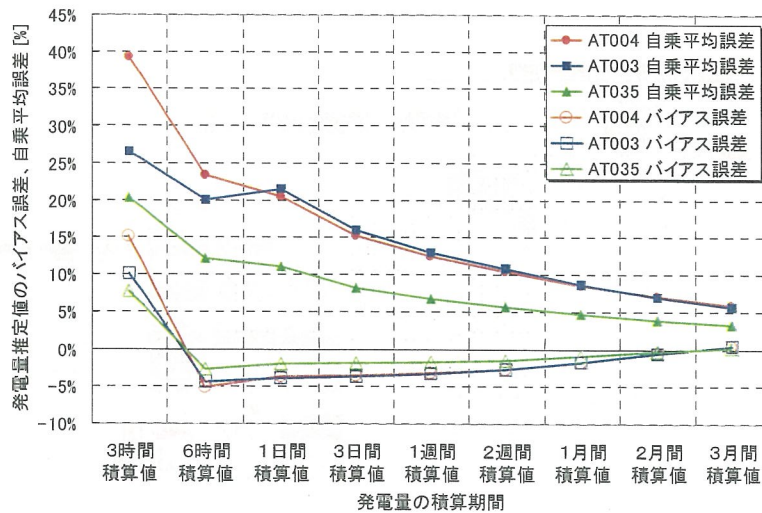


- 動的診断: **静的診断結果にもとづく発生箇所の特定**
 - 微小信号印加や等価回路推定などによるさまざまなアプローチ

静的診断技術のフローチャート



積算期間と推定誤差の関係



故障の検出率

※6時間積算値

故障判定の閾値	空振り	20%ダウン	30%ダウン	40%ダウン
σ	6%	67%	83%	83%
2σ	0.6%	27%	59%	59%

設計支援技術(シミュレーション)のWeb化

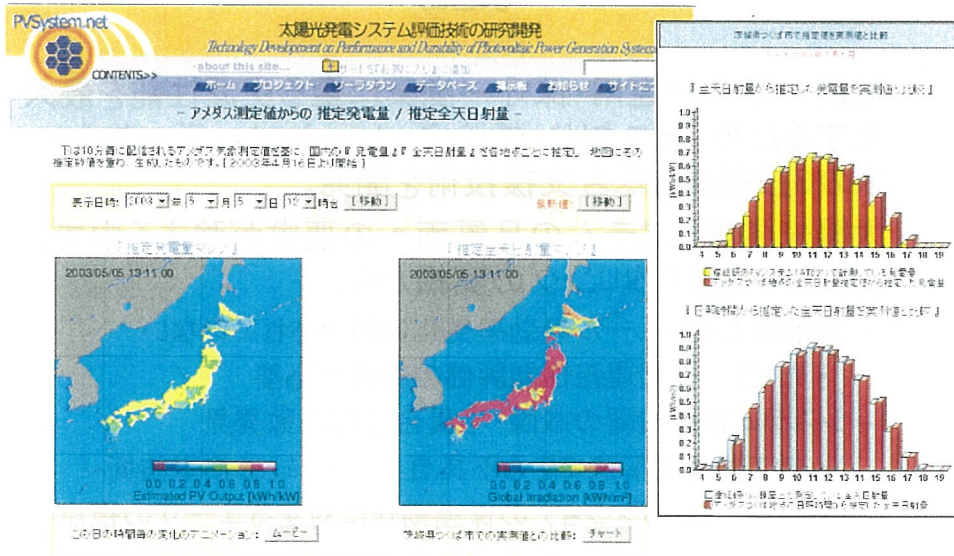
www.pvsystem.net

The screenshot displays the PVSystem.net web application interface. It features a navigation menu on the left with options like 'STEP 1' and 'CONTENTS'. The main content area includes a map of Japan, a grid of images showing solar panels and system components, and a bar chart at the bottom right. The website header and footer both identify the organization as the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).

全国PVシステムの広域リアルタイムモニタリング

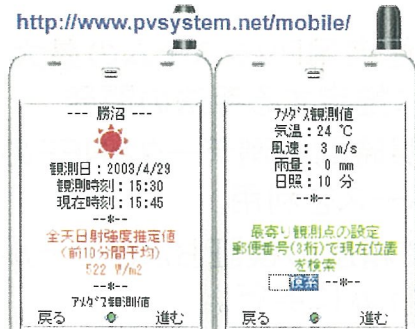
- 45万kW、10万件を越えた住宅用PVシステムの最大発電可能量をリアルタイムに推定する手法の開発
- 全国850地点のアメダス日照時間観測データとNEFの都道府県別導入量データベースを利用。
- 発電性能診断ネットワークで精度の検証およびモデルパラメータの更新をリアルタイムに実行。

全国発電量マップの例



ケータイ日射計

<http://www.pvsystem.net/mobile/>



- パワーコンディショナの前で発電量のチェックを可能とするPVSystem.netの携帯電話端末版。



独立行政法人 産業技術総合研究所

まとめ

- 設計→施工→運用・保守→廃棄に至る生涯性能を最大化するため、モニタリング・シミュレーション・データベースの3技術から総合支援技術を開発。
- 太陽光発電システムの品質面への要求が強まる中で、これまでのモニタリングの実績から、
 - 太陽電池モジュールの効率劣化は観測されていない
 - ただし、長期運転性能評価の継続が必要
 - システム構成機器の故障・不具合は相当数発見
 - 竣工検査で解決できる不具合多 → 竣工検査技術
 - パワーコンディショナの保護動作に対するユーザの視点

独立行政法人 産業技術総合研究所



平成17年7月14日

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 研究成果発表会



有機薄膜チーム

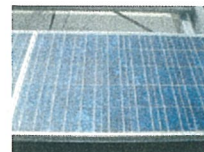
當摩 哲也, ○原 浩二郎, 齊藤 和裕



各種太陽電池のセル変換効率(AM1.5G)

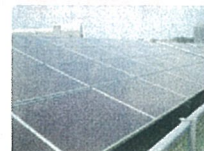
○ 無機半導体・p-n接合タイプ

結晶系・シリコン	18~24%
GaAs	26%
InP	20%
CuInGaSe (CIGS)	16%
アモルファス・シリコン	12%



○ 有機太陽電池

色素増感太陽電池	~11%
有機薄膜太陽電池	~4%



(実験室レベルの小セル)

 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
AIST

有機太陽電池の特徴

有機太陽電池の特徴

- 低コスト製造プロセスの可能性
- 軽量・柔軟性


新しい用途の可能性

New usage taking advantages of organic PV cell
Small and light-weight battery

Batteries for mobile phones and digital equipments.

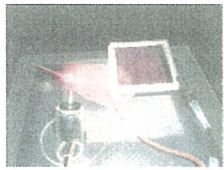
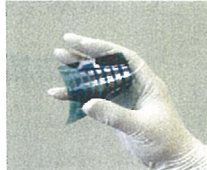
Colorful mobile and wearable solar cell!

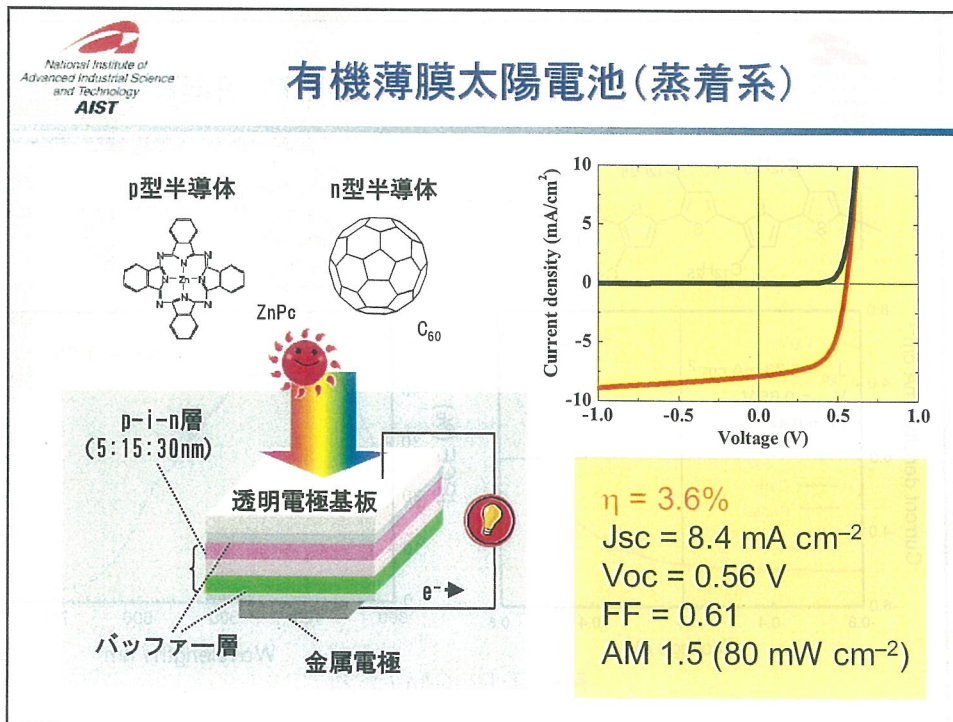
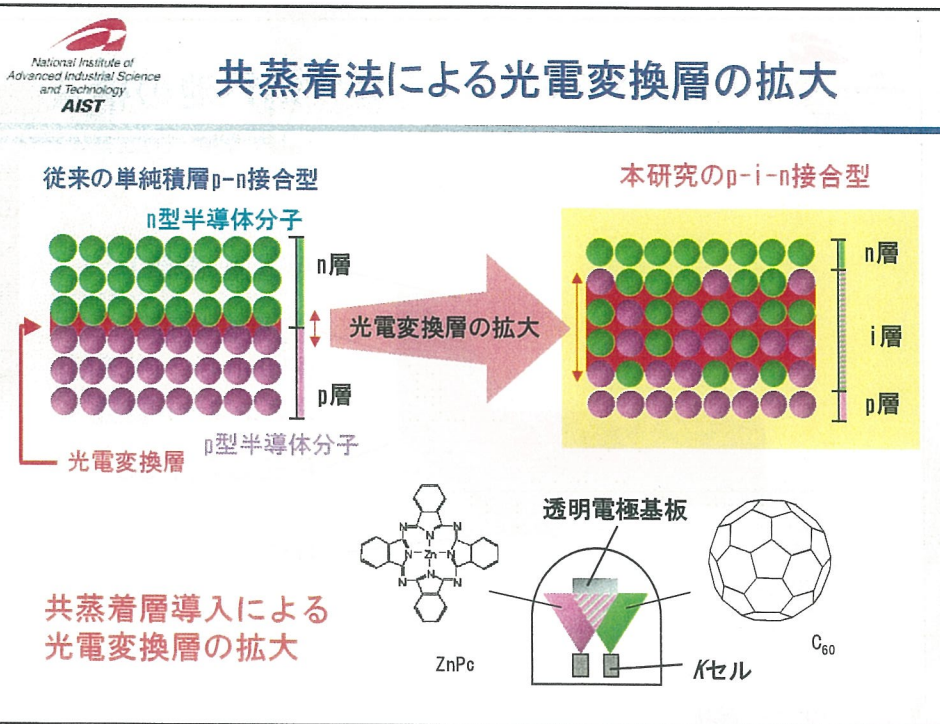


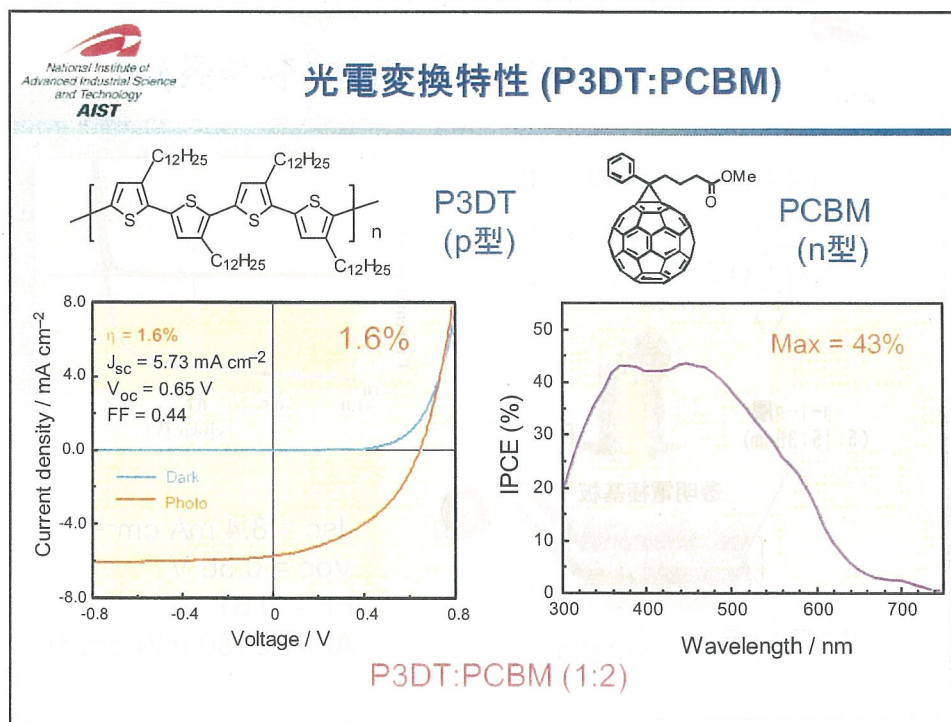
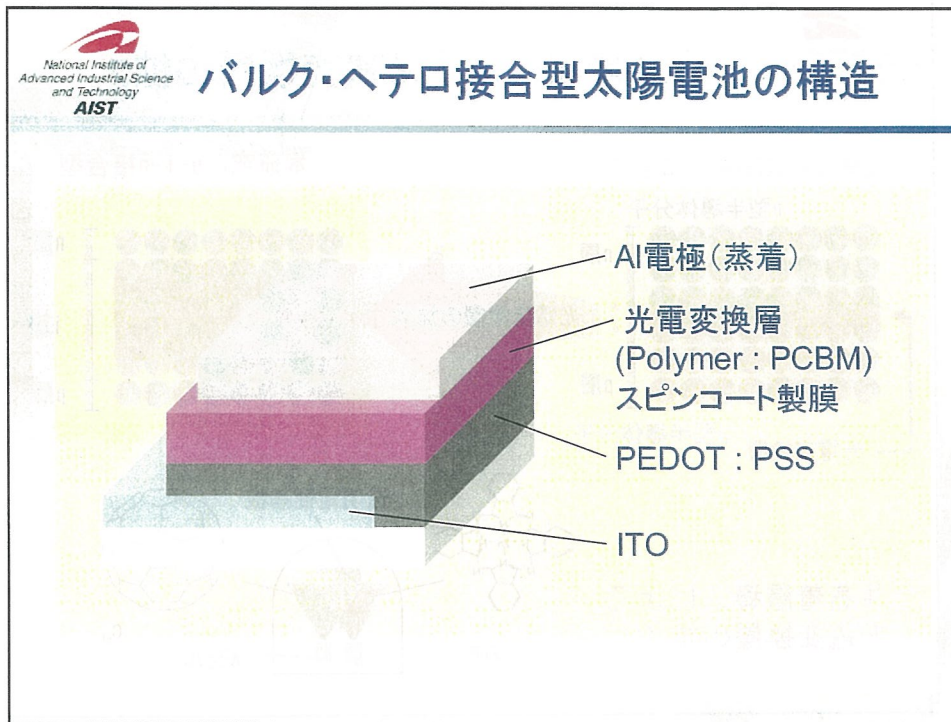
 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
AIST

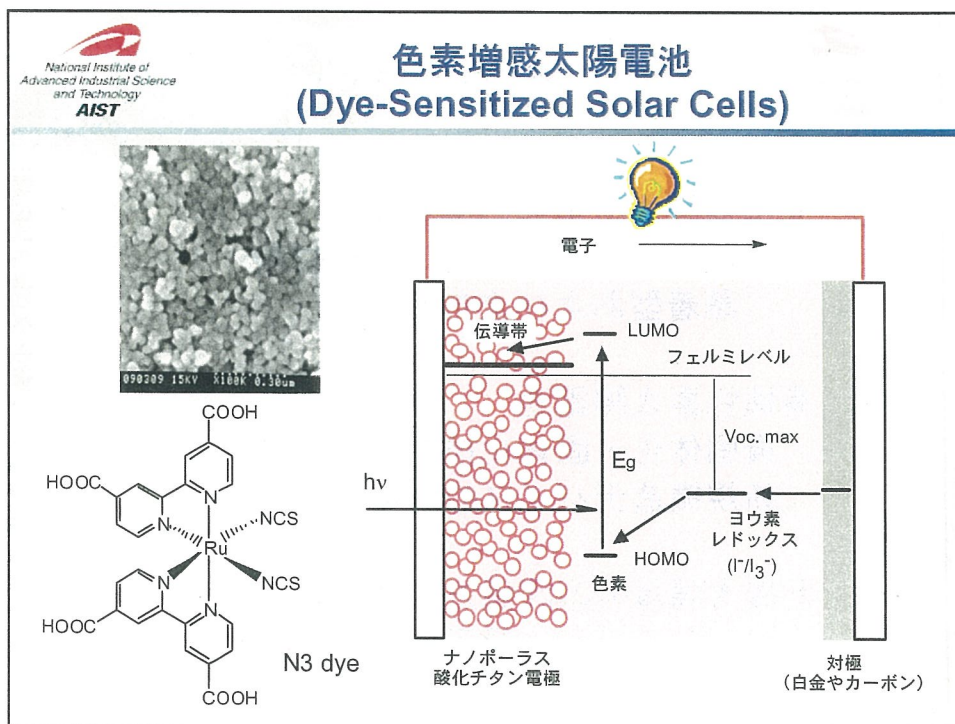
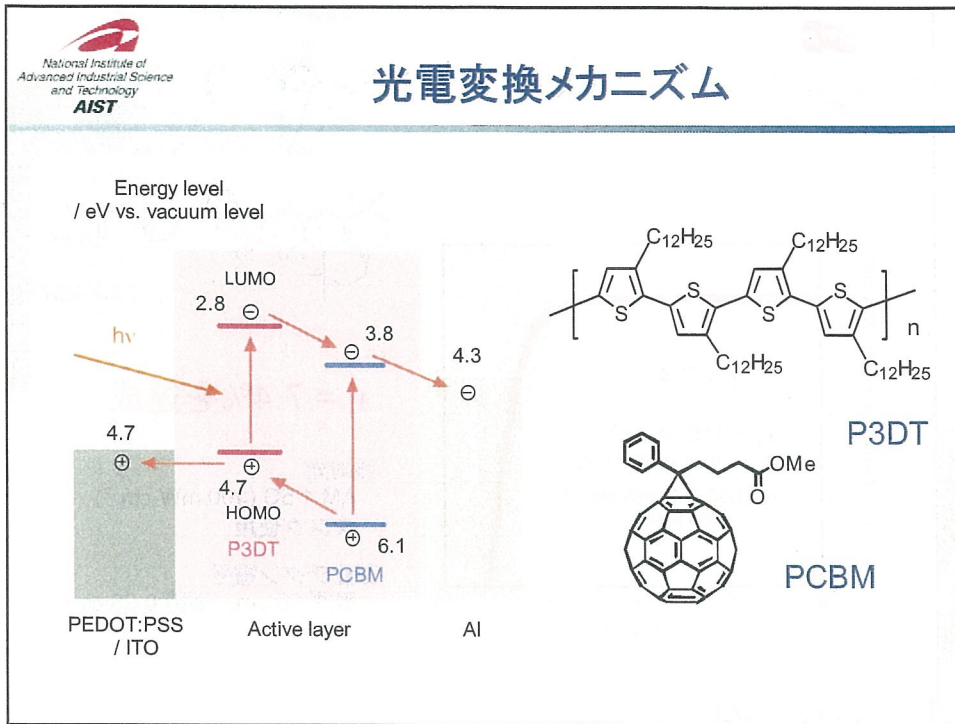
有機薄膜チームの研究課題

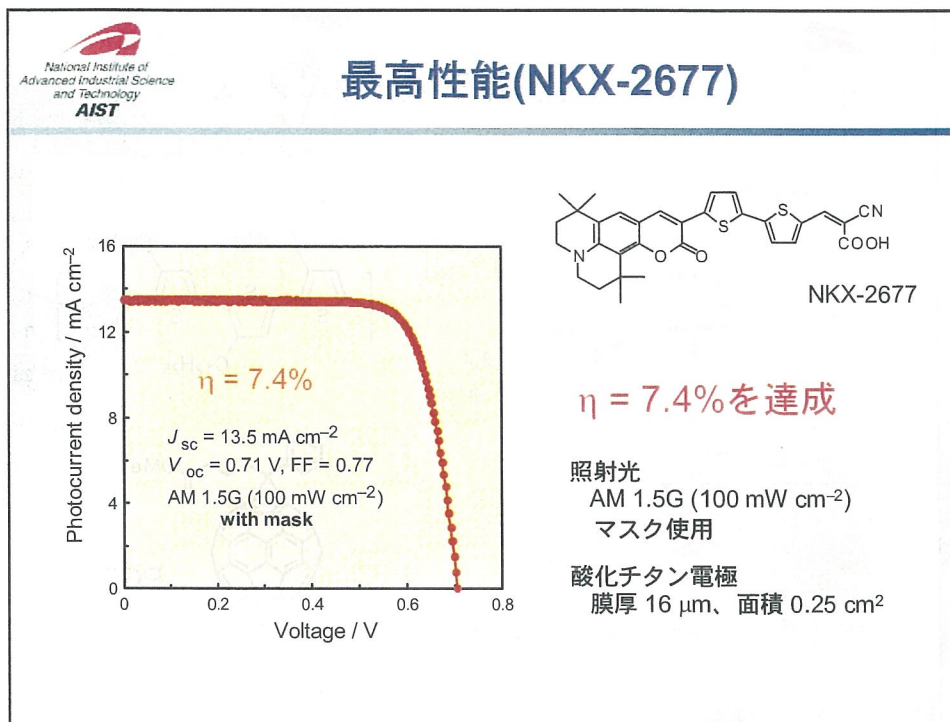
- 1 有機薄膜太陽電池**
 - 共蒸着法によるp-I-n構造デバイス
p型フタロシアニンとn型フラーレン
 - 塗布型・バルク・ヘテロ接合型太陽電池
共役系高分子とフラーレン誘導体
- 2 有機色素(増感)太陽電池**
 - 高効率化
 - 電解液の固体化・擬固体化












-  **今後の方針**
- 有機薄膜太陽電池の高効率化
デバイス構造の改善、新規材料
(蒸着型および塗布型)
 - 有機色素太陽電池
擬固体化・固体化技術、新規材料
新規構造デバイスの開発
 - 有機太陽電池の評価方法技術の確立
→ システム・評価チームとの共同

AIST

産業化戦略チームの ミッションと展望

太陽光発電研究センター
産業化戦略チーム長
増田 淳

独立行政法人 産業技術総合研究所

AIST

産業化戦略チームの位置付け

シリコン新材料チーム 結晶シリコンチーム

化合物薄膜チーム

有機薄膜チーム

評価・システムチーム

ニーズ

産業化戦略

シーズ

基盤技術

Theoretical limit
Efficiency (%)
Bandgap (eV)
2003年 16.9%
2002年 11.1%
CuInSe₂
E_g ≥ 1.3eV
CuGaSe₂

放射照度 (mW/cm²/nm)
波長 (nm)
大面積高出力
ソーラモジュール
1000W/m²
1000nm

産業化戦略チームのミッション

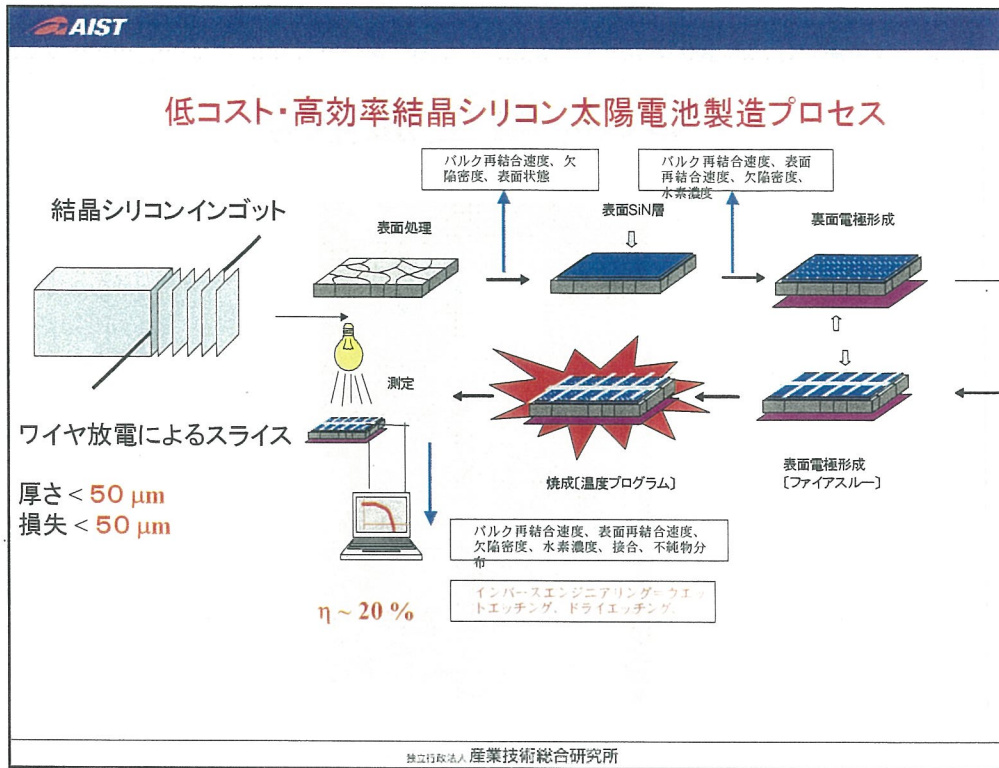
結晶シリコン太陽電池、薄膜シリコン太陽電池
→ 高効率化のために一層の技術革新が必要

新型太陽電池(化合物太陽電池、有機太陽電池等)
各種太陽電池用フレキシブル基板
→ ロードマップに沿った実用化

- 1) 太陽光発電研究センターで開発された技術を中心に、新規要素技術の実用化の可否を判断可能なパイロットラインを構築
- 2) 国内外の太陽電池に関する要素技術を幅広く調査し体系化

パイロットラインの概要

- 結晶シリコン太陽電池用
サイズ: 150 mm × 150 mm
- 薄膜シリコン太陽電池用
サイズ: 300 mm × 300 mm
大面積(2 mサイズ)均一堆積原理実証機
a-Si:H, μ c-Si:H
- フレキシブル基材用
透明電極付プラスチック基板



 **POCl₃ 縦型拡散炉**



独立行政法人 産業技術総合研究所

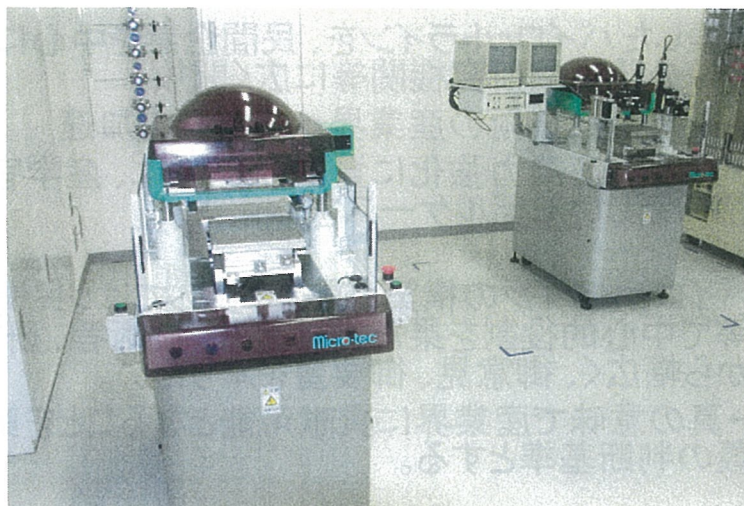
 **横型酸化炉**



独立行政法人 産業技術総合研究所



スクリーン印刷装置



独立行政法人 産業技術総合研究所



電極焼成用ランプ炉



独立行政法人 産業技術総合研究所



産業化戦略チームの展望

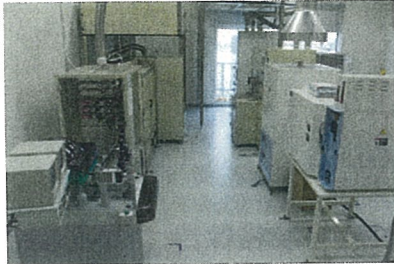
構築したパイロットラインを、民間企業を中心に、大学、公設試験研究機関等に広く開放

- 新規要素技術の産業界への移転を加速
- 日本の産業力強化に資するとともに、産学官連携の新しいモデルケースをも構築

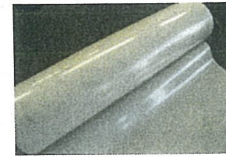
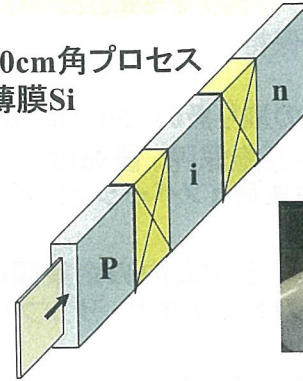
パイロットラインの構築、運営に際しては、民間企業等で中心的役割を果たす経営者、技術者、研究者から幅広く、御意見、御要望を承りたい。

- 真の意味で産業界に貢献可能となることを第一義の判断基準とする。

16~17年度 RCPVに次世代結晶シリコン試作ライン、薄膜シリコン試作ライン、フレキシブル基板開発ラインを設置



150 mm角プロセス
結晶Si



フレキシブル基板利用技術

2m長尺プラズマCVD装置
薄膜Si高速大面積製膜技術

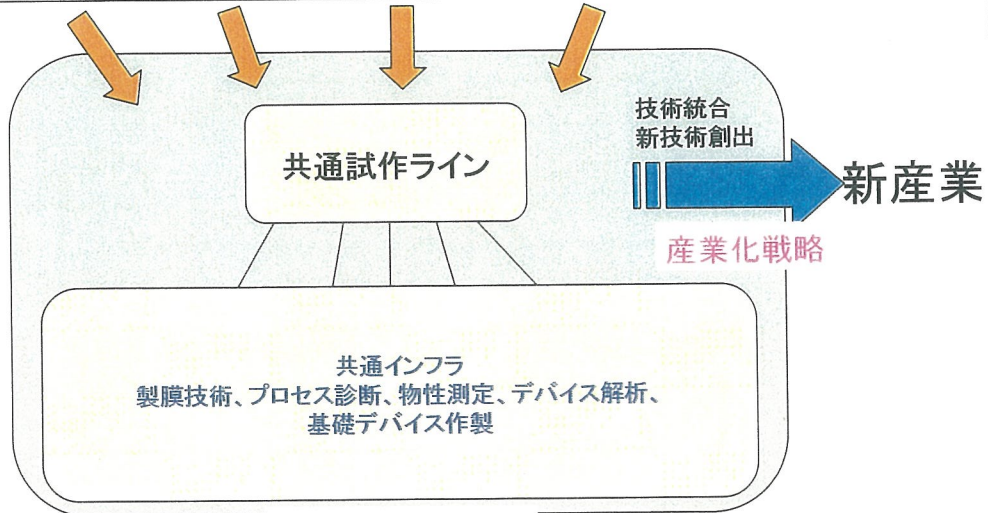
基板

原料

セル

メカトロニクス

要素技術



共同研究契約**秘密保持**

知財の取り扱い 50:50 原則
不実施保障、優先権
産総研イノベーションズ (TLO)

コンソーシアム内の企業間の取り扱い、秘密保持
ノウハウ流出、サンプル保持

受託研究、資金提供型

600万円以上の受託に対して同額補助の制度
(マッチングファンド)

問い合わせ:産業化戦略チーム 増田 atsushi-masuda@aist.go.jp

薄膜結晶シリコン系太陽電池の高速製膜・高効率化技術の開発

シリコン新材料チーム 松井 卓矢、近藤 道雄

微結晶Si太陽電池の高速製膜化技術

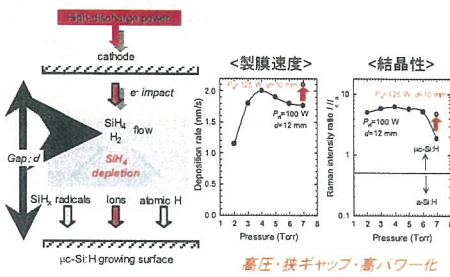
1. 高压-SiH₄枯渇プラズマプロセスの開発

プラズマCVDによる高品質微結晶Siの高速製膜

- ・高いラジカルフラックス
- ・十分な原子状水素の供給
- ・イオンダメージの低減

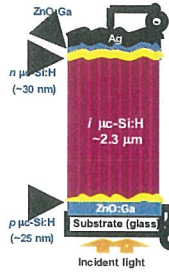
<高压-SiH₄枯渇プラズマの提案>

高压
狭ギャップ → 低電子温度化
高速製膜化
高パワー → 高結晶化

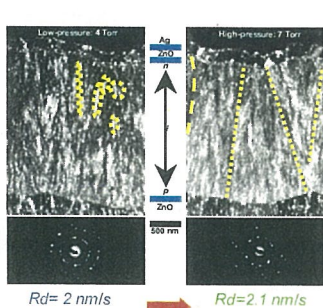


高压・狭ギャップ・高パワー化

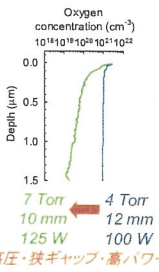
<太陽電池構造>



<暗視野断面TEM・電子線回折>



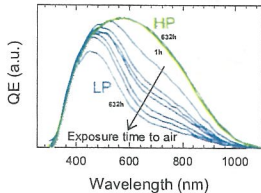
<SIMS酸素濃度分布>



高压・狭ギャップ・高パワー化

Rd= 2 nm/s → Rd=2.1 nm/s
@4 Torr, 12mm, 100W @ 7 Torr, 10mm, 125W
高压・狭ギャップ化・高パワー化

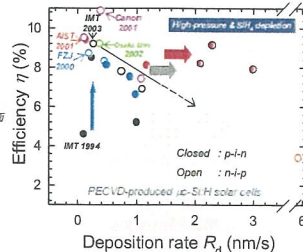
<量子効率スペクトルの大気暴露時間依存性>



高压SiH₄枯渇プラズマ

- 結晶配向性・構造緻密性の改善
- 大気不純物の拡散・酸界酸化を防止
- 酸化による電気的特性変化 (n型化・欠陥生成) を抑制
- 良好な分光感度特性

<変換効率と製膜速度の関係>



#	R _d (Å/s)	Pressure (Torr)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF	η (%)
1	8	4.0	22.2	0.527	0.71	8.3
2	20	4.0	15.5	0.467	0.52	4.5
3	21	7.8	22.2	0.530	0.69	8.2
4	26	6.6	22.1	0.530	0.67	7.9
5	23	9.0	23.7	0.528	0.73	9.1

・高压-SiH₄枯渇プラズマプロセスを提案し、高速製膜条件下 (2~3nm/s) で変換効率8-9%の太陽電池を実証した。

・最高変換効率9.1%を製膜速度2.3nm/sで達成した。

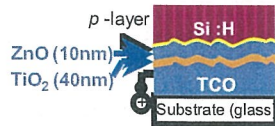
高電流・スペクトル感度広帯域化技術

2. TCO/Si界面反射防止構造の開発

TCOとSiの屈折率差が大きいため界面反射損失が大きい

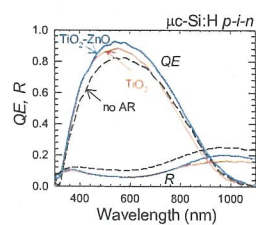
中間屈折率、低電気抵抗率、耐プラズマ性を満足する界面AR構造を検討

<TiO₂/ZnO積層型AR中間層を提案>



TiO₂ (40nm): 屈折率整合層
ZnO (10nm): TiO₂還元防止保護層

<AR構造と量子効率・反射率の関係>

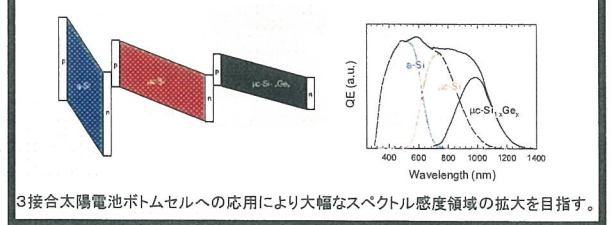


Material	AR-layer	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF	η (%)
no AR		15.1	0.938	0.71	10.0
	no AR	15.7	0.933	0.70	10.3
a-Si:H	TiO ₂ -ZnO	16.0	0.938	0.632	10.4
	no AR	21.8	0.512	0.675	7.54
μc-Si:H	TiO ₂	22.1	0.515	0.697	7.96
	TiO ₂ -ZnO	23.8	0.516	0.687	8.46

- ・全波長領域で量子効率が改善 (Max 92%)
- ・短絡電流が6~10%増加
- ・開放電圧、曲線因子に影響小
- ・a-Si:H、μc-Si:H両太陽電池に適用可

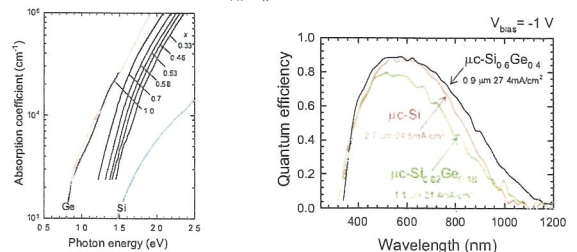
3. 微結晶SiGeナローギャップ太陽電池の開発

結晶SiGe系ナローギャップ太陽電池材料を用いた薄膜太陽電池の多接合化・高効率化



3接合太陽電池ボトムセルへの応用により大幅なスペクトル感度領域の拡大を目指す。

<プラズマCVDによる μc-Si_{1-x}Ge_xHの組成制御と太陽電池の試作結果>



- ・全てのGe組成範囲で微結晶SiGeが得られ、組成比により赤外光吸収係数を自由に制御できる。
- ・Ge組成比40%、0.9 μm厚の微結晶SiGe太陽電池において、膜厚3倍の微結晶Si太陽電池を上回る赤外感度を実証した。

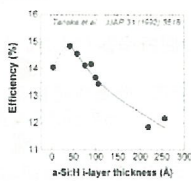
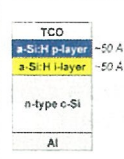
分光エリプソメトリーによるa-Si:H/c-Siヘテロ接合太陽電池の実時間構造制御および界面構造評価

シリコン新材料チーム 藤原裕之

Introduction and Experimental Setup

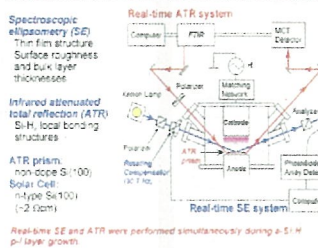
Background

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

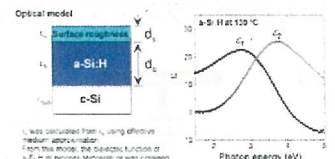


In this study, real-time thickness control of a-Si:H has been performed by spectroscopic ellipsometry (SE). To investigate interface structures, we applied infrared attenuated total reflection (ATR).

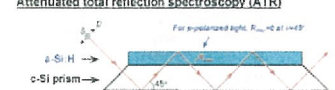
Deposition system for real-time monitoring and control



Spectroscopic ellipsometry data analysis



Attenuated total reflection spectroscopy (ATR)

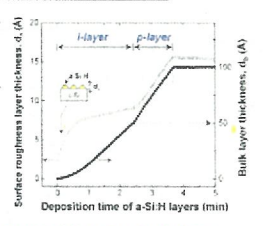


Real-time control and characterization of a-Si:H p-i layers

Real-time control of a-Si:H layer thicknesses by SE

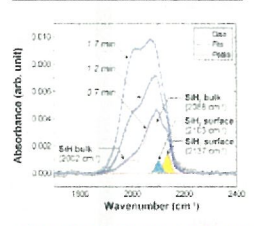
Growth conditions
 $T_{\text{sub}} = 130^\circ\text{C}$
 $[\text{SiH}_4] = 5 \text{ sccm}$
 $[\text{B}_2\text{H}_6] = 2 \text{ sccm}$ (p-layer)
 Pressure = 2 mTorr
 RF power = 12 mW/cm²

Two-layer model
 a-Si:H (p)
 a-Si:H (i)
 c-Si (H)



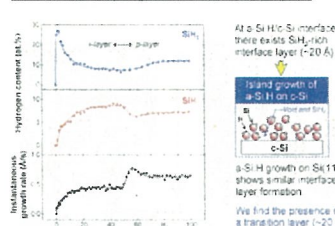
Real-time SE revealed the island growth of a-Si:H layer on the c-Si substrate.

Real-time ATR spectra during deposition



a-Si:H layer formed initially on the c-Si contains a large amount of Si-H bonds.

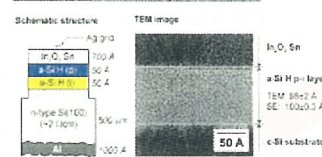
Depth-profile of hydrogen content in a-Si:H p-i layers



At a-Si:H/c-Si interface there exists Si₂H₃O₂ interface layer (~20 Å) and island growth of a-Si:H on c-Si.

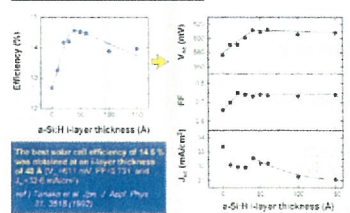
Characteristics of Solar Cell Fabricated by Real-Time Process Control

Structure of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cell



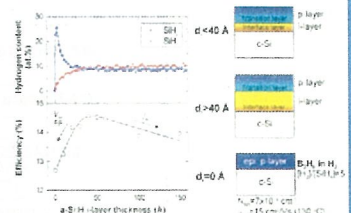
a-Si:H bulk layer thickness estimated from TEM cross-sectional agreement with SE result.

Characteristics of a-Si:H/c-Si solar cells



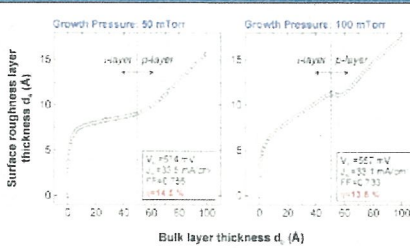
The best solar cell efficiency of 14.5% was obtained at an a-Si:H layer thickness of 40 Å. $V_{oc} = 0.611 \text{ V}$, $J_{sc} = 17.1 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 0.731$ and $\eta = 13.8 \%$.
 ref) Toyoda et al., Sol. St. Appl. Phys. 17, 3818 (1992).

Interface layer formation and solar cell efficiency



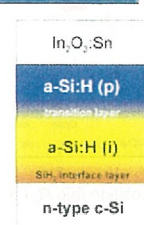
$N_{\text{H}} = 7.10 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ (15.5 at %) (130 °C)

Growth vs. Solar Cell Characteristics



At the high pressure, d_1 decreases after starting p-layer growth.
 Removal of SiH₃ species by H in the p-layer gas.
 Surface roughness effects appear to affect solar cell performance significantly.

Summary



- 1) By applying SE, we demonstrated real-time thickness control of a-Si:H layers in a Si:H/c-Si solar cell. The SE result shows excellent agreement with TEM.
- 2) At a-Si:H/c-Si interface, SiH₃-rich interface layer (~27 at %) is formed most likely by island growth of a-Si:H layer on the c-Si substrate.
- 3) We find the presence of a transition layer at a-Si:H/p-i interface.
- 4) The a-Si:H/c-Si solar cell shows a relatively high conversion efficiency of 14.5%.

トライオードプラズマCVD法による低劣化アモルファスシリコン 太陽電池のタンデム型太陽電池への適用

園部裕之^{1,2}, 佐藤愛子¹, 松井卓夫¹, 松田彰久¹, 近藤道雄¹

¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター シリコン新材料チーム

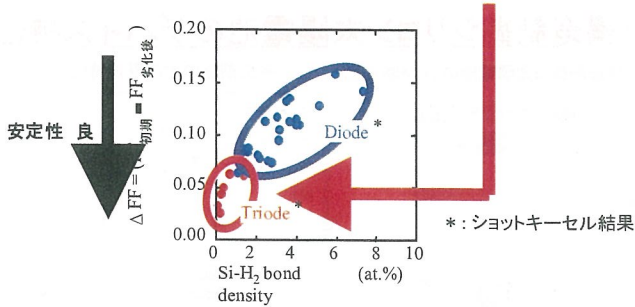
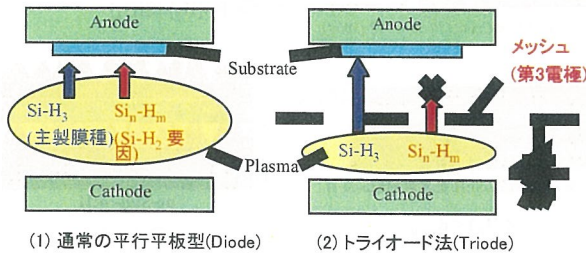
²三菱重工株式会社 長崎研究所

1. 狙い

アモルファスシリコン(a-Si)太陽電池には光劣化という問題がある。当研究チームでは、トライオードプラズマCVD法を用い、i層膜中のSi-H₂結合濃度を減少させることにより光劣化の抑制を試みている。その結果、H15年度までにa-Si太陽電池の劣化後効率9.22%(劣化率7.8%)を達成している。

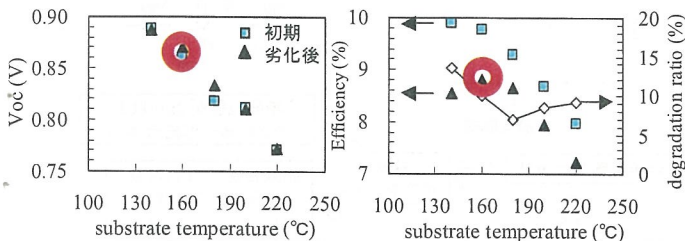
H16年度は、トライオードプラズマCVD法によるa-Si太陽電池をa-Si/微結晶シリコン(μc-Si)構造のタンデム型太陽電池に適用することを試みた。

2. トライオードプラズマCVD装置構成



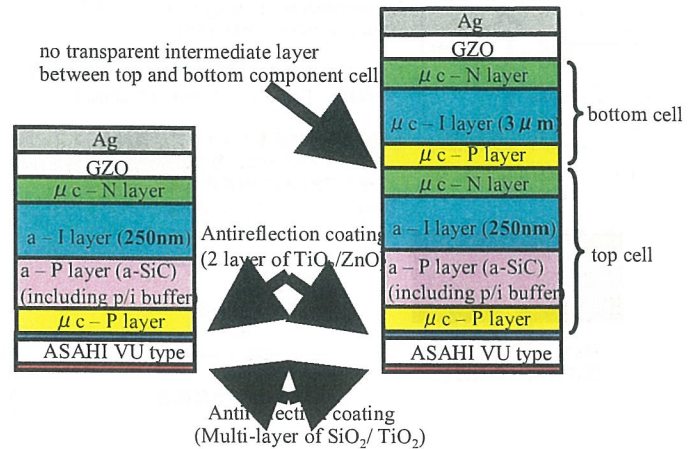
トライオード法を用い、プラズマ中の高次シランラジカル(Si_nH_m)が製膜に寄与することを抑制することにより、i層膜中のSi-H₂結合を減少させる。結果として、形状因子(FF)の低下が抑制され光安定性が向上する。

3. トップセル高電圧化



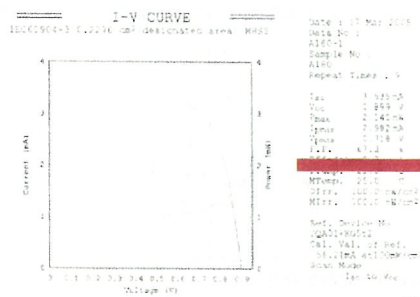
トライオード法では、i層製膜基板温度を下げた場合においても低い劣化率を保つ。このため、タンデム用トップセルの開放電圧(Voc)を高電圧化できる。

4. 反射防止処理基板を用いたトップセルシングル及びタンデムセル



(1) 反射防止処理基板を用いたトップセルシングルのセル構造

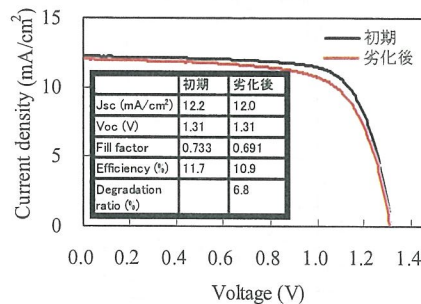
(2) 反射防止処理基板を用いたタンデムセルのセル構造



◆トップセルシングルの劣化後効率(当センターのシステム・評価チームによる計測結果)

劣化条件	3sun, 60°C, 10h	
Jsc (mA/cm ²)	初期	劣化後
Voc (V)	0.910	0.899
Fill factor	0.749	0.673
Efficiency (%)	10.7	9.32
Degradation ratio (%)		13

AIST



◆タンデムセルの初期及び劣化後効率
◆中間層なし
◆劣化条件: 3sun, 60°C, 10h

5. まとめ

●トライオードプラズマCVD法による低劣化a-Si太陽電池をタンデム用トップセルとして高電圧化し、さらに基板のガラス側及び透明導電膜(TCO)側の両面に反射防止処理を施すことで、劣化後効率9.32%(劣化率13%)を得た。

●上記a-Siセルをa-Si/μc-Si型タンデム太陽電池のトップセルに用いることで、劣化後効率10.9%(劣化率6.8%)を得た。

ナノ構造制御シリコン太陽電池の研究

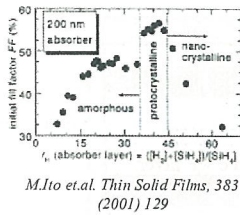
1,2) 伊藤 学、1) 近藤 道雄

1) 産業総合技術研究所 太陽光発電センターシリコン新材料チーム 2) 凸版印刷株式会社 総合研究所

研究の背景

目的: 任意にナノ構造を制御可能な水素希釈率変調法を用いて光劣化を根本的に解決することを目指す

プロトクリスタルシリコン

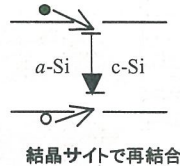


M.Ito et al. Thin Solid Films, 383 (2001) 129



- ・狭いパラメータウィンドウ
- ・膜厚方向への異方性

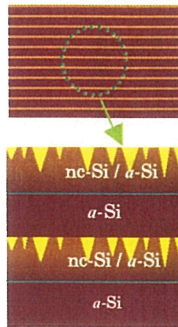
1. 中距離秩序の改善 [Guha et al. APL 74, 1860 (1999)]
2. “intermediate Si” ($\omega_{TO} = 490 \text{ cm}^{-1}$) の存在 [Tsu et al. PRB 63, 125338 (2001)]
3. ナノ結晶の存在で周囲のアモルファス相の構造が改善 [Mahan et al. PRB 61, 1677 (2000)]
4. 結晶サイトで過剰なキャリアが再結合アモルファスシリコン内での非輻射再結合を抑制アモルファス相での劣化低減 [Kamei et al. APL 74 1707 (1999)]



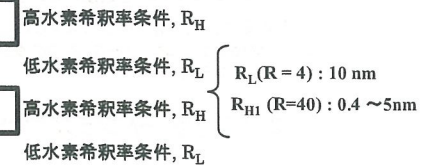
水素希釈率変調法

ナノ構造を任意に制御可能

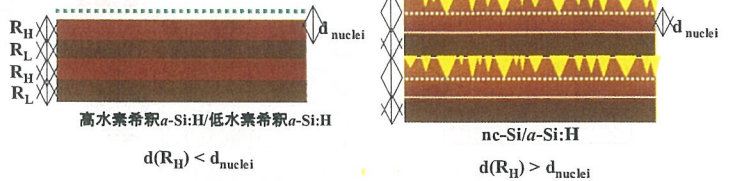
投入電力, 動作圧力, 水素流量: 一定
SiH₄流量を変化.



成膜時間

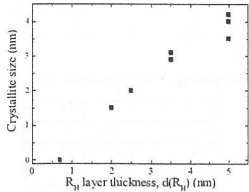


(M.Ito et al. J-Non.Cryst.338-340, 698 (2004))



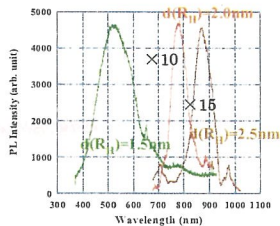
ナノ構造制御シリコン薄膜の特性

結晶サイズと $d(R_H)$ の関係(TEM)による評価



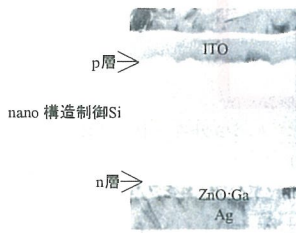
$d(R_H) \geq 1.5 \text{ nm}$ ナノ結晶が存在

フォトルミネッセンススペクトル

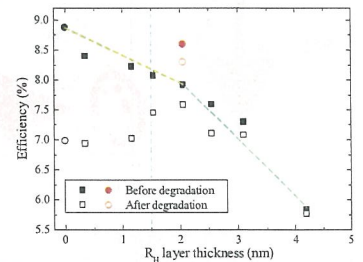


ナノ構造制御シリコン太陽電池のデバイス特性

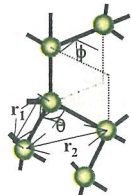
ナノ構造制御Si太陽電池のTEM断面図



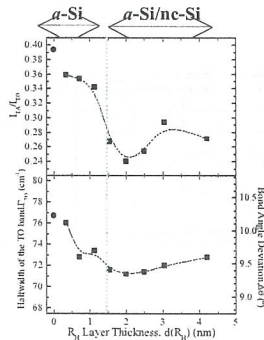
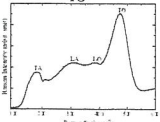
劣化前後の太陽電池特性



ナノ構造制御シリコン薄膜の構造秩序

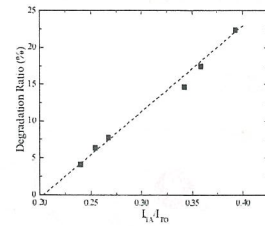


中距離秩序: $I_{TA}/I_{TO} = k \Delta\theta$
短距離秩序: $\Gamma_{TO} = 15 + 6\Delta\theta$

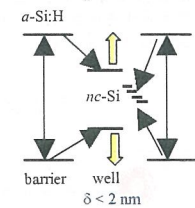


中距離秩序: nano結晶の存在で大きく改善
短距離秩序: 大きな変化無し

中距離秩序とセルの劣化率との関係



線形な関係



結晶粒径が2nm以上
ナノ結晶→再結合中心
結晶粒径が2nm未満
量子サイズ効果
Eg of nc-Si ~ a-Si:H

最も優れた太陽電池

結論

アモルファス太陽電池の光劣化を克服することを目的に、水素希釈率変調法を用いてナノ構造制御シリコン薄膜の膜構造、デバイス特性について考察した。

1. 水素希釈率変調法を用いて、膜の中距離秩序やナノ結晶のサイズを任意に制御できることを見いだした。中距離秩序はナノ結晶の存在と密接に関連しておりナノ結晶の存在が周囲のアモルファス相の中距離秩序を緩和していることを示唆している。
2. ナノ構造制御シリコン太陽電池においては安定化効率8.3%[劣化率3.6%]の太陽電池作製に成功し光劣化をほぼ克服した。
3. 膜の中距離秩序と太陽電池の劣化特性とは直接的な相関関係があることを初めて実証した。

シリコン系薄膜太陽電池作製プロセスの気相診断 及び高性能透明電極材料の探索

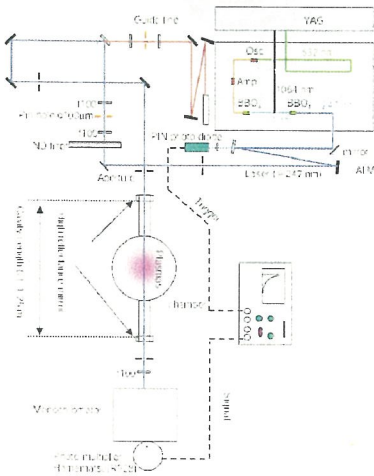
目的: 高品質太陽電池の作製

- ・ 製膜プロセスの最適化 ← プラズマ診断
- ・ 光及び電流損失の低減 ← 高性能透明導電膜の開発

OCavity Ring Down 法を用いたラジカルの密度測定

ON₂ second positive systemの発光スペクトラムを用いた ガス分子の温度測定及び微結晶シリコンの高速製膜

実験装置の概要



【目的】シリコン系薄膜太陽電池の開発のためには、高品質シリコン薄膜の作製が不可欠である。プラズマCVD法を用いたシリコン薄膜を作製する場合、膜質を左右する中間反応種であるSiH₃ラジカルが発生する。本研究では、反応炉内で発生したこれらSiH₃ラジカルの絶対量をキャビティリングダウンスペクトル(CRDS)分光法を用いて検出し「膜質との相関」および「薄膜形成メカニズム」を明らかにする事を目的とする。

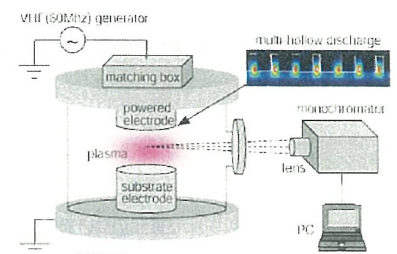
【実験装置および結果】反応炉内で微小発生するSiH₃ラジカルの絶対量検出のため、CRDS測定を行った。SiH₃ラジカルが発生していない条件(プラズマOFF)では、リングダウンタイムが~250 nsあるのに対し、SiH₃ラジカル発生条件(プラズマON)ではリングダウンタイムが~100 nsまで減少する。このリングダウンタイムの逆数の差は密度に比例し、本条件におけるSiH₃ラジカル濃度は~3 x 10¹² cm⁻³程度である事が分かった。

【目的】太陽電池の高品質化にはプロセス条件を最適化する必要がある。本研究ではガス温度の測定及び高温のガス分子が膜質に与える影響について研究を行っている。

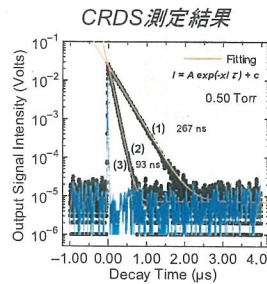
【ガス温度測定結果】プラズマ中のガス分子の温度を測定するため、プローブガスとして微量の窒素ガスを混入し、窒素分子の2nd positive systemの発光スペクトル計測を行った。スペクトルは分子の振動及び回転温度に応じて変化する。バンドヘッドの強度比が振動温度を与えバンドヘッドの短波長側の広がりが回転温度を与える。本条件では、窒素分子の振動及び回転温度がそれぞれ約3500K、500Kである。

【製膜結果】マルチホロー電極を用いたVHF放電にて、高速且つ低欠陥密度の微結晶シリコン薄膜を作製することに成功している。

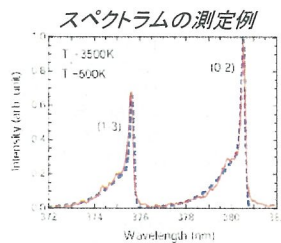
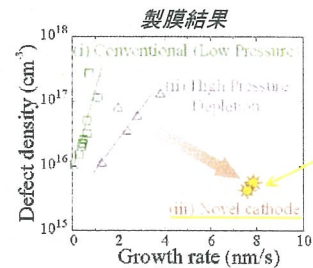
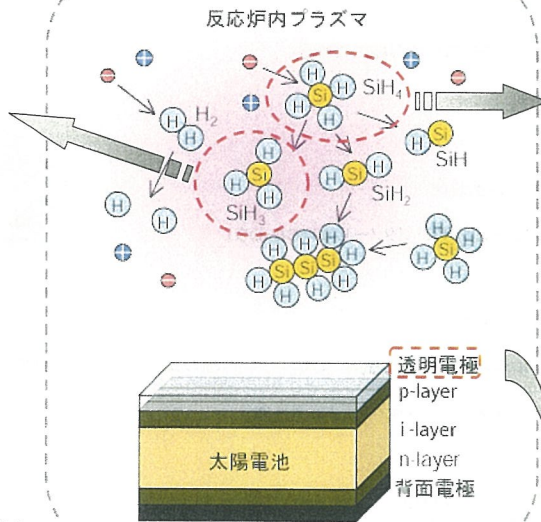
実験装置の概要



製膜条件
total gas pressure: 9.3 Torr
H₂, SiH₄ and N₂ flow rate: 96, 6.4 and 10 sccm
discharge power: 296W
substrate temperature: 200°C



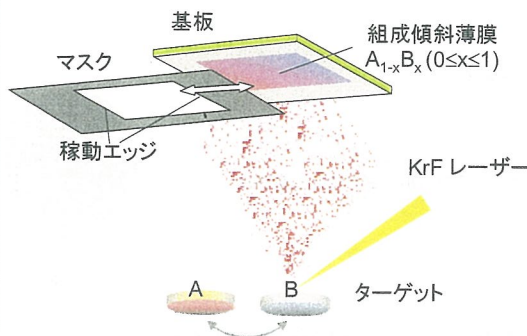
SiH₃ラジカル濃度の測定
⇒ 膜質との相関解明
⇒ 薄膜形成メカニズムの解明



ガス分子温度の測定
⇒ 膜質との相関を解明
⇒ 製膜条件の最適化

太陽電池に適した透明導電膜の開発

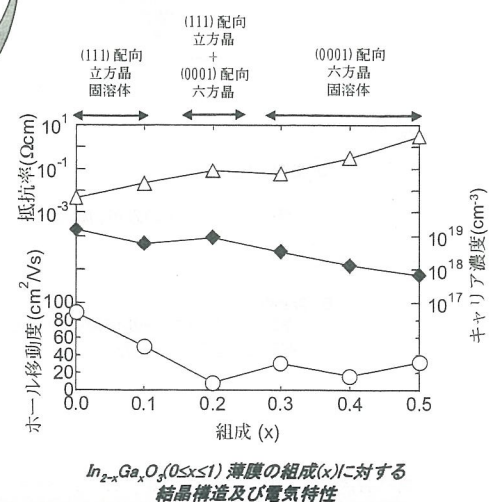
コンビナトリアルパルスレーザー堆積装置



【背景】酸化インジウム錫(ITO)は、可視領域の透過性が優れた低抵抗な薄膜を容易に得られることから太陽電池の窓電極に適用されている。しかし、積層型による太陽光スペクトルの有効利用といった近年の着しい薄膜太陽電池開発に伴い、ITOによる赤外領域の光学的損失が太陽電池変換効率に悪影響を与え始めている。そのため、錫以外のドーパントによる酸化インジウム系透明導電膜の高移動度化及び母体材料自体の検討を行っている。ここでは、III族酸化物の透明導電体の母体材料としてのポテンシャルを調べるため単結晶薄膜を作製し、その構造・電気特性の結果を紹介する。

【実験】材料探索に適したコンビナトリアルパルスレーザー堆積装置(樹バスケル社製)を用い、(111)YSZ(イットリウム安定化ジルコニア)基板上にIn_{2-x}Ga_xO₃(0 ≤ x ≤ 1)薄膜を作製した。

【結果】In_{2-x}Ga_xO₃薄膜のxが増加するにつれ、結晶構造が立方晶固溶体薄膜、立方晶・六方晶混在相分離薄膜、六方晶固溶体薄膜へと変化する事がわかった。x=0.2の相分離薄膜においては移動度が10cm²/Vsと低いが、x=0.1の立方晶薄膜では移動度が約90, 50 cm²/Vsと高移動度、x=0.3-0.5の六方晶薄膜では移動度20~30 cm²/Vs程度と比較的高移動度であることが分かった。x増加に伴う、紫外領域の吸収端の短波長シフトも観察されていることからIn_{2-x}Ga_xO₃(0 ≤ x ≤ 1)薄膜が「ワイドギャップ透明導電膜の母体材料として適していることが示唆される。



結晶シリコン基板の表面パッシベーションとライフタイム評価

1. 溶液を用いたシリコン基板の表面パッシベーション

- ・熱処理工程がない室温での表面パッシベーション方法
- ・シリコン基板の少数キャリアライフタイム測定には不可欠の技術
- ・特に、シリコン基板のバルクライフタイムの評価に有効

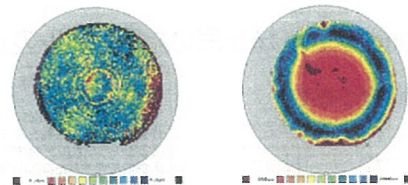
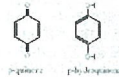


図1. キンヒドロ/メタノール溶液処理による表面パッシベーション効果

2. 新しい表面パッシベーション方法として、キンヒドロ/メタノール溶液 (QM) 法を提案

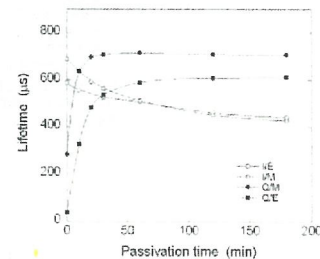
キンヒドロ



- ・劣化のない安定したライフタイム値が得られる。

3. 標準的なQMパッシベーション方法

- (1) シリコン基板を5%HF溶液に浸す(5分)。
- (2) 上記基板をプラスチックの袋または容器に入れる。
- (3) 0.01M キンヒドロ/メタノール溶液を袋または容器に入れる。
- (4) 30分~1時間程度暗所に置く。
- (5) ライフタイム測定



4. QMパッシベーションによるシリコン基板表面の状態

キンヒドロ/メタノール溶液 (CH₃OH) とキンヒドロ/メタノールd4 (CD₃OD) を用いて、ATR-FTIR測定をおこなった。

手順

- (1) Si(100) 基板を5%HF溶液に浸す(5分)。
- (2) 上記基板をプラスチックの袋に入れる。
- (3) 0.01M キンヒドロ/メタノール溶液を袋に入れる。
- (4) 1時間暗所に置く。
- (5) シリコン基板を袋から取り出して、メタノール(メタノールd4)で洗浄。
- (6) ATR-FTIR測定

結果

- ・キンヒドロメタノール処理により、Si-H結合が減少。
- ・-OCD₃由来の、C-D結合によるピークが現れる。
- ・キンヒドロ由来のベンゼン環を持つ化合物が存在。

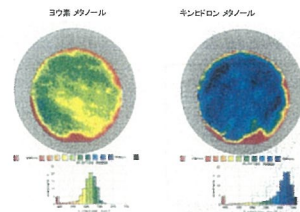
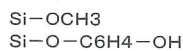


図2. キンヒドロ/メタノール溶液処理とヨウ素/メタノール溶液処理との比較

5. SPV法との比較

ライフタイム測定の方が、面内分布をより詳細に測定できる。

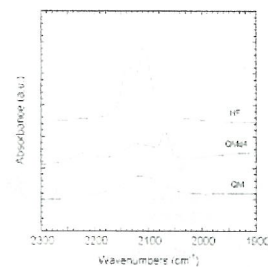


図3. FT-IRによる測定結果

6. まとめ

キンヒドロ/メタノール溶液処理方法は、シリコン基板のバルクライフタイム評価に有効であることを示した。

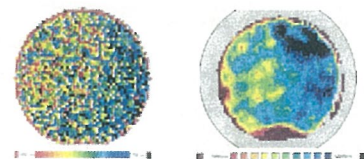


図5. ライフタイム測定とSPV測定との比較

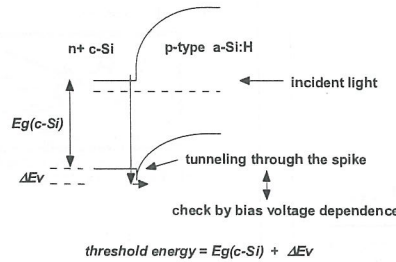
低温BSF技術

目的:

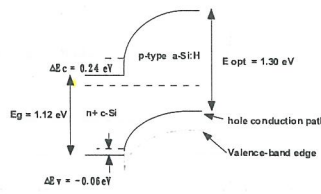
- Back-Surface-Field(BSF):
 - 表面における少数キャリア再結合の低減
 - 表面に基板と同じ伝導型でよりキャリア濃度の高い層を設け、表面接合における電界分布の制御を行う
 - 少数キャリアの追い返しで再結合速度を低減
 - p型シリコン基板に有効な手法を探す
- 低温化: 200°C
 - プロセスにおける熱歪み発生を避ける
 - 薄型ウエハへの適用

手法:

- RFプラズマCVD法でp型シリコン基板の背面にp⁺層を形成
- 原料ガス: シラン、水素、ジボラン
- ガス比: H₂ / SiH₄ = 60, B₂H₆ / SiH₄ = 0.025 - 10 %
- p⁺層膜厚: 40nm

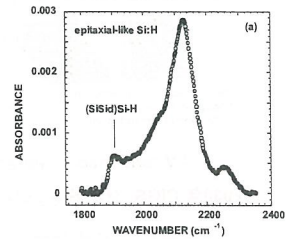


内部光電子放出(internal photoemission)IPEによるヘテロ界面のバンド不連続の評価(原理図)



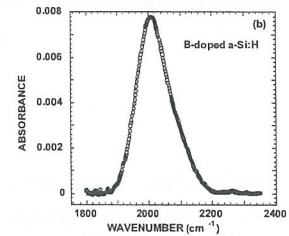
ポンドープa-Si:H/結晶シリコン界面のバンド構造

- ΔEvが小さい理由:
 - ポンドープに伴う結合水素量の低下
 - B-doped a-Si:HのValence-band tailに存在する hopping conduction pathをIPEで観測していると解釈
- ΔEc = 0.24 eV
 - 従来の理論はB-doped a-Si:H / c-Si界面を想定していないので、理論との比較は難しい
 - 太陽電池特性とは矛盾しない



attenuated-total-reflection mode Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR)で測定したepitaxial-like Si:H膜のabsorbanceスペクトル

シリコンの未結合手に起因するピークが観測され、欠陥密度が高いことが推定される



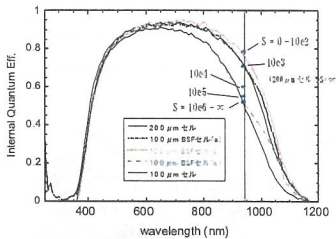
ATR-FTIRで測定したa-Si:H膜のabsorbanceスペクトル Si-H結合が支配的な高品質膜が得られている

a-Si:H/結晶シリコン界面で再結合速度が低減される理由2

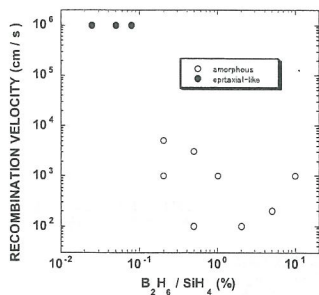
epitaxial-like Si:H膜に高密度に存在していたシリコン未結合手などの欠陥は、構造が柔軟なa-Si:Hでは密度が低減される。また、膜中の水素で終端される。

まとめ

- 低温BSF技術を提案
- p型シリコン基板に適用できる手法
- 単純な構造: ポンドープa-Si:H / 結晶シリコンコンタクトホールが不要
- 200°Cの低温で100cm/s以下の再結合速度を実現
- ユニークなメカニズム: ヘテロ接合のバンド構造を利用

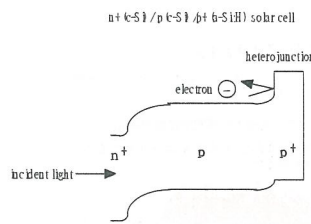


n+ 結晶シリコン / p型結晶シリコン/ポンドープp型シリコン太陽電池の内部量子効率の解析 波長940nmでのフィッティングから背面再結合速度を評価



ガス中でのポンドープ速度が0.1%以上で、膜がアモルファス構造になると背面再結合速度は3桁以上低下し、BSF効果が顕著になる

100cm/s以下の再結合速度を200°Cのプロセスで実現



n+ 結晶シリコン / p型結晶シリコン/ポンドープp型シリコン太陽電池の確認されている、表面p型層をa-Si:Hにしたときの表面再結合速度の低減の1つの理由は、ヘテロ接合での電子のブロッキング

バンド不連続が主に伝導帯側に存在するので電子の追い返しに有効

水蒸気を用いた新製膜技術によるワイドギャップCIGSe太陽電池の高効率化

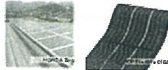
問い合わせ先: 化合物薄膜チーム 石塚尚吾

Introduction

Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ (CIGSe)太陽電池

高い変換効率(>19%*)、多用途への応用期待

Large area modules, Flexible cells, Space use, etc.



Photos: Examples of large area** and flexible*** CIGSe modules

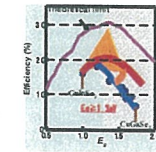
*M. A. Contreras, et al., Prog. Photovolt. Res. Appl. 13, 209 (2005).
**http://www.honda.co.jp/news/2002/e020411.html
***http://www.jns-products.com/solar.htm

PV road map in Japan (NEDO目標)

2030年 CIGS: セル効率 25%、モジュール効率 22%

目標達成に向けた課題

- ◆pn接合形成のメカニズムや構成元素の内部拡散など、基礎物理の解明
- ◆新バフファ層を用いた新しいセル構造デザイン
- ◆よりワイドギャップなCIS系材料による、禁制帯幅に見合った大開放電圧化の達成と高効率化



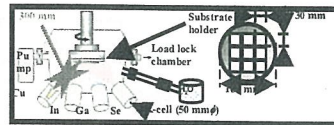
CIS系太陽電池の禁制帯幅と変換効率

特に禁制帯幅1.3 eV以上のワイドギャップCIGSe太陽電池の高効率化は目標達成のために必要不可欠。

Experimental Procedures

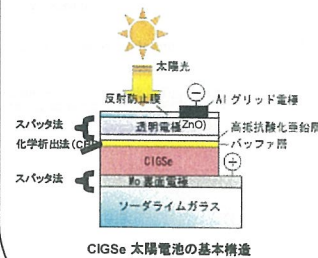
CIGSe薄膜と太陽電池デバイスの作製

- CIGSe layers: MBE装置を用いた三段階法
- Growth rate: 0.5 μm/h
- Film thickness: ~1.7 μm



- Water vapor introduction: 製膜中の水蒸気分圧は一定値に固定 (1~10×10⁻⁴ Pa)

水蒸気を用いた高品質CIGSe製膜技術を新開発



CIGSe 太陽電池の基本構造

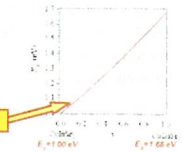
CIGSe薄膜の禁制帯幅の見積もり

CIGSe薄膜のE_gはGa/III比xから導出した。xの値は、EPMAにより幾つか異なるプローブ電圧で測定し、その平均値より見積もった。

$$E_g = (1-x)E_g(\text{CuInSe}_2) + xE_g(\text{CuGaSe}_2) - \gamma(1-x)x$$

$$(1) \begin{cases} E_g(\text{CuInSe}_2) = 1.00 \text{ eV} \\ E_g(\text{CuGaSe}_2) = 1.68 \text{ eV} \\ \gamma = 0.116 \text{ eV} \end{cases}$$

$$E_g = 1.00 + 0.564x + 0.116x^2$$

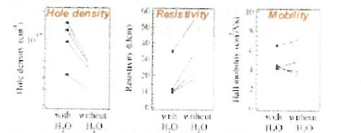


*M. Gorska, et al. Sol. Energy Mater. 2, 343 (1980).
**J. L. Shay, et al. Ternary Chalcogenide Semiconductors: Growth, Electronic Properties and Applications. Pergamon, 1975.
***M. Turek, et al. Appl. Phys. A 73, 769 (2001).

Results & Discussion

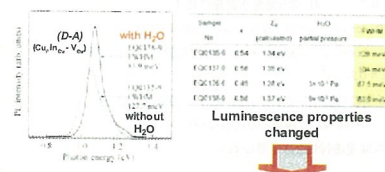
水雰囲気製膜によるCIGSe薄膜の特性変化

1. Electrical properties of Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ (x~0.5) thin films



- Measured by the van der Pauw method at room temperature.
- Specimens for Hall measurements were deposited directly on glass substrates

2. Photoluminescence properties



- Excitation source: Ar ion laser 514.5 nm
- Measured at 1.4 K

Improvements in the bulk crystal quality of CIGSe

太陽電池特性の向上

J-V curves



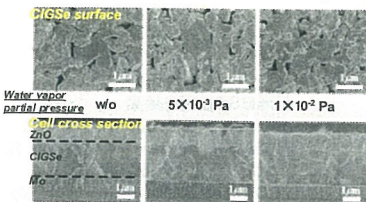
1.3 eVのワイドギャップCIGSeで変換効率18.1%を達成

18.1%-efficient cell with V_{oc} = 0.744V, J_{sc} = 32.4 mA/cm², F.F. = 0.752 was fabricated from a 1.30 eV-CIGSe (x=0.48) thin film grown in water vapor.

Previous record: S. Ishizuka, et al., Proc. 19th EU-PVSEC (2004) pp. 1729.

3. Morphology

SEM images of CIGSe surface & cell cross section



No significant changes

薄膜の電気的特性変化

p-CuInSe₂においては、大気中ポストアニール効果の有効性が知られている。

→ p型伝導性の促進と太陽電池性能の向上*

→ CuInSe₂に取り込まれた酸素はSe空孔に置換すると考えられる*

水蒸気を用いたCIGSe薄膜の電気的特性変化の原因として、酸素置換によるドナ性欠陥Se空孔の減少が一つの有力な要因

従来方法及び水導入製膜により作製したCIGSe (x=0.48) 太陽電池の特性パラメータ

*R. Hoek, et al., Sol. Cells 16, 479 (1983).
**S. Ito, et al., J. Cryst. Growth 29 (1982), 1061 (1989).

Summary

- 水蒸気を用いたCIGSe製膜技術を新開発
- 太陽電池の開放電圧、短絡電流密度双方の向上に成功
- 1.3 eVのワイドギャップCIGSeで変換効率18.1%を達成

Acknowledgement

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援のもと行われた。

関連資料: S. Ishizuka, et al., Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 44 (2005) L679.

S. Ishizuka, et al., Proceedings of the 20th EU-PVSEC (2005) (in press).

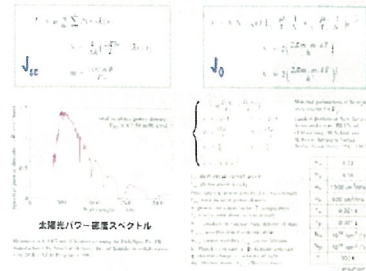
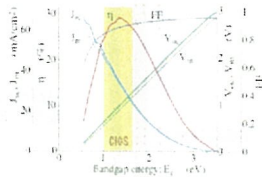
高開放電圧で高効率のCIGS太陽電池を得るための指標

山田昭政、松原浩司、櫻井啓一郎、石塚尚吾、反保衆志、柴田肇、仁木栄

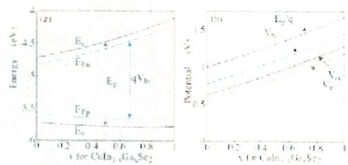
はじめに

- 単接合セルに最適な禁制帯幅は~1.4 eV.
 - $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ($x=0.65$) はその要請に応え得る.
 - しかし、 $x \sim 0.3$ までは x の増加に伴って効率は上がるが、0.65のかなり手前で効率は低下に転じる.
 - 効率低下は開放電圧が上がらないことによる.
- ↓
- 開放電圧上げ止まりの理由を考え、
 - 開放電圧の高いセルを得る材料選択の指針を得る.

禁制帯幅に対する太陽電池パラメタ

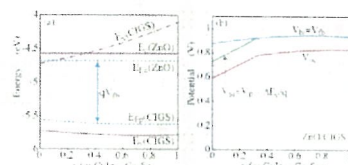


CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ ホモ接合のポテンシャル



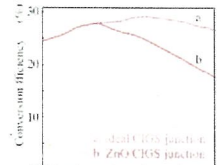
接合を有効に利用するには
良好なオームミック接触が必要.

ZnO/CIGS ヘテロ接合のポテンシャル



ZnO/CIGS 接合の開放電圧は決して 0.84 V を超えない.
 $V_{oc} = V_{oc0} + C(1-x) - 0.029x^2$

CIGS 太陽電池の変換効率の限界



ZnO 窓層・電極を用いる限り、
高 x CIGS 太陽電池の変換効率は必然的に低くなる.

バンドエネルギー

Band energy diagrams showing the relationship between band gap (E_g) and band potential (V_b) for $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$. The x-axis is x from 0 to 1.0. The y-axis is Energy (eV) from 3.5 to 4.5. The diagrams show the conduction band (E_c), valence band (E_v), and band gap (E_g) as a function of x .

Band potential V_b

Band potential diagrams showing the relationship between band potential (V_b) and x for $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$. The x-axis is x from 0 to 1.0. The y-axis is Potential (eV) from 3.5 to 4.5. The diagrams show the conduction band potential (V_{bc}) and valence band potential (V_{bv}) as a function of x .

$\beta < 0$ のとき

Energy band diagrams for $\beta < 0$ case. The diagrams show the conduction band (E_c), valence band (E_v), and band gap (E_g) as a function of x . The diagrams show the conduction band potential (V_{bc}) and valence band potential (V_{bv}) as a function of x .

正味の内部ポテンシャル: $V_b = V_{bc} + V_{bv} + V_{bi}$
 V_b は V_{bc} に寄与しない!

取り除かれた電子は再結合を誘起し得るが、正味はそうではない
→ 伝導帯のオフセットが価電子帯のそれより重要

$\beta > 0$ のとき

Energy band diagrams for $\beta > 0$ case. The diagrams show the conduction band (E_c), valence band (E_v), and band gap (E_g) as a function of x . The diagrams show the conduction band potential (V_{bc}) and valence band potential (V_{bv}) as a function of x .

正味の内部ポテンシャル: $V_b = V_{bc} + V_{bv} + V_{bi}$
 V_b は光電子に対してバリアとして働く.

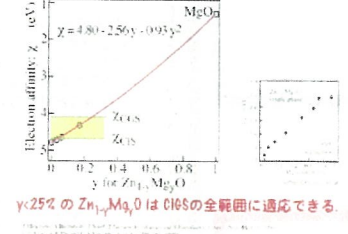
中間 (バッファ) 層の効果

本質的に、 V_b は誘導材料によって決まる
界面における正のオフセットはバリアをもたらす
中間層が薄いほど効果は軽減される
(界面における正のオフセットを誘起する材料は効果的)

高 V_{oc} CIGS 太陽電池を得る手段

- CIGS ホモ接合 + オーム性電極 (少なくとも一方は透明)
 ZnO ($\sim 4.55 \text{ eV}$) 電極は高 x CIGS に不十分
透明電極として仕事関数のもっと小さい材料を!
- 窓/CIGS ヘテロ接合 + オーム性電極 (窓の電極は透明)
 ZnO ($\sim 4.57 \text{ eV}$) は高 x CIGS の相手として適当でない
窓 (とバッファ) に電子親和力の小さい材料を!
 ZnO 透明電極はこの電子親和力の小さい窓に合わない
透明電極にも仕事関数の小さい材料を!

$\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_y\text{O}$ の電子親和力と禁制帯幅



まとめ

- $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ デバイスが ZnO 窓に依存する限り、
 V_{oc} は $x \sim 0.65$ から上げ止まり始め、0.84 V を超えない。
その結果、必然的に変換効率が低下する。
たとえ内蔵ホモ接合が形成されても、
 ZnO は高 x CIGS デバイスの透明電極として不向きである。
- $\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_y\text{O}$ は高 x CIGS デバイスの有望な窓材である
必要な電子親和力は $\chi < 2.5$ eV の範囲で得られる。
 ZnO より禁制帯幅が大きい。
適合する y の範囲で相分離しない
- 透明電極 (およびバッファ層) の材料も
適切な ZnO 窓に適合するものでなければならない。
ドーパされた ZnO がおそらく透明電極の役割を果たす [1]

フレキシブルガラス基板を用いたCu(In,Ga)Se₂太陽電池の作製

Production of Cu(In,Ga)Se₂ solar cell on a flexible glass substrate

○中村 聡史、櫻井 啓一郎*、山田 昭政*、松原 浩司*、石塚 尚吾*、木村 泰之、米村 実、桑森 心平、仁木 栄*、杉山 睦、中西 久幸
東京理科大学理工学部・産業技術総合研究所*

背景

・エネルギーの枯渇
・地球環境問題

クリーンエネルギー
原子力、地熱、水力、風力、太陽光

太陽電池の種類
・バルク太陽電池
・薄膜太陽電池

化合物半導体太陽電池の用途

・一般電力用
・モバイル用
・宇宙用

ソーダライムガラス(SLG)基板の特徴

・低コスト
・CIGSに近い熱膨張係数
・Naを含む

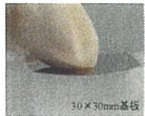
CIGS太陽電池の特徴
・優れた耐放射線特性
・光吸収係数が大きい
・光劣化がない

一般的なフレキシブル基板

・ステンレス
・ポリイミド

フレキシブルガラス基板の特徴

・成長時の高温に耐える
・透過率が高い
・SLGに近い特性



フレキシブル基板写真

本研究の目的

フレキシブル基板を用いて太陽電池を作製し、フレキシブルガラス基板の有用性を検討する。

実験方法

フレキシブルガラス基板を用いたCIGS太陽電池を作製し、SLG基板、SiO₂コーティングを施したSLG基板を用いた場合と比較した。

基板ごとに

(a)SLG
(b)Flexible glass
(c)Flexible glass + NaF

(d)SLG/SiO₂

(e)SLG/SiO₂ + NaF

として試料を作製した。

太陽電池各層は

Al電極を真空蒸着法

ZnO窓層をスパッタ法

CdS/バッファ層をCBD法

CIGS吸収層を多元蒸着法(三段階法)

NaF層を真空蒸着法

Mo裏面電極をスパッタ法

を用いて作製した。

作製した試料はXRD、EPMA、SEM、効率測定を行い評価した。



CIGS太陽電池微視図

まとめ

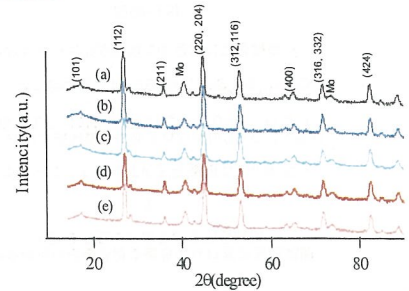
・フレキシブルガラス基板を用いてSLG基板を用いた場合とほぼ同等の効率が得られた。

今後の予定としては、利点を生かした応用例の模索を検討している。

実験結果

XRD結果

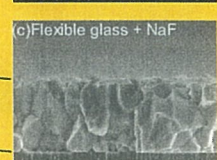
・試料間での組成(異相)、配向の違いは見られない



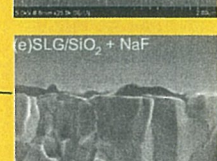
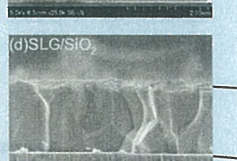
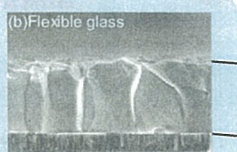
断面SEM画像

Naあり

・(a)(c)(e)は(b)(d)と比べ粒径が縮小傾向にある。
・EPMAでの結果と照らし合わせると粒径の変化はNaの効果によるものと考えられる。

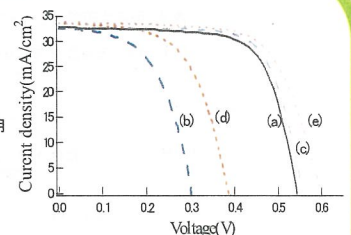


Naなし



効率測定結果およびI-V曲線

・NaF層を蒸着することにより、Voc、FFの向上が見られる。
・フレキシブル基板を用いた試料においてNaF層を蒸着することにより、SLG基板を用いた場合と同等の効率が得られた。



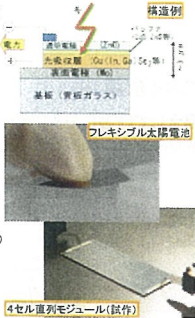
Sample name	Eff (%)	Voc(V)	Jsc (mA/cm ²)	FF
(a)SLG	12.48	0.543	32.7	0.703
(b)flexible glass	5.37	0.302	32.6	0.547
(c)flexible glass+NaF	13.10	0.557	32.7	0.720
(d)SLG/SiO ₂	7.72	0.388	33.6	0.592
(e)SLG/SiO ₂ +NaF	13.66	0.602	33.6	0.676

CIGS系太陽電池の低コスト化に向けた鉄(Fe)原料の導入

問い合わせ先 化合物薄膜チーム 櫻井啓一郎

背景:CIGS系太陽電池の特長と現状

- 薄型**
・素子の厚みは3μm程度で省資源
- 高性能**
・現時点で19%以上のエネルギー変換効率
・報告されている(AIST)に於いても18%以上
- フレキシブル**
・有機ガラス・金属箔・プラスチックなど、基板を選ばない(フレキシブルもOK)
- 量産に向く**
・大面積(平方m単位)の素子を連続生産可能
・インラインでセルを直列接続することも可能
・組成の調整も容易
- 光や放射線への耐性が高い**
・光や放射線による劣化が極めて少ない(自己回復する)
- さらに性能向上が期待できる
(高効率化&低コスト化)



本研究の目的と内容

- 主目的: CIGS系太陽電池の低コスト化**
- 最終目標: より安価な光吸収層材料の開発**
- 内容: 未開発の材料系 (CIGS:Fe) の作製および評価**
- ・原料の中では比較的高価なInの使用量を削減し、さらに価格を低減することを狙う
 - ・Feを追加することでCuGaSe₂の禁帯幅が減少する (Wasim et al. (Mater. Lett. 28 (1996) 231). =Feを用いることでInの使用量を削減できる可能性がある
 - ・しかし、実際にCIGS太陽電池に用いた報告は皆無
 - 実際にCIGS:Fe太陽電池を作製し、その可能性を探った。

実験手法

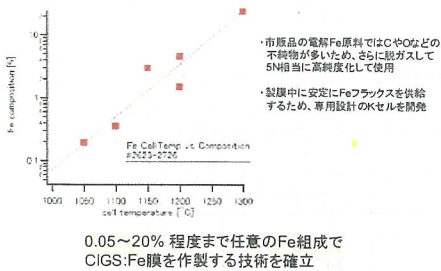
Standard "bracket" deposition process
 Stage1: 315°C, In,Ga,Fe,Se
 Stage2: Max 340-570°C, Cu,Se
 Stage3: In,Ga,Fe,Se
 Total deposition time = 50min / 1700nm
 Fe: 5N, K-coat / alumina crucible

Characterization
 SEM, EDS, EPMA/GD-Mass
 XRD, Absorbance
 Cell performance

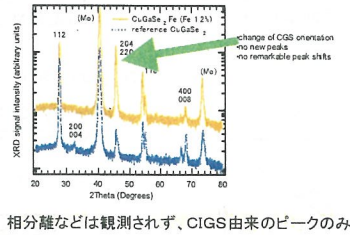
光吸収層制御装置概要 (MBE装置を利用)

通常のCIGS太陽電池ならば16~18%の効率が得られるプロセスを利用
 ・5N相当に高純度化したFe原料をCIGS膜に0.1~1.2%添加
 ・CIGS:Fe層単体および太陽電池の性能を評価

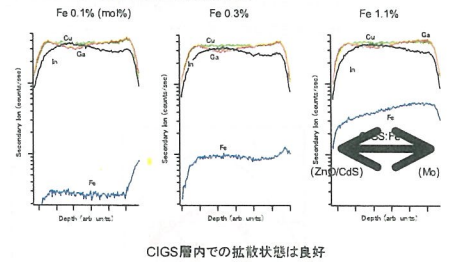
CIGS:Fe単膜の作製技術の確立



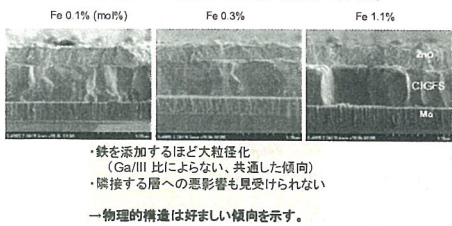
CIGS:Fe単膜のXRDによる評価



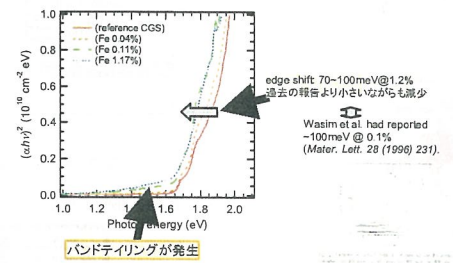
SIMSによる深さ方向組成分析



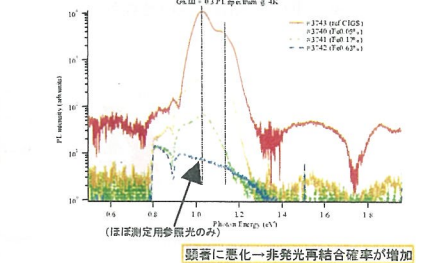
CIGS:Fe太陽電池の断面SEM像 (Ga/In = 0.54の例)



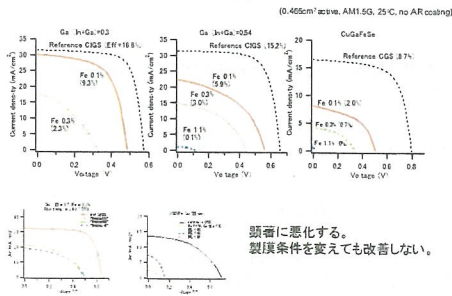
CIGS:Fe単膜の光吸収係数の変化



CIGS:Fe単膜のPL特性の変化



太陽電池試作結果: I-V出力特性



考察

- ・物理的構造は良好:
→全てのGa/In比において吸収層が大粒径化、境界が減少
- ・CIGS:Fe膜そのものの光物性が悪化:
→Feの割合(5N)が不足?
→それともFeの添加そのものによる影響?
→不純物の影響が否定できないため、原因の特定がまだ難しい
- ・CIGS:Feに合わせた電池構造の最適化にまで至っていない
→バンド構造等の不整合で性能低下している可能性がある

まとめ

- ・Cu(In,Ga)Se₂:Fe多結晶薄膜を添加する技術を確立した。
 - ・CIGS:Fe膜を用いた太陽電池を初めて作製し、その性能を評価した。
 - ・Fe添加によってCIGS光吸収層に下記のような変化が見られた。
 - ・膜の物理構造には大粒径化などの好ましい変化が見られた。
 - ・禁帯幅は減少したが、期待されたより変化量が少なかった。
 - ・膜の光物性が顕著に悪化した。これに伴い、太陽電池としての特性も悪化した。
- 今後の課題:
 ・さらに高純度なFe原料を用いて、不純物の影響とFeによる変化を切り分ける
 ・再結合中心やバンドテイリングの少ない膜の製法の確立
 ・太陽電池各部の材料や膜厚などの最適化
- 謝辞:
 本研究は、NEDOの支援を受けて行われた。

ZnMgO透明導電膜の作製と太陽電池への応用

化合物薄膜チーム

松原浩司, 山田昭政, 石塚尚吾, 櫻井啓一郎, 反保衆志, 中村聡史*, 米村実*, 中西久幸*, 仁木栄 (* 東京理科大)

1. はじめに

Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS)はCuInSe₂ (E_g = 1.00 eV)とCuGaSe₂ (E_g = 1.68 eV)の混晶で、Ga濃度を調整することで、バンドギャップを1.00~1.68 eVの間の任意の値に設定できる。一方、単接合太陽電池の吸収層のバンドギャップ(E_g)は1.4~1.5 eV付近が最適値で、高い効率を与えるといわれている。ところが、現在までのCIGS太陽電池の最高効率はE_gが約1.12 eVで与えられており、ワイドギャップのCIGSを用いても効率が向上しない[図1]。このとき吸収層のワイドギャップ化にもかかわらず、開放電圧V_{oc}の向上が見られず、E_g~1.3 eV以上ではV_{oc}はほぼ0.8 eVで飽和する[図2]。

この問題を解決するには、CIGSと窓層の間の伝導帯のバンドオフセット(COB)が重要であると考えられる[図3]。このCOBを制御するにはバンドギャップ制御されたZn_xMg_{1-x}O (ZMO) 窓層の利用が有効である [T. Minemoto *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 75, 121 (2003)]. 我々は、CIGSと窓層のCOBのみならず、窓層と透明導電膜の間のCOBも重要であると考えている [Yamada *et al.*, Appl. Phys. Lett., 85, 5607(2004)]. そこで、バンドギャップおよび電子親和力を制御することが可能なZMOに不純物をドーピングし、バンドギャップ制御可能な透明導電膜という新しい概念を提案し、膜を作製して、ワイドギャップCIGS太陽電池への応用を試みている。

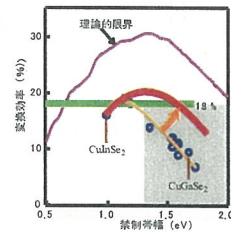


図1. 単接合太陽電池の理論効率

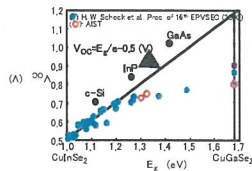


図2. CIGS太陽電池の開放電圧の飽和現象

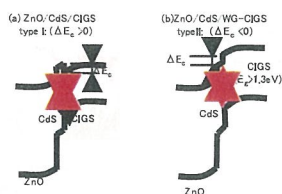


図3. 通常のZnOを用いたCIGS太陽電池のバンドラインアップ

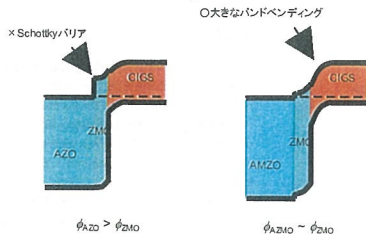


図4. ZMOを用いたワイドギャップCIGSのバンドラインアップ

AZO : AlドープZnO; AZMO : AlドープZMO

[1] K. Matsubara *et al.*, Appl. Phys. Lett. 85, 1374 (2004).
[2] K. Matsubara *et al.*, Proc. MRS Spring Meeting 2005 (in press).

2. パルスレーザー堆積法による成膜 [1]

ZnO,MgO,Al₂O₃の粉末を混合して作製したターゲットを用い、パルスレーザー堆積(PLD)法によりAZMOの単膜を作製し、特性を評価した。

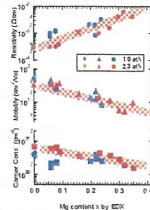
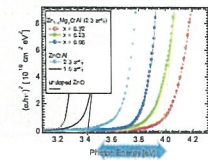


図5. PLDによるAZMOの電気特性のMg濃度依存性



Bandgap controllable range within $\rho < 10^{-3} \Omega \text{ cm}$

図6. Mg濃度によるバンドギャップの変化

3. スパッタリング法による成膜とCIGS太陽電池への応用 [2]

AlドープZnOとMgOターゲットを用いた多元同時スパッタリング法によりAZMO膜の作製を行ない、これをワイドギャップCIGS太陽電池に応用した。

表1. 多元同時スパッタで作製したAZMOの組成とシート抵抗

Sputtering power on MgO (W)	AZMO-1	AZMO-2	AZO
Mg (wt%)	0.09	0.04	0
Al (wt%)	2.0	2.7	3.0
R _s (Ωsq)	4820	42	8

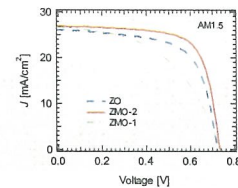
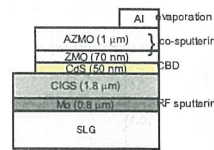


図7. AZMOを用いたCIGSセルの構造とJ-V特性

表2. AZMOを用いたワイドギャップCIGSセルの特性 (セルの平均値と分散)

sample ID	AZMO/ZMO-1	AZMO/ZMO-2	AZO/ZO
Mg content (wt%)	0.10	0.04	0.00
η (%)	7.25 ± 1.74	13.67 ± 0.26	12.12 ± 0.15
V _{oc} (V)	0.732 ± 0.001	0.729 ± 0.006	0.723 ± 0.003
J _{sc} (mA/cm²)	23.8 ± 3.0	26.9 ± 0.2	25.4 ± 0.4
FF	0.41 ± 0.05	0.70 ± 0.01	0.66 ± 0.01

4. まとめ

- ワイドギャップ制御された透明導電膜という新しい概念を提案し、ZMOにAlをドーピングすることでこれを実現した。
- PLDによりMg濃度 $\gamma = 0.30$ まで、異相の発生なく、透明導電膜を作製できた。
 - Mg濃度 $\gamma = 0.23$ 以下で抵抗率 $1 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ 以下、可視光平均透過率85%以上の膜を得た。
- スパッタリングで作製したZMOおよびAZMOを利用して、ワイドギャップCIGS太陽電池を作製した。
 - CdS層を用いているため、期待されたほどの効率向上は見られなかったが、通常のZnOを用いた場合と同等以上の性能を持つことが示された。

謝辞
本研究の一部は、経済産業省のもと、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)技術開発機構から委託され、実施したもので関係各位に感謝する。

反応性プラズマ蒸着法による酸化亜鉛透明導電膜の作製

岩田 拓也¹, 酒見 俊之², 粟井 清³, 山本 哲也³, 山田 昭政¹, ポールフォンス¹, 松原 浩司¹, 仁木 栄¹
産業技術総合研究所¹, 住友重機械工業², 高知工科大学³

圧力勾配型プラズマガンによる反応性プラズマ蒸着(Reactive Plasma Deposition: RPD)法は、低イオンダメージ、低温、大面積、高速成膜等の利点がある。(図1,2)このRPD法を用いて大面積高品質GaドーブZnO透明導電膜の作製に成功した。

GaドーブZnO薄膜はGa3%含有のZnOターゲットを原料としてガラス基板上に搬送成膜した。成膜基板温度は200°Cで酸化をアシストする酸素の流量は0~100SCCMの範囲で変化させた。この成膜条件での成膜速度は7~11 μm/hであるが最速24 μm/hの成膜速度を得た。薄膜中の酸素原子と亜鉛原子の比率は、図3のように精密に制御され、図4のように薄膜中の電子の移動度に影響を及ぼす。プラズマによる不純物混入を冷却機構によるトラップで低減することに成功し、図5に示す通り単結晶薄膜の値に迫る37cm²/Vsecの高移動度を達成した。これにより、200mm角ガラス基板上へのGaドーブZnO薄膜の成膜において膜厚780nmで可視光平均透過率85%以上、2.1×10⁻⁴Ωcmの低抵抗率を実現した。

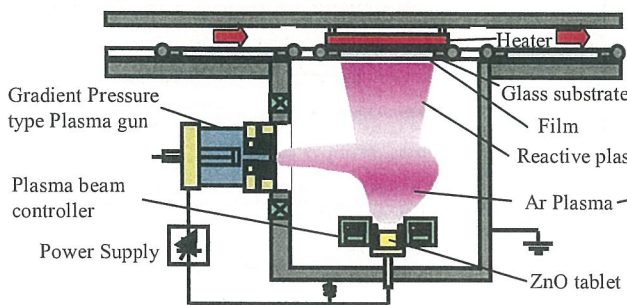


図1 反応性プラズマ蒸着法

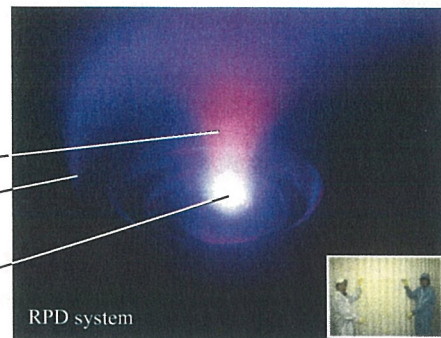


図2 酸化亜鉛成膜中の様

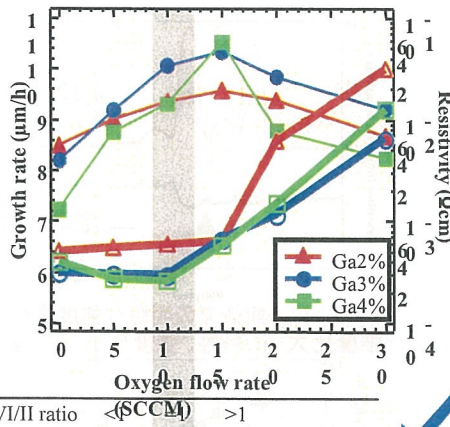


図3 酸素/亜鉛比率制御

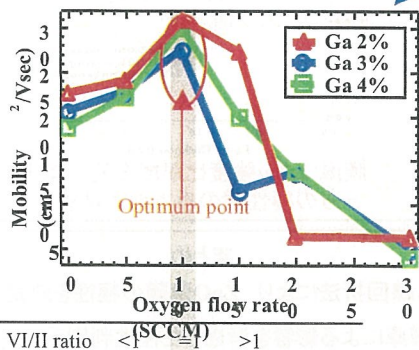


図4 酸素/亜鉛比率の性能依存性

Specifications of RPD

- Large area fabrication : > 200 × 200 mm
- Low growth temperature : < 200°C
- Extra high growth rate : 24 μm/h

Fine control of II-VI ratio in film

- High mobility : 37cm²/Vsec (comparable with single crystal film)
- Low resistivity : 2.1×10⁻⁴ Ωcm

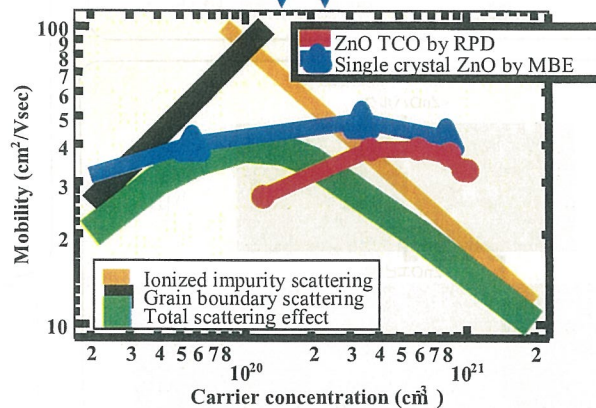


図5 単結晶薄膜に迫るRPD法作製の酸化亜鉛透明導電膜

【謝辞】本研究は経済産業省の提案公募型技術開発事業(地域新生コンソーシアム研究開発「透明導電酸化物薄膜の大面積化への技術開発、委託元: 四国経済産業局、管理法人: (財)四国産業・技術振興センター」)を受けて行われた。

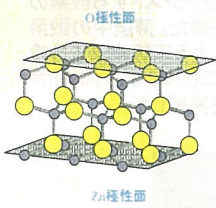
X線回折によるZnO薄膜の結晶極性決定

反保衆志、ポールフォンス、山田昭政、金慶國、柴田肇、松原浩司、仁木栄、産業技術総合研究所
吉川隼人、蟹江壽、東京理科大学

要約

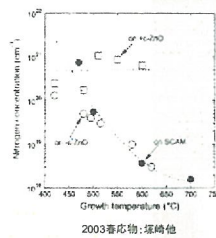
MBE法により成長した、+c面ZnOおよび-c面ZnO薄膜の極性決定を、通常のX線回折法により、簡便に、非破壊で、行った。ZnのKエッジ前後で+c面と-c面の明瞭な回折強度の違いを観測することができた。回折強度比は、ZnO薄膜の膜厚により単調減少するが、これを検量線として用いることにより、一方の極性の薄膜のみで極性を判定できることが分かった。極性判定の結果は、酸によるエッチングにより追確認を行った。

背景



極性により異なる性質

- ・電気分極(ピエゾ、自発)
- ・成長モード
- ・不純物の取り込み



結晶の極性により不純物の取り込み等、さまざまな特性が大きく異なる！！

結晶極性の簡便な判定方法が必要

(従来は、CBED、CAISSS、SPM等により極性を判別)

理論

X線の回折強度 $I(hkl)$ は単純には以下の構造因子 $F(hkl)$ を用いて表される。

$$F(hkl) = \sum_j f_j \exp[2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j)]$$

$$I(hkl) = F(hkl) \times F^*(hkl)$$

この場合 f_j は f_0 となり、フーリエ変換が成り立つ。

ところが、用いるX線が特定の元素の吸収線に近い場合、原子散乱因子の補正が必要。

$$F(hkl) = \sum_j (f_0 + \Delta f' + i\Delta f'') \exp[2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j)]$$

この場合必ずしも、フーリエ変換が成り立たない。
今回はZn K-edgeを用いるのでこの補正が適用できる。

実際のZnO極性面に上式を適用する。
Zn: (0,0,0) and (1/2, 2/3, 1/2)
O: (0,0,0) and (1/3, 2/3, 1/2)

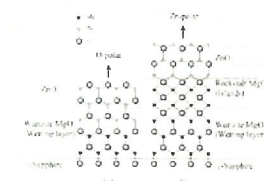
$$D(00l) = FF^*(00l) - FF^*(00\bar{l}) = \begin{cases} 0 & (l \text{ is odd}) \\ 16 \sin^2(2\pi ul) (f_{0z}'^2 f_{0z}''^2 - f_{0z}''^2 f_{0z}'^2) & (l \text{ is even}) \end{cases}$$

ワルツ結構造において理想的な4面体結合をとると $u=3/8$ であり、 $l=4n$ で $D=0$ となる。
ZnOにおいては $u=3/8$ であり、 $l=3/8$ であるので $D(004) \neq 0$ であるが 0 に近い値として $2z$ を選んだ。
実際の解析には以下の式を用いた。

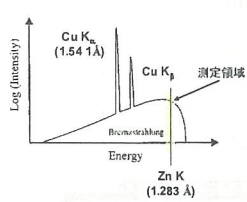
$$\frac{I(002)}{I(00\bar{2})} = \frac{FF^*(002)}{FF^*(00\bar{2})} = \frac{(a f_{0z}'^2 + b f_{0z}''^2) + (-b f_{0z}'^2 + a f_{0z}''^2)}{(a f_{0z}'^2 - b f_{0z}''^2) + (b f_{0z}'^2 + a f_{0z}''^2)}$$

$$a = \cos(4\pi u) \text{ and } b = \sin(4\pi u)$$

実験方法



- ・RS-MBE法により製膜
- ・中間MgOバッファ層厚によりZnOの極性制御

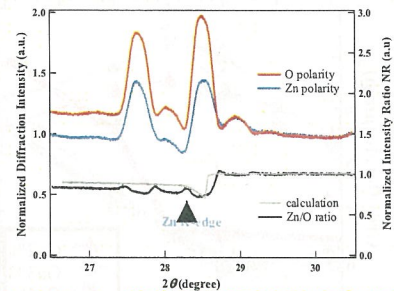


- ・Cu陰極管からの連続X線
- ・ $\theta-2\theta$ 対称配置

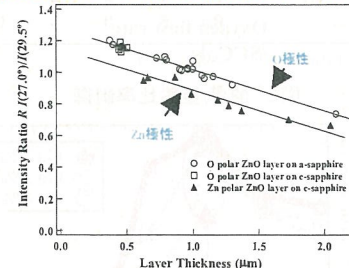
$$2d \sin \theta = \lambda$$

ZnO(002) 回折角 連続波長のX線

X線回折実験



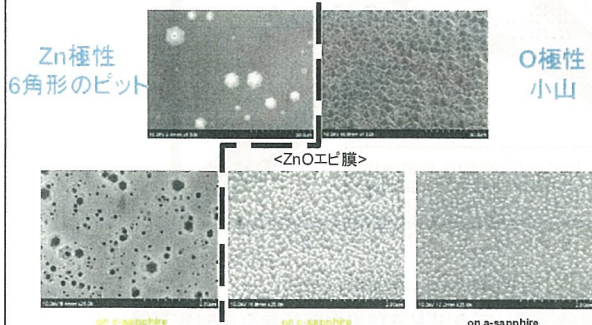
ZnのK-edge前後での明瞭な強度変化を確認
(強度比大→O極性、強度比小→Zn極性)



膜厚により強度比が線形的に減少
一方の極性膜のみで判定可能

エッチング実験

<ZnOバルク>



エッチングにより極性の追確認

まとめ

- ・X線回折法により、ZnO薄膜の極性を決定した。
- ・膜厚による影響を考慮した極性判別手法を確立した。
- ・エッチングによる極性面の追確認を行った。

酸化亜鉛透明電極による青色LEDの取り出し効率2倍化

反保衆志、松原浩司、山田昭政、仁木栄、産業技術総合研究所
 田村謙太郎、中原 健、高須 秀視、ローム㈱

要約

青色LEDの発光効率向上を目指し、Ni/Au金属電極をZnO:Ga透明電極で置き換えを試みた。その結果、取り出し効率は2倍も向上させることが出来た。ZnO:GaはLEDへのダメージを最小限に抑えるため、MBE法により製膜し、精密にキャリア濃度の制御をおこなった。酸化亜鉛ZnOは透明導電膜として、通常用いられるITOに比べて非常に安価であり、プロセスも簡便になるため青色LEDの電極材として非常に有望である。

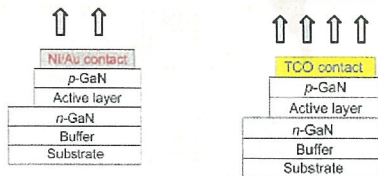
背景

LEDの効率

$$\eta = \eta_v \cdot \eta_i \cdot \eta_{ext}$$

内部量子効率
→ 転位の低減等

取り出し効率
改善の余地大



発光効率の更なる高効率化のための取り出し効率 η_{ext} の向上

ZnO:Gaを透明電極として提案

実験方法

製膜方法

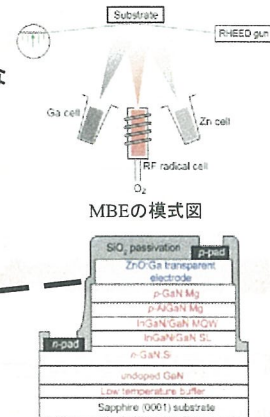
下地のLEDにダメージ与えない
キャリア濃度の精密制御

MBE法により製膜

デバイス構造

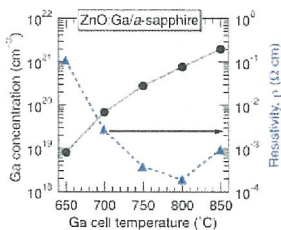
MBEにより作製

MOCVD
により作製

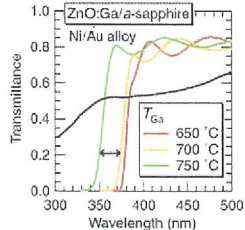


LEDの模式図

結果 (ZnO:Gaの特性)



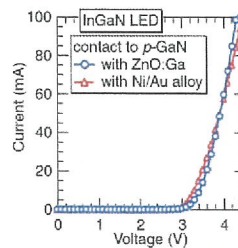
Gaセル温度と電気特性の関係



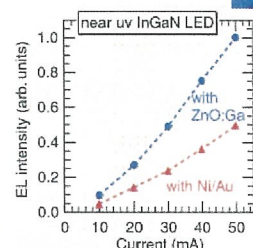
ZnO:GaとNi/Au電極の透過率

- ・Gaセル温度の制御により精密にキャリア濃度を制御可能
- ・Ni/Au金属電極に比べ透明性の向上

結果 (取り出し効率)



I-V特性の比較



発光効率の比較

- ・ZnO:Gaを透明電極として用いることにより
- ・電気特性を損なわずに取り出し効率の2倍化

まとめ

MBEで製膜したZnO:GaをLEDの透明電極として用いることにより取り出し効率2倍化を達成
 ZnO製膜後の熱処理は不要であり、プロセスが簡便

	ZnO:Ga	ITO	Ni/Au alloy
transparency	high	high	low
ohmic contact to p-GaN	Au deposition	Rapid thermal annealing	Rapid thermal annealing
Extraction efficiency	> 2		1

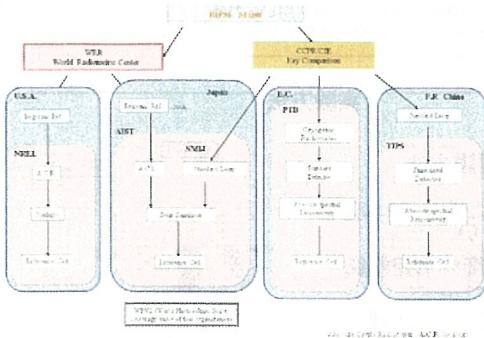
太陽電池のトレーサビリティ技術開発

一次標準セルの校正体系

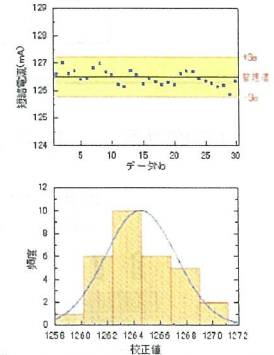
高精度な校正トレーサビリティ体系を構築・維持・発展
 各国校正機関との技能比較(WPVS)による国際整合
 ISO/IEC17025 認定取得 (2007年7月目標)

研究担当者 猪狩真一
 スタッフ 永井武彦, 高久清,
 鈴木真由美, 伊藤美智子

WPVS Qualified Lab.とトレーサビリティ体系



校正の管理状態

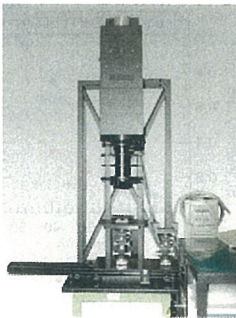


高精度・高安定校正システムの開発

一次校正の不確かさ: ±1%を目標

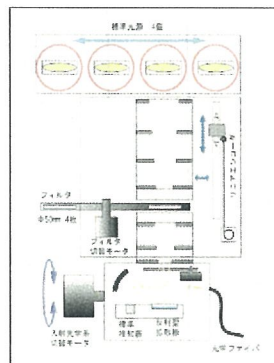
高平行度ソーラシミュレータ

- ・光線平行度 : ± 0.52°
- ・視野角 : 5° (A.C.R.Iに完全適合)
- 世界で初めて
- ・絶対放射計での直接測定に適合
- ・WRR・トレースな屋内校正を実現



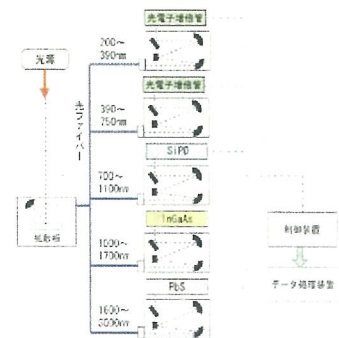
標準電球群管理システム

- ・4本の標準電球を群管理(同時測定)
- ・不確かさの低減・管理状態の安定化 (2σ, ±0.3%以下) が目標



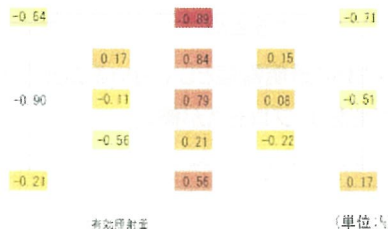
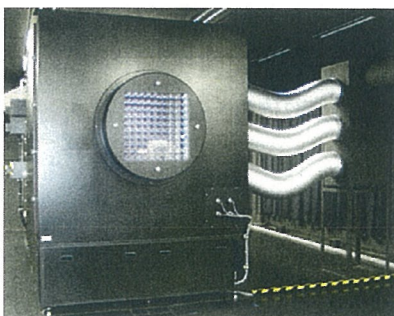
絶対分光放射計

- ・測定時間短縮(最短2min)
- ・測定波長範囲拡大(200nm~3000nm)
- ・分光応答度標準との比較



S系標準太陽電池モジュール校正技術

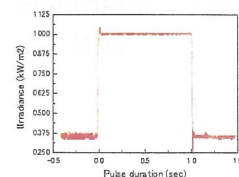
ロングパルス・大照射面で均一性±1%を達成: 世界初



均一性 (%)

有効照射面: 1.1m角 × 1.9m角

- ・校正サービスを予定
- ・世界に先駆け、薄膜系まで適用可能
- ・JISの作成に活用



ロングパルス

パルス発光幅: 最長1秒

各種太陽電池の高精度な性能評価技術 (1)

研究開発の目的

各種太陽電池セル・モジュールの材料・構造に基づく最適な性能評価技術を明らかにする。
 ・各種太陽電池の材料・構造に基づく特有な特性が、変換効率等の性能評価に及ぼす影響の定量的な把握。
 ・各種太陽電池に適した高精度な性能評価技術の開発。
 ・国際的整合性の確保。
 ・標準化への寄与。

世界の太陽光発電をリードする日本
本格的な普及・国際的競争



図1 太陽電池性能評価技術の重要性。

各種太陽電池

バルク結晶Si (従来型)
 単結晶、多結晶
 バルク結晶Si (新製)
 ヘキサ層型、薄型
 線状Si、新ドーパント等。
 CIS系化合物半導体
 異方性化合物半導体
 多接合
 有機Si、化合物半導体等。
 元素有機
 有機薄膜

IV特性

デバイス温度制御/計測
 IVスイープ時間/方向
 光照射位置、照度依存/温度依存
 要素セル分離測定(多接合)
 (ソーラシミュレータ)
 均一性、安定性、スペクトル合致度
 スペクトル再現性(多接合)
 定常光/ロングパルス/ショートパルス
 分光放射照度測定
分光感度特性
 要素セル分離測定(多接合)
 モジュールの分光感度特性評価技術

図2 各種太陽電池評価技術。

高近似ソーラシミュレータ

多様な材料・構造の太陽電池セル・モジュールの性能を高精度に評価するために、通常のクラスAソーラシミュレータに要求される性能に加え、更に高いスペクトル近似度、広い波長範囲、およびスペクトルの可変性を持つ高性能ソーラシミュレータ。

超高近似ソーラシミュレータ

(WHSS: wide-range high-fidelity solar simulator)

- ・定常光
- ・セル用 (照射面積12cm×12cm)
- ・3光源 Xe (350-750nm), Ha1 (750-850nm), Ha2 (850-1900nm)
- ・安定性: ±0.1%/5 hours (typical)

大面積高近似ソーラシミュレータ

(HFSS: high-fidelity solar simulator)

- ・定常光+メカニカルシャッター
- ・セル/モジュール用 (照射面積120cm×100cm)
- ・2光源 Xe (350-750nm)×9灯, Ha (750-1300nm)×32灯
- ・安定性: ±0.2%/5 hours (typical)



図3 WHSSの外観。



図4 HFSSの外観。

350~1900nmの広い波長範囲で基準太陽
光スペクトルに高近似。

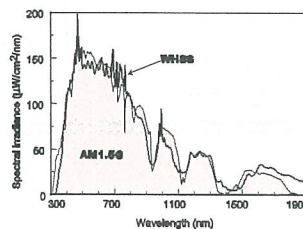


図5 WHSSの分光放射照度スペクトルの一例。

3種類の光源が異なる波長域を分担。
ベースの高近似に加え、サンプル特性に
合わせた高精度なスペクトル制御。

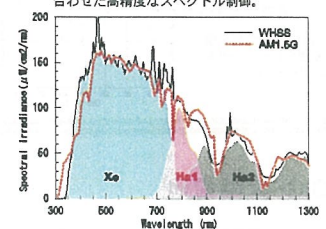


図6 WHSSの分光放射照度スペクトルと各ランプの波長領域。

複数のXe, Haランプの光を、インテグレート光学系で照射。同じ光軸→スペクトルの空間均一性に優れる

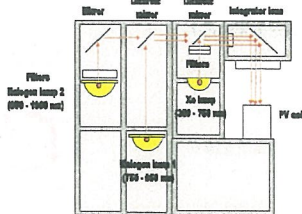


図7 WHSSの基本光学設計。

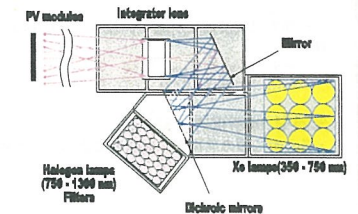


図8 HFSSの基本光学設計。

多接合太陽電池評価技術

高効率・高信頼性が可能な構造として研究開発が盛んな多接合太陽電池の性能評価に必要な技術を開発する。

多接合太陽電池は通常、同一基板上に複数の要素セルが一体となって直列接続された構造をもち、すべての要素セルの特性に影響される。通常の単接合セルよりも高度な評価技術が要求される。

各要素セルの分光感度分離測定

- ・適切なカラーバイアス光、バイアス電圧の印加により、各要素セルの分光感度を分離測定。
- ・測定値と、各要素セルの真の分光感度およびIV特性の関係を定量的に解明→分光感度測定値の補正による高精度化を可能とした。

高近似ソーラシミュレータによる測定

- ・HFSS, WHSSによる高近似スペクトルに加え、各サンプルに合わせて更にスペクトルを調整し、各要素セルの光電流値を、基準太陽光下の値に正確に一致させる。

各要素セルのIV特性分離技術

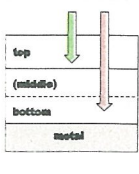


図9 多接合太陽電池構造の概念図。

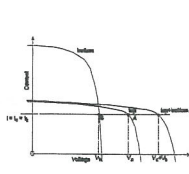


図10 多接合太陽電池と要素セルのIV特性。

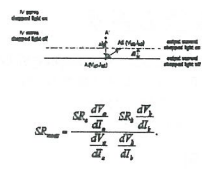


図11 多接合太陽電池と要素セルの分光感度特性。

各要素セルの分光感度分離測定技術が重要

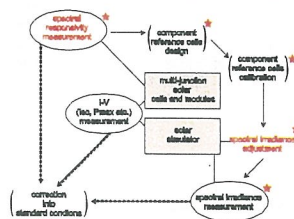


図12 多接合太陽電池性能評価のフロー図。

要素セルの出力電流のバランスが、多接合太陽電池の性能に複雑な影響を及ぼす。

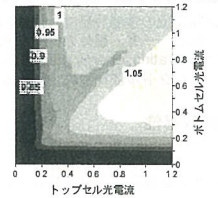


図13 多接合太陽電池の曲線因子(FF)の各要素セルの電流バランスによる変化の一例。(a-Si/薄膜結晶Si)。

分光感度測定値には、他の要素セルの寄与が不可避→補正法を開発し、高精度な分光感度評価を可能とした。

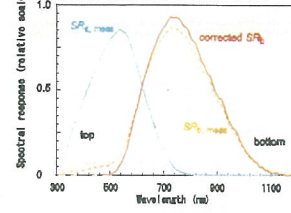


図14 a-Si/薄膜結晶Si太陽電池における、各要素セルの分光感度の測定値と補正值。

多接合太陽電池の材質、構造にかかわらず適用できる。

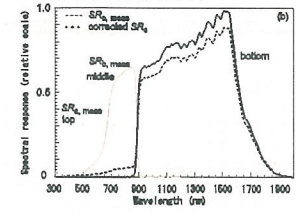


図15 InGaP/InGaAs/Ge太陽電池における、各要素セルの分光感度の測定値と補正值。

各種太陽電池の高精度な性能評価技術 (2)

色素増感太陽電池

色素増感太陽電池は、従来の半導体pn接合を基本とした太陽電池とは発電原理が異なる。特に入射光およびバイアス電圧が変化した場合の時間的応答が遅いことが特徴。これが原因で特殊な性能評価技術が必要。

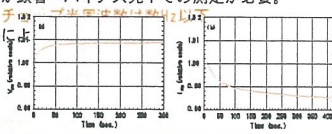
IV特性

- ・ I_{sc} , V_{oc} の過渡応答は数分のオーダー。
- ・ スキャン方向により、見掛けのIV特性が異なる。
- ・ 正確なIV特性評価に約25秒、もしくはそれ以上が必要。
- ・ 照度依存性は、「出力電流 = 暗電流 + 電圧に依存した光電流」に従う。

分光感度特性

- ・ バイアス光依存性が顕著 → バイアス光下での測定が必要。
- ・ AC測定の場合、チョップ周波数による影響が大きい。
- ・ 応答速度は光波長による。

図1 色素増感太陽電池の I_{sc} , V_{oc} 過渡応答の一例。



色素増感太陽電池は応答速度が遅い → IV測定に25秒以上必要な場合あり、スキャン方向依存の確認が必要。

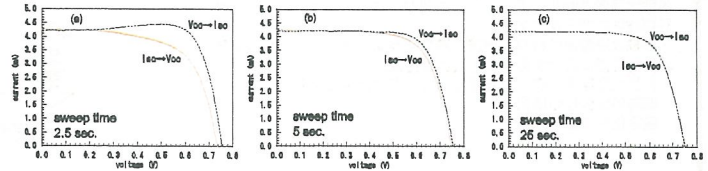


図2 色素増感太陽電池のIV特性評価に及ぼすIVスイープ方向・速度の影響の一例。

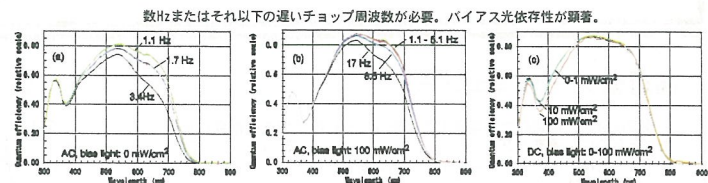


図3 色素増感太陽電池の分光感度特性評価に及ぼす、チョップ周波数・バイアス光の影響の一例。

CIGS太陽電池

CIGS太陽電池は、光照射により変換率が上昇する特徴で知られる。その程度はバッファ層や発電層の構造・組成で異なることが予想される。正確な性能評価には、光照射効果を定量的に把握することが必須。

光照射効果の概要

- ・ 数十分〜数時間の光照射で、主にFFが上昇することにより、変換効率が上昇。
- ・ 暗所では変換効率が低下するが、その後の光照射で変換効率が再上昇。
- ・ 光照射効果の程度は、材質・構造により大きく異なる。光照射効果がほとんど見られないサンプルもある。

光照射/暗所保存の繰り返し

- ・ ある中心値の前後で、光照射による効率上昇と暗所での低下を繰り返す。

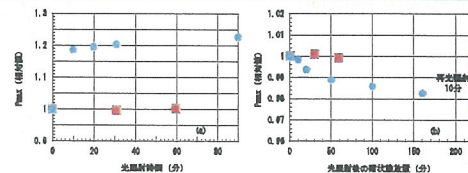


図4 構造の異なるCIGS太陽電池の光照射効果の一例

光照射効果の程度は、CIGS太陽電池の材料・構造等に大きく依存する。

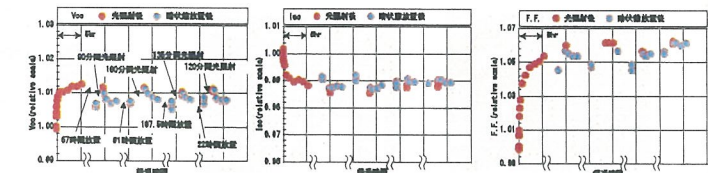


図5 CIGS太陽電池の光照射/暗所保存繰り返しによる性能変化の一例。

様々な条件下での太陽電池特性

太陽電池の性能評価は、通常STC (AM1.5G, 100 mW/cm², 25°C)で行われる。一方、屋外の様々な気象条件の下での実際の性能を把握 (power rating, energy rating) するためには、温度依存性、照度依存性、スペクトル依存性の定量化が重要。

照度依存性

- ・ 多様な種類の太陽電池において、IV特性の照度依存性は、「出力電流 = 暗電流 + 電圧に依存した光電流」で精度よく近似される。
- ・ バルク結晶Si, 薄膜結晶Si, a-Si, CdTe, Si系多接合, 色素増感, etc.

温度依存性

- ・ IV特性の温度依存性は、 I_{sc} が同じ場合「IV特性の電圧方向への直線補間」で精度良く近似される。
- ・ バルク結晶Si, a-Si, Si系多接合で確認。

スペクトル依存性

- ・ バルク結晶Si: スペクトル依存性は確認されていない。
- ・ a-Si: スペクトル依存性あり、デバイス構造により差がある。

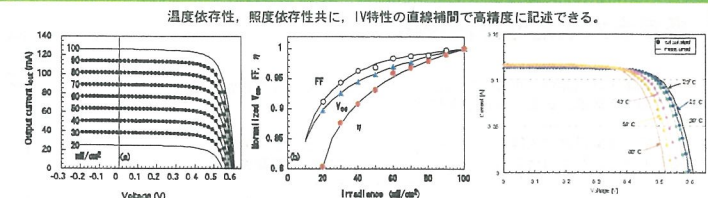


図6 結晶Si太陽電池のIV特性の照度依存性および温度依存性の一例。

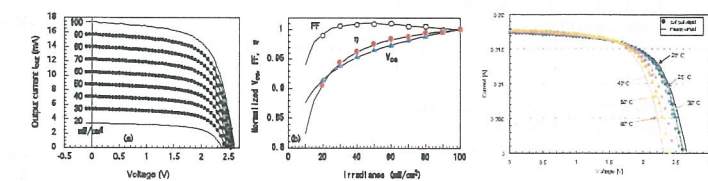


図7 a-Si太陽電池のIV特性の照度依存性および温度依存性の一例。

まとめ

- 各種太陽電池セル・モジュールの材料・構造に基づく最適な性能評価技術を開発。
- ・ 高近似ソーラシミュレータ: 高いスペクトル近似度と可変性を両立。
 - ・ 多接合太陽電池評価技術: 各要素セルの分離測定・補正技術。ソーラシミュレータスペクトルの調整。
 - ・ 色素増感太陽電池評価技術: 遅い時定数等特有の性質に適合した性能評価技術。
 - ・ CIGS太陽電池評価技術: 光照射効果の把握。
 - ・ 温度、照度依存性等: IV特性の内挿(外挿)による高精度な近似。
 - ・ 約80サンプルの新型太陽電池等の性能評価を実施(外部サンプル: NEDO開発品等)
- 本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から受託して実施したもので、関係各位に感謝する。

今後の課題

セル・モジュール評価技術開発

- ・ モジュール分光感度評価技術。
- ・ より多様なセル・モジュール構造、新型太陽電池に対応する評価技術。
- ・ 大面積セル、モジュール評価技術

応用

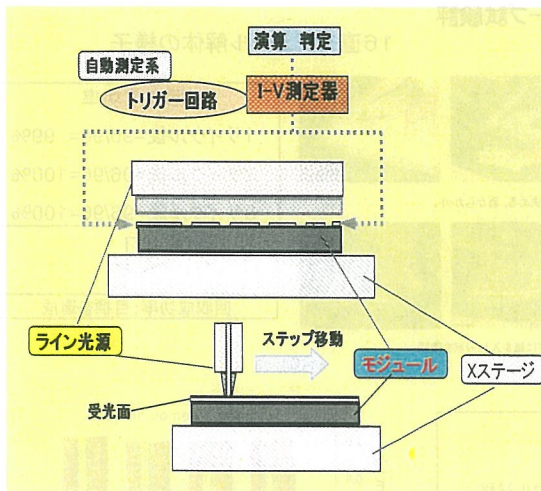
- ・ energy rating, power ratingへの応用。
- ・ 標準化の推進。

性能診断装置の開発 およびモジュール評価事例

柳澤 武 小島 猛 評価・システムチーム

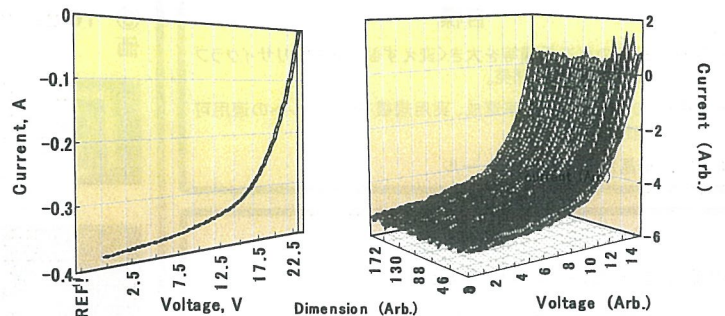
ライン光励起I-V測定による集積型薄膜モジュール性能の面内均一性や局所的な異常の検出・診断

品質スクリーニング検査
局部劣化・故障の評価解析

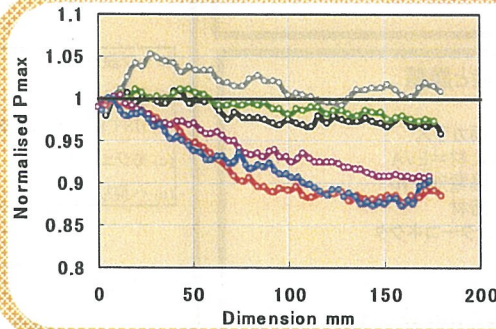


測定法

薄膜モジュール面にライン状の光を全受光面にわたって移動し、ステップ毎に光I-V特性を測定することによって、求められたパラメータの面内分布情報から、性能均一性及び局所的な異常等を診断評価する手法

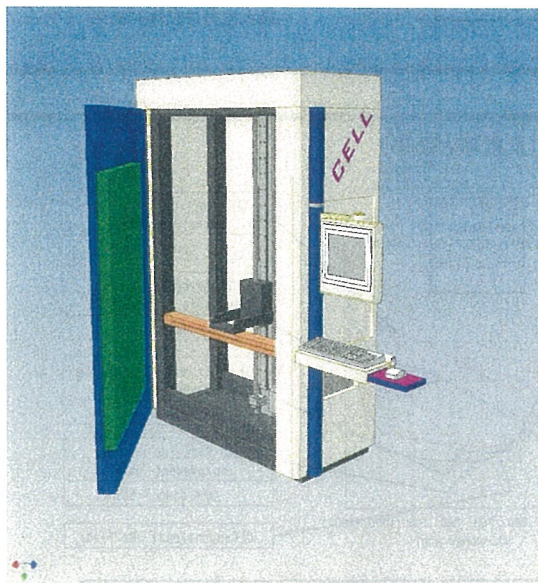


ライン光I-V測定から得られる基本情報



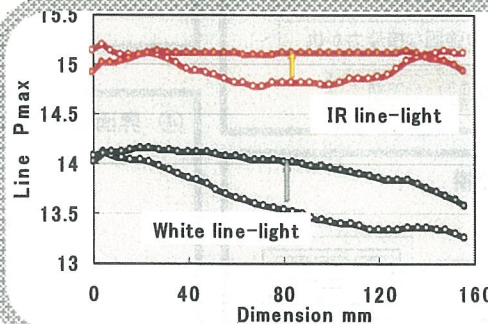
P_{max}の面内分布(CIGS)

3mm幅光、60ライン測定
白色LEDアレイ光源
結果
不均一幅の判定: 3%~13%
局所的な異常の特定



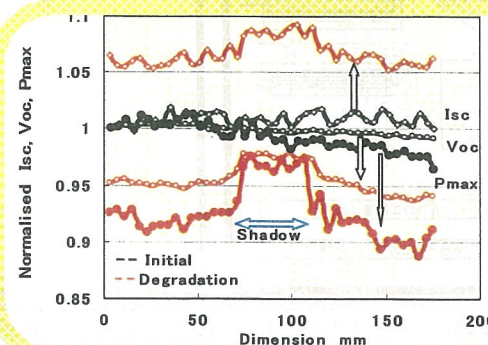
実用化評価・診断装置

1×1.2mサイズまでのモジュールに対応
高速・自動測定・評価・診断



光照射挙動例

2-SUN, 室温, 200 h
4mm幅 IR光・White光
40ライン測定
モジュールP_{max}: 10%向.
結果
分布の均一化
ライン光波長



光劣化の評価例

2-SUN, 室温, 300 h
モジュール受光面一部 遮光
3mm幅光、60ライン測定
結果
照射部と遮光部の差異判別
局部異常の挙動判別

リサイクルブルモジュールの開発

背景

現在、市販されている太陽電池モジュールは、信頼性と耐久性のある頑強な作りとするために、優れた耐候性・耐湿性を有するEVAが使用されています。しかしながら、これはリサイクルを意識せずに製造されているため、EVAの強固な接着力が仇となり、太陽電池モジュールから太陽電池セルを取り出すことを困難にしています。その結果、太陽電池セルを回収しようとする、薬品処理や熱処理が必要であり、経済的にもエネルギー的にも望ましいプロセスとは言えません。そこで、リサイクルに対応できる新たな構造・機能を持った太陽電池モジュールの開発を行っています。

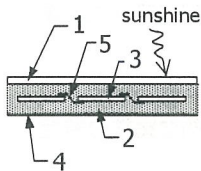
目標

- ★目的: 既存の製造設備等を大きく変えず製造可能なリサイクルブルモジュールの開発。
- ★目標: 90%以上の回収率達成、実用規模モジュールへの適用可能性の実証。
- ★対象: 結晶系太陽電池モジュール

主な課題

- ・信頼性: 追加したフィルムによる影響が不明。
→信頼性の確認が必要→③
- ・効率: 追加したフィルムにより、セルに到達する光が減少。
→効率低下の低減→④

① 従来型モジュールの構造と課題



- 1: 表面ガラス
- 2: 封止材=EVA
- 3: 太陽電池セル
- 4: 裏面材
- 5: インターコネクタ

EVA: 耐候性・耐湿性に優れる → 封止材として使用

リサイクルを行う場合、その強固な接着力が仇

EVAの除去(セルの回収)が課題

③ 16セルでのループ試験評価

16直モジュール解体の様子



表側からカット位置を決める。裏からカット。



溶着部を融し、セル下に紙を入れ分離を確認。

回収成功率

- 1サイクル後=96/96= 99%
- 2サイクル後=96/96=100%
- 3サイクル後=96/96=100%



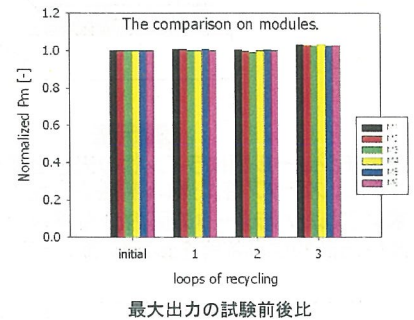
回収成功率: 目標を達成

ループ試験

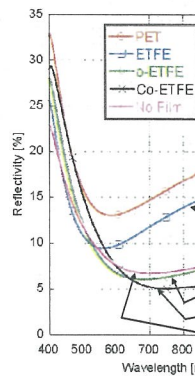
- (a) モジュール組立
- (b) JIS C8917温湿度サイクル試験
- (c) モジュール解体
- (a) へ戻り、繰り返す



温湿度サイクル試験での信頼性OK



④ 界面条件の改善(反射率と効率)

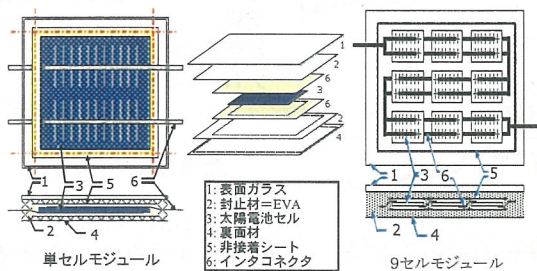


- (1) Confirmation of the principle (2001)
η* down (-20%)
- (2) Screening & most suitable film (2002)
η* down -13%
- (3) Oil, optical coupling improvement (2003)
η* down (-7%)
- (4) Plastics coating improvement (2004)
η* down -6%
- (0) Conventional (No Film)

フィルムのみでは対従来型比13%減

→樹脂膜塗布により対従来型比6%減と大幅に効率向上

② 二重封止型モジュールの構造



- 1: 表面ガラス
- 2: 封止材=EVA
- 3: 太陽電池セル
- 4: 裏面材
- 5: 非接着シート
- 6: インタコネクタ

太陽電池セルの両側に非接着シート

製造時の工程増はわずか

非接着シートはセルよりわずかに大きく、解体時は裏面からこの切り代を切削する。

目標は達成。平成17(最終)年度は、耐久性の詳細検討と経済性・LCA評価を実施中。

産総研メガワット級太陽光発電設備における運転性能評価

設備概要

つくばセンター太陽光発電設備は、既存設備約160kWに、平成14年度補正予算「分散エネルギー供給システム実証プラント導入のための高度化改修事業」の一環として新規設備84kWを追加したものである。太陽光発電機器は、4エリア16分電盤の低圧配電系統に連系している。太陽電池モジュールの全枚数は約5,600枚、パワーコンディショナの総台数は211台である。

実証運転の分析のため、総合計測は、主に全体発電量の評価と構内電力需要のピークカット効果の検証のために用いている。個体計測は、211台のシステムの中から80台を選んで、太陽光発電機器単体の固有性能(ベンチマーク)を評価するためにを行っている。初期不良等の信頼性評価のためには、運転開始から1年間、3人体制の巡回を1週間毎に全システムに対して行った。

●つくばセンター太陽光発電設備の配置図



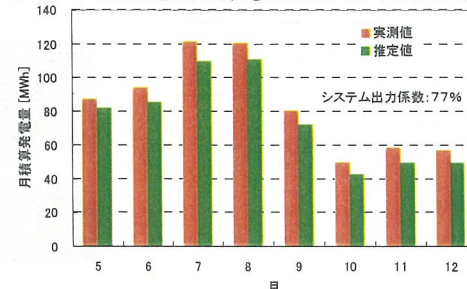
No.	Location	PV Type	Power (kW)	Module Type	Power (kW)	Module Type
Solar Photovoltaic System						
1	AIT Building Conference Room	mono-cr-Si	14.0	Polysilicon	41.0	2004
Building Integrated Photovoltaic System						
2	Building Maintenance and Information Technology Collaborative Research Center	mono-cr-Si	41.0	Mitsubishi Energy Systems	41.0	2004
3	Central 10 West Annex	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
Solar Photovoltaic Pavilion						
4	Central 2	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
5	Central 3	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
6	Central 4	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
7	Central 5	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
8	Central 6	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
9	Central 7	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
10	Central 8	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
11	Central 9	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
12	Central 11	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
Solar Photovoltaic Pavilion						
13	Central 2 2F Wing	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
14	Central 2 2F Wing	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
15	Central 2 2F Wing	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
16	AIT Central Energy Center	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
Solar Photovoltaic System on Roof						
17	Central 1	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
18	Central 2 West Annex	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
19	Central 3	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
20	Central 4	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
21	Central 5	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
22	Central 6	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
23	Central 7	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
24	Central 8	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
25	Central 9	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004
26	Central 11	mono-cr-Si	11.0	Polysilicon	11.0	2004

発電性能

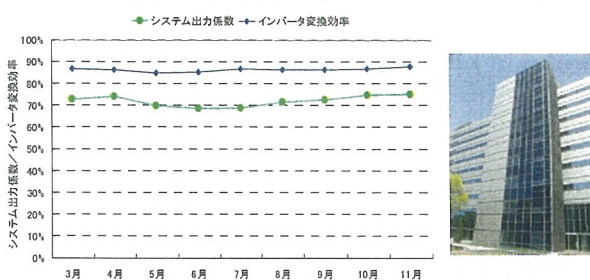
つくばセンター太陽光発電設備は、システム出力係数が2004年中は77%となり、国内平均値(住宅システムで約72%)と比べて高い傾向を示した。これは、200台を超える分散形システム構成が効果的に性能を発揮し、日陰やシステム故障等の不具合が小ユニット(主に4kW)に限定されたためである。設置場所別の発電性能としては、屋上に置かれたオープン架台式のシステムがもっとも良く、反対に、地上に置かれたエネルギーセンター東西面のシステムは、方角および構造上の日陰の影響から発電量が平均から2割程度少ない。もっとも発電量が少ないのは建物一体型の太陽光発電設備であり、本部情報棟システムについてはカーテンウォールパネルの方角が原因であるが、システム出力係数は70%超と性能面で遜色はない。

産総研つくばセンターにおける電力需要は、夏季に昼夜間格差が1.5倍あり、太陽光発電設備においてピークカットを行うことが期待される。昨夏の実績として、13、14台の電力需要のピーク時間帯が太陽光発電導入の効果として16時台にシフトしたこと、太陽光発電出力の期待できない16時台における電力需要がピークカット効果を決めた。

●つくばセンター太陽光発電設備の月間発電量の実測とシミュレーション値の比較



●つくば本部・情報技術共同研究棟の発電効率



●つくばセンターに増設した太陽光発電機器の一覧

太陽電池モジュール	パワーコンディショナ
シャープ NT-132BJ	シャープ JH-L304
シャープ NB-150AM	シャープ JH-M303
京セラ SPG1-67-04	京セラ PVH-402
三菱電機 P50M-126F	三菱電機 PV-P505G2
三洋電機 HIP-180B2	三洋電機 SSI-TL40A2
ジェルソーラ RK148/A-HP	三菱重工 SPV400
三菱電機 MA100J1-YF-01	オムロン KP40F
エムエスケイ LPS125-180JH	オムロン KP40F

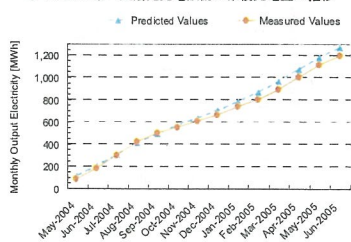
●太陽光発電設備の計測システム一覧

対象	計測項目
総合計測 4事業所	発電電力、需要電力、系統電圧、日射量、気温、等
特別計測 12台 (3-5地区)	発電電力、太陽電池電圧・電流、高調波電圧、モジュール表面温度、等
個体計測 80台	発電電力、太陽電池電圧・電流、連系点電圧
全数検査 211台	電圧電流値、外観目視

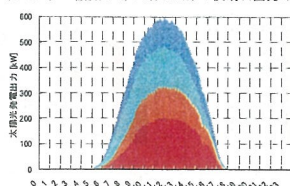
発電実績

2004年4月から現在(2005年6月末)までに、つくばセンター太陽光発電設備は約120万kWhを発電した。設計時の予測とほぼ同等の発電量を記録しており、年間目標の100万kWhが達成できた。

●つくばセンター太陽光発電設備の累積発電量の推移



●つくばセンター増設システム(84kW)の快晴日出力の例



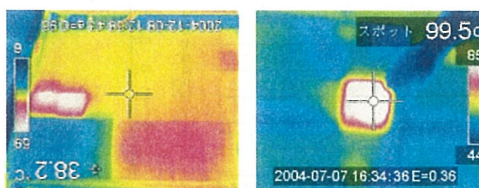
電源品質(電圧高調波)の分析

つくば中央地区太陽光発電設備(3-5)において6秒間隔で収集された運転記録データの中から夜間と昼間、平日と休日、快晴日・曇天日及び雨天日と太陽光発電システムの出力に含まれる高調波(電圧)がどのように変化するかを分析した。2004年9月13日から26日までの記録値を用いた分析結果は以下の通りである。

1. 高調波成分は全期間を通して2%以内にとまっている。
2. 高調波成分別では第3次及び第13次が多めで、第5次、第7次、第11次は少なめである。
3. 日射強度に対する高調波の増減は日射強度が増加する(インバータ出力が増大)に従って、高調波は増加する傾向が見られる。ただし、日射強度の増加は負荷の増加とほぼ同じ時間帯なので負荷の増減による可能性もある。
4. 電灯室における高調波とインバータ出力の高調波はほぼ比例している。ただし位置的に電灯室に近い社インバータ出力と最も近い社インバータとは、後者の方がインバータ出力の高調波は20~30%多い傾向が見られる。

信頼性調査・不具合事例

- ・パワーコンディショナの交換: 1台
 - ・パワーコンディショナの間欠停止: 3台
 - ・太陽電池アレイの出力不足: 3箇所(1箇所は記録チェックで解決済み)
 - ・太陽電池モジュールの損傷: 多数(ガラス割れ、表面破損、焼損)
 - ・ホットスポット: 部分影により多数
- ※前列アレイや保護箱(手すり)の陰によるものであり、設計段階において十分な配慮が必要



モンゴル国ゴビ砂漠域における 太陽電池の屋外試験評価

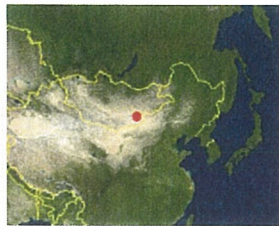
◎ 目的

- モンゴル国ゴビ砂漠域における大型太陽光発電(VLS-PV)実現可能性の評価のため、当該地域において下記項目を計測し、冷涼・高日射量のコビ砂漠での発電性能を分析
 - 日射量・気温・風速等の環境因子の計測
 - 太陽電池モジュール出力およびモジュール温度の計測 ←モンゴル国はSHSが3万台以上の普及国であるが、独立形のため系統連系形と異なりPmax出力が不明であったため分光日射量の計測(2005.7~)
- 当該地域における産業、経済構造、電力需要等の情報収集によりVLS-PVの詳細設計
- エネルギー定格標準の策定において、わが国を補充する幅広い気象環境条件下における屋外試験データの提供

◎ 計測サイトの概況

● 位置(東京・札幌との比較)

	北緯(°)	東経(°)	標高(m)
サインシャンド	44.9	110.1	938
札幌	43.1	141.3	17
東京	35.7	139.8	5



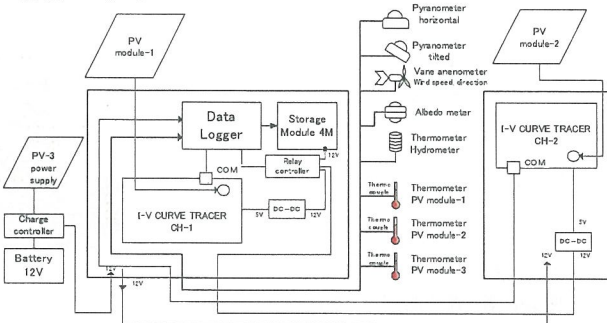
● 平均気温

気温(°C)	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
サインシャンド	15.1	-12.7	-4.2	5.9	14.5	20.4	22.7	20.9	13.6	4.4	-7.0	-15.6

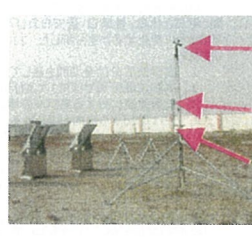
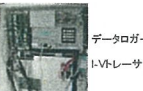
● 降雨日数

降雨日数	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
サインシャンド	0.1	0.3	0.4	0.7	1.6	2.6	5.4	4.4	1.8	1.0	0.5	0.4

◎ 計測システム

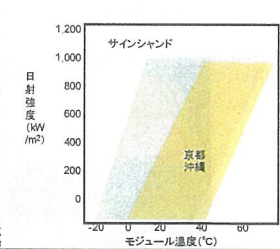
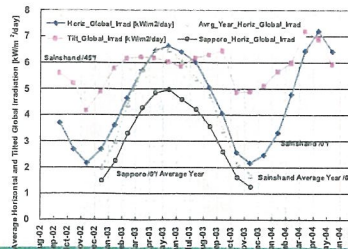


- シヤープ NE-80A1H (80W)
- セルソーラ SP-75 (75W)
- 開放電圧
- 短絡電流
- 最速動作電圧
- 最速動作電流
- モジュール裏面温度



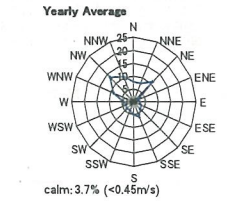
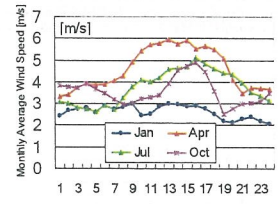
- 平均風速
- 平均風速方向
- 最大風速
- 最大風速方向
- 最大風速時刻
- 気温
- 湿度
- 上方日射量
- 下方日射量

◎ 日射量



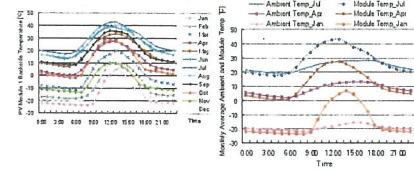
◎ 風速・風向

- 当該地域において北西また北東の風が多い傾向
- 平均風速は2.85m/s
- 冬季を除いて昼間の風速が夜間よりも強い傾向 → 太陽電池モジュールが効果的に冷却される可能性
- 季節の差については春季の風速が強く、4月の平均で昼時間帯は約6m/sであった。



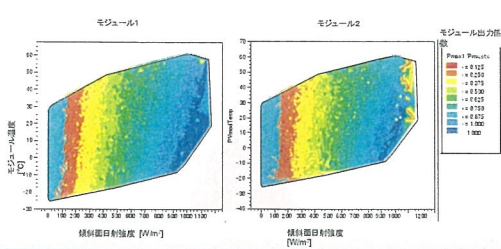
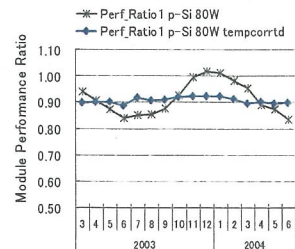
◎ 気温・モジュール温度

- 観測期間における気温は、年平均で3.5°C、最も高い7月平均で23°C、最も低い1月平均で-19°Cであった。気温についても年平均値(年平均で3.53°C)と大差はなかった。
- 1月、4月、7月においてモジュール温度の日平均はそれぞれ8°C、28°C、43°Cであり、国内同時期におけるモジュール温度と比べて、15~20°C程度小さい。



◎ 太陽電池モジュール出力

- 観測期間における日照時間は3,128時間であり、モンゴル気象庁観測の年平均値(3,099時間)と比べて大差はなく、ほぼ年平均通りの日射条件であった。
- 全天日射量の2003年における観測値は4.66 kWh/m²/日であり、年平均値(4.30 kWh/m²/日)と比べて8%程度大きかった。なお、札幌における全天日射量の年平均値は3.24 kWh/m²/日であるので、これに比べると約1.5倍である。
- アルベドは、夏季に約30%、冬季に積雪の程度により30~40%。
- 被験体の太陽電池モジュール2種のモジュール等価後動時間は約5時間/日であり、モジュール出力係数は冬季に約1.0となってほぼ定格出力(STC)と同様の性能を示す。夏季においてもモジュール出力係数は0.8以上であり、モジュール裏面温度が低いために得られる太陽電池出力の利得が明らか。
- なお、モジュール出力係数(module performance ratio) $K_{p,module}$ は、アレイ面日射量に対するモジュールの出力性能を表す指標であり、 $K_{p,module} = 1/Y$ で定義される。YAおよびYRはIEC 61724に定義された日射量及び太陽電池出力の性能指標である。
- 温度補正後のモジュール出力係数は年間を通じてほぼ0.9であった。

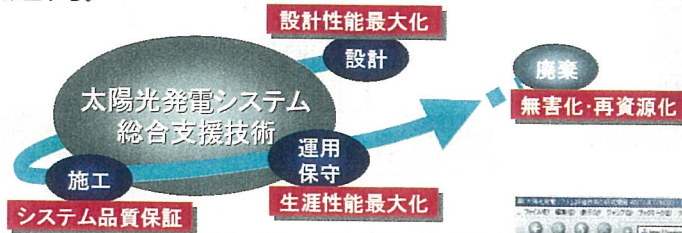


太陽光発電システム総合支援技術の研究開発

高島工 大谷謙仁 加藤和彦

・目的

-実用的かつ信頼性の高い太陽光発電システム設計支援技術、及び太陽光発電システム性能診断技術を開発し、太陽光発電システム総合支援技術を確立する。



・これまでの成果

- ウェブベースのPVシステム設計ツールプロトタイプの公開
- 太陽光発電リアルタイム測定ネットワークの構築
- アレイ構成設計基本単位「PVクラスタ」の提案
- 「動作点移動モデル」による最適動作点の予測手法の開発

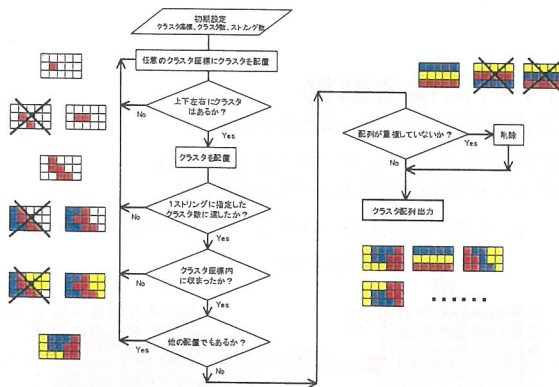
www.pvsystem.net



・最近のトピック

-PVクラスタ最適配置手法の開発

- ・PVアレイ設置条件を考慮した最適ストリング構成を自動抽出



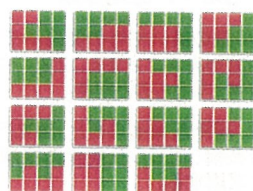
抽出したストリング構成をエネルギー量比較により評価

$$Kc = \frac{\sum_i \{ \lambda_i \cdot C_{i,d} \cdot (m \cdot C_{i,d} \cdot G_d + n \cdot C_{i,d} \cdot G_g) \}}{\sum_i \{ C_{i,d} \cdot C_{i,d} \cdot G_d \}}$$

グループA
(0.96 < Kc < 0.99)

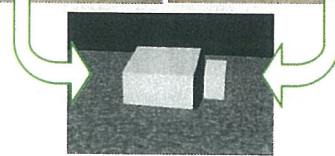


グループB
(0.94 < Kc < 0.99)



-写真測量によるPVアレイ設置姿勢の算出

・PVアレイの設置姿勢をコンピュータ上に再現し自己陰等の評価に利用



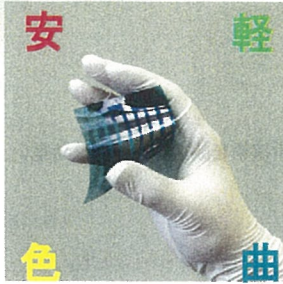
-実規模実証試験模擬試験設備の導入(3kW架台×4基[東1、南2、西1])

- ・各種クラスタ配置による出力の比較とシミュレーション精度の検証
- ・複面システムの評価手法の開発
- ・故障診断手法の実規模システムによる実験的検討



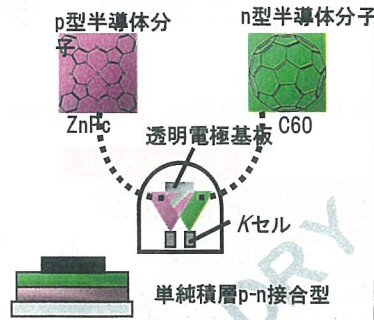
有機薄膜太陽電池の研究開発

★有機薄膜太陽電池とは？

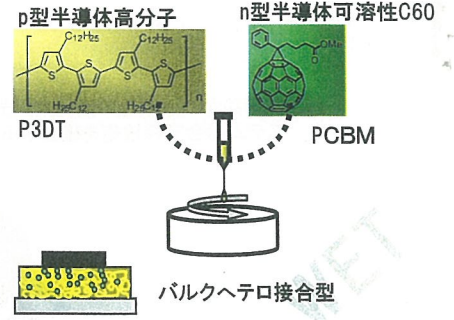


軽い、柔らかい、カラフルかつ低コストという特長を持つ次世代の太陽電池

低分子蒸着系有機薄膜太陽電池



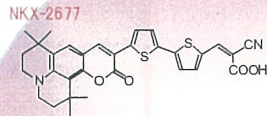
高分子溶液系有機薄膜太陽電池



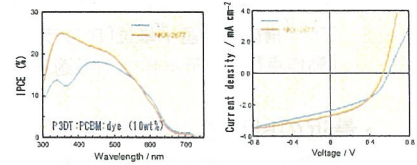
★高性能化への指針 ～半導体材料 不純物制御 デバイス構造制御～

半導体材料

○吸収波長帯拡大～色素添加効果～



吸光係数が高く、色素増感太陽電池で使われる色素をバルクヘテロ接合型有機薄膜太陽電池に添加し、吸収波長帯の拡大と光の利用効率の向上を期待



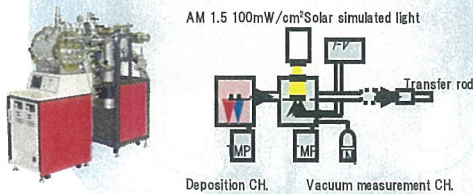
吸収波長帯が拡大(IPCEスペクトル)することにより、光電流の増加(I-V特性)に成功した。

不純物制御

○外部からの不純物混入～デバイス環境制御～

大気中では材料本来の性能を引き出すことは難しい

大気中の水や酸素を排除できる真空測定システムを開発

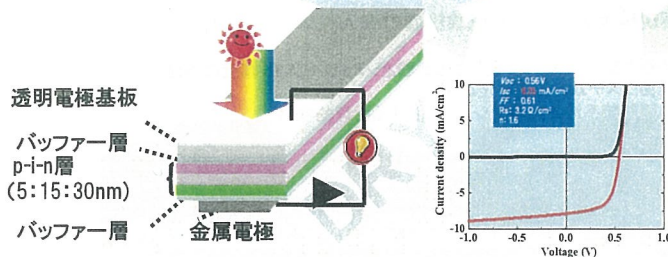
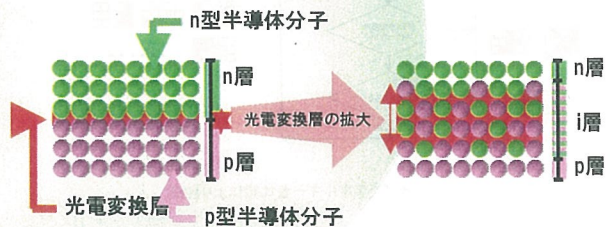


デバイス構造制御

○有機層膜厚制御～ナノ構造層の導入～

光電変換層拡大による光の利用効率向上のため p-n界面に共蒸着で作製したナノ構造層を導入

(a) 従来の単純積層p-n接合型 (b) 本研究のp-i-n接合型



不純物制御とナノ構造層の導入により、AM1.5G 0.8sunで変換効率3.6%の高性能有機薄膜太陽電池の開発に成功した。

★今後の展開

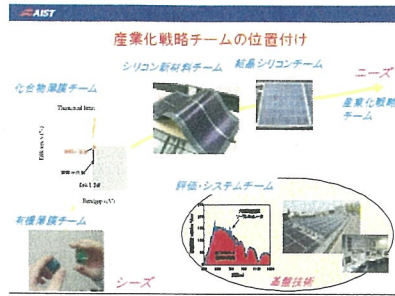
より吸光係数の高い材料の開発やデバイスのタンデム化により、さらに光の利用効率を向上させることで、今後大幅なエネルギー変換効率の改善が可能となるものと期待。

本研究は、経済産業省のもと、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO技術開発機構)から委託され実施したもので、関係各位に感謝する。

連絡先
太陽光発電研究センター 有機薄膜チーム
當摩哲也研究員、原浩二郎研究員、斉藤和裕チーム長
kazuhiko-saito@aist.go.jp

産業化戦略チームのミッションと展望

太陽光発電研究センター・産業化戦略チーム長 増田 淳



産業化戦略チームのミッション

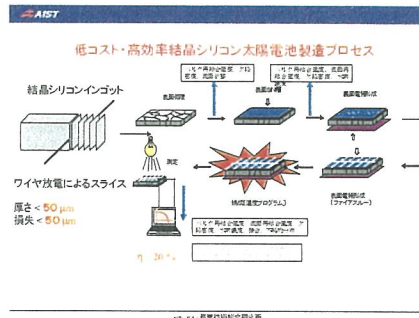
結晶シリコン太陽電池、薄膜シリコン太陽電池
→ 高効率化のために一層の技術革新が必要

新型太陽電池(化合物太陽電池、有機太陽電池等)
各種太陽電池用フレキシブル基板
→ ロードマップに沿った実用化

- 1) 太陽光発電研究センターで開発された技術を中心に、新規要素技術の実用化の可否を判断可能なパイロットラインを構築
- 2) 国内外の太陽電池に関する要素技術を幅広く調査し体系化

パイロットラインの概要

- 結晶シリコン太陽電池用
サイズ: 150 mm × 150 mm
- 薄膜シリコン太陽電池用
サイズ: 300 mm × 300 mm
大面積(2 mサイズ)均一堆積原理実証機
a-Si:H, μ c-Si:H
- フレキシブル基材用
透明電極付プラスチック基板

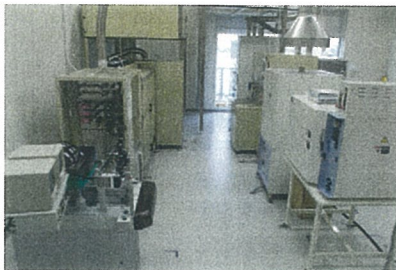


産業化戦略チームの展望

構築したパイロットラインを、民間企業を中心に、大学、公設試験研究機関等に広く開放
→ 新規要素技術の産業界への移転を加速
→ 日本の産業界強化に資するとともに、産学官連携の新しいモデルケースをも構築

パイロットラインの構築、運営に際しては、民間企業等で中心的役割を果たす経営者、技術者、研究者から幅広く、御意見、御要望を承りたい。
→ 真の意味で産業界に貢献可能となることを第一の判断基準とする。

結晶シリコン太陽電池用パイロットライン



全景



POCl₃縦型拡散炉



横型酸化炉



スクリーン印刷装置



電極焼成用ランプ炉