微小角入射X線散乱および高エネルギーXPSによる太陽電池用アモルファスシリコン薄膜の評価

(富士電機のフィルム太陽電池)

富士電機ホールディングス (株)
富士電機システムズ (株)

高野章弘

経営方針

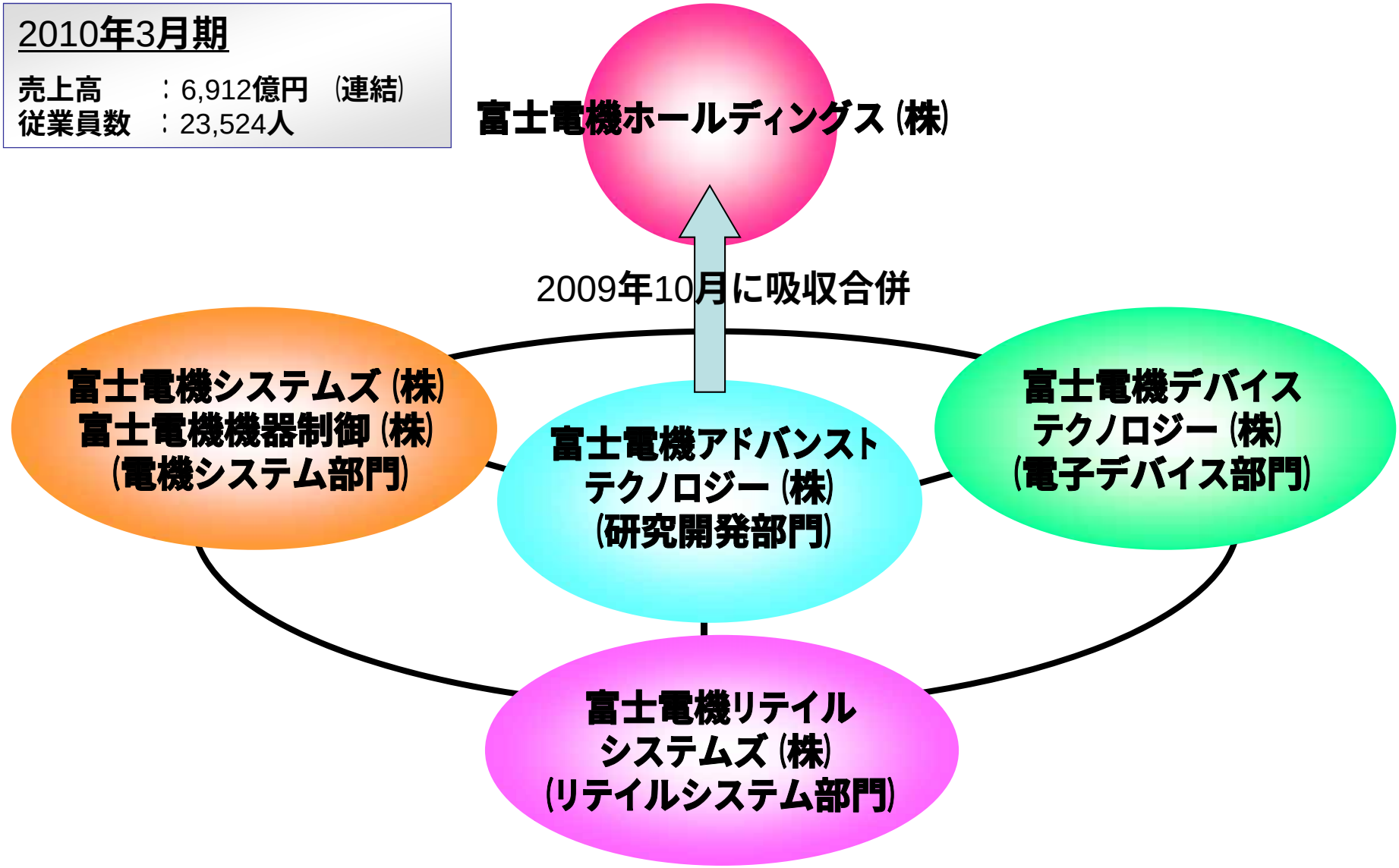
富士電機グループは、創業以来「最小の資源とエネルギー消費で、最高の効率を提供する製品・技術を追求してきたメーカー」としてノウハウと実績を蓄積しており、この新市場における大きな可能性を有しています。

この「エネルギー・環境」を成長の軸に位置付け、事業ポートフォリオの変革を目指していきます。

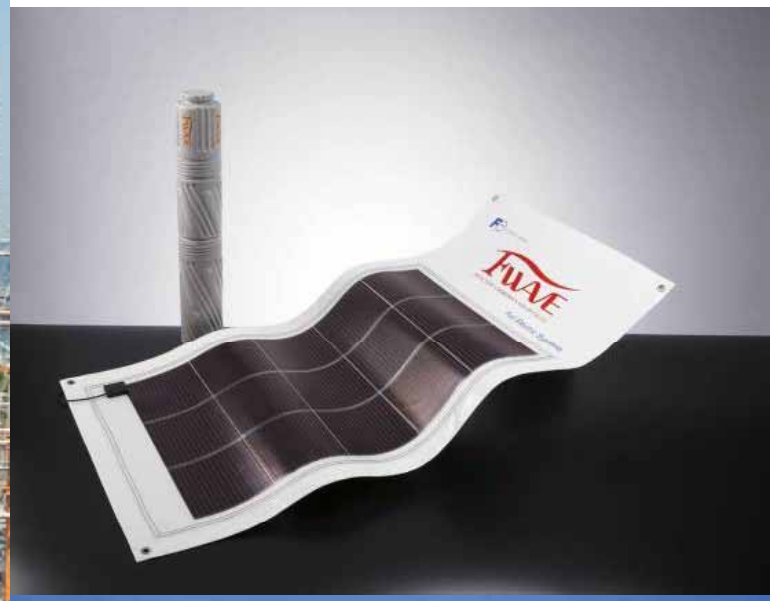
富士電機グループの概要

2010年3月期

売上高　　：6,912億円　(連結)
従業員数　：23,524人



富士電機のフィルム太陽電池



- 世界一の**軽量**太陽電池を実現 (1kg/m2)
- **フレキシブル (割れない)** で**デザイン**性に富む
- 優れた**生産性**と将来の**低コスト化**の高いポテンシャル

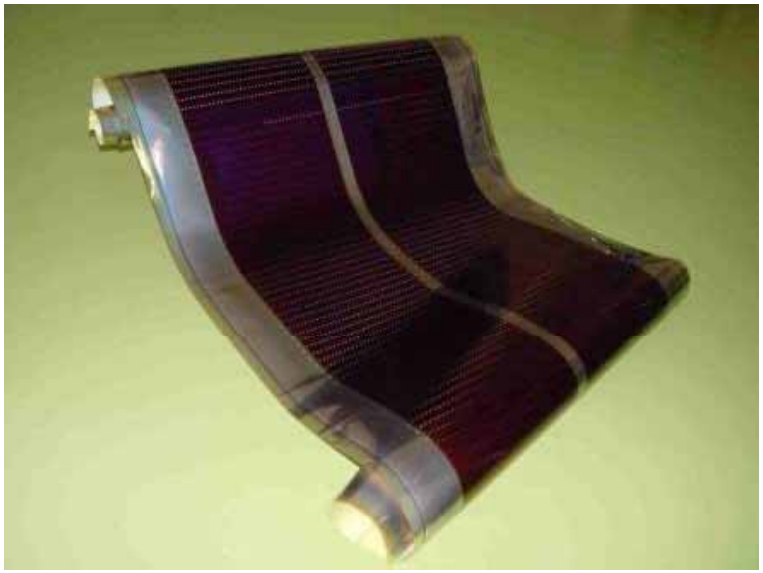
太陽光発電事業拡大

富士電機は、セル/モジュールのコンポーネント販売事業に加え、パワーコンディショナや系統制御などの関連技術を融合させた太陽光発電システム事業に着手、当社固有の優れた製品･技術力とエンジニアリングを活かした高効率な太陽光発電システムを提供する予定です。

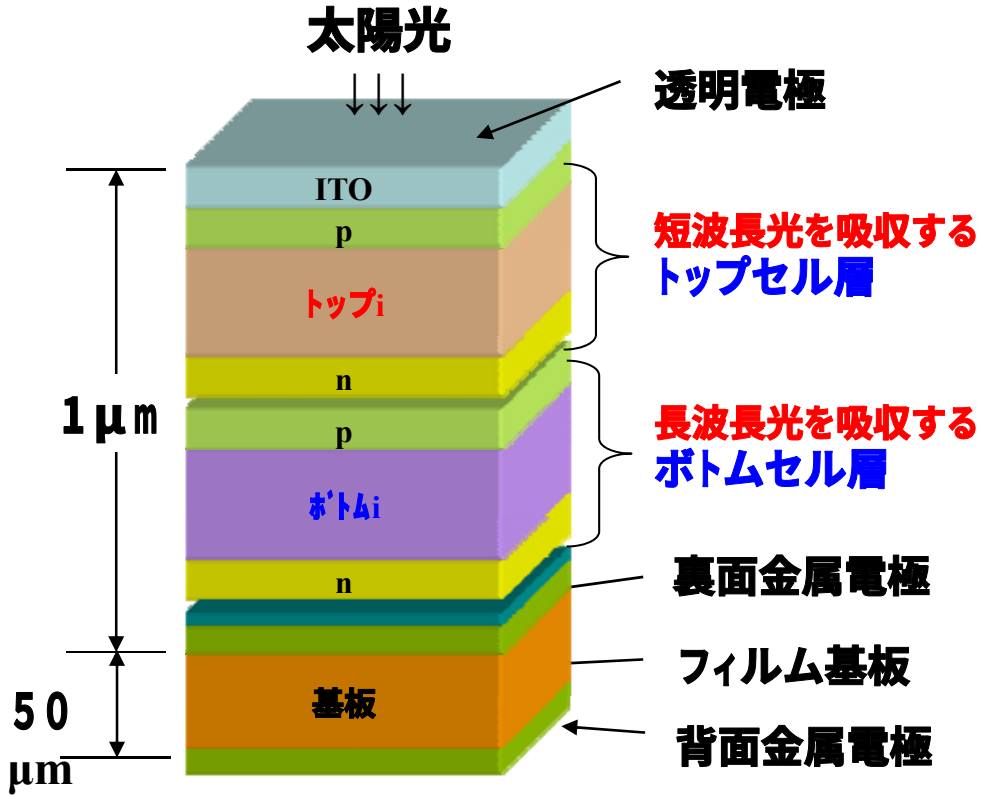
【参考】スマートグリッド

http://www.fujielectric.co.jp/about/news/09031201/index.html

富士電機製フレキシブル太陽電池



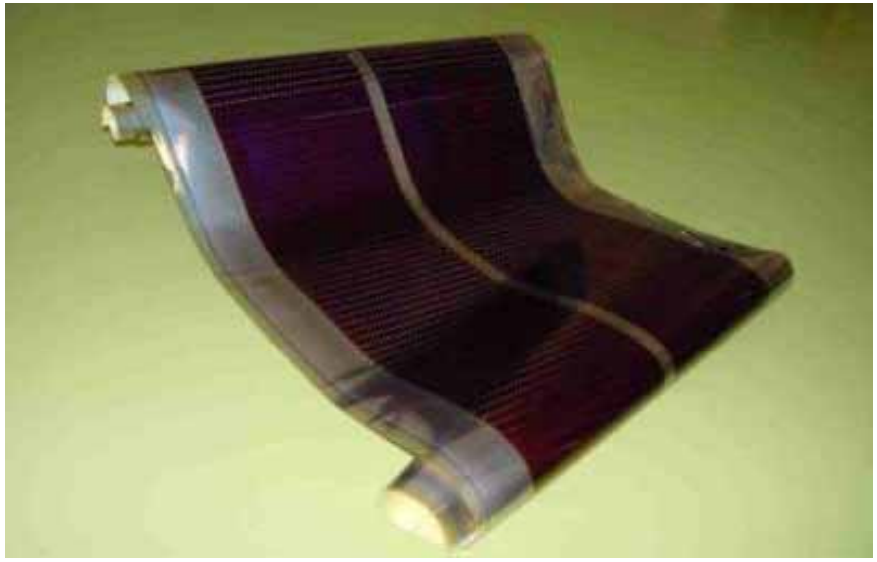
フィルム基板を用いた
フレキシブル太陽電池



a-Si/a-SiGe 2層太陽電池

軽量･大面積･フレキシブル

富士電機製フレキシブル太陽電池



軽量･大面積･フレキシブル

①ガラス基板を使用しない⇒軽量化

②直列接続構造を外部配線無しに形成可能（絶縁性基板）

③基板の熱容量が小さく、昇温・降温時間が秒オーダーで良い

④基板をロール単位で一括処理

⑤モジュールを曲げ加工できる（フレキシブル）

高スループット製造プロセスによる低コスト化

LC-CO_2（CO2ライフサイクルアセスメント）

モジュール製造[調達+製造]時（1kW製造時）のCO_2放出量

・単結晶Si太陽電池	1,350kg/kW
・多結晶Si太陽電池	980kg/kW
・a-Si/微結晶Si	790kg/kW
・CIS	680kg/kW
・F-Wave	609kg/kW

※F-Waveについては、熊本工場の直近4ヶ月のエネルギー使用量とモジュール生産量より算出。他太陽電池は、みずほ総研報告書データ。

・結晶系に比べてｼﾘｺﾝ使用量が少なく、製造時ｴﾈﾙｷﾞｰ消費量も小さい。
・ｶﾞﾗｽやｱﾙﾐﾌﾚｰﾑを使用していない。

富士電機システムズ（株）　太陽電池熊本工場

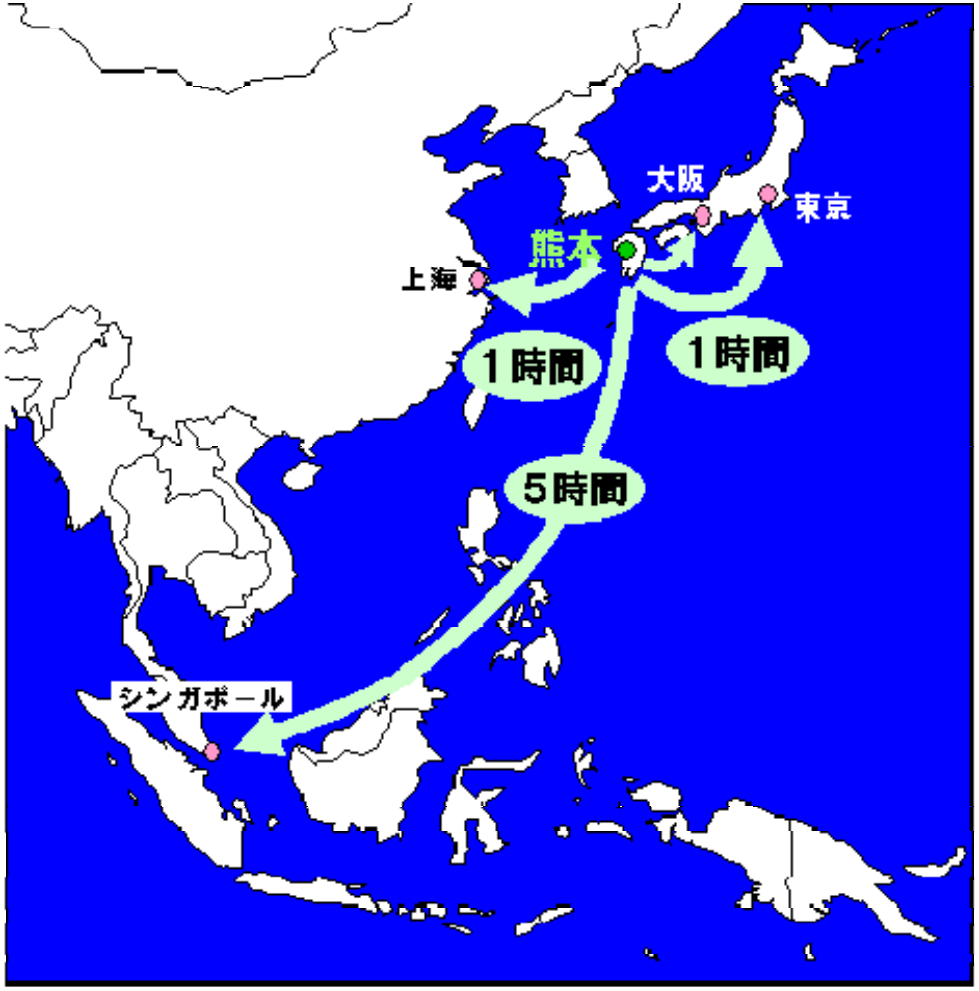
現在の生産能力：24MW/年

フィルム（1m幅・2200m長さ）を取り扱う生産ラインを導入した

富士電機システムズ(株)　太陽電池熊本工場

● 南関町から近隣主要都市

熊本市	1時間
福岡市	1時間



導入事例 (鋼板一体型)

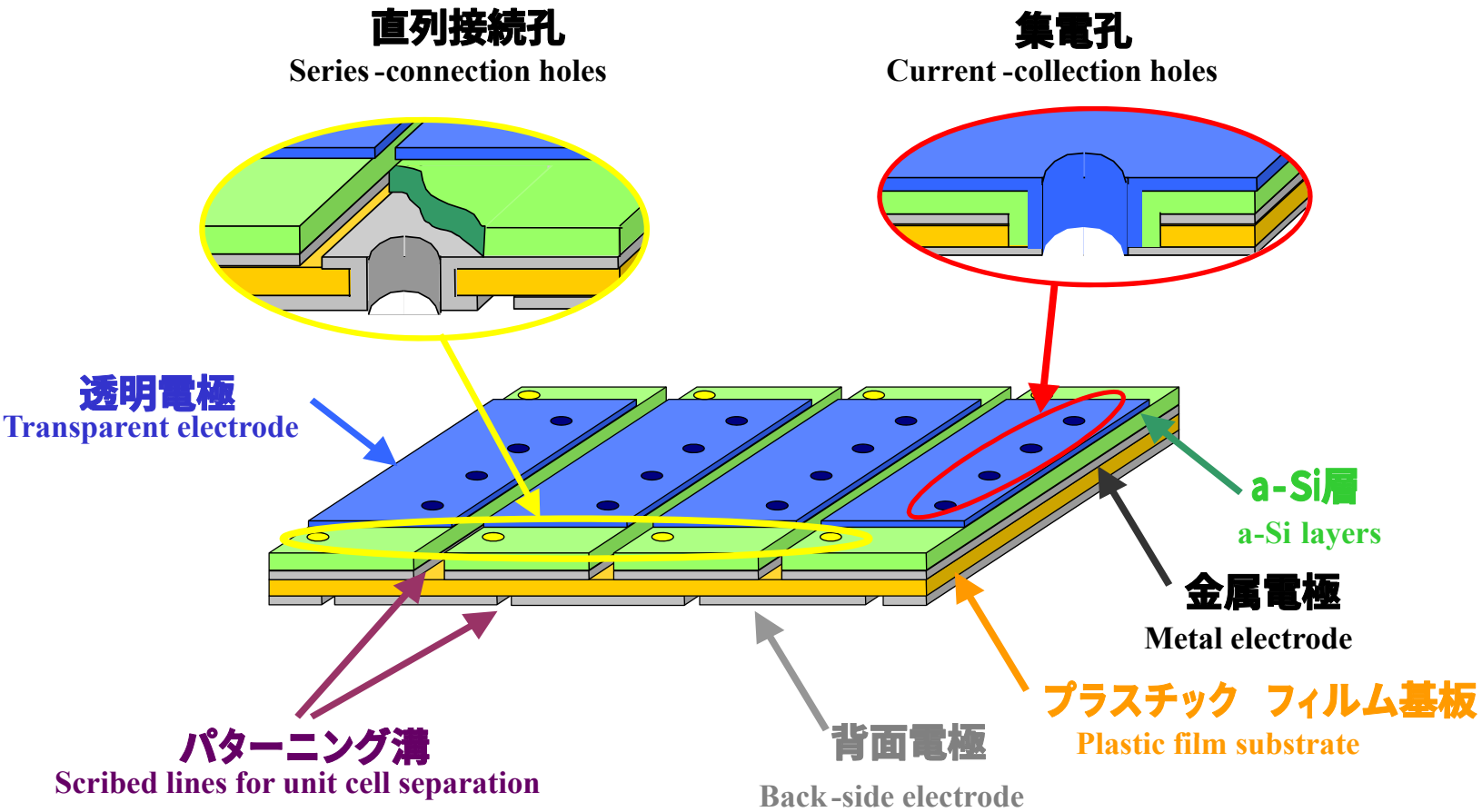
導入事例

こんな
ところに
富士電機

「地球にやさしい」に貢献する太陽電池

さまざまなイベントに毎日たくさんの人が集まる「さいたまスーパーアリーナ」。
富士電機の太陽電池がこの施設の「地球にやさしい」に貢献している。

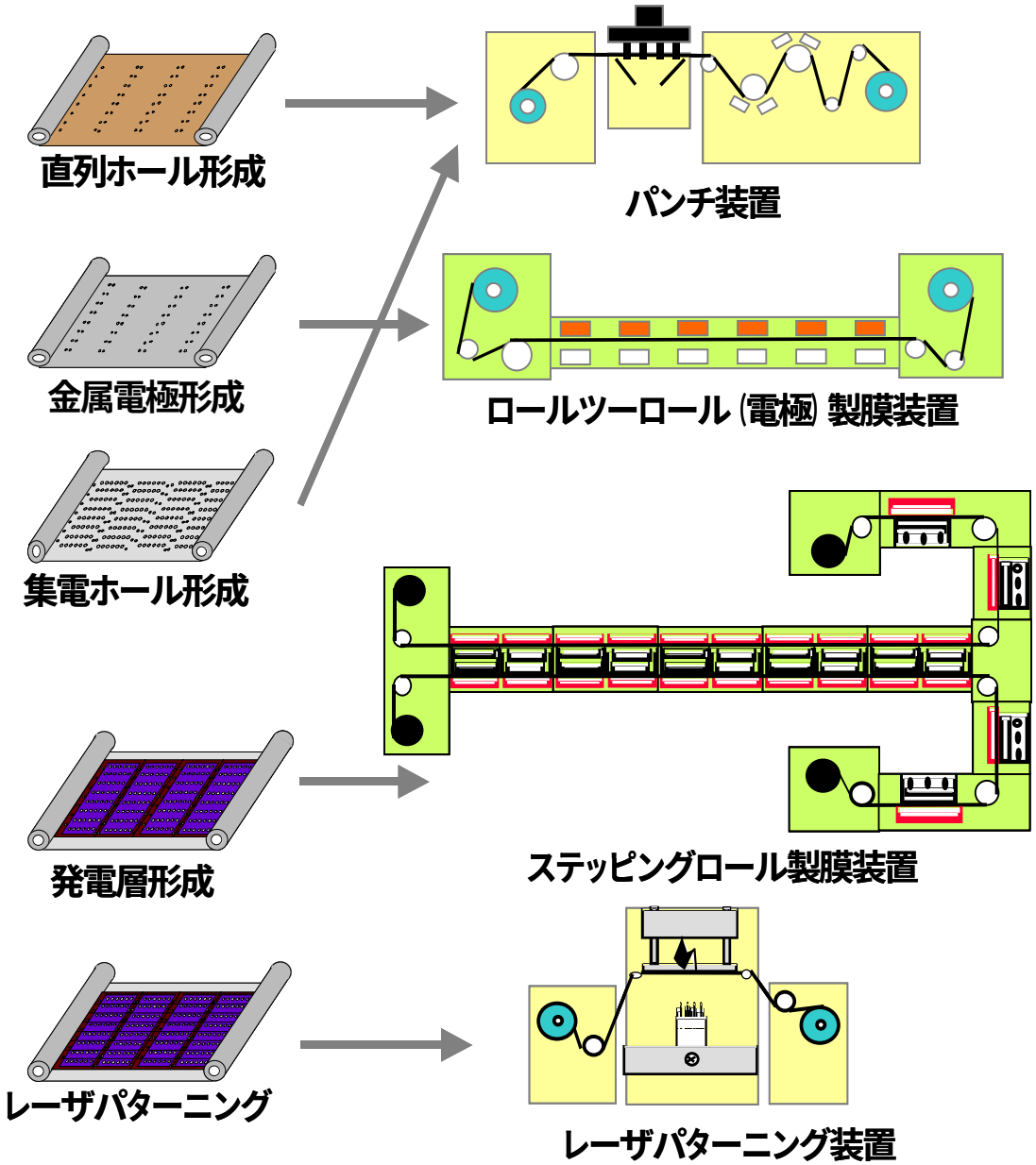
フィルム太陽電池デバイス構造 (SCAF構造)



SCAF : Series-Connection through Apertures Formed on Film Substrate

フィルムの特徴を最大限に活かすことができるデバイス構造

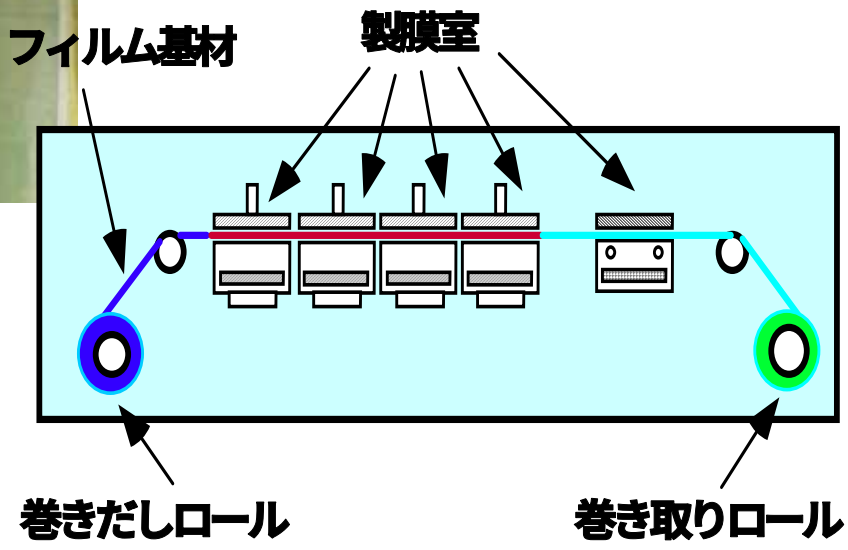
フィルム型太陽電池の製造プロセス



Roll-to-Roll (ステッピングロール) 製膜装置

(1) **軽量フィルム基板**
2000mフィルム
(160kW / プロセス)
⇒ 200 kg 以下/ ロール
(2) **大量生産**
(3) **品質コントロール**
(大気開放無しに、全ての層構成を形成する。)

CVD & Sputtering Chambers



共通真空槽内に、CVD室とスパッタリング室が設置されている。

これまでに開発してきた技術

①スルーホールコンタクト（SCAF構造）太陽電池設計技術
Jpn. J. Appl. Phys.,43,(2004) 7976.

②ステッピングロール製膜装置技術
Sol. Energy Mater. & Solar Cells, 66,(2001) 107.

③放電周波数制御（Vpp制御）によるアモルファスシリコン高速製膜技術
Jpn. J. Appl. Phys.,41,(2002) L323.
Jpn. J. Appl. Phys.,42,(2003) L1312.

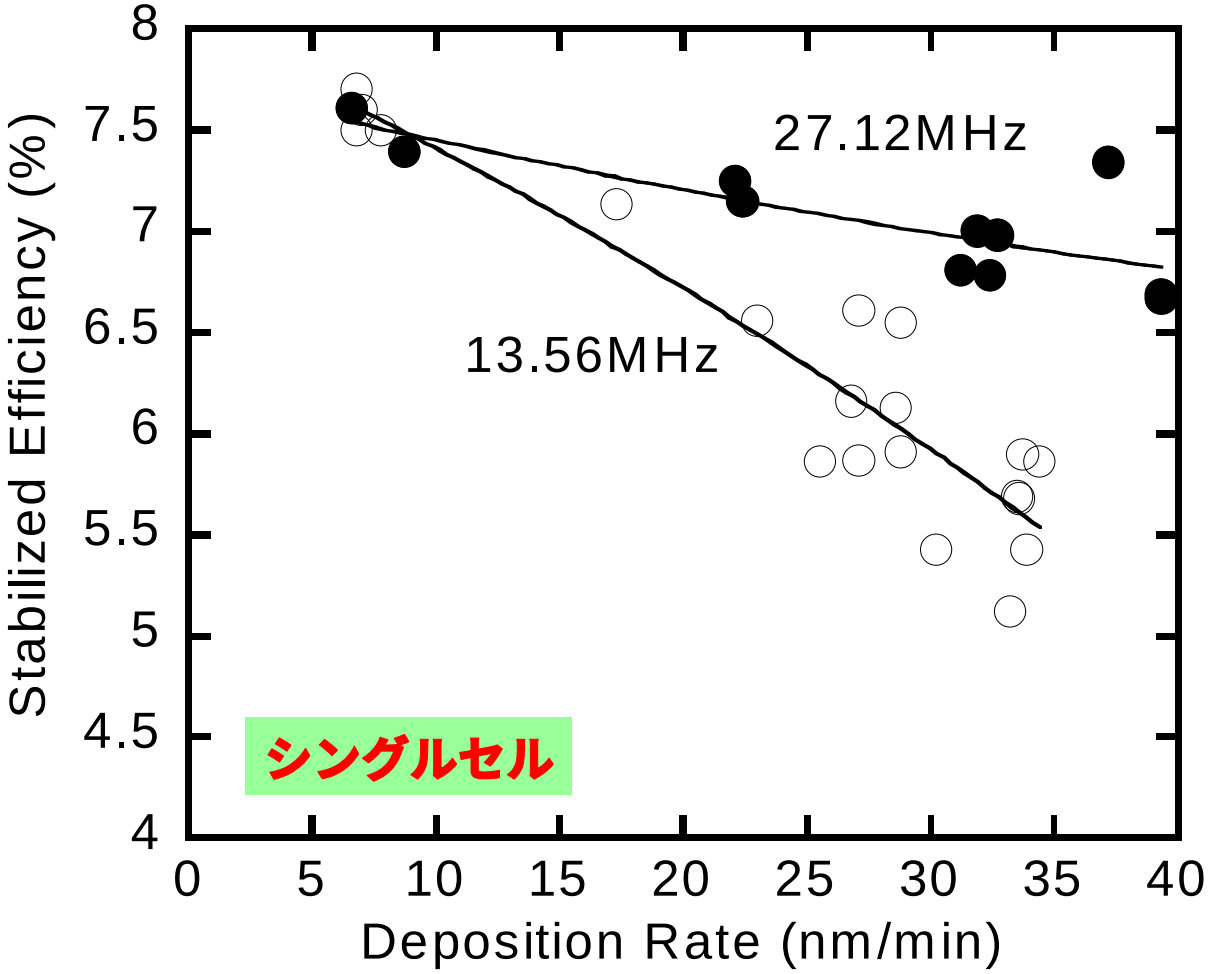
④選択的反応性スパッタリングによる低温・高速テクスチャー電極形成技術
Jpn. J. Appl. Phys.,43,(2004) L277.

⑤大面積均一透明電極形成技術
Jpn. J. Appl. Phys.,43,(2004) 7976.

⑥大面積金属屋根一体型太陽電池モジュール・製造技術
Jpn. J. Appl. Phys.,43,(2004) 7976.

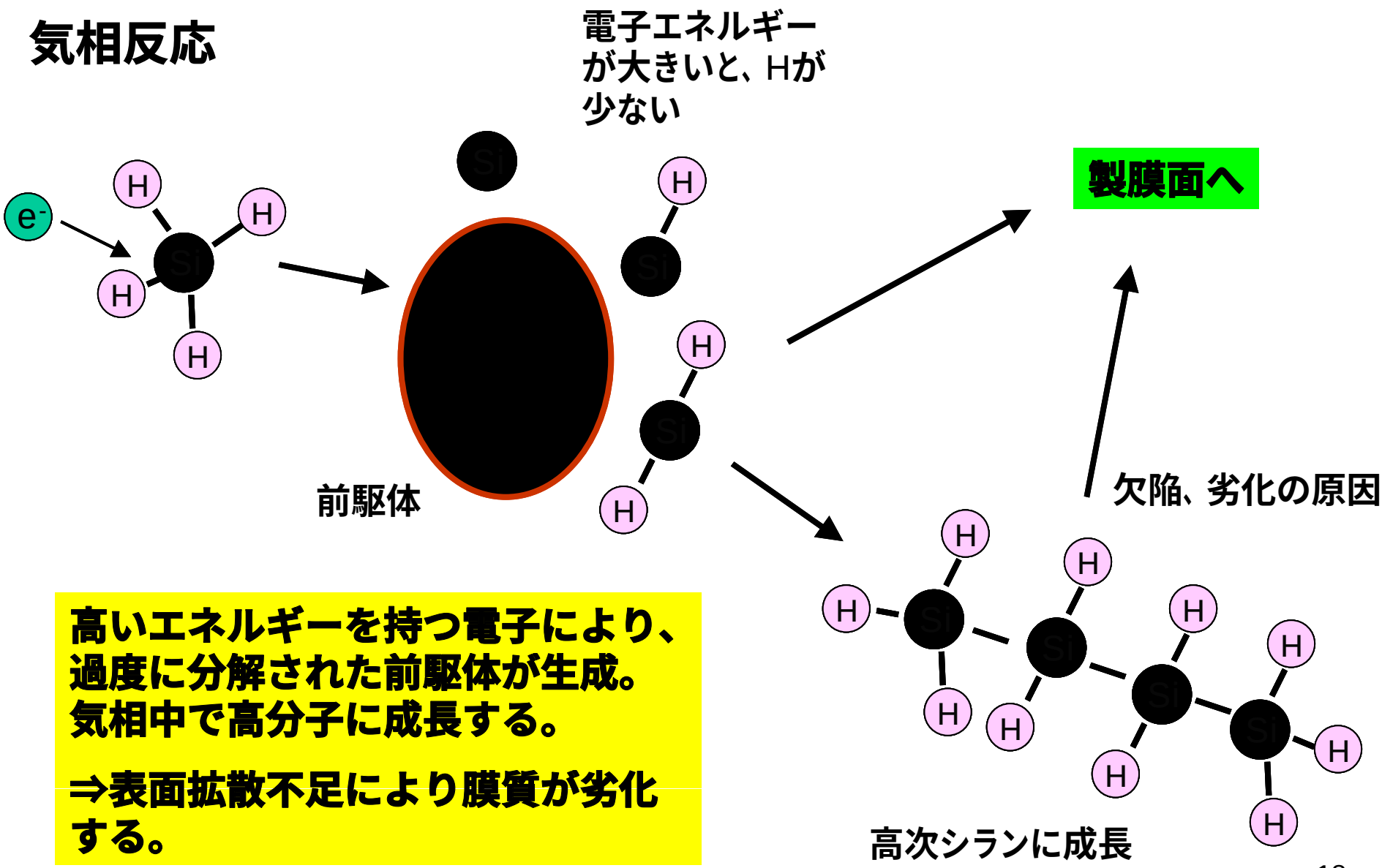
⑦超高速レーザパターニング装置・プロセス

製膜速度とa-Si:Hシングルセル特性
（放電周波数依存性）



気相中の高次シランの発生【高速製膜時】

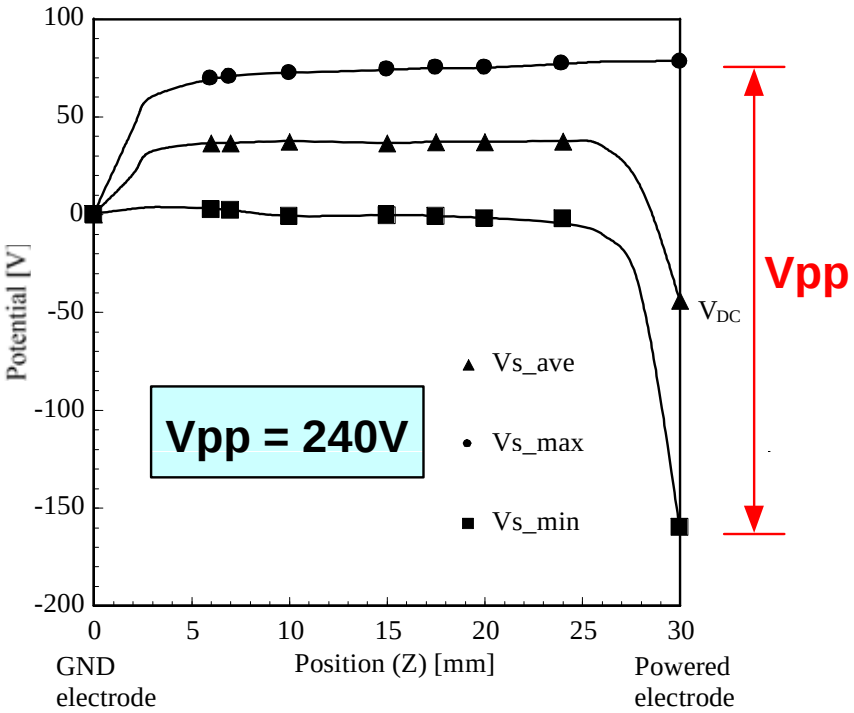
気相反応

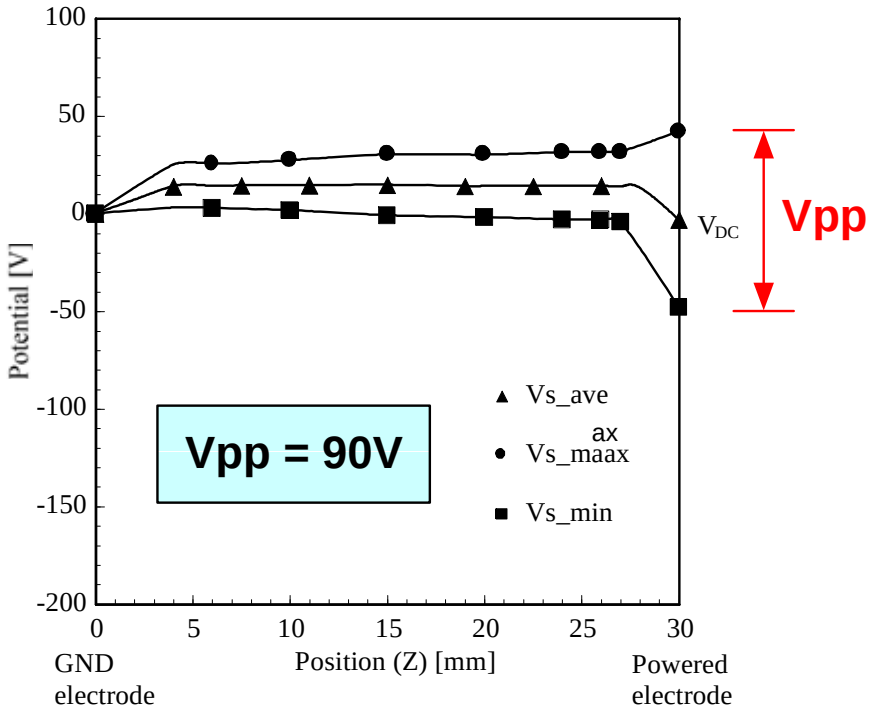


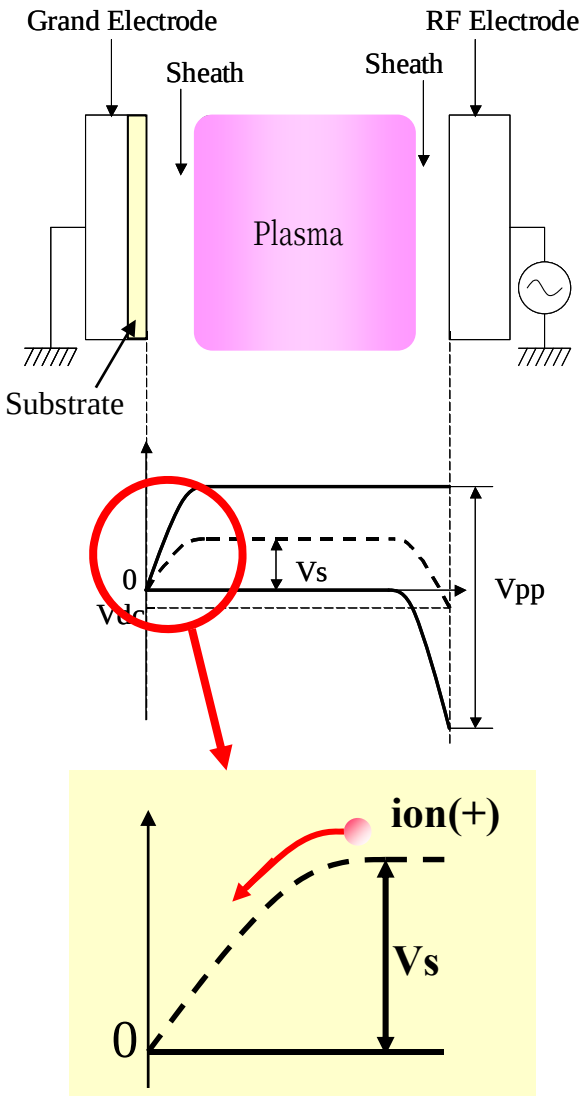
高いエネルギーを持つ電子により、過度に分解された前駆体が生成。気相中で高分子に成長する。

⇒表面拡散不足により膜質が劣化する。

高周波プラズマのピークツーピーク電圧（Vpp）はプラズマポテンシャルと相関を持つ。







Relationship among time mean average of plasma potential(Vs), self-bias(Vdc), and Vpp

$$Vs = \frac{1}{2}\left(\frac{Vpp}{2} - Vdc\right) = \frac{Vpp}{4} - \frac{Vdc}{2} = \frac{Vpp}{4} \quad \text{(Vpp>>Vdc)}$$

Vs is proportional to Vpp

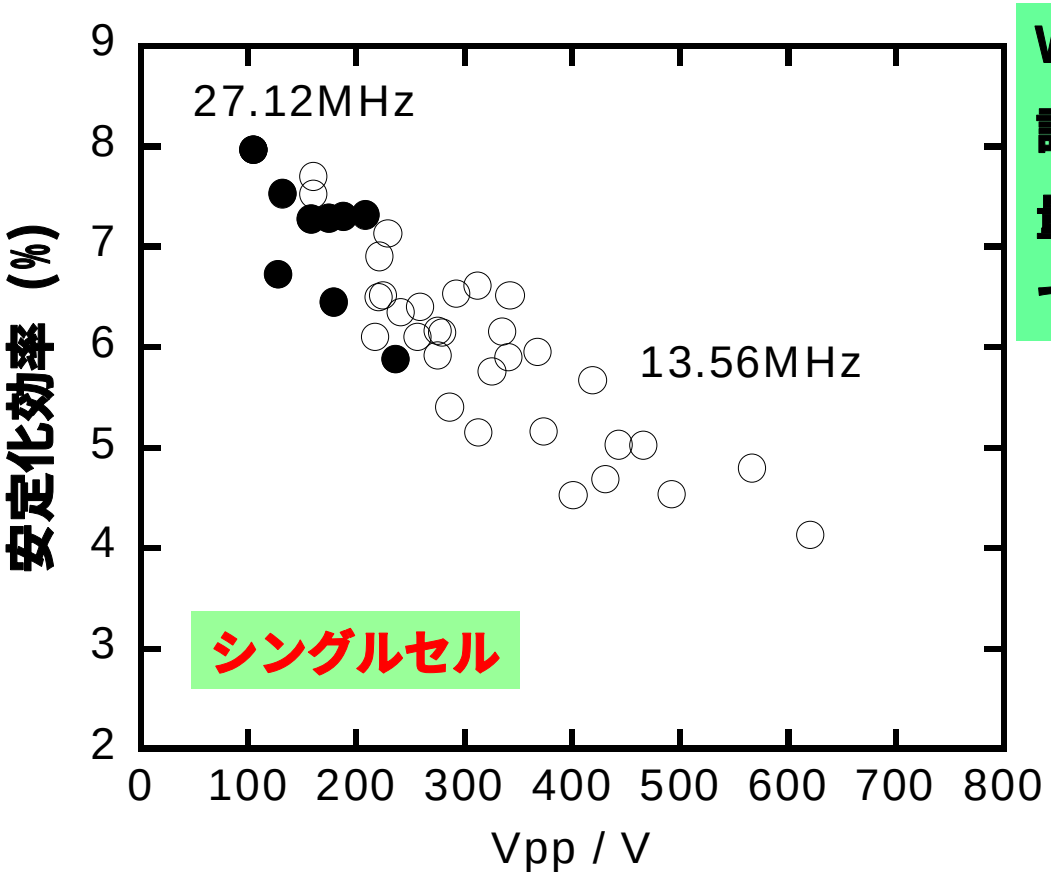
Vs relates...

- **Electron temperature (Te)**
- **Energy difference between Vs and grand potential**

Low Vs → **Low Te** → **Less higher silane formation**

Low Vs → **Low energy difference** → **Low ion bombardment**

Vpp制御によるアモルファスシリコン高速製膜技術



Vppはプラズマポテンシャルとは異なり計測が容易なパラメータであるため、量産装置の製膜条件を決める指標として非常に有効。

Vpp低下

⇩

プラズマポテンシャルの低下

⇩

電子温度の低下

⇩

気相中高次シラン生成の防止

⇩

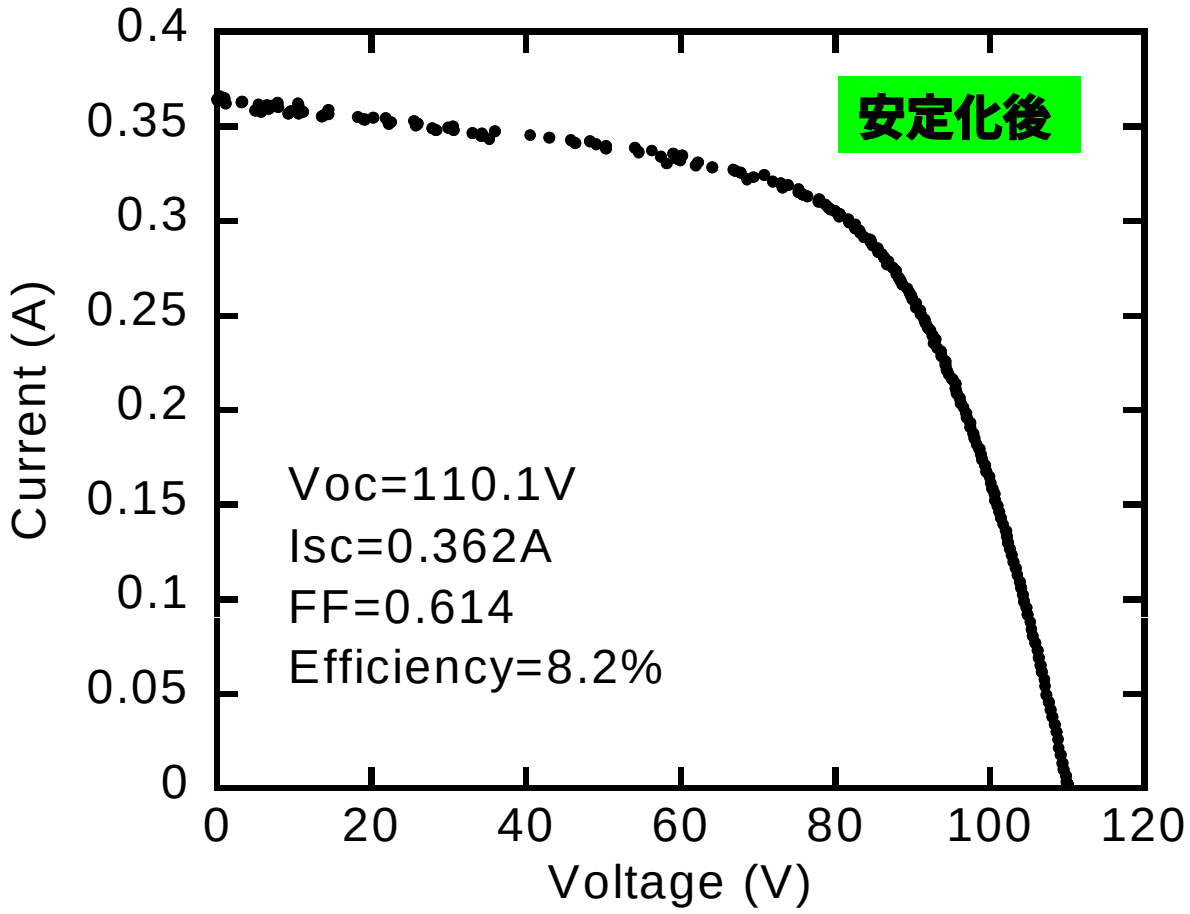
膜質の向上

膜厚300nmのアモルファスシリコンをi層とするシングルセルを形成。

Vppと安定化効率の関係を求めた。

低Vpp製膜条件の適用による高速製造したa-Si:H/a-SiGe:HタンデムSCAFセルの特性

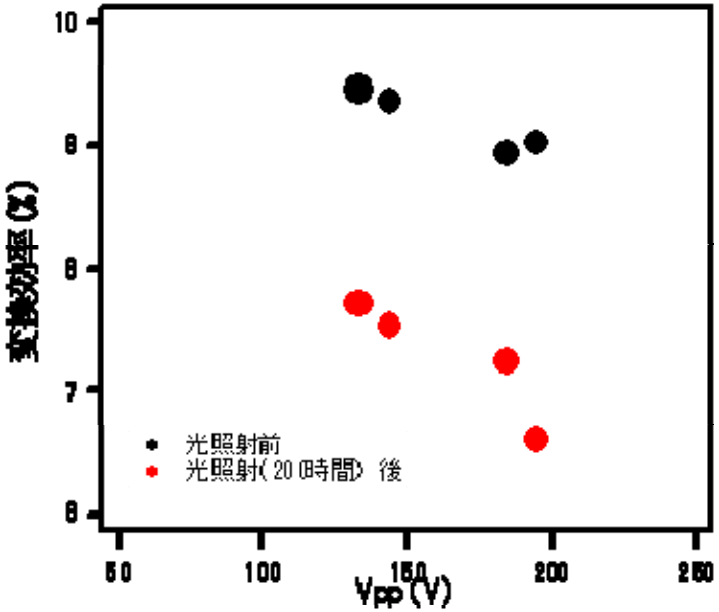
製膜速度を5倍以上にしても、従来と同等のセル特性が得られる



Vppと変換効率の関係

測定試料の成膜パラメータ

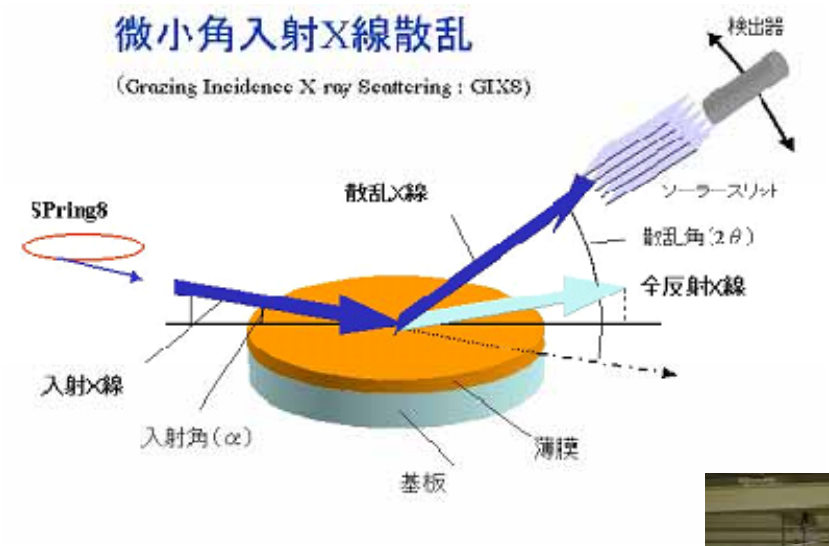
sample No.	成膜speed [nm/min]	Vpp [V]
V3-630	9.2	194
V3-631	10.4	133
V3-632	22	144
V3-633	20.5	184



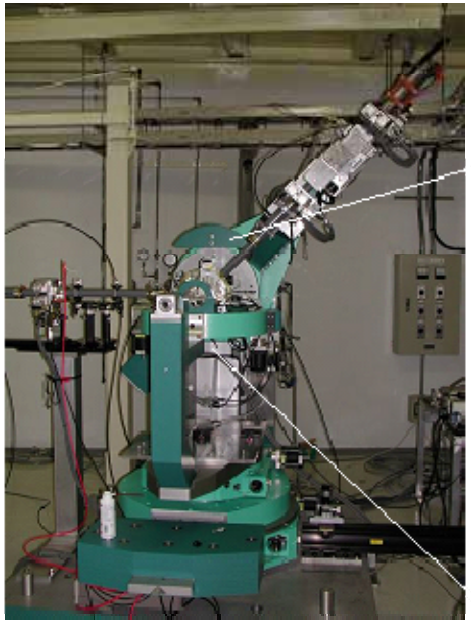
測定試料の作成条件で作成した太陽電池の変換効率の Vpp 依存性

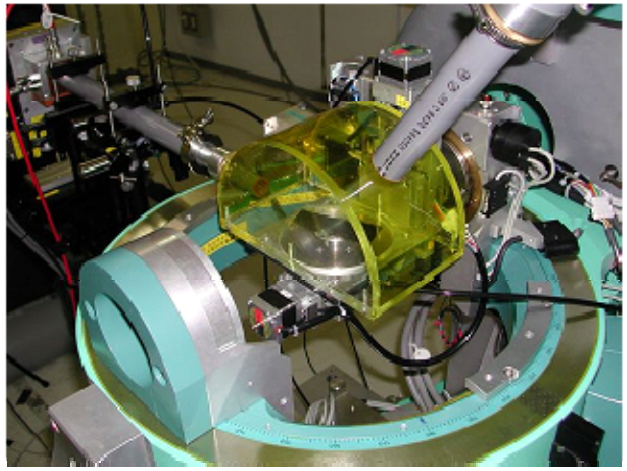
（黒：光照射前、赤：光照射（200 時間）後）

微小角入射X線散乱



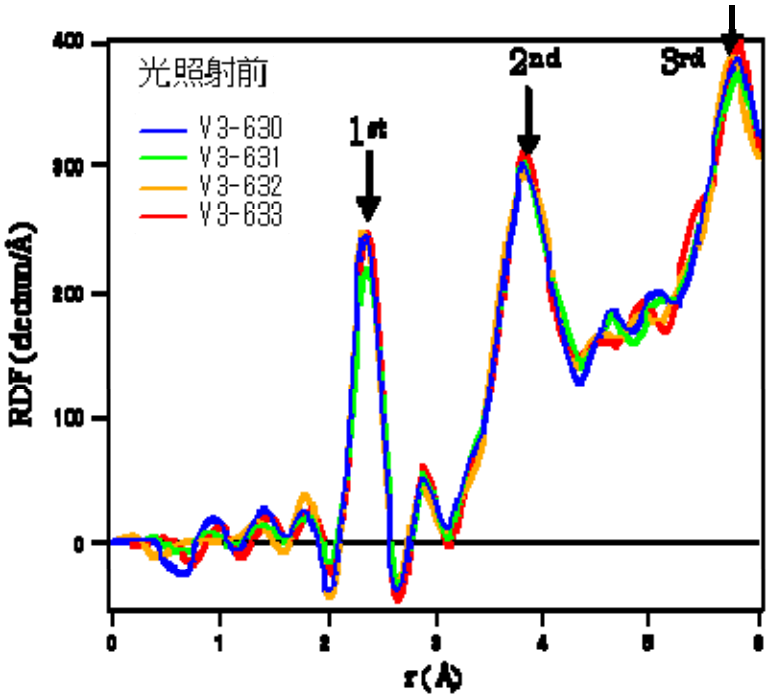
GIXS 概念図

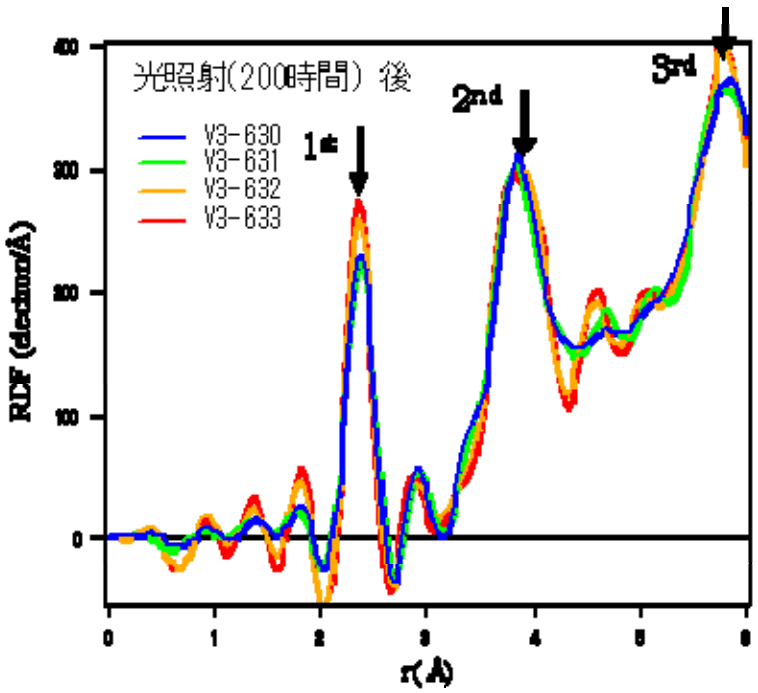




実験レイアウト(写真:JASRI　佐藤提供)

微小角入射X線散乱

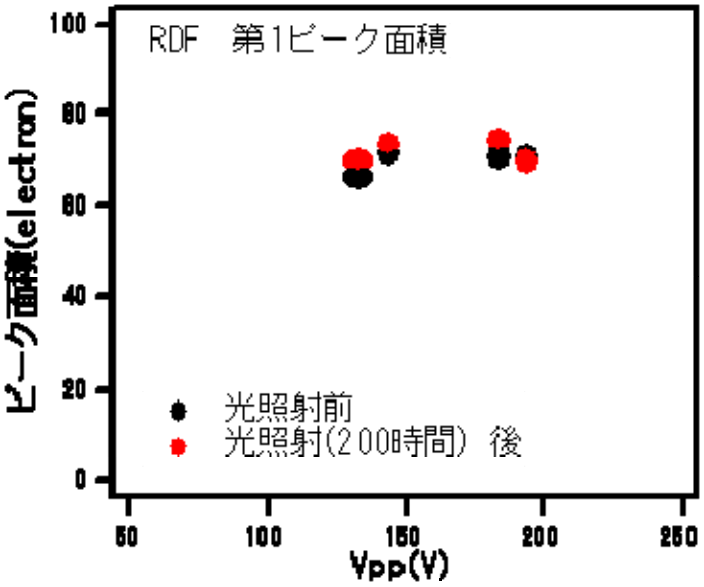




a-Si 薄膜の原子動径分布関数の成膜プロセス依存性

①光照射前　②光照射（200 時間）後

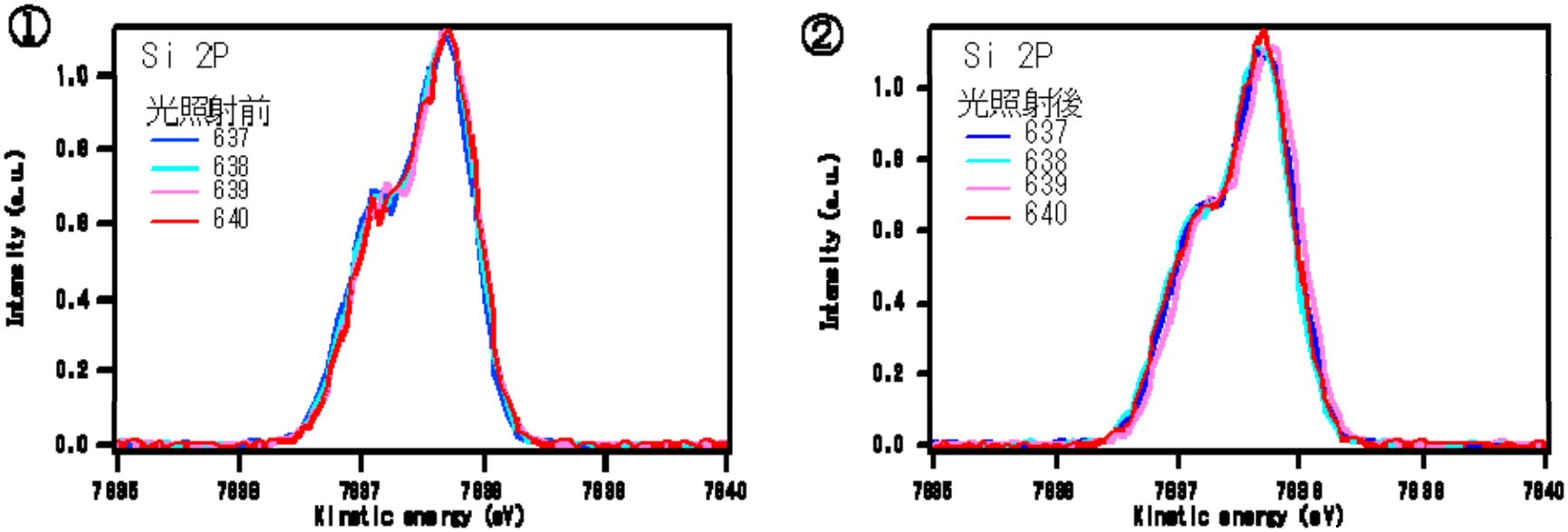
微小角入射X線散乱



a-Si 薄膜の原子動径分布関数第１ピーク面積の成膜プロセス依存性

原子動径分布関数に関しては、Vppおよび光照射有無による有意な違いは見られなかった。

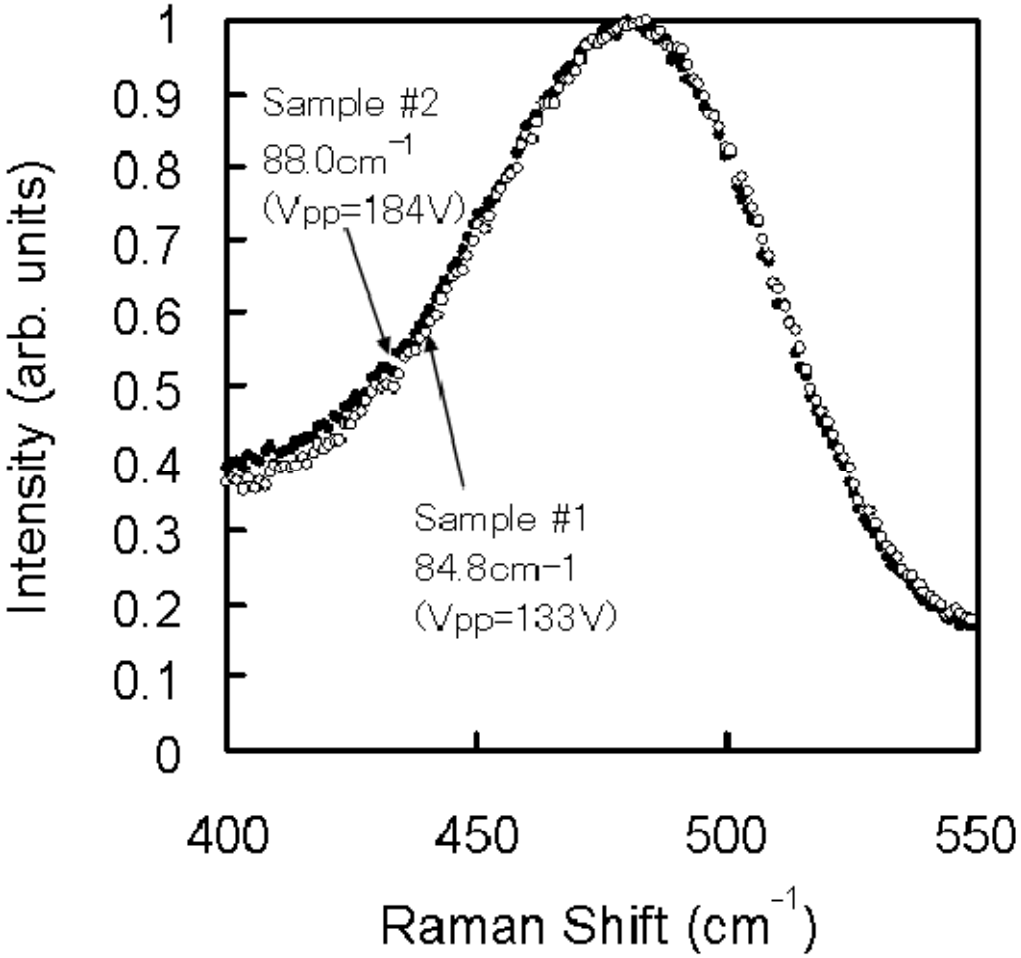
高エネルギーXPS



Si2P スペクトルの試料依存性。①光照射前試料　②光照射後試料

Si周辺の結合状態についても、Vppあるいは光照射有無による
有意な違いは見られなかった。

ラマン散乱スペクトル



TOモードの半値幅に、Vpp依存性が見られる。
（中距離秩序の違いを反映か？）

まとめ

①プラズマCVD製膜プロセスで、高周波印加電極の電圧振幅（Vpp）をモニターすることで、間接的にプラズマの状態を観測することが可能。

②Vppを低減させると、良質なアモルファスシリコン薄膜を形成することができる。（高速でも高効率な太陽電池が得られる。）

③アモルファスシリコンは、光照射により初期劣化を起こし、その後安定化する。

④異なるVpp、光照射の有無のサンプルについて、微小角入射X線散乱と高エネルギーXPSの測定を行ったが、有意な差は見られなかった。

⑤ラマン散乱スペクトルは、Vpp依存性を示した。